注册电气工程师执业资格专业考试

典型考点详解

——（供配电专业）

冯　峰　主编

- 提供短视频例题讲解
- 提供在线交流答疑服务

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

注册电气工程师执业资格专业考试典型考点详解（供配电专业）

主编　冯　峰
参编　吴　海　梁金海　老　马
郁开田　焦建雷　宋贺利

机 械 工 业 出 版 社

本书根据全国勘察设计注册工程师管理委员会颁布的《注册电气工程师执业资格考试大纲》编写而成。内容涵盖注册电气工程师执业资格专业考试（供配电专业）绝大部分知识点。本书创新点较多，每个章节都有知识点导图、网络视频等。本书共1000多道例题，是注册电气工程师执业资格考试备考必备用书。

本书内容均参考住房和城乡建设部执业资格注册中心与人力资源和社会保障部人事考试中心规定的最新规范和手册，其中《工业和民用供配电设计手册》第四版和《照明设计手册》第三版有很多重大更新，本书按照最新手册和规范对例题做出了全面的更新和改进。

本书适用于参加注册电气工程师执业资格专业考试的应试人员，同时也可作为本专业相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

注册电气工程师执业资格专业考试典型考点详解．供配电专业／冯峰主编．—2版．—北京：机械工业出版社，2018.5
ISBN 978-7-111-59797-1

Ⅰ．①注…　Ⅱ．①冯…　Ⅲ．①电气工程-资格考试-自学参考资料　②供电系统-资格考试-自学参考资料　③配电系统-资格考试-自学参考资料　Ⅳ．①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第087413号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号　邮政编码　100037)
策划编辑：汤　枫　　责任编辑：汤　枫
责任校对：张艳霞　　责任印制：孙　炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018年6月第2版·第1次印刷
184mm×260mm·42.75印张·1050千字
0001-1800册
标准书号：ISBN 978-7-111-59797-1
定价：169.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务
服务咨询热线：(010)88361066　　机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：(010)68326294　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
(010)88379203　　教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版　　金　书　网：www.golden-book.com

前　言

从2005年全国正式举行注册电气工程师执业资格考试起，到2018年注册电气工程师执业资格考试已经历经了13个年头，其中供配电专业每年报考人员接近1万人。2005年至今国家发布了很多新的规范，相应的设计手册也有更新，而现行习题集知识陈旧，绝大部分内容需要更新，广大参加考试人员急需一本反映最新考试内容的案例习题参考书。

本书根据全国勘察设计注册工程师管理委员会颁布的《注册电气工程师执业资格考试大纲》编写而成，内容涵盖注册电气工程师执业资格专业考试（供配电专业）的第一天专业知识和第二天案例考试的重要及普通考点。例题数量达到1000多，覆盖90%的考试内容，案例解析按照注册考试中心最新规范、手册并摘录对应考点的关键内容，案例解析的解题步骤清晰明确、规整全面，并附有知识点解析。

本书编写内容均参考住房和城乡建设部执业资格注册中心与人力资源和社会保障部人事考试中心规定的最新规范和手册，如《工业和民用供配电设计手册》第四版、《照明设计手册》第三版等。其中《工业和民用供配电设计手册》第四版有很多重大更新，本书按照《工业和民用供配电设计手册》第四版、《照明设计手册》第三版等最新规范和手册对全部案例题目做了更新和改进，同时在本书配套视频讲解中介绍了新旧版本解答过程的差异。

本书创新点较多，每个章节开始都有知识点导图，对考点进行了分解细化，面面俱到地增加了对应例题。对于负荷计算、直流电源系统、照明等章节可以作流程化设计的内容，添加了解题计算流程图，结构化地展示了解题的步骤和必要条件。每一道例题都有标准、详细的解答步骤，让考生更加容易消化理解对应考点。本书采用互联网+学习形式，网络短视频与纸质书结合学习，考生在上下班路途中、喝茶休息时间，打开手机即可听到短视频例题讲解，晚上回到家可以看课本持续巩固，充分利用个人的碎片化时间。本书共编入1000多道例题，大部分来自作者的微信公众号：冯胤清注册电气工程师每日一解，微信公众号上也有1000多道例题可供考友免费学习，相关知识点总结来自作者编写的《注册电气工程师考试执业资格考试专业考试复习指南（供配电专业）》。

注册电气工程师专业考试是一项极其复杂的考试项目，刚考过基础的考生可能对专业考试不太了解，为此，本书全面介绍了注册电气工程师从基础考试合格到拿到执业资格证书全过程中的经验和注意事项。内容包含几位考过注册电气工程师的考友介绍专业考试经验谈，考前准备工作，必备考试资料整理和规范、标准、手册重点点评，如何制订自己的备考计划，如何结合本书建立高效学习方法，应试技巧及考前注意事项，如何查成绩和获取资格证书等。

在2017年注册电气工程师供配电专业案例考试上、下午65道案例题目中，本书中的考点覆盖到55道案例，与本书中题目解答基本相似的有48道案例，完全达到本书最初编

写的目标。在2018年的新版中更正了原版中的错误，增加了2017年注册电气工程师供配电专业案例题目，增加了建筑物防火及架空线路题目等100多道，使本书更加完善和全面。

由于编者水平有限，以及受篇幅和编写时间的限制，书中有的遗漏知识点及错误会在例题视频讲解中补充说明，同时敬请业界专家和广大读者提出建议和意见，在改版时予以修正。

编　者

目　　录

前言

上篇　注册电气工程师专业考试之路

0.1　注册电气工程师专业考试经验谈 …… 3
0.2　考前准备以及必备资料 …… 6
0.3　备考计划及实施过程 …… 9
0.4　如何结合本书建立高效学习方法 …… 11
0.5　应试技巧及考前注意事项 …… 12
0.6　获取证书 …… 16

下篇　注册电气工程师专业考试典型考点详解

第 1 章　低压安全防护与低压保护电器 …… 19
1.1　电流对人体效应 …… 20
1.2　低压安全防护 …… 27
1.3　低压保护电器选择 …… 44
1.4　电压骚扰和电磁骚扰防护 …… 55
1.5　爆炸危险环境的电气装置和特殊装置或场所的电气安全 …… 57
第 2 章　电能质量与节能损耗 …… 62
2.1　电压偏差和暂降 …… 63
2.2　电压波动和闪变与三相电压不平衡度 …… 69
2.3　公用电网谐波 …… 74
2.4　节能损耗 …… 82
第 3 章　负荷计算与负荷分级 …… 93
3.1　设备功率与单位指标法负荷计算 …… 93
3.2　需要系数法负荷计算 …… 96
3.3　利用系数法负荷计算 …… 106
3.4　单相负荷换算为等效三相负荷 …… 111
3.5　负荷分级及供电要求 …… 116
3.6　通用电气设备负荷计算以及保护电器、供电导体选择 …… 119
第 4 章　无功补偿与应急电源 …… 122
4.1　无功补偿与功率因数 …… 123

4.2 并联电容器 …… 128
4.3 应急电源 …… 141
第5章 供配电系统与变(配)电站 …… 150
5.1 供配电系统 …… 150
5.2 变(配)电站设计 …… 162
第6章 短路电流计算 …… 194
6.1 实用短路电流计算法——标幺值短路计算 …… 195
6.2 实用短路电流计算法——有名值短路计算 …… 218
6.3 实用短路电流计算法——单相接地电容电流和异步电动机对短路电流影响的计算 …… 230
6.4 实用短路电流计算法——短路电流热效应 …… 238
6.5 实用短路电流计算法——不对称短路电流计算 …… 244
6.6 IEC 法——短路电流计算 …… 248
第7章 高压电气设备 …… 256
7.1 电器选择常规条件和环境条件参数修正 …… 257
7.2 变压器 …… 261
7.3 高压断路器 …… 267
7.4 高压隔离开关、接地开关 …… 270
7.5 高压熔断器、高压负荷开关及组合电器 …… 273
7.6 电抗器 …… 279
7.7 电流互感器和电压互感器（一次部分） …… 283
7.8 消弧线圈设备、接地变压器和接地电阻设备 …… 290
7.9 绝缘子与穿墙套管 …… 299
7.10 气体绝缘金属封闭开关设备与交流金属封闭开关设备 …… 307
第8章 导体、电缆、架空线路 …… 309
8.1 导体设计选择 …… 310
8.2 高压电缆设计选择 …… 322
8.3 低压电力电缆及导体、N、PE、PEN、等电位联结设计选择 …… 331
8.4 二次回路、爆炸环境电缆设计和其他 …… 339
8.5 架空线路设计选择 …… 343
第9章 继电保护与二次系统 …… 361
9.1 电力变压器的保护 …… 362
9.2 3~110 kV 线路的保护 …… 372
9.3 6~110 kV 母线保护 …… 377
9.4 3~20 kV 电力电容器的保护 …… 379
9.5 3~10 kV 电动机的保护 …… 382
9.6 接地信号与接地保护 …… 388

9.7 自动装置 …… 389
9.8 电流互感器和电压互感器选择（二次部分） …… 391
9.9 电气测量仪表装置二次回路的保护、控制、信号回路与综合自动化系统 …… 400
第 10 章 直流电源系统与交流操作电源 …… 405
10.1 直流电源系统设计与蓄电池布置 …… 405
10.2 直流负荷统计与蓄电池选择 …… 407
10.3 直流设备选择 …… 421
10.4 交流操作电源 …… 439
第 11 章 过电压保护、绝缘配合、建筑物防雷 …… 441
11.1 暂时过电压、操作过电压及限制 …… 442
11.2 雷电过电压及保护 …… 446
11.3 绝缘配合 …… 455
11.4 建筑物的防雷分类 …… 458
11.5 建筑物的防雷措施 …… 462
11.6 建筑物的防雷装置 …… 473
11.7 建筑物的防雷击电磁脉冲 …… 476
第 12 章 接地 …… 483
12.1 高压电气装置接地和发电厂与变电站的接地网 …… 484
12.2 高压架空线路和电缆线路的接地 …… 495
12.3 高压配电电气装置接地与低压系统接地相关要求 …… 499
12.4 接地导体（线）、接地极设计与选择 …… 503
12.5 接地电阻计算 …… 509
12.6 其他环境接地 …… 524
第 13 章 照明 …… 528
13.1 照明标准与设计要求 …… 528
13.2 点光源、线光源与面光源照度计算 …… 533
13.3 平均照度计算 …… 547
13.4 单位容量、球面和柱面照度、投光灯照度计算 …… 557
13.5 其他环境照明设计 …… 563
13.6 照明系统供配电要求 …… 573
第 14 章 电气传动 …… 577
14.1 电动机基本选择与校验 …… 578
14.2 交、直流电动机的起动 …… 588
14.3 交、直流电动机的制动 …… 603
14.4 交、直流电动机调速 …… 608
14.5 变流器相关计算 …… 618
14.6 电动机继电保护、PLC、控制电器闭环调节系统 …… 624

第 15 章　建筑智能化 …… *628*
15.1　火灾自动报警系统…… *629*
15.2　建筑设备监控系统…… *643*
15.3　安全防范和视频监视系统…… *646*
15.4　计算机网络、通信网络系统、电子信息系统机房…… *650*
15.5　综合布线…… *653*
15.6　有线电视…… *659*
15.7　公共广播及厅堂扩声系统…… *661*
15.8　会议电视会场及视频显示系统…… *668*

上　　篇

注册电气工程师专业考试之路

0.1 注册电气工程师专业考试经验谈

【经验谈（一）】

“冷静，沉着，谦虚，谨慎”，我觉得无论对什么考试而言，这几点都是最重要的。2012 年过的基础，2013 年过的专业，我是从 4 月初开始备考的，以后基本上维持每天都抽时间看一会书。

第一轮复习：看指导书和做习题集，每周一章，把要考试的基本轮廓大致了解，大范围的知识点有个基本了解，不懂的就和别人讨论，也正好弥补一下平时做设计用计算软件和经验的弊端。第一轮复习不要急着记忆，要理解，比如短路电流计算的公式推导，短路电流含有的直流、交流分量，以及各自的变化。第一轮复习我是看完一章做完一章习题集，习题集粗略做一遍即可，不可较真，当然里面也有很多好题，能帮助你理解很多知识点。

第二轮复习：重点就在真题上了，历年真题是考生需要重视的，出题人也很重视。题库再变，也是万变不离其宗，真题要每道题每个选项都搞懂，搞清楚每个选项的出处。我是把所有真题都打印出来，自己把完整的答案写在旁边，出处也写在旁边，例如出自哪本规范的第 X. X. X 条，以便以后浏览真题的时候知道这本规范有讲到此类知识。专业知识虽然有几年的真题是重复的，但是在第二轮复习的时候还是要把它当成新题来做。进度固然重要，但是复习的质量更重要，我不赞成跟着别人的进度复习，自己订下进度表，按照自己的进度复习即可。在解答案例时，一定要自己亲手计算，亲手写下过程，不要以为找到公式代入数值就可以，自己在演算的过程中，会有些意想不到的收获，这点很重要。第二轮复习基本上是一个星期解答一年真题，要想做到每个选项都彻底弄清楚，做到这个进度已属不易。在第二轮复习做完历年真题之后，差不多配电手册、钢铁手册、传动手册上的重要点都过了一遍，在过的时候，要认真看相关章节的内容，最后要做到配电手册每一章的大标题都要记住，这样才能做到心中有数，考试才能准确定位。

第三轮复习：我把真题又打印了一份，这次就是快速地复习一遍，也是一个总结的过程，同一个知识点在不同年份的侧重点不一样，例如有一年考到限制短路电流的措施是在变压器回路装设限流电抗器，有一年考的是降低工频过电压是在线路安装并联电抗器，还有减少谐波电流也是限流电抗器，这些点都是紧紧相扣的，要理解限流电抗器知识点为什么可以限制短路电流，为什么并联电抗器能降低工频过电压，为什么串联电抗器能减少谐波，根据《配三》上的公式和文字可以找到答案。举例只是说明应该这样复习，当然如果大家有捷径更好，反正我是这样复习的，第三轮复习很重要，这是一个巩固和加深的过程。在第三轮复习的时候，规范和手册依然是重点，没必要抱着它们啃，毕竟内容太多，关键是知道相关知识点所在的位置，开卷考试并不是要你记住，而是把手册当成工具，所以我一再强调对每一章节的大标题要熟悉，做到准确定位。比如 2013 年的案例负荷计算考到电梯，在我印象中讲到电梯的有三个地方，第一是《民规》第九章常用设备电气装置提到过电梯，第二是《通用用电设备配电设计规范》中提到过，第三就是《配电设计》的第十二章提到过，考试的时候跑不出这三个地方，所以此题就做对了。

第四轮复习：基本上就是查漏补缺了，历年没考到的但是又认为很重要的点，比如照度

里面的倾斜面照度、低压线路保护里的选择性保护等，这些可能是以后考试中会涉及的。还有一个就是对规范的名称要记住，我在第一轮复习中做第一天专业知识的时候，每个选项的出处我都是用规范和手册的中文名称来注明的，这样以便在以后浏览的时候能知道这本规范讲到过此类知识。QQ 学习群里的讨论很热烈，基本上每天都进行到十一二点，我认为有用，特别是继电保护的 1/3、2/3 问题争论了很久，我一直以为 2/3 是必对无疑，和考友也单独交流过，也吵过，但是我还是坚信自己是对的，后来还是经过考友的点拨才如梦初醒，在考试中出现了这题，毫不犹豫，顺利拿下。还有群里在最后阶段出的几份真题（虽然在考试中没出现过），我认为也很有用，都是平时很少注意或者真题中没出现过的，但是通过它能更深入地理解一些知识点，比如电动机的调速给的参数有很多，有电动机的输入功率、输出功率、液力偶合器的效率等，通过这题搞清楚了什么是电机的额定功率，是定子侧输入功率还是转子侧输出功率，转子侧的输出功率和电机轴的输出功率是否相等，液力耦合器的效率一般能达到多少（上网查资料），这些知识点虽然 2013 年没考过，但是起码拓展了自己的专业知识。在群里讨论一定要秉持脚踏实地、谦虚谨慎的态度，因为你的一句话也许就影响了别人对相关知识的理解。

最后就是考试的临场处置了，2013 年的考试题目第一天简单，我知道是来自真题，但是还是翻规范（平时没记专业知识真题），做完大概只用一个半小时，之后就是涂答题卡了，这个很重要，一定要按照答题卡上的题目顺序涂写，要不然功亏一篑就不值得了。第二天的考试案例题目有些难，对第一感觉就有些麻烦的题，果断放弃，不必纠缠，不必影响心态，但是你认为可以下手的题，过程一定要整洁，不要出现手册简写，配电手册要写成《工业与民用配电手册》第三版 P200 页式 XXX，写得完整阅卷人认为你是在尊重他，自然也就少了些刁难。第二天的考试总的原则就是保证 60 分，不要为了考高分，分数再高，证书也是和 60 分一样的，不会出现高分通过等字眼。

以上就是自己的一些总结，考完之后对完第一版答案就觉得能过，就再也没有关注考试了，很多东西都忘记了，只记得自己一直在坚持看书和注释，笔芯就用了 10 根，辛苦付出换来了好的结果，我认为值得。预祝继续奋战的考友百尺竿头、更进一步，取得好的成绩。

【经验谈（二）】

首先声明我是真题党，但这并不意味着真题应对考试绰绰有余。考完试了，我也后悔自己以真题为中心的复习思路，因为今年考试的题型变化实在很大。复习过程我觉得应该有模块化的思想。考试其实涉及几个不同的方向，其中的有些方向是相对独立的，比如照明、弱电、电气传动等。模块化复习的好处很明确，有时候掌握了一本规范，10 分就到手，也就是及格成绩的 1/6 就到手了，典型的就是直流电源部分，一本 DL/T 5044—2014 就足够；再比如照明部分，只要掌握《照明设计手册》和 GB 50034—2013 就可以了，而且《照明设计手册》别看它很厚，和计算相关的内容是有限的。这样，在复习的过程中，就可以慢慢增加自信。复习的过程就是从基础 20 分到 60 分的过程，照着这个思路，累积到及格水平就是我们的奋斗目标。复习需要准备的资料主要是：指导书+习题集、规范、手册、真题和规范汇编。规范汇编我觉得还是很有用处的，特别是对于第一天知识题，考场上我也看到一些考友是用的单行本，考试过程中不停地换书、看目录、找内容，显然这样的过程比较浪费时间。如果以后知识题换新的题库，我觉得用单行本的朋友们时间上会更紧张。

复习过程中需要有目标，这点很重要。定好计划，计划要完整，比如是复习规范，还是

看手册，还是做真题，如果是做真题的话，是做哪一年的。供配电考试涉及的内容很多，制定好计划之后，就会发现自己的时间很紧张，比如做一份案例真题需要 3 个小时，好多年案例加起来，完成一轮就得好多天。再比如看一本手册，也是要好多天的，这些我们如果事先合理规划一下，就能够保证复习全面，也能保证有条不紊。其实这种考试，除极少数天才之外，大家都是靠时间磨出来的成绩。开始复习的时间要尽量早，这样的话一旦发现问题还有一个消化和理解的过程。可以把战线拉长，把复习强度适度降低，坚持到底。关于视频（网上也有），我觉得有必要看，帮我们梳理知识点，是看书之外一个很好的补充。

再提一下各个知识点复习的策略。同一部分内容，比如照明，手册上有，规范上有，指导书上也有，但是指导书上的内容取自规范和手册，而且指导书不能作为案例解答的依据，所以复习过程中，还是应该以规范>手册>指导书的原则进行：①规范可以解决的，手册和指导书讲解不清楚、不详细的，比如直流系统，就以规范为准。②规范可以解决，手册也可以解决的，应该以规范为准，主要是因为规范更新比手册更快，有些手册应该是很多年前编写的，比好多规范都早，如果碰到两者都可引用的案例，显然选择规范更靠谱。虽然我们不确定哪些题目两者都可引用，但是平时掌握这个原则，应该对考试还是有帮助的，典型的比如 DL/T 5222—2005、GB 50217—2007 等。③只有手册可以解决的，就以手册为准，比如负荷计算、短路电流计算等。

关于考试，坐到考场上都会紧张，紧张很正常，告诉自己心情平静了，你就比别人多了一份胜算，尽快让自己平静下来。考试过程中，做好面对各种题目的准备（这么说，是因为 2013 年的题目一看确实有点愣住），因为我们不确定以后会不会又是很新的题型。拿到试卷先浏览一遍，基本区分出题目的难度，考试的时候采取轮番做题的战术，第一遍，挑最容易的，第二遍，挑花点时间可以解决的，剩下的时间就去做那些有挑战性的。千万不要被某一个题目卡住或者和某一个题目较劲，你去较劲可能真是中了命题者的圈套，因为同一组案例里面会设个别有区分度的题目。做题目一定要保证准确率，你觉得难的题目，别人也好不到哪里去，那要超越别人，要及格，必须得到该得的分数，否则难题不会，简单的题目做错，怎么及格呢？下午的考试可以自选题，更灵活，我考试的时候还是分好几轮做题，一直到考试结束或者做满 25 道题目。下午的考试怎么选题合适？每个人的思路都不一样，我是按照知识点来，先做直流系统，没想到 2013 年的直流题型变化很大，看了一遍，好像只会做一题，心理压力有点大（这个时候就需要调节下自己的心理）；后面再做电气传动的题目，有几个比较容易，也有计算很复杂的，我做了 3~4 题，具体记不清了，剩下那题我果断放弃，现在想来也是正确的；然后是照明，也做了 3~4 题的样子；再后来是防雷的题目；最后是弱电。然后开始第二轮。这是我的做题方法和选题顺序，各人根据自己的习惯制定自己的方法。

再提一点，供配电和发输电的考点有重复的部分，现在供配电的题目又很新，考友们可以参考下发输变电历年真题中的防雷、接地、直流系统部分，说不定能在以后的考试中碰到一些类似于发输变电里面的案例。最后想起老师的总结：只要会 50%的题目，65 道考题的 50%的分数，考试稳过。针对案例考试中的下午考试，考虑到案例中有些内容，每个人擅长的地方不一样，但总有几个部分，比如电能质量、照明可能会 80%的题目，那其他部分再会 40%的题目说不定就能得 60 分了（恰好每组案例里都有 2~3 道的基本题）。用这段做总结，是激励我们自己。

0.2 考前准备以及必备资料

【专业考试使用的规范、标准、手册】

2018年考试涉及规范和手册清单如下：

（1）规程、规范

1）《绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则》GB 311.1—2012。

2）《户外严酷条件下的电气设施 第1部分：范围和定义》GB/T 9089.1—2008。

3）《户外严酷条件下的电气设施 第2部分：一般防护要求》GB/T 9089.2—2008。

4）《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006。

5）《电能质量 供电电压偏差》GB/T 12325—2008。

6）《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

7）《用电安全导则》GB/T 13869—2008。

8）《电流通过人体的效应 第1部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008。

9）《电流通过人体的效应 第2部分：特殊情况》GB/T 13870.2—2016。

10）《系统接地的型式及安全技术要求》GB 14050—2008。

11）《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993。

12）《电能质量 三相电压不平衡》GB/T 15543—2008。

13）《建筑物电气装置 第4-42部分：安全防护 热效应保护》GB 16895.2—2005。

14）《建筑物电气装置 第5-54部分：电气设备的选择和安装 接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3—2004。

15）《建筑物电气装置 第5部分：电气设备的选择和安装 第53章：开关设备和控制设备》GB 16895.4—1997。

16）《低压电气装置 第4-43部分：安全防护 过电流保护》 GB 16895.5—2012。

17）《低压电气装置 第5-52部分：电气设备的选择和安装 布线系统》GB 16895.6—2014。

18）《低压电气装置 第7-706部分：特殊装置或场所的要求 活动受限制的可导电场所》GB 16895.8—2010。

19）《建筑物电气装置 第7部分：特殊装置或场所的要求 第707节：数据处理设备用电气装置的接地要求》GB/T 16895.9—2000。

20）《低压电气装置 第4-44部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。

21）《低压电气装置 第4-41部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011。

22）《电击防护装置和设备的通用部分》GB/T 17045—2008。

23）《建筑设计防火规范》GB 50016—2014。

24）《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

25）《人民防空地下室设计规范》GB 50038—2005。

26）《供配电系统设计规范》GB 50052—2009。

27）《20 kV及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

28）《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

29）《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011。

30）《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

31）《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014。

32）《35~110 kV 变电所设计规范》GB 50059—2011。

33）《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

34）《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

35）《电力装置的电气测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017。

36）《交流电气装置的过电压和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

37）《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011。

38）《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》GB 50067—2014。

39）《人民防空工程设计防火规范》GB 50098—2009。

40）《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

41）《石油化工企业设计防火规范》GB 50160—2008。

42）《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

43）《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994。

44）《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

45）《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

46）《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229—2006。

47）《电力设施抗震设计规范》GB 50260—2013。

48）《城市电力规划规范》GB/T 50293—2014。

49）《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

50）《智能建筑设计标准》GB/T 50314—2015。

51）《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010。

52）《工业电视系统工程设计规范》GB 50115—2009。

53）《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012。

54）《安全防范工程设计规范》GB 50348—2004。

55）《厅堂扩声系统设计规范》GB 50371—2006。

56）《入侵报警系统工程设计规范》GB 50394—2007。

57）《视频安防监控系统工程设计》GB 50395—2007。

58）《出入口控制系统工程设计规范》GB 50396—2007。

59）《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008。

60）《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524—2010。

61）《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010。

62）《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010。

63）《电子会议系统工程设计规范》GB 50799—2012。

64）《工程建设标准强制性条文》（电力工程部分）。

65）《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014。

66）《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

67）《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

68）《住宅建筑电气设计规范》JGJ 242—2011。

69）《民用闭路电视系统工程技术规范》GB 50198—2011。

注：以上所有规程、规范以考试年度1月1日以前实施的最新版本为准。

（2）设计手册

1）西北电力设计院编，《电力工程电气设计手册》（电气一次部分），中国电力出版社，1989年12月。

2）西北电力设计院编，《电力工程电气设计手册》（电气二次部分），水利电力出版社，1991年8月。

3）中国航空工业规划设计研究院等编，《工业和民用配电设计手册》第四版，中国电力出版社，2016年12月。

4）《钢铁企业电力设计手册》编委会编，《钢铁企业电力设计手册》，冶金工业出版社，1996年1月。

5）北京照明学会照明设计专业委员会编，《照明设计手册》第三版，中国电力出版社，2016年12月。

6）机械电子工业部天津电气传动设计研究所编著，《电气传动自动化技术手册》第三版，机械工业出版社，2011年5月。

7）东北电力设计院编，《电力工程高压送电线路设计手册》第二版，中国电力出版社，2003年。

（3）说明

考试所涉及规范和手册，以考试当年住房和城乡建设部执业资格注册中心（www.pqrc.org.cn）和中国人事考试网（www.cpta.com.cn）发布的考务文件为准，一般会增减几本规范。当考试所用到的设计手册的内容与规程、规范不一致时，以规程、规范为准。《数据中心设计规范》GB 50174—2017的实施日期2018年1月1日，故考试时依然使用旧规范。

【规范、标准、手册重点点评】

1）考试涉及规范文字加粗的部分为重点内容，约占考试内容的90%以上；非加粗的规范，约占考试内容10%以下，请考生合理安排学习时间。

2）《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）：电力设计最重要的手册之一，供配电考试中高压部分重要考试依据。

3）《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）：电力设计最重要的手册之一，供配电考试中涉及极少内容。

4）《钢铁企业电力设计手册》：供配电考试中电气传动主要依据，其主要内容为电技术节能、电动机选择与容量校验、交流电动机调速系数、晶闸管变流器及直流电机调速、可编程序控制器（PC）及其应用。

5）《工业和民用配电设计手册》第四版：2016年12月出版，内容主要有以下大幅扩充和更新：从第三版的35 kV及以下扩大到110 kV及以下；全面贯彻最新标准、规范；跟踪IEC的最新动态按最新版本更新（引用的少数IEC标准未转化为国际标准）；改进计算方法和表达方式；从单行本改为上下册。

6）《照明设计手册》第三版：供配电考试中照明的主要依据，内容主要有以下大幅扩充和更新：随《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 及最新 CIE 等国际标准进行内容更新，增加了一些场景照明设计章节，增加了导光管采光照度计算和 LED 灯设计的内容。

7）《电气传动自动化技术手册》第三版：供配电考试中电气传动的主要依据，其主要内容为电气传动方案及电动机选择、直流传动系统、交流调速传动系统和基础自动化等。配合《钢铁企业电力设计手册》构成供配电考试中电气传动知识体系。

8）《电力工程高压送电线路设计手册》第二版：供配电考试中送电线路的主要依据，其主要内容为电气部分、电线力学计算等。配合《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 构成供配电考试中送电线路知识体系。

【专业考试报名要求和考试时间】

注册电气工程师考试实行网上报名、现场资格审查、现场或网上缴费的方式，符合报考条件的人员需在规定时间内在指定网站填写并提交报名信息，上传照片，并按有关规定进行资格审查，确认符合报考条件后，在规定时间内支付考试费用［报名具体安排详见各省（区、市）有关文件］。

注册电气工程师考试实行网上报名时间，一般在每年的 6 月左右，考试时间一般在每年的 9 月。网上报名在中国人事考试网（www. cpta. com. cn）。

0.3 备考计划及实施过程

【第一阶段——入门】

入门阶段主要任务：

以《工业和民用配电设计手册》第四版为核心，结合重要的手册和规范，快速阅读第一遍，对考试内容有个全面的理解，篇幅性描述的做标记后跳过，但是一定要快。本书典型考点详解的内容全面，例题丰富，看的过程会比较缓慢，需要对照着手册和规范，即翻到手册和规范的相应位置阅读，同时要在书目上做好日常标注的依据和关键词、索引标签，这是一个熟悉手册和规范的过程。本书针对手册和规范条文给出了经典例题，有一些是以往的真题，刚开始学习会有难度，不要强迫自己去解题，而是去理解每道题目的解答过程。

注意事项：

1）备考过程中的关键是学习的持久性。如果发生因工作或家庭的原因导致学习长期停滞，后面高效学习很难持续下去，建议至少每天都要抽出一定的时间进行碎片化学习。学习时，尤其是自学时，要做到用心学习，对接触到的知识点，要充分地投入进去，深入学习+多思考+耐心的总结，最后把结论保存下来，手写或打印粘贴到相关考试书籍的位置。

2）购买考试相关手册和规范。需要根据本年度考务文件出来之后，购买正版手册和规范，同时对照考务文件增减变化的手册或规范。

3）辅导培训班具备监督复习、梳理思路、答疑解惑功能，参不参加辅导培训班请根据个人实际情况，比如钱、时间、精力、决心等因素考虑。参加辅导培训班可以帮助梳理考点，详细讲解对应知识点，可少走一些弯路，节约时间。

4）注册电气工程师学习社群，最常见的有微信公众号、QQ 学习群，建议加入各种视频公开课。里面会共享很多免费的学习资料，有注册电气工程师大咖为你免费答疑。推荐有

冯胤清注电供配电 QQ 群 315789184；供配电实用技术 QQ 群 521678558；老马识途 QQ 群 331502231；供配电之家 QQ 群 261089727；供配电专业考试 QQ 群 424457409 等。

5）制订一个符合自己的备考计划。需要根据自己的实际情况来确定，对应相关专业的考生学习起来会更加吃力，安排的学习时间要多一些。制订备考计划时一定要遵循一个原则："剩余的备考时间=截止到考试的余下的时间减去备用的一个月"。如果是参加了辅导班，根据辅导班的培训计划，调整自己的备考计划。

【第二阶段——提高与强化】

提高与强化阶段主要任务：

提高阶段——结合历年真题，通过做真题，进一步熟悉以《工业和民用供配电设计手册》第四版为核心的手册和规范，在经过第一阶段的铺垫之后做第二遍真题以便熟悉和掌握。注意对往年的热门考点和普通考点、容易错的概念点，逐步整理索引，为后期强化和冲刺阶段做出扎实的准备。在这个环节，对热门考点和普通考点的内容一定要学习透彻，对从未涉及过的冷门考点内容，也要进行理解与分析。

强化阶段——经过提高阶段的学习，注册电气工程师考试大纲涉及的热门考点和普通考点已经熟悉理解，相应的真题已熟练掌握。强化阶段的目的就是熟练运用，提高解题速度，比如按照模拟考试环境去解答近 3 年的真题，解答完毕对照答案估计解题正确率，分析解题中对考点的理解与掌握情况。这一阶段题海战术很重要，可以反复强化自己的做题技巧和速度！

注意事项：

1）对冷门考点的分析——关于考试有一种说法就是"真题党"，即"搞懂所有真题"然后上考场一定能考及格，这种情况就是热门考点和普通考点轮流反复地考，在 2013 以前的考试中经常出现，随着近几年考试题库不断更新，"真题党"学习效果变得很差！所以在强化阶段还要发掘更多的冷门考点，特别是 2017 年案例考试上午考试中超出考试大纲可能考到的内容变得更多，本书中有大约 20%的例题属于新挖掘冷门考点，在 2017 年案例考试下午考试中与本书相似题目达到 30 道之多。由于篇幅有限本书不能列举太多例题，考生可根据这种学习方法自我补充对冷门考点的分析。

2）避免考题陷阱——对必须掌握的公式和重点内容做一次全面梳理。要把公式中的每个参数弄清楚，把公式应避开的陷阱写到考试书目上。所谓的陷阱，如只看到了甲规范（手册）中的公式，公式中的参数需要关联到乙规范（手册）中的内容；如多个规范手册对应条文或公式重复而且不同，要整理出来什么情况下使用什么规范手册的对应条文或公式，哪些条文或公式已经是过时废止的。学会看规范的条文说明，条文说明中给出对应的条文发展与继承，或者从哪个规范或报告中引用，条文说明也是冷门考点经常出现的地方！

【第三阶段——冲刺】

冲击阶段主要任务：

冲刺阶段——距考试时间约一个月，需要做到按照真实考试场景做历年真题正确率达到 90%以上，容易出错的地方要反复练习。本阶段需要做的是重复再重复，反复强调考点熟练应用，各科的知识点和易错的地方要强化练习。不宜再花费大量精力和时间学习很多难点内容，建议根据个人的学习情况，查漏补缺，修补自己的知识体系，多交流、多沟通、勤学、多问、多练、多思考、多讨论，只要目标坚定，功夫深，方法正确，一定能成功！考前的心

态非常关键，有时甚至起到了决定性的作用，所以一定要有信心，建立自信，从战略上藐视考试，战术上重视考题。

注意事项：

1）书本的索引+标签的应用。在经过对手册、规范充分的熟悉之后，已经做了很多标签、索引和总结，但是不够整齐，这些标签平时在用，考试也要用。而且考试之前，要对标签做更新、修改、添加、删除、重新排序之类的工作。考试时候结合标签、索引去查找相关知识点，事倍功半。这个工作，建议在考前一个月左右进行，注意书本侧面的标签粘贴成阶梯状，方便查找。这样一来，在备考中，一定是利器。

2）押题及把握命题方向：首先，要明确心态，备考的时候不能以押题为主导来复习，注册电气专业考试已经越来越趋向于全面、多角度的考核，往年的重点可能不考，往年的冷门可能大篇幅出题。所谓的押题，仅意在全面备考之后，做强化、冲刺之时的选择性提高，不能作为备考依据和计划内容！盲目追求押题，实为投机取巧，极容易弄巧成拙，切记！从2016年、2017年考试类型及备考材料、实事等方面来看，以下考点会是2018年比较重要的考点，在通篇学习之后，可以适当加大力度，或可提高分数：①发输变电专业的架空线路设计计算、高压电器选择、直流系统、配电设计图审查等跨界题目；②火灾报警系统、建筑设备监控系统、会议电视会场及视频显示系统等第15章中图形示例的题目；③涉及“安全”概念的各种可能的考点，尤其留意RCD、安全电压、火灾、静电、安全距离、绝缘等。

3）模拟题训练：考前一个月，很多注册电气工程师学习社群中发布一些模拟题（参加辅导班会有很多），可以按照真实考场环境模拟一下考试，试试考试感觉，查看分数，对一些知识点查漏补缺。

4）常见专业考试的题目风格：第一种——冷门和普通考点，需要从考试书目中找到条文或公式，代入对应参数即可得到答案。第二种——热门和普通考点，对应的条文或公式设置有陷阱，需要从多本规范中得出，有陷阱的题目需要对知识点非常熟练，否则做对不易。第三种——普通考点，但计算量巨大，计算过程容易出错。第四种——普通考点，题目主要以电气图或计算表格形式出现，如电气主接线图、电气设备布置图、负荷计算表等。最后一种——冷门考点，常用规范、手册中无法查到，超纲题目。

0.4 如何结合本书建立高效学习方法

根据考试报名条件要求可以看出注册电气工程师专业考试的考生年龄分布在26~35岁的占70%，年龄36~45岁的占25%，45岁以上的占5%，这些供配电专业考生人群的特点是工作时间长，生活负担繁重，参加考试全部使用工作以外的业余时间，并且学习时间不固定，时间短，碎片化的时间过多，学习精力无法集中。针对考生这些特点，本书每个章节将考点拆分细化，给出了知识点思维导图，细化的知识点分布，对应每个知识点有一道经典的案例题目和相应的知识点解析。对于解题很复杂的按照规范手册规定给出了解题流程图，预防考生对知识点不理解导致一些解题过程中步骤性错误，同时解释了某些规范与手册之间矛盾的知识点。本书的每一个小节中都给出考试依据书目和参数书目，依据书目为案例考试时解题过程中必须写出的规范和手册，但是这些书目中的知识点讲解或基础知识介绍并不完善，考生可以在参考书目的书籍中找到对应的知识点，完善对应的知识体系。本书根据知识

点总结了1000多道例题，全面覆盖热门考点、普通考点和部分冷门考点，可覆盖80%以上考试内容。同时考生也要注意电气传动和建筑物防雷等章节经常出现冷门考点，可以按照本书的学习方法自己总结。

在移动互联网大时代，学习交流平台逐渐从学校授课转向网络授课，特别是近两年，网络“短视频”风口已来袭，根据学习碎片化的要求，本书典型考点详解会附送网络授课短视频，每个短视频会在3~10分钟内结合本书案例题目讲解一个考点内容，每天在1个小时内学会3~10个考点，可以在2~3个月内将本书所讲解的考点融会贯通。供配电专业考生在上下班路途中、喝茶休息时间，打开手机即可听到短视频讲解，晚上回到家可以看课本持续巩固。纸质媒体与网络短视频媒体的融合模式可以极大地提高学习的效率，让自己考试合格更有一份把握！

0.5 应试技巧及考前注意事项

【准考证打印】

考前一个星期左右会开始打印准考证，请登录中国人事考试网（www.cpta.com.cn）。单击“准考证打印”，选择当年的考试名称后，填入个人信息，单击确定后，可以在线打印准考证。提示：

1）准考证不要下载下来之后修改打印，尽量使用在线打印，保证格式不变。打印份数在4份左右，另存为PDF文档，防止遗失。

2）准考证尽量早点打印，并查看自己的考场在哪里，提前预订距离考场近的旅馆，以及安排出行时间。

【计算器应用技巧】

计算器一定早买，在平时备考过程中一定要使用，对于三角函数、复数、一元二次方程、e^x、y^x、$\sqrt[x]{y}$等情况的计算必须熟练应用。

1）角度、弧度相关的计算题，如三角函数的计算，应关注计算器上的弧度或角度显示（查阅计算器说明书）。

2）运算时候，如果省略乘号，可能导致一些不必要的问题，建议尽量加上。

3）在负荷计算之类计算量较大的题目时，往往列一个长式子，比分开列的误差会大到产生不同的选项。有可能的话，分开列，计算过程保留比选项多一位小数点。

4）习惯用计算器的“上一次运算结果”变量功能的，要小心，只要按了一次等于号，那个变量的值就变了，不要修改带有这个变量的表达式再算其他内容。

5）列一个较长表达式时，按键之后时刻小心，注意有没有多按或少按的，这个情况常发生！

6）计算器尽量带两个，以防万一。再不济，如果计算器用了几年了，一定要换个电池再上考场。

【考试时住宿安排与考前注意事宜】

（1）作息时间注意事项

1）考试日期2017年已经调整为9月的最后一个周末，应当从考前一周开始，逐步调整晚上休息时间，每天提前20分钟左右上床休息，考前一天应该22:30左右关灯

休息。

2）早晨起床闹钟定在 7:00 左右。（考试那两天，如果住的离考场较远，起床时间宜再提前一些，尽量保证提前一小时到考场。

3）饭后可散步一小时，听听音乐，放松放松。（考试那两天，上午考完试后就不要再想上午的事，中午尽量午休一会，设置好闹钟。）

4）最好不参加剧烈的运动，防止受伤。

（2）学习注意事项

1）以复习、恢复记忆为主，不再深挖还未搞懂的知识点，学会有所放弃。

2）各种手册的索引打印好，贴在扉页上。

3）重要规范的重要计算公式可集中抄写在该规范的扉页上。

4）某些省份考场可以带入打印资料，没买的标准、规范和自己总结的知识点可以打印出来装订成册。

5）某些省份考场可以带入历年真题书籍，尽量带入本书，开卷考试比的就是谁准备得更充分。

6）2B 铅笔、塑料橡皮、黑色水笔准备好，黑色水笔带 3~5 根笔芯；计算器电池检查一下（建议准备两个计算器，有备无患），操作计算器要相当熟练。

7）准考证不妨打印 5 张，备用（也可以作为草稿纸使用，可将自己的答案写在准考证背面方便考后对答案）。

8）手表准备好。

9）准备一个书架，合理安排规范手册排放顺序，考试的时候找起来顺手；最好将规范的代码、星级涂在规范的书脊上，手册的重要章节内容，也涂上色标或折叠一下，醒目易找。

10）官方的辅导教材或者比较好的辅导书如《注册电气工程师执业资格考试专业考试复习指南（供配电专业）》等各种复习资料尽量带入。

（3）衣食住行注意事项

1）提前一周或两周在网上订好宾馆，离考场越近越好；在当地考试的，若路程时间超过 1 小时的建议住宿！路程远，则增加了不确定性。

2）考前一天下午踩场，计算一下路程时间，熟悉考场线路。

3）考前一周开始，晚上是否开空调，个人要衡量，感冒生病则会严重影响考试状态。

4）饮食上保持日常习惯，一定要注意饮食卫生。

5）带点清凉油、风油精（考场也会用上）、常用药；住宿的话，可考虑准备蚊香。

6）考试时间比较长，答卷时间内肯定需要补充能量。准备好一些提神饮料等，作为能量补充。

7）当天赶往考场的朋友，一定要有充足的路程时间，多留一些时间，你会发现事情就从容多了，跑错考点，跑错考场，丢了准考证、身份证等，这类事情太多了！注意安全，行车安全很重要！

8）手机闹钟要设好，必要的时候请家人给你打电话确认，也可请隔壁考友帮忙叫早。

9）准备好拉杆箱，尺寸建议 20~24 寸，可以先把所有资料试着放放看。

10）出发前再次检查一下身份证、准考证、手表、计算器、铅笔、水笔、橡皮和草

稿纸。

【考场携带物件清单】

1）考场必备书籍。（各个省份考场要求不同，严格的考场只准携带考试规范和手册，较松的考场允许带入打印的考试资料和习题集，请参照各地方要求携带。）

2）考试文具。（中性笔、考试专用铅笔或 2B 铅笔多带几支。）

3）茶、红牛等提神饮料。（进入考场前记得上厕所，考场内不要喝得太多。）

4）巧克力、士力架等补充能量食品。

5）拉杆箱（所有资料重量会在 30 kg 左右）。

6）折叠书架或鞋架。

7）身份证、准考证。

8）可能需要的药物（清凉油、风油精等）。

9）手表。

10）计算器（建议两个，预防意外情况）。

11）其他。

【考场注意事项】

1）试卷上书写用笔：黑色或蓝色钢笔、签字笔；填涂答题卡专用笔：黑色 2B 铅笔。试卷上作答严禁使用铅笔，否则视为无效。

2）考生须用书写用笔将工作单位、姓名、准考证号填写在答题卡和试卷相应的栏目内。在其他位置书写单位、姓名、考号等信息的，视为违纪试卷，不予评分。

3）考生在作答时，按题号在试卷上每道试题对应的答案位置（括号内）填写该试题所选择的答案（即填写上所选选项对应的字母），并必须在相应试题解答过程下面的空白处写明该题的主要案例分析或计算过程及计算结果，同时还须将所选答案用 2B 铅笔填涂在答题卡上。对不按上述要求作答的，视为无效，该试题不予复评记分。

4）在答题卡或试卷上书写与题意无关的语言，或作标记的，均按违纪试卷处理。

5）考试用规范和手册、正规出版物肯定能带进考场，习题集和打印资料能否带进考场，只能看各省考场规定，尽量准备好。

6）考卷下发后，先填好卷头和答题卡的姓名、试卷号、准考证号。涂卡时应注意：专业考试四场考试的考场不一定相同，四场考试的准考证号也是不同的，还要注意四场考试的答题卡顺序也可能不一样（横向或纵向），涂卡的时候要小心。

7）草稿纸由各地统一配发，考后收回。

8）考试结束时，由监考人员当面将试卷、答题卡一并收回。

9）建议个人佩戴手表，做好解题时间计划。

【考试答题技巧】

第一天专业知识考试：专业知识考试分为上午场和下午场，两场考试内容的侧重点有所不同，每场试卷单选题目 40 道（每题 1 分）、多选题目 30 道（每题 2 分），满分为 100 分，每场考试时长 180 分钟，特点不用写依据和过程。推荐的答题技巧如下：

1）做多选题。多选题的特色是“分值高、耗时间、容易错”，做题按照先易后难的原则，题目过难就放在最后解答，如果无法解答或考试时间不够用，再去蒙答案。多选题四个选项，一般选择 2~3 个答案。历年真题里面没有一个题目是选 4 个的，如果觉得 4 个选项

都对，一定要再考虑一次，慎重选择 4 个。多选题因为分值高、容易错，尽量每个题目都去查询出处，对着出处选择，除非这个题目有十足的把握，才直接选择。

2）做单选题。单选题的特色是“分值低、题量较大、可以蒙”。按照计划给予单选题较充分的时间，做题还是先易后难的原则，不会做跳过继续下一题。离考试结束时间还有 15 分钟左右时，检查试卷和答题卡是否有错误，剩余时间可做简单估分。再次检查准考证号等信息，可以考虑在草稿纸或者准考证上记录答案方便考后对答案。

第二天专业案例考试：专业案例考试分为上午场和下午场，两场考试内容的侧重点有所不同，上午场试卷案例题目 25 道（必做题，每题 2 分），满分为 50 分；下午场试卷案例题目 40 道（任选做 25 题，每题 2 分），满分为 50 分；每场考试为 180 分钟，必须写依据和完整计算过程。

案例考试上午场和下午场，每场考试为 180 分钟，做题 25 道，平均解答每道题所用时间为 7. 2 分钟。案例题目题干处会给出冗长文字，还会有图或表格作为辅助，阅读题目花去 3~4 分钟，如果对考点不熟练或理解不到位，翻阅到对应规范或手册内容就花去 5 分钟，这样解答的时间就没有了，更难通过考试。

1）实际考试中如何使用本书以便快速正确解答题目？本书典型考点详解已经按照实际考试将考点分析到位，第一、第二阶段学习过程考生在考试书目上做好日常标注的依据来源和关键词、索引标签，将该考点分析理解透彻。在考试中日常标注的依据来源和关键词将起到决定性作用，分析考试题目内容找到题目中对应的关键词，根据日常做好的索引标签找到本书中对应内容进行解答，翻阅到对应规范或手册内容减少到 30 秒以内，这样有较充裕的时间编写解答过程，从而考取高分。

2）关于解题依据，考试书目中手册和规范名称、公式编号、对应页数章节编号抄写上（不建议使用缩写），写出计算公式然后代入数据、算出得数（数值的计算过程可以不用写得很详细），需要判断或评论的一定要有文字描述，明确写出你选择的答案。注意：案例答案一定要在【　】内写上你的选项。尽量保持卷面干净，清晰，别乱涂抹。

解题依据以下情况宜引用标准：近几年以来新颁布的规范、标准；技术复杂、内容详尽、涉及安全者，如《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014 等；智能楼宇等手册不会出现内容，如《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013、《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010 等。

解题依据以下情况宜引用手册：供配电相关试题宜用《工业与民用配电设计手册》第四版；电气传动相关试题宜用《钢铁企业电力设计手册》、《电气传动自动化技术手册》第三版；送电线路相关试题宜用《电力工程高压送电线路设计手册 》第二版；照明相关试题宜用《照明设计手册》第三版。

当考试所用到的设计手册的内容与规程、规范不一致时，以规程、规范为准。

依据书写只写规范号或简称，如“配电手册”“GB 50054”也是可以的。需要注意，在人工复评时有可能会判为答题依据的引用条文号与标准答案不完全一致从而不得分，详见考卷评分标准。

3）答题涂卡任务最为重要，建议每答一题，在案例答案中【　】填写选项，找到题目涂卡，在准考证上记录自己的答案（方便对答案），建议不要留最后一次性涂卡。要注意的是，答题卡分竖排和横排两种，涂卡时一定要题号与考卷中一一对应。

4）案例下午 40 题任选 25 题怎么选择？案例考试每 5 道小题组成一道大题目，其中 3~4 道是热门、普通考点的题目，可会有 1~2 道冷门题目，做题按照先易后难的原则，题目过难就放弃。注意，如果选择大于 25 题，则以题号顺序前 25 题在计分范围，在 25 题之后的题目不会给分。其中电气传动、建筑物防雷、过电压、智能楼宇等章节容易出现冷门题或计算量巨大的题目，需要有所取舍。如果一道题耗时 5 分钟无解题头绪，建议放弃。

【考卷评分标准】

1）考生在试卷上作答，不得使用铅笔，否则视为无效。

2）在试卷上书写与题意无关的语言，或在试卷上做标记的，均按违纪试卷处理。

3）每道题只有 0 分或 2 分，无其他分数。

4）答案未填在【　】中的，不得分，但试题答案位置处填写答案后又涂抹，另填在括号外的答案有效。

5）仅有答案无解答过程，无论答案对错均不得分。

6）答题依据的引用条文号与标准答案完全一致（章、节、款、条），可没有文字描述，得分。

7）没有引用条文号，但文字叙述与标准答案基本吻合的，得分。

8）没有列出公式，直接代入数据计算，结果与标准答案一致的，得分。

9）列出公式，没有代入数据，虽然结果与标准答案一致的，不得分。

10）采用排除法解题，结果与标准答案一致的，得分。

11）引用手册（包括复习指导书）内容的一定要有文字描述，并与标准答案内容一致的，得分。仅写出手册名称（包括复习指导书）、页数的，不得分。

12）需要论述说明有何优点或特点的试题，一定要有文字描述并与标准答案内容一致的，得分。

13）答题依据的引用条文号与标准答案不一致，同时又没有文字说明的，提请专家查相关条文后确认是否得分。

14）没有按标准答案给定的方法计算，但结果与标准答案一致的，需经专家确认是否得分。

0.6　获取证书

【如何查成绩】

登录中国人事考试网（www. cpta. com. cn），单击“成绩查询”，选择当年 9 月份考试，选择“注册电气工程师”输入身份证号等信息，即可查询。成绩公布时间约为当年 12 月或次年 1 月。往年及格标准为：第一天专业知识考试分数之和 120 分，且第二天专业案例考试分数之和 60 分。

【如何获取资格证书】

参加专业考试的人员必须在一个年度内通过全部科目。考试合格后，由省（区、市）人力资源社会保障部门颁发《中华人民共和国注册电气工程师执业资格证书》，在全国范围内有效。往年的颁发时间约在 4~6 月之间，不同省份地区会有差异。

下　　篇

注册电气工程师专业考试典型考点详解

第 1 章　低压安全防护与低压保护电器

【知识点导图】

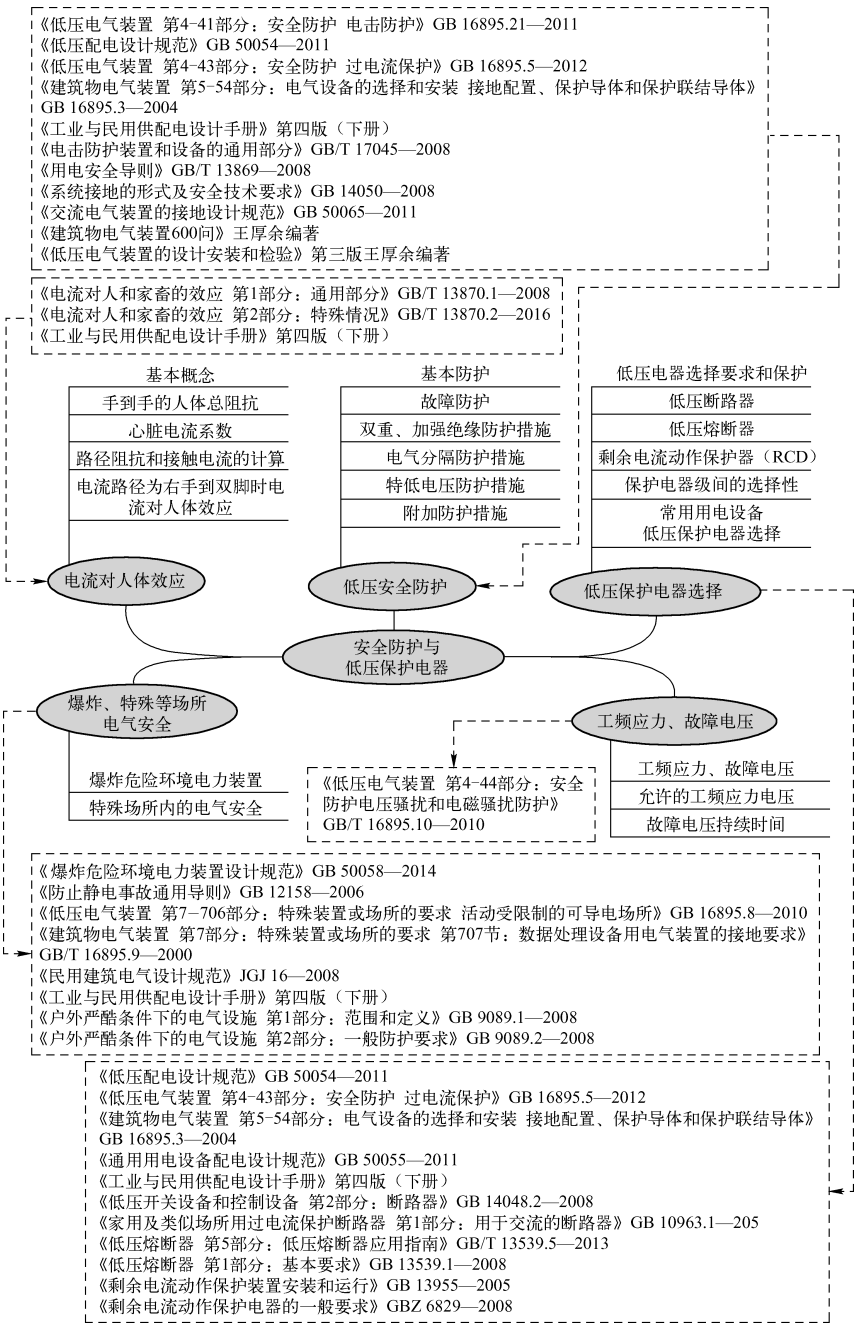


图 1-1　低压安全防护与低压保护电器知识点导图

图 1-1 所示的低压安全防护与低压保护电器知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。其中必考点有电流对人体效应，故障防护中 TN 系统等电位联结、重复接地间接接触保护计算，故障防护中 TT 系统间接接触保护计算，低压断路器、低压熔断器、剩余电流动作保护器选择和级间配合，爆炸危险环境电力装置、特殊场所内的电气安全，在本章中都给出了相关的例题。

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 11 章对低压配电线路保护和低压电器选择内容根据新规范要求进行了全面的更新，特别是对爆炸危险环境的低压电器设备选择、火灾危险环境的电器选择两小节。第 12 章完善了常用用电设备配电低压电器的选择。第 13 章根据新规范要求更新了电流通过人体的效应、电击防护小节，更全面地完善了特殊装置或场所的电气安全小节。

1.1 电流对人体效应

【知识点说明】

电流对人体效应属于重要考点，依据《电流对人和家畜的效应 第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）15.1 节等。要求熟练掌握基本概念中偏差系数、感知阈、反应阈、摆脱阈、等效因数等；熟练掌握流过人体不同路径阻抗和接触电流的计算、电流路径为右手到双脚时电流对人体效应、心脏电流系数。

依据书目：

《电流对人和家畜的效应 第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008

《电流对人和家畜的效应 第 2 部分：特殊情况》GB/T 13870.2—2016

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《电流对人和家畜的效应 第 3 部分：电流通过家畜躯体的效应》GB/T 13870.3—2003

《电流对人和家畜的效应 第 5 部分：生理效应的接触电压阈值》GB/T 13870.5—2016

例题 1-1：在某外部环境条件下，交流电流路径为手到手的人体总阻抗 Z_T，见表 1-1。已知偏差系数 $F_D(5\%)=0.74$，$F_D(95\%)=1.35$，一手到一脚的人体部分内阻抗百分比分布中膝盖到脚占比为 32.3%，电流流过膝盖时的附加内阻抗百分比为 3.3%，电流路径为一手到一脚的人体总阻抗为手到手的人体总阻抗百分比的 80%，请计算在相同的外部环境条件下，当接触电压为 1000 V，人体总阻抗为不超过被测对象的 5%，且电流路径为一手到膝盖时接触电流应与下列哪项数值最接近？（忽略阻抗中的电容分量及皮肤阻抗）（供配电 2017 年考题）

表 1-1　不超过被测对象 95%的人体总阻抗（手到手）Z_T

接触电压/V	人体总阻抗 Z_T/Ω
400	1340
500	1210
700	1100
1000	1100

（A）2.34 A　　（B）2.45 A　　（C）2.92 A　　（D）3.06 A

答案：【 D 】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应 第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008 附录 D 公式和例 1。

第 3.1.10 条，根据偏差系数定义进行换算：

$$F_D(5\%,1000\,\mathrm{V})=\frac{Z_{T(5\%,1000\,\mathrm{V})}}{Z_{T(50\%,1000\,\mathrm{V})}}=0.74$$

$$F_D(95\%,1000\,\mathrm{V})=\frac{Z_{T(95\%,1000\,\mathrm{V})}}{Z_{T(50\%,1000\,\mathrm{V})}}=\frac{1100}{Z_{T(50\%,1000\,\mathrm{V})}}=1.35$$

两公式代入计算得 $Z_{T(5\%,1000\,\mathrm{V})}=0.74\times\frac{1100}{1.35}\Omega=602.9\,\Omega$

一手到一脚的人体总阻抗为 $Z_{TA}(1\mathrm{H}-1\mathrm{F})=0.8Z_{TA}(\mathrm{H}-\mathrm{H})=0.8\times602.9\,\Omega=482.4\,\Omega$

由图 1-2，电击点即电流流入处要加入部分内阻抗，流出不计，电流路径为一手到膝盖时的阻抗：

$$Z_{TX}=X\%\times Z_{TA}(1\mathrm{H}-1\mathrm{F})=(1-32.3\%)\times483.4\,\Omega=326.6\,\Omega$$

接触电压为 1000 V，电流路径为膝盖到脚时接触电流：$I_T=\frac{U_T}{Z_{TX}}=\frac{1000}{326.6}\mathrm{A}=3.06\,\mathrm{A}$。

【知识点解析】

人体内阻抗精确计算法：

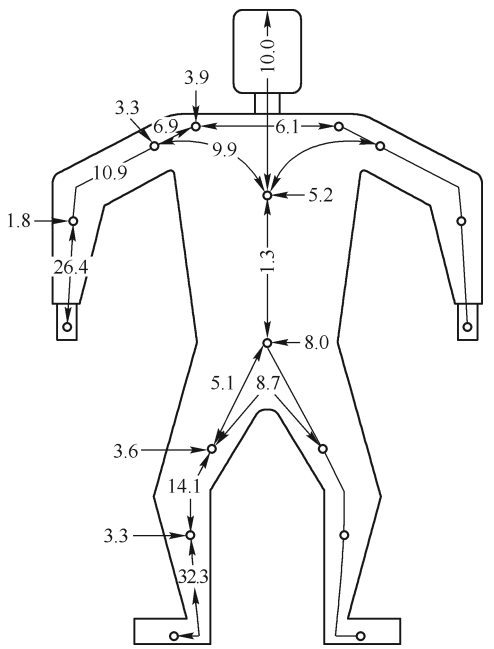


图 1-2　人体内部的部分阻抗 Z_{ip}

注：数字表示相对于路径为一手到一脚的相关人体部分内阻抗的百分数。

注释：为了计算所给出的电流路径的人体总阻抗 Z_T，对电流流通的人体所有部分的部分内阻抗 Z_{ip} 以及接触表面积的皮肤阻抗都必须相加。人体外面的数字表示，当电流进入那

点时，才要加到总数中的部分内阻抗。

下面以接触表面积相同（大的接触面积）计算值为例：

Z_{TA}(H-H)为人体手到手总阻抗；$X\%$为不同路径人体内阻抗百分数；Z_{TA}(1H-1F)为人体一手到一脚总阻抗 $Z_{TA}(1H-1F)=0.8Z_{TA}(H-H)$。

人体某部位到某部位的总阻抗为 Z_T，具体人体某部位到某部位的阻抗为 Z_{ip}，电流流入皮肤阻抗为 Z_{S1}（默认为图 1-2 中人体外部数字箭头指入的值），电流流出皮肤阻抗为 Z_{S2}（默认为 0），则

$$Z_T=Z_{S1}+Z_{ip}+Z_{S2}=X\%\times Z_{TA}(1H-1F)=X\%\times 0.8Z_{TA}(H-H)$$

例题 1-2：50 Hz 交流电通过人身达一定数量时，将引起人身发生心室纤维性颤动现象，当电流通路为左手到右脚时这一数值为 50 mA，那么，当电流通路变为右手到双脚时，引起发生心室纤维性颤动相同的效应的人身电流是多少？（供配电 2016 年考题）

（A）30 mA　　（B）50 mA　　（C）62.5 mA　　（D）70 mA

答案：【C】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008。

（1）先将左手到右脚转换为左手到双脚通路

查表 12 中心脏电流系数 $F=1$

左手到双脚通路 $I_{ref}=50$ mA

（2）再将左手到双脚通路转换为右手到双脚通路

查表 12 中心脏电流系数 $F=0.8$

左手到双脚通路 $I_h=I_{ref}/F=50/0.8$ mA $=62.5$ mA

【知识点解析】

心脏电流系数可用以计算通过除左手到双脚的电流通路以外的电流 I_h，此电流与图 1-3 中的左手到双脚的 I_{ref}具有同样的心室纤维性颤动的危险：

$$I_h=I_{ref}/F$$

式中，I_{ref}为图 1-3 中的路径为左手到双脚的人体电流；I_h 为表 1-2 中各路径的人体电流；F 为表 1-2 中心脏电流系数。

左手到双脚的交流电流对人体效应约定的时间/电流区域见图 1-3 和表 1-2。

表 1-2　不同电流路径的心脏电流系数 *F*

电 流 路 径	心脏电流系数
左手到左脚、右脚或双脚	1.0
双手到双脚	1.0
左手到右手	0.4
右手到左脚、右脚或双脚	0.8
背脊到右手	0.3
背脊到左手	0.7
胸膛到右手	1.3
胸膛到左手	1.5
臀部到左手、右手或到双手	0.7
左脚到右脚	0.04

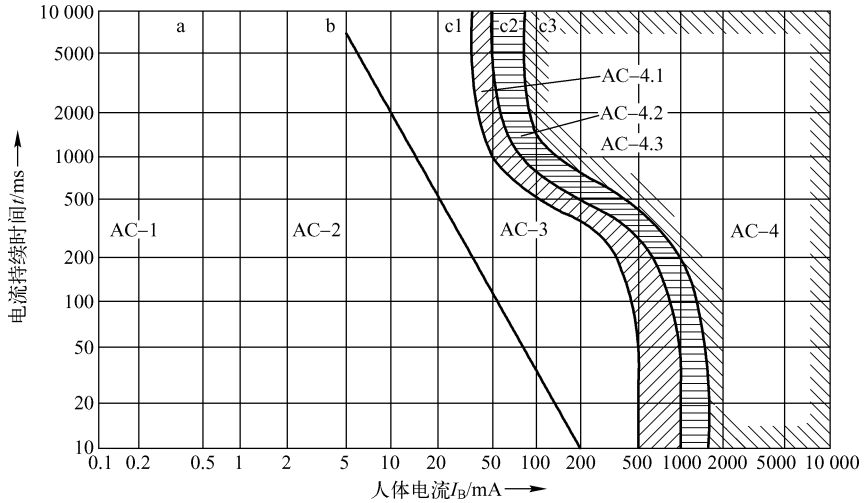


图 1-3　左手到双脚的交流电流（15~100 Hz）对人体效应约定的时间/电流区域

例题 1-3：某高层办公楼供电电源为交流 10 kV，频率为 50 Hz，10/0.4 kV 变电所设在室内，10 kV 侧采用低电阻接地系统，400/230 V 侧接地形式采用 TN-S 系统且低压配电装置采用保护总等电位联结系统。因低压系统发生接地故障，办公室有一电气设备的金属外壳带电，若已知干燥环境，大的接触表面积，50/60 Hz 交流电流路径为手到手的人体总阻抗 Z_T 见表 1-3，若人体碰触到该电气设备，交流接触电压为 75 V，干燥条件，大的接触表面积，电流路径为人体双手对身体躯干形成并联，接触电流应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）50 mA　　（B）75 mA　　（C）150 mA　　（D）214 mA

答案：【C】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应 第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008 附录 D 公式和例 1、图 3。

查表 75 V 路径为手到手的人体总阻抗 Z_T 为 2000 Ω，人体双手对躯干如图 1-4 所示，电流路径为人体双手对身体躯干形成并联，人体阻抗为

表 1-3　人体总阻抗 Z_T 表

接触电压/V	人体总阻抗 Z_T/Ω
25	3250
50	2500
75	2000
100	1725
125	1550
150	1400
175	1325
200	1275

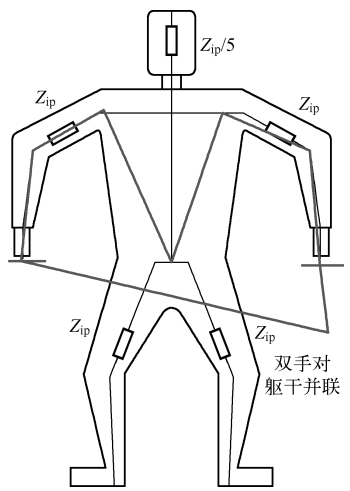


图 1-4　人体双手对躯干阻抗示意

$$Z'_{\mathrm{T}}=25\%\times Z_{\mathrm{T}}(\mathrm{H-H})=25\%\times 2000\ \Omega=500\ \Omega$$

电流路径为人体双手对身体躯干形成并联时的接触电流：

$$I_{\mathrm{T}}=\frac{U_{\mathrm{T}}}{Z'_{\mathrm{T}}}=\frac{75}{500}=0.15\ \mathrm{A}=150\ \mathrm{mA}$$

【知识点解析】

（1）指定电流路径的人体总阻抗和接触电流计算

接触电流 I_{T} 的计算对评估电击防护措施和电气事故的调查研究是很重要的，接触电流 I_{T} 的计算如下：

$$I_{\mathrm{T}}=\frac{U_{\mathrm{T}}}{Z_{\mathrm{T}}}$$

式中，U_{T} 为接触电压；Z_{T} 为指定电流路径、接触的表面积和接触条件的人体总阻抗。

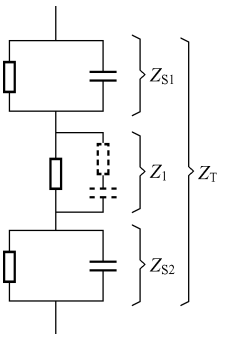


图 1-5　人体阻抗

（2）人体总阻抗计算（见图 1-5）

Z_{T}（总阻抗）= Z_1（内阻抗）+ Z_{S1}（皮肤阻抗）+Z_{S2}（皮肤阻抗）

接触电流流过人体不同路径的总阻抗 Z_{T} 参数说明：

大的接触表面积（10000 mm^2）阻抗 Z_{TA}；

中等的尺寸接触表面积（1000 mm^2）阻抗 Z_{TB}；

小的尺寸接触表面积（100 mm^2）阻抗 Z_{TC}；

未确定的接触表面积总阻抗 Z_{TX}。

括号内不同路径名称说明：H—手；1H—一手；2H—双手并联；F—脚；1F—一脚；2F—双脚并联；T—躯干。

环境条件：干燥条件、水湿润条件、盐水湿润条件；直流交流。

各种条件下的不同接触面积人体手到手总阻抗表格详见 GB/T 13870.1—2008 表 1～表 10。下面以接触表面积相同（大的接触面积）计算值为例说明各部分的计算。

Z_{TA}（H-H）：人体手到手总阻抗，$Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-H})=2Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-T})$。

Z_{TA}（H-T）：人体手（一手）到躯干总阻抗，$Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-T})=Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{1H-T})=0.5Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-H})$。

Z_{TA}（1H-1F）：人体一手到一脚总阻抗，$Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{1H-1F})=0.8Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-H})$。

Z_{TA}（T-1F）：人体躯干到一脚总阻抗，$Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{T-1F})=Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{1H-1F})-Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-T})=0.3Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-H})$。

Z_{TA}（2H-T）：人体双手到躯干成并联总阻抗，$Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{2H-T})=0.5Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{1H-T})=0.25Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-H})$。

Z_{TA}（T-2F）：人体躯干到双脚成并联总阻抗，$Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{T-2F})=0.5Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{T-1F})=0.15Z_{\mathrm{TA}}(\mathrm{H-H})$。

Z_{T}：人体躯干到脚总阻抗，等于对应条件（环境条件、接触面积、双手单手）的手到躯干 Z_{TX}（H-T）加对应条件（环境条件、接触面积、双手单手）躯干到脚 Z_{TX}（T-F）的总阻抗值，即 $Z_{\mathrm{T}}=Z_{\mathrm{TX}}(\mathrm{H-T})+Z_{\mathrm{TX}}(\mathrm{T-F})$。

注：以上公式来自 GB/T 13870.1—2008 附录 D。

例题 1-4：某城市拟在市中心建 400 m 高层建筑，内设 35/10 kV 及若干 10/0.4 kV 变电所，高低压共同接地。低压侧采用 TN-S 系统，拟采用剩余电流动作保护电器作为手持式和移动式设备的间接接触电器，为确保电流通过人体无有害的电生理效应，按右手到

双脚流过 25 mA 电流计，保护电器的最大分断时间不应超过下列哪个数值？（供配电 2012 年考题）

（A）0.2 s　　（B）0.3 s　　（C）0.5 s　　（D）0.6 s

答案：【C】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应　第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008。

查表 2 右手到双脚系数为 $F=0.8$，流过左手到双脚的电流 $I_{ref}=I_h F=25\times0.8\ mA=20\ mA$，查图 20 中当超越曲线 c1 时会有人体有害的电生理效应，对应此曲线查得 500 ms。

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.9 条或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护　电击防护》GB 16895.21—2011 表 41.1。该手持式和移动式设备电压等级为 220 V，TN 系统的最长切断时间不应超过 0.4 s；电压等级为 380 V，TN 系统的最长切断时间不应超过 0.2 s。

本题为确保电流通过人体无有害的电生理效应，最大分断时间为 0.5 s，该时间超过规范规定时间，请考生注意！

例题 1-5：直流/交流的电流对人的效应对比时，以电击持续时间超过一个心搏周期，并且心室纤维性颤动概率为 50%为依据，对应电击持续时间 10 s 的直流/交流等效因数约为下列哪项数值？

（A）3.5　　（B）3.0　　（C）5.0　　（D）3.75

答案：【D】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应 第 1 部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008 第 3.3.2 条。

心室纤维性颤动概率为 50%，持续时间为 10 s，查图 20、图 22 中对应上限值 c3 曲线为

$$I_{d\cdot c\text{-纤维性颤动}}=300\ mA,\quad I_{a\cdot c\text{-纤维性颤动}}=80\ mA$$

直流/交流等效因数为 $k=\dfrac{I_{d\cdot c\text{-纤维性颤动}}}{I_{a\cdot c\text{-纤维性颤动(r\cdot m\cdot s)}}}=\dfrac{300\ mA}{80\ mA}=3.75$

例题 1-6：下述哪一项电流值在电流通过人体的效应中被称为“反应阈”？

（A）通过人体能引起任何感觉的最小电流值

（B）通过人体能引起肌肉不自觉收缩的最小电流值

（C）大于 30 mA 的电流值

（D）能引起心室纤维颤抖的最小电流值

答案：【B】

解答过程：依据《电流对人体和家畜的效应 第 1 部分：通用部分》GB 13870.1—2008 第 3.2.2 条。

例题 1-7：50/60 Hz 交流电流路径（大的接触表面积）为手到手的人体总阻抗，下列哪一项描述是错误的？

（A）在干燥条件下，当接触电压为 100 V 时，95%被测对象的人体总阻抗为 3125 Ω

（B）在水湿润条件下，当接触电压为 125 V 时，50%的被测对象的人体总阻抗为 1550 Ω

（C）在盐水温润条件下，当接触电压为 200 V 时，5%被测对象的人体总阻抗为 770 Ω

（D）在盐水温润条件下，人体总阻抗被舍入到 5 的整数倍数值

答案：【C】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应　第1部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008。

第4.5.1条中，在盐水温润条件下，由表3中查出，当接触电压为200 V时，5%被测对象的人体总阻抗为790 Ω；表3之注4，人体总阻抗被舍入到5的整数倍数值。答案C错。

例题1-8：某食盐加工厂一个车间，设备采用安全特低电压（SELV）额定交流电压为25 V，假设工作环境为盐水润湿条件下，工作人员发生误触电，电流路径为双手对身体躯干成并联。若已知盐水润湿条件下人体手到手的总阻抗为1300 Ω，则通过人体的接触电流为下列哪项数值？

（A）50 mA　　（B）77 mA　　（C）150 mA　　（D）214 mA

答案：【B】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应 第1部分：通用部分》GB/T 13870.1—2008附录D公式和例3、图3。

已知人体手到手的总阻抗为1300 Ω，当电流路径为人体双手对身体躯干形成并联时，人体阻抗为

$$Z'_{\mathrm{T}} = 25\% \times Z_{\mathrm{T}}(\mathrm{H-H}) = 25\% \times 1300\ \Omega = 325\ \Omega$$

电流路径为人体双手对身体躯干形成并联时的接触电流：

$$I_{\mathrm{T}} = \frac{U_{\mathrm{T}}}{Z'_{\mathrm{T}}} = \frac{25}{325}\mathrm{A} = 77\ \mathrm{mA}$$

例题1-9~1-10：在电容器对人体放电效应的实验中，已知电容器的电容量 $C = 1\ \mu\mathrm{F}$，电容器充电电压为交流1000 V，时间常数 $T = 1\ \mathrm{ms}$、电击持续时间 $t_{\mathrm{i}} = 3\ \mathrm{ms}$，电流路径为一手到一脚的总阻抗为1000 Ω。请回答以下问题。

1-9：电容器对人体放电的效应中，放电电流方均根值为下列哪项数值？

（A）0.25 A　　（B）0.41 A　　（C）1 A　　（D）4.1 A

答案：【B】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应 第2部分：特殊情况》GB/T 13870.2—2016的11.4.2节示例1。

电容器放电电流的峰值为

$$I_{\mathrm{C(p)}} = \frac{U_{\mathrm{C}}}{R_{\mathrm{i}}} = \frac{1000}{1000}\mathrm{A} = 1\ \mathrm{A}$$

放电电流方均根值为

$$I_{\mathrm{Crms}} = \frac{I_{\mathrm{C(p)}}}{\sqrt{6}} = \frac{1}{\sqrt{6}}\mathrm{A} = 0.41\ \mathrm{A}$$

1-10：电容器对人体放电的效应中，若已知双手干燥，大接触面积接触，致颤电荷量为 $10^{-3}\mathrm{A}\cdot\mathrm{s}$，放电能量为0.5 W·s，则比致颤能量和生理效应为下列哪一项？

（A）$0.5\times10^{-3}\mathrm{A}^2\cdot\mathrm{s}$，致痛　　（B）$0.7\times10^{-3}\mathrm{A}^2\cdot\mathrm{s}$，致痛

（C）$5\times10^{-3}\mathrm{A}^2\cdot\mathrm{s}$，不适　　（D）$50\times10^{-3}\mathrm{A}^2\cdot\mathrm{s}$，会发生心颤

答案：【A】

解答过程：依据《电流对人和家畜的效应 第2部分：特殊情况》GB/T 13870.2—2016的11.4.2节示例1。

已知放电能量为0.5 W·s，比致颤能量为

$$F_e \approx \frac{W_c}{R_i} = \frac{0.5}{1000}\mathrm{A^2 \cdot s} = 0.5\times10^{-3}\mathrm{A^2 \cdot s}$$

已知致颤电荷量为 10^{-3}A·s，电容器电容量为 1 μF，充电电压为交流 1000 V，查图 19 中为致痛区。

1.2 低压安全防护

【知识点说明】

1）基本防护、故障防护属于重要考点，依据《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护 》GB 16895.21—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）15.2 节、《低压配电设计规范》GB 50054—2011 等。要求熟练掌握安全电压、接触电压、预期接触电压、预期接触电压限值的概念；掌握基本防护中的基本绝缘、遮栏或外护物、阻挡物、伸臂范围等；熟练掌握故障防护中 TN 系统等电位联结、重复接地等间接接触保护计算；掌握故障防护中 TT 系统间接接触保护计算；了解故障防护中 IT 系统间接接触保护计算。

2）双重、加强绝缘、电气分隔、特低电压防护措施属于普通考点，依据《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护 》GB 16895.21—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）15.2 节、《低压配电设计规范》GB 50054—2011 等。要求掌握双重、加强绝缘、电气分隔、特低电压防护措施要求。

3）附加防护属于重要考点，依据《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）15.2 节、《低压配电设计规范》GB 50054—2011 等。要求熟练掌握辅助等电位联结时 RCD 保护计算。

4）低压安全防护的基本知识在规范和手册中介绍不详细，考生可参考《建筑物电气装置 600 问》、《低压电气装置的设计安装和检验》第二版等书籍辅助学习。

依据书目：

《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护　电击防护 》GB 16895.21—2011

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

《低压电气装置 第 4-43 部分：安全防护　过电流保护》GB 16895.5—2012

《建筑物电气装置　第 5-54 部分：电气设备的选择和安装　接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3—2004

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《电击防护装置和设备的通用部分》GB/T 17045—2008

《用电安全导则》GB/T 13869—2008

《系统接地的形式及安全技术要求》GB 14050—2008

《交流电气装置的接地设计规范》GB 50065—2011

参考书目：

《建筑物电气装置 600 问》王厚余编著

《低压电气装置的设计安装和检验》第三版 王厚余编著

例题 1-11：一建筑物内的相对地标称电压为 AC220 V，低压配电系统采用 TN-S 接地形式，对插座回路采用额定电流为 16 A 的断路器作馈电保护，且瞬动脱扣倍数为 10 倍。现需

在此插座上使用标识为Ⅰ类防触电类别的手电钻，手电钻连接电缆单位长度相保阻抗为 Z_L = 8.6 Ω/km（不计从馈电开关到插座之间的线路阻抗及系统阻抗）。手段钻连接长度不大于多少时，才能满足防间接接触保护的要求？（供配电 2014 年考题）

（A）28 m　　（B）123 m　　（C）160 m　　（D）212 m

答案：【B】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条及第 6.2.4 条或《低压电气装置 第4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.4.4 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1455 页式（15.2-1）。

设线路长度为 L，当短路保护电器为断路器时，动作电流不应小于断路器瞬时脱扣器整定电流的 1.3 倍，即

$$Z_S I_a = Z_L L \times 1.3 I_d = 8.6L \times 1.3 \times 16 \times 10 \leqslant U_0 = 220$$

线路长度为 $L \leqslant 0.123\ \text{km} = 123\ \text{m}$。

例题 1-12：用标称相电压为 AC220 V，50 Hz 的 TT 系统为一户外单相设备供电，设备的防触电类别为Ⅰ类。TT 系统电源侧接地电阻为 4 Ω，供电电缆的电阻为 0.8 Ω，采用带漏电模块的断路器作馈电保护，断路器脱扣瞬动电流整定为 100 A，额定漏动作电流为 0.5 A，不计设备侧接地线的阻抗。设备侧接地阻抗最大为下列哪项数值时，能满足防间接接触防护的要求？（供配电 2014 年考题）

（A）0.5 Ω　　（B）95.6 Ω　　（C）100 Ω　　（D）440 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 式（5.2.15）、第 5.2.18 条或《低压电气装置 第4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.5.3 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1458 页式（15.2-3）。

根据 TT 系统中配电线路的间接接触防护的动作特性，设备侧接地阻抗：

$$R_A \leqslant 50/I_{\Delta n} = 50/0.5\ \Omega = 100\ \Omega$$

【知识点解析】

1）TT 系统中，配电线路内由同一间接接触防护电器保护的外露可导电部分，应用保护导体连接至公用或各自的接地极上。当有多级保护时，各级应有各自的或共同的接地极。

2）TT 系统配电线路间接接触防护电器的动作特性，应符合下式的要求：

$$R_A I_a \leqslant 50\ \text{V}$$

式中，R_A 为外露可导电部分的接地电阻和保护导体电阻之和（Ω）。

3）TT 系统中，配电线路的间接接触防护的保护电器应采用剩余电流动作保护电器或过电流保护电器。

例题 1-13：一座 35/10 kV 变电站附属于某公共建筑物内并为该建筑物供电。建筑物内下级 10/0.4 kV 变压器兼站用变。35 kV 系统采用高电阻接地方式，10 kV 侧单相接地电容电流为 15 A，采用经消弧线圈接地，0.4 kV 侧采用 TN-S 系统，各变电站及建筑物共用接地系统。假定低压接地故障回路的阻抗为 25 mΩ，则变电所低压侧该配电回路间接接触动作电流最接近下列哪个数值？（供配电 2016 年考题）

（A）8.8 kA　　（B）9.2 kA　　（C）15.2 kA　　（D）16 kA

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.4.4 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1455 页式（15.2-1）。

根据 TN 系统中配电线路的间接接触防护电器的动作特征，间接接触动作电流为

$$I_a = \frac{U_0}{Z_s} = \frac{220}{0.025}\text{A} = 8.8\text{ kA}$$

例题 1-14：某高层办公楼供电电源为交流 10 kV，频率为 50 Hz，10/0.4 kV 变电所设在室内，10 kV 侧采用低电阻接地系统，400/230 V 侧接地形式采用 TN-S 系统且低压配电装置采用保护总等电位联结系统。楼内某办公室配电箱配电给除湿机，除湿机为三相负载，功率为 15 kW，保证间接接触保护电器在规定时间内切断故障回路的动作电流为 756 A，为降低除湿机发生接地故障时与邻近暖气片之间的接触电压，在该办公室设置局部等电位联结。该配电箱除湿机供电线路中 PE 线的电阻值最大不应超过下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）66 mΩ　　（B）86 mΩ　　（C）146 mΩ　　（D）291 mΩ

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.6.4 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1464 页式（15.2-8）。

局部等电位联结时切除故障的要求中，PE 线的电阻值为

$$R \leqslant \frac{50}{I_a} = \frac{50}{756}\Omega = 0.0661\ \Omega = 66.1\ \text{m}\Omega$$

【知识点解析】

交流系统局部等电位联结或辅助等电位联结时切除故障的要求：

当电气装置或电气装置某一部分发生接地故障后间接接触的保护电器不能满足自动切断电源的要求时，尚应在局部范围内可导电部分再做一次局部等电位联结；亦可将伸臂范围内能同时触及的两个可导电部分之间做辅助等电位联结。局部等电位联结或辅助等电位联结的有效性，应符合下式的要求：

$$R \leqslant \frac{50}{I_a}$$

式中，R 为可同时触及的外露可导电部分和装置外可导电部分之间，故障电流产生的电压降引起接触电压的一段线路的电阻（Ω）；I_a 为保证间接接触保护电器在规定时间内切断故障回路的动作电流（A）。

例题 1-15：某变压器的配电线路如图 1-6 所示，已知变压器电阻 $R_T = 0.02\ \Omega$，图中为设备供电电缆相线与 PEN 线截面相等，各相线单位长度电阻值均为 6.5 Ω/km，忽略其他未知电阻、电抗的影响，当设备 A 发生相线对设备外壳短路故障时，计算设备 B 外壳的对地故障电压应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）30.80 V　　（B）33.0 V　　（C）33.80 V　　（D）50.98 V

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

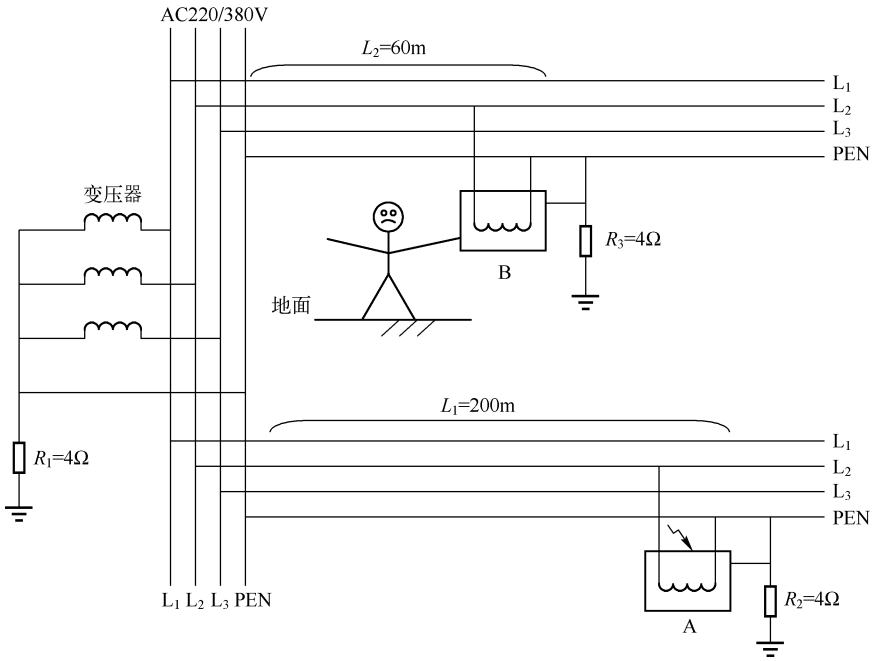


图 1-6　配电线路发生故障图

本题 TN-C 系统外部有两路局部 TT 接线设备，设备 A 故障，设备 B 外壳处传递故障电压，示意图如图 1-7 所示。

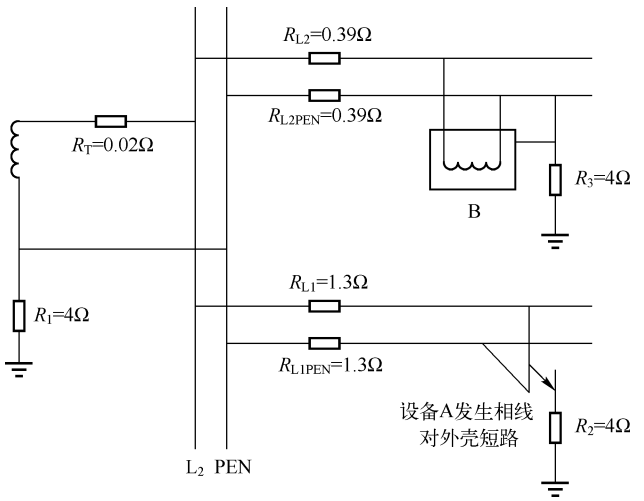


图 1-7　配电线路发生故障示意图

假设设备 B 开路状态，忽略其他未知电阻、电抗的影响以及三相不平衡中性点电压偏差的影响，当设备 A 发生相线对设备外壳短路故障时，系统设备接地认为短接，简化后电路如图 1-8 所示。

设备 A 发生相线对设备外壳短路故障时，故障点的故障电流为

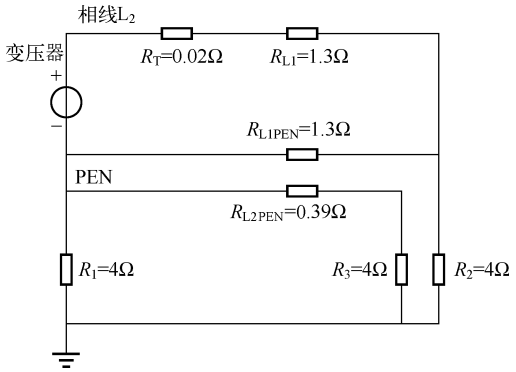


图 1-8　配电线路发生接地故障电路图

$$I_a=\frac{U_0}{Z_s}=\frac{U_0}{R_T+R_{L1}+R_{L1PEN}\parallel[R_2+R_1\parallel(R_3+R_{L2PEN})]}$$

$$=\frac{220}{1.32+1.3\parallel(4+4\parallel4.39)}\text{A}=92\text{ A}$$

计算设备 B 外壳的对地故障电压应为电阻 R_3 处的对地电压，如图 1-8 所示。

$$I_{R3}=I_a\frac{R_{L1PEN}}{R_{L1PEN}+R_2+R_1\parallel(R_3+R_{L2PEN})}\frac{R_1}{R_1+(R_3+R_{L2PEN})}$$

$$=92\times\frac{1.3}{1.3+6.093}\times\frac{4}{4+4.39}\text{A}=7.71\text{ A}$$

$$U_{R3}=I_{R3}R_3=7.71\times4\text{ V}=30.85\text{ V}$$

例题 1-16：某办公楼供电电源 10 kV 电网中性点为小电阻接地系统，双路 10 kV 高压电缆进户，楼内 10 kV 高压与低压电气装置共用接地网。楼内安装 AC220 V 落地式风机盘管，电源相线与 PE 线等截面，配电线路接线图如图 1-9 所示，已知：变压器电阻 $R_s=0.015\,\Omega$，中性点接地电阻 $R_a=0.5\,\Omega$，全部相线电阻 $R_t=0.5\,\Omega$，人体电阻 $R_A=1000\,\Omega$，人体站立点的大地过渡电阻 $R_g=20\,\Omega$，其他未知电阻、电抗、阻抗，计算时忽略不计。发生如图短路故障时人体接触外壳的接触电压 U_k 为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）106.146 V　　（B）108.286 V　　（C）108.374 V　　（D）216.000 V

答案：【A】

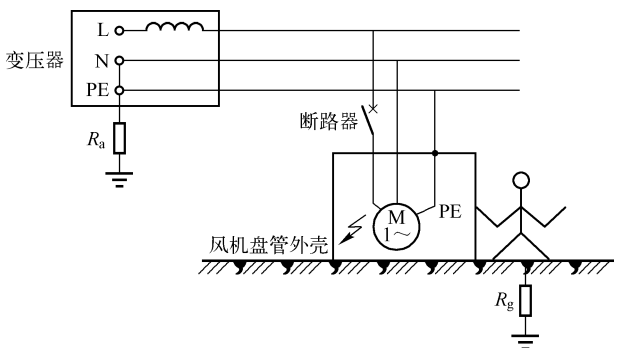


图 1-9　办公楼配电线路接线图

解答过程：依据《系统接地的形式及安全技术要求》GB 14050—2008 第 3.8 条。

接触电压是指人体同时触及的两点之间意外出现的电压。此术语仅用于间接接触保护有关方面。在某些情况下，接触电压值可能受到触及这些部分的人的阻抗的明显影响。

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.4.4 条。

风机盘管属于 AC220 V 的三线制 TN-S 系统，PE 线 $R_{PE}=R_t=0.5\,\Omega$（电源相线与 PE 线等截面等长度），其他未知电阻、电抗、阻抗，计算时忽略不计，其阻抗电路图如图 1-10 所示。

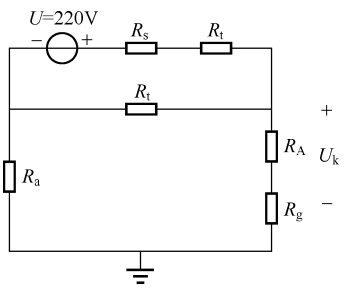


图 1-10　阻抗电路图

回路总电阻：

$$R=\left[0.5+0.015+\frac{(1000+20+0.5)\times 0.5}{1000+20+0.5+0.5}\right]\Omega=1.014755\,\Omega$$

接地故障电流：

$$I_a=\frac{U}{Z_s}=\frac{220}{1.014755}\text{A}=216.8\text{ A}$$

通过人体的接地故障电流：$I'=\dfrac{0.5}{1000+20+0.5+0.5}\times 216.8\text{ A}=0.10617\text{ A}$

接触电压：$U_k=0.10617\times 1000\text{ V}=106.17\text{ V}$

【知识点解析】

交流 TN 系统中配电线路的间接接触防护电器的要求：

1）TN 系统中电气装置的所有外露可导电部分，应通过保护导体与电源系统的接地点连接。

2）TN 系统中配电线路的间接接触防护电器的动作特征，应符合下式的要求：

$$Z_sI_a\leqslant U_0$$

式中，Z_s为接地故障回路的阻抗（Ω），包括电源、电源到故障点之间的带电导体以及故障点到电源之间的保护导体的阻抗在内的阻抗，通常是指变压器阻抗和自变压器至接地故障处相导体和保护导体或保护接地中性导体的阻抗；U_0为相导体对地标称电压（V），低压一般是 220 V；I_a为保证保护电器在规定时间内切断故障回路的动作电流，其值不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍。

例题 1-17：某城市拟在市中心建一 400 m 高层建筑，当地海拔为 2000 m，主电源采用 35 kV进线，内设 35/10 kV 及若干 10/0.4 kV 变电所，高低压共同接地，如果低电压配电形式为 TN-S，开水间设 AC220 V/6 kW 热水器，间接接触保护断路器过电流整定值为 $I_n=32$ A，瞬时保护动作电流为 $I_a=6I_n$，电热水器旁 500 mm 处有一组暖气，为了人身安全，降低电热水器发生接地时电压，开水间做局部等电位联结，则产生接触电压的那段线路导体的电阻最大不应超过下列哪项数值？（供配电 2011 年考题改编）

（A）0.26 Ω　　（B）1.2 Ω　　（C）1.56 Ω　　（D）1.83 Ω

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.5 条、第 6.2.4 条或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.3.2.6 条。

为了人身安全，当发生接地故障时应保证主保护（瞬动保护）可靠动作，同时考虑被保护线路末端的短路电流不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍，所以接触电压的那段线路导体的电阻最大为

$$R \leqslant \frac{50}{I_a} = \frac{50}{6I_n} = \frac{50}{6\times 32}\Omega = 0.26\,\Omega$$

例题 1-18：某工程通信机房采用 TN 系统供电，用绝缘缆线敷设，室内要求有通信设备、网络、UPS 及接地设备。用电设备过电流保护器 5 s 时的动作电流为 200 A，通信机房内等电位联结，依据规范要求可能触及的外露可导电部分和外界可导电部分的电阻最大不应超过下列哪项数值？

（A）0.125 Ω　　（B）0.25 Ω　　（C）1 Ω　　（D）4 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.5 条、第 6.2.4 条或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.3.2.6 条。

由于题目中给出用电设备过电流保护器 5 s 时的动作电流 I_a 为 200 A，所以可能触及的外露可导电部分和外界可导电部分的电阻为

$$R \leqslant \frac{50}{I_a} = \frac{50}{200}\Omega = 0.25\,\Omega$$

例题 1-19～1-21：某座建筑物由一台 1000 kV·A 变压器采用 TN-C-S 系统供电，线路材质、长度和截面如图 1-11 所示，图中小间有移动式设备由末端配电器供电，回路首端装有单相 $I_n = 20$ A 断路器，建筑物做总等电位联结，已知截面积为 50 mm²、6 mm²、2.5 mm² 铜电缆每芯导体在短路时每公里的热态电阻值为 0.4 Ω、3 Ω、8 Ω。请回答下列问题。

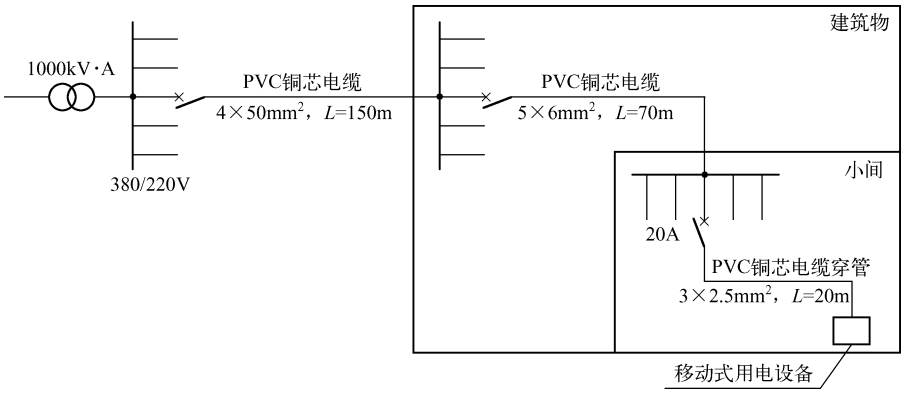


图 1-11　供电线路接线及参数

1-19：该移动式设备发生相线碰外壳接地故障时，回路故障电流 I_d 最接近下列哪一项数值？（故障点阻抗、变压器零序阻抗和电缆电抗可忽略不计）（供配电 2011 年考题）

（A）171 A　　（B）256 A　　（C）442 A　　（D）512 A

答案：【B】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条和条文说明第 5.2.10 条。

根据题目要求，故障点阻抗、变压器零序阻抗和电缆电抗忽略不计，仅考虑供电电缆电阻。接地故障回路为变压器 TN-C 供电回路 4×50 mm²、建筑物内三相五线 TN-S 回路 5×6 mm²、小间内单相三线 TN-S 回路 3×2.5 mm²，形成的故障电流回路如图 1-12 所示，回路故障电流 I_d 计算如下：

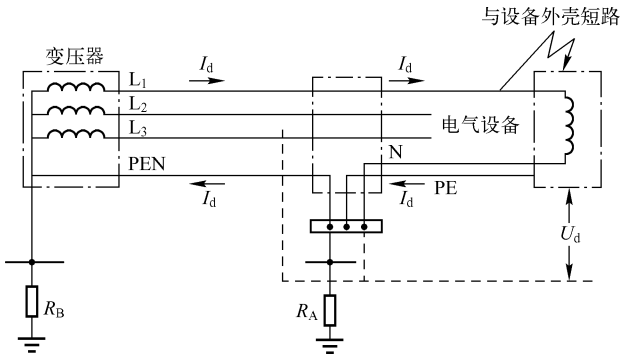


图 1-12　故障电流回路

$$I_d=\frac{U_0}{Z_s}=\frac{U_0}{R_1+R_{l1}+R_{l2}+R_{PEN}+R_{PE1}+R_{PE2}}=\frac{220}{2\times(0.4\times0.15+3\times0.07+8\times0.02)}\text{A}=256\text{ A}$$

1-20：假设移动设备相线碰外壳的接地故障电流为 200 A，则该移动设备金属外壳的预期接触电压 U_d 最接近下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）74 V　　（B）86 V　　（C）110 V　　（D）220 V

答案：【A】

解答过程：依据《系统接地的形式及安全技术要求》GB 14050—2008 第 3.9 条。

预期接触电压是指电气装置中发生阻抗（故障点阻抗、故障电流通过人体阻抗等）可以忽略的故障时，可能出现的最高接触电压。

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 条文说明第 5.2.10 条。

根据题目要求故障点阻抗、变压器零序阻抗和电缆电抗等忽略，仅考虑供电电缆电阻。接地故障回路为变压器 TN-C 供电回路 4×50 mm²、建筑物内三相五线 TN-S 回路 5×6 mm²、小间内单相三线 TN-S 回路 3×2.5 mm²，变压器中性点接地电阻和接地电阻忽略不计，形成的故障电流回路如图 1-12 所示，因建筑物总等电位联结，小间内移动设备金属外壳的预期接触电压 U_d 计算如下：

$$U_d=I_dZ_s=I_d(R_{PE1}+R_{PE2})=200\times(3\times0.07+8\times0.02)\text{ V}=74\text{ V}$$

【知识点解析】

建筑物做总等电位联结分析：

由于等电位作用，建筑物内的所有外露可导电部分和外界可导电部分都处于同一电压水平，不发生人身电击事故。图 1-13 为常用的 TN-C-S 系统，在电源进线处 PEN 导体分成 PE 导体和 N 导体（N 导体从此处开始与 PE 导体绝缘），未安装总等电位联结，如果设备发生接地故障，忽略接地故障点的阻抗，R_A 与 R_B 串联后再与 R_{PEN} 并联，$R_A+R_B\gg R_{PEN}$；人体

阻抗 Z_h 与鞋袜和地板电阻 R_p 串联后再与 R_{PE} 并联，$Z_h+R_p \gg R_{PE}$，接地故障电流 I_d 流经相导体和 PE 导体、PEN 导体，返回变压器低压绕组，预期接触电压仅为总等电位联结范围内的 PE 导体的电压降，消除总等电位联结范围外 PEN 导体的电压降。

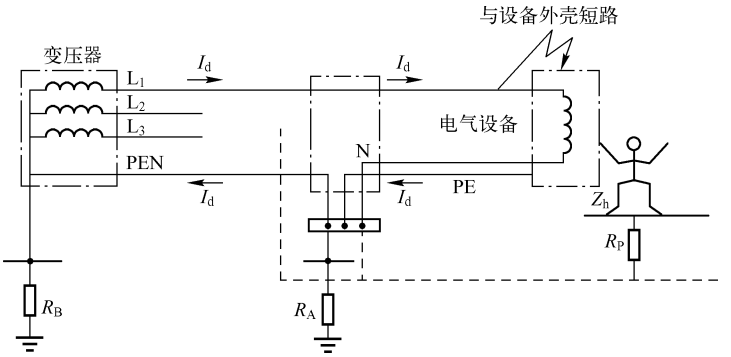


图 1-13　TN 系统等电位联结作用

1-21：如果在小间内做局部等电位联结，假设相线碰移动设备外壳的接地故障电流为 200 A，则该设备的接触电压 U_d 最接近下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）32 V　　（B）74 V　　（C）310 V　　（D）220 V

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 条文说明第 5.2.5 条或《工业与民用配电设计手册》第四版 第 1456 页（第三版第 920 页）。

根据题目要求，故障点阻抗、变压器零序阻抗和电缆电抗等忽略，仅考虑供电电缆电阻。接地故障回路为变压器 TN-C 供电回路 4×50 mm^2、建筑物内三相五线 TN-S 回路 5×6 mm^2、小间内单相三线 TN-S 回路 3×2.5 mm^2，变压器中性点接地电阻和接地电阻忽略不计，形成的故障电流回路如图 1-14 所示，A 处为小间内做局部等电位联结，此时移动设备的接触电压 U_d 计算如下：

$$U_d = I_d R_{PE2} = 200 \times (8 \times 0.02)\,V = 32\,V$$

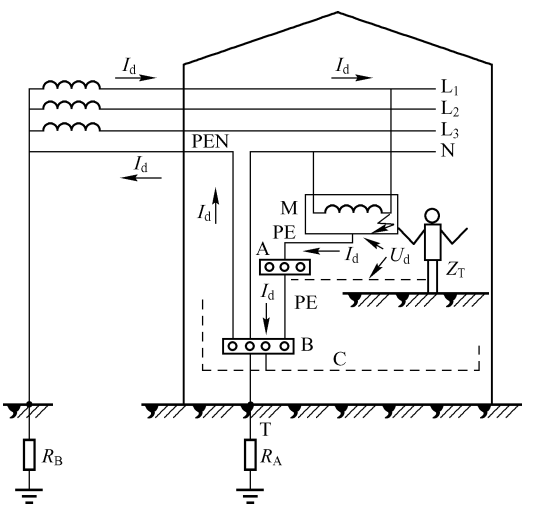


图 1-14　故障电流回路

【知识点解析】

总等电位联结虽然能大大降低接触电压，但如果建筑物离电源较远，建筑物内保护线路过长，则保护电器的动作时间和接触电压都可能超过规定的限值。

这时应在局部范围内再做一次等电位联结即局部等电位联结，如图 1-15 所示。局部等电位联结之前，图中人的双手承受的接触电压为电气设备与暖气片之间的电位差；其值为 a—b—c 段保护导体上的故障电流产生的电压降，由于此段线路较长，电压降超过 50 V，但因离电源距离远，故障电流不能使过电流保护器在 5 s 内切断故障线路。为保障人身安全，应如图虚线所示做局部等电位联结。这时接触电压降低为 a—b 段的保护导体的电压降，其值小于安全电压限值 50 V。

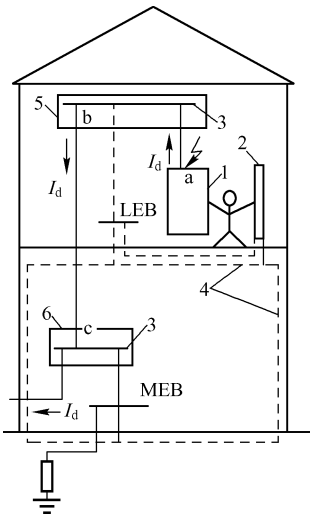


图 1-15　局部等电位联结的作用

1—电气设备　2—暖气片　3—保护导体　4—结构钢筋　5—末端配电箱　6—进线配电箱　I_d—故障电流

例题 1-22～1-26：某建筑物采用 TN-C-S 系统供电，建筑物地下室设有与大地绝缘的防水层。PEN 线进户后即分为 PE 线和 N 线，并用人工接地极将 PE 线重复接地。变电所系统接地 R_A 和建筑物重复接地 R_B 阻值分别为 4 Ω 及 10 Ω。各段线路的电阻值如图 1-16 所示，为简化计算可忽略工频条件下的回路导体电抗和变压器电抗。请回答下列问题。

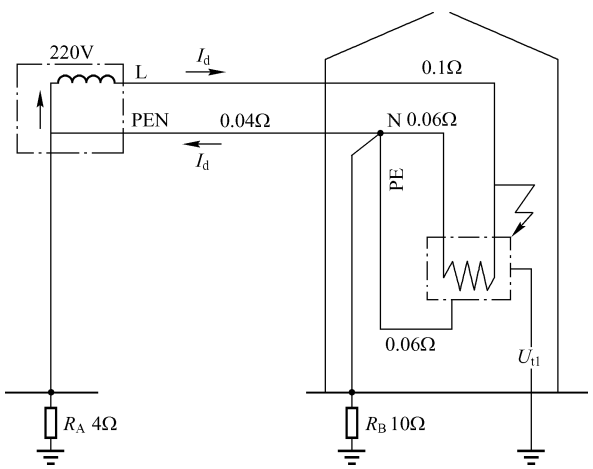


图 1-16　某建筑物供电系统及参数

1-22：若建筑物内电气设备发生接地故障，则设备外壳的预期接触电压 U_{t1} 应为下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

（A）97 V　　（B）88 V　　（C）110 V　　（D）64 V

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条和条文说明第 5.2.10 条。

题目已知建筑物 PE 线重复接地，建筑物内没有等电位联结。当建筑物内电气设备发

生接地故障时，故障电流回路为 L—PE—PEN。接地故障时等效电路图如图 1-17 所示。

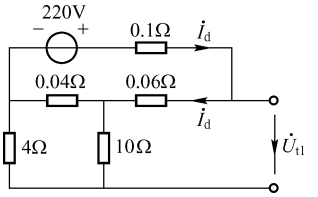


图 1-17　接地故障等效电路图

故障回路的电流：$I_d = \dfrac{220}{0.1+0.06+0.014/\!/14}$ A = 1100.63 A

建筑物 PE 线重复接地，设备外壳的预期接触电压为 PE 线的电阻上的电压降与 R_B 上电压降之和，即

$$U_{t1} = I_d \times 0.06 + \left(I_d \times \frac{0.04}{14+0.04}\right) \times 10$$

$$= \left(1100.63 \times 0.06 + 1100.63 \times \frac{0.04}{14+0.04} \times 10\right) \text{V}$$

$$= 97.4 \text{ V}$$

1-23：若在该建筑物不做重复接地而改为总等电位联结，各线段的电阻值如图 1-18 所示，做总等电位联结后设备 A 处发生接地故障时的预期接触电压值 U_{t2} 应为下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

（A）110 V　　（B）88 V　　（C）66 V　　（D）44 V

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条和条文说明第 5.2.10 条。

题目已知建筑物 PE 线没有重复接地，建筑物设置有总等电位联结。当建筑物内电气设备发生接地故障时，故障电流回路为 L—PE—PEN。接地故障时等效电路图如图 1-19 所示。

故障回路的电流：$I_d = \dfrac{220}{0.1+0.06+0.04}$ A = 1100 A

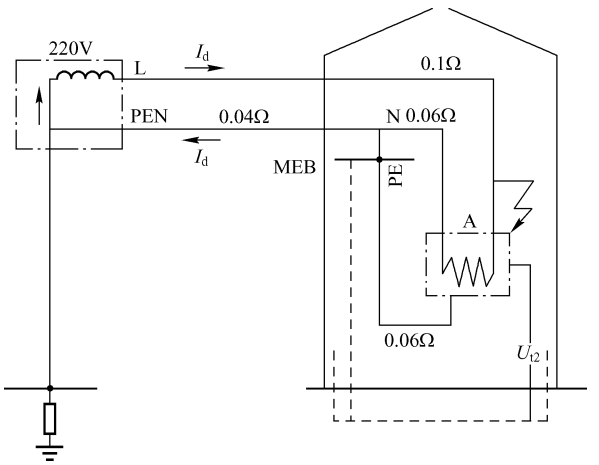


图 1-18　做总等电位联结后供电系统图

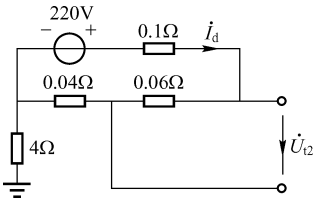


图 1-19　接地故障等效电路图

建筑物总等电位联结后，设备 A 处发生接地故障时的预期接触电压 U_{t2} 为 PE 电阻两端的电压，即

$$U_{t2} = I_d \times 0.06 = 1100 \times 0.06 \text{ V} = 66 \text{ V}$$

1-24：若建筑物引出线路给户外电气设备 B 供电如图 1-20 所示，当设备 A 发生接地故障时，不仅在设备 A 处出现预期接触电压 U_{t2}，在设备 B 处也出现预期接触电压 U_{t3}，此 U_{t3} 值为下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

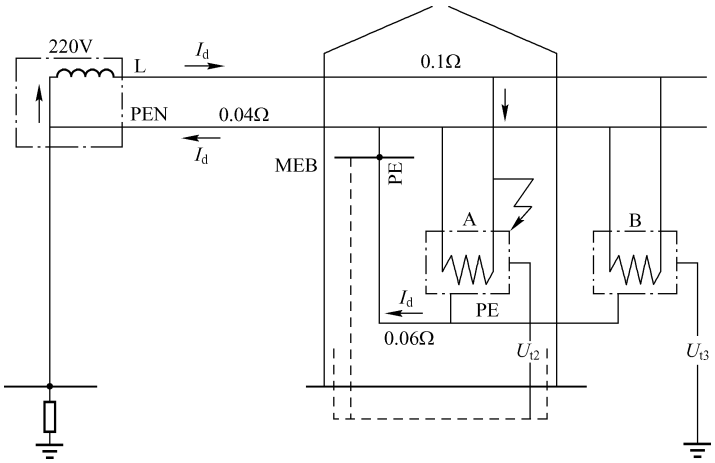


图 1-20　给户外电气设备 B 供电系统图

（A）110 V　　（B）100 V　　（C）120 V　　（D）80 V

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条和条文说明第 5.2.10 条。

题目已知建筑物内设置有总等电位联结，给户外电气设备 B 采用 TN-S 系统供电。当建筑物内电气设备 A 发生接地故障时，故障电流回路为 L—PE—PEN。接地故障时等效电路图如图 1-21 所示。

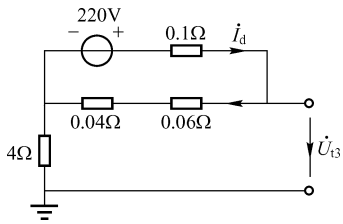


图 1-21　接地故障等效电路图

故障回路的电流：$I_d=\dfrac{220}{0.1+0.06+0.04}\text{A}=1100\text{ A}$

题目已知建筑物内设置有总等电位联结，给户外电气设备 B 采用 TN-S 系统供电，设备 A 处发生接地故障时的预期接触电压 U_{t2} 为 PE 电阻两端的电压，设备 B 处可导电外壳处通过 PE 线将设备 A 处故障电压 U_{t2} 传递到设备 B 处，设备 B 预期接触电压 U_{t3} 为

$$U_{t3}=1100\text{ A}\times(0.06+0.04)\,\Omega+0\times4\text{ V}=110\text{ V}$$

1-25：在图 1-20 中的条件下，当设备 A 发生接地故障时，下列哪一种措施无法防止在设备 B 处发生电击事故？（供配电 2009 年考题）

（A）在设备 B 的配电线路上装用 RCD

（B）另引其他专用电源给设备 B 供电（设备 A 与 B 之间无 PE 线连接）

（C）给设备 B 另做接地以局部 TT 系统供电

（D）给设备 B 经隔离变压器供电，不接 PE 线

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条和条文说明第 5.2.10 条。

1）设备 B 装 RCD，不能防止设备 A 处发生接地故障时设备 B 处可导电外壳处通过 PE 线将设备 A 处故障电压 U_{t2} 传递到设备 B 处，设备 B 处有故障电压。答案 A 错。

2）另引电源给 A 供电，则设备 A、B 之间无 PE 线连接，故 A 接地故障接触电压不会传到设备 B。答案 B 对。

3）设备 B 做局部 TT，单做设备外壳接地，可以切断设备 A、B 之间的 PE 线，设备 A 外壳的故障电压也不会传到设备 B。答案 C 对。

4）设备 B 经隔离变压器供电，不接 PE，切断了设备 A、B 间的 PE 和 N 线。答案 D 对。

1-26：为提高电气安全水平，将上述 TN-C-S 系统改为 TN-S 系统如图 1-22 所示，即从变电所起将 PE 线与 N 线分开，请判断接地系统改变后，当设备 A 发生接地故障时，设备 A 和 B 处的预期接触电压的变化为下列哪一种情况？并说明理由。（供配电 2009 年考题）

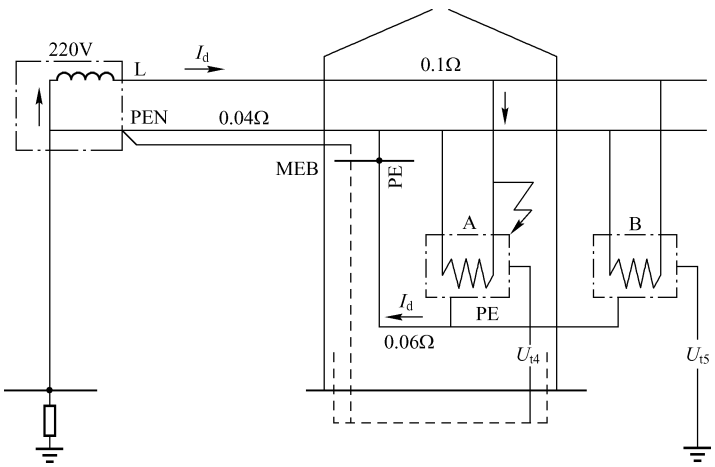


图 1-22　TN-S 供电系统

（A）降低 20%　　（B）降低 50%　　（C）降低 40%　　（D）没有变化

答案：【D】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条和条文说明第 5.2.10 条。

将 TN-C-S 系统改为 TN-S 系统，可使正常运行时设备 A、B 外壳不带电位。设备 A 外壳接地故障时，将在 PE 及 PEN 线通过接地故障电流 I_d，而使 PE 及 PEN 线上产生电位升高，设备 A、B 外壳产生接触电压。将 TN-C-S 改为 TN-S，即 PEN 线分为 PE 和 N 线，如果截面不变，则对应部分电阻也不变，设备 A 和 B 处的预期接触电压将不会发生变化。

例题 1-27～1-31：某高档住宅小区 10/0.4 kV 变配电室保护接地和系统接地独立设置，系统接地极电阻为 4 Ω。建筑内部采用 TN-S 接地系统。请回答以下问题。

1-27：假设小区内庭院灯采用 TN-S 接地系统，当相导体与大地之间发生接地故障时，为保证故障电压不超过允许值，相导体与大地之间的接地故障电阻不小于下列哪一项？

（A）8.5 Ω　　（B）10.2 Ω　　（C）11.7 Ω　　（D）13.6 Ω

答案：【D】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.11 条或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.4.1 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1457 页式（15.2-2）。

如果设备在无等电位联结的户外，而故障电压超过接触电压限值，将对人身构成危害，为此应尽量使工作接地极的电阻 R_B 与接地故障电阻 R_E 之比满足下式以减少电击危险：

$\frac{R_B}{R_E} \leqslant \frac{50}{U_0-50}=0.294$，相导体与大地之间接地故障电阻 $R_E \geqslant 13.6\ \Omega$

1-28：假设小区内庭院灯采用 TN-S 接地系统，当相导体与大地之间发生接地故障时，变压器阻抗为 5 Ω，相导体、PEN、PE 导体的阻抗共计 5.5 Ω（忽略故障点和其他电阻），若庭院灯的照明配电线路采用瞬时过电流（瞬动值 $5I_n$）断路器兼作接地故障防护电器时，断路器瞬时过电流脱扣器整定电流为下列哪一项？

（A）15 A　　（B）16 A　　（C）21 A　　（D）23.6 A

答案：【B】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.8 条、第 6.2.4 条或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.4.4 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1455 页式（15.2-1）。

故障回路阻抗值为 $Z_s=(5+5.5)\ \Omega=10.5\ \Omega$。

断路器瞬时过电流动作电流为

$$I_a \leqslant \frac{U_0}{Z_s}=\frac{220}{10.5}\text{A}=20.95\ \text{A}$$

GB 50054—2011 第 6.2.4 条 当短路保护电器为断路器时，考虑被保护线路末端的短路电流不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍，所以断路器瞬时过电流脱扣器整定电流为

$$I_{set3} \leqslant \frac{I_a}{1.3}=\frac{20.95}{1.3}\text{A}=16.1\ \text{A}$$

1-29：某小区内庭院灯采用 TN-S 接地系统，该照明回路断路器瞬时过电流脱扣器整定电流为 400 A，RCD 额定漏电动作电流为 300 mA，采用单根聚乙烯铜芯 $3\times35\ \text{mm}^2+1\times16\ \text{mm}^2$ 直埋敷设，铜芯电缆电阻率直接取 $0.0184\ \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$。若该照明回路离变压器较远，最小接地故障电流按瞬时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍考虑，则该电缆长度的最大允许值不小于下列哪一项？

（A）85 m　　（B）102 m　　（C）117 m　　（D）135 m

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 966 页。

该照明回路离变压器较远系数取 0.8；相截面积与 PE 截面积之比 $m=35/16=2.19$，电缆电抗校正系数 $k_1=1$，多根相导体并联使用的校正系数不考虑，该电缆的最大允许值为

$$L=\frac{0.8U_0S}{1.5\rho(1+m)I_k}k_1=\frac{0.8\times220\times35}{1.5\times0.0184\times(1+2.19)\times1.3\times400}\times1\ \text{m}=134.5\ \text{m}$$

1-30：某小区内庭院灯采用 TN-S 接地系统，该照明回路熔断器电流为 63 A，采用单根聚乙烯铝芯 $3\times35\ \text{mm}^2+1\times16\ \text{mm}^2$ 直埋敷设。若该照明回路离变压器较远，发生接地故障时电

流熔断器熔断电流为 300 A，故障切断时间为 2 s，则该电缆长度的最大允许值不小于下列哪一项？（铜芯电缆电阻率直接取 0.0184 Ω · mm²/m）

（A）124 m　　（B）142 m　　（C）217 m　　（D）243 m

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 966 页。

该照明回路离变压器较远系数取 0.8；相截面积与 PE 截面积之比 $m=35/16=2.19$，电缆电抗校正系数 $k_1=1$，多根相导体并联使用的校正系数不考虑，该铜芯电缆长度的最大允许值为

$$L=\frac{0.8U_0S}{1.5\rho(1+m)I_k}k_1=\frac{0.8\times220\times35}{1.5\times0.0184\times(1+2.19)\times300}\times1\ \text{m}=233.2\ \text{m}$$

对应铝芯电缆长度最大允许值为 233.2×0.61 m = 142.3 m。

1-31：该小区内采用 TN-S 接地系统，某配电干线回路的计算电流为 220A，配电干线正常运行时的三相不平衡电流值为计算电流的 20%。若设置三相不平衡电流保护，则三相不平衡电流保护整定值为下列哪一项？

（A）44 A　　（B）30 A　　（C）25 A　　（D）20 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 969 页（第三版第 588 页）。

三相不平衡电流保护整定值为

$$I_{set0}\geqslant2I_N=2\times0.1\times220\ \text{A}=44\ \text{A}$$

例题 1-32：假设某建筑物已设置等电位联结，其中一个 IT 系统 380/660 V 无中性线引出，如图 1-23 所示，IT 系统供电回路设线路保护，若设备 A 处发生接地故障未切除时，设备 B 发生二次接地故障，设备 A、设备 B 的供电回路相导体的电阻分别为 1 Ω、2 Ω，设备 A、

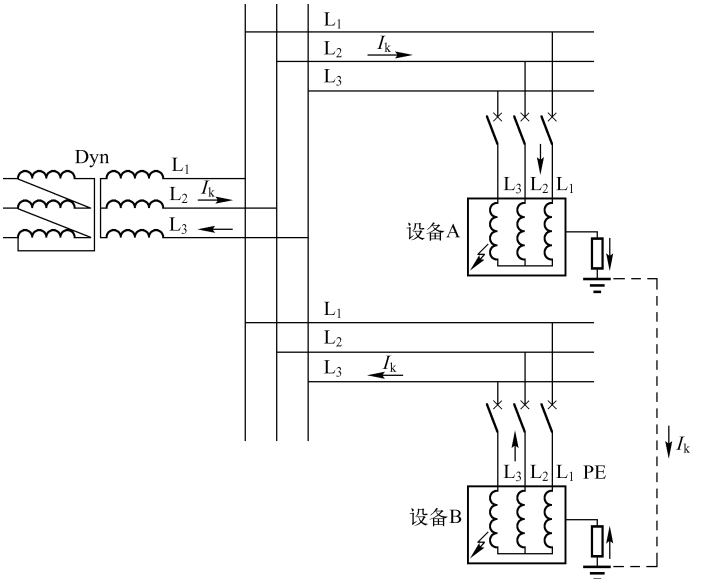


图 1-23　某 IT 系统无中性线引出供电回路

设备 B 的故障电流流过 PE 导体的电阻为 1 Ω，对地故障的故障点、电源变压器等电阻忽略，若该系统配电线路采用过电流断路器兼作接地故障防护电器，断路器的动作电流最小为下列哪一项？（按不同相发生二次接地故障考虑）

（A）82 A　　（B）164 A　　（C）66 A　　（D）132 A

答案：【D】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.6.4 条或《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.24 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1459 页。

故障回路阻抗值为 $2Z_s=(1+1+1+2)\Omega=5\Omega$。

断路器的动作电流为

$$I_a \leqslant \frac{U}{2Z_s}=\frac{660}{5}\text{A}=132\text{ A}$$

例题 1-33：某建筑物其中一个 IT 系统 380/660 V 无中线引出，如图 1-23 所示，设备 A 和 B 外漏导电部分均单独接地，若设备 A 处发生接地故障未切除时，设备 B 发生二次接地故障，其使断路器切除故障的动作电流为 125A，对地故障的故障点、电源变压器、接地极等电阻忽略。设备 B 的通过 PE 导体的电阻不得大于下列哪一项？（按不同相发生二次接地故障考虑）

（A）0.2 Ω　　（B）0.4 Ω　　（C）0.6 Ω　　（D）0.8 Ω

答案：【 B 】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.6.4-b 条或《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.24 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1459 页。

PE 导体的电阻：$Z_A \leqslant \frac{50}{I_d}=\frac{50}{125}\Omega=0.4\Omega$

例题 1-34：某建筑物已设置等电位联结，其中一个 IT 系统 380/660 V 有中性线引出，如图 1-24 所示，IT 系统供电回路设线路保护，若设备 A 处发生接地故障未切除时，设备 B 发生二次接地故障，设备 A 故障回路相导体、PE 导体电阻合计为 2 Ω，设备 B 故障回路相导体、中导体、PE 导体的电阻合计为 3 Ω，对地故障的故障点、电源变压器、接地极等电阻忽略，若该系统配电线路采用过电流断路器兼作接地故障防护电器，断路器的动作电流最小为下列哪一项？

（A）45 A　　（B）38 A　　（C）90 A　　（D）76 A

答案：【D】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 第 411.6.4-b 条或《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.2.24 条、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1459 页。

故障回路阻抗值为 $2Z_s=(2+3)\Omega=5\Omega$。

断路器的动作电流为

$$I_a \leqslant \frac{U_0}{2Z_s}=\frac{380}{5}\text{A}=76\text{ A}$$

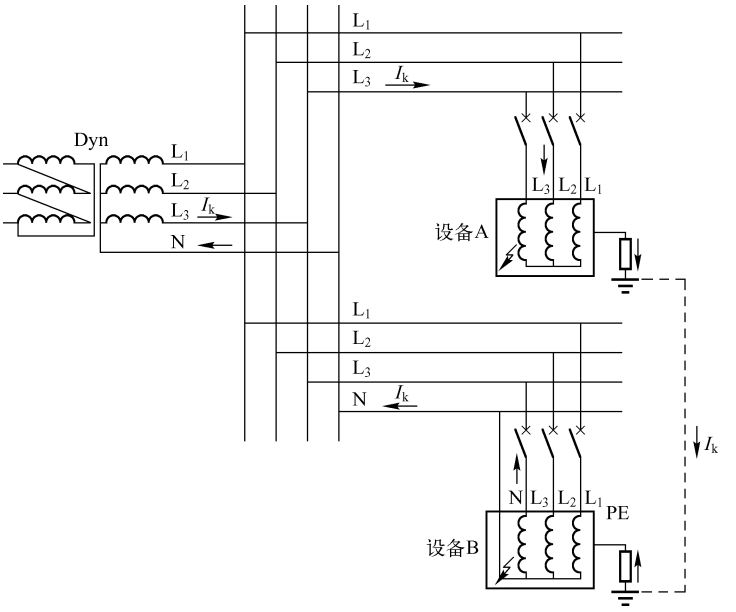


图 1-24　某 IT 系统有中性线引出供电回路

例题 1-35：图 1-25 表示直接接触伸臂范围的安全限值，图中标注正确的是哪些项？（供配电 2010 年考题）

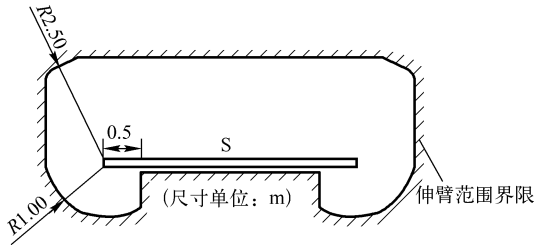


图 1-25　直接接触伸臂范围界限

（A）*R*2.50　　（B）*R*1.00　　（C）0.75　　（D）S（非导电地面）

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 5.1.11 条及图 5.1.11 或《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21—2011 附录 B 第 B.3 条。

伸臂范围的安全限值如下：

1）裸带电体布置在有人活动的区域上方时，其与平台或地面的垂直净距不应小于 2.5 m。

2）裸带电体布置在有人活动的平台侧面时，其与平台边缘的水平净距不应小于 1.25 m。

3）裸带电体布置在有人活动的平台下方时，其与平台下方的垂直净距不应小于 1.25 m，且与平台边缘的水平净距不应小于 0.75 m。

图中只有其与平台或地面的垂直净距 *R*2.50 正确。

1.3 低压保护电器选择

【知识点说明】

1）低压电器选择要求和保护、低压配电线路的保护属于重要考点，依据《低压电气装置 第4-43部分：安全防护 过电流保护》GB 16895.5—2012、《低压配电设计规范》GB 50054—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第11章等。要求熟练掌握过负荷保护电器的动作特性计算、短路保护电器的特性、TN系统发生接地故障最小接地故障电流近似计算。

2）低压断路器、低压熔断器、剩余电流动作保护器（RCD）等属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第11章等。要求熟练掌握低压断路器、低压熔断器、剩余电流动作保护器选择的相关计算。

3）保护电器级间配合属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第11章等。要求熟练掌握低压断路器、低压熔断器等保护电器级间配合计算。

4）常用用电设备低压保护电器选择属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第12章等。要求熟练掌握电动低压断路器、熔断器、接触器等保护电器选择计算；常用用电设备低压电器选择详见第3章。

依据书目：

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

《低压电气装置 第4-43部分：安全防护 过电流保护》GB 16895.5—2012

《建筑物电气装置 第5-54部分：电气设备的选择和安装 接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3—2004

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《低压开关设备和控制设备 第2部分：断路器》GB 14048.2—2008

《家用及类似场所用过电流保护断路器 第1部分：用于交流的断路器》GB 10963.1—2005

《低压熔断器 第5部分：低压熔断器应用指南》GB/T 13539.5—2013

《低压熔断器 第1部分：基本要求》GB 13539.1—2008

《剩余电流动作保护装置安装和运行》GB 13955—2005

《剩余电流动作保护电器的一般要求》GB Z 6829—2008

例题1-36：某车间10 kV变电所，设1台SCB9-2000/10型变压器，10/0.4 kV，Dyn11，$U_k\%=6$，低压网络系统如图1-26所示，变压器高压侧系统短路容量$S''_s=75$ MV·A，低压配电线路L_1选用铜芯电缆VV_{22}-3×35+1×16，长度为30 m，电动机M额定功率为50 kW，额定电流$I_r=90$ A，低压配电线路L_2所带负荷计算电流为410 A，其中最大一台电动机的额定电流为60 A，起动电流倍数为6（忽略母线的阻

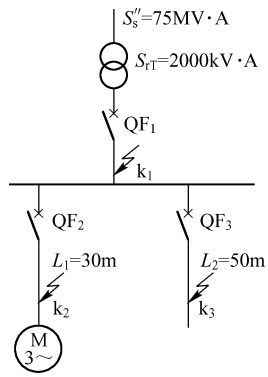


图1-26 低压网络系统

抗）。假设低压断路器 QF_3 是保护配电线路的，则该断路器定时限过电流和瞬时过电流脱扣器的整定值应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）650 A，1068 A　　（B）710 A，1284 A

（C）852 A，1284 A　　（D）975 A，1313 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 986 页（第三版第 631 页、第 636 页）。

断路器定时限过电流脱扣器的整定值

$$I_{set2} \geqslant K_{rel2}[I_{stM}+I_{C(n-1)}] = 1.2\times[6\times60+(410-60)]\text{A} = 852\text{ A}$$

断路器瞬时过电流脱扣器的整定值：

$$I_{set3} \geqslant K_{rel3}[I'_{stM}+I_{C(n-1)}] = 1.2\times[2\times6\times60+(410-60)]\text{A} = 1284\text{ A}$$

【知识点解析】

配电线路用断路器额定电流及脱扣器整定电流的选择：

1）断路器额定电流的确定。断路器壳架电流 I_N 为

$$I_N \geqslant I_{set1}$$

式中，I_{set1} 为反时限过电流脱扣器的整定电流（A）。

2）反时限过电流脱扣器的整定值（I_{set1}）。反时限过电流脱扣器的整定电流为

$$I_{set1} \geqslant I_C$$

$$I_{set1} \leqslant I_Z$$

式中，I_C 为线路计算电流（A）；I_Z 为导体允许持续载流量（A）。

3）定时限过电流脱扣器的整定值（I_{set2}）。定时限过电流脱扣器主要用于保证保护装置动作的选择性，要求如下：

① 定时限过电流脱扣器的整定电流，应躲过短时间出现的负荷尖峰电流，即

$$I_{set2} \geqslant K_{set2}[I_{stM1}+I_{C(n-1)}]$$

式中，I_{set2} 为定时限过电流脱扣器的整定电流（A）；K_{set2} 为低压断路器定时限过电流脱扣器的可靠系数，可取 1.2；I_{stM1} 为线路中最大一台电动机的起动电流（A）；$I_{C(n-1)}$ 为除起动电流最大的一台电动机以外的线路计算电流（A）。

② 定时限过电流脱扣器的整定时间通常有 0.1 s、0.2 s、0.3 s、0.4 s、0.6 s、0.8 s 等几种，根据需要确定。其整定时间要比下级任一组熔断器可能出现的最大熔断时间大一个量级。上下级时间级差不小于 0.1~0.2 s。

4）配电线路用低压断路器（I_{set3}）整定。

① 瞬时过电流脱扣器整定电流 I_{set3}，应躲过配电线路的尖峰电流，即

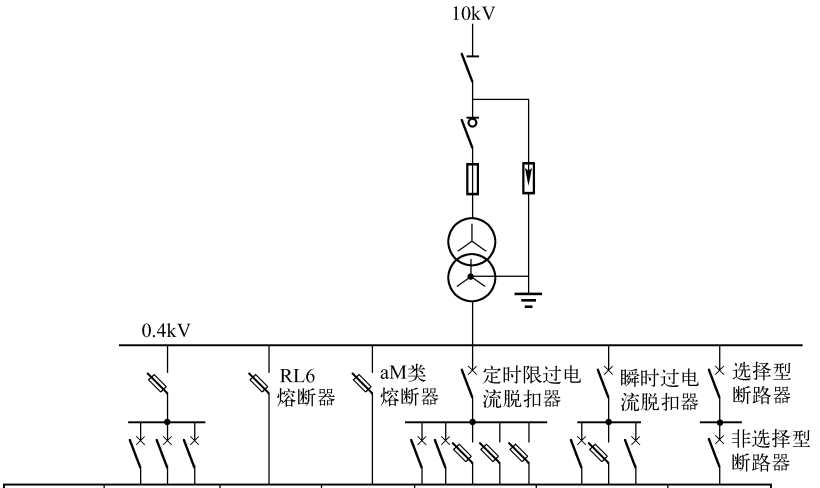
$$I_{set3} \geqslant K_{set3}[I'_{stM1}+I_{C(n-1)}]$$

式中，I_{set3} 为瞬时过电流脱扣器的整定电流（A）；K_{set3} 为低压断路器瞬时过电流脱扣器的可靠系数，考虑电动机起动电流误差和断路器瞬动电流误差，可取 1.2；I'_{stM1} 为线路中最大一台电动机的全起动电流（A），它包括周期分量和非周期分量，对于笼型电动机，可取其起动电流 I_{stM1} 的 2~2.5 倍；$I_{C(n-1)}$ 为除起动电流最大的一台电动机以外的线路计算电流（A）。

② 为满足被保护线路各级间选择性要求，选择型低压断路器瞬时过电流脱扣器整定电

流 I_{set3}，还应大于下一级保护电器所保护线路的故障电流。非选择型低压断路器瞬时过电流脱扣器整定值，在大于回路正常工作时的尖峰电流条件下尽可能整定得小一些。

例题 1-37~1-41：某 10 kV 变电所变压器高压侧采用通用负荷开关+熔断器组合电器保护，低压侧线路和用电设备采用断路器或熔断器保护，供电系统如图 1-27 所示。请解答下列问题。



回路编号	N1	N2	N3	N4	N5	N6
回路名称	办公、生活	户外照明	搅拌机	1#工地	2#工地	维修

图 1-27　某 10 kV 变电所供电系统图

1-37：已知低压侧 N1 配电回路采用熔断器保护，回路计算电流为 200 A，最大的电动机的额定电流为 50 A，除去最大的电动机以外的回路计算电流为 160 A，则熔断器熔体的额定电流（计算值）最接近下列哪个数值？（供配电 2016 年考题）

（A）210 A　　（B）231 A　　（C）252 A　　（D）273 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1009 页勘误（第三版第 623 页）。

按正常工作电流选择：I_r>200 A

按用电设备起动时尖峰电流选择：$I_{rM1}/I_C = 50/200 = 0.25$，查表 11.6-19，$K_r = 1.0$，熔断器熔体的额定电流：

$$I_r \geqslant K_r[I_{rM1}+I_{C(n-1)}] = 1.0\times(50+160)\,A = 210\,A$$

【知识点解析】

配电线路用熔断器额定电流的选择：

熔断体额定电流的选择应保证在正常工作电流和用电设备起动时的尖峰电流下不误动作，并且在发生故障（如过载、短路和接地故障）时能在一定时间熔断，以切断故障电路。

1）按正常工作电流选择应符合下式要求：

$$I_r \geqslant I_C$$

2）按用电设备起动时的尖峰电流选择。

① 单台电动机回路熔断体选择（略）。

② 配电线路熔断体选择应符合下式要求：

$$I_r \geqslant K_r[I_{rM1}+I_{C(n-1)}]$$

以上式中，I_r 为熔断体的额定电流（A）；I_C 为线路的计算电流（A）；I_{rM1} 为线路中起动电流最大的一台电动机的额定电流（A）；$I_{C(n-1)}$ 为除起动电流最大的一台电动机以外的线路计算电流（A）；K_r 为配电线路熔断体选择计算系数，取决于最大一台电动机额定电流与线路计算电流的比值，见表 1-4。

表 1-4　K_r 值

I_{rM1}/I_C	≤0.25	0.25~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8
K_r	1.0	1.0~1.1	1.1~1.2	1.2~1.3

③ 照明线路熔断体选择应符合下式要求：

$$I_r \geqslant K_m I_C$$

式中，K_m 为照明线路熔断体选择计算系数，取决于电光源起动状况和熔断时间-电流特性，其值见表 1-5。

表 1-5　K_m 值

熔断器型号	熔断体额定电流/A	K_m		
		白炽灯、卤钨灯、荧光灯	高压钠灯，金属卤化物灯	荧光高压汞灯
RL7、NT	≤63	1.0	1.2	1.1~1.5
RL6	≤63	1.0	1.5	1.3~1.7

3）当线路发生故障时，熔断体应保证在规定的时间内熔断，以切断故障电路。

1-38：已知低压侧户外照明回路 N2 采用 RL6 熔断器保护，负荷均为金属卤化物灯，该回路计算电流为 40 A，计算熔断器熔体的额定电流（计算值）最接近下列哪个数值？（供配电 2016 年考题）

（A）40 A　　（B）48 A　　（C）60 A　　（D）68 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1009 页勘误（第三版第 666 页）。

按正常工作电流选择：I_r>40 A

按尖峰电流选择，RL6 熔断器电流≤63 A，金属卤化物灯，查表 11.6-19 K_m=1.5，熔断器熔体的额定电流：

$$I_r \geqslant K_m I_C = 1.5\times 40\ \text{A} = 60\ \text{A}$$

1-39：已知低压侧混凝土搅拌机回路 N3 的电动机短路和接地故障采用 aM 类熔断器保护（部分范围分断），且电动机的额定电流为 50 A，起动电流为 350 A，则熔断器熔体的额定电流最小值应选择下列哪个数值？（供配电 2016 年考题）

（A）50 A　　（B）63 A　　（C）80 A　　（D）100 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 960 页、第 1086 页 12. 1. 5. 2 节（第三版第 666 页）。

按电动机额定电流选择：I_N>1. 1×50 A = 55 A

按起动电流选择，熔断器熔体的额定电流为 63 A 时：6. 3I_N = 6. 3×63 A = 396. 9 A≥350 A

或查表 12. 1-3 中选择 63 A。所以采用 aM 类熔断器熔体的额定电流为 63 A。

1-40：已知低压侧混凝土搅拌机回路 N3 的电动机（笼型电动机直接起动）短路和接地故障采用 gG 类熔断器保护（全范围分断），且电动机的额定电流为 50 A，起动电流为 350 A，则熔断器熔体的额定电流最小值应选择下列哪个数值？（供配电 2016 年考题）

（A）50 A　　（B）63 A　　（C）80 A　　（D）100 A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1086 页 12. 1. 5. 2 节（第三版第 666 页）。

已知笼型电动机直接起动电流 350 A，查表 12. 1-3 和表 12. 1-4 中，躲过起动电流，采用 gG 类熔断器熔体的额定电流为 100 A。

1-41：已知低压侧 N6 配电回路上下两级分别采用选择型和非选择型断路器保护，下级断路器长延时脱扣器电流整定值为 100 A，瞬时脱扣器电流整定值为 1000 A；上级断路器长延时脱扣器电流整定值为 300 A。上级断路器短延时脱扣器电流整定值计算结果最接近下列哪个数值？（供配电 2016 年考题改编）

（A）1000 A　　（B）1300 A　　（C）1600 A　　（D）2000 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1022 页（第三版第 650 页）。

采用选择型和非选择型断路器保护时，上级断路器短延时脱扣器电流整定值为

$$I_{set2,A} \geqslant 1.3 I_{set3,B} = 1.3 \times 1000\ \text{A} = 1300\ \text{A}$$

例题 1-42～1-45：某工厂 10/0. 4 kV 变电所，内设 1000 kV · A 变压器一台，采用 Dyn11 接线，已知该变电所原最大运行方式下 10 kV 母线的短路全电流最大有效值为 10 kA；最大、最小运行方式下，变压器二次侧短路时折算到变压器一次侧的故障电流分别为 500 A、360 A。请解答下列问题。

1-42：10/0. 4 kV 变电所 0. 4 kV 母线的某配电回路采用 gG 类熔断器作为保护，已知回路的计算负荷为 20 kW，功率因数为 0. 85，回路中起动电流最大一台电动机的额定电流为 15 A，电动机起动电流倍数为 6，其余负荷的计算电流为 26 A。熔断器熔丝的额定电流应选择下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）40 A　　（B）63 A　　（C）125 A　　（D）160 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1009 页勘误（第三版第 623 页）。

按正常工作电流选择：$I_r \geqslant \dfrac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} = \dfrac{20}{\sqrt{3}\times 0.38\times 0.85}\text{A} = 35.75\ \text{A}$

按尖峰电流选择，$I_{rM}/I_C=15/35.75=0.42$，查表 11-35 得 $K_r=1.1\sim1.2$，熔断器熔丝的额定电流：

$$I_r\geqslant K_r[I_{rM}+I_{C(n-1)}]=(1.1\sim1.2)\times(15+26)\,A=45.1\sim49.2\,A$$，取 63 A

1-43：10/0.4 kV 变电所 0.4 kV 母线的某电动机配电回路采用断路器保护。已知电动机额定电流为 20 A，起动电流倍数为 6。断路器的瞬时脱扣器以及短延时脱扣器的最小整定电流为下列哪一项？（忽略电动机起动过程中的非周期分量）（供配电 2014 年考题）

（A）250 A，125 A　　（B）230 A，230 A

（C）160 A，160 A　　（D）120 A，20 A

答案：【A】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011 第 2.3.5 条。

瞬时脱扣电流：$I_{set3}=(2\sim2.5)k_{st}I_{rM}=(2\sim2.5)\times6\times20\,A=240\sim300\,A$，取 250 A。

短延时脱扣电流：$I_{set2}>k_{st}I_{rM}=6\times20\,A=120\,A$，取 125 A。

【知识点解析】

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011 电动机用低压断路器（脱扣器）的整定要求：

当交流电动机正常运行、正常起动或自起动时，短路保护器件不应误动作。短路保护器件的选择应符合下列规定。

1）正确选用保护电器的使用类别。

2）瞬动过电流脱扣器或过电流继电器瞬动元件的整定电流应取电动机起动电流周期分量最大有效值的 2～2.5 倍。

3）当采用短延时过电流脱扣器作保护时，短延时脱扣器整定电流宜躲过起动电流周期分量最大有效值，延时不宜小于 0.1 s。

1-44：10/0.4 kV 变电所某配电回路采用断路器保护。回路中起动电流最大一台电动机的额定电压为 0.38 kV，额定功率为 18.5 kW，功率因数为 0.83，满载时的效率为 0.8，起动电流倍数为 6，除该电动机外其他负荷的计算电流为 200 A，系统最小运行方式下线路末端的单相接地短路电流为 1300 A、两相短路电流为 1000 A。按躲过配电线路尖峰电流的原则，断路器的瞬时脱扣整定电流为下列哪一项？并校验灵敏系数是否满足要求。（供配电 2014 年考题）

（A）850 A，不满足　　（B）850 A，满足

（C）720 A，满足　　（D）720 A，不满足

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 986 页（第三版第 631 页、第 636 页）。

电动机额定电流：$I_{rM}=\dfrac{P}{\sqrt{3}U\eta\cos\varphi}=\dfrac{18.5}{\sqrt{3}\times0.38\times0.8\times0.83}\,A=42.33\,A$

断路器瞬时过电流脱扣器的整定值：

$$I_{set3}\geqslant K_{set3}[I'_{stM1}+I_{C(n-1)}]=1.2\times[(2\sim2.5)\times6\times42.33+200]\,A=850\sim1002\,A$$

依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 7.6.3 条。

系统最小运行方式下线路末端的最小短路电流：$I_{d2min}=1000\,A$

校验灵敏系数：$K_{sen}=\dfrac{I_{d2min}}{I_a}=\dfrac{1000}{850}=1.18<1.3$，不满足要求。

【知识点解析】

低压断路器的灵敏度应按下式校验：

$$K_{LZ}=\frac{I_{dmin}}{I_{zd}}\geqslant 1.3$$

式中，K_{LZ}为低压断路器动作灵敏系数；I_{dmin}为被保护线路预期短路电流中的最小电流（A），在TN、TT系统中为单相短路电流；I_{zd}为低压断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流（A）。

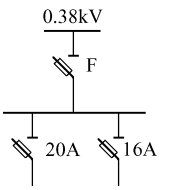


图1-28　某低压配电系统图

1-45：10/0.4kV变电所内某低压配电系统图如图1-28所示。已知馈电线路末端预期故障电流为2kA，熔断器弧前时间电流特性如图1-29所示。弧前I^2t_{min}值和熔断I^2t_{max}值见表1-6。根据本题给出的图、表数据，熔断器的最小额定电流应为下列哪一项？（供配电2014年考题）

表1-6　熔断器额定电流值、弧前I^2t_{min}值和熔断I^2t_{max}值

熔断器额定电流/A	16	20	25	32	40
熔断器弧前I^2t_{min}值/$A^2\cdot s$	300	500	1000	1800	3000
熔断器熔断I^2t_{max}值/$A^2\cdot s$	1200	2000	3500	5500	10000

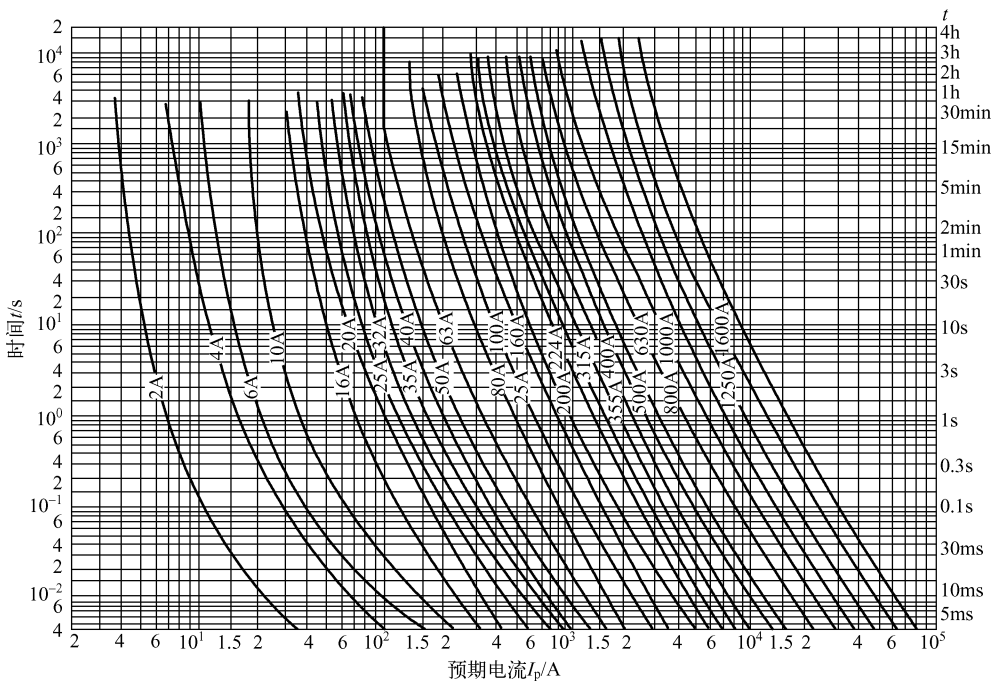


图1-29　熔断器弧前时间电流特性

（A）25 A　　（B）32 A　　（C）40 A　　（D）50 A

答案：【C】

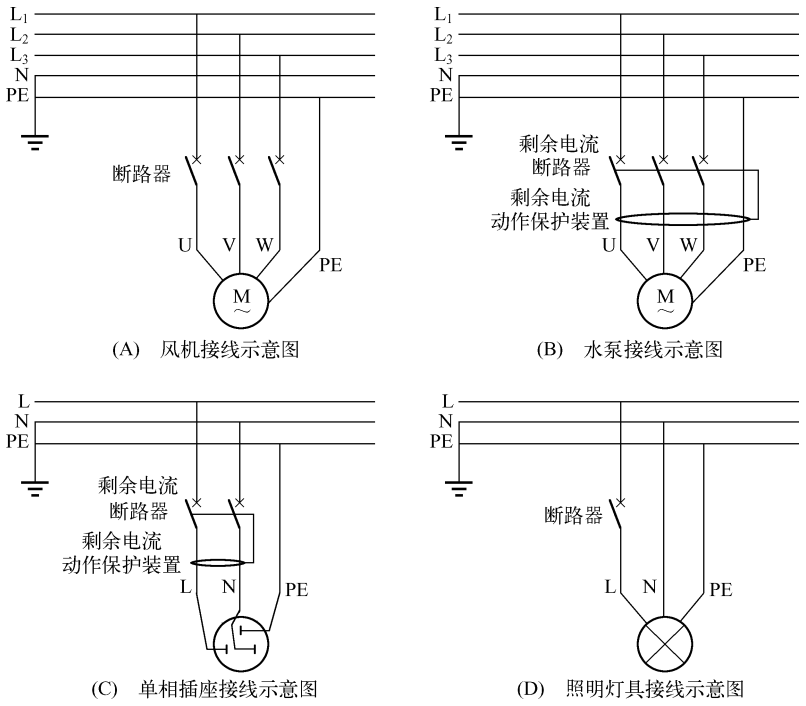
解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 960 页、第 997～1008 页 11.6 节、第 1021 页 11.9.2 节（第三版第 622 页、第 648 页）。

假设下级负荷功率因数相同，依据最大负荷电流确定熔断器额定电流：$I_1 \geqslant (20+16)\,A = 36\,A$

假设熔断器为 gG 型时，满足上下级选择性要求：$I_1 \geqslant 1.6I_{2max} = 1.6\times 20\,A = 32\,A$

当预期短路电流为 2000 A 时查曲线得出短路电流持续时间<0.1 s，取 40 A 熔断器 $I^2t_{min} = 3000\,A^2\cdot s$，大于 20 A 熔断器 $I^2t_{max} = 2000\,A^2\cdot s$，满足选择性要求。

例题 1-46：某办公楼供电电源 10 kV 电网中性点为小电阻接地系统，双路 10 kV 高压电缆进户，楼内 10 kV 高压与低压电气装置共用接地网。低压配电系统接地及安全保护采用 TN-S 方式，下列常用机电设备简单接线示意图中哪个不符合规范规定？（供配电 2012 年考题）



(A)　风机接线示意图　　(B)　水泵接线示意图

(C)　单相插座接线示意图　　(D)　照明灯具接线示意图

答案：【B】

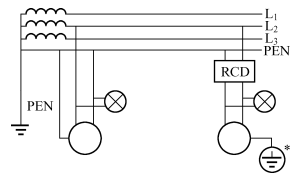
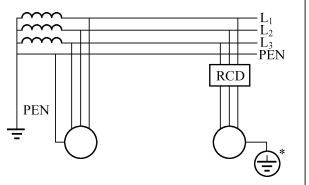
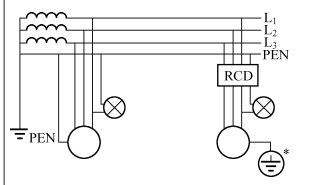
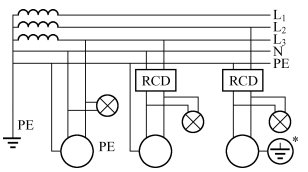
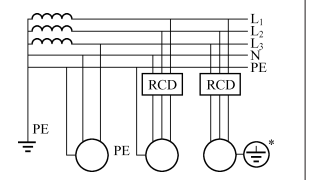
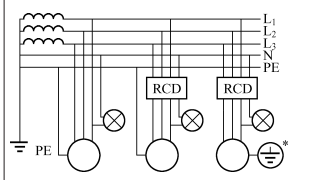
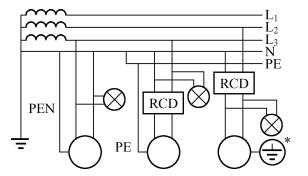
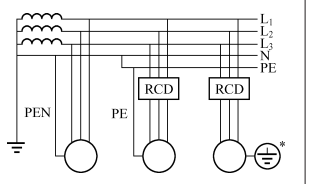
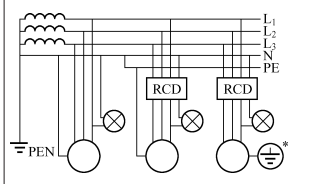
解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 7.7.10 条。

TN 系统中 PE 导体严禁穿过漏电保护器中电流互感器的磁回路。选 B。

【知识点解析】

在《剩余电流动作保护装置安装和运行》GB 13955—2005 中，剩余电流保护装置接线方式见表 1-7。

表 1-7　剩余电流保护装置接线方式

接线图 / 极别 / 接地形式		单相（单极或双极）	三相	
			三线（三极）	四线（三极或四极）
TN	TN-C			
	TN-S			
	TN-C			

注：1. L_1、L_2、L_3为相线；N 为中性线；PE 为保护线；PEN 为中性线和保护线合一；为单相或三相电气设备；为单相照明设备；RCD 为剩余电流保护装置；为不与系统中性接地点相连的单独接地装置，作保护接地用。

2. 单相负载或三相负载在不同的接地保护系统的接线方式图中，左侧设备为未装有剩余电流保护装置，中间和右侧为装有剩余电流保护装置的接线图。

3. 在 TN-C 系统中使用剩余电流保护装置的电气设备，其外露可接近导体的保护线应接在单独接地装置上而形成局部 TT 系统，如 TN-C 系统接线方式图中的右侧设备带 * 的接线方式。

4. 表中 TN-S 及 TN-C-S 接地形式，单相和三相负荷的接线图中的中间和右侧接线图为根据现场情况，可任选一种接地方式。

例题 1-47：某城市拟在市中心建一 400 m 高层建筑，当地海拔为 2000 m，主电源采用 35 kV进线，内设 35/10 kV 及若干 10/0.4 kV 变电所，高低压共同接地。已知某段低压线路末端短路电流为 2.1 kA，该断路器瞬动或短延时过电流脱扣器整定值最大不超过多少？（供配电 2011 年考题）

（A）1.6 kA　　（B）1.9 kA　　（C）2.1 kA　　（D）2.4 kA

答案：【A】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 6.2.4 条。

短路保护电器为断路器时，被保护线路末端的短路电流不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍。该断路器瞬动或短延时过电流脱扣器整定值最大为

$$I_a \leqslant \frac{I_d}{1.3} = \frac{2.1}{1.3}\text{kA} = 1.6\text{ kA}$$

例题 1-48：某座建筑物由一台 1000 kV·A 变压器采用 TN-C-S 系统供电，其中一个工

作小间有移动式设备由末端配电器供电，回路首端装有单相 $I_n=20$ A 断路器，建筑物做总等电位联结，已知在移动设备供电回路的首端安装额定电流 $I_n=20$ A 的断路器，断路器的瞬动脱扣器整定电流为 $12I_n$，该回路的短路电流不应小于下列哪一项数值，才能使此断路器可靠瞬时地切断电源？（供配电 2011 年考题）

（A）240 A　　（B）262 A　　（C）312 A　　（D）360 A

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 条文说明。

第 6.2.4 条　当短路保护电器为断路器时，被保护线路末端的短路电流不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍。该回路的短路电流：$I_d \geqslant 1.3I_a = 1.3\times 20\times 12$ A $= 312$ A。

例题 1-49～1-51：一台水泵由异步电动机驱动，电动机参数为：额定功率 15 kW、额定电压 380 V、额定效率 0.87、额定功率因数 0.89，起动电流倍数 7.0、起动时间 4 s，另外该水泵频繁起动且系统瞬时停电恢复供电时需要自起动。请回答下列问题。

1-49：下列哪项可作为该水泵电动机的控制电器？并请说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）熔断器　　（B）接触器　　（C）断路器　　（D）负荷并关

答案：【B】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011。

第 2.4.4 条　该水泵频繁起动控制电器不可采用低压断路器或负荷开关，应采用接触器。

1-50：若该水泵电动机采用断路器长延时脱扣器作电动机过载保护时，要求电动机起动时保证断路器在 7.2 倍长延时脱扣器整定电流的动作时间为 7 s）。该断路器的长延时脱扣器整定电流应为下列哪项数值？（供配电 2010 年考题）

（A）30 A　　（B）26 A　　（C）24 A　　（D）23 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1088 页 12.1.5.3 节（第三版第 668 页）。

三相电动机的额定电流为

$$I_r=\frac{P_r}{\sqrt{3}U_r\eta\cos\varphi}=\frac{15\times10^3}{\sqrt{3}\times380\times0.87\times0.89}\text{A}=29.43\text{ A}$$

采用断路器长延时脱扣器用作电动机过载保护时，其整定电流应接近不小于电动机额定电流，且在 7.2 倍整定电流下的动作时间应大于电动机的起动时间 4 s。

1-51：假设该水泵电动机额定电流为 24 A、堵转电流倍数为 6.8，当长延时脱扣器用作电动机电流后备保护时，长延时脱扣器整定电流为 25 A，其最小瞬动倍数应为下列哪项数值？（供配电 2010 年考题）

（A）2　　（B）7　　（C）12　　（D）13

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1088 页（第三版第 668 页）。

长延时脱扣器用作后备保护时，其最小瞬动倍数为

$$I_{set}=\frac{(2\sim2.5)K_{LR}}{K_{ins}}I_r\Rightarrow K_{ins}=\frac{(2\sim2.5)K_{LR}}{I_{set}}I_r=\frac{(2\sim2.5)\times6.8}{25}\times24=13\sim16.3$$

例题 1-52～1-53：某钢厂配电回路中电动机参数如下：额定电压 U_e = 380 V，额定功率 P_e = 45 kW，额定效率 η = 0.9，额定功率因数 $\cos\varphi$ = 0.8，起动电流倍数 λ = 6。变压器高压侧系统短路容量为 100 MV · A，其他参数如图 1-30 所示。请回答下列问题，并列出解答过程。

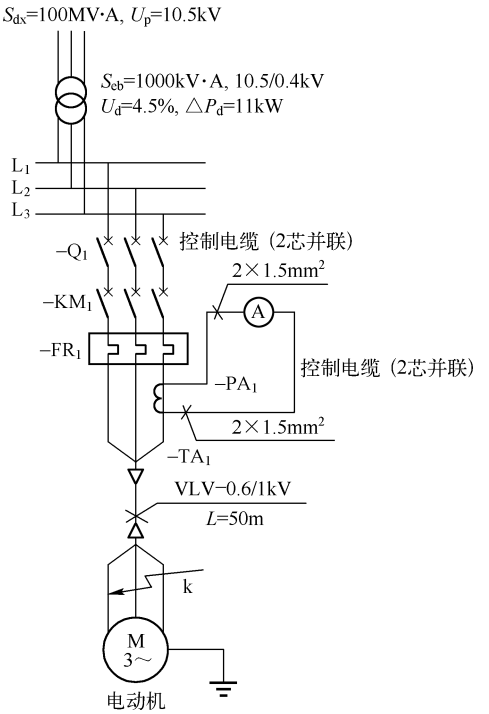


图 1-30　钢厂配电回路图

1-52：若已知断路器 Q_1 的瞬时动作电流倍数为 10 倍，动作时间小于 20 ms，不考虑温度补偿系数，计算图中断路器 Q_1 的额定电流和瞬时动作电流整定值最小宜为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）80 A，800 A　　（B）100 A，1000 A

（C）125 A，1250 A　（D）160 A，1600 A

答案：【 C 】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1072 页、第 1088 页（第三版第 668 页）。

电动机额定电流：$I_e=\dfrac{P_e}{\sqrt{3}U_e\eta\cos\varphi}=\dfrac{45}{\sqrt{3}\times0.38\times0.9\times0.8}\text{A}=94.96\text{ A}$

断路器 Q_1 的额定电流应不小于长延时脱扣器整定电流。长延时脱扣器整定电流为

$$I_{Q1r}\geqslant I_{set}=\frac{2.2K_{LR}}{K_{ins}}I_e=\frac{2.2\times6}{10}\times94.96\text{ A}=125.35\text{ A}$$，取 I_{Q1r} = 125 A

瞬时脱扣器整定电流：$I_{set3}=K_{ins}I_{Q1r}=10\times125\text{ A}=1250\text{ A}$

1-53：图中低压交流 220 V 控制回路中 KM_1 为安装在配电室内 MCC 低压开关柜中交流接触器（吸持功率 20 W），SB_1、SB_2 分别为安装在远程机旁操作箱上的起动、停止按钮，配电柜与机旁箱之间的距离为 500 m。若考虑线路电容电流对 KM_1 断开的影响，计算配电柜与机旁箱的临界距离应为下列哪项数值？并判定接触器能否受开关 SB_2 的控制正常断开。（供配电 2017 年考题）

（A）344 m，不能　　（B）450 m，不能

（C）688 m，能　　（D）860 m，能

答案：【A】

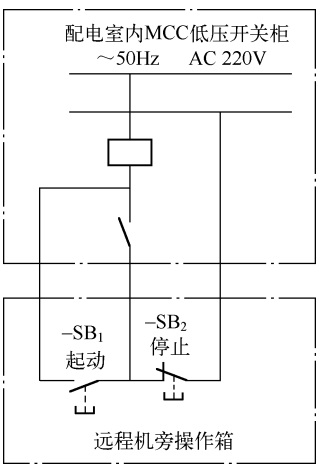


图 1-31　远程电机控制图

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第1105页12.1.11.5节。

题目中控制回路采用三芯线控制电容，约为0.6 μF/km，控制回路电压为AC220 V，一台接触器保持功率为20 W，控制线路临界长度为 $L_{cr}=\frac{500P_h}{CU^2}=\frac{500\times20}{0.6\times220^2}\text{m}=344.35\text{ m}$，实际长度为500 m，大于临界长度，接触器不能受开关 SB_2 的正常控制。

例题1-54：某西南地区企业35 kV电力用户具有若干10 kV变电所。所带负荷等级为三级，35/10 kV变电站向车间A馈电线路所设的主保护动作时间和后备保护时间分别为0和0.5 s，当主保护装置为速动时，短路电流持续时间为0.2 s；车间B变电所3#变压器容量为800 kV·A，额定电压为10/0.4 kV，Yyn0接线，其低压侧计算电流为900 A，低压母线载流量为1500 A。为充分利用变压器的容量，车间B3#变压器低压侧主断路器反延时过电流脱扣器整定电流最小宜选用下列哪项数值？（供配电2009年考题）

（A）800 A　　（B）1000 A　　（C）1250 A　　（D）1600 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第986页（第三版第636页）。

变压器低压侧额定电流为 $I_{rM}=\frac{S}{\sqrt{3}U}=\frac{800}{\sqrt{3}\times0.4}\text{A}=1154.7\text{ A}$，低压侧主断路器额定（壳架）电流宜选 $I_N=1250\text{ A}$。

反延时过电流脱扣器整定电流应满足 $I_C\leqslant I_{set1}\leqslant I_Z$ 要求，$I_C=900\text{ A}\leqslant I_{set1}\leqslant I_Z=1500\text{ A}$，为保证灵敏度宜选择1000 A。

1.4　电压骚扰和电磁骚扰防护

【知识点说明】

电压骚扰和电磁骚扰防护属于普通考点，依据《低压电气装置 第4-44部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。要求掌握工频应力电压、工频故障电压、允许的工频应力电压、故障电压持续时间。

依据书目：

《低压电气装置 第4-44部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010

例题1-55：某10 kV变电所的配电接线如图1-32所示，R_E 与 R_B 相互独立，R_E 与 R_A 相互连接，低压IT系统采用经高电阻接地，R_D 远大于 R_A、R_B 及 R_E，低压侧线电压为AC380 V。变电所内发生接地故障时，流过 R_E 的故障电流 $I_E=10\text{ A}$，计算高压侧发生接地故障时低压电气装置相线与外壳间的工频应力电压 U_1 应为下列哪项数值。（忽略线路、变压器及未知阻抗）（供配电2017年考题）

（A）100 V　　（B）220 V　　（C）250 V　　（D）320 V

答案：【D】

解答过程：依据《低压电气装置 第4-44部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。

从表44.A1中没有对应的故障形式。分析方法同表44.A1，高压侧发生接地故障时对地

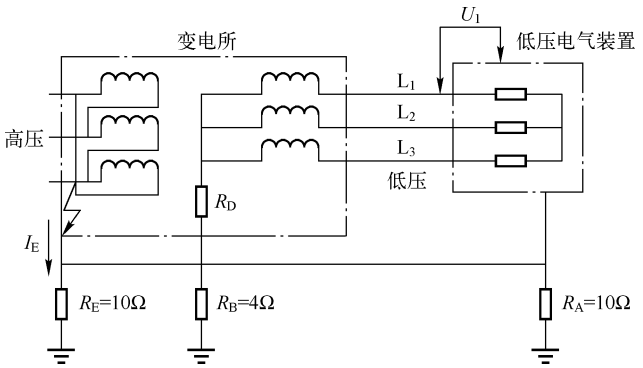


图 1-32　10 kV 变电所的配电接地故障图

电位升高 $I_E R_E = 10\times10\ \text{V} = 100\ \text{V}$，图中通过单独接线到低压电气装置外壳并接地，使低压电气装置外壳对地电位升高 100 V，当低压侧 IT 系统未发生第一次接地故障时两者最大电位向量差为 $I_E R_E + U_0 = (10\times10+220)\ \text{V} = 320\ \text{V}$；当低压侧 IT 系统发生第一次接地故障时两者最大电位向量差为 $I_E R_E + U_0\times\sqrt{3} = (10\times10+380)\ \text{V} = 480\ \text{V}$。高压侧发生接地故障时低压电气装置相线与外壳间的工频应力电压 U_1 为 320 V（低压侧 IT 未发生第一次接地故障时）。

注：该故障状况已经超出国家规范和实际工作范围，只能做理论分析。

例题 1-56~1-59：某高层办公楼供电电源为交流 10 kV，频率为 50 Hz，10/0.4 kV 变电所设在室内，10 kV 侧采用低电阻接地系统，400/230 V 侧接地形式采用 TN-S 系统且低压配电装置采用保护总等电位联结系统，办公楼 10/0.4 kV 变电所的高压接地系统和低压接地系统相互连接，变电所的接地电阻为 3.3 Ω，若变电所 10 kV 高压侧发生单相接地故障，测得故障电流为 150 A。请回答下列问题，并列出解答过程。

1-56：在故障持续期内低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频应力电压为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）110 V　　（B）220 V　　（C）495 V　　（D）725 V

答案：【B】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。

TN 系统，R_E 与 R_B 连接时，查表 44.A1 中，低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频应力电压为 $U_2 = U_0 = 220\ \text{V}$。

1-57：在故障持续期内低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频故障电压为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题改编）

（A）110 V　　（B）220 V　　（C）495 V　　（D）725 V

答案：【C】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。

TN 系统，R_E 与 R_B 连接时，查表 44.A1 中低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频故障电压为 $U_f = R_E I_E = 3.3\times150\ \text{V} = 495\ \text{V}$。

1-58：若 10 kV 侧故障持续期为 0.2 s，低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频故障电压限值为下列哪项数值？该低压系统的故障电压是否超出限值要求？

（供配电 2013 年考题改编）

（A）110 V，超过　　（B）200 V，超过

（C）550 V，未超过　　（D）725 V，未超过

答案：【C】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。

查图 44.A2 中，故障持续期为 0.2 s 时对应的工频故障电压限值为 550 V。

TN 系统，R_E与 R_B连接时，查表 44.A1 中低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频故障电压为 $U_f = R_E I_E = 3.3 \times 150\ \text{V} = 495\ \text{V} < 550\ \text{V}$，未超出限值要求。

1-59：若 10 kV 侧故障持续期为 0.2 s，低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频应力电压限值为下列哪项数值？该低压系统的应力电压是否超出限值要求？（供配电 2013 年考题改编）

（A）110 V，超过　　（B）200 V，超过

（C）550 V，未超过　　（D）1420 V，未超过

答案：【D】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010。

查表 44.A2 中，故障持续期为 0.2 s 时，对应的工频应力电压限值为 $U = U_0 + 1200\ \text{V} = (220 + 1200)\ \text{V} = 1420\ \text{V}$。

TN 系统，R_E与 R_B连接时，查表 44.A1 中，低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频应力电压为 $U_2 = U_0 = 220\ \text{V} < 1420\ \text{V}$，未超出限值要求。

例题 1-60：某老旧工厂供电电源为交流 10 kV，频率为 50 Hz，10/0.4 kV 变电所设在室内，10 kV 侧采用低电阻接地系统，400/230 V 侧接地形式采用 TN-C 系统，在车间内低压配电装置采用 PEN 多点重复接地系统，若变电所的高压接地系统和低压接地系统相互连接，变电所的接地电阻为 3.3 Ω，若变电所 10 kV 高压侧发生单相接地故障，测得故障电流为 150 A，在故障持续期内低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频故障电压为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题改编）

（A）110 V　　（B）248 V　　（C）495 V　　（D）725 V

答案：【B】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010 的 442.2.1 节。

TN 系统采用 PEN 多点重复接地，低压系统线导体与变电所低压设备外露可导电部分之间的工频故障电压为 $U_f = 0.5 R_E I_E = 0.5 \times 3.3 \times 150\ \text{V} = 247.5\ \text{V}$。

1.5　爆炸危险环境的电气装置和特殊装置或场所的电气安全

【知识点说明】

1）爆炸危险环境电力装置属于重要考点，依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》

GB 50058—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 11 章等。要求熟练掌握爆炸性环境的电力装置设计；掌握爆炸性气体环境、爆炸性粉尘环境设计要求。

2）特殊装置或场所的电气安全属于普通考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）15.3 节。要求掌握浴盆或淋浴盆的场所、游泳池和喷水池、施工和拆除场所、防止静电的场所、数据处理设备用电气装置的接地要求等。

依据书目：

《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014

《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006

《低压电气装置 第 7-706 部分：特殊装置或场所的要求 活动受限制的可导电场所》GB 16895.8—2010

《建筑物电气装置 第 7 部分：特殊装置或场所的要求 第 707 节：数据处理设备用电气装置的接地要求》GB/T 16895.9—2000

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《户外严酷条件下的电气设施 第 1 部分：范围和定义》GB 9089.1—2008

《户外严酷条件下的电气设施 第 2 部分：一般防护要求》GB 9089.2—2008

例题 1-61：某科技园位于寒冷地区，其中规划有科研办公楼自备应急柴油发电机组设置 20 m^3 室外埋地油罐，附近有杆高为 10 m 的架空电力线路，请计算确定该油罐与架空电力线路的最小水平距离应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）6 m　　（B）7.5 m　　（C）12 m　　（D）15 m

答案：【A】

解答过程：依据《建筑设计防火规范》GB 50016—2014。

第 3.1.1 条及条文说明　柴油闪点大多数为 60~90℃（其中仅“—35#”柴油为 50℃），埋地柴油油罐属于直埋地下丙类液体储罐。第 10.2.1 条中表 10.2.1　直埋地下丙类液体储罐与架空电力线路的最小水平距离为 0.6 倍的杆高，即 0.6×10 m=6 m。

例题 1-62：某工厂生产装置，爆炸性气体环境中加工处理的物料有两种，其爆炸性气体混合物的引燃温度分别是 240℃和 150℃。那么，在该环境中允许使用的防爆设备的温度组应为下列哪项？请说明理由。（供配电 2016 年考题）

（A）T3　　（B）T4　　（C）T3，T4，T5，T6　　（D）T4，T5，T6

答案：【D】

解答过程：依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014 第 5.23-1 条。

爆炸性气体混合物无据可查时可按照危险程度较高的级别和组别选用防爆电气设备，引燃温度按照 150℃选择。查表 5.23-2 中 T4 组别允许温度 135℃时允许使用的防爆电气设备的温度组为 T4，T5，T6。

例题 1-63：某生产车间，其内生产产品时包含多种可燃气体成分的气体，若该气体所包含组分及其体积百分比为乙烯 45%、丙烷 12%、甲烷 3%、异丙醚 17.5%、二乙醚 2.5%，其中惰性气体氮气 20%取 *MESG* 值为 2，具体参数见表 1-8，混合气体的最大试验安全间隙 $MESG_{mix}$ 为下列哪一项数值？

（A）0.65　　（B）0.71　　（C）0.86　　（D）0.97

表 1-8　组分及其体积百分比表

组分	摩尔质量	爆炸体积百分比下限（%）	爆炸体积百分比上限（%）	引燃温度/℃	蒸气压强25℃下/Pa	闪点/℃	NEC 组别	*MESG*	*MICR*
乙烯	28.05	2.7	36	450	6 975 302	-104	C	0.65	0.53
丙烷	44.09	2.1	9.5	450	953 238	-42	D	0.97	0.82
甲烷	16.04	5.0	15	600	61 833 816	-162	D	1.12	1.0
异丙醚	102.17	1.4	21	443	19 784	69	D	0.94	
二乙醚	74.12	1.9	36	150	5092	34.5	C	0.83	0.88

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1058 页。

混合气体的最大试验安全间隙 $MESG_{mix}$ 为

$$MESG_{mix}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{X_i}{MESG_i}}=\frac{1}{\frac{0.45}{0.65}+\frac{0.12}{0.97}+\frac{0.20}{2}+\frac{0.03}{1.12}+\frac{0.175}{0.94}+\frac{0.025}{0.83}}=0.86$$

例题 1-64：某生产车间内生产产品时包含多种可燃气体成分的气体，若根据计算混合气体的最大试验安全间隙 $MESG_{mix}$ 为 0.8。那么，在该环境中允许使用的防爆设备的类别可为下列哪项？请说明理由。

（A）ⅡA、ⅡB、ⅡC　　（B）ⅡA、ⅡB　　（C）ⅡB、ⅡC　　（D）ⅡC

答案：【C】

解答过程：依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014。

查表 3.4.1 中混合气体的最大试验安全间隙 $MESG_{mix}$ 为 0.8，对应ⅡB 级，查表 5.2.3-1 中ⅡB 级对应设备级别为ⅡB、ⅡC。

例题 1-65：以下对于爆炸性粉尘环境中粉尘分级的表述正确的是下列哪一项？（发输电 2016 年考题）

（A）焦炭尘为可燃性导电粉尘，粉尘分类为ⅢC 级

（B）煤粉尘为可燃性非导电粉尘，粉尘分类为ⅢB 级

（C）硫磺粉尘为可燃性非导电粉尘，粉尘分类为ⅢB 级

（D）人造纤维为可燃性飞絮，粉尘分类为ⅢB 级

答案：【A】

解答过程：依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014。

条文说明第 4.1.2 条　常见的ⅢA 级可燃性飞絮如棉花纤维、麻纤维、丝纤维、毛纤维、木质纤维、人造纤维等；常见的ⅢB 级可燃性非导电粉尘如聚乙烯、苯酚树脂、小麦、玉米、砂糖、染料、可可、木质、米糠、硫黄等粉尘；常见的ⅢC 级可燃性导电粉尘如石墨、炭黑、焦炭、煤、铁、锌、钛等粉尘。答案 A 正确。

例题 1-66：人体与导体间发生放电的电荷量达到 2×10^{-7}C 以上时就可能感到电击，当人体的电容为 100 pF，依规范确定静电引起的人体电击的电压大约是下列哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）100 V　　（B）500 V　　（C）1000 V　　（D）3000 V

答案：【D】

解答过程：依据《防静电事故通用导则》GB 12158—2006。

第 7.3.1 条 静电引起的人体电击的电压约 3000 V。

例题 1-67：关于静电的基本防护措施，下列哪项描述是错误的？（供配电 2016 年考题）

（A）对接触起电的物料，应尽量选用在带电序列中位置较邻近的，或对产生正负电荷的物料加以适当组合，使最终达到起电最小

（B）在生产工艺的设计上，对有关物料应尽量做到接触面和压力较小，接触次数较少，运动和分离速度较慢

（C）在气体爆炸危险场 0 区，局部环境的相对湿度宜增加至 50%以上

（D）在静电危险场所，所有属于静电导电的物体必须接地

答案：【C】

解答过程：依据《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006。

第 6.1.1 条、第 6.1.2 条　局部环境的相对湿度宜增加至 50%以上。增湿可以防止静电危害的发生，但这种方法不得用在气体爆炸危险场所 0 区。

例题 1-68：如果用电设备安装在浴室的 0 区内，下列哪一项用电设备的安装条件是正确的？（供配电 2010 年考题）

（A）由隔离变压器供电

（B）采用额定电压不超过交流 12 V 或直流 30 V 的 SELV 防护措施

（C）由动作电流不大于 30 mA 的剩余电流动作保护进行供电

（D）由安装在 0、1、2 区内的电源接线盒的线路供电

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1468 页（第三版第 928 页）或《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 12.9.2-3 条。

在 0 区，用电设备的安装满足下列全部条件：按照生产厂家使用和安装说明中所适用的区域使用；固定的永久性的连接；采用额定电压不超过交流 12 V 或直流 30 V 的 SELV 防护措施。答案 B 正确。

例题 1-69：某临时报废楼房拆除场所，户外环境条件复杂，多为潮湿环境，场所内无等电位联结。该拆除场所采用 TT 系统，分设几个互不关联的独立的接地极，场所内各用电设备的 PE 导体与就近的独立的接地极相连，采用 RCD 额定剩余动作电流作为接地故障保护。若场所内独立的接地极接地电阻均为 15 Ω，各用电设备 RCD 的预期剩余故障电流是下列哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）100 mA　　（B）300 mA　　（C）800 mA　　（D）1666 mA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1474 页。

15.3.4 节中施工和拆除场所的 TT 系统内的每一配电回路应装设瞬时动作 RCD，接地电阻满足 $R_A I_a \leqslant 25$ V 的要求。满足规范规定的切断电源时间要求的预期剩余故障电流 I_a 为

$$I_a \leqslant 25/R_A = 25/15\ \text{mA} = 1667\ \text{mA}$$

【知识点解析】

建筑施工和拆除场所是电气危险很大的特殊场所，在户外不具备等电位联结，风吹、日

晒、雨淋等气候条件使得电气设备绝缘水平下降，户外作业的施工人员皮肤潮湿，人体阻抗下降，电击致死的危险性更大。户外不具备等电位联结，宜采用 TT 系统，在施工和拆除场所可以分设几个互不关联的独立的接地极，用电设备的 PE 导体与就近的独立的接地极相连，这就避免了故障电压在施工场地内传导，减少了电击事故的发生。TT 系统内的每一配电回路应装设瞬时动作的 RCD，接地电阻满足 $R_A I_a \leqslant 25\,V$ 的要求，I_a 为满足规范规定的切断电源时间要求的预期剩余故障电流，显著大于 RCD 的额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$（此预期剩余故障电流通常为 5 倍额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$）。

例题 1-70：某座建筑物由一台 1000 kV·A 变压器采用 TN-C-S 系统供电，其中一个工作小间（小间属于活动受限制场所）有移动式设备由末端配电器供电。如果在小间内移动式设备有带电裸露导体，作为防间接电击保护的措施下列哪种处理方式最好？（供配电 2011 年考题改编）

（A）采用额定电压为 50 V 的特低电压电源供电

（B）设置遮挡和外护物以防止人体与裸露导体接触

（C）裸露导体包以绝缘，小间地板绝缘

（D）该回路上装有动作电流不大于 30 mA 的剩余电流动作保护器

答案：【A】

解答过程：依据《低压电气装置 第 7-706 部分：特殊装置或场所的要求 活动受限制的可导电场所》GB 16895.8—2010。

小间属于活动受限制的可导电场所，按照第 706.413 条和第 706.410.3.1.6 条，向手持式工具或便携式设备供电时，使用 SELV 或者隔离变压器二次绕组只连接一台设备的电气分隔，答案 A 正确。

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

5.1 节中遮挡和外护物、裸露导体包以绝缘，属于直接接触防护，答案 B、C 错误。剩余电流动作保护器属于附加保护，答案 D 错误。

例题 1-71：对泄漏电流超过 10 mA 的数据处理设备用电，下列接地要求哪项是错误的？（供配电 2016 年考题）

（A）当采用独立的保护导体时，应是一根截面不小于 10 mm^2 的导体或两根有独立端头的，每根截面积不小于 4 mm^2 的导体

（B）当保护导体与供电导体合在一根多芯电缆中时，电缆中所有导体截面积的总和应不小于 6 mm^2

（C）应设置一个或多个在保护导体出现中断故障时能按要求切断设备供电的电器

（D）当设备通过双绕组变压器供电或通过其他输入与输出回路相互隔开的机组（如电动发电机）供电时，其二次回路建议采用 TN 系统，但在特定应用中也可采用 IT 系统

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物电气装置 第 7 部分：特殊装置或场所的要求 第 707 节：数据处理设备用电气装置的接地要求》GB/T 16895.9—2000。

第 707.471.3.3 条　当保护导体与供电导体合在一根多芯电缆中时，电缆中所有导体截面积的总和应不小于 10 mm^2，答案 B 错误。

第2章　电能质量与节能损耗

【知识点导图】

图2-1　电能质量与节能损耗知识点导图

图 2-1 所示的电能质量与节能损耗知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。其中必考点有变压器电压降计算、配电系统电压偏差计算、谐波含有率计算、谐波叠加和谐波限值折算、电压波动及限值的计算、变压器功率损耗计算、电力线路功率损耗、变频与其他调速对比节能计算等，在本章中都给出了相关的例题。

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 16 章增加了节能章节，整合了《钢铁企业电力设计手册》中节能章节的所有内容，在此基础上还增加了建设项目节能评估报告、能效管理系统、分布式能源系统小节（了解即可与考试无关）。《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 6 章增加了电压暂降与短时中断、供电中断与供电可靠性小节，将电动机起动时的电压降归入电压暂降，请考生注意。

2.1 电压偏差和暂降

【知识点说明】

1）电压偏差属于重要考点，依据《电能质量 供电电压允许偏差》GB/T 12325—2008、《供配电系统设计规范》GB 50052—2009、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.2 节等。要求熟练掌握电压偏差概念和允许值、线路电压降计算、变压器电压降计算、配电系统电压偏差计算。

2）电压暂降与短时中断、供电中断与供电可靠性属于冷门考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.5~6.6 节。要求掌握电动机起动时的电压暂降，了解其危害与抑制措施。电动机起动内容详见第 14 章。

依据书目：

《电能质量 供电电压允许偏差》GB/T 12325—2008

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

参考书目：

《供电系统用户供电可靠性评价规程》DL/T 836—2012

《电能质量 电压暂降与短时中断》GB/T 30137—2013

例题 2-1：某变电站向某 10 kV 用户配电站提供电源，采用一回电缆出线，已知该电缆回路电阻为 0.118 Ω/km，感抗为 0.090 Ω/km，电缆长度为 2 km。用户配电站实际运行有功变化范围为 5~10 MW，功率因数为 0.95。假设变电站 10 kV 母线电压偏差范围为±2%，计算用户配电站 10 kV 母线电压偏差范围应为下列哪项数值？若产权分界点为用户配电站 10 kV进线柜出线端头，判断其电压偏差是否满足供电电压偏差限值要求，并说明依据。（供配电 2017 年考题）

（A）1.48~2.95%，满足　　（B）-0.52~4.95%，满足

（C）-3.48~0.89%，满足　　（D）-4.95~0.52%，满足

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 459 页、第 463 页（第三版第 254 页、第 257 页）。

供电线路属于三相平衡负荷线路，自然功率因数为 0.95，其正切值为 $\tan\varphi = -0.329$，

电压损失范围为

$$\Delta u_1=\frac{Pl}{10U_n^2}(R'+X'\tan\varphi)=\frac{(5000\sim10000)\times2}{10\times10^2}\times(0.118+0.09\times0.329)=1.476\%\sim2.95\%$$

变电站 10 kV 母线电压偏差范围为±2%，最大负荷时远端设备电压降：

$$\Delta u_{max}=e-\Delta u_1=-2\%-2.95\%=-4.95\%$$

最小负荷时近端设备电压降：

$$\Delta u_{min}=e-\Delta u_1=2\%-1.476\%=0.524\%$$

依据《电能质量 供电电压允许偏差》GB/T 12325－2008 第 4.2 条，满足 20 kV 及以下三相线路电压偏差 ±7% 的规定。

【知识点解析】

电压偏差计算：

如果在某段时间内线路或其他供电元件首端的电压偏差为 Δu_o，线路电压降为 Δu_1，则线路末端电压偏差为

$$\Delta u_x=\Delta u_o-\Delta u_1$$

当有变压器或其他调压设备时，还应计入该类设备内的电压提升，即

$$\Delta u_x=\Delta u_o+e-\sum\Delta u$$

在图 2-2 的电路中，其末端的电压偏差为

$$\Delta u_x=\Delta u_o+e-\sum\Delta u=\Delta u_o+e-(\Delta u_{l1}+\Delta u_T+\Delta u_{l2})$$

以上式中，Δu_o 为线路首端的电压偏差（%）；$\sum\Delta u$ 为回路中电压降总和（%）；Δu_{l1}、Δu_{l2} 分别为高压线路和低压线路的电压降（%）；Δu_T 为变压器电压降百分数（%）；e 为变压器分接头设备的电压提升（%）。

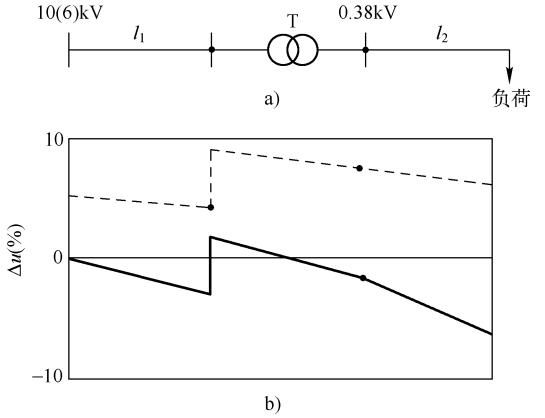


图 2-2　网络电压偏差计算电路

a）计算电路　b）电路沿线的电压偏差曲线

注：实线表示最大负荷时的电压偏差；虚线表示最小负荷时的电压偏差。

其中线路的电压降和变压器的电压降与负荷率成正比。

例题 2-2：某 10/0.4 kV 变电站，高压侧最大负荷时电压偏差为−1%，最小负荷时电压偏差为 4%，变压器最大负荷时电压损失为 3%，最小负荷时电压损失为 1%，近端线路最小

电压损失为1%，远端线路最大电压损失为8%，当变压器在0抽头时低压线路电压偏差是否满足规范要求？

（A）满足　　（B）近端满足　　（C）远端满足　　（D）都不满足

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第462～463页（第三版第257页）。

当变压器在0抽头时，查《配四》第463页表6.2-5中 $\Delta u_T=5\%$。

近端最大电压偏差为

$$\delta u_{j,max}=e-\Delta u_T-\Delta u_{l1}=+4\%+5\%-1\%-1\%=7\%$$

远端最大电压偏差为

$$\delta u_{y,max}=e-\Delta u_T-\Delta u_{l1}=-1\%+5\%-3\%-8\%=-7\%<-10\%$$

依据《电能质量　供电电压允许偏差》GB/T 12325—2008第4.2条、第4.3条，满足20 kV及以下三相线路电压偏差±7%和220 V单相线路电压偏差+7%，−10%的规定。

例题2-3：若从变电所低压母线至远端设备馈电线路的最大电压损失为5%，至近端设备馈电线路的最小电压损失为0.95%，变压器满负荷时电压损失为2%，用电设备允许电压偏差在±5%以内，该变压器分接头宜设置为下列哪一项？（供配电2014年考题）

（A）+5%　　（B）0　　（C）−2.5%　　（D）−5%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第462～463页（第三版第257页）。

假设采用高压母线恒调压，偏差为0，如图2-3所示。

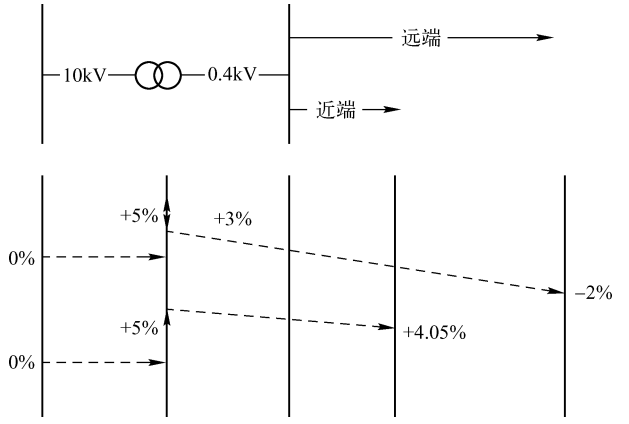


图2-3　网络电压偏差计算电路

最大负荷时远端设备电压降：

$$\Delta u_{max}=e-\Delta u_T-\Delta u_{l1}=e-2\%-5\%\geqslant-5\%$$

$$\Rightarrow e\geqslant 2\%$$

最小负荷时近端设备电压降（假设变压器电压损失忽略不计）：

$$\Delta u_{\min}=e-\Delta u_{\mathrm{T}}-\Delta u_{12}=e-0-0.95\%\leqslant 5\%$$

$$\Rightarrow e\leqslant 5.95\%$$

综上，e 可取 5%，即分接头设置为 0。

例题 2-4：某变电所 10 kV 母线正常运行时电压为 10.2 kV，则该 10 kV 母线供电电压偏差为下列哪一项？（供配电 2013 年考题）

（A）-3.80%　　（B）-1.90%　　（C）2%　　（D）3%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 458 页（第三版第 255 页）。

10 kV 母线供电电压偏差为

$$\delta U=\frac{U-U_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}}\times 100\%=\frac{10.2-10}{10}\times 100\%=2\%$$

例题 2-5～2-7：某 110/35/10 kV 区域变电站，分别向水泵厂及轧钢厂等用户供电，供电系统如图 2-4 所示，区域变电站 35 kV 母线最小短路容量为 500 MV·A，35 kV 母线的供电设备容量为 12500 kV·A，轧钢厂用电协议容量为 7500 kV·A。水泵厂最大负荷时，由区域变电所送出的 10 kV 供电线路的电压损失为 4%，水泵厂 10/0.4 kV 变压器的电压损失为 3%，厂区内 380 V 线路的电压损失为 5%，区域变电站 10 kV 母线电压偏差为 0，在水泵厂最小负荷时，区域变电所 10 kV 母线电压偏差为+5%。请回答下列问题。

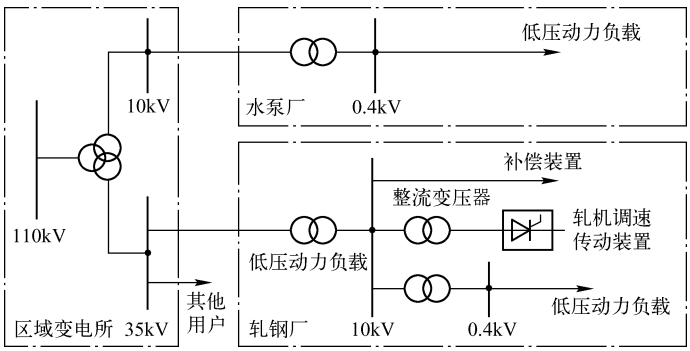


图 2-4　某区域变电所供电系统图

2-5：设水泵厂变压器 10±5%/0.4 kV 的分接头在-5%位置上，最小负荷为最大负荷的 25%，该水泵厂 380 V 线路末端的电压偏差范围为下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）5%　　（B）10%　　（C）14%　　（D）19%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 462 页、第 463 页（第三版第 257 页）。

查表 6.2-5 可知，变压器分接头-5%时，低压提升 $e=+10\%$。

水泵厂最大负荷时，由区域变电所送出的 10 kV 供电线路的电压损失为 4%，水泵厂 10/0.4 kV 变压器的电压损失为 3%，厂区内 380 V 线路的电压损失为 5%，区域变电站 10 kV 母线电压偏差为 0，则 380 V 低压线路末端电压偏差为

$$\Delta u_{max}=\Delta u_o+e-(\Delta u_{l1}+\Delta u_T+\Delta u_{l2})=0+10\%-(4+3+5)\%=-2\%$$

在水泵厂最小负荷时，区域变电所 10 kV 母线电压偏差为+5%，最小负荷为最大负荷的 25%，则 380 V 低压线路末端电压偏差为

$$\Delta u_{min}=\Delta u_o+e-(\Delta u_{l1}+\Delta u_T+\Delta u_{l2})=5\%+10\%-0.25\times(4+3+5)\%=12\%$$

电压偏差范围为+12%～-2%=14%。

2-6：在最大负荷时，20 MV·A 主变压器负载率为 84%，变压器阻抗电压为 8%，短路损耗为 90 kW，负载功率因数为 0.92，则 110/10 kV 变压器电压损失为下列哪项数值？（供配电 2010 年考题）

（A）2.97%　　（B）3.03%　　（C）5.64%　　（D）6.32%

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 460 页（第三版第 254 页）。

变压器电压损失为

$$u_a=\frac{100\Delta P_T}{S_{rT}}=\frac{100\times90}{20000}=0.45\%$$

$$u_r=\sqrt{u_T^2-u_a^2}=\sqrt{8^2-0.45^2}=7.978\%$$

$$\Delta u_T=\beta(u_a\cos\varphi+u_r\sin\varphi)=0.84\times(0.45\times0.92+7.987\times0.392)=2.97\%$$

【知识点解析】

变压器电压降按下式计算：

$$\begin{cases}\Delta u_T=\beta(u_a\cos\varphi+u_r\sin\varphi)=\dfrac{Pu_a+Qu_r}{S_{rT}}\\ u_a=\dfrac{100\Delta P_T}{S_{rT}}\\ u_r=\sqrt{u_T^2-u_a^2}\end{cases}$$

式中，Δu_T 为变压器电压降百分数（%）；S_{rT} 为变压器的额定容量（kV·A）；u_a 为变压器阻抗电压的有功分量（%）；u_r 为变压器阻抗电压的无功分量（%）；u_T 为变压器的阻抗电压（%）；ΔP_T 为变压器的短路损耗（kW）；β 为变压器的负荷率，即实际负荷与额定容量 S_T 的比值；$\cos\varphi$ 为负荷的功率因数；P 为三相负荷的有功功率（kW）；Q 为三相负荷的无功功率（kvar）。

2-7：某 35/10 kV 变电所，如果供电部门与该用户的产权分界为本 35 kV 变电所 35 kV 受电端，根据规范规定 35 kV 供电电压正、负偏差的绝对值之和允许值不超过下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）5%　　（B）10%　　（C）7%　　（D）15%

答案：【B】

解答过程：依据《电能质量 供电电压偏差》GB/T 12325—2008。

第 4.1 条　35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%。

例题 2-8：某企业新建 35/10 kV 变电所，选用 2 台 16000 kV·A 的变压器，每单台变压器阻抗电压为 8%，短路损耗为 70 kW，两台变压器同时工作，分列运行，负荷平均分配。

假定该变电所一台变压器所带负荷的功率因数为 0.7，其最大电压损失是下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）3.04%　　（B）3.90%　　（C）5.18%　　（D）6.01%

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版第 460 页（第三版第 254 页）。

变压器负载率与电压损失成正比，不考虑变压器超载运行时负载率为 1 时电压损失最大：

$$u_a=\frac{100\Delta P_T}{S_{rT}}=\frac{100\times70}{16000}=0.438\%$$

$$u_r=\sqrt{u_T^2-u_a^2}=\sqrt{8^2-0.438^2}=7.988\%$$

$$\Delta u_T=\beta(u_a\cos\varphi+u_r\sin\varphi)=1\times(0.438\times0.7+7.988\times0.714)=6.01\%$$

例题 2-9：某车间变电所配置一台 1600 kV·A，10±2×2.5%/0.4 kV，阻抗电压为 6% 的变压器，低压母线装设 300 kvar 并联补偿电容器，正常时全部投入。当负荷变化切除 50 kvar 并联电容器时，变压器电压损失的变化是下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）0.19%　　（B）0.25%　　（C）1.88%　　（D）2.08%

答案：【A】

解答过程：依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009 或《工业与民用供配电设计手册》第四版第 466 页（第三版第 260 页）。

条文说明第 5.0.5 条，切除 50 kvar 并联电容器变压器电压损失的变化为

$$\Delta U_T=\Delta Q_C\frac{E_k}{S_T}\%=50\times\frac{6}{1600}\%=0.19\%$$

【知识点解析】

产生电压偏差的主要因素是系统滞后的无功负荷所引起的系统电压损失，当调整电容器的接入容量就可以改变系统中的电压损失，电压损失的变化可按下式计算：

$$\text{对于线路}\quad \Delta U_1'=\Delta Q_C\frac{X_1}{10U_k^2}\%$$

$$\text{对于变压器}\quad \Delta U_T'=\Delta Q_C\frac{E_k}{S_T}\%$$

式中，ΔQ_C 为增加或减少的电容器容量（kvar）；X_1 为线路电抗（Ω）；E_k 为变压器短路电压（%）；U_k 为线路电压（kV）；S_T 为变压器容量（kV·A）。

例题 2-10：某变电所 10 kV 侧有一路长度为 5 km 的 LGJ-120 架空供电线路，该线路的计算有功功率为 1500 kW，自然功率因数为 0.8，则该供电线路电压损失为下列哪项数值？（LGJ-120 导线电阻为 0.285 Ω/km，电抗为 0.392 Ω/km）（供配电 2008 年考题）

（A）3.63%　　（B）4.34%　　（C）6.06%　　（D）5.08%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版第 459 页（第三版第 254 页）。

供电线路属于三相平衡负荷线路，自然功率因数为 0.8，其正切值为 $\tan\varphi=0.75$，电压损失为

$$\Delta u\%=\frac{1}{10U_n^2}(R_0'+X_0'\tan\varphi)Pl$$

$$=\frac{1}{10\times10^2}(0.285+0.392\times0.75)\times1500\times5$$

$$=4.34\%$$

【知识点解析】

线路电压损失按下式计算：

三相平衡负荷线路

$$\begin{cases}\Delta u=\dfrac{\sqrt{3}Il}{10U_n}(R'\cos\varphi+X'\sin\varphi)=Il\Delta u_\alpha\\ \Delta u=\dfrac{Pl}{10U_n^2}(R'+X'\tan\varphi)=Pl\Delta u_p\end{cases}$$

线电压的单相负荷线路

$$\begin{cases}\Delta u=\dfrac{2Il}{10U_n}(R'\cos\varphi+X'\sin\varphi)\approx1.15Il\Delta u_\alpha\\ \Delta u=\dfrac{2Pl}{10U_n^2}(R'+X'\tan\varphi)=2Pl\Delta u_p\end{cases}$$

相电压的单相负荷线路

$$\begin{cases}\Delta u=\dfrac{2\sqrt{3}Il}{10U_n}(R'\cos\varphi+X'\sin\varphi)\approx2Il\Delta u_\alpha\\ \Delta u=6Pl\Delta u_p\end{cases}$$

以上各式中，Δu 为线路电压损失（%）；U_n 为系统标称电压（kV）；I 为负荷电流（A）；$\cos\varphi$ 为负荷功率因数；P 为负荷的有功功率（kW）；l 为线路长度（km）；R'、X'为三相线路单位长度的电阻和电抗（Ω/km）；Δu_α 为三相线路单位电流长度的电压损失[%/(A·km)]；Δu_p 为三相线路单位功率长度的电压损失[%/(kW·km)]。

例题 2-11：如果某车间计算负荷为 2000kW，功率因数为 0.93（超前），35/10kV 变电所至车间的供电线路长度为 5.4km，线路每公里电抗、电阻分别为 0.36Ω/km、0.19Ω/km，则供电线路电压损失百分比应为下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）4.7　　（B）0.5　　（C）3.6　　（D）3.4

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版第 459 页（第三版第 254 页）。

供电线路属于三相平衡负荷线路，自然功率因数为 0.93（超前），其正切值为 $\tan\varphi=-0.4$，电压损失为

$$\Delta u=\frac{Pl}{10U_n^2}(R'+X'\tan\varphi)=\frac{2000\times5.4}{10\times10^2}\times[0.19+0.36\times(-0.4)]=0.5\%$$

2.2　电压波动和闪变与三相电压不平衡度

【知识点说明】

1）电压波动和闪变属于普通考点，依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326-

2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.4 节。要求熟练掌握电压波动及限值的计算，了解电弧炉和电焊机引起的电压波动，了解电压波动和闪变改善措施。

2）三相电压不平衡度属于普通考点，依据《电能质量 三相电压不平衡》GB/T 15543—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.3 节。要求掌握三相电压不平衡度近似计算，了解其危害以及改善措施。

依据书目：

《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008

《电能质量 三相电压不平衡》GB/T 15543—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

例题 2-12~2-13：企业变电所电源引自地区变电站，已知：35 kV 电源侧（公共接入点）最大和最小短路容量分别为 590 MV·A 和 500 MV·A，35 kV 线路电源处公共接入点供电设备容量为 50 MV·A，该电力用户用电协议容量为 20 MV·A；该电力用户 35/10 kV 变电所 10 kV 母线最大和最小短路容量分别为 157 MV·A 和 150 MV·A；电力用户的车间 A、B 的 10 kV 母线上有非线性负荷。请回答以下问题。

2-12：车间 A 的 2500 kW 电动机带动一周期工作制机械，在起动初始阶段，最大无功功率变动为 4 Mvar，该传动装置在 10 kV 变电所与 35 kV 母线和电源（公共接入点）引起的最大电压变动 d，其值分别接近下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）1.7%，0.5%　　（B）2.5%，0.67%

（C）1.59%，0.42%　　（D）2.7%，0.8%

答案：【D】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

在 10 kV 变电所引起的最大电压变动 d 为

$$d=\frac{\Delta Q_{\mathrm{i}}}{S_{\mathrm{sc}}}\times 100\%=\frac{4}{150}\times 100\%=2.7\%$$

在 35 kV 母线和电源侧（公共接入点）引起的最大电压变动 d 为

$$d=\frac{\Delta Q_{\mathrm{i}}}{S_{\mathrm{sc}}}\times 100\%=\frac{4}{500}\times 100\%=0.8\%$$

【知识点解析】

电压波动的估算：

当已知三相负荷的有功功率和无功功率的变化量分别为 ΔP_{i} 和 ΔQ_{i} 时，计算式为

$$d=\frac{R_{\mathrm{L}}\Delta P_{\mathrm{i}}+X_{\mathrm{L}}\Delta Q_{\mathrm{i}}}{U_{\mathrm{N}}^2}\times 100\%$$

式中，R_{L}、X_{L} 分别为电网阻抗的电阻和电抗分量。

在高压电网中，一般 $X_{\mathrm{L}}\gg R_{\mathrm{L}}$。

$$d\approx\frac{\Delta Q_{\mathrm{i}}}{S_{\mathrm{sc}}}\times 100\%$$

式中，S_{sc} 为考查点（一般为公共连接点 PCC）的短路容量。

在无功功率的变化量为主要成分时（例如大容量电动机起动），可采用下式进行粗略估算：

对于平衡的三相负荷

$$d \approx \frac{\Delta S_i}{S_{sc}} \times 100\%$$

式中，ΔS_i 为三相负荷容量的变化量。

对于由某一相间单相负荷变化引起的电压变动，计算式为

$$d \approx \frac{\sqrt{3}\Delta S_i}{S_{ac}} \times 100\%$$

式中，ΔS_i 为单相负荷容量的变化量。

注：上述公式参数中的短路容量 S_{sc} 是在正常较小方式下的，若未给出此参数，则以给出的投产时正常运行方式下的最大短路容量乘以 0.7 进行计算。

2-13：如该用户在 35 kV 电源（公共接入点）引起的电压变动 $d=1.5\%$，变动频率 r（次/h）不宜超过下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）1　　（B）10　　（C）100　　（D）1000

答案：【C】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

第 4 节中表 1 电压波动限值，系统电压等级为 35/10 kV，电压变动 $d=1.5\%$，查表得到变动频率 $1<r\leqslant 100$ 次/h。

例题 2-14~2-19：某轧钢厂电源引自开发区变电站 35 kV 母线（公共连接点）。公共连接点供电总容量 $S_t=40$ MV·A，轧钢厂协议供电容量 $S_i=4$ MV·A。公共连接点最大、最小运行方式时的短路容量分别为 400 MV·A、150 MV·A。轧钢厂最繁重轧制周期最大负荷为 4000 kV·A，其中基本负荷为 1000 kV·A，负荷以无功变化量为主，负荷曲线如图 2-5 所示。请回答下列问题。

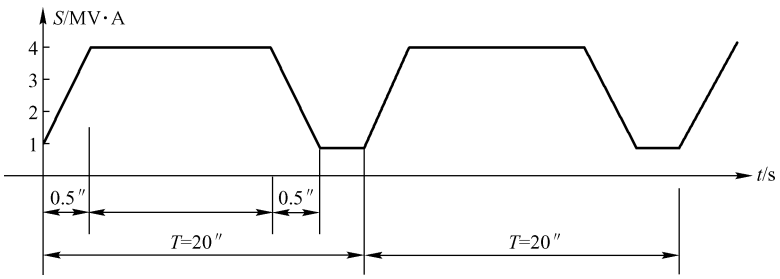


图 2-5　某轧钢厂负荷曲线

2-14：轧钢厂单独（不计其他用户）在公共连接点引起的电压变动百分数约为下列哪一项数值？

（A）0.5%~1.0%　　（B）1.2%~1.8%　　（C）1.9%~2.1%　　（D）2.2%~2.5%

答案：【C】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

题目已知轧钢厂最繁重轧制周期最大负荷为 4000 kV·A，基本负荷为 1000 kV·A，其负荷变化量为 3000 kV·A，对应的公共连接点引起的电压变动为

$$d=\frac{\Delta S}{S_{sc}}\times 100\%=\frac{3}{150}\times 100\%=2\%$$

2-15：轧钢厂单独（不计其他用户）在公共连接点引起的电压变动频度（1 h 内电压变动次数）约为下列哪一项数值？

（A）100 次/h　　（B）200 次/h　　（C）400 次/h　　（D）360 次/h

答案：【D】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

第 3.6 条　电压变动频度定义。如图 2-5 所示，轧钢厂轧制周期为 20 s 一周期，波动 2 次，电压变动频度为

$$r=\frac{3600}{20}\times 2\text{ 次/h}=360\text{ 次/h}$$

2-16：假设轧钢厂在公共连接点引起的电压变动频度为 5.7 次/min，则短时间闪变值约为下列哪一项数值？

（A）1.25　　（B）1.5　　（C）1.75　　（D）2.15

答案：【A】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

轧钢厂最繁重轧制周期最大负荷为 4000 kV·A，基本负荷为 1000 kV·A，其负荷变化量为 3000 kV·A，对应的公共连接点引起的电压变动 $d=\frac{\Delta S}{S_{sc}}\times 100\%=\frac{3}{150}\times 100\%=2\%$。

已知电压变动频度为 5.7 次/min，查 GB/T 12326—2008 表 4 或图 1 中对应电压变动 $d_{Lim}=1.6\%$，短时间闪变值为

$$P_{st}=\frac{d}{d_{Lim}}=\frac{2}{1.6}=1.25$$

2-17：若某地区变电站电压等级为 220/35 kV，220 kV 母线的长时间闪变限值为 0.8，35 kV母线（公共连接点 PCC）侧接入轧钢厂、炼钢厂等用户。若 220 kV 母线对 PCC 的闪变传递系数 $T=0.8$，则全部用户在 PCC 处的闪变限值约为下列哪一项数值？

（A）0.4　　（B）0.6　　（C）0.8　　（D）0.9

答案：【D】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

题目已知 220 kV 母线的长时间闪变限值为 $L_H=0.8$，查 GB/T 12326—2008 表 2 中 35 kV 母线公共连接点 PCC 长时间闪变总限制值为 $L_P=1.0$，全部用户在 PCC 处的闪变总限值 G 为

$$G=\sqrt[3]{L_P^3-T^3L_H^3}=\sqrt[3]{1^3-0.8^3\times 0.8^3}=0.904$$

2-18：已知公共连接点扣除背景后对全部用户引起的闪变限值为 $G=0.9$，取接于公共连接点的各用户的波动同时系数 $F=0.3$，则分配给轧钢厂的闪变（单独由轧钢厂在 PCC 产生的闪变）限值约为下列哪一项数值？

（A）0.2～0.4　　（B）0.45～0.55　　（C）0.6～0.65　　（D）0.85～0.95

答案：【C】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

题目已知全部用户引起的闪变限值为 $G=0.9$，波动同时系数为 $F=0.3$，查 GB/T 12326—2008 表 2 中 35 kV 母线公共连接点 PCC 长时间闪变总限制值为 $L_P=1.0$，协议供电容量为 $S_i=4\,\text{MV}\cdot\text{A}$，公共连接点供电总容量为 $S_t=40\,\text{MV}\cdot\text{A}$，单独由轧钢厂在 PCC 产生的闪变限值 E_i 为

$$E_i=G\sqrt[3]{\frac{S_i}{S_t}\frac{1}{F}}=0.9\times\sqrt[3]{\frac{4}{40}\times\frac{1}{0.3}}=0.624$$

2-19：某 10 kV 供电母线上带有一台电弧炉，母线短路容量为 50 MV·A。电弧炉变压器的额定容量为 2000 kV·A，电弧炉工作短路电流倍数为 3.5，熔化期额定运行点相应回路阻抗角为 $\cos^2\varphi=0.49$。在电弧炉熔化期中 10 kV 供电母线上的电压变动 d 值为下列哪一项数值？

（A）7.52%　　（B）5.3%　　（C）6.82%　　（D）8.21%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 475 页（第三版第 265 页）。

电弧炉熔化期中最大无功功率变化量为

$$\Delta Q_{max}=0.49kS_t=0.49\times3.5\times2000\,\text{kvar}=3430\,\text{kvar}$$

10 kV 供电母线上的电压变动 d 为

$$d\approx\frac{\Delta Q_{max}}{S_{sc}}\times100\%=\frac{3.43}{50}\times100\%=6.86\%$$

例题 2-20：某车间的 0.4 kV 供电母线上的短路容量为 4 MV·A，带有 3 台电弧焊机。一台三相电弧焊机（自动弧焊）的额定容量为 12 kV·A，两台单相 220 V 电弧焊机（手动弧焊）的额定容量为 2 kV·A，电弧焊机的冲击电流倍数均为 3.3。焊接时供电母线上的电压变动 d 值为下列哪一项数值？

（A）0.7%　　（B）0.5%　　（C）0.6%　　（D）0.8%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 476 页（第三版第 265 页）。

最大一台三相电弧焊机（自动弧焊）的额定容量为 12 kV·A，其最大无功功率变化量为

$$\Delta Q_{max}=2.3k_NS_N\sin\varphi=2.3\times1\times12\times0.86\,\text{kvar}=23.74\,\text{kvar}$$

10 kV 供电母线上的电压变动 d 为

$$d\approx\frac{\Delta Q_{max}}{S_{sc}}\times100\%=\frac{23.74}{4000}\times100\%=0.59\%$$

例题 2-21：已知某冶炼企业一个车间内有三台电弧炉，电弧炉容量为 1.5 t，型号为 HX-1.5，变压器额定容量为 1250 kV·A。假设当三台电弧炉同时开启工作时，波动（熔化期重叠）负荷短时间闪变值分别为 0.1%、0.2%、0.3%，则三台电弧炉波动负荷引起的短时间闪变值为下列哪一项数值？

（A）0.4%　　（B）0.5%　　（C）0.6%　　（D）0.8%

答案：【A】

解答过程：依据《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2008。

8.1 节中三台电弧炉（熔化期重叠）波动负荷时 $m=2$，引起的短时间闪变值为

$$P_{st}=\sqrt{P_{st1}^2+P_{st2}^2+P_{st3}^2}=\sqrt{(0.1\%)^2+(0.2\%)^2+(0.3\%)^2}=0.4\%$$

例题 2-22：某钢铁企业变电所 35 kV 母线三相短路容量为 400 MV·A，有轧钢类钢铁负荷，若 35 kV 母线有负序电流为 46 A，钢铁企业变电所 35 kV 母线的电压不平衡度为下列哪一项数值？（发输电 2013 年考题改编）

（A）0.06%　　（B）0.05%　　（C）0.7%　　（D）0.8%

答案：【C】

解答过程：依据《电能质量 三相电压不平衡》GB/T 15543—2008。

附录 A 中钢铁企业变电所 35 kV 母线的电压不平衡度为

$$\varepsilon_{U2}=\frac{\sqrt{3}I_2U_L}{S_k}\times100\%=\frac{\sqrt{3}\times46\times35\times10^3}{400\times10^6}\times100\%=0.7\%$$

例题 2-23：某钢铁企业变电所有轧钢类钢铁负荷，实测 0.4 kV 母线线电压 $U_{AB}=359.97e^{j32.94^\circ}$，$U_{BC}=362.49e^{j86.07^\circ}$，$U_{AC}=366.62e^{j153.10^\circ}$。若实测时发现零序电压为 0，则钢铁企业变电所 0.4 kV 母线的电压不平衡度为下列哪一项数值？

（A）1.4%　　（B）1.55%　　（C）1.7%　　（D）1.8%

答案：【A】

解答过程：依据《电能质量 三相电压不平衡》GB/T 15543—2008。

附录 A 中钢铁企业变电所 0.4 kV 母线的电压不平衡度为

$$L=\frac{a^4+b^4+c^4}{(a^2+b^2+c^2)^2}=\frac{U_{AB}^4+U_{BC}^4+U_{AC}^4}{(U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{AC}^2)^2}=\frac{359.97^4+362.49^4+366.62^4}{(359.97^2+362.49^2+366.62^2)^2}=0.3334$$

$$\varepsilon_{U2}=\sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6L}}{1+\sqrt{3-6L}}}\times100\%=\sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\times0.3334}}{1+\sqrt{3-6\times0.3334}}}\times100\%=1.4\%$$

2.3　公用电网谐波

【知识点说明】

公用电网谐波属于重要考点，依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.7 节等。要求熟练掌握谐波基本知识、谐波含有率的相关计算、谐波叠加和谐波限值折算；掌握谐波源及常用设备产生的谐波电流值、谐波的危害和减小谐波影响。

依据书目：

《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

例题 2-24：某变电所低压侧一馈电线路为容量 26 kV·A，电压 380 V 的三相非线性负载供电，若供电线路电流为 42 A，则此线路电流谐波畸变率 THD_i 为下列哪一项？（供配电

2014 年考题）

（A）6%　　（B）13%　　（C）36%　　（D）94%

答案：【C】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993 附录 A。

基波电流：$I_1=\dfrac{S}{\sqrt{3}U}=\dfrac{26}{\sqrt{3}\times 0.38}\text{A}=39.5\text{ A}$

谐波电流：$I_H=\sqrt{I_i^2-I_1^2}=\sqrt{42^2-39.5^2}\text{ A}=14.27\text{ A}$

总谐波畸变率：$\text{THD}_i=\dfrac{I_H}{I_1}\times 100\%=\dfrac{14.27}{39.5}\times 100\%=36\%$

【知识点解析】

（1）含有谐波的电压或电流有效值

含有谐波的电压或电流有效值等于基波和各次谐波电流或电流有效值的方均根值，即

$$U_h=\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}U_n^2}$$

$$I_h=\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}I_n^2}$$

式中，U_n、U_1 为第 n 次谐波电压和基波电压有效值（kV）；I_n、I_1 为第 n 次谐波电流和基波电流有效值（A）。

（2）第 n 次谐波含有率

谐波含有率是指周期性电气量中含有的第 n 次谐波分量有效值与基波分量有效值之比，用百分数表示。第 n 次谐波电压或电流含有率分别为

$$\begin{cases}\text{HRU}_n=\dfrac{U_n}{U_1}\times 100\%\\ \text{HRI}_n=\dfrac{I_n}{I_1}\times 100\%\end{cases}$$

（3）总谐波畸变率

总谐波畸变率表征波形畸变程度的总的谐波畸变率，是周期性电气量中谐波含量与其基波分量有效值之比，用百分数表示。谐波电压或谐波电流总谐波畸变率分别为

$$\begin{cases}\text{THD}_U=\dfrac{U_h}{U_1}\times 100\%=\dfrac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}U_n^2}}{U_1}\times 100\%=\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}(\text{HRU}_n)^2}\,(\%)\\ \text{THD}_I=\dfrac{I_h}{I_1}\times 100\%=\dfrac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}I_n^2}}{I_1}\times 100\%=\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}(\text{HRI}_n)^2}\,(\%)\end{cases}$$

式中，U_n、U_1 分别为第 n 次谐波电压和基波电压有效值（kV）；I_n、I_1 为第 n 次谐波电流和基波电流有效值（A）。

例题 2-25：变电所馈出的照明线路三相负荷配置平衡，各相 3 次谐波电流为基波电流的 20%，照明线路的中性导体电流和相导体电流的比值是下列哪一项？（供配电 2014

年考题）

（A）0.20　　（B）0.59　　（C）1.02　　（D）1.20

答案：【B】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

条文说明第3.2.9条，设基波电流为I，则相线电流$I_{ph}=I\sqrt{1+0.2^2}=1.02I$，中性线电流$I_N=3\times20\%I=0.6I$，中性导体电流和相导体电流的比值$\frac{I_N}{I_{ph}}=\frac{0.6I}{1.02I}=0.59$。

例题2-26：若该办公楼内某配电箱共有6个AC220 V馈线回路，每回路带25盏T5-28 W灯具，设计依据规范三相均衡配置。T5荧光灯用电子镇流器，电源电压为AC220 V，总输入功率为32 W，功率因数为0.97，3次谐波电流占总输入电流20%，计算照明配电箱电源中性线上的3次谐波电流应为哪项数值？（供配电2017年考题）

（A）0 A　　（B）0.03 A　　（C）0.75 A　　（D）4.5 A

答案：【D】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

条文说明第3.2.9条，一回路的3次谐波电流相线电流$I_3=20\%\frac{NP}{U\cos\varphi}=20\%\times\frac{25\times32}{220\times0.97}\text{A}=0.75\text{ A}$，中性线电流$I_N=6I_3=6\times0.75\text{ A}=4.5\text{ A}$。

例题2-27：某10 kV配电系统，系统中有两台非线性用电设备，经测量得知，一号设备的基波电流为100 A，3次谐波电流含有率为5%，5次谐波电流含有率为3%，7次谐波电流含有率为2%；二号设备的基波电流为150 A，3次谐波电流含有率为6%，5次谐波电流含有率为4%，7次谐波电流含有率为2%。两台设备3次谐波电流相位角为45°，基波和其他各级谐波的电流同相位。该10 kV配电系统中10 kV母线的电流总畸变率为下列哪项数值？（供配电2016年考题）

（A）6.6%　　（B）7.0%　　（C）13.6%　　（D）22%

答案：【A】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993附录A、附录C。

两路基波电流（电流同相位）：$I_1=I_{11}+I_{12}=(100+150)\text{ A}=250\text{ A}$

两路3次谐波电流（电流相位角为45°）：

$$I_3=\sqrt{I_{31}^2+I_{32}^2+2I_{31}I_{32}\cos\theta_3}$$

$$=\sqrt{(100\times5\%)^2+(150\times6\%)^2+2\times(100\times5\%)\times(150\times6\%)\cos45°}\text{ A}$$

$$=13\text{ A}$$

两路5次谐波电流（电流同相位）：

$$I_5=\sqrt{I_{51}^2+I_{52}^2+2I_{51}I_{52}\cos\theta_5}$$

$$=\sqrt{(100\times3\%)^2+(150\times4\%)^2+2\times(100\times3\%)\times(150\times4\%)\cos0}\text{ A}$$

$$=9\text{ A}$$

两路7次谐波电流（电流同相位）：

$$I_7=\sqrt{I_{71}^2+I_{72}^2+2I_{71}I_{72}\cos\theta_7}$$

$$=\sqrt{(100\times2\%)^2+(150\times2\%)^2+2\times(100\times2\%)\times(150\times2\%)\cos0}\ \text{A}$$

$$=5\ \text{A}$$

总谐波畸变率为

$$\text{THD}_I=\frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{7}I_n^2}}{I_1}\times100\%=\frac{\sqrt{13^2+9^2+6^2}}{250}\times100\%=6.6\%$$

例题 2-28~2-32：如图 2-6 所示，某工厂变电所 35 kV 电源进线侧（35 kV 电网）最大运行方式时短路容量为 650 MV·A、最小运行方式时短路容量为 500 MV·A，该变电所 10 kV 母线皆有两组整流设备，整流器接线均为三相全控桥式。已知 1#整流设备 10 kV 侧 5 次谐波电流值为 20 A，2#整流设备 10 kV 侧 5 次谐波电流值 30 A。请回答下列问题。

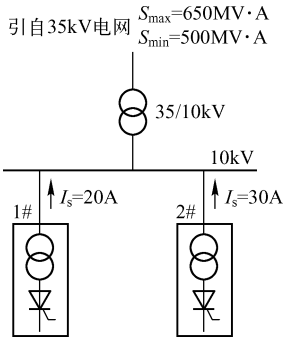


图 2-6　某工厂变电所接线图

2-28：若各整流器产生下列各次谐波，则下列哪项是非特征次谐波？请说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）5 次　　（B）7 次　　（C）9 次　　（D）11 次

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 494 页（第三版第 281 页）或《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 427 页。

整流器为 3 相，则特征谐波次数为 $3p\pm1$，即特征次谐波次数为 2、4、5、7、8、10、11、13 等，答案中 9 次是非特征次谐波。

【知识点解析】

特征谐波电流是换流设备的主要谐波电流。n_c 以外的谐波次数是非特征谐波次数。非特征谐波电流相对较小，可忽略不计。

当整流电路滤波电抗足够大，不计换相重叠角且控制角为零时（非相控），特征谐波次数 n_c 为

$$n_c=kp\pm1$$

式中，k 为整数 1，2，3，4，…；p 为整流电路的相数或每周脉动数。

2-29：若各整流器产生下列各次谐波，则哪一项是负序谐波？请叙明依据和理由。

（A）5 次　　（B）7 次　　（C）9 次　　（D）13 次

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 492 页（第三版第 281 页）。

谐波按照相序分为正序谐波（第 4、7、10、…、$3n+1$ 次）、负序谐波（第 2、5、8、…、$3n-1$ 次）和零序谐波（第 3、6、9、…、$3n$ 次）。答案中 5 次为负序谐波。

2-30：按照规范要求允许全部用户注入 35 kV 电网公共连接点的 5 次谐波电流分量为下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）31.2 A　　（B）24 A　　（C）15.8 A　　（D）12 A

答案：【B】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993 附录 B。

公共连接点处最小短路容量为 500 MV·A，查 GB/T 14549—1993 表 2 可得 35 kV 基准容量 $S_{k2}=250\ \text{MV}\cdot\text{A}$ 的允许值为 $I_{5p}=12\ \text{A}$。注入 35 kV 电网公共连接点的 5 次谐波电流允许值为

$$I_5=\frac{S_{k1}}{S_{k2}}I_{5p}=\frac{500}{250}\times 12\ \text{A}=24\ \text{A}$$

2-31：注入 35 kV 电网公共连接点的 5 次谐波电流值为下列哪一项？（供配电 2010 年考题）

（A）10 A　　（B）13 A　　（C）14 A　　（D）50 A

答案：【B】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993 附录 C。

10 kV 侧 1#整流设备 5 次谐波 20 A，2#整流设备 5 次谐波 30 A。查 GB/T 14549—1993 表 Cl 可得，5 次谐波时，$K_h=1.28$。10 kV 侧总的 5 次谐波电流值为

$$I_h=\sqrt{I_{h1}^2+I_{h1}^2+K_hI_{h1}I_{h2}}=\sqrt{20^2+30^2+1.28\times 20\times 30}\ \text{A}=45.475\ \text{A}$$

注入 35 kV 电网公共连接点的 5 次谐波电流值：

$$I'_h=\frac{I_h}{n_T}=45.475\times\frac{10}{35}\text{A}=13\ \text{A}$$

【知识点解析】

两个谐波源的同次谐波电流在一条线路的同一相上叠加，当相位角已知时，按下式计算：

$$I_n=\sqrt{I_{n1}^2+I_{n2}^2+2I_{n1}I_{n2}\cos\theta_n}\qquad(2-1)$$

式中，I_{n1}为谐波源 1 的第 n 次谐波电流（A）；I_{n2}为谐波源 2 的第 n 次谐波电流（A）；θ_n 为谐波源 1 和谐波源 2 的第 n 次谐波电流之间的相位角。

当相位角不确定时可按下式计算：

$$I_n=\sqrt{I_{n1}^2+I_{n2}^2+K_nI_{n1}I_{n2}}\qquad(2-2)$$

式中，K_n 系数按表 2-1 选取。

表 2-1　K_n 值

n	3	5	7	11	13	9 | >13 | 偶次
K_n	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08	0

两个以上同次谐波电流叠加时，首先将两个谐波电流叠加，然后再与第三个谐波电流相叠加。两个及以上谐波源在电网中同一节点同一相上引起的同次谐波电压的计算公式与式（2-1）或式（2-2）类同。

2-32：假设注入电网的 7 次谐波电流为 10 A，由此产生的 7 次谐波电压含有率最大值为下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）24%　　（B）0.85%　　（C）0.65%　　（D）0.24%

答案：【B】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993 附录 C。

注入电网的7次谐波电压含有率为

$$\mathrm{HRU}_{\mathrm{h}}=\frac{\sqrt{3}U_{\mathrm{N}}hI_{\mathrm{h}}}{10S_{\mathrm{k}}}=\frac{\sqrt{3}\times35\times7\times10}{10\times500}=0.8487\%$$

【知识点解析】

第 n 次谐波含有率近似工程估算公式：

$$\mathrm{HRU}_{n}=\frac{\sqrt{3}U_{\mathrm{N}}nI_{n}}{10S_{\mathrm{k}}}(\%)$$

或

$$I_{n}=\frac{10S_{\mathrm{k}}\mathrm{HRU}_{n}}{\sqrt{3}U_{\mathrm{N}}n}(\%)$$

式中，U_{N} 为电网的标称电压（kV）；S_{k} 为公共连接点的三相短路容量（MV·A）；I_{n} 为第 n 次谐波电流（A）。

例题 2-33~2-34：某 110/35/10 kV 区域变电站，分别向水泵厂及轧钢厂等用户供电，供电系统如图 2-7 所示，区域变电站 35 kV 母线最小短路容量为 500 MV·A，35 kV 母线的供电设备容量为 12500 kV·A，轧钢厂用电协议容量为 7500 kV·A。请回答下列问题。

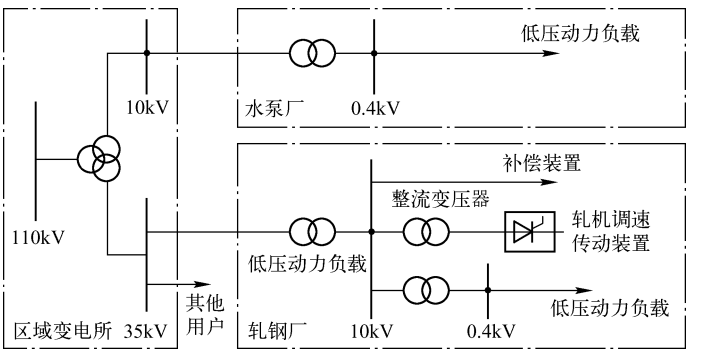


图 2-7　某区域变电所供电系统图

2-33：轧钢厂在区域变电所 35 kV 母线上，可注入的 7 次谐波电流允许值是下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）7.75 A　　（B）8.61 A　　（C）10.56 A　　（D）12.22 A

答案：【D】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993 第 8.1.7 条。

题目已知中全部用户注入公共连接点处最小短路容量为 500 MV·A，查 GB/T 14549—1993 表 2 可得，$S_{\mathrm{k2}}=250$ MV·A，$I_{7\mathrm{p}}=8.8$ A；总供电设备容量为 $S_{\mathrm{t}}=12500$ kV·A，轧钢厂协议容量为 $S_{\mathrm{i}}=7500$ kV·A，根据表 C2 可得，$h=7$ 时，$\alpha=1.4$。

变电站总可注入的 7 次谐波电流允许值为

$$I_{7}=\frac{S_{\mathrm{k1}}}{S_{\mathrm{k2}}}I_{7\mathrm{p}}=\frac{500}{250}\times8.8\ \mathrm{A}=17.6\ \mathrm{A}$$

轧钢厂可注入的 7 次谐波电流允许值为

$$I_{7\mathrm{i}}=I_{7}\left(\frac{S_{\mathrm{i}}}{S_{\mathrm{t}}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}=17.6\times\left(\frac{7500}{12500}\right)^{\frac{1}{1.4}}\mathrm{A}=12.22\ \mathrm{A}$$

【知识点解析】

当电网公共连接点的最小短路容量不同于基准短路容量时，应按照下式修正谐波电流允许值：

$$I_n=(S_{k1}/S_{k2})I_{np} \tag{2-3}$$

式中，S_{k1}为公共连接点的最小短路容量（MV·A）；S_{k2}为基准短路容量（MV·A）；I_{np}为第n次谐波电流允许值（A）；I_n为短路容量为S_{k1}时的第n次谐波电流允许值（A）。

在公共连接点处第i个用户的第n次谐波电流允许值（I_{ni}）对式（2-3）再修正

$$I_{ni}=I_n(S_i/S_t)^{1/\alpha} \tag{2-4}$$

式中，I_n为按式（2-3）换算的第n次谐波电流允许值（A）；S_i为第i个用户的用电协议容量（MV·A）；S_t为公共连接点的供电设备容量（MV·A）；α为相位叠加系数，按表2-2取值。

表2-2　α值

n	3	5	7	11	13	9 | >13 | 偶次
α	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

2-34：下列关于谐波的描述哪一项是错误的？请说明依据和理由。（供配电2010年考题）

（A）谐波可能在公用电网中产生并联谐振引起过电压而损坏电网中的其他用电设备

（B）谐波使接在同一电网中的电力电容器可能由于对谐波电流的放大而过电流

（C）并联电容器的容性阻抗特性，以及阻抗和频率成反比的特性，使得电容器容易吸收谐波电流而引起过载发热

（D）谐波电压与基波电压峰值不会发生叠加，电容器介质不会发生局部放电

答案：【D】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第810页。

11.1.1节中第4、5条，答案A、B正确。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第489页（第三版第286页）。

6.7.4节谐波对并联电容器影响中C正确，D错误。

例题2-35~2-37：某110/35 kV区域变电站，向附近的轧钢厂、钢绳厂及水泵厂等用户供电，供电方案如图2-8所示。

区域变电站110 kV侧最小短路容量为1500 MV·A，35 kV母线侧最小短路容量为500 MV·A，35 kV母线的供电设备容量为25000 kV·A，轧钢厂用电协议容量为15000 kV·A。

方案一：区域变电所以35 kV分别向轧钢厂、钢绳厂及水泵厂等用户供电。轧钢厂设35/10 kV专用变电所，以10 kV向整流变压器供电。轧钢厂共设有两台4500 kV·A整流变压器，各供一套6脉动三相桥式整流装置，每台整流变压器10 kV侧基波电流I_1=225 A，7次谐波电流的有效值按工程设计法计算。

方案二：由轧钢厂及钢绳厂合并用（轧钢钢绳厂）并拟自建110/35 kV专用降压变电所，改为110 kV由区域变电站受电，轧钢厂整流变压器运行情况同上。假定不考虑轧钢厂其他谐波源，不考虑7次谐波以外次数谐波，也无其他会放大谐波电流的容性负荷。请回答以下问题，并列出解答过程。

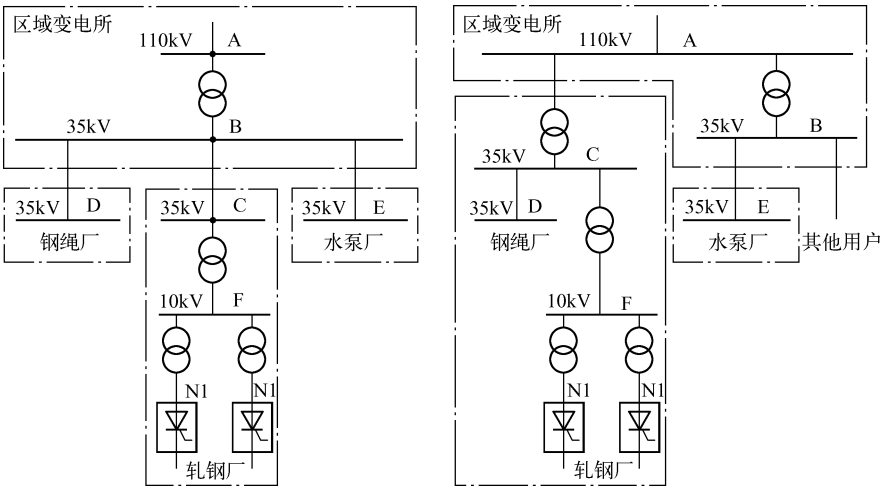


图 2-8　某区域变电所供电方案

2-35：方案一中的电网谐波公共连接点应为下列哪项？（供配电 2008 年考题）

（A）轧钢厂总变电所 35 kV 母线 C 点　　（B）轧钢厂总变电所 10 kV 母线 F 点

（C）区域变电所 35 kV 母线 B 点　　（D）区域变电所 110 kV 母线 A 点

答案：【C】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993。

第 3.1 条 公共连接点指的是用户接入公用电网的连接处。方案一的公共连接点为区域变电所 35 kV 母线 B 点。

2-36：方案二中的电网谐波公共连接点应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）轧钢厂总变电所 35 kV 母线 C 点　　（B）轧钢厂总变电所 10 kV 母线 F 点

（C）区域变电所 35 kV 母线 B 点　　（D）区域变电所 110 kV 母线 A 点

答案：【D】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993。

第 3.1 条方案二的公共连接点为区域变电所 110 kV 母线 A 点。

2-37：若采用方案一，在 35 kV 电网谐波公共连接点处，钢绳厂基波电流为 $I_1=250$ A，5 次谐波含有率为 15%；轧钢厂基波电流为 $I_1=200$ A，5 次谐波含有率为 12%；水泵厂基波电流为 $I_1=350$ A，5 次谐波含有率为 10%。则该用户注入电力系统的 5 次谐波电流为下列何值？

（A）93.3 A　　（B）82.9 A　　（C）70.5 A　　（D）102.5 A

答案：【B】

解答过程：依据《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549—1993 附录 C。

钢绳厂 5 次谐波为 37.5 A，轧钢厂 5 次谐波为 24 A，水泵厂 5 次谐波为 35 A。查表 C1 可得，5 次谐波时，$K_h=1.28$。

注入 35 kV 电网公共连接点的 5 次谐波电流值为

$$I_h=\sqrt{I_{h1}^2+I_{h1}^2+K_hI_{h1}I_{h2}}=\sqrt{37.5^2+24^2+1.28\times37.5\times24}\,\text{A}=55.98\,\text{A}$$

$$I_h=\sqrt{I_{h1}^2+I_{h1}^2+K_hI_{h1}I_{h2}}=\sqrt{55.98^2+35^2+1.28\times55.98\times35}\,\text{A}=82.87\,\text{A}$$

2.4 节能损耗

【知识点说明】

1）配电系统的节电设计属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）1.9~1.10节、16.2节和《钢铁企业电力设计手册》（上册）等。要求熟练掌握年电能消耗量、电力线路功率损耗计算；掌握提高功率因数与节电、电压选择与节电计算。

2）配电变压器的节能属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）1.10节、16.2节和《钢铁企业电力设计手册》（上册）等。要求熟练掌握变压器功率损耗计算、变压器电能损耗计算、经济运行临界负荷计算；掌握变压器效率、负载率、变压器综合功率和有功、无功、综合经济负载系数等计算。

3）电动机及调速的节电设计属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）16.5节和《钢铁企业电力设计手册》（上册）等。要求熟练掌握变频调速与其他调速对比的节能计算、风机水泵的节能原理计算；了解电动机效率、损耗、无功补偿后节电计算。

4）照明节电设计属于重要考点，依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013、《照明设计手册》第三版、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）16.6节和《钢铁企业电力设计手册》（上册）等。详见第13章。

5）并联电容器、电抗器等电器损耗计算属于冷门考点，依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）10.2节、《钢铁企业电力设计手册》（上册）。要求掌握并联电容器、电抗器、电缆发热量等。

依据书目：

《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008

《建筑照明设计标准》GB 50034—2013

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

《照明设计手册》第三版

例题2-38：某城市综合体设置一座10 kV总配电室及若干变配电室。某1000 kV·A变压器空载损耗为1.7 kW，短路损耗（或满足损耗）为10.3 kW，阻抗电压为4.5%，空载电流为0.7%，负荷率为71%，负荷功率因数为0.9，则变压器实际运行效率为下列哪项数值？（供配电2016年考题）

（A）98.89%　　（B）98.92%　　（C）99.04%　　（D）99.18%

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第291页。

变压器实际运行效率为

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{\beta S_N\cos\varphi}{\beta S_N\cos\varphi+P_0+\beta^2P_K}\times100\%$$

$$=\frac{0.71\times1000\times0.9}{0.71\times1000\times0.9+1.7+0.71^2\times10.3}\times100\%=98.93\%$$

例题 2-39：一台 UPS 的电源引自某变电所，UPS 的额定输出容量为 300 kV·A、整机效率为 0.92，所带负载的功率因数为 0.8，若整机效率提高到 0.93，则 UPS 一年（365 天）负荷运行节约的电量为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）30748 kW·h　　（B）24572 kW·h　　（C）1024 kW·h　　（D）986 kW·h

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 306 页。

假设在平均负载率为 1 的情况下运行一年：

$$W=P\left(\frac{1}{\eta_2}-\frac{1}{\eta_1}\right)T_Y=300\times0.8\times\left(\frac{1}{0.92}-\frac{1}{0.93}\right)\times365\times24\ \text{kW}\cdot\text{h}=24572\ \text{kW}\cdot\text{h}$$

例题 2-40~2-41：某企业 35 kV 总降压变电站设有两台三相双绕组变压器，容量为 2×5000 kV·A，电压比为 35±2×2.5%/10.5 kV，变压器空载有功损耗为 4.64 kW，变压器阻抗电压为 7%，变压器负载有功损耗为 34.2 kW，变压器空载电流为 0.48%。请回答以下问题。

2-40：该变电站主变压器经济运行的临界负荷是多少？（无功功率经济当量取 0.1 kW/kvar）（供配电 2014 年考题）

（A）1750 kV·A　　（B）2255 kV·A　　（C）3250 kV·A　　（D）4000 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1561 页（第三版第 40 页）。

该变电站主变压器经济运行的临界负荷：

$$S_{cr}=S_r\sqrt{2\frac{P_0+K_qQ_0}{P_k+K_qQ_r}}=5000\times\sqrt{2\times\frac{4.64+0.1\times5000\times0.48\%}{34.2+0.1\times5000\times7\%}}\ \text{kV}\cdot\text{A}=2255\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

【知识点解析】

（1）无功经济当量 K_q

无功经济当量 K_q 的物理概念是，变压器每减少 1 kvar 无功功率消耗时，引起连接系统有功损失下降的 kW 值。所以 K_q 值的大小和变压器在系统中的位置直接相关：

$$K_q=\frac{\Delta P_C}{\Delta Q}$$

式中，ΔQ 为变压器无功功率消耗减少值（kvar）；ΔP_C 为变压器连接系统有功功率损失下降值（kW）。

（2）变压器经济运行条件

变电所主变压器经济运行的条件见表 2-3。

表 2-3　变电所主变压器经济运行的条件

序　号	主变压器台数	经济运行的临界负荷	经济运行条件
1	2 台	$S_{cr}=S_r\sqrt{2\frac{P_0+K_qQ_0}{P_k+K_qQ_r}}$	若 $S<S_{cr}$ 宜 1 台运行 若 $S>S_{cr}$ 宜 2 台运行

（续）

序　号	主变压器台数	经济运行的临界负荷	经济运行条件
2	n 台	$S_{cr}=S_r\sqrt{n(n-1)\dfrac{P_0+K_qQ_0}{P_k+K_qQ_r}}$	若 $S<S_{cr}$ 宜 $n-1$ 台运行 若 $S>S_{cr}$ 宜 n 台运行

注：S_{cr}为经济运行临界负荷（kV·A）；S_r 为变压器的额定容量（kV·A）；S 为变电所实际负荷（kV·A）；P_0 为变压器空载有功损耗（铁损，kW）；Q_0 为变压器空载时的无功损耗（kvar），$Q_0\approx S_r(I_0\%)/100$；$I_0\%$为变压器空载电流占额定电流的百分值（%）；$P_k$ 为变压器满载（短路）有功损耗（kW）；Q_r 为变压器满载（短路）无功损耗（kvar），$Q_r\approx S_r(U_k\%)/100\%$；$U_k\%$为变压器阻抗电压占额定电压的百分值（%）；$K_q$ 为无功功率经济当量（kW/kvar），由发电机电压直配的工厂变电所 $K_q=0.02\sim0.04$ kW/kvar，经两级变压的工厂变电所 $K_q=0.05\sim0.08$ kW/kvar，经三级及以上变压的工厂变电所 $K_q=0.01\sim0.15$ kW/kvar，在不计及上述计算条件时，一般取 $K_q=0.1$ kW/kvar。

2-41：变压器负荷率为下列哪一项时，变压器的有功损失率最小？（供配电 2014 年考题）

（A）37%　　（B）50%　　（C）65%　　（D）80%

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 291 页。

变压器的有功损失率最小时变压器负荷率为

$$\beta_{jP}=\sqrt{\frac{P_0}{P_K}}=\sqrt{\frac{4.64}{34.2}}=0.37=37\%$$

【知识点解析】

变压器有功经济负载系数：

$$\beta_{jP}=\sqrt{\frac{P_0}{P_K}} \tag{2-5}$$

式（2-5）说明，当铜损等于铁损时，变压器的损失率达到最低，β_{jP}称为有功经济负载系数。所以，当固定变压器运行时，可以通过调负载来降低 $\Delta P\%$。一般变压器的$\dfrac{P_0}{P_K}\approx\dfrac{1}{4}\sim\dfrac{1}{3}$，故最低损失率大体发生在负载系数$\beta\approx0.5\sim0.6$ 的情况下。

例题 2-42：已知设计选用额定容量为 1600 kV·A，变压器的空载损耗为 2110 W、负载损耗为 10250 W，空载电流为 0.25%、阻抗电压为 6%，在负载率为 51%的情况下，变压器的综合有功功率损耗应为下列哪组数值？（无功功率经济当量取 0.1 kW/kvar）（供配电 2013 年考题改编）

（A）59.210 kW　　（B）6.304 kW　　（C）5.228 kW　　（D）7.673 kW

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1544 页或《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 295 页。

变压器的无功功率损耗为

$$\Delta Q_T=Q_0+Q_k\left(\frac{S_c}{S_r}\right)^2=\frac{I_0\%}{100}S_r+\frac{u_k\%}{100}S_r\left(\frac{S_c}{S_r}\right)^2=\left[\frac{0.25}{100}\times1600+\frac{6}{100}\times1600\times(0.51)^2\right]\text{kvar}$$

$=28.97\ \text{kvar}$

变压器的综合有功功率损耗为

$$\sum P=P_0+P_k\left(\frac{S_c}{S_r}\right)^2+K_q\Delta Q_T=[2.11+10.25\times(0.51)^2+0.1\times28.97]\text{kW}=7.673\text{kW}$$

例题 2-43~2-44：某车间变电所设 10/0.4 供电变压器一台，变电所设有低压配电室，用于布置电压配电柜。变压器容量为 1250 kV·A，$U_d\%=5$，△/Y接线，短路损耗为13.8 kW。变电所低压侧总负荷为 836 kW，功率因数为 0.76。低压用电设备中电动机 M_1 的额定功率为 45 kW，额定电压为 380 V，额定电流为 94.1 A，额定转速为 740 r/min，效率为 92.0%，功率因数为 0.79，最大转矩比为 2。电动机 M_1 的供电电缆型号为 VV-0.6/1 kV，3×25+1×16 mm^2，长度为 220 m，单位电阻为 0.723 Ω/km。请回答下列问题，并列出解答过程。（计算中忽略变压器进线侧阻抗和变压器至低压配电柜的母线阻抗）

2-43：拟在低压配电室设置无功功率自动补偿装置，将功率因数从 0.76 补偿至 0.92，计算补偿后该变电所年节能量应为下列哪项数值？（变电所的年运行时间按 365 天×24 小时计算）（供配电 2017 年考题）

（A）29731 kW·h　　（B）31247 kW·h

（C）38682 kW·h　　（D）40193 kW·h

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 297 页。

由于在低压配电室设置无功功率自动补偿装置，题目中忽略变压器进线侧阻抗和变压器至低压配电柜的母线阻抗，此部分的损耗不考虑，只需计算 10/0.4 供电变压器。故 10/0.4 供电变压器补偿后该变电所年节能量为

$$\Delta Pt=\left(\frac{P_2}{S_N}\right)^2\left(\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-\frac{1}{\cos^2\varphi_2}\right)P_Kt=\left(\frac{836}{1250}\right)^2\times\left(\frac{1}{0.76^2}-\frac{1}{0.92^2}\right)\times13.8\times365\times24\text{kW}\cdot\text{h}=29731\text{kW}\cdot\text{h}$$

2-44：拟采用就地补偿的方式将电动机 M_1 的功率因数补偿至 0.92，计算补偿后该电动机馈电线路的年节能量应为下列哪项数值？（电动机的年运行时间按 365 天×24 小时计算）（供配电 2017 年考题改编）

（A）6350 kW·h　　（B）7132 kW·h　　（C）8223 kW·h　　（D）9836 kW·h

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 297 页。

计算补偿后该电动机馈电线路的年节能量：

$$\Delta Pt=\left(\frac{P}{\eta U}\right)^2R\left(\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-\frac{1}{\cos^2\varphi_2}\right)t$$

$$=\left(\frac{45}{0.92\times380}\right)^2\times0.732\times0.22\times\left(\frac{1}{0.79^2}-\frac{1}{0.92^2}\right)\times10^{-3}\times365\times24\text{kW}\cdot\text{h}=9836\text{kW}\cdot\text{h}$$

【知识点解析】

提高功率因数的节能作用

1）提高功率因数可减少线路损耗。如果输电线路导线每相电阻为 $R(\Omega)$，则三相输电线路的功率损耗为

$$\Delta P = 3I^2R\times10^{-3} = \frac{P^2R}{U^2\cos^2\varphi}\times10^{-3}$$

式中，ΔP 为三相输电线路的功率损耗（kW）；P 为电力线路输送的有功功率（kW）；U 为线电压（V）；I 为线电流（A）；$\cos\varphi$ 为电力线路输送负荷的功率因数。

由上式可以看出，在全厂有功功率一定的情况下，$\cos\varphi$ 越低，功率损耗 ΔP 将越大。设法将 $\cos\varphi$ 提高，就可使 ΔP 减小。

在线路的电压 U 和有功功率 P 不变的情况下，改善前的功率因数为 $\cos\varphi_1$，改善后的功率因数为 $\cos\varphi_2$，则三相回路实际减少的功率损耗可按下式计算：

$$\Delta P = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R\left(\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-\frac{1}{\cos^2\varphi_2}\right)\times10^{-3}$$

2）减少变压器的铜损。变压器的损耗主要有铁损和铜损。如果提高变压器二次侧的功率因数，可使总的负荷电流减少，从而减少铜损。

提高功率因数后，变压器节约的有功功率 ΔP 和节约的无功功率 ΔQ 的计算公式为

$$\Delta P = \left(\frac{P_2}{S_N}\right)^2\left(\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-\frac{1}{\cos^2\varphi_2}\right)P_K$$

$$\Delta Q = \left(\frac{P_2}{S_N}\right)^2\left(\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-\frac{1}{\cos^2\varphi_2}\right)Q_K$$

式中，ΔP、ΔQ 分别为变压器的有功功率节约值（kW）和无功功率节约值（kvar）；P_2 为变压器负载侧输出功率（kW）；S_N 为变压器额定容量（kV·A）；$\cos\varphi_1$ 为变压器原负载功率因数；$\cos\varphi_2$ 为提高后的变压器负载功率因数；P_K 为变压器的短路损失（kW）；Q_K 为变压器额定负载时的无功功率（kvar）。

3）减少线路及变压器的电压损失。由于提高了功率因数，减少了无功电流，因而减少了线路及变压器的电流，从而减小了电压降。

例题 2-45～2-46：某企业供电系统计算电路如图 2-9 所示。

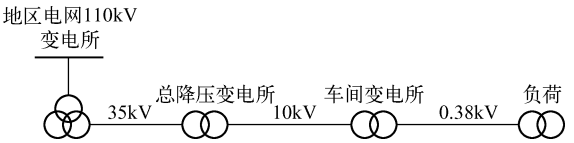


图 2-9　某企业供电系统图

图中 35 kV 电缆线路采用交联聚乙烯铜芯电缆，长度为 3.5 km，电缆截面积为 150 mm^2，35 kV 电缆有关参数见表 2-4，请回答下列问题，并列出解答过程。

表 2-4　35 kV 交联聚乙烯绝缘电缆的电压损失表

截面/mm^2		电阻 θ=75℃/(Ω/km)	感抗/(Ω/km)	埋地 25℃的允许负荷/MV·A	明敷 30℃的允许负荷/MV·A	电压损失/[%/(MW·km)]			电压损失/[%/(kA·km)]		
						cosφ			cosφ		
						0.8	0.85	0.9	0.8	0.85	0.9
铜	3×50	0.428	0.137	7.76	10.85	0.043	0.042	0.39	2.099	2.158	2.202
	3×70	0.305	0.128	9.64	13.88	0.033	0.031	0.029	1.589	1.613	1.638

（续）

截面/mm²		电阻 θ=75℃/(Ω/km)	感抗/(Ω/km)	埋地 25℃的允许负荷/MV·A	明敷 30℃的允许负荷/MV·A	电压损失/[%/(MW·km)]			电压损失/[%/(kA·km)]		
						cosφ			cosφ		
						0.8	0.85	0.9	0.8	0.85	0.9
铜	3×95	0.225	0.121	11.46	16.79	0.026	0.025	0.022	1.250	1.262	1.267
	3×120	0.178	0.116	12.97	19.52	0.022	0.02	0.018	1.049	1.049	1.044
	3×150	0.143	0.112	14.67	22.49	0.019	0.017	0.015	0.896	0.896	0.881
	3×185	0.116	0.109	16.49	25.70	0.016	0.015	0.013	0.782	0.772	0.752
	3×240	0.090	0.104	19.04	30.31	0.014	0.013	0.011	0.663	0.653	0.624
	3×300	0.072	0.103	21.40	34.98	0.012	0.011	0.009	0.593	0.571	0.544
	3×400	0.054	0.103	24.07	39.46	0.011	0.010	0.008	0.519	0.496	0.465

2-45：假定总降压变电所计算有功负荷为 15000 kW，补偿前后的功率因数分别为 0.8 和 0.9，该段线路补偿前后有功损耗为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）28 kW，22 kW　　（B）48 kW，38 kW

（C）83 kW，66 kW　　（D）144 kW，113 kW

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 26 页（第三版第 16 页）。

补偿前线路损耗：

$$\Delta P_{L1}=3I_{C1}^2R\times10^{-3}=3\left(\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_1}\right)^2R\times10^{-3}=3\times\left(\frac{15000}{\sqrt{3}\times35\times0.8}\right)^2\times0.143\times10^{-3}\times3.5\,\text{kW}=144\,\text{kW}$$

补偿后线路损耗：

$$\Delta P_{L2}=3I_{C2}^2R\times10^{-3}=3\left(\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_2}\right)^2R\times10^{-3}=3\times\left(\frac{15000}{\sqrt{3}\times35\times0.9}\right)^2\times0.143\times10^{-3}\times3.5\,\text{kW}=113\,\text{kW}$$

题中对线路温度无要求，不考虑温度修正，选 D。

2-46：假定车间变电所变压器额定容量为 $S_N=20000\,\text{kV}\cdot\text{A}$，空载损耗为 $P_0=3.8\,\text{kW}$，短路损耗为 $P_K=16\,\text{kW}$，正常运行时的计算负荷为 $S_j=1500\,\text{kV}\cdot\text{A}$，该变压器在正常运行时的有功损耗 ΔP_T 为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）9 kW　　（B）12.8 kW　　（C）15.2 kW　　（D）19.2 kW

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 30 页（第三版第 16 页）。

变压器在正常运行时的有功损耗 ΔP_T 为

$$\Delta P_T=P_0+P_K\left(\frac{S_c}{S_r}\right)^2=\left[3.8+16\times\left(\frac{1500}{2000}\right)^2\right]\text{kW}=12.8\,\text{kW}$$

例题 2-47：某企业拟建一座 10 kV 变电站，用电负荷如下：大批量冷加工机床、焊接变压器组、泵、通风机类设备等。在该变电站设计中，下列哪项不是节能措施？请说明依据

和理由。(供配电 2011 年考题)

(A) 合理选择供电电压等级

(B) 为了充分利用设备的容量资源，应尽量使变压器满负荷运行

(C) 提高系统的功率因数

(D) 选择低损耗变压器

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》(上册) 第 291 页、第 297 页。

6.3 节变配电设备的节电中，答案 A、C、D 是节电措施。

变压器的最低损失率发生在 $\beta_{jP}=\sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$，一般为 0.5~0.6，从变压器的功率损失和损失率的负荷特性曲线中看出，最低损失率之后负载率越大，变压器的功率损失越大，所以答案 B 错。

例题 2-48~2-49：某炼钢厂除尘风机电动机额定功率为 $P_e=2100\,\text{kW}$，额定转速为 $N=1500\,\text{r/min}$，额定电压为 $U_n=10\,\text{kV}$，额定效率为 $\eta_m=0.952$；除尘风机额定功率为 $P_N=2000\,\text{kW}$，额定转速为 $N=1491\,\text{r/min}$，据工艺状况工作在高速或低速状态，高速时转速为 1350 r/min，低速时为 300 r/min，年作业 320 天，每天 24 h。进行方案设计时，做液力耦合器调速方案和变频器调速方案的技术比较，变频器效率为 0.96。请回答下列问题，并列出解答过程。

2-48：如果除尘风机运行在高速时，这种情况下用变频调速器调速比液力耦合器调速每天省电多少度？(供配电 2012 年考题改编)

(A) 2351 kW·h　　(B) 3231 kW·h　　(C) 2599 kW·h　　(D) 3958 kW·h

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》(上册) 第 306 页、第 309 页。

根据风机轴功率与转速的特性关系，电动机的额定效率：

$$\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3\Rightarrow P_2=P_1\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3=2000\times\left(\frac{1350}{1491}\right)^3\,\text{kW}=1484.56\,\text{kW}$$

液力耦合器效率 $\eta_{M1}=1-\frac{1500-1350}{1500}=0.9$，变频效率 $\eta_{M2}=0.96$，额定效率 $\eta_m=0.952$，变频调速器调速比液力耦合器调速每天省电：

$$W=\frac{P_2}{\eta_m}\left(\frac{1}{\eta_{M1}}-\frac{1}{\eta_{M2}}\right)t=\frac{1484.56}{0.952}\left(\frac{1}{0.9}-\frac{1}{0.96}\right)\times 24\,\text{kW}\cdot\text{h}=2599\,\text{kW}\cdot\text{h}$$

【知识点解析】

(1) 更换高效电动机 (交流、变频装置等) 节省的电量计算

$$W=P_N\left(\frac{1}{\eta_2}-\frac{1}{\eta_1}\right)T_Y K_L K_W$$

式中，P_N 为直流电动机的额定容量 (kW)；η_1 为晶闸管交流装置的效率；η_2 为电动发电机组的效率；T_Y 为年运行时间 (h)；K_L 为平均负载系数；K_W 为实际有效作业率。

(2) 更换高效电动机 (交流、变频装置等) 节省的电费计算 (不考虑负荷率和作业率)

采用高效电动机每年节约的电费可按下式计算：

$$G_d=\frac{J_d Pt}{\eta_m}\left(\frac{1}{\eta_{M1}}-\frac{1}{\eta_{M2}}\right)$$

式中，J_d 为电价（元/kW·h）；P 为泵的轴功率（kW）；t 为年运行时间（h）；η_m 为机械传动装置的效率；η_{M1} 为低效电动机的效率；η_{M2} 为高效电动机的效率。

2-49：已知从风机的供电回路测得，采用变频调速方案时，风机高速运行时功率为1202 kW，低速运行时功率为10 kW，采用液力耦合器调速方案时，风机高速运行时功率为1406 kW，低速时为56 kW，若除尘风机高速和低速各占50%，则采用变频调速比采用液力耦合器调速每年节约多少度电？（供配电2012年考题）

（A）688 042 kW·h　　（B）726 151 kW·h

（C）960 000 kW·h　　（D）10 272 285 kW·h

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第303页例7中相关公式。

1）高速时，应用变频调速方案和液力耦合器方案的功率差为(1406-1202) kW=204 kW，对应节省的电量为

$$W_1=\Delta Pt=204\times(50\%\times320\times24)\text{ kW}\cdot\text{h}=783\,360\text{ kW}\cdot\text{h}$$

2）低速时，应用变频调速方案和液力耦合器方案的功率差为(56-10) kW=46 kW，对应节省的电量为

$$W_2=\Delta Pt=46\times(50\%\times320\times24)\text{ kW}\cdot\text{h}=176\,640\text{ kW}\cdot\text{h}$$

3）变频调速比采用液力耦合器调速每年节约电量：

$$W=W_1+W_2=(783\,360+176\,640)\text{ kW}\cdot\text{h}=960\,000\text{ kW}\cdot\text{h}$$

例题2-50~2-52：某一除尘风机拟采用变频调速，技术数据：在额定风量时交流感应电动机计算功率为 $P=900$ kW，电动机综合效率为 $\eta_{m100}=0.92$，变频器效率为 $\eta_{mp100}=0.976$；50%额定风量工作时，电动机效率为 $\eta_{m50}=0.8$，变频器效率为 $\eta_{mp50}=0.92$。20%额定风量工作时，电动机效率为 $\eta_{m20}=0.65$，变频器效率为 $\eta_{mp20}=0.9$。工作制度：年工作时间为6000 h，额定风量下工作时间占40%，50%额定风量下工作时间占30%，20%额定风量下占30%；忽略电网损失。请回答下列问题，并列出解答过程。

2-50：采用变频调速，在上述工作制度下，该风机的年耗电量与下述哪项值相近？

（A）2 645 500 kW·h　　（B）2 702 900 kW·h

（C）3 066 600 kW·h　　（D）4 059 900 kW·h

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第306页。

根据风机速度与功率的特性，功率与速度（风量）的3次方成正比，即 $\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3=\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3$，故各个风量对应的功率如下：

额定风量对应的功率 $P_{100}=\frac{P_n}{\eta_{m100}\eta_{mp100}}$，50%额定风量对应的功率 $P_{50}=\frac{(0.5)^3P_n}{\eta_{m50}\eta_{mp50}}$，20%额

定风量对应的功率 $P_{20}=\dfrac{(0.2)^3P_n}{\eta_{m20}\eta_{mp20}}$。

风机的年耗电量为

$$W=PT_Y=P_n\left[\frac{40\%}{\eta_{m100}\eta_{mp100}}+\frac{30\%\times(0.5)^3}{\eta_{m50}\eta_{mp50}}+\frac{30\%\times(0.2)^3}{\eta_{m20}\eta_{mp20}}\right]T_Y$$

$$=900\times6000\times\left[\frac{40\%}{0.92\times0.976}+\frac{30\%\times(0.5)^3}{0.8\times0.92}+\frac{30\%\times(0.2)^3}{0.65\times0.9}\right]\text{kW}\cdot\text{h}$$

$$=2\,702\,849\,\text{kW}\cdot\text{h}$$

【知识点解析】

用年平均负荷来确定年电能消耗量：企业年电能消耗量用年平均负荷和实际工作小时数计算，当已知企业的计算有功功率 P_c 及计算无功功率 Q_c 后，企业的年有功 W_y 及无功电能 W_{ry} 消耗量的计算式为

$$W_y=\alpha_{av}P_cT_n(\text{kW}\cdot\text{h})$$

$$W_m=\beta_{av}Q_cT_n(\text{kvar}\cdot\text{h})$$

式中，α_{av}、β_{av} 为年平均有功、无功负荷系数，应采用同类型企业的多年累积的统计数据，当缺乏此数据时，作为估算，α_{av} 值一般取 0.7～0.75，β_{av} 值取 0.76～0.82；T_n 为年实际工作小时数，一班制可取 1860 h，二班制可取 3720 h，三班制可取 5580 h。

2-51：若不采用变频器调速，风机风量 Q_i 的改变采用控制风机出口挡板开度的方式，在上述工作制度下，该风机的年耗电量与下列哪个数值最接近？（设风机扬程为 $H_i=1.4-0.4\times Q_i^2$，式中，Q_i 和 H_i 均为标幺值。提示：$P_i=\dfrac{Q_iH_i}{\eta_m}$）

（A）3 979 800 kW·h　　（B）4 220 800 kW·h

（C）4 353 900 kW·h　　（D）5 388 700 kW·h

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 306 页。

额定风量对应的扬程为 $H_{100}=1.4-0.4\times Q_{100}^2=1.4-0.4\times1^2=1$

50%额定风量对应的扬程为 $H_{50}=1.4-0.4\times Q_{50}^2=1.4-0.4\times0.5^2=1.3$

20%额定风量对应的扬程为 $H_{20}=1.4-0.4\times Q_{20}^2=1.4-0.4\times0.2^2=1.384$

风机的年耗电量为

$$W=\frac{P_nH_iQ_i}{\eta_m}T_Y=\frac{P_n}{\eta_m}(40\%\times H_{100}Q_{100}+30\%\times H_{50}Q_{50}+30\%\times H_{20}Q_{20})T_Y$$

$$=\frac{900}{0.92}\times6000\times(40\%\times1\times1+30\%\times1.3\times0.5+30\%\times1.384\times0.2)\text{kW}\cdot\text{h}$$

$$=4\,353\,947\,\text{kW}\cdot\text{h}$$

【知识点解析】

调节电动机的转速，可以实现变速变流量调节。

1）变速变流量的节能原理。根据风机、水泵的压力-流量特性曲线，按照工艺要求的流量，实现变速变流量控制，是节电的有效方法。从理论上讲，风机、泵类具有以下特点：

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{N_2}{N_1},\frac{H_2}{H_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2,\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

式中，Q_1、Q_2 为流量（m^3/s）；N_1、N_2 为转速（r/min）；P_1、P_2 为功率（kW）；H_1、H_2 为扬程（m）。

即流量与转速成比例，而功率与流量的 3 次方成比例。由于风机、水泵一般用不调速的笼型电动机传动，当流量需要改变时，用改变风门或阀门的开度进行控制，效率很低。若采用转速控制，当流量减小时，所需功率近似按流量的 3 次方大幅度下降。

图 2-10a、b 分别为风门控制和转速控制流量的特性曲线。由图 2-10a 可知，当流量降到 80%时，功耗为原来的 96%，即

$$P_B=H_BQ_B=1.2H_A\times0.8Q_A=0.96P_A$$

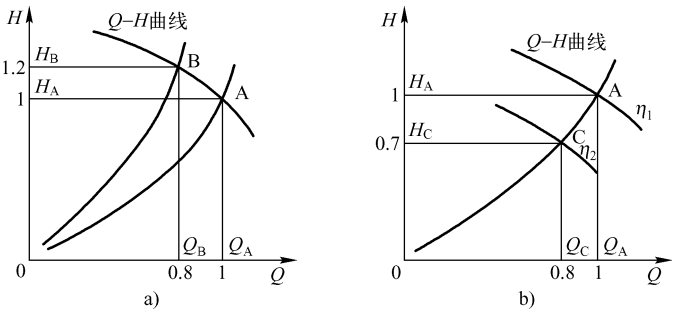


图 2-10　风门控制和转速控制流量特性曲线

a）风机流量的风门控制　b）风机流量的转速控制（$\eta_1>\eta_2$）

由图 2-10b 可见，当流量下降到 80%时，功率为原来的 56%（即降低了 44%），即

$$P_C=H_CQ_C=0.7H_A\times0.8Q_A=0.56P_A$$

由此看来，调速比调风门提升的节电率为

$$\frac{0.96P_A-0.56P_A}{0.96P_A}\times100\%=41\%$$

可见流量的转速控制节电效果显著。

2-52：若变频器调速设备的初始投资为 84 万元，假设采用变频器调速时的年耗电量是 2 156 300 kW·h，不采用变频器调速时的年耗电量是 3 473 900 kW·h，若电价按 0.7 元/(kW·h)计算，仅考虑电价因素时预计初始投资成本回收期约为多少个月？

（A）10 个月　　（B）11 个月　　（C）12 个月　　（D）13 个月

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 290 页。

因题目要求仅考虑电价因素（忽略时间价值因素等）

单月电费：$G_Y=G_d/12=\dfrac{(3473900-2156300)\times0.7}{12}$万元/月 $=7.686$ 万元/月

回收期：$T_Y=Z/G_Y=84/7.686$ 月 $=10.92$ 月 ≈11 月

例题 2-53：某厂为进行节能技术改造，拟将原由晶闸管整流器供电的直流电动机改用交流调速同步电动机，电动机水冷方式不变，原直流电动机的功率 $P_n=2500$ kW，转速为585 r/min，

要求调速比大于15∶1。该直流电动机的设备年工作6000 h，有效作业率为0.7，平均负载系数为0.65，设直流电动机平均效率为0.91，同步电动机的平均效率为0.96，改为交流传动方案后，电动机本身的年节能为下列哪一项数值？

（A）39.1×10^4 kW·h　　（B）60.9×10^4 kW·h

（C）85.9×10^4 kW·h　　（D）188.7×10^4 kW·h

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第306页。

改为交流传动方案后电动机本身的年节能：

$$W=P_{\mathrm{N}}\left(\frac{1}{\eta_2}-\frac{1}{\eta_1}\right)T_{\mathrm{Y}}K_{\mathrm{L}}K_{\mathrm{W}}=2500\times\left(\frac{1}{0.91}-\frac{1}{0.96}\right)\times6000\times0.65\times0.7\ \mathrm{kW\cdot h}=39.1\times10^4\ \mathrm{kW\cdot h}$$

例题2-54：某变电站，整组35 kV电容器户内安装于一间电容器室内。单台电容器容量为500 kvar，电容器组每相电容器10并4串，介质损耗角正切值（tanδ）为0.05%，串联电抗器额定端电压为1300 V，额定电流为850 A，损耗为0.03 kW/kvar，与暖通专业进行通风量配合时，电容器室一组电容器的发热量应为下列哪项数值？（发输电2016年考题）

（A）30 kW　　（B）69.45 kW　　（C）99.45 kW　　（D）129.45 kW

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008。

条文说明第9.2.1条、第9.2.3条中并联电容器负荷60 Mvar，3相，每相10并4串，单台500 kvar，共计120台。电容器介质损耗发热量为

$$P_{\mathrm{C}}=NQ_{\mathrm{C}}\tan\delta=120\times500\times0.05\%\ \mathrm{kW}=30\ \mathrm{kW}$$

三相共计三台电抗器，电抗器发热量为

$$P_{\mathrm{L}}=NQ_{\mathrm{L}}K=3\times1.3\times850\times0.03\ \mathrm{kW}=99.45\ \mathrm{kW}$$

电容器室一组电容器的发热量为

$$\sum P=P_{\mathrm{C}}+P_{\mathrm{L}}=(30+99.45)\ \mathrm{kW}=129.45\ \mathrm{kW}$$

第 3 章　负荷计算与负荷分级

【知识点导图】

图 3-1 所示的负荷计算与负荷分级知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。其中必考点有设备功率转换、需要系数法负荷计算、利用系数法负荷计算、单相负荷换算为等效三相负荷、负荷分级及供电要求。需要系数法、利用系数法负荷计算，单相负荷换算为等效三相负荷的计算过程要求很模糊，本章给出了相应解题流程图作为指导。

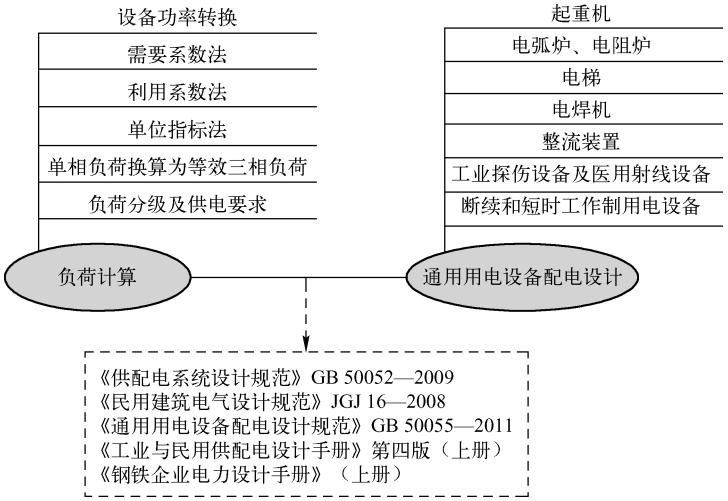


图 3-1　负荷计算与负荷分级知识点导图

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 1 章对负荷计算章节的内容更新较小，明确了最大负荷和平均负荷概念；更新了周期工作制、短时工作制电动机设备功率的换算等；需要系数法、利用系数法负荷计算小节变动较小。

3.1　设备功率与单位指标法负荷计算

【知识点说明】

1）设备功率属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）1.2 节等。要求熟练掌握周期工作制、短时工作制电动机、电焊机、电炉变压器等设备功率计算；掌握用电设备组、消防用电设备、季节性用电设备的总设备功率计算。

2）单位指标法属于冷门考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）1.3 节。了解负荷密度指标法、综合单位指标法、单位产品耗电量法。

依据书目：

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《民用建筑电气设计计算及示例》12SDX101-2

例题 3-1：民用建筑中，关于负荷计算的内容和用途，下列表述哪一项是不符合规范要求的？

（A）负荷计算，可作为按发热条件选择变压器、导体及电器的依据

（B）负荷计算，可作为电能损耗及无功功率补偿的计算依据

（C）季节性负荷，可以确定变压器的容量和台数及经济运行方式

（D）二、三级负荷，可用以确定备用电源及其容量

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 3.5.1 条　负荷计算应包括下列内容和用途：

1）负荷计算，可作为按发热条件选择变压器、导体及电器的依据，并用来计算电压损失和功率损耗；也可作为电能消耗及无功功率补偿的计算依据。

2）尖峰电流，可用以校验电压波动和选择保护电器。

3）一级、二级负荷，可用以确定备用电源或应急电源及其容量。

4）季节性负荷，可以确定变压器的容量和台数及经济运行方式。

答案 D 与本条不符，选 D。

例题 3-2：弧焊变压器 10 台，其铭牌容量及数量为：额定电压为单相 380 V，其中 200 kV·A，4 台；150 kV·A，4 台；100 kV·A，2 台；负载持续率为 60%，功率因数为 0.5。本车间单相 380 V 自动弧焊变压器的总有功设备功率应为下列哪项数值？（供配电 2006 年考题）

（A）619.8 kW　　（B）800 kW　　（C）1240 kW　　（D）1600 kW

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页（第三版第 2 页）。

本车间单相 380 V 自动弧焊变压器的总有功设备功率为

$$\sum P_e = \sum S_N \sqrt{\varepsilon_N} \cos\varphi = (4\times200+4\times150+2\times100)\times\sqrt{60\%}\times0.5\,\text{kW} = 619.7\,\text{kW}$$

例题 3-3：已知有一台额定功率为 40 kW、负载持续率为 40%的吊车，采用需要系数法进行负荷计算时该设备功率是下列何值？（供配电 2008 年考题）

（A）25.3 kW　　（B）16 kW　　（C）100 kW　　（D）32 kW

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页（第三版第 2 页）。

本车间单相 380 V 自动弧焊变压器的总有功设备功率为

$$P_e = P_N \sqrt{\varepsilon_N} = 40\times\sqrt{40\%}\,\text{kW} = 25.3\,\text{kW}$$

【知识点解析】

周期工作制电动机的设备功率是将额定功率一律换算到负载持续率为 100%的有功功

率，即

$$P_e = P_N \sqrt{\varepsilon_N}$$

式中，P_e 为负载持续率为100%的有功功率（kW）；P_N 为电动机额定功率（kW）；ε_N 为电动机额定负载持续率。

常见的周期工作制电动机是起重机用电动机。过去的习惯做法是：采用利用系数法时，换算为 $\varepsilon=100\%$ 的功率；采用需要系数法时，换算为 $\varepsilon=25\%$ 的功率。这种不统一的做法应予以摒弃，如利用原有的需要系数时，只要相应地调整其取值即可。

例题 3-4：已知某商场有两台交流货梯 32 kV·A，两台交流客梯 4 kV·A，额定电压为单相 380 V，功率因数为 0.9，1 h 工作制频繁使用。本商场电梯单相 380 V 的总有功设备功率应为下列哪项数值？（供配电 2014 年考题改编）

（A）25.3 kW　　（B）16 kW　　（C）100 kW　　（D）32.4 kW

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页。

电梯 1 h 工作制频繁使用，按持续率 25% 考虑，本商场电梯单相 380 V 的总有功设备功率为

$$\sum P_e = \sum S_N \sqrt{\varepsilon_N} \cos\varphi = (2\times32+2\times4)\times\sqrt{25\%}\times0.9\,\text{kW} = 32.4\,\text{kW}$$

例题 3-5：已知某车间内有 5 台断续周期工作制电动机组，额定电压为单相 380 V，额定功率和负载持续率如图 3-2 所示。本车间单相 380 V 电动机的总有功设备功率应为下列哪项数值？

（A）25.3 kW　　（B）36 kW

（C）100 kW　　（D）32 kW

答案：【B】

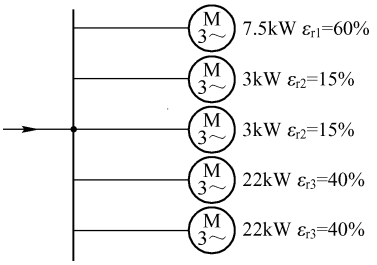


图 3-2　电动机组额定功率和负载持续率

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页（第三版第 2 页）。

本商场电梯单相 380 V 的总有功设备功率为

$$\sum P_e = \sum P_N \sqrt{\varepsilon_N} = (7.5\times\sqrt{60\%}+2\times3\times\sqrt{15\%}+2\times22\times\sqrt{40\%})\,\text{kW} = 35.96\,\text{kW}$$

例题 3-6：某省会城市综合体项目，地上 4 栋一类高层建筑，地下室连成一体，总建筑面积为 280 254 m^2，建筑面积分配和装机指标见表 3-1，在初步设计方案中拟设置 10 kV 配电站一座，该配电站的计算容量为下列哪一项？（供配电 2013 年考题改编）

表 3-1　建筑面积分配和装机指标

建筑区域	五星级酒店	金融总部办公大楼	出租商务办公大楼	综合商业大楼
建筑面积/m^2	58 749	75 860	68 423	77 222
装机指标/[(V·A)/m^2]	97	106	105	150

（A）32 900 kV·A　　（B）38 460 kV·A　　（C）30 254 kV·A　　（D）32 512 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 8 页（第三版第 11 页）。

该配电站的单位指标法计算容量见表 3-2。

表 3-2　该配电站的单位指标法计算容量

建 筑 区 域	建筑面积/m^2	装机指标/[(V·A)/m^2]	计算容量/kV·A
五星级酒店	58 794	97	5703
金融总部办公大楼	75 860	106	8041
出租商务办公大楼	68 425	105	7185
综合商业大楼	77 222	150	11583
合计			32512

例题 3-7：某科技园位于寒冷地区，其中规划有科研办公楼高 99 m，酒店高 84 m，住宅楼高 49.5 m，员工宿舍楼高 24.5 m，以及配套商业车库等建筑物。根据表 3-3 列出的几栋楼建筑的技术指标，同时系数取 0.9，$\cos\varphi=0.92$，计算负荷容量应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

表 3-3　科技园的几栋楼建筑的技术指标

序　　号	建 筑 名 称	建筑面积/m^2	户数/户	计算负荷指标	需 要 系 数
1	科研办公楼	31400	—	42 W/m^2	—
2	员工宿舍楼	2800	27	2.5 kW/户	0.65
3	住宅楼	12122	117	6 kW/户	0.4
4	配套商业车库等设施	14688	—	36 W/ m^2	—

（A）1799 kV·A　　（B）1955 kV·A　　（C）2125 kV·A　　（D）2172 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 8 页（第三版第 11 页）。

表 3-4　科技园的几栋楼建筑的负荷计算表

建 筑 名 称	建筑面积/m^2	户数/户	计算负荷指标	需 要 系 数	功率/kW
科研办公楼	31400	—	42 W/ m^2	—	1318.8
员工宿舍楼	2800	27	2.5 kW/户	0.65	43.87
住宅楼	12122	117	6 kW/户	0.4	280.8
配套商业车库等设施	14688	—	36 W/ m^2	—	528.77
功率合计					2172.24
计算容量	$S=K_{\Sigma p}\dfrac{P}{\cos\varphi}=0.9\times2172.24\div0.92\,\text{kV}\cdot\text{A}=2125.02\,\text{kV}\cdot\text{A}$				

3.2　需要系数法负荷计算

【知识点说明】

1）需要系数法属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）1.4 节等。要求熟练掌握需要系数、同时系数查取，用电设备组、配电干线或车间变电站的

计算功率、计算视在功率和计算电流。

2）需要系数法配电干线或车间变电站的计算可以参考《民用建筑电气设计计算及示例》12SDX101-2。针对需要系数法计算过程本节给出了解题流程图，如图 3-3 所示。

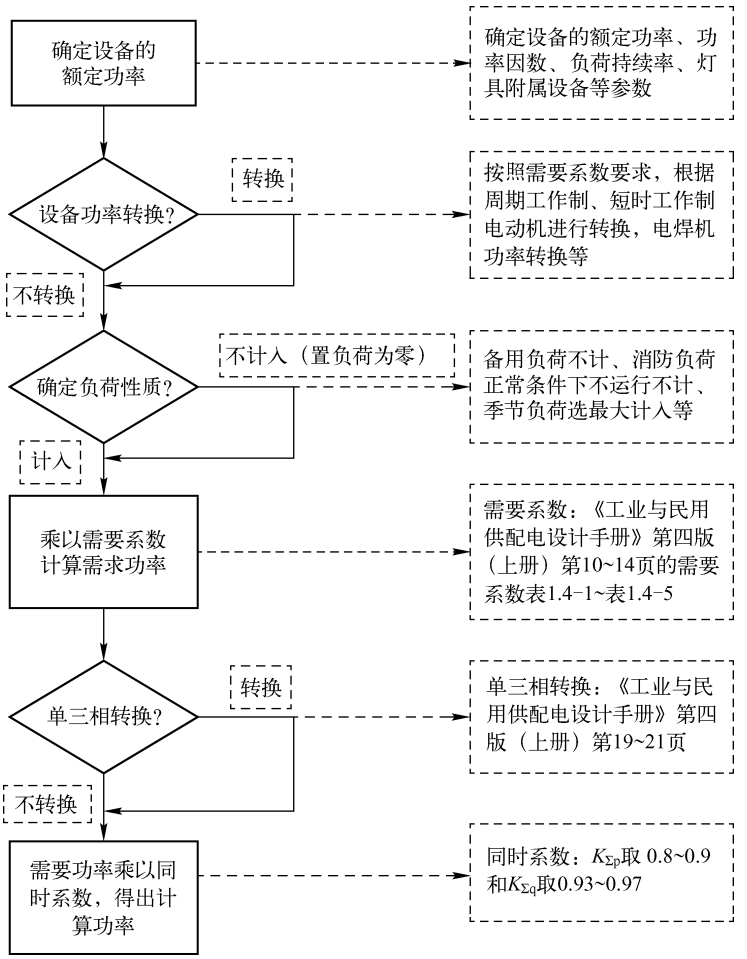


图 3-3　需要系数法负荷计算流程图

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《民用建筑电气设计计算及示例》12SDX101-2

例题 3-8：某城市综合体设置一座 10 kV 总配电室及若干变配电室，10 kV 总配电室向各变配电室和制冷机组放射式供电。10 kV 制冷机组无功功率就地补偿，各变配电室无功在低压侧集中补偿，各变配电室和制冷机组补偿后的功率因数均为 0.9。综合体内共设 8 台 10/0.4 kV 变压器（变压器容量及负荷率见表 3-5）和 3 台 10 kV 制冷机组，制冷机组的额定功率分别为 2 台 1928 kW（$\cos\varphi=0.80$）和 1 台 1260 kW（$\cos\varphi=0.80$），按需要系数法计

算综合体的总计算负荷，其值是下列哪项数值？（同时系数取 0.9，不计线路、母线及变压器损耗）（供配电 2016 年考题）

表 3-5　变压器容量及负荷率

变压器编号	TM_1	TM_2	TM_3	TM_4	TM_5	TM_6	TM_7	TM_8
容量/kV·A	2000	2000	1600	1600	1250	1250	1000	1000
负荷率（%）	67	61	72	60	70	65	76	71

（A）11651 kV·A　　（B）12163 kV·A　　（C）12227 kV·A　　（D）12802 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 10 页（第三版第 3 页）。

题目已知综合体内各变配电室无功在低压侧集中补偿，综合体内各变配电和制冷机组补偿后 10 kV 侧的功率因数均为 0.9，不计线路、母线及变压器损耗。

各变配电总计算功率为

$$\sum P_T = [2000(0.67+0.61)+1600(0.72+0.6)+1250(0.7+0.65)+1000(0.76+0.71)]\times 0.9\,\text{kW}$$
$$= 7046.55\,\text{kW}$$

制冷机组总计算功率（用电设备少于 5 台不考虑需要系数）：

$$\sum P_C = (2\times 1928+1260)\,\text{kW} = 5116\,\text{kW}$$

汇总各配电支路，则总配电室 10 kV 侧的总计算负荷为

$$\sum S = K_{\sum P}(\sum P_T+\sum P_C)/\cos\varphi = 0.9\times(7046.55+5116)/0.9\,\text{kV·A} = 12162.5\,\text{kV·A}$$

例题 3-9：某 2000 kV·A 变压器低压侧三相四线，额定频率为 50 Hz，母线运行线电压为 0.4 kV，总计算负荷合计有功功率为 1259 kW，无功功率为 800 kvar，现在该母线上设置 12 组星形接线的 3 相并联电容器组，每组串联电抗率为 7%的电抗器，电容器组参数：三相额定线电压为 0.48 kV，额定容量为 50 kvar，按需要系数法确定无功功率补偿后总计算容量，其值是下列哪项数值？（$K_{\sum P}=0.9$，$K_{\sum Q}=0.95$）（供配电 2016 年考题改编）

（A）1144 kV·A　　（B）1153 kV·A　　（C）1175 kV·A　　（D）1307 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 508 页式（9-20）或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 10 页、第 39 页（第三版第 3 页）。

考虑加入电抗器后的并联电容器无功输出为

$$Q_B \leqslant \frac{3M}{N}\frac{U_m^2}{U_{ce}^2}\frac{Q_{ce}}{1-A} = \frac{12}{1}\times\frac{0.4^2}{0.48^2}\times\frac{50}{1-0.07}\,\text{kvar} = 448.03\,\text{kvar}$$

配线干线计算有功功率：$P_C = K_{\sum P}(K_d P_e) = 0.9\times 1259\,\text{kW} = 1133.4\,\text{kW}$

配线干线计算无功功率：$Q_c = K_{\sum Q}(K_d P_e \tan\varphi) = 0.95\times 800\,\text{kvar} = 760\,\text{kvar}$

配线干线计算容量：$S_c = \sqrt{P_c^2+Q_c^2} = \sqrt{1133.4^2+(760-448.03)^2}\,\text{kV·A} = 1175.5\,\text{kV·A}$

例题 3-10：若每户住宅用电负荷标准为 6 kW，255 户均匀分配接入三相配电系统，需要系数见表 3-6，三相计算容量为下列哪项数值？（$\cos\varphi=0.80$）（供配电 2016 年考题）

表 3-6　需要系数表

户　　数	13~24	25~124	125~259	260~300
需要系数	0.50	0.45	0.35	0.3

注：表中户数是指单相配电时接于同一相上的户数，按三相配电时连接的户数应乘以 3。

（A）1913 kV·A　　（B）1530 kV·A　　（C）861 kV·A　　（D）669 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《住宅建筑电气设计规范》JGJ 242—2011。

条文说明 3.4.1 条和表 1，均匀分配接入三相配电系统，可以认为是三相用户，题目中表格折算见表 3-7，255 户查表需要系数为 0.45。

表 3-7　需要系数折算表

单相户数	13~24	25~124	125~259	260~300
三相户数	39~72	75~372	375~777	780~900
需要系数	0.50	0.45	0.35	0.3

住宅用电负荷计算有功功率：$P_c = KP = 0.45 \times 6 \times 255\ \text{kW} = 688.5\ \text{kW}$

住宅用电负荷计算容量：$S_c = \dfrac{P_c}{\cos\varphi} = \dfrac{688.5}{0.8}\text{kV} \cdot \text{A} = 861\ \text{kV} \cdot \text{A}$

例题 3-11：某大型商业中心裙房商场电梯数量见表 3-8，按需要系数法计算（同时系数取 0.8）供全部电梯的商场电梯计算容量为下列哪一项？（供配电 2013 年考题改编）

表 3-8　商场电梯参数表

设备名称	功率/kV·A	额定电压	功率因数	数量/部	需要系数
直流客梯	50	380	0.9	6	0.5
交流货梯	32①	380	0.85	2	0.5
交流客梯	4①	380	0.85	2	0.5

① 持续运行时间 1 h 额定容量。

（A）134.3 kV·A　　（B）251.2 kV·A　　（C）207.6 kV·A　　（D）565.2 kV·A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页。

电梯 1 h 工作制频繁使用，按持续率 25%考虑，本商场电梯设备功率计算如下。

单台直流客梯：$P_{e0} = S_N \cos\varphi = 50 \times 0.9\ \text{kW} = 45\ \text{kW}$

单台交流货梯：$P_{e1} = S_N \sqrt{\varepsilon_N} \cos\varphi = 32 \times \sqrt{25\%} \times 0.85\ \text{kW} = 13.6\ \text{kW}$

单台交流客梯：$P_{e2} = S_N \sqrt{\varepsilon_N} \cos\varphi = 4 \times \sqrt{25\%} \times 0.85\ \text{kW} = 1.7\ \text{kW}$

商场电梯的电源导体载流量计算见表 3-9。

表 3-9　商场电梯的电源导体载流量计算表

设备名称	设备功率/kW	电压/V	数量	功率因数/tanφ	需要系数	计算有功功率/kW	计算无功功率/kvar
直流客梯	45	380	6	0.484	0.5	135	65.34
交流货梯	13.6	380	2	0.62	0.5	13.6	8.43

（续）

设备名称	设备功率/kW	电压/V	数量	功率因数/tanφ	需要系数	计算有功功率/kW	计算无功功率/kvar
交流客梯	1.7	380	2	0.62	0.5	1.7	1.05
合计						150.3	74.82
计算容量/（kV·A）（同时系数0.8）						134.3	

例题 3-12：某酒店自备柴油发电机组带载负荷统计见表3-10，该发电机组额定视在功率不应小于下列哪组数值？（同时系数取1）（供配电2013年考题）

表 3-10　自备柴油发电机组带载负荷统计

用电设备组名称	功率/kW	需要系数 K_x	cosφ	备　注
照明负荷	56	0.6	0.9	火灾时可切除
动力负荷	167	0.6	0.8	火灾时可切除
UPS	120（kV·A）	0.8	0.9	功率单位kV·A
24h空调负荷	125	0.7	0.8	火灾时可切除
消防应急照明	100	1	0.9	
消防水泵	130	1	0.8	
消防风机	348	1	0.8	
消防电梯	40	1	0.5	

（A）705kV·A　　（B）874kV·A　　（C）915kV·A　　（D）1137kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第9页1.2.2.2节、第93页2.6.3.2节（第三版第2~3页）和《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008第3.5.4条。

自备柴油发电机组负荷计算表见表3-11。

表 3-11　自备柴油发电机组负荷计算表

设备名称	容量/kW	K_d	cosφ	tanφ	P/kW	Q/kvar	S/kV·A
UPS	120（kV·A）	0.8	0.9	0.484	86.4	41.8176	
应急照明	100	1	0.9	0.484	100	48.4	
消防水泵	130	1	0.8	0.75	130	97.5	
消防风机	348	1	0.8	0.75	348	261	
消防电梯	40	1	0.5	1.732	40	69.28	
合计					704.4	517.9976	874.3574

【知识点解析】

应急发电机的负荷计算应满足下列要求：

1）当应急发电机仅为一级负荷中特别重要负荷供电时，应以一级负荷中特别重要负荷的计算容量作为选用应急发电机容量的依据。

2）当应急发电机为消防用电设备及一级负荷供电时，应将两者计算负荷之和作为选用

应急发电机容量的依据。

3）当自备发电机作为第二电源，且尚有第三电源为一级负荷中特别重要负荷供电时，以及当向消防负荷、非消防一级负荷及一级负荷中特别重要负荷供电时，应以三者的计算负荷之和作为选用自备发电机容量的依据。

例题 3-13：某小型企业拟新建检修车间、办公附属房屋和 10/10.4 kV 车间变电所各一处。变电所设变压器一台，车间的用电负荷及有关参数见表 3-12。车间用电负荷同时系数取 0.9，变电所低压侧无功补偿容量为 60 kvar。用需要系数法计算的该车间变电所 0.4 kV 侧总计算负荷（视在功率）与下列哪个数值最接近？（除交流电焊机外的其余单相负荷按平均分配到三相考虑）（供配电 2012 年考题改编）

表 3-12　车间的用电负荷及有关参数

设备组名称	单位	数量	设备组总容量/kW	电压/V	需要系数 K_d	$\cos\varphi$ /$\tan\varphi$
小批量金属加工车床	台	15	60	380	0.5	0.7/1.02
恒温电热箱	台	3	3×4.5	220	0.8	1.0/0
交流电焊机（ε_r=65%）	台	1	32（kV·A）	单相 380	0.5	0.5/1.73
泵、风机	台	6	20	380	0.8	0.8/0.75
5 t 吊车（ε_r=40%）	台	1	30	380	0.25	0.5/1.73
消防水泵	台	2	2×45	380	1.0	0.8/0.75
空调（单冷）	台	6	6×1	220	1.0	0.8/0.75
电采暖气	台	2	2×1.5	220	1.0	1.0/0
照明	盏		20	220	0.9	0.8/0.75

（A）85 kV·A　　（B）100 kV·A　　（C）125 kV·A　　（D）160 kV·A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5~20 页（第三版第 2~7 页）。

1）5 t 吊车的总有功设备功率：

$$P_e = P_N\sqrt{\varepsilon_N} = 30\times\sqrt{40\%}\,\text{kW} = 19\,\text{kW}$$

2）交流电焊机的等效三相负荷（设备功率）：

单相 380 V 设备功率：$\sum P_e = \sum S_N\sqrt{\varepsilon_N}\cos\varphi = 32\times\sqrt{65\%}\times 0.5\,\text{kW} = 12.9\,\text{kW}$

交流电焊机单相需求功率与计算范围内的三相需求功率对比：

$\sum P_{e.s} \leqslant 0.15\sum P_{e.t}$，即 $6.45 \leqslant 0.15\times(30+10.8+16+4.75+6+18) = 12.83$，单相负荷可不作换算。

3）季节性负荷：单冷空调负荷大于电采暖负荷，取较大负荷；消防负荷不计入；除交流电焊机外的其余单相负荷按平均分配到三相考虑时，单冷空调和照明均按照等效三相负荷直接计算。

4）车间的用电负荷需要系数法计算：

车间的用电负荷需要系数法计算表见表 3-13。

表 3-13　车间的用电负荷需要系数法计算表

序号	用电设备组名称	设备功率/kW	需要系数 K_d	功率因数	tanφ	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	机床	60	0.5	0.7	1.02	30	30.6
2	电热箱	13.5	0.8	1	0	10.8	0
3	交流电焊机	12.9	0.5	0.5	1.73	6.45	11.16
4	泵、风机	20	0.8	0.8	0.75	16	12
5	吊车	19	0.25	0.5	1.73	4.75	8.22
6	单冷空调	6	1	0.8	0.75	6	4.5
7	照明	20	0.9	0.8	0.75	18	13.5
合计						92	79.98
乘以有功、无功同时系数　（$K_{\sum P}=0.9$、$K_{\sum Q}=0.9$）						82.8	71.98
无功补偿功率							60
补偿后合计						82.8	11.98
视在功率/kV·A						83.66	

【知识点解析】

需要系数法的计算步骤：

(1) 用电设备组的计算功率

有功功率

$$P_c = K_d P_e$$

无功功率

$$Q_c = P_e \tan\varphi$$

(2) 配电干线或车间变电站的计算功率

有功功率

$$P_c = K_{\sum P} \sum (K_d P_e)$$

无功功率

$$Q_c = K_{\sum Q} \sum (K_d P_e \tan\varphi)$$

(3) 计算现在功率和计算电流

视在功率

$$S_c = \sqrt{P_c + Q_c}$$

计算电流

$$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3} U_n}$$

以上各式中，P_c 为计算有功功率（kW）；Q_c 为计算无功功率（kvar）；S_c 为计算视在功率（kV·A）；I_c 为计算电流（A）；P_e 为用电设备组的设备功率（kW）；K_d 为需要系数；tanφ 为计算负荷功率因数角的正切值；$K_{\sum P}$ 为有功功率同时系数；$K_{\sum Q}$ 为无功功率同时系数；U_n 为系统标称电压（线电压，kV）。

同时系数也称参差系数或最大负荷重合系数，$K_{\sum P}$ 可取 0.8~0.9，$K_{\sum Q}$ 可取 0.93~0.97，简化计算时可与 $K_{\sum P}$ 相同。通常，用电设备数量越多，同时系数越小。对于较大的多级配电

系统，可逐级取同时系数。

例题 3-14：某车间工段用电设备的额定参数及使用情况见表 3-14，本工段用电设备按平均分配到三相考虑，有功功率同时系数取 0.85、无功功率同时系数取 0.90。用需要系数法计算本工段总用电设备组计算负荷的视在功率，其值为下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题改编）

表 3-14　某车间工段用电设备的额定参数

设备名称	额定功率/kW	需要系数 K_d	功率因数	备　注
金属冷加工机床	40	0.2	0.5	
起重机用电动机	52	0.3	0.5	负荷持续率 40%
电加热器	40	1.0	0.98	
冷水机组、空调风机	40	0.85	0.8	
高强气体放电灯	8	0.9	0.6	已含整流器功率损耗
荧光灯	4	0.9	0.9	已含整流器功率损耗及无功补偿

（A）127.63 kV·A　　（B）110.84 kV·A　　（C）95.47 kV·A　　（D）93.96 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5~10 页（第三版第 2~7 页）。

1）5 t 吊车的总有功设备功率：

$$P_e = P_N\sqrt{\varepsilon_N} = 52\times\sqrt{40\%}\,\text{kW} = 32.89\,\text{kW}$$

2）季节性负荷：电加热器属工业用负荷，不是采暖负荷。用电设备功率已按三相负荷计算。

3）车间的用电负荷需要系数法计算：

本工段负荷计算统计表见表 3-15。

表 3-15　本工段负荷计算统计表

设备名称	额定功率/kW	需要系数 K_d	功率因数	$\tan\varphi$	计算有功功率/kW	计算无功功率/kvar
金属冷加工机床	40	0.2	0.5	1.732	8	13.86
起重机用电动机	32.89	0.3	0.5	1.732	9.88	17.09
电加热器	40	1.0	0.98	0.203	40	8.12
冷水机组、空调风机	40	0.85	0.8	0.75	34	25.5
高强气体放电灯	8	0.9	0.6	1.333	7.2	9.6
荧光灯	4	0.9	0.9	0.484	3.6	1.74
设备功率合计					102.68	75.91
计入有功、无功同时系数（$K_{\sum P}=0.85, K_{\sum Q}=0.9$）					87.28	68.32
本工段总用电设备组计算负荷的视在功率/kV·A					110.84	

例题 3-15：假设某工段计算负荷为 105 kV·A，供电电压为 220/380 V 时，本工段计算电流应为下列哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）142.76 A　　（B）145.06 A　　（C）159.72 A　　（D）193.92 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 10 页（第三版第 3 页）。

本工段计算电流：

$$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3}U_r} = \frac{105}{\sqrt{3}\times 0.38}\text{A} = 159.53\text{ A}$$

例题 3-16：某车间有下列用电负荷：

机床：80 kW 2 台；60 kW 4 台；30 kW 15 台。

通风机：80 kW 4 台，其中备用 1 台；60 kW 4 台，其中备用 1 台；30 kW 12 台，其中备用 2 台。

电焊机：三相 380 V，75 kW 4 台，50 kW 4 台 30 kW 10 台，负载持续率为 100%。

起重机：160 kW 4 台，100 kW 4 台，80 kW 2 台，其负载持续率为 25%。

照明：采用高压钠灯，额定电压为 220 V，功率为 400 W，数量为 90 个，镇流器的功率消耗为灯管功率的 8%。

负荷计算系数表见表 3-16。

表 3-16　负荷计算系数表

设 备 名 称	需要系数 K_d	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
机床	0.15	0.5	1.73
通风机	0.8	0.8	0.75
电焊机	0.5	0.6	1.33
起重机	0.15	0.5	1.73
照明（含镇流器）	0.9	0.45	1.98
有功和无功功率同时系数 $K_{\sum P}$、$K_{\sum Q}$ 均为 0.9			

上述负荷中通风机为二类级负荷，其余为三类级负荷。采用需要系数法计算本车间动力负荷的计算视在功率，其值应为下列哪项？（供配电 2006 年考题改编）

（A）1615.3 kV·A　　（B）1682.6 kV·A　　（C）1792.0 kV·A　　（D）1794.7 kV·A

答案【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5~20 页（第三版第 2~7 页）。

1）起重机的总有功设备功率：

$$P_{e1} = P_N\sqrt{\varepsilon_N} = (4\times 160+4\times 100+2\times 80)\times\sqrt{25\%}\text{ kW} = 600\text{ kW}$$

2）电焊机的总有功设备功率：

$$P_{e2} = P_N\sqrt{\varepsilon_N} = (4\times 75+4\times 50+10\times 30)\times\sqrt{100\%}\text{ kW} = 800\text{ kW}$$

3）本题为动力负荷计算不计照明负荷。

4）车间的动力负荷需要系数法计算：

本车间动力负荷计算统计表见表 3-17。

表 3-17　本车间动力负荷计算统计表

设备组名称	设备功率/kW	需要系数 K_d	cosφ	tanφ	计算有功功率/kW	计算无功功率/kvar
机床	850	0.15	0.5	1.73	127.5	220.6
通风机	720	0.8	0.8	0.75	576	432
电焊机	800	0.5	0.6	1.33	400	532
起重机	600	0.15	0.5	1.73	90	155.7
合计					1193.5	1340.3
计入同时系数（$K_{\sum P}=K_{\sum Q}=0.9$）					1074.2	1206.3
计算视在功率/kV·A					1615.3	

例题 3-17：采用需要系数法求得某办公楼的计算负荷见表 3-18。有功功率同时系数取 0.85；无功功率同时系数取 0.95。该办公楼计算负荷的视在功率最接近下列哪一项？

表 3-18　某办公楼的计算负荷

用电设备组	设备功率/kW	需要系数	cosφ	tanφ	备　注
正常照明和办公设备	2500	0.8	0.9	0.48	
应急照明	168	1	0.9	0.48	其中正常点亮者为 50 kW
空调	1800	0.7	0.8	0.75	
水泵和风机	350	0.7	0.8	0.75	其中消防设备 150 kW
电梯（1 h 工作制）	160	0.5	0.6	1.33	其中消防电梯 40 kW 平时也正常运行

（A）3569 kV·A　　（B）2552 kV·A　　（C）3683 kV·A　　（D）3214 kV·A

答案【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5~10 页（第三版第 2~7 页）。

1）消防设备一般可不计入总设备功率，但正常点亮的应急照明 50 kW 仍应计入。

2）消防电梯平时均用作客运电梯或服务电梯，平时也正常运行。电梯 1 h 工作制按持续率 25%考虑，电梯总有功设备功率：

$$\sum P_e=\sum S_N\sqrt{\varepsilon_N}\cos\varphi=160\times\sqrt{25\%}\,\text{kW}=80\,\text{kW}$$

3）办公楼负荷需要系数法计算：

本办公楼负荷需要系数法计算统计表见表 3-19。

表 3-19　本办公楼负荷需要系数法计算统计表

设备组名称	设备功率/kW	需要系数 K_d	cosφ	tanφ	计算有功功率/kW	计算无功功率/kvar
正常照明和办公设备	2500	0.8	0.9	0.48	2000	960
正常点亮应急照明	50	1	0.9	0.48	50	24
空调	1800	0.7	0.8	0.75	1260	945
水泵和风机	200	0.7	0.8	0.75	140	105
电梯	80	0.5	0.6	1.33	40	53
合计	4630				3490	2087
计入同时系数（$K_{\sum P}=0.85$，$K_{\sum Q}=0.95$）					2967	1983
计算视在功率/kV·A					3569	

3.3 利用系数法负荷计算

【知识点说明】

利用系数法属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）1.5节等。要求熟练掌握利用系数、最大系数查取，总利用系数和有效台数计算，视在功率和计算电流计算。针对利用系数法计算过程本节给出了解题流程图，如图3-4所示。

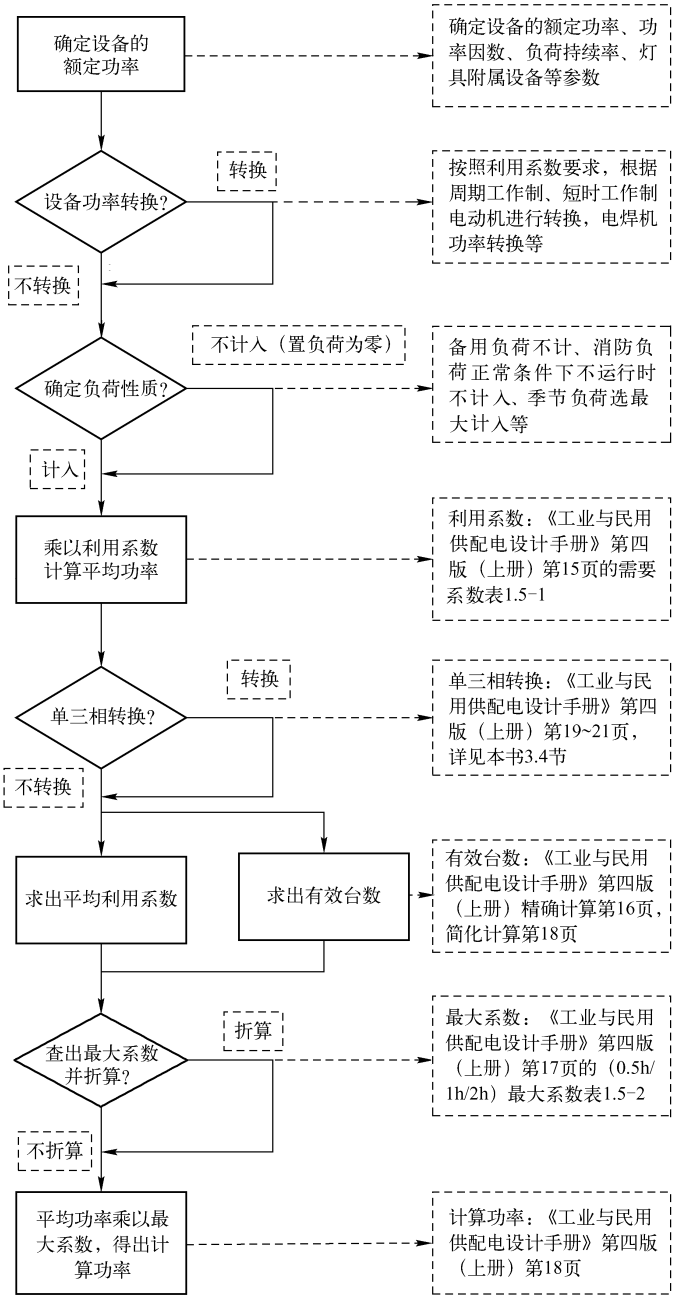


图3-4 利用系数法负荷计算流程图

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

例题 3-18：某企业拟建一座 10 kV 变电站，用电负荷如下：

1）一般工作制大批量冷加工机床类设备 152 台，总功率为 448.6 kW。

2）焊接变压器组（负荷率为 $\varepsilon_N=65\%$，功率因数为 $\cos\varphi=0.5$）6×23 kV·A+3×32 kV·A，总设备功率为 94.5 kW，平均有功功率为 28.4 kW，平均无功功率为 49 kvar。

3）泵、通风机类设备共 30 台，总功率为 338.9 kW，平均有功功率为 182.6 kW，平均无功功率为 139.6 kvar。

4）传送带 10 台，总功率为 32.6 kW，平均有功功率为 16.3 kW，平均无功功率为 14.3 kvar。

采用利用系数法（利用系数为 $K_u=0.14$、$\tan\varphi=1.73$），计算机床类设备组的平均有功功率、无功功率，变电站供电所有设备的平均利用系数（按有效使用台数等于实际设备台数考虑），变电站电压母线最大系数（达到稳定温升的持续时间按 1 h 计）。其计算结果最接近下列哪一项数值？（供配电 2010 年考题）

（A）89.72 kW，155.4 kvar，0.35，1.04

（B）62.80 kW，155.4 kvar，0.32，1.07

（C）62.80 kW，31.4 kvar，0.32，1.05

（D）62.80 kW，108.64 kvar，0.32，1.05

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 15~18 页（第三版第 7~9 页）。

1）大批生产的金属冷加工机床利用系数 $K_u=0.14$、$\tan\varphi=1.73$，一般工作制大批量冷加工机床类设备 152 台，机床类额定功率等于设备功率，故总设备功率为 448.6 kW。

机床类设备组的平均有功功率：

$$P_{av}=K_uP_e=0.14\times448.6\ \text{kW}=62.8\ \text{kW}$$

机床类设备组的平均无功功率：

$$Q_{av}=P_{av}\tan\varphi=62.8\times1.73\ \text{kvar}=108.6\ \text{kvar}$$

2）供电所有设备的平均利用系数：

设备功率之和为 $\sum P_e=(448.6+94.5+338.9+32.6)\ \text{kW}=914.6\ \text{kW}$

平均功率之和为 $\sum P_{av}=(62.8+28.4+182.6+16.3)\ \text{kW}=290.1\ \text{kW}$

平均利用系数为 $K_{ut}=\sum P_{av}/\sum P_e=290.1/914.6=0.32$

3）设备有效台数按实际台数为 $n_{eq}=(152+9+30+10)$ 台 $=201$ 台

4）最大系数 K_m：根据有效台数 n_{eq}、平均利用系数 K_{ut} 查《配四》第 17 页表 1.5-2 中 1 h 最大系数 $K_m=1.05$。

例题 3-19~3-20：某车间有机床、通风机、自动弧焊变压器和起重机等用电设备，其中通风机为二类负载，其余负载为三类负载，负荷参数见表 3-20。请回答以下问题。

表 3-20　某车间负荷参数

设 备 名 称	利用系数 K_u	cosφ	tanφ
机床	0.12	0.5	1.73
通风机	0.55	0.8	0.75
自动弧焊变压器	0.3	0.5	1.73
起重机	0.2	0.5	1.73

3-19：车间内有起重机 5 台：其中 160 kW，2 台；100 kW，2 台；80 kW，1 台，负载持续率均为 25%，采用利用系数法计算本车间起重机组的计算负荷的视在功率，其值为下列哪项数值？（设起重机组的最大系数 K_m 为 2.42）（供配电 2006 年考题）

（A）119.9 kV·A　　（B）290.2 kV·A　　（C）580.3 kV·A　　（D）1450.7 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页、第 15~18 页（第三版第 2 页、第 7~9 页）。

折算到 100%负载持续率，起重机组设备功率：

$$P_e = P_N\sqrt{\varepsilon_N} = (2\times160+2\times100+80)\times\sqrt{0.25}\,\text{kW} = 300\,\text{kW}$$

起重机组的平均有功功率：

$$P_{av} = K_u P_e = 0.2\times300\,\text{kW} = 60\,\text{kW}$$

起重机组的平均无功功率：

$$Q_{av} = P_{av}\tan\varphi = 60\times1.73\,\text{kvar} = 103.8\,\text{kvar}$$

起重机组的计算负荷的视在功率为

$$S_c = \sqrt{P_c^2+Q_c^2} = K_m\sqrt{P_{av}^2+Q_{av}^2} = 2.42\sqrt{60^2+103.8^2}\,\text{kV·A} = 290.14\,\text{kV·A}$$

3-20：车间装有机床电动机功率为 850 kW，通风机功率为 720 kW，自动弧焊变压器等效三相功率为 700 kW（负载持续率已折算 100%），起重机组的设备功率为 300 kW（负载持续率已折算 100%）。采用利用系数法确定该车间负载的视在功率，其值为下列哪项数值？（设车间计算负荷的最大系数 K_m 为 1.16）（供配电 2006 年考题）

（A）890.9 kV·A　　（B）1290.5 kV·A　　（C）1406.8kV·A　　（D）2981.2 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页、第 15~18 页（第三版第 2 页、第 7~9 页）。

起重机组和自动弧焊变压器（等效三相）设备功率已经折算到 100%负载持续率，车间负载的视在功率计算表见表 3-21。

表 3-21　车间负载的视在功率计算表

设 备 名 称	设备功率/kW	利用系数 K_u	tanφ	平均有功功率/kW	平均无功功率/kvar
机床	850	0.12	1.73	102	174.5
通风机	720	0.55	0.75	396	297
自动弧焊变压器	700	0.3	1.73	210	363.3
起重机	300	0.2	1.73	60	103.8
合计（最大系数 K_m=1.16）				890.9	1088.8
车间负载的视在功率 S_c/kV·A				1406.8	

例题 3-21~3-23：请采用利用系数法求某车间的计算负荷，已知数据见表 3-22。

表 3-22　某车间负荷参数

用电设备组	单台设备功率/kW	台　　数	$\sum P_e$/kW
重型机床	40 20 15	1 2 1	95
一般机床	4~10	50	255
风机 水泵	75 37 18.5	2 2 4	298
	3~7.5	10	49

起重机：负载持续率为 40%，单台功率为 28.5 kW，2 台；负载持续率为 25%，单台功率为12 kW，4 台。

若已知车间的重型机床利用系数 $K_u=0.15$，一般机床利用系数 $K_u=0.12$，风机、水泵利用系数 $K_u=0.5$，起重机利用系数 $K_u=0.15$，请回答以下问题。

3-21：该车间的平均利用系数为下列哪一项数值？

（A）0.49　　（B）0.41　　（C）0.3　　（D）0.26

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 页、第 15~16 页（第三版第 2 页、第 7~9 页）。

1）本车间起重机的设备功率：

$$P_e=P_N\sqrt{\varepsilon_N}=28.5\times\sqrt{40\%}\,\text{kW}=18\,\text{kW}$$

$$P_e=P_N\sqrt{\varepsilon_N}=12\times\sqrt{25\%}\,\text{kW}=6\,\text{kW}$$

2）该车间的平均功率计算：

该车间的平均功率计算表见表 3-23。

表 3-23　该车间的平均功率计算表

用电设备组	设备功率/kW			利用系数 K_u	平均功率 P_{av}/kW
	单台	台数	$\sum P_e$		
重型机床	40 20 15	1 2 1	95	0.15	14.25
一般机床	5.1 （4~10）	50	255	0.12	30.6
风机 水泵	75 37 18.5	2 2 4	298	0.5	149
	4.9 （3~7.5）	10	49	0.5	24.5
起重机	18 6	2 4	60	0.15	9
合计			757		227.35

3）该车间的平均利用系数：

$$K_{ut}=\sum P_{av}/\sum P_e=227.35/757=0.3$$

3-22：若已知该车间的平均利用系数为 0.5，则该车间的用电设备有效台数约为下列哪一项数值？

（A）20　　（B）28　　（C）36　　（D）44

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 18 页（第三版第 2~7 页）。

题目已知最大的单台设备功率为 $P_{e.max}=75\,kW$，最小的单台设备功率为 $P_{e.min}=3\,kW$，故 $P_{e.max}/P_{e.min}>3$，当 $m>3$ 和 $K_{u.av}\geqslant 0.2$ 时，该车间的用电设备有效台数：

$$n_{yx}=\sum P_e/0.5P_{e.max}=2\sum P_e/P_{e.max}=2\times 757/75\text{ 台}=20.2\text{ 台}$$

3-23：若已知该车间的总利用系数为 0.4，用电设备有效台数为 20 台，则该车间的最大系数（2h）和计算有功功率约为下列哪一项数值？

（A）355 kV·A　　（B）420 kV·A　　（C）470 kV·A　　（D）520 kV·A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 16~18 页（第三版第 2~7 页）。

查《配四》第 17 页表 1.5-2 中，总利用系数为 0.4 和用电设备有效台数为 20 台的最大系数（2h）为 1.12。

在《配四》第 15 页表 1.5-1 中，查出用电设备功率因数正切值 $\tan\varphi$。

该车间的计算视在功率计算表见表 3-24。

表 3-24　该车间的计算视在功率计算表

用电设备组	设备功率/kW			利用系数 K_u	$\tan\varphi$	平均有功 P_{av}/kW	平均无功 Q_{av}/kvar
	单台	台数	$\sum P_e$				
重型机床	40 20 15	1 2 1	95	0.15	1.51	14.25	21.52
一般机床	5.1 （4~10）	50	255	0.12	1.73	30.6	52.94
风机 水泵	75 37 18.5	2 2 4	298	0.5	0.75	149	111.75
	4.9 （3~7.5）	10	49	0.5	0.75	24.5	18.38
起重机	18 6	2 4	60	0.15	1.73	9	15.57
合计			757			227.35	220.16
计算视在功率（最大系数 2h 为 $K_m=1.12$）/kV·A						354.5	

【知识点解析】

利用系数法的计算步骤：

（1）最大负荷班的用电设备组平均负荷

有功功率

$$P_{av}=K_uP_e$$

无功功率

$$Q_{av}=P_{av}\tan\varphi$$

式中，P_{av}为用电设备组的有功平均功率（kW）；Q_{av}为用电设备组的无功平均功率（kvar）；P_e为用电设备组的设备功率（kW）；K_u为最大负荷班的用电设备组利用系数；$\tan\varphi$为用电设备组的功率因数角的正切值。

（2）全计算范围的总利用系数

$$K_{ut}=\frac{\sum P_{av}}{\sum P_e}$$

式中，K_{ut}为总利用系数；$\sum P_{av}$为各用电设备组的有功平均功率之和（kW）；$\sum P_e$为各用电设备组的设备功率之和（kW）。

（3）用电设备有效台数的精确计算式

$$n_{eq}=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}P_{ei}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}P_{ei}^2}$$

式中，n_{eq}为用电设备的有效台数；P_{ei}为第 i 台用电设备的设备功率（kW）。

（4）有效台数简化计算式

1）当有效台数为 4 台及以上，且最大一台用电设备功率 $P_{e.max}$与最小一台用电设备功率 $P_{e.max}$的比值 $m\leqslant 3$ 时，取

$$n_{eq}=n$$

在确定 m 值时，可将组内总功率不超过全组总设备功率 5%的最小一挡用电设备略去。

2）当 $m>3$ 和 $K_{u.av}\geqslant 0.2$ 时，取

$$n_{eq}=\frac{\sum P_e}{0.5P_{e.max}}$$

（5）计算负荷

有功功率

$$P_e=K_m\sum P_{av}$$

无功功率

$$Q_c=K_m\sum Q_{av}$$

式中，P_e为计算有功功率（kW）；Q_c为计算无功功率（kvar）；K_m为最大系数。

3.4 单相负荷换算为等效三相负荷

【知识点说明】

单相负荷换算为等效三相负荷属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第

四版（上册）1.6节等。要求熟练掌握计算原则、单相负荷换算为等效三相负荷简化法、精确法。针对单相负荷换算为等效三相负荷过程本节给出了解题流程图，如图3-5所示。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

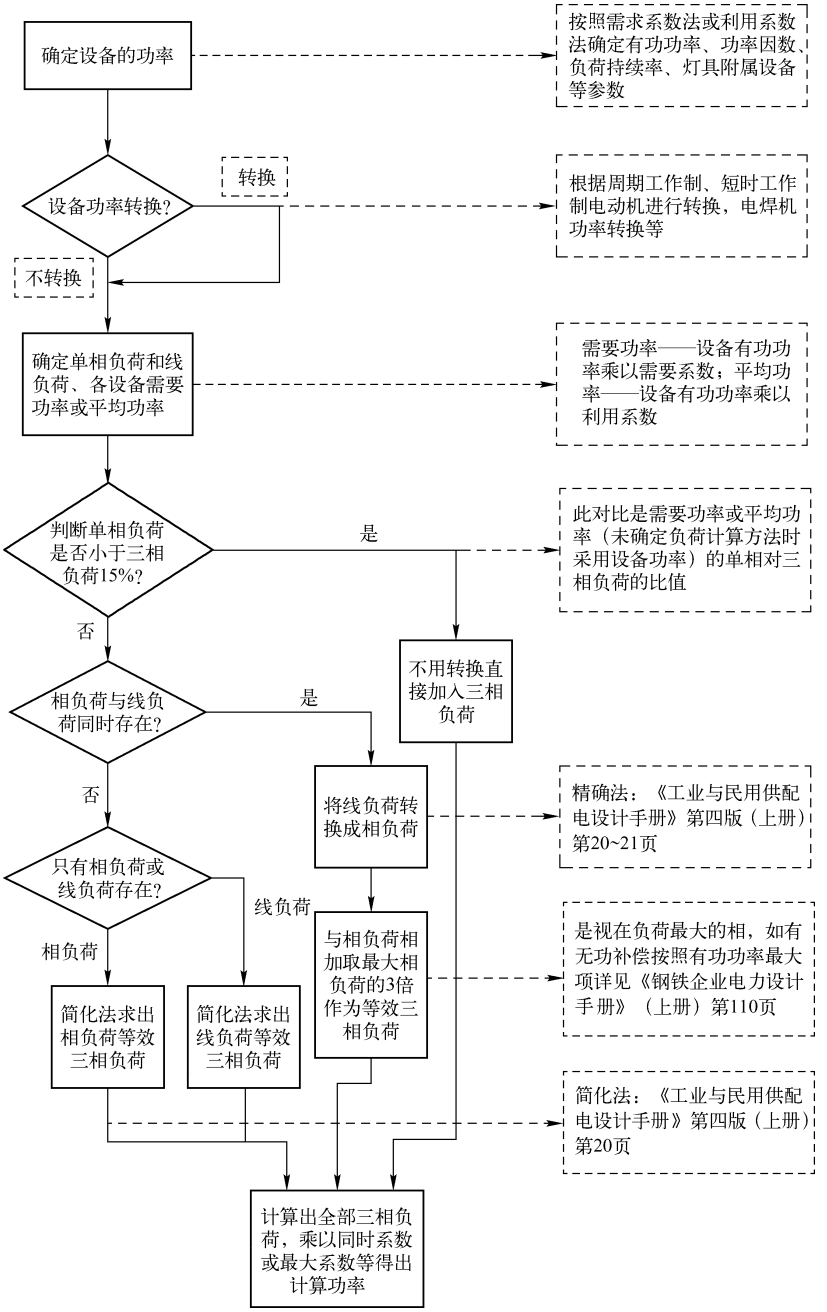


图3-5　负荷计算中单相负荷换算为等效三相负荷流程图

例题 3-24：室外照明电源总配电柜三相供电，照明灯具参数及数据见表 3-25，当需要系数 $K_x=1$ 时，室外照明总负荷容量为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

表 3-25　照明灯具参数及数据

灯具名称	额定电压/V	光源功率/W	电源功率/W	功率因数 $\cos\varphi$	数量/盏	每一相电压的灯具数量/盏		
大功率会聚投光灯	单相 380	1000	105	0.8	18	UV	VW	WU
						4	6	8

注：U、V、W 为相序符号。

已查线间负荷换算系数：$p_{(UV)U}=p_{(VW)V}=p_{(WU)W}=0.72$，$p_{(UV)V}=p_{(VW)W}=p_{(WU)U}=0.28$，$q_{(UV)U}=q_{(VW)V}=q_{(WU)W}=0.09$，$q_{(UV)V}=q_{(VW)W}=q_{(WU)U}=0.67$。

（A）19.85 kV·A　　（B）24.8 kV·A　　（C）23.45 kV·A　　（D）29.24 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 20 页（第三版第 12 页）。

已知投光灯的设备功率（计入电源设备）：$P=(1000+105)\text{W}=1105\text{ W}$

1）单相负荷换算为等效三相负荷的精确方法

单相负荷换算为等效三相负荷计算表见表 3-26。

表 3-26　单相负荷换算为等效三相负荷计算

设计名称	设备功率/kW	台数	功率因数	各线间设备功率/kW			换算系数			需要系数	各相需要功率					
											有功功率/kW			无功功率/kvar		
				UV	VW	WU	相序	p	q		U	V	W	U	V	W
单相 380 V 灯具	1.105	4	0.8	4.42			U	0.72	0.09	1	3.18			0.40		
							V	0.28	0.67			1.24			2.96	
		6			4.63		V	0.72	0.09			4.77			0.60	
							W	0.28	0.67				1.86			4.44
		8				8.84	W	0.72	0.09				6.36			0.80
							U	0.28	0.67		2.48			5.92		
合计											5.66	6.01	8.22	6.32	3.56	5.24

取最大相负荷，等效三相负荷为

$$P_d=3P_W=24.66\text{ kW},Q_d=3Q_W=15.72\text{ kW}$$

$$S_d=\sqrt{P_d^2+Q_d^2}=\sqrt{24.66^2+15.72^2}\text{ kV·A}=29.24\text{ kV·A}$$

2）因只有线负荷，使用单相负荷换算为等效三相负荷的简化方法：

$$P_d=1.73P_{WU}+1.27P_{VW}=(1.73\times8.84+1.27\times6.63)\text{kW}=23.71\text{ kW}$$

$$S_d=\frac{P_d}{\cos\varphi}=\frac{23.71}{0.8}\text{ kV·A}=29.64\text{ kV·A}$$

【知识点解析】

单相负荷换算为等效三相负荷的精确法：

对于既有相间负荷又有相负荷的情况，应采用精确法换算。

1）先将相间负荷换算为相负荷，各相负荷分别为

$$P_U = P_{UV}p_{(UV)U} + P_{WU}p_{(WU)U}$$
$$Q_U = P_{UV}q_{(UV)U} + P_{WU}q_{(WU)U}$$
$$P_V = P_{UV}p_{(UV)V} + P_{VW}p_{(VW)V}$$
$$Q_V = P_{UV}q_{(UV)V} + P_{VW}p_{(VW)V}$$
$$P_W = P_{VW}p_{(VW)W} + P_{WU}p_{(WU)W}$$
$$Q_W = P_{VW}q_{(VW)W} + P_{WU}q_{(WU)W}$$

以上式中，P_{UV}、P_{VW}、P_{WU}分别为接于UV、VW、WU相间的有功负荷（kW）；P_U、P_V、P_W分别为换算为U、V、W相的有功负荷（kW）；Q_U、Q_V、Q_W分别为换算为U、V、W相的无功负荷（kvar）；$p_{(UV)U}$、$q_{(UV)U}$分别为接于UV相间负荷换算为U相负荷的有功及无功换算系数。

2）各相负荷分别相加（把线间负荷换算成相负荷，与原相负荷对应相加），选出最大相负荷，取其3倍作为等效三相负荷。

例题3-25：已知某工段中电加热器用电设备组是单台、单相380V，额定功率为20kW，功率因数为0.5。采用简化法计算本工段电加热器用电设备组的等效三相设备功率，其值应为下列哪一项数值？（供配电2011年考题改编）

（A）20kW　　（B）28.28kW　　（C）34.60kW　　（D）60kW

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第20页（第三版第13页）。

因只有一台线负荷，使用单相负荷换算为等效三相负荷的简化方法：

$$P_d = \sqrt{3}P_e = \sqrt{3}\times 20\ \text{kW} = 36.64\ \text{kW}$$

【知识点解析】

单相负荷换算为等效三相负荷的简化法：

对于仅有线（相间）负荷或仅有相负荷的情况，可采用简化法换算。

1）只有相间负荷时，将各相间负荷相加，选取较大两项数据进行计算。

当$P_{UV} \geqslant P_{VW} \geqslant P_{WU}$时

$$P_{eq} = \sqrt{3}P_{UV} + (3-\sqrt{3})P_{VW} = 1.73P_{UV} + 1.27P_{VW}$$

当$P_{UV} = P_{VW}$时　　$P_{eq} = 3P_{UV}$

当只有P_{UV}时　　$P_{eq} = \sqrt{3}P_{UV}$

以上式中，P_{eq}为等效三相负荷（kW）；P_{UV}、P_{VW}、P_{WU}分别为接于UV、VW、WU线间的单相负荷（kW）。

2）只有相负荷时，等效三相负荷取最大相负荷的3倍。

例题3-26：若自动弧焊变压器的设备功率和接入电网的方案如下。

1）AB相负载：2台200kW焊接变压器，1台150kW焊接变压器。

2）BC相负载：1台200kW焊接变压器，2台150kW焊接变压器和1台100kW焊接变压器。

3）CA 相负载：1 台 200 kW 焊接变压器，1 台 150 kW 焊接变压器和 1 台 100 kW 焊接变压器。

上述负荷均为折算到负载持续率为 100%时的有功功率，用简化方法计算本车间的全部自动弧焊变压器等效三相设备功率，其值为下列哪项数值？（供配电 2006 年考题）

（A）1038 kW　　（B）1600 kW　　（C）1713.5 kW　　（D）1736.5 kW

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 20 页（第三版第 13 页）。

本车间的全部各线间负荷合计为

$$P_{AB}=(2\times200+1\times150)\ \text{kW}=550\ \text{kW}$$

$$P_{BC}=(1\times200+2\times150+1\times100)\ \text{kW}=600\ \text{kW}$$

$$P_{CA}=(1\times200+1\times150+1\times100)\ \text{kW}=450\ \text{kW}$$

对比各线间负荷合计为 $P_{BC}>P_{AB}>P_{CA}$。

使用单相负荷换算为等效三相负荷的简化方法：

$$P_d=1.73P_{BC}+1.27P_{AB}=(1.73\times600+1.27\times550)\ \text{kW}=1736.5\ \text{kW}$$

例题 3-27：已知某三相四线 380/220V 配电箱接有如下负荷（假设负荷均为设备功率）：三相 10 kW，A 相 0.6 kW，B 相 0.2 kW，C 相 0.8 kW。用简化法求出该配电箱的等效三相负荷，其值应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）2.4 kW　　（B）10 kW　　（C）11.6 kW　　（D）12.4 kW

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 19~20 页（第三版第 12~13 页）。

单相设备功率与计算范围内的三相的设备功率对比：$\Sigma P_{e.s}\leqslant0.15\Sigma P_{e.t}$；$1.6\geqslant0.15\times10$，单相负荷需要换算，三个单相负荷取最大乘 3 再加上三相负荷，即 $\Sigma P_e=(10+3\times0.8)\ \text{kW}=12.4\ \text{kW}$。

例题 3-28：在三相配电系统中，每相均接入一盏交流 220 V，1 kW 碘钨灯，同时在 A 相和 B 相间接入一个交流 380 V、2 kW 的全阻性负载，则该配电系统等效三相负荷，下列哪项数值是正确的？

（A）5 kW　　（B）6 kW　　（C）9 kW　　（D）10 kW

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 20 页（第三版第 12 页）。

已经分配到各相中的相负荷 $P_{U1}=1\ \text{kW}$，$P_{V1}=1\ \text{kW}$，$P_{W1}=1\ \text{kW}$。

单相负荷换算为等效三相负荷的精确方法：

$$P_{U2}=P_{UV}p_{(UV)U}+0=2\times0.5\ \text{kW}=1\ \text{kW}$$

$$P_{V2}=P_{UV}p_{(UV)V}+0=2\times0.5\ \text{kW}=1\ \text{kW}$$

$$P_{W2}=0\ \text{kW}$$

因此　$P_U=P_{U1}+P_{U2}=(1+1)\ \text{kW}=2\ \text{kW}$

$$P_V = P_{V1} + P_{V2} = (1+1)\ \text{kW} = 2\ \text{kW}$$

$$P_W = P_{W1} + P_{W2} = (1+0)\ \text{kW} = 1\ \text{kW}$$

取最大相负荷，等效三相负荷为 $P_d = 3P_U = 6\ \text{kW}$。

3.5 负荷分级及供电要求

【知识点说明】

负荷分级及供电要求属于重要考点，依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）2.1 节等。负荷分级多在第一天专业知识考试中出现或结合供电要求综合案例考核，如分析负荷分级选择变压器台数和主接线方式等。

依据书目：

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

例题 3-29：某科技园位于寒冷地区，其中规划有住宅楼高 49.5 m，员工宿舍楼高 24.5 m，该住宅楼用电设备清单详见表 3-27，同时系数取 1，$\cos\varphi = 0.85$，分别计算二级、三级负荷容量应为下列哪一项？（供配电 2017 年考题）

表 3-27 住宅楼用电设备清单

序　号	设备名称	设备容量/kW	数　量	需要系数	备　注
1	住宅用电	6（kW/户）	99 户	0.4	三相配电
2	应急照明	5	—	1	
3	走道照明	10		0.5	
4	普通照明	15	—	0.5	
5	消防栓水泵	30	2 台	1	一备一用
6	喷淋水泵	15	2 台	1	一备一用
7	消防电梯	17.5	1 台	1	
8	普通客梯	17.5	1 台	1	
9	生活水泵	7.5	2 台	1	一备一用
10	排污泵	3	4 台	0.9	
11	消防用排水泵	3	4 台	1	
12	消防低压装置	5.5	2 台	1	
13	安防系统用电	20		0.85	
14	通风机	7.5	4 台	0.6	
15	公共小动力电器	10		0.6	
16	集中供暖风交换系统	50		0.7	

注：所有用电设备不计及损耗，即效率均取 1。

（A）二级负荷　156 kV·A；三级负荷　376 kV·A

（B）二级负荷　169 kV·A；三级负荷　364 kV·A

（C）二级负荷　175 kV·A；三级负荷　358 kV·A

（D）二级负荷　216 kV·A；三级负荷　317 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《建筑设计防火规范》GB 50016—2014 表 5.1.1 中该住宅楼高 49.5 m，属于二类建筑。

依据《住宅建筑电气设计规范》JGJ 242—2011 二类建筑二级负荷按照表 3.2.1 中规定，第 3.2.2 条　由于科技园位于寒冷地区，其集中供暖风交换系统应为二级负荷。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5~20 页（第三版第 2~7 页），住宅楼用电二级负荷及三级负荷统计表分别见表 3-28、表 3-29。

表 3-28　住宅楼用电二级负荷统计表

设 备 名 称	设备容量/kW	数量	需 要 系 数	功率/ kW
应急照明	5	—	1	5
走道照明	10	—	0.5	5
消防栓水泵	30	1 台	1	30
喷淋水泵	15	1 台	1	15
消防电梯	17.5	1 台	1	17.5
普通客梯	17.5	1 台	1	17.5
生活水泵	7.5	1 台	1	7.5
排污泵	3	4 台	0.9	10.8
消防用排水泵	3	4 台	1	12
消防低压装置	5.5	2 台	1	11
安防系统用电	20		0.85	17
集中供暖风交换系统	50		0.7	35
合计				183.3
计算容量	$S=K_{\Sigma p}\frac{P}{\cos\varphi}=1\times183.3\div0.85\,\text{kV}\cdot\text{A}=215.6\,\text{kV}\cdot\text{A}$			

表 3-29　住宅楼用电三级负荷统计表

设 备 名 称	设备容量/kW	数　　量	需 要 系 数	功率/kW
住宅用电	6（kW/户）	99 户	0.4	237.6
普通照明	15	—	0.5	7.5
通风机	7.5	4 台	0.6	18
公共小动力电器	10	—	0.6	6
合计				269.1
计算容量	$S=K_{\Sigma p}\frac{P}{\cos\varphi}=1\times269.1\div0.85\,\text{kV}\cdot\text{A}=316.6\,\text{kV}\cdot\text{A}$			

例题 3-30：某建筑高度为 36 m 的普通办公室，地下室平时为Ⅲ类普通汽车库，战时为

防空地下室，属二等人员隐蔽所，下列楼内用电设备哪一项为一级负荷？

（A）防空地下室战时应急照明　　（B）自动扶梯

（C）消防电梯　　（D）消防水泵

答案：【A】

解答过程：依据《人民防空地下室设计规范》GB 50038—2005。

第 7.2.4 条表 7.2.4 中的战时常备设备电力负荷，防空地下室战时应急照明为一级负荷。

例题 3-31：民用建筑中，关于负荷计算，下列哪一项表述符合规范的规定？

（A）当应急发电机仅为一级负荷中特别重要负荷供电时，应以一级负荷的计算容量作为选用应急发电机容量的依据

（B）当应急发电机为消防用电负荷及一级负荷供电时，应以一级负荷的计算容量作为选用应急发电机容量的依据

（C）当自备发电机作为第二电源时，且尚有第三电源为一级负荷中特别重要负荷供电时，以及当向消防负荷、非消防负荷及一级负荷中特别重要负荷供电时，应以三者的计算负荷之和作为选用自备发电机容量的依据

（D）当消防设备的计算负荷大于火灾切除非消防设备的计算负荷时，可不计入计算负荷

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 3.5.4 条。

例题 3-32：某栋 25 层普通住宅，建筑高度为 73 m，根据当地航空部门要求需设置航空障碍标志灯，该楼内消防设备用电按一级负荷供电，客梯、生活水泵、电力及楼梯照明按二级负荷供电，除航空障碍标志灯外的其余用电设备按三级负荷供电。该楼的航空障碍标志灯应按下列哪一项要求供电？

（A）一级负荷　　（B）二级负荷

（C）三级负荷　　（D）一级负荷中特别重要负荷

答案：【A】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 10.3.5 条中障碍标志灯电源应按主体建筑中最高负荷等级要求供电。附录 A 中一类高层民用建筑为一级负荷。选 A。（一类高层民用建筑见《建筑设计防火规范》GB 50016—2014 表 5.1.1。）

例题 3-33：二级电力负荷的供电系统，采用以下哪一种供电方式是正确的？

（A）应由两回线路供电

（B）在负荷较小或地区供电条件困难时，可由一回 10 kV 及以上专用架空线路供电

（C）当采用一回电缆线路时，应采用两根电缆组成的电缆线路供电，其每根电缆应能承受 100%的二级负荷

（D）当采用一回电缆线路时，应采用两根电缆组成的电缆线路供电，其每根电缆应能承受 50%的二级负荷

答案：【B】

解答过程：依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009。

第 3.0.7 条 二级负荷的供电系统，宜由两回线路供电。在负荷较小或地区供电条件困

难时，二级负荷可由一回 6 kV 及以上专用的架空线路供电。B 项正确。

3.6 通用电气设备负荷计算以及保护电器、供电导体选择

【知识点说明】

通用电气设备负荷计算属于冷门考点，依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 12 章等。要求掌握电梯、起重机、电焊机等设备功率计算；了解断续和短时工作制用电设备及其导线的载流量计算。

依据书目：

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

例题 3-34：某裙房商场电梯数量见表 3-30，按需要系数法计算（同时系数取 0.8）供全部电梯的电源导体载流量不应小于下列哪一项？（供配电 2013 年考题）

表 3-30 某裙房商场电梯参数

设备名称	设备容量/kV·A	额定电压/V	数量/部	需要系数
直流客梯	50	380	6	0.5
交流货梯	32①	380	2	0.5
交流客梯	4①	380	2	0.5

① 持续运行时间 1h 额定容量。

（A）226.1 A　　（B）294.6 A　　（C）207.6 A　　（D）565.2 A

答案：【B】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011 第 3.3.4 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 10 页（第三版第 735 页）。

全部电梯的电源导体载流量计算表见表 3-31。

表 3-31 商场全部电梯的电源导体载流量计算表

设备	设备容量/kV·A	电压/V	数量/部	需要系数	计算系数	计算容量/kV·A
直流客梯	50	380	6	0.5	1.4	210
交流货梯	32	380	2	0.5	0.9	28.8
交流客梯	4	380	2	0.5	0.9	3.6
合计						242.4
×同时系数 0.8						193.92
计算电流/A						294.64

按需要系数法计算（同时系数取 0.8）供全部电梯的电源导体载流量为 294.6 A。

【知识点解析】

计算各种电梯的计算电流：

1）单台交流电梯供电导线的连续工作载流量，应大于其铭牌连续工作制额定电流的140%或铭牌0.5 h（或1 h）工作制额定电流的90%。如果要加上附属电器的负荷电流，或取连续工作制额定电流的140%。

2）单台直流电梯供电导线的连续工作载流量，应大于交直流变流器的连续工作制交流额定输入电流的140%。

3）多台电梯电源线的计算电流，应计入同时系数。

4）交流自动扶梯的计算电流，应取每级拖动电动机的连续工作制额定电流加上每梯级的照明负荷电流。每级单自动扶梯的照明电源为单相220 V；当为多梯级、双自动扶梯或多梯级的双自动扶梯时，照明负荷应分别接到三相上，尽量使三相负荷平衡。

例题3-35：已知某冶炼企业一个车间内有三台电弧炉，电弧炉容量为1.5 t，型号为HX-1.5，变压器额定容量为1250 kV·A。该冶炼车间的电弧炉的最大负荷视在功率应为下列哪项数值？（采用电冶炼周期计算法）

（A）3427 kV·A　　（B）3616 kV·A　　（C）3765 kV·A　　（D）3822 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第23页（第三版第14页）。

题目已知有三台电弧炉容量相同，查《配四》表1.7-1中熔化期台数2台，精炼期台数1台。

该冶炼车间的电弧炉的最大负荷为

$$P_c = 1.2\cos\varphi_1 \Sigma(n_1 S_{r1}) + 0.66\cos\varphi_2 \Sigma(n_2 S_{r2}) = (1.2\times0.85\times2\times1250 + 0.66\times0.9\times1250)\ \text{kW}$$
$$= 3292.5\ \text{kW}$$

$$Q_c = 1.2\sin\varphi_1 \Sigma(n_1 S_{r1}) + 0.66\sin\varphi_2 \Sigma(n_2 S_{r2}) = (1.2\times0.527\times2\times1250 + 0.66\times0.436\times1250)\ \text{kvar}$$
$$= 1940.7\ \text{kvar}$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} = \sqrt{3292.5^2 + 1940.7^2}\ \text{kV·A} = 3821.9\ \text{kV·A}$$

例题3-36：某生产车间在一条起重机滑触线上连接有3台起重机，其中最大一台50/10 t双梁桥式起重机额定负载持续率时的电动机总功率为105.5 kW、额定电流为165 A；较小2台5 t双梁桥式起重机连接在滑触线上的电动机在额定负载持续率下的总功率为27.8 kW。若这三台起重机的额定负载持续率 ε 均为40%，起动电流倍数为2，则该滑触线的计算电流与尖峰电流为下列哪一项数值？（采用综合系数法）

（A）170A，390A　　（B）170A，398A　　（C）175A，422A　　（D）180A，430A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第1129页（第三版第714页）。

滑触线上三台起重机吨位相差较大，其中最大一台负载持续率 $\varepsilon = 40\%$，查《配四》表12.2-2中 $K'_{cc} = 1.5, K_{cc} = 0.5$，故计算电流为

$$I_c = K'_{cc1} P_{n1} + 0.3(P_n - P_{n1}) = [1.5\times105.5 + 0.3\times(2\times27.8)]\ \text{A} = 175\ \text{A}$$

尖峰电流为

$$I_p = I_c + (K_{st} - K_{cc}) I_{rMmax} = [175 + (2 - 0.5) \times 165]\ A = 422\ A$$

例题 3-37：某台交流弧焊机，电焊机一次侧额定电流为 40 A，电焊机额定负载持续率为 25%，采用低压断路器保护时，长延时过电流脱扣器的额定电流最小值为下列哪一项数值？

（A）16 A　　（B）26 A　　（C）28 A　　（D）32 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1160 页（第三版第 744 页）。

交流弧焊机低压断路器长延时过电流脱扣器的额定电流为

$$I_{nl} \geqslant K I_e \sqrt{\varepsilon} = 1.3 \times 40 \times \sqrt{0.25}\ A = 26\ A$$

例题 3-38：某厂拟增设电镀用硅整流装置一台，已知：硅整流装置交流输入为三相 380 V；直流输出为 3~24 V，2000 A；接线方式为双星形带平衡电抗器。则整流器交流输入电流最大为下列哪一项数值？

（A）186 A　　（B）74 A　　（C）110 A　　（D）152 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1178 页（第三版第 758 页）。

整流器直流输出额定功率：$P_{rd} = \dfrac{U_{rd} I_{rd}}{1000} = \dfrac{24 \times 2000}{1000}\ kW = 48\ kW$

接线方式为双星形带平衡电抗器，查《配四》表 12.6-1 得 $K_1 = 1.26$；交流输入为三相 380 V，故 $K_2 = 1.52$；硅整流校正系数最大值为 $K_3 = 1.2$；整流器交流输入电流最大值为

$$I \geqslant K_3 K_2 K_1 P_{rd} = 1.2 \times 1.52 \times 1.26 \times 48\ A = 110.3\ A$$

例题 3-39：某锻造车间使用一台三相异步电动机，额定功率为 37 kW，正常工作为断续负载下，断续负载的工作周期为 10 min，负载持续率为 40%，环境温度为 30℃。拟采用 0.6/1 kV 铜芯聚氯乙烯绝缘电力电缆架空敷设，电缆的发热时间常数为 10.2 min，若已知电缆的连续负载时载流量为 60 A，当用于该电动机时电缆载流量为下列哪一项数值？

（A）83.3A　　（B）74.6A　　（C）65.8A　　（D）52A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1188 页（第三版第 768 页）。

已知断续负载的工作周期为 10 min，负载持续率为 40%，电缆的发热时间常数为 10.2 min，用于该电动机时断续负载下的校正系数为

$$C_1 = \sqrt{\frac{1 - e^{-T/\tau}}{1 - e^{-\varepsilon T/\tau}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-10/10.2}}{1 - e^{-0.4 \times 10/10.2}}} = 1.388$$

计入校正系数后的载流量为

$$I'_N = I_N C_1 = 60 \times 1.388\ A = 83.3\ A$$

第 4 章　无功补偿与应急电源

【知识点导图】

图 4-1 所示的无功补偿与应急电源知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点，其中必考点有最大、平均负荷的无功补偿，平均功率因数计算，柴油发电机组选择，UPS 和 EPS 装置的选择，并联电容器设计等。在 2016 年考试中并联电容器知识点多次考到，需要重点关注，本章给出了相应例题。

图 4-1　无功补偿与应急电源知识点导图

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）对无功补偿章节的内容大幅更新，更新了按平均负荷计算的补偿容量，将自然平均功率因数公式隐含在平均功率因数正切值公式中，增加了按最大负荷计算的补偿容量，增加了并联电容器的众多内容，如串联电抗器引起的电容器端子电压升高、实际输出容量等（本章也增加了对应例题），第 5 章中增加了并联电容器及其附属设备选择内容。对应急电源章节的内容大幅更新，工矿企业柴油发电机组内容更新与《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）14-2 节相似，民用柴油发电机组更新与《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 一致，更新了 UPS 装置的选择并增加了海拔修正的内容等。

4.1 无功补偿与功率因数

【知识点说明】

1）无功补偿属于重要考点，依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）1.11 节等。要求熟练掌握最大、平均、最小负荷的无功补偿的计算，同步电动机补偿能力的计算；掌握无功无偿的原则与要求、提高电压要求无功补偿的计算等。

2）功率因数提高属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）1.11 节、第 16 章和《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 6、10 章等。要求熟练掌握自然平均功率因数计算、功率因数提高要求和措施等；了解用户接入电网侧功率因数考核指标的计算和要求。

依据书目：

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《全国供用电规则》

《电力系统电压和无功电力技术导则》SD325-89

《国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则》

例题 4-1~4-4：已知某企业总计算负荷 $P_{js}=18\,MW$，$Q_{js}=8.8\,Mvar$，年平均有功负荷系数为 0.7，年平均无功负荷系数为 0.8，年实际工作小时数为 5000 h，年最大负荷利用小时数为 3500 h。请回答下列问题，并列出解答过程。

4-1：为提高 10 kV 母线的功率因数通常采用下列哪种措施？（供配电 2008 年考题）

（A）并联电容器补偿　　（B）增加感应电动机的容量

（C）并联电抗器补偿　　（D）串联电容器补偿

答案：【A】

解答过程：依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 34 页。

第 6.0.2 条　当采用提高自然功率因数措施后，仍达不到电网合理运行要求时，应采用并联电力电容器作为无功补偿装置。

4-2：计算该企业自然平均功率因数。（供配电 2008 年考题）

（A）0.87　　（B）0.9　　（C）0.92　　（D）0.88

答案：【A】

解题过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 37 页（第三版第 21 页）。

企业自然平均功率因数：

$$\cos\varphi_{av}=\sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{\beta_{av}Q_c}{\alpha_{av}P_c}\right)^2}}=\sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{0.8\times8.8}{0.7\times18}\right)^2}}=0.873$$

【知识点解析】

用户自然平均功率因数为

$$\cos\varphi=\sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{\beta_{av}Q_c}{\alpha_{av}P_c}\right)^2}}$$

式中，P_c为企业的计算有功功率（kW）；Q_c为企业的计算无功功率（kvar）；α_{av}、β_{av}为年平均有功、无功负荷系数，α_{av}值一般取0.7~0.75，β_{av}值一般取0.76~0.82。

《工业与民用配电设计手册》第三版企业自然平均功率因数计算公式在第四版中已取消，可从平均功率因数角正切值推导得出。

4-3：已知有一台10 kV同步电动机，额定容量为4000 kV·A，额定功率因数为0.9（超前），负荷率为0.75，无功功率增加系数为0.36。计算其输出无功功率。（供配电2008年考题）

（A）1760 kvar　　（B）1795 kvar　　（C）2120 kvar　　（D）2394 kvar

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第34页（第三版第22页）。

题目已知额定容量为4000 kV·A，额定功率因数为0.9（超前），负荷率为0.75，无功功率增加系数为0.36，则同步电动机输出无功功率为

$$Q_M=S_N[\sin\varphi_N+\gamma(1-\beta)]=4000\times[0.44+0.36(1-0.75)]\text{ kvar}=2120\text{ kvar}$$

【知识点解析】

当同步电动机的负荷率为0.4~1时，其输出的无功功率可按如下近似式求得：

$$Q_M=S_N[\sin\varphi_N+\gamma(1-\beta)]$$

式中，Q_M为同步电动机输出的无功功率（kvar）；S_N为同步电动机的额定容量（kV·A）；φ_N为同步电动机额定功率因数角；β为同步电动机负荷率；γ为同步电动机带负荷时的无功功率增加系数，具体见表4-1。

表4-1　γ值

$\cos\varphi_N$	$\sin\varphi_N$	γ
0.8	0.6	0.2
0.9	0.44	0.36
1.0	0	0.4

4-4：已知企业中某台10 kV笼型感应电动机的工作方式为负荷平稳连续工作制，额定功率为800 kW，电动机的功率因数$\cos\varphi$为0.82，要求就地设置无功补偿装置，补偿后该电动机供电回路的功率因数$\cos\varphi$为0.92，则下列补偿量哪项是正确的？（供配电2008年考题改编）

（A）156 kvar　　（B）171 kvar　　（C）218 kvar　　（D）273 kvar

答案：【C】

解答过程：依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 36 页（第三版第 21 页）。

补偿前自然功率因数的正切值 $\tan\varphi_1=0.7$；补偿后自然功率因数的正切值 $\tan\varphi_2=0.426$；电动机的补偿量为

$$Q_c=P(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=800\times(0.7-0.426)\ \text{kvar}=219.2\ \text{kvar}$$

【知识点解析】

按最大负荷计算无功补偿容量：

$$Q=P_c(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=P_cq_c$$

$$\tan\varphi_1=\frac{Q_c}{P_c}$$

式中，Q 为无功补偿容量（kvar）；P_c 为用电设备的计算有功功率（kW）；$\tan\varphi_1$ 为补偿前用电设备自然功率因数的正切值；$\tan\varphi_2$ 为补偿后用电设备自然功率因数的正切值，一般 10（6）kV 及以下无功补偿宜在配电变压器低压侧集中补偿，且功率因数不宜低于 0.9。

例题 4-5：某企业 35 kV 总降压变电站设有两台三相双绕组变压器，容量为 2×5000 kV·A，电压比为 35±2×2.5%/10.5 kV，变压器空载有功损耗为 4.64 kW，变压器阻抗电压为 7%，变压器负载有功损耗为 34.2 kW，变压器空载电流为 0.48%，无功经济当量为 0.02 kW/kvar。10 kV 侧计算有功功率为 3600 kW，计算无功功率为 2400 kvar，该负荷平均分配在两台变压器，则企业 35 kV 侧最大负荷时的功率因数为多少？（供配电 2014 年考题改编）

（A）0.74　　（B）0.78　　（C）0.815　　（D）0.83

答案：【C】

解题过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 37 页、第 1544 页（第三版第 16 页）。

变压器负载率

$$\beta=\frac{S_c}{S_r}=\frac{\sqrt{P_c^2+Q_c^2}}{S_r}=\frac{\sqrt{(3600/2)^2+(2400/2)^2}}{5000}=0.433$$

变压器无功损耗：

$$\Delta Q=Q_0+\beta^2Q_k=(0.48\%\times5000+0.433^2\times7\%\times5000)\ \text{kvar}=89.62\ \text{kvar}$$

变压器综合有功损耗

$$\Delta P=P_0+\beta^2P_k+K_Q(Q_0+\beta^2Q_k)=(4.64+0.433^2\times34.2+0.02\times89.62)\ \text{kW}=12.84\ \text{kW}$$

企业总计算负荷有功功率 $P=P_c+\Delta P=(3600/2+12.84)\ \text{kW}=1812.84\ \text{kW}$

企业总计算计算无功功率 $Q=Q_c+\Delta Q=(2400/2+89.62)\ \text{kvar}=1289.62\ \text{kvar}$

企业 35 kV 侧最大负荷时的功率因数

$$\cos\varphi=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}=\frac{1812.84}{\sqrt{1812.84^2+1289.62^2}}=0.815$$

【知识点解析】

1）功率因数：

$$\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{Q}{P}\right)^2}}$$

式中，Q 为无功容量（kvar）；P 为有功功率（kW）；S 为视在功率（kV·A）。

2）无功补偿的功率因数要求：《国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则》、《中国南方电网公司电力系统电压质量和无功电力管理标准》中的要求，100 kV·A 及以上高压供电的电力用户，在用户高峰负荷时变压器高压侧功率因数不宜低于 0.95。

例题 4-6：某企业新建 35/10 kV 变电所，10 kV 侧计算有功功率为 17450 kW，计算无功功率为 11200 kvar，选用 2 台 16000 kV·A 的变压器，每单台变压器阻抗电压为 8%，短路损耗为 70 kW，两台变压器同时工作，分列运行，负荷平均分配，两回线路同时工作。请计算补偿前的 10 kV 侧平均功率因数正切值（年平均负荷系数 $\alpha_{av}=0.75$，$\beta_{av}=0.8$，假定两台变压器所带负荷的功率因数相同），如果要求 10 kV 侧平均功率因数补偿到 0.9 以上，按照平均负荷计算的补偿容量最接近下列哪组数值？（供配电 2013 年考题改编）

（A）0.76，3315 kvar　　（B）0.81，2094 kvar

（C）0.685，1313 kvar　　（D）0.89，261.8 kvar

答案：【C】

解题过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 37 页（第三版第 21 页）。

补偿前的 10 kV 侧平均功率因数正切值：

$$\tan\varphi_1=\frac{\beta_{av}Q_c}{\alpha_{av}P_c}=\frac{0.8\times11200/2}{0.75\times17450/2}=0.685$$

当要求功率因数补偿到 0.9 时对应正切值为 $\tan\varphi_2=0.484$，补偿容量为

$$Q=\alpha_{av}\frac{P_c}{2}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=0.75\times\frac{17450}{2}\times(0.672-0.484)\ \text{kvar}=1313\ \text{kvar}$$

【知识点解析】

按照平均负荷计算的补偿容量为

$$Q=\alpha_{av}P_c(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=\alpha_{av}P_cq_c$$

$$\tan\varphi_1=\frac{\beta_{av}Q_c}{\alpha_{av}P_c}$$

式中，Q 为平均负荷计算的无功补偿容量（kvar）；P_c 为用电设备的计算有功功率（kW）；$\tan\varphi_1$ 为补偿前用电设备平均功率的正切值；$\tan\varphi_2$ 为补偿后平均功率的正切值；α_{av}、β_{av} 为年平均有功、无功负荷系数；q_c 为无功功率补偿率（kvar/kW）。

例题 4-7：某小型企业拟新建检修车间、办公附属房屋和 10/10.4 kV 车间变电所各一处。假定该企业变电所总计算有功功率为 120 kW，自然平均功率因数为 0.75，年平均有功负荷系数为 $\alpha_{av}=0.75$，如果使变电所 0.4 kV 侧的平均功率因数提高到 0.9，则最小的无功补偿容量与下列哪个数值最接近？（供配电 2012 年考题改编）

（A）30 kvar　　（B）40 kvar　　（C）60 kvar　　（D）75 kvar

答案：【B】

解题过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 37 页（第三版第 21 页）。

补偿前的平均功率因数为 0.75，正切值 $\tan\varphi_1=0.882$；当要求功率因数补偿到 0.9 时，对应正切值为 $\tan\varphi_2=0.484$，补偿容量为

$$Q=\alpha_{av}P_c(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=0.75\times120\times(0.882-0.484)\ \text{kvar}=35.82\ \text{kvar}$$

可选 40 kvar 无功补偿，即答案 B。

例题 4-8：某 110/10 kV 变电站设有两台主变压器，110 kV 采用内桥接线方式，10 kV 采用单母线分段接线方式，110 kV 进线及 10 kV 母线均分列运行。两台主变压器参数如下：容量为 50000 kV·A；电压比为（110±8×1.25%/10.5）kV；短路阻抗为 $U_k=12\%$；空载电流为 $I_0=1\%$；接线组别为 YNd11。所内两段 10 kV 母线上的预计总负荷为 40 MW，所有负荷均匀分布在两段母线上。未补偿前 10 kV 负荷功率因数为 0.86，当地电力部门要求变电站入口处功率因数达到 0.96。请计算确定全站 10 kV 侧需要补偿的容性无功容量，其结果应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）12000 kvar　　（B）13541 kvar　　（C）15152 kvar　　（D）16500 kvar

答案：【C】

解题过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 37 页、第 1544 页（第三版第 16 页）。

变压器负载率：$\beta=\dfrac{P_2}{S_r\cos\varphi}=\dfrac{40/2}{50\times0.96}=0.417$

单台变压器无功损耗：$\Delta Q=Q_0+\beta^2Q_k=1\%\times50\times10^3+0.417^2\times12\%\times50\times10^3\ \text{kvar}=1543.3\ \text{kvar}$

工厂 10 kV 侧：补偿前的平均功率因数为 0.86，正切值 $\tan\varphi_1=0.593$；当要求功率因数补偿到 0.96 时，对应正切值为 $\tan\varphi_2=0.292$，按最大负荷计算的补偿容量为

$$Q=P_c(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=40\times10^3\times(0.593-0.292)\ \text{kvar}=12040\ \text{kvar}$$

计入两台变压器无功补偿后的补偿容量为

$$Q'=Q+2\Delta Q=(12040+2\times1543.3)\ \text{kvar}=15126.6\ \text{kvar}$$

【知识点解析】

当地电力部门要求的功率因数考核点一般在工厂终端变电所接入电网高压侧，进行无功补偿时需要计入工厂变压器损耗对功率因数的影响。在《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 476 页式（9-1）和式（9-2）中只考虑了计入变压器无功损耗补偿的计算，电力部门要求变电站入口处功率因数还应考虑变压器有功损耗。

例题 4-9：某车间变电所设 10/0.4 供电变压器一台，变电所设有低压配电室，用于布置电压配电柜。低压用电设备中电动机 M_1 的额定功率为 45 kW，额定电流为 94.1 A，额定转速为 740 r/min，效率为 92.0%，功率因数为 0.79，最大转矩比为 2。对电动机 M_1 进行就地补偿时，为防止产生自励磁过电压，补偿电容的最大容量是下列哪项数值？（电动机空载电流按电动机最大转矩倍数推算的方法计算）（供配电 2017 年考题）

（1）18.26 kvar　　（B）20.45 kvar　　（C）23.68 kvar　　（D）25.73 kvar

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 305 页。

计算补偿后该电动机馈电线路的年节能量：

$$I_0 = I_N\left(\sin\varphi_N - \frac{\cos\varphi_N}{2b}\right) = 94.1\times\left[\sin(\arccos(0.79)) - \frac{0.79}{2\times2}\right]\text{A} = 39.11\text{ A}$$

$$Q_b \leqslant \sqrt{3}U_N I_0 = \sqrt{3}\times0.38\times39.11\text{ kvar} = 25.74\text{ kvar}$$

依据《供配电系统设计规范》GB50052—2009，第 6.0.12 条 接在电动机控制设备侧电容器的额定电流，不应超过电动机励磁电流的 0.9 倍。本题因采用《钢铁企业电力设计手册》进行解答，与该条文有矛盾之处。

例题 4-10：某 110 kV 变电所装有两台绕组变压器，额定电压为 110/10 kV。10 kV 侧通过 5 km 的 3×120 铜芯电缆接至某企业 10 kV 配电装置（电缆单位长度电阻为 0.297 Ω/km，电抗为 0.095 Ω/km）。假设企业 10 kV 配电装置母线上运行电压为 9.5 kV，为将母线电压正常运行提升为 10 kV，则需补偿的最大容性无功容量最接近下列哪项数值？

（A）10 kvar　　（B）20 kvar　　（C）30 kvar　　（D）35 kvar

答案：【A】

解题过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 37 页。

题目已知企业配电装置母线运行电压为 9.5 kV，母线电压升高值为 0.5 kV，线路电缆长度为 5 km，电抗为 0.095 Ω/km。企业所需提高电压的补偿容量为

$$Q = \Delta U\frac{U_b}{X_L} = 0.5\times\frac{9.5}{0.095\times5}\text{kvar} = 10\text{ kvar}$$

【知识点解析】

按提高电压要求计算的补偿容量为

$$Q = \Delta U\frac{U_b}{X_L}$$

式中，Q 为补偿容量（kvar）；ΔU 为补偿后变电站母线电压升高值（kV）；U_b 为补偿前变电站母线电压（kV）；X_L 为该变电站送电线路的感抗值（Ω）。

4.2　并联电容器

【知识点说明】

并联电容器属于重要考点，依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017、《20 kV及以下变电所设计规范》GB 50053—2013、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。要求熟练掌握并联电容器额定电压、运行电压、额定容量、谐振容量、实际输出容量计算，并联电容器接线方式、保护装置，并联电容器电器（断路器、电抗器、熔断器、避雷器等）和导体选择；掌握电容器组投入电网时的涌流计算。并联电容器保护装置的整定计算详见第 9 章，并联电容器装置布置、安装、防火等设计详见第 5 章。并联电容器及电容器组的容量计算会结合负荷计算、节能、电能质量等方面的案例以综合考题的形式出现。

依据书目：

《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017

《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《35～220 kV 变电站无功补偿装置设计技术规定》DL/T 5242—2010

《高压并联电容器使用技术条件》DL/T 840—2016

《高压并联电容器装置使用技术条件》DL/T 604—2009

《高压并联电容器装置的通用技术要求》GB/T 30841—2014

例题 4-11：某城市综合体设置一座 10 kV 总配电室及若干变配电室，10 kV 总配电室向各变配电室和制冷机组放射式供电。10 kV 制冷机组无功功率就地补偿。在确定并联电容器组分组容量时，应避免发生谐振。为躲开谐振点，需根据电抗器的电抗率合力选择电容器分组容量，避开谐振容量，假定 10 kV 制冷机组电源母线短路容量为 100 MV·A，电容器组串联电抗率为 6%的电抗器，则发生 3 次谐波谐振的电容器容量是下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）5.111 Mvar　　（B）2 Mvar　　（C）−2 Mvar　　（D）−5.111 Mvar

答案：**【A】**

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

发生 3 次谐波谐振的电容器容量为

$$Q_{cx}=S_d\left(\frac{1}{n^2}-K\right)=100\times\left(\frac{1}{3^2}-6\%\right)\text{Mvar}=5.111\text{ Mvar}$$

【知识点解析】

并联电容器分组容量：

1）在电容器分组投切时，母线电压波动应满足国家现行标准的要求，并应满足系统无功功率和电压调控要求。

2）当分组电容器按各种容量组合运行时，应避开谐振容量，不得发生谐波的严重放大和谐振。

3）发生谐振的电容器容量，可按下式计算：

$$Q_{cx}=S_d\left(\frac{1}{n^2}-K\right)$$

式中，Q_{cx}为发生 n 次谐波谐振的电容器容量（Mvar）；S_d为并联电容器装置安装处的母线短路容量（MV·A）；n 为谐波次数，即谐波频率与电网基波频率之比；K 为电抗率。

例题 4-12：某 2000 kV·A 变压器低压侧三相四线，额定频率为 50 Hz，母线运行线电压为 0.4 kV，现在该母线上设置 12 组星形接线的 3 相并联电容器组，每组串联电抗率为 7%的电抗器，电容器组容量参数如下：三相额定线电压为 0.48 kV，额定容量为 50 kvar，考虑电抗器和并联电容器运行电压影响后的并联电容器无功输出是下列哪项数值？（供配电 2016 年考题改编）

（A）387.5 kvar　　（B）448.03 kvar　　（C）398.03 kvar　　（D）467.2 kvar

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 508 页或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 39 页。

考虑电抗器、并联电容器运行电压影响后的并联电容器无功输出为

$$Q_B \leqslant \frac{3M}{N}\frac{U_m^2}{U_{ce}^2}\frac{Q_{ce}}{1-A}=\frac{12}{1}\times\frac{0.4^2}{0.48^2}\times\frac{50}{1-0.07}\ \text{kvar}=448.03\ \text{kvar}$$

【知识点解析】

当考虑单台电容器额定电压与实际运行电压的关系和串入电抗器的影响后，电容器整体输出容量计算如下：

$$Q_B \leqslant \frac{3M}{N}\frac{U_m^2}{U_{ce}^2}\frac{Q_{ce}}{1-K}$$

式中，Q_B 为计入实际运行电压和串入电抗器的影响后并联电容器组的容量（kvar）；Q_{ce} 为单台并联电容器组（无电抗器）的额定容量（kvar）；U_{ce} 为单台并联电容器组的额定电压（kV）；K 为串联电抗器电抗率；U_m 为系统母线实际运行电压（kV）；N 为并联电容器组串联段数；M 为并联电容器组并联台数。单台电容器额定电压与串入电抗器电抗率是一一对应的关系。

例题 4-13：某低压配电系统，无功功率补偿设备选用额定容量为 480 kvar、额定线电压为 480 V 的三相并联电容器组，三角形接线，回路要求串联 7%电抗器组，母线运行电压为 0.4 kV，如图 4-2 所示。请计算确定串联电抗器组的容量最接近下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

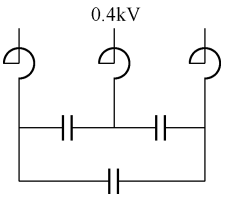


图 4-2　并联电容器组接线图

（A）33.60 kvar

（B）26.98 kvar

（C）23.33 kvar

（D）8.99 kvar

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 510 页。

三相并联电容器组容抗值和额定电流（三角形接线）：

$$X_{\Sigma Ce}=\frac{N}{3M}\frac{U_{ce}^2}{Q_{ce}}=\frac{1}{3\times1}\times\frac{480^2}{480\times10^3}\ \Omega=0.16\ \Omega \quad I_{\Sigma ce}=\frac{U_m}{(1-A)X_{\Sigma Ce}}\times10^3=\frac{400/\sqrt{3}}{(1-7\%)\times0.16}\ \text{A}=1552\ \text{A}$$

串联电抗器感抗值和额定电流（三角形接线）：

$$X_{Le}=AX_{\Sigma Ce}=7\%\times0.16\ \Omega=11.2\times10^{-3}\ \Omega \quad I_{\Sigma Le}=I_{\Sigma ce}=1552\ \text{A}$$

母线运行电压为 0.4 kV，串联电抗器组的容量为

$$Q_L=I_{\Sigma Le}^2X_{\Sigma Le}\times10^{-3}=1552^2\times11.2\times10^{-6}\ \text{kvar}=26.98\ \text{kvar}$$

例题 4-14：某小型企业拟新建检修车间、办公附属房屋和 10/10.4 kV 车间变电所各一处。为了限制并联电容切断电路涌流，拟在低压电容器组的电源侧设置串联电抗器，此时电抗率应该选择下列哪个数值？（供配电 2012 年考题）

（A）0.1%～1%　　（B）3%　　（C）4.5%～6%　　（D）12%

答案：【A】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 5.5.2-1 条中仅用于限制并联电容切断电路涌流，电抗率宜取 0.1%～1%。

【知识点解析】

串联电抗器电抗率的选择，应根据电网条件与电容器参数经相关计算分析确定，电抗率取值范围应符合下列规定：

1）仅用于限制涌流时，电抗率宜取0.1%~1.0%。

2）用于抑制谐波时，电抗率应根据并联电容器装置接入电网处的背景谐波含量的测量值选择。

当谐波为5次及以上时，电抗率宜取5.0%；

当谐波为3次及以上时，电抗率宜取12.0%，亦可采用5.0%与12.0%两种电抗率混装方式。

例题4-15：某企业总降压变电所电源引自地区变电所。车间变配电所10 kV母线上设置无功补偿装置，单台并联电容器额定电压为$10/\sqrt{3}$ kV，额定容量为500 kvar，三相星形接线，并联台数为1，串联段数为1。为了防止5次谐波放大，增加串联电抗器，电抗器电抗率为5%，重新选用单台并联电容器额定电压为$11/\sqrt{3}$ kV，额定容量为500 kvar。不考虑母线实际运行电压影响，请计算串联电抗器前后并联电容器可输出的容性无功功率减少数值。(供配电2007年考题改编)

（A）75 kvar　　（B）77 kvar　　（C）52 kvar　　（D）86 kvar

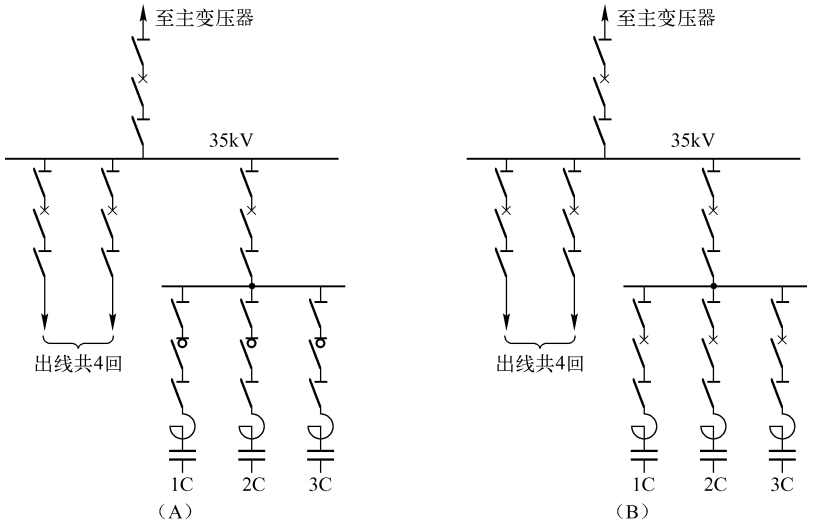
答案：【A】

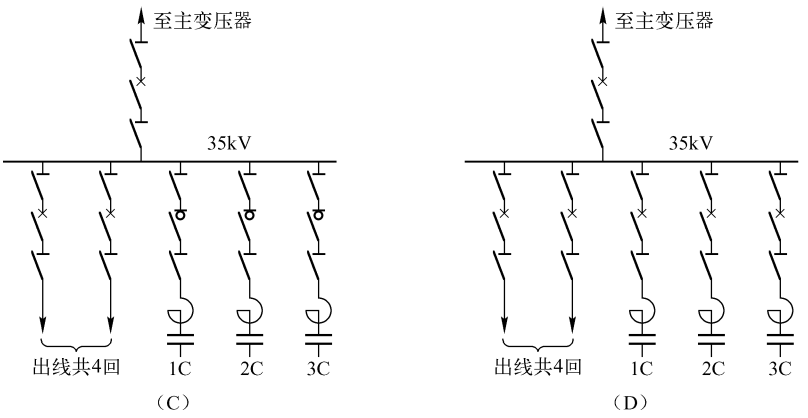
解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

不考虑母线实际运行电压影响时，未串联电抗器前容性无功功率为3×500 kvar=1500 kvar，串联电抗器后容性无功功率为$(1-5\%)\times3\times500$ kvar=1425 kvar，串联电抗器前后容性无功功率减少(1425-1500) kvar=-75 kvar。

例题4-16~4-26：某220 kV变电站有180 MV·A、220/110/35 kV主变压器两台，其中35 kV配电装置有8回出线，单母分段接线，35 kV母线装有若干组电容器。请回答下列问题。

4-16：如该变电站的每台主变压器35 kV侧装有3组电容器，4回出线，其35 kV接线不可采用下列哪种接线方式？说明理由。(发输电2013年考题)





答案：【C】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 4.1.1 条中并联电容器装置的各分组回路可采用直接接入母线，并经总回路接入变压器的接线方式，常用接线方式图 4.1.1-2～图 4.1.1-3 中，答案 B、D 对。

第 4.2.1 条中并联电容器装置应装设隔离开关、断路器；第 4.2.2 条中并联电容器装置分组回路的断路器，应装设于电容器组的电源侧；第 5.3.2 条中并联电容器装置总回路中的断路器，应具有切除所连接的全部电容器组和开断总回路短路电流的性能，分组回路断路器可采用不承担开断短路电流的开关设备；答案 A 中接线方式的电容器组的总回路中的断路器有切除所连接的全部电容器组和开断总回路短路电流的性能，各分组装设负荷开关不承担开断短路电流，也可使用，答案 C 中接线方式的电容器组的电源侧装设负荷开关，不能达到切除故障的要求，不能使用。

4-17：若该变电站中，35 kV 电容器单组容量为 10000 kvar，三组电容器组采用专用母线方式接入 35 kV 主母线，则专用母线断路器长期允许电流最小不应小于下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）495 A　　（B）643 A　　（C）665 A　　（D）1000 A

答案：【B】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 5.8.2 条　并联电容器装置总回路和分组回路的电器导体选择时，回路工作电流应按稳态过电流最大值确定，过电流倍数应为回路额定电流的 1.3 倍。

$$I_C = 1.3\times3\times\frac{Q_N}{\sqrt{3}U_N} = 1.3\times3\times\frac{10000}{\sqrt{3}\times35}\,A = 643.3\,A$$

4-18：若变电站初期设计时，拟在 35 kV 侧装设并联电容器进行无功补偿，则本变电站的每台主变的无功补偿容量宜取下列何值？（发输电 2010 年考题）

（A）15000 kvar　　（B）40000 kvar　　（C）63000 kvar　　（D）80000 kvar

答案：【B】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 3.0.2 条条文说明　变电站中并联电容器安装容量占主变容量的比例，由于各地电网情况和无功补容量的差异而略有不同，一般不少于 10%，不大于 30%。

变电站主变压器容量为 180 MV·A 时，并联电容器安装容量为 18~54 MV·A，答案 B 符合要求。

4-19：若该变电站的 35 kV 三相电容器组，每相由单台 500 kvar 电容器串、并联组合而成，采用双星形接线，每相串联段数为 2，则每组允许的最大组合容量是下列哪项数值？（发输电 2014 年考题）

（A）每串联段由 6 台并联，最大组合容量 36000 kvar

（B）每串联段由 7 台并联，最大组合容量 42000 kvar

（C）每串联段由 8 台并联，最大组合容量 48000 kvar

（D）每串联段由 9 台并联，最大组合容量 54000 kvar

答案：【B】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 4.1.2-3 条　每个串联段的电容器并联总容量不应超过 3900 kvar。

$N=\dfrac{3900}{500}=7.8$，每个串联段取 7 台。

已知双星形接线，串联段数为 2，每串联段的台数为 7，三相电容器组。并联电容器组最大组合容量为

$$Q_C=7\times2\times2\times3\times500\ \text{kvar}=42000\ \text{kvar}$$

【知识点解析】

并联电容器组的额定容量 Q_{rC}，不考虑串联电抗器容量影响的计算公式如下：

$$Q_{rC}=knmQ$$

式中，n 为每相电容器的串联段数；m 为每相各串联段电容器并联台数；Q 为单台电容器额定容量（kvar）；k 为并联电容器相数，单星形和单三角形接线形式为 1 组、3 相，双星形和双三角形接线形式为 2 组、6 相。

4-20：若该变电站的 35 kV 三相电容器组，采用双星形接线，先并联后串联，每相串联段数为 2，每串联段的台数为 10 台，每台 334 kvar 电容器，设串联了电抗率为 12% 的电抗器，此三相电容器组中的电容器运行电压是下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）5.64 kV　　（B）10.6 kV　　（C）10.75 kV　　（D）12.05 kV

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

已知每相串联段数为 2，串联了电抗率为 12% 的电抗器，计入串联电抗器引起的电容器运行电压升高为

$$U_C=\frac{U_s}{\sqrt{3}S}\frac{1}{1-K}=\frac{1.05\times35}{\sqrt{3}\times2}\times\frac{1}{1-0.12}\text{kV}=12.05\text{kV}$$

【知识点解析】

应计入串联电抗器引起的电容器运行电压升高。接入串联电抗器后，电容器运行电压应按下式计算：

$$U_C=\frac{U_s}{\sqrt{3}S}\frac{1}{1-K}$$

式中，U_C为电容器的运行电压（kV）；U_s为并联电容器装置的母线运行电压（kV）；S为电容器组每相的串联段数；K为电抗率。

4-21：若该变电站的35 kV三相电容器组，设有一组单星形接线，串联了电抗率为12%电抗器的35 kV电容器组，电容器组每相串联段数为4，此电容器组中的电容器额定电压应选为下列哪项数值？（发输电2013年考题）

（A）4 kV　　（B）5 kV　　（C）6 kV　　（D）6.6 kV

答案：【C】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

已知每相串联段数为4，串联了电抗率12%电抗器，计入串联电抗器的电容器额定电压为（条文说明第5.2.2条）

$$U_{CN}=\frac{1.05U_{SN}}{\sqrt{3}S(1-K)}=\frac{1.05\times35}{\sqrt{3}\times4\times(1-0.12)}\text{ kV}=6.03\text{ kV}$$

4-22：若该变电站的35 kV三相电容器组，每台变压器配置1组电容器补偿装置，电抗率为12%，35 kV母线短路容量为500 MV·A，已运行的补偿容量为12 Mvar，由于负荷波动，每次自动投入的分组补偿容量为334 kvar。则电容器组投入时的涌流标幺值为下列哪项数值？

（A）3.88　　（B）8.31　　（C）3.82　　（D）8.39

答案：【C】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

附录A第A.0.1条　计入自动投入后的电容器组容量为

$$Q=Q'+Q_0=(12+0.334)\text{ Mvar}=12.334\text{ Mvar}$$

电源影响系数为

$$\beta=1-\frac{1}{\sqrt{1+\dfrac{Q}{KS_d}}}=1-\frac{1}{\sqrt{1+\dfrac{12.334}{0.12\times500}}}=0.089$$

自动投入电容器组投入时的涌流标幺值为

$$I_{*ym}=\frac{1}{\sqrt{K}}\left(1-\beta\frac{Q_0}{Q}\right)+1=\frac{1}{\sqrt{0.12}}\left(1-0.089\times\frac{0.334}{12.334}\right)+1=3.82$$

【知识点解析】

电容器组投入电网时的涌流计算

1）同一电抗率的电容器组单组投入或追加投入时，涌流应按下列公式计算：

$$\begin{cases}I_{*ym}=\dfrac{1}{\sqrt{K}}\left(1-\beta\dfrac{Q_0}{Q}\right)+1\\ \beta=1-\dfrac{1}{\sqrt{1+\dfrac{Q}{KS_d}}}\\ Q=Q'+Q_0\end{cases}\tag{4-1}$$

式中，I_{*ym}为涌流峰值的标幺值（以投入的电容器组额定电流峰值为基准值）；Q为同一母线上装设的电容器组总容量（Mvar）；Q_0为正在投入的电容器组容量（Mvar）；Q'为所有正

在运行的电容器组容量（Mvar）；β为电源影响系数。

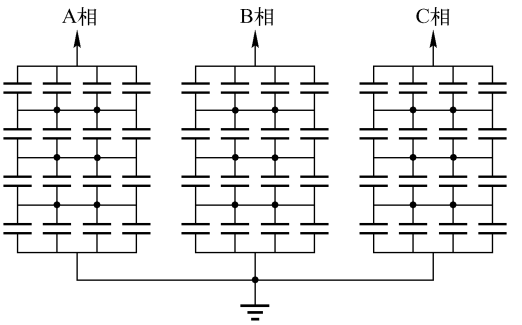
2）当有两种电抗率的多组电容器追加投入时，涌流计算应符合下列规定：

① 设正在投入的电容器组电抗率为K_1，当满足$\frac{Q}{K_1 S_d}<\frac{2}{3}$时，涌流应按下式计算：

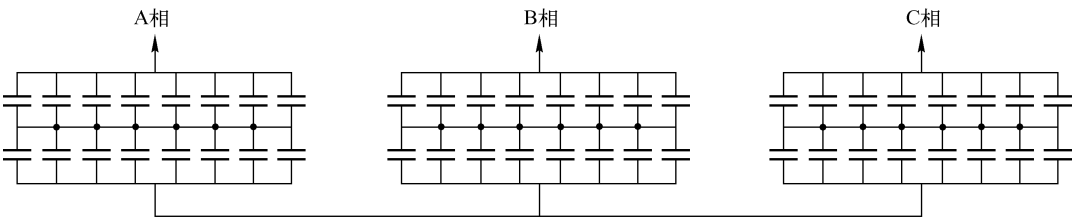
$$I_{*ym}=\frac{1}{\sqrt{K_1}}+1 \tag{4-2}$$

② 仍设正在投入的电容器组电抗率为K_1，两种电抗率中的另一种电抗率为K_2，当满足$\frac{Q}{K_1 S_d}\geqslant\frac{2}{3}$，且$\frac{Q}{K_1 S_d}<\frac{2}{3}$时，涌流仍应按式（4-1）计算，其中$K=K_1$。

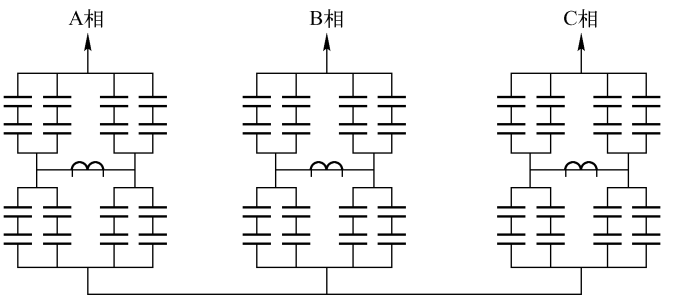
4-23：若本变电所安装的三相35 kV电容器组，每组由48台500 kvar电容器串、并联组合而成，每组容量为24000 kvar，如图的几种接线方式中，哪一种是可采用的？并说明理由。（500 kvar电容器内有内熔丝）（发输电2013年考题）



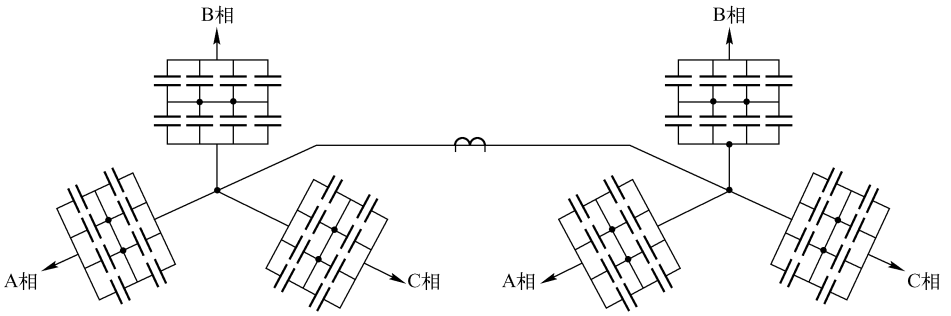
（A）单星形接线，每相4并4串



（B）单星形接线，每相8并2串



（C）单星形接线，每相4并4串，桥差接线



（D）双星形接线，每星每相4并2串

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

1）第 4.1.2 条　并联电容器组应采用星形接线。在中性点非直接接地的电网中，星形接线电容器组的中性点不应接地，答案 A 中性点接地错误。

2）每个串联段的电容器并联总容量不应超过 3900 kvar。$N=\dfrac{3900}{500}=7.8$，串联段最大取 7 台，答案 B 串联段 8 台错误。

3）第 6.1.2-3 条　单星形电容器组，每相能接成四个桥臂时，可采用桥式差电流保护，答案 C 保护接线符合要求。并联电容器组的每相或每个桥臂，由多台电容器串并联组合连接时，宜采用先并联后串联的连接方式，答案 C 不符合先并联后串联的原则，答案 C 错误。

4）第 4.1.2 条　在中性点非直接接地的电网中，星形接线电容器组的中性点不应接地，答案 D 符合接线条件正确。

第 6.1.2-4 条　双星形接线中性点不平衡保护接线正确。

综上所述，选 D。

4-24：若该变电站主变压器 35 kV 侧采用单母线单元制接线，如图 4-3 所示，无出线，仅安装无功补偿设备，不设总断路器。安装的电容器组为框架装配式电容器，中性点不接地的单星形接线，桥式差动保护，由单台容量 500 kvar 电容器串并联组成，每桥臂 2 串（2 并联+3 并联），如图 4-4 所示。电容器的最高运行电压 $U_c=43\sqrt{3}$ kV。请选择下面图中金属台架 1 与金属台架 2 之间的支柱绝缘子电压为下列哪项，并说明理由。（发输电 2016 年考题）

（A）3 kV 级　　（B）6 kV 级　　（C）10 kV 级　　（D）20 kV 级

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

条文说明第 5.2.3 条 35 kV 电容器组，每相 4 个串联段组成，单台电容器额定电压为 $U_c=\dfrac{43}{4\sqrt{3}}$ kV = 6.2 kV，安装在绝缘平台上，绝缘平台分两层，两台电容器绝缘水平不应低于 20 kV级，连接并联段各台电容器的母线与框架间的绝缘水平应与电容器的绝缘等级相同，金属台架 1 与金属台架 2 之间的支柱绝缘子电压应选 20 kV 级。

4-25：如该变电站 35 kV 母线安装的并联电容器组总容量为 60 Mvar，请验证 35 kV 母线

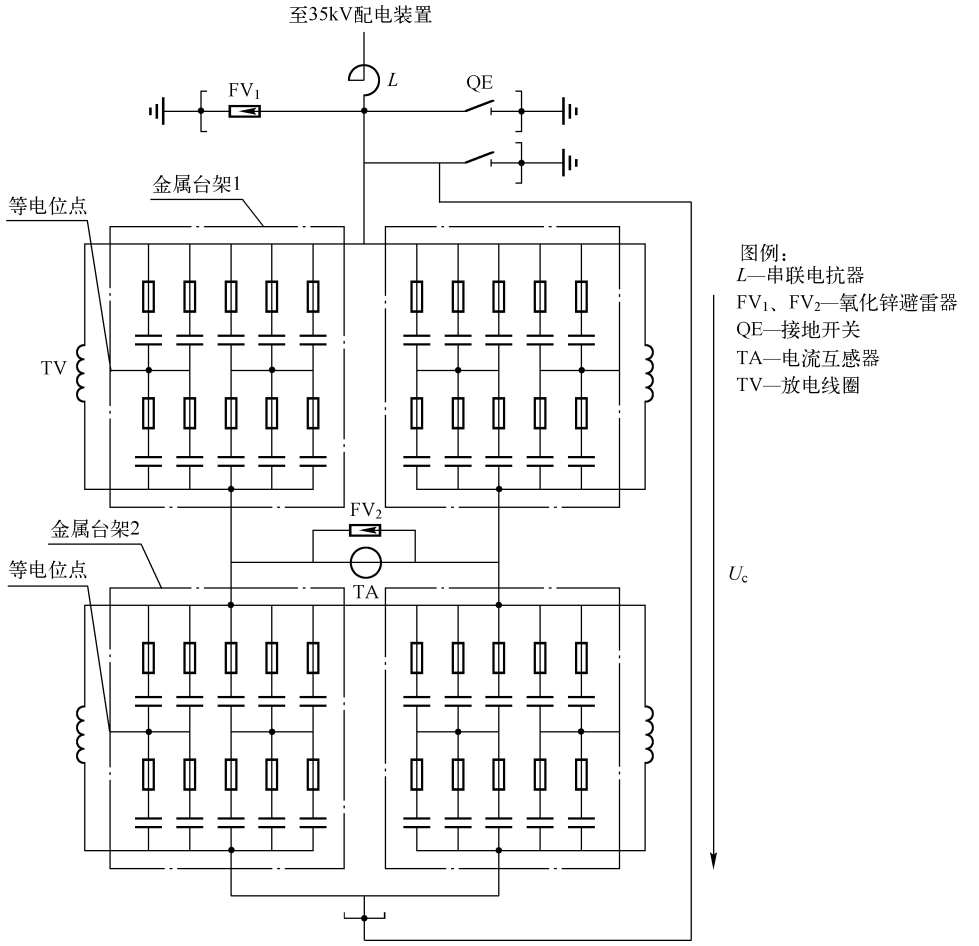


图 4-3　电容器组主接线图

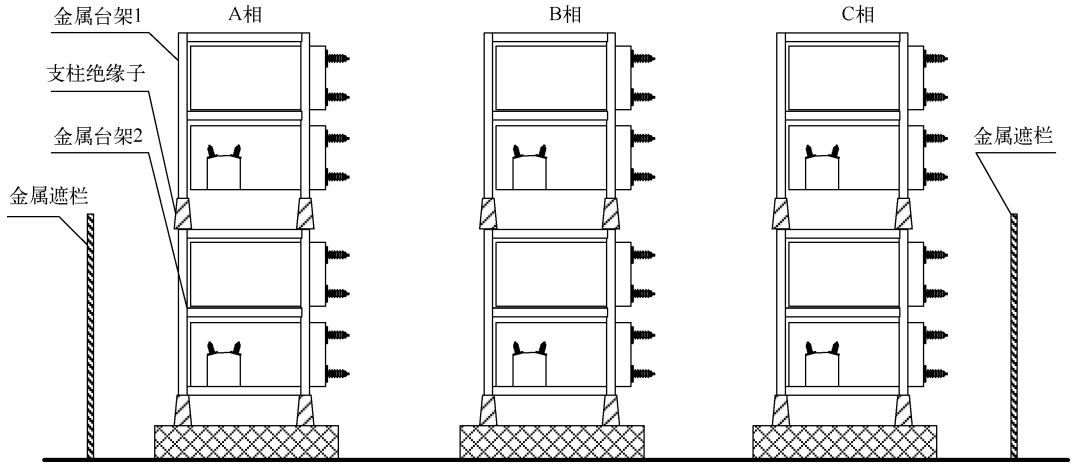


图 4-4　电容器组的绝缘框架安装图

并联时是否会发生 3 次、5 次谐波谐振，并说明理由。（发输电 2013 年考题）

（A）会发生 3 次，5 次谐波谐振

（B）会发生 3 次谐波谐振，不会发生 5 次谐波谐振

（C）会发生 5 次谐波谐振，不会发生 3 次谐波谐振

（D）不会发生 3 次，5 次谐波谐振

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

发生 3 次谐波谐振容量：$Q_{cx3}=S_d\left(\frac{1}{n^2}-K\right)=1672.2\times\left(\frac{1}{3^2}-5\%\right)\text{ Mvar}=102.19\text{ Mvar}$

发生 5 次谐波谐振容量：$Q_{cx5}=S_d\left(\frac{1}{n^2}-K\right)=1672.2\times\left(\frac{1}{5^2}-5\%\right)\text{ Mvar}=-16.72\text{ Mvar}$

与并联电容器组容量 60 Mvar 不同，不会发生 3 次、5 次谐波谐振。

4-26：如本变电所每台主变压器 35 kV 母线上各接有 100 Mvar 电容器组，请计算电容器组投入运行后母线电压升高值。（发输电 2011 年考题）

（A）13.13 kV　　（B）7 kV　　（C）3.5 kV　　（D）1.75 kV

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 5.2.2 条条文说明，并联电容器装置投入电网后引起的电压升高值：$\Delta U=U_{s0}\frac{Q}{S_d}=35\times\frac{100}{2000}\text{ kV}=1.75\text{ kV}$。

例题 4-27～4-31：若某企业内部变电所的 10/0.4 kV 电压等级，设置了并联电容器组，请回答在设计时的一些问题。

4-27：并联电容器装置设计，应根据电网条件、无功补偿要求确定补偿容量。在确定单台电容器额定容量时，下列哪种因素是不需要考虑的？

（A）电容器组设计容量

（B）电容器组每相电容串联、并联的台数

（C）宜在电容器产品额定容量系列的优先值中选取

（D）电容器接线方式（星形、三角形）

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 5.2.4 条　单台电容器额定容量选择，应根据电容器组容量和每相电容器的串联段数和并联台数确定，并宜在电容器产品额定容量系列的优先值中选取。接线方式不是单台电容器额定容量考虑因素。选 D。

4-28：当变电所内的并联电容器组设置不平衡保护时，保护方式可根据电容器组的接线方式选择不同的保护方式，下列不平衡保护方式哪一项是不正确的？

（A）单星形电容器组，可采用开口三角电压保护

（B）单星形电容器组，串联段数两段以上时，可采用相电压保护

（C）单星形电容器组，每相能接成四个桥臂时，可采用桥式差电流保护

（D）双星形电容器组，可采用中性点不平衡电流保护

答案：【B】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 6.1.2 条　单星形电容器组，串联段数两段以上时，可采用相电压差动保护，答案 B 与原条文不符，答案 A、C、D 与原条文相同。选 B。

4-29：若 10 kV 变电所的电容器组装设放电装置，请问使电容器组两端的电压从峰值（2 倍的额定电压）降至 50 V 所需的时间，低压、高压电容器分别不应大于下列哪项数值？

（A）5 min，1 min　　（B）4 min，2 min　　（C）3 min，5 s　　（D）2 min，4 s

答案：【C】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017 或《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

第 5.6.4 条、第 5.6.6 条　放电器件应满足断开电源后电容器组两端的电压从$\sqrt{2}$倍额定电压降至 50 V 所需的时间，高压电容器不应大于 5 s，低压电容器不应大于 3 min。选 C。

4-30：若该变电所中，单台电容器额定电压为 $11/\sqrt{3}$ kV，容量为 200 kvar，则单台电容器保护的外熔断器的熔丝额定电流符合下列哪项数值？

（A）16 A　　（B）32 A　　（C）40 A　　（D）63 A

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 5.4.2 条　用于单台电容器保护的外熔断器的熔丝额定电流，应按电容器额定电流的 1.37～1.50 倍选择。

$$I_N=(1.37\sim1.5)\times\frac{Q_N}{U_N}=(1.37\sim1.5)\times\frac{200}{11\sqrt{3}}\text{ A}=43.15\sim47.23\text{ A}，取\ 63\text{ A}$$

4-31：若该变电所中，单台电容器额定电压为 $11/\sqrt{3}$ kV，容量为 200 kvar，单台电容器保护的外熔断器的连接线采用软导线，则连接线长期允许电流为下列哪项数值？

（A）16 A　　（B）32 A　　（C）40 A　　（D）47.23 A

答案：【D】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017。

第 5.8.1 条　单台电容器至母线或熔断器的连接线应采用软导线，其长期允许电流不宜小于单台电容器额定电流的 1.5 倍。

单台电容器保护的外熔断器的连接线长期允许电流：

$$I_N=1.5\times\frac{Q_N}{U_N}=1.5\times\frac{200}{11\sqrt{3}}\text{ A}=47.23\text{ A}$$

例题 4-32：某企业内部变电所为 10/0.4 kV 电压等级，在 0.4 kV 侧装设有低压无功功率自动补偿控制器。该低压无功功率自动补偿控制器配有 1 组 3 台 3 相并联电容器，额定电压为 0.4 kV，每台容量为 20 kvar，电流互感器变比为 100/1。请计算自动补偿控制器动作阈值。

（A）2.6 A　　（B）3.2 A　　（C）4.1 A　　（D）5.4 A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 1039 页。

自动补偿控制器动作阈值：$I_{op}=\dfrac{0.62Q\times1000}{\sqrt{3}U_N n_{TA}}=\dfrac{0.62\times3\times20\times1000}{\sqrt{3}\times400\times100/1}\text{A}=5.37\text{A}$

例题 4-33~4-34：某 500 kV 变电站#2 主变压器及其 35 kV 侧电气主接线如图 4-5 所示，其中的虚线部分表示远期工程，请回答下列问题。

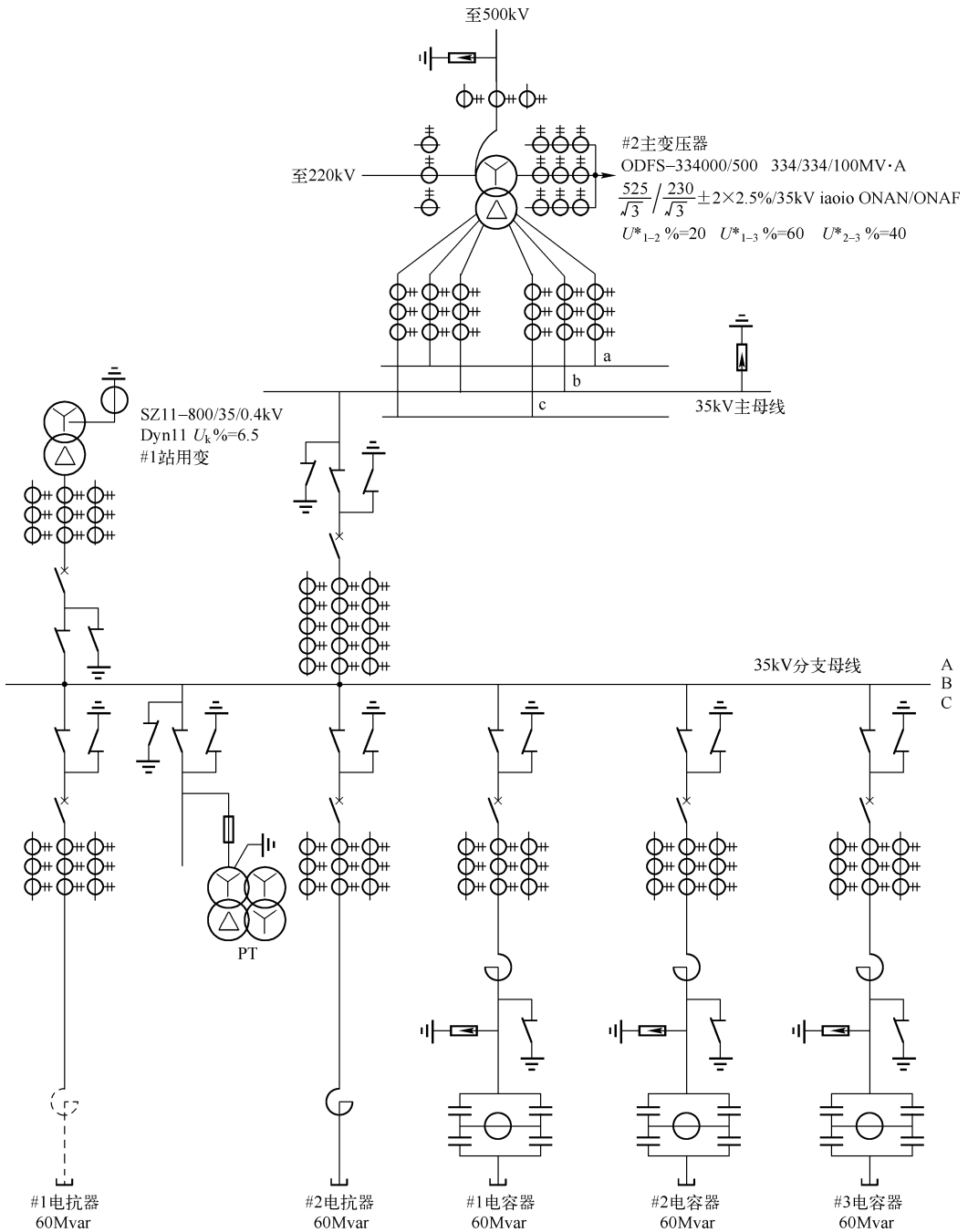


图 4-5　变电站#2 主变 35 kV 侧电气主接线图

4-33：计算气主接线图中 35 kV 分支母线总断路器回路持续工作电流应为下列哪项数值。(发输电 2017 年考题)

(A) 2191.3 A　　(B) 3860 A　　(C) 3873.9 A　　(D) 6051.3 A

答案：【C】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2017 和《电力工程电气设计手册》(电气一次部分) 第 232 页表 6-3。

第 5.8.2 条条文说明，当 3 组电容器同时投入时稳态过电流最大，同时考虑一直运行的站用变压器：

$$I_C = 1.3 \times \frac{3Q_N}{U_N} = 1.3 \times \frac{3 \times 60000}{\sqrt{3} \times 35}\,A = 3860\,A \qquad I_g = 1.05 \times \frac{S_N}{U_N} = 1.05 \times \frac{800}{\sqrt{3} \times 35}\,A = 13.9\,A$$

$$I_C + I_g = 3860 + 13.9\,A = 3873.9\,A$$

4-34：若该变电站 35 kV 电容器组采用单星形桥差接线，每桥臂 7 并 4 串。单台电容器容量为 334 kvar，电容器组额定电压为 24 kV，电容器装置电抗率为 12%，求串联电抗器的每相额定感抗和串联电抗器的三相额定容量应为下列哪组数值。(发输电 2017 年考题)

(A) 7.4 Ω，4491.1 kvar　　(B) 7.4 Ω，13482.2 kvar

(C) 3.7 Ω，2247.0 kvar　　(D) 3.7 Ω，6741.1 kvar

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》(电气一次部分) 第 510 页。

题目中单星形桥差接线，每相两个桥臂，每桥臂 7 并 4 串，星形接线时容抗值、额定电流分别为

$$X_{Ce} = \frac{U_{ce}^2}{Q_{ce}} = \frac{(24/4 \times 10^3)^2}{334 \times 10^3}\,\Omega = 107.78\,\Omega;\ X_{\Sigma Ce} = \frac{N}{M}X_{Ce} = \frac{4}{7 \times 2} \times 107.78\,\Omega = 30.8\,\Omega$$

感抗值为 $X_{Le} = AX_{\Sigma Ce} = 12\% \times 30.8\,\Omega = 3.7\,\Omega$

$$I_{\Sigma ce} = \frac{Q_{ce}}{U_{ce}^2} = \frac{334 \times 7 \times 4 \times 2}{24}\,A = 779.33\,A$$

串联电抗器组的容量：$Q_L = I_{\Sigma Le}^2 X_{\Sigma Le} \times 10^{-3} = 3 \times 779.33^2 \times 3.7 \times 10^{-3}$ kvar $= 6741.6$ kvar。

4.3　应急电源

【知识点说明】

1) 应急电源分类及基本要求属于普通考点，依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版 (上册) 2.6 节等，多以专业考试的考题出现，也可能结合负荷计算、供配电系统案例综合考题出现。

2) 柴油发电机组的选择属于重要考点，民用柴油发电机组依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008；工矿企业用柴油发电机组依据《工业与民用供配电设计手册》第四版 (上册) 2.6 节。要求熟练掌握工业与民用柴油发电机组的负荷统计、容量选择、海拔修正等；了解柴油发电机组的机房布置。

发电厂和变电站柴油发电机组属于发输变电专业考点，依据《电力工程电气设计手册》

（电气一次部分）14.2 节、《水力发电厂厂用电设计规范》NB/T 35044—2014、《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014 等，其与工矿企业用、民用（所属变电所）柴油发电机组设计与选择不同，请注意。

3）UPS 装置的选择属于重要考点，工业与民用 UPS 依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）、《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008 的 2.6 节等。要求熟练掌握工业与民用 UPS 装置的基础知识、容量选择、海拔修正等。各专业 UPS 装置的选择按照专业规范选择。

4）EPS 装置的选择属于重要考点，工业与民用 EPS 依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）、《照明设计手册》第二版 20.3 节等。要求熟练掌握工业与民用 EPS 装置的基础知识、容量选择、海拔修正等。

依据书目：

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《照明设计手册》第二版

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《重要电力用户供电电源及自备应急电源配置技术规范》GB Z 29328—2012

《柴油发电机组设计与安装》15D202-2

《UPS 与 EPS 电源装置的设计与安装》15D202-3

《电力用直流和交流一体化不间断电源设备》DL/T 1074—2007

例题 4-35~4-39：某企业工程设计中，一级负荷中的特别重要负荷统计如下：

给水泵电动机：3 台（两用一备）每台额定功率为 45 kW，允许断电时间为 5 min；

风机用润滑油泵电动机：共 4 台（三用一备）额定功率为 10 kW，允许断电时间为 5 min；

应急照明：安装容量为 50 kW，允许断电时间为 5 s；

计算机控制与监视系统：安装容量为 30 kW，允许断电时间为 5 ms；

上述负荷中电动机的起动电流倍数为 7，电动机的功率因数为 0.85，电动机的效率为 0.92，起动时的功率因数为 0.5，直接但不同时起动。请回答以下问题。

4-35：下列哪一项不能采用快速自起动柴油发电机作为应急电源？（供配电 2012 年考题）

（A）变电所直流电源充电装置

（B）应急照明和计算机控制与监视系统

（C）给水泵电动机

（D）风机用润滑油泵电动机

答案：【B】

解答过程：根据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 91 页 2.6.1 节（第三版第 63 页）。

第 3.0.5 条　应急电源应根据允许中断供电的时间选择，并应符合下列规定：

1）快速自起动的发电机组适用于允许中断供电时间为 15 s 以上的供电。A、C、D 适合。

2）计算机控制与监视系统应使用 UPS 不间断电源，允许中断供电时间为毫秒级的负荷。应急照明宜用 EPS 应急电源，允许中断供电时间为 0.25 s 以上的负荷。B 不适合。

4-36：若用 EPS 作为电动机和应急照明备用的应急电源，其容量最小为下列哪项数值？（企业的工作场所海拔为 1500 m）（供配电 2012 年考题改编）

（A）178.9 kW　　（B）196.8 kW　　（C）521.1 kW　　（D）631.6 kW

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 103～105 页（第三版第 69 页）。

2.6.5.4 节中，EPS 的容量按以下条件最大值选取：

1）负载中最大的单台直接起动电动机容量的 7 倍，即 45×7 kW = 315 kW。

2）EPS 所供负载中同时工作负荷容量的 1.1 倍，即（45×2+10×3+50+30）×1.1 kW = 220 kW。

3）同时工作的风机、水泵容量的 5 倍，即（45×2+10×3）×5 kW = 600 kW。

EPS 的容量取上述条件的最大值，即 600 kW。

企业的工作场所海拔为 1500 m，查《配四》第 103 页表 2.6-4 中降额系数为 0.95，海拔修正后的 EPS 的容量为 600/0.95 kW = 631.6 kW。

【知识点解析】

选用 EPS 的容量必须同时满足以下条件：

1）负载中最大的单台直接起动的电动机容量，只占 EPS 容量的 1/7 以下。

2）EPS 容量应是所供负载中同时工作容量总和的 1.1 倍以上。

3）直接起动风机、水泵时，EPS 的容量应为同时工作的风机、水泵容量的 5 倍以上。

4）若风机、水泵为变频起动时，则 EPS 的容量为同时工作的电动机总容量的 1.1 倍。

5）若风机、水泵采用星-三角减压起动，则 EPS 的容量应为同时工作的电动机总容量的 3 倍以上。

6）安装场地的海拔超过 1000 m 时，应急电源设备应降额使用，降额系数见表 4-2。

表 4-2　在海拔 1000 m 以上使用的降额系数

海拔/m	降额系数	海拔/m	降额系数
1000	1.0	3500	0.78
1500	0.95	4000	0.74
2000	0.91	4500	0.7
2500	0.86	5000	0.67
3000	0.82		

注：基于干燥空气密度（于海平面+15℃）= 1.225 kg/m^3。

4-37：当采用柴油发电机为所有负荷供电时，发电机的功率因数为 0.8，用电设备的运算系数 K_1 = 0.9、K_2 = 0.5，按长期连续运行计算柴油发电机容量，其最小值为下列哪项？（供配电 2012 年考题改编）

（A）194 kV·A　　（B）243.2 kV·A　　（C）286.1 kV·A　　（D）308.1 kV·A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第94页。

连续运行的电动机额定功率之和：$\Sigma P_M=(45\times2+10\times3)\,kW=120\,kW$

连续运行的电动机额定功率之和：$\Sigma P_m=(50+30)\,kW=80\,kW$

计算有功功率：

$$P_c=\Sigma P_M K_1+\Sigma P_m K_2=(120\times0.9+80\times0.5)\,kW=148\,kW$$

计算无功功率：

$$Q_c=\Sigma P_M K_1\tan\varphi_M+\Sigma P_m K_2\tan\varphi_m=(120\times0.9\times0.86+80\times0.5\times0.8)\,kvar=124.88\,kvar$$

柴油发电机容量：

$$S_{fe}\geqslant S_c=\sqrt{P_c^2+Q_c^2}=\sqrt{148^2+124.88^2}\ kV\cdot A=193.64\,kV\cdot A$$

【知识点解析】

工业建筑柴油发电机容量可分别按下列公式计算：

1）计算长期连续运行所需要的容量，即

$$P_c=\Sigma P_M K_1+\Sigma P_m K_2$$

$$Q_c=\Sigma P_M K_1\tan\varphi_M+\Sigma P_m K_2\tan\varphi_m$$

式中，P_c为计算有功功率（kW）；Q_c为计算无功功率（kvar）；ΣP_M为连续运行的电动机额定功率之和（kW）；ΣP_m为连续运行的静止负荷之和（kW）；K_1为运算系数，取0.9；K_2为运算系数，取0.32~0.52；$\tan\varphi_M$为电动机正常运行时的功率因数，取0.86；$\tan\varphi_m$为静止负荷的功率因素，取0.8。

2）确定柴油发电机组额定容量，即

$$S_{fe}\geqslant S_c,\quad P_{fe}\geqslant P_c,\quad Q_{fe}\geqslant Q_c$$

式中，S_{fe}、P_{fe}、Q_{fe}分别为柴油发电机组额定视在功率、有功功率、无功功率（kV·A、kW、kvar）；S_c、P_c、Q_c分别为计算视在功率、有功功率、无功功率（kV·A、kW、kvar）。

注：施工图阶段柴油发电机容量计算，《工业与民用配电设计手册》第三版第66页与12SDX101-2《民用建筑电气设计计算及示例》和图集15D202-2《柴油发电机组设计与安装》内容基本相同。《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第94~95页已经全面更改，工业建筑柴油发电机容量计算摘录自《电力工程电气设计手册》电气一次部分，第935页；民用建筑柴油发电机容量计算摘录自《民用建筑电气设计规范》JGJ 16-2008中6.1.2条文说明。

4-38：当采用柴油发电机作为应急电源，若最大一台电动机自起动时，发电机已经带有负载200 kV·A（功率因数为0.9），发电机短时过负载系数为1.5，那么按短时过载能力校验，发电机的容量约为多少？（供配电2012年考题改编）

（A）329 kV·A　　（B）343.3 kV·A　　（C）386.18 kV·A　　（D）553.3 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第94页。

最大一台电动机起动容量：$S_{st}=\dfrac{45\times7}{0.85\times0.92}\,kV\cdot A=402.8\,kV\cdot A$

最大一台电动机起动容量与已经带有负载合计：

$$P_{Qm}=(200\times0.9+402.8\times0.5)\,kW=381.4\,kW$$

$$Q_{Qm}=(200\times0.436+402.8\times0.866)\,kvar=436\,kvar$$

$$S_{Qm}=\sqrt{P_{Qm}^2+Q_{Qm}^2}=\sqrt{381.4^2+436^2}\ kV\cdot A=579.3\,kV\cdot A$$

已知短时过负载系数为 1.5，按短时过负荷能力校验柴油发电机的容量：

$$S_{fe}\geqslant\frac{S_{Qm}}{K_{GF}}=\frac{579.3}{1.5}kV\cdot A=386.18\,kV\cdot A$$

【知识点解析】

校验柴油发电机短时过载能力：

$$S_{fe}\geqslant\frac{S_{Qm}}{K_{GF}}$$

式中，S_{Qm}为成组起动或自起动时负荷的最大值（kV·A）；K_{GF}为发电机短时过负荷系数，取 1.5。

4-39：当采用柴油发电机作为应急电源，已知发电机容量为 400 kV·A，无刷励磁，次暂态电抗为 0.18，暂态电抗为 0.2，若最大一台电动机自起动时，发电机已经带有负载 200 kV·A（功率因数为 0.9，含有电梯容量），那么按母线电压降校验时，最大一台电动机自起动时电压降近似值为下列哪一项？是否符合电压降校检要求？（供配电 2012 年考题改编）

（A）25.3%，不满足　　（B）21.1%，不满足

（C）15.3%，满足　　（D）19.1%，满足

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 94 页。

最大一台电动机起动容量：$S_{st}=\dfrac{45\times7}{0.85\times0.92}kV\cdot A=402.8\,kV\cdot A$

最大一台电动机起动容量与已经带有负载合计：

$$P_{Qm}=(200\times0.9+402.8\times0.5)\,kW=381.4\,kW$$

等效起动电抗：$X_e=P_{fe}/P_{Qm}=400/381.4=1.05$

等效发电机电抗：$X_{dm}=\dfrac{1}{2}(X''_d+X'_d)=\dfrac{1}{2}(0.2+0.18)=0.19$

最大一台电动机自起动时电压降近似值为

$$\Delta U\%=\frac{X_{dm}}{X_{dm}+X_e}\times100\%=\frac{0.19}{0.19+1.05}\times100\%=15.3\%<20\%$$

满足有电梯负荷时电动机自起动母线最低电压不得低于额定电压的 80%的要求。

例题 4-40~4-47：某省会酒店自备消防用柴油发电机组带载负荷统计见表 4-3，请回答关于柴油发电机组选择和应急电源选择方面的问题。

表 4-3　发电机组带载负荷

用电设备组名称	功率/kW	负荷效率	cosφ	备　注
照明负荷	56	0.8	0.9	火灾时可切除
动力负荷	167	0.8	0.8	火灾时可切除

（续）

用电设备组名称	功率/kW	负 荷 效 率	cosφ	备　　注
UPS	120	0.82	0.9	功率单位为 kV·A
24h 空调负荷	125	0.78	0.8	火灾时可切除
消防应急照明	100	0.88	0.9	
消防水泵	130	0.88	0.8	电动机组容量
消防风机	348	0.88	0.8	电动机组容量
消防电梯	40	0.88	0.5	

4-40：该酒店自备消防用柴油发电机工作时负荷率为 0.8，按稳定负荷计算该柴油发电机容量，其最小值为下列哪一项？

（A）705 kV·A　　（B）834 kV·A　　（C）915 kV·A　　（D）1137 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 条文说明第 6.1.2 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 95 页。

自备消防用柴油发电机组负荷统计见表 4-4。

表 4-4　自备消防用柴油发电机组负荷统计表

设 备 名 称	容量 P/kW	负荷效率 η	cosφ	P/η/kW
UPS	120	0.82	0.9	131.7
应急照明	100	0.88	0.9	113.64
消防水泵	130	0.88	0.8	147.73
消防风机	348	0.88	0.8	395.45
消防电梯	40	0.88	0.5	45.45
合计				833.97

已知柴油发电机负荷率为 0.8，功率因数为 0.8。按稳定负荷计算计算柴油发电机容量：

$$S_{C1}=\alpha\frac{P_{\Sigma}}{\eta_{\Sigma}\cos\varphi}=0.8\times\frac{833.97}{0.8}\text{kV}\cdot\text{A}=833.97\text{kV}\cdot\text{A}$$

4-41：该酒店自备消防用柴油发电机工作时消防水泵、消防风机、消防电梯电动机组均为星-三角起动，起动倍数为 5 倍，按最大的成组电动机起动的需要计算柴油发电机容量，其最小值为下列哪一项？

（A）705 kV·A　　（B）834 kV·A　　（C）915 kV·A　　（D）1132 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 条文说明第 6.1.2 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 95 页。

起动容量最大的电动机组为消防风机，其电动机的容量 $P_m=348\text{kW}$。

自备消防用柴油发电机组负荷统计表内不统计消防风机的其他负荷容量，$\frac{P_{\Sigma}-P_m}{\eta_{\Sigma}}=$ 438.52 kW。

已知星-三角起动时 $C=0.67$，起动倍数 $K=5$，起动功率因数 $\cos\varphi_m=0.4$，柴油发电机功率因数为 0.8。按最大的成组电动机起动的需要计算柴油发电机容量：

$$S_{C2}=\left(\frac{P_\Sigma-P_m}{\eta_\Sigma}+P_mKC\cos\varphi_m\right)\frac{1}{\cos\varphi}$$

$$=(438.52+348\times5\times0.67\times0.4)\times\frac{1}{0.8}\text{kV}\cdot\text{A}=1131.05\text{kV}\cdot\text{A}$$

4-42：该酒店自备消防用柴油发电机工作时消防水泵、消防风机、消防电梯电动机组均为星-三角起动，起动倍数为 5 倍。柴油发电机的暂态电抗为 0.25，应急负荷中心母线允许的瞬时电压降为 0.25。按起动电动机时母线容许电压降计算柴油发电机容量，其最小值为下列哪一项？

（A）705 kV·A　　（B）834 kV·A　　（C）915 kV·A　　（D）1302 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 条文说明第 6.1.2 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 95 页。

电动机组的总容量 $P_n=(130+348+40)\text{kW}=518\text{kW}$。

已知星-三角起动时 $C=0.67$，起动倍数 $K=5$，起动功率因数 $\cos\varphi_m=0.4$，柴油发电机暂态电抗 $X''=0.25$，允许的瞬时电压降 $\Delta E=0.25$。按起动电动机时母线容许电压降计算柴油发电机容量：

$$S_{C3}=P_nKCX''_d\left(\frac{1}{\Delta E}-1\right)$$

$$=518\times5\times0.67\times0.25\times\left(\frac{1}{0.25}-1\right)\text{kV}\cdot\text{A}=1301.48\text{kV}\cdot\text{A}$$

【知识点解析】

民用建筑柴油发电机容量可分别按下列公式计算：

1）按稳定负荷计算发电机容量，即

$$S_{C1}=\alpha\frac{P_\Sigma}{\eta_\Sigma\cos\varphi}\tag{4-3}$$

或

$$S_{C1}=\alpha\left(\frac{P_1}{\eta_1}+\frac{P_2}{\eta_2}+\cdots+\frac{P_n}{\eta_n}\right)\frac{1}{\cos\varphi}=\frac{\alpha}{\cos\varphi}\sum_{k=1}^{n}\frac{P_k}{\eta_k}\tag{4-4}$$

式中，P_Σ为总负荷（kW）；P_k为每个或每组负荷容量（kW）；η_k为每个或每组负荷的效率；η_Σ为总负荷的计算效率，一般取 0.82~0.88；α 为负荷率；$\cos\varphi$ 为发电机额定功率因数，可取 0.8。

2）按最大的单台电动机或成组电动机起动的需要，计算发电机容量，即

$$S_{C2}=\left(\frac{P_\Sigma-P_m}{\eta_\Sigma}+P_mKC\cos\varphi_m\right)\frac{1}{\cos\varphi}\tag{4-5}$$

式中，P_m为起动容量最大的电动机或成组电动机的容量（kW）；$\cos\varphi_m$电动机的起动功率因数，一般取 0.4；K 为电动机的起动倍数；C 为按电动机起动方式确定的系数，全压起动 $C=1.0$，Y-△起动 $C=0.67$，自耦变压器起动：50%抽头 $C=0.25$，65%抽头 $C=0.42$，80%抽头 $C=0.64$；

P_Σ、η_Σ、$\cos\varphi$ 意义同式（4-4）。

3）按起动电动机时母线容许电压降计算发电机容量，即

$$S_{C3}=P_n KCX''_d\left(\frac{1}{\Delta E}-1\right) \tag{4-6}$$

式中，P_n为电动机总容量（kW）；X''_d为发电机的暂态电抗，一般取0.25；ΔE为应急负荷中心母线允许的瞬时电压降。一般ΔE取0.25~0.3（有电梯时取$0.2U_H$）；K、C意义同式（4-5）。

式（4-6）适用于柴油发电机与应急负荷中心距离很近的情况。

4-43：若该酒店位于海拔高度1500 m地区，平时大气温度为15℃，相对湿度为60%。该酒店自备消防用柴油发电机（非增压型）额定容量为1200 kV·A，该柴油发电机容量在该地区运行时容量为下列哪一项？

（A）705 kV·A　（B）834 kV·A　（C）1008 kV·A　（D）1200 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008条文说明第6.1.2条。

查表6-2中海拔高度1500 m，大气温度为15℃，相对湿度为60%，非增压型柴油发电机修正系数为0.84，该柴油发电机容量：$S'_C=S_C\cdot C=1200\times0.84\ \text{kV}\cdot\text{A}=1008\ \text{kV}\cdot\text{A}$。

4-44：若该酒店附近海拔2000 m处有一个办公楼，二层数据机房设置了10台机柜，每台机柜设备的计算负荷为8 kW（功率因数为0.8），需要配置不间断电源（UPS），则UPS基本容量应为下列哪项数值？（供配电2013年考题改编）

（A）150 kV·A　（B）120 kV·A　（C）100 kV·A　（D）80 kV·A

答案：【A】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第103页2.6.4.5节。

第8.1.7条　UPS基本容量为

$$S=1.2S_n=1.2N\frac{P}{\cos\varphi}=1.2\times10\times\frac{8}{0.8}\ \text{kV}\cdot\text{A}=120\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

企业的工作场所海拔为2000 m，查《配四》第103页表2.6-4降额系数为0.91，海拔修正后的UPS的容量120/0.91 kV·A=132 kV·A，可选择150 kV·A。

【知识点解析】

UPS的选择：

不间断电源设备的选择，应按负荷性质、负荷容量、允许中断供电时间等要求确定，并应符合如下规定。

1）不间断电源设备适用于电容性和电阻性负荷；当为电感性负荷时，则应选择负载功率因数自动适应不降容的不间断电流装置。

2）不间断电源设备输出功率，应接下列条件选择。

① 不间断电源设备给电子计算机供电时，单台UPS额定输出功率应大于电子计算机各设备额定功率总和的1.2倍。对其他用电设备供电时，其额定输出功率为最大计算负荷的1.3倍。

② 负荷的最大冲击电流不应大于不间断电源设备的额定电流的150%。

③ UPS 应能在额定条件下，在海拔 1000 m 及以下的高度正常运行。当海拔超过1000 m 时，应降额使用，降额系数见《配四》第 103 页表 2.6-4。

4-45：若该酒店位于海拔高度 1000 m 以下地区。该酒店为消防应急照明专设集中型应急电源 EPS-AC，该应急电源 EPS 的容量最大值为下列哪一项？

（A）200 kV·A　　（B）150 kV·A　　（C）120 kV·A　　（D）100 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第二版第 488 页。

集中型应急电源 EPS-AC 可靠系数 K 最大为 1.3，EPS 的容量为

$$S_N > K\frac{\Sigma P}{\cos\varphi} = 1.3\times\frac{100}{0.9}\text{kV}\cdot\text{A} = 144.4\text{ kV}\cdot\text{A}，\text{可取 }150\text{ kV}\cdot\text{A}$$

例题 4-46：某电力公司的电力调度大楼内装设程控用户交换机系统，需要采用 UPS 不间断电源供电，设一组阀控式蓄电池，需在 8 h 内以 10 A 的负荷电流持续供电，放电终止电压为 1.8 V，该大楼内装有采暖设备，电池温度系数取 0.008（1/℃）。则该交换机设备的蓄电池总容量应不低于下列哪项数值？

（A）200 A·h　　（B）150 A·h　　（C）120 A·h　　（D）80 A·h

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

已知放电终止电压为 1.8 V，电池放电时间为 8 h，阀控式蓄电池查表 20.2.9-2 中放电容量系数为 0.94。有采暖设备最低环境温度数值为 15℃。该交换机设备的蓄电池总容量为

$$Q \geqslant \frac{KIT}{\eta[1+\alpha(t-25)]} = \frac{1.25\times10\times8}{0.94[1+0.008(15-25)]}\text{A}\cdot\text{h} = 115.63\text{ A}\cdot\text{h}$$

可取 120 A·h。

例题 4-47：若该企业 UPS 电源，所带计算机网络设备额定容量共计 50 kW（$\cos\varphi$ = 0.95），计算机网络设备电源效率为 0.92，当 UPS 设备效率为 0.93 时，该 UPS 电源的容量最小为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）61.5 kV·A　　（B）73.8 kV·A　　（C）80.0 kV·A　　（D）92.3 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

基本容量选择（负荷率 60%~80%，有一定余量）：

$$E > 1.2P = 1.2\times\frac{50}{0.95\times0.92}\text{kV}\cdot\text{A} = 68.64\text{ kV}\cdot\text{A}$$

最小容量选择（负荷率 100%，无余量）：

$$E \geqslant S = \frac{50}{0.95\times0.92\times0.93}\text{kV}\cdot\text{A} = 61.5\text{ kV}\cdot\text{A}$$

取最大值，选 B。

第 5 章　供配电系统与变(配)电站

【知识点导图】

图 5-1 所示的供配电系统与变（配）电站知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。其中必考考点有供配电配置原则、电气主接线选择、高压电气设备配置、配电装置安全净距、配电装置布置以及防火等。本章中高压电气设备设置要求和布置设计知识点，还需要配合学习理解《民用建筑电气设计与施工》、《国家电网公司配电、输变电工程典型设计图册》等书籍中的经典设计示例作为补充。

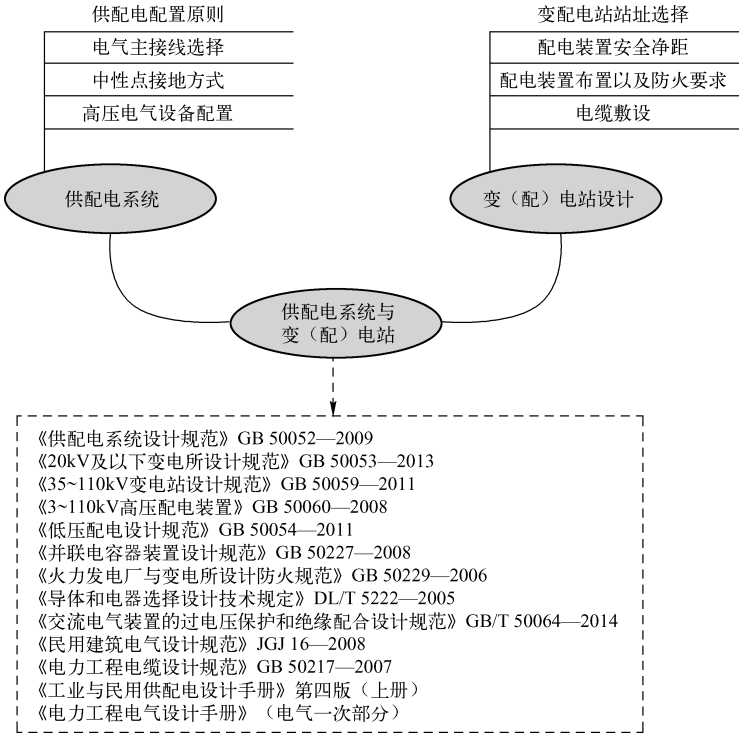


图 5-1　供配电系统与变（配）电站知识点导图

5.1　供配电系统

【知识点说明】

1）供配电配置原则属于重要考点，依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 2 章等。要求熟练掌握结合供电负荷分级对应的高低压供配电要求。

2）电气主接线选择属于重要考点，依据《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。要求熟练掌握单母线和桥式主接线方式，掌握双母线等其他接线方式。

3）中性点的接地方式属于普通考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。该考点必须结合其他考点出题，如中性点的接地方式选择、单相接地电容电流计算、中性点设备选择、相关接地保护的计算等，需要完全理解中性点接地的相关知识。

4）高压电气设备配置属于重要考点，依据《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）等熟练掌握断路器配置和带熔断器负荷开关配置、隔离开关和接地开关配置、电压互感器和电流互感器配置、避雷器配置（相关知识点例题详见本书第 11 章）。本章中高压电气设备配置要求知识点，还需要配合学习理解《民用建筑电气设计与施工》、《国家电网公司配电、输变电工程典型设计图册》等书籍中的经典设计示例作为补充。

依据书目：

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013

《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011

《3～110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2006

《35～220 kV 无人值班变电站设计规范》DL/T 5103—2012

《国家电网公司配电工程典型设计》（10 kV 配电分册）

《国家电网公司输变电工程典型设计》（35 kV 变电站分册）

《国家电网公司输变电工程典型设计》（110 kV 变电站分册）

《民用建筑电气设计与施工供电电源》（08D800-2）

《民用建筑电气设计与施工变配电所》（08D800-3）

例题 5-1～5-3：某 110 kV 户外变电所，设有两台主变压器，2 回电源进线（电源来自某 220 kV 枢纽变电站的 110 kV 出线），6 回负荷出线。请回答下列问题。

5-1：本变电站主接线宜采用下列哪一种主接线方式？（供配电 2006 年考题）

（A）双母线　　（B）双母线分段　　（C）单母线分段　　（D）单母线

答案：【A】

解答过程：依据《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011。

第 3.2.4 条　35～110 kV 线路为两回及以下时，宜采用桥形、线路变压器组或线路分支

接线。超过两回时，宜采用扩大桥形、单母线或分段单母线的接线。35～63 kV 线路为 8 回及以上时，亦可采用双母线接线。110 kV 线路为 6 回及以上时，宜采用双母线接线。

【知识点解析】

电气主接线的选择：

单母线和单母线分段接线的选择要求如下。

1）35～110 kV 变电所线路为超过两回时或采用室内配电装置时，宜采用桥形、扩大桥形、线路变压器组或线路分支接线、单母线或单母线分段的接线。

2）20 kV 及以下配电所、变电所的高压及低压母线宜采用单母线或分段单母线接线。当对供电连续性要求很高时，高压母线可采用分段单母线带旁路母线或双母线的接线。

3）当变电所装有两台主变压器时，6～10 kV 侧宜采用分段单母线。

4）配变电所电压为 10（6）kV 及 0.4 kV 的母线，宜采用单母线或单母线分段接线形式。

双母线接线的选择要求如下：

1）35～110 kV 变电站 35～63 kV 线路为 8 回及以上时，亦可采用双母线接线。110 kV 线路为 6 回及以上时，宜采用双母线接线。

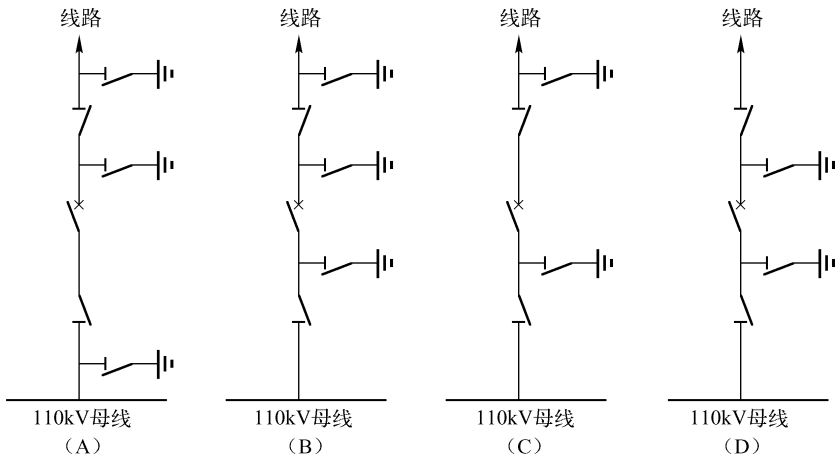
2）10（6）kV 配电所主接线当供电连续性要求较高，不允许停电检修断路器或母线时，可采用双母线接线。

内桥和外桥等接线的选择要求如下。

1）35～110 kV 变电所线路为两回及以下时，宜采用桥形、线路变压器组或线路分支接线。超过两回时，宜采用扩大桥形、单母线或分段单母线的接线。

2）35 kV 采用室外配电装置，并有两回路电源线和两台变压器时，主接线可采用“桥形接线”。当电源线路较长时，应采用内桥接线，为了提高可靠性和灵活性，可增设带隔离开关的跨条。当电源线路较短，需经常切除变压器，或桥上有穿越功率时，应采用外桥接线。

5-2：下列出线间隔接线图中，断路器、隔离开关及接地开关的配置，哪种是正确的？（供配电 2006 年考题）



答案：【B】

解答过程：依据《3～110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 2.0.6 条　电压为 63 kV 及 110 kV 的配电装置，每段母线上宜装设接地开关或接地器，对断路器两侧隔离开关的断路器侧和线路隔离开关的线路侧宜装设接地开关。

5-3：假设 110 kV 主接线形式为双母线接线，则 110 kV 导体和电器的动稳定、热稳定所用的短路电流应按以下哪种运行工况考虑？（供配电 2006 年考题）

（A）110 kV 系统最大运行方式下两台主变并列运行

（B）110 kV 系统最大运行方式下双母线并列运行

（C）110 kV 双母线并列运行

（D）110 kV 母线分列运行

答案：【B】

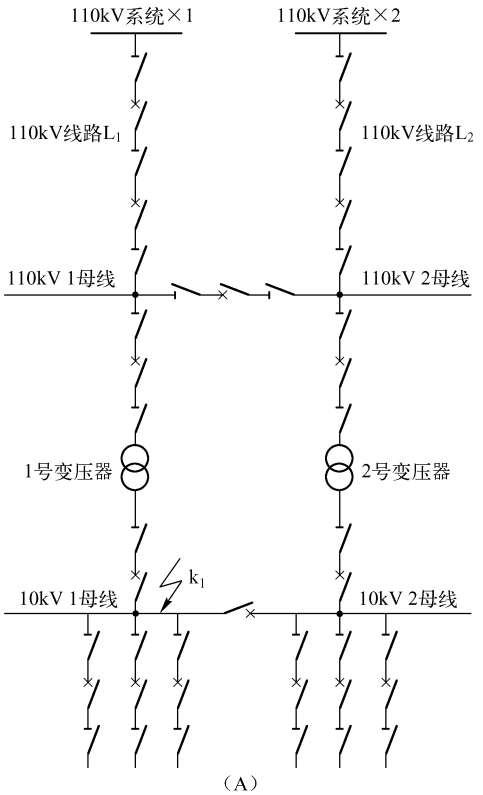
解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 5.0.4 条　确定短路电流时，应按可能发生最大短路电流的正常运行方式，不应按仅在切换过程中可能并列运行的接线方式。

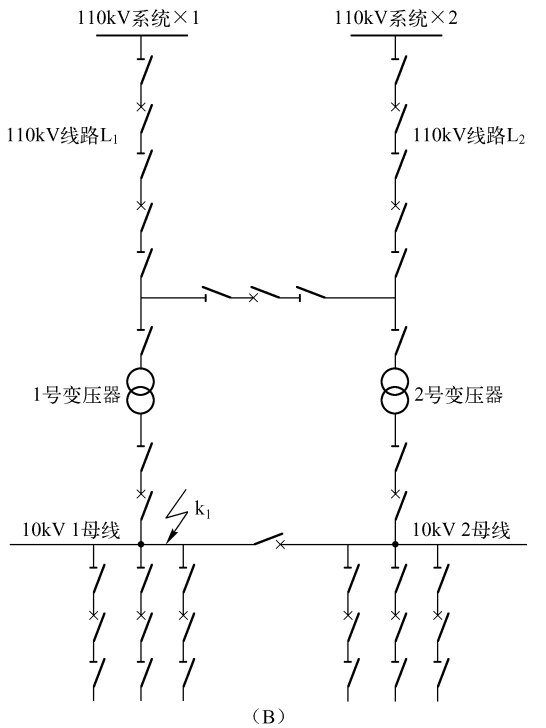
本题中 10 kV 主接线形式为双母线接线，正常运行方式即为并列运行，两台主变并列运行或分列运行不能确定，答案 B 最为准确。

例题 5-4～5-5：某钢铁厂新建一座 110/10 kV 变电所，其两回 110 kV 进线，分别引自不同的系统 X_1 和 X_2，供电距离较长。请回答下列问题。

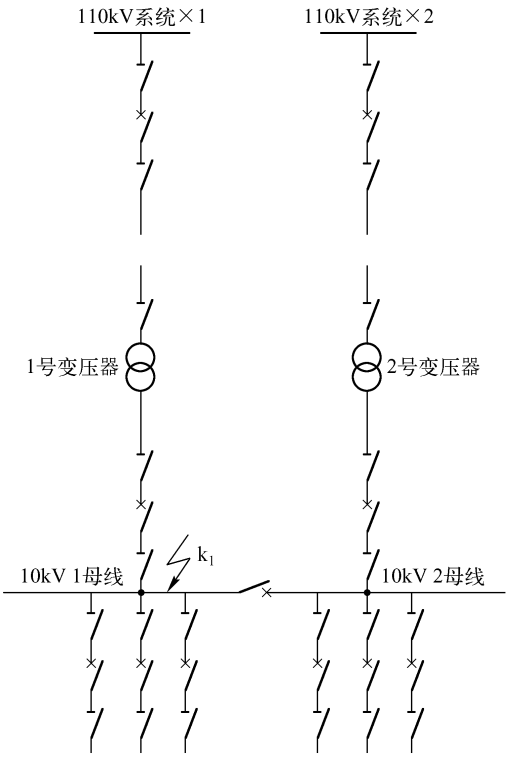
5-4：在满足具有较高的可靠性、安全性和一定的经济性的条件下，本变电所的接线宜采用下图所示的哪种接线？并说明理由。（供配电 2007 年考题改编）



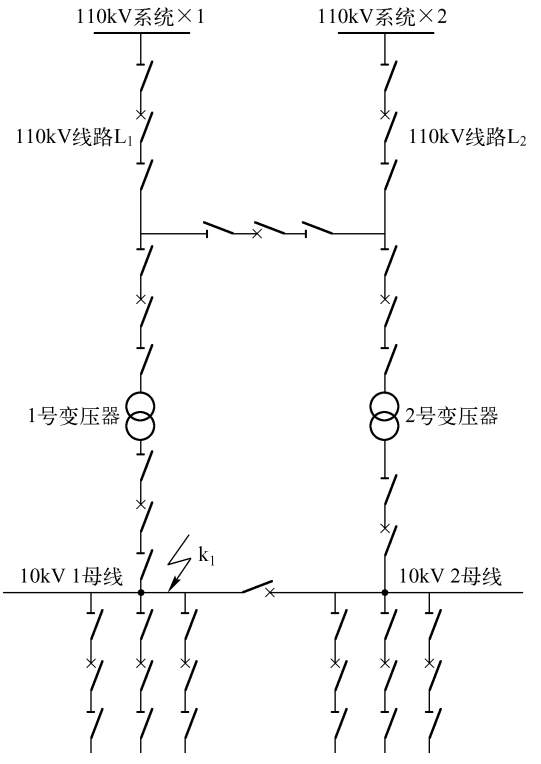
（A）



（B）



（C）



（D）

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 70 页。

表 2.4-6 中对各种接线形式的优缺点进行了对比分析。内桥接线适用于线路较长，不需要经常投切的场所。

A 项为单母线分段接线方式，增加母线投资，不够经济性；

B 项为内桥接线形式，适用于线路较长，符合题意；

C 项为线路变压器组接线方式，可靠性差；

D 项为外桥接线形式，适用于变压器切换频繁或线路较短、故障较少的变电站，不符合题意。

5-5：假设变电所 110 kV 侧接线采用例题 5-4 中所示的单母线分段接线，设备为常规电器（瓷柱式 SF_6断路器、GW5-110D 型隔离开关附带接地开关等），电气布置形式为户外中型配电装置，按规程要求需要为各个电气元件设置接地开关和隔离开关，本题要求主变压器高压侧及 PT 避雷器间隔（未画出）也设置接地开关，则本变电所 110 kV 侧需要配置多少组双接地型隔离开关？多少组单接地型隔离开关？多少组不接地型隔离开关？（供配电 2007 年考题）

（A）双接地型 10 组，单接地型 6 组

（B）双接地型 4 组，单接地型 6 组，不接地型 2 组

（C）双接地型 6 组，单接地型 4 组，不接地型 2 组

（D）双接地型 6 组，单接地型 6 组

答案：【D】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 2.0.6 条中，电压为 63 kV 及 110 kV 的配电装置，每段母线上宜装设接地开关或接地器，对断路器两侧隔离开关的断路器侧和线路隔离开关的线路侧，宜装设接地开关。

依据《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2006（发输电考试规范）第 5.1.7 条，变压器 110 kV 侧接地开关应设置（GB 50060—2008 中无此条文）。

110 kV 系统的Ⅰ母线及 1 号变压器线路需要配置 3 组双接地型隔离开关和 3 组单接地型隔离开关，详见图 5-2。110 kV 系统的Ⅱ母线及 2 号变压器线路也需要同样的配置，因此本变电所 110 kV 侧需要配置 6 组双接地型隔离开关和 6 组单接地型隔离开关。

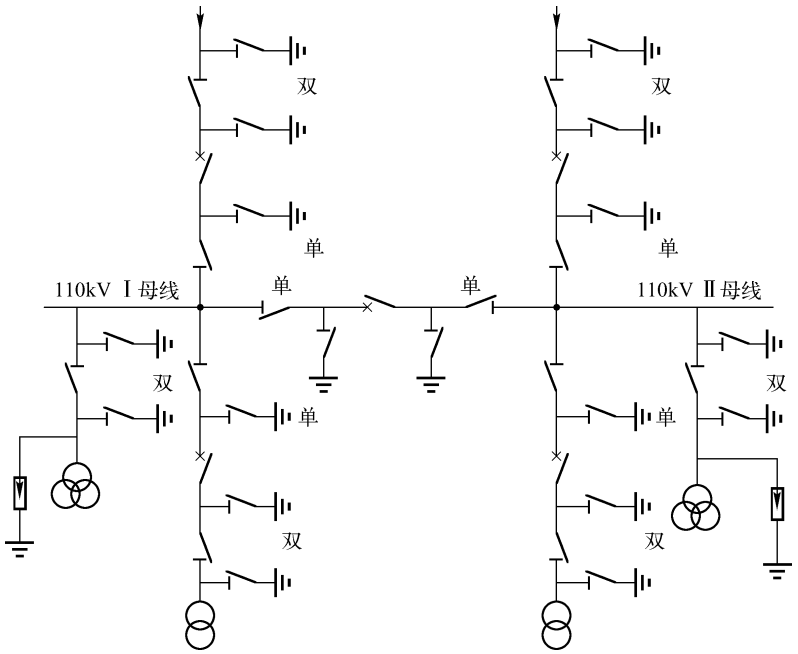


图 5-2　110 kV 系统接线图

例题 5-6~5-7：某企业有 110 kV 主变电站一座，设有两台主变压器，容量均为 50 MV·A，电压等级为 110/35/10 kV。110 kV 设备采用户外敞开式布置，35 kV、10 kV 采用户内开关柜布置，110 kV 为有效接地系统，采用 35 kV、10 kV 向企业各个用电点供电。当地海拔为 800 m。请解答下列问题。

5-6：根据规范需求，本变电站 110 kV 配电装置应采用下列哪种接线形式？（供配电 2011 年考题）

（A）线路-变压器组接线　　（B）单母线接线

（C）单母线分段接线　　（D）扩大桥形接线

答案：【C】

解答过程：依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011 第 3.2.3 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 70 页表 2.4-6。

厂内变电站 2 回 110 kV 架空（专用线路）进线，并向两台变压器供电。本变电站可靠性要求高，单母线是对应只有一台变压器的情况，不适合本变电站；扩大桥形接线是对应两回电源线及三台变压器的情况，不适合本变电站；线路-变压器组接线是对应只有一台变压器及一回线路的情况，不适合本变电站；单母线分段接线对应两个电源回路两台变压器的情况，适合本变电站接线要求。选 C。

5-7：假设该 110 kV 变电站系统主接线如图 5-3 所示，图中有几处隔离开关和接地开关的配置不满足规范要求？并说明依据。（供配电 2016 年考题）

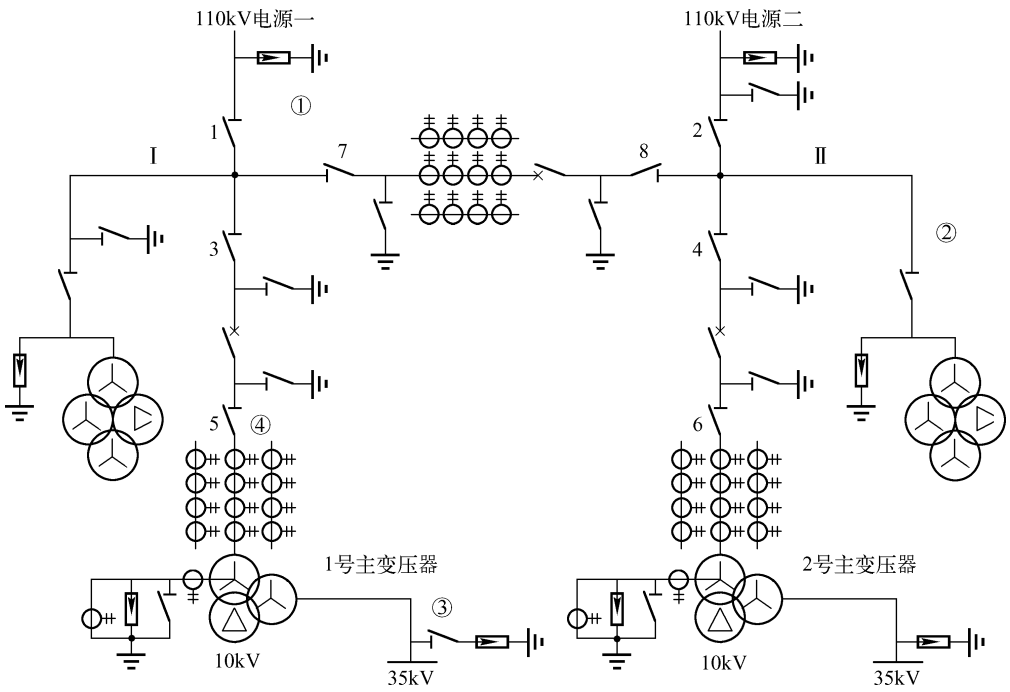


图 5-3　110 kV 变电站系统主接线

（A）3 处　　（B）4 处　　（C）5 处　　（D）6 处

答案：【B】

解答过程：依据《3～110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

1）第 2.0.6 条　66～110 kV 敞开式配电装置，断路器两侧隔离开关的断路器侧、线路隔离开关的线路侧，宜配置接地开关。①处没有设置接地开关，错。

2）第 2.0.7 条　66～110 kV 敞开式配电装置，每段母线上应配置接地开关，②处没有设置接地开关，错。

依据《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011。

3）第 3.2.7 条　接在母线上的避雷器和电压互感器，可合用一组隔离开关。接在变压器引出线上的避雷器，不宜装设隔离开关。③处 1 号主变压器 35 kV 侧避雷器设隔离开关，错。

4）依据《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2006（发输电考试规范）第

5.1.7 条④处变压器 110 kV 侧接地开关应设置（GB 50060—2008 中无此条文）。

共计 4 处，选 B。

【知识点解析】

（1）隔离开关配置

1）配电所专用电源线的进线开关宜采用断路器或负荷开关-熔断器组合电器。当进线无继电保护和自动装置要求且无须带负荷操作时，可采用隔离开关或隔离触头。

2）配电所母线的分段开关，当不需要带负荷操作、无继电保护、无自动装置要求时，可采用隔离开关或隔离触头。

3）两个配电所之间的联络线，当无供电可能性时，宜装设负荷开关、隔离开关或隔离触头。

4）在架空出线或有电源反馈可能的电缆出线的高压固定式配电装置的馈线回路中，应在线路侧装设隔离开关。

5）在高压固定式配电装置中采用负荷开关-熔断器组合电器时，应在电源侧装设隔离开关。

6）接在母线上的避雷器和电压互感器，宜合用一组隔离开关。接在配电所、变电所的架空进、出线上的避雷器，可不装设隔离开关。

7）变压器一次侧高压开关的装设，当电源以放射式供电时，宜装设隔离开关或负荷开关。

8）变压器二次侧电压为 3~10 kV 的总开关可采用负荷开关-熔断器组合电器、隔离开关或隔离触头。

9）在高压断路器的电源侧及可能反馈电能的一侧，必须装设高压隔离开关或隔离触头。当低压母线为双电源时，在总开关的出线侧及母线分段开关的两侧，宜装设隔离开关或隔离触头。

10）66~110 kV 敞开式配电装置，母线避雷器和电压互感器宜合用一组隔离开关。接在变压器引出线上的避雷器，不宜装设隔离开关。

11）对于电压为 0.4 kV 的低压系统采用固定式配电装置时，其中断路器等开关设备的电源侧，应装设隔离电器或同时具有隔离功能的开关电器。当母线为双电源时，其电源或变压器的低压出线断路器和母线联络断路器的两侧均应装设隔离电器。与外部配变电所低压联络电源线路断路器的两侧，亦均应装设隔离电器。

12）安装在出线上的耦合电容器、电压互感器以及接在变压器引出线或中性点上的避雷器，不应装设隔离开关。

13）桥形接线中的跨条，宜用两组隔离开关串联，以便于进行不停电检修。

14）断路器两侧均应配置隔离开关，以便在断路器检修时隔离电源。

15）中性点直接接地的普通型变压器均应通过隔离开关接地，自耦变压器的中性点则不必装设隔离开关。

（2）接地开关配置

1）对室外配电装置，为保证电气设备和母线的检修安全，每段母线上应装设接地开关

或接地器；接地开关或接地器的安装数量应根据母线电磁感应电压和平行母线的长度以及间隔距离进行计算确定。

2）66 kV 及以下配电装置，断路器两侧的隔离开关靠断路器侧，线路隔离开关靠线路侧，变压器进线隔离开关的变压器侧，应配置接地开关。66 kV 及以下电压等级的并联电抗器的高压侧应配置接地开关。双母线接线两组母线隔离开关的断路器侧可共用一组接地开关。

3）旁路母线一般装设一组接地开关，设在旁路回路隔离开关的旁路母线侧。

例题 5-8：某省会城市综合体项目，地上 4 栋一类高层建筑，地下室连成一体，总建筑面积 280301 m^2，建筑面积分配见表 5-1，设置 10 kV 配电站一座。

表 5-1　建筑面积分配

建 筑 区 域	五星级酒店	金融总部办公大楼	出租商务办公大楼	综合商业大楼	合　　计
建筑面积/m^2	58749	75860	68423	77222	280301

已知 10 kV 电源供电线路每回最大电流为 600 A，本项目方案设计阶段负荷估算见表 5-2，按规范要求应向电力公司至少申请几回 10 kV 供电线路？（供配电 2013 年考题）

表 5-2　负荷估算

建 筑 区 域	建筑面积/m^2	装机指标/[(V·A)/m^2]	变压器装机容量/kV·A	预测负荷率(%)	预测一、二级负荷容量/kV·A
五星级酒店	58794	97	2×1600 2×1250	60	2594
金融总部办公大楼	75860	106	4×2000	60	2980
出租商务办公大楼	68425	105	2×2000 2×1600	60	2792
综合商业大楼	77222	150	6×2000	60	3600
合计	280301	117	32900	60	11960

（A）1 回　　（B）2 回

（C）3 回　　（D）4 回

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 3.2.5 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 315 页表 5.2-3。

1）项目方案设计阶段可采用单位面积功率法计算负荷容量，其需要的供电回路：

$$I_1=\frac{S}{\sqrt{3}U}=\frac{280301\times117}{\sqrt{3}\times10}\text{ A}=1893\text{ A}$$；回路数 $N=\frac{I_1}{I'}=\frac{1893}{600}=3.15$

满足变电站线路最大持续工作电流要求，其需要的供电回路：

$$I_g=\frac{S}{\sqrt{3}U}=\frac{32900}{\sqrt{3}\times10}\text{ A}=1899.5\text{ A}$$；回路数 $N=\frac{I_g}{I'}=\frac{1899.5}{600}=3.16$

满足上述要求，取 4 回供电线路。

依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009 第 4.0.5 条。

2）根据设计变电站计算电流即按变压器负荷率60%的供电回路和一二级负荷的供电回路要求。

满足一、二级负荷时载流量：$I_2=\dfrac{S_2}{\sqrt{3}U}=\dfrac{11966}{\sqrt{3}\times10}\text{A}=691\text{ A}$，回路数：$N=\dfrac{I_2}{I'}=\dfrac{691}{600}=1.15$，取2回供电线路。

变压器负荷率60%载流量：$I_3=\dfrac{\beta S_3}{\sqrt{3}U}=\dfrac{60\%\times32900}{\sqrt{3}\times10}\text{A}=1140\text{ A}$，回路数：$N=\dfrac{I_3}{I'}=\dfrac{1140}{600}=1.9$，取2回供电线路。

同时供电的两回及以上供配电线路中，当有一回路中断供电时，其余线路应能满足全部一级负荷及二级负荷，需要3路。

3）同时满足所有要求，取上述计算中最大值，即4回供电线路。

【知识点解析】

1）一级负荷应由双重电源供电，当一电源发生故障时，另一电源不应同时受到损坏。

2）供配电系统的设计，除一级负荷中的特别重要负荷外，不应按一个电源系统检修或故障的同时另一电源又发生故障进行设计。

3）需要两回电源线路的用户，宜采用同级电压供电。但根据各级负荷的不同需要及地区供电条件，亦可采用不同电压供电。

4）同时供电的两回及以上供配电线路中，当有一回路中断供电时，其余线路应能满足全部一级负荷及二级负荷。

5）在方案设计阶段可采用单位指标法；在初步设计及施工图设计阶段，宜采用需要系数法。

例题5-9：某车间有机床、通风机、自动弧焊变压器和起重机等用电设备，其中风机为二类负荷，其余负荷为三类负荷。下列对这个车间变电所变压器供电方案中，哪一个供电方案是正确的？（供配电2006年考题）

（A）单回10 kV架线路　　（B）单回10 kV电缆线路

（C）由两根10 kV电缆组成的单回线路　　（D）单回6 kV专用架空线路

答案：【D】

解答过程：依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009。

第3.0.7条　二级负荷的供电系统，宜由两回线路供电。在负荷较小或地区供电条件困难时，二级负荷可由一回6 kV及以上专用的架空线路供电，选D。

例题5-10：某大用户拟建一座110 kV变电站，电压等级为110/35/10 kV，110 kV电源进线2回，负荷出线4回，双母线接线，正常运行方式为并列运行，主接线及间隔排列示意图如图5-4所示。该站110 kV为户外敞开式布置，下面110 kV主接线中设备的配置和接线有几处错误并说明理由。（注：同一类的错误算一处，如所有出线没有配电流互感器，算一处错误）（发输电2016年考题改编）

（A）1处　　（B）2处　　（C）3处　　（D）4处

答案：【D】

解答过程：依据《3~110 kV高压配电装置》GB 50060—2008。

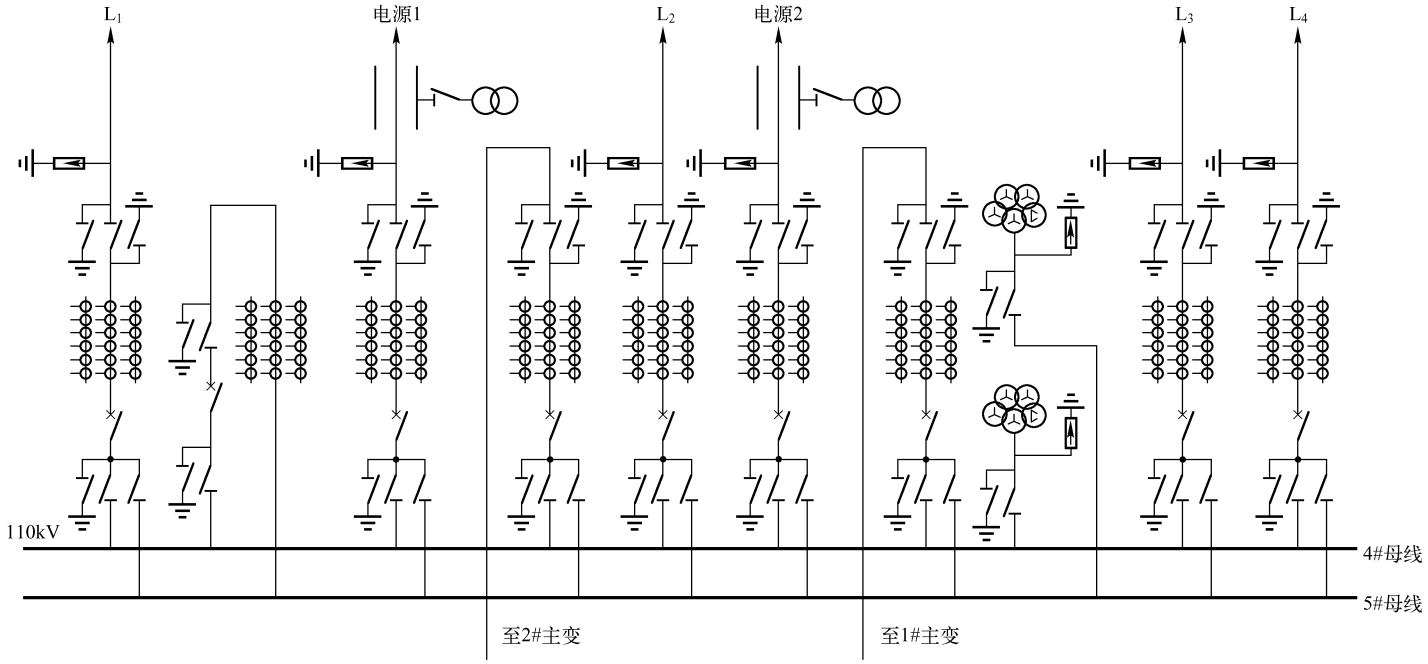


图5–4　变电站主接线及间隔排列示意图

第 2.0.3 条　66~110 kV 配电装置内的母线排列顺序，宜为靠变压器侧布置的母线为Ⅰ母，靠线路侧布置的母线为Ⅱ母；双层布置的配电装置内的母线排列顺序，宜为下层布置的母线为Ⅰ母、上层布置的母线为Ⅱ母。4#、5#母线，母线命名有错误，错 1 处。

第 2.0.7 条　66~110 kV 敞开式配电装置，每段母线上应配置接地开关，4#、5#母线未装设接地开关，错 1 处。

依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 71 页。

母线联络断路器电流互感器安装位置错误，不能满足继电保护装置要求，应在断路器与隔离开关之间，错 1 处。

电源 1、2 进线上的耦合电容器、电压互感器不应设置隔离开关，错 1 处。

依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014：

110 kV 变电站进出线上的避雷器设置需要根据是否架设地线等各种情况确定。

共计 4 处，选 D。

【知识点解析】

电流互感器配置要求：

1）凡装有断路器的回路均应装设电流互感器，其数量应满足继电保护装置、计量和自动装置要求。

2）在未设断路器的下列地点也应装设电流互感器：发电机和变压器的中性点、发电机和变压器的出口、桥形接线的跨条上等。

3）对直接接地系统，一般按三相配置。对非直接接地系统，依具体委托要求按两相或三相配置。

4）由地区电网供电的变配电所电源进线处，宜装设供计费用的专用电流互感器。

例题 5-11：某风电场升压站的 110 kV 主接线采用变压器线路组接线，一台主变压器容量为 100 MV·A，主变压器短路阻抗为 10.5%，110 kV 配电装置采用屋外敞开式，升压站地处海拔 1000 m 以下，站区属多雷区。该站 110 kV 侧主接线简图如图 5-5 所示，请问接线图中有几处设计错误，并简要说明原因。（发输电 2012 年考题）

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

第 2.0.6 条，66~110 kV 敞开式配电装置，线路隔离开关的线路侧宜配置接地开关，出线侧未设接地开关，错 1 处。

第 2.0.2 条，配电装置各回路的相序排列宜一致。可按面对出线，自左至右、由远而近、从上到下的顺序，相序排列为 A、B、C，出线排序有错，错 1 处。

第 2.0.8 条，66~110 kV 敞开式配电装置当需要监视和检测线路侧有无电压时，出线侧的一相上宜装设电压互感器，出线安装三相电压互感器，错 1 处。

避雷器设置需要根据规范中安装距离确定。

依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 5.3.5 条，多雷区变电站出线安装避雷器，正确。

第 5.4.13-8 条，变压器中性点单进线单变压器中性点应装避雷器，正确。

第 5.4.13-12 条，变压器 35 kV 侧三绕组变压器属于开路侧绕组，应装避雷器，正确。

综上所述，选 C。

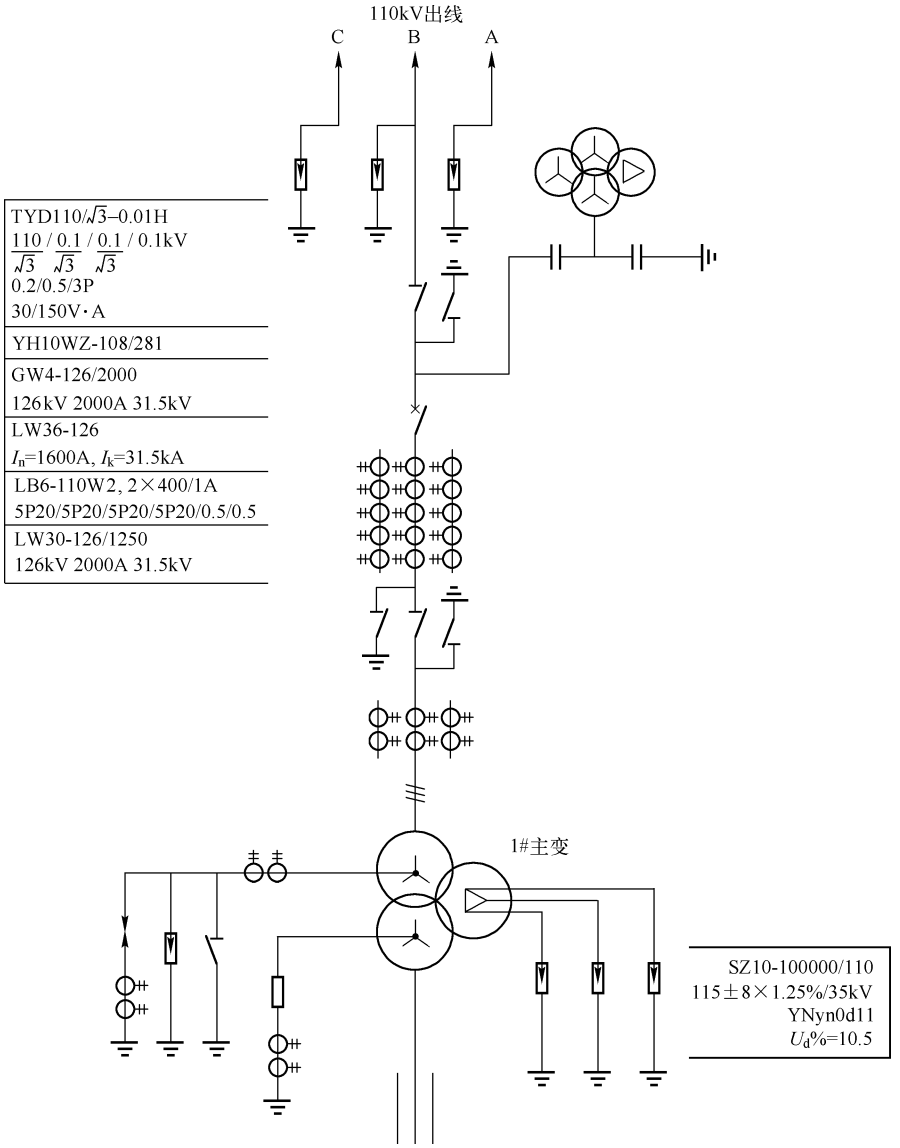


图 5-5　风电场升压站的 110 kV 主接线

5.2　变(配)电站设计

【知识点说明】

1）变配电站站址选择属于重要考点，依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013、《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 3 章等。

2）配电装置安全净距属于重要考点，依据《3～110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008、《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 3 章等。要求熟练掌握室内室外高压和低压配电装置安全净距，安全净距

的海拔修正。

3）配电装置布置以及防火要求属于重要考点，依据《3～110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008、《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013、《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008、《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229—2006、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 3 章等。要求熟练掌握变压器布置、高低压室内开关柜布置、高压室外配电装置布置、储油设施的要求、配电装置防火的要求。本章中的高压电气设备布置设计知识点，还需要配合学习理解《民用建筑电气设计与施工》、《国家电网公司配电、输变电工程典型设计图册》等书籍中的经典设计示例作为补充。

4）电缆敷设属于普通考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 等。

依据书目：

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013

《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011

《3～110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008

《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229—2006

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《变电站布置设计技术规程》DL/T 5056—2007

《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2006

《35～220 kV 无人值班变电站设计规范》DL/T 5103—2012

《国家电网公司输变电工程典型设计》（10 kV 配电分册）

《国家电网公司输变电工程典型设计》（35 kV 变电站分册）

《国家电网公司输变电工程典型设计》（110 kV 变电站分册）

《民用建筑电气设计与施工供电电源》（08D800-2）

《民用建筑电气设计与施工变配电所》（08D800-3）

例题 5-12～5-16：某企业有 110 kV 主变电站一座，设有两台同容量同型号的主变压器，户外布置，主变容量为 50 MV · A，电压等级为 110/35/10 kV，单台变压器油重 13.5 t。110 kV设备采用户外敞开式布置，35 kV、10 kV 采用户内开关柜布置，主变低压各侧均采用单母线分段接线方式，110 kV 为有效接地系统，采用 35 kV、10 kV 向企业各个用电点供电。当地海拔为 800 m。请解答下列问题。

5-12：该变电站室外部分设备平面布置图如图 5-6 所示。变压器储油池按能容纳 100% 油量设计。指出图中不符合规范要求的有几处，并说明依据。（供配电 2016 年考题）

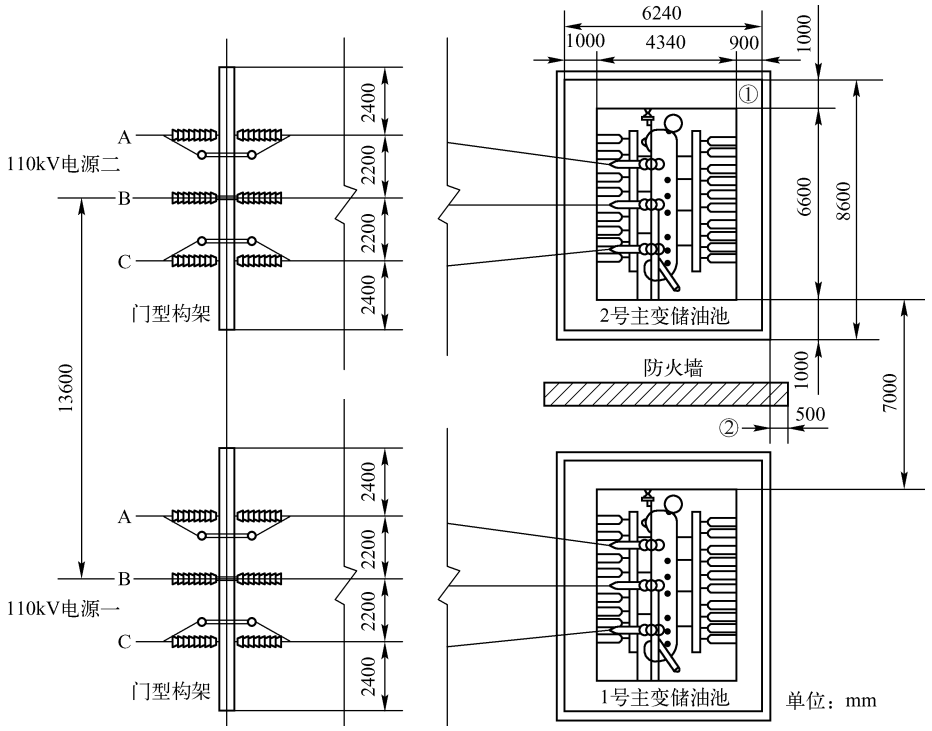


图 5-6　变电站室外部分设备平面布置图

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【B】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008 或《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229—2006。

1）第 5.5.3 条　室外单台电气设备的油量在 1000 kg 以上时，应设置储油或挡油设施。当设置有容纳 20%油量的储油或挡油设施时，应设置将油排到安全处所的设施，且不应引起污染危害。当不能满足上述要求时，应设置能容纳 100%油量的储油或挡油设施。储油和挡油设施应大于设备外廓每边各 1000 mm，四周应高出地面 100 mm。图中①处 1 号、2 号变压器储油池应大于设备外廓每边各 1000 mm，图中右侧只有 900 mm，错。

2）第 5.5.5 条　油量为 2500 kg 及以上的室外油浸变压器之间的防火间距不能满足 GB 50060—2008 中表 5.5.4 的要求时，应设置防火墙。防火墙的耐火极限不宜小于 4 h。防火墙的高度应高于变压器油枕，其长度应大于变压器储油池两侧各 1000 mm。图中②处已经按照规范设置防火墙，防火墙长度应大于储油池两侧 1000 mm，但图中②处防火墙两边大于储油池两侧只有 500 mm，错。

第 1、2 条按照各一处计算，选 B。

【知识点解析】

蓄油设施的要求：

1）室内单台电气设备的油量在 100 kg 以上时，应设置储油设施或挡油设施。挡油设施的容积应按容纳 20%油量设计，并应有将事故油排至安全处的设施；当不能满足上述要求时，应设置能容纳 100%油量的储油设施。排油管的内径不应小于 150 m，管口应加装铁栅滤网。

2）室外单台电气设备的油量在 1000 kg 以上时，应设置储油或挡油设施，容纳 20% 油量的储油不能满足上述要求时，应设置能容纳 100% 油量的储油或挡油设施。储油和挡油设施应大于设备外廓每边各 1000 mm，四周应高出地面 100 mm。储油设施内应铺设卵石层，卵石层厚度不应小于 250 mm，卵石直径为 50~80 mm。当设置有油水分离措施的总事故储油池时，储油池容量宜按最大一个油箱容量的 60% 确定。储油或挡油设施应大于变压器外廓每边各 1 m。

3）高层建筑物的裙房和多层建筑物内的附设变电所及车间内变电所的油浸变压器室，应设置容量为 100% 变压器油量的储油池。

4）当设置容量不低于 20% 变压器油量的挡油池时，应有能将油排到安全场所的设施。位于下列场所的油浸变压器室，应设置容量为 100% 变压器油量的储油池或挡油设施：

① 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维的场所。

② 附近有粮、棉及其他易燃物大量集中的露天场所。

③ 油浸变压器室下面有地下室。

5）地下变电站的变压器应设置能存储最大一台变压器油量的事故储油池。

6）油浸集合式并联电容器，应设置储油池或挡油墙。电容器的浸渍剂和冷却油不得污染周围环境和地下水。

5-13：该变电站 35 kV、10 kV 配电室平面布置系统图如图 5-7 所示，穿墙套管采用水平排列，35 kV 和 10 kV 配电设备全部采用移开式交流金属封闭式开关设备，柜前操作，柜后维护。35 kV 和 10 kV 手车长分别为 1500 mm 和 750 mm。指出图中有几处不满足规范要求，并说明依据。（供配电 2016 年考题）

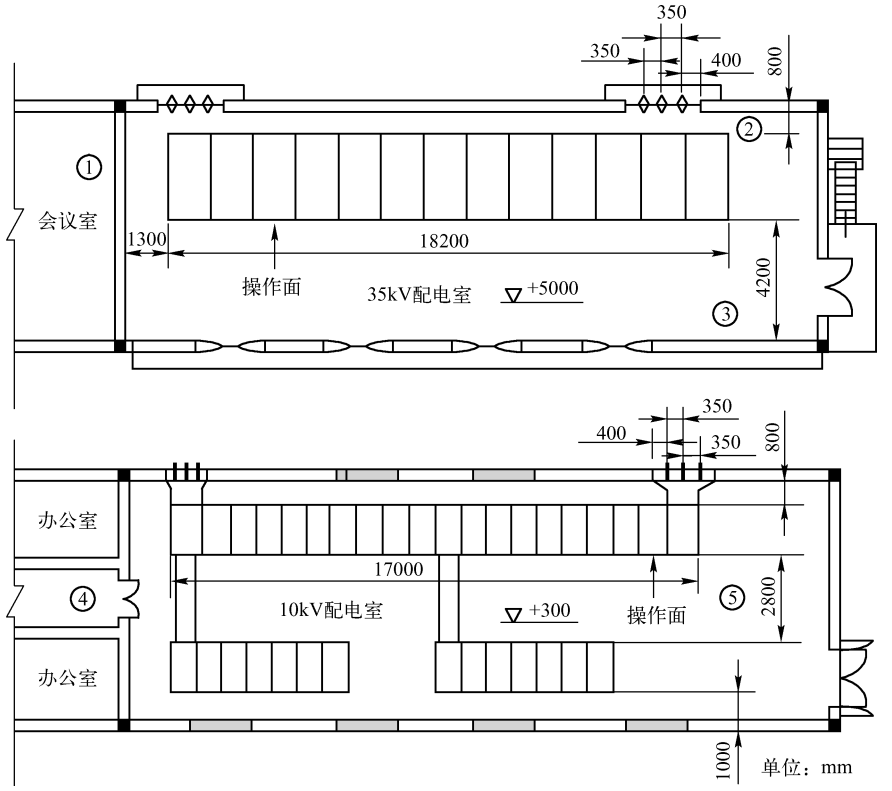


图 5-7　配电室平面布置系统图

（A）3 处　　（B）4 处　　（C）5 处　　（D）6 处

答案：【A】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

（1）35 kV 配电室

1）第 7.1.1 条　长度大于 7000 mm 的配电装置室，应设置 2 个出口。长度大于 60000 mm 的配电装置室，宜设置 3 个出口；当配电装置室有楼层时，一个出口可设置在通往室外楼梯的平台处。图中①处应设置一个出口，错误。

2）第 5.4.4 条　室内配电装置采用金属封闭开关设备时，室内各种通道的最小宽度（净距），宜符合表 5-3 的规定。

表 5-3　配电装置室内各种通道的最小宽度（净距）　（单位：mm）

通道分类 / 布置方式	维护通道	操作通道	
		固定式	移开式
设置单列布置时	800	1500	单车长+1200
设备双列布置时	1000	2000	双车长+900

注：1. 通道宽度在建筑物的墙柱个别凸出处，可缩小 200 mm。

2. 移开式开关柜不需进行就地检修时，其通道宽度可适当减小。

3. 固定式开关柜靠墙布置时，柜背离墙距离宜取 50 mm。

4. 当采用 35 kV 开关柜时，柜后通道不宜小于 1000 mm。

图中②处采用 35 kV 开关柜时柜后维护通道宽度 800 mm，错。图中③处单车长+1200 mm = 2700 mm，小于 4200 mm，正确。

依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

（2）10 kV 配电室

1）第 6.2.2 条　变压器室、配电室、电容器室的门应向外开启。相邻配电室之间有门时，应采用不燃材料制作的双向弹簧门。图中④处门应向外开启，错误。

2）第 4.2.7 条　高压配电室内成排布置的高压配电装置，其各种通道的最小宽度，应符合表 5-4 的规定。

表 5-4　高压配电室内各种通道的最小宽度　（单位：mm）

开关柜布置方式	柜后维护通道	柜前操作通道	
		固定式开关柜	移开式开关柜
单排布置	800	1500	单手车长度+1200
双排面对面布置	800	2000	双手车长度+900
双排背对背布置	1000	1500	单手车长度+1200

注：1. 固定式开关柜为靠墙布置时，柜后与墙净距应大于 50 mm，侧面与墙净距宜大于 200 mm。

2. 通道宽度在建筑物的墙面有柱类局部凸出时，凸出部位的通道宽度可减少 200 mm。

3. 当开关柜侧面需设置通道时，通道宽度不应小于 800 mm。

4. 对全绝缘密封式成套配电装置，可根据厂家安装使用说明书减少通道宽度。

图中⑤单车长+1200 mm = 1950 mm，小于 2800 mm，柜后通道也符合要求，正确。

共计 3 处错误，选 A。

5-14：该变电站设计为独立场地，四周有实体围墙，场地内室外布置的全部电气设备

不单独设置固定遮栏，变压器储油池按照 100% 油量设计，室外部分设备立面布置图如图 5-8所示。在变压器外轮廓投影到 35 kV 配电室、10 kV 配电室以及办公辅助室外墙各侧向外 3000 mm 范围内有窗户。确定图中 L_1、L_2、L_3的最小尺寸（mm），并说明依据。（供配电 2016 年考题）

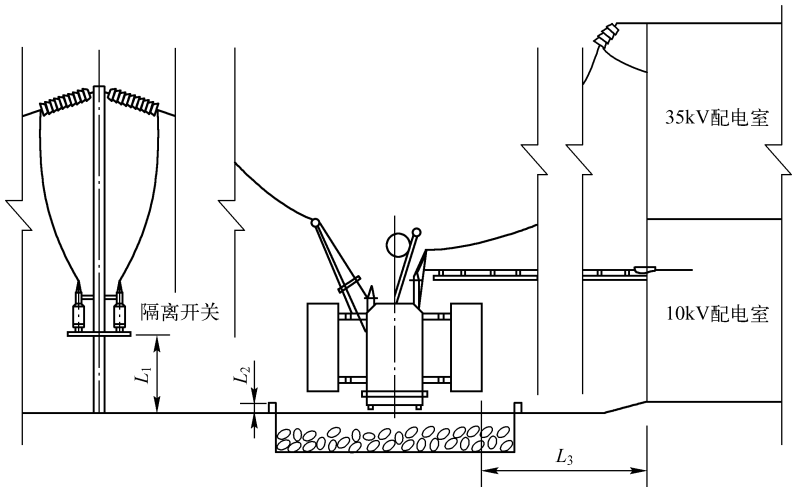


图 5-8　室外部分设备立面布置图

（A）2500，100，10000　　（B）2500，100，8000

（C）3400，0，10000　　（D）3400，100，8000

答案：【A】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

L_1的最小尺寸（mm）：图 5.1.2-3 中 L_1的最小尺寸为≥2500 mm。

L_2的最小尺寸（mm）：第 5.5.3 条中变压器储油池按照 100% 油量设计时储油和挡油设施四周应高出地面 100 mm，即 L_2的最小尺寸（mm）为 100 mm。

L_3的最小尺寸（mm）：第 7.1.11 条中因为在变压器外轮廓投影到 35 kV 配电室、10 kV 配电室以及办公辅助室外墙各侧向外 3000 mm 范围内有窗户，所以 L_3的最小尺寸不宜小于 10000 mm。

5-15：该变电站内除主变压器外无其他有油设备，根据规划在变电站内设置有油水分离设施的总事故储油池。当主变压器的储油池容量均为变压器油重的 40% 时，总事故储油池的储油量最小值为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）16.2 t　　（B）10.8 t　　（C）8.1 t　　（D）5.4 t

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

第 5.5.3 条　当设置有油水分离措施的总事故储油池时，储油池容量宜按最大一个油箱容量的 60% 确定。

总事故储油池容量宜为最大油箱容量 60%，即 13.5 t×60% = 8.1 t。

5-16：若该变电所地处海拔高度为 1500 m，变电所内安装了 10/0.4 kV 干式变压器、低压配电开关柜等设备。变压器与低压柜之间用裸母线连接，在裸母线周围设用栅栏。那么，

配电室通道上方裸带电母线栅栏底部距地面的高度和用钥匙打开的栅栏到带电母线的最小安全净距为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题改编）

（A）1700 mm，800 mm　　（B）1700 mm，801 mm

（C）2200 mm，801 mm　　（D）2200 mm，821 mm

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

第 4.2.6 条　配电室通道上方裸带电体采用遮栏或外护物，遮栏或外护物底部距地面的高度不应低于 2.2 m。

依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

表 4.2.1 中栅栏到带电低压母线的最小安全净距 B_1（裸带电部分至用钥匙或工具才能打开或拆卸的栅栏）为 800 mm。

海拔 1500 m 修正后：$B_1 = 800\times\left(20+\dfrac{1500-1000}{100}\times 1\%\right)\text{mm} = 801\text{ mm}$

【知识点解析】

室内、外配电装置的最小电气安全净距见表 5-5。

表 5-5　室内、外配电装置的最小电气安全净距　　（单位：mm）

监控项目	场所	额定电压/kV						符　号
		≤1	3	6	10	15	20	
无遮栏裸带电部分至地（楼）面之间	室内	2500	2500	2500	2500	2500	2500	—
	室外	2500	2700	2700	2700	2800	2800	
裸带电部分至接地部分和不同的裸带电部分之间	室内	20	75	100	125	150	180	A
	室外	75	200	200	200	300	300	
距地面 2500 mm 以下的遮栏防护等级为 IP2X 时，裸带电部分与遮护物间水平净距	室内	100	175	200	225	250	280	B
	室外	175	300	300	300	400	400	
不同时停电检修的无遮栏裸导体之间的水平距离	室内	1875	1875	1900	1925	1950	1980	—
	室外	2000	2200	2200	2200	2300	2300	
裸带电部分至无孔固定遮栏	室内	50	105	130	155	—	—	—
裸带电部分至用钥匙或工具才能打开或拆卸的栅栏	室内	800	825	850	875	900	930	C
	室外	825	950	950	950	1050	1050	
高低压引出线的套管至户外通道地面	室外	3650	4000	4000	4000	4000	4000	—

注：1. 海拔高度超过 1000 m 时，表中符号 A 后的数值应按每升高 100 m 增大 1%进行修正，符号 B、C 后的数值应加上符号 A 的修正值。

2. 裸带电部分的遮栏高度不小于 2.2 m。

例题 5-17～5-21：某企业所在地区海拔高度为 2300 m，总变电所设有 110/35 kV 变压器，从电网用架空线引来一路 110 kV 电源，110 kV 和 35 kV 配电设备均为户外敞开式；其中 110 kV系统为中性点直接接地系统，35 kV 和 10 kV 系统为中性点不接地系统。企业设有 35 kV分变电所。请解答下列问题。

5-17：总变电所某 110 kV间隔接线平、断面图如图 5-9 所示。那么，现场安装的 110 kV 不同相的裸导体之间的安全净距不应小于下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

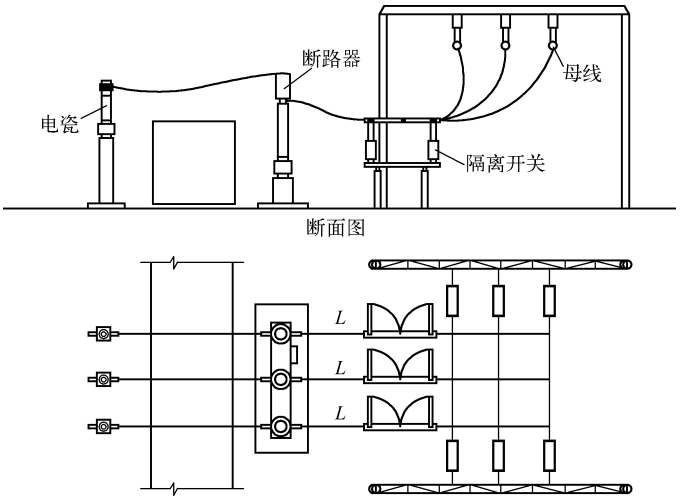


图 5-9　110 kV 间隔接线平、断面图

（A）1000 mm　　（B）1100 mm　　（C）1130 mm　　（D）1149 mm

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008 第 5.1.1 条。

110 kV 不同相的裸导体之间（110 kV 系统为中性点直接接地系统），查表 5.1.1 中对应 A_2 值，按照注 2 修正计算如下：

$$A_2 = 1000\times\left(1+\frac{2300-1000}{100}\times 1\%\right)\text{ mm} = 1130\text{ mm}$$

【知识点解析】

（1）室外安全净距

A 值是基本带电距离。110 kV 及以下配电装置的 A 值采用惯用法确定。隔离开关和断路器等开断电器的断口两侧引线带电部分之间，应满足 A_2 值的要求。

B_1 值是指带电部分至栅栏的距离和可移动设备在移动中至无遮栏带电部分的净距，$B_1 = A_1 + 750$ mm；带电作业时，不同相或交叉的不同回路带电部分之间，其 $B_1 = A_2 + 750$ mm。

B_2 值是指带电部分至网状遮栏的净距，$B_2 = A_1 + 70$ mm $+ 30$ mm。

C 值是保证人举手时，手与带电裸导体之间的净距不小于 A_1 值，$C = A_1 + 2300$ mm $+ 200$ mm。

D 值是保证配电装置检修时，人和带电裸导体之间净距不小于 A_1 值，$D = A_1 + 1800$ mm $+ 200$ mm。

（2）室内安全净距

A 值：110 kV 及以下室内配电装置的 A 值普遍比室外 A 值小 50~100 mm。

B_2 值是指带电部分至网状遮栏的净距，$B_2 = A_1 + 30$ mm $+ 70$ mm；若为板状遮栏，则因运行人员手指无法伸入，只需考虑施工误差 30 mm，故此时 $B_2 = A_1 + 30$ mm。

C 值：35~110 kV 栏目中 C 值的含义与室外相同，考虑到室内条件比室外为好，20 kV 及以下 C 值取 2500 mm，35 kV 及以上 $C = A_1 + 2300$ mm。

D 值的含义与室外相同，考虑室内条件比室外为好，无须再增加裕度，因此 $D=A_1+1800\,\text{mm}$。

E 值指由出线套管中心线至室外通道路面的净距，考虑人站在载重汽车车厢中举手高度不大于 3500 mm，因此将 E 值定为在 35 kV 及以下时为 4000 mm，66 kV 为 4500 mm，110 kV 为 5000 mm。

（3）室内和室外安全净距 A 值海拔修正公式

$$A_1'=A_1[1+0.1(H-1)]$$

式中，A_1 为基本带电距离，室外配电装置的安全净距可从表 5-6 中查到；H 为安装点海拔高度（km）。

（4）室外配电装置的安全净距

屋外配电装置的安全净距应按图 5-10～图 5-12 校验。

表 5-6　室外配电装置的安全净距　　（单位：mm）

类　别	适应范围	系统标称电压/kV					
		3～10	15～20	35	66	110J	110
A_1	1. 带电部分至接地部分之间 2. 网状遮栏向上延伸线距地 2.5 m 处与遮栏上方带电部分之间	200	300	400	650	900	1000
A_2	1. 不同相的带电部分之间 2. 断路器和隔离开关的端口两侧引线带电部分之间	200	300	400	650	1000	1100
B_1	1. 设备运输时，其设备外廓至无遮栏带电部分之间 2. 交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 3. 栅状遮栏至绝缘体和带电部分之间 4. 带电作业时带电部分至接地部分之间	950	1050	1150	1400	1650	1750
B_2	网状遮栏至带电部分之间	300	400	500	750	1000	1100
C	1. 无遮栏裸导体至地面之间 2. 无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间	2700	2800	2900	3100	3400	3500
D	1. 平行的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 2. 带电部分与建筑物、构筑物的边沿部分之间	2200	2300	2400	2600	2900	3000

注：1. 110J 指中性点有效接地系统。

2. 海拔超过 1000 m 时，A 值应进行修正。带电作业时，不同相或交叉的不同回路带电部分之间其 B_1 值可在 A_2 值上加 750 mm。

3. 本表所列各值不适用于制造厂的成套配电装置。

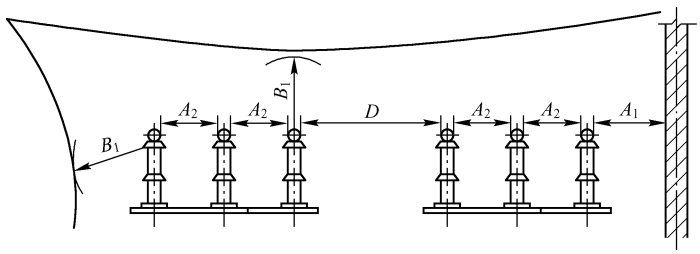


图 5-10　室外 A_1、A_2、B_1、D 值校验

5-18：例题 5-17 图 5-9 中，如果设备运输道路上方的 110 kV 裸导体最低点距地面高为

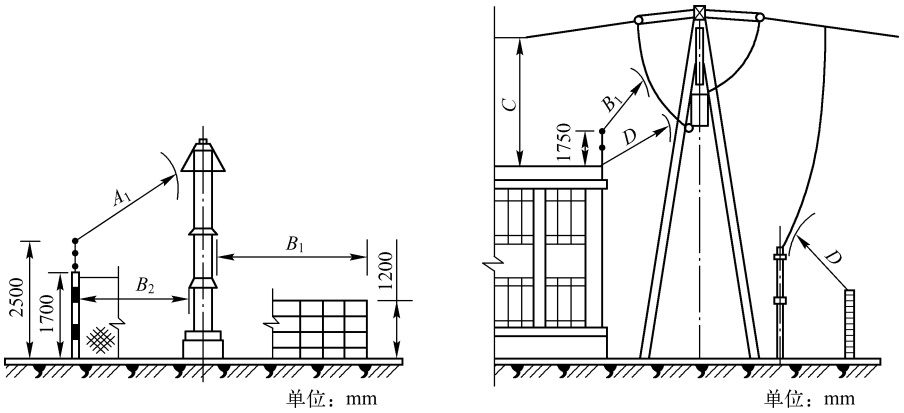


图 5-11　室外 A_1、B_1、B_2、C、D 值校验

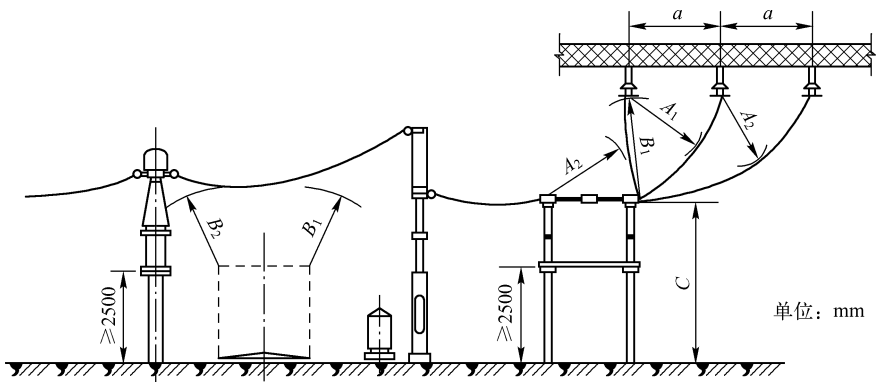


图 5-12　室外 A_2、B_1、C 值校验

注：a 为不同相带电部分之间的距离。

5000 mm，则汽车运输设备时，运输限高应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）1650 mm　　（B）3233 mm　　（C）3350 mm　　（D）3400 mm

答案：【B】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008 条文说明 第 5.1.1 条。

设备运输设备至无遮栏带电设备距离（110 kV 系统为中性点直接接地系统），查表 5.1.1中对应 B_1 值，按照注 2 修正计算如下：

$$B_1=\left(1650+900\times\frac{2300-1000}{100}\times1\%\right)\text{mm}=1767\text{ mm}$$

汽车运输设备时运输限高为

$$H=5000\text{ mm}-B_1=(5000-1767)\text{ mm}=3233\text{ mm}$$

5-19：企业分变电所布置如图 5-13 所示，为一级负荷供电。其中一路电源来自总变电所，另一路电源来自柴油发电机，变压器 T_1 为 35/10.5 kV，4000 kV·A，油重 3100 kg，高 3.5 m；变压器 T_2/T_3 均为 10/0.4 kV，1600 kV·A，油重 1100 kg，高 2.2 m。高低压开关柜均为无油设备同室布置，10 kV 电力电容器独立布置于一室，变压器露天布置，设有1.8 m高的固定遮栏。指出变电所布置上有几处不符合规范要求，并说明理由。（供配电 2013 年考题）

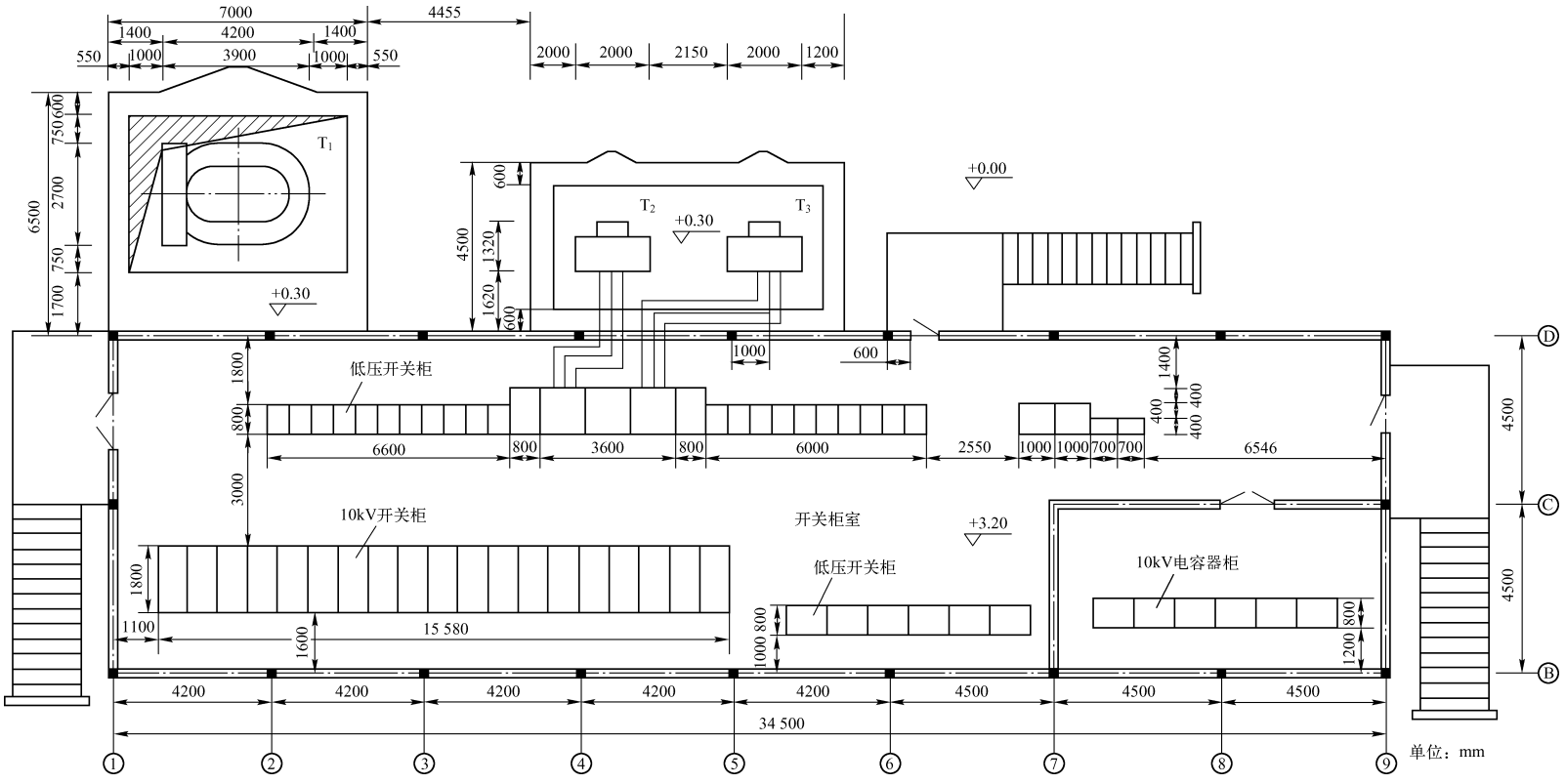


图5–13　分变电所布置图

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【D】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

第 4.2.3 条　当露天或半露天变压器供给一级负荷用电时，相邻的可燃油油浸变压器的防火净距不应小于 5 m，图中 T_2、T_3间距仅为 2.15 m，不符合规范要求。

第 4.2.6 条　低压配电装置两个出口间的距离超过 15 m 时，应增加出口。②~⑥间低压柜长度为 15.58 m，未增加出口，不符合规范要求。

第 6.2.2 条　变压器室、配电室、电容器室的门应向外开启。相邻配电室之间有门时，应采用不燃材料制作的双向弹簧门 10 kV 电容器室的门应采用双向弹簧门，图中为向外开启，不符合规范要求。

依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008。

第 9.1.5 条　并联电容器室的长度超过 7 m 时，应设两个出口。图中只有一个出口，不符合规范要求。

综上所述，共计 4 处错误，选 D。

5-20：若该企业设有 35 kV 分变电所，主电源采用 35 kV 进线，内设 35/10 kV 及若干 10/0.4 kV 变电所，高低压共同接地，则变压所室内 10 kV 空气绝缘母线桥相间距离最少不应小于多少？（供配电 2012 年考题改编）

（A）125 mm　　（B）142 mm　　（C）200 mm　　（D）300 mm

答案：【B】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

从表 5.1.4 中查出不同相的带电部分之间 A_2为 125 mm，当地海拔高度为 2300 m，大于 1000 m，需进行海拔修正：

$$A_2'=A_2[1+0.1\times(H-1)]=125[1+0.1\times(2.3-1)]\ \text{mm}=141.3\ \text{mm}$$，取 142 mm

【知识点解析】

1）室内高压配电装置的安全净距不应小于表 5-7 所列数值。电气设备外绝缘体最低部位距地小于 2300 mm 时，应装设固定遮栏。

表 5-7　室内配电装置的安全净距　（单位：mm）

类　别	适 应 范 围	系统标称电压/kV								
		3	6	10	15	20	35	66	110J	110
A_1	1. 带电部分至接地部分之间 2. 网状和板状遮栏向上延伸线距地 2300 mm 处与遮栏上方带电部分之间	75	100	125	150	180	300	550	850	950
A_2	1. 不同相的带电部分之间 2. 断路器和隔离开关的端口两侧引线带电部分之间	75	100	125	150	180	300	550	900	1000
B_1	1. 栅状遮栏至带电部分之间 2. 交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间	825	850	875	900	930	1050	1300	1600	1700
B_2	网状遮栏至带电部分之间	175	200	225	250	280	400	650	950	1050

（续）

类　别	适 应 范 围	系统标称电压/kV								
		3	6	10	15	20	35	66	110J	110
C	无遮栏裸导体至地（楼）面之间	2500	2500	2500	2500	2500	2600	2850	3150	3250
D	平行的不同时停电检修的无遮栏裸导体之间	1875	1900	1925	1950	1980	2100	2350	2650	2750
E	通向室外的出线套管至室外通道的路面	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4500	5000	5000

注：1. 110J 指中性点有效接地系统。

2. 海拔超过 1000 m 时，*A* 值应进行修正。当为板状遮栏时，B_2 值可在 A_1 值上加 30 mm。

3. 通向室外配电装置的出线套管至室外地面的距离，不应小于表 5-6 中所列室外部分的 *C* 值。

4. 本表所列各值不适用于制造厂的产品设计。

2）室内配电装置的安全净距应按图 5-14 和图 5-15 校验。

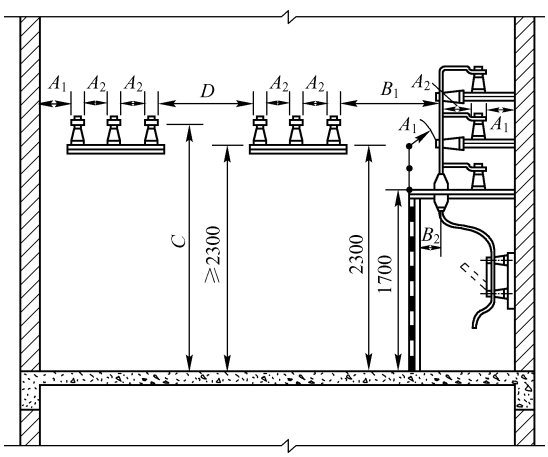


图 5-14　室内 A_1、B_1、B_2、*C*、*D* 值校验

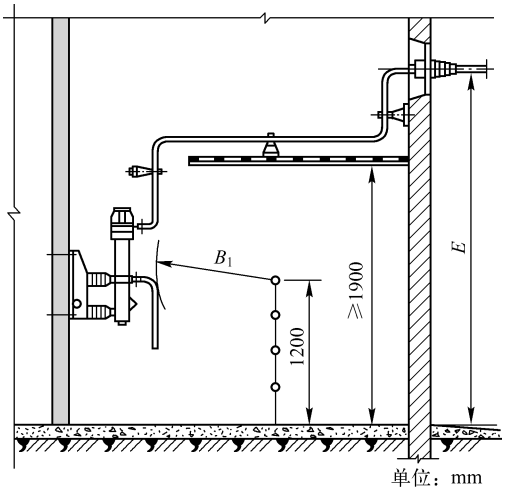


图 5-15　室内 B_1、*E* 值校验

5-21：该变电所所址的选择和所区的表述中，下列哪一项表述不符合规范要求？（供配电 2009 年考题）

（A）靠近负荷中心

（B）所址的选择应与城乡或工矿企业规划相协调，对于变电站的进出线口只需考虑架空线路的引入和引出的方便

（C）所址周围环境宜无明显污秽，如空气污秽时，所址宜设在污源影响最小处

（D）变电所内为满足消防要求的主要道路宽度，应为 3.5 m，主要设备运输道路的宽度可根据运输要求确定，并应具备回车条件

答案：【B】

解答过程：依据《35～110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011。

第 2.0.1-3 条　应与城乡或工矿企业规划相协调，便于架空和电缆线路的引入和引出，答案 B 错误。

例题 5-22～5-26：请配合完成某变电站设计方案的图样审核。

5-22：某 110 kV 室外变电站的部分场地布置初步设计方案如图 5-16 所示，变电站的外围采用 2 m 高的实体外墙，场地内设有消防和运输通道。110 kV 和 35 kV 配电装置均选用不含油电气设备，室内布置，110 kV 和 35 kV 配电室靠近变压器一侧均设有通风用窗户和供人员出入的门。变电站设总事故油池一座，两台 110/35 kV 主变压器选用油浸变压器，单台变压器油重 6.5 t。图中标注的尺寸单位均为 m，均指建（构）筑物外缘的净尺寸。请判断该设计方案有几处不符合的规范要求，并分别说明理由。（供配电 2017 年考题）

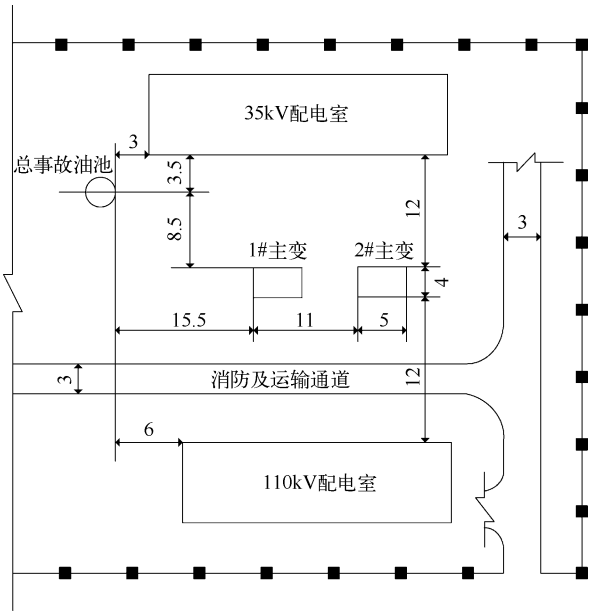


图 5-16　110 kV 室外变电站的部分场地布置图

（A）2 处　　（B）3 处　　（C）4 处　　（D）5 处

答案：【C】

解答过程：依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011。

1）第 2.0.5 条　屋外变电站实体围墙不应低于 2.2 m。题干中采用 2 m 高的实体外墙，违反规范规定 1 处。

2）第 2.0.6 条　变电站内为满足消防要求的主要道路宽度应为 4.0 m。题目图中消防通道为 3 m，违反规范规定 1 处。

依据《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229—2006。

3）第 6.6.2 条、第 6.6.3 条　油量为 2500 kg 及以上的屋外 110 kV 油浸变压器之间的最小净距为 8 m。题目图中油重 6.5 t，屋外 110 kV 主变压器对应距离为 6 m，不满足要求，没有设置防火墙，违反规范规定 1 处。

4）第 11.1.4 条　总事故油池距 110 kV、35 kV 配电室（戊类二类耐火生产建筑）或屋外 110 kV 油浸变压器之间的最小净距为 5 m；110 kV、35 kV 配电室建筑物与屋外 110 kV 油浸变压器的外廓间距不宜小于 10 m。题目中总事故油池距 35 kV 配电室为 $\sqrt{3^2+3.5^2}$ m = 4.6 m，总事故油池距屋外 110 kV 油浸变压器为 $\sqrt{15.5^2+8.5^2}$ m = 17.7 m；110 kV 和 35 kV 配

电室与屋外 110 kV 油浸变压器的外廓间距均为 12 m。总事故油池距 35 kV 配电室的距离不满足规范要求，违反规范规定 1 处。

综上所述，共计 4 处错误。

例题 5-23：某 110/35 kV 变电站部分设计方案如图 5-17 所示。已知当地海拔高度小于 1000 m，110 kV 系统为有效接地系统。该变电站为独立场地，四周有实体围墙，场地内室外布置的全部电气设备不单独设置固定遮栏，变压器储油池按能容纳 100% 油量设计。图中标注的尺寸单位均为 mm。请判断该设计方案中共有几处不符合规范的要求，并分别说明理由。(供配电 2017 年考题)

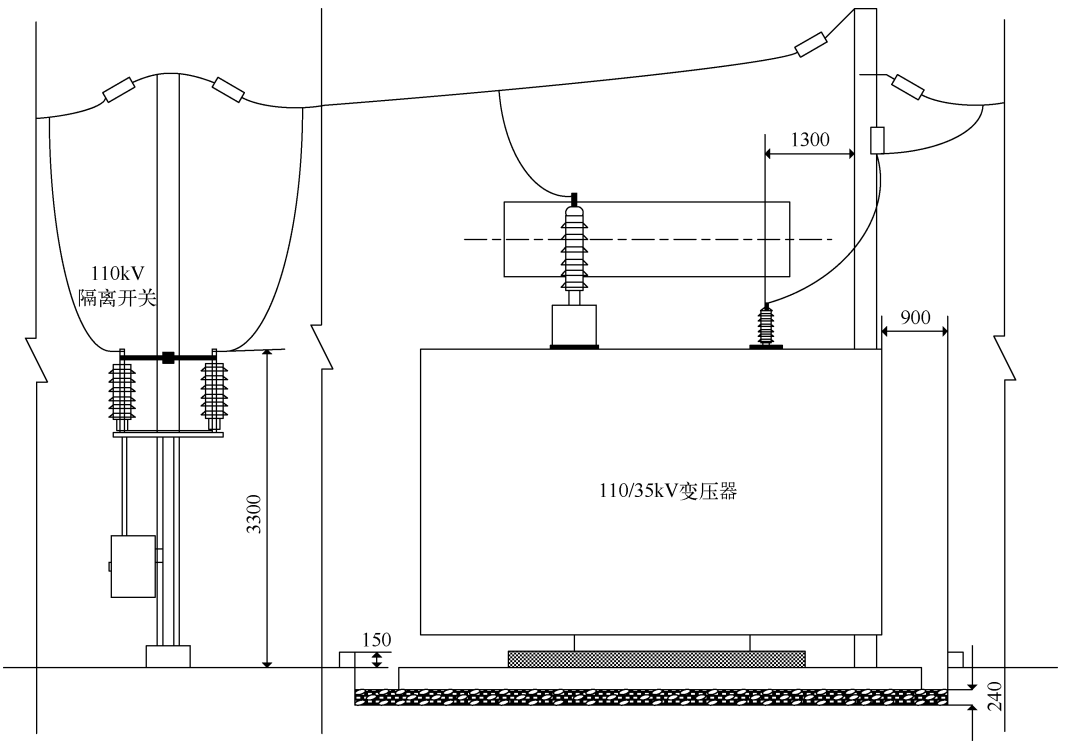


图 5-17　110/35 kV 变电站布置图局部

(A) 2 处　　(B) 3 处　　(C) 4 处　　(D) 5 处

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

1) 第 5.5.3 条　当设置能容纳 100% 油量的储油或挡油设施时。储油和挡油设施应大于设备外廓每边各 1000 mm，四周应高出地面 100 mm。储油设施内应铺设卵石层，卵石层厚度不应小于 250 mm，卵石直径为 50~80 mm。题目图中储油和挡油设施大于设备外廓每边各 900 mm，四周高出地面 150 mm，卵石层厚度为 240 mm，违反规范规定 2 处。

2) 查表 5.1.1 条　110J 中的 C 值为 3400 mm，海拔高度小于 1000 m 无须修正。题目图中隔离开关的安全净距 C 值为 3300 mm，违反规范规定 1 处。

3) 查表 5.1.1 条 35 kV 中的 B_1 值为 1150 mm，海拔高度小于 1000 m 无须修正。题目图中变压器 35 kV 低压套管的安全净距 B_1 值为 1300 mm，正确。

4）第 5.4.7 条 66~110 kV 屋外配电装置，其周围宜设置高度不低于 1500 mm 的围栏，并应在围栏醒目地方设置警示牌。题干中该 110 kV 变电站为独立场地，四周有实体围墙，场地内室外布置的全部电气设备不单独设置固定遮栏，违反规范规定 1 处。（参考《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2006 第 8.1.3 条 电气设备外绝缘体最低部位距地小于 2500 mm 时，应装设固定遮栏）。

综上所述，共计错误 4 处。

5-24：某变电站 35 kV 配电室如图 5-18 所示。35 kV 母线经穿墙套管室内后沿母线支架敷设，配电室内沿垂直于母线支架方向设计两列照明灯具，照明线路沿屋顶结构明敷。35 kV设备选用手车式开关柜，车长 950 mm。图中标注的尺寸单位均为 mm，请判断该设计方案中共有几处不符合规范的要求，并分别说明理由。（供配电 2017 年考题）

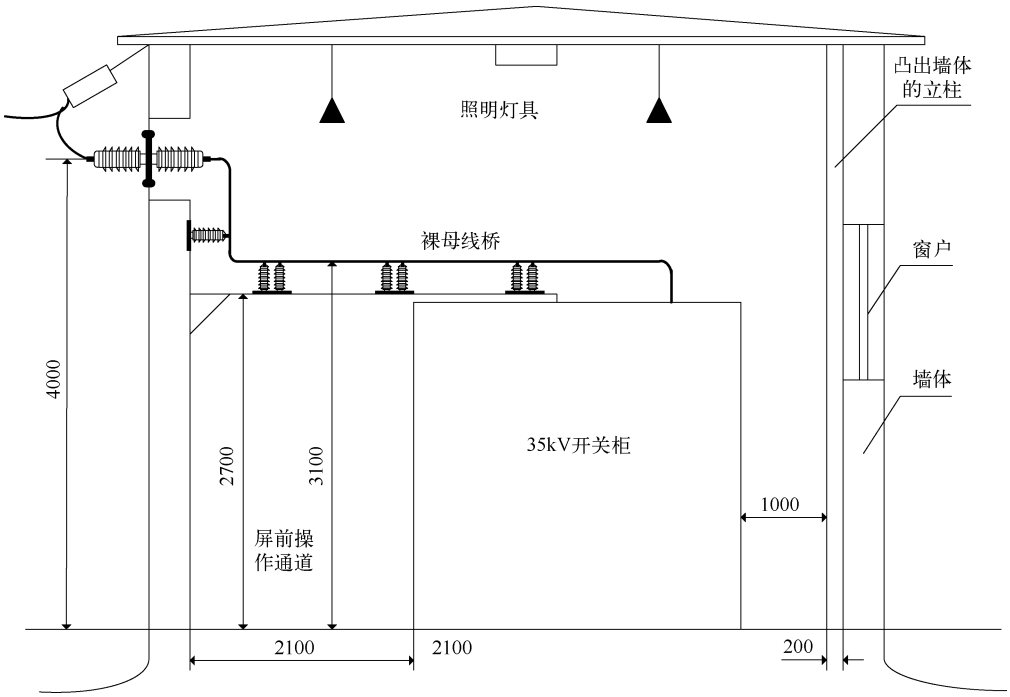


图 5-18　变电站 35 kV 配电室布置图

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【B】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

1）查表 5.1.1 条中对应安全净距：35 kV 中的室外穿墙套管至路面 E 值为 4000 mm，无遮拦裸导体至地面之间 C 值为 2600 mm，母线支持绝缘子桥架至地面之间≥2300 mm。题目图中室外穿墙套管至路面 E 值为 4000 mm，无遮拦裸导体至地面之间为 3100 mm，母线支持绝缘子桥架至地面之间为 2700 mm，均满足规范要求（无须考虑海拔修正）。

2）第 5.1.7 条　屋内配电装置裸露的带电部分上面不应有明敷的照明、动力线路或管线跨越。题干中配电室内沿垂直于母线支架方向设计两列照明灯具，照明线路沿屋顶结构明敷，违反规范规定 1 处。

3）第 5.4.4 条　当采用 35 kV 移动式开关柜时，操作通道为单车长+1200 mm =（950+1200）mm = 2150 mm，柜后通道不宜小于 1000 mm。题目图中操作通道为 2100 mm，柜后通道为 1000 mm，违反规范规定 1 处。

4）第 5.4.11 条 屋外裸导体母线桥，当外物有可能落在母线上时，应根据具体情况采取防护措施。题目图中屋外为架空裸导线引入，未采用裸导体母线桥。

5）第 7.1.5 条 配电装置室可开固定窗采光，并应采取防止玻璃破碎时小动物进入的措施。题目图中未说明窗户是固定式，无法判定。

依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

6）第 6.4.3 条 在变压器、配电装置和裸导体的正上方不应布置灯具。当在变压器室和配电室内裸导体上方布置灯具时，灯具与裸导体的水平净距不应小于 1.0 m，灯具不得采用吊链和软线吊装。题目图中配电装置和裸导体的正上方布置灯具，并且使用灯具采用吊链和软线吊装，违反规范规定 1 处。但是变电站为 35 kV 配电室，超出了 GB 50053—2013 规范的适用范围。

综上所述，已确定错误共计 2 处。

5-25：某 10 kV 变电所的部分布置图如图 5-19 所示。图中 10 kV 配电柜选用柜前操作、柜前柜后维护结构的移动式开关柜，手车长度为 650 mm，10 kV 油浸变压器额定容量为 800 kV·A，油重 380 kg，不考虑变压器在室内检修。挂墙式配电箱为本变电所内的照明、通风等小型 380/220 V 用电设备供电，并在配电箱前面板实施操作。10 kV 配电柜和挂墙式配电箱的防护等级不低于 IP3X。图中标注的尺寸单位均为 mm，请判断该设计方案中共有几处不符合规范的要求，并分别说明理由。（供配电 2017 年考题）

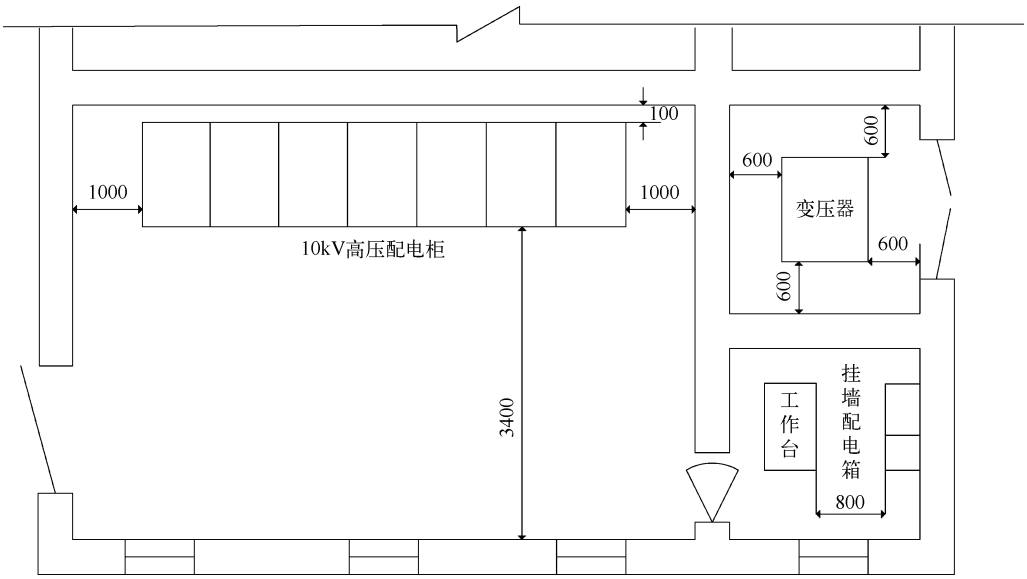


图 5-19　变电所 10 kV 配电室布置图

（A）2 处　　（B）3 处　　（C）4 处　　（D）5 处

答案：【B】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

1）第 4.2.7 条 表 4.2.7 中，单排移动式开关柜，柜前操作通道为单手车长度+1200 mm=（650+1200）mm=1850 mm，柜后维护通道和柜侧面通道不应小于 800 mm。题目图中柜前操作通道为 3400 mm，柜后维护通道为 100 mm，柜侧面通道为 1000 mm，违反规范规定 1 处。

2）第 6.2.2 条 变压器室、配电室、电容器室的门应向外开启。相邻配电室之间有门时，应采用不燃材料制作的双向弹簧门。题目图中 10 kV 配电室、变压器门向外开启，相邻低压配电室为双向开启，符合规范规定。

3）表 4.2.4 中，800 kV · A 油浸变压器外廓与变压器室的最小净距中，与墙壁为 600 mm，与门为 1000 mm。题目图中油浸变压器外廓与变压器室的最小净距中，与墙壁为 600 mm，与门为 600 mm，违反规范规定 1 处。

4）第 4.1.4 条 值班室应与配电室直通或经过通道相通，且值班室应有直接通向室外或通向变电所外走道的门。题目图中低压配电室有工作台，可认为兼作值班室使用，低压配电室没有直接通向室外或通向变电所外走道的门，违反规范规定 1 处。因为题目中未直接说明低压配电室兼作值班室，错误无法确定。

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

5）第 4.2.5 条 挂墙式配电箱防护等级不低于 IP2X 级、挂墙式配电箱的箱前操作通道宽度不宜小于 1 m。题目中挂墙式配电箱的箱前操作通道宽度为 800 mm，防护等级为 IP3X 级，违反规范规定 1 处。

综上所述，已确定错误共计 3 处。

5-26：某 10/0.4 kV 变电所需要布置 15 台低压抽屉式配电柜，柜前柜后操作，配电柜的外形尺寸为 800 mm（宽）×800 mm（深）×2200 mm（高）。在不考虑房间受限且均采用直线布置时，请画出草图并计算确定采用下列哪种方式布置时所占用的房间面积最小。注：若配电柜柜后和柜侧可以靠墙安装时，距离分别按 60 mm 和 300 mm 计算。（供配电 2017 年考题）

（A）单排布置　　（B）双排面对面布置

（C）双排背对背布置　　（D）多排布置（大于两排）

答案：【 B 】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

变电所需要布置 15 台低压抽屉式配电柜不考虑房间受限，查表 4.2.5 中各种布置方案如下：

1）单排布置。屏前 1800 mm、屏后操作 1200 mm、屏侧 1000 mm，15 个低压屏长度12 m，设置 2 个出口。不考虑墙厚，配电室长 14 m 宽 3.8 m，房间面积为 53.2 m^2（见图 5-20）。

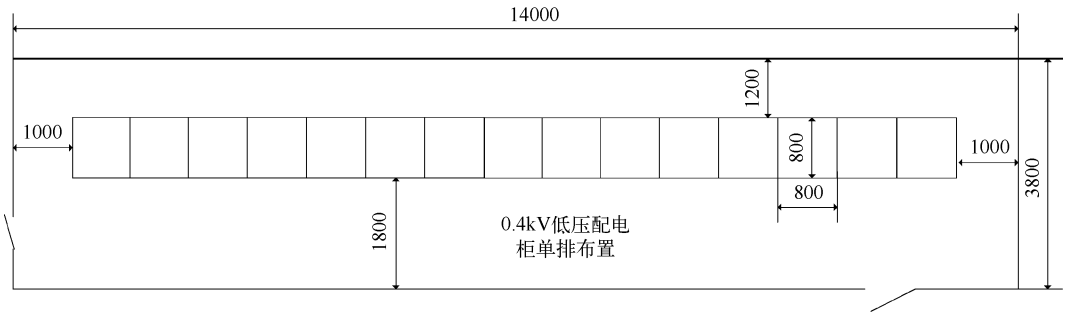


图 5-20　变电所 0.4 kV 配电室单排布置

2）双排面对面布置。屏前 2300 mm、屏后操作 1200 mm、屏侧 1000 mm，8 个低压屏长度 6.4 m，设置 2 个出口。不考虑墙厚，配电室长 8.4 m 宽 6.3 m，房间面积为 52.92 m^2（见图 5-21）。

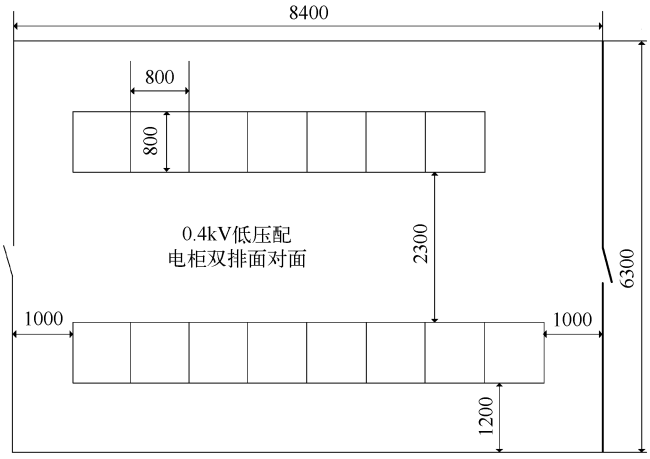


图 5-21　变电所 0.4 kV 配电室双排面对面布置

3）双排背对背布置。屏前 1800 mm、屏后操作 2000 mm、屏侧 1000 mm，8 个低压屏长度 6.4 m，设置 2 个出口。不考虑墙厚，配电室长 8.4 m 宽 7.2 m，房间面积为 60.48 m^2（见图 5-22）。

4）多排（三排）同向布置。屏间 2300 mm、前排屏前 1800 mm、后排屏后操作 1200 mm（参考单排屏后操作距离，后排屏后维护 1000 mm），5 个低压屏长度 4 m，设置 1 个出口靠墙屏侧 300 mm。不考虑墙厚，配电室长 10 m 宽 5.3 m，房间面积为 53 m^2（见图 5-23）。

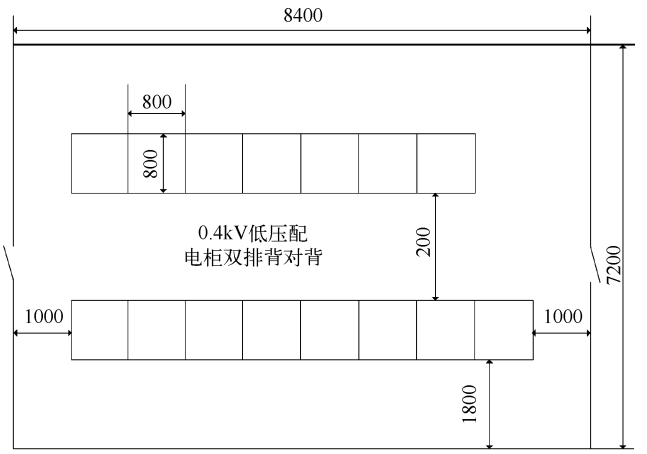


图 5-22　变电所 0.4 kV 配电室双排背对背布置

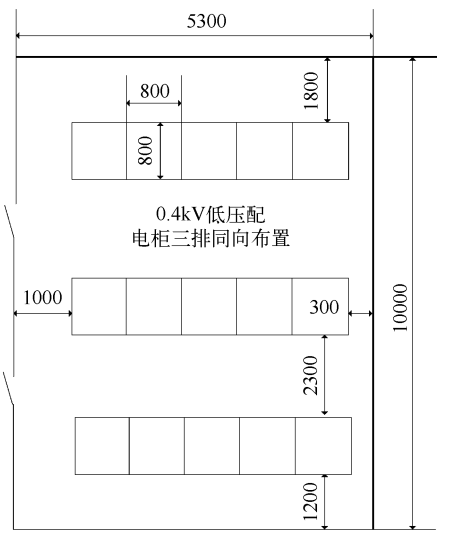


图 5-23　变电所 0.4 kV 配电室多排（三排）同向布置

通过多种方案比较后，双排面对面布置房间面积最小。

【知识点解析】

1）20 kV 及以下变电所内高压配电室内成排布置的高压配电装置，其各种通道的最小宽度，应符合表 5-8 的规定。

表 5-8　高压配电室内各种通道的最小宽度　（单位：mm）

开关柜布置方式	柜后维护通道	柜前操作通道	
		固定式开关柜	移开式开关柜
单排布置	800	1500	单手车长度+1200
双排面对面布置	800	2000	双手车长度+900
双排背对背布置	1000	1500	单手车长度+1200

注：1. 固定式开关柜为靠墙布置时，柜后与墙净距应大于 50 mm，侧面与墙净距宜大于 200 mm。

2. 通道宽度在建筑物的墙面有柱类局部凸出时，凸出部位的通道宽度可减少 200 mm。

3. 当开关柜侧面需设置通道时，通道宽度不应小于 800 mm。

4. 对全绝缘密封式成套配电装置，可根据厂家安装使用说明书减少通道宽度。

20 kV 及以下油浸变压器外廓与变压器室墙壁和门的最小净距，应符合表 5-9 的规定。

表 5-9　油浸变压器外廓与变压器室墙壁和门的最小净距　（单位：mm）

变压器容量/kV · A	100～1000	≥1250
变压器外廓与后壁、侧壁	600	800
变压器外廓与门	800	1000

注：不考虑室内油浸变压器的就地检修。

2）低压配电室内成排布置的配电屏通道最小宽度应符合表 5-10 的规定。

表 5-10　成排布置的配电屏道最小宽度　（单位：m）

配电屏种类		单排布置			双排面对面布置			双排背对背布置			多排同向布置			屏侧通道
		屏前	屏后		屏前	屏后		屏前	屏后		屏间	前、后排屏距墙		
			维护	操作		维护	操作		维护	操作		前排屏前	后排屏后	
固定式	不受限制时	1.5	1.0	1.2	2.0	1.0	1.2	1.5	1.5	2.0	2.0	1.5	1.0	1.0
	受限制时	1.3	0.8	1.2	1.8	0.8	1.2	1.3	1.3	2.0	1.8	1.3	0.8	0.8
抽屉式	不受限制时	1.8	1.0	1.2	2.3	1.0	1.2	1.8	1.0	2.0	2.3	1.8	1.0	1.0
	受限制时	1.6	0.8	1.2	2.1	0.8	1.2	1.6	0.8	2.0	2.1	1.6	0.8	0.8

注：1. 受限制时是指受到建筑平面的限制、通道内有柱等局部凸出物的限制。

2. 屏后操作通道是指需在屏后操作运行中的开关设备的通道，多排同向布置时屏后操作通道宜参照单排布置时的距离。

3. 背靠背布置时屏前通道宽度可按本表中双排背对背布置的屏前尺寸确定。

4. 控制屏、控制柜、落地式动力配电箱前后的通道最小宽度可按本表确定。

5. 挂墙式配电箱的箱前操作通道宽度，不宜小于 1 m。

例题 5-27～5-31：某企业的 35 kV 变电所，35 kV 配电装置选用移开式交流金属封闭开关柜，室内单层布置，10 kV 配电装置采用移开式交流金属封闭开关柜，室内单层布置，变压器布置在室外，平面布置示意图如图 5-24 所示。请回答下列问题。

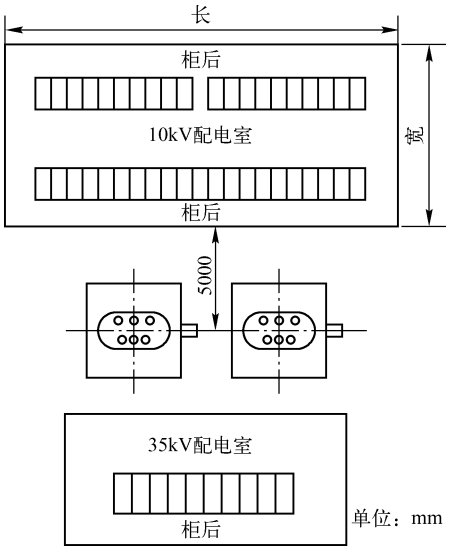


图 5-24　35 kV 变电所平面布置示意图

5-27：如果 10 kV 及 35 kV 配电室是耐火等级为二级的建筑，下列关于变电所建筑物及设备的防火间距的要求中哪一项表述是正确的？（供配电 2011 年考题）

（A）10 kV 配电室面对变压器的墙在设备总高加 3 m 及两侧各 3 m 的范围内不设门窗不开孔洞时，则该墙与变压器之间的防火净距可不受限制

（B）10 kV 配电室面对变压器的墙在设备总高加 3 m 及两侧各 3 m 的范围内不开一般门窗，但设有防火门时，则该墙与变压器之间的防火净距应大于或等于 5 m

（C）两台变压器之间的最小防火净距应为 3 m

（D）所内生活建筑与油浸变压器之间的最小防火净距，当最大单台油浸变压器的油量为 5～10 t 时，对二级耐火建筑的防火间距最小为 20 m

答案：【B】

解答过程：依据《3～110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

第 7.1.11 条　建筑物与户外油浸变压器的外廓间距不宜小于 10000 mm；当其间距小于 10000 mm，且在 5000 mm 以内时，在变压器外轮廓投影范围外侧各 3000 mm 内的室内配电装置楼、主控制楼及网络控制楼面向油浸变压器的外墙不应开设门、窗和通风孔；当其间距在 5000～10000 mm 时，在上述外墙上可设甲级防火门。上述答案中只有 B 正确。

5-28：如图 5-24 所示，10 kV 配电室墙无凸出物，开关柜的深度为 1500 mm，则 10 kV 配电室室内最小净宽为下列哪一项？（供配电 2011 年考题）

（A）5500 mm+双车长　　（B）5900 mm+双车长

（C）6200 mm+单车长　　（D）7000 mm

答案：【A】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013 第 4.2.7 条。

10 kV 配电室为双排面对面移开式交流金属封闭开关柜布置，按表 4.2.7 中计算 10 kV 配电室内最小净宽：

$$W_{min}=800\ mm\times2+双车长+900\ mm+1500\ mm\times2=5500\ mm+双车长$$

5-29：如图 5-14 所示，35 kV 配电室墙无凸出物，手车开关柜的深度为 2800 mm，则 35 kV 配电室室内最小净宽为下列哪一项？(供配电 2011 年考题)

(A) 4700 mm+双车长　　(B) 4800 mm+单车长

(C) 5000 mm +单车长　　(D) 5100 mm

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008 第 5.4.4 条。

35 kV 配电室为单列移开式交流金属封闭开关柜布置，按表 5.4.4 中计算 35 kV 配电室内最小净宽：

$$W_{min}=1000\ mm+单车长+1200\ mm+2800\ mm=5000\ mm+单车长$$

5-30：如果 10 kV 配电室墙无凸出物，第一排高压开关柜共有 21 台，其中有三台开关柜宽度为 1000 mm，其余为 800 mm，第二排高压开关柜共有 20 台，其宽度均为 800 mm，中间维护通道为 1000 mm。则 10 kV 配电室的最小长度为下列哪一项数值？(供配电 2011 年考题)

(A) 19400 mm　　(B) 18000 mm　　(C) 18400 mm　　(D) 17600 mm

答案：【A】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013 第 4.2.7 条。

10 kV 配电室第一排两侧有维护通道，第二排有三处维护通道，按表 4.2.7 中计算 10 kV 配电室的最小长度为

第一排要求最小宽度：$L_{min1}=1000\ mm\times3+800\ mm\times18+800\ mm\times2=19000\ mm$

第二排要求最小宽度：$L_{min2}=800\ mm\times3+800\ mm\times20=18400\ mm$

综上计算，配电室最小宽度取为 19400 mm。

或者：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008 第 5.4.4 条。

10 kV 配电室第一排两侧有维护通道，第二排有三处维护通道，按表 5.4.4 中计算 10 kV 配电室的最小长度为

第一排要求最小宽度：$L_{min1}=1000\ mm\times3+800\ mm\times18+1000\ mm\times2=19400\ mm$

第二排要求最小宽度：$L_{min2}=800\ mm\times20+1000\ mm\times3=19000\ mm$

综上计算，配电室最小宽度取为 19400 mm。

注：两个规范中双列开关柜面对面布置时，开关柜侧面维护通道宽度规定有冲突。

5-31：下列关于变压器事故油浸的描述中哪一项是正确的。(供配电 2011 年考题)

(A) 室外变压器单个油箱的油量在 1000 kg 以上，应设置能容纳 100%油量的储油池，或 10%油量的储油池和挡油墙

(B) 室外变压器当设置有油水分离装置的总事故储油池时，其容量不应小于最小一个油箱的 60%的油量

(C) 变压器储油池和挡油墙的长、宽尺寸，可按设备外廓尺寸每边相应大 1 m 计算

(D) 变压器储油池的四周，应高出地面 100 mm，储油池内应铺设厚度不小于 250 mm 的卵石层，其卵石直径应为 30~50 mm

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

第 5.5.3 条 “室外单台电气设备的油量在 1000 kg 以上时，应设置储油或挡油设施。当

设置有容纳 20%油量的储油或挡油设施时，应设置将油排到安全处所的设施，且不应引起污染危害。当不能满足上述要求时，应设置能容纳 100%油量的储油或挡油设施。储油和挡油设施应大于设备外廓每边各 1000 mm，四周应高出地面 100 mm。储油设施内应铺设卵石层，卵石层厚度不应小于 250 mm，卵石直径为 50~80 mm。当设置有油水分离措施的总事故储油池时，储油池容量宜按最大一个油箱容量的 60%确定。”对应条款，只有 C 正确。

例题 5-32~5-36：某企业 110 kV 变电所，从电网用 110 kV 架空线引来一路 110 kV 电源，如图 5-25 所示为 110 kV 配电装置变压器间隔断面图（局部），已知 110 kV 系统为中性点有效接地系统，设有 110/35 kV 变压器，变压器为油浸式。请回答下列问题。

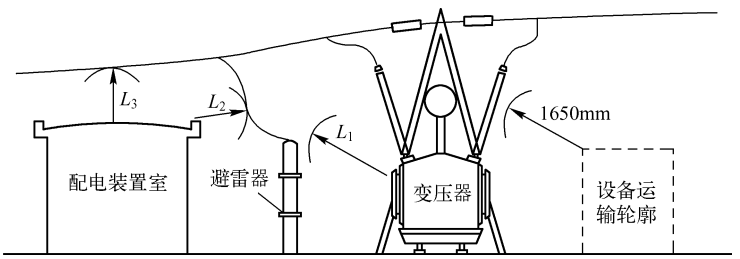


图 5-25　110 kV 配电装置变压器间隔断面图

5-32：变压器散热器的外轮廓与避雷器之间的安全净距 L_1 不应小于下列哪一项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）900 mm　　（B）1000 mm　　（C）1650 mm　　（D）1750 mm

答案：【A】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 5.1.1 条表 5.1.1 中 110J 带电部分至接地部分之间 A_1 值为 900 mm（中性点有效接地系统）。

5-33：避雷器引上线与配电装置室挑檐之间的安全净距 L_2 不应小于下列哪一项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）1000 mm　　（B）1650 mm　　（C）2900 mm　　（D）3400 mm

答案：【C】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 5.1.1 条表 5.1.1 中 110J 带电部分与建筑物、构筑物的边沿部分之间 D 值为 2900 mm。

5-34：配电装置室顶部与跨越配电装置室的导线的安全净距 L_3 不应小于下列哪一项数值？

（A）1000 mm　　（B）1650 mm　　（C）2900 mm　　（D）3400 mm

答案：【D】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 5.1.1 条表 5.1.1 中 110J 无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间 C 值为 3400 mm。

5-35：在配电装置室不采取防火措施的情况下，变压器与配电装置室之间的防火间距应为下列哪一项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）5 m　　（B）10 m　　（C）15 m　　（D）20 m

答案：【B】

解答过程：依据《3~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 7.1.11 条　建筑物与户外油浸变压器的外廓间距不宜小于 10000 mm。

5-36：下列关于变电所控制室布置的表述中，哪一项是正确的？（供配电 2006 年考题）

（A）控制室应布置在远离高压配电室并靠近楼梯的位置

（B）控制室内控制屏（台）的排列布置，宜与配电装置的间隔排列次序相对应

（C）控制室的建筑，应按变电所的规划容量分期分批建成

（D）控制室可只设一个出口，且不宜直接通向高压配电室

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 111 页。

3.2.2 节中，控制室的门不宜直接通向室外，宜通过走廊或套间。答案 A 错误。控制室应有两个出口，出口应靠近主环。答案 D 错误。

依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011。

第 3.9.2 条　控制屏、柜的排列布置，宜与配电装置的间隔排列次序相对应。答案 B 正确。

第 3.9.3 条　控制室的建筑，应按变电站的规划容量在第一期工程中一次建成，屏位应按规划容量确定，并应留有备用屏位的余地。答案 C 错误。

例题 5-37~5-41：在某市开发区拟建设一座 110/10 kV 变电所，主变压器布置在室外，型号为 SFZ10-20000/110。高压配电装置为室内双层布置：10 kV 配电室、变压器间、低压配电室、备件库等均匀布置在一层，控制室、电容器室布置在二层。请回答下列问题。

5-37：图 5-26 所示的 10 kV 配电室平面布置图中，有几处不符合规范的要求？并请逐条说明正确的做法是什么。图中油浸变压器容量为 1250 kV·A，高、低压柜为固定式配电屏。（注：图中未标注的尺寸不用校验。）（供配电 2006 年考题改编）

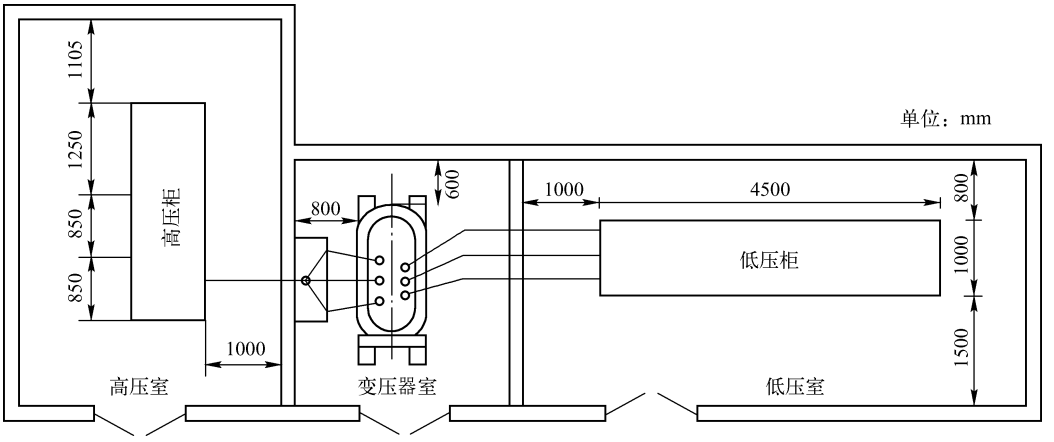


图 5-26　110 kV 配电室平面布置图

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【C】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

第 4.2.4 条　油浸变压器容量为 1250 kV·A，变压器外廓与变压器室墙壁的最小净距为 800 mm。变压器室内为 600 mm，错一处。

第 4.2.7 条　高压配电室内单排布置的 10 kV 高压配电装置各种通道的最小宽度，柜后维护 800 mm，柜侧 800 mm，无错。

第 6.2.6 条　长度大于 7 m 的配电室应设两个安全出口，并宜布置在配电室的两端。高压配电室长度=(850+850+1250+1105+1105) mm=5160 mm，无错。

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

第 4.2.5 条　单排布置的固定式配电屏通道最小宽度，屏前 1.5 m，屏后维护 1.0 m，屏侧 1.0 m。低压配电室屏后维护 0.8 m，错一处。

第 4.3.2 条　配电室长度超过 7 m 时，应设 2 个出口，并宜布置在配电室两端。高压配电室长度=(4500+1000+1000) mm=5500 mm，无错。配电室的门均应向外开启，但通向高压配电室的门应为双向开启门，错一处。

综上所述，错 3 处，选 C。

5-38：若该变电所一个电力用户设有若干个 10 kV 车间变电所，假设用户所处海拔高度为 1500 m，车间 10 kV 室外配电装置裸带电部分与用工具才能打开的栅栏之间的最小电气安全净距为下列哪一项？(供配电 2011 年考题)

(A) 875 mm　　(B) 950 mm　　(C) 952 mm　　(D) 960 mm

答案：【D】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

查表 4.2.1，10 kV 室外裸带电部分至用钥匙或工具才能打开或拆卸的栅栏为 950 mm。

海拔 1500 m 修正：

$$C=\left(950+200\,\frac{1500-1000}{100}\times 1\%\right)\text{mm}=960\text{ mm}$$

5-39：为实施无功补偿，在变电所二层设置装有 6 台 GR-1 型 10 kV 电容器柜的高压电容器室。关于电容器室的布置，下列表述中哪一项是错误的？并说明理由。(供配电 2007 年考题)

(A) 高压电容器装置宜设置在单独的房间内，当采用非可燃介质的电容器且电容器组容量较小时，可设置在高压配电室内

(B) 成套电容器柜单列布置时，柜前通道宽度不应小于 1.5 m；当双列布置时，柜面之间的距离不应小于 2.0 m

(C) 装配式电容器组单列布置时，网门与墙的距离不应小于 1.3 m；当双列布置时，网门之间的距离不应小于 1.5 m

(D) 当高压电容器室的长度超过 6 m 时，应设两个出口

答案：【D】

解答过程：依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

第 5.3.1 条　高压电容器装置宜设置在单独的房间内，当采用非可燃介质的电容器且电容器组容量较小时，可设置在高压配电室内。答案 A 对。

第 5.3.2 条　装配式电容器组单列布置时，网门与墙的距离不应小于 1.3 m；当双列布置时，网门之间的距离不应小于 1.5 m。答案 C 对。

第 5.3.3 条　成套电容器柜单列布置时，柜前通道宽度不应小于 1.5 m；当双列布置时，柜面之间的距离不应小于 2.0 m。答案 B 对。

第 6.2.6 条　长度大于 7 m 的配电室应设两个安全出口，并宜布置在配电室的两端。答案 D 错。

5-40：请判断下列设计方案的描述哪几条不符合规范的要求，并分别说明正确与错误的原因。(供配电 2017 年考题)

① 某企业外降压变电站的变压器的总油量为 6 t，该变电站与单层三级耐火等级的丙类仓库的防火间距为 12 m。

② 某民用建筑内油浸变压器室位于地面一层，变压器室下面有地下室，该变压器室设置挡油池时，挡油池的容积可按容纳 20%变压器油量设计，并有将事故油排到安全场所的设施。

③ 某住宅楼与 10 kV 预装式变电站（干式）的防火间距设计为 2 m。

④ 某民用建筑内柴油发电机房储油间，其柴油总存储量不大于 1 m^3。

（A）1 条　　（B）2 条　　（C）3 条　　（D）4 条

答案：【C】

解答过程：依据《建筑设计防火规范》GB 50016—2014。

① 表 3.4.1 中，室外变电站的变压器的总油量为 6 t，该变电站与单层三级耐火等级的丙类仓库的防火间距为 15 m。该条错误。

② 第 5.2.3 条以及条文说明中，民用建筑与 10 kV 及以下的预装式变电站（干式）的防火间距不应小于 3 m。该条错误。

③ 第 5.4.13-4 条中，布置在民用建筑内的柴油发电机房内设置储油间时，其总储存量不应大于 1 m^3。该条正确。依据《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

④ 第 6.1.6 条和第 6.1.7 条中，建筑物内的附设变电所油浸变压器室下面有地下室，应设置容量为 100%变压器油量的储油池。该条错误。

共计错误 3 条。

【知识点解析】

20 kV 及以下变电所储油池设置：

1）高层建筑物的裙房和多层建筑物内的附设变电所及车间内变电所的油浸变压器室，应设置容量为 100%变压器油量的储油池。

2）当设置容量不低于 20%变压器油量的挡油池时，应有能将油排到安全场所的设施。位于下列场所的油浸变压器室，应设置容量为 100%变压器油量的储油池或挡油设施：

① 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维的场所。

② 附近有粮、棉及其他易燃物大量集中的露天场所。

③ 油浸变压器室下面有地下室。

3）室内单台电气设备的油量在 100 kg 以上时，应设置储油设施或挡油设施。挡油设施的容积应按容纳 20%油量设计，并应有将事故油排至安全处的设施；当不能满足上述要求时，应设置能容纳 100%油量的储油设施。

4）独立变电所、附设变电所、露天或半露天变电所中，油量大于或等于1000 kg的油浸变压器，应设置储油池或挡油池，并应符合第2)条的有关规定。

5-41：若该变电所一个电力用户设有若干10 kV车间变电所，当一级负荷用电由同一10 kV配电所供给时，下列哪几种做法符合规范的要求？（供配电2006年考题）

（A）母线分段处应设防火隔板或有门洞的隔墙

（B）供给一级负荷用电的两路电缆不应同沟敷设，当无法分开时，该电缆沟内的两路电缆应采用耐火性电缆，且应分别敷设在电缆沟两侧的支架上

（C）供给一级负荷用电的两路电缆不应同沟敷设，当无法避免时，允许采用阻燃电缆，分别敷设在电缆沟一侧不同层的支架上

（D）供给一级负荷用电的两回路电缆应同沟敷设

答案：【A】

解答过程：依据《20 kV及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

第4.1.7条　由同一配电所供给一级负荷用电的两回电源线路的配电装置，当布置在同一配电室时，配电装置宜分列布置；当配电装置并排布置时，在母线分段处应设置配电装置的防火隔板或有门洞的隔墙，答案A正确。

第4.1.8条　供给一级负荷用电的两回电源线路的电缆不宜通过同一电缆沟；当无法分开时，应采用阻燃电缆，且应分别敷设在电缆沟或电缆夹层的不同侧的桥（支）架上；当敷设在同一侧的桥（支）架上时，应采用防火隔板隔开，答案B、C、D错误。

例题5-42~5-48：在某市一个重要的110/10 kV变电所，主变压器布置在室外，高压配电装置为室内双层布置：10 kV配电室、电容器室在一层，控制室、低压配电室布置在二层。请回答下列问题。

5-42：10 kV配电室、变压器室至低压配电室布置如图5-27所示，若变压器容量为1250 kV·A，在下列选项中选出H、L、M、N值，并写出理由。（发输电2011年考题改编）

（A）$H\geqslant2500$ mm，$L\geqslant600$ mm，$M\geqslant600$ mm，$N\geqslant800$ mm

（B）$H\geqslant2300$ mm，$L\geqslant600$ mm，$M\geqslant800$ mm，$N\geqslant800$ mm

（C）$H\geqslant1900$ mm，$L\geqslant800$ mm，$M\geqslant600$ mm，$N\geqslant1000$ mm

（D）$H\geqslant2300$ mm，$L\geqslant800$ mm，$M\geqslant800$ mm，$N\geqslant1000$ mm

答案：【D】

解答过程：依据《3~110 kV高压配电装置设计规范》GB 50060—2008或《20 kV及以下变电所设计规范》GB 50053—2013。

H的最小尺寸（mm）：第5.1.4条　室内电气设备外绝缘体最低部位距地最小距离为2300 mm。

M、L、N的最小尺寸（mm）：第5.4.5条，室内1250 kV·A油浸变压器距后壁侧壁为800 mm；变压器与门之间为1000 mm。

综上所述，选D。

5-43：若该变电站设置两台容量为80 MV·A主变，每台主变压器的油量为40 t，变压器油密度是0.84 t/m^3，在设计有油水分离措施的总事故储油池时，按《火力发电厂与变电站设计防火规范》GB 50229—2006的要求，其容量应选下列哪项数值？（发输电2014年考题）

（A）92.24 m^3　　（B）47.62 m^3　　（C）28.57 m^3　　（D）9.52 m^3

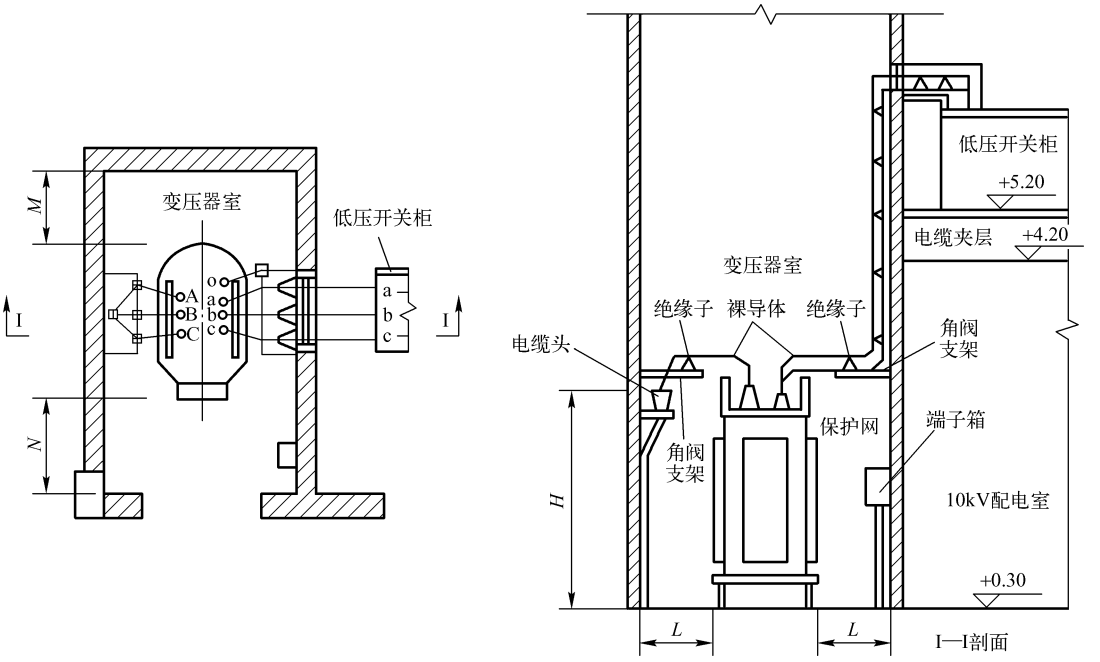


图 5-27　10 kV 配电室、变压器室至低压配电室布置图

答案：【C】

解答过程：依据《火力发电厂与变电站设计防火规范》GB 50229—2006。

第 6.6.7 条　当设置有油水分离措施的总事故储油池时，其容量宜按最大一个油箱容量的 60%确定，即

$$V=\frac{40}{0.84}\times 60\%\ \mathrm{m^3}=28.57\ \mathrm{m^3}$$

5-44：若该变电站在 10 kV 侧采用单母线接线，设置专用的高压电容器室，安装的电容器组为户内框架装配式电容器，并联电容器组安装示意图如图 5-28 所示，图中 L_1、L_2、L_3这三个尺寸哪一组数据是合理的？

（A）1.0 m，1.2 m，0.1 m　（B）0.4 m，1.1 m，1.3 m

（C）0.4 m，1.3 m，1.1 m　（D）1.3 m，0.4 m，1.1 m

答案：【A】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008。

图中 L_1距离，查表 8.2.3 中并联电容器组顶部至屋顶净距为 1 m。

图中 L_2距离，第 8.2.4 条，室外或室内布置的并联电容器组，应在其四周或一侧设置维护通道，维护通道的宽度不宜小于 1.2 m。

图中 L_3距离，查表 8.2.3 中并联电容器组排间距离为 0.1 m。

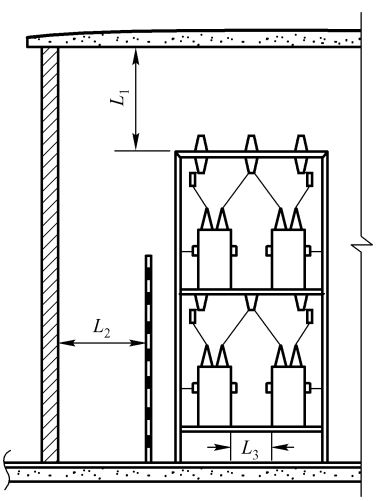


图 5-28　并联电容器组安装示意图

综上所述，选 A。

【知识点解析】

1）并联电容器组的安装设计最小尺寸，宜符合表 5-11 的规定。

表 5-11　并联电容器组安装设计最小尺寸　　（单位：mm）

名　称	电容器（室外、室内）		电容器底部距地面		框（台）架顶部至屋内顶面净距
	间距	排间距离	屋外	屋内	
最小尺寸	70	100	300	200	1000

2）室外或室内布置的并联电容器组，应在其四周或一侧设置维护通道，维护通道的宽度不宜小于 1.2 m。电容器在框（台）架上单排布置时，框（台）架可靠墙布置；电容器在框（台）架上双排布置时，框（台）架相互之间或与墙之间，应留出距离设置检修走道，走道宽度不宜小于 1 m。

注：维护通道指正常运行时可使用的通道；检修走道指在停电后才能使用的走道。

5-45：某 110 kV 户外敞开式变电站，海拔高度为 400 m，年最高温度为+40℃，年最低温度为-25℃。该站主变压器 35 kV 采用三角形接线，为中性点不接地系统，无出线，仅安装无功补偿设备，不设总断路器。若变电站无功补偿设备采用户内安装框架装配式并联电容器，如图 5-29 所示，请分析图中的 L_1、L_2、L_3这三个尺寸哪一组数据是合理的？（发输电 2016 年考题改编）

（A）1.0 m、0.4 m、1.3 m　　（B）0.4 m、1.1 m、1.3 m

（C）0.4 m、1.3 m、1.1 m　　（D）1.3 m、0.4 m、1.1 m

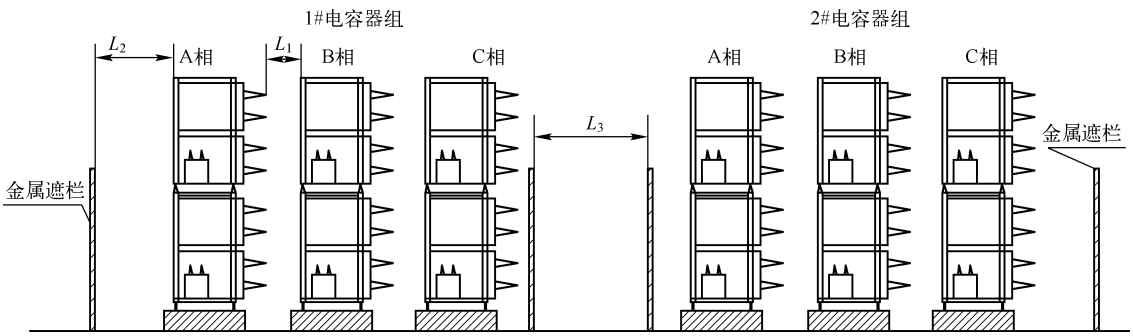


图 5-29　变电站户内电容器组框架装配图

答案：【A】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008 。

第 8.2.4 条及条文说明，图中 L_1、L_3距离规定的检修走道为 1 m、维护走道为 1.2 m。

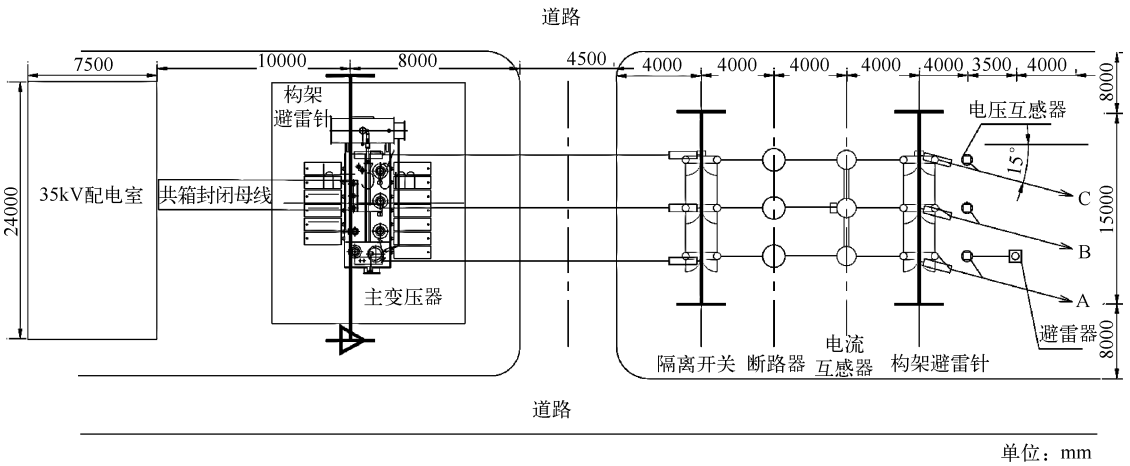
依据《3 ~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

第 5.1. 4 条表 5.1.4，图中 L_2距离规定 B_2值为 0.4 m，海拔高度为 400 m，该值不需要海拔修正。

综上所述，选 A。

5-46：某 110 kV 变电站地处海拔 1000 m 以下，设置一台主变压器，以变压器-线路组接线一回出线至 110 kV 系统，主变压器为双绕组有载调压电力变压器，容量为 125 MV・A，

站内架空导线采用 LGJ-300/25，110 kV 配电装置为中型布置，采用普通敞开式设备，其变压器及 110 kV 配电装置区平面布置图如图 5-30 所示。主变压器进线跨（变压器门构至进线门构）长度为 16.5 m，变压器及配电装置区土壤电阻率 $\rho=400\ \Omega\cdot m$，35 kV 配电室主变侧外墙为无门窗的实体防火墙。请在配电装置布置图中找出有几处错误，并说明理由。（注：同一类的错误算 1 处）（发输电 2016 年考题改编）



单位：mm

图 5-30　变压器及 110 kV 配电装置区平面布置图

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 579 页。

选用出线构架宽度时，应使出线对构架横梁垂直线的偏角 θ 不大于下列数值：5°（35 kV）；20°（110 kV）；10°（220 kV）。题目图中为 15°，正确。

依据《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）第 65 页。

本题图中电流互感器装设在断路器出线侧，主要用于线路计量保护，当用于变压器差动保护会有误动。应在变压器侧安装电流互感器用于变压器保护，错 1 处。

依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 7.5.3 条，共箱封闭母线主要应用于发电厂厂用高压变压器低压侧到高压厂用配电装置之间的连接，本题为变电站，不宜采用，错 1 处。

依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064-2014。

第 5.4.8-1 条，除大坝与厂房紧邻的水力发电厂外，当土壤电阻率大于 350 Ω·m 时，在变压器门型构架上和在离变压器主接地线小于 15 m 的配电装置的构架上，不得装设避雷针、避雷线。该站的土壤电阻率 $\rho=400\ \Omega\cdot m$，在主变构架上装设了避雷针，错 1 处。

综上所述，选 C。

5-47：图 5-31 所示为变电站的断面图，若该站所处海拔高度在 1000 m 以下，土壤电阻率为 1500 Ω·m，110 kV 系统采用中性点有效接地方式，图中布置上有几处设计错误？并简要说明原因。（发输电 2012 年考题）

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

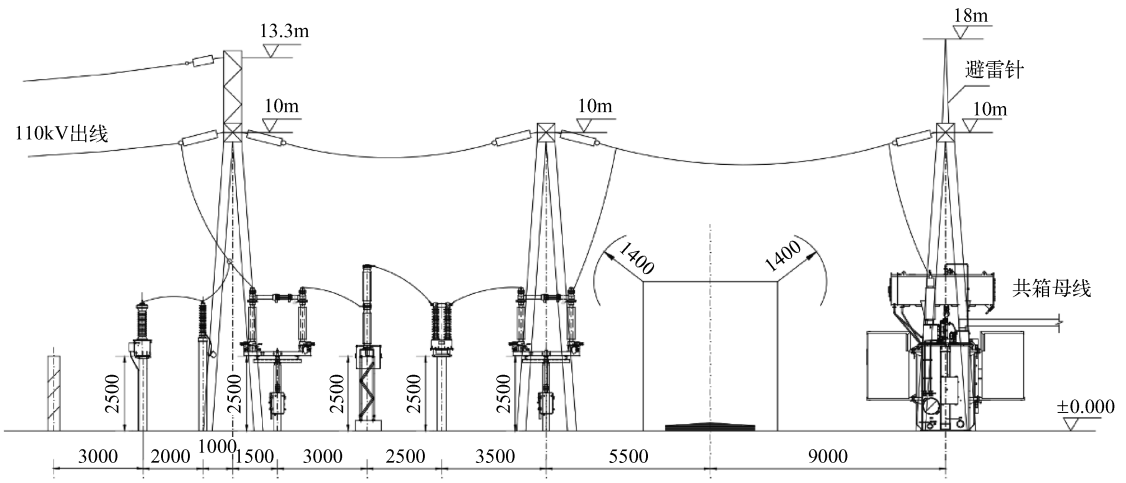


图 5-31　变电站断面图

答案：【D】

解答过程：依据《3～110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008。

表 5.1.1 中 B_1：设备运输时，其设备外廓至无遮栏带电部分之间的距离为，对 110J 为 1650 mm，而图中为 1400 mm，错 1 处。

依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 71 页。

断路器电流互感器安装位置错误，不能满足继电保护装置要求，其应在断路器与进线隔离开关之间，错 1 处。

依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 5.4.8 条　当土壤电阻率大于 350 Ω·m 时，在变压器门型架构上和在离变压器主接地线小于 15 m 的配电装置的架构上，不得装设避雷针、避雷线，错 1 处。

依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 7.5.3 条以及条文说明　共箱封闭式母线主要用于单机容量为 200 MW 及以上的发电厂的厂用回路，故本处不应采用共箱母线，错 1 处。

综上所述，共计 4 处，选 D。

5-48：变电所内各种地下管道之间的最小净距，应满足安全、检修安装及工艺的要求，下列哪项表述符合规范要求？（供配电 2009 年考题改编）

（A）10 kV 穿管直埋电力电缆与事故排油管的水平净距不小于 0.1 m

（B）10 kV 直埋电力电缆与事故排油管的垂直净距不小于 0.25 m

（C）10 kV 直埋电力电缆采用隔板分隔与热力管的交叉净距不小于 0.25 m

（D）10 kV 明敷电力电缆与热力管的垂直净距不小于 0.25 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

查表 5.3.5 中，10 kV 直埋电力电缆与事故排油管的交叉净距不小于 0.5 m，穿管电缆穿管时不得小于 0.25 m，答案 A、B 错误；10 kV 直埋电力电缆采用隔板分隔与热力管的交叉净距不小于 0.25 m，答案 C 正确。

查 5.1.7 中，10 kV 明敷电力电缆与热力管的交叉净距不小于 0.5 m，答案 D 错误。

综上所述，选 C。

【知识点解析】

电缆与电缆、管道、道路、构筑物等之间的容许最小距离见表 5-12。

表 5-12　电缆与电缆、管道、道路、构筑物等之间的容许最小距离　（单位：m）

电缆直埋敷设时的配置情况		平　行	交　叉
控制电缆之间		—	0.5①
电力电缆之间或与控制电缆之间	10 kV 及以下电力电缆	0.1	0.5①
	10 kV 及以上电力电缆	0.25②	0.5①
不同部门使用的电缆		0.5②	0.5①
电缆与地下管沟	热力管沟	2③	0.5①
	油管或易（可）燃气管道	1	0.5①
	其他管道	0.5	0.5①
电缆与铁路	非直流电气化铁路路轨	3	1.0
	直流电气化铁路路轨	10	1.0
电缆与建筑物基础		0.6③	—
电缆与公路边		1.0③	
电缆与排水沟		1.0③	
电缆与树木的主干		0.7	
电缆与 1 kV 以下架空线电杆		1.0③	
电缆与 1 kV 以上架空线杆塔基础		4.0③	

① 用隔板分隔或电缆穿管时不得小于 0.25 m。

② 用隔板分隔或电缆穿管时不得小于 0.1 m。

③ 特殊情况时，减小值不得小于 50%。

第 6 章　短路电流计算

【知识点导图】

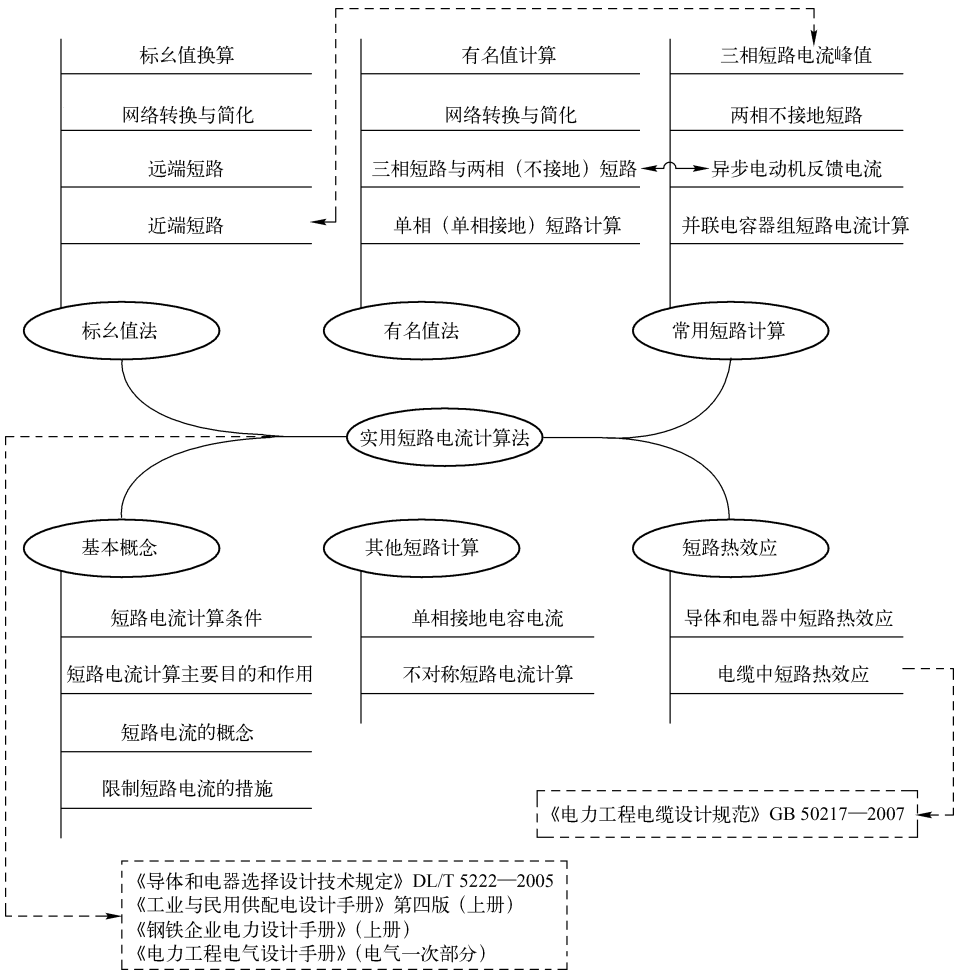


图 6-1　短路电流计算知识点导图

历年考试中均以实用短路电流计算法为考点，如图 6-1 所示，其中标幺值法和有名值法短路电流计算属于考试重点，特别是近 3 年标幺值法的近端短路运算曲线法频繁考到，应作为重点学习；有名值法短路计算在去年也重点考到；短路电流热效应和短路电流峰值需要结合导体、电器的动稳定和热稳定结合解题，发输电考试中近 3 年频繁考到；单相接地电容电流会结合中性点接地设备选择结合解题，近 3 年频繁考到；不对称短路电流计算是冷门考点，但是属于基础知识必须理解。

实用短路电流计算法主要依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《水电工程三相交流系统短路电流计算导则》NB/T 35043—2014 等规范和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）等手册。

IEC 法短路电流计算原用于对于进出口设备及对外工程，主要依据《三相交流系统短路电流计算第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013（IEC60909-0：2001），《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）作为重点予以推广，请各位考生予以重视。

6.1 实用短路电流计算法——标幺值短路计算

【知识点说明】

1）标幺值的计算和归算属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）4.6 节、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4.2 节、4.3 节等，标幺值计算属于基础知识，必须熟练掌握，标幺值归算重要掌握分布系数法和星-三角转换。

2）远端（无穷大系统）短路计算属于重要考点，依据 DL/T 5222—2005 附录 F、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4.4 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）4.6 节等。

3）近端（运算曲线法）短路计算属于重要考点，依据 DL/T 5222—2005 附录 F、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4.4 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）4.6 节等。要求熟练掌握计算电抗的转换、运算曲线法运用。

4）两相不接地短路估算属于普通考点，《工业与民用供配电设计手册》第三版 4.4 节中有详细估算过程，第四版 4.6 节删减该内容。两相不接地短路计算，依据 DL/T 5222—2005 附录 F、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4.7 节，应使用不对称短路计算（详见本章）。

5）短路电流峰值和全电流的计算，依据 DL/T 5222—2005 附录 F、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4.6 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）4.6 节等。注意短路点处短路电流峰值需要考虑计入异步电动机和大容量并联电容器组对短路电流影响，其主要配合电气设备动稳定校验。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《水电工程三相交流系统短路电流计算导则》DL/T 5163—2002（NB/T 35043—2014）

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013

《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014

《短路电流实用计算方法》

解题流程图（见图 6-2）：

例题 6-1~6-4：某企业新建 110/35/10 kV 变电所，设 2 台 SSZ11-50000/110 的变压器，

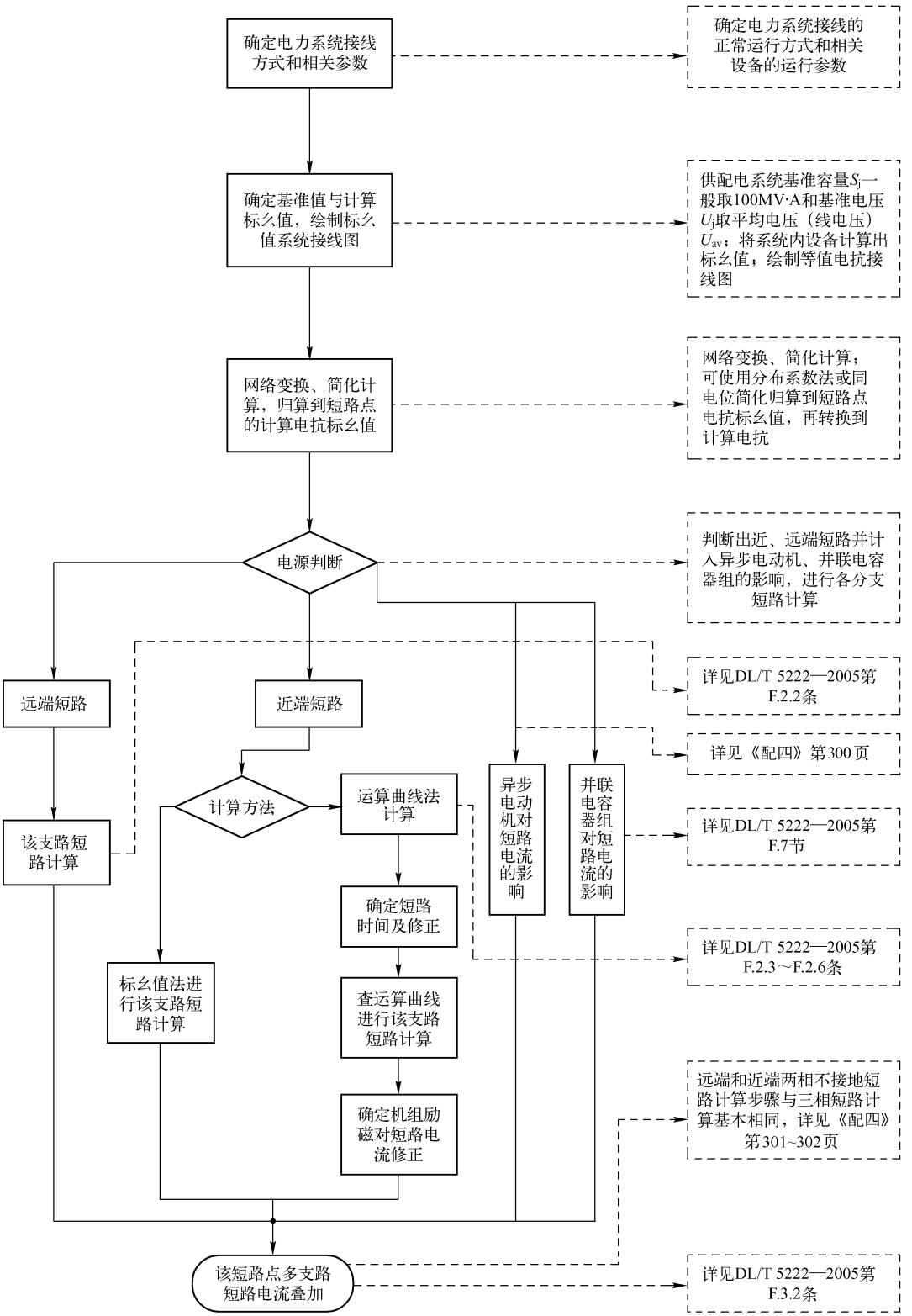


图 6-2　标幺值短路计算流程图

$u_{k(1—2)}\%=10.5$，$u_{k(1—3)}\%=17$，$u_{k(2—3)}\%=6.5$，容量比为 100/50/100，短路电流计算系统图如图 6-3所示。第一电源的最大短路容量 S_{1sd}为 4630 MV·A，最小短路容量 S_{1m}为 1120 MV·A；第二电源的最大短路容量 S_{2sd}为 3630 MV·A，最小短路容量 S_{2m}为 1310 MV·A。110 kV线路的阻抗为 0.4 Ω/km（各元件有效电阻值较小，不予考虑）。请回答下列问题。

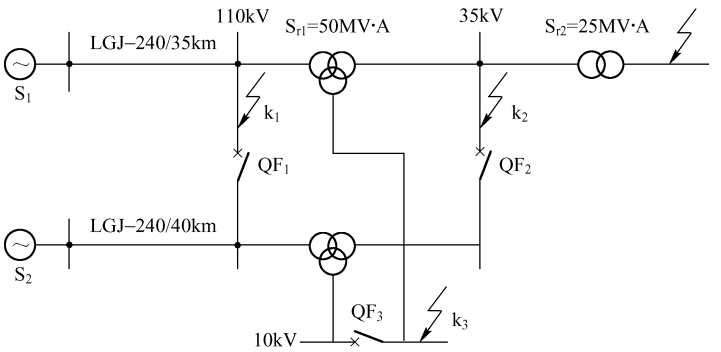


图 6-3　短路电流计算系统图

6-1：主变压器三侧绕组（高、中、低）以 100 MV·A 为基准容量的电抗标幺值应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）0.21，0，0.13　　（B）0.21，0.13，0.34

（C）0.26，0，0.16　　（D）0.42，0，0.26

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页（第三版第 131 页）。

基准值选择：$S_j=100$ MV·A。

三相绕组变压器各侧短路电压百分比为

$$x_{k1}\%=\frac{1}{2}(u_{k(1—2)}+u_{k(3—1)}-u_{k(2—3)})=\frac{1}{2}\times(10.5+17-6.5)\%=10.5\%$$

$$x_{k2}\%=\frac{1}{2}(u_{k(1—2)}+u_{k(2—3)}-u_{k(3—1)})=\frac{1}{2}\times(10.5+6.5-17)\%=0$$

$$x_{k3}\%=\frac{1}{2}(u_{k(2—3)}+u_{k(3—1)}-u_{k(1—2)})=\frac{1}{2}\times(17+6.5-10.5)\%=6.5\%$$

三相绕组变压器各侧标幺值为

$$X_{*1}=\frac{x_{k1}\%}{100}\frac{S_j}{S_{rT}}=\frac{10.5}{100}\times\frac{100}{50}=0.21$$

$$X_{*2}=\frac{x_{k2}\%}{100}\frac{S_j}{S_{rT}}=0$$

$$X_{*3}=\frac{x_{k3}\%}{100}\frac{S_j}{S_{rT}}=\frac{6.5}{100}\times\frac{100}{50}=0.13$$

【知识点解析】

（1）双绕组变压器

当电阻值允许忽略不计时，变压器标幺值为

$$X_{*T}=\frac{u_k\%}{100}\frac{S_j}{S_{rT}}$$

简化公式：基准容量 S_j 为 100 MV·A，可以简化为 $X''_{*T}=u_k\%/S_{rT}$。

（2）三绕组变压器或自耦变压器

如图 6-4 所示。

$$\begin{cases}x_1\%=\dfrac{1}{2}(u_{k12}\%+u_{k13}\%-u_{k23}\%)\\ x_2\%=\dfrac{1}{2}(u_{k12}\%+u_{k23}\%-u_{k13}\%)\\ x_3\%=\dfrac{1}{2}(u_{k13}\%+u_{k23}\%-u_{k12}\%)\end{cases}$$

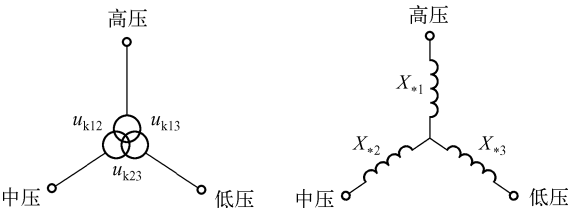


图 6-4　三相三绕组变压器等效变换

$$\begin{cases}u_{k12}\%=x_1\%+x_2\%\\ u_{k23}\%=x_2\%+x_3\%\\ u_{k13}\%=x_1\%+x_3\%\end{cases}$$

式中，$u_{k12}\%$、$u_{k13}\%$、$u_{k23}\%$为每对绕组的阻抗电压百分值。

标幺值计算同双绕组变压器标幺值计算。

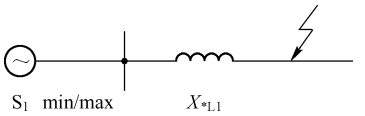
6-2：断路器 QF_1、QF_2、QF_3均断开，k_1 点的最大和最小三相短路电流应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）2.5 kA，1.5 kA　　（B）3.75 kA，2.74 kA

（C）3.92 kA，2.56 kA　　（D）12.2 kA，7.99 kA

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 284 页（第三版第 126~129 页）。



基准值选择：$S_j=100\text{ MV}\cdot\text{A}$，$U_j=115\text{ kV}$，$I_j=0.5\text{ kA}$。

线路标幺值：

$$X_{*L1}=X_{L1}\frac{S_j}{U_j^2}=0.4\times35\times\frac{100}{115^2}=0.106$$

S_1 系统短路容量最大和最小系统标幺值：

$$X_{*S1.max}=\frac{S_j}{S_{S1max}}=\frac{100}{4630}=0.0216$$

$$X_{*S1.min}=\frac{S_j}{S_{S1min}}=\frac{100}{1120}=0.089$$

短路点 k_1 点的最大和最小三相短路电流

$$I''_{k1S1max}=\frac{I_j}{X_{*S1.max}+X_{*L1}}=\frac{0.5}{0.0216+0.106}kA=3.92\,kA$$

$$I''_{k1S1min}=\frac{I_j}{X_{*S1.min}+X_{*L1}}=\frac{0.5}{0.089+0.106}kA=2.56\,kA$$

【知识点解析】

（1）标幺值计算

1）线路标幺值

$$X_*=X\frac{S_j}{U_j^2}=\frac{X}{X_j},\quad R_*=R\frac{S_j}{U_j^2}$$

注：标幺值计算时线路电阻可以忽略。架空线路 x（Ω/km），计算时要乘以线路长度 l（km）。相关线路阻抗可以查《工业与民用配电设计手册》第三版第 128 页表 4-2、表 4-7~表 4-12。

2）标幺值不同基准容量值转换

电力系统短路容量标幺值：

$$S''_{*s}=I_{*s}=\frac{1}{X_{*s}}$$

转换成系统阻抗标幺值：

$$X_{*s}=\frac{S_j}{S''_s}$$

（2）短路电流计算

远端短路的单电源馈电的三相短路电流初始值 I''（I''_k、I''_k）的计算：远离发电机端的（无限大电源容量的）网络发生短路时，即以电源容量为基准的计算电抗 $X_{js}\geqslant 3$ 时，短路电流交流分量在整个短路过程不发生衰减，即 $I''=I_{zt}=I_\infty$（或 $I''_k=I_{0z}=I_k$）。用标幺值计算时，三相短路电流初始值 I''（I''_k、I''_z）按下式计算：

$$I_{zt}=I''=I_\infty=\frac{I_j}{X_{js}}$$

式中，I_{zt}为短路电流 I_s周期分量的有效值（kA）；I_∞为时间为无穷大短路电流周期分量的有效值（kA）。

也可使用下列公式：

$$I_{*k}=S_{*k}=I''_*=\frac{1}{X_{*c}}$$

$$I''_k=I_{*k}I_j=I''_*I_j=\frac{I_j}{X_{*c}}$$

$$S_k=S_{*k}S_j=I_{*k}S_j=I''_*S_j=\frac{S_j}{X_{*c}}$$

式中，I_{*k}为短路电流交流分量有效值的标幺值；S_{*k}为短路容量标幺值；X_{*c}为短路电路总电阻（计算电抗）标幺值；I''_k为短路电流初始值（kA）；S_k为短路容量（MV·A）；I_j为基准电流（kA）；S_j为基准容量（MV·A）。

6-3：假定 QF_1、QF_2断路器断开，QF_3断路器闭合，短路电流计算电抗如图 6-5所示（图中电抗标幺值均以100 MV·A为基准容量），则 k_3 点的三相短路电流为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）6.94 kA　　（B）10.6 kA

（C）24.46 kA　　（D）33.6 kA

答案：【C】

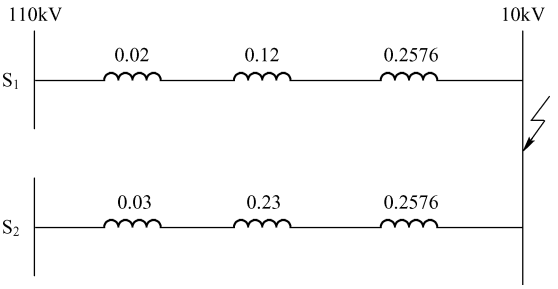


图 6-5　短路电流计算电路图

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页（第三版第 126~129 页）。

基准值选择：$S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j=10.5\ \text{kV}$，$I_j=5.5\ \text{kA}$。

标幺值归算：

$$X_{*1}=0.02+0.12+0.2576=0.3976$$

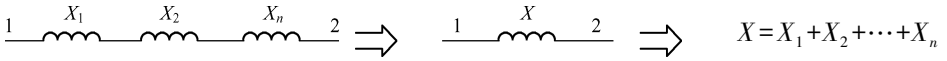
$$X_{*2}=0.03+0.23+0.2576=0.5176$$

短路点 k_3 点的最大和最小三相短路电流：

$$I''_{k3}=\frac{I_j}{X_{*1}}+\frac{I_j}{X_{*2}}=\left(\frac{5.5}{0.3976}+\frac{5.5}{0.5176}\right)\text{kA}=24.46\ \text{kA}$$

【知识点解析】

（1）串联标幺值归算



（2）多等位电源归算

1）按个别变化计算

当网络有几个电源时，可将条件相类似的发电机，按下述情况连接成一组，分别求出至短路点的转移电抗：

① 同型式，且至短路点的电气距离大致相等的发电机。

② 至短路点的电气距离较远，即 $X_{js}>1$ 的同一类型或不同类型的发电机。

③ 直接连接于短路点上的同类型发电机。

2）按同一变化计算

当仅计算任意时间 t 的短路电流周期分量 I_{zt}，各电源的发电机型式、参数相同且距短路点的电气距离大小相等时，可将各电源合并为一个总的计算电抗。

同电位的点可以短接，其间的电抗可以略去。

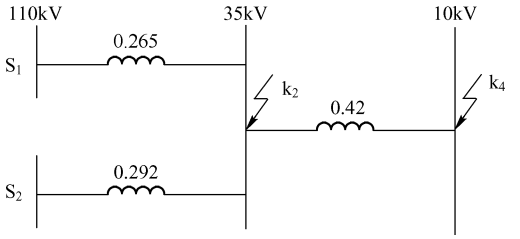
6-4：假设第一电源和第二电源同时工作，QF_1、QF_3断路器断开，QF_2断路器闭合，第一和第二电源 35 kV 侧短路容量分别为 378 MV·A 和 342 MV·A，35 kV 变压器 S_{rT1} 以基准容量 100 MV·A 的电抗标幺值 $X_T=0.42$，则第二电源提供给 k_4 点的三相短路电流和短路容量为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）2.57 kA，70.26 MV·A　　（B）4.63 kA，84.18 MV·A

（C）5.66 kA，102.88 MV·A　　（D）9.84 kA，178.92 MV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页（第三版第 126~129 页）；《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 128 页。



基准值选择：$S_j = 100\,\text{MV}\cdot\text{A}$，$U_{n3} = 10\,\text{kV}$，$U_{j3} = 10.5\,\text{kV}$，$I_{j3} = 5.5\,\text{kA}$。

系统短路容量标幺值计算：

$$X_{*S1} = \frac{S_j}{S_{S1}} = \frac{100}{378} = 0.258$$

$$X_{*S2} = \frac{S_j}{S_{S2}} = \frac{100}{342} = 0.292$$

星-三角转换法标幺值归算与短路电流计算：

$$X_{*4} = X_{*S2} + X_{*T} + \frac{X_{*S2}X_{*T}}{X_{*S1}} = 0.292 + 0.42 + \frac{0.292\times 0.42}{0.265} = 1.175$$

$$I_{k4S1} = \frac{I_j}{X_{*4}} = \frac{5.5}{1.175}\,\text{kA} = 4.68\,\text{kA}$$

$$S_{k4S1} = \frac{S_j}{X_{*4}} = \frac{100}{1.175}\,\text{MV}\cdot\text{A} = 85.11\,\text{MV}\cdot\text{A}$$

分布系数法标幺值归算与短路电流计算：

$$X_\Sigma = X_3 + \frac{X_1X_2}{X_1+X_2} = 0.42 + \frac{0.265\times 0.292}{0.265+0.292} = 0.559$$

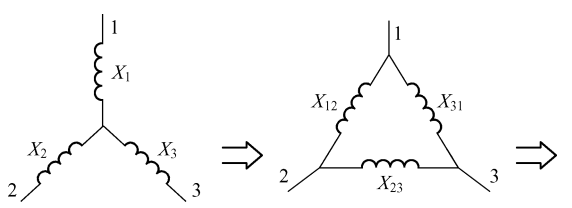
$$C_2 = \frac{X_1}{X_1+X_2} = \frac{0.265}{0.265+0.292} = 0.48$$

$$I''_{k4S1} = C_2\frac{I_j}{X_\Sigma} = \frac{0.48\times 5.5}{0.559}\,\text{kA} = 4.723\,\text{kA}$$

$$S_{k4S1} = C_2\frac{S_j}{X_\Sigma} = \frac{0.48\times 100}{0.559}\,\text{MV}\cdot\text{A} = 85.867\,\text{MV}\cdot\text{A}$$

【知识点解析】

（1）等电位归算——星-三角转换法短路电流计算



$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1X_2}{X_3}$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2X_3}{X_1}$$

$$X_{31} = X_3 + X_1 + \frac{X_3X_1}{X_2}$$

（2）多电源时分布系数法短路电流计算

求得短路点到各电源间的总组合电抗以后，为了求出短路点到各电源的转移电抗及网络内电流分布，可利用分布系数 C_n 将短路处的总电流当作单位电流，则可求得每支路中电流对单位电流的比值，这些比值称为分布系数，用符号 C_1，C_2，…，C_n 代表。任一电源 n 和短路点 d 间的转移电抗 X_{nd}，可由该电源的分布系数 C_n 和网络的总组合电抗 X_Σ 来决定，即

$$X_{nd}=\frac{X_\Sigma}{C_n}$$

任一电源供给的短路电流 I_z，也可由该电源的分布系数 C_n 和短路点的总短路电流 I_d 来决定，即

$$I_z=C_nI_d$$

图 6-6 所示为分布系数法，对于一个点，其所有支路的电流分布系数之和为 1，这就很容易判别分布系数是否计算正确。

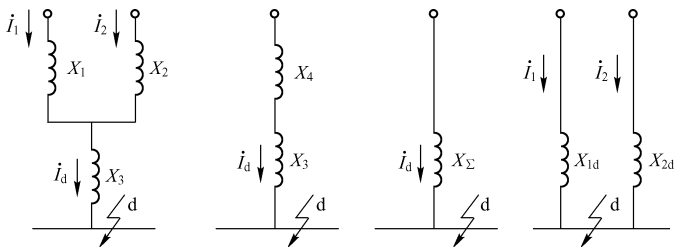


图 6-6　求分布系数示图

$$\Rightarrow\quad X_4=\frac{X_1X_2}{X_1+X_2}$$

$$X_\Sigma=X_3+X_4=X_3+\frac{X_1X_2}{X_1+X_2}$$

$$C_1=\frac{X_4}{X_1}=\frac{X_2}{X_1+X_2}$$

$$C_2=\frac{X_4}{X_2}=\frac{X_1}{X_1+X_2}$$

$$\Rightarrow\quad \begin{matrix}X_{1d}=\dfrac{X_\Sigma}{C_1} & I_1=C_1I_d\\ X_{2d}=\dfrac{X_\Sigma}{C_2} & I_2=C_2I_d\end{matrix}\quad\Rightarrow\quad C_1+C_2=\frac{X_2}{X_1+X_2}+\frac{X_1}{X_1+X_2}=\frac{X_1+X_2}{X_1+X_2}=1$$

注：两路电源的分布系数法等效于星形-三角形转换。

例题 6-5~6-7：某系统接线如图 6-7 所示，其已知参数均列在图上，发电机运算曲线表见表 6-1（短路电流计算，不计各元件电阻）。请回答下列问题。

表 6-1　汽轮发电机运算曲线数字表

X_e \ t/s / I_*	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.12	8.963	8.603	7.186	6.400	5.220	4.252	4.006	3.821	3.344	2.795	2.512
0.14	7.718	7.467	6.441	5.839	4.878	4.040	3.829	3.673	3.280	2.808	2.526
0.16	6.763	6.545	5.660	5.146	4.336	3.649	3.481	3.359	3.060	2.706	2.490
0.18	6.020	5.844	5.122	4.697	4.016	3.429	3.288	3.186	2.944	2.659	2.476
0.20	5.432	5.280	4.661	4.297	3.715	3.217	3.099	3.016	2.825	2.607	2.462
0.22	4.938	4.813	4.296	3.988	3.487	3.052	2.951	2.882	2.729	2.561	2.444

（续）

X_e \ t/s / I_*	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.24	4.526	4.421	3.984	3.721	3.286	2.904	2.816	2.758	2.638	2.515	2.425
0.26	4.178	4.088	3.714	3.486	3.106	2.769	2.693	2.644	2.551	2.467	2.404
0.28	3.872	3.705	3.472	3.274	2.939	2.641	2.575	2.534	2.464	2.415	2.378
0.30	3.603	3.536	3.255	3.081	2.785	2.520	2.463	2.429	2.379	2.360	2.347
0.32	3.368	3.310	3.063	2.909	2.646	2.410	2.360	2.332	2.299	2.306	2.316
0.34	3.159	3.108	2.891	2.754	2.519	2.308	2.264	2.241	2.222	2.252	2.283
0.34	3.159	3.108	2.891	2.754	2.519	2.308	2.264	2.241	2.222	2.252	2.283
0.36	2.975	2.930	2.736	2.614	2.403	2.213	2.175	2.156	2.149	2.109	2.250
0.38	2.811	2.770	2.597	2.487	2.297	2.216	2.093	2.077	2.081	2.148	2.217
0.40	2.664	2.628	2.471	2.372	2.199	2.045	2.017	2.004	2.017	2.099	2.184
0.42	2.531	2.499	2.357	2.267	2.110	1.970	1.946	1.936	1.956	2.052	2.151

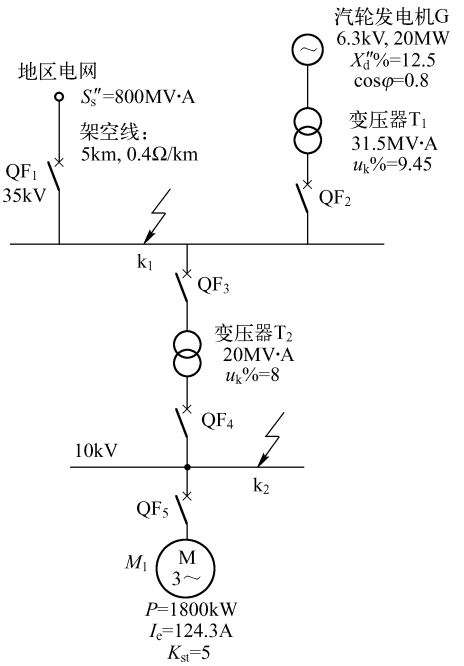


图 6-7　系统接线

6-5：当 QF_3 断开，QF_1、QF_2 合闸时，k_1 点三相短路时的超瞬态短路电流周期分量有效值 I_{k1}^* 为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）18.2 kA　　（B）7.88 kA　　（C）7.72 kA　　（D）7.32 kA

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 289 页（第三版第 126~129 页、第 137 页）或《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

附录 F。

基准值选择：$S_j = 100\,\text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j = 37\,\text{kV}$，$I_j = 1.56\,\text{kA}$。

标幺值计算：

线路标幺值 $X_{*L} = X_L \dfrac{S_j}{U_j^2} = 0.4\times5\times\dfrac{100}{37^2} = 0.146$

系统短路容量标幺值 $X_{*S} = \dfrac{S_j}{S_S} = \dfrac{100}{800} = 0.125$

变压器标幺值 $X_{*T1} = \dfrac{x_{T1}\%}{100}\dfrac{S_j}{S_{rT1}} = \dfrac{9.45}{100}\times\dfrac{100}{31.5} = 0.3$

发电机标幺值 $X_{*G} = x_d \dfrac{S_j}{S_G} = 12.5\%\times\dfrac{100}{20/0.8} = 0.5$

折算到发电机容量为基准值的计算电抗：

$$S_G = \frac{P_G}{\cos\varphi} = \frac{20}{0.8}\,\text{MV}\cdot\text{A} = 25\,\text{MV}\cdot\text{A}$$

$$I_{rj1} = \frac{P_G}{\sqrt{3}U_{j1}\cos\varphi} = \frac{20}{\sqrt{3}\times37\times0.8}\,\text{kA} = 0.39\,\text{kA}$$

$$X_{c1} = (X_{*G} + X_{*T1})\frac{S_G}{S_j} = (0.3+0.5)\times\frac{25}{100} = 0.2$$

计算电抗为 0.2 时，查题目中发电机运算曲线表，得短路电流标幺值：

$$I_{*1} = 5.432$$

系统侧短路电流计算：

$$I''_{k1S1} = \frac{I_j}{X_{*L}+X_{*S}} = \frac{1.56}{0.146+0.125}\,\text{kA} = 5.756\,\text{kA}$$

发电机短路电流计算

$$I''_{0k1} = I_{*1}I_{rj1} = 5.432\times0.39\,\text{kA} = 2.118\,\text{kA}$$

短路点 k_1 点处短路电流归算：

$$I''_{k1} = I''_{k1S1} + I''_{0k1} = (5.756+2.118)\,\text{kA} = 7.874\,\text{kA}$$

【知识点解析】

用运算曲线计算交流分量的步骤如下：

1）确定计算电抗 X_{js}。在使用运算曲线时，应将各电源对短路点的等值电抗归算到以本电源等值发电机的额定容量为基准容量的标幺值，这个电抗称为计算电抗 X_{js}（详见 6.4 节）。

2）确定短路时间 t。（需要时间常数引起的修正）

3）根据求得的各个电源对短路点的计算电抗 X_{js} 查相应的 t 秒运算曲线，或查相对应的发电机运算曲线数字表，即可求得交流分量的标幺值。（需要发电机励磁参数修正）

4）求 t 秒短路电流交流分量的有名值。由运算曲线查得的短路电流标幺值 I_* 乘以相应电源的基准电流 $I_{r.j}$（发电机容量为基准容量对应的基准电流），即得到该分支短路电流交流分量的有名值

$$I_{kt}=I_{*}I_{r.j}$$

发电机运算曲线图表可以在《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F 图 F.1～图 F.6；《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 285～299 页；《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 130 页；《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 209 页对应图表中查出。

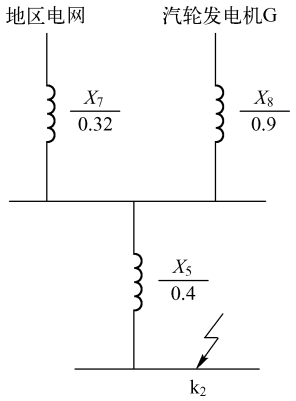


图 6-8　变换简化后的系统接线 1

6-6：当 QF_5 断开，QF_1～QF_4 合闸时，假设以基准容量 $S_j=100\,MV\cdot A$、基准电压 $U_j=10.5\,kV$ 计算并变换简化后的网络电抗如图 6-8 所示。当 k_2 点三相短路时，由地区电网提供的超瞬态短路电流周期分量有效值 I_{k2} 为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）2.24 kA　　（B）6.40 kA

（C）7.64 kA　　（D）8.59 kA

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页（第三版第 126～129 页）；《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 128 页。

基准值选择：$S_j=100\,MV\cdot A$，$U_j=10.5\,kV$，$I_j=5.5\,kA$。

星-三角法网络标幺值网络归算：

$$X=X_7+X_5+\frac{X_7X_5}{X_8}=0.32+0.4+\frac{0.32\times0.4}{0.9}=0.862$$

分布系数法标幺值网络归算：

$$C_7=\frac{X_8}{X_7+X_8}=\frac{0.9}{0.32+0.9}=0.738$$

$$X=\frac{X_\Sigma}{C_7}=\frac{0.4+\dfrac{0.32\times0.9}{0.32+0.9}}{0.738}=0.862$$

短路点 k_2 点三相短路电流计算：

$$I''_{k2}=\frac{I_j}{X}=\frac{5.5}{0.862}\,kA=6.40\,kA$$

6-7：当 QF_5 断开，QF_1～QF_4 合闸时，假设以基准容量 $S_j=100\,MV\cdot A$、基准电压 $U_j=10.5\,kV$ 计算并变换简化后的网络电抗如图 6-9 所示。当 k_2 点两相不接地短路时，总的超瞬态电流周期分量有效值 I_{2k2} 为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

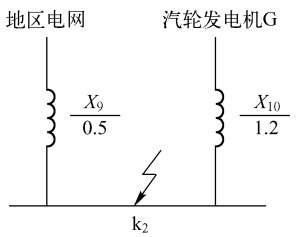


图 6-9　变换简化后的系统接线 2

（A）9.5 kA　　（B）13.9 kA

（C）14.9 kA　　（D）16 kA

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 301 页（第三版第 126～129 页、第 137 页）。

基准值选择：$S_j=100\,MV\cdot A$，$U_j=10.5\,kV$，$I_j=5.5\,kA$。

地区电网两相不接地短路电流计算：

$$I''_{k2S1}=0.866I''_{k3S1}=0.866\times\frac{I_j}{X_9}=0.866\times\frac{5.5}{0.5}\text{kA}=9.526\text{kA}$$

汽轮发电机两相不接地短路电流计算：

$$X_{c1}=X_{10}\frac{S_G}{S_j}=1.2\times\frac{25}{100}=0.3$$

因为 $X_{c1}=0.3<0.6$，所以按照 $2X_{c1}=0.6$ 查运算曲线表 $I_{*1}=1.748$。发电机额定电流 $I_{rj1}=\dfrac{P_G}{\sqrt{3}U_{j1}\cos\varphi}=\dfrac{20}{\sqrt{3}\times10.5\times0.8}\text{kA}=1.375\text{kA}$。

$$I''_{k2S2}=\sqrt{3}I_{*1}I_{rj1}=\sqrt{3}\times1.748\times1.375\text{kA}=4.163\text{kA}$$

短路点 k_1 点处两相不接地短路电流归算：

$$I''_{k2}=I''_{k2s1}+I''_{k2s2}=(9.526+4.163)\text{kA}=13.69\text{kA}$$

【知识点解析】

（1）远端短路两相短路超瞬态电流的计算

将两相短路超瞬态电流计算公式与三相短路超瞬态电流计算公式相除，得

$$\frac{I''_{k2}}{I''_{k3}}=\frac{\sqrt{3}}{2}=0.866$$

而 i_pI_p 均正比于 I''_k，故

$$I''_{k2}=0.866I''_{k3};i_{pk2}=0.866i_{pk3};I_{pk2}=0.866I_{pk3}$$

两相短路稳态电流 I_{k2} 与三相短路稳态电流 I_{k3} 的比值关系，视短路点与电源的距离远近而定。

（2）运算曲线法发电机出口两相不接地短路电流的计算

1）发电机出口处发生短路时

$$I_{k2}=1.5I_{k3}(\text{kA})$$

2）远离短路点时，即 $X_{*c}>3$ 时，因 $I_k=I''_k$，故

$$I_{k2}=0.866I_{k3}(\text{kA})$$

3）一般可这样估算

$$X_{*c}>0.6\text{ 时},I_{k2}<I_{k3}$$
$$X_{*c}\approx0.6\text{ 时},I_{k2}=I_{k3}$$
$$X_{*c}<0.6\text{ 时},I_{k2}>I_{k3}$$

在靠近发电机端短路时，两相短路电流的交流分量亦可利用三相短路的运算曲线进行近似计算，其方法是以两倍的 X_{*c}（X_{*c} 为计算三相短路电流用的短路电路电抗的标幺值）作横坐标，从运算曲线上查得 I_{*z}，然后按下式求出两相短路电流在某一时刻 t 的交流分量有名值 I_{zk2}。

$$I_{zk2}=\sqrt{3}I_{*z}I_{r\Sigma}\quad(\text{kA})$$

式中，$I_{r\Sigma}$ 为有限电源容量系统向短路点馈送短路电流时所有发电机额定电流的总和（kA）。

例题 6-8~6-11：某企业新建 35/10 kV 变电所，短路电流计算系统如图 6-10 所示，其已知参数均列在图上，第一电源为无穷大容量，第二电源为汽轮发电机，其运算曲线数字表见表 6-2，容量为 30 MW，功率因素为 0.8，超瞬态电抗值 $x''_d\%=13.65\%$，两路电源同时供电，两台降压变

压器并列运行，10 kV 母线上其中一回馈线给一台 1500 kW 的电动机供电。电动机效率为 0.95，起动电流为 6，电动机超瞬态电抗相对值为 0.156。35 kV 架空线路的电抗为 0.37 Ω/km（短路电流计算，不计算元件电阻）。请回答下列问题。

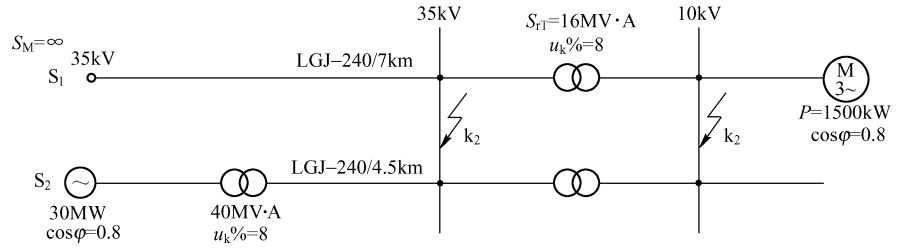


图 6–10　短路电流计算系统

表 6–2　汽轮发电机运算曲线数字表

t/s / X_c / I_*	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5
0.12	8.963	8.603	7.186	6.400	5.220	4.252	4.006
0.14	7.718	7.467	6.441	5.839	4.878	4.040	3.829
0.16	6.763	6.545	5.660	5.146	4.336	3.649	3.481
0.18	6.020	5.844	5.122	4.697	4.016	3.429	3.288
0.20	5.432	5.280	4.661	4.297	3.715	3.217	3.099
0.22	4.938	4.813	4.296	3.988	3.487	3.052	2.951
0.24	4.526	4.421	3.984	3.721	3.286	2.904	2.816
0.26	4.178	4.088	3.714	3.486	3.106	2.769	2.693
0.28	3.872	3.705	3.472	3.274	2.939	2.641	2.575
0.30	3.603	3.536	3.255	3.081	2.785	2.520	2.463
0.32	3.368	3.310	3.063	2.909	2.646	2.410	2.360
0.34	3.159	3.108	2.891	2.754	2.519	2.308	2.264
0.36	2.975	2.930	2.736	2.614	2.403	2.213	2.175
0.38	2.811	2.770	2.597	2.487	2.297	2.126	2.093
0.40	2.664	2.628	2.471	2.372	2.199	2.045	2.017
0.42	2.531	2.499	2.357	2.267	2.110	1.970	1.946
0.44	2.411	2.382	2.253	2.170	2.027	1.900	1.879
0.46	2.302	2.275	2.157	2.082	1.950	1.835	1.817
0.48	2.203	2.178	2.069	2.000	1.879	1.774	1.759
0.50	2.111	2.088	1.988	1.924	1.813	1.717	1.704
0.55	1.913	1.894	1.810	1.757	1.665	1.589	1.581
0.60	1.748	1.732	1.662	1.617	1.539	1.478	1.474
0.65	1.610	1.596	1.535	1.497	1.431	1.382	1.381

（续）

X_c \ t/s，I_*	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5
0.70	1.492	1.479	1.426	1.393	1.336	1.297	1.298
0.80	1.301	1.291	1.249	1.223	1.179	1.154	1.159
0.90	1.153	1.145	1.110	1.089	1.055	1.039	1.047
1.00	1.035	1.028	0.999	0.981	0.954	0.945	0.954
1.50	0.686	0.682	0.665	0.656	0.644	0.650	0.662
2.00	0.512	0.510	0.498	0.492	0.486	0.496	0.508

6-8：k_1点三相短路时，短路点处第一电源提供的短路电流和短路容量为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）2.65 kA，264.6 MV·A　　（B）8.25 kA，529.1 MV·A

（C）8.72 kA，529.2 MV·A　　（D）10.64 kA，684.54 MV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 284 页（第三版第 126~129 页、第 137 页）；《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 128 页式（4-15）。

基准值选择：$S_j=100\,\text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j=37\,\text{kV}$，$I_j=1.56\,\text{kA}$。

标幺值计算：

系统变压器 T_1：$X_{*T1}=\dfrac{x_{T1}\%}{100}\dfrac{S_j}{S_{rT1}}=\dfrac{8}{100}\times\dfrac{100}{16}=0.5$，$X_2=\dfrac{X_{*T1}}{2}=\dfrac{0.5}{2}=0.25$

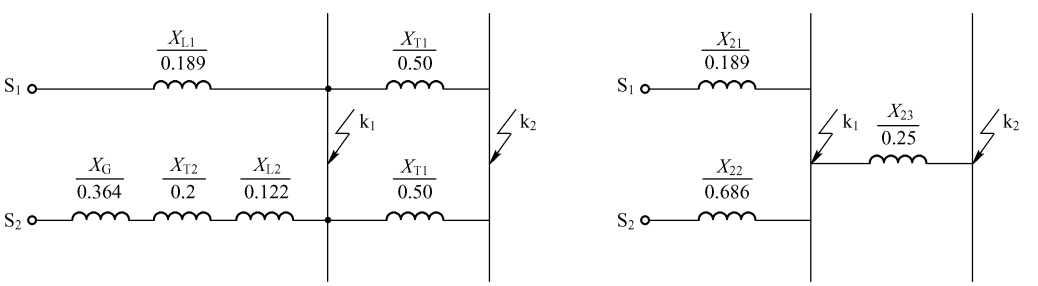
第二电源侧变压器 T_2：$X_{*T2}=\dfrac{x_{T2}\%}{100}\dfrac{S_j}{S_{rT2}}=\dfrac{8}{100}\times\dfrac{100}{40}=0.2$

第二电源线路：$X_{*L2}=X_{L2}\dfrac{S_j}{U_{j1}^2}=0.37\times4.5\times\dfrac{100}{37^2}=0.122$

发电机：$X_{*G}=x_d\dfrac{S_j}{S_G}=13.65\%\times\dfrac{100}{37.5}=0.364$

第一电源：$X_{21}=X_{*L1}=0.189$

第二电源：$X_{22}=X_{*T2}+X_{*L2}+X_{*G}=0.2+0.122+0.364=0.686$



星-三角转换网络归算：

$$X_{*31}=X_{*21}+X_{*23}+\frac{X_{*21}X_{*23}}{X_{*22}}=0.189+0.25+\frac{0.189\times0.25}{0.686}=0.508$$

$$X_{*32}=X_{*22}+X_{*23}+\frac{X_{*22}X_{*23}}{X_{*21}}=0.686+0.25+\frac{0.686\times0.25}{0.189}=1.843$$

分布系数法网络归算：

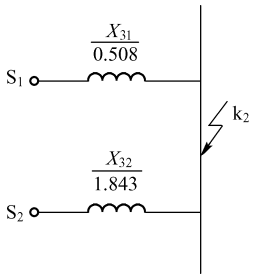
$$X_{*\Sigma}=(X_{*21}\parallel X_{*22})+X_{*23}=0.398$$

$$C_1=X_{*22}/(X_{*21}+X_{*22})=0.784$$

$$C_2=X_{*21}/(X_{*21}+X_{*22})=0.216$$

$$X_{*31}=\frac{X_{*\Sigma}}{C_1}=\frac{0.398}{0.784}=0.508$$

$$X_{*32}=\frac{X_{*\Sigma}}{C_2}=\frac{0.398}{0.216}=1.843$$



短路点 k_1 点三相短路时，短路点处第一电源提供的短路电流和短路容量为

$$I''_{k1S1}=\frac{I_j}{X_{*21}}=\frac{1.56}{0.189}\text{kA}=8.248\text{ kA}$$

$$S_{k1S1}=\frac{S_j}{X_{*21}}=\frac{100}{0.189}\text{MV}\cdot\text{A}=529.1\text{ MV}\cdot\text{A}$$

6-9：k_2 点三相短路时，短路点处第一电源提供的短路电流和短路容量为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）7.38 kA，119.75 MV·A　　（B）10.83 kA，196.85 MV·A

（C）11.3 kA，187.3 MV·A　　（D）12.6 kA，229.15 MV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页（第三版第 126～129 页）。

基准值选择：$S_j=100\text{ MV}\cdot\text{A}$，$U_j=10.5\text{ kV}$，$I_j=5.5\text{ kA}$。

短路点 k_2 点三相短路时，短路点处第一电源提供的短路电流和短路容量为

$$I''_{k2S1}=\frac{I_j}{X_{31}}=\frac{5.5}{0.508}\text{kA}=10.83\text{ kA}$$

$$S_{k1S1}=\frac{S_j}{X_{31}}=196.85\text{ MV}\cdot\text{A}$$

6-10：k_1 点三相短路时（0 s），短路点处第二电源提供的短路电流和短路容量为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）0.4 kA，25.54 MV·A　　（B）2.02 kA，202 MV·A

（C）2.41 kA，158.58 MV·A　　（D）24.93kA，309 MV·A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 289 页（第三版第 126～129 页、第 137 页）。

标幺值计算与归算详见例题 6-8。

发电机容量：$S_G=\dfrac{P_G}{\cos\varphi}=\dfrac{30}{0.8}\text{MV}\cdot\text{A}=37.5\text{MV}\cdot\text{A}$

归算到发电机容量的计算电抗：$X_{c1}=X_{22}\dfrac{S_G}{S_j}=0.686\times\dfrac{37.5}{100}=0.257$

查汽轮发电机运算曲线表（0s）时（插值法），$I_{*1}=4.23$

短路点 k_1 点三相短路时（0s），短路点处第二电源提供的短路电流和短路容量为

$$I_{rj}=\frac{P_G}{\sqrt{3}U_G\cos\varphi}=\frac{30}{\sqrt{3}\times37\times0.8}\text{kA}=0.585\text{kA}$$

$$I_{0k1}=I_{*1}I_{rj}=4.23\times0.585\text{kA}=2.475\text{kA}$$

$$S_{0k1}=\sqrt{3}I_{0k1}U_{j1}=\sqrt{3}\times2.475\times37\text{MV}\cdot\text{A}=158.58\text{MV}\cdot\text{A}$$

6-11：k_2 点三相短路时（0s），短路点处第二电源提供的短路电流和短路容量为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）2.32kA，41.8MV·A　　（B）3.03kA，55.11MV·A

（C）4.14kA，75.3MV·A　　（D）6.16kA，112MV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 289 页（第三版第 126~129 页、第 137 页）。

标幺值计算与归算详见例题 6-8。

归算到发电机容量的计算电抗：$X_{c2}=X_{32}\dfrac{S_G}{S_j}=1.843\times\dfrac{37.5}{100}=0.691$

查汽轮发电机运算曲线表（0s）时（插值法），$I_{*2}=1.471$

短路点 k_2 点三相短路时（0s），短路点处第二电源提供的短路电流和短路容量为

$$I_{rj}=\frac{P_G}{\sqrt{3}U_G\cos\varphi}=\frac{30}{\sqrt{3}\times10.5\times0.8}\text{kA}=2.062\text{kA}$$

$$I_{0k2}=I_{*2}I_{rj}=1.492\times2.062\text{kA}=3.03\text{kA}$$

$$S_{0k2}=\sqrt{3}I_{0k2}U_{j2}=\sqrt{3}\times3.07\times10.5\text{MV}\cdot\text{A}=55.11\text{MV}\cdot\text{A}$$

例题 6-12~6-15：某工厂的供电系统如图 6-11 所示，有两台 50MV·A，110/10kV 变压器，$u_k\%=10.5\%$，并列运行，接入 110kV 电网系统，系统短路容量 $S''_s=\infty$，送出线上装设限流电抗器，正常通过电抗器的负荷电流为 0.8kA，功率因数为 $\cos\varphi=0.8$，取基准容量为 $S_j=100\text{MV}\cdot\text{A}$。请回答以下问题。

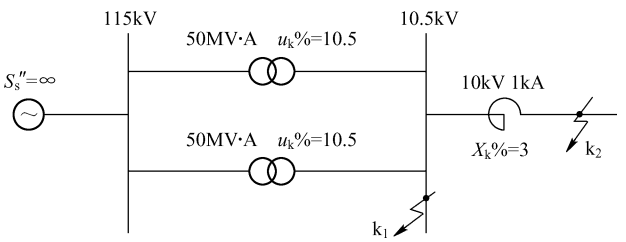


图 6-11　某供电系统

6-12：10 kV 母线的 k_1 点发生三相短路，短路电流周期分量的起始有效值为下列何值？

（A）20.99 kA，852.38 MV·A　　（B）37.78 kA，912.38 MV·A

（C）53.53 kA，952.38 MV·A　　（D）52. 38 kA，952.38 MV·A

答案：【D】

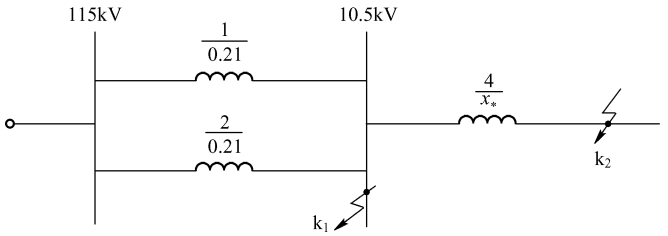
解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 284 页（第三版第 126~129 页、第 137 页）。

基准值选择：$S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j=10.5\ \text{kV}$，$I_j=5.5\ \text{kA}$。

标幺值计算：

变压器标幺值　$X_{*T}=\dfrac{x_T\%}{100}\dfrac{S_j}{S_{rT1}}=\dfrac{10.5}{100}\times\dfrac{100}{50}=0.21$

标幺值归算　$X_\Sigma=\dfrac{X_{*T}}{2}=\dfrac{0.21}{2}=0.105$



短路点 k_1 点三相短路时，短路点处第一电源提供的短路电流和短路容量为

$$I''_{k1}=\frac{I_j}{X_\Sigma}=\frac{5.5}{0.105}\ \text{kA}=52.38\ \text{kA}$$

$$S_k=\frac{S_j}{X_\Sigma}=\frac{100}{0.105}\ \text{MV}\cdot\text{A}=952.38\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

6-13：10 kV 送出线的限流电抗为 $x_k\%=3$，额定电压为 10 kV，额定电流为 1 kA，则限流电抗标幺值为下列何值？（基准容量 $S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$）

（A）$X_{*k}=0.11$　　（B）$X_{*k}=0.157$　　（C）$X_{*k}=0.262$　　（D）$X_{*k}=0.31$

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页（第三版第 128 页）。

限流电抗标幺值为

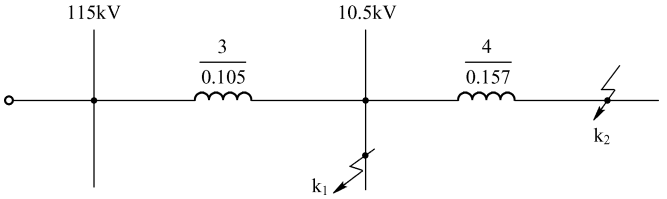
$$X_{*k}=\frac{x_k\%}{100}\frac{U_r}{I_r}\frac{I_j}{U_j}=\frac{3}{100}\times\frac{10}{1}\times\frac{5.5}{10.5}=0.157$$

6-14：10 kV 送出线的电抗器后 k_2 点发生三相短路，冲击电流峰值为下列何值？

（A）20.99 kA　　（B）37.78 kA　　（C）53.53 kA　　（D）58.53 kA

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 289 页（第三版第 126~129 页、第 137 页）。



基准值：$S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j=10.5\ \text{kV}$，$I_j=5.5\ \text{kA}$。

标幺值和网络归算：

$$X_\Sigma=X_{*3}+X_{*k}=0.105+0.157=0.262$$

短路点 k_2 点发生三相短路电流：

$$I''_k=\frac{I_j}{X_\Sigma}=\frac{5.5}{0.262}\text{kA}=20.99\ \text{kA}$$

因系统短路容量为无穷大，短路点 k_2 点发生三相短路冲击电流峰值为

$$i_p=2.55I''_k=2.55\times20.99\ \text{kA}=53.53\ \text{kA}$$

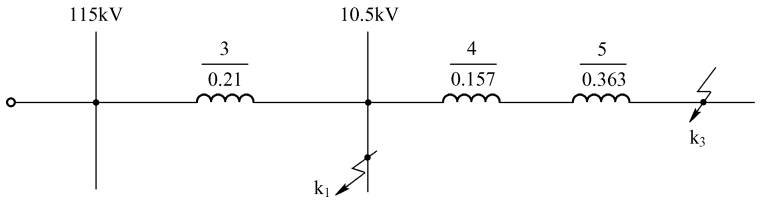
6-15：该送电线路电缆长度为 5 km（电抗器到线路末端距离），单位电抗为 0.08 Ω/km，若该线路采用过电流保护作为相间故障后备保护，则校验该后备保护灵敏度采用的短路电流为下列哪项数值？

（A）6.52 kA　　（B）7.53 kA　　（C）18.18 kA　　（D）20.99 kA

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 284 页、第 550 页（第三版第 126~129 页、第 137 页、第 152 页）。

后备保护采用最小运行方式下送电线路末端两相短路稳态电流。系统正常运行方式为两台变压器并列运行，最小运行方式为一台主变压器运行一台变压器停运的情况。



基准值：$S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$，$U_{j1}=10.5\ \text{kV}$，$I_{j1}=5.5\ \text{kA}$。

标幺值和网络归算：

线路电抗标幺值：$X_{*L}=xl/X_j=5\times0.08/1.103=0.363$

$$X_\Sigma=X_{*1}+X_{*k}+X_{*L}=0.21+0.157+0.363=0.73$$

短路点 k_3 点送电线路末端的两相短路电流为

$$I''_{2k3\cdot\min}=\frac{I_j}{X_\Sigma}=\frac{5.5}{0.73}\text{kA}=7.53\ \text{kA}$$

$$I''_{2k2\cdot\min}=0.866I''_{2k3\cdot\min}=0.866\times7.53\ \text{kA}=6.52\ \text{kA}$$

例题 6-16~6-20：某一供电系统的变电所分别由电网及发电厂各输出一回 110 kV 电源，在 110 kV 母线并网运行，变电所内设一台 31.5 MV·A、110/10 kV、$u_k\%=10.5$ 变压器，电网各参数如图 6-12 所示，汽轮发电机运算曲线数字表使用《工业与民用供配电设计手册》

第四版（上册）第 290 页表 4.6-6（第三版第 143 页表 4-15）。

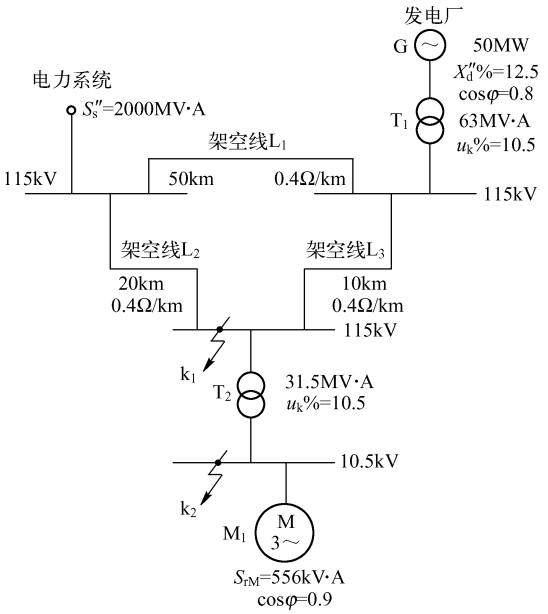


图 6-12　某供电系统及其参数

6-16：110 kV 母线的 k_1 点发生三相短路，由火力发电厂提供的 0 s 短路电流周期分量的起始有效值为下列何值？（使用星-三角转换方法将网络变换简化）

（A）5.11 kA　　（B）4.48 kA　　（C）1.4202 kA　　（D）1.284 kA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 289 页（第三版第 126～129 页、第 137 页）。

基准值：$S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$；$U_j=115\ \text{kV}$，$I_j=0.5\ \text{kA}$。

标幺值计算：

$$x_1=X_{*s}=\frac{S_j}{S''_s}=\frac{100}{2000}=0.05$$

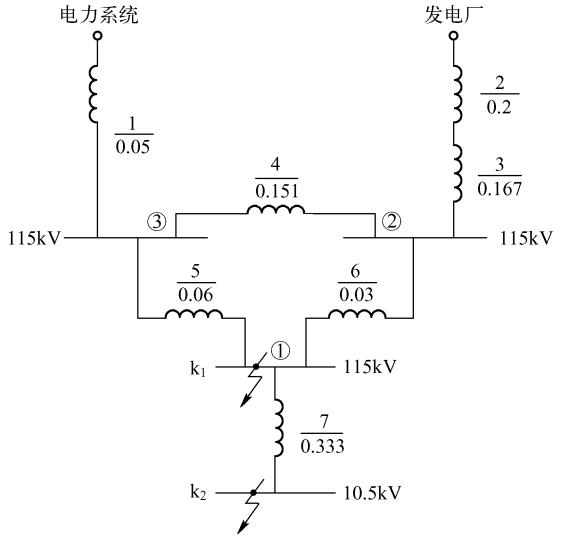
$$x_2=X_{*G}=\frac{x''_d\%}{100}\frac{S_j}{S_r}=\frac{12.5}{100}\times\frac{100}{\frac{50}{0.8}}=0.2$$

$$x_3=X_{*T1}=\frac{u_k\%}{100}\frac{S_j}{S_r}=\frac{10.5}{100}\times\frac{100}{63}=0.167$$

$$x_4=X_{*L1}=X\frac{S_j}{U_j^2}=0.4\times50\times\frac{100}{115^2}=0.151$$

$$x_5=X_{*L2}=X\frac{S_j}{U_j^2}=0.4\times20\times\frac{100}{115^2}=0.06$$

$$x_6=X_{*L3}=X\frac{S_j}{U_j^2}=0.4\times10\times\frac{100}{115^2}=0.03$$

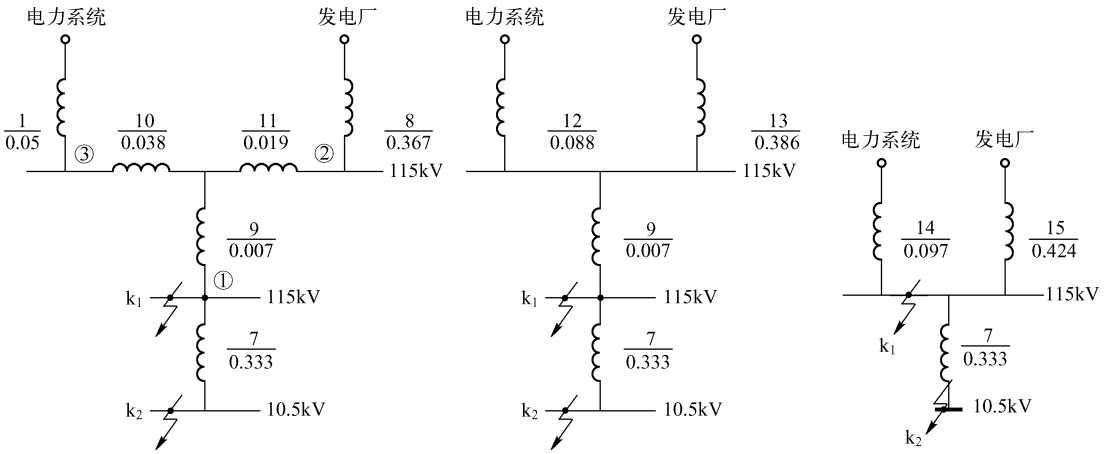


$$x_7 = X_{*T2} = \frac{u_k\%}{100}\frac{S_j}{S_r} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{31.5} = 0.333$$

星-三角转换法网络归算：

将 x_2、x_3合并，得

$$x_8 = x_2 + x_3 = 0.2 + 0.167 = 0.367$$



将 x_4、x_5、x_6组成的△形变换成Y形，得

$$x_9 = \frac{x_5 x_6}{x_4 + x_5 + x_6} = \frac{0.06 \times 0.03}{0.151 + 0.06 + 0.03} = 0.007$$

$$x_{10} = \frac{x_4 x_5}{x_4 + x_5 + x_6} = \frac{0.151 \times 0.06}{0.151 + 0.06 + 0.03} = 0.038$$

$$x_{11} = \frac{x_4 x_6}{x_4 + x_5 + x_6} = \frac{0.151 \times 0.03}{0.151 + 0.06 + 0.03} = 0.019$$

$$x_{12} = x_1 + x_{10} = 0.05 + 0.038 = 0.088$$

$$x_{13} = x_8 + x_{11} = 0.367 + 0.019 = 0.386$$

将 x_9、x_{12}、x_{13}网络化简，得

$$x_{14} = x_{12} + x_9 + \frac{x_{12} x_9}{x_{13}}$$

$$= 0.088 + 0.007 + \frac{0.088 + 0.007}{0.386} = 0.097$$

$$x_{15} = x_{13} + x_9 + \frac{x_{13} x_9}{x_{12}}$$

$$= 0.386 + 0.007 + \frac{0.386 \times 0.007}{0.088} = 0.424$$

由于使用运算曲线法计算，将标幺值转换为发电机容量为基准的计算电抗，得

$$X_{*c} = X_{15}\frac{S_{Gr}}{S_j} = 0.424 \times \frac{62.5}{100} = 0.265 < 3 \text{（按照有限容量计算）}$$

查汽轮发电机运算曲线数字表表 4.6-6（见《配四》第 290 页）得计算电抗 X_{*c} =

0.265，0 s 时的短路电流标幺值 $I_*=4.089$（插值法）。

110 kV 侧发电机容量基准电流为

$$I_r=\frac{62.5}{\sqrt{3}\times115}\text{ kA}=0.314\text{ kA}$$

110 kV 母线的 k_1 点发生三相短路，发电厂提供的 0 s 时短路电流周期分量的起始有效值为

$$I''_G=I_*I_r=4.089\times0.314\text{ kA}=1.284\text{ kA}$$

6-17：110 kV 母线的 k_1 点发生两相不接地短路，短路电流周期分量的起始有效值为下列何值？（火力发电厂侧按照 0 s 时的短路电流计算）

（A）5.11 kA　　（B）4.48 kA　　（C）5.569 kA　　（D）0.716 kA

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 302 页（第三版第 126~129 页、第 152 页）。

标幺值计算和网络简化同例题 6-16 解答。

短路点 k_1 点发生短路时由电力系统提供的短路电流计算：

三相短路电流　$I''_{d1}=\dfrac{I_j}{x_{14}}=\dfrac{\frac{100}{\sqrt{3}\times115}}{0.097}\text{ kA}=5.18\text{ kA}$

两相不接地短路电流　$I''_{dlk2}=0.866I''_{dls}=0.866\times5.18\text{ kA}=4.486\text{ kA}$

短路点 k_1 点发生短路时由发电厂提供的短路电流计算：

计算电抗 $X_{*c}=0.265<0.6$，查汽轮发电机运算曲线数字表得计算电抗 $2X_{*c}=0.53$，0 s 时的短路电流标幺值 $I_*=1.992$（插值法）。

两相不接地短路电流　$I''_{kGk2}=\sqrt{3}I_*I_r=\sqrt{3}\times1.992\times0.314\text{ kA}=1.083\text{ kA}$

短路点 k_1 点发生短路时由电动机反馈短路电流因为有变压器隔离所以不计。短路点 k_1 点发生短路时两相不接地短路电流：

$$I''_{k1k2}=I''_{dlk2}+I''_{kGk2}=(4.486+1.083)\text{ kA}=5.569\text{ kA}$$

6-18：假设 k_1 点发生短路时由电力系统提供的短路电流为 5.18 kA，发电厂提供短路电流周期分量的起始有效值为 1.312 kA。则校验主变压器 T_2 的 110 kV 侧断路器动稳定的短路电流为下列何值？（发电厂按照短路点远离发电厂考虑）

（A）5.18 kA　　（B）13.2 kA　　（C）11.88 kA　　（D）16.55 kA

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5.0.4 条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 300 页、第 375 页（第三版第 151 页、第 212 页）。

校验电器动稳所用的短路电流，应按系统最大运行方式下可能流经被校验电器的最大短路电流。运行方式应是电力系统和火力发电厂同时供电。短路点应在断路器与主变压器 T_2 之间。电力系统按照远端短路考虑，发电厂按照短路点远离发电厂考虑。校验主变压器 T_2 的 110 kV 侧断路器动稳定的短路电流为

$$i_{pk1}=2.55I''_{dl}+2.55I''_{kG}=(2.55\times5.18+2.55\times1.312)\text{ kA}=16.55\text{ kA}$$

6-19：异步电动机 M_1 额定容量为 500 kW、额定电压为 10 kV、功率因数为 0.9、起动倍数为 6.5。10 kV 母线的 k_2 点发生三相短路，则异步电动机 M_1 反馈短路电流周期分量初始值

为下列何值？

（A）0.54 kA　　（B）0.361 kA　　（C）0.314 kA　　（D）0.208 kA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 301 页（第三版第 151 页）。

异步电动机 M_1 反馈短路电流周期分量初始值：

$$I''_{M}=K_{stM}I_{rM}=6.5\times\frac{500}{\sqrt{3}\times0.9\times10}\times10^{-3}\ \text{kA}=0.208\ \text{kA}$$

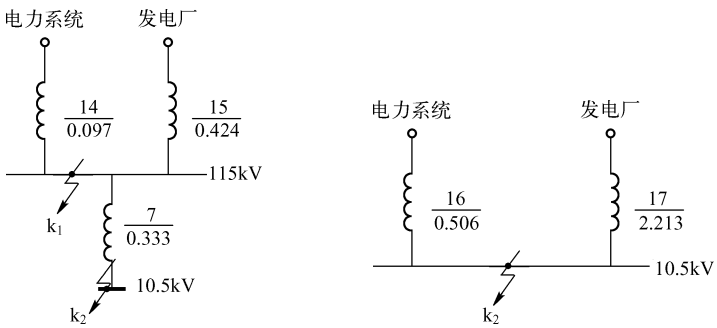
6-20：假设异步电动机馈送的短路电流峰值系数为 1.5，异步电动机参数同例题 6-19。10.5 kV 母线的 k_2 点发生短路，总的三相短路冲击电流峰值为下列何值？（使用分布系数法网络变换简化，发电厂按照短路点远离发电厂考虑）

（A）5.18 kA　　（B）13.2 kA　　（C）11.88 kA　　（D）34.67 kA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页表 4.6-3、第 284 页、第 289 页；《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 128 页式（4-15）。

标幺值计算同例题 6-16。



分布系数法标幺值网络归算：

$$c_1=\frac{X_{15}}{X_{14}+X_{15}}=\frac{0.424}{0.097+0.424}=0.814$$

$$c_2=\frac{X_{14}}{X_{14}+X_{15}}=\frac{0.097}{0.097+0.424}=0.186$$

$$X_{\Sigma}=X_7+\frac{X_{14}X_{15}}{X_{14}+X_{15}}=0.333+\frac{0.097\times0.424}{0.097+0.424}=0.412$$

$$X_{16}=\frac{X_{\Sigma}}{c_1}=\frac{0.412}{0.814}=0.506$$

$$X_{17}=\frac{X_{\Sigma}}{c_2}=\frac{0.412}{0.186}=2.213$$

短路点 k_2 点发生短路时由电力系统提供的短路电流计算：

$$I''_{ks}=\frac{I_j}{x_{16}}=\frac{\frac{100}{\sqrt{3}\times10.5}}{0.506}\text{kA}=10.87\ \text{kA}$$

由于使用运算曲线法计算，将标幺值转换为发电机容量为基准的计算电抗：

$$X_{*c}=X_{17}\frac{S_{Gr}}{S_j}=2.213\times\frac{62.5}{100}=1.383<3\text{（按照有限容量计算）}$$

查汽轮发电机运算曲线数字表得计算电抗 $X_{*c}=1.383$，0 s 时的短路电流标幺值 $I_*=0.745$（插值法估算）。

10.5 kV 侧发电机容量基准电流 $I_r=\dfrac{62.5}{\sqrt{3}\times10.5}\text{kA}=3.437\text{ kA}$。

10.5 kV 侧母线的 k_2点发生三相短路，发电厂提供的 0 s 时短路电流周期分量的起始有效值为：

$$I''_G=I_*I_r=3.437\times0.745\text{ kA}=2.56\text{ kA}$$

异步电动机 M_1反馈短路电流周期分量初始值计算同例题 6-19。

因为短路点远离发电机，所以 K_{ps}取 1.8。10.5 kV 母线的 k_2点发生短路，总的三相短路冲击电流峰值为

$$\begin{aligned}i_{pk2}&=i_{ps}+i_{pM}=\sqrt{2}\left[K_{ps}(I''_{ks}+I''_G)+1.1K_{pM}I''_M\right]\\&=\sqrt{2}\times\left[1.8\times(10.87+2.56)+1.1\times1.5\times0.208\right]\text{ kA}=34.67\text{ kA}\end{aligned}$$

例题 6-21：某 110/10 kV 变电站设有两台主变压器，110 kV 采用内桥接线方式，10 kV 采用单母线分段接线方式，110 kV 进线及 10 kV 母线均分列运行，系统接线如图 6-13 所示。电源 1 最大运行方式下三相短路电流为 25 kA，最小运行方式下三相短路电流为 20 kA。电源 2 容量为无限大。电源进线 L_1 及 L_2 均采用 110 kV 架空线路。变电站基本情况如下：

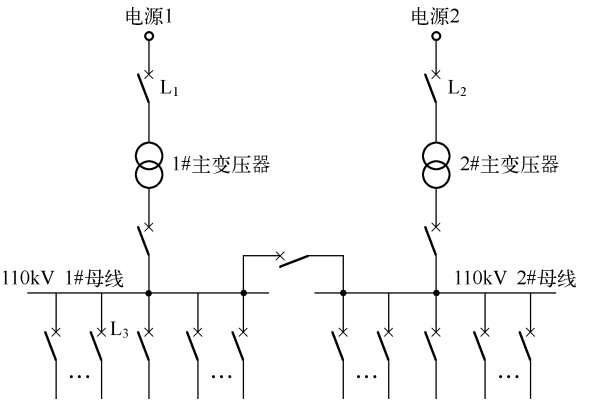


图 6-13　变电站主接线图

1）主变压器参数

容量：50000 kV@ A；电压比：110±8×1.25%/10.5 kV；

短路阻抗：$U_k=12\%$；空载电流为 $I_0=1\%$；

接线组别：YN d11；变压器允许长期过载 1.3 倍。

2）每回 110 kV 电源架空线路长度约为 40 km；

导线采用 LGJ-300/25，单位电抗取 0.4 Ω/km；

3）10 kV 馈电线路均为电缆出线，单位电抗为 0.1 Ω/km；

请计算 1#10 kV 母线发生最大三相短路时，其短路电流为下列哪项数值。（供配电 2017

年考题)

(A) 15.23 kA　　(B) 17.16 kA　　(C) 18.30 kA　　(D) 35.59 kA

答案:【A】

解答过程:依据《工业与民用供配电设计手册》第四版(上册)第 281 页(第三版第 131 页)。

基准值选择:$S_j = 100\ \text{MV}\cdot\text{A}$;$U_j = 115\ \text{kV}$,$10.5\ \text{kV}$;$I_j = 0.5\ \text{kA}$,$5.5\ \text{kA}$

标幺值归算:

线路标幺值　$X_{*L} = X_L \dfrac{S_j}{U_j^2} = 0.4 \times 40 \times \dfrac{100}{115^2} = 0.12$

系统短路容量标幺值　$X_{*S} = \dfrac{I_j}{I_S} = \dfrac{0.5}{25} = 0.02$

变压器标幺值　$X_{*T1} = \dfrac{x_{T1}\%}{100} \dfrac{S_j}{S_{rT1}} = \dfrac{12}{100} \times \dfrac{100}{50} = 0.24$

正常运行方式 1#母线为电源 1 供电:$I''_{k1} = \dfrac{I_j}{X_{*L} + X_{*S} + X_{*T1}} = \dfrac{5.5}{0.12 + 0.02 + 0.24}\ \text{kA} =$ 14.47 kA

正常运行方式 1#母线切换到电源 2 供电:$I''_{k1} = \dfrac{I_j}{X_{*L} + X_{*S} + X_{*T1}} = \dfrac{5.5}{0.12 + 0.0 + 0.24}\ \text{kA} =$ 15.28 kA

选择最大值,选 A。

6.2　实用短路电流计算法——有名值短路计算

【知识点说明】

1)有名值短路计算属于重要考点,依据《工业与民用供配电设计手册》第三版,其作为供配电专业的低压短路计算的主要方法,第三版中参照《低压辐射系统短路电流计算的应用指南》IEC-60781-1989 引入了电压系数 c 等,做出很多改进,与原有《电力工程电气设计手册》(电气一次部分)4.10 节和《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014 的低压实用短路计算法有很多不同;因在第四版主要引用了 GB/T 15544.1—2013,也适用于低压短路计算,所以第四版 4.6 节中对第三版低压短路计算内容做出了删减,不全的部分内容详见第三版 4.5 节,或者依据第四版第 229 页、第 232 页进行 IEC 法低压短路计算,注意第四版第 177 页表 4.1-1 中低压电压系数 c 的选用,例题详见本章 4.6 节。

2)低压异步电动机对短路电流影响的依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版(上册)4.6 节等。

依据书目:

《工业与民用供配电设计手册》第四版(上册)

《电力工程电气设计手册》(电气一次部分)

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

参考书目：

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544. 1—2013
《低压辐射系统短路电流计算的应用指南》IEC 60781—1989
《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014

解题流程图（见图 6-14）：

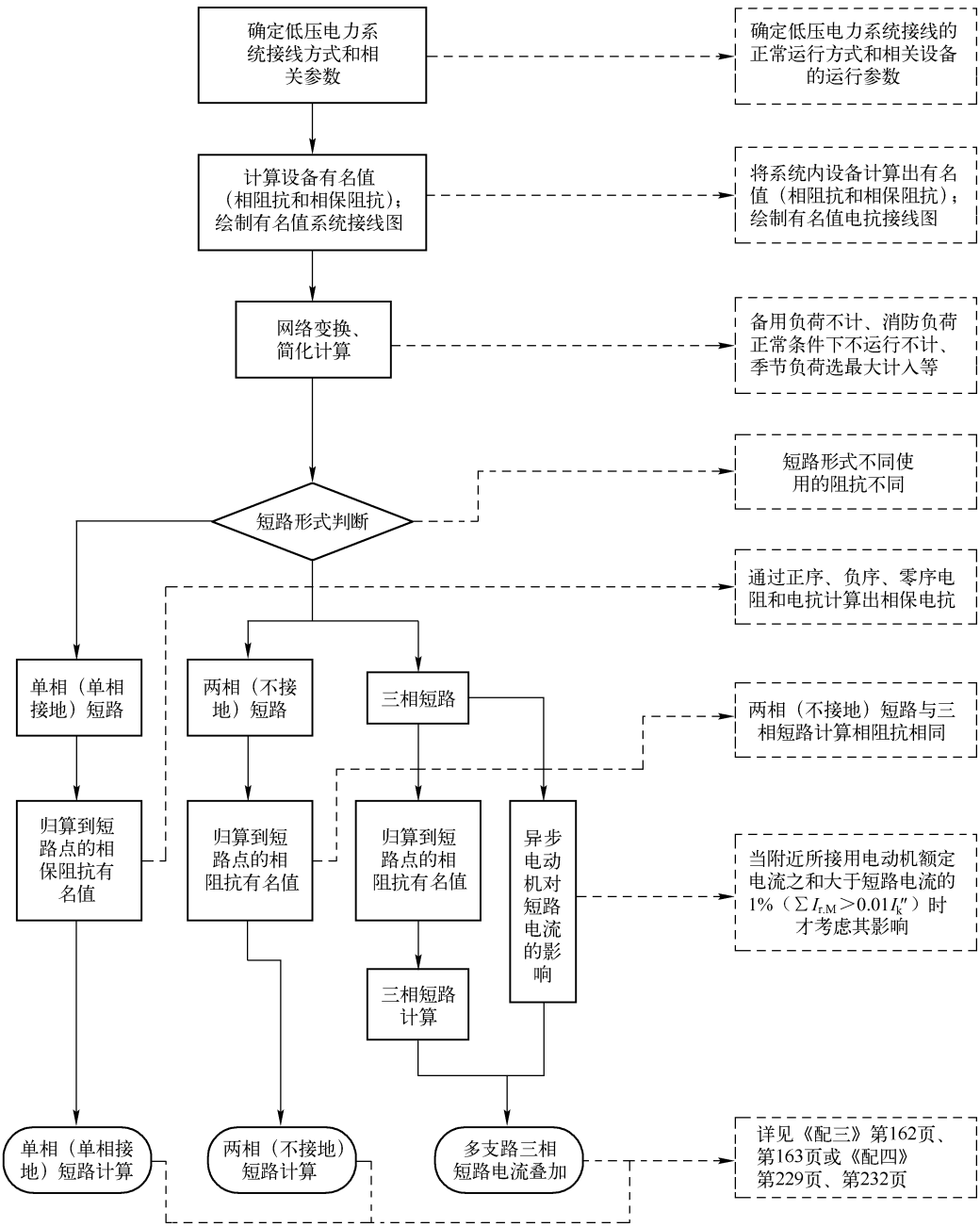


图 6-14　有名值短路计算流程图

例题 6-22～6-26：某车间 10 kV 变电所，设 1 台 SCB9-2000/10 型变压器，10/0.4 kV，Dyn11，$U_k\%=6$，低压网络系统如图 6-15 所示，变压器高压侧系统短路容量为 $S''_s=75$ MV·A，低压配电线路 L_1 选用铜芯电缆 $VV_{22}-3\times35+1\times16$，长度为 30 m，电动机 M 额定功率为 50 kW，额定电流为 $I_r=90$ A，低压配电线路 L_2 所带负荷计算电流为 410 A，其中最大一台电动机的额定电流为 60 A，起动电流倍数为 6（忽略母线的阻抗）。请回答下列问题。

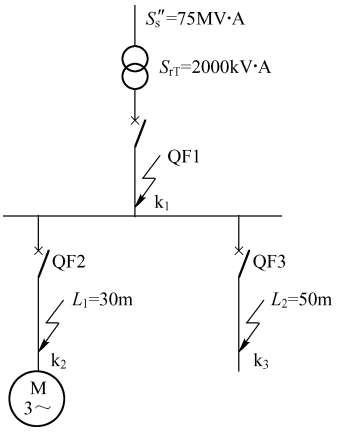


图 6-15　低压网络系统

6-22：配电线路 L_1 的相保阻抗值应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）45.34 mΩ　　（B）61.06 mΩ

（C）72.13 mΩ　　（D）100.96 mΩ

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 308 页（第三版第 158 页）。

查铜芯电缆 $VV_{22}-3\times35+1\times16$ 为

$$R'_{php}=2.397\ \text{m}\Omega/\text{m},\quad X'_{php}=0.191\ \text{m}\Omega/\text{m}$$

配电线路 L_1 的相保阻抗值为

$$Z_{php}=\sqrt{(lR'_{php})^2+(lX'_{php})^2}=\sqrt{(30\times2.397)^2+(30\times0.191)^2}\ \text{m}\Omega=72.13\ \text{m}\Omega$$

6-23：不计电动机反馈电流的影响，k_1 点的三相短路电流应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）23.1 kA　　（B）33.24 kA　　（C）47.99 kA　　（D）108.66 kA

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 304 页、第 230 页（第三版第 154～155 页表 4-21、表 4-23，第 162 页）。

系统短路容量折算后的正序阻抗：

$$Z_Q=\frac{(cU_n)^2}{S''_Q}\times10^3=\frac{(1.05\times0.38)^2}{75}\times10^3\ \text{m}\Omega=2.12\ \text{m}\Omega$$

$$X_Q=0.995Z_Q=0.995\times2.12\ \text{m}\Omega=2.12\ \text{m}\Omega$$

$$R_Q=0.1X_Q=0.1\times2.12\ \text{m}\Omega=0.21\ \text{m}\Omega$$

变压器正序阻抗：

$$R_T=0.53\ \text{m}\Omega,X_T=4.77\ \text{m}\Omega$$

归算后的正序阻抗为

$$Z_k=\sqrt{(R_s+R_T)^2+(X_s+X_T)^2}=\sqrt{(0.21+0.53)^2+(2.12+4.77)^2}\ \text{m}\Omega=6.93\ \text{m}\Omega$$

短路点 k_1 点的三相短路电流为

$$I''=\frac{230}{Z_k}=\frac{230}{6.93}\text{kA}=33.24\ \text{kA}$$

【知识点解析】

三相和两相（不接地）短路电流的计算：在 220/380 V 网络中，一般以三相短路电流为最大。一台变压器供电的低压网络三相短路电流计算电路如图 6-16 所示。

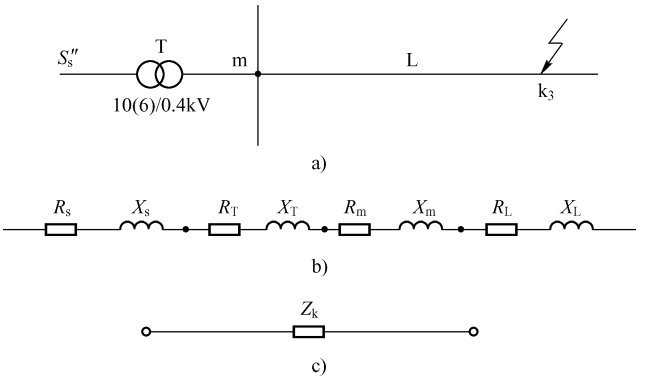


图 6-16　低压网络三相短路电流计算电路

a）系统图　b）等效电路图　c）用短路阻抗$\dot{Z}_2$表示的等效电路

$$I''=\frac{cU_n/\sqrt{3}}{Z_k}=\frac{1.05U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{R_k^2+X_k^2}}=\frac{230}{\sqrt{R_k^2+X_k^2}}(\text{kA})$$

$$R_k=R_s+R_T+R_m+R_L$$

$$X_k=X_s+X_T+X_m+X_L$$

式中，U_n为网络标称电压（线电压，V），220/380 V 网络为 380 V；c 为电压系数，计算三相短路电流时取 1.05；Z_k、R_k、X_k为短路电路总阻抗、总电阻、总电抗（mΩ）；R_s、X_s为变压器高压侧系统的电阻、电抗（归算到 400 V 侧 mΩ）；R_T、X_T为变压器的电阻、电抗（mΩ）；R_m、X_m为变压器低压侧母线段的电阻、电抗（mΩ）；R_L、X_L为配电线路的电阻、电抗（mΩ）；I''为三相短路电流的初始值。

只要$\sqrt{R_T^2+X_T^2}/\sqrt{R_s^2+X_s^2}\geqslant 2$，变压器低压侧短路时的短路电流交流分量就不会衰减，即三相短路电流稳态值$I_k=I''$。

6-24：不计电动机反馈电流的影响，k_1点的单相短路电流应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）24.5 kA　　（B）31.66 kA　　（C）35.27 kA　　（D）45.71 kA

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 304 页、第 232 页（第三版第 154 页表 4-21、第 155 页表 4-23、第 162 页式（4.3-15））。

系统短路容量折算后的相保阻抗：

$$R_{php\cdot s}=0.14\ \text{m}\Omega,\ X_{php\cdot s}=1.41\ \text{m}\Omega$$

变压器相保阻抗：

$$R_{php\cdot T}=0.53\ \text{m}\Omega,\ X_{php\cdot T}=4.77\ \text{m}\Omega$$

归算后的相保阻抗为

$$Z_{php}=\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2}=\sqrt{(0.14+0.53)^2+(1.41+4.77)^2}\ \text{m}\Omega=6.216\ \text{m}\Omega$$

短路点 k_1点的单相短路电流为

$$I''_{k1}=\frac{220}{Z_{php}}=\frac{220}{6.216}\text{kA}=35.27\ \text{kA}$$

【知识点解析】

单相接地故障电流的计算：

TN 接地系统的低压网络单相接地故障电流 I''_{k1} 可由下式计算。

$$I''_{k1}=\frac{cU_n/\sqrt{3}}{\dfrac{|\dot{Z}_{(1)}+\dot{Z}_{(2)}+\dot{Z}_{(0)}|}{3}}=\frac{1.0\times U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(\dfrac{R_{(1)}+R_{(2)}+R_{(0)}}{3}\right)+\left(\dfrac{X_{(1)}+X_{(2)}+X_{(0)}}{3}\right)}}$$

$$=\frac{U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2}}=\frac{220}{\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2}}=\frac{220}{Z_{php}}\text{ kA}$$

$$\begin{cases}R_{php}=\dfrac{R_{(1)}+R_{(2)}+R_{(0)}}{3}=R_{php\cdot s}+R_{php\cdot T}+R_{php\cdot m}+R_{php\cdot L}\\ X_{php}=\dfrac{X_{(1)}+X_{(2)}+X_{(0)}}{3}=X_{php\cdot s}+X_{php\cdot T}+X_{php\cdot m}+X_{php\cdot L}\\ Z_{php}=\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2}\end{cases}$$

$$R_{(1)}=R_{(1)\cdot s}+R_{(1)\cdot T}+R_{(1)\cdot m}+R_{(1)\cdot L}$$

$$R_{(2)}=R_{(2)\cdot s}+R_{(2)\cdot T}+R_{(2)\cdot m}+R_{(2)\cdot L}$$

$$R_{(0)}=R_{(0)\cdot s}+R_{(0)\cdot T}+R_{(0)\cdot m}+R_{(0)\cdot L}$$

$$X_{(1)}=X_{(1)\cdot s}+X_{(1)\cdot T}+X_{(1)\cdot m}+X_{(1)\cdot L}$$

$$X_{(2)}=X_{(2)\cdot s}+X_{(2)\cdot T}+X_{(2)\cdot m}+X_{(2)\cdot L}$$

$$X_{(0)}=X_{(0)\cdot s}+X_{(0)\cdot T}+X_{(0)\cdot m}+X_{(0)\cdot L}$$

式中，U_n为 220/380 V 网络标称线电压，即 380 V，$U_n/\sqrt{3}=380/\sqrt{3}$ V，取 220 V；c 为电压系数，计算单相接地故障电流时取 1；$R_{(1)}$、$R_{(2)}$、$R_{(0)}$ 为短路电路正序、负序、零序电阻（mΩ）；$X_{(1)}$、$X_{(2)}$、$X_{(0)}$ 为短路电路正序、负序、零序电阻（mΩ）；$Z_{(1)}$、$Z_{(2)}$、$Z_{(0)}$ 为短路电路正序、负序、零序阻抗（mΩ）。

6-25：假设 k_2 点的三相短路电流为 24.5 kA，且 L_2 回路只带一台额定电流为 60 A 的电动机，关于 k_1 和 k_2 点短路电流是否计入电动机的影响，下列说法中哪项是正确的？（供配电 2016 年考题）

（A）k_1 点短路电流需计入电动机的影响，k_1 点短路电流不考虑电动机的影响

（B）k_1 点短路电流不考虑电动机的影响，k_1 点短路电流需计入电动机的影响

（C）k_1 和 k_2 点短路电流均不考虑电动机的影响

（D）k_1 和 k_2 点短路电流均需计入电动机的影响

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 225 页（第三版第 183 页）。

第 3.1.2 条　当短路点附近所接电动机额定电流之和超过短路电流的 1%时，应计入电动机反馈电流的影响。

k_1 点 1%短路电流 $1\%\times I_{k2}<1\%\times I_{k1}$；

k_2 点 1%短路电流 $1\%\times I_{k2}=1\%\times 24.5\text{ kA}=245\text{ A}$；

k_1点电动机额定电流和 $I_{m2}=(90+60)\ A=150\ A<245\ A=1\%\times I_{k2}<1\%\times I_{k1}$，不考虑；

k_2点电动机额定电流和 $I_{m1}=90\ A<245\ A$，不考虑。

6-26：低压配电系统短路电流计算条件中，下列表述中哪一项是错误的？

（A）当配电用的电力变压器的容量远小于系统的容量时，短路电流可按无限大电源容量的网络短路进行计算

（B）计入短路电路各元件的有效电阻，但短路点的电弧电阻、导线连接点、开关设备和电器的接触电阻可忽略不计

（C）当电路电阻较大时，短路电流直流分量衰减较快，一般可以不考虑直流分量

（D）可不考虑变压器高压侧系统阻抗

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 303 页（第三版第 162 页）。

第 303 页　低压配电系统短路电流计算条件中，A、B、C 对。

第 304 页　高压侧系统阻抗计算章节，说明低压配电系统短路电流计算需要考虑变压器高压侧系统阻抗，D 错。

【知识点解析】

低压网络短路电流计算条件：

高压系统短路电流的计算条件同样适用于低压网络短路电流的计算，但低压网络还有如下一些特点。

1）一般用电单位的电源来自地区大中型电力系统，配电用的变压器的容量远小于系统的容量，因此短路电流可按远离发电机端，即无限大电源容量的网络短路进行计算，短路电流周期分量不衰减。

2）计入短路电路各元件的有效电阻，但短路点的电弧电阻、导线连接点、开关设备和电器的接触电阻可忽略不计。

3）当电路电阻较大时，短路电流直流分量衰减较快，一般可不考虑直流分量。只有在离配电变压器低压侧很近处，如低压侧 20 m 以内大截面线路上或低压配电屏内部发生短路时，才需要计算直流分量。

4）单位长度有效电阻的计算温度不同，在计算三相最大短路电流时，导体计算温度取为 20℃；在计算单相短路电流时，假设计算温度升高，电阻值增大，其值一般为 20℃时电阻的 1.5 倍。

5）计算过程采用有名单位制，电压用 V，电流用 kA，容量用 kV·A，电阻用 mΩ。

6）计算 220/380 V 网络三相短路电流时，计算电压 cU_n取电压系数 c 为 1.05，计算单相接地故障电流时，c 取 1.0，U_n为系统标称电压（线电压）380 V。

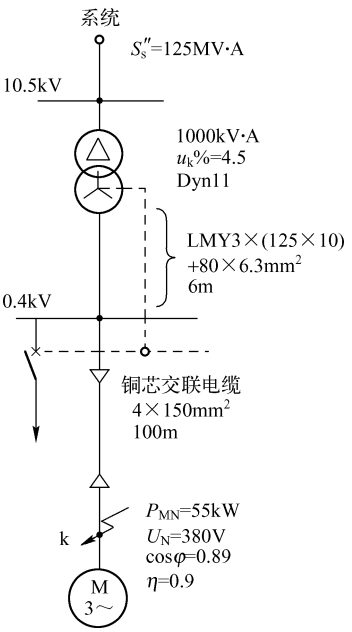


图 6-17　配电回路

例题 6-27～6-30：某工厂采用 TN 接地系统，配电回路接线图如图 6-17 所示，连接变压器、母线和电缆、电动

机等参数均如图所示，请回答下列问题。

6-27：已知该工厂10 kV系统侧短路容量为125 MV·A，归算到0.4 kV侧的相保电阻值为下列何值？（写出计算过程和依据）

（A）1.8 mΩ，0.18 mΩ

（B）1.27 mΩ，0.127 mΩ

（C）0.85 mΩ，0.085 mΩ

（D）1.65 mΩ，1.65 mΩ

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第304页（第三版第157页表4-24）。

高压侧系统正序阻抗有名值计算：

$$Z_s=\frac{(cU_n)^2}{S''_s}\times10^3=\frac{(1.05\times0.38)^2}{125}\times10^3\ \text{m}\Omega=1.28\ \text{m}\Omega$$

第304页表4.6-11注③，变压器接线为Dyn11型，零序电流不能在高压侧流通，故不计入高压侧的零序阻抗，即相保电阻为

$$R_{\text{php}\cdot s}=\frac{2}{3}R_s=\frac{2}{3}\times0.1\times0.995Z_s=\frac{2}{3}\times0.1\times0.995\times1.28\ \text{m}\Omega=0.085\ \text{m}\Omega$$

$$X_{\text{php}\cdot s}=\frac{2}{3}X_s=\frac{2}{3}\times0.995Z_s=\frac{2}{3}\times0.995\times1.28\ \text{m}\Omega=0.85\ \text{m}\Omega$$

【知识点解析】

在计算220/380 V网络短路电流时，变压器高压侧系统阻抗需要计入。若已知高压侧系统短路容量为S''_s，则归算到变压器低压侧的高压系统阻抗可按下式计算：

$$Z_s=\frac{(cU_n)^2}{S''_s}\times10^3(\text{m}\Omega)$$

如不知道其电阻R_s和X_s的确切值，可以认为

$$R_s=0.1X_s,X_s=0.995Z_s$$

式中，U_n为变压器低压侧标称电压，0.38 kV；c为电压系数，计算三相短路电流时取1.05；S''_s为变压器高压侧系统短路容量（MV·A）；R_s、X_s、Z_s为归算到变压器低压侧的高压系统电阻、电抗、阻抗（mΩ）。

至于零序阻抗，Dyn11和Yyn0联结的配电变压器，当低压侧发生单相短路时，零序电流不能在高压侧绕组流通，高压侧对于零序电流相当于开路状态，故在计算单相接地短路电流时视若无此阻抗。10(6)/0.4 kV配电变压器高压侧系统短路容量与高压侧系统阻抗、相保阻抗（归算到400 V）的数值关系见表6-3。

表6-3　10(6)/0.4 kV变压器高压侧系统短路容量与高压侧阻抗、相保阻抗（归算到400 V）的数值关系

（单位：mΩ）

高压侧短路容量 S''_s/MV·A	10	20	30	50	75	100	200	300	∞
Z_s①	16.00	8.00	5.33	3.20	2.13	1.60	0.80	0.53	0
X_s②	15.92	7.96	5.30	3.18	2.12	1.59	0.80	0.53	0

（续）

高压侧短路容量 S''_s/MV·A	10	20	30	50	75	100	200	300	∞
R_s②	1.59	0.80	0.53	0.32	0.21	0.16	0.08	0.05	0
$R_{php\cdot s}$③	1.06	0.53	0.35	0.21	0.14	0.11	0.05	0.03	0
$X_{php\cdot s}$③	10.61	5.31	3.53	2.12	1.41	1.06	0.53	0.35	0

① 系统阻抗 $Z_s=\dfrac{U_{av}^2}{S''_s}\times10^3=\dfrac{160}{S''_s}\,m\Omega$；$U_{av}$为系统平均电压。

② 系统电抗 $X_s=0.995Z_s$，系统电阻 $R_s=0.1X_s$。

③ 对于 Dyn11 或 Yyn0 连接变压器，零序电流不能在高压侧流通，故不计入高压侧的零序阻抗 $R_{(0)\cdot s}$、$X_{(0)\cdot s}$，即

相保电阻 $R_{php\cdot s}=\dfrac{1}{3}(R_{(1)\cdot s}+R_{(2)\cdot s}+R_{(0)\cdot s})=\dfrac{2R_{(1)\cdot s}}{3}=\dfrac{2R_s}{3}(m\Omega)$

相保电抗 $X_{php\cdot s}=\dfrac{1}{3}(X_{(1)\cdot s}+X_{(2)\cdot s}+X_{(0)\cdot s})=\dfrac{2X_{(1)\cdot s}}{3}=\dfrac{2X_s}{3}(m\Omega)$

6-28：已知变压器型号 S9 额定电压为 10/0.4 kV，额定容量为 1000 kV·A，阻抗电压为 4.5%，变压器接线为 Dyn11 型，满载有功损耗为 10.3 kW，归算到 0.4 kV 侧的相保电阻值为下列何值？（写出计算过程和依据）

（A）1.8 mΩ，8.8 mΩ　　（B）1.8 mΩ，7 mΩ

（C）1.65 mΩ，7 mΩ　　（D）1.65 mΩ，14.1 mΩ

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 304 页（第三版第 157 页表 4-24）。

变压器正序阻抗有名值计算：

$$R_T=\frac{\Delta PU_r^2}{S_{rT}^2}=\frac{10.3\times0.4^2}{1^2}\,m\Omega=1.648\,m\Omega$$

$$Z_T=\frac{u_K\%}{100}\frac{U_r^2}{S_{rT}}\times10^3=\frac{4.5}{100}\times\frac{0.4^2}{1}\times10^3\ m\Omega=7.2\,m\Omega$$

$$X_T=\sqrt{Z_T^2-R_T^2}=\sqrt{7.2^2-1.65^2}\ m\Omega=7\,m\Omega$$

变压器接线为 Dy11 型，因题目中没有给出零序电阻，默认其等于正序、负序阻抗，即相保电阻等于正序电阻。

$$R_{php\cdot T}=R_T=1.648\,m\Omega$$

$$X_{php\cdot T}=X_T=7\,m\Omega$$

6-29：假设工厂配电回路接线图 6-17 中连接变压器、母线和电缆、电动机等各元件的相电阻、相电抗、相保电阻、相保电抗见表 6-4。k 点发生单相接地短路故障时电流为下列何值？（不考虑电动机反馈电流）

表 6-4　某配电系统电气参数

电路元件	元件阻抗/mΩ							
	R'	R	X'	X	R'_{php}	R_{php}	X'_{php}	X_{php}
系统		0.08		0.80		0.05		0.53
变压器		1.65		7.00		1.65		7.00

（续）

电路元件	元件阻抗/mΩ							
	R'	R	X'	X	R'_{php}	R_{php}	X'_{php}	X_{php}
母线 6 m	0. 028	0. 17	0. 17	1. 02	0. 088	0. 53	0. 37	2. 22
电缆 100 m	0. 117	11. 70	0. 077	7. 70	0. 351	35. 10	0. 152	15. 20
合并		13. 60		16. 52		37. 33		24. 95

（A）4. 9 kA　　（B）5. 15 kA　　（C）5. 89 kA　　（D）8. 82 kA

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 304 页、第 232 页（第三版第 163 页式（4. 3-15））。

短路点 k 点前总的相保阻抗为

$$Z_{php}=\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2}=\sqrt{37.33^2+24.95^2}\ \text{m}\Omega=44.9\ \text{m}\Omega$$

短路点 k 发生单相接地短路故障时电流为

$$I''_{k1}=\frac{220}{Z_{php}}=\frac{220}{44.9}\text{kA}=4.9\ \text{kA}$$

6-30：假设工厂配电回路接线图 6-17 中连接变压器、母线和电缆、电动机等各元件的相电阻、相电抗、相保电阻、相保电抗见表 6-8。短路点 k 处接一台异步电动机，额定功率为55 kW，额定电压为 380 V，额定功率因数为 0. 89，效率为 0. 9。k 点发生三相接地短路故障时短路电流峰值为下列何值？

（A）9. 52 kA　　（B）16. 43 kA　　（C）15. 66 kA　　（D）9. 07 kA

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 225 页、第 229 页、第 300 页（第三版第 162 页、第 163 页）。

短路点 k 点前总的正序阻抗为

$$Z_k=\sqrt{R_k^2+X_k^2}=\sqrt{13.6^2+16.52^2}\ \text{m}\Omega=21.4\ \text{m}\Omega$$

短路点 k 点发生三相接地短路故障时三相短路稳态值为

$$I''_k=230/Z_k=230/21.4\ \text{kA}=10.76\ \text{kA}$$

依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 3. 1. 2 条。

电动机额定电流 $I_{NM}=\dfrac{P_{NM}}{\sqrt{3}\eta\cos\varphi U_N}=\dfrac{55}{\sqrt{3}\times0.9\times0.89\times0.38}\text{A}=104.3\ \text{A}$，与 0. 01 倍短路电流对比：$\Sigma I_{NM}=104.3\ \text{A}<0.01I''_{k3}=107.6\ \text{A}$，所以电动机短路反馈电流不计算在内。

因 $\dfrac{X_\Sigma}{R_\Sigma}=\dfrac{16.52}{13.6}=1.2147$，$T_f=\dfrac{X_\Sigma}{314R_\Sigma}=\dfrac{16.52}{314\times13.6}=0.00397$，故短路电流峰值系数为

$$K_p=1+e^{-0.01/T_f}=1+e^{-0.01/0.00397}=1.08$$

短路点 k 发生三相接地短路故障时短路电流峰值为

$$i_p=K_p\sqrt{2}I''_k=1.08\times\sqrt{2}\times10.76\ \text{kA}=16.43\ \text{kA}$$

例题 6-31：某钢厂配电回路中电动机参数如下：额定电压 $U_e=380$ V，额定功率 $P_e=$

45 kW，额定效率 $\eta=0.9$，额定功率因数 $\cos\varphi=0.8$，起动电流倍数 $\lambda=6$。变压器高压侧系统短路容量为 100 MV·A，其他参数如图 6-18 所示。已知 VLV-0.6/1 kV，3×50 mm² 电缆的电阻及电抗分别为 0.754 mΩ/m 和 0.075 mΩ/m，当忽略系统电阻、不忽略回路电阻条件下，计算图中 k 点的三相短路冲击电流与下列哪项数值最接近。（忽略母线及低压主回路元件的阻抗，三相短路冲击电流冲击系数 $K_{ch}=1$，电动机的馈送短路电流峰值系数 $K_{pM}=0.8$）（供配电 2017 年考题改编）

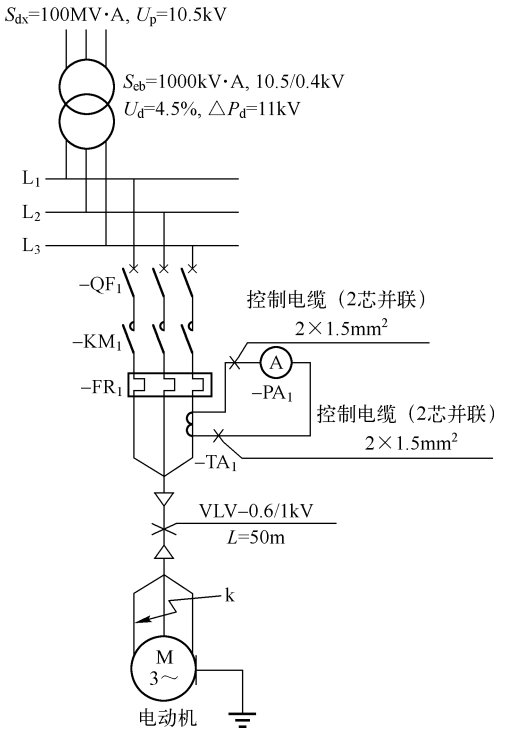


图 6-18　钢厂配电回路图

（A）0.47 kA　　（B）5.59 kA　　（C）7.90 kA　　（D）8.65 kA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 225 页、第 301 页（第三版第 162 页、第 151 页）和《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 3.1.2 条。

变压器高压侧系统短路容量为 100 MV·A，因题目要求忽略系统电阻，即 $R_S=0\ m\Omega$，$X_S=0\ m\Omega$。

变压器正序阻抗有名值计算：

$$R_T=\frac{\Delta PU_r^2}{S_{rT}^2}=\frac{11\times0.4^2}{1^2}\ m\Omega=1.76\ m\Omega;\quad Z_T=\frac{u_K\%}{100}\frac{U_r^2}{S_{rT}}\times10^3=\frac{4.5}{100}\times\frac{0.4^2}{1}\times10^3\ m\Omega=7.2\ m\Omega$$

$$X_T=\sqrt{Z_T^2-R_T^2}=\sqrt{7.2^2-1.76^2}\ m\Omega=6.98\ m\Omega$$

忽略母线及低压主回路元件的阻抗，即相关阻抗为 0 mΩ；铝芯电缆 VLV-0.6/1 kV，3×50 mm² 电缆的电阻及电抗为 $R_L=50\times0.754\ m\Omega=37.7\ m\Omega$；$X_L=50\times0.075\ m\Omega=3.75\ m\Omega$。短

路点 k 前总的正序阻抗和三相短路电流为

$$Z_k=\sqrt{R_k^2+X_k^2}=\sqrt{(0+1.76+0+37.7)^2+(0+6.98+0+3.75)^2}\ \text{m}\Omega=40.89\ \text{m}\Omega$$

$$I''_k=230/Z_k=230/40.89\ \text{kA}=5.62\ \text{kA}$$

电动机额定电流：$I_e=\dfrac{P_e}{\sqrt{3}U_e\eta\cos\varphi}=\dfrac{45}{\sqrt{3}\times0.38\times0.9\times0.8}\ \text{A}=94.96\ \text{A}$，与 0.01 倍短路电流对比：$\Sigma I_e=94.96\ \text{A}>0.01I''_{K3}=56.2\ \text{A}$，所以电动机短路反馈电流应计算在内。冲击系数 $K_{ch}=1$，电动机的 $K_{pM}=0.8$，短路点 k 发生三相短路故障时系统侧提供的三相短路峰值电流为

$$i_p=\sqrt{2}(K_pI''_k+1.1K_{pM}I''_M)=\sqrt{2}\times(1.0\times5.62+1.1\times0.8\times6\times0.09496)\ \text{kA}=8.65\ \text{kA}$$

例题 6-32：某变电所采用 TN-C-S 系统给一建筑物内的用电设备供电，配电线路如图 6-19 所示，变压器侧配电柜至建筑物内配电箱利用电缆第四芯作为 PEN 线，建筑内配电箱用电设备利用电缆第四芯线作为 PE 线，用电设备为三相负荷，线路单位长度阻抗值见表 6-5，忽略电抗以及其他未知电阻的影响。当用电设备电源发生一相与外壳电箱接地故障时（金属性短路），计算该供电回路的故障电流应为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

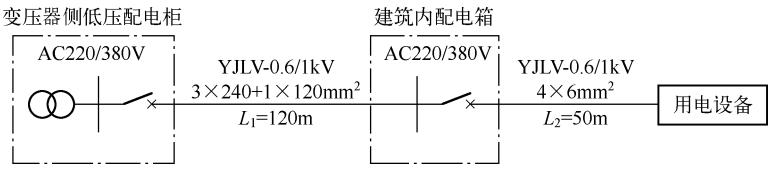


图 6-19　变电所向建筑物内用电设备供电线路图

（A）286 A　　（B）294 A　　（C）312 A　　（D）323 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 304 页、第 232 页（第三版第 163 页）。

题目要求忽略电抗以及其他未知电阻的影响，需要考虑两段 YJLV 电缆相保阻抗，计算如下：

按照 4×6 mm² 相保阻抗：$R'_{php6}L_2=14.1\times50\ \text{m}\Omega=705\ \text{m}\Omega$

按照 3×50+1×25 mm² 相保阻抗等比折算出 3×240+1×120 mm²：

$$R'_{php240}L_1=\frac{50}{240}\times R'_{php50}L_1=\frac{50}{240}\times2.589\times120\ \text{m}\Omega=64.725\ \text{m}\Omega$$

或者铝电缆截面为 240 mm² 时 $R'_{240}=C_j\dfrac{\rho_{20}}{S}\times10^3=1.02\times\dfrac{2.82\times10^{-8}}{240\times10^{-6}}\times10^3\ \text{m}\Omega/\text{m}=0.2397\ \text{m}\Omega/\text{m}$

铝电缆截面为 120 mm² 时 $R'_{120}=0.5R'_{240}=0.11985\ \text{m}\Omega/\text{m}$

$$R'_{php}=1.5(R'_{ph}+R'_p)\text{L}=1.5\times(0.2397+0.11985)\times120\ \text{m}\Omega=64.72\ \text{m}\Omega$$

该供电回路的发生一相与外壳电箱接地故障时（金属性短路）故障电流为

$$I_{k1}=\frac{220}{Z_{php}}=\frac{220}{\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2}}=\frac{220}{\sqrt{(705+64.72)^2+0^2}}\ \text{A}=285.8\ \text{A}$$

【知识点解析】

线路相保阻抗的计算：单相接地短路电路中任一元件（配电变压器、线路等）的相保阻抗 Z_{php} 计算公式为

$$\begin{cases} Z_{php}=\sqrt{R_{php}^2+X_{php}^2} \\ R_{php}=\dfrac{1}{3}[R_{(1)}+R_{(2)}+R_{(0)}] \\ \quad =\dfrac{1}{3}[R_{(1)}+R_{(2)}+R_{(0)ph}+3R_{(0)p}]=R_{ph}+R_p \\ X_{php}=\dfrac{1}{3}[X_{(1)}+X_{(2)}+X_{(0)}]=\dfrac{1}{3}[X_{(1)}+X_{(2)}+X_{(0)ph}+3X_{(0)p}] \\ \quad =\dfrac{1}{3}[X_{(1)}+X_{(2)}+X_{(0)ph}]+X_{(0)p} \end{cases}$$

式中，R_{php} 为元件的相保电阻，$R_{php}=\dfrac{1}{3}[R_{(1)}+R_{(2)}+R_{(0)}]$；$X_{php}$ 为元件的相保电抗，$X_{php}=\dfrac{1}{3}[X_{(1)}+X_{(2)}+X_{(0)}]$；$R_{(1)}$、$X_{(1)}$ 为元件的正序电阻和正序电抗；$R_{(2)}$、$X_{(2)}$ 为元件的负序电阻和负序电抗；$R_{(0)}$、$X_{(0)}$ 为元件的零序电阻和零序电抗，$R_{(0)}=R_{(0)ph}+3R_{(0)p}$，$X_{(0)}=X_{(0)ph}+3X_{(0)p}$；$R_{ph}$、$R_{(0)ph}$、$X_{(0)ph}$ 为元件相线的电阻、相线的零序电阻和相线的零序电抗；R_P、$R_{(0)p}$、$X_{(0)p}$ 为元件保护线的电阻、保护线的零序电阻和保护线的零序电抗。

常用低压母线单位长度阻抗值可在《工业与民用配电设计手册》第三版第 157 页表 4-24 中查出。

常用架空线路、电缆单位长度阻抗值可在《工业与民用配电设计手册》第三版第 158 页表 4-25，即表 6-5 中查出。

表 6-5　线路单位长度阻抗值　　（单位：mΩ/m）

R'															
S/mm²		185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5
铝		0.156	0.192	0.240	0.303	0.411	0.575	0.822	1.151	1.798	2.876	4.700	7.050	11.280	
铜		0.095	0.117	0.146	0.185	0.251	0.351	0.501	0.702	1.097	1.754	2.867	4.300	6.880	11.467
$R'_{php}=1.5(R'_{ph}+R'_p)$															
$S_p=S$/mm² 4×		185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5
铝		0.468	0.576	0.720	0.909	1.233	1.725	2.466	3.453	5.394	8.628	14.100	21.150	33.840	
铜		0.285	0.351	0.438	0.555	0.753	1.053	1.503	2.106	3.291	5.262	8.601	12.900	20.640	34.401
$S_p=S/2$ /mm²	3×	185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4		
	+1×	95	70	70	50	35	25	16	16	10	6	4	2.5		
铝		0.689	0.905	0.977	1.317	1.850	2.589	3.930	4.424	7.011	11.364	17.625	27.495		
铜		0.420	0.552	0.596	0.804	1.128	1.580	2.397	2.699	4.277	6.932	10.751	16.770		

（续）

		X'_{php}													
S/mm²		185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5
架空线	S_p=S	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.75	0.77				
	S_p=S/2	0.60	0.62	0.63	0.65	0.67	0.69	0.72	0.73	0.767					
绝缘子布线 D=1500 mm	S_p=S	0.448	0.464	0.478	0.493	0.517	0.537	0.563	0.583	0.611	0.643	0.681	0.707	0.737	0.767
	S_p=S/2	0.470	0.491	0.498	0.516	0.539	0.559	0.587	0.597	0.627					
绝缘子布线 D=100 mm	S_p=S							0.513	0.533	0.561	0.591	0.631	0.655	0.685	0.716
	S_p=S/2							0.537	0.547	0.576					
绝缘子布线 D=70 mm	S_p=S											0.585	0.611	0.645	0.673
全塑电缆	S_p=S	0.152	0.152	0.152	0.158	0.156	0.158	0.160	0.164	0.174	0.188	0.200	0.200		
	S_p=S/2	0.179	0.161	0.161	0.186	0.178	0.187	0.191	0.192	0.201	0.224	0.211	0.234		

注：1. R'为导线20℃时单位长度电阻值，$R'=C_j\frac{\rho_{20}}{S}\times10^3$(mΩ)，铝$\rho_{20}=2.82\times10^{-6}$ Ω·cm，铜$\rho_{20}=1.72\times10^{-6}$ Ω·cm；C_j为绞入系数，导线截面≤6 mm²时，C_j取为1.0；导线截面>6 mm²时，C_j取为1.02。

2. S为相线线芯截面，S_p为PEN线线芯截面。

3. R'_{php}为计算单相对地短路电流用，其值取导线20℃时电阻的1.5倍。

4. 架空线水平排列，PEN线在中间，线间距离依次为400 mm、600 mm、400 mm。

5. 绝缘子布线水平排列，PEN线在边位，D（mm）为线间距离。

6.3 实用短路电流计算法——单相接地电容电流和异步电动机对短路电流影响的计算

【知识点说明】

1）单相接地电容电流的估算依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）4.6节，厂用电的电缆单相接地电容电流的计算依据《电力工程电气设计手册》(电气一次部分)3-4节，属于重要考点，一般会结合中性点接地设备选择考到，此时应考虑变电站电力设备增加的接地电容电流。

2）异步电动机对短路电流影响的依据《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014附录L和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）4.6节等，属于重要考点，需注意异步电动机提供的反馈电流峰值的修正系数，在《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）做出了修改，电动机的修正系数取6，10 kV异步电动机取1.1，低压异步电动机取0.9，同步电动机取1.1。

3）大容量并联电容器组对短路电流影响的依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005附录F和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4-11节，属于冷门考点。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《水电工程三相交流系统短路电流计算导则》DL/T 5163—2002（NB/T 35043—2014）

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544. 1—2013

《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014

《短路电流实用计算方法》

例题 6-33~6-37：某 110 kV 变电站有 110 kV、35 kV、10 kV 三个电压等级，设一台三相三绕组变压器，主变 110 kV 中性点采用直接接地，35 kV、10 kV 采用消弧线圈接地。该变电站 10 kV 母线共有 16 回 10 kV 线路，其中架空线 12 回，每回线路长约 6 km，单回路架设，无架空地线；电缆线路 4 回，每回线路长约 3 km，采用标称截面为 150 mm^2 三芯电力电缆。该变电站 35 kV 母线共有架空线 2 回，每回线路长约 5 km，有架空地线；电缆线路 2 回，每回线路长约 5 km。请回答以下问题。（供配电 2012 年考题改编）

6-33：该变电站 10 kV 线路的单相接地电容电流为下列哪一项？

（A）18. 644 A　　（B）19. 078 A　　（C）22. 112 A　　（D）22. 544 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 302 页（第三版第 152 页、第 153 页）。

10 kV 电缆单相接地电容电流：

$$I_{C1}=\frac{95+1.144S}{2200+0.23S}U_r l=\frac{95+1.44\times150}{2200+0.23\times150}\times10\times4\times3\ \text{A}=16.7\ \text{A}$$

10 kV 架空线单相接地电容电流：

$$I_{C2}=2.7U_r l\times10^{-3}=2.7\times10\times12\times6\times10^{-3}\ \text{A}=1.944\ \text{A}$$

10 kV 线路的单相接地电容电流合计：$I=I_{C1}+I_{C2}=(16.7+1.944)\ \text{A}=18.644\ \text{A}$

题目中问的是线路单相接地电容电流，故不考虑变电所增容系数，选 A。

6-34：该变电站 10 kV 系统消弧线圈计算所用的单相接地电容电流为下列哪一项？

（A）22. 112 A　　（B）22. 544 A　　（C）22. 544 A　　（D）21. 63 A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 302 页（第三版第 153 页）和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 18. 1. 5 条。

10 kV 线路总的单相接地电容电流计算见例题 6-33，消弧线圈的计算所用单相接地电容电流应计入厂、所母线和电器的影响，查《配四》第 303 页表 4. 6-10 中 10 kV 增容系数为 0. 16，故 10 kV 侧总的单相接地电容电流为

$$I_{C\Sigma}=1.16I_C=1.16\times(1.944+16.7)\ \text{A}=21.63\ \text{A}$$

6-35：该变电站 35 kV 系统消弧线圈计算所用的单相接地电容电流为下列哪一项？

（A）1. 155 A　　（B）1. 944 A　　（C）16. 7 A　　（D）18. 6 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 302 页（第三版第 153 页）和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222-2005 第 18. 1. 5 条。

35 kV 电缆线路的单相接地电容电流：

$$I_{C1}=0.1U_r l=0.1\times35\times2\times5\ \text{A}=35\ \text{A}$$

35 kV 有地线架空线路单相接地电容电流：

$$I_{C2}=3.3U_r l\times10^{-3}=3.3\times35\times2\times5\times10^{-3}\ \text{A}=1.155\ \text{A}$$

35 kV 侧消弧线圈的计算所用单相接地电容电流应计入厂、所母线和电器的影响，查表 4.6-10中 35 kV 增容系数为 0.13，故 35 kV 侧总的单相接地电容电流为

$$I_{C\Sigma}=1.13I_C=1.13\times(1.155+35)\ \text{A}=40.86\ \text{A}$$

【知识点解析】

（1）线路单相接地电容电流的计算

电网中的单相接地电容电流由电力线路和电力设备两部分的电容电流组成。

1）电缆线路的单相接地电容电流按下式计算：

6 kV 电缆线路 $$I_C=\frac{95+2.84S}{2200+6S}U_r l(\text{A})$$

10 kV 电缆线路 $$I_C=\frac{95+1.44S}{2200+0.23S}U_r l(\text{A})$$

电缆线路的单相接地电容电流还可以按下式估算：

$$I_C=0.1U_r l(\text{A})$$

式中，S 为电缆芯线的标称截面（mm^2）；U_r 为线路额定线电压（kV）；l 为线路长度（km）；I_C 为接地电容电流（A）。

2）架空线路单相接地电容电流按下式计算：

无架空地线单回路 $$I_C=2.7U_r l\times10^{-3}(\text{A})$$

有架空地线单回路 $$I_C=3.3U_r l\times10^{-3}(\text{A})$$

架空线路的单相接地电容电流还可以按下式估算：

$$I_C=\frac{U_r l}{350}(\text{A})$$

使用查表法：架空线路和电缆线路每千米单相接地电容电流的平均值见表 6-6。

表 6-6　架空线路和电缆线路每千米单相接地电容电流的平均值　（单位：A/km）

电压/kV	电缆线路（当芯线截面为下列诸值时）/mm^2											架空线路	
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	单回路	双回路
6	0.33	0.37	0.46	0.52	0.59	0.71	0.82	0.89	1.10	1.20	1.30	0.013	0.017
10	0.46	0.52	0.62	0.69	0.77	0.90	1.00	1.10	1.30	1.40	1.60	0.0256	0.035
35	—	—	—	—	—	3.70	4.10	4.40	4.80	5.20	—	0.078 （0.091）	0.102 （0.110）

注：括号内数字用于有架空地线的架空线路。

（2）变电所增加的接地电容电流值

变电所电气设备增加的接地电容电流百分数见表 6-7。

表 6-7　变电所增加的接地电容电流值

额定电压/kV	6	10	15	35	63	110
附加值（%）	18	16	15	13	12	10

6-36：某220 kV变电站，电压等级为220/110/10 kV，两台相同的主变压器，容量为240/240/120 MV·A。220 kV架空线进线2回。110 kV架空负荷出线8回。10 kV电缆负荷出线12回，设两段，每段母线出线6回，每回电缆平均长度为6 km。若10 kV电缆电容电流为2 A/km，则10 kV线路总的单相接地电容电流为下列哪一项？

（A）115.5 A　　（B）144 A　　（C）167 A　　（D）186 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第302页（第三版第153页）。

10 kV侧总的单相接地电容电流：

$$I_C = 2\times12\times6\ \text{A} = 144\ \text{A}$$

题目中问的是线路单相接地电容电流，故不考虑变电所增容系数，选B。

6-37：某新建2×300 MW燃煤发电厂，高压厂用电系统标称电压为6 kV，其中性点为高电阻接地。每台机组设两台高压厂用无励磁调压双卷变压器，容量为35 MV·A，6.3 kV单母线分段接线，设A段、B段。6 kV系统电缆选为ZR-YJV$_{22}$-6/6 kV三芯电缆，其对地电容值和电缆长度见表6-8。当两台厂用高压变压器6.3 kV侧采用中性点电阻接地时，6.3 kV侧总的电缆对地电容电流接近下列哪项数值？

表6-8　ZR-YJV$_{22}$-6/6 kV三芯电缆每相对地电容值及A、B段电缆长度

电缆截面/mm^2	每相对地电容值/(μF/km)	A段电缆长度/km	B段电缆长度/km
95	0.42	5	5.5
120	0.46	3	2.5
150	0.51	2	2.1
185	0.53	2	1.8

（A）18.79 A　　（B）19.5 A　　（C）29.4 A　　（D）37.84 A

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第80页。

6.3 kV侧A段电缆对地电容电流：

$$I_{AC} = \sqrt{3}\omega U_e C\times10^{-3}$$

$$= \sqrt{3}\times314\times6.3\times(0.42\times5+0.46\times3+0.51\times2+0.53\times2)\times10^{-3}\ \text{A} = 19.05\ \text{A}$$

6.3 kV侧B段电缆对地电容电流：

$$I_{BC} = \sqrt{3}\omega U_e C\times10^{-3}$$

$$= \sqrt{3}\times314\times6.3\times(0.42\times5.5+0.46\times2.5+0.51\times2.1+0.53\times1.8)\times10^{-3}\ \text{A} = 18.79\ \text{A}$$

6.3 kV侧总的电缆对地电容电流：

$$I_C = (19.05+18.79)\ \text{A} = 37.84\ \text{A}$$

题目中问的是电缆单相接地电容电流，故不考虑系数1.25倍，选D。

【知识点解析】

将求得的电缆总电容值乘以1.25即为全系统总的电容近似值（即包括厂用变压器绕组、电动机以及配电装置等的电容）。单相接地电容电流可由下式求出：

$$I_C = \sqrt{3}\, U_e \omega C \times 10^{-3}$$

$$\omega = 2\pi f_e$$

式中，I_C为单相接地电容电流（A）；U_e为厂用电系统额定线电压（kV）；ω 为角频率；f_e为额定频率（Hz）；C 为厂用电系统每相对地电容（μF）。

例题 6-38~6-40：某供电系统接线及相关参数如图 6-20 所示。蒸汽发电机的运算曲线见表 6-9。请回答以下问题。（基准容量选取为 100 MV · A）

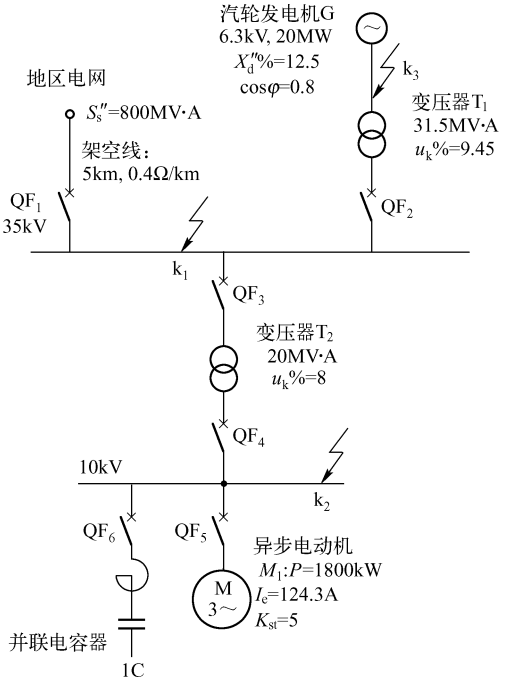


图 6-20　某供电系统及其参数

表 6-9　蒸汽发电机运算曲线表

I_* 与 t/s 与 X_c	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.12	8.963	8.603	7.186	6.400	5.220	4.252	4.006	3.821	3.344	2.795	2.512
0.14	7.718	7.467	6.441	5.839	4.878	4.040	3.829	3.673	3.280	2.808	2.526
0.16	6.763	6.545	5.660	5.146	4.336	3.649	3.481	3.359	3.060	2.706	2.490
0.18	6.020	5.844	5.122	4.697	4.016	3.429	3.288	3.186	2.944	2.659	2.476
0.20	5.432	5.280	4.661	4.297	3.715	3.217	3.099	3.016	2.825	2.607	2.462
0.22	4.938	4.813	4.296	3.988	3.487	3.052	2.951	2.882	2.729	2.561	2.444
0.24	4.526	4.421	3.984	3.721	3.286	2.904	2.816	2.758	2.638	2.515	2.425
0.26	4.178	4.088	3.714	3.486	3.106	2.769	2.693	2.644	2.551	2.467	2.404
0.28	3.872	3.705	3.472	3.274	2.939	2.641	2.575	2.534	2.464	2.415	2.378
0.30	3.603	3.536	3.255	3.081	2.785	2.520	2.463	2.429	2.379	2.360	2.347
0.32	3.368	3.310	3.063	2.909	2.646	2.410	2.360	2.332	2.299	2.306	2.316

（续）

I_* \ t/s / X_c	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.34	3.159	3.108	2.891	2.754	2.519	2.308	2.264	2.241	2.222	2.252	2.283
0.36	2.975	2.930	2.736	2.614	2.403	2.213	2.175	2.156	2.149	2.109	2.250
0.38	2.811	2.770	2.597	2.487	2.297	2.126	2.093	2.077	2.081	2.148	2.217
0.40	2.664	2.628	2.471	2.372	2.199	2.045	2.017	2.004	2.017	2.099	2.184
0.42	2.531	2.499	2.357	2.267	2.110	1.970	1.946	1.936	1.956	2.052	2.151

6-38：假设 $QF_1 \sim QF_5$ 闭合，QF_6 断开。请问该发电厂高压母线 k_1 处发生三相短路的短路电流为下列何值？（供配电 2014 年考题改编）

（A）4.25 kA　　（B）4.98 kA　　（C）5.24 kA　　（D）7.84 kA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 281 页、第 300 页（第三版第 127 页表 4-1、第 152 页式（4-33））。

1）标幺值计算和网络归算详见例题 6-5。

2）由地区电网提供的三相短路电流：

$$I''_{k1S1}=\frac{I_j}{X_{*L}+X_{*S}}=\frac{1.56}{0.146+0.125}\text{kA}=5.756\text{ kA}$$

3）由发电厂提供的三相短路电流：

发电机的容量和 35 kV 侧基准电流为

$$S_G=\frac{P_G}{\cos\varphi}=\frac{20}{0.8}\text{MV}\cdot\text{A}=25\text{ MV}\cdot\text{A},\quad I_{rj1}=\frac{P_G}{\sqrt{3}U_{j1}\cos\varphi}=\frac{20}{\sqrt{3}\times37\times0.8}\text{kA}=0.39\text{ kA}$$

折算到发电机容量下的计算电抗：$X_{c1}=(X_{*G}+X_{*T1})\dfrac{S_G}{S_j}=(0.3+0.5)\times\dfrac{25}{100}=0.2$

按照 $X_{c1}=0.2$ 对应 0 s 查表 6-9 得三相短路电流周期分量起始值 $I_{*1}=5.432$。

通过发电机运算曲线表查出短路电流标幺值为

$$I''_{0k1}=I_{*1}I_{rj1}=5.432\times0.39\text{ kA}=2.118\text{ kA}$$

4）短路电流计算与归算

假设 $QF_1 \sim QF_5$ 闭合，QF_6 断开时，因异步电动机通过变压器 T_2 隔离，异步电动机 M 反馈电流不计入，所以发电厂高压母线 k_1 处发生三相短路的短路电流为

$$I''_{k1}=I''_{k1S1}+I''_{0k1}=(5.756+2.118)\text{kA}=7.874\text{ kA}$$

6-39：假设 $QF_1 \sim QF_5$ 闭合，QF_6 断开。请问 10 kV 母线 k_2 点处发生三相短路时，假设不考虑并联电容器组反馈电流，设电网和发电机提供的超瞬态短路电流周期分量有效值 I''_k 为 10 kA，其峰值系数为 $K_p=1.85$，异步电动机 M 反馈电流的峰值系数查图 6-21。当 k_2 点三相短路时，该 10 kV 母线 k_2 点处三相短路电流峰值为下列哪项数值？（供配电 2014 年考题改编）

（A）27.54 kA　　（B）26.16 kA　　（C）19.88 kA　　（D）17 kA

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 301 页（第三版第 151 页）或《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153—2014 附录 L 式（L. 0. 1-8）。

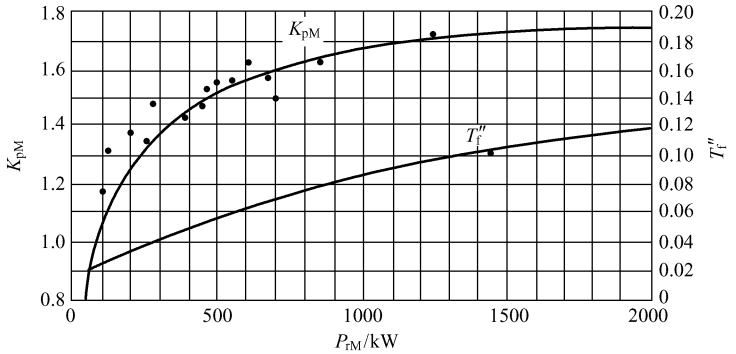


图 6-21　异步电动机额定容量 P_{rM}与冲击系数 K_{pM}的关系

T_f''—反馈电流周期分量衰减时间常数

异步电动机 M 额定电流为 124. 3 A，查图 6-21 中 1800 kW 异步电动机对应反馈电流的峰值系数为 1. 75，该 10 kV 母线 k_2 点处三相短路电流峰值为

$$i_p = i_{ps} + i_{pM} = \sqrt{2}\,(K_{ps} I''_s + 1.1 K_{pM} I''_M) = \sqrt{2}\,(1.85\times 10 + 1.1\times 1.75\times 5\times 0.1243)\,\text{kA} = 27.85\,\text{kA}$$

【知识点解析】

短路电流实用计算法——异步电动机反馈电流：

1）由一台异步电动机提供的反馈电流周期分量初始值按下式计算。

$$I''_M = K_{stM} I_{NM} \times 10^{-3}$$

2）由 n 台异步电动机提供的反馈电流周期分量初始值按下式计算。

$$I''_M = \sum_{i=1}^{n} K_{stMi} I_{NM} \times 10^{-3}$$

3）由 n 台异步电动机提供的反馈电流峰值电流按下式计算。

$$i_{pM} = K\sqrt{2} \sum_{i=1}^{n} K_{pMi} K_{stMi} I_{NMi} \times 10^{-3}$$

式中，I''_M 为电动机反馈电流交流分量初始值（方均根值，kA）；K_{stM} 为电动机反馈电流倍数，可取其起动电流倍数值；K_{stMi}为第 i 台电动机的反馈电流倍数，可取其起动电流倍数值；I_{NM}为电动机额定电流；I_{NMi}为第 i 台电动机额定电流；K_{pMi}为第 i 台电动机反馈电流峰值系数；K 为不同形式电动机的修正系数，异步电动机取 1. 1。

计入反馈电流后异步电动机的短路计算：三相短路电流交流分量初始值为

$$I''_k = I''_s + I''_M$$

短路电流峰值

$$i_p = i_{ps} + i_{pM} = \sqrt{2}\,(K_{ps} I''_s + K K_{pM} I''_M)$$

式中，I''_s 为由系统送到短路点的三相短路电流初始值；I''_M 为由短路点附近的异步电动机反馈电流初始值；i_{ps}为由系统送到短路点的短路电流峰值；i_{pM}为由短路点附近的电动机反馈

的短路峰值电流；K_{ps}为由系统馈送的短路电流峰值系数；K_{pM}为由异步电动机馈送的短路电流峰值系数，一般可取1.4~1.7，准确数据可查图6-18；K为不同类型电动机的修正系数，6 kV、10 kV异步电动机取1.1，低压异步电动机取0.9，同步电动机取1.1。

6-40：假设QF_1~QF_6全闭合，10 kV母线短路容量为150 MV·A，在10 kV母线安装有一组并联电容器，采用6%串联电抗器。计算并联电容器组容量不超过下列何值时k_2点短路可不考虑电容器对短路电流助增作用，说明理由。

（A）5 MV·A　　（B）7.5 MV·A　　（C）10 MV·A　　（D）15 MV·A

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

附录F，第F.7.1条　对于采用5%~6%串联电抗器的电容器装置Q_C/S_d<5%时，可不考虑并联电容器组对短路电流的影响。

$$Q_C<5\%S_d=0.05\times150\ \text{MV}\cdot\text{A}=7.5\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

【知识点解析】

大容量并联电容器组的短路电流计算：

（1）一般规定

下列情况可不考虑并联电容器组对短路电流的影响：

1）短路点在出线电抗器后。

2）短路点在主变压器的高压侧。

3）不对称短路。

4）计算$t(s)$周期分量有效值，当$M=\dfrac{X_S}{X_L}$<0.7时；或者对于采用5%~6%串联电抗器的电容器装置$\dfrac{Q_C}{S_d}$<5%时；对于采用12%~13%串联电抗器的电容器装置$\dfrac{Q_C}{S_d}$<10%时。

其中，Q_C为并联电容器装置的总容量（Mvar）；S_d为并联电容器装置安装地点的短路容量（MV·A）；M为系统电抗与电容器装置串联电抗的比值；X_S为归算到短路点的系统电抗；X_L为电容器装置的串联电抗。

采用阻尼措施（例如在串联电抗器两端并入一个不大的电阻），使得电容器组的衰减时间常数T_C<0.025 s时，能够有效地抑制并联电容器组对短路电流的影响。

（2）$t(s)$短路电流的计算

短路点的$t(s)$短路电流周期分量按下式计算：

$$I_{zt}=K_{tc}I_{ts}$$

式中，I_{ts}为系统供给的三相短路电流$t(s)$周期分量有效值（kA）；K_{tc}为考虑电容器助增作用的校正系数，由DL/T 5222—2005附录F.7节中查得。

（3）冲击电流计算

短路点的冲击短路电流按下式计算：

$$i_{ch}=K_{chc}i_{chs}$$

式中，i_{chs}为系统供给的冲击电流（kA）；K_{chc}为考虑电容器助增作用的冲击校正系统，由DL/T 5222—2005附录F.7节中查得。

6.4 实用短路电流计算法——短路电流热效应

【知识点说明】

实用短路电流计算法——短路电流热效应考点可以依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F 的 F.6 节和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）的 5.6.2 节。短路电流热效应属于重要考点，需要结合电力系统运行方式、短路点选择、短路点短路电流合计、短路持续时间等综合考虑，其中短路持续时间还需要根据电气设备、导体、电缆分析电力系统运行方式继电保护动作时间，所需要的知识综合性强，如 2014 年发输电考试中就综合考到了两道题目，很经典十分贴合实际设计工作，本书摘录在内并做出了详细解析。

IEC 法——短路电流热效应在《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）的 5.6.1 节重点推荐，对于校验刚性导体和软导体的电磁效应和裸导体的热效应（热稳定），依据《短路电流—效应计算 第 1 部分：定义和计算方法 》IEC 60865—1：2011 和《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013，适用于交流系统短路电流引起的电磁效应和热效应（焦耳积分）的计算；对于高压电器和开关设备的热效应（热稳定），依据 IEC 60865—1：1993（该标准对于电缆和绝缘导线不适用）中的计算方法。最新版 IEC 标准为 IEC 60909-0：2016、IEC 60865-1：2011 和 IEC 60865-2：2015 未做国标转化。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《水电工程三相交流系统短路电流计算导则》DL/T 5163—2002（NB/T 35043—2014）

《短路电流—效应计算 第 1 部分：定义和计算方法 》IEC 60865-1：2011

《短路电流—计算的影响 第 2 部分：计算举例》IEC 60865-2：2015

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013

《短路电流实用计算方法》

例题 6-41～6-43：一座远离发电厂与无穷大系统连接的变电站，其电气主接线如图 6-22 所示。

变电站位于海拔高度 2000 m 处，变电站设有两台 31500 kV·A（有 1.3 倍过负荷能力），110/10 kV 主变压器。正常运行时电源 3 与电源 1 在 110 kV 1 号母线并网运行，110 kV、10 kV 母线分列运行，当一段母线失去电源时，分段断路器投入运行。电源 3 向 k_1 点提供的最大三相短路电流为 4 kA，电源 1 向 k_2 点提供的最大三相短路电流为 3 kA，电源 2 向 k_3 点提供的最大三相短路电流为 5 kA。110 kV 电源线路主保护均为光纤纵差保护，保护动作时间为 0 s。架空线路 1 电缆线路 1 两侧的后备保护均为方向过电流保护，方向指向线路的动作时间为 2 s，方向指向 110 kV 母线的动作时间为 2.5 s。主变配置的差动保护动作时间为 0.1 s，110 kV 侧过电流保护动作时间为 1.5 s。110 kV 断路器全分闸时间为 50 ms。（发输电

2014 年考题）

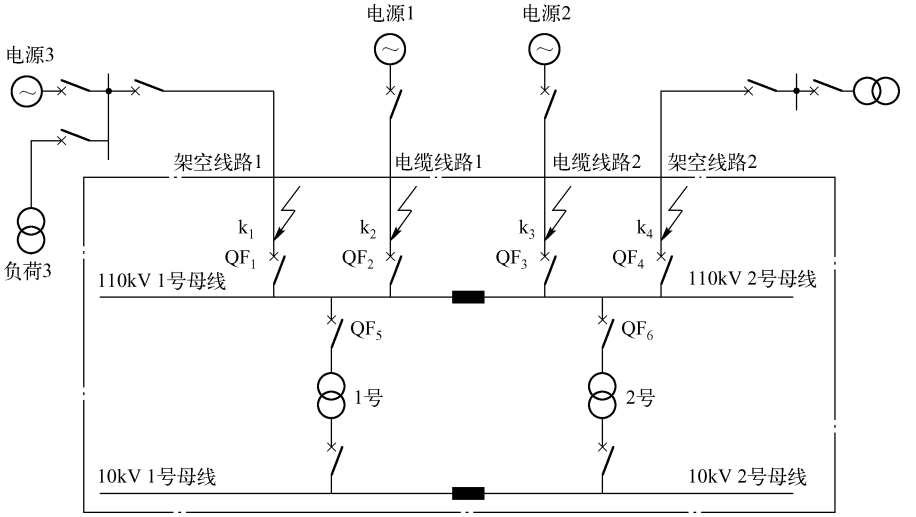


图 6-22　变电站主接线图

6-41：断路器 QF_1 和 QF_2 回路的短路电路热效应值应为下列哪组数值？（发输电 2014 年考题）

（A）18 $kA^2 \cdot s$，18 $kA^2 \cdot s$　　（B）22.95 $kA^2 \cdot s$，32 $kA^2 \cdot s$

（C）40.8 $kA^2 \cdot s$，32.8 $kA^2 \cdot s$　　（D）40.8 $kA^2 \cdot s$，22.95 $kA^2 \cdot s$

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 381 页（第三版第 210 页）。

第 5.0.4 条　确定短路电流时，应按可能发生最大短路电流的正常运行方式，不应按仅在切换过程中可能并列运行的接线方式。正常运行时电源 3 与电源 1 在 110 kV 的 1 号母线并网运行，110 kV、10 kV 母线分列运行，所以不用考虑电源 4 和电源 2，短路点可以设置在断路器 QF_1 和 QF_2 的两侧。

校验导体和电器动稳定、热稳定以及电器开断电流所用的短路电流，应按系统最大运行方式下可能流经被校验导体和电器的最大短路电流。断路器 QF_1 母线侧短路通过短路电流 4 kA 为最大，断路器 QF_2 电源侧短路通过短路电流 4 kA 为最大。

第 5.0.13 条　确定短路电流热效应计算时间时，对电器，宜采用后备保护动作时间加相应断路器的开断时间。架空线路 1 电缆线路 1 两侧的后备保护均为方向过电流保护，方向指向线路的动作时间为 2 s，方向指向 110 kV 母线的动作时间为 2.5 s，110 kV 断路器全分闸时间为 50 ms。

断路器 QF_1 母线侧短路过电流保护方向指向母线，故保护加开断时间为（2.5+0.05）s = 2.55 s。

断路器 QF_2 电源侧短路过电流保护方向指向线路，故保护加开断时间为（2.0+0.05）s = 2.5 s。

断路器 QF_1 和 QF_2 回路的短路电路热效应值（忽略非周期分量）为

$$Q_{QF1}=\frac{I''^2+10I_{zt/2}^2+I_{zt}^2}{12}t=I''^2t=4^2\times2.55\,kA^2\cdot s=40.8\,kA^2\cdot s$$

$$Q_{QF2}=\frac{I''^2+10I_{zt/2}^2+I_{zt}^2}{12}t=I''^2t=4^2\times2.05\,kA^2\cdot s=32.8\,kA^2\cdot s$$

6-42：如果 2 号主变 110 kV 断路器与 110 kV 侧套管间采用独立电流互感器，110 kV 侧套管与独立电流互感器之间为软导线连接，该导线的短路电流热效应计算值应为下列哪项数值？（发输电 2014 年考题）

（A）7.35 $kA^2\cdot s$　　（B）9.6 $kA^2\cdot s$　　（C）37.5 $kA^2\cdot s$　　（D）73.5 $kA^2\cdot s$

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 381 页（第三版第 210 页）。

第 5.0.4 条　确定短路电流时，正常运行时电源 3 与电源 1 在 110 kV 的 1 号母线并网运行，110 kV、10 kV 母线分列运行，所以不用考虑电源 4 和电源 2，110 kV 侧套管与独立电流互感器之间短路最大短路电流为电源 3 与电源 1 的合计，即(4+3) kA = 7 kA。

第 5.0.13 条　确定短路电流热效应计算时间时，对导体，宜采用主保护动作时间加相应断路器的开断时间。110 kV 侧套管与独立电流互感器之间短路属于主变差动的保护区域，主变配置的差动保护动作时间为 0.1 s，110 kV 断路器全分闸时间为 50 ms。热效应计算时间为(0.1+0.05) s = 0.15 s。

该导线的短路电路热效应值（忽略非周期分量）为

$$Q=\frac{I''^2+10I_{zt/2}^2+I_{zt}^2}{12}t=I''^2t=7^2\times0.15\,kA^2\cdot s=7.35\,kA^2\cdot s$$

6-43：如果 2 号主变采用 110 kV 侧套管电流互感器，110 kV 侧套管与隔离开关之间为软导线连接，该隔离开关的短路电流热效应计算值应为下列哪项数值？（发输电 2014 年考题改编）

（A）7.35 $kA^2\cdot s$　　（B）7.595 $kA^2\cdot s$　　（C）37.5 $kA^2\cdot s$　　（D）73.5 $kA^2\cdot s$

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 381 页（第三版第 210 页）。

第 5.0.4 条　确定短路电流时，正常运行时电源 3 与电源 1 在 110 kV 的 1 号母线并网运行，110 kV、10 kV 母线分列运行，所以不用考虑电源 4 和电源 2，110 kV 侧套管与独立电流互感器之间短路最大短路电流为电源 3 与电源 1 的合计，即(4+3) kA = 7 kA。

第 5.0.13 条　确定短路电流热效应计算时间时，对电器，宜采用后备保护动作时间加相应断路器的开断时间。110 kV 侧套管与隔离开关之间短路属于主变配置的 110 kV 侧过电流保护（无方向过流保护）的保护区域，主变配置的 110 kV 侧过流保护动作时间为 1.5 s，110 kV 断路器全分闸时间为 50 ms。热效应计算时间为(1.5+0.05) s = 1.55 s。

该隔离开关的短路电路热效应值（忽略非周期分量）为

$$Q=\frac{I''^2+10I_{zt/2}^2+I_{zt}^2}{12}t=I''^2t=7^2\times0.155\,kA^2\cdot s=7.595\,kA^2\cdot s$$

【知识点解析】

短路电流热效应基本公式：

1）导体和电器中引起的热效应 Q_t 按下式计算。

$$Q_t=\int_0^t i_{dt}^2 dt \approx Q_z + Q_f$$

式中，Q_z 为短路电流周期分量引起的热效应（$kA^2 \cdot s$）；Q_f 为短路电流非周期分量引起的热效应（$kA^2 \cdot s$）；i_{dt} 为短路电流瞬时值（kA）；t 为短路持续时间（s）。

2）短路电流周期分量引起的热效应 Q_z 按下式计算。

$$Q_z=\frac{(I''^2+10I_{zt/2}^2+I_{zt}^2)t}{12}$$

式中，$I_{zt/2}$ 为短路电流在（$t/2$）s 时的周期分量有效值（kA）。

当为多支路向短路点供给短路电流时，I''、$I_{zt/2}$ 和 I_{zt} 分别为各个支路短路电流之和。

3）短路电流非周期分量引起的热效应 Q_f 按下式计算。

$$Q_f=\frac{T_a}{\omega}(1-e^{-\frac{2\omega t}{T_a}})I''^2=TI''^2$$

式中，T 为等效时间（s），为简化工程计算，可按表 6-10 查得。

表 6-10　非周期分量等效时间　　（单位：s）

短　路　点	T	
	$t \leqslant 0.1$	$t>0.1$
发电机出口及母线	0.15	0.2
发电厂升高电压母线及出线发电机电压电抗器后	0.08	0.1
变电所各级电压母线及出线	0.05	

4）校验导体和电器动稳定、热稳定以及电器开断电流所用的短路电流，应按系统最大运行方式下可能流经被校验导体和电器的最大短路电流计算。系统容量应按具体工程的设计规划容量计算，并考虑电力系统的远景发展规划（宜按该工程投产后 5～10 年规划）。

确定短路电流时，应按可能发生最大短路电流的正常运行方式，不应按仅在切换过程中可能并列运行的接线方式。

5）用最大短路电流校验导体和电器的动稳定和热稳定时，应选取被校验导体或电器通过最大短路电流的短路点，选取短路点应遵守下列规定：

① 对不带电抗器的回路，短路点应选在正常接线方式时短路电流为最大的地点。

② 对带电抗器的 3～10 kV 出线和厂用分支回路，校验母线与母线隔离开关之间隔板前的引线和套管时，短路点应选在电抗器前；校验其他导体和电器时，短路点宜选在电抗器之后。

6）确定短路电流热效应计算时间时，应遵守下列规定。

① 对导体（不包括电缆），宜采用主保护动作时间加相应断路器开断时间。主保护有死区时，可采用能对该死区起作用的后备保护动作时间，并采用相应处的短路电流值。

② 对电器，宜采用后备保护动作时间加相应断路器的开断时间。

例题 6-44~6-47 与例题 6-38~6-40 题干相同。

6-44：题干中 QF_3 断开，QF_1 和 QF_2 合闸，假设以基准容量 $S_j=100\,MV\cdot A$、基准电压 $U_j=37\,kV$，计算的发电机和变压器支路的总电抗为 0.8，当 k_1 点三相短路时，保护动作使 QF_2 分闸。已知短路电流的持续时间为 0.2 s，直流分量的等效时间为 0.1 s。此时短路电流在 QF_2 中产生的热效应为下列哪项数值？

（A）$1.03\,kA^2\cdot s$　（B）$1.14\,kA^2\cdot s$　（C）$1.35\,kA^2\cdot s$　（D）$35.39\,kA^2\cdot s$

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 381 页（第三版第 210 页）。

标幺值计算与归算见例题 6-5。

计算电抗为

$$X_{c1}=X\frac{S_G}{S_j}=0.8\times\frac{25}{100}=0.2$$

发电机侧提供的短路电流为

$$I_{*0}=5.432$$

$$I_{*0.1s}=4.297$$

$$I_{*0.2s}=3.715$$

$$I''=I_{*1}I_{rj1}=5.432\times0.39\,kA=2.118\,kA$$

$$I_{0.1s}=I_{*0.1s}I_{rj1}=4.297\times0.39\,kA=1.676\,kA$$

$$I_{0.2s}=I_{*0.2s}I_{rj1}=3.715\times0.39\,kA=1.449\,kA$$

短路电流在断路器 QF_2 中产生的热效应为

$$Q_z=\frac{I''^2+10I_{zt/2}^2+I_{zt}^2}{12}t=\frac{2.118^2+10\times1.676^2+1.449^2}{12}\times0.2\,kA^2\cdot s=0.578\,kA^2\cdot s$$

$$Q_f=T_{eq}I''^2=0.1\times2.118^2\,kA^2\cdot s=0.449\,kA^2\cdot s$$

$$Q=Q_z+Q_f=1.03\,kA^2\cdot s$$

6-45：该发电厂所属变电站正常运行方式 $QF_1\sim QF_6$ 合闸。假设当短路点 k_1 发生三相短路时，35 kV 母线差动保护动作时间为 0.1 s、后备过电流保护动作时间为 1 s，动作跳开 $QF_1\sim QF_3$。$QF_1\sim QF_6$ 开断时间均为 0.1 s。此时地区电网短路电流在 35 kV 母线产生的热效应为下列何值？

（A）$1.03\,kA^2\cdot s$　（B）$1.14\,kA^2\cdot s$　（C）$1.35\,kA^2\cdot s$　（D）$8.28\,kA^2\cdot s$

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 381 页（第三版第 210 页）。

1）标幺值计算与归算见例题 6-5。

2）地区电网侧提供的短路电流：

$$I''_{k1S}=\frac{I_j}{X_{*L}+X_{*S}}=\frac{1.56}{0.146+0.125}\,kA=5.756\,kA$$

3）地区电网短路电流在 35 kV 母线产生的热效应：

第 5.0.13 条　确定短路电流热效应计算时间时，对导体宜采用主保护动作时间加相应断路器的开断时间。短路电流持续时间为 $t=t_b+t_d=(0.1+0.1)\,s=0.2\,s$，查表 F.6.3 得等效时间 T_{eq} 为 0.1 s。

$$Q_z=\frac{I''^2+10I''^2_{zl/2}+I''^2_{zl}}{12}t=I''^2_{k1S}t=5.756^2\times0.2\,kA^2\cdot s=6.626\,kA^2\cdot s$$

$$Q_f=T_{eq}I''^2_{k1s}=0.05\times5.756^2\,kA^2\cdot s=1.657\,kA^2\cdot s$$

$$Q_t=Q_z+Q_f=(6.626+1.657)\,kA^2\cdot s=8.283\,kA^2\cdot s$$

6-46：该发电厂所属变电站正常运行方式 $QF_1\sim QF_6$ 合闸。假设断路器 QF_3 旁独立电流互感器与变压器 T_2 高压侧套管之间发生三相短路，变压器 T_2 差动保护动作时间为 0.1 s、后备过电流保护动作时间为 1 s，动作跳开 $QF_3\sim QF_4$。$QF_1\sim QF_6$ 开断时间均为 0.1 s。此时 QF_3 断路器热稳定校验值为下列何值？

（A）16.6 $kA^2\cdot s$　　（B）56.6 $kA^2\cdot s$　　（C）63.18 $kA^2\cdot s$　　（D）93.1 $kA^2\cdot s$

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 381 页（第三版第 210 页）。

第 5.0.4 条　校验导体和电器动稳定、热稳定以及电器开断电流所用的短路电流，是地区电网和发电厂短路电流的合计（短路电流计算见例题 6-44、例题 6-45）。

第 5.0.13 条　确定短路电流热效应计算时间时，对电器，宜采用后备保护动作时间加相应断路器的开断时间。短路电流持续时间为 $t=t_b+t_d=(1+0.1)\,s=1.1\,s$。

短路电流周期分量热效应 Q_z：

$$Q_z=\frac{I''^2+10I''^2_{zl/2}+I''^2_{zl}}{12}t$$

$$=\frac{(5.756+2.118)^2+10\times(5.756+1.676)^2+(5.756+1.449)^2}{12}\times1.1\,kA^2\cdot s=61.07\,kA^2\cdot s$$

短路电流非周期分量热效应 Q_f：

地区电网属于无穷大系统，查表 F.6.3 得等效时间 T_{eq} 为 0.05 s，则

$$Q_{f1}=T_{eq}I''^2_{k1s}=0.05\times5.756^2\,kA^2\cdot s=1.657\,kA^2\cdot s$$

发电厂发电机升高电压母线处短路，持续时间 $t>0.1$ s，查表 F.6.3 得等效时间 T_{eq} 为 0.1 s，则

$$Q_{f2}=T_{eq}I''^2=0.1\times2.118^2\,kA^2\cdot s=0.449\,kA^2\cdot s$$

QF_3 断路器热稳定校验值 Q_t：

$$Q_t=Q_z+Q_f=[61.07+(1.657+0.449)]\,kA^2\cdot s=63.18\,kA^2\cdot s$$

6-47：假设该发电厂厂用电接在发电机出口处，其厂用电接有大型电动机，在电动机馈线电缆上发生三相短路。此时短路电流在厂用电动机馈线电缆中产生的热效应使用哪个公式计算？

（A）$I^2(t+T_b)$　　（B）$0.196I^2+0.22II_d+0.09I_d^2$

（C）$0.21I^2+0.23II_d+0.09I_d^2$　　（D）$0.245I^2+0.22II_d+0.09I_d^2$

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 附录 E 第 E. 1. 3 条。

对火电厂 3~10 kV 厂用电动机馈线回路，当本厂发电机机组容量为 20~100 MW 时应使用 $Q=I^2(t+T_b)$ 公式计算。

【知识点解析】

电缆短路电流热效应 Q 值确定方式，应符合下列规定：

1）对火电厂 3~10 kV 厂用电动机馈线回路，当机组容量为 100 MW 及以下时

$$Q=I^2(t+T_b)$$

2）对火电厂 3~10 kV 厂用电动机馈线回路，当机组容量大于 100 MW 时，Q 的表达式见表 6-11。

表 6-11　机组容量大于 100 MW 时火电厂电动机馈电回路 Q 值表达式

t/s	T_b/s	T_d/s	Q/(A²·s)
0. 15	0. 045	0. 062	$0.195I^2+0.22II_d+0.09I_d^2$
	0. 06		$0.21I^2+0.23II_d+0.09I_d^2$
0. 2	0. 045	0. 062	$0.245I^2+0.22II_d+0.09I_d^2$
	0. 06		$0.26I^2+0.24II_d+0.09I_d^2$

注：1. 对于电抗器或 u_d%小于 10. 5 的双绕组变压器，取 $T_b=0.045$ s，其他情况取 $T_b=0.06$ s。

2. 对中速断路器，t 可取 0. 15 s，对慢速断路器，t 可取 0. 2 s。

3）除火电厂 3~10 kV 厂用电动机馈线外的情况

$$Q=I^2t$$

式中，I 为系统电源供给短路电流的周期分量起始有效值（A）；I_d 为电动机供给反馈电流的周期分量起始有效值之和（A）；t 为短路持续时间（s）；T_b 为系统电源非周期分量的衰减时间常数（s）。

6.5　实用短路电流计算法——不对称短路电流计算

【知识点说明】

不对称短路计算主要计算过程和要求可以依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F 的 F. 5 节，具体细节可以依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）4-7 节，属于冷门考点，需要理解对称分量基本关系，了解电气设备的零序阻抗计算、短路点各种短路合成电流计算。对称分量法也是学习 IEC 法的基础知识，需要理解。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）

参考书目：

《水电工程三相交流系统短路电流计算导则》DL/T 5163—2002（NB/T 35043—2014）

《短路电流实用计算方法》

例题 6-48：某地区新建 2 台 1000 MW 级火力发电机组，发电机额定功率为 1070 MW，额定电压为 27 kV，额定功率因数为 0. 9。通过容量为 1230 MV·A 的主变压器送至 500 kV 升

压站，主变阻抗为18%，主变高压侧中性点直接接地。机组采用发电机变压器组接线方式，发电机的直轴瞬变电抗为0.257，直轴超瞬变电抗为0.187，当主变高压侧发生短路时由发电机侧提供的最大短路电流的周期分量起始值最接近下列哪项数值？（发电机的正序与负序阻抗相同，请使用不对称短路电流计算。）（发输电2016年考题改编）

（A）3.09 kA　　（B）3.61 kA　　（C）2.92 kA　　（D）3.86 kA

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005附录F和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）。

若发电机出口的两相短路，或中性点直接接地系统及自耦变压器等回路中的单相、两相接地短路较三相短路严重时，则应按严重情况计算。

标幺值计算与归算如下。

基准值选择：基准容量1000 MV·A。

发电机容量：$S_G=\dfrac{P_G}{\cos\varphi}=\dfrac{1070}{0.9}\text{MV}\cdot\text{A}=1188.9\text{MV}\cdot\text{A}$

发电机超瞬变电抗标幺值：$X''_{*d1}=X''_{*d2}=\dfrac{X''_d}{100}\dfrac{S_j}{S_G}=\dfrac{0.187\times1000}{1188.9}=0.1573$

变压器电抗标幺值：$X''_{*T1}=X''_{*T2}=\dfrac{X''_T}{100}\dfrac{S_j}{S_t}=\dfrac{0.18\times1000}{1230}=0.1463$

发电机侧计算电抗、三相短路电流：

$$X''_{*1\Sigma}=X''_{*G1}+X''_{*T1}=0.1573+0.1463=0.3036$$

计算电抗$X''_{*js}=X''_{*1\Sigma}\dfrac{S_G}{S_j}=0.3036\times\dfrac{1188.9}{1000}=0.361$，查DL/T 5222—2005图F.1和一次手册表4-7，$t=0$ s时$I''_*=2.95$，三相短路电流为

$$I''_{3max}=mI''_*I_G=2.95\times\frac{1188.9}{\sqrt{3}\times525}\text{kA}=3.86\text{kA}$$

发电机侧计算电抗、两相短路电流：

$$X''_{*2\Sigma}=X''_{*1\Sigma}+X''^{(2)}_{\Delta}=2X''_{*1\Sigma}=0.6072$$

计算电抗$X''_{*js}=X''_{*2\Sigma}\dfrac{S_G}{S_j}=0.6072\times\dfrac{1188.9}{1000}=0.722$，查DL/T 5222—2005图F.1和一次手册表4-7，$t=0$ s时$I''_*=1.351$，两相短路电流为

$$I''_{2max}=mI''_*I_G=\sqrt{3}\times1.351\times\frac{1188.9}{\sqrt{3}\times525}\text{kA}=3.06\text{kA}$$

经三相和两相短路电流对比后，三相短路电流3.86 kA值最大，所以选D。

【知识点解析】

（1）合成阻抗

计算不对称短路，首先应求出正序短路电流。正序短路电流的合成阻抗标幺值可由下式计算：

$$X_*=X_{1\Sigma}+X^{(n)}_{\Delta}$$

三相短路 $$X_{\Delta}^{(3)}=0$$

两相短路 $$X_{\Delta}^{(2)}=X_{2\Sigma}$$

单相短路 $$X_{\Delta}^{(1)}=X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}$$

两相接地短路 $$X_{\Delta}^{(1.1)}=\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}$$

式中，$X_{1\Sigma}$为正序网络的合成阻抗标幺值；$X_{2\Sigma}$为负序网络的合成阻抗标幺值；$X_{0\Sigma}$为零序网络的合成阻抗标幺值；$X_{\Delta}^{(n)}$为附加阻抗，与短路类型有关，上角符号表示短路的类型。

计算电抗的算式为

$$X_{js}^{(n)}=\left(1+\frac{X_{\Delta}^{(n)}}{X_{1\Sigma}}\right)X_{js}^{(3)}=X_{*}\frac{S_N}{S_j}$$

（2）正序短路电流$I_{d1}^{(n)}$

各种短路形式的正序短路电流$I_{d1}^{(n)}$的计算方法与三相短路电流相同。在计算电抗$X_{js}^{(n)}\geqslant 3$时，按无穷大电源系统短路电流计算；在有限电源系统中，按发电机查运算曲线法进行短路电流计算。

当个别计算法计算时，各电源正序电流分配系数按正序网络求得；按同一计算法计算时，其误差δ将随着短路的不对称度越来越小，即$\delta^{(1)}<\delta^{(2)}<\delta^{(1.1)}<\delta^{(3)}$。

当计算电抗$X_{js}^{(n)}\geqslant 3$时，可按系统为无穷大计算，其标幺值为

$$I_{*d1}^{(n)}=\frac{1}{X_{1\Sigma}+X_{\Delta}^{(n)}}$$

在有限电源系统中，按$X_{js}^{(n)}$直接查发电机运算曲线，即得不对称短路的正序电流标幺值$I_{*d1(t)}^{(n)}$。

正序电流的有名值为

$$I_{d1(t)}^{(n)}=I_{*d1(t)}^{(n)}I_N$$

（3）合成电流I_d

短路点的短路电流合成电流I_d可用下式计算：

$$I_d^{(n)}=mI_{d1}^{(n)}$$

三相短路 $$m=1$$

两相短路 $$m=\sqrt{3}$$

单相短路 $$m=3$$

两相接地短路 $$m=\sqrt{3}\sqrt{1-\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})^2}}$$

式中，m为I_d与正序电流之比值。

例题6-49~6-52：某110kV变电站，有两台相同的主变压器，有110kV、35kV两个电压等级，容量为180MV·A，短路阻抗为$u_k\%=14$（基准容量为$S_j=100$MV·A）。请回答下列问题。

6-49：假设变压器接线形式为Yyn0型三相四柱式，消弧线圈零序标幺值为正序标幺值几倍？

（A）0　　（B）1　　（C）$\sqrt{3}$　　（D）3

答案：【D】

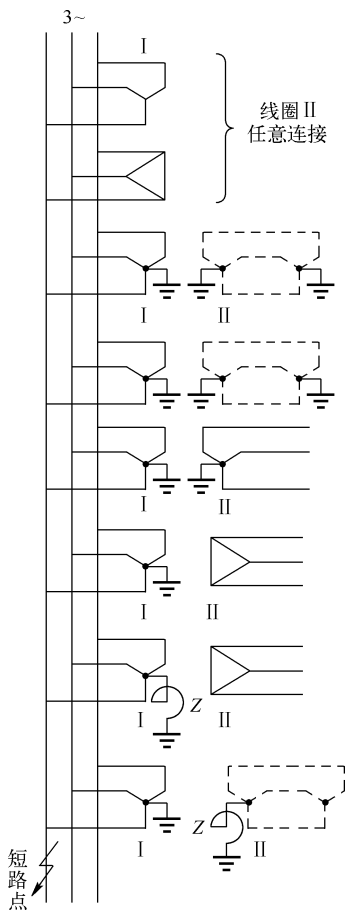
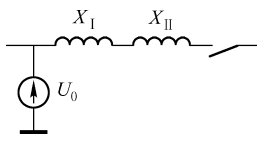
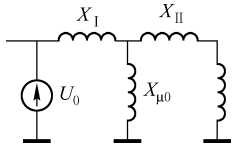
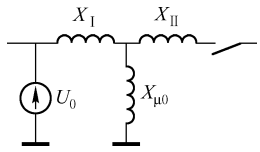
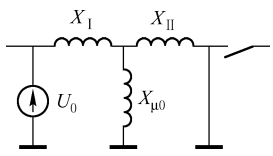
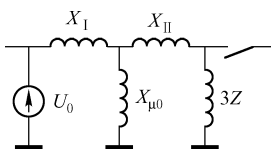
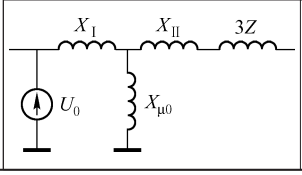
解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F 或《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 142 页表 4-17。

第 5.1 条　变压器中性点消弧线圈零序标幺值应乘以 3 倍加入零序网络。

【知识点解析】

变压器的零序阻抗不仅与构造有关，还与各绕组的连接方式有关，计算时应根据工程实际情况确定。双绕组变压器零序阻抗计算见表 6-12。

表 6-12　双绕组变压器的零序电抗

序号	接线图	等效电抗		
		等效网络	三个单相、三相四柱或壳式	三相三柱式
1			$X_0=\infty$	$X_0=\infty$
2			$X_0=X_{\mathrm{I}}+\cdots$	$X_0=X_{\mathrm{I}}+\cdots$
3			$X_0=\infty$	$X_0=X_1+X_{\mu 0}$
4			$X_0=X_1$	$X_0=X_1+\dfrac{X_{\mathrm{II}}X_{\mu 0}}{X_{\mathrm{II}}+X_{\mu 0}}$
5			$X_0=X_1+3Z$	$X_0=X_1+\dfrac{(X_{\mathrm{II}}+3Z)X_{\mu 0}}{X_{\mathrm{II}}+3Z+X_{\mu 0}}$
6			$X_0=X_1+3Z$	$X_0=X_1+\dfrac{(X_{\mathrm{II}}+3Z+\cdots)X_{\mu 0}}{X_{\mu 0}+X_{\mathrm{II}}+3Z+\cdots}$

注：1. $X_{\mu 0}$为变压器的零序励磁电抗。三相三柱式 $X_{*\mu 0}=0.3\sim1.0$，通常在 0.5 左右（以额定容量为基准）；三个单相、三相四柱式或壳式变压器 $X_{\mu 0}\approx\infty$。

2. X_{I}、X_{II}为变压器各线圈的正序电抗，两者大致相等，约为正序电抗 X_{I} 的一半。

6-50：假设变压器接线形式为 Ynd11 型三相四柱式，变压器零序标幺值为下列何值？

（A）0.0778　　（B）0.0389　　（C）0.1556　　（D）0.166

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 142 页表 4-17。

变压器接线形式为 Ynd11 型三相四柱式，变压器零序标幺值为

$$X_{*T0}=X_{*T1}=\frac{u_k\%}{100}\frac{S_j}{S_r}=\frac{14}{100}\times\frac{100}{180}=0.0778$$

6-51：假设该变电站 35 kV 母线侧发生单相短路，经过网络的化简，各序计算总阻抗标幺值如下：$X_{1\Sigma}=0.1623$，$X_{2\Sigma}=0.1623$，$X_{0\Sigma}=0.12$，使用不对称短路电流计算，两相接地短路时正序短路电流的合成阻抗最接近下列哪项？

（A）0.1623　　（B）0.2823　　（C）0.231　　（D）0.4446

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F。

两相接地短路时正序短路电流的合成阻抗为

$$X_*=X_{1\Sigma}+X_\Delta^{1.1}=X_{1\Sigma}+\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}=0.1623+\frac{0.1623\times0.12}{0.1623+0.12}=0.231$$

6-52：假设该变电站 35 kV 母线侧发生单相短路，经过网络的化简，各序计算总阻抗如下：$X_{1\Sigma}=0.1623$，$X_{2\Sigma}=0.1623$，$X_{0\Sigma}=0.12$，使用不对称短路电流计算，单相短路电流的周期分量起始有效值最接近下列哪项？

（A）33.87 kA　　（B）10.53 kA　　（C）19.56 kA　　（D）16.94 kA

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F。

基准值选择：$S_j=100\ \text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j=37\ \text{kV}$，$I_j=1.56\ \text{kA}$。

单相短路电流的周期分量起始有效值为

$$I_d^1=mI_{d1}^1=\frac{3I_j}{X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}=\frac{3\times1.56}{0.1623+0.1623+0.12}\text{kA}=10.53\ \text{kA}$$

6.6　IEC 法——短路电流计算

【知识点说明】

IEC 法——短路电流计算在《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 4 章中强烈推荐，其规范为《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分 电流计算》GB/T 15544.1—2013（IEC 60909-0：2001 国内现行）等系列规范。

虽然 GB/T 15544.1—2013 在“范围”一节中取消了“本标准主要作为进出口设备及对外工程投标使用，在国内工程计算中逐步推广采用”的规定，但是 GB/T 15544.1—2013 采用的等值电压源计算法与我国目前普遍采用的运算曲线法有相当大的差别。前者采用衰减系数的概念计算短路电流，且规定衰减系数仅与初始短路电流的标幺值有关，对于汽轮发电机和水轮发电机、不同励磁方式的发电机均未作区别。经分析，GB/T 15544.1—2013 中规定的衰减系数与我国发电机组的实际情况不尽相符，用于汽轮发电机则偏小，用于水轮发电机

则偏大。由于 GB/T 15544.1—2013 是等效采用 IEC 标准，不便于对其中的曲线进行修改，将 IEC 标准曲线用于我国国内的工程计算则不十分恰当，国内发输变电工程计算时建议使用发电机的运算曲线设计。

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 4 章引用的 GB/T 15544.1—2013 等效标准 IEC 60909-0：2001 已经在 IEC 标准中废止，现行版为 IEC 60909-0：2016、IEC 60909-1：2002、IEC 60909-2：2008、IEC 60909-3：2009 RLV、IEC 60909-4：2000，请设计人员在进出口设备及对外工程投标工程中使用 IEC 现行标准。本书例题参照 IEC 60909-4：2000 编写。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

参考书目：

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013

《三相交流系统短路电流计算 第 0 部分：电流计算》IEC 60909-0：2016

IEC 法短路计算应用范围图（见图 6-23）：

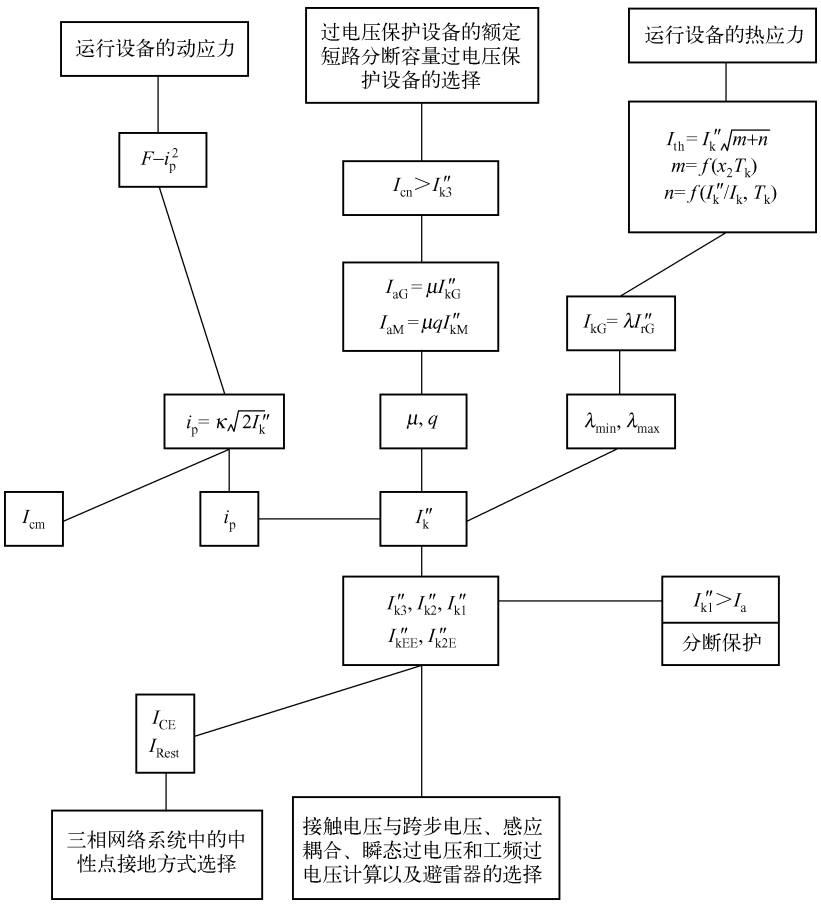


图 6-23　IEC 法短路计算应用范围

例题 6-53~6-55：某工厂有一厂用变电所，相关参数如图 6-24 所示，电网电压为 10 kV，在变电所母线 Q 处最大三相短路电流 $I''_k=10\,kA$，正常运行方式为两台变压器分列运行，变压器 T_1、T_2 容量为 630 kV·A，额定电压为 10/0.4 kV，短路阻抗为 4%，满载损耗为 6.2 kW，变压器低压侧为 $U_n=380\,V$、$f=50\,Hz$ 的 TN 低压系统。

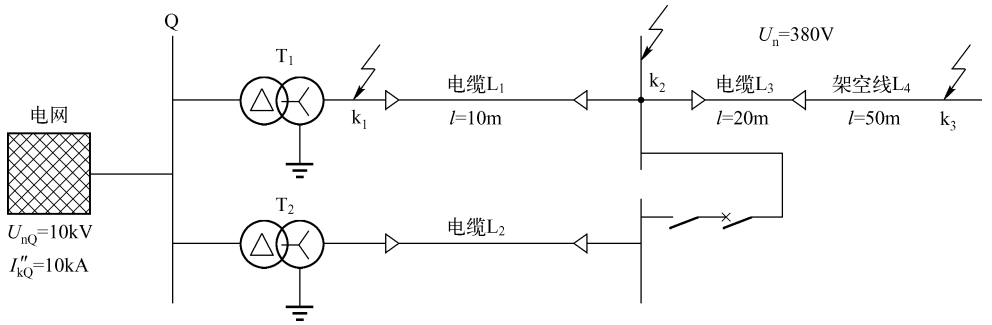


图 6-24　$U_n=380\,V$ 的低压系统

6-53：已知电网电压为 10 kV，在母线 Q 处最大三相短路电流 $I''_k=10\,kA$，则电网侧的正序阻抗（归算到变压器低压侧）为下列哪一项？（使用 IEC 法计算，写出计算过程和依据。）

（A）0.18 + j1.8 mΩ　　（B）0.127 + j1.27 mΩ

（C）0.101+ j1.011 mΩ　　（D）0.165 + j 1.65 mΩ

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 182 页。

查表 4.1-1 电压系数 $c_Q=c_{Qmax}=1.1$，电网侧的正序阻抗为

$$Z_{Qt}=\frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}}\frac{1}{t_N^2}=\frac{1.1\times10}{\sqrt{3}10}\times\left(\frac{0.4}{10}\right)^2\ m\Omega=1.016\ m\Omega$$

$$R_{Qt}=0.1X_{Qt}=0.1\times0.995Z_{Qt}=0.1\times0.995\times1.016\ m\Omega=0.101\ m\Omega$$

$$X_{Qt}=0.995Z_{Qt}=0.995\times1.016\ m\Omega=1.011\ m\Omega$$

$$Z_{Qt}=0.101+j1.011\ m\Omega$$

【知识点解析】

如果电网经过变压器向短路点馈电，仅知节点 Q 的对称短路电流初始值 I''_{kQ}，则 Q 点的正序网络阻抗归算到变压器低压侧的值 Z_{Qt} 可由下式确定：

$$Z_{Qt}=\frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}}\frac{1}{t_N^2}$$

式中，Z_{Qt} 为 Q 点的正序网络阻抗归算到变压器低压侧的阻抗（Ω）；U_{nQ} 为 Q 点的系统标称电压（kV）；I''_{kQ} 为流过 Q 点的对称短路电流初始值（kA）；c 为电压系数，见《配四》第 177 页表 4.1-1；t_N 为分接开关在主分接位置时的变压器额定变比。

若已知节点 Q 的对称短路容量初始值 S''_{kQ}，则 Z_{Qt} 可由下式确定：

$$Z_{Qt}=\frac{c(U_{nQ})^2}{S''_{kQ}}\frac{1}{t_N^2}$$

若电网电压在 35 kV 以上时，网络阻抗可视为纯电抗（略去电阻），即 $Z_Q=0+jX_Q$。计

算中若计及电阻但具体数值不知道，可按 $R_Q=0.1X_Q$ 和 $X_Q=0.995Z_Q$ 计算。

6-54：已知变电所变压器 T_1 零序电阻与正序电阻之比为 1，零序电抗与正序电抗之比为 0.95，则变压器 T_1 的零序阻抗为下列哪一项？（使用 IEC 法计算，写出计算过程和依据。）

（A）2.18 +j 8.8 mΩ　　（B）3.127+j 10.27 mΩ

（C）2.101+j 9.011 mΩ　　（D）2.437+j 9.121 mΩ

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 182 页。

查表 4.1-1 电压系数 $c_Q=c_{Qmax}=1.05$，变压器正序阻抗为

$$Z_{T1}=\frac{u_{krT1}}{100}\frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}}=\frac{4}{100}\times\frac{400^2}{630}\,\text{m}\Omega=10.159\,\text{m}\Omega$$

$$R_{T1}=\frac{P_{krT1}}{3I_{rT1LV}^2}=\frac{P_{krT1}U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}^2}=\frac{6.2\times400^2}{630^2}\,\text{m}\Omega=2.499\,\text{m}\Omega$$

$$u_{Rr}=\frac{P_{krT1}}{S_{rT1}}=\frac{6.2}{630}=0.984\%,\quad u_{Xr}=\sqrt{u_{kr}^2-u_{Rr}^2}=\sqrt{(4\%)^2-(0.984\%)^2}=3.877\%$$

$$X_{T1}=\sqrt{Z_{T1}^2-R_{T1}^2}=\sqrt{10.159^2-2.499^2}\,\text{m}\Omega=9.847\,\text{m}\Omega$$

$$Z_{T1}=2.499+\text{j}9.847\,\text{m}\Omega$$

$$K_{T1}=0.95\frac{c_{max}}{1+0.6x_{T1}}=0.95\times\frac{1.05}{1+0.6\times0.03877}=0.975$$

$$Z_{T1K}=Z_{T1}K_{T1}=(2.437+\text{j}9.601)\,\text{m}\Omega$$

变压器零序阻抗为

$$Z_{(0)T1K}=(1\times2.437+\text{j}9.601\times0.95)\,\text{m}\Omega=(2.437+\text{j}9.121)\,\text{m}\Omega$$

【知识点解析】

双绕组变压器的正序短路阻抗 $Z_T=R_T+\text{j}X_T$ 按下式计算：

$$Z_T=\frac{u_{kN}}{100\%}\frac{U_{NT}^2}{S_{NT}}\tag{6-1}$$

$$R_T=\frac{u_{RN}}{100\%}\frac{U_{NT}^2}{S_{NT}}=\frac{P_{kNT}}{3I_{NT}^2}\tag{6-2}$$

$$X_T=\sqrt{Z_T^2-R_T^2}\tag{6-3}$$

$$u_{RN}=\frac{P_{kNT}}{S_{NT}}\times100\%\tag{6-4}$$

式中，Z_T 为双绕组变压器的正序短路阻抗（Ω）；U_{NT} 为变压器高压侧或低压侧的额定电压（kV）；I_{NT} 为变压器高压侧或低压侧的额定电压（kA）；S_{NT} 为变压器的额定容量（MV·A）；P_{kNT} 为变压器负载损耗（kW）；u_{kN} 为额定阻抗电压百分数，其值由变压器设备厂家提供；u_{RN} 为额定电阻电压分量百分数，u_{RN} 能够根据变压器流过额定电流 I_{NT} 时的绕组总损耗 P_{krT} 和额定容量 S_{NT} 计算得到。

R_T/X_T 通常随着变压器容量的增大而减小。计算大容量变压器短路阻抗时，可略去绕组中的电阻，只计电抗，只是在计算短路电流峰值或非周期分量时才计及电阻。

计算 $Z_T=R_T+jX_T=Z_{(1)}=Z_{(2)}$ 所必需的数据，可从设备铭牌值获得。零序短路阻抗 $Z_{(0)T}=R_{(0)T}+jX_{(0)T}$ 可从铭牌值或设备制造厂得到。

对于有载调节或无有载调节分接头的双绕组变压器，计算短路阻抗时应在式（6-1）~式（6-3）中引入阻抗校正系数 K_T，即 $Z_{TK}=K_TZ_T$，其中 $Z_T=R_T+jX_T$。

$$K_T=0.95\frac{c_{max}}{1+0.6x_T}$$

式中，K_T 为变压器的阻抗校正系数；c_{max} 为根据表 4.1-1 由网络变压器低压侧电网的标称电压决定；x_T 为变压器的相对电抗。

6-55：若变电所变压器 T_1 出口处 k_1 点发生三相短路，此时短路电流峰值为下列哪一项？（使用 IEC 法计算，写出计算过程和依据）

（A）24.5 kA　　（B）31.66 kA　　（C）35.27 kA　　（D）44.72 kA

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 182 页。

查表 4.1-1 电压系数 $c=1.05$，电网侧的正序阻抗和变压器正序阻抗计算见例题 6-54、6-55，短路点 k_1 处的正序阻抗归算：

$$Z_k=Z_{Qt}+Z_{T1k}=2.538+j10.612\ m\Omega$$

$$I''_k=\frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}=\frac{1.05\times380}{\sqrt{3}\times\sqrt{2.538^2+10.612^2}}kA=21.11\ kA$$

$$\frac{R_k}{X_k}=\frac{2.538}{10.612}=0.239$$

$$k=1.02+0.98e^{-3R/X}=1.498$$

短路点 k_1 发生三相短路峰值电流为

$$i_p=k\sqrt{2}I''_k=1.498\times\sqrt{2}\times21.11\ kA=44.72\ kA$$

【知识点解析】

（1）三相短路初始值

通常情况下，三相短路时采用等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 和短路阻抗 $Z_k=R_k+jX_k$ 通过下式计算 I''_k：

$$I''_k=\frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}=\frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2+X_k^2}}$$

式中，U_n 为系统标称电压（kV）；Z_k 为三相短路阻抗（Ω）；R_k 为三相短路电阻（Ω）；X_k 为三相短路电抗（Ω）。

（2）对称短路电流峰值 i_p

由放射状电网馈电的三相短路，各馈电支路对短路电流峰值的馈入均可表示为

$$i_p=k\sqrt{2}I''_k$$

式中，k 为计算系数；计算系数 k 由 R/X 或 X/R 决定，可通过图 6-25 查曲线或通过下式计算得到：

$$k=1.02+0.98e^{-3R/X}$$

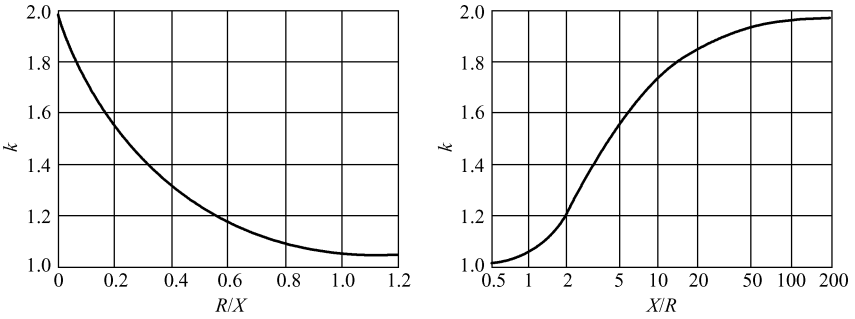


图 6-25　串联支路中系数 k 与 R/X 或 X/R 的函数关系

例题 6-56：某企业新建 110/35/10 kV 变电所，设 2 台 SSZ11-50000/110 的变压器，$u_{KNHM}=10.5\%$，$u_{KNHL}=17\%$，$u_{KNML}=6.5\%$，$u_{RNHM}=0.26\%$，$u_{RNHL}=0.16\%$，$u_{RNML}=0.16\%$，容量比为 100/50/100，主变压器三侧绕组（H、M、L）35 kV 侧的电抗有名值应为下列哪组数值？（使用 IEC 法计算，写出计算过程和依据）

（A）0.0418+j2.9006、0.0835+j2.1555、-0.0046+j1.0476

（B）0.1252+j5.0561、0.0372+j3.9482、0.0789+j3.2031

（C）0.105+j0.26、0.17+j0.16、0.0065+j0.16

（D）5.0561+j0.1252、3.9482+j0.0372、3.2031+j0.0789

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 183 页。

$$u_{XNHM}=\sqrt{u_{KNHM}^2-u_{RNHM}^2}=\sqrt{(10.5\%)^2-(0.26\%)^2}=10.497\%$$

$$u_{XNHL}=\sqrt{u_{KNHL}^2-u_{RNHL}^2}=\sqrt{(17\%)^2-(0.16\%)^2}=16.999\%$$

$$u_{XNML}=\sqrt{u_{KNML}^2-u_{RNML}^2}=\sqrt{(6.5\%)^2-(0.16\%)^2}=6.498\%$$

阻抗校正系数：

$$K_{TNHM}=0.95\frac{C_{max}}{1+0.6x_{TNHM}}=0.95\times\frac{1.1}{1+0.6\times0.10497}=0.983$$

$$K_{TNHL}=0.95\frac{C_{max}}{1+0.6x_{TNHL}}=0.95\times\frac{1.1}{1+0.6\times0.16999}=0.948$$

$$K_{TNML}=0.95\frac{C_{max}}{1+0.6x_{TNML}}=0.95\times\frac{1.1}{1+0.6\times0.06498}=1.006$$

三相绕组变压器阻抗：

$$\underline{Z}_{HM}=K_{TNHM}\left(\frac{u_{RNHM}}{100\%}+\mathrm{j}\frac{u_{XNHM}}{100\%}\right)\frac{U_{NTM}{}^2}{S_{NTHM}}=0.983\times\left(\frac{0.26}{100}+\mathrm{j}\frac{10.497}{100}\right)\times\frac{35^2}{25}\Omega=0.1252+\mathrm{j}5.0561\,\Omega$$

$$\underline{Z}_{HL}=K_{TNHL}\left(\frac{u_{RNHL}}{100\%}+\mathrm{j}\frac{u_{XNHL}}{100\%}\right)\frac{U_{NTM}^2}{S_{NTHL}}=0.948\times\left(\frac{0.16}{100}+\mathrm{j}\frac{16.999}{100}\right)\times\frac{35^2}{50}\Omega=0.0372+\mathrm{j}3.9482\,\Omega$$

$$\underline{Z}_{ML}=K_{TNML}\left(\frac{u_{RNML}}{100\%}+\mathrm{j}\frac{u_{XNML}}{100\%}\right)\frac{U_{NTM}^2}{S_{NTML}}=1.006\times\left(\frac{0.16}{100}+\mathrm{j}\frac{9.498}{100}\right)\times\frac{35^2}{25}\Omega=0.0789+\mathrm{j}3.2031\,\Omega$$

三相绕组变压器阻抗：

$$\underline{Z}_{H}=\frac{1}{2}(\underline{Z}_{HM}+\underline{Z}_{HL}-\underline{Z}_{ML})=\frac{1}{2}(0.1252+j5.0561+0.0372+j3.9482-0.0789-j3.2031)\ \Omega=$$
$0.0418+j2.9006\ \Omega$

$$\underline{Z}_{M}=\frac{1}{2}(\underline{Z}_{HM}+\underline{Z}_{ML}-\underline{Z}_{HL})=\frac{1}{2}(0.1252+j5.0561+0.0789+j3.2031-0.0372-j3.9482)\ \Omega=$$
$0.0835+j2.1555\ \Omega$

$$\underline{Z}_{L}=\frac{1}{2}(\underline{Z}_{HL}+\underline{Z}_{ML}-\underline{Z}_{HM})=\frac{1}{2}(0.0372+j3.9482+0.0789+j3.2031-0.1252-j5.0561)\ \Omega=$$
$-0.0046+j1.0476\ \Omega$

例题 6-57~6-58：已知火力发电厂采用发电机变压器组供电到 110 kV 母线（见图 6-26），已知发电机容量为 150 MV·A，额定电压为 21 kV，$R_G=0.002\ \Omega$，$X''_d=0.412\ \Omega$。变压器额定容量为 150 MV·A，额定电压为 115/21 kV，有载调压归算到 110 kV 侧的阻抗为 $Z_T=0.441+j14.101\ \Omega$，阻抗电压百分数 $u_{kr}=16\%$。当 110 kV 母线 Q 处发生短路时，请回答以下问题。（已知校正系数 $K_G=0.96$，$K_T=0.98$，$K_S=0.996$，使用 IEC 法计算，写出计算过程和依据）

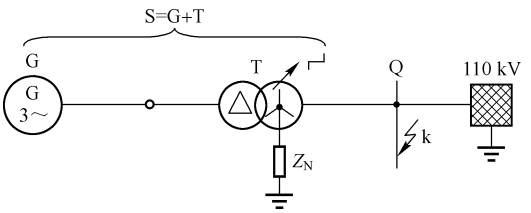


图 6-26　火力发电厂发电机变压器组接线图

6-57：计算发电机变压器组提供最小延时开断时间为 0.1 s 时的开断电流 I_b 为下列哪组数值。

（A）3.50 kA　　（B）5.87 kA　　（C）7.90 kA　　（D）10.25 kA

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 182~233 页。

发电机变压器组：

$$Z_S=K_S(t_r^2Z_G+Z_{THV})=0.996\times[(115/21)^2\times(0.002+j0.412)+(0.441+j14.101)]\ m\Omega=$$
$0.499+j26.351\ m\Omega$

查表 4.1-1 中 $c_Q=c_{max}=1.1$，三相短路电流为

$$I''_K=\frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_K}=\frac{1.1\times110}{\sqrt{3}\times\sqrt{0.499^2+26.351^2}}\ kA=2.6521\ kA$$

开断电流为

$$I_{NG}=\frac{S_{rG}}{\sqrt{3}U_{rG}}=\frac{150}{\sqrt{3}\times21}\ kA=4.1239\ kA;\ I''_G=t_NI''_K=\frac{115}{21}\times2.6521\ kA=14.523\ kA$$

$I''_G/I_{NG}=14.523/4.1239=3.522>2$ 为近端短路，$\mu=0.62+0.72e^{-0.32I''_G/I_{NG}}=0.62+0.72e^{-0.32\times14.523/4.1239}=0.853$

$$I_b=\mu I''_K=0.853\times2.6521\ kA=3.5051\ kA$$

例题 6-58：若发电机饱和电抗为 $X_{dsat}=2.0$，励磁顶值为 1.3 倍时，计算发电机变压器组提供的峰值电流 i_p 和最大稳态电流 I_{kmax} 分别为下列哪组数值。

（A）2.65 kA，0.22 kA　　（B）5.31 kA，6.60 kA

（C）7.09 kA，0.22 kA　　（D）7.09 kA，6.60 kA

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 182~233 页。

发电机大于 100 MV·A 的假想电阻：$R_{Gf}=0.05X''_d=0.05\times0.412\ \Omega=0.0206\ \Omega$

$$Z_{Sf}=K_S(t_r^2\ \underline{Z}_{Gf}+\underline{Z}_{THV})=0.996\times[(115/21)^2\times(0.0206+j0.412)+(0.441+j14.101)]\ m\Omega$$
$$=1.0545+j26.351\ m\Omega$$

$$\frac{R_{Sf}}{X_{Sf}}=\frac{1.0545}{26.351}=0.040\Rightarrow k=1.02+0.98e^{-3R/X}=1.02+0.98e^{-3\times0.04}=1.889$$

发电机变压器组三相短路电流计算同题 6-57，$I''_K=2.6521$ kA。

短路点 k 发生三相短路峰值电流为

$$i_p=k\sqrt{2}I''_k=1.889\times\sqrt{2}\times2.6521\ kA=7.085\ kA$$

最大稳态电流为

$$I_{NG}=\frac{S_{rG}}{\sqrt{3}U_{rG}}=\frac{150}{\sqrt{3}\times21}kA=4.1239\ kA;\ I''_G=t_NI''_K=\frac{115}{21}\times2.6521\ kA=14.523\ kA$$

$$I''_G/I_{NG}=14.523/4.1239=3.522>2,\text{查图 4.3-8a 中 }\lambda_{max}\approx1.6$$

$$I_{kmax}=\lambda_{max}I_{NG}/t^2=1.6\times4.1239/(115/21)^2\ kA=0.22\ kA$$

第 7 章　高压电气设备

【知识点导图】

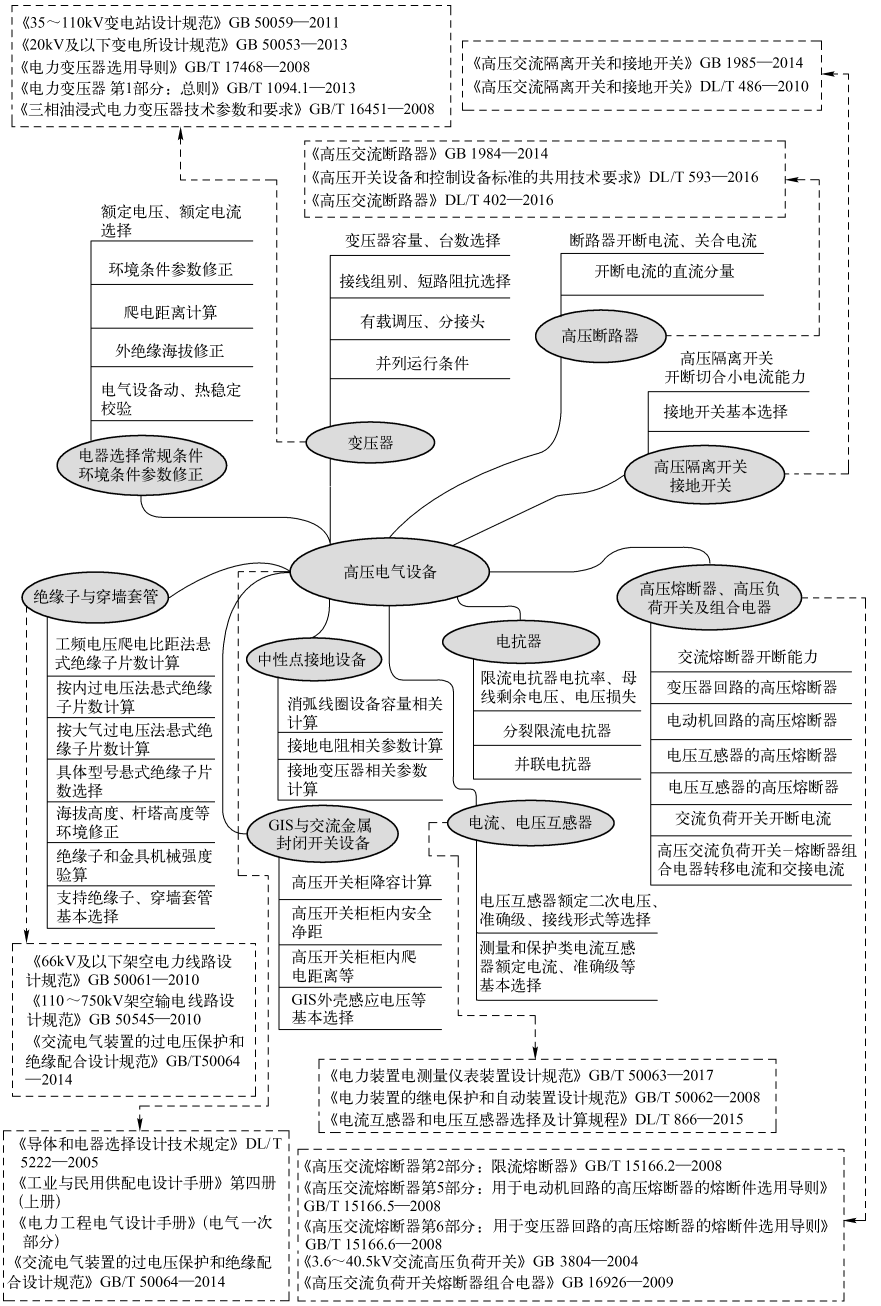


图 7-1　高压电气设备知识点导图

图 7-1 所示的高压电气设备知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点，由于本章知识体系是以《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）为基础的，对应内容较为陈旧，各小节中列出了对应的最新规范名录以供参考。本章核心考点很多，近两年经常考到的有电气设备在环境条件改变时的修正，变压器容量选择，消弧线圈、接地电阻、接地变压器、电流互感器相关参数计算，悬式绝缘子片数计算，穿墙套管动稳定计算等，考点比较散乱，详见各小节的知识点说明和相应例题。

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 5 章对高压电气设备的内容进行了大幅更新，更新了高压熔断器小节，增加了 IEC 法动、热稳定校验的内容（本章也增加了对应例题）；增加了并联电容器及其附属设备选择内容（相关知识点例题详见第 4 章）。

7.1 电器选择常规条件和环境条件参数修正

【知识点说明】

1）电器基本选择属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）等。要求掌握电气设备选择一般条件、电气设备额定电压、电气设备回路持续工作电流、电气设备额定耐受电压并了解其他要求。

2）电气设备环境条件参数修正属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。要求熟练掌握环境条件对电气设备额定电流和温升修正，环境条件对电气设备额定耐受电压和试验电压修正。

3）电器动、热稳定校验属于重要考点，实用短路电流计算法的动、热稳定校验依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5~7 节、附录 F 和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 8 章。但《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.5~5.6 节增加了 IEC 法的动、热稳定校验，采用 IEC 60865-1—2011、IEC 60865-2—2015，请设计人员在进出口设备及对外工程投标工程计算时使用，因未转化为中国标准，在国内工程计算中仅作推广，本书给出了相应例题。

4）污秽等级和爬电比距属于重要考点，依据《污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第 1 部分：定义、信息和一般原则》GB/T 26218.1—2010（等效 IEC TS 60815-1—2008，代替 GB/T 16434—1996）等。要求熟练掌握污秽等级和爬电比距下电气设备校验和绝缘子的选择。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则》GB 311.1—2012

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第1部分：定义、信息和一般原则》GB/T 26218.1—2010（IEC TS 60815-1—2008）

例题7-1~7-5：某企业根据负荷发展需要，拟在企业内新建一座变电站，用于企业内35 kV负荷供电，该变电所电源取自地区110 kV电网（无限大电源容量），请回答设备选择的相关问题。

7-1：假设变压器容量为2×20000 kV·A，因变压器需要承担事故时转移的一二级负荷，故允许长时间过负荷，过负荷电流为额定电流的1.3倍，此时变压器110 kV侧进线电器设备的额定电流不应小于下列哪个数值？并说明理由。

（A）105 A　　（B）137 A　　（C）210 A　　（D）273 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第314~315页或《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第232页。

变压器110 kV侧额定电流为

$$I_r=\frac{S_r}{\sqrt{3}U_r}=\frac{20000}{\sqrt{3}\times110}\text{A}=105\text{ A}$$

高压电器及导体的额定电流不应小于该回路的最大持续工作电流，即

$$I_n>I_{max}=1.3\times105\text{ A}=136.5\text{ A}$$

【知识点解析】

1）对于断路器、隔离开关、组合电器、封闭式组合电器、金属封闭开关设备、负荷开关、高压接触器等长期工作制电器，在选择其额定电流时应满足各种可能运行方式下回路持续工作电流，即

$$I_n\geqslant I_z$$

2）最大工作电流：对于电抗器、断路器、隔离开关等长期工作制电器不能过载运行，要满足各种工作方式下的最大回路持续工作电流。不同回路的持续工作电流，可以按照表7-1中所列原则计算。

表7-1　回路持续工作电流

回路名称		计算工作电流	说　明
出线	带电抗器出线	电抗器额定电流	
	单回路	线路最大负荷电流	包括线路损耗与事故时转移过来的负荷
	双回路	（1.2~2）倍一回线的正常最大负荷电流	包括线路损耗与事故时转移过来的负荷
	环形与一台半断路器接线回路	两个相邻回路正常负荷电流	考虑断路器事故或检修时，一个回路加另一最大回路负荷电流的可能
	桥型接线	最大元件负荷电流	桥回路尚需考虑系统穿越功率
变压器回路		1.05倍变压器额定电路	① 根据在0.95额定电压以上时其容量不变； ② 带负荷调压变压器应按变压器的最大工作电流
		（1.3~2.0）倍变压器额定电流	若要求承担另一台变压器事故或检修时转移的负荷，则应考虑变压器允许的过负荷时间
母线联络回路		1个最大电源元件的计算电流	

（续）

回路名称	计算工作电流	说　明
母线分段回路	分段电抗器额定电流	① 考虑电源元件事故跳闸后仍能保证该段母线负荷； ② 分段电抗器一般发电厂为最大一台发电机额定电流的50%～80%，变电所应满足用户的一级负荷和大部分二级负荷
旁路回路	需旁路的回路最大额定电流	

7-2：若该110 kV户外变电站，设有两台主变压器，选择该变电站110 kV隔离开关设备时，环境最高温度宜采用下列哪一项？（供配电2011年考题）

（A）年最高温度　　（B）最热月平均最高温度

（C）安装处通风设计温度，当无资料时，可取最热月平均最高温度加5℃

（D）安装处通风设计最高排风温度

答案：【A】

解答过程：依据《3～110 kV高压配电装置》GB 50060-2008表3.0.2或《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005表6.0.2。

电气设备室外环境温度最高为年最高温度，选A。

【知识点解析】

选择导体和电器的环境温度依据表7-2。

表7-2　选择导体和电器的环境温度

类　别	安装场所	环境温度/℃	
		最　高	最　低
电器	屋外	年最高温度	年最低温度
	屋内电抗器	该处通风设计最高排风温度	
	屋内其他	该处通风设计温度。当无资料时，可取最热月平均最高温度加5℃	

注：1. 年最高（或最低）温度为一年中所测得的最高（或最低）温度的多年平均值。
2. 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值，取多年平均值。

7-3：该110 kV户外变电站，选择110 kV断路器时，其最高工作电压的最低值不得低于下列哪项数值？（供配电2006年考题）

（A）110 kV　　（B）115 kV　　（C）126 kV　　（D）145 kV

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第312～313页（第三版第200页）。

断路器的最高工作电压为

$$U_m \geqslant U_s = 126\ \text{kV}$$

【知识点解析】

选用的高压电器及开关设备，其额定电压应符合所在回路的系统标称电压，高压电器及开关设备的最高电压不应小于所在回路的系统最高电压，即

$$U_m \geqslant U_s$$

式中，U_m为高压电器的最高电压（kV）；U_s为系统最高电压（kV）。

高压电器的最高电压见表 7-3。

表 7-3　高压电器的最高电压　　（单位：kV）

系统标称电压 U_n	3（3.3）	6	10	20	35	66	110
设备最高电压 U_m	3.6	7.2	12	24	40.5	72.5	126

注：1. 表中系统标称电压括号内的电压数值为用户要求时使用。

2. 绝缘套管设备最高电压第Ⅰ系列的标准值为 3.5 kV、6.9 kV、11.5 kV、17.5 kV、23 kV、40.5 kV、72.5 kV、126 kV；第Ⅱ系列的标准值为 3.6 kV、7.2 kV、12 kV、17.5 kV、24 kV、36 kV、52 kV、72.5 kV、100 kV、123 kV、145 kV。

高压交流金属封闭开关设备的额定电压均为系统最高电压上限值。

7-4：假设企业所在地区海拔高度为 2300 m，设有 35 kV 分变电所。总变电所所在地区的污秽特征如下：大气污染较为严重，重雾重盐碱区域，距离海岸盐场 2.5 km，盐密为 0.2 mg/cm^2，总变电所中 35 kV 断路器的爬电距离为 875 mm，下列断路器绝缘瓷瓶爬电距离校验结论中，哪项是正确的？并说明理由。（供配电 2013 年考题）

（A）经计算，合格　　（B）经计算，不合格

（C）无法计算，不能判定　　（D）无须计算，合格

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 325~327 页。

查表 5.3-4 污秽为Ⅲ级，查表 5.3-6，对应 2.5 cm/kV。断路器绝缘瓷瓶爬电距离为

$$K_d\lambda U_m = 2.5\times1\times40.5\ \text{mm} = 1012.5\ \text{mm} > L = 875\ \text{mm}$$

经计算，不合格，选 B。

【知识点解析】

电气设备户外绝缘的爬电距离按下式计算：

$$L \geqslant K_d\lambda U_m$$

式中，L 为电气设备户外绝缘的几何爬电距离（cm）；K_d 为电气设备户外绝缘爬电距离增大系数，详见各设备规范的规定；λ 为电气设备户外绝缘的爬电比距；U_m 为系统最高电压。

7-5：假设企业所在地区海拔高度为 2300 m，该 110 kV 变电站 110 kV 断路器的额定短时工频绝缘耐受电压哪项是正确的？并说明理由。

（A）210 kV　　（B）215 kV　　（C）269 kV　　（D）285 kV

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 324 页、第 319 页（第三版第 205 页）和《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014。

查 GB 50064—2014 表 6.4.6-1 中 110 kV 断路器的额定短时工频绝缘耐受电压为 230 kV。

绝缘耐受电压海拔修正系数为

$$K_a = e^{m(H-1000)/8150} = e^{(2300-1000)/8150} = 1.17$$

修正后断路器额定短时（1 min）工频绝缘耐受电压为

$$K_aU_s = 1.17\times230\ \text{kV} = 269\ \text{kV}$$

【知识点解析】

对于安装在海拔 1000 km 以上的高压电器，该使用场所要求的绝缘耐受电压是由标准参

考大气条件下的绝缘耐受电压乘以修正系数来决定的，按下式计算：

$$K_a = e^{m(H-1000)/8150}$$

式中，K_a 为修正系数；H 为海拔（m）；为了简单起见，m 取下述确定值：$m=1$ 用于工频、雷电冲击和相间操作冲击电压；$m=0.9$ 用于纵绝缘操作冲击电压；$m=0.75$ 用于相对地操作冲击电压。

海拔修正系数 K_a 也可以由图 7-2 选取。海拔修正系数 K_a 和海拔 H 的关系曲线如图 7-2 所示。

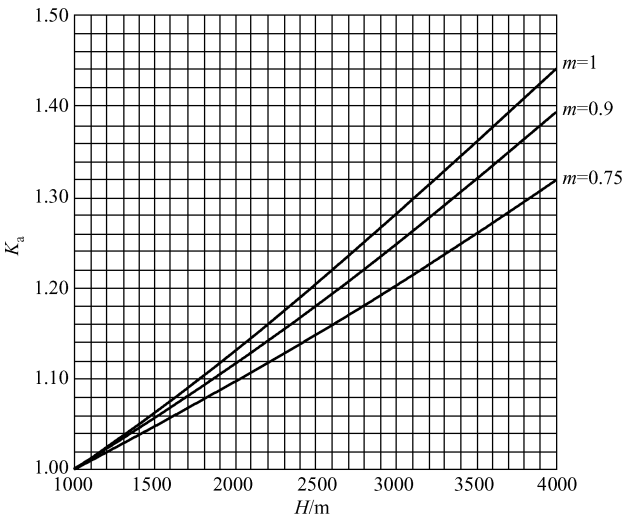


图 7-2　海拔修正系数 K_a 和海拔 H 的关系曲线

例题 7-6：某新建 2×300 MW 燃煤发电厂，高压厂用电系统标称电压为 6 kV，其中性点为高电阻接地。当额定电流为 2000 A 的 6.3 kV 开关运行在周围空气温度为 50℃，海拔高度为 2000 m 环境中时，其实际的负荷电流应不大于下列哪项值？（发输电 2012 年考题）

（A）420 A　　（B）1580 A　　（C）1640 A　　（D）1940 A

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222-2005 第 5.0.3 条。

额定电流温度和海拔修正：

$$I' = I\times\left[1-(50-5)\times 1.8\%-\frac{(2000-1000)}{100}\times 0.3\%\right] = 2000\times(1-0.82\%-0.97\%)\ \text{A} = 1580\ \text{A}$$

7.2　变压器

【知识点说明】

1）供配电变压器选型属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）等。要求熟练掌握变压器选择一般要求，变压器容量、台数选择；掌握变压器接线组别、短路阻抗选择，变压器有载调压、分接头数量选择；了解变压器并列

运行条件。

2）变电站主变压器的相关要求可以参考《电力变压器选用导则》GB/T 17468—2008、《电力变压器 第1部分：总则》GB 1094.1—2013、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）等。

依据书目：

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011

《20 kV 及以下变电所设计规范》GB 50053—2013

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上下册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《电力变压器选用导则》GB/T 17468—2008

《电力变压器 第1部分：总则》GB 1094.1—2013

《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》GB/T 6451—2008

例题 7-7：某新建35 kV变电所，已知计算负荷为15.9 MV·A，其中一、二级负荷为11 MV·A，节假日时运行负荷为计算负荷的二分之一。变压器选择容量为10 MV·A的主变两台，已知变压器的空载有功损耗为8.2 kW，负载有功损耗为47 kW，空载电流百分数 $I_0\%$ 为0.7，阻抗电压百分数 $u_k\%$ 为7.5，变压器的过载能力按1.2倍考虑。无功功率经济当量取0.1 kW/kvar，校验变压器的容量是否满足一、二级负荷的供电要求，并确定节假日时两台变压器的经济运行方式。（供配电2016年考题）

（A）不满足，两台运行　　（B）满足，两台运行

（C）不满足，单台运行　　（D）满足，单台运行

答案：【B】

解答过程：依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011第3.1.3条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）第68页、第1561页（第三版第40页）。

装有两台及以上主变压器的变电站，当断开一台主变压器时，其余主变压器的容量（包括过负荷能力）应满足全部一、二级负荷用电，即 $1.2S_r = 1.2\times10\ \text{MV}\cdot\text{A} = 12\ \text{MV}\cdot\text{A} > 11\ \text{MV}\cdot\text{A}$，满足要求。

经济运行临界负荷：

$$S_{cr} = S_r\sqrt{2\frac{P_0+K_qQ_0}{P_k+K_qQ_r}} = 10\times\sqrt{2\times\frac{8.2+0.1\times10000\times0.7\%}{47.8+0.1\times10000\times7.5\%}}\ \text{MV}\cdot\text{A} = 4.976\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

节假日实际运行负荷 $S = 15.9/2\ \text{MV}\cdot\text{A} = 7.95\ \text{MV}\cdot\text{A} > 4.976\ \text{MV}\cdot\text{A}$，宜两台运行。

【知识点解析】

（1）35~110 kV 变电站变压器一般要求

1）主变压器的台数和容量，应根据地区供电条件、负荷性质、用电容量和运行方式等条件综合考虑确定。

2）有一、二级负荷的变电站应装设两台主变压器，当技术和经济比较合理时，可装设两台以上主变压器。如变电站可由中、低压侧电网取得足够容量的工作电源时，可装设一台

主变压器。

3）装有两台及以上主变压器的变电站，当断开一台主变压器时，其余主变压器的容量（包括过负荷能力）应满足全部一、二级负荷用电要求。

4）对于35~110 kV变电站，当满足供电要求时宜选用双绕组变压器。具有三种电压的变电站，如通过各侧绕组的负荷均达到该变压器容量的15%以上，主变压器宜采用三相绕组变压器。

5）主变压器宜选择低损耗、低噪声变压器。

6）电力潮流变化大和电压偏差大的变电站，如经计算普通变压器不能满足电力系统和用户对电压质量的要求时，应采用有载调压变压器。

7）变压器过载能力应满足运行要求。

（2）变压器经济运行要求

变电所主变压器经济运行的条件见表7-4。

表7-4　变电所主变压器经济运行的条件

序　　号	主变压器台数	经济运行的临界负荷	经济运行条件
1	2台	$S_{cr}=S_r\sqrt{2\dfrac{P_0+K_qQ_0}{P_k+K_qQ_r}}$	若$S<S_{cr}$宜1台运行 若$S>S_{cr}$宜2台运行
2	n台	$S_{cr}=S_r\sqrt{n(n-1)\dfrac{P_0+K_qQ_0}{P_k+K_qQ_r}}$	若$S<S_{cr}$宜$n-1$台运行 若$S>S_{cr}$宜n台运行

注：S_{cr}为经济运行临界负荷（kV·A）；S_r为变压器的额定容量（kV·A）；S为变电所实际负荷（kV·A）；P_0为变压器空载有功损耗（铁损，kW）；Q_0为变压器空载时的无功损耗（kvar），$Q_0\approx S_r(I_0\%)/100$，$I_0\%$为变压器空载电流占额定电流的百分值（%）；$P_k$为变压器满载（短路）有功损耗（kW）；$Q_r$为变压器满载（短路）无功损耗（kvar），$Q_r\approx S_r(U_k\%)/100\%$，$U_k\%$为变压器阻抗电压占额定电压的百分值（%）；$K_q$为无功功率经济当量（kW/kvar），由发电机电压直配的工厂变电所$K_q=0.02\sim0.04$ kW/kvar，经两级变压的工厂变电所$K_q=0.05\sim0.08$ kW/kvar，经三级及以上变压的工厂变电所$K_q=0.01\sim0.15$ kW/kavr，在不计及上述计算条件时，一般取$K_q=0.1$ kW/kavr。

例题7-8：某一般性质的220 kV变电站，电压等级为220/110/10 kV，两台相同的主变压器，容量为240/240/120 MV·A，两台主变压器同时运行时的负载率为65%，从系统供电经济合理性考虑，该变电站一台主变10 kV侧最少应带下列哪项负荷值时，变压器选型是合理的？（发输电2008年考题）

（A）120 MV·A　　（B）72 MV·A　　（C）36 MV·A　　（D）18 MV·A

答案：【C】

解答过程：依据《35~110 kV变电站设计规范》GB 50059—2011第3.1.4条。

通过主变各侧绕组负荷至少达到变压器额定容量的15%以上时，宜采用三绕组变压器，因此主变10 kV最少带负荷为240×15%MV·A=36 MV·A，选C。

例题7-9：某10 kV变电所要增扩建，目前在用的一台110/10 kV，7500 kV·A，接线形式为Yd11的主变压器，下列可以与其并列运行、允许的容量最大是哪一种？（发输电2011年考题）

（A）7500 kV·A，Yd7　　（B）10000 kV·A，Yd11

（C）15000 kV·A，Yd5　　（D）20000 kV·A，Yd11

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 67 页（第三版第 40 页）。

变压器并列运行条件：额定电压和变压比相同，联结组别相同，短路电压（即阻抗电压）相等，容量相等或相近。

答案 A、C 接线组别不同不符合要求；答案 B 接线组别相同，容量比载在 2∶1 符合要求；答案 D 接线组别相同，容量比载在 2.7∶1 符合要求；答案 D 容量最大，选 D。

【知识点解析】

按并列运行条件选择变压器。两台或多台变压器的变电站，各台变压器通常采取分列运行方式。如需采取变压器并列运行方式时，必须满足表 7-5 所列条件。

表 7-5　变电站变压器并列运行条件

序　　号	并列运行条件	技 术 要 求
1	额定电压和变压比相同	变压比差值不得超过 0.5%，调压范围与每级电压要相同
2	联结组别相同	包括联结方式、极性、相序都必须相同
3	短路电压（即阻抗电压）相等	短路电压值不得超过±10%
4	容量相等或相近	两变压器容量比不宜超过 3∶1

例题 7-10：某工厂拟建一座 110/10 kV 变电站，由两路独立的 10 kV 电源供电。预计一级负荷为 10 MW，二级负荷为 35 MW，三级负荷为 10 MW，负荷平均分配到两台变压器上。站内设两台主变压器，接线组别为 Ynd11。110 kV 采用单母线分段接线，110 kV 母线正常运行方式为分列运行，未补偿前工厂内负荷功率因数为 86%，经过补偿后功率因数达到 96%满足要求。该主变压器的计算容量和选取的变压器容量最小值应为下列哪组数值？并说明选择原则和依据。（不考虑变压器损耗）（发输电 2013 年考题改编）

（A）计算值 34 MV·A，选 40 MV·A　　（B）计算值 34 MV·A，选 50 MV·A

（C）计算值 47 MV·A，选 50 MV·A　　（D）计算值 53 MV·A，选 63 MV·A

答案：【C】

解答过程：依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011 第 3.1.3 条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上下册）第 68 页、第 1561 页。

装有两台及以上主变压器的变电站，当断开一台主变压器时，其余主变压器的容量（包括过负荷能力）应满足全部一、二级负荷用电。

补偿后一台变压器正常负荷：

$$S_r \geqslant \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{(10+35+10)/2}{0.96}\ \text{MV·A} = 28.6\ \text{MV·A}$$

补偿后的全部一二级负荷为

$$S_r \geqslant \frac{P_{12}}{\cos\varphi} = \frac{10+35}{0.96}\ \text{MV·A} = 46.9\ \text{MV·A}$$

取最大值，变压器计算值为 47 MV·A，选 50 MV·A，选 C。

例题 7-11：某企业拟建一座 10 kV 变电站，若该变电所补偿前的计算负荷 $P_c = 390.1$ kW、$Q_c = 408.89$ kvar，实际补偿容量为 280 kvar，忽略电网损耗，按最低损失率为条件选择变压

器容量并计算变压器负荷率，其结果最接近下列哪组数值？（供配电 2010 年考题）

（A）500 kV · A，82%　　（B）800 kV · A，51%

（C）800 kV · A，53%　　（D）1000 kV · A，57%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 10 页（第三版第 3 页）。

变电所补偿后的总计算容量：

$$S_c=\sqrt{P_c^2+(Q_{c1}-Q_{c2})^2}=\sqrt{390.1^2+(408.89-280)^2}\ \text{kV}\cdot\text{A}=410.84\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 291 页。

变压器的最低损失率发生在 $\beta_{jP}=\sqrt{\dfrac{P_0}{P_k}}$，一般为 0.5～0.6，本题中未提供变压器的铜损和铁损参数，故估算一般变压器容量为 $\dfrac{S_c}{\beta}=\dfrac{410.84}{0.5\sim0.6}\ \text{kV}\cdot\text{A}=684.74\sim821.68\ \text{kV}\cdot\text{A}$。

初步选择变压器容量为 800 kV · A，此时负荷率为 $\beta=S_c/S_r=410.84/800=51\%$，选 B。

【知识点解析】

当铜损等于铁损时，变压器的损失率达到最低，β_{jP} 称为有功经济负载系数。所以，当固定变压器运行时，可以通过调负载来降低 $\Delta P\%$。一般变压器的 $\dfrac{P_0}{P_k}\approx\dfrac{1}{4}\sim\dfrac{1}{3}$，故最低损失率大体发生在负载系数 β 为 0.5～0.6。简单化采用经济负荷率选择变压器是不可取的，特别是按铜损等于铁损得出的所谓经济负荷率只是理论值。这种做法没有考虑其他众多因素，如售电单价的高低、负荷性质、无功补偿的差别、运行情况的变化、负荷计算的误差等，仅作为理论分析使用。

例题 7-12：某科技园位于寒冷地区，其中规划有科研办公楼高 99 m，科研办公楼用电统计见表 7-6，设计要求变压器负荷率不大于 65%，无功补偿后的功率因数按 0.92 计算，同时系数取 0.9，不计及变压器损耗，计算变压器容量应为下列哪项数值。（变压器容量只按负荷率选择，不进行其他校验）（供配电 2017 年考题）

表 7-6　科研办公楼用电统计表

序　号	用户负荷名称	容量/ kW	需要系数 K_x	cosφ	备　　注
1	照明用电	316	0.7	0.9	
2	应急照明	40	1	0.9	平时用电 20%
3	插座及小动力用电	1057	0.35	0.85	
4	新风机组及风机盘管	100	0.6	0.8	
5	动力设备	105	0.6	0.8	
6	制冷设备	960	0.6	0.8	
7	采暖热交换设备	119	0.6	0.8	
8	出租商业及餐饮	200	0.6	0.8	

（续）

序　号	用户负荷名称	容量/ kW	需要系数 K_x	cosφ	备　　注
9	建筑立面景观照明	57	0. 6	0. 7	
10	控制室及通信机房	100	0. 6	0. 85	
11	信息及智能化系统	20	0. 6	0. 85	
12	防排烟设备	550	1	0. 8	
13	消防水泵	215	0. 5	0. 8	
14	消防卷帘门	20	1	0. 8	
15	消防电梯	30	1	0. 8	
16	客梯、货梯	150	0. 65	0. 8	
17	建筑立体面擦窗机	52	0. 6	0. 8	

注：所有用电设备不计及损耗，即效率均取 1。

（A）2×1000 kV · A　　（B）2×1250 kV · A

（C）2×1600 kV · A　　（D）2×2000 kV · A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 68 页（第三版第 23 页）。

应急照明按照平时用电 20%计算，采暖热交换设备比制冷设备小可不计，消防设备不计，消防电梯计入（消防负荷估算小于正常工作负荷）。科研办公楼用电负荷计算表见表 7-7。

表 7-7　科研办公楼用电负荷计算表

用户负荷名称	容量/kW	需 要 系 数	功 率 因 数	功率/kW
照明用电	316	0. 7	0. 9	221. 2
应急照明	40×0. 2	1	0. 9	8
插座及小动力用电	1057	0. 35	0. 85	369. 95
新风机组及风机盘管	100	0. 6	0. 8	60
动力设备	105	0. 6	0. 8	63
制冷设备	960	0. 6	0. 8	576
出租商业及餐饮	200	0. 6	0. 8	120
建筑立面景观照明	57	0. 6	0. 7	34. 2
控制室及通信机房	100	0. 6	0. 85	60
信息及智能化系统	20	0. 6	0. 85	12
消防电梯	30	1	0. 8	30
客梯、货梯	150	0. 65	0. 8	97. 5
建筑立体面擦窗机	52	0. 6	0. 8	31. 2
合计				1683. 05
计入无功补偿以后的计算容量	$S=K_{\Sigma p}\dfrac{P}{\cos\varphi}=0.9\times1683.05\div0.92\,\text{kV}\cdot\text{A}=1646.5\,\text{kV}\cdot\text{A}$			

选择两台变压器，单台变压器容量为 $S_{rT}=\frac{S}{2\beta}=\frac{1646.5}{2\times0.65}$ kV·A = 1266.5 kV·A，可选择 2×1600 kV·A，选 C。

7.3 高压断路器

【知识点说明】

1）断路器基本选择、断路器开断电流属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 9 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求熟练掌握断路器额定电压、额定电流选择与环境条件修正，断路器开断电流、关合电流等的校验；了解断路器开断电流直流分量的计算。

2）断路器动、热稳定校验属于重要考点，《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.5~5.6 节中 IEC 法对短路时短路作用力校验和热稳定校验要求有所改变。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《高压交流断路器》GB 1984—2014

《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》DL/T 593—2016

《高压交流断路器》DL/T 402—2016

例题 7-13：某 110/10 kV 变电所，变电所所在地的海拔高度为 2000 m，户外设备运行的环境温度为-25~45℃，且冬季时有冰雪天气。若 110/10 kV 变电所 10 kV 出线间隔采用 10 kV 真空断路器，断路器在正常环境条件下额定电流为 630 A、周围空气温度为 40℃时的允许温升为 20℃，该断路器在本工程所在地区环境条件下及环境温度 5℃时的额定电流和 40℃时的允许温升为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）740 A，19℃　　（B）740 A，20℃　　（C）630 A，19℃　　（D）630 A，20℃

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5.0.3 条。

户外设备运行的环境温度为-25~45℃，断路器在本工程所在地区环境条件下及环境温度 5℃时的额定电流为

$$I'_T=I[1+(40-5)\times0.5\%]=630\times1.175\ \text{A}=740\ \text{A}$$

断路器在本工程所在地区环境条件下及环境温度 40℃时的允许温升为

$$T'=T\left(1-\frac{2000-1000}{100}\times0.3\%\right)=20\times0.97℃=19.4℃$$

【知识点解析】

环境条件对电器额定电流、允许温升修正计算：

电器的正常使用环境条件规定为：周围空气温度不高于 40℃，海拔不超过 1000 m。当电器使用在周围空气温度高于 40℃（但不高于 60℃）时，允许降低负荷长期工作。推荐周

围空气温度每增高 1℃，减少额定电流负荷的 1.8%；当电器使用在周围空气温度低于 +40℃时，推荐周围空气温度每降低 1℃，增加额定电流负荷的 0.5%，但其最大过负荷不得超过额定电流负荷的 20%；当电器使用在海拔超过 1000 m（但不超过 4000 m）且最高周围空气温度为 40℃时，其规定的海拔每超过 100 m（以海拔 1000 m 为起点），允许温升降低 0.3%。

温度对额定电流简化修正公式：

$$I_t = I_e[1-0.018(t-40)]\text{（空气温度>40℃时）}$$

$$I_t = I_e[1+0.005(40-t)]\text{（空气温度<40℃时不得超过 } I_e \text{ 的 20%）}$$

式中，t 为空气温度（℃）。

海拔对允许温升 T' 简化修正公式：

$$T' = T[1-0.003(h-1000)/100]\text{（空气温度为 40℃时，以海拔 1000 m 为起点）}$$

式中，T 为允许温升（℃）；h 为海拔高度。

例题 7-14：某企业总变电所设计中，安装有变压器 TR_1 及电抗器 L，并从总变电所 6 kV 母线引一回路向车间变电所供电，供电系统如图 7-3 所示。6 kV 侧为不接地系统，380 V 系统为 TN-S 接地形式。假设通过 6 kV 侧断路器 QF_2 的最大三相短路电流 $I''_{k3}=34$ kA，短路电流持续时间为 430 ms，短路电流直流分量等效时间为 50 ms，变压器 6 kV 短路视为远端短路，冲击系数 $K_p=1.8$，断路器 QF_2 的短路耐受能力为 25 kA/3 s，峰值耐受电流为 63 kA，下列关于该断路器是否通过动、热稳定校检（实用短路电流计算法）的判断中，哪项是正确的？请说明理由。

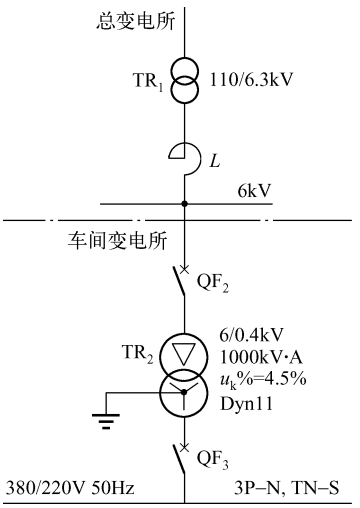


图 7-3　企业总变电站供电系统图

（A）热稳定校验不通过，动稳定校验不通过

（B）热稳定校验不通过，动稳定校验通过

（C）热稳定校验通过，动稳定校验不通过

（D）热稳定校验通过，动稳定校验通过

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 376 页、第 385 页（第三版第 212 页）。

断路器 QF_2 的动稳定校验：

$$i_p = i_{ps} + i_{pM} = \sqrt{2}K_{ps}I''_{k3} = \sqrt{2}\times 1.8\times 34\text{ kA} = 86.55\text{ kA} > i_{max} = 63\text{ kA}$$，校验不通过

依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 F。

断路器 QF_2 的热稳定校验：

周期分量 $Q_{z1} = \dfrac{I''^2 + 10I''^2_{0.1s} + I''^2_{0.2s}}{12}t = I''^2_{k3}t = 34^2\times 0.43\text{ kA}^2\cdot\text{s} = 497.08\text{ kA}^2\cdot\text{s}$

非周期分量 $Q_f = T_{eq}I''^2_{k1s} = 0.05\times 34^2\text{ kA}^2\cdot\text{s} = 57.8\text{ kA}^2\cdot\text{s}$

短路电流热效应 $Q_t = Q_z + Q_f = (497.08+57.8)\text{ kA}^2\cdot\text{s} = 554.98\text{ kA}^2\cdot\text{s} < I''^2_{th}t_{th} = 25^2\times 3\text{ kA}^2\cdot\text{s} = 1875\text{ kA}^2\cdot\text{s}$，校验通过。

【知识点解析】

（1）断路器动稳定校检

$$i_p \leqslant I_p$$

$$F_{k3} \leqslant F_{th} 或\ F_{tv}$$

式中，i_p 为三相短路峰值（冲击）电流（kA）；I_p 为电器额定峰值耐受电流（kA），由厂家样本查得；F_{k3} 为短路时端子上的作用力（N）；F_{th} 为接线端子允许的静态水平力（N）；F_{tv} 为接线端子允许的静态垂直力（N）。

（2）断路器热稳定校检

$$Q_t \leqslant I_k^2 t_k$$

式中，Q_t 为短路电流热效应（$kA^2 \cdot s$）；I_k 为额定短时耐爱电流（kA），由样本查得；t_k 为额定短路持续时间（s），由样本查得。

例题 7-15：某 110 kV 有效接地系统中的一变电站，有 110/10 kV，31.5 MV·A 主变两台。110 kV 进线 2 回、35 kV 出线 5 回。假如 110 kV 采用外桥接线，有 20 MV·A 穿越功率，则桥回路中的断路器长期持续工作电流为下列哪一项？

（A）165.3 A　　（B）270.3 A　　（C）330.6 A　　（D）135.6 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 314~315 页。

查表 5.2-3 中桥形接线的计算工作电流为最大元件负荷电流并考虑系统穿越功率，本题中最大元件为变压器，有 20 MV·A 的穿越功率。桥回路中的断路器长期持续工作电流为

$$I_n > I_{max} = \frac{(31.5+20)\times 10^3}{\sqrt{3}\times 110}\ A = 270.3\ A$$

例题 7-16：假设发电机出口发生短路时，由系统侧提供的短路电流周期分量的起始有效值为 135 kA，系统侧提供的短路电流值大于发电机侧提供的短路电流值。主保护动作时间为 10 ms，发电机断路器的固有分闸时间为 50 ms，全分断时间为 75 ms，系统侧的时间常数 X/R 为 50，发电机出口断路器的额定开断电流为 160 kA。请计算发电机出口断路器选择时的直流分断能力应不小于下列哪项数值。（发输电 2017 年考题改编）

（A）50%　　（B）58%　　（C）69%　　（D）82%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 316 页（第三版第 201 页）。

断路器的最短分闸时间为 $T_{op} = (50+10)\ ms = 60\ ms$，时间常数 $\tau = 50/314\ ms$，断路器额定短路开断电流的直流分量百分数为 $\%dc = 100e^{-\frac{T_{op}+T_N}{\tau}} = 100e^{-314\times\frac{0.06+0}{50}} = 68.61\%$。

直流分断能力：$\%DC = \dfrac{135\sqrt{2}\times 68.61\%}{160\sqrt{2}} = 57.89\%$

【知识点解析】

高压断路器额定短路开断电流的直流分量采用对交流分量幅值的百分数表示，可按下式计算：

$$\%dc = 100e^{-\frac{T_{op}+T_N}{\tau}}$$

式中，%dc 为高压断路器额定短路开断电流直流分量的百分数；T_{op}为直流分量百分数对应于时间间隔等于断路器首先分闸极的最短分闸时间（ms），可向断路器制造厂家索取；τ 为时间常数（ms）；T_N 为额定频率的一个半波时间（ms），对于自脱扣断路器应设定为 T_N = 0 ms，对于仅由辅助动力脱扣的断路器，当额定频率为 50 Hz 时，T_N = 10 ms。

直流分量百分数对应的时间间隔等于 T_{op}加上 T_N。

例题 7-17：某 10 kV 配电装置采用单母线接线方式，当该母线发生三相对称短路时，系统频率 f = 50 Hz；三相对称短路电流初始值 I''_k = 16 kA；峰值短路电流的计算系数 κ = 1.35。已知该母线进线断路器的峰值耐受电流为 36 kA。使用 IEC 法计算该母线三相对称峰值短路电流为下列何值，进线断路器是否通过动稳定校验？请说明理由。

（A）28.5 kA，动稳定校验不通过

（B）32.4 kA，动稳定校验通过

（C）36.8 kA，动稳定校验不通过

（D）30.5 kA，动稳定校验通过

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 232 页、第 376 页。

该母线三相对称峰值短路电流为

$$i_p = \sqrt{2}\kappa I''_{k3} = \sqrt{2}\times 1.35\times 16\ \text{kA} = 30.5\ \text{kA} < I_p = 36\ \text{kA}$$，校验通过

7.4 高压隔离开关、接地开关

【知识点说明】

1）高压隔离开关、接地开关基本选择属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 9 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求熟练掌握高压隔离开关额定电压、额定电流选择与环境条件修正，高压隔离开关开断切合小电流能力，并了解接地开关基本选择。

2）高压隔离开关、接地开关动、热稳定校验属于重要考点，《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.5~5.6 节中 IEC 法对短路时短路作用力校验和热稳定校验要求有所改变。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《高压交流隔离开关和接地开关》GB 1985—2014

《高压交流隔离开关和接地开关》DL/T 486—2010

例题 7-18~7-21：某企业的 110/10 kV 变电站，主接线采用单母线分段屋外布置，110 kV 采用直接接地系统，主变压 110/10 kV 两台，容量为 31.5 MV·A。110 kV 属于无穷大系统，在变电站最大、最小运行方式下，当 110 kV 母线三相短路时交流分量起始有效值分别为36 kA、25 kA。请回答以下问题。

7-18：如 110 kV 单母线分段回路中，母线联络隔离开关额定电流为 1000 A，当它具备分断母线环流能力，开合次数为 100 次时，其开合电压和开断电流应为哪组数据？（发输电 2010 年考题改编）

（A）50 V，500 A　　（B）100 V，600 A

（C）100 V，800 A　　（D）300 V，1000 A

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

条文说明第 11.0.9 条（35~110）kV 级产品开合电压为 100 V，隔离开关的开断电流为 $0.8I_n = 0.8 \times 1000 = 800$ A，选 C。

【知识点解析】

分断环流、分断电压互感器、分断母线等电容电流，在运行中是必要的，根据东北电网的实践，对 220 kV 及以下隔离开关在运行中分断环流、分断电压互感器从未发生过问题，不需要另提要求。但对 330 kV 以上隔离开关则应根据需要向制造部门提出要求。DL486—1992《交流高压隔离开关订货技术条件》中明确隔离开关进行开、合母线转移电流的试验条件如下：

对一般隔离开关的开断电流为 $0.8I_n$（I_n为产品的额定电流），开合次数 100 次，开合电压为：10 kV 级产品——50 V；（35~110）kV 级产品——100 V；220 kV 级以上产品——300 V、400 V。开、合过程中的燃弧时间不限，但不能危及相间绝缘和操作人员安全，试验后产品仍能正常运行，不需要检修。

7-19：假设该变电站处于海拔高度 1000 m 以下的地区，母线联络隔离开关选用单柱垂直开启式，则在分闸状态下动静触头的最小距离为下列何值？（发输电 2010 年考题改编）

（A）1650 mm　　（B）1700 mm　　（C）1400 mm　　（D）1000 mm

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 11.0.7 条　单柱垂直开启式隔离开关在分闸状态下，动静触头间的最小电气距离不应小于配电装置的最小安全净距 B 值。

依据《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008。

表 5.1.1 中最小安全净距 B 值为 1650 mm，选 A。

7-20：假设母线联络隔离开关选用双柱式，两侧附有接地开关，接地开关的短路耐受能力为 25 kA/3 s，峰值耐受电流为 63 kA，使用实用短路电流计算法计算该接地开关处三相对称峰值短路电流为下列何值，该接地开关是否通过动稳定校验？（发输电 2010 年考题改编）

（A）68.7 kA，动稳定校验不通过

（B）68.7 kA，动稳定校验通过

（C）91.6 kA，动稳定校验不通过

（D）91.6 kA，动稳定校验通过

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 300 页、第 376 页（第三版第 150 页、第 212 页）。

110 kV 属于无穷大系统，系数 K_{ps} 为 1.8，变电站最大运行方式三相短路时交流分量起始有效值为 36 kA，该接地开关处三相对称峰值短路电流为

$$i_p=\sqrt{2}K_{ps}I''_{k3}=\sqrt{2}\times1.8\times36\ \text{kA}=91.6\ \text{kA}<I_p=63\ \text{kA}$$，校验不通过

7-21：假设 110 kV 采用内桥、主变 110 kV 隔离开关能切合空载变压器，由于材质原因，各变压器的空载励磁电流不相同，按隔离开关的切合能力，变压器的空载励磁电流最大不可能超过下列哪项？（发输电 2010 年考题改编）

（A）0.9 A　　（B）1.2 A　　（C）2.0 A　　（D）2.9 A

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 11.0.9 条　选用的隔离开关应具有切合电感、电容性小电流的能力，应使电压互感器、避雷器、空载母线、励磁电流不超过 2 A 的空载变压器及电容电流不超过 5 A 的空载线路等，在正常情况下操作时能可靠切断，并符合有关电力工业技术管理的规定。当隔离开关的技术性能不能满足上述要求时，应向制造部门提出，否则不得进行相应的操作。选 C。

例题 7-22：110 kV 单母线分段回路中，母线联络隔离开关额定电流为 1000 A，如图 7-4 所示，母线引下线采用铝绞线通过支持绝缘子连接到母线联络隔离开关端子上。假设引下线的自重、张力、风力和冰雪等施加于接线端的最大水平静拉力为 600 N，使用 IEC 法计算出的母线短路时导线的最大摆动力 $F_{t.d}=800$ N 和短路后导线的回落力 $F_f=820$ N。此时母线联络隔离开关接线端上机械荷载是哪项？是否超过允许的机械荷载？写出依据和理由。

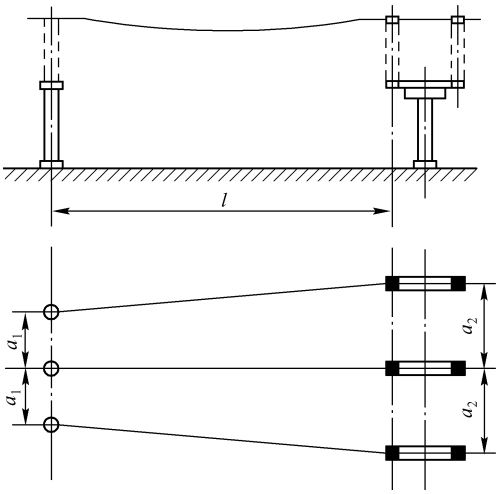


图 7-4　母线联络线示意图

（A）1400 N，超过　　（B）1420 N，超过

（C）800 N，未超过　　（D）600 N，未超过

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 11.0.10 条　当引下线采用软导线时，接线端机械荷载中不需再计入短路电流产生的电动力，机械荷载应考虑引下线的自重、张力、风力和冰雪等施加于接线端的最大水平静拉

力，机械荷载为600 N。

查表11.0.10中，额定电压110 kV、额定电流1000 A时最小水平静拉力为750 N，机械荷载为600 N<750 N，未超过允许的机械荷载。选D。

【知识点解析】

屋外隔离开关接线端的机械荷载不应大于表7-8所列数值。机械荷载应考虑母线（或引下线）的自重、张力、风力和冰雪等施加于接线端的最大水平静拉力。当引下线采用软导线时，接线端机械荷载中不需再计入短路电流产生的电动力。但对采用硬导体或扩径空心导线的设备间连线，则应考虑短路电动力。

表7-8　屋外隔离开关接线端允许的机械荷载

额定电压/kV	额定电流/A	水平拉力/N		垂直力（向上、下）/N
		纵向	横向	
12		500	250	300
40.5~72.5	≤1250	750	400	500
	≥1600	750	500	750
126	≤2000	1000	750	750
	≥3150	1250	750	1000

注：1. 如果机械荷载计算值超过本表规定值时，应和制造厂协商另定。

2. 安全系数为：静态不小于3.5，动态不小于1.7。

7.5　高压熔断器、高压负荷开关及组合电器

【知识点说明】

1）高压交流熔断器属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005第9节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）。要求熟练掌握高压交流熔断器额定电压、额定电流选择与环境条件修正，高压交流熔断器开断能力校验，用于变压器回路的高压熔断器选择，用于电动机回路的高压熔断器选择，用于电压互感器的高压熔断器选择。《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.7.3节中采用了最新国家标准（见参考书目），弱化了额定电流选择计算，强化用于变压器回路、电动机回路的高压熔断器校验计算。

2）高压交流负荷开关和高压交流负荷开关-熔断器组合电器属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005第10节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求掌握交流负荷开关选择和开断电流，了解高压交流负荷开关-熔断器组合电器转移电流和交接电流。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《高压交流熔断器 第2部分：限流熔断器》GB/T 15166.2—2008

《高压交流熔断器 第5部分：用于电动机回路的高压熔断器的熔断件选用导则》GB/T

15166.5—2008

《高压交流熔断器 第6部分：用于变压器回路的高压熔断器的熔断件选用导则》GB/T 15166.6—2008

《3.6~40.5 kV 交流高压负荷开关》GB 3804—2004

《高压交流负荷开关 熔断器组合电器》GB 16926—2009

例题 7-23~7-25：某工厂 10/0.4 kV 变电所，内设 1000 kV·A 变压器一台，采用 Dyn11 接线，已知变压器的冲击励磁涌流为 693 A（0.1 s），低压侧电动机自起动时的计算系数为 2，该变电所原最大运行方式下 10 kV 母线的短路全电流最大有效值为 10 kA；在最大、最小运行方式下，变压器二次侧短路时折算到变压器一次侧的故障电流分别为 500 A、360 A，请解答下列问题。

7-23：在变压器高压侧设限流型高压熔断器对低压侧的短路故障进行保护，熔断器能在短路电流达到冲击值前完全熄灭电弧。表 7-9 为熔断器产品的技术参数。则该高压熔断器应选择下列哪一项产品？（供配电 2014 年考题）

表 7-9　熔断器产品的技术参数

产品编号	熔体的额定电流/A	熔断器的额定最大开断电流/kA	熔断器的额定最小开断电流/A	熔断器允许通过的电流/A
1	100	6.8	300	700(0.15 s)
2	125	6.8	300	700(0.15 s)
3	125	7.5	400	850(0.05 s)
4	160	7.5	400	850(0.05 s)

（A）产品编号 1　　（B）产品编号 2

（C）产品编号 3　　（D）产品编号 4

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 246 页和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 17.0.10 条或《工业与民用配电设计手册》第三版第 216 页。

熔体额定电流校验：

$$I \geqslant kI_r = k\frac{S}{\sqrt{3}U} = 2\times\frac{1000}{\sqrt{3}\times 10}\ \text{A} = 115.47\ \text{A}，\text{可取 } 125\ \text{A}$$

最大开断电流校验：

$$I''_{1kmax} = 10/1.51\ \text{kA} = 6.62\ \text{kA} < 6.8\ \text{kA}$$

最小开断电流校验：

$$300\ \text{A} < I''_{2kmin} = 360\ \text{A} < 400\ \text{A}$$

励磁涌流校验：

$$700^2\times 0.15\ \text{A}^2\cdot\text{s} = 73500\ \text{A}^2\cdot\text{s} > Q_f = I^2T = 693^2\times 0.1\ \text{A}^2\cdot\text{s}$$
$$= 48025\ \text{A}^2\cdot\text{s} > 850^2\times 0.05\ \text{A}^2\cdot\text{s} = 36125\ \text{A}^2\cdot\text{s}$$

综上所述，产品 2 满足要求。

【知识点解析】

（1）变压器回路熔断器的选择

依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 246 页。

1）熔断器应能承受变压器的容许过负荷电流及低压侧电动机成组起动所产生的过电流，即

$$I_{rr}=KI_{gmax}$$

式中，I_{rr}为熔体的额定电流（A）；K 为系数，当不考虑电动机自起动时，可取 1.1~1.3，当考虑电动机自起动时，可取 1.5~2.0；I_{gmax}为电力变压器回路最大工作电流（A）。

2）变压器突然投入时的励磁涌流不应损伤熔断器，变压器的励磁涌流通过熔断器产生的热效应可按 10~20 倍的变压器满载电流持续 0.1 s 计算，当需要时可按 20~25 倍的变压器满载电流持续 0.01 s 校验。

3）熔断器对变压器低压侧的短路故障进行保护，熔断器的最小开断电流应低于预期短路电流。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 390 页。

1）变压器回路的高压交流熔断器的熔断件的弧前时间-电流特性应具有：

在 0.1 s 以下范围内有较高的动作电流，以耐受变压器涌流并提供与二次侧保护装置的良好配合。

在 10 s 以下范围内有较低的动作电流，以保证绕组故障、二次侧故障以及（适用时）一次侧对地故障的快速消除，并提供与电源侧过电流保护装置的良好配合。

2）变压器回路中的高压熔断件的时间-电流特性的极值为

$$\frac{I_{f10}}{I_N}\leqslant 6 \tag{7-1}$$

$$\frac{I_{f0.1}}{I_N}\geqslant 7\left(\frac{I_N}{100}\right)^{0.25} \tag{7-2}$$

式中，I_N 为熔断件的额定电流（A）；I_{f10}为熔断件弧前时间为 10 s 时的预期电流（平均）值（A）；$I_{f0.1}$为熔断件弧前时间为 0.1 s 时的预期电流（平均）值（A）。

式（7-1）和式（7-2）中的预期电流值可以是平均值，也可以是最小值。如果采用平均电流值其容差应不超过±20%；采用最小值电流值其容差应不超过 50%。

3）高压熔断件的额定电流值选择还应满足下列要求：

① 为了防止变压器突然投入时产生的励磁涌流损伤熔断器，变压器的励磁涌流通过熔断器产生的热效应，可取与实际变压器容量相关的最高运行电流的 10~12 倍，持续时间为 0.1 s。

② 一次侧高压熔断件的额定电流应超过变压器的满负载电流，还应考虑由于运行状况和使用环境引起的电流增加，包括以下情况：

a. 熔断件的额定电流可以承载允许变压器在运行条件下的过负荷电流。

b. 当熔断件安装在一个封闭的外壳内，应保证熔断件在封闭的外壳内，其额定电流不超过规定温升限值的电流。

c. 熔断件的额定电流应满足在周围空气超过规定的正常使用条件下的温度，保证熔断件正常运行。

③ 一次侧高压熔断件的弧前电流在弧前时间-电流特性 10 s 以下范围内应尽可能地低，以保证变压器得到最大的保护。

④ 做好一次侧和二次侧熔断件或负荷侧的其他保护装置之间的配合。

（2）高压熔断器开断电流要求

1）高压熔断器的额定开断电流应大于回路中可能出现的最大预期短路电流周期分量有效值。跌落式高压熔断器的开断电流应以短路全电流进行校验。

2）校验跌落式高压熔断器开断能力和灵敏性时，不对称短路分断电流计算时间应取0.01 s。

7-24：若变压器高压侧设负荷开关，则下列对通用负荷开关的要求哪一项是错误的？并说明理由。（供配电 2016 年考题）

（A）当负荷开关与熔断器组合使用时，负荷开关应能关合组合电器中可能配用熔断器的最大截止电流

（B）负荷开关应能开断不超过 1250 kV·A 的配电变压器的空载电流

（C）负荷开关应能开断不大于 10 A 的电缆电容电流

（D）选择负荷开关时，也要校验其开断能力，负荷开关的额定开断电流应不小于所在回路的最大三相对称短路电流的初始值 I''

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 10.2.1 条　当负荷开关与熔断器组合使用时，负荷开关应能关合组合电器中可能配用熔断器的最大截止电流。A 正确。

第 10.2.4 条　选用的负荷开关应具有切合电感、电容性小电流的能力。应能开断不超过 10 A[(3~35)kV]、25 A（63 kV）的电缆电容电流或限定长度的架空线充电电流，以及开断 1250 kV·A[(3~35)kV]、5600 kV·A（63 kV）配电变压器的空载电流。B、C 正确。

第 10.2.3 条　负荷开关的有功负荷开断能力和闭环电流开断能力应不小于回路的额定电流。D 错误。

【知识点解析】

1）当负荷开关与熔断器组合使用时，负荷开关应能关合组合电器中可能配用熔断器的最大截止电流。

2）当负荷开关与熔断器组合使用时，负荷开关的开断电流应大于转移电流和交接电流。

3）负荷开关的有功负荷开断能力和闭环电流开断能力应不小于回路的额定电流。

4）选用的负荷开关应具有切合电感、电容性小电流的能力。应能开断不超过 10 A[(3~35)kV]、25A（63 kV）的电缆电容电流或限定长度的架空线充电电流，以及开断 1250 kV·A[(3~35)kV]、5600 kV·A(63 kV)配电变压器的空载电流。

5）当开断电流超过 4）的限额或开断其电容电流为额定电流 80% 以上的电容器组时，应与制造部门协商，选用专用的负荷开关。

7-25：用于变压器高压侧的保护电压互感器一次侧熔断器，该熔断器需要校验下列哪些项目？

（A）额定电压，额定开断电流

（B）工频耐受电压，额定开断电流

（C）额定电压，额定电流，额定开断电流

（D）额定电压，额定电流，短路动稳定，开断时间

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器的选择设计技术规定》DL 5222—2005。

第 17.0.8 条　保护电压互感器的熔断器，只需按额定电压和开断电流选择。

例题 7-26：某一生活小区安装一台 400 kV·A 变压器，电压等级为 10/0.4 kV，变压器允许短时过负荷 150%，该地区年最高温度为 45℃，其变压器高压侧保护采用熔断器保护。此台变压器若仅作生活用电，其熔断器规格应为下列哪项？

（A）RNT 额定电压 10 kV，管体额定电流/熔体额定电流 40/32 A

（B）RNT 额定电压 11 kV，管体额定电流/熔体额定电流 40/40 A

（C）RNT 额定电压 12 kV，管体额定电流/熔体额定电流 40/40 A

（D）RNM 额定电压 12 kV，管体额定电流/熔体额定电流 40/32 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 323 页（第三版第 216 页）。

变压器的最大工作电流：$I=150\%\dfrac{S}{\sqrt{3}U}=1.5\times\dfrac{400}{\sqrt{3}\times10}\text{A}=34.6\text{A}$

查《配四》第 391 页表 5.7-2 中熔断器型号 RNT、RNM 中初步选择额定电流为 40 A，额定电压为 12 kV。

该地区年最高温度为 45℃，熔断器额定电流环境温度修正后：

$$I_N=I_e\times[1-0.01\times(45-40)]=40\times0.95\text{A}=38\text{A}$$

大于变压器的最大工作电流 34.6 A，满足要求，选 C。

【知识点解析】

熔断器额定电流环境温度修正

在不了解熔断器接触形式及其表面处理的情况时，一般情况下可采用估算的方法，当环境温度高于 40℃时每升高 1 K，熔断器的额定电流应降低 1%使用，当环境温度低于-25℃时，熔断器的机械性能将受到影响。

例题 7-27：某一生活小区安装一台 1000 kV·A 变压器，电压等级为 10/0.4 kV，变压器允许短时过负荷 150%，变压器高压侧采用高压交流负荷开关-熔断器组合电器，初步选择额定电流 100 A，额定电压 12 kV，熔断器的最小弧前时间-电流特性如图 7-5 所示，若熔断器触发的负荷开关分闸时间为 50 ms 时，实际转移电流值最接近下列哪一项数值？

（A）1600 A　　（B）1300 A　　（C）1000 A　　（D）800 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 394～395 页（第三版第 218 页）。

题目已知熔断器触发的负荷开关分闸时间为 50 ms，故熔断器在三相短路时首先动作的熔断时间为

$$T_{m1}=0.9T_0=0.9\times0.05\text{s}=0.045\text{s}$$

在熔断器的最小弧前时间-电流特性图中 $T_{m1}=0.045$ s 时，所对应的电流值是确定的实际转移电流值，为 1300 A。

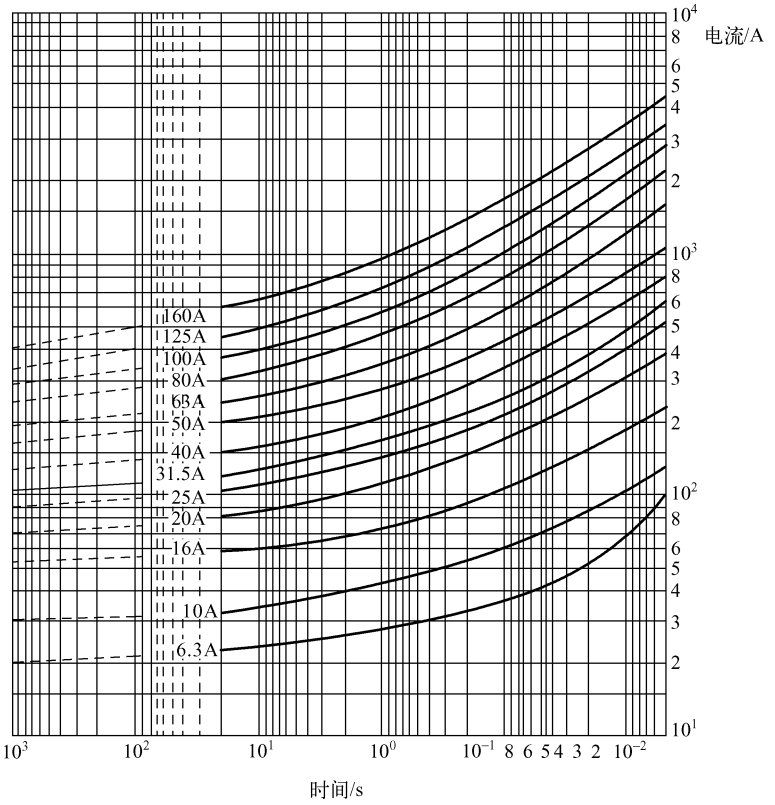


图 7-5　熔断器的最小弧前时间-电流特性

【知识点解析】

1）确定高压交流负荷开关-熔断器组合电器的实际转移电流，取决于两个因素，即熔断器触发的负荷开关分闸时间和熔断件的时间-电流特性。对于给定用途的组合电器，其实际转移电流可由制造厂家提供，当厂家不能提供时可按以下简化方法确定：

在熔断器的最小弧前时间-电流特性（基于电流偏差-6.5%）曲线上，T_{m1}所对应的电流值是确定的实际转移电流值$I_{sj.transfer}$，T_{m1}按下式计算：

$$T_{m1}=0.9T_0$$

式中，T_{m1}为三相故障电流下首先动作的熔断器在最小时间-电流特性曲线上的熔断时间（s）；T_0为熔断器触发的负荷开关分闸时间（s），一般可取0.05 s。

2）确定高压交流负荷开关-熔断器组合电器的实际交接电流，也取决于两个因素，即脱扣器触发的负荷开关的分闸时间和熔断器的时间-电流特性。对于给定用途的组合电器，其最大交接电流可由制造厂家提供，也可通过以下方法确定：在熔断器的最大弧前时间-电流特性（基于电流偏差+6.5%）曲线上，时间坐标为最小的脱扣器触发的负荷开关分闸时间，再加上0.02 s（以代表外部继电器的最小动作时间）后的总时间，它所对应的电流值就是实际的交接电流值。

例题 7-28：某垃圾电厂建设2台50 MW级发电机组，采用发电机-变压器组单元接线接入110 kV配电装置，为了简化短路电流计算，110 kV配电装置三相短路电流水平为40 kA，高压厂用电系统电压为6 kV，每台机组设2段6 kV母线。发电机主要参数：额定功

率 $P_e=50\,\text{MW}$，额定功率因数 $\cos\varphi=0.8$，额定电压 $U_e=6.3\,\text{kV}$，次暂态电抗 $X''_d=17.33\%$。主变压器主要参数：额定容量 $S_e=63\,\text{MV}\cdot\text{A}$，电压比 $121\pm2\times2.5\%/6.3\,\text{kV}$，短路阻抗 $U_d=10.5\%$，接线组别为 YNd11。高压厂用电系统最大计算负荷 13960 kV·A，厂用负荷功率因数 $\cos\varphi=0.8$。若发电机出口设置负荷开关，请确定负荷开关的额定电压、额定电流、峰值耐受电流为下列哪组数值。（发输电 2017 年考题）

（A）7.2 kV、5000 A、160 kA（峰值）　　（B）6.3 kV、5000 A、160 kA（峰值）

（C）7.2 kV、6300 A、160 kA（峰值）　　（D）6.3 kV、6300 A、100 kA（峰值）

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222-2005。

第 5.0.1 条　选用电器的最高工作电压不应低于所在系统的最高电压，额定电压取 7.2 kV。

依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 232 页表 6-3、第 123~140 页，第 245 页。

负荷开关的额定电流应大于 1.05 倍发电机额定电流，即

$$I_{NG}=1.05\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}=1.05\times\frac{50}{\sqrt{3}\times6.3\times0.8}\,\text{kA}=6.014\,\text{kA}\text{，选用 6300A}$$

发电机侧短路电流计算：$X''_{js}=X''_d=0.1733$，查表 4-7（插值法）$I_{*d}=6.28$。

$$I_{NG}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}=\frac{50}{\sqrt{3}\times6.3\times0.8}\,\text{kA}=5.73\,\text{kA}\text{；}I''_{dzG}=I_{*d}I_{NG}=6.28\times5.73\,\text{kA}=35.98\,\text{kA}$$

负荷开关的峰值耐受电流：$i_{chG}=\sqrt{2}K_{ch}I''_{dzG}=2.69\times35.98\,\text{kA}=96.79\,\text{kA}<100\,\text{kA}$，选 C。

7.6　电抗器

【知识点说明】

1）电抗器属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 9 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）。要求熟练掌握普通限流电抗器选择及相关计算，了解分裂限流电抗器、并联电抗器。

2）普通限流电抗器动、热稳定校验属于重要考点，《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.5~5.6 节中 IEC 法热稳定校验要求有所改变。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

例题 7-29：某 110/10 kV 变电站设有两台主变压器，110 kV 采用内桥接线方式，10 kV 采用单母线分段接线方式，110 kV 进线及 10 kV 母线均分列运行，电源进线 L_1 及 L_2 均采用 110 kV 架空线路。主变压器参数如下：容量为 50000 kV·A；电压比为 $110\pm8\times1.25\%/10.5\,\text{kV}$；短路阻抗为 $U_k=12\%$；空载电流为 $I_0=1\%$；接线组别为 YN d11；变压器允许长期过载 1.3

倍。若通过在主变压器10 kV侧串联电抗器，将该变电站的10 kV母线最大三相短路由30 kA降到20 kA，请计算该电抗器的额定电流和电抗百分值应为下列哪组数值。（供配电2017年考题）

（A）2887 A，5.05%　　（B）2887 A，5.55%

（C）3753 A，6.05%　　（D）3753 A，6.57%

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005条文说明第14.1.1条、第14.2.1条或《工业与民用供配电设计手册（第四版）》（上册）第315页、第401页（第三版第219页）。

电抗器额定电流为主变压器或馈线回路的最大可能工作电流：

$$I_n > I_{max} = 1.3\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = 1.3\times\frac{50\times10^3}{\sqrt{3}\times10.5}\text{ A} = 3753\text{ A}$$

实用短路电流计算法基准值选择 $S_j = 100\text{ MV}\cdot\text{A}$，$U_j = 6.3\text{ kV}$，$I_j = 9.16\text{ kA}$。

母线上未加电抗器三相短路电流 $I''_{k1} = 30\text{ kA}$，加电抗器限流后三相短路电流 $I''_{k2} = 20\text{ kA}$，计算电抗器 L 的电抗率为

$$X_k\% = \left(\frac{I_j}{I''_{k2}} - \frac{I_j}{I''_{k1}}\right)\frac{I_{nk}U_j}{U_{nk}I_j} = \left(\frac{5.5}{20} - \frac{5.5}{30}\right)\times\frac{3.753\times10.5}{10\times5.5} = 6.57\%$$

例题7-30：某110 kV变电站有110/35/10 kV三个电压等级，设一台三相绕组变压器，系统如图7-6所示，主变110 kV中性点采用直接接地，35 kV、10 kV采用消弧线圈接地，10 kV侧无电源，且不考虑电动机的反馈电流。假定该变电站10 kV母线三相短路电流为29.5 kA，现需将本站10 kV母线三相短路电流限制到20 kA以下，拟采用在变压器10 kV侧串联限流电抗器的方式，已知限流电抗器额定电压为10 kV，额定电流为2000 A，该限流电抗器电抗率最小应为下列哪一项？（供配电2012年考题）

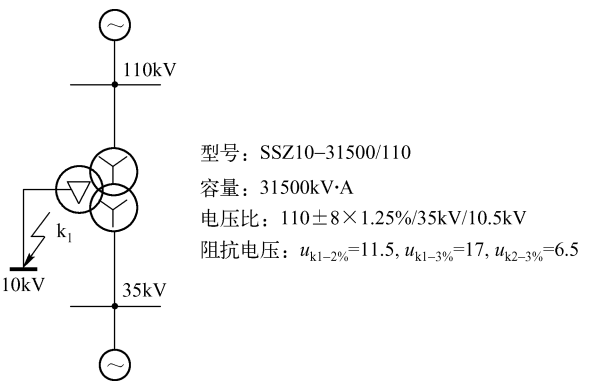


图7-6　系统接线图

（A）3%　　（B）4%　　（C）5%　　（D）6%

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005条文说明第14.1.1条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第401页（第三版第219页）。

限流电抗器电抗率为

$$x_{rk}\% \geqslant \left(\frac{I_j}{I_{ky}}-\frac{I_j}{I''_k}\right)\frac{I_{rk}}{U_{rk}}\frac{U_j}{I_j}=\left(\frac{5.5}{20}-\frac{5.5}{29.5}\right)\times\frac{2\times10.5}{10\times5.5}=3.383\%$$

【知识点解析】

（1）普通电抗器的电抗百分值一般要求

1）将短路电流限制到要求值。

2）正常工作时，电抗器的电压损失不得大于母线额定电压的5%，对于出线电抗器，尚应计及出线上的电压损失。

3）当出线电抗器未装设无时限继电保护装置时，应按电抗器后发生短路，母线剩余电压不低于额定值的（60~70)%校验。若此电抗器接在6 kV发电机主母线上，则母线剩余电压应尽量取上限值。对于母线分段电抗器、带多回路出线的电抗器及其他具有无时限继电保护的出线电抗器不必校验短路时母线剩余电压。

（2）普通电抗器的电抗百分值计算

将短路电流限制到要求值，此时所必需的电抗器的电抗百分值（$X_k\%$）按下式计算：

$$X_k\% \geqslant \left(\frac{I_j}{I''}-X_{*j}\right)\frac{I_{nk}U_j}{U_{nk}I_j}\times100\%$$

或

$$X_k\% \geqslant \left(\frac{S_j}{S''}-X_{*j}\right)\frac{U_jI_{nk}}{I_jU_{nk}}\times100\%$$

$$X_k\% \geqslant \left(\frac{I_j}{I''_{补偿后}}-\frac{I_j}{I''_{补偿前}}\right)\times\frac{I_{nk}U_j}{U_{nk}I_j}\times100\%$$

$$X_k\% \geqslant \left(\frac{1}{S''_{补偿后}}-\frac{1}{S''_{补偿前}}\right)\times\frac{\sqrt{3}I_{nk}U_j^2}{U_{nk}}\times100\%$$

式中，U_j为基准电压（kV）；I_j为基准电流（A）；X_{*j}为以U_j、I_j为基准，从网络计算至所选用电抗器前的电抗标幺值；S_j为基准容量（MV·A）；U_{nk}为电抗器的额定电压（kV）；I_{nk}为电抗器的额定电流（A）；I''为被电抗限制后所要求的短路次暂态电流（kA）；S''为被电抗限制后所要求的零秒短路容量（MV·A）。

例题7-31~7-33：某企业总变电所设计如图7-7所示，总变电所主变压器TR_1电压等级为110/6.3 kV，6 kV侧为不接地系统，假设未串接电抗器L时6 kV出线上的三相短路电流$I''=48$ kA，现需要将6 kV出线上的三相短路电流I''限制在25 kA，在6 kV出线上串一电抗器L。请解答下列问题。

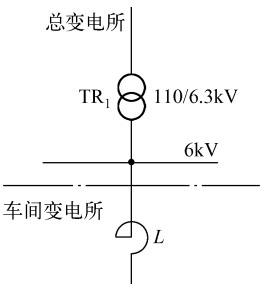


图7-7　总变电所设计示意图

7-31：该变电所在6 kV出线上串一电抗器L的电抗值应为下列哪一项？（供配电2010年考题改编）

（A）0.063 Ω　　（B）0.07 Ω

（C）0.111 Ω　　（D）0.176 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005条文说明第14.1.1条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第401页（第三版第219页）。

实用短路电流计算法基准值选择：

$$S_j = 100\,\text{MV}\cdot\text{A}, U_j = 6.3\,\text{kV}, I_j = 9.16\,\text{kA}$$

6 kV 母线上未加电抗器时三相短路电流 $I''_{k1} = 48\,\text{kA}$，加电抗器限流后三相短路电流 $I''_{k2} = 25\,\text{kA}$，计算电抗器 L 的有名值为

$$X_k = (X_{*k2} - X_{*k1})X_j = \left(\frac{I_j}{I''_{k2}} - \frac{I_j}{I''_{k1}}\right)\frac{U_j}{\sqrt{3}I_j} = \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{48}\right)\times\frac{6.3}{\sqrt{3}}\,\Omega = 0.07\,\Omega$$

7-32：假若 6 kV 出线电抗器 L 额定电流为 1000 A，电抗值为 $X_k\% = 3\%$，当在 6 kV 出线电抗器 L 后发生三相短路时母线剩余电压为下列哪一项？

（A）50%　　（B）55%　　（C）65%　　（D）75%

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 402 页（第三版第 219 页）。

当在 6 kV 出线电抗器 L 后发生三相短路时母线剩余电压为

$$U_B\% = X_N\%\frac{I''}{I_{nk}} = 3\%\times\frac{25}{1} = 75\%$$

7-33：假若 6 kV 出线最大工作电流为 800 A，电抗器 L 额定电流为 1000 A，电抗值为 $X_k\% = 3\%$，正常工作时电抗器产生的电压损失为下列哪一项？

（A）1.35%　　（B）1.40%　　（C）1.44%　　（D）1.48%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 402 页（第三版第 220 页）。

正常工作时电抗器产生的电压损失为

$$\Delta U\% = X_N\%\frac{I_{w\cdot max}}{I_{nk}}\sin\varphi = 3\%\times\frac{0.8}{1}\times 0.6 = 1.44\%$$

【知识点解析】：

普通限流电抗器的额定电流应按下列条件选择：

1）考虑主变压器或馈线回路的最大可能工作电流。

2）发电厂母线分段回路的限流电抗器，应根据母线上发生事故切断最大一台发电机时，可能通过电抗器的电流选择，一般取该台发电机额定电流的(50~80)%。

3）变电站母线回路的限流电抗器应满足用户的一级负荷和大部分二级负荷的要求。

正常工作时电抗器的电压损失，可按下式计算：

$$\Delta U\% = x_N\%\sin\varphi\,\frac{I_{w\cdot max}}{I_N}$$

式中，$\Delta U\%$为电抗器电压损失百分数；$x_N\%$为电抗器在其额定参数条件下的电抗百分数；φ为负荷功率因数角，一般情况下，$\cos\varphi = 0.8$，$\sin\varphi = 0.6$；$I_{w\cdot max}$为最大工作电流（kA）；I_N为电抗器额定持续电流（kA）。

正常工作时电抗器的电压损失不宜大于额定电压的 5%。

在电抗器后短路时，要使母线剩余电压保持一定水平，母线的剩余电压按下式计算：

$$U_B\% = x_N\% \frac{I''_k}{I_N}$$

式中，$U_B\%$为母线的剩余电压百分数；$x_N\%$为电抗器在其额定参数条件下的电抗百分数；I''_k为电抗器后短路时对称短路电流初始值（kA）；I_N为电抗器额定持续电流（kA）。

7.7 电流互感器和电压互感器（一次部分）

【知识点说明】

1）电流互感器选择属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 15 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册），《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）。要求熟练掌握测量和保护类电流互感器额定电流、准确度等级等基本选择，了解电流互感器二次极限感应电动势和中性点电流互感器选择。

2）电压互感器选择重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 16 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求熟练掌握电压互感器额定二次电压、准确度等级、接线形式应用范围等基本选择，掌握电压互感器防谐振措施。

3）电流互感器动、热稳定校验属于重要考点，实用短路电流计算法的动、热稳定校验依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 条文说明第 15 节、附录 F 和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 8 章。《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.5~5.6 节中 IEC 法对穿墙套管式电流互感器短路时短路作用力校验和热稳定校验要求有所改变。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017

《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》DL/T 866—2015

例题 7-34：某 110/10 kV 变电站设有两台主变压器，110 kV 采用内桥接线方式，10 kV 采用单母线分段接线方式，110 kV 进线及 10 kV 母线均分列运行，电源进线 L_1 及 L_2 均采用 110 kV 架空线路。主变压器参数如下：容量为 50000 kV · A；电压比为 $110 \pm 8 \times 1.25\%/10.5$ kV；短路阻抗为 $U_k = 12\%$；空载电流为 $I_0 = 1\%$；接线组别为 YN d11；变压器允许长期过载 1.3 倍。若 10 kV 1#母线的最大三相短路电流为 20 kA，主变高压侧主保护用电流互感器（安装与变压器高压套管处）的变比为 300/1 A，请选择该电流互感器最低准确度等级应为下列哪项。（可靠系数取 2.0）（供配电 2017 年考题）

（A）5P10　　（B）5P15　　（C）5P20　　（D）10P20

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 603 页。

电流互感器额定电流为 300 A，变压器主回路宜采用复合误差较小的 5P 和 5PR 级电流互感器。

主变压器高压侧的通过短路电流：$I''_{2k3max}=\dfrac{I''_{2k3}}{n_T}=\dfrac{20\times10^3}{110/10.5}\text{A}=1909\text{ A}$

$KK_{pcf}=K\dfrac{I''_{2k3max}}{I_{nr}}=2\times\dfrac{1909}{300}=12.7$，综上所述，可选答案 5P15。

例题 7-35~7-36：某企业从电网引来两路 6 kV 电源，变电所主接线如图 7-8 所示。短路计算 S_j 取 100 MV · A，设工厂远离电源，系统容量为无穷大，请回答下列问题。

7-35：该企业计算有功功率为 6800 kW，年平均运行时间为 7800 h，年平均功率因数为 0.8。该企业的电能计量装置中电压互感器的准确度等级至少应为下列哪一项？（供配电 2013 年考题改编）

（A）0.2　　（B）0.5　　（C）1.0　　（D）2.0

答案：【B】

解答过程：依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB 50063—2017 条文说明第 4.1.2 条。

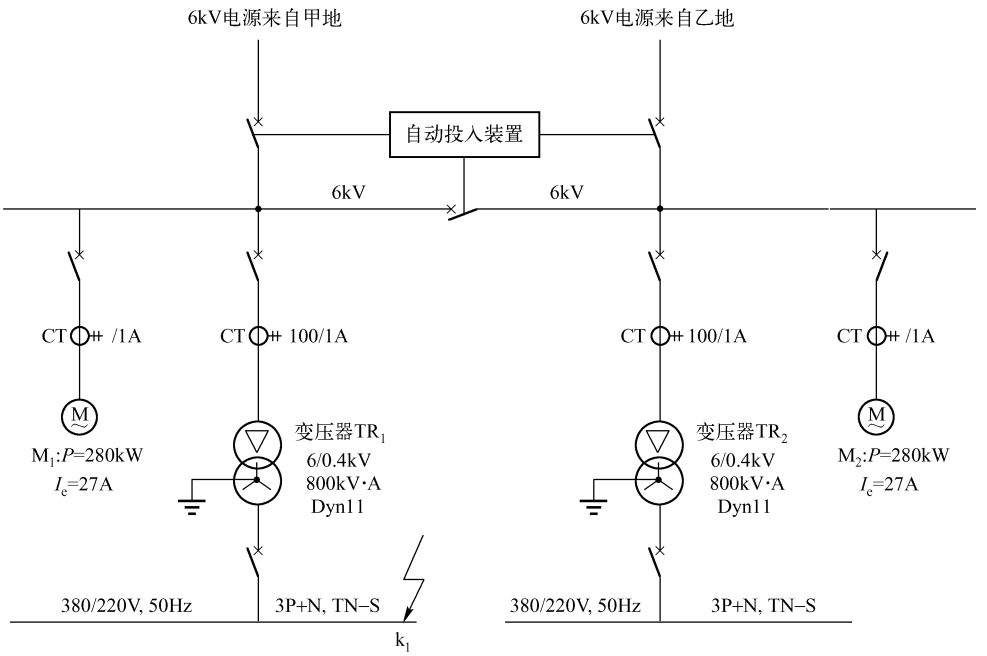


图 7-8　变电所主接线图

该企业电能计量装置应安装在 6 kV 侧属于Ⅳ类电能计量装置，查条文说明表 1 中电压互感器的准确度应选用 0.5 级。

【知识点解析】

Ⅲ类电能计量装置：10~110 kV 贸易结算用电能计量装置，10~110 kV 考核用电能计量装置，计量 100 MW 以下发电机发电量、发电企业厂（站）用电量的电能计量装置。Ⅳ类电能计量装置：380 V~10 kV 电能计量装置，220 V 单相供电、双向计量的电能计量装置。Ⅴ

类电能计量装置：220 V 单相供电，单向计量的电能计量装置。

电能计量装置的准确度不应低于表 7-10 的规定。

表 7-10　电能计量装置的准确度要求

电能计量装置类别	准确度（级）			
	有功电能表	无功电能表	电压互感器	电流互感器
Ⅰ类	0.2S	2.0	0.2	0.2S 或 0.2
Ⅱ类	0.5S	2.0	0.2	0.2S 或 0.2
Ⅲ类	1.0	2.0	0.5	0.5S
Ⅳ类	2.0	2.0	0.5	0.5S
Ⅴ类	2.0	—	—	0.5S

注：0.2 级电流互感器仅用于发电机计量回路。

7-36：若工厂有一台电动机额定功率为 200 kW，额定电流为 27 A，6 kV 母线的最大短路电流 I_k 为 28 kA，电动机回路的短路电流切除时间为 0.6 s，此回路电流互感器的额定热稳定参数见表 7-11。根据量程和热稳定条件选择电流互感器应为哪一项？（供配电 2013 年考题）

表 7-11　电流互感器的额定热稳定参数

编号	一次额定电流/A	准确度（级）	额定热稳定电流/时间/（kA/s）
①	40	0.5	16/1
②	60	0.1	20/1
③	75	0.1	25/1
④	100	0.5	33.5/1

（A）①　　（B）②　　（C）③　　（D）④

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 385 页表 5.6-8（第三版第 212 页）。

热稳定校验：初选③I_n = 75 A 时，有

$Q_t = I_k^2 t = 28^2 \times 0.6\ \text{kA}^2 \cdot \text{s} = 470.4\ \text{kA}^2 \cdot \text{s} \leqslant I_{th}^2 t_{th} = 25^2 \times 1\ \text{kA}^2 \cdot \text{s} = 625\ \text{kA}^2 \cdot \text{s}$，条件满足

依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB 50063—2017。

第 7.1.5 条　量程：实际运行值只要达到额定量程 30%~60%，即

$I = 75\ \text{A} \times (30\% \sim 60\%) = 22.5 \sim 45\ \text{A}, I_n = 27\ \text{A}$，条件满足

第 3.1.4 条　交流回路指示仪表的综合准确度不应低于 2.5 级，对应表 3.1.4 中电流互感器准确度等级要求 1.0 级，表中③准确度等级为 0.1 级，条件满足。

综上所述，选 C。

【知识点解析】

（1）测量用电流互感器基本选择

应根据电力系统测量和计量系统的实际需要合理选择互感器的类型。要求在较大工作电流范围内作准确测量时可选用 S 类电流互感器。为保证二次电流在合适的范围内，可采用复

变比或二次绕组带抽头的电流互感器。用于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类贸易结算的电能计量装置，应按计量点设置专用电流互感器或专用二次绕组。电流互感器额定一次电流的选择，宜满足正常运行的实际负荷电流达到额定值的60%，且不应小于30%（S级为20%）的要求，也可选用较小变比或二次绕组带抽头的电流互感器。电流互感器额定二次负荷的功率因数应为0.8~1.0。对工作电流变化范围大的回路，宜选用S级的电流互感器。

（2）电流互感器热稳定校检

热稳定校验是验算互感器承受短路电流发热的能力。制造部门在产品样本中给出的是1 s或5 s热稳定电流倍数，校验按下式进行：

$$K_r \geqslant \frac{\sqrt{Q_d/t}}{I_{1n}}$$

式中，K_r为电流互感器热稳定电流倍数，由制造部门提供；Q_d为短路电流引起的热效应（$A^2 \cdot s$）；t为制造部门提供的热稳定计算采用的时间，$t=1$ s或5 s。

或者使用下列公式：

$$Q_t \leqslant I_{th}^2 t$$

式中，Q_t为短路电流热效应（$kA^2 \cdot s$）；I_{th}为电流互感器额定短时热电流（kA）；t为电流互感器额定短时热电流持续时间（s），由样本查得，一般为1 s。

提高短路稳定度的措施：当动热稳定不够时，例如，有时由于回路中的工作电流较小，互感器按工作电流选择后不能满足系统短路时的动、热稳定要求，则可选择额定电流较大的电流互感器，增大变流比。若此时5 A的电流表读数太小时，可选用1~2.5 A的电流表。

例题7-37~7-38：某新建110/10 kV变电站设有2台主变压器，单侧电源供电。110 kV采用单母分段接线，两段母线分列运行，110 kV电源远离发电厂，其110 kV母线最大运行方式下三相短路电流为20 kA，最小运行方式下三相短路电流为18 kA。请解答下列问题。

7-37：假如主变高压侧电流互感器一次额定电流为300 A，变比为300/1，主变压器配置差动保护和过电流保护，则主变高压侧电流互感器的动稳定倍数应不小于下列哪项值？（发输电2010年考题改编）

（A）60　　（B）80　　（C）100　　（D）120

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

附录F　电源远离发电厂$K_{ch}=1.8$，条文说明第15.0.1条电流互感器的动稳定倍数：

$$K_d \geqslant \frac{i_{ch}}{\sqrt{2}I_{1n}} \times 10^3 = \frac{K_{ch}\sqrt{2}I''}{\sqrt{2}I_{1n}} = \frac{1.8 \times 20 \times 10^3}{300} = 120$$

7-38：假如主变高压侧电流互感器一次额定电流为300 A，变比为300/1，5 s允许的热稳定倍数为40，主变压器配置差动保护动作时间为0 s，过电流保护动作时间为1 s，发生三相短路时通过电流互感器的最大热效应值为400 $kA^2 \cdot s$，发生三相短路时主变高压侧电流互感器的5 s热稳定倍数应不小于下列哪项值？是否通过校验要求？

（A）26.2，通过　　（B）29.8，通过　　（C）32，不通过　　（D）35，不通过

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

条文说明第 15.0.1 条电流互感器的热稳定倍数：

$$K_r = 40 \geqslant \frac{\sqrt{Q_t/t}}{I_{1n}} = \frac{\sqrt{400/5}}{0.3} = 29.8$$，通过热稳定校验

【知识点解析】

1）内部动稳定校验：校验冲击电流倍数应不高于制造部门给出的允许动稳定倍数，这是校验短路电流作用在电流互感器内部的强度。校验按下式计算：

$$I_{dyn} \geqslant i_{ch} \text{或 } K_d \geqslant \frac{i_{ch}}{\sqrt{2} I_{1n}} \times 10^3$$

式中，K_d 为动稳定倍数，由制造部门提供；i_{ch} 为短路冲击电流瞬时值（A）；I_{1n} 为电流互感器一次额定电流（A）；I_{dyn} 为电流互感器额定动稳定电流（kA）。

2）外部动稳定校验：校验相间电流的相互作用使互感器绝缘瓷套顶部受到的外作用力。其校验公式与穿墙套管的相同，即

$$F_{max} = 1.76 i_{ch}^2 \frac{l_M}{a} \times 10^{-1}$$

$$l_M = \frac{l_1 + l_2}{2}$$

式中，a 为回路相间距离（cm）；l_M 为计算长度（cm）；l_1 为电流互感器出线端部至最近一个母线支柱绝缘子的距离（cm）；l_2 为电流互感器两端瓷帽的距离（cm），当电流互感器为非母线式瓷绝缘时，$l_2 = 0$。

例题 7-39：假如主变低压侧电流互感器采用穿墙套管式，采用单片矩形铝导体，水平排列，连接到母线，相向距离 35 cm，电流互感器出线端部至最近一个母线支柱绝缘子的距离为 70 cm，电流互感器两端瓷帽的距离为 90 cm，10 kV 母线最大运行方式下三相短路电流为 12 kA，则主变低压侧穿墙套管式电流互感器的出线端部的作用力与下列哪一项值最接近？

（A）375 N　　（B）400 N　　（C）450 N　　（D）475 N

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

附录 F，电源远离发电厂 $K_{ch} = 1.8$，条文说明第 15.0.1 条电流互感器的动稳定倍数：

$$L_m = \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{70+90}{2}\text{ cm} = 80\text{ cm}$$

$$F_{max} = 1.76 i_{ch}^2 \frac{L_m}{a} \times 10^{-1} = 1.76 \times (1.8 \times \sqrt{2} \times 12)^2 \times \frac{80}{35} \times 10^{-1}\text{ N} = 375\text{ N}$$

例题 7-40：假如主变压器容量为 20 MV·A，电压等级为 110/10.5 kV，变压器低压侧10 kV 母线最大运行方式下三相短路电流为 12 kA，则主变压器低压侧保护专用电流互感器电流比及保护专用电流互感器配置选择下列哪一组最合适？（发输电 2008 年考题改编）

（A）600/1A，5P10　　（B）800 A/1 A，5P20

（C）2×600/1 A，5P10　　（D）1000/1 A，5P20

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 601～603 页或《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）第 64 页表 20-13。

主变压器低压侧的额定电流：$I_N=\dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_N}=\dfrac{20\times10^3}{\sqrt{3}\times10.5}\text{A}=1100\text{A}$

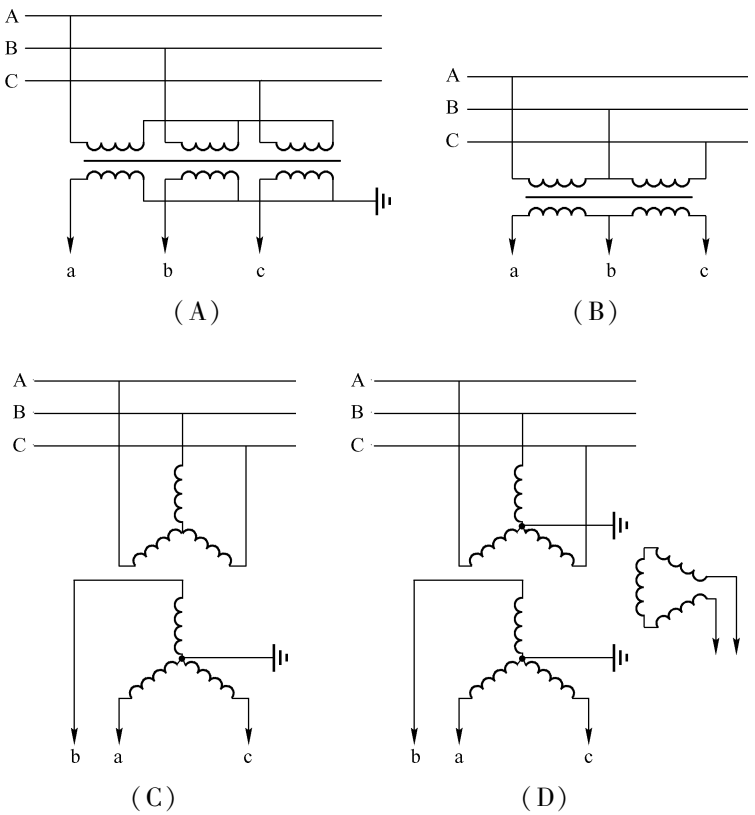
可选电流互感器额定电流 2×600 A。

变压器主回路宜采用复合误差较小的 5P 和 5PR 级电流互感器。

极值准确倍数：$\dfrac{12\times10^3}{1200}=10$

综上所述，可选答案 2×600/1 A，5P10。

例题 7-41：某 10 kV 变电站采用单母分段接线，采用不接地系统，当需要设置零序电压保护时，电压互感器一般选用下列哪一种形式？



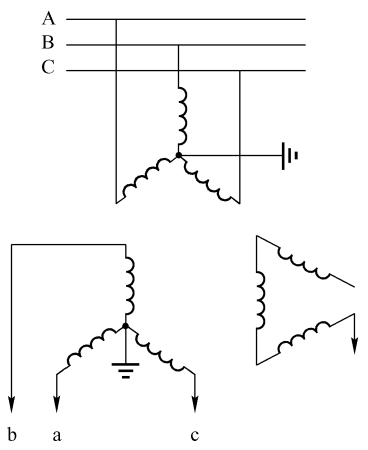
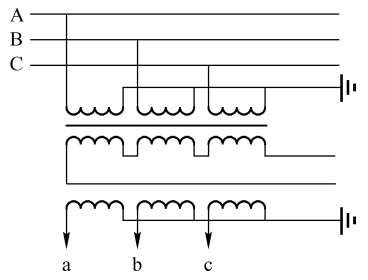
答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 16.0.4 条　答案 D 为一个三相五柱式电压互感器，附加二次绕组接成开口三角形可供零序电压保护使用（见表 7-12）。

【知识点解析】

表 7-12　电压互感器选型

接　线　图	采用的电压互感器	使 用 范 围	备　　注
	一个三相五柱式电压互感器	主二次绕组连接成星形以供电给测量表计、继电器以及绝缘检查电压表，对于要求相电压的测量表计只有在系统中性点直接接地时才能接入。附加的二次绕组接成开口三角形，构成零序电压过滤器供电给保护继电器和接地信号（绝缘检查）继电器	应优先采用三相五柱式电压互感器，只有在要求容量较大的情况下或 110kV 以上无三相式电压互感器时，才采用三个单相三绕组电压互感器
	三个单相三线圈电压互感器		

例题 7-42：在选用Ⅰ类和Ⅱ类计量、测量用的电流互感器和电压互感器时，下列哪些选择是正确的？

（A）电压互感器的准确度为 0.5 级

（B）电压互感器的主二次绕组额定二次线电压为 100 V

（C）测量仪表和保护或自动装置可共用电压互感器的同一个二次绕组，按照保护要求选择

（D）电压互感器二次绕组中所接入的负荷应保证实际二次负荷在 25%～100%

答案：【D】

解答过程：依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017 条文说明第 4.1.2 条、第 7.2.4 条、第 8.2.2 条和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 16.0.7 条。

例题 7-43：该变电所的 10 kV 系统为中性点不接地系统，当连接由中性点接地的电磁式电压互感器的空载母线，因合闸充电或在运行时接地故障消除等原因的激发，会使电压互感器饱和而产生铁磁谐振过电压，下列为限制此过电压的措施哪项是错误的？并说明依据和理由。（供配电 2010 年考题改编）

（A）选用励磁特性饱和点较高的电磁式电压互感器

（B）可在 10 kV 及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 X_{c0}，使 $X_{c0} \leqslant 0.01X_m$（X_{c0}为系统每相对地分布容抗；X_m为电互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗）

（C）10 kV 电压互感器高压绕组中性点可接入单相电压互感器或消谐装置

（D）可在电压互感器的开口三角形绕组处设置阻值不大于（X_m/K_{13}^2）的电阻或设置其他专门消除此类铁磁谐振的装置；注：K_{13}为互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014。

第 4.1.11 条中可在 10 kV 及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 X_{c0}，使 X_{c0}小于 $0.01X_m$。答案 B 中“使 $X_{c0} \leqslant 0.01X_m$”错误，选 B。

【知识点解析】

6~66 kV 不接地系统或偶然脱离谐振接地系统的部分，谐振过电压应符合下列要求。

1）谐振过电压计算应包括下列产生条件：

① 中性点接地的电磁式电压互感器过饱和。

② 配电变压器高压绕组对地短路。

③ 输电线路单相断线且一端接地或不接地。

2）限制电磁式电压互感器铁磁谐振过电压宜选取下列措施：

① 选用励磁特性饱和点较高的电磁式电压互感器。

② 减少同一系统中电压互感器中性点接地的数量，除电源侧电压互感器高压绕组中性点接地外，其他电压互感器中性点不宜接地。

③ 可在 10 kV 及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 X_{c0}，使 X_{c0}小于 $0.01X_m$；注：X_{c0}为系统每相对地分布容抗；X_m 为电压互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗。

④ 可在电压互感器的开口三角形绕组装设阻值不大于（X_m/K_{13}^2）的电阻或装设其他专门消除此类铁磁谐振的装置；注：K_{13}为互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比。

⑤ 电压互感器高压绕组中性点可接入单相电压互感器或消谐装置。

7.8 消弧线圈设备、接地变压器和接地电阻设备

【知识点说明】

1）消弧线圈设备选择属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 18 节、《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。要求熟练掌握消弧线圈设备的设置和应用要求，消弧线圈设备容量相关计算。

2）接地变压器和接地电阻设备属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 18 节、《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。要求熟练掌握接地电阻

的设置和应用要求，接地变压器和接地电阻等相关参数计算。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

例题 7-44：企业生产现场设置有 35/10 kV 可移动式变电站，主变联结组别为 Dyn11，负责大型移动设备供电，10 kV 供电电缆长度为 4.0 km，10 kV 侧采用中性点经高电阻接地，则接地电阻额定电压和电阻消耗的功率为下列哪组数值？（单相对地短路时电阻电流与电容电流的比值为 1.1）（供配电 2016 年考题）

（A）6.06 kV，25.4 kW　　（B）6.06 kV，29.5 kW

（C）6.37 kV，29.4 kW　　（D）6.37 kV，32.5 kW

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 18.2.5 条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 302 页、第 407～408 页（第三版第 153 页、第 223 页）。

中性点经高电阻接地，接地电阻额定电压：

$$U \geqslant 1.05 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 1.05 \times \frac{10}{\sqrt{3}}\,\text{kV} = 6.06\,\text{kV}$$

单相接地故障电流：$I = 0.1 U_N l = 0.1 \times 10 \times 4\,\text{A} = 4\,\text{A}$

考虑变电所增容系数：$I_1 = I(1+16\%)\,\text{A} = 4.64\,\text{A}$

中性点经高电阻接地，接地电阻消耗功率：

$$P_R = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times I_R = \frac{10 \times 1.1 \times 4.64}{\sqrt{3}}\,\text{kW} = 29.47\,\text{kW}$$

【知识点解析】

中性点高电阻接地系统：6～10 kV 配电系统以及发电厂厂用电系统，单相接地故障电容电流较小（≤7 A）时，为防止谐振、间歇性电弧接地过电压等对设备的损害，可采用高电阻接地系统。此种接地系统下，单相接地故障不立即跳闸，故障电流应不大于 10 A。

当中性点采用高电阻直接接地时，接地电阻计算如下。

电阻额定电压：

$$U_R \geqslant 1.05 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

电阻值：

$$R = \frac{U_N}{I_R \sqrt{3}} \times 10^3 = \frac{U_N}{K I_C \sqrt{3}} \times 10^3$$

电阻消耗功率：

$$P_R = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times I_R$$

式中，R 为中性点接地电阻值（Ω）；U_N 为系统额定线（标称电压）电压（kV）；U_R 为电阻额定电压（kV）；I_R 为电阻电流（A）；I_C 为系统单相对地短路时电容电流（A）；K 为单相对地短路时电阻电流与电容电流的比值，一般取 1.1。

例题 7-45～7-46：某 110/35/10 kV 变电站，110 kV 和 35 kV 采用敞开式配电装置，10 kV 采用户内配电装置，变压器三侧均采用架空套管出线。正常运行方式下任一路 110 kV 电源线路带全所负荷，另一路热备用，两台变压器分列运行，避雷器选用阀式避雷器。

其中：110 kV 电源进线为架空线路，约 5 km，进线段设有 2 km 架空避雷线，主变压器距 110 kV 母线避雷器最大电气距离为 60 m。

35 kV 系统以架空线路为主，架空线路进线段设有 2 km 架空避雷线，主变压器距 35 kV 母线避雷器最大电气距离为 60 m。

10 kV 系统以架空线路为主，主变压器距 10 kV 母线避雷器最大电气距离为 20 m。

请回答下列问题，并列出解答过程。

7-45：设 35 kV 系统以架空线路为主，架空线路总长度约为 60 km，35 kV 架空线路的单相接地电容电流约为 0.1 A/km。10 kV 系统以钢筋混凝土杆塔架空线路为主，架空线路总长度约为 30 km，架空线路的单相接地电容电流约为 0.03 A/km。电缆线路总长度约为 8 km，电缆线路的单相接地电容电流约为 1.6 A/km。10 kV 系统及 35 kV 系统的接地方式选择（假定 10～35 kV 系统在接地故障条件下仍需短时运行），下列哪一项是正确的？（供配电 2011 年考题）

（A）10 kV 及 35 kV 系统均采用不接地方式

（B）10 kV 及 35 kV 系统均采用经消弧线圈接地方式

（C）10 kV 系统采用高电阻接地方式，35 kV 系统采用低电阻接地方式

（D）10 kV 系统采用经消弧线圈接地方式，35 kV 系统采用不接地方式

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 302 页（第三版第 152～153 页）。

35 kV 系统（架空线）接地电容电流：$I_{C35}=1.13\times60\times0.1\ A=6.78\ A$

10 kV 系统（架空线+电缆）接地电容电流：$I_{C10}=1.16\times(30\times0.03+8\times1.6)\ A=15.9\ A$

依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 第 3.1.3～3.1.5 条。

35 kV 系统接地电容电流小于 10 A，采用不接地方式。

10 kV 系统接地电容电流大于 10 A，采用经消弧线圈接地方式。

【知识点解析】

（1）中性点不接地系统

1）35 kV、66 kV 不直接连接发电机、由钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统和所有 6～20 kV 系统，当单相接地故障电容电流不超过 10 A 时，可采用不接地系统；当超过 10 A 又需在接地故障条件下运行时，应采用中性点谐振接地方式。

2）不直接连接发电机的 6～20 kV 电缆线路构成的系统，当单相接地故障电容电流≤10 A 时可采用不接地系统；当大于 10 A 又需在接地故障条件下运行时，应采用中性点谐振接地方式。

（2）中性点低电阻接地系统

6~35 kV 由电缆线路构成的配电系统、发电厂厂用电系统和除矿山外的工业企业供电系统，当单相接地故障电容电流较大时，可采用低电阻接地系统。选择变压器中性点电阻器的电阻时，在满足单相接地继电保护可靠性和过电压绝缘配合的前提下宜选用较大值。

（3）中性点高电阻接地系统

6~10 kV 配电系统以及发电厂厂用电系统，单相接地故障电容电流较小（≤7 A）时，可采用中性点高电阻接地系统，故障电流应不大于 10 A。

7-46：假定 10 kV 系统接地电容电流为 36.7 A，10 kV 系统采用经消弧线圈接地方式。消弧线圈的计算容量为下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）275 kV·A　　（B）286 kV·A　　（C）332 kV·A　　（D）1001 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 第 3.1.6 条。

消弧线圈容量为：

$$W=1.35I_C\frac{U_N}{\sqrt{3}}=1.35\times36.7\times\frac{10}{\sqrt{3}}\text{ kV}\cdot\text{A}=286\text{ kV}\cdot\text{A}$$

【知识点解析】

自动跟踪补偿消弧装置消弧部分的容量应根据系统远景的发展规划确定，并应按下式计算：

$$W=1.35I_C\frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

式中，W 为自动跟踪补偿消弧装置消弧部分的容量（kV·A）；I_C 为接地电容电流（A）；U_N 为系统标称电压（kV）。

电网的电容电流，应包括有电气连接的所有架空线路、电缆线路的电容电流，并计及厂、所母线和电器的影响。该电容电流应取最大运行方式下的电流。计算电网的电容电流时，应考虑电网 5~10 年的发展。

例题 7-47~7-51：某 35 kV 变电所，设 35/10 kV 变压器 1 台、10 kV 馈出回路若干。请解答该变电所 10 kV 系统考虑采用不同接地方式时所遇到的几个问题。

7-47：已知变电所在最大运行方式下 10 kV 架空线路和电缆线路的电容电流分别为 3 A 和 9 A，变电所设备产生的电容电流不计。生产工业要求系统在单相接地故障情况下继续运行，则按过补偿考虑消弧线圈补偿容量的计算值为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）60 kV·A　　（B）70 kV·A　　（C）94 kV·A　　（D）162 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 第 3.1.6 条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 405~406 页（第三版第 221~222 页）。

变电所设备产生的电容电流不计（整容系数为 1），消弧线圈补偿容量为

$$Q=K(I_{C1}+I_{C2})\frac{U_r}{\sqrt{3}}=1.35\times(3+9)\times\frac{10}{\sqrt{3}}\text{ kV}\cdot\text{A}=94\text{ kV}\cdot\text{A}$$

7-48：假定变电所 10 kV 系统的电容电流为 44 A，经计算选择的消弧线圈电感电流为 50 A，采用了消弧线圈后的系统中性点位移电压为下列哪一项？（阻尼率取 4%）（供配电 2014 年考题）

（A）800 V　　（B）325 V　　（C）300 V　　（D）130 V

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 18.1.7 条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 405~406 页（第三版第 221~222 页）。

实际运行时脱谐度：

$$v=\frac{I_C-I_L}{I_C}=\frac{44-50}{44}=-0.136$$

采用了消弧线圈后的系统中性点位移电压：

$$U_0=\frac{U_{bd}}{\sqrt{d^2+v^2}}=\frac{\frac{10}{\sqrt{3}}\times 0.8\%}{\sqrt{0.04^2+(-0.136)^2}}\text{ V}=325\text{ V}$$

【知识点解析】

消弧线圈脱谐度与中性点位移电压：

中性点经消弧线圈接地的电网，在正常情况下，长时间中性点位移电压不应超过额定相电压的 15%，脱谐度一般不大于 10%（绝对值），消弧线圈分接头宜选用 5 个（宜采用具有自动跟踪补偿功能的消弧装置）。

中性点经消弧线圈接地的发电机，在正常情况下，长时间中性点位移电压不应超过额定相电压 10%，考虑到限制传递过电压等因素，脱谐度不宜超过±30%，消弧线圈的分接头应满足脱谐度的要求。

中性点位移电压 U_0 可按下式计算：

$$U_0=\frac{U_{bd}}{\sqrt{d^2+v^2}}$$

脱谐度可按下式计算：

$$v=\frac{I_C-I_L}{I_C}$$

式中，U_0 为中性点位移电压（kV）；U_{bd} 为消弧线圈投入前电网或发电机回路中性点不对称电压，可取 0.8%相电压；d 为阻尼率，一般对 60~110 kV 架空线路取 3%，35 kV 及以下架空线路取 5%，电缆线路取2%~4%；v 为脱谐度；I_C 为电网或发电机回路的电容电流（A）；I_L 为消弧线圈电感电流（A）。注：U_{bd} 当接在接地变压器的二次侧时其电压是 220 V 或 100 V。

7-49：假定该变电所 10 kV 系统单相接地电容电流为 5 A，为了防止谐振对设备造成损坏，中性点采用经高电阻接地方式，则接地电阻器的阻值为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）1050 Ω　　（B）1155 Ω　　（C）1818 Ω　　（D）3149 Ω

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

接地电阻器的阻值为

$$R=\frac{U_{\mathrm{N}}}{KI_{\mathrm{C}}\sqrt{3}}\times10^{3}=\frac{10}{1.1\times5\sqrt{3}}\times10^{3}\ \Omega=1050\ \Omega$$

7-50：假定 10 kV 馈出线主要由电缆线路构成，变压器 10 kV 侧中性点可以引出，拟采用经低电阻接地方式。如果系统单相接地电流值为 320 A，则接地电阻值的阻值和单相接地时最大消耗功率为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）18 Ω，1939 kW　　（B）18 Ω，3200 kW

（C）31 Ω，1939 kW　　（D）31 Ω，3200 kW

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 的 18.2.6 节或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 407~408 页（第三版第 220~221 页）。

电阻的额定电压：

$$U_{\mathrm{R}}=1.05\frac{U_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3}}=1.05\times\frac{10\times10^{3}}{\sqrt{3}}\ \mathrm{V}=6062\ \mathrm{V}$$

电阻值：

$$R_{\mathrm{N}}=\frac{U_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3}I_{\mathrm{d}}}=\frac{10}{320\sqrt{3}}\times10^{3}\ \Omega=18\ \Omega$$

接地电阻消耗功率：

$$P_{\mathrm{R}}=I_{\mathrm{d}}U_{\mathrm{R}}=0.32\times6062\ \mathrm{kW}=1939.9\ \mathrm{kW}$$

【知识点解析】

中性点低电阻接地系统：

6~35 kV 由电缆线路构成的配电系统、发电厂厂用电系统和除矿山外的工业企业供电系统，单相接地故障电容电流较大时，可采用低电阻接地系统，电阻阻值一般在 10~20 Ω，单相接地故障电流为 100~1000 A。该接地系统在系统接地时应采取保护动作跳闸，因此应考虑供电可靠性的要求。选择变压器中性点电阻器的电阻时，在满足单相接地继电保护可靠性和过电压绝缘配合的前提下宜选用较大值，以减轻对通信的影响，降低接地装置的接触电位差、跨步电位差和降低电阻器的容量。

当中性点采用经单相配电变压器接地时，接地电阻选择计算如下。

电阻的额定电压：

$$U_{\mathrm{R}}\geqslant1.05\frac{U_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3}}$$

电阻值：

$$R_{\mathrm{N}}=\frac{U_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3}I_{\mathrm{d}}}$$

接地电阻消耗功率：

$$P_{\mathrm{R}}=I_{\mathrm{d}}U_{\mathrm{R}}$$

式中，R_{N} 为中性点接地电阻值（Ω）；U_{N} 为系统线电压（V）；I_{d} 为选定的单相接地电流（A）。

7-51：假定变压器 10 kV 侧中性点可以引出，拟采用经单相接地变压器电阻接地。已知变电所在最大运行方式下的单相接地电容电流为 16 A（接地变压器过负荷系数为 1.2，接地变压器二次电压为 220 V），该接地变压器的最小额定容量和电阻器的阻值为下列哪一项？（精确到小数点后两位）（供配电 2014 年考题）

（A）500 kV·A，0.16 Ω　　（B）100 kV·A，0.48 Ω

（C）160 kV·A，0.52 Ω　　（D）200 kV·A，0.82 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 的 18.2 节和 18.3 节或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 407~408 页（第三版第 220~221 页）。

变压器变比：

$$n_{\varphi}=\frac{10}{\sqrt{3}}\Big/0.22=26.24$$

接地电阻值：

$$R_{N2}=\frac{U_N\times10^3}{1.1\sqrt{3}I_C n_{\varphi}^2}=\frac{10\times10^3}{1.1\sqrt{3}\times16\times26.24^2}\Omega=0.48\ \Omega$$

中性点采用经单相配电变压器接地时，接地变压器容量：

$$S_N\geqslant\frac{1}{K}U_2I_2=\frac{1}{1.2}\times0.22\times16\times26.24\times1.1\ \text{kV}\cdot\text{A}=84.7\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

或者：

$$S_N\geqslant\frac{U_N}{\sqrt{3}Kn_{\varphi}}I_2=\frac{10}{\sqrt{3}}\times\frac{1}{1.2\times26.24}\times16\times26.24\times1.1\ \text{kV}\cdot\text{A}=84.7\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

采用单相接地变压器，所以选择 100 kV·A。

【知识点解析】

（1）三相接地变压器

三相接地变压器的作用是在系统为 D 型接线或 Y 型接线中性点无法引出时，引出中性点用于加接消弧线圈或电阻，接地变除不仅可带消弧圈，也可带二次负载，可代替站用变，从而节省投资费用。

（2）单相接地变压器

在发电机、变压器系统有中性点引出时，也可采用中性点接入单相接地变压器，在其二次侧接入小电阻来满足中性点接地的要求，如图 7-9 所示。

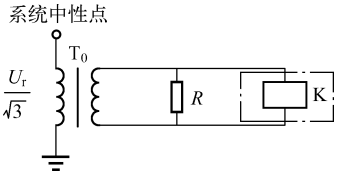


图 7-9　中性点经接地变压器接地的原理接线图

1）接地变压器一般参数选择

① 接地变压器的额定电压：安装在发电机或变压器中性点的单相接地变压器额定一次电压，即

$$U_{Nb}=U_N$$

式中，U_N为发电机或变压器额定一次线电压（kV）。

接于系统母线三相接地变压器额定一次电压应与系统额定电压一致，接地变压器二次电

压可根据负载特性确定。

② 接地变压器的绝缘水平应与连接系统绝缘水平相一致。

③ 接地变压器一次电压不小于高压厂用电系统额定相电压，二次电压决定于变压器的供货和接地继电器的技术规范，一般为 100~220 V。

2）接地变压器的额定容量

① 单相接地变压器的额定容量：

$$S_N \geqslant \frac{1}{K} U_2 I_2 = \frac{U_N}{\sqrt{3} K n_\varphi} I_2 (\text{kV} \cdot \text{A})$$

式中，U_N为发电机或变压器额定一次线电压（kV）；U_2为接地变压器二次电压（kV）；I_2为二次电阻电流（A）；K为变压器的过负荷系数（由变压器制造厂提供）。

② 三相接地变压器，其额定容量应与消弧线圈或接地电阻容量相匹配。若带有二次绕组还应考虑二次负荷容量。

对 Z 型或 Ynd 接线三相接地变压器，若中性点接消弧线圈或电阻，则接地变压器容量为

$$S_N \geqslant Q_x, S_N \geqslant P_r$$

式中，Q_x为消弧线圈额定容量；P_r为接地电阻额定容量。

对 Y/开口 D 接线接地变压器（三台单相），若中性点接消弧线圈或电阻，则接地变压器容量为

$$S_N \geqslant \sqrt{3} Q_x / 3, S_N \leqslant \sqrt{3} P_r / 3$$

③ 当中性点采用经单相配电变压器接地时，接地电阻选择计算如下。

电阻值：

$$R_{N2} = \frac{U_N \times 10^3}{1.1 \times \sqrt{3} I_C n_\varphi^2}$$

接地电阻消耗功率：

$$P_R = I_{R2} U_{N2} \times 10^{-3} = \frac{U_N \times 10^3}{\sqrt{3} n_\varphi R_{N2}} \frac{U_N}{\sqrt{3} n_\varphi} = \frac{U_N^2}{3 n_\varphi^2 R_{N2}} \times 10^3$$

$$n_\varphi = \frac{U_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_{N2}}$$

式中，n_φ为降压变压器一、二次之间的变比；I_{R2}为二次电阻上流过的电流（A）；U_{N2}为单相配电变压器的二次电压（V）；R_{N2}为间接接入的电阻值。

例题 7-52~7-54：某 110/10 kV 变电所，变压器容量为 2×25 MV·A，两台变压器一台工作一台备用。变电所的计算负荷为 17000 kV·A。变电所采用室外布置，10 kV 设备采用室内布置。变电所所在地的海拔高度为 2000 m，户外设备运行的环境温度为-25~45℃，且冬季时有冰雪天气，在最大运行方式下 10 kV 母线的三相稳态短路电流有效值为 20 kA（回路的总电阻小于总电抗的三分之一），请解答下列问题。

7-52：110/10 kV 变电所 10 kV 供电线路中，电缆总长度约为 32 km，无架空地线的钢筋混凝土电杆架空线路 10 km，若采用消弧线圈经接地变压器接地，使接地故障点的残余电流小于等于 10 A。则消弧线圈的容量（计算值）应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）32.74 kV·A　　（B）77.94 kV·A　　（C）251.53 kV·A　　（D）284.26 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014第3.1.6条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第405~406页（第三版第221~222页）。

电网回路的电容电流：

$$I_{C1}=0.1U_r l=0.1\times10\times32\ \text{A}=32\ \text{A}$$

$$I_{C2}=2.7U_r l\times10^{-3}=2.7\times10\times10\times10^{-3}\ \text{A}=0.27\ \text{A}$$

$$I_C=1.16\times(32+0.27)\ \text{A}=37.43\ \text{A}$$

消弧线圈的容量（计算值）：

$$Q_1=I_C\frac{U_N}{\sqrt{3}}=37.43\times\frac{10}{\sqrt{3}}\ \text{kV}\cdot\text{A}=216\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

$$Q_2=(I_C+10)\frac{U_N}{\sqrt{3}}=(37.43+10)\times\frac{10}{\sqrt{3}}\ \text{kV}\cdot\text{A}=274\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

当容量为251.53 kV·A时是过补偿，大于谐振容量并且使接地故障点的残余电流在0~10 A之内。

【知识点解析】

残余电流法确定消弧线圈（自动跟踪补偿消弧装置）容量：

供配电系统采用中性点谐振接地系统时自动跟踪补偿消弧装置宜工作在过补偿状态。系统发生接地故障时，自动跟踪补偿消弧装置应使故障点的残余电流不超过10 A，残余电流在10 A时补偿容量按照以下公式计算：

$$I_C\frac{U_N}{\sqrt{3}}<Q\leqslant(I_C+I_0)\frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

式中，Q为补偿容量（kV·A）；I_C为电网回路的电容电流（A）；I_0为故障点的残余电流（过补偿时为感性电流A）；U_N为电网（标称电压）或发电机回路的额定线电压（kV）。

消弧线圈的分接头数量应满足调节脱谐度的要求，宜选择5个，通过调节分接头使故障点的残余电流不超过10 A。必要时可将系统分区运行。

7-53：若110/10 kV变电所的10 kV系统的电容电流为35 A，阻尼率取3%。当脱谐率和长时间中性点位移电压满足规范要求且采用过补偿方式时，消弧线圈的电感电流取值范围为下列哪项数值？（供配电201年考题）

（A）31.50~38.50 A　　（B）34.0~38.50 A

（C）34.25~36.75 A　　（D）36.54~38.50 A

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005第18.1.7条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第405~406页（第三版第221~222页）。

脱谐度计算：

$$U_0=\frac{U_{bd}}{\sqrt{d^2+v^2}}=U_N/\sqrt{3}\times15\%=\frac{U_N/\sqrt{3}\times0.8\%}{\sqrt{0.03^2+v^2}}$$

计算出过补偿时脱谐度 $v=-0.044$。

消弧线圈的电感电流取值范围：

$$v=\frac{I_C-I_L}{I_C}$$

$v=-0.044$ 时，$I_L\geqslant I_C(1-v)=35\times(1+0.044)\,A=36.54\,A$

脱谐度一般不大于 10%（绝对值），当 $v=-0.1$ 时，$I_L\leqslant I_C(1-v')=35\times(1+0.1)\,A=38.5\,A$。

综上所述，$36.54\,A<I_L<38.5\,A$。

7-54：若 110/10 kV 变电所的 10 kV 系统采用了 YNd 接线的三相接地变压器，且中性点经电阻接地，下列哪项接地变压器容量选择是正确的？为什么？（S_N为变压器的额定容量，P_r为接地电阻额定容量。）（发输电 2011 年考题）

（A）$S_N=U_NI_2/(\sqrt{3}Kn_\varphi)$　　（B）$S_N\leqslant P_r$　　（C）$S_N\geqslant P_r$　　（D）$S_N\leqslant\sqrt{3}P_r/3$

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 18.3.4 条。

对 Z 型或 YNd 接线三相接地变压器，若中性点接消弧线圈或电阻，则接地变压器容量为

$$S_N\geqslant Q_x,S_N\geqslant P_r$$

7.9 绝缘子与穿墙套管

【知识点说明】

1）悬式绝缘子属于重要考点，依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010、《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）、《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）等。要求熟练掌握工频电压爬电比距法悬式绝缘子片数计算；了解按内过电压法悬式绝缘子片数计算，按大气过电压法悬式绝缘子片数计算；掌握预留零值绝缘子，具体型号悬式绝缘子片数选择；熟练掌握海拔高度和杆塔高度等环境变化对绝缘子片数修正；掌握绝缘子和金具机械强度验算。

注意：采用工频电压爬电比距法计算时，应依据《污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第 1 部分：定义、信息和一般原则》GB/T 26218.1—2010（IEC TS 60815-1—2008），原 GB/T 16434—1996 已废止。66 kV 及以下与 110~750 kV 悬式绝缘子依据和计算方法都有很多不同点。内过电压法和大气过电压法对应绝缘子串正极性雷电冲击电压波 50%放电电压和绝缘子串的工频湿闪电压计算，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

2）穿墙套管属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等。要求熟练掌握环境条件对穿墙套管额定电流和额定电压的修正。

3）支持绝缘子和穿墙套管动、热稳定校验属于重要考点，实用短路电流计算法的动、热稳定校验依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5~7 节、附录 F 和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 8 章。但《工业与民用供配电设计手册》第

四版（上册）的5.5~5.6节增加了IEC法的动、热稳定校验，由于采用IEC 60865-1—2011、IEC 60865-2—2015翻译稿编写，因未能转化为中国标准，仅建议学习使用，本书给出了例题。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《66 kV及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010

《110~750 kV架空输电线路设计规范》GB 50545—2010

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第1部分：定义、信息和一般原则》GB/T 26218.1—2010（IEC TS 60815-1—2008）

《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2005

例题7-55~7-57：某110/10 kV变电所，变压器容量为2×25 MV·A，两台变压器一台工作一台备用。变电所的计算负荷为17000 kV·A。变电所采用室外布置，10 kV设备采用室内布置。变电所所在地的海拔高度为2000 m，最热月平均最高温度为45℃，最低温度为-20℃，且冬季时有冰雪天气，在最大运行方式下10 kV母线的三相稳态短路电流有效值为20 kA（回路的总电阻小于总电抗的三分之一），请解答下列问题。

7-55：110/10 kV变压器10 kV出线经穿墙套管引入室内，则穿墙套管的额定电压、额定电流宜为下列哪组数值？（不考虑温度影响）（供配电2013年考题）

（A）20 kV，1600 A　　（B）20 kV，1000 A

（C）10 kV，1600 A　　（D）10 kV，1000 A

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005第5.0.2条、第21.0.4条和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第315页表5.2-3（第三版第204页式（5-8））。

按长期回路持续工作电流确定穿墙套管额定电流：

$$I=1.05\times\frac{S}{\sqrt{3}U}=1.05\times\frac{25000}{\sqrt{3}\times10.5}\text{ A}=1443\text{ A}$$

环境温度修正：$I_{xu}=I_{n}\sqrt{\frac{90-t}{90-40}}=1600\times\sqrt{\frac{90-45}{50}}\text{ A}=1517\text{ A}$，$I_{xu}>I$，选1600 A

因为有冰雪，宜采用高一级电压的产品，选用20 kV。

【知识点解析】

发电厂与变电所的3~20 kV屋外支柱绝缘子和穿墙套管，当有冰雪时，宜采用高一级电压的产品。对于3~6 kV者，也可采用提高两级电压的产品。

7-56：110/10 kV变压器10 kV出线经穿墙套管引入室内。假如10 kV配电室内无机械通风，穿墙套管额定电流为1600 A，在该环境温度下的穿墙套管额定电流最接近下列哪组数值？

（A）1600 A　　（B）1312 A　　（C）1208 A　　（D）1000 A

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5.0.3 条。

10 kV 配电室内长期实际环境温度为 50℃（最热月平均最高温度加 5℃），穿墙套管额定电流修正后：

$$I_t = I_e \times [1 - 0.018 \times (50 - 40)] = 1600 \times 0.82\ \text{A} = 1312\ \text{A}$$（空气温度>40℃时）

依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 255 页。

在 50℃环境温度下的穿墙套管额定电流为

$$I_{xu} = I_n \sqrt{\frac{85 - t}{45}} = 1600 \times \sqrt{\frac{85 - 50}{45}}\ \text{A} = 1411\ \text{A}$$

7-57：110/10 kV 变压器 10 kV 出线经穿墙套管引入室内，三相矩形母线水平布置平放。已知穿墙套管与最近的一组母线支撑绝缘子的距离为 800 mm，穿墙套管的长度为 500 mm，相间距离为 300 mm，绝缘子上受力的折算系数取 1。则穿墙套管的最小弯曲破坏负荷为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题改编）

（A）500 N　　（B）1000 N　　（C）2000 N　　（D）4000 N

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 255 页或《工业民用配电设计手册》第三版第 212 页表 5-10。

三相矩形（单片）母线水平布置平放实用短路电流计算法短路时电动力为

$$F_{k3} = 8.66 i_p^2 \frac{l_{r1} + l_{r2}}{D} \times 10^{-2} = 8.66 \times (2.55 \times 20)^2 \times \frac{800 + 500}{300} \times 10^{-2}\ \text{N} = 976\ \text{N}$$

穿墙套管的最小弯曲破坏负荷：

$$F_{ph} \geqslant \frac{F_{k3}}{0.6} = \frac{976}{0.6}\ \text{N} = 1626\ \text{N}$$

【知识点解析】

（实用短路电流计算法）三相短路电流在绝缘套管上产生的作用力为

$$F_{k3} = 8.66 i_p^2 \frac{l_{r1} + l_{r2}}{D} \times 10^{-2}$$

式中，F_{k3}为三相短路电流在绝缘套管上产生的作用力（N）；i_p 为三相短路冲击电流（kA）；l_{r1}为绝缘套管与最近的一个绝缘子间的距离（m）；l_{r2}为绝缘套管本身的长度（m）；D 为导体中心距离（m）。

绝缘套管的动稳定应满足下面的条件，即

$$i_p < I_d \text{ 或 } F_{k3} < F_{th}(F_{tv})$$

式中，i_p 为三相短路冲击电流（kA）；I_d 为绝缘套管的额定动稳定电流（kA）；F_{k3}为三相短路电流在绝缘套管上的作用力（N）；F_{th}为绝缘套管接线端子允许的静态水平力（N）；F_{tv}为绝缘套管接线端子允许的静态垂直力（N）。

注：《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 376 页表 5.5-15，将穿墙套管的弯曲破坏负荷校验，更改为接线端子允许的静态水平力和静态垂直力校验，支持绝缘子未改变。

例题 7-58：假设 110/10 kV 变压器 10 kV 出线经穿墙绝缘套管引入室内，室内 10 kV 配电装置采用矩形铝母线，每相母线由一片矩形铝镁合金导体组成，采用等跨距绝缘子支撑（等效于等距简支梁），已知：母线为水平布置、竖放，跨距为 1 m；系统频率 $f=50$ Hz；三相对称短路电流初始值 $I''_{k}=16$ kA；峰值短路电流的计算系数 $\kappa=1.35$；导体高 60 mm、宽 10 mm；单位长度上的质量 $m'_{m}=1.62$ kg/m；弹性模量 $E=70000$ N/mm^2；主导体截面模量 $W_{m}=1\times10^{-6}$ m^3。对应于屈服点应力为 $f_{y}=180$ N/mm^2。母线布置如图 7-10 所示，当该母线发生三相对称短路电流时使用 IEC 法确定支柱绝缘子的短路最大作用力为下列哪项数值？

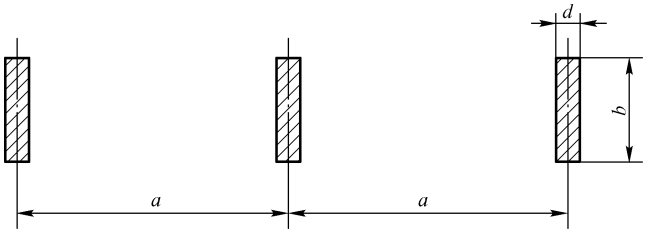


图 7-10　母线的布置图

（A）633 N　　（B）1740 N　　（C）246 N　　（D）803 N

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 233 页、第 333～334 页。

三相短路电流峰值：$i_{p}=\sqrt{2}\kappa I''_{k}=\sqrt{2}\times1.35\times16\text{ kA}=30.6\text{ kA}=36\times10^{3}$ A

真空磁导率 $\mu_{0}=4\pi\times10^{-7}$ H/m

根据 $\frac{b}{d}=\frac{60}{10}=6$、$\frac{a}{d}=\frac{200}{10}=20$、$a_{1s}=a$ 由《配四》第 335 页图 5.5-1 查得 $k_{1s}=0.99$，故有效距离为

$$a_{m}=\frac{a}{k_{12}}=\frac{0.2}{0.99}\text{ m}=0.202\text{ m}$$

中间相母线的最大作用力

$$F_{m3}=\frac{\sqrt{3}\mu_{0}i_{p}^{2}l}{4\pi a_{m}}$$

$$=\frac{\sqrt{3}\times4\pi\times10^{-7}\times30.6^{2}\times10^{6}\times1.0}{4\pi\times0.202}\text{ N}=803\text{ N}$$

不考虑重合闸影响，查表 5.5-5 中 $V_{\sigma m}=1$，$V_{rm}=1$；等跨距（多跨）绝缘子支撑连续梁查表 5.5-3 中 $\beta=0.73$；主导体截面模量 $W_{m}=1\times10^{-6}$ m^3。

该母线的导体弯曲应力

$$\sigma_{m,d}=\frac{V_{\sigma,m}V_{rm}\beta F_{m}l}{8W_{m}}=\frac{1\times1\times0.73\times803\times1}{8\times10^{-6}}\text{ MPa}=73\text{ MPa}$$

屈服点应力为 $f_{y}=180$ N/mm^2；查表 5.5-3 得系数 $\alpha_{A}=0.4$，$\alpha_{B}=1.1$；$V_{\sigma m}=1$，$V_{rm}=1$ 查表 5.5-5 得计算公式为

$$V_F V_{rm} = \frac{0.8 f_y}{\sigma_{m,d}} = 1.97$$

支柱绝缘子的作用力为

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_{m3}$$

对于支柱绝缘子外侧 A 受到的作用力为

$$F_{r,d} = 1.97 \times 0.4 \times 803\ \text{N} = 633\ \text{N}$$

对于支柱绝缘子内侧 B 受到的作用力为

$$F_{r,d} = 1.97 \times 1.1 \times 803\ \text{N} = 1740\ \text{N}$$

故支柱绝缘子的短路最大作用力为 1740 N。

【知识点解析】

硬导体支架的受力计算：

硬导体支架的受力是指绝缘子顶部受到的弯曲力，该力不应大于支架和绝缘子制造厂家给出的规定值。

支架的受力可按下式计算：

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_m$$

式中，$F_{r,d}$为硬导体支架的计算最大受力（N）；F_m 为短路时主导体间的最大受力（N）；V_F 为作用在支架上的动态力与静态力之比，可选取《配四》第 353 页表 5.5-5 中的最大值；V_{rm} 为三相自动重合闸装置不成功合闸与成功合闸在主导体产生的应力之比，可选取表 5.5-5 中的最大值；α 为支架的系数，可由表 5.5-3 查得。

主导体间的最大受力 F_m，在系统为三相短路时应采用 F_{m3}，为两线间短路时应采用 F_{m2}。

例题 7-59：假设 110/10 kV 变压器 10 kV 出线经穿墙绝缘套管引入室内，直接连接室内 10 kV 配电装置的矩形铝母线，每相母线由一片矩形铝镁合金导体组成，采用等跨距绝缘子支撑（等效于等距简支梁），已知：母线为水平布置、竖放，跨距为 1 m；导体截面积为 600 mm^2；系统频率 f=50 Hz；三相对称短路电流初始值 I''_k = 24 kA；峰值短路电流的计算系数 κ = 1.8；三相稳态短路电流 I_k = 19.2 kA；短路电流持续时间 T_k = 0.8 s。穿墙绝缘套管短路的初始温度为 65℃；短路的结束温度为 170℃；额定短时间 T_{kr} = 1 s，额定短时耐受电流 I_{thr} = 30 kA。若该母线发生三相对称短路时，使用 IEC 法计算校验该穿墙绝缘套管的热等效短路电流为下列何值，是否通过校验？

（A）22.9 kA，满足　　（B）26.5 kA，满足

（C）3.21 kA，满足　　（D）35.6 kA，满足

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 239～240 页、第 378～380 页。

根据系统频率 f=50 Hz，计算系数 κ = 1.8，短路电流持续时间 T_k = 0.8 s，fT_k = 50×0.8 = 40，I''_k/I_k = 24/19.2 = 1.25，查《配四》第 239 页图 4.3-10 中 m = 0.05，查图 4.3-11 中 n = 0.86，热等效短路电流为

$$I_{th} = I''_k \sqrt{m+n} = 24.0 \sqrt{0.05+0.86}\ \text{kA} = 22.9\ \text{kA}$$

当 T_k = 0.8 s < T_{kr} = 1 s 时，穿墙绝缘套管短时热稳定校验：

$I_{th}=22.9\,kA<I_{thr}=30\,kA$，满足热稳定要求

【知识点解析】

高压电器和开关设备的短时热强度（热稳定）校验应满足：

当 $T_k \leqslant T_{kr}$ 时　　$I_{th} \leqslant I_{thr}$

当 $T_k \geqslant T_{kr}$ 时　　$I_{th} \leqslant I_{thr}\sqrt{\dfrac{T_{kr}}{T_k}}$

式中，T_k 为短路电流持续时间（s）；T_{kr} 为高压电器和开关设备的额定短路时间（s）；I_{th} 为热等效短路电流（A）；I_{thr} 为高压电器和开关设备的额定短时耐受电流（A）。

例题 7-60~7-64：某 35 kV 架空配电线路设计采用钢筋混凝土电杆、铁横担、钢芯铝绞线、悬式绝缘子组成的绝缘子串，请解答下列关于架空电力线路设计和导线力学计算中的几个问题。

7-60：已知悬式绝缘子泄漏比距为 $\lambda=2\,cm/kV$，每片绝缘子的泄漏距离为 $L_0=30\,cm$。按额定电压和泄漏比距选择，悬式绝缘子片数为多少片？

（A）1　　（B）2　　（C）3　　（D）4

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 257 页和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 21.0.9 条及条文说明。

额定电压和泄漏比距选择悬式绝缘子片数：

$n \geqslant \lambda \dfrac{U_e}{L_0}=2\times\dfrac{35}{30}$ 片 $=2.33$ 片，悬式绝缘子增加 1 片零值绝缘子，即 3.33 片，取 4 片

7-61：已知综合系数 $K_\Sigma=0.9$，内过电压计算倍数为 1.2。按内过电压选择，绝缘子串的工频湿闪电压 U_s 和悬式绝缘子的片数为下列哪一项？

（A）25 kV，3 片　　（B）26 kV，3 片　　（C）31 kV，4 片　　（D）30 kV，5 片

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 257 页和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 21.0.9 条及条文说明。

绝缘子串的工频湿闪电压 U_s：

$$U_s \geqslant \frac{KU_{xg}}{K_\Sigma}=\frac{1.2\times\dfrac{40.5}{\sqrt{3}}}{0.9}\,kV=31\,kV$$

查《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）图 6-5 闪络电压曲线中，工频湿闪电压 31 kV 时需要 3 片，悬式绝缘子增加 1 片零值绝缘子，取 4 片。

7-62：已知大气过电压配合系统 $K_e=1.45$，避雷器 5 kA 下残压 $U_{ch}=134\,kV$。按大气过电压选择，绝缘子串正极性雷电冲击电压波 50% 放电电压 $U_{t.50}$ 和耐张绝缘子的片数为下列哪一项？

（A）180 kV，3 片　　（B）185 kV，3 片　　（C）195 kV，4 片　　（D）195 kV，5 片

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 257 页和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 21.0.9 条及条文说明。

绝缘子串正极性雷电冲击电压波50%放电电压：

$$U_{t.50} \geqslant K_e U_{ch} = 1.45 \times 134\ \text{kV} = 194.3\ \text{kV}$$

查《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）图6-5闪络电压曲线中，绝缘子串正极性雷电冲击电压波50%放电电压194.3 kV时需要3片，耐张绝缘子增加2片零值绝缘子，取5片。

【知识点解析】

例题7-60~7-62介绍了《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）和《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005中的绝缘子串数选用方法。其中的绝缘子串的工频湿闪电压和绝缘子串正极性雷电冲击电压波50%放电电压在《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014规范第6章绝缘配合中都有重新的定义和计算方法。

7-63：已知该线路悬式绝缘子在运行工况下的最大设计荷载为3 kN，则悬式绝缘子的机械破坏载荷最小值应为下列哪一项？

（A）2.5 kN　　（B）4.5 kN　　（C）6.0 kN　　（D）8.1 kN

答案：【D】

解答过程：《66 kV及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第410页。

查表7-11中悬式绝缘子在运行工况下安全系数为2.7。

悬式绝缘子的机械破坏载荷最小值：

$$F_u \geqslant KF = 2.7 \times 3\ \text{kN} = 8.1\ \text{kN}$$

【知识点解析】

66 kV及以下架空电力线路绝缘子机械强度校验所用安全系数详见表7-13。

表7-13　绝缘子及金具的机械强度安全系数

类　型	安全系数		
	运行工况	断线工况	断联工况
悬式绝缘子	2.7	1.8	1.5
针式绝缘子	2.5	1.5	1.5
蝶式绝缘子	2.5	1.5	1.5
瓷横担绝缘子	3.0	2.0	—
合成绝缘子	3.0	1.8	1.5
金具	2.5	1.5	1.5

7-64：已知35 kV线路在海拔高度1000 m以下空气清洁地区时，悬式绝缘子串的绝缘子数量为3片。假定该线路地处海拔高度3000 m地区，则线路悬式绝缘子串的绝缘子数量最少应为下列哪一项？

（A）3片　　（B）4片　　（C）5片　　（D）6片

答案：【B】

解答过程：依据《66 kV及以下架空电力线路设计规范》GB 50061-2010或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第325页。

悬式绝缘子串的绝缘子数量海拔修正：

$$N_H = N[1+0.1(H-1)] = 3[1+0.1\times(3-1)]片 = 3.6片，取4片$$

【知识点解析】

66 kV及以下架空电力线路绝缘子海拔修正：

在海拔1000~4000 m地区，当需要增加绝缘子数量来加强绝缘时，耐张绝缘子串的片数应按下式修正。

$$N_H = N[1+0.1(H-1)]$$

式中，N_H为修正后的绝缘子片数；N为海拔1000 m及以下地区绝缘子片数；H为海拔(km)。

例题7-65~7-66：某变电站的110 kV主接线采用变压器线路组接线，110 kV配电装置采用屋外敞开式，站区属多雷区。

7-65：假设该110 kV变电站属Ⅱ级污秽区，则变压器门型架构上的绝缘子串应为多少片？(悬式绝缘子为XWP-7型，单片泄露距离为40 cm)(发输电2012年考题改编)

(A) 7片　　(B) 8片　　(C) 9片　　(D) 10片

答案：【B】

解答过程：依据《110~750 kV架空输电线路设计规范》GB 50545—2010。

查表B.0.1中Ⅱ级污秽区爬电比距为2 cm/kV，采用爬电比距法绝缘子串为

$$n \geqslant \frac{\lambda U}{k_e L_{01}} = \frac{2\times126}{1\times40} = 6.3$$

同时根据第7.0.2条、第7.0.3条、第7.0.6条符合表7.0.2中110 kV中悬垂绝缘子7片，变压器门型架构上耐张绝缘子应加1片，取8片。

【知识点解析】

1) 在海拔高度1000 m以下地区，操作过电压及雷电过电压要求的悬垂绝缘子串的绝缘子最少片数，应符合表7-14的规定。耐张绝缘子串的绝缘子片数应在表7-12的基础上增加，对110~330 kV输电线路应增加1片。

表7-14　操作过电压及雷电过电压要求悬垂绝缘子串的最少绝缘子片数

标称电压/kV	110	220	330	500	750
单片绝缘子的高度/mm	146	146	146	155	170
绝缘子片数/片	7	13	17	25	32

2) 全高超过40 m有地线的杆塔，高度每增加10 m，应比表7-12增加1片相当于高度为146 mm的绝缘子，全高超过100 m的杆塔，绝缘子片数应根据运行经验结合计算确定。由于高杆塔而增加绝缘子片数时，雷电过电压最小间隙也相应增大。

3) 绝缘配合设计可采用爬电比距法，也可采用污耐压法，选择合适的绝缘子形式和片数。当采用爬电比距法时，绝缘子片数应按下式计算：

$$n \geqslant \frac{\lambda U}{k_e L_{01}}$$

式中，n为海拔1000 m时每联绝缘子所需片数；λ为爬电比距(cm/kV)；U为系统标称电压(kV)；L_{01}为单片悬式绝缘子的几何爬电距离(cm)；k_e为绝缘子爬电距离的有效系数，主要由各种绝缘子几何爬电距离在试验和运行中污秽耐压的有效性来确定，并以XP-70、

XP-160 型绝缘子为基础，其 k_e 值取为 1。

4）通过污秽地区的输电线路，耐张绝缘子串的片数按第 3）条的选择并已达到第 2）条的规定片数时，可不再增加。同一污区，其爬电比距根据运行经验较悬垂绝缘子串可适当减少。

7-66：假设该 110 kV 变电站变压器门型架构上的耐张绝缘子串的绝缘子数量为 8 片，特征指数为 0.65。假定该线路地处海拔高度 3000 m 地区，则线路悬式绝缘子串的绝缘子数量最少应为下列哪一项？（发输电 2012 年考题改编）

（A）10 片　　（B）11 片　　（C）12 片　　（D）13 片

答案：【A】

解答过程：依据《110~750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010。

耐张绝缘子串的绝缘子数量海拔修正：

$$n_H = n e^{0.1215 m_1 (H-1000)/1000} = 8 \times e^{0.1215 \times 0.65 \times (3000-1000)/1000} = 9.37$$，取 10 片

【知识点解析】

高海拔地区悬垂绝缘子串的片数，宜按下式计算：

$$n_H = n e^{0.1215 m_1 (H-1000)/1000}$$

式中，n_H 为高海拔地区每串绝缘子所需片数；H 为海拔高度（m）；m_1 为特征指数，各种绝缘子 m_1 可按 GB 50545—2010 附录 C 的规定取值。

7.10　气体绝缘金属封闭开关设备与交流金属封闭开关设备

【知识点说明】

1）交流金属封闭开关设备和控制设备属于普通考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 13 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求掌握高压开关柜降容计算，高压开关柜爬电比距和安全净距。

2）72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备属于冷门考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 13 节。要求掌握 GIS 外壳感应电压。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《3~110 kV 高压配电装置》GB 50060—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

参考书目：

《额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》GB 7674—2008

《3.6~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》DL/T 404—2007

《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352—2005

例题 7-67~7-68：一座远离发电厂的变电所，设有 110/10 kV、40 MV·A 主变压器两台。110 kV 线路内桥接线，10 kV 单母线分段接线。110 kV 配电装置为户内 GIS，10 kV 户内配电装置为成套开关柜。请回答以下问题。

7-67：变电所所址海拔为 2000 m，10 kV 系统拟选用 KYN28-12 型高压开关柜，则柜内

带电导体至无孔遮栏间净距应为多少？

（A）125 mm　　（B）155 mm　　（C）167 mm　　（D）182 mm

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

查表 13.0.9 中柜内带电导体至无孔遮栏间净距为 155 mm，2000 m 海拔修正为

$$B=\left[155+125\times\left(\frac{2000-1000}{100}\times1\%\right)\right]\text{mm}=167.5\text{ mm}$$

【知识点解析】

高压开关柜单纯以空气作为绝缘介质时，开关内各相导体的相间与对地净距必须符合表 7-15 的要求。

表 7-15　开关内各相导体的相间与对地净距　　（单位：mm）

额定电压/kV	7.2	12（11.5）	24	40.5
导体至接地间净距	100	125	180	300
不同相导体之间的净距	100	125	180	300
导体至无孔遮栏间净距	130	155	210	330
导体至网状遮栏间净距	200	225	280	400

注：海拔超过 1000 m 时本表所列 1、2 项值按每升高 100 m 增大 1%进行修正，3、4 项之值应分别增加 1 或 2 项值的修正值。

7-68：该变电所 10 kV 系统拟选用 KYN28-12 型高压开关柜，其内装母线在环境温度 40℃时的允许电流为 1200 A，当柜内空气度为 50℃时，母线的允许电流应为下列哪个值？（发输电 2011 年考题）

（A）958 A　　（B）983 A　　（C）1018 A　　（D）1073 A

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 13.0.5 条　当环境温度高于 40℃时，开关柜内的电器应降容使用，母线的允许电流：

$$I_{50}=I_{40}\sqrt{\frac{40}{t}}=1200\times\sqrt{\frac{40}{50}}\text{ A}=1073\text{ A}$$

【知识点解析】

当环境温度高于 40℃时，开关柜内的电器应降容使用，母线的允许电流可按下式计算：

$$I_{\mathrm{t}}=I_{40}\sqrt{\frac{40}{t}}$$

式中，t 为环境温度（℃）；I_{t} 为环境温度 t 下的允许电流；I_{40} 为环境温度 40℃时的允许电流。

第 8 章　导体、电缆、架空线路

【知识点导图】

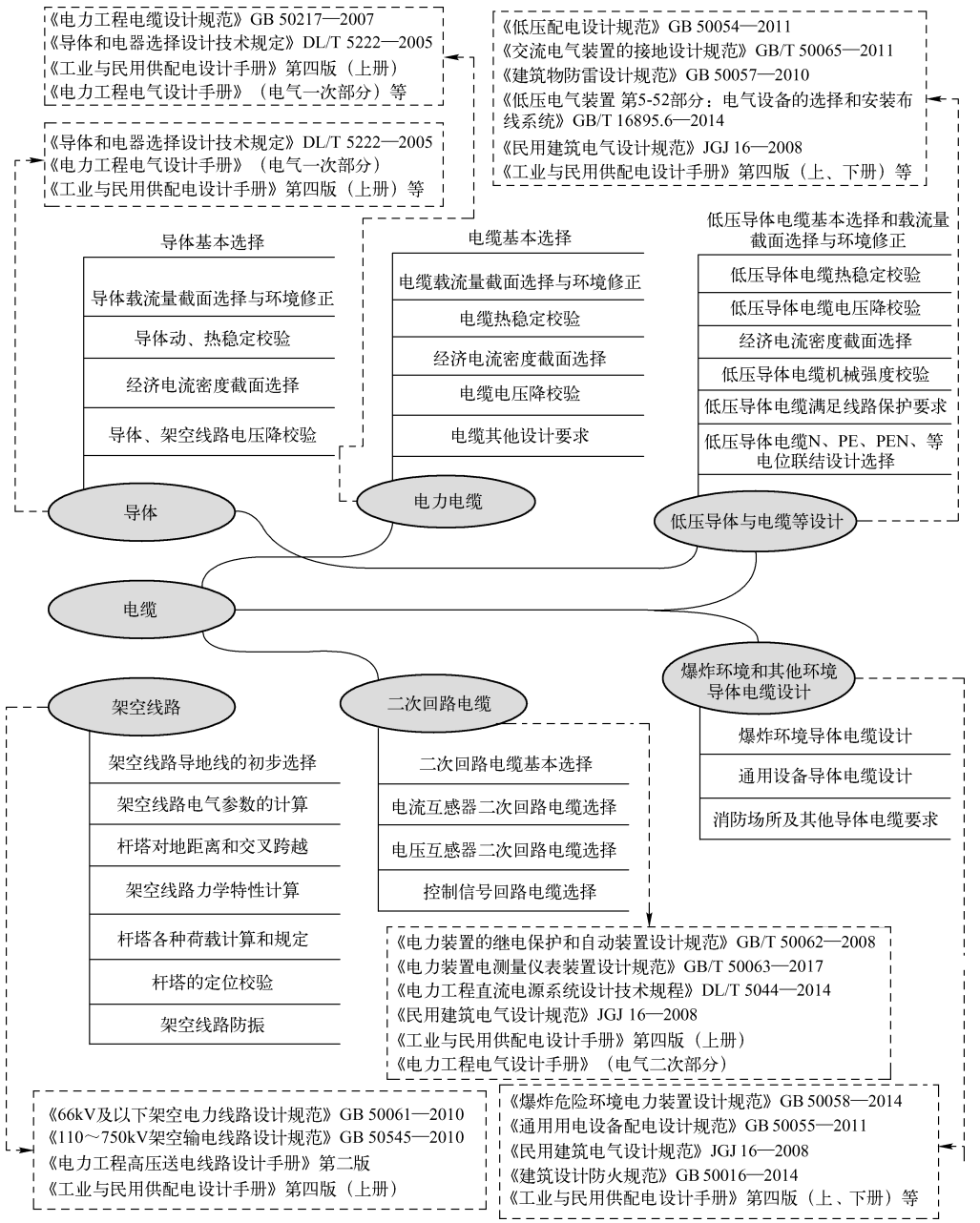


图 8-1　导体、电缆、架空线路知识点导图

图 8-1 所示的导体、电缆、架空线路知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点，由于规范和手册的更新对应内容有很大的改变，特别是《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）增加了 IEC 动、热稳定校验的内容；架空线路在新大纲中增加了 110 kV 架空输电线路设计要求，《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 和《电力工程高压送电线路设计手册》第二版对应考点增加很多；电缆的相关规范众多，主要是 IEC 的规范和国内规范对应规定有所冲突，在《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 9 章中将两种规范进行融合，但效果不好，本书将低压导体与电缆设计单独列出，强调对应考点内容的差异。本章的知识点较为散乱，详见各小节的知识点说明。

8.1 导体设计选择

【知识点说明】

1）导体基本选择属于发输电专业的重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5～7 节。要求掌握导体选择的基本规定，了解管型导体微风振动和挠度。

2）导体载流量截面选择与环境修正属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 D。要求熟练掌握导体载流量的应用（同截面的铜是铝导体的载流量的 1.27 倍），掌握导体在各种海拔和温度环境的修正。

3）导体动、热稳定校验属于重要考点，实用短路电流计算法的动、热稳定校验依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 第 5～7 节、附录 F 和《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 8 章。但《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.5～5.6 节增加了 IEC 法的动、热稳定校验，采用 IEC 60865-2—2015、IEC 60865-1—2011 翻译稿编写，因未能转化为中国标准，仅建议学习使用，本书给出对应例题。

4）导体经济电流密度截面选择属于重要考点，依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 E。

5）线路电压降校验属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.2 节和 9.4 节。要求了解导体阻抗计算，熟练掌握表 9.4.3 中线路各种电压降计算，以及线路电压降在电能质量中电压偏差的应用。

依据书目：

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《钢铁企业电力设计手册》（上册）等

参考书目：

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013

《短路电流效应的计算 第 2 部分：计算举例》IEC 60865-2—2015

《短路电流效应的计算 第 1 部分：测定和计算方法》IEC 60865-1—2011

例题 8-1：某企业所在地区海拔高度为 2300 m，总变电所设有 110/35 kV 变压器，从电网用架空线引来一路 110 kV 电源，110 kV 和 35 kV 配电设备均为户外敞开式。总变电所的

35 kV 裸母线拟采用管形母线。该母线的长期允许载流量及计算用数据见表 8-1。设计师初选的导体尺寸为 ϕ100/90 mm，当地最热月平均最高温度为 35℃。该导体在实际环境条件下的载流量为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

表 8-1　铝镁硅系管形母线长期允许载流量及计算用数据

导体尺寸 D/d /mm	导体截面 /mm²	导体最高允许温度时的载流量/A		截面系数 W/cm²	惯性半径 r_1/cm	截面惯性矩 J/cm²
		+70℃	+80℃			
ϕ30/25	216	578	624	1.37	0.976	2.06
ϕ40/35	294	735	804	2.60	1.33	5.20
ϕ50/45	373	925	977	4.22	1.68	10.6
ϕ60/54	639	1210	1251	7.29	2.02	21.9
ϕ70/64	631	1410	1428	10.2	2.37	35.5
ϕ72/80	954	1888	1841	17.3	2.69	69.2
ϕ100/90	1491	2652	2485	33.8	3.36	169
ϕ110/100	1649	2940	2693	41.4	3.72	228
ϕ120/110	1806	3166	2915	49.9	4.07	299
ϕ130/116	2705	3974	3661	79.0	4.36	513
ϕ150/136	3145	4719	4159	107	5.06	806
ϕ170/154	4072	5696	4952	158	5.73	1339
ϕ200/184	4825	6674	5687	223	6.79	2227
ϕ250/230	7540	9139	7635	435	8.49	5438

注：1. 最高允许温度+70℃的载流量，是按基准环境温度+25℃、无风、无日照、辐射散热系数与吸收系数为 0.5、不涂漆条件计算的。
2. 最高允许温度+80℃的载流量，是按基准环境温度+25℃、日照 0.1 W/cm²、风速 0.5 m/s 且与管形导体垂直、海拔 1000 m、辐射散热系数与吸收系数为 0.5、不涂漆条件计算的。
3. 导体尺寸中，D 为外径，d 为内径。

（A）1975.6 A　　（B）2120 A　　（C）2247 A　　（D）2333.8 A

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

裸导体户外布置实际环境温度取当地最热月平均最高温度，即 35℃，查裸导体载流量在不同海拔高度及环境温度下的综合校正系数表 D.11，35℃时，2000 m 为 $k=0.81$，3000 m 为 $k=0.76$，采用插值法 2300 m 综合校正系数为

$$k=0.81+300\times\frac{0.76-0.81}{3000-2000}=0.795$$

管形母线 ϕ100/90（导体最高允许温度 80℃）载流量为 2485A，折算到 35℃时、2300 m 载流量为

$$I'_z\leqslant I_z k=2485\times0.795\ \text{A}=1975.6\ \text{A}$$

【知识点解析】

选用导体的长期允许电流不得小于该回路的持续工作电流。在按回路正常工作电流选择导体截面时，导体的长期允许载流量应按所在地区的海拔及环境温度进行修正，环境修正综

合校正系数详见表 8-2。导体采用多导体结构时，应考虑邻近效应和热屏蔽对载流量的影响。

回路正常工作电流≤环境修正综合校正系数 × 导体的长期允许载流量

常用导体的长期允许载流量可以在《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 附录 D 表 D.1~表 D.10 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 849-851 页表 9.3-35~表 9.3-37 中查出。同截面铜导体载流量为表中铝导体载流量的 1.27 倍。最高允许温度在导体载流量表中查出。一般基准环境温度为 25℃，海拔在 1000 m 及其以下。

表 8-2　裸导体载流量在不同海拔高度及环境温度下的综合校正系数

导体最高允许温度/℃	适用范围	海拔高度/m	实际环境温度/℃						
			+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
+70	屋内矩形、槽形、管形导体和不计日照的屋外软导线		1.05	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
+80	计及日照时屋外软导线	1000 及以下	1.05	1.00	0.94	0.89	0.83	0.76	0.69
		2000	1.01	0.96	0.91	0.85	0.79		
		3000	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75		
		4000	0.93	0.89	0.84	0.77	0.71		
	计及日照时屋外管形导体	1000 及以下	1.05	1.00	0.94	0.87	0.80	0.72	0.63
		2000	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74		
		3000	0.95	0.90	0.84	0.76	0.69		
		4000	0.91	0.86	0.80	0.72	0.65		

例题 8-2：假定变电所所在地海拔高度为 2000 m，环境温度为+35℃。已知 35 kV 户外软导线在正常使用环境下的载流量为 200 A，则校正后的户外软导线载流量为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）120 A　　（B）150 A　　（C）170 A　　（D）210 A

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

查表 D.11，海拔 2000 m，环境温度为 35℃时，综合校正系数为 $k=0.85$，则

$$I'_z = I_z k = 200\times 0.85\ \text{A} = 170\ \text{A}$$

例题 8-3：某 110 kV 变电站配置有两台主变压器，变压器铭牌为 SF11-50000/110，50 MV·A，110±2×2.5%/10.5 kV。正常情况下每台主变压器负荷率为 50%，一台主变压器故障检修情况下另一台主变压器负荷率为 100%。变压器户外布置，110 kV 侧采用电缆进线，110 kV 侧采用裸母线出线（阳光直射无遮栏），母线为铝镁硅系（6063）管形母线，规格为 ϕ120/110。变电站所在位置最热月平均最高环境温度为 30℃，年高温度为 40℃，海拔高度为 2000 m。计算该主变压器 10 kV 侧母线的允许载流量应为下列哪项数值，并判断是否满足允许要求。（假定主变压器 10 kV 侧电压维持在 10 kV 不变，母线载流量数据参见《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222-2005）（供配电 2017 年考题）

（A）2565.2A，满足　　（B）2565.2A，不满足

（C）2786.1A，满足　　（D）2786.1A，不满足

答案：【B】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222-2005。

裸导体户外布置实际环境温度取当地最热月平均最高温度 30℃，海拔高度为 2000 m，查裸导体载流量在不同海拔高度及环境温度下的综合校正系数表 D. 11，$k=0.88$。查 D. 1 铝镁硅系（6063）管形母线，规格 ϕ120/110，最高温度时载流量为 2915 A。

计入修正后为

$$I'_z \leqslant I_z k = 2915\times 0.88\ \text{A} = 2565.2\ \text{A}$$

变压器 10 kV 侧母线长期持续电流为

$$I_r = \frac{S_{Tr}}{\sqrt{3}U} = \frac{50000}{\sqrt{3}\times 10}\ \text{A} = 2886.8\ \text{A} > I'_z = 2565.2\ \text{A}$$

该母线载流量不满足选型要求。

例题 8-4：在某变电所设计中，导体接触面的电流密度应限制在一定的范围内，10 kV 回路的导体的回路工作电流为 1000 A 时，采用单片规格为 808 的铝排进行无镀层搭接，则铝-铝接触面的电流密度值应选择哪项是经济合理的？

（A）0. 078 A/mm^2　　（B）0. 147 A/mm^2

（C）0. 173 A/mm^2　　（D）0. 226 A/mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

查表 7. 1. 10 中，接触面的电流密度值为

$$I'_j = 0.78\times[0.31-1.05(I-200)\times 10^{-4}]$$

$$= 0.78\times[0.31-1.05(1000-200)\times 10^{-4}]\ \text{A/mm}^2 = 0.173\ \text{A/mm}^2$$

【知识点解析】

导体无镀层接头接触面的电流密度，不宜超过表 8-3 所列数值。矩形导体接头的搭接长度不应小于导体的宽度。

表 8-3　无镀层接头接触面的电流密度　　（单位：A/mm^2）

工作电流/A	J_{Cu}（铜-铜）	J_{Al}（铝-铝）
<200	0. 31	$J_{Al}=0.78J_{Cu}$
200~2000	$0.31-1.05(I-200)\times 10^{-4}$	
>2000	0. 12	

注：I 为回路工作电流。

例题 8-5：某 220 kV 变电所位于海拔 1500 m 处，选用铝镁系（LDRE）管形母线 ϕ130/116 mm，其固有频率为 8. 23 Hz，则产生微风共振的计算风速为下列哪项数值？

（A）2. 0 m/s　　（B）3. 0 m/s　　（C）4. 0 m/s　　（D）5. 0 m/s

答案：【D】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/ T5222—2005。

微风共振的计算风速为

$$v_{js} = f\frac{D}{A} = 8.23\times\frac{0.130}{0.214}\ \text{m/s} = 5.0\ \text{m/s}$$

【知识点解析】

屋外管形导体的微风振动，可按下式校验：

$$v_{js}=f\frac{D}{A}$$

式中，v_{js}为管形导体产生微风共振的计算风速（m/s）；f为导体各阶固有频率（Hz）；D为铝管外径（m）；A为频率系数，圆管可取0.214。

当计算风速小于6 m/s时，可采用下列措施消除微风振动：管内加装阻尼线；加装动力消振器；采用长托架。

例题8-6~8-10：10 kV配电装置采用矩形铝母线，已知母线上计算电流$I_{js}=396$ A，三相短路电流$I''=I_{\infty}=16.52$ kA，三相短路电流峰值$i_{p3}=2.55I''$；给母线供电的断路器的主保护动作时间为1 s，断路器开断时间为0.15 s；母线长度为8.8 m，母线中心距为0.25 m，母线为水平布置、平放，跨距为0.8 m；长期允许载流量见表8-4；实际环境温度为35℃；按机械共振条件校验的振动系数$\beta=1$，铝母线短路时的热稳定系数$C=87$。请使用实用短路电流计算法回答以下问题，并列出解答过程。

表8-4　矩形铝母线（单条、平放）的长期允许载流量

导体尺寸$h\times b$/mm^2	载流量/A
40×4	480
40×5	542
50×5	661
50×6.3	703

注：1. 载流量是按最高允许温度70℃、环境温度25℃为基准，无风、无日照条件计算的。
2. 表中导体尺寸h为宽度，b为高度。

8-6：按热稳定校验的导体截面应为下列哪一项？（供配电2007年考题）

（A）40×4 mm^2　（B）40×5 mm^2　（C）50×5 mm^2　（D）50×6.3 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第382页（第三版第211页）。

题目已知热稳定系数$C=85$，裸导体的热稳定校验母线最小截面为

$$S_{min}\geqslant\frac{\sqrt{Q}}{C}10^3=\frac{\sqrt{I^2t}}{C}\times10^3=\frac{I}{C}\sqrt{t}\times10^3=\frac{16.52}{87}\sqrt{1+0.15}\times10^3\ \text{mm}^2=203.6\ \text{mm}^2$$

可选择$50\times5=250$ mm^{2}的母线。

【知识点解析】

实用计算法的热稳定校验：

（1）导体热稳定校验

裸导体的热稳定可用下式验算。

$$S\geqslant\frac{\sqrt{Q_d}}{C}$$

式中，S为裸导体的载流截面（mm^2）；Q_d为导体短路电流的热效应（A^2·s）；C为热稳定系数。

（2）确定短路电流热效应与热稳定系数C

短路电流热效应计算时间，对导体宜采用主保护动作时间加相应断路器开断时间。主保护有死区时，可采用能对该死区起作用的后备保护动作时间，并采用相应处的短路电流值。

导体短路电流的热效应 Q_d 计算详见本书 6.4 节。

普通导体的正常最高工作温度不宜超过+70℃，在计及日照影响时，钢芯铝线及管形导体可按不超过+80℃考虑。验算短路热稳定时，导体的最高允许温度，对硬铝及铝镁（锰）合金可取 200℃；硬铜可取 300℃，短路前的导体温度应采用额定负荷下的工作温度。不同工作温度、不同材料下的热稳定系数 C 见表 8-5。

表 8-5　不同工作温度、不同材料下 C 值

工作温度/℃	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
硬铝及铝镁合金	95	93	91	89	87	85	83	81	79	77	75	73
硬铜	181	179	176	174	171	169	166	164	161	159	157	155

8-7：当铝母线采用 50×5 mm² 时，短路时母线上产生的应力为下列哪一项？（供配电 2007 年考题）

（A）5.8 MPa　　（B）37.6 MPa　　（C）47.0 MPa　　（D）376.0 MPa

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 369 页、第 372 页（第三版第 208～209 页）。

题目已知母线水平布置三相平放尺寸为 50×5 mm²，查《配四》表 5.5-11 中截面系数 $W=2.0875\times10^{-6}\ \mathrm{m}^3$；

根据 $\frac{b}{h}=\frac{5}{50}=0.1$，$\frac{D-b}{h+b}=\frac{250-5}{50+5}=4.45$，查图 5.5-16 形状系数 $K_x=1$；

三相短路电流峰值 $i_{p3}=2.55I''=42.13\ \mathrm{kA}$；

母线绝缘子跨距 $l=0.8\ \mathrm{m}$；振动系数 $\beta=1$；导体中心距离 $D=0.25\ \mathrm{m}$。

考虑机械共振时，短路电流通过母线的应力为

$$\sigma_c=1.73K_x i_{p3}^2\frac{l^2}{DW}\beta\times10^{-2}$$

$$=1.73\times1\times42.13^2\times\frac{0.8^2}{0.25\times2.0875\times10^{-6}}\times10^{-2}\ \mathrm{MPa}=37.6\ \mathrm{MPa}$$

【知识点解析】

实用计算法的导体应力校验：

考虑自振频率影响时导体的应力。导体的应力与导体的自振频率和系统频率有关，当两个频率接近时，应力将被放大。对于振动系数 β，当导体的自振频率 f_m 能限制在上述共振频率范围之外时，$\beta\approx1$，当导体的自振频率无法限制在上述共振频率范围之外时，导体受力应乘以振动系数 β。当跨数大于 2 时，导体的应力 σ_c 为

$$\sigma_c=1.73K_x i_{p3}^2\frac{l^2}{DW}\beta\times10^{-2}$$

式中，σ_c 为考虑自振频率影响时的导体的应力（Pa）；K_x 为矩形截面导体的形状系数；i_p 为三相短路冲击电流（kA）；β 为振动系数；l 为支撑绝缘子的跨度（m）；D 为导体中心距离

(m)；W 为导体截面系数（m^3）。

8-8：该配电装置当三相短路电流通过时，中间相电磁效应最为严重。若查得矩形截面导体的形状系数 $K_x=1$，三相短路时，其最大作用力应为下列哪一项？(供配电 2007 年考题)

(A) 98.2 N　　(B) 151 N　　(C) 246 N　　(D) 982 N

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 369 页、第 372 页(第三版第 208~209 页)。

题目已知母线水平布置三相平放尺寸为 50×5 mm^2，形状系数 $K_x=1$，振动系数 $\beta=1$，三相短路时中间最大作用力为

$$F_{k3}=0.173K_x(i_{p3})^2\frac{l}{D}=0.173\times1\times42.13^2\times\frac{0.8}{0.25}\text{N}=982.6\text{ N}$$

【知识点解析】

电磁力计算：

1) 短路电流通过平行导体产生的电磁效应。当两根平行导体中分别有电流 i_1 和 i_2 同时通过时，导体间的相互作用力 F 为

$$F=0.2K_xi_1i_2\frac{l}{D}$$

式中，F 为两根平行导体中分别有电流通过时导体间的相互作用力（N)；i_1、i_2 为流过两根平行导体的电流瞬时值（kA)；l 为平行导体长度（m)；D 为导体中心距离（m)；K_x 为矩形截面导体的形状系数，可根据与导体厚度 b、宽度 h 和中心距离 D 有关的关系式 $\frac{D-b}{h+b}$ 和 $\frac{b}{h}$，从图 8-2 中查得，当 $\frac{D-b}{h+b}$ 大于 2 时 K_x 取 1；b 为导体的厚度（m)；h 为导体的宽度（m)。

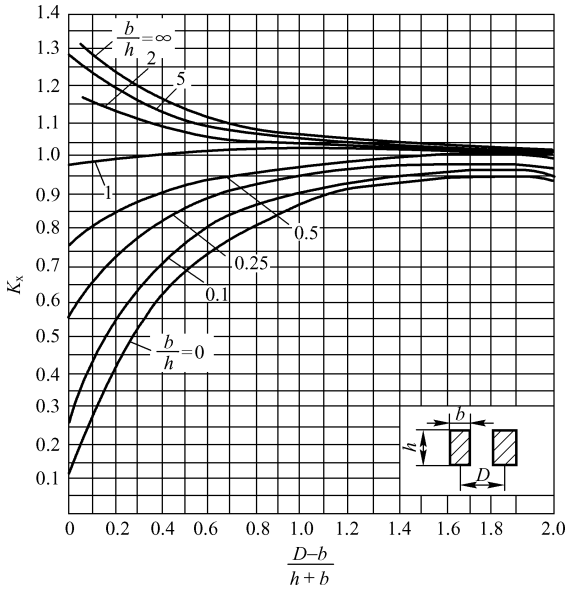


图 8-2　矩形截面导体的形状系数 K_x 与 $(D-b)/(h+b)$ 的关系曲线

2）当三相短路电流通过在同一平面的三相导体时，中间相所处情况最严重，其最大作用力 F_{k3} 为

$$F_{k3}=0.173K_x i_p^2\frac{l}{D}$$

式中，F_{k3} 为三相短路时中间相导体的最大作用力（N）；K_x 为矩形截面导体的形状系数；i_p 为三相短路冲击电流（三相短路峰值电流，kA）；l 为平行导体长度（m）；D 为导体中心距离（m）。

8-9：计算当铝母线采用 50×5 mm^2 时，已知铝母线最大允许应力 $\sigma_y=120$ MPa，按机械强度允许的母线最大跨距应为下列哪一项？（供配电 2007 年考题）

（A）0.8 m　　（B）1.43 m　　（C）2.86 m　　（D）3.64 m

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 369 页、第 372 页（第三版第 208~209 页）。

题目已知母线水平布置三相平放尺寸为 50×5 mm^2，查《配四》表 5.5-11 中得 $K'=120.35$，截面系数 $W=2.0875\times10^{-6}\ m^3$。

不考虑机械共振时，按机械强度允许的母线最大跨距为

$$l_{max}=K'\frac{\sqrt{D}}{i_{p3}}=120.35\times\frac{\sqrt{0.25}}{42.13}\ m=1.428\ m$$

或者直接计算

$$l_{max}=7.06\sqrt{W\sigma_y}\frac{\sqrt{D}}{i_{p3}}=7.06\times\sqrt{2.0875\times10^{-6}\times120\times10^6}\times\frac{\sqrt{0.25}}{42.13}\ m=1.428\ m$$

【知识点解析】

硬导体按机械强度允许的最大跨距为

$$l_{max}=7.603\sqrt{W\sigma_y}\frac{\sqrt{D}}{i_p}=K'\frac{D}{i_p}$$

$$K'=7.603\sqrt{W\sigma_y}$$

式中，l_{max} 为水平布置矩形导体最大允许跨距（m）；W 为导体截面系数（m^3）；σ_y 为硬导体最大允许应力（Pa）；D 为导体中心距离（m）；K' 为机械强度允许的最大跨距系数，该系数随导体材料与截面而定；i_p 为三相短路冲击电流（kA）。

8-10：若该母线水平布置平放，绝缘子间跨距为 180 cm，管型半径为 3.613 cm，材料系数为 1.55×10^{-2}，此时母线的自振频率为下列哪一项？

（A）100 Hz　　（B）150.5 Hz　　（C）193.6 Hz　　（D）205.2 Hz

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 369 页（第三版第 209 页）。

母线的自振频率为

$$f_m=112\frac{r_i}{l^2}\varepsilon=112\times\frac{3.613\times10^{-2}}{1.8^2}\times1.55\times10^2\ Hz\approx193.6\ Hz$$

【知识点解析】

在单频自由振动系统中同一平面内的三相导体自振频率为

$$f_m = 112\frac{r_i}{l^2}\varepsilon$$

式中，f_m 为硬导体自振频率（Hz）；ε 为材料系数，铜为 1.14×10^2，铝为 1.55×10^2，钢为 1.64×10^2；r_i 为硬导体的惯性半径（m），与导体布置方式有关，对于水平布置的三相导体，当导体平放时为 $0.289h\times10^{-2}$，当导体立放时为 $0.289b\times10^{-2}$，其值见《配四》中表 5.5-11；l 为支撑绝缘子的跨度（m）；b 为母线厚度（m）；h 为母线宽度（m）。

例题 8-11：某单回路单导线 110 kV 架空送电线路，频率 f 为 50 Hz，导线采用 LGJ-400。架设导线截面积为 399.79 mm^2，经济电流密度为 $J=0.9$ A/mm^2，功率因数为 $\cos\varphi=0.95$，则经济输送功率 P 为下列哪项数值？（发输电 2014 年考题）

（A）69.8 MW　　（B）72.6 MW　　（C）65.1 MW　　（D）74.2 MW

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）第 180 页。

经济输送功率 P 为

$$P=\sqrt{3}SJU_N\cos\varphi=\sqrt{3}\times399.79\times0.9\times110\times0.95\ \text{MW}=65.1\ \text{MW}$$

【知识点解析】

按经济电流密度选择导线截面：

按经济电流密度选择导线截面用的输送容量，应考虑线路投入运行后 5～10 年的发展。在计算中必须采用正常运行方式下经常重复出现的最高负荷。在系统发展还不明确的情况下，选定截面应留有足够裕度。

导线截面的计算公式如下：

$$S=\frac{P}{\sqrt{3}JU_N\cos\varphi}$$

式中，S 为导线截面（mm^2）；P 为送电容量（kW）；U_N 为线路额定电压（kV）；$\cos\varphi$ 为功率因数；J 为经济电流密度（A/mm^2）。

例题 8-12～8-14：某 10 kV 配电装置采用矩形铝母线，每相母线由一片矩形铝镁合金导体组成，采用等跨距绝缘子支撑（等效于等距简支梁），已知：母线为水平布置、竖放，跨距为 1 m；系统频率 $f=50$ Hz；三相对称短路电流初始值 $I''_k=16$ kA；峰值短路电流的计算系数 $\kappa=1.35$；导体高 60 mm、宽 10 mm；单位长度上的质量 $m'_m=1.62$ kg/m；弹性模量 $E=70000$ N/mm^2；对应于屈服点范围 $f_y=120\sim180$ N/mm^2。母线布置如图 8-3 所示，请回答以下问题。

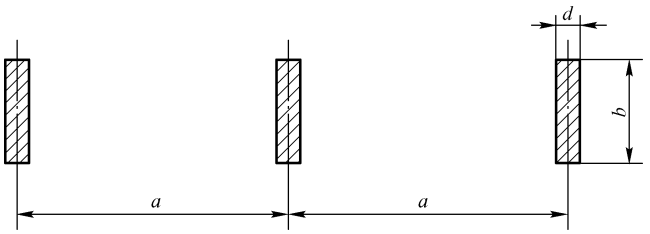


图 8-3　母线的布置图

8-12：当该母线发生三相对称短路电流时，使用 IEC 法计算该母线的最大作用力为下列何值。

（A）98.2 N　　（B）151 N　　（C）246 N　　（D）803 N

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 333～334 页、第 233 页。

三相短路电流峰值：$i_p=\sqrt{2}\kappa I''_k=\sqrt{2}\times1.35\times16\ \text{kA}=30.6\ \text{kA}=36\times10^3\ \text{A}$

真空磁导率：$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\ \text{H/m}$

根据$\frac{b}{d}=\frac{60}{10}=6$、$\frac{a}{d}=\frac{200}{10}=20$、$a_{1s}=a$，由《配四》第 335 页图 5.5-1 查得 $k_{12}=0.99$，故有效距离为

$$a_m=\frac{a}{k_{12}}=\frac{0.2}{0.99}\ \text{m}=0.202\ \text{m}$$

中间相母线的最大作用力为

$$F_{m3}=\frac{\sqrt{3}\mu_0 i_p^2 l}{4\pi a_m}=\frac{\sqrt{3}\times4\pi\times10^{-7}\times30.6^2\times10^6\times1.0}{4\pi\times0.202}\ \text{N}=803\ \text{N}$$

【知识点解析】

作用于硬导体电磁力的计算：

硬导体的应力和支架的受力，与支持的方式和支架的数量有关。在短路电流相同的情况下，采用不同的支撑类型和支架数量，硬导体的应力和支架的受力将会是不同的。硬导体的应力和支架的受力，还与导体和安装系统的相关固有频率与电气系统频率之间的比率有关。在共振或接近共振的情况下，硬导体的应力和支架的受力将会被放大。

1）在同一平面内以中心线距离相等布置的硬导体，三相短路时作用在中间主导体受力最大，该最大的力 F_{m3} 为

$$F_{m3}=\frac{\sqrt{3}\mu_0 i_p^2 l}{4\pi a_m}$$

式中，μ_0 为真空磁导率，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\ \text{H/m}$；$i_p$ 为三相短路电流峰值，$i_p=\sqrt{2}\kappa I''_k$；l 为支柱间的中心线距离（m）；a_m 为相邻主导体间的有效距离（m）。

2）由矩形截面组成的主导体，以及由矩形截面的子导体组成的主导体，有效距离为

$$a_m=\frac{a}{k_{12}}$$

式中，a_m 为主导体之间的有效距离（m）；a 为导体之间中心线距离（m）；k_{12} 为子导体之间有效距离系数，可由《配四》图 5.5-1 中查得，取 $a_{1s}=a$；$b_s=b_m$；$c_s=c_m$；a_{1s} 为子导体之间的中心线距离（m）；b_s 为子导体垂直于力的方向的尺寸（m）；b_m 为主导体垂直于力的方向的尺寸（m）；c_s 为子导体在力的方向上的尺寸（m）；c_m 为主导体在力的方向上的尺寸（m）。

8-13：若该母线发生三相对称短路时中间相母线的最大作用力为 $F_{m3}=803\ \text{N}$，主导体截

面模量为 $W_m=1\times10^{-6}\ m^3$，使用 IEC 简化法计算该母线的导体弯曲应力为下列何值。（不考虑重合闸影响）

（A）5.8 MPa　　（B）37.6 MPa　　（C）73.3 MPa　　（D）376.0 MPa

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 351～352 页。

题目已知三相对称短路最大作用力 $F_{m3}=803$ N；不考虑重合闸影响，查《配四》表 5.5-5中 $V_{\sigma m}=1$，$V_{rm}=1$；等跨距（多跨）绝缘子支撑连续梁，查表 5.5-3 中 $\beta=0.73$；主导体截面模量 $W_m=1\times10^{-6}m^3$。

该母线的导体弯曲应力为

$$\sigma_{m,d}=\frac{V_{\sigma,m}V_{rm}\beta F_m l}{8W_m}=\frac{1\times1\times0.73\times803\times1}{8\times10^{-6}}\ MPa=73\ MPa$$

【知识点解析】

硬导体的应力计算的条件是，导体必须以一种可以忽略轴向力的方式来固定，在这种假设的前提下，对导体起作用的力都是弯曲力。硬导体的支撑有多种方式，可以是固定式、简支式或二者混合式。在短路电流相同的条件下，导体的应力和作用到支架上的力，随着支撑方式和支架数量的不同而示同。硬导体的应力和支架上受到的作用力，还与导体的自然频率有关。

主导体之间的力产生的弯曲应力为

$$\sigma_{m,d}=\frac{V_{\sigma,m}V_{rm}\beta F_m l}{8W_m}$$

式中，$\sigma_{m,d}$为主导体之间的力产生的弯曲应力（N/m^2）；$V_{\sigma,m}$为主导体动态应力和静态应力的比值；V_{rm}为有三相自动重合闸的主导体应力和没有三相自动重合闸的主导体应力的比值；β为与支架的类型和数量有关的系数，见《配四》中表 5.5-3；F_m为短路时作用在主导体的最大受力，三相短路时采用 F_{m3}，两相短路时采用 F_{m2}（N）；l为主导体支架的中心线距离（m）；W_m为主导体截面模量，应相对主导体力的方向来计算（m^3）。

8-14：若该母线发生三相对称短路时中间相母线的导体弯曲应力为 73.3 MPa，已知母线材料的屈服点的应力为 120 MPa，使用 IEC 法计算校验该母线材料的允许弯曲应力为下列何值，是否通过校验？（不考虑重合闸影响）

（A）5.8 MPa，不通过　　（B）37.6 MPa，不通过

（C）73.3 MPa，通过　　（D）120 MPa，通过

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 354 页。

题目已知导体弯曲应力为 $\sigma_{m,d}=73.3$ MPa；材料的屈服点的应力为 $f_y=120$ MPa，查《配四》表 5.5-6 中可塑性系数 $q=1.5$。

该母线材料的允许弯曲应力为

$$q f_y=1.5\times120=180\ MPa$$

母线的允许应力校验：

$$\sigma_{m,d}=73.3\ \text{MPa}<q f_y=180\ \text{MPa}$$；通过校验

【知识点解析】

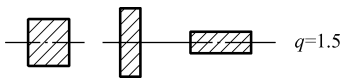
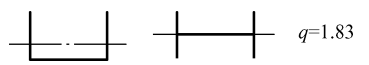
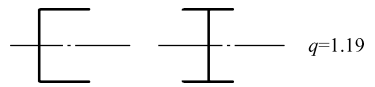
硬导体的允许应力校检：

单根硬导体承受短路电流产生的电动力，硬导体的允许应力应满足

$$\sigma_{m,d}\leqslant q f_y$$

式中，$\sigma_{m,d}$为主导体间计算的弯曲应力（N/m^2）；q 为可塑性系数，见表 8-6；f_y 为材料的屈服点的应力（N/m^2），由导体的材料给出。

表 8-6　可塑性系数 q 最高允许值

横　截　面	横　截　面
	 

例题 8-15~8-16：某 10 kV 配电装置采用矩形铝母线，每相母线由一片矩形 Al-Mg-Si 系合金导体组成，采用等跨距绝缘子支撑（等效于等距简支梁），已知：母线为水平布置、竖放，跨距为 1 m；导体截面积为 600 mm^2；系统频率 $f=50$ Hz；三相对称短路电流初始值 $I''_k=24$ kA；峰值短路电流的计算系数 $\kappa=1.8$；三相稳态短路电流；短路电流持续时间 $T_k=0.8$ s；导体短路的初始温度为 65℃；导体短路的结束温度为 170℃；导体额定短时间 $T_{kr}=1$ s。请回答以下问题。

8-15：若该母线发生三相对称短路电流时，使用 IEC 法计算校验该母线的热等效短路电流密度为下列何值，是否通过校验？

（A）38×10^6 A/m^2　　（B）45×10^6 A/m^2　　（C）67×10^6 A/m^2　　（D）83×10^6 A/m^2

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 378~380 页、第 239~240 页。

根据系统频率 $f=50$ Hz，计算系数 $\kappa=1.8$，短路电流持续时间 $T_k=0.8$ s，$fT_k=50\times0.8=40$，$I''_k/I_k=24/19.2=1.25$，查《配四》第 239 页图 4.3-10 中 $m=0.05$，查图 4.3-11 中 $n=0.86$，热等效短路电流为

$$I_{th}=I''_k\sqrt{m+n}=24.0\sqrt{0.05+0.86}\ \text{kA}=22.9\ \text{kA}$$

根据导体截面 600 mm^2，母线的热等效短路电流密度为

$$S_{th}=\frac{22.9\times10^3}{6.0\times10^{-4}}\ A/m^2=38\times10^6\ A/m^2$$

【知识点解析】

热等效短路电流密度比 S_{th}（A/m）：热等效短路电流与导体截面的比值。

热等效短路电流：

$$I_{th}=I''_k\sqrt{m+n}$$

式中，I_{th}为热等效短路电流（A）；m为短路电流非周期分量的热效应系数；n为短路电流交流分量的热效应系数。

配电网中发生短路时（远端短路），通常取$n=1$。对于短路持续时间不小于0.5 s的远端短路，可近似取$m+n=1$。m可通过图4.3-10中查出，n可通过图4.3-11中查出［《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第239~240页］。

8-16：若该母线发生三相对称短路时母线的热等效短路电流密度为38×10^6 A/m^2，使用IEC法计算导体的额定短时耐受电流密度为下列何值，是否通过校验？

（A）38×10^6 A/m^2，不通过　　（B）45×10^6 A/m^2，不通过

（C）67×10^6 A/m^2，通过　　（D）83×10^6 A/m^2，通过

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第378~380页。

根据导体短路的初始温度65℃；导体短路的结束温度170℃，查《配四》第379页图5.6-1b中导体的额定短时耐受电流密度为$S_{thr}=80$ A/mm$^2=8.0\times10^7$ A/m^2。

$$S_{thr}\sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}=8.0\times\sqrt{\frac{1.0}{0.8}}\times10^7\ \text{A/m}^2=8.9\times10^7\ \text{A/m}^2$$

裸导体的短时热强度（热稳定）校验应满足以下要求，即

$S_{th}=38\times10^6$ A/m$^2\leqslant S_{thr}\sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}=89\times10^6$ A/m^2，通过热稳定强度校检。

【知识点解析】

裸导体的短时热强度（热稳定）校验应满足：

$$S_{th}\leqslant S_{thr}\sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}$$

式中，S_{th}为热等效短路电流密度（A/m^2）；S_{thr}为导体的额定短时耐受电流密度（A/m^2）；T_{kr}为导体的额定短时间（s）；T_k为短路电流持续时间（s）。

校验时为估算电流密度而计算导体截面积时，应扣除加强型钢芯铝绞线的钢芯截面积。

8.2　高压电缆设计选择

【知识点说明】

1）高压电缆基本选择属于重要考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。要求掌握电缆额定电压、电缆导体材质、芯数、外护层类型选择，以及电缆敷设。

2）高压电缆载流量截面选择与环境修正属于重要考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007附录C、附录D。要求熟练掌握电缆载流量的应用（同截面的铜是铝电缆的载流量的1.29倍），掌握电缆在各种环境下的校正系数计算。

3）高压电缆热稳定校验属于重要考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007附录E和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）表5.6-7。要求熟练掌握实用短路电流计算法的热稳定校验。但《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）5.6

节增加了 IEC 法的热稳定校验，采用 IEC 60865-2—2015、IEC 60865-1—2011 翻译稿编写，因未能转化为中国标准，仅建议学习使用。

4）高压电缆经济电流密度截面选择属于重要考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 附录 E 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）16.4 节。要求熟练掌握电流密度截面选择计算和经济电流密度曲线应用，经济电流范围上限的表格应用。

5）高压电缆电压降校验属于重要考点，要求与导体部分相同。

6）高压电缆其他考点，包括单芯电缆的感应电动势计算和护层电压限制器的要求、单芯电缆的敷设和接地要求、电缆短路时对固定部件的机械强度校验计算。

依据书目：

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）等

参考书目：

《三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算》GB/T 15544.1—2013

《短路电流效应的计算 第 2 部分：计算举例》IEC 60865-2—2015

《短路电流效应的计算 第 1 部分：测定和计算方法》IEC 60851-1—2011

例题 8-17：已知某 35/10 kV 变电所，10 kV 馈出回路若干。某 10 kV 出线电缆线路的计算电流为 230 A，采用交联聚乙烯绝缘铠装铜芯三芯电缆。直埋敷设在多石地层，非常干燥，湿度为 3%的沙土层中，环境温度为 25℃，按持续工作电流选择电缆截面时，该电缆最小截面为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）120 mm^2　　（B）150 mm^2　　（C）185 mm^2　　（D）240 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

附录 D　由表 D.0.1 温度校正系数为 1，由表 D.0.2 中非常干燥，湿度为 3%的沙土层中热阻系数为 3.0，对应校正系数为 0.75；10 kV 电缆载流量表 C.0.3 中热阻系数为 2.0，对应校正系数为 0.87；土壤中环境温度为 25℃，校正系数为 1；铜芯电缆对应铝芯电缆载流量倍数 1.29。

初选 150 mm^2 持续工作电流载流量为 219 A，其矫正计算如下：

$$I_z \frac{k_T k_{Z1} k}{k_{Z2}} = 219 \times \frac{1 \times 0.75 \times 1.29}{0.87} A = 243.5 A > 230 A$$

初选 120 mm^2 持续工作电流载流量为 205 A，其矫正计算如下：

$$I_z \frac{k_T k_{Z1} k}{k_{Z2}} = 205 \times \frac{1 \times 0.75 \times 1.29}{0.87} A = 228 A < 230 A$$

选 150 mm^2，即答案 B。

【知识点解析】

1）35 kV 及以下电缆在不同环境温度时的载流量校正系数 K_1 见表 8-7。

表 8-7　35 kV 及以下电缆在不同环境温度时载流量校正系数

位　　置		空　气　中				土　壤　中			
环境温度/℃		30	35	40	45	20	25	30	35
电缆导体最高工作温度/℃	60	1.22	1.11	1.0	0.86	1.07	1.0	0.93	0.85
	65	1.18	1.09	1.0	0.89	1.06	1.0	0.94	0.87
	70	1.15	1.08	1.0	0.91	1.05	1.0	0.94	0.88
	80	1.11	1.06	1.0	0.93	1.04	1.0	0.95	0.90
	90	1.09	1.05	1.0	0.94	1.04	1.0	0.96	0.92

2）直埋土壤热阻校正系数 K_2：

当沟内电缆埋砂且无经常性水分补充时，应按砂质情况选取大于 2.0 K·m/W 的热阻系数计入对电缆热阻增大的影响。土壤热阻系数基准值为 1.2 K·m/W 和直埋土壤热阻修正系数见表 8-8。由于 GB 50217—2007 附录 C 各种电缆载流量表中土壤热阻系数不统一，修正时应先将原表中的校正系数折算到基准值，再乘以实际情况下的直埋土壤热阻校正系数，计算公式如下：

$$\text{直埋土壤热阻校正系数 } K_2 = K_{\text{实际}} / K_{\text{原表}}$$

式中，$K_{\text{实际}}$为实测方式确定土壤特性和雨量，查表得到的校正系数；$K_{\text{原表}}$为 GB 50217—2007 附录 C 各种电缆载流量表中规定的土壤热阻校正系数。

表 8-8　不同土壤热阻系数时电缆载流量的校正系数

土壤热阻系数/(K·m/W)	分类特征（土壤特性和雨量）	校 正 系 数
0.8	土壤很潮湿，经常下雨。如湿度大于 9% 的沙土；湿度大于 10% 的沙-泥土等	1.05
1.2	土壤潮湿，规律性下雨。如湿度大于 7% 但小于 9% 的沙土；湿度为 12%～14% 的沙-泥土等	1.0
1.5	土壤较干燥，雨量不大。如湿度为 8%～12% 的沙-泥土等	0.93
2.0	土壤干燥，少雨。如湿度大于 4% 但小于 7% 的沙土；湿度为 4%～8% 的沙-泥土等	0.87
3.0	多石地层，非常干燥。如湿度小于 4% 的沙土等	0.75

注：1. 本表适用于缺乏实测土壤热阻系数时的粗略分类，对 110 kV 及以上电缆线路工程，宜以实测方式确定土壤热阻系数。

2. 校正系数适于 GB 50217—2007 附录 C 各表中采取土壤热阻系数为 1.2 K·m/W 的情况，不适用于三相交流系统的高压单芯电缆。

例题 8-18：某 10 kV 变电所，10 kV 系统中性点不接地，继电保护设计时，系统单相接地故障持续时间在 1 min～2 h 之间，按规范规定选择标称电压为 10 kV 电缆。其缆芯与绝缘屏蔽层（或金属护套之间）的额定电压 U_0最小为下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

（A）6 kV　　（B）8.7 kV　　（C）10 kV　　（D）12 kV

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 第 3.3.2 条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 778 页（第三版第 481 页）。

10 kV 系统中性点不接地，系统单相接地故障持续时间在 1 min～2 h 之间时，系统不宜低于 133%的使用回路工作相电压，即 $U_0 = 1.33 \times 10/\sqrt{3}\ \text{kV} = 8.7\ \text{kV}$。

注：《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 778 页表 9.1-2 中采用带故障运行时间在 1 min～1 h 之间为 B 类电缆，与 GB 50217—2007 不一致。

【知识点解析】

1）交流系统中电力电缆导体的相间额定电压，不得低于使用回路的工作线电压。

2）交流系统中电力电缆导体与绝缘屏蔽或金属层之间额定电压的选择，应符合下列规定：

① 中性点直接接地或经低电阻接地的系统，接地保护动作不超过 1 min 切除故障时，不应低于 100%的使用回路工作相电压。

② 除上述供电系统外，其他系统不宜低于 133%的使用回路工作相电压；在单相接地故障可能持续 8 h 以上，或发电机回路等安全性要求较高的情况，宜采用 173%的使用回路工作相电压。

3）交流系统中电缆的耐压水平，应满足系统绝缘配合要求。

例题 8-19：某 110 kV 变电站配置有两台主变压器，变电站所在位置最热月平均最高环境温度为 30℃，年最高温度为 40℃，海拔高度为 2000 m。该变电站设有一台 380 V 消防专用泵，其工作电流为 220 A，采用一根 1 kV 三芯交联聚乙烯绝缘铜芯钢带铠装电缆配电，电缆在土壤中单根直埋敷设，埋深处最热月平均地温为 30℃，土壤热阻系数为 1.5 km/W。如仅从电缆载流量和经济方面考虑，计算该配电电缆的最小截面应为下列哪项数值？（设电缆经济电流密度为 1.8 A/mm^2，电缆直埋时直流载流量参见《电力工程电缆设计规范》GB 50217-2007）（供配电 2017 年考题）

（A）70 mm^2　　（B）95 mm^2　　（C）120 mm^2　　（D）150 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217-2007 附录 A、附录 B、附录 C、附录 D。

消防专用泵工作电流为 220 A。查表 D.0.1 温度校正系数为 0.96，表 D.0.2 中土壤热阻系数为 1.5 km/W，对应校正系数为 0.93；10 kV 电缆载流量表 C.0.3 中热阻系数为 2.0，对应校正系数 0.87。查表 C.0.1-4 初选 95 mm^2 持续工作电流载流量为 247 A，其修正计算如下：

$$I_z \frac{k_T k_{Z1}}{k_{Z2}} = 247 \times \frac{0.96 \times 0.93}{0.87}\ \text{A} = 253.5\ \text{A} > 220\ \text{A}$$

消防专用泵属于那些长期不使用的回路，不宜按经济电流密度选择截面。从电缆载流量和经济方面考虑选择 95 mm^2 截面满足要求。

例题 8-20～8-22：某县在城网改造中需将环城 18 km 架空线路换为单芯交联聚氯乙烯铝芯电缆，采用隧道内敷设，架空线路输送容量为 100 MV·A，单芯交联聚氯乙烯铝芯电缆在空气中一字形敷设。请回答以下问题。

8-20：已知电缆护层的冲击耐压值为 37.5 kV，则电缆保护器通过最大电流时的最大残压应取下列哪项数值？并说明理由。（供配电 2006 年考题）

（A）64 kV　　（B）37.5 kV　　（C）24 kV　　（D）26.8 kV

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

第 4.1.13 条　护层电压限制器可能最大冲击电流作用下护层电压限制器的残压，不得大于电缆护层的冲击耐压被 1.4 所除数值。保护器通过最大电流时的最大残压为 37.5/1.4 kV = 26.8 kV，选 D。

【知识点解析】

护层电压限制器参数的选择，应符合下列规定：

1）可能最大冲击电流作用下护层电压限制器的残压，不得大于电缆护层的冲击耐压被 1.4 所除数值。

2）系统短路时产生的最大工频感应过电压作用下，在可能长的切除故障时间内，护层电压限制器应能耐受。切除故障时间应按 5 s 以内计算。

3）可能最大冲击电流累积作用 20 次后，护层电压限制器不得损坏。

8-21：经过计算，电缆敷设时需将电缆保护层分为若干单元，每个单元内两端护层三相互相接地，且每单元又用绝缘连接盒分为三段，每段交叉换位并经保护接地。这样的主要原因是什么？（供配电 2006 年考题）

（A）为降低电缆护层上的感应电压

（B）为使电缆三相的阻抗参数相同

（C）为使每相电缆护层内的感应电流相互抵消

（D）为使每相电缆产生的电压降互相抵消

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

第 4.1.10 条和第 4.1.11 条　交流单芯电力电缆线路的金属层上任一点非直接接地处的正常感应电动势应满足规定，题干就是规定的具体内容。

依据《交流电气装置的接地设计规范》GB 50065—2011。

第 5.2.1 条和第 5.2.2 条　单芯电缆在线路上应至少有一点直接接地，而且非接地处金属护套或屏蔽层上的正常感应电压都要求有限制。

8-22：如附近有一回 35 kV 单芯交联聚氯乙烯铝芯电缆，金属层接地方式按一端接地设计。电缆导体额定电流为 300 A，电缆计算长度为 1 km，三根单芯电缆埋设且水平排列，相间距离为 20 cm，电缆金属层半径为 3.2 cm，则这段电缆线路中相间（B 相）正常感应电压是多少？（发输电 2012 年考题）

（A）47.58 V　　（B）42.6 V　　（C）34.5 V　　（D）13.05 V

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

题目已知三根单芯电缆埋设且水平排列电缆线路中相间（B 相）单位长度的正常感应电动势，查 GB 50217—2007 表 F.0.2 中：

$$E_{s0}=IX_0=I\left(2\omega\ln\frac{S}{r}\right)\times10^{-4}$$

$$=300\times\left(2\times50\times2\pi\times\ln\frac{0.2}{0.032}\right)\times10^{-4}\ \text{V/km}=34.5\ \text{V/km}$$

正常感应电动势为

$$E_s = LE_{s0} = 1 \times 34.5\ \text{V} = 34.5\ \text{V}$$

【知识点解析】

交流系统中单芯电缆线路一回或两回的各相按通常配置排列情况下，在电缆金属层上任一点非直接接地处的正常感应电动势值，可按下式计算：

$$E_s = LE_{s0}$$

式中，E_s为感应电动势（V）；L为电缆金属层的电气通路上任一部位与其直接接地处的距离（km）；E_{s0}为单位长度的正常感应电动势（V/km），E_{s0}的表达式见 GB 50217—2007 附录 F 中表 F.0.2。

例题 8-23：某企业新建 35/10 kV 变电所，10 kV 侧计算有功功率为 17450 kW，计算无功功率为 11200 kvar，选用 2 台 16000 kV·A 的变压器，每单台变压器阻抗电压为 8%，短路损耗为 70 kW，两台变压器同时工作，分列运行，负荷平均分配，该变电所采用两回 35 kV 输电线路供电，两回线路同时工作。该变电所的两回 35 kV 输电线路采用经济电流密度选择导线截面应为下列哪项数值？（不考虑变压器损耗，经济电流密度取 0.9 A/mm²）（供配电 2013 年考题）

（A）150 mm²　　（B）185 mm²　　（C）300 mm²　　（D）400 mm²

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 附录 B 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1591 页（第三版第 535 页）。

变电站最大负荷计算电流：

$$I_{max} = \frac{S_c}{\sqrt{3}U} = \frac{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{3}U} = \frac{\sqrt{14500^2 + 11200^2}}{2\sqrt{3} \times 35}\ \text{A} = 171.025\ \text{A}$$

采用经济电流选导体截面：

$$S = \frac{I_{max}}{J} = \frac{171.025}{0.9}\ \text{mm}^2 = 190\ \text{mm}^2$$，取最接近值 185 mm²

【知识点解析】

采用经济电流密度选择导线截面方法：

按经济电流密度公式计算导体、高压电缆、架空线路截面，使用公式如下。

$$S_{ec} = I_{max}/j \qquad (8\text{-}1)$$

式中，j为导体的经济电流密度（A/mm²）；S_{ec}为导体的经济截面（mm²）；I_{max}为第一年导体最大负荷电流（A）；

由于第一年导体最大负荷电流在规范手册的要求不同，建议按以下顺序使用式（8-1）。

1）最大负荷电流使用导体第一年最大负荷电流I_{max}或配电负荷侧第一年最大计算电流。

2）供电单位无法知道具体的最大负荷电流时可使用回路持续工作电流I_g。

例题 8-24：某台 10 kV 笼型感应电动机的工作方式为负荷平稳连续工作制，额定功率为 800 kW。若电动机采用铜芯交联聚乙烯绝缘电缆（YJV）供电，电缆沿墙穿钢管明敷，环境温度为 35℃，缆芯最高温度为 90℃，三班制（6000 h），所在地区电价为 0.5 元/（kW·h），

计算电流为 59 A，下列按经济电流密度选择的电缆截面哪项是正确的？说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）35 mm^2　　（B）50 mm^2　　（C）70 mm^2　　（D）95 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1588 页（第三版第 532 页表 9-57）。

查表 16.4-1 铜芯交联聚氯乙烯绝缘电缆，三班制（6000 h），电价为 0.5 元/（kW·h），电缆截面 35 mm^2时经济电流上限为 59.6 A，大于计算电流 59 A。选 B。

【知识点解析】

常用的电缆和绝缘导体的经济电流截面可以从《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1588 页中 10 kV 交联聚氯乙烯绝缘电缆经济电流范围表 16.4-1（即表 8-9），铜芯和铝芯 0.6/1.0 kV 低压电缆经济电流范围表 16.4-2 和表 16.4-3 中查出。

表 8-9　10 kV 交联聚乙烯绝缘电缆的经济电流范围之上限值　　（单位：A）

导　体	截面积/mm^2	低电价：0.40~0.50 元/（kW·h）			中电价：0.51~0.60 元/（kW·h）			高电价：0.61~0.70 元/（kW·h）		
		T_{max}/h			T_{max}/h			T_{max}/h		
		2000	4000	6000	2000	4000	6000	2000	4000	6000
铜	4	11.2	8.3	6.5	8.8	6.4	5	8.4	6.1	4.7
	6	17.5	13.0	10.2	13.7	10.1	7.8	13.1	9.6	7.4
	10	29.1	21.6	16.9	22.8	16.8	13.0	21.8	15.9	12.3
	16	45.2	33.6	26.2	35.4	26.0	20.2	33.8	24.7	19.1
	25	68.7	51.1	39.9	53.8	39.5	30.7	51.4	37.5	29.0
	35	102.7	76.3	59.6	80.5	59.1	45.9	76.9	56.1	43.4
	50	127.1	94.4	73.8	99.6	73.2	56.8	95.1	69.4	53.7
	70	178.6	132.7	103.7	139.9	102.8	79.9	133.7	97.5	75.5
	95	245.1	182.2	142.3	192.1	141.1	109.6	183.5	133.8	103.6
	120	316.2	235.0	183.6	247.8	182.0	141.4	236.7	172.6	133.6
	150	366.0	272.0	212.5	286.8	210.7	163.7	274.0	199.8	154.6
	185	467.5	347.5	271.4	366.4	269.2	209.1	350.0	255.2	197.6
	240	617.2	458.8	358.3	483.7	355.3	276.0	462.0	336.9	260.8
	300	—	—	—	709.6	521.3	404.9	677.8	494.3	382.6

例题 8-25：有一台 10 kV，800 kW 异步电动机，此电动机供电的 10 kV 母线最小运行方式下短路容量为 75 MV·A，10 kV 母线最大运行方式下短路容量为 100 MV·A。如果该电动机由 10 kV 母线经电缆供电，短路电流持续时间为 0.2 s，则铜芯交联聚乙烯电力电缆的最小电缆截面应为下列哪一项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）35 mm^2　　（B）50 mm^2　　（C）25 mm^2　　（D）10 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005 和《电力工程电

缆设计规范》GB 50217—2007 附录 E。

第 5.0.4 条　通过 10 kV 铜芯交联聚乙烯电缆最大短路电流为

$$I''_{k}=\frac{S_{kmax}}{\sqrt{3}U_{j}}=\frac{100}{\sqrt{3}\times10.5}\text{ kA}=5.5\text{ kA}$$

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 384 页。

查表 5.6-7，10 kV 铜芯交联聚乙烯电缆，热稳定系数 $C=137$，实用短路电流计算法的热稳定校验电力电缆最小截面为

$$S_{min}\geqslant\frac{\sqrt{Q_{t}}}{C}\times10^{3}=\frac{\sqrt{I''^{2}_{k}t}}{137}\times10^{3}=\frac{\sqrt{5.5^{2}\times0.2}}{137}\times10^{3}\text{ mm}^{2}=18\text{ mm}^{2}$$，选 25 mm^2

【知识点解析】

实用计算法的热稳定校验：

1）电力电缆热稳定校验确定最小截面可用下式验算。

$$S\geqslant\frac{\sqrt{Q}}{C}\times10^{2}$$

式中，S 为裸导体的载流截面积（mm^2）；Q 为导体短路电流的热效应（A^2·s）；C 为热稳定系数。

2）常用硬导体和电力电缆热稳定系数 C（见表 8-10）。

表 8-10　常用硬导体和电力电缆热稳定系数 C

导体种类和材料			导体长期允许工作温度/℃	短路时导体允许最高温度/℃	C 值
硬导体及裸导线	铜		70	300	171
	铝及铝合金		70	200	87
10 kV 架空绝缘电缆	铜芯	高密度聚乙烯绝缘	75	150	100×10^{2}
		交联聚乙烯绝缘	90	250	137×10^{2}
	铝芯	高密度聚乙烯绝缘	75	150	66×10^{2}
		交联聚乙烯绝缘	90	250	90×10^{2}
1~30 kV 聚氯乙烯绝缘电缆	铜芯：≤300 mm^2		70	160	115×10^{2}
	铝芯：≤300 mm^2		70	160	72×10^{2}
≤110 kV 交联聚乙烯绝缘电缆	铜芯：≤300 mm^2		90	250	137×10^{2}
	铝芯：≤300 mm^2		90	250	90×10^{2}

3）除火电厂 3~10 kV 厂用电动机馈线外的情况下的热效应计算。

$$Q=I^{2}t$$

式中，I 为系统电源供给短路电流的周期分量起始有效值（A）；t 为短路持续时间（s）。

例题 8-26：某 2×350 MW 火力发电厂，高压厂用电采用 6 kV 一级电压。每台机组设一台分裂高厂变。两台机组设一台同容量的高压起动/备用变压器。每台机组设两段 6 kV 工作母线，不设公用段，低压厂用电电压等级为 400/230 V，采用中性点直接接地系统。假设该

工程 6 kV 母线三相短路时，厂用电源短路电流周期分量的起始有效值为 $I_B = 24\ kA$，电动机反馈电流周期分量的起始有效值为 $I_D = 15\ kA$，6 kV 断路器采用中速真空断路器。6 kV 电缆全部采用交联聚乙烯铜芯电缆。若电缆的额定负荷电流与电缆的实际最大工作电流相同，则 6 kV 电动机回路按短路热稳定条件允许的三芯电缆最小截面应为下列哪项数值？（发输电 2017 年考题）

（A）95 mm^2　　（B）120 mm^2　　（C）190 mm^2　　（D）185 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217-2007。

表 E.1.3-1 中，火电机组为 350 MW，中速真空断路器取 $T = 0.2\ s$，取 $T_b = 0.06\ s$，火电厂 6 kV 厂用电动机馈线 Q 值：

$$Q = 0.21I^2 + 0.23II_d + 0.09I_d^2 = (0.21\times24^2 + 0.23\times24\times15 + 0.09\times15^2)\ kA^2\cdot s = 224.01\ kA^2\cdot s$$

依据《工业与民用配电设计手册》第四版（上册）第 385 页。

查表 5.6-7，铜芯交联聚乙烯电缆，热稳定系数 $C = 137$，热稳定校验电力电缆最小截面：

$$S_{min} \geqslant \frac{\sqrt{Q_t}}{c}\times10^3 = \frac{\sqrt{224.01}}{137}\times10^3\ mm^2 = 109.25\ mm^2$$，选 120 mm^2。

例题 8-27：本变电所 10 kV 其中有一负荷出线电缆，已知该负荷线路的短路电流交流起始分量最大有效值为 9.6 kA，若电缆相间中心距离为 22 mm，电缆上夹具的相邻跨距为 1500 mm 时，电缆固定部件应能承受的最大短路电动力最接近下列哪一项？

（A）10.42 kN　　（B）11.72 kN　　（C）16.75 kN　　（D）19.66 kN

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

题目已知安全系数为 2，相间中心距离为 22 mm，相邻跨距为 1500 mm，电缆固定部件的最大短路电动力为

$$F \geqslant \frac{2.05i_p^2LK}{D}\times10^{-7} = \frac{2.05\times(2.55\times9.6)^2\times1.5\times2}{0.022}\ kN = 16.75\ kN$$

【知识点解析】

交流单芯电力电缆固定部件的机械强度，应验算短路电动力条件，并应满足下列关系式：

$$F \geqslant \frac{2.05i_p^2LK}{D}\times10^{-7}$$

对于矩形断面夹具：

$$F = bh\sigma$$

式中，F 为夹具、扎带等固定部件的抗张强度（N）；i_p 为通过电缆回路的最大短路电流峰值（A）；D 为电缆相间中心距离（m）；L 为在电缆上安装夹具、扎带等的相邻跨距（m）；K 为安全系数，取大于 2；b 为夹具厚度（mm）；h 为夹具宽度（mm）；σ 为夹具材料允许拉力（Pa），对铝合金夹具，σ 取 80×10^6。

例题 8-28：如图 8-4 所示，6 kV 电动机额定功率为 2500 kW，功率因数为 0.85，采用铜芯交联聚乙烯绝缘电缆（XLPE）供电，初步设计时电缆的截面积为 120 mm^2。已知 6 kV 母线最大负荷时电压偏差为-3%，最小负荷时电压偏差为+4%，若要求电动机运行时允许最低电压为-5%，仅考虑电压降时该电动机供电电缆的最大长度为下列哪一项？

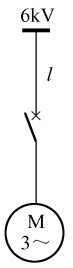


图 8-4　电动机供电示意图

（A）1.36 km　　（B）1.22 km

（C）1.14 km　　（D）0.95 km

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 865 页、第 875 页（第三版第 542 页、第 551 页）。

6 kV 母线最大负荷时电压偏差为-3%，因为电动机运行时允许最低电压为-5%，电缆上的电压降不能大于-2%。电动机功率因数为 0.85、电缆的截面为120 mm^2，查《配四》第 875 页表 9.4-18 中单位功率长度的电压损失为 0.653%/(MW·km)，电缆上的电压降不能大于 2%，供电电缆的最大长度为

$$\Delta u = 2\% = Pl\Delta u_a = 2.5 \times l \times 0.653;\ l = 1.225\ \text{km}$$

【知识点解析】

线路的电压降计算公式见表 8-11。

表 8-11　线路的电压降计算公式

线路种类	负荷情况	计算公式
三相平衡负荷线路	（1）终端负荷用电流矩 Il(A·km)表示 （2）几个负荷用电流矩 I_iI_i(A·km)表示 （3）终端负荷用负荷矩 Pl(kW·km)表示 （4）几个负荷用负荷矩 P_il_i(kW·km)表示 （5）整条线路的导线截面、材料及敷设方式均相同且 $\cos\varphi=1$，几个负荷用负荷矩 P_il_i（kW·km）表示	$\Delta u\% = \frac{\sqrt{3}}{10U_n}(R'_0\cos\varphi + X'_0\sin\varphi)Il = \Delta u_a\%Il$ $\Delta u\% = \frac{\sqrt{3}}{10U_n}\sum[(R'_0\cos\varphi + X'_0\sin\varphi)I_il_i] = \sum(\Delta u_a\%I_il_i)$ $\Delta u\% = \frac{1}{10U_n^2}(R'_0 + X'_0\tan\varphi)Pl = \Delta u_p\%Pl$ $\Delta u\% = \frac{1}{10U_n^2}\sum[(R'_0 + X'_0\tan\varphi)P_il_i] = \sum(\Delta u_p\%P_il_i)$ $\Delta u\% = \frac{R_0}{10U_n^2}\sum P_il_i = \frac{1}{10U_n^2\gamma_s}\sum P_il_i = \frac{\sum P_il_i}{CS}$

8.3　低压电力电缆及导体、N、PE、PEN、等电位联结设计选择

【知识点说明】

1）低压导体电缆基本选择、低压导体电缆载流量截面选择与环境修正属于重要考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007、《低压配电设计规范》GB 50054—2011、《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005、IEC 转化标准《低压电气装置 第 5-52 部分：电气设备的选择和安装布线系统》GB/T 16895.6—2014 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 9 章。要求掌握电缆额定电压、电缆导体材质、芯数、外护层类型

选择，电缆敷设与布线；熟练掌握低压导体电缆载流量的应用；掌握低压导体电缆在各种环境下的校正系数计算。但应注意 GB 50217—2007 与 GB/T 16895.6—2014 两个规范各种环境下的校正系数计算不同和电缆载流量的基准值不同。

2）低压导体电缆热稳定校验属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）11.2 节、《低压配电设计规范》GB 50054—2011 附录 A。

3）低压电缆电压降校验属于重要考点，要求与高压电缆部分相同。

4）低压电缆经济电流密度截面选择属于重要考点，要求与高压电缆部分相同。

5）低压导体电缆机械强度校验，依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 的 3.2 节、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）9.2 节、IEC 转化标准《低压电气装置 第 5-52 部分：电气设备的选择和安装布线系统》GB/T 16895.6—2014。

6）低压导体电缆满足线路保护要求，依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 的 6.3 节、IEC 转化标准《低压电气装置 第 4-43 部分：安全防护 过电流保护》GB 16895.5—2012、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）11.2 节等。

7）低压导体电缆的 N、PE、PEN、等电位联结设计选择，依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011、《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011、《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、IEC 转化标准《建筑物电气装置 第 5-54 部分：电气设备的选择和安装接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3—2004、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）9.2 节等。

依据书目：

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011

《低压电气装置 第 4-43 部分：安全防护 过电流保护》GB 16895.5—2012

《低压电气装置 第 5-52 部分：电气设备的选择和安装布线系统》GB/T 16895.6—2014

《建筑物电气装置 第 5-54 部分：电气设备的选择和安装 接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3—2004

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）等

例题 8-29~8-33：某车间采用 380 V 三相线路供电，线路长度 $L=50$ m，允许电压降为 5%，短路故障切除时间为 0.4 s，线路最大短路电流为 6.8 kA，线路采用铜芯交联聚乙烯绝缘电缆穿钢管明敷，环境温度为 40℃，电缆经济电流密度为 2.0 A/mm^2，热稳定系数为 137，电压损失百分数为 0.50%/(kW·km)。请回答以下问题，并列出解答过程。

8-29：假定计算功率为 $P_c=21.5$ kW，$Q_c=25.78$ kvar，则电缆截面不应小于哪项数值？(已考虑综合校正后的铜芯交联聚乙烯电缆穿钢管敷时允许载流量见表 8-12)(供配电 2008 年考题)

(A) 25 mm^2　　(B) 35 mm^2　　(C) 50 mm^2　　(D) 70 mm^2

表 8-12　已考虑综合校正后的铜芯交联聚乙烯电缆穿钢管敷时的允许载流量

电缆截面积/mm²	25	35	50	70
允许载流量/A	69	82	104	129
导体最高温度/℃	90			
环境温度/℃	40			

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 10 页（第三版第 3 页）。

计算容量：$S_c=\sqrt{P_c^2+Q_c^2}=\sqrt{21.5^2+25.78^2}\ \text{kV}\cdot\text{A}=33.57\ \text{kV}\cdot\text{A}$

计算电流：$I_c=\dfrac{S_c}{\sqrt{3}U_c}=\dfrac{33.57}{\sqrt{3}\times0.38}\text{A}=51\ \text{A}$

依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 第 3.7.2 条或《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 3.2.2 条。

10 kV 及以下常用电缆载流量计入校正系数后的实际允许值应大于回路的工作电流，因表 8-12 中电缆载流量为综合校正后，选截面 25 mm² 满足要求，选 A。

【知识点解析】

1 kV 以下低压电力电缆和导体截面按环境条件确定的导体载流量，不应小于计算电流，即

计算电流≤环境修正综合校正系数×允许持续载流量

常用 1 kV 及其以下电力电缆和导体允许持续载流量，可在《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 附录 C 中查出，对于 IEC 规范可在《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 811 页 9.3 节（第三版第 496 页 9.3 节）或《低压电气装置 第 5-52 部分：电气设备的选择和安装布线系统》GB/T 16895.6—2014 附录 B~附录 D 中查出。

环境修正综合校正系数：

1）当采用《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 时，环境条件修正和综合校正系数计算方法与高压电力电缆计算方法相同，详见 GB 50217—2007 附录 D。

2）当采用 IEC 规范时，对于《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 811 页 9.3 节或 GB/T 16895.6—2014 中建筑物内 1 kV 及以下电力电缆和导体允许持续载流量，环境基准温度土壤 20℃、空气中 30℃、土壤热阻系数 $\rho=2.5(\text{K}\cdot\text{m})/\text{W}$ 与 GB 50217—2007 中的环境修正系数完全不同，应使用 IEC 规范的综合校正系数计算。

8-30：若假定车间负荷计算电流 $I_c=55\ \text{A}$，按电缆经济电流密度选择电缆导体截面应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）25 mm²　　（B）35 mm²　　（C）50 mm²　　（D）70 mm²

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 附录 B 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1591 页（第三版第 535 页）。

按电缆经济电流密度选择电缆导体截面：

$$S_j=\frac{I_{max}}{J}=\frac{55}{2}\ mm^2=27.5\ mm^2$$

第 B.0.3-3 条　当电缆经济电流截面介于电缆标称截面档次之间，可视其接近程度，选择较接近一档截面，且宜偏小选取。因此选择截面为 25 mm^2，选 A。

8-31：若按热稳定校验选择电缆导体最小截面应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）25 mm^2　　（B）35 mm^2　　（C）50 mm^2　　（D）70 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

题目已知铜芯交联聚乙烯绝缘电缆热稳定系数 $k=137$，低压电缆相导体的截面积计算：

$$S_{min}\geqslant\frac{I\sqrt{t}}{k}\times10^3=\frac{6.8\times\sqrt{0.4}}{137}\times10^3\ mm^2=31.4\ mm^2$$，选 35 mm^2

【知识点解析】

低压相导体及保护导体的热稳定，应按其截面积校验，且应符合下列规定：

1）当短路持续时间小于等于 5 s 时，绝缘导体的截面积应符合下式的要求。

$$S\geqslant\frac{I\sqrt{t}}{k}$$

式中，S 为保护导体的截面积（mm^2）；I 为通过保护电器的预期故障电流或短路电流交流方均根值（A）；t 为保护电器自动切断电流的动作时间（s）；k 为系数，相导体和裸导体系数可从 GB 50054—2011 附录 A 表 A.0.6～表 A.0.7 中查出；或相导体系数从 GB 16895.5—2012 中查出；保护导体的热稳定系数 k 值从 GB 50054—2011 附录表 A.0.2～表 A.0.5 中查出。

2）短路持续时间小于 0.1 s 时，校验绝缘导体截面积应计入短路电流非周期分量的影响；大于 5 s 时，校验绝缘导体截面积应计入散热的影响。

8-32：若假定 $P_e=21.5$ kW，则供电线路电压损失应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）0.054%　　（B）0.54%　　（C）5.4%　　（D）54%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 865 页（第三版第 542 页、第 551 页）。

题目已知 $\Delta u_p\%=0.5\%/(kW\cdot km)$，线路距离为 50 m，负载 $P_e=21.5$ kW，线路电压降为

$$\Delta u=Pl\Delta u_p=21.5\times0.05\times0.5\%=0.54\%$$

8-33：某车间工段用电设备，接至本工段电源进线点前的电缆线路为埋地敷设的电缆，根据本工段计算电流采用“gG”型熔体额定电流为 200A 的熔断器作为该电缆线路保护电器，并已知该电器在约定时间内的可靠动作电流为 1.6 倍的熔体额定电流。按照 0.6/1 kV 铜芯交联聚乙烯绝缘电力电缆的载流量表 8-13，考虑过负荷保护电器的工作特性，则进线 0.6/1 kV 铜芯交联聚乙烯绝缘电力电缆截面应为下列哪一项？（考虑电缆敷设处土壤温度、热阻系数、并列系数等总校正系数为 0.8）（供配电 2011 年考题）

表 8-13　0.6/1 kV 铜芯交联聚乙烯绝缘电力电缆的载流量

电力电缆截面/mm²	载流量/A	电力电缆截面/mm²	载流量/A
70	178	150	271
95	211	185	304
120	240	240	351

（A）3×70+1×35　　（B）3×95+1×50

（C）3×150+1×70　　（D）3×185+1×95

答案：【D】

解答过程：依据《低压电气装置 第 4-43 部分：安全防护 过电流保护》GB 16895.5—2012 第 433.1 条或《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 6.3.3 条。

根据防止电缆过负荷保护电器的工作特性：

电缆载流量 I_z 满足 $I_B \leqslant I_n \leqslant I_z$（式①）要求，$I_z \geqslant I_n = 200$ A

电缆载流量 I_z 满足 $I_2 \leqslant 1.45 I_z$（式②）要求，$I_z \geqslant I_2/1.45 = 1.6\times200/1.45$ A $= 220.7$ A

考虑电缆校正系数后电缆 3×185+1×95 的载流量 0.8×304 A = 243.2 A>220.7 A，满足要求，选 D。

【知识点解析】

低压电力电缆和导体截面满足线路保护要求的导体载流量如图 8-5 所示，按照下式计算：

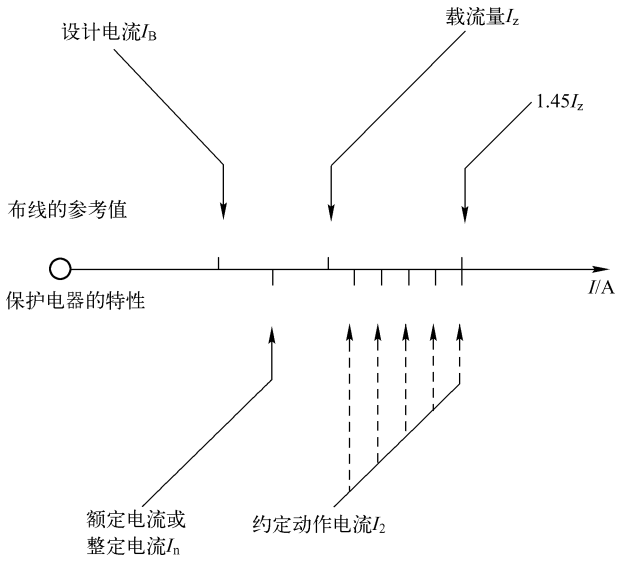


图 8-5　导体载流量

$$I_B \leqslant I_n \leqslant I_z$$

$$I_2 \leqslant 1.45 I_z$$

式中，I_B 为回路计算电流（A）；I_n 为熔断器熔体额定电流或断路器额定电流或整定电流（A）；I_z 为导体允许持续载流量（A）；I_2 为保证保护电器可靠动作的电流（A），当保护电器为断路器时，I_2 为约定时间内的约定动作电流，当为熔断器时，I_2 为约定时间内的约定熔

断电流。

例题 8-34：某办公室配电设计中，额定工作电压为 AC 220 V，已知办公室末端分支线路有功功率为 1000 W，功率因数为 0.9，导体过电流保护断路器整定值 10 A，铜芯绝缘导体穿导管敷设，下列分支线导线截面积哪组数据符合规范规定？（不考虑电压降和线路敷设方式的环境影响，导体允许载流量按表 8-14 选取）

表 8-14　导体允许载流量

导线截面积/ mm^2	0.75	1.0	1.5	2.5
导线载流量/A	8	11	16	27

（A）分支线导线截面积选择 0.75 mm^2

（B）分支线导线截面积选择 1.0 mm^2

（C）分支线导线截面积选择 1.5 mm^2

（D）分支线导线截面积选择 2.5 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 第 3.2.2 条、第 6.3.3 条。

题目已知办公室末端分支有功功率为 1000 W，功率因数为 0.9，计算电流为

$$I_n=\frac{P}{U\cos\varphi}=\frac{1000}{220\times0.9}\text{A}=5.05\text{A}$$

根据防止电缆过电流保护电器的工作特性：

电缆载流量 I_z 满足 $I_B\leqslant I_n\leqslant I_z$（式①）要求，$I_z\geqslant I_n=5$ A

电缆载流量 I_z 满足 $I_2\leqslant1.45I_z$（式②）要求，$I_z\geqslant I_2/1.45=10/1.45$ A $=6.9$ A

不考虑电缆校正系数后导线截面积可选择 0.75 mm^2。

固定敷设的导体最小截面：查 GB 50054—2011 表 3.2.2 中绝缘导体穿导管敷设铜导体最小截面选择 1.5 mm^2，选 C。

【知识点解析】

低压导体选择导体截面，应符合下列规定：

1）按敷设方式及环境条件确定的导体载流量，不应小于计算电流。

2）导体应满足线路保护的要求。

3）导体应满足动稳定与热稳定的要求。

4）线路电压损失应满足用电设备正常工作及启动时端电压的要求。

5）导体最小截面应满足机械强度的要求。固定敷设的导体最小截面，应根据敷设方式、绝缘子支持点间距和导体材料按表 8-15 的规定确定。

表 8-15　固定敷设的导体最小截面

敷设方式	绝缘子支持点间距/m	导体最小截面/ mm^2	
		铜导体	铝导体
裸导体敷设在绝缘子上	—	10	16

（续）

敷 设 方 式	绝缘子支持点间距/m	导体最小截面/mm^2	
		铜导体	铝导体
绝缘导体敷设在绝缘子上	≤2	1.5	10
	>2，且≤6	2.5	10
	>6，且≤16	4	10
	>16，且≤25	6	10
绝缘导体穿导管敷设或在槽盒中敷设	—	1.5	10

例题 8-35：已知变电所一路 380 V 所用电回路是以气体放电灯为主的照明回路，拟采用 1 kV 交联聚乙烯铜芯四芯电缆直埋敷设（环境温度 25℃，热阻系数 $\rho=2.5$，电缆载流量见表 8-16）。该回路的基波电流为 80 A，各相线电流中三次谐波分量为 35%，该回路的电缆最小截面应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

表 8-16　交联聚乙烯绝缘电缆直埋敷设载流量表

敷 设 方 式			三、四芯或单芯三角排列			二　　芯		
线芯截面/mm^2			不同环境温度的载流量/A					
主线芯		中性线	20℃	25℃	30℃	20℃	25℃	30℃
铜	1.5		22	21	20	26	25	24
	2.5		29	28	27	34	33	32
	4	4	37	36	34	44	42	41
	6	6	46	44	43	56	54	52
	10	10	61	59	57	73	70	68
	16	16	79	76	73	95	91	88
	25	16	101	97	94	121	116	113
	35	16	122	117	113	146	140	136
	50	25	144	138	134	173	166	161
	70	35	178	171	166	213	204	198
	95	50	211	203	196	252	242	234
	120	70	240	230	223	287	276	267
	150	70	271	260	252	324	311	301
	185	95	304	292	283	363	349	338
	240	120	351	337	326	419	402	390
	300	150	396	380	368	474	455	441

（A）25 mm^2　　（B）35 mm^2　　（C）50 mm^2　　（D）70 mm^2

答案：【D】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011。

第 3.2.9 条　三次谐波分量为 35%，按照中性导体电流选择截面计算如下：

$$I_z \geq \frac{80\times35\%\times3}{0.86}\text{A}=97.67\text{A}$$，初步选择相导体截面为 35 mm^2

题目中给出四芯电缆载流量表中中性导体与相导体材料相同和截面不相等。

依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007。

第 3.7.9 条　气体放电灯为主要负荷的回路，中性线截面不宜小于相芯线截面。所以宜

选择 3×70+1×35 电缆，选 D。

【知识点解析】

在三相四线制线路中存在谐波电流时，计算中性导体的电流应计入谐波电流的效应。当中性导体电流大于相导体电流时，电缆相导体截面应按中性导体电流选择。当三相平衡系统中存在谐波电流，四芯或五芯电缆内中性导体与相导体材料相同和截面相等时，则

按相电流选择截面：$I=\dfrac{I_c\sqrt{1+\varepsilon^2}}{\alpha}$

按中性导体电流选择截面：$I=\dfrac{3I_c\varepsilon}{\alpha}$

式中，I_c为相导体计算电流（A）；ε 为谐波电流百分比（%）；α 为电缆载流量降低系数，应按表 8-17 的规定确定。

表 8-17　电缆载流量的降低系数 α

相电流中三次谐波分量（%）	降低系数	
	按相电流选择截面	按中性导体电流选择截面
0~15	1.0	—
>15，且≤33	0.86	—
>33，且≤45	—	0.86
>45	—	1.0

有谐波电流影响的回路，尚应符合下列规定：

1）气体放电灯为主要负荷的回路，中性线截面不宜小于相芯线截面。

2）除上述情况外，中性线截面不宜小于 50%的相芯线截面。

例题 8-36：一座 35/10 kV 变电站附属于某公共建筑物内并为该建筑物供电。建筑物内下级 10/0.4 kV 变压器兼站用变。35 kV 系统采用高电阻接地方式，10 kV 侧单相接地电容电流为 15 A，采用经消弧线圈接地，0.4 kV 侧采用 TN-S 系统。假定站用变低压侧某出线回路采用铜芯多芯电缆，其中一芯作为 PE 线，电缆绝缘材料为 85℃橡胶，回路预期的单相短路故障电流有效值为 2 kA，保护电器动作时间考虑最不利情况取 5 s，则作为 PE 线的电缆芯线截面积最小为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）16 mm^2　　（B）25 mm^2　　（C）35 mm^2　　（D）50 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《低压配电设计规范》GB 50054—2011 或《建筑物电气装置 第 5-54 部分：电气设备的选择和安装 接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3—2004。

查 GB 50054—2011 附录 A 表 A.0.4 中电缆绝缘材料为 85℃橡胶的 K 值为 134，PE 线的电缆芯线截面积为

$$S\geqslant\frac{I\sqrt{t}}{k}=\frac{2000}{134}\times\sqrt{5}\ mm^2=33.37\ mm^2,\text{取}\ 35\ mm^2$$

例题 8-37：假设企业车间 380 V 供电负荷组成如图 8-6 所示。车间有两台容量相同的

电动机 A、B，额定功率为 30 kW，功率因数为 0.86，采用铜芯三相交联聚乙烯绝缘电力电缆供电，截面积为 25 mm^2，配电柜 O 至电动机 A 的长度为 100 m，电动机 A 至电动机 B 的长度为 60 m，则配电柜 O 至电动机 B 处供电电缆的电压损失为下列哪一项？

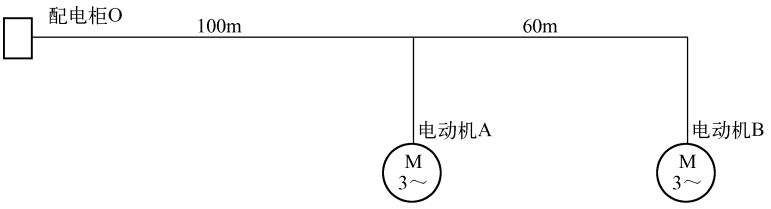


图 8-6　某车间供电负荷

（A）0.54%　　（B）2.49%　　（C）4.96%　　（D）5.41%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 865 页、第 875 页（第三版第 542 页、第 551 页）。

铜芯三相交联聚乙烯绝缘电力电缆供电截面积为 25 mm^2，查《配四》表 9.4-19 中 $R_0'=0.87\ \Omega/km$，$X_0'=0.082\ \Omega/km$。功率因数 0.86 对应 $\tan\varphi=\tan(\arccos\varphi)=0.593$。

配电柜 O 至电动机 B 处供电电缆的电压损失为

$$\Delta u\% = \frac{1}{10U_n^2}\sum (R_0' + X_0'\tan\varphi)P_i l_i$$

$$=\frac{1}{10\times 0.38^2}\times[0.87+0.082\times 0.593]\times(60\times 0.1+30\times 0.06)=4.96\%$$

例题 8-38：安全防范系统的电源线、信号线经过不同防雷区的界面处，宜安装电涌保护器，系统的重要设备应安装电涌保护器，电涌保护器接地端和防雷接地装置应作等电位联结，等电位联结带应采用铜质线，按现行国家标准其截面积不应小于下列哪个数值？

（A）60 mm^2　　（B）10 mm^2　　（C）16 mm^2　　（D）25 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《安全防范工程设计规范》GB 50348—2004 第 3.9.5 条。

安全防范系统的电源线、信号线经过不同防雷区的界面处，宜安装电涌保护器；系统的重要设备应安装电涌保护器。电涌保护器接地端和防雷接地装置应作等电位联结。等电位联结带应采用铜质线，其截面积应不少于 16 mm^2。

8.4　二次回路、爆炸环境电缆设计和其他

【知识点说明】

1）二次回路电缆属于普通考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007、《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008、《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017 等规范和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）8.5 节。要求掌握二次回路电缆一般要求，控制信号回路电缆截面选择；了解电流互感器回路电缆截面选择，电压互感器回路电缆截面选择。

2）爆炸环境电缆设计属于重要考点，依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014 的 5.4 节。

3）通用设备电缆设计属于普通考点，依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 9 章、《工业与民用供配电设计手册》第四版第 12 章和 11.12~11.13 节。

4）火灾场所及其他电缆设计属于普通考点，依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 第7 章、《建筑设计防火规范》GB 50016—2014 第 10 章等规范。

依据书目：

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007

《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008

《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017

《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《建筑设计防火规范》GB 50016—2014 等

例题 8-39：某变电所二次回路选择导线，根据二次回路性质确定电缆芯线最小截面时，下列哪项不符合规定？

（A）电压互感器带电磁式自动电压校正器的连接铜芯电缆芯线截面不应小于 1.5 mm^2

（B）电流互感器测量二次回路电缆芯线截面不应小于 2.5 mm^2

（C）强电控制回路电缆芯线截面不应小 1.5 mm^2

（D）弱电控制同路电缆芯线截面不应小于 0.5 mm^2

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 762 页（第三版第 461 页）、《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB 50063—2017 第 9.0.5 条、《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB 50062—2008 第 15.1.5 条。

电压互感器带电磁式自动电压校正器的连接铜芯电缆芯线截面不应小于 4 mm^2，A 错；

测量回路电流回路用电流互感器二次回路电缆芯线截面不应小于 2.5 mm^2，B 对；

强电控制同路铜芯控制电缆和绝缘导线的线芯最小截面不应小于 1.5 mm^2，C 对；

弱电控制回路铜芯控制电缆和绝缘导线的线芯最小截面不应小于 0.5 mm^2，D 对。

例题 8-40：某小型变电所采用 UPS 作为交流操作电源，控制、信号回路的额定电压 U_n = 220 V，电缆长度为 68 m，已知回路最大工作电流为 4.2 A。要求允许电压降 ΔU_p = 10% U_n，则铜芯电缆的最小截面应为下列哪项数值？（铜导体 γ 电导率取 57 × 10^6 S/m，不考虑敷设条件的影响。）（供配电 2009 年考题）

（A）6 mm^2　　（B）4 mm^2　　（C）2.5 mm^2　　（D）1.5 mm^2

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第763页（第三版第463页）。

交流操作电源控制、信号回路铜芯电缆的最小截面为

$$S=\frac{2I_{Q\cdot max}L}{\Delta UU_r\gamma}=\frac{2\times68\times4.2}{0.1\times220\times57\times10^6}mm^2=0.46mm^2$$

控制、信号回路用的电缆芯，根据机械强度条件选择，铜芯电缆芯截面积不应小于1.5 mm^2，选D。

【知识点解析】

控制、信号回路用控制电缆选择：

1）控制、信号回路用电缆芯，根据机械强度条件选择，铜芯电缆芯截面积不应小于1.5 mm^2。

2）控制回路电缆截面积的选择，应保证最大负荷时，控制电源母线至被控设备间连接电缆的电压降不应超过额定二次电压的10%。

3）当合闸回路和跳闸回路流过的电流较大时，产生的电压降将增大。为使断路器可靠动作，此时需根据电缆允许电压降来校验电缆芯截面积。

4）电缆芯截面选择计算式为

$$S=\frac{2I_{Q\cdot max}L}{\Delta UU_r\gamma}$$

式中，S为电缆芯截面积（mm^2）；$I_{Q\cdot max}$为流过合闸或跳闸绕组的最大电流（A）；L为电缆长度（m）；ΔU为合闸或跳闸绕组正常工作时允许的电压降，取10%；U_r为回路标称电压，取220 V；γ为电导率，铜取57×10^6 S/m。

例题8-41：某企业有110 kV变电站，设置两台主变压器，容量为2 MV·A。110 kV母线上接有三相星形接线的电压互感器，其作为关口电量计量使用，回路每相负荷均按40 V·A计，PT端子箱到电能计量装置屏的电缆长度为200 m，均采用铜芯电缆，则电缆的截面计算值应为下列哪项数值？（铜导体γ电导率取57×10^6 S/m，不考虑敷设条件的影响。）

（A）6.7 mm^2　　（B）7.81 mm^2　　（C）9.72 mm^2　　（D）12.16 mm^2

答案：【D】

解答过程：依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB 50063—2017。

条文说明第4.1.2条企业110 kV贸易结算用电能计量装置，为Ⅱ、Ⅲ类电能计量装置，有功电能表为0.5S级，第8.2.3条　电能计量装置的二次回路电压降不应大于额定二次电压的100×0.2%V=0.2 V。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第763页（第三版第462页）。

电能计量装置的电压互感器铜芯电缆的最小截面为

$$S=\sqrt{3}K_{con}\frac{PL}{U_{sn}\gamma\Delta U}=\sqrt{3}\times1\times\frac{40\times200}{100\times57\times0.2}mm^2=12.16mm^2$$

【知识点解析】

电压回路用控制电缆，按允许电压降来选择电缆芯截面。

（1）电测量仪表用电压互感器二次回路电缆截面的选择

电测量仪表用电压互感器二次回路电缆截面的选择，应符合以下规定。

1）用于测量的电压互感器的二次回路允许电压降，应符合下列规定：

① 计算机监控系统中的测量部分、常用电测量仪表和综合装置的测量部分，二次回路电压降不应大于额定二次电压的3%。

② 电能计量装置的二次回路电压降不应大于额定二次电压的0.2%。

2）电压互感器二次电压回路的电缆芯线截面，应按本规范第1）条的要求计算，一般计量回路不应小于4 mm^2，其他测量回路不应小于2.5 mm^2。

（2）保护装置用电压互感器二次回路电缆截面积的选择

当全部保护和自动装置动作时，电压互感器至保护和自动装置屏的电缆电压降不应超过额定电压的3%，但对电磁式自动电压校正器的连接电缆芯（铜芯）的截面积不应小于4 mm^2。

电压回路用控制电缆，计算时只考虑有功电压降，电缆芯截面积选择计算公式如下：

$$S=\sqrt{3}K_{con}\frac{PL}{U_{sn}\gamma\Delta U}$$

式中，S为电缆芯截面积（mm^2）；P为电压互感器每一相负荷（V·A）；U_{sn}为电压互感器二次线电压（V）；γ为电导率，铜取57×10^6 S/m；ΔU为允许电压降（V）；L为电缆长度（m）；K_{con}为接线系数，三相星形接线为1，两相星形接线为$\sqrt{3}$，单相接线为2。

例题8-42：某高层建筑物内设燃气炉房，燃气炉房内循环泵用380 V笼型感应电动机，额定电流为25 A，则电动机配电线路导体长期允许载流量不应小于下列哪一项数值？

（A）25 A　　（B）28 A　　（C）30 A　　（D）32 A

答案：【D】

解答过程：依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014。

第5.1.4-6条　爆炸性环境电缆引向电压为1000 V以下笼型感应电动机支线的长期允许载流量不应小于电动机额定电流的1.25倍。

即电机配电线路导体长期允许载流量：$I_z\geqslant1.25I_n=1.25\times25\ A=31.25\ A$

例题8-43：某企业的爆炸危险环境1区内380 V电缆配线，下列哪一项不符合规范要求？

（A）铜芯电力电缆在沟内敷设时的最小截面为2.5 mm^2

（B）铜芯控制电缆明敷时的最小截面为1.0 mm^2

（C）铝芯电力电缆在钢管敷设时的最小截面为10 mm^2

（D）铜芯照明电缆在沟内敷设时的最小截面为2.5 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014。

查表5.4.1-1、表5.4.1-2中，爆炸危险环境1区铜芯电力电缆描述A、B、D对，第5.4.1-3条中在1区内应采用铜芯电缆，C错。

【知识点解析】

爆炸性环境电缆和导线的选择应符合下列规定：

1）在爆炸性环境内，低压电力、照明线路采用的绝缘导线和电缆的额定电压应高于或等于工作电压，且U_0/U不应低于工作电压。中性线的额定电压应与相线电压相等，并应在同一护套或保护管内敷设。

2）在爆炸危险区内，除在配电盘、接线箱或采用金属导管配线系统内，无护套的电线不应作为供配电线路。

3）在1区内应采用铜芯电缆；除本质安全电路外，在2区内宜采用铜芯电缆，当采用铝芯电缆时，其截面不得小于16 m^2，凡与电气设备的连接应采用铜-铝过渡接头。敷设在爆炸性粉尘环境20区、21区以及在22区内有剧烈振动区域的回路，均应采用铜芯绝缘导线或电缆。

4）除本质安全系统的电路外，爆炸性环境电缆配线的技术要求应符合表8-18的规定。

表8-18　爆炸性环境电缆配线的技术要求

项目 / 技术要求 / 爆炸危险区域	电缆明设或在沟内敷设时的最小截面			移动电源
	电　力	照　明	控　制	
1区、20区、21区	铜芯2.5 mm^2 及以上	铜芯2.5 mm^2 及以上	铜芯1.0 mm^2 及以上	重型
2区、22区	铜芯1.5 mm^2 及以上，铝芯16 mm^2 及以上	铜芯1.5 mm^2 及以上	铜芯1.0 mm^2 及以上	中型

5）除本质安全系统的电路外，在爆炸性环境内电压为1000 V以下的铜管配线的技术要求应符合表8-19的规定。

表8-19　爆炸性环境内电压为1000 V以下的钢管配线的技术要求

项目 / 技术要求 / 爆炸危险区域	钢管配线用绝缘导线的最小截面			管子连接要求
	电　力	照　明	控　制	
1区、20区、21区	铜芯2.5 mm^2 及以上	铜芯2.5 mm^2 及以上	铜芯2.5 mm^2 及以上	钢管螺纹旋合不应少于5扣
2区、22区	铜芯2.5 mm^2 及以上	铜芯1.5 mm^2 及以上	铜芯1.5 mm^2 及以上	钢管螺纹旋合不应少于5扣

6）在爆炸性环境内，绝缘导线和电缆截面的选择应满足表8-18和表8-19的规定外，还应符合下列规定：

① 导体允许载流量不应小于熔断器熔体额定电流的1.25倍及断路器长延时过电流脱扣器整定电流的1.25倍，第2项的情况除外。

② 引向电压为1000 V以下笼型感应电动机支线的长期允许载流量不应小于电动机额定电流的1.25倍。

7）在架空、桥架敷设时电缆宜采用阻燃电缆。当敷设方式采用能防止机械损伤的桥架方式时，塑料护套电缆可采用非铠装电缆。当不存在会受鼠、虫等损害情形时，在2区、22区电缆沟内敷设的电缆可采用非铠装电缆。

8.5　架空线路设计选择

【知识点说明】

1）架空线路导地线的初步选择、架空线路电气参数的计算属于发输电专业的重要考

点，依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010、《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010、《电力工程高压送电线路设计手册》第二版等。要求掌握导、地线的种类和选用的原则，架空线路导线最小截面积选择，按导线长期允许电流校验，按经济电流密度选择，架空线路的气象条件；了解按电晕条件校验，输电线路的阻抗计算，输电线路的电容计算等。

2）杆塔对地距离和交叉跨越属于重要考点，依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010、《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010。

3）架空线路力学特性计算属于重要考点，依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求熟练掌握电线载荷、比载的计算，导线与地线在档距中央的距离，各种设计档距的计算；了解导线应力弧垂计算式，导线的状态方程式，最大应力和最大弧垂的控制条件；掌握线路导线的线间距离等。

4）各种杆塔荷载计算和规定属于重要考点，依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010、《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010、《电力工程高压送电线路设计手册》第二版、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）。要求熟练掌握导线瞬时破坏应力和最大使用张力、不平衡张力值；掌握导地线的风荷载，杆塔水平、垂直荷载的计算；了解杆塔形式、横担的选择。

5）杆塔的定位校验、架空线路防振属于普通考点，依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版。

依据书目：

《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010

《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010

《电力工程高压送电线路设计手册》第二版

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气一次部分）

例题 8-44～8-48：某企业 35 kV 电源线路，选用 JL/G1A-240 mm^2 导线，导线的参数如下：重量 g_1 为 964.3 kg/km，计算总截面 A 为 277.75 mm^2，计算直径 d 为 21.66 mm，最大风速为 30 m/s，覆冰厚度 b 为 5 mm，最大拉断力为 83370 N，安全系数为 3。请解答下列问题。

8-44：该导线的自重加冰重比载为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）13.29×10^{-3} N/（m·mm^2）　　（B）34.02×10^{-3} N/（m·mm^2）

（C）47.31×10^{-3} N/（m·mm^2）　　（D）58.42×10^{-3} N/（m·mm^2）

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 931 页表 10.3-28 或《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页表 3-2-3。

导线的自重加冰重比载为

$$\gamma_3=\gamma_1+\gamma_2=\frac{P_1 g}{A}+0.9\pi\frac{b(b+d)}{A}g\times10^{-3}$$

$$=\left(\frac{0.9643\times9.8}{277.75}+0.9\pi\frac{5\times(5+21.66)}{277.75}\times9.8\times10^{-3}\right)\text{N/(m}\cdot\text{mm}^2\text{)}$$

$$=(34.024\times10^{-3}+13.298\times10^{-3})\text{N/(m}\cdot\text{mm}^2\text{)}=47.32\times10^{-3}\text{ N/(m}\cdot\text{mm}^2\text{)}$$

【知识点解析】

电线每米长度上的荷载简称为单位荷载 g(N/m)，将其折算到电线单位截面上的单位荷载称为比载 g[N/(m·mm^2)]。比载计算公式见表 8-20。

表 8-20　比载计算公式　　（单位：N/(m·mm^2)）

比载种类	符号	计算公式	比载种类	符号	计算公式
自重	γ_1	$\dfrac{P_1 g}{A}$	覆冰时风荷载	γ_5	$ac\dfrac{W_0(d+2b)}{A}\times10^{-3}$
冰重	γ_2	$0.9\pi\dfrac{b(b+d)}{A}g\times10^{-3}$	无冰时综合荷载	γ_6	$\sqrt{\gamma_1^2+\gamma_4^2}$
自重加冰重	γ_3	$\gamma_1+\gamma_2$	覆冰时综合荷载	γ_7	$\sqrt{\gamma_3^2+\gamma_5^2}$
无冰时风荷载	γ_4	$ac\dfrac{W_0 d}{A}\times10^{-3}$			

注：P_1为导、地线单位长度的质量（kg/m）；g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2；A 为导、地线截面积（mm^2）；b 为导、地线覆冰厚度（mm）；d 为导、地线直径（mm）；W_0为不同风速 v(m/s) 作用下的基本风压，$W_0=\dfrac{1}{2}\rho v^2=0.6128v^2$，空气密度 $\rho=1.2255\ \text{kg/m}^3$。$a$ 为风速不均匀档距折减系数，取值如下：$v<20$ m/s，$a=1.0$；20 m/s$\leqslant v<30$ m/s，$a=0.85$；30 m/s$\leqslant v<35$ m/s，$a=0.75$；$v\geqslant35$ m/s，$a=0.70$；计算杆塔时系数为 1。c 为电线空气动力系数，取值如下：$d<17$ mm，$c=1.2$；$d\geqslant17$ mm，$c=1.1$；覆冰（不论线径大小），$c=1.2$。

8-45：该线路 12#杆塔一侧档距为 150 m，高差为 35 m，另一侧档距为 180 m，高差为 40 m，则 12#杆塔的水平档距应为下列哪组数值？（供配电 2016 年考题）

（A）150 m　　（B）165 m　　（C）169 m　　（D）180 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 183 页。

12#杆塔的水平档距为

$$l_h=\left(\frac{l_1}{\cos[\arctan(h_1/l_1)]}+\frac{l_2}{\cos[\arctan(h_2/l_2)]}\right)/2$$

$$=\left(\frac{150}{\cos[\arctan(35/150)]}+\frac{180}{\cos[\arctan(40/180)]}\right)/2\ \text{m}=169.21\ \text{m}$$

【知识点解析】

当计算杆塔结构所承受的电线风荷载时，其荷载近似认为等于电线单位长度上风压与杆塔两侧档距平均值的乘积，其档距平均值称为水平档距，即

$$l_h=(l_1+l_2)/2$$

在高差较大且又需要准确地计算杆塔的水平荷载时，其水平档距可按下式计算：

$$l_h=\frac{\left(\dfrac{l_1}{\cos\beta_1}+\dfrac{l_2}{\cos\beta_2}\right)}{2}$$

式中，l_h为水平档距（m）；β_1、β_2为杆塔两侧高差角；l_1、l_2为杆塔两侧的档距（m）。

8-46：该线路 15#杆塔一侧档距为 160 m，15#比 14#杆塔高 10 m，垂直比载为 35.46×10^{-3} N/(m·mm^2)，应力为 78.24 N/mm^2；另一侧档距为 190 m，15#比 16#杆塔低 6 m，垂直比载为 35.46×10^{-3} N/(m·mm^2)，应力为 83.85 N/mm^2。15#杆塔的垂直档距应为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）175.00 m　　（B）238.23 m　　（C）243.23 m　　（D）387.57 m

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 183 页或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 932 页表 10.3-31。

15#杆塔的垂直档距为

$$l_v=\left(\frac{l_1}{2}+\frac{\sigma_{10}h_1}{\gamma_v l_1}\right)+\left(\frac{l_2}{2}+\frac{\sigma_{20}h_2}{\gamma_v l_2}\right)$$

$$=\left[\left(\frac{160}{2}+\frac{78.24\times10}{35.46\times10^{-3}\times160}\right)+\left(\frac{190}{2}+\frac{83.85\times(-6)}{35.46\times10^{-3}\times190}\right)\right]\text{m}=238.23\text{ m}$$

【知识点解析】

垂直档距的计算：

当计算杆塔结构所承受的电线垂直荷载时，通常近似地认为是电线单位长度的垂直重量与杆塔两侧电线最低点（O 点）间的水平距离的乘积，此档距系供计算垂直荷载之用，故称为“垂直档距”，常用计算式为

$$l_v=l_{1v}+l_{2v}=\left(\frac{l_1}{2}+\frac{\sigma_{10}h_1}{\gamma_v l_1}\right)+\left(\frac{l_2}{2}+\frac{\sigma_{20}h_2}{\gamma_v l_2}\right)$$

当杆塔为直线杆塔时，$\sigma_{10}=\sigma_{20}=\sigma_0$，则

$$l_v=\frac{l_1+l_2}{2}+\frac{\sigma_0}{\gamma_v}\left(\frac{h_1}{l_1}+\frac{h_2}{l_2}\right)=l_h+\frac{\sigma_0}{\gamma_v}\alpha$$

式中，l_{1v}、l_{2v}分别为某一杆塔两侧的垂直档距（m）；σ_{10}、σ_{20}分别为某一杆塔两侧的电线水平应力（N/mm^2）；α 为杆塔的综合高差系数；l_1、l_2、l_h分别为杆塔两侧的档距和杆塔的水平档距（m）；h_1、h_2分别为杆塔两侧的悬挂点高差（m），当邻塔悬挂点低时取正号，反之取负号；σ_0为耐张段内的电线水平应力（N/mm^2），对于耐张塔，应取两侧可能不同的应力，按对应注角号分开计算垂直档距；γ_v为电线的垂直比载［$N/(m\cdot mm^2)$］。

8-47：该线路某一耐张段内，各档距为 120 m、138 m、150 m、160 m、180 m、140 m，则该耐张段的代表档距为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）140.00 m　　（B）148.00 m　　（C）151.58 m　　（D）155.94 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 182 页或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 932 页表 10.3-31。

该线路耐张段的代表档距为

$$l_r=\sqrt{\frac{\sum l^3}{\sum l}}=\sqrt{\frac{120^3+138^3+150^3+160^3+180^3+140^3}{120+138+150+160+180+140}}\text{ m}=\sqrt{\frac{20403072}{888}}\text{ m}=151.58\text{ m}$$

【知识点解析】

对于耐张段间具有若干直线杆塔的连续档中，各档电线水平应力 σ_0是按同一值架设的。当气象条件变化时，由于各档档距及高差不一定相同，从而使直线杆塔产生张力差，使悬垂绝缘子串产生偏斜。偏斜的结果又使各档的应力趋于基本相同的某一数值上。这个应力称为耐张段内的代表应力，其值是用耐张段内的代表档距代入电线状态方程求出的。

1）常用的代表档距，系不考虑悬挂点有高差的情况得出的，其式为

$$l_r=\sqrt{\frac{l_1^3+l_2^3+l_3^3+\cdots+l_n^3}{l_1+l_2+l_3+\cdots+l_n}}=\sqrt{\frac{\sum l^3}{\sum l}}$$

式中，l_r为代表档距（m）；l_1，l_2，…，l_n为耐张段内各档的档距（m）。

2）考虑高差影响的代表档距是与考虑高差影响的电线状态方程式相配合，其算式为

$$l_r=\sqrt{\frac{l_1^3\cos^2\beta_1+l_2^3\cos^2\beta_2+\cdots+l_n^3\cos^2\beta_n}{\frac{l_1}{\cos\beta_1}+\frac{l_2}{\cos\beta_2}+\cdots+\frac{l_n}{\cos\beta_n}}}=\sqrt{\frac{\sum l^3\cos^2\beta}{\sum\frac{l}{\cos\beta}}}$$

式中，l_1，l_2，…，l_n及β_1，β_2，…，β_n分别为耐张段内各档的档距及高差角。

8-48：若该线路平均运行应力为 71.25 kN，振动风速上限值为 4 m/s，则该线路导线的防振锤的安装距离应为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题改编）

（A）0.093～0.099 m　　（B）3.311～3.495 m

（C）0～0.116 m　　（D）4.21～4.45 m

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 230 页。

该线路导线的防振锤的安装距离为

$$b_1=(2.25\sim2.375)\left(\frac{d}{r_M}\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\right)\times10^{-3}=(2.25\sim2.375)\times\frac{21.66}{4}\sqrt{\frac{71250}{0.9643}}\times10^{-3}\ \text{m}$$

$$=3.311\sim3.495\ \text{m}$$

【知识点解析】

防振锤安装地点应尽量接近波腹，以最大限度地消耗导线振动能量，然而电线振动可能出现的频率及波长并非一个，而是在一定范围内变动。为了使防振对可能出现危险的各种振动都能发挥其消振作用，防振锤的安装位置如能照顾到最大及最小波长的振动，则对中间波长的振动自然更能起作用了。

当代表档距很大时，T_{av}和T_M相差很小，在使用的档距范围内，用平均运行张力T_{av}代替T_M，T_M对b_1影响很小，系数μ一般在 0.05～0.1 之间，此时防振锤安全距离b_1近似简化算法为

$$b_1=(0.9\sim0.95)\left(\frac{\lambda_m}{2}\right)=(2.25\sim2.375)\left(\frac{d}{r_M}\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\right)\times10^{-3}$$

式中，T_{av}为电线平均运行张力（N）；r_M为振动风速上限值。

例题 8-49～8-54：在城网附近一个 35/10 kV 变电所，其架空配电线路设计采用钢筋混凝土电杆、铁横担、钢芯铝绞线、悬式绝缘子组成的绝缘子串，请解答下列关于架空电力线路设计和导线力学计算中的几个问题。

8-49：在架空线力学计算中，下列关于导线比载的表述，哪一项是正确的？（供配电 2009 年考题）

（A）导线上每米长度的荷载折算到单位截面上的数值

（B）导线上每米长度的荷载

（C）导线单位截面上的荷载

（D）长度为代表档距的导线上的荷载折算到单位截面上的数值

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 931 页表 10.3-28 或《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页表 3-2-3。

电线每米长度上的荷载简称为单位荷载 g（N/m），将其折算到电线单位截面上的单位荷载称为比载 g［N/(m·mm^2)］，选 A。

8-50：已知某杆塔相邻两档等高，档距分别为 120 m 和 100 m，电线截面 $A=170\ \text{mm}^2$，出现灾害性天气时的比载 $\gamma_5=100\times10^{-3}$ N/(m·mm^2)。此时一根导线施加在杆塔上的水平荷载最接近哪一项数值？（供配电 2009 年考题）

（A）500 N　　（B）1000 N　　（C）1500 N　　（D）2000 N

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页、第 183 页。

水平档距为

$$l_h=\frac{l_1+l_2}{2}=\frac{120+100}{2}\ \text{m}=110\ \text{m}$$

根据比载定义，一根导线施加在杆塔上水平载荷为

$$F_h=\gamma_5 l_h A=100\times110\times170\times10^{-3}\ \text{N}=1870\ \text{N}，\text{接近 }2000\ \text{N}$$

【知识点解析】

如图 8-7 所示，杆塔的导线或避雷线的水平载荷（风压）为

$$p_x=\gamma_4 S l_s\cos^2\frac{\varphi}{2}$$

式中，p_x为导线或避雷线的风压（N）；γ_4为导线或避雷线的相应风速比载［N/(m·mm^2)］；S 为导线或避雷线的计算截面(mm^2)；l_s为水平档距（m）；φ 为线路转角。

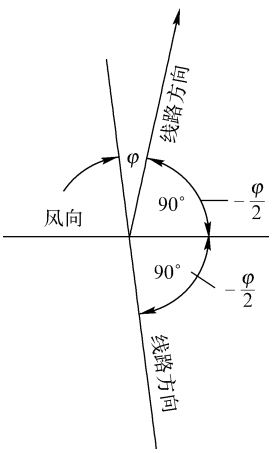


图 8-7　水平荷重示意图

8-51：已知该架空电力线路导线的自重比载、冰重比载、自重+冰重综合比载、无冰时的风压比载、覆冰时的风压比载［N/(m·mm^2)］分别为 $\gamma_1=33\times10^{-3}$，$\gamma_2=74\times10^{-3}$，$\gamma_3=108\times10^{-3}$，$\gamma_4=29\times10^{-3}$，$\gamma_5=65\times10^{-3}$，则导线覆冰综合比载为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）82×10^{-3} N/(m·mm^2)　　（B）99×10^{-3} N/(m·mm^2)

（C）112×10^{-3} N/(m·mm^2)　　（D）126×10^{-3} N/(m·mm^2)

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 931 页表 10.3-28 或《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页表 3-2-3。

覆冰时的综合比载：

$$\gamma_7=\sqrt{\gamma_3^2+\gamma_5^2}=\sqrt{108^2+65^2}\times10^{-3}\ \text{N/(m·mm}^2\text{)}=126\times10^{-3}\ \text{N/(m·mm}^2\text{)}$$

8-52：已知该架空电力线路设计气象条件和导线的物理参数如下：覆冰厚度 $b=20$ mm，

覆冰时的风速 $v=10\,\mathrm{m/s}$；电线直径 $d=17\,\mathrm{mm}$，空气密度 $\rho=1.2255\,\mathrm{kg/m^3}$，空气动力系数 $k=1.2$，风速不均匀系数 $a=1.0$，导线截面积 $A=170\,\mathrm{mm^2}$，理论风压 $W_0=0.5\rho v^2=0.6128v^2$（N/m），则导线覆冰时的风压比载 γ_5 与下列哪项数值最接近？（供配电 2011 年考题）

（A）$3\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$　　（B）$20\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$

（C）$25\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$　　（D）$4200\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 931 页表 10.3-28 或《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页表 3-2-3。

导线覆冰时的风压比载 γ_5：

$$\gamma_5=\frac{akW_0(d+2b)}{A}\times10^{-3}=ak\frac{1}{2A}\rho v^2(d+2b)\times10^{-3}$$

$$=1.0\times1.2\times\frac{1}{2\times170}\times1.2255\times10^2\times(17+2\times20)\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$$

$$=24.7\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$$

8-53：已知某杆塔相邻两档导线等高悬挂，杆塔两侧导线最低点间的距离为 120 m，导线的截面积 $A=170\,\mathrm{mm^2}$，比载为 $100\times10^{-3}\,\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$，此时一根导线施加在横担上的垂直载荷最接近下列哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）5000 N　　（B）4000 N　　（C）3000 N　　（D）2000 N

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 183 页。

根据垂直档距的定义，电线的垂直载荷等于电线单位长度的垂直载荷与杆塔两侧电线最低点间的水平距离之乘积。因 γ_3 无风载荷，故不用考虑风偏角问题可以直接计算：

$$\gamma=\gamma_3 Ad=100\times10^{-3}\times170\times120\,\mathrm{N}=2040\,\mathrm{N}$$

【知识点解析】

导线及避雷线的垂直荷重：

$$Q=\gamma S l_C$$

式中，Q 为导线及避雷线的垂直荷重（N）；γ 为计算条件下的自重比载或自重和冰重综合比载［$\mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$］；S 为导线或避雷线的计算截面（$\mathrm{mm^2}$）；l_C 为垂直档距（m）。

8-54：如果要求这条线路导线的最大使用应力（σ_m）不超过 $80\,\mathrm{N/mm^2}$，该导线瞬时破坏应力的最小值为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）$150\,\mathrm{N/mm^2}$　　（B）$200\,\mathrm{N/mm^2}$　　（C）$250\,\mathrm{N/mm^2}$　　（D）$300\,\mathrm{N/mm^2}$

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 185 页或《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 第 5.2.3 条。

导线或地线的最大使用张力不应大于绞线瞬时破坏张力的 40%，则

$$\sigma_p=\frac{\sigma_m}{F},\quad \sigma_m=F\sigma_p=2.5\times80\,\mathrm{N/mm^2}=200\,\mathrm{N/mm^2}$$

【知识点解析】

电线最大使用应力的选定：

架空线路长期在旷野、山区、厂区或湖海边运行，经受风、冰等负荷作用和气温的剧烈变化，在最恶劣条件下，导线发生的应力也最大（如最大风、冰荷载或最低气温时）。此时导线还应具有一定的安全系数，以电线的破坏强度 σ_p 被安全系数 F 除，即得电线的最大使用应力（指电线弧垂最低点应力），表达式为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_p}{F}$$

式中，σ_m 为最大使用应力（N/mm^2）；σ_p 为电线的破坏强度（N/mm^2）；F 为电线的安全系数，电线的安全系数应不小于 2.5，避雷线的安全系数宜大于导线安全系数。

例题 8-55：一般情况下导线弧垂最低点的应力不应超过破坏力的 40%，当导线弧垂最低点的应力为破坏应力的 40%时，导线悬挂点的最大应力可为下列哪项数值？（以破坏应力为基准）（供配电 2008 年考题）

（A）34%　　（B）38%　　（C）44%　　（D）48%

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 184 页。

悬挂点应力可较弧垂最低点应力高 10%，即不超过破坏应力的 44%，选 C。

【知识点解析】

极大档距：架空线路设计是按导线在弧垂最低点的应力计算的，但实际上导线其他各点都比最低点应力大。在一档中悬挂点应力为最大。弧垂最低点应力不得超过破坏应力的 40%，而悬挂点应力可较弧垂最低点应力高 10%，但不得超过破坏应力的 44%。在线路设计中，一般的档距当弧垂最低点应力为 40%破坏应力时，其悬挂点应力不致超过 44%的破坏力。如果某档档距很大，导线悬挂点应力达到 44%破坏应力时，则称此档距为极大档距。

例题 8-56：已知有两档的档距分别为 500 m 和 180 m，当环境条件为 15℃无风时这两档中央导线和避雷线间的最小距离分别为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）3.10 m，3.10 m　　（B）6.00 m ，3.16 m

（C）6.00 m，6.00 m　　（D）7.00 m，3.16 m

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 第 5.3.1 条。

两档中央导线和避雷线间的最小距离分别为

$$S_{l1} = 0.012l_1 + 1 = (0.012 \times 500 + 1)\ m = 7\ m$$

$$S_{l2} = 0.012l_2 + 1 = (0.012 \times 180 + 1)\ m = 3.16\ m$$

【知识点解析】

有地线的线路应防止雷击档距中央地线反击导线，档距中央导地线间距应符合下列要求：

$U_m \leqslant 252$ kV 的输电线路，15℃无风时档距中央导线与地线间的最小距离为

$$S_1 = 0.012l + 1$$

式中，S_1 为导线与地线间的距离（m）；l 为档距长度（m）。

根据雷击档距中央地线时防止反击的条件，防止反击要求的大跨越档导线与地线间的距离不得小于表 8-21 的要求。

表 8-21　防止反击要求的大跨越档导线与地线间的距离

系统标称电压/kV	35	66	110	220
距离/m	3.0	6.0	7.5	11.0

双地线线路，杆塔处两根地线间的距离不应大于导线与地线间垂直距离的 5 倍。

注：大跨越线路跨越通航江河、湖泊或海峡等，因档距较大（在 1000 m 以上）或杆塔较高（在 100 m 以上），导线选型或杆塔设计需特殊考虑，且发生故障时严重影响航运或修复特别困难的耐张段，应按大跨越工程进行勘测。

例题 8-57：该变电所用 10 kV 架空线向 6 km 处供电，额定功率为 1800 kW，功率因数为 0.85，采用 LJ 型裸铝绞线，路径经过居民区设计，按机械强度选择的导体最小允许截面积应为下列哪项数值？请列出解答过程。（供配电 2006 年考题）

（A）25 mm^2　　（B）35 mm^2　　（C）50 mm^2　　（D）70 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 924 页（第三版第 580 页）。

题目已知 10 kV 的 LJ 型裸铝绞线输电线路经过居民区，查《配四》表 10.3-18 中导体最小允许截面积为 35 mm^2，选 B。

【知识点解析】

1）架空线路导线截面积的最小截面要求见表 8-22。

表 8-22　导线最小截面　　（单位：mm^2）

导线种类	35 kV 线路	3~10 kV 线路		3 kV 以下线路
		居民区	非居民区	
铝绞线及铝合金线	35	35	25	16
钢芯铝绞线	35	25	16	16
铜线		16	16	10（线直径 3.2 mm）

注：1. 居民区指居住小区、厂矿地区、港口、码头、火车站、城镇及乡村等人口密集地区。
2. 非居民区指居民区以外的其他地区。此外，虽有车辆、行人或农业机械到达，但未建房屋或房屋较少地区，亦属非居民区。

2）3~10 kV 高压接户线的截面，不应小于下列数值：铝绞线为 35 mm^2；铜绞线为 25 mm^2。

3）1 kV 及以下低压接户线应采用绝缘导线，导线截面应根据允许载流量选择，但不应小于下列数值：铝绞线为 16 mm^2；铜绞线为 10 mm^2。

例题 8-58：某 110 kV 送电线路，导线采用双地线的单回路架空送电线路，相导线按水平排列，地线之间的水平距离为 25 m。导线与地线垂直距离不应小于下列哪一项？（发输电 2008 年考题改编）

（A）4 m　　（B）5 m　　（C）6 m　　（D）7 m

答案：【B】

解答过程：依据《110~750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 第 7.0.15 条或《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 第 5.3.1-5 条。

题目已知两根地线回水平距离为 25 m，设导线与地线垂直距离为 l，则有 $25m \leqslant 5l$；$l =$

25/5 m=5 m。选 B。

例题 8-59：某单回路 66 kV 架空送电线路，采用钢芯铝绞线，设计直线塔的水平档距为 200 m，导线的直径为 26.82 mm，截面积为 425.24 mm^2，单位长度质量为 1.349 kg/m，最大覆冰厚度 2δ 为 10 mm，大风（30 m/s）时，电线的基本风压为 2.4 kN/m^2，风向与线路方向夹角为 60°时导线上垂直线路方向的风荷载为下列何值？

（A）20.16 kN　　（B）15.96 kN

（C）11.92 kN　　（D）6.04 kN

答案：【C】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 940 页。

风速 30 m/s 时查表 8-23 中风荷载档距系数取 $a=0.75$；导线或地线覆冰后的计算外径之和 $d=(26.82+10)\ \text{mm}=36.82\ \text{mm}$；覆冰时风荷体型系数 μ_s 为 1.2；导线上风荷载标准值为

$$W_X=\alpha\mu_S dL_W W_O=0.75\times1.2\times\frac{36.82}{1000}\times200\times2.4\ \text{kN}=15.96\ \text{kN}$$

查表 8-24 中，当风向与线路方向夹角为 60°大风时导线上垂直线路方向的风荷载为 $0.75W_X=11.93$ kN，选 C。

【知识点解析】

风向与线路垂直情况的导线或地线风荷载的标准值，应按下式计算：

$$W_X=\alpha\mu_S dL_W W_O$$

式中，W_X 为导线或地线风荷载的标准值（kN）；α 为风荷载档距系数，应采用表 8-23 所列数值；d 为导线或地线覆冰后的计算外径之和（m），对分裂导线，不应考虑线间的屏蔽影响；μ_S 为风荷载体型系数，当 $d<17$ mm，取 1.2；当 $d\geqslant17$ mm，取 1.1；覆冰时，取 1.2；L_W 为风力档距（m）；W_O 为基本风压，按 GB 50009—2012 的有关规定采用（kN/m^2）。

表 8-23　风荷载档距系数

设计风速/(m/s)	20 以下	20~29	30~34	35 及以上
α	1.0	0.85	0.75	0.7

表 8-24　风荷载垂直线路方向分量和顺线路方向分量

风向与线路方向间夹角/(°)	塔身风荷载		横担风荷载		导线或地线风荷载	
	X	Y	X	Y	X	Y
0	0	W_{Sb}	0	W_{Sc}	0	$0.25W_X$
45	$0.424(W_{Sa}+W_S)$	$0.424(W_{Sa}+W_S)$	$0.4W_{Sc}$	$0.7W_{Sc}$	$0.5W_X$	$0.15W_X$
60	$0.747W_{Sa}+0.249W_{Sb}$	$0.431W_{Sa}+0.144W_{Sb}$	$0.4W_{Sc}$	$0.7W_{Sc}$	$0.75W_X$	0
90	W_{Sa}	0	$0.4W_{Sc}$	0	W_X	0

注：1. X 为风荷载垂直线路方向的分量，Y 为风荷载顺线路方向的分量。

2. W_{Sa} 为垂直线路风向的塔身风荷载。

3. W_{Sb} 为顺线路风向的塔身风荷载。

4. W_{Sc} 为顺线路风向的横担风荷载。

例题 8-60：某单回路 66 kV 架空送电线路，采用钢芯铝绞线，开阔地区档距为 200 m，导线最大使用张力为 5409.6 N，则直线塔在不均匀覆冰情况下导线平均运行张力上限为下列哪项数值？

（A）15793 N　　（B）110554 N　　（C）3948.4 N　　（D）2163.8 N

答案：【D】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 930 页。

第 5.2.3 条　导线最大使用张力不应大于导线瞬时破坏张力的 40%，导线瞬时破坏张力为 5409.6/0.4 N = 13524 N。

题目已知 66 kV 架空送电线路采用钢芯铝绞线，开阔地区档距<500 m，查表 8-25，导线平均运行张力上限是导线瞬时破坏张力的 16%，导线平均运行张力上限为 0.16×13524 N = 2163.8 N。

【知识点解析】

导线或地线的最大使用张力不应大于导线瞬时破坏张力的 40%。

导线或地线的平均运行张力上限及防振措施应符合表 8-25 的要求。

表 8-25　导线或地线平均运行张力上限及防振措施

档距和环境状况	平均运行张力上限（瞬时破坏张力的百分数）（%）		防振措施
	钢芯铝导线	镀锌钢导线	
开阔地区档距<500 m	16	12	不需要
非开阔地区挡距<500 m	18	18	不需要
档距<120 m	18	18	不需要
不论档距大小	22	—	护线条
不论档距大小	25	25	防振锤（线）或另加护线条

例题 8-61：某单回路 66 kV 架空送电线路，有一档的档距为 $l = 200$ m，悬点高差为 $h = 30$ m，最高气温时导线最低点应力 $\sigma_0 = 20\ \mathrm{N/mm^2}$，垂直比载为 $g = 25\times10^{-3}\ \mathrm{N/(m\cdot mm^2)}$，用斜抛物线公式计算最大弧垂为下列哪项数值。

（A）6.05 m　　（B）6.32 m　　（C）6.95 m　　（D）7.23 m

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 932 页表 10.3-31。

$$\text{高差角}\ \beta = \arctan\frac{h}{l} = \arctan\frac{30}{200} = 8.53$$

$$\text{最大弧垂}\ f_m = \frac{g\,l^2}{8\,\sigma_0\cos\beta} = \frac{25\times10^{-3}\times200^2}{8\times20\times\cos8.53}\ \mathrm{m} = 6.32\ \mathrm{m}$$

【知识点解析】

电线应力弧垂公式见表 8-26。

表 8-26　电线应力弧垂公式一览表

参数 \ 公式类别		悬链线公式	斜抛物线公式	平抛物线公式
电线弧垂	最大弧垂	$f_m=\frac{\sigma_0}{\gamma}\left[\mathrm{ch}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}+\mathrm{arsh}\frac{\gamma h}{2\sigma_0\mathrm{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}-\sqrt{1+\left(\frac{h}{l}\right)^2}-\frac{\gamma h}{2\sigma_0}-\frac{h}{l}\left(\mathrm{arsh}\cdot\frac{\gamma h}{2\sigma_0\mathrm{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}-\mathrm{arsh}\frac{h}{l}\right)\right]$	$f_m=\frac{\gamma l^2}{8\sigma_0\cos\beta}$（档距中央）	$f_m=\frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}$（档距中央）

例题 8-62：某单回路 66 kV 架空送电线路，设计覆冰厚度为 10 mm。某直线塔的最大设计档距为 200 m，使用的悬垂绝缘子串长度为 2 m，地线串长度为 0.5 m。若导线最大弧垂为 20 m，相导线按水平排列，则相导线最小水平线间距离为下列哪项值？

（A）4.3 m　　（B）9.27 m　　（C）11.2 m　　（D）3.2 m

答案：【A】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 936 页。

悬垂绝缘子串长度为 2 m，导线最大弧垂为 20 m，相导线最小水平线间距离为

$$D=0.4L_K+\frac{U}{110}+0.65\sqrt{f}=\left(0.4\times2+\frac{66}{110}+0.65\sqrt{20}\right)\mathrm{m}=4.3\mathrm{m}$$

【知识点解析】

架空电力线路导线的线间距离应结合运行经验，35 kV 和 66 kV 线路导线的线间距离应按下列各式计算：

$$D\geqslant0.4L_k+\frac{U}{110}+0.65\sqrt{f}$$

$$D_X\geqslant\sqrt{D_p^2+\left(\frac{4}{3}D_z\right)^2}$$

$$h\geqslant0.75D$$

式中，D 为导线水平线间距离（m）；D_X 为导线三角排列的等效水平线间距离（m）；D_p 为导线间水平投影距离（m）；D_z 为导线间垂直投影距离（m）；L_k 为悬垂绝缘子串长度（m）；U 为线路电压（kV）；f 为导线最大弧垂（m）；h 为导线垂直排列的垂直线间距离（m）。

例题 8-63：某单回路 66 kV 架空送电线路，当遭遇大风时的对应的垂直比载和水平比载［N/(m·mm²)］分别为 $\gamma_1=30\times10^{-3}$，$\gamma_4=20\times10^{-3}$，则大风时的导线风偏角为下列哪一项？（发输电 2008 年考题改编）

（A）33.7°　　（B）56.3°　　（C）41.8°　　（D）25.8°

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 106 页。

导线风偏角为

$$\eta=\arctan\frac{\gamma_4}{\gamma_1}=\arctan\left(\frac{20\times10^{-3}}{30\times10^{-3}}\right)=33.69°$$

例题 8-64~8-68：某企业 35 kV 电源线路，选用 JL/GIA-300 mm^{2}导线，导线计算总截面为 338.99 mm^2，导线直径为 23.94 mm。请回答以下问题。

8-64：若该线路杆塔导线水平排列，线间距离为 4 m，计算相导线间的几何均距最接近下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）2.05 m　　（B）4.08 m　　（C）5.04 m　　（D）11.3 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 16 页。

相导线间的几何均距：$d_m=\sqrt[3]{d_{ac}d_{bc}d_{ac}}=\sqrt[3]{4\times4\times8}$ m=5.04 m。

8-65：该线路的正序电抗为 0.399 Ω/km，电纳为 2.85×10^{-6}1/(Ω/km)，计算该线路的自然功率最接近下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）3.06 MW　　（B）3.3 MW　　（C）32.3 MW　　（D）374.2 MW

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 24 页。

波阻抗：$Z_n=\sqrt{X_1/b_1}=\sqrt{0.399/(2.85\times10^{-6})}\ \Omega=374.16\ \Omega$

线路自然功率：$P_n=\frac{U^2}{Z_n}=\frac{35^2}{374.16}$ MW=3.275 MW。

8-66：已知线路某档距为 300 m，高差为 70 m，最高气温时导线最低点应力为 50 N/mm^2，垂直比载为 27×10^{-3} N/(m·mm^2)，用斜抛物线公式计算在最高气温时，档内线长最接近下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）300 m　　（B）308.4 m　　（C）318.4 m　　（D）330.2 m

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页。

表 3-3-1 中，档内线长：$\cos\beta=\frac{l}{\sqrt{h^2+l^2}}=\frac{300}{\sqrt{70^2+300^2}}=0.974$

$$L=\frac{l}{\cos\beta}+\frac{\gamma^2l^3\cos\beta}{24\sigma^2}=\left(\frac{300}{0.974}+\frac{(27\times10^{-3})^2\times300^3\times0.974}{24\times50^2}\right)\text{m}=308.33\text{ m}。$$

8-67：该线路某档水平档距为 250 m，导线悬挂点高差为 70 m，导线最大敷冰时的比载为 57×10^{-3} N/(m·mm^2)，应力为 55 N/mm^2，按最大敷冰时气象条件校验，高塔处导线悬点处的应力最接近下列哪项数值？（按平抛物线公式计算）（供配电 2017 年考题）

（A）55.5 N/mm^2　　（B）59.6 N/mm^2

（C）65.5 N/mm^2　　（D）70.6 N/mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页。

表 3-3-1 中，高塔处导线悬挂点处的应力：$\tan\beta=\frac{h}{l}=\frac{70}{250}=0.28$

$$l_{OB}=\frac{l}{2}+\frac{\sigma_0}{\gamma}\tan\beta=\left(\frac{250}{2}+\frac{55}{57\times10^{-3}}\times0.28\right)\text{ m}=395.2\text{ m}$$

$$\sigma_B=\sigma_0+\frac{\gamma^2l_{OB}^2}{2\sigma_0}=\left[55+\frac{(57\times10^{-3})^2\times395.2^2}{2\times55}\right]\text{ m}=59.6\text{ m}。$$

8-68：假设该线路悬垂绝缘子长度为 0.8 m，导线最大弧垂为 2.4 m，导线垂直排列，则该线路导线垂直线间距离最小应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）1.24 m　　（B）1.46 m　　（C）1.65 m　　（D）1.74 m

答案：【A】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061-2010 或《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 115 页。

悬垂绝缘子串长度为 0.8 m，导线最大弧垂为 2.4 m，垂直线间距离为

$$D=0.4L_K+\frac{U}{110}+0.65\sqrt{f}=\left(0.4\times0.8+\frac{35}{110}+0.65\sqrt{2.4}\right)\text{ m}=1.65\text{ m}$$

$$h\geqslant0.75D=0.75\times1.65\text{ m}=1.234\text{ m}$$

本题没有说明是重冰区，其他条件不予考虑，选 A。

例题 8-69~8-72：某单回路 500 kV 架空送电线路，位于海拔 500 m 以下的平原地区，大地电阻率平均为 200 Ω·m，线路全长 155 km，三相导线 a、b、c 为倒正三角排列，线间距离为 7 m，导线采用六分裂 LGJ-500/35 钢芯铝绞线，各子导线按正六边形布置，子导线直径为 30 mm，分裂间距为 400 mm，子导线的铝截面为 497.01 mm^2，综合截面为 531.37 mm^2，线路的最高电压为 550 kV。全线采用双 OPGW-120。

8-69：计算该线路相导线的有效半径 R_e应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）0.312 m　　（B）0.400 m　　（C）0.336 m　　（D）0.301 m

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 16 页。

六分裂线路相导线的有效半径 R_e为

$$r_e=0.81r=0.81\times30/2\text{ mm}=12.15\text{ mm}$$

$$R_e=1.349(r_eS^5)^{1/6}=1.349\times(12.15\times400^5)^{1/6}\text{ mm}=301.41\text{ mm}$$

8-70：设相分裂导线半径为 0.4 m，有效半径为 0.3 m，子导线交流电阻 $R=0.06\,\Omega/\text{km}$，计算该线路“导线-地”回路的自阻抗 Z_m应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）（0.11+j0.217）Ω/km　　（B）（0.06 +j0.652）Ω/km

（C）（0.06+j0.528）Ω/km　　（D）（0.06+j0.511）Ω/km

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 153 页。

“导线-地”回路自阻抗 Z_m为

$$D_0=660\sqrt{\frac{\rho}{f}}=660\sqrt{\frac{200}{50}}\text{ m}=1320\text{ m}$$

$$Z_m=\left(R+0.05+\text{j}0.145\lg\frac{D_0}{R_e}\right)=\left(\frac{0.06}{6}+0.05+\text{j}0.145\lg\frac{1320}{0.3}\right)\Omega/\text{km}=(0.06+\text{j}0.528)\,\Omega/\text{km}$$

8-71：设相分裂导线半径为 0.4 m，有效半径为 0.3 m，计算本线路的正序电抗 X_1 应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）0.198 Ω/km　　（B）0.213 Ω/km

（C）0.180 Ω/km　　（D）0.356 Ω/km

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 16 页。

线路的正序电抗 X_1 为

$$d_m=\sqrt[3]{d_{ac}d_{bc}d_{ac}}=\sqrt[3]{7\times7\times7}\ \text{m}=7\ \text{m}$$

$$X_1=0.0029f\lg\frac{d_w}{R_e}=0.0029\times50\times\lg\frac{7}{0.3}\ \Omega/\text{km}=0.198\ \Omega/\text{km}$$

8-72：设相分裂导线半径为 0.35 m，有效半径为 0.3 m，计算本线路的正序电纳 B_1 应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）5.826×10^{-6} S/km　　（B）5.409×10^{-6} S/km

（C）5.541×10^{-6} S/km　　（D）5.034×10^{-6} S/km

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版）第 16 页。

线路的正序电纳 B_1 为

$$d_m=\sqrt[3]{d_{ac}d_{bc}d_{ac}}=\sqrt[3]{7\times7\times7}\ \text{m}=7\ \text{m}$$

$$B_1=\frac{7.58\times10^{-6}}{\lg\frac{d_w}{R_e}}=\frac{7.58\times10^{-6}}{\lg\frac{7}{0.35}}\ \text{S/km}=5.826\times10^{-6}\ \text{S/km}$$

例题 8-73～8-75：某 500 kV 架空送电线路，相导线采用 4×400/5 钢芯铝绞线，设计安全系数取 2.5，平均运行工况安全系数大于 4，相导线均采用阻尼间隔棒且不等距、不对称布置。导线单位重量为 1.348 kg/m，直径为 26.8 mm，假定线路引起振动风速上下限值为 5 m/s、0.5 m/s，一相导线的最高和最低温度张力各为 82650 N 和 112480 N。

8-73：计算导线的最小振动波长为下列哪项数值？（发输电 2017 年考题）

（A）1.66 m　　（B）2.57 m　　（C）3.32 m　　（D）4.45 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 230 页。

最小振动半波长为

$$\frac{\lambda_m}{2}=\frac{d}{400v_M}\sqrt{\frac{T_m}{m}}=\frac{26.8}{400\times5}\sqrt{\frac{82650/4}{1.348}}\ \text{m}=1.659\ \text{m}$$

波长为 $\lambda_m=3.32$ m

8-74：计算第一只防振锤的安装位置距线夹出口的距离应为下列哪项数值？（发输电 2017 年考题）

（A）0.77 m　　（B）1.53 m　　（C）1.75 m　　（D）2.01 m

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 230 页。

最小、最大振动半波长为

$$\frac{\lambda_m}{2}=\frac{d}{400v_M}\sqrt{\frac{T_m}{m}}=\frac{26.8}{400\times5}\sqrt{\frac{82650/4}{1.348}}\ \text{m}=1.659\ \text{m}$$

$$\frac{\lambda_M}{2}=\frac{d}{400v_m}\sqrt{\frac{T_M}{m}}=\frac{26.8}{400\times5}\sqrt{\frac{112480/4}{1.348}}\ \text{m}=19.35\ \text{m}$$

第一只防振锤的安装位置距线夹出口的距离：

$$b_1=\left(\frac{\lambda_m}{2}\times\frac{\lambda_M}{2}\right)\Big/\left(\frac{\lambda_m}{2}+\frac{\lambda_M}{2}\right)=\left(\frac{1.659}{2}\times\frac{19.35}{2}\right)\Big/\left(\frac{1.659}{2}+\frac{19.35}{2}\right)=1.53\ \text{m}$$

8-75：若电线振动的半波长为 5 m，单峰最大振幅为 15 mm，计算此时的最大振动角为下列哪项数值？（发输电 2017 年考题）

（A）22°　（B）24°　（C）32°　（D）65°

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 220 页。

此时的最大振动角：$a_M=60\arctan\left(\frac{2\pi A}{\lambda}\right)=60\arctan\left(\frac{2\pi\times15}{2\times5000}\right)=32°$

例题 8-76～8-78：某单回 220 kV 架空送电线路，导线直径为 27.63 mm，截面为 451.55 mm^2，单位长度质量为 1.511 kg/m，本线路在某档需跨越高速公路，高速公路在档距中卡（假设高速公路路面、铁塔处高程相同），该档档距为 450 m，导线 40℃时最低点张力为 24.32 kN，导线 70℃时最低点张力为 23.1 kN，两塔均为直线塔，悬垂串长度为 3.4 m，$g=9.8\ \text{N/kg}$。

8-76：假设跨越高速公路时，两侧跨越直线塔呼称高度相同，则两侧直线塔的呼高应至少为下列哪项数值？（用平抛物线公式）（发输电 2008 年考题）

（A）27.6 m　（B）26.8 m　（C）24.2 m　（D）28.6 m

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页、第 602 页。

表 3-2-3 中，导线 70℃最大弧垂：$f_m=\frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}=\frac{1.511\times9.8/451.55\times450^2}{8\times23100/451.55}\ \text{m}=16.23\ \text{m}$。

依据《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 表 13.0.11 中，220 kV 送电线路跨越高速公路最小垂直距离为 8 m。

呼称高度：$H=s+\lambda+h_1+h_2=(16.2+8+3.4+0)\ \text{m}=27.6\ \text{m}$。

8-77：在跨越档中距铁塔 150 m 处，40℃时导线弧垂应为下列哪项数值？（用平抛物线公式）（发输电 2008 年考题）

（A）14.43 m　（B）12.51 m　（C）13.71 m　（D）14.03 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页。

表 3-3-1 中，导线 40℃最大弧垂：$f_m=\frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}=\frac{1.511\times9.8/451.55\times450^2}{8\times24320/451.55}\ \text{m}=15.41\ \text{m}$。

距铁塔 150 m 处导线弧垂：$f_x=\frac{4x'}{l}\left(1-\frac{x'}{l}\right)f_m=\frac{4\times150}{450}\times\left(1-\frac{150}{450}\right)\times15.41\ \text{m}=13.70\ \text{m}$。

8-78：若塔水平档距为 425 m，垂直档距为 500 m，若导线大风时的垂直比载为 33×10^{-3} N/(m·mm^2)，水平比载为 28×10^{-3} N/(m·mm^2)，则该塔悬垂串的摇摆角（即风偏角）应为下列哪项数值？（不考虑绝缘子影响）（发输电 2008 年考题）

（A）35.8°　（B）44.9°　（C）54.2°　（D）25.8°

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 103 页。

塔悬垂串风偏角：$\varphi=\arctan\left(\frac{P_1/2+PL_h}{G_1/2+W_1L_V}\right)=\arctan\left(\frac{28\times10^{-3}\times425\times451.55}{1.511\times9.8\times500}\right)=35.9°$。

这里不考虑绝缘子影响即 $P_1=0$，$G_1=0$。

例题 8-79~8-82：架空线档距为 1000 m，悬点高差 $h=150$ m，最高气温时导线最低点应力为 50 N/mm^2，垂直比载 $\gamma=2.5\times10^{-3}$ N/(m·mm^2)。

8-79：用悬链线公式计算在最高气温时档内线长为下列哪项数值？（发输电 2009 年考题）

（A）1021.67 m　（B）1021.52 m　（C）1000 m　（D）1011.55 m

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页。

表 3-3-1 中，最高气温时档内线长：

$$L=\sqrt{\frac{4\sigma_0^2}{\gamma^2}\text{sh}^2\frac{\gamma l}{2\sigma_0}+h^2}=\sqrt{\frac{4\times50^2}{(2.5\times10^{-2})^2}\text{sh}^2\frac{2.5\times10^{-2}\times1000}{2\times50}+150^2}\ \text{m}=1021.52\ \text{m}$$

8-80：用斜抛物线计算距一端 350 m 的弧垂为下列哪项数值？（发输电 2009 年考题）

（A）56.9 m　（B）58.7 m　（C）57.5 m　（D）55.6 m

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 179 页。

表 3-3-1 中，最大弧垂：

$$\cos\beta=\cos\left(\arctan\frac{h}{l}\right)=\cos\left(\arctan\frac{150}{1000}\right)=0.9889$$

$$f_m=\frac{\gamma l^2}{8\sigma_0\cos\beta}=\frac{2.5\times10^{-2}\times1000^2}{8\times50\times0.9889}\ \text{m}=63.2\ \text{m}$$

距一端 350 m 的弧垂为

$$f'_x=\frac{4x'}{l}\left(1-\frac{x'}{l}\right)f_m=\frac{4\times350}{1000}\times\left(1-\frac{350}{1000}\right)\times63.2\ \text{m}=57.512\ \text{m}$$

8-81：用平抛物线计算 $I=1000$ m 档内高塔侧，导线最高温悬垂角为下列哪项数值？（发输电 2009 年考题）

（A）8.53°　（B）14°　（C）5.7°　（D）21.8°

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》（第二版）第 179 页。

表 3-3-1 中，档内高塔侧导线最高温悬垂角为

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{\gamma l}{2\sigma_0}+\frac{h}{l}\right) = \arctan\left(\frac{2.5\times10^{-2}\times1000}{2\times50}+\frac{150}{1000}\right) = 14.03°$$

8-82：若基本风速折算到导线平均高度处的风速为 28 m/s，内部过电压下风速应取下列哪项数值？

（A）10 m/s　　（B）14 m/s　　（C）15 m/s　　（D）28 m/s

答案：【C】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061-2010。

第 4.0.7 条，内部过电压下的风速宜取基本风速折算到导线平均高度处的风速的 50%，但不宜低于 15 m/s。操作过电压下风速为 28×50% m/s = 14 m/s，取 15 m/s。

第 9 章　继电保护与二次系统

【知识点导图】

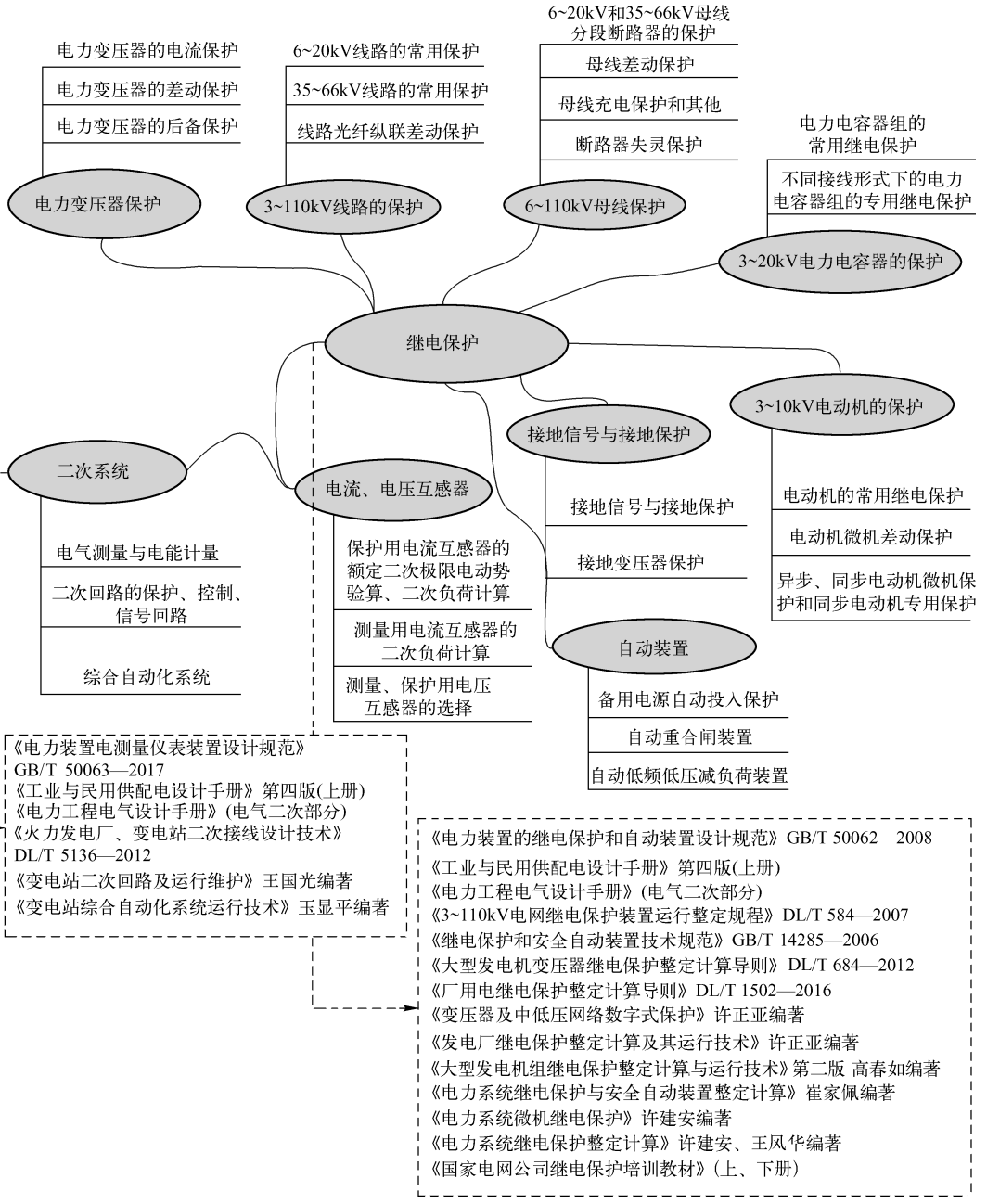


图 9-1　继电保护与二次系统知识点导图

图 9-1 所示的继电保护与二次系统知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 7 章对继电保护和自动装置的内容大幅更新，从原来的电磁式继电保护为主更新为目前最常用的微机继电保护整定计算为主，删除了原来的变压器、电动机、线路电磁式差动的小节，丰富了变压器、电动机微机比率差动保护的内容，增加了线路光纤差动、母线差动和失灵保护，以及变压器、线路、电动机、并联电容器、母线分段断路器的 110 kV 及其以下相应电压等级微机继电保护的整定计算，使该章节的考试内容变得更为丰富完整。针对《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 7 章的更新，本章增加了变压器比率差动保护、接地变压器保护等考点例题解析。

9.1 电力变压器的保护

【知识点说明】

1）电力变压器的电流保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.2 节。要求熟练掌握过电流保护、电流速断保护、低压侧单相接地保护、过负荷保护、低电压闭锁的带时限过电流保护等整定计算。其中返回系数（《工业与民用供配电设计手册》第四版中为 0.9、第三版中为 0.85）等相关系数有所改变，请读者解答时注意。

2）电力变压器的差动保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.2 节。要求熟练掌握比率制动差动保护等整定计算。

3）电力变压器的后备保护整定计算属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.2 节。要求掌握复合电压启动过电流保护、零序过电流保护、零序电压保护等整定计算，了解非电量保护的整定。

4）《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.2 节主要是变压器保护设置和整定计算，相关原理比较欠缺，建议按照参考书目中学习继电保护原理。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》DL/T 684—2012

《变压器及中低压网络数字式保护》许正亚编著

《发电厂继电保护整定计算及其运行技术》许正亚编著

《大型发电机组继电保护整定计算与运行技术》第二版高春如编著

《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》崔家佩编著

《电力系统微机继电保护》许建安编著

《电力系统继电保护整定计算》许建安、王风华编著

《国家电网公司继电保护培训教材》（上、下册）

例题 9-1~9-6：一座 35 kV 变电所，有两回 35 kV 进线，装有两台 35/10 kV，5000 kV·A 主变压器，35 kV 母线和 10 kV 母线均采用单母线分段接线方式，有关参数如图 9-2 所示，请回答下列问题，并列出解答过程。

9-1：若该变电所两台 35/10 kV 主变压器采用并联运行方式，当过电流保护时限大于

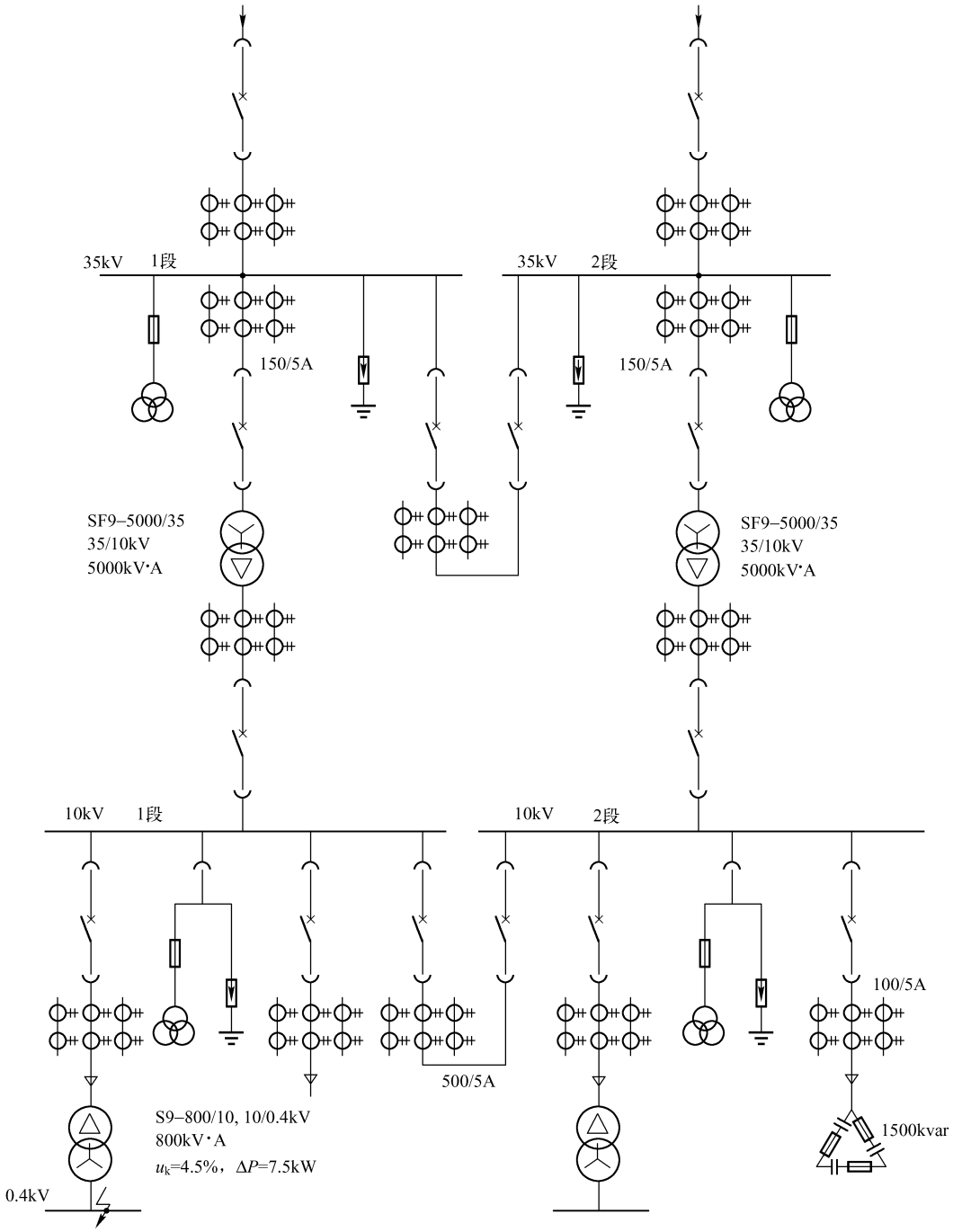


图 9–2　变电所接线方式及相关参数

0.5 s，电流速断保护能满足灵敏性要求时，在正常情况下主变压器的继电保护配置中下列哪一项可不装设？并说明其理由。（供配电 2012 年考题）

（A）带时限的过电流保护　　（B）电流速断保护

（C）纵联差动保护　　（D）过负荷保护

答案：【C】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008 第4.0.1条和第4.0.3条。

第4.0.1条　应设置带时限的过电流保护、过负荷保护。

第4.0.3条　电压为10kV的重要变压器或容量为2MV·A及以上的变压器，当变压器速断保护灵敏度不符合要求时，宜采用纵联差动保护。本题中变压器速断保护能满足灵敏性要求，故纵联差动保护可不设置。

【知识点解析】

1）电压为3~110kV，容量为63MV·A及以下的电力变压器，对下列故障及异常运行方式，应装设相应的保护装置：

① 绕组及其引出线的相间短路和在中性点直接接地或经小电阻接地侧的单相接地短路。

② 绕组的匝间短路。

③ 外部相间短路引起的过电流。

④ 中性点直接接地或经小电阻接地的电力网中外部接地短路引起的过电流及中性点过电压。

⑤ 过负荷。

⑥ 油面降低。

⑦ 变压器油温过高、绕组温度过高、油箱压力过高、产生瓦斯或冷却系统故障。

2）对变压器引出线、套管及内部的短路故障，应装设下列保护作为主保护，且应瞬时动作于断开变压器的各侧断路器，并应符合下列规定：

① 电压为10kV及以下、容量为10MV·A以下单独运行的变压器，应采用电流速断保护。

② 电压为10kV以上、容量为10MV·A及以上单独运行的变压器，以及容量为6.3MV·A及以上并列运行的变压器，应采用纵联差动保护。

③ 容量为10MV·A以下单独运行的重要变压器，可装设纵联差动保护。

④ 电压为10kV的重要变压器或容量为2MV·A及以上的变压器，当电流速断保护灵敏度不符合要求时，宜采用纵联差动保护。

⑤ 容量为0.4MV·A及以上、一次电压为10kV及以下，且绕组为D-Y联结的变压器，可采用两相三继电器式的电流速断保护。

9-2：假定该变电所在最大运行方式下35/10kV主变压器低压侧三相短路时流过高压侧的超瞬态短路电流为1.3kA，在最小运行方式下35/10kV主变压器低压侧三相短路时流过高压侧的超瞬态电流为1.1kA。变压器高压侧电流互感器Y接线，继电保护装置采用DL型电流继电器、时间继电器组成，可靠系数为1.2，接线系数为1，过负荷系数取1.3，继电器返回系数为0.9，主变压器过电流保护装置的一次动作电流和灵敏系数为下列哪一项？（假设系统电源容量为无穷大，稳态短路电流等于超瞬态短路电流。）（供配电2012年考题改编）

（A）106.8A，8.92　　（B）106.8A，12.17

（C）143A，2.3　　（D）128.1A，8.59

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 521 页（第三版第 297 页）。

题目已知电流互感器变比为 150/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，过负荷系数取 1.3，继电器返回系数为 0.9。主变压器过电流保护装置的动作电流为

$$I_{\mathrm{op,k}}=K_{\mathrm{rel}}K_{\mathrm{con}}\frac{K_{\mathrm{ol}}I_{\mathrm{1rT}}}{K_{\mathrm{r}}n_{\mathrm{TA}}}=1.2\times1\times\frac{1.3\times\dfrac{5000}{\sqrt{3}\times35}}{0.9\times\dfrac{150}{5}}\mathrm{A}=4.77\ \mathrm{A}$$

$$I_{\mathrm{op}}=\frac{I_{\mathrm{op,k}}n_{\mathrm{TA}}}{K_{\mathrm{con}}}=4.77\times\frac{150}{5}\mathrm{A}=143\ \mathrm{A}$$

变压器接线方式为 Yd11，高压侧电流互感器 Y 接线，最小运行方式下主变压器低压侧两相短路时流过高压侧的超瞬态电流为

$$I_{\mathrm{2k2min}}=\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{0.866I_{\mathrm{k3min}}}{n_{\mathrm{T}}}=\frac{1100}{35/10.5}\mathrm{A}=330\ \mathrm{A}$$

灵敏系数：

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{I_{\mathrm{2k2min}}}{I_{\mathrm{op}}}=\frac{330}{143}=2.3>1.3$$

9-3：假定该变电所在最大运行方式下 10/0.4 kV 变压器低压侧母线三相短路超瞬态电流为 16.33 kA，在最小运行方式下 10/0.4 kV 主变压器 10 kV 侧母线短路容量为 100MV · A。变压器继电保护装置高压侧电流互感器 Y 接线，变比为 50/5，DL 型电流继电器，可靠系数为 1.3，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.9，变压器速断保护装置整定电流和灵敏系数各为多少？（供配电 2007 年考题改编）

（A）85 A，5.6　　（B）72 A，1.9　　（C）89 A，2.2　　（D）77 A，1.5

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 521 页（第三版第 297 页）。

题目已知电流互感器变比为 50/5，可靠系数为 1.3，接线系数为 1。主变压器速断保护装置的动作电流为

$$I_{\mathrm{op,k}}=K_{\mathrm{rel}}K_{\mathrm{con}}\frac{I''_{\mathrm{2k\cdot max}}}{n_{\mathrm{TA}}}=1.3\times1\times\frac{\dfrac{16330}{10/0.4}}{\dfrac{50}{5}}\mathrm{A}=85\ \mathrm{A}$$

$$I_{\mathrm{op}}=\frac{I_{\mathrm{op,k}}n_{\mathrm{TA}}}{K_{\mathrm{con}}}=85\times\frac{50}{5}\mathrm{A}=850\ \mathrm{A}$$

变压器接线方式为 Yd11，高压侧电流互感器 Y 接线，最小运行方式下主变压器低压侧两相短路时流过高压侧的超瞬态电流为

$$I_{\mathrm{1k2,min}}=0.866I_{\mathrm{1k,3min}}=0.866\times\frac{100}{\sqrt{3}\times10.5}\mathrm{kA}=4.76\ \mathrm{kA}$$

灵敏系数：

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{I_{\mathrm{1k2min}}}{I_{\mathrm{op}}}=\frac{4760}{850}=5.6>1.5$$

9-4：该变电所在 10/0.4 kV 变压器 800 kV·A，Dyn11 接线，中性点直接接地，u_k=4.5%。10 kV 侧母线安装备用电源自投入装置，0.4 kV 侧需要自起动电动机的总容量为250 kV·A，则用于过电流保护装置的过负荷系数为下列何值？（发输电 2012 年考题改编）

（A）1.3　　（B）1.4　　（C）1.5　　（D）1.6

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 522 页（第三版第 299 页）。

题目已知 u_k=4.5%，变压器容量为 800 kV·A，需要自起动电动机的总容量为 250 kV·A。过负荷系数为

$$K_{ol}=\frac{1}{u_k+\dfrac{S_{rT}}{K_{st}S_{M\Sigma}}\times\left(\dfrac{380}{400}\right)^2}=\frac{1}{0.045+\dfrac{800}{5\times250}\times\left(\dfrac{380}{400}\right)^2}=1.6$$

9-5：该变电所在 10/0.4 kV 变压器 800 kV·A，Dyn11 接线，中性点直接接地，u_k=4.5%。10.4 kV 侧有多台自起动电动机，总容量为 250 kV·A，最大的一台自起动电动机时间为 8 s。已知电流互感器变比为 50/5，可靠系数为 1.1，接线系数为 1，则用于过负荷保护装置的整定值以及动作时间为下列何值？

（A）8.9 A，9 s　　（B）8.1 A，11 s　　（C）5.6 A，10 s　　（D）5.9 A，13 s

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 522 页（第三版第 298 页）。

题目已知电流互感器变比为 50/5，可靠系数为 1.1，接线系数为 1。主变压器过负荷保护装置的动作电流为

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{I_{1rT}}{K_r n_{TA}}=1.1\times1\times\frac{\dfrac{800}{\sqrt{3}\times10}}{0.9\times\dfrac{50}{5}}\text{ A}=5.63\text{ A}$$

应躲过电动机自起动的时间 8 s，可设定为 10 s。

9-6：假设变电所在 10/0.4 kV 变压器 800 kV·A，Yyn0 接线，中性点直接接地，u_k=4.5%。在最小运行方式下变压器低压侧母线单相接地稳态短路电流为 9470 A，低压分支线断路器最大的零序过电流保护为 1600A。已知变压器低压侧设置零序电流互感器，变比为 400/5，可靠系数为 1.2，配合系数为 1.1，则在变压器低压侧中性线上装设专用的零序保护的整定值以及灵敏系数为下列何值？

（A）4.33 A，27　　（B）4.33 A，5.38　　（C）22 A，27　　（D）22 A，5.38

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 522 页（第三版第 297 页）。

题目已知变压器 Yyn0 接线，零序电流互感器变比为 400/5，可靠系数为 1.2。主变压器专用的零序保护的整定值：

$$I_{op,k}=K_{rel}\frac{0.25I_{1rT}}{n_{TA}}=1.2\times\frac{0.25\dfrac{800}{\sqrt{3}\times0.4}}{\dfrac{400}{5}}\text{ A}=4.33\text{ A}$$

主变压器专用的零序保护与低压侧出线上零序保护相配合：

$$I_{op,k}=K_{co}\frac{I_{(0)op,br}}{n_{TA}}=1.1\times\frac{1600}{\dfrac{400}{5}}\text{ A}=22\text{ A}$$

变压器专用的零序保护的整定值取最大值 22 A。

灵敏系数为 $$K_{sen}=\frac{I_{22k1,min}}{I_{opk}n_{TA}}=\frac{9470}{22\times400/5}=5.38>1.3$$

例题 9-7~9-8：某企业新建 110/35/10 kV 变电所，设 2 台 SSZ11-50000/110 的变压器，容量比为 100/50/100，变压器 S_{rT}的 110 kV 侧电流互感器变比为 300/5，电压互感器变比为 110000/100，电流互感器接线图如图 9-3 所示，请回答下列问题。

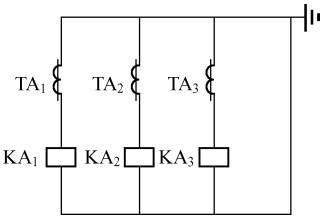


图 9-3　电流互感器接线图

9-7：假若变压器 S_{rT}高压侧装设低电压闭锁的带时限过电流保护，则保护装置的动作电流和动作电压为下列哪组数值？（运行中可能出现的最低工作电压取变压器高压侧母线额定电压的 0.5 倍）（供配电 2016 年考题改编）

（A）5.25 A，41.7 V　　（B）5.83 A，36.2 V

（C）6.7 A，33.4 V　　（D）7.41 A，49 V

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 521 页（第三版第 297 页）。

题目已知电流互感器变比为 300/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.9。主变压器低电压闭锁的带时限过电流保护装置的动作电流为

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{I_{1rT}}{K_rn_{TA}}=1.2\times1\times\frac{\dfrac{50000}{\sqrt{3}\times110}}{0.9\times\dfrac{300}{5}}\text{ A}=5.83\text{ A}$$

动作电压为

$$U_{opk}=\frac{U_{min}}{K_{rel}K_rn_{TV}}=\frac{0.5\times110000}{1.2\times1.15\times110000/100}\text{ V}=36.23\text{ V}$$

9-8：假若变压器 S_{rT}高压侧装设复合电压启动过电流保护，负序过滤器输出额定电压为 100 V，则保护装置的动作电流和动作电压为下列哪组数值？（按躲过最大不平衡电压整定）（供配电 2016 年考题改编）

（A）5.25 A，5 V　　（B）5.83 A，6 V　　（C）6.7 A，7 V　　（D）7.41 A，8 V

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 521 页（第三版第 297 页）。

题目已知电流互感器变比为 300/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.9。主变压器复合电压启动过电流保护的动作电流为

$$I_{\mathrm{op,k}}=K_{\mathrm{rel}}K_{\mathrm{con}}\frac{I_{\mathrm{1rT}}}{K_{\mathrm{r}}n_{\mathrm{TA}}}=1.2\times1\times\frac{\dfrac{50000}{\sqrt{3}\times110}}{0.9\times\dfrac{300}{5}}\ \mathrm{A}=5.83\ \mathrm{A}$$

主变压器复合电压启动过电流保护的负序动作电压为

$$U_{\mathrm{op,(2)}}=0.06U_{\mathrm{n}}=0.06\times100\ \mathrm{V}=6\ \mathrm{V}$$

例题 9-9：变压器的过电流保护装置电流回路的接线如图 9-4 所示，过负荷系数取 3，可靠系数取 1.2，返回系数取 0.9，最小运行方式下变压器低压侧母线单相接地稳态电流$I_{\mathrm{k}}=13.6\ \mathrm{kA}$。当利用此过电流保护装置兼作低压侧单相接地故障保护时其灵敏系数为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）1.7　　（B）1.96　　（C）2.1　　（D）2.94

答案：【A】

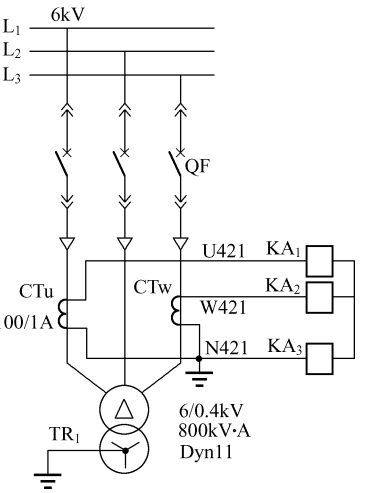


图 9-4　过电流保护装置电流回流

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 521 页（第三版第 297 页）。

题目已知电流互感器变比为 100/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.9。变压器过电流保护装置兼作低压侧单相接地故障保护整定电流为

$$I_{\mathrm{opk}}=K_{\mathrm{rel}}K_{\mathrm{con}}\frac{K_{\mathrm{ol}}I_{\mathrm{1rT}}}{K_{\mathrm{r}}n_{\mathrm{TA}}}=1.2\times1\times\frac{3\times\dfrac{800}{\sqrt{3}\times6}}{0.9\times\dfrac{100}{1}}\ \mathrm{A}=3.079\ \mathrm{A}$$

$$I_{\mathrm{op}}=I_{\mathrm{opk}}\frac{n_{\mathrm{TA}}}{K_{\mathrm{con}}}=3.079\times\frac{100}{1}\ \mathrm{A}=307.9\ \mathrm{A}$$

变压器接线为 Dyn11 型，最小运行方式下变压器低压侧母线单相接地故障时流过高压侧保护装置的故障电流为

$$I_{\mathrm{2k1min}}=\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{I_{\mathrm{k2min}}}{n_{\mathrm{T}}}=\frac{1}{\sqrt{3}}\times\frac{13600}{\dfrac{6}{0.4}}\ \mathrm{A}=523.48\ \mathrm{A}$$

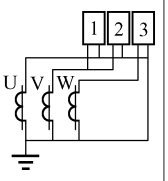
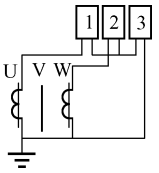
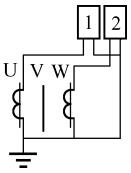
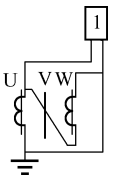
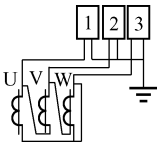
保护灵敏系数为

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{I_{\mathrm{2k1min}}}{I_{\mathrm{op}}}=\frac{523.48}{307.9}=1.7$$

【知识点解析】

短路时变压器高压侧保护装置安装处流经继电器短路电流（I/n_{TA}）折算系数表，见表 9-1。

表 9-1　短路时变压器高压侧保护装置安装处流经继电器短路电流（I/n_{TA}）折算系数表

变压器接线形式	短路点位置	短路形式	短路时变压器高压侧保护装置安装处流经继电器短路电流（I/n_{TA}）折算系数 K_{rT}				
							
			完全星形	不完全星形	两相和	两相差	三角形
Yd11	低压侧	三相短路	1			$\sqrt{3}$	
		两相短路	$2/\sqrt{3}$		$1/\sqrt{3}$ *	$\sqrt{3}$	
		单相接地	—			—	
Yyn0	低压侧	三相短路	1			$\sqrt{3}$	
		两相短路	1			1 *	2
		单相接地	2/3		1/3 *	1	
Dyn11		三相短路	1			$\sqrt{3}$	
		两相短路	$2/\sqrt{3}$		$1/\sqrt{3}$ *	$\sqrt{3}$	
		单相接地	$1/\sqrt{3}$			$1/\sqrt{3}$ *	$2/\sqrt{3}$
Yd11 Yyn0 Dyn11	高压侧	三相短路	1			$\sqrt{3}$	
Yd11 Yyn0 Dyn11	高压侧	两相短路	1			1 *	2

注：1. 变压器可为 Yd、Dd、Yy 接线，可为三绕组也可为双绕组。

2. 本表是由《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 529~532 页表 7.2-6~表 7.2-9（第三版第 358~361 页表 7-28~表 7-30）推导出来的；* 为流经继电器短路电流非 0 的最小值，最大值为表中值的 2 倍。

3. 本表中的值是短路时变压器高压侧保护装置安装处流经继电器短路电流的折算系数 K_{rT}，n_{TA} 为电流互感器变比，I 为变压器高压侧短路电流。当作为灵敏系数计算时，因为变压器继电器动作电流整定值折算到电流互感器一次侧已经除以接线系数 K_{con}（接于相电流为 1，接于相电流差为$\sqrt{3}$），所以考虑短路电流流经继电器在电流互感器一次侧时，也需要除以接线系数 K_{con}，即：

当变压器高压侧短路电流 I_{k*} 归算至变压器低压侧保护装置安装处，流经继电器处短路电流为 $I_{*\cdot min}=\dfrac{K_{rT}}{K_{con}}I_{k*\cdot min}$；

当变压器低压侧短路电流 I_{2k*} 归算至变压器高压侧保护装置安装处，流经继电器处短路电流为 $I_{2*\cdot min}=\dfrac{K_{rT}}{n_T K_{con}}I_{2k*\cdot min}$，$n_T$ 为变压器变比。

例题 9-10：某企业从总变电所 6 kV 母线引一回路向车间变电所供电，供电系统如图 9-5 所示。6 kV 侧为不接地系统，380 V 系统为 TN-S 接地形式。变压器 TR_2 的绕组接线组别为

Yyn0，6 kV 侧过电流保护的接线方式及电流互感器变比如图 9-5 所示。已知 6 kV 侧过电流保护继电器 KA_1 和 KA_2 的动作整定值为 15.3 A。最小运行方式下变压器低压侧单相接地稳态短路电流为 12.3 kA。欲利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护，其灵敏系数应为下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）0.6　　（B）1.03

（C）1.2　　（D）1.8

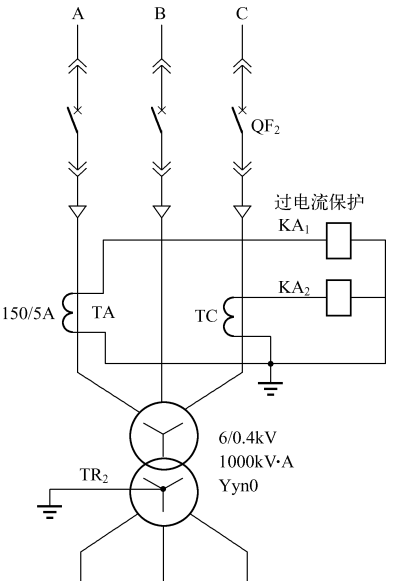


图 9-5　6 kV 侧过电流保护的接地方式及电流互感器变比

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 521 页（第三版第 297 页）。

题目已知电流互感器变比为 150/5，接线系数为 1。变压器过电流保护装置兼作低压侧单相接地故障保护一次动作电流为

$$I_{op}=I_{opk}\frac{n_{TA}}{K_{jx}}=15.3\times\frac{150/5}{1}\text{ A}=459\text{ A}$$

变压器接线为 Yyn0 型，最小运行方式下变压器低压侧母线单相接地故障时流过高压侧保护装置的故障电流（非零最小值）为

$$I_{2k1min}=\frac{1}{3}\frac{I_{k2min}}{n_T}=\frac{1}{3}\times\frac{12300}{6/0.4}\text{ A}=273.3\text{ A}$$

灵敏系数为

$$K_{sen}=\frac{I_{2k1min}}{I_{op}}=\frac{273.3}{459}=0.595$$

【知识点解析】

灵敏系数 K_{sen} 为被保护区发生短路时，流过保护安装处的最小短路电流 $I_{k,min}$ 与保护装置一次动作电流 I_{op} 的比值，即

$$K_{sen}=I_{k,min}/I_{op}$$

式中，K_{sen} 为灵敏系数；$I_{k,min}$ 为流过保护安装处的最小短路电流（A）；I_{op} 为保护装置一次动作电流（A）。

对多相短路保护，$I_{k,min}$ 取两相短路电流最小值 $I_{k2,min}$；对中性点不接地系统的单相短路保护，取单相接地电容电流最小值 $I_{c,min}$；对中性点接地系统的单相短路保护，取单相接地电流最小值 $I_{k1,min}$。

例题 9-11～9-14：某企业内部变电站中有一 35/6.3 kV 电力变压器，其装设比率制动纵差保护。已知：变压器为 S11-8000 kV·A，Yd11 接线，$u_k\%=7.5$，高压侧电流互感器 Y 形接线，变比为 300/5，低压侧电流互感器 Y 形接线，变比为 800/5。最小运行方式下变压器高压侧三相短路电流初始值为 4.62 kA。正常变压器 6.3 kV 侧负荷电流为 500 A。请回答以下问题。（所有保护的动作、制动电流均为变压器低压侧）

9-11：变压器高、低压侧平衡系数为下列哪一项？

（A）0.229，0.583　　（B）0.245，0.308

（C）0.229，0.283　　（D）0.262，0.218

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 523 页（第三版第 332 页）。

变压器 Y 接线侧平衡系数：

$$K_{bal1}=\frac{U_{1n}n_{TA1}}{s}=\frac{35\times60}{8000}=0.262$$

变压器 D 接线侧平衡系数：

$$K_{bal2}=\frac{\sqrt{3}U_{2n}n_{TA2}}{s}=\frac{\sqrt{3}\times6.3\times160}{8000}=0.218$$

9-12：如果该变压器差动保护的差动启动电流为变压器额定电流的 0.5 倍，下列哪项比率差动元件启动电流值满足要求？（取变压器高、低压侧额定电流值折算到电流互感器二次侧最大值为基准电流）

（A）114 A　　（B）366.4 A　　（C）1.91 A　　（D）2.29 A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 523 页（第三版第 333 页）。

变压器高、低压侧额定电流值折算到电流互感器二次侧为

高压侧

$$\frac{I_{1rT}}{n_{TA}}=\sqrt{3}\times\frac{S_{rT}}{\sqrt{3}U_{1r}}=\sqrt{3}\times\frac{8000}{\sqrt{3}\times35}\text{ A}=3.81\text{ A}$$

低压侧

$$\frac{I_{2rT}}{n_{TA}}=\frac{S_{2rT}}{\sqrt{3}U_{2r}}=\frac{8000}{\sqrt{3}\times6.3}\text{ A}=4.58\text{ A}$$

取最大值为基准电流，变压器率比差动元件启动电流值（电流互感器二次侧）：

$$I_{D,st}/n_{TA}=0.5I_{op}=0.5\times4.58\text{ A}=2.29\text{ A}$$

9-13：若该变压器差动保护的差动电流为变压器额定电流的 0.5 倍，变压器比率差动第一、第二制动斜率分别为 0.5、1，二次谐波制动系数为 0.2，系统最小运行方式下变压器低压侧发生两相短路时流过高压侧保护安装处的电流初始值为 1.27 kA。假设变压器差动速断动作电流为变压器额定电流的 4 倍，其作为最大制动电流，此时变压器差动保护的元件动作电流及灵敏系数应为下列哪一项？

（A）12.6 A，2.91　　（B）18.32 A，3.64

（C）13.1 A，9.1　　（D）16.3 A，5.6

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 524～525 页（第三版第 333～334 页）。

变压器比率差动元件第一拐点电流值为

$$I_{t1}/n_{TA}=0.5I_n=0.5\times4.58\ A=2.29\ A$$

变压器比率差动元件第二拐点电流值为

$$I_{t2}/n_{TA}=3I_n=3\times4.58\ A=13.74\ A$$

变压器比率差动第一、第二制动斜率为 $K_{D,res1}=0.5$，$K_{D,res2}=1$

最大制动电流为变压器差动保护的差动速断动作电流：

$$I_{D,set}/n_{TA}=4I_n=4\times4.58\ A=18.32\ A$$

此制动电流大于第二拐点电流值在第三折线中，故变压器差动保护的动作电流为

$$\begin{aligned}I_{op}&=(I_{res}-I_{t2})K_{D,res2}+(I_{t2}-I_{t1})K_{D,res1}+I_{D,st}\\&=[(18.32-13.74)\times1+(13.74-2.29)\times0.5+2.29]\ A=12.6\ A\end{aligned}$$

灵敏系数：

$$K_{sen}=\frac{\sqrt{3}I''_{k2min}}{I_{op}n_{TA}}=\frac{\sqrt{3}\times1270}{12.6\times300/5}=2.91\geqslant1.5$$，满足要求

9-14：如果该变压器差动速断动作电流为变压器额定电流的 4 倍，则变压器差动保护的差动速断电流（电流互感器二次侧）及灵敏系数应为下列哪一项？

（A）7.22 A，12.3　　（B）18.32 A，6.3

（C）13.1 A，9.1　　（D）16.3 A，5.6

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 524～525 页（第三版第 334 页）。

变压器差动保护的差动速断电流（电流互感器二次侧）：

$$I_{D,set}/n_{TA}=4I_n=4\times4.58\ A=18.32\ A$$

灵敏系数：

$$K_{sen}=\frac{\sqrt{3}I_{1k2min}}{I_{D,set}n_{TA}}=\frac{\sqrt{3}\times0.866I_{1k3min}}{I_{D,set}n_{TA}}=\frac{\sqrt{3}\times0.866\times4620}{18.32\times300/5}=6.3\geqslant1.2$$，满足要求

9.2　3～110 kV 线路的保护

【知识点说明】

1）线路的常用保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.3 节。要求熟练掌握过电流保护、无时限电流速断保护、带时限电流速断保护、单相接地保护、无时限电流和电压速断保护、带时限电流和电压速断保护等整定计算。其中返回系数（《工业与民用供配电设计手册》第四版中为 0.9、第三版中为 0.85）等相关系数有所改变，请读者解答时注意。

2）线路光纤纵联差动保护属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.3 节。要求了解光纤纵联差动保护的动作方程以及原理。

3）《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.3 节主要是配电线路保护设置和整定计算内容，与输电线路保护相比缺少了距离保护等重要内容。其配电线路保护原理比较欠缺，建议按照参考书目中学习继电保护原理。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584—2007

《变压器及中低压网络数字式保护》许正亚编著

《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》崔家佩编著

《电力系统微机继电保护》许建安编著

《电力系统继电保护整定计算》许建安、王风华编著

《国家电网公司继电保护培训教材》（上、下册）

例题 9-15~9-17：某电力用户设 35/10 kV 变电站。10 kV 系统为中性点不接地系统，下设有三个 10 kV 车间变电所，其中主要是二级负荷，其供电系统图（见图 9-6）和已知条件如下：

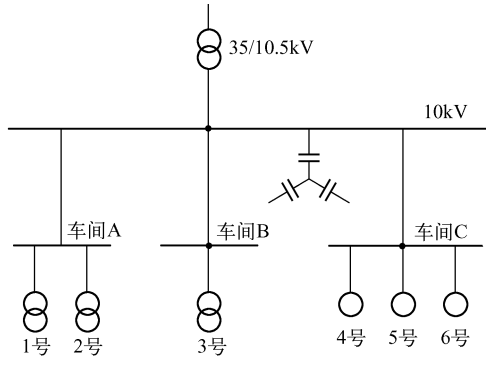


图 9-6　变电站供电系统图

1）35 kV 线路电源侧短路容量无限大；

2）35/10 kV 变电站为重要变电站；

3）最大、小运行方式下 35/10 kV 变电站10 kV 母线短路容量分别为 132 MV·A、104 MV·A；

4）最小运行方式下 A、B、C 车间变电所 10 kV 母线短路容量分别 102 MV·A、100 MV·A、39MV·A；

5）车间 B 变电所 3#变压器额定电压 10/0.4 kV，其低压侧母线三相短路超瞬态电流为 16330 A；

6）35/10 kV 变电站正常运行时 A、B、C 车间变电所供电的三个 10 kV 出线及负载的单相对地电容电流分别为 2.9 A、1.3 A、0.7 A，并假设各出线及负载的三相对地电容电流对称；

7）保护继电器接线系数取 1。

请回答下列问题。

9-15：35/10 kV 变电站线路出线应配置下列哪项保护装置？并说明理由。（供配电 2007 年考题）

（A）带时限电流速断和单相接地保护

（B）无时限电流速断、单相接地保护和过负荷保护

（C）无时限电流速断和带时限电流速断

（D）带时限电流速断和过电流保护

答案：【B】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 547~550 页（第三版第 309 页）。

第 5.0.1 条　3~66 kV 线路的下列故障或异常运行，应装设相应的保护装置：相间短路、单相接地、过负荷。选 B。

9-16：如果向车间 C 供电的 10 kV 线路发生单相接地故障，在该供电线路电源端装设无时限单相接地保护装置，其整定值应为下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）10 A　　（B）15 A　　（C）4.9 A　　（D）2.1 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 550 页表 7.3-2（第三版第 310 页）。

考虑增容系数后，电网总单相接地故障电流为

$$I_{C\Sigma}=(I_{CA}+I_{CB}+I_{CC})\times 3\times 1.16=(2.9+1.3+0.7)\times 3\times 1.16\ \text{A}=17.05\ \text{A}$$

供电线路电源端无时限单相接地保护整定值：

$$I_{op}\leqslant K_{rel}I_{Cx}=(4\sim 5)\times 0.7\times 3\ \text{A}=8.4\sim 10.5\ \text{A}$$

$$I_{op}\leqslant \frac{I_{C\Sigma}-I_{Cx}}{1.3}=\frac{17.05-0.7\times 3}{1.3}\ \text{A}=11.5\ \text{A}$$

选择整定值为 10 A。

9-17：如果向车间 B 供电的 10 kV 线路为专用架空线路，长度为 3 km，阻抗为 0.4 Ω/km，线路工作电流按车间 B 变压器额定电流考虑。车间 B 内 10/0.4 kV 变压器（3 号）容量为 1600 kV·A，Dyn11 接线，$u_k=4.5\%$，需要自起动电动机的总容量为 500 kV·A（起动电流倍数为 5）。在向车间 B 供电线路电源端装设过电流保护装置，已知电流互感器变比为 100/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.9，其整定值应为下列哪项数值？

（A）8.8 A　　（B）7.5 A　　（C）4.9 A　　（D）2.1 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 550～551 页（第三版第 309 页）。

以变压器额定容量为基础的线路阻抗标幺值为

$$Z_{pu\cdot II}=X\frac{S_j}{U_j^2}=0.4\times 3\times\frac{1.6}{10.5^2}=0.0174$$

车间 B 电动机自起动时的过负荷电流为

$$I_{ol}=K_{ol}I_w=\frac{I_w}{u_k+Z_{pu\cdot II}+\dfrac{S_{rT}}{K_{st}S_{M\Sigma}}}=\frac{\dfrac{1600}{\sqrt{3}\times 10}}{0.045+0.0174+\dfrac{1600}{5\times 500}}\ \text{A}=131.5\ \text{A}$$

题目已知电流互感器变比为 100/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.9。向车间 B 供电线路电源端装设过电流保护整定值为

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{I_{ol}}{K_r n_{TA}}=1.2\times 1\times\frac{131.5}{0.9\times\dfrac{100}{5}}\ \text{A}=8.77\ \text{A}$$

例题 9-18～9-20：35 kV 单侧电源线路的保护，线路接线如图 9-7 所示。

已知：线路 MN 最大工作电流为 127 A，电流互感器的变比为 200/5，降压变压器装有差动保护。系统最大运行方式下，N 母线三相短路电流初始值为 2461 A，配电变压器低压侧

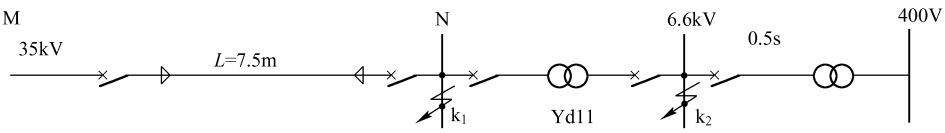


图 9-7　35 kV 单侧电源线路的接线图

三相短路时流过高压侧的电流初始值为 1020 A。最小运行方式下，线路 M 处三相短路电流初始值为 1732 A，配电变压器低压侧三相短路时流过高压侧的电流初始值为 869 A。MN 线路单位千米阻抗为 0.4 Ω/km，变压器额定容量为 7500 kV · A、$u_k\%=7.5$、额定电压为 35/6.6 kV。请回答以下问题。

9-18：假设 35 kV 电源母线侧线路 M 处安装带时限电流速断保护装置，已知电流互感器变比为 200/5，可靠系数为 1.3，接线系数为 1，则电流元件整定值和灵敏系数为下列何值？

（A）33.2 A，1.13　　（B）38.2 A，1.54

（C）41.2 A，1.35　　（D）23.2 A，1.96

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 550~551 页。

题目已知电流互感器变比为 200/5，可靠系数为 1.3，接线系数为 1，按变压器低压侧最大三相短路电流 1020 A 整定，带时限电流速断保护的动作电流为

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{I''_{3k,max}}{n_{TA}}=1.3\times1\times\frac{1020}{\frac{200}{5}}\text{ A}=33.2\text{ A}$$

保护装置一次动作电流为

$$I_{op}=I_{op,k}\frac{n_{TA}}{K_{con}}=33.2\times\frac{40}{1}\text{ A}=1328\text{ A}$$

保护装置的灵敏系数为

$$K_{sen}=\frac{I''_{1k2,min}}{I_{op}}=\frac{0.866I''_{1k,min}}{I_{op}}=\frac{0.866\times1732}{1328}=1.13<1.5$$

无时限电流速断保护不能满足灵敏系数要求。

9-19：假设 35 kV 电源母线侧线路 M 处安装带时限电流闭锁电压速断保护装置，已知接线系数为 1，灵敏系数要求大于 1.5，则电压元件一次侧整定值和灵敏系数为下列何值？

（A）20895 V，1.59　　（B）20317 V，1.59

（C）21835 V，2.86　　（D）20317 V，2.86

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 552 页。

电流元件的动作电流按保护线路末端短路时具有足够灵敏系数（大于 1.5）整定：

$$I^{I}_{op}=\frac{I''_{1k2,min}}{K_{sen}}=\frac{0.866I''_{1k,min}}{K_{sen}}=\frac{0.866\times1732}{1.5}\text{ A}=1000\text{ A}$$

变压器的电抗：

$$X_T=\frac{u_k\%}{100}\frac{U_r^2}{S_r}=\frac{0.075\times35^2}{7.5}\Omega=12.25\Omega$$

线路的电抗：　　$X_L = 0.4 \times 7.5\ \Omega = 3\ \Omega$

电压元件动作值为

$$U_{op}^{I} = \frac{\sqrt{3} I_{op}^{I} (X_T + X_L)}{K_{rel}} = \frac{\sqrt{3} \times 1000 \times (12.25+3)}{1.3}\ \text{V} = 20317\ \text{V}$$

电压元件灵敏系数为

$$K_{sen} = \frac{U_{op}^{I}}{U_{rem \cdot max}} = \frac{U_{op}^{I}}{\sqrt{3} X_L I_{1k,max}} = \frac{20317}{\sqrt{3} \times 3 \times 2461} = 1.59 < 1.5$$，满足要求

9-20：假设在 35 kV 电源母线侧线路安装过电流保护装置作为配电变压器后备保护，已知可靠系数为 1.2，接线系数为 1，返回系数为 0.9，则过电流保护装置一次侧整定值和灵敏系数为下列何值？

（A）133.2 A，3.13　　（B）138.2 A，5.4

（C）141.2 A，3.5　　（D）169.3 A，4.4

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 552 页（第三版第 309 页）。

已知可靠系数为 1.2，接线系数为 1，返回系数为 0.9，线路 MN 最大工作电流为 127 A，过电流保护装置一次侧整定值为

$$I_{op}^{\text{Ⅱ}} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{ol}}{K_r} = 1.2 \times 1 \times \frac{127}{0.9}\ \text{A} = 169.3\ \text{A}$$

作为配电变压器后备保护时的灵敏系数为

$$K_{sen} = \frac{I''_{2k2,min}}{I_{op}^{\text{Ⅱ}}} = \frac{0.866 I''_{2k,min}}{I_{op}^{\text{Ⅱ}}} = \frac{0.866 \times 869}{169.3} = 4.4 > 1.2$$

过电流保护装置的动作时限应与配电变压器过电流部分的动作时限相配合。

例题 9-21：某 110/10 kV 变电站设有两台主变压器，110 kV 采用内桥接线方式，10 kV 采用单母线分段接线方式，110 kV 进线及 10 kV 母线均分列运行，系统接线如图 9-8 所示。电源 1 最大运行方式下三相短路电流为 25 kA，最小运行方式下三相短路电流为 20 kA。电源 2 容量为无限大。电源进线 L_1 及 L_2 均采用 110 kV 架空线路。变电站基本情况如下：

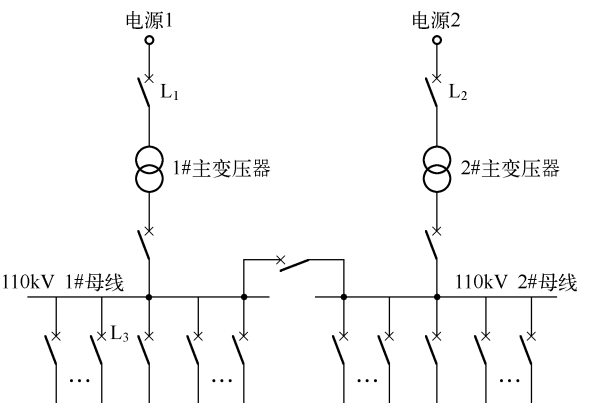


图 9-8　110/10 kV 变电站系统接线图

1）主变压器参数

容量为 50000 kV·A；电压比为 110±8×1.25%/10.5 kV；

短路阻抗 $U_k = 12\%$；空载电流 $I_0 = 1\%$；

接线组别为 YNd11；变压器允许长期过载 1.3 倍。

2）每回 110 kV 电源架空线路长度约为 40 km；

导线采用 LGJ-300/25，单位电抗取 0.4 Ω/km。

3）10 kV 馈电线路均为电缆出线，单位电抗为 0.1 Ω/km。

假定本站 10 kV 1#母线最大运行方式下三相短路电流为 23 kA，最小运行方式下三相短路电流为 20 kA。又该母线馈出一回线路 L_3为下级 10 kV 配电站配电。线路长度为 8 km，采用无时限电流速断保护，电流互感器变比为 300/1 A，接线方式如图所示，计算保护装置的动作电流及灵敏系数应为下列哪项数值。（可靠系数为 1.3）（供配电 2017 年考题）

（A）2.47 kA，2.34　　（B）4.28 kA，2.34

（C）24.7 A，2.7　　（D）42.78 A，2.34

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 550 页（第三版第 309 页）。

基准值选择：　$S_j = 100\ \text{MV}\cdot\text{A}$，$U_j = 10.5\ \text{kV}$，$I_j = 5.5\ \text{kA}$

线路标幺值：　$X_{*L} = X_L \dfrac{S_j}{U_j^2} = 0.1\times 8\times \dfrac{100}{10.5^2} = 0.725$

最大运行方式下系统短路容量标幺值：　$X_{*S} = \dfrac{I_j}{I_S} = \dfrac{5.5}{23} = 0.239$

线路末端短路最大三相短路电流：　$I''_{2k3,max} = \dfrac{I_j}{X_{*L}+X_{*S}} = \dfrac{5.5}{0.725+0.239}\ \text{kA} = 5.705\ \text{kA}$

无时限电流速断保护的动作电流：　$I_{op,k} = K_{rel}K_{con}\dfrac{I''_{3k,max}}{n_{TA}} = 1.3\times\sqrt{3}\times\dfrac{5705}{\frac{300}{1}}\ \text{A} = 42.82\ \text{A}$

灵敏系数：$K_{sen} = \dfrac{I''_{1k2,min}}{I_{op}} = \dfrac{0.866\times 20000\times\sqrt{3}}{47.82\times 300/1} = 2.09 > 2$，满足要求。

9.3　6~110 kV 母线保护

【知识点说明】

1）母线分段断路器的保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.4 节。要求熟练掌握过电流保护、电流速断保护、零序过电流保护等整定计算。其中返回系数（《工业与民用供配电设计手册》第四版中为 0.9、第三版中为 0.85）等相关系数有所改变，请读者解答时注意。

2）母线差动和失灵保护属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.4 节。要求掌握母线比率差动保护、母联充电保护、母联过电流保护、母联过电流零序定值、母联失灵保护等整定与计算。

3）《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.4 节增加了母线差动、母联保护、失灵保护等保护设置和整定计算，使母线相关保护内容变得完整。相关原理建议按照参考书目中学习。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584—2007

《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》崔家佩编著

《电力系统微机继电保护》许建安编著

《电力系统继电保护整定计算》许建安、王风华编著

《国家电网公司继电保护培训教材》（上、下册）

例题 9-22~9-24：一座 35 kV 变电所，有两回 35 kV 进线，装有两台 35/10 kV、5000 kV·A 主变压器，35 kV 母线和 10 kV 母线均采用单母线分段接线方式，有关参数如图 9-2（见例题 9-1）所示，继电保护装置由电流互感器、DL 型电流继电器、时间继电器组成，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，继电器返回系数为 0.85。请回答下列问题，并列出解答过程。

9-22：若 35 kV 母线正常并列运行和 10 kV 母线分列运行，有关该 35/10 kV 变电站母线应设置的继电保护和自动装置，下列哪一项叙述是正确的？（供配电 2011 年考题改编）

（A）10 kV 分段母线宜采用不完全电流差动保护

（B）10 kV 母线应装设带方向的电流速断

（C）35 kV 母线应装设过电流保护作为主保护

（D）35 kV 母线应装设电流速断保护作为主保护

答案：【A】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

第 7.0.4 条　3~10 kV 分段母线宜采用不完全电流差动保护。A 对。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 563 页。

表 7.4-1 和表 7.4-2 中：10 kV 不并列运行分段母线装设电流速断，没有方向要求；35 kV 并列运行分段母线可不装设过电流保护和电流速断；故 B、C、D 错。

9-23：假定变电所的两段 10 kV 母线在系统最大运行方式下母线三相短路超瞬态电流为 5480 A，系统最小运行方式下母线三相短路超瞬态电流为 4560 A，则 10 kV 母线分段断路器的电流速断保护装置的动作电流为下列哪一项？（供配电 2012 年考题改编）

（A）19.74 A　　（B）22.8 A　　（C）23.73 A　　（D）26.33 A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 564 页（第三版第 315 页）。

题目已知电流互感器变比为 500/5，最小运行方式下母线三相短路超瞬态电流为4560 A，10 kV 母线分段断路器的电流速断保护装置的动作电流按最小灵敏系数 1.5 整定：

$$I_{\mathrm{op,k}}=\frac{I''_{\mathrm{k2,min}}}{1.5n_{\mathrm{TA}}}=\frac{0.866\times4560}{1.5\times\dfrac{500}{5}}\mathrm{A}=26.33\ \mathrm{A}$$

9-24：假定变电所的两段 10 kV 母线在系统最大运行方式下母线三相短路超瞬态电流为 5480 A，系统最小运行方式下母线三相短路超瞬态电流为 4560 A。10 kV 母线在Ⅰ段母线最大负荷（包括电动机起动引起的）电流为 420 A，Ⅱ段母线负荷电流为 360 A，若可靠系数

为 1.2，接线系数为 1，返回系数为 0.9，则 10 kV 母线分段断路器的过电流保护装置的动作电流和灵敏系数为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）5.6 A，6.35　　（B）8.2 A，5.4　　（C）4.12 A，3.5　　（D）9.3 A，4.4

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 564 页（第三版第 315 页）。

题目已知电流互感器变比为 500/5，可靠系数为 1.2，接线系数为 1，返回系数为 0.9，10 kV 母线分段断路器的电流速断保护装置的动作电流按最小灵敏系数 1.5 整定：

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{I''_{L,max}}{K_r n_{TA}}=1.2\times1\times\frac{420}{0.9\times\frac{500}{5}}\text{ A}=5.6\text{ A}$$

$$I_{op}=I_{op,k}\frac{n_{TA}}{K_{con}}=\frac{5.6}{1}\times\frac{500}{5}\text{ A}=560\text{ A}$$

最小运行方式下母线三相短路超瞬态电流为 4560 A，此时灵敏系数为

$$K_{sen}=\frac{I''_{k2,min}}{I_{op}}=\frac{0.866\times4560}{560}=7.05>1.3$$，满足要求

9.4　3~20 kV 电力电容器的保护

【知识点说明】

1）电力电容器组的常用继电保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.5 节。要求熟练掌握带有短延时的速断保护、过电流保护、过负荷保护、过电压保护、低电压保护、单相接地保护等整定计算。其中返回系数（《工业与民用供配电设计手册》第四版中为 0.9、第三版中为 0.85）等相关系数有所改变，请读者解答时注意。

2）不同接线形式下的电力电容器组的专用继电保护属于冷门考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.5 节和《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）27.4 节。要求了解（单星形接线）零序电压保护、桥式差电流保护、电压差动保护、（双星形接线）中性线不平衡电流保护整定与计算。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584—2007

《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》崔家佩编著

《电力系统微机继电保护》许建安编著

《电力系统继电保护整定计算》许建安、王风华编著

《国家电网公司继电保护培训教材》（上、下册）

例题 9-25~9-31：某 35 kV 变电所 10 kV 系统装有一组 4800 kvar 电力电容器，单台容量为 200 kvar，共计 24 台，串联段数为 1，并联台数为 8，额定电压为 10.5/$\sqrt{3}$ kV（未安装限

制谐波电抗器），装于绝缘支架上，星形接线，中性点不接地，电流互感器变比为 400/5，10 kV 最大运行方式下短路容量为 300 MV·A，最小运行方式下短路容量为 200 MV·A，10 kV 母线电压互感器二次额定电压为 100 V。请回答下列问题，并列出解答过程。

9-25：该电力电容器可不设置下列哪一项保护？（供配电 2011 年考题改编）

（A）中性线对地电压不平衡电压保护　　（B）过电压保护

（C）单相接地保护　　（D）过电流保护

答案：【C】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 572 页表 7.5-1 或《并联电容器装置设计规范》GB/T 50227—2008 的 6.1 节。

第 8.1.2 条　中性点不接地单星形接线的电容器组，可装设中性点电压不平衡保护，A 对；

第 8.1.4 条　电容器组应装设过电压保护，B 对；

第 8.1.3 条　安装在绝缘支架上的电容器组，可不再装设单相接地保护，故 C 错；

第 8.1.2 条　电容器组和断路器之间连接线的短路，可装设带有短时限的电流速断和过电流保护，D 对。

9-26：电力电容器组带短延时速断保护装置的动作电流应为下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题改编）

（A）59.5 A　　（B）68.8 A　　（C）79.38 A　　（D）103.1 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 572 页（第三版第 317 页）。

最小运行方式下电容器组端部三相短路电流：

$$I''_{\mathrm{k3min}}=\frac{S}{\sqrt{3}U_{\mathrm{j}}}=\frac{200}{\sqrt{3}\times 10.5}\ \mathrm{kA}=11.00\ \mathrm{kA}$$

带短延时速断保护装置的动作电流：

$$I_{\mathrm{op,k}}\leqslant\frac{I''_{\mathrm{k2,min}}}{1.5n_{\mathrm{TA}}}=\frac{0.866\times 11000}{1.5\times\dfrac{400}{5}}\ \mathrm{A}=79.38\ \mathrm{A}$$

9-27：当电力电容器组接入母线处实际运行电压为 10 kV，电力电容器组过电流保护装置的最小动作电流和相应灵敏系数应为下列哪组数值？（供配电 2011 年考题改编）

（A）6.1 A，19.5　　（B）5.44 A，19.7

（C）6.4 A，27.9　　（D）6.8 A，17.5

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 572 页（第三版第 318 页）。

考虑实际运行电压影响后的每相电力电容器组的额定电流：

$$I_{\mathrm{rc}}=\frac{Q}{U^2_{\mathrm{rph}}}\frac{U_{\mathrm{rc}}}{\sqrt{3}}=\frac{4800/3}{(10.5/\sqrt{3})^2}\times\frac{10}{\sqrt{3}}\ \mathrm{A}=251\ \mathrm{A}$$

题目已知电流互感器变比为400/5，可靠系数为1.2，接线系数为1，返回系数为0.9，过负荷系数为1.3，过电流保护装置的动作电流为

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{K_{ol}I_{rC}}{K_r n_{TA}}=1.2\times1\times\frac{1.3\times251}{0.9\times\frac{400}{5}}\text{ A}=5.44\text{ A}$$

$$I_{op}=I_{op,k}\frac{n_{TA}}{K_r}=\frac{5.44}{0.9}\times\frac{400}{5}\text{ A}=483.6\text{ A}$$

过电流保护装置的灵敏系数为

$$K_{sen}=\frac{I''_{k2,min}}{I_{op}}=\frac{0.866\times11000}{483.6}=19.7>1.3，\text{满足要求}$$

9-28：电力电容器组过负荷保护装置的动作电流为下列哪项数值？（供配电2011年考题改编）

（A）4.18 A　　（B）4.7 A　　（C）4.9 A　　（D）5.4 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第572页（第三版第318页）。

题目已知电流互感器变比为400/5，可靠系数为1.2，接线系数为1，返回系数为0.9，过负荷系数为1.3，过负荷保护装置的动作电流为

$$I_{op,k}=K_{rel}K_{con}\frac{I_{rC}}{K_r n_{TA}}=1.2\times1\times\frac{251}{0.9\times\frac{400}{5}}\text{ A}=4.18\text{ A}$$

9-29：电力电容器组低电压保护装置的动作电压一般取下列哪项数值？（供配电2011年考题）

（A）40 V　　（B）45 V　　（C）50 V　　（D）60 V

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第572页（第三版第318页）。

已知电压互感器二次侧电压为100 V，最低电压系数为0.5，低电压保护装置的动作电压为

$$U_{opK}=K_{min}U_{r2}=0.5\times100\text{ V}=50\text{ V}$$

9-30：电力电容器组过电压保护装置的动作电压一般取下列哪项数值？

（A）100 V　　（B）110 V　　（C）120 V　　（D）130 V

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第572页（第三版第318页）。

已知电压互感器二次侧电压为100V，电力电容器组过电压保护装置的动作电压为

$$U_{op,k}=1.1U_{r2}=1.1\times100\text{ V}=110\text{ V}$$

9-31：若该变电所10 kV系统向外引出三条电缆线路，A、B、C三条电缆线路单相接地电容电流分别为2.9 A、1.3 A、0.7 A，假设并联电力电容器组装于金属支架上，在该电力

电容器组装设单相接地保护装置，其整定值应为下列哪项数值？（供配电 2007 年考题改编）

（A）10 A　　（B）13.1 A　　（C）4.9 A　　（D）2.1 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 572 页（第三版第 318 页）。

考虑增容系数后，10 kV 系统总单相接地电容电流为

$$I_{C\Sigma}=(I_{CA}+I_{CB}+I_{CC})\times 3\times 1.16=(2.9+1.3+0.7)\times 3\times 1.16\ \text{A}=17.05\ \text{A}$$

供电线路电源端无时限单相接地保护整定值为

$$I_{op}\leqslant\frac{I_{C\Sigma}}{1.3}=\frac{17.05}{1.3}\ \text{A}=13.1\ \text{A}$$

9.5　3~10 kV 电动机的保护

【知识点说明】

1）电动机的常用继电保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.6 节。要求熟练掌握电流速断保护、过负荷保护、单相接地保护、低电压保护等整定计算。其中返回系数（《工业与民用供配电设计手册》第四版中为 0.9、第三版中为 0.85）等相关系数有所改变，请读者解答时注意。

2）电动机微机差动保护和其他保护属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.6 节。要求掌握比率制动差动保护、差动速断保护等整定与计算。

3）异步、同步电动机微机保护和同步电动机专用保护属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.6 节。要求掌握负序过电流保护、电动机过热保护、起动时间过长保护、堵转保护等整定计算，了解磁平衡差动保护、失步保护、失磁保护等。

4）《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.6 节增加了磁平衡差动保护、电动机过热保护、起动时间过长保护、堵转保护等整定计算，其对应保护相关原理建议按照参考书目中学习。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《厂用电继电保护整定计算导则》DL/T 1502—2016

《变压器及中低压网络数字式保护》许正亚编著

《大型发电机组继电保护整定计算与运行技术》第二版 高春如编著

《电力系统继电保护整定计算》许建安、王风华编著

例题 9-32~9-41：有一台 10 kV、2500 kW 的电动机，$\cos\varphi=0.8$，效率为 0.92，起动电流倍数为 6.5，本回路三相 Y 接线，电流互感器变比为 300/5，容量为 30 V·A，10 kV 系统接入无限大电源系统，电动机机端短路容量为 65 MV·A（最小运行方式）、100 MV·A（最大运行方式），机端保护采用微机型电动机成套保护装置，请回答下列问题。（所有保护的动作、制动电流均为二次侧的）

9-32：该电动机比率制动差动保护的最小动作电流计算值（电流互感器二次侧）为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）0.48～0.96 A　　（B）0.65～1.31 A

（C）1.13～2.26 A　　（D）39.2～78.4 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1072 页（第三版第 656 页）。

电动机额定电流：

$$I_r=\frac{P}{\sqrt{3}U\eta\cos\varphi}=\frac{2500}{\sqrt{3}\times10\times0.92\times0.8}\text{ A}=196.11\text{ A}$$

电动机额定工作时（电流互感器二次侧）：

$$I_n=\frac{I_r}{n_{TA}}=\frac{196.11}{300/5}\text{ A}=3.27\text{ A}$$

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 585 页（第三版第 334 页）。

电动机比率制动差动保护的最小动作电流（电流互感器二次侧）：

$$I_{D,st}/n_{TA}=(0.2\sim0.4)I_n=(0.2\sim0.4)\times3.27\text{ A}=0.65\sim1.31\text{ A}$$

9-33：如果该电动机差动保护的差动电流为电动机额定电流的 5 倍，下列哪项制动电流值（电流互感器二次侧）满足要求？（比率制动系数取 0.35）（供配电 2014 年考题）

（A）9.34 A　　（B）28 A　　（C）46.7 A　　（D）280.16 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 585 页（第三版第 334 页）。

电动机比率制动差动保护的制动电流（电流互感器二次侧）：

$$I_{D,res}=\frac{I_{op}}{k_{D,res}}=\frac{5\times3.27}{0.35}\text{ A}=46.71\text{ A}$$

9-34：如果该电动机差动速断动作电流为电动机额定电流的 3 倍，则差动保护的差动速断电流及灵敏系数应为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）7.22 A，12.3　　（B）9.81 A，5.26

（C）13.1 A，9.1　　（D）16.3 A，5.6

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 585 页（第三版第 334 页）。

电动机比率制动差动保护的差动速断动作电流：$I_{opk}=3I_n=3\times3.27\text{ A}=9.81\text{ A}$

最小运行方式下，10 kV 电动机机端三相短路电流为

$$I''_{k3,min}=\frac{S_k}{\sqrt{3}U_j}=\frac{65}{\sqrt{3}\times10.5}\text{ kA}=3.574\text{ kA}$$

电动机比率制动差动保护的差动速断灵敏系数：

$$K_{sen}=\frac{I_{k2,min}}{n_{TA}I_{opk}}=\frac{0.866I_{k3,min}}{n_{TA}I_{opk}}=\frac{0.866\times3574}{300/5\times9.81}=5.26\geqslant1.2\text{，满足要求}$$

9-35：假设该电动机为异步电动机，则电流速断保护的动作电流及灵敏系数为下列哪组数值？（供配电 2014 年考题改编）

（A）20.40 A，2.30　　（B）23.50 A，3.40

（C）25.50 A，3.10　　（D）27.62 A，1.86

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 584 页（第三版第 323 页）。

已知接线系数取 1，返回系数为 0.9，电流互感器变比为 300/5，可靠系数为 1.3，起动电流倍数为 6.5，电动机电流速断保护的动作电流为

$$I_{\mathrm{op,k}}=K_{\mathrm{rel}}K_{\mathrm{con}}\frac{K_{\mathrm{st}}I_{\mathrm{rM}}}{n_{\mathrm{TA}}}=1.3\times1\times\frac{6.5\times196.11}{60}\ \mathrm{A}=27.62\ \mathrm{A}$$

最小运行方式下，10 kV 电动机机端三相短路电流为

$$I''_{\mathrm{k3,min}}=\frac{S_{\mathrm{k}}}{\sqrt{3}U_{\mathrm{j}}}=\frac{65}{\sqrt{3}\times10.5}\ \mathrm{kA}=3.574\ \mathrm{kA}$$

电动机电流速断保护的灵敏系数为

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{I_{\mathrm{k2,min}}}{n_{\mathrm{TA}}I_{\mathrm{op,k}}}=\frac{0.866I_{\mathrm{k3,min}}}{n_{\mathrm{TA}}I_{\mathrm{op,k}}}=\frac{0.866\times3574}{300/5\times27.62}=1.86\geqslant1.5$$，满足要求

9-36：假设该电动机为异步电动机，电动机起动时间为 8 s，接线系数取 1，返回系数为 0.9，过负荷保护动作于信号，过负荷保护装置动作整定值和过负荷保护装置动作时间应选取下列哪组数值？（供配电 2009 年考题改编）

（A）3.43 A，9 s　　（B）3.43 A，11 s　　（C）5.5 A，9 s　　（D）5.5 A，11 s

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 584 页（第三版第 323 页）。

已知接线系数取 1，返回系数为 0.9，电流互感器变比为 300/5，过负荷保护动作于信号，可靠系数为 1.05，电动机过负荷保护装置的动作电流为

$$I_{\mathrm{op,k}}=K_{\mathrm{rel}}K_{\mathrm{con}}\frac{I_{\mathrm{rM}}}{n_{\mathrm{TA}}}=1.05\times1\times\frac{196.11}{300/5}\ \mathrm{A}=3.43\ \mathrm{A}$$

该电动机未说明用途按照一般电动机考虑，过负荷保护装置动作时间应为

$$t_{\mathrm{op}}=(1.1\sim1.2)t_{\mathrm{st}}=(1.1\sim1.2)\times8\ \mathrm{s}=8.8\sim9.6\ \mathrm{s}$$

综上所述，选 A。

9-37：假设该电动机为异步电动机，装设过热保护，电动机起动时间为 8 s，电动机额定连续运行时的稳定温升为 50 K，电动机起动温升为 55 K。当电动机过热保护动作时发出报警信号，电动机过热报警值应选取下列哪项数值？

（A）220 s　　（B）250 s　　（C）280 s　　（D）310 s

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 586 页（第三版第 337 页）。

题目已知电动机起动时间为 8 s，电动机额定连续运行时的稳定温升为 50 K，电动机起动温升为 55 K，电动机发热时间常数：

$$\tau=\frac{Q_{\mathrm{n}}K_{\mathrm{st}}^{2}t_{\mathrm{st}}}{Q_{0}}=\frac{50\times6.5^{2}\times8}{55}\mathrm{s}=307.3\mathrm{s}$$

电动机热积累定值 $H=\tau=307.3\mathrm{s}$

电动机过热报警值$(0.7\sim0.8)H=(0.7\sim0.8)\times307.3\mathrm{s}=215\sim245\mathrm{s}$

答案中 220 s 在范围内，选 A。

9-38：假设该电动机为异步电动机，装设负序过电流保护，负序过电流Ⅱ段保护采用定时限，可靠系数为 1.2，正常运行时最大负序电流约为电动机额定电流的 65%，则负序过电流保护Ⅰ段和Ⅱ段动作电流（电流互感器二次侧）应选取下列哪组数值？

（A）2.45 A，1.62 A　　（B）3.27 A，2.55 A

（C）3.04 A，1.85 A　　（D）3.46 A，1.93 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 585～586 页（第三版第 337 页）。

负序过电流保护Ⅰ段的动作电流：

$$I_{(2)\mathrm{I},\mathrm{op},\mathrm{k}}=\frac{I_{\mathrm{rM}}}{n_{\mathrm{TA}}}=\frac{196.11}{300/5}\mathrm{A}=3.27\mathrm{A}$$

已知可靠系数为 1.2，最大负序电流为电动机额定电流的 65%，负序过电流保护Ⅱ段的动作电流：

$$I_{(2)\mathrm{II},\mathrm{op},\mathrm{k}}=K_{\mathrm{rel}}\frac{I_{(2),\max}}{n_{\mathrm{TA}}}=K_{\mathrm{rel}}\times0.65\frac{I_{\mathrm{rM}}}{n_{\mathrm{TA}}}=1.2\times0.65\times\frac{196.11}{300/5}\mathrm{A}=2.55\mathrm{A}$$

9-39：假设该电动机为异步电动机，装设低电压保护，电动机在电压短时降低或中断后为了保证重要电动机自起动而断开次要电动机，低电压保护装置动作整定值和动作时间应选取下列哪组数值？（供配电 2008 年考题改编）

（A）45 V，0.5 s　　（B）45 V，0.05 s　　（C）65 V，1.1 s　　（D）65 V，0.5 s

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 587 页（第三版第 329 页）。

电动机在电压短时降低或中断后为了保证重要电动机自起动而断开次要电动机，低电压保护装置动作整定值：

$$U_{\mathrm{op},\mathrm{k}}=(0.65\sim0.70)U_{2,\mathrm{n}}=(0.65\sim0.70)\times100\mathrm{V}=65\sim70\mathrm{V}$$

保护装置动作时限：$t_{\mathrm{op}}=0.5\mathrm{s}$

9-40：假设该电动机为异步电动机，装设堵转保护，不引入转速开关触点，电动机最大起动时间为 10s，堵转保护装置动作整定值（电流互感器二次侧）和动作时间应选取下列哪组数值？

（A）2.43 A，2 s　　（B）3.43 A，4 s　　（C）7.5 A，6 s　　（D）5.5 A，8 s

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 587 页。

堵转保护的动作电流：

$$I_{\mathrm{op,k}}=\frac{(2\sim3)I_{\mathrm{rM}}}{n_{\mathrm{TA}}}=\frac{(2\sim3)\times196.11}{300/5}\ \mathrm{A}=6.54\sim9.81\ \mathrm{A}$$

保护装置动作时限：$t_{\mathrm{pe,s}}=(0.4\sim0.7)t_{\mathrm{st,max}}=(0.4\sim0.7)\times10\ \mathrm{s}=4\sim7\ \mathrm{s}$

9-41：假设该电动机为异步电动机，装设单相接地保护，10 kV 电网的总单相接地电容电流为 9.5 A，配电装置至电动机端的电缆长度为 0.23 km，忽略电动机本身的电容电流，单相接地保护装置动作整定值应选取下列哪组数值？（供配电 2009 年考题改编）

（A）7.13 A　　（B）8.25 A　　（C）9.31 A　　（D）5.5 A

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 302 页、第 584 页（第三版第 153 页、第 323 页）。

电动机回路电缆电容电流为

$$I_{\mathrm{CM}}=I_{\mathrm{C1}}=0.1U_{\mathrm{r}}l=0.1\times10\times0.23\ \mathrm{A}=0.23\ \mathrm{A}$$

电动机回路单相接地保护装置动作电流为

$$I_{\mathrm{op}}\leqslant\frac{I_{\mathrm{C\Sigma}}-I_{\mathrm{CM}}}{1.3}=\frac{9.5-0.23}{1.3}\ \mathrm{A}=7.13\ \mathrm{A}$$

例题 9-42～9-44：若已知某传动风机用 6 kV 同步电动机 TD/73/66-10，额定功率为 2500 kW，额定转速为 600 r/min。额定电流 $I_{\mathrm{rM}}=279$ A，起动电流倍数 $K_{\mathrm{st}}=6.5$，同步电抗 $X''_{\mathrm{d}}=0.154$，额定功率因数为 $\cos\varphi=0.9$，短路比 $K_{\mathrm{k,m}}=0.94$，电动机起动时间 $t_{\mathrm{st}}=12$ s，最小运行方式下电动机接线端三相短路电流初始值为 7330 A。6 kV 电网总单相接地电容电流为 9.5 A，配电装置至电动机端的电缆长度为 0.15 km。请回答下列问题。

9-42：下列保护中哪一项不是同步电动机专用保护？（供配电 2008 年考题改编）

（A）负序过电流保护　　（B）失步保护

（C）失磁保护　　（D）防止非同步冲击的断电失步保护

答案：【A】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

第 9.0.9 条　2 MW 及以上重要电动机，可装设负序电流保护。答案 A 不是同步电动机专用的保护。

第 9.0.1 条、第 9.0.6 条、第 9.0.7 条　失步保护、失磁保护、防止非同步冲击的断电失步保护是同步电动机专用的保护。

综上所述，选 A。

9-43：假设该电动机为隐极式同步电动机，则单相接地保护动作电流是下列何值？

（A）6.80 A　　（B）7.20 A　　（C）7.90 A　　（D）8.10 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 592 页、第 302 页、第 584 页（第三版第 153 页、第 323 页、第 329 页）。

同步电动机电容电流为

$$I'_{CM}=\frac{2.5KS_{rM}\omega U_{rM}\times10^{-3}}{\sqrt{3}U_{rM}(1+0.08U_{rM})}=\frac{2.5\times0.0187\times\dfrac{2.5}{0.9}\times314\times6\times10^{-3}}{\sqrt{3}\times6\times(1+0.08\times6)}\text{ A}=0.0474\text{ A}$$

同步电动机 6 kV 电缆电容电流：$I_C=0.1U_{rM}l=0.1\times6\times0.15\text{ A}=0.09\text{ A}$

同步电动机回路电容电流：$I_{CM}=I'_{CM}+I_C=(0.0474+0.09)\text{ A}=0.1374\text{ A}$

同步电动机单相接地保护动作电流：

$$I_{op}=\frac{I_{C\Sigma}-I_{CM}}{1.3}=\frac{9.5-0.1374}{1.3}\text{ A}=7.2\text{ A}$$

9-44：假设该电动机额定连续运行时的稳定温升为 50 K，电动机起动温升为 55 K。当电动机过热保护动作时发出报警信号，按 6 倍等效发热电流允许电动机过热考虑，电动机过热报警时间应选取下列哪项数值？

（A）4 s　　（B）6 s　　（C）8 s　　（D）10.6 s

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 586 页。

已知电动机起动时间为 12 s，电动机额定连续运行时的稳定温升为 50 K，电动机起动温升为 55 K，电动机热积累定值等于电动机发热时间常数，即

$$H=\tau=\frac{Q_nK_{st}^2t_{st}}{Q_0}=\frac{50\times6.5^2\times12}{55}\text{ s}=461\text{ s}$$

6 倍等效发热电流允许电动机时间：

$$t\leqslant\tau/[(I_{eq}/I_n)^2-1.05^2]=461/(6^2-1.05^2)=13.2\text{ s}$$

电动机过热报警时间为$(0.7\sim0.8)t=(0.7\sim0.8)\times13.2=9.24\sim10.56\text{ s}$

答案中 10.6 s 符合要求，选 D。

例题 9-45：若已知某传动风机用 6 kV 隐极式同步电动机 T630M1-4，额定功率为 1000 kW，额定转速为 1500 r/min，额定电流为 113 A，额定功率因数为 $\cos\varphi=0.9$，电流互感器变比为 100/5，可靠系数为 1.2，则磁平衡差动保护动作电流应选取下列哪组数值？（供配电 2009 年考题改编）

（A）0.13 A　　（B）0.915 A　　（C）0.391 A　　（D）0.55 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 589 页。

隐极同步电动机定子绕组每相零序电容：

$$C_{M0}=0.84KS_{rM}\frac{1}{\sqrt{U_{rM}(1+0.08U_{rM})}}=0.84K\frac{P_{rM}}{\cos\varphi}\frac{1}{\sqrt{U_{rM}(1+0.08U_{rM})}}$$

$$=0.84\times0.0187\times\frac{1.0}{0.9}\times\frac{1}{\sqrt{6\times(1+0.08\times6)}}\text{ mF}=\frac{0.0175}{\sqrt{6\times1.48}}\text{ mF}=\frac{0.0175}{2.979}\text{ mF}=0.00587\text{ mF}$$

可靠系数为 1.2，磁平衡差动保护动作电流为

$$I_{op}=1.31K_{rel}\omega C_{M(0)}U_{jN}=1.572\times314\times0.00587\times6.3\text{ A}=18.29\text{ A}$$

$$I_{op,k}=\frac{I_{op}}{n_{TA}}=\frac{18.29}{100/5}\text{ A}=0.9145\text{ A}$$

9.6 接地信号与接地保护

【知识点说明】

接地信号与接地保护属于冷门考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.8节。要求了解接地变压器保护配置与整定计算，接地信号、接地保护。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

参考书目：

《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584—2007

《大型发电机组继电保护整定计算与运行技术》第二版 高春如编著

例题 9-46~9-48：若某20 kV变电所内采用Z形接地变压器经小电阻接地，接地变压器容量为100 kV·A，有多条电缆出线，请回答关于接地变压器保护的相关问题。

9-46：在正常情况下接地变压器的继电保护配置中下列哪一项可不装设？

（A）过电流保护　　（B）电流速断保护

（C）纵联差动保护　　（D）零序电流Ⅰ段、Ⅱ段保护

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第618页。

第7.8.5节的表7.8-1中接地变压器的继电保护不需要设置纵联差动保护。

9-47：若该20 kV变电所最小运行方式下接地变压器低压侧的三相接地故障电流折算到高压侧保护安装处为2100 A，则接地变压器电流速断保护（变压器高压侧）的整定值及灵敏系数应为下列哪一项？

（A）19 A，81　　（B）26 A，70　　（C）32 A，67　　（D）48 A，57

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第618页。

接地变压器高压侧额定电流为

$$I_{\mathrm{n}}=\frac{S_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}U_{\mathrm{n}}}=\frac{100}{\sqrt{3}\times 20}\ \mathrm{A}=2.89\ \mathrm{A}$$

接地变压器电流速断保护（变压器高压侧）的整定值为

$$I_{\mathrm{opI}}=(7\sim 10)I_{\mathrm{n}}=(7\sim 10)\times 2.89\ \mathrm{A}=20.2\sim 28.9\ \mathrm{A}，\text{取}\ 26\ \mathrm{A}$$

灵敏系数为

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{I_{\mathrm{1k2,min}}}{I_{\mathrm{opI}}}=\frac{0.866\times 2100}{26}=70>2，\text{满足要求}$$

9-48：若该20 kV变电所有多条电缆出线，电缆的单相对地电容电流共计280 A（不考虑增容），最小运行方式下的单相接地故障电流为890 A，则接地变压器零序电流Ⅱ段保护的整定值及灵敏系数应为下列哪一项？

（A）402 A，2.43　　（B）420 A，2.12

（C）450 A，2.04　　（D）480 A，1.82

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第618页。

已知可靠系数为 1.5，接地变压器零序电流Ⅱ段保护的整定值为

$$I_{(0)\,\mathrm{Ⅱ}} \geqslant K'_{\mathrm{rel}} I_{\mathrm{C}} = 1.5 \times 280\ \mathrm{A} = 420\ \mathrm{A}$$

灵敏系数为

$$K_{\mathrm{sen}} = \frac{I_{\mathrm{k1,min}}}{I_{(0)\,\mathrm{Ⅱ}}} = \frac{890}{420} = 2.12 > 2$$，满足要求

9.7 自动装置

【知识点说明】

自动装置属于普通考点，依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.11 节。要求掌握备用电源自动投入保护、自动重合闸装置、自动低频低压减负荷装置原理和规定。

依据书目：

《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584—2007

《继电保护和安全自动装置技术规范》GB/T 14285—2006

《变压器及中低压网络数字式保护》许正亚编著

《大型发电机组继电保护整定计算与运行技术》第二版 高春如编著

《国家电网公司继电保护培训教材》（上、下册）

例题 9-49~9-52：某 110/10 kV 变电所，两台主变，两回 110 kV 电源进线，110 kV 内桥接线，10 kV 为单母线分段接线（分列运行），电气主接线如图 9-9 所示。110 kV 桥开关和 10 kV 分段开关均装设备用电源自动投入装置。架空线路 1 长 70 km，架空线路 2 长 30 km。该变电所主变压器负载率不超过 60%，系统基准容量为 100 MV·A。请回答下列问题。

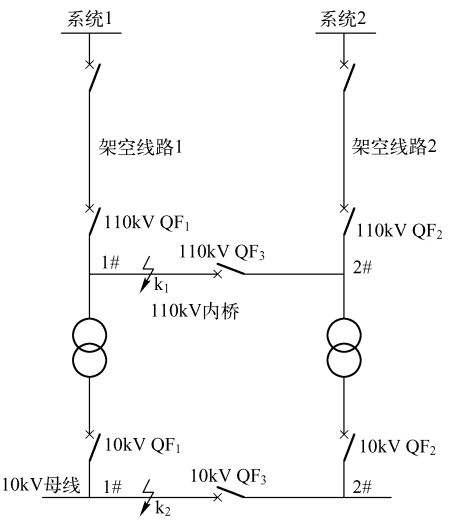


图 9-9　变电所电气主接线图

9-49：若系统 1 和系统 2 均为无穷大系统，该变电所发生下列哪种情况时，110 kV 桥开关自动投入？为什么？（发输电 2011 年考题）

（A）主变差动保护动作

（B）主变 110 kV 侧过电流保护动作

（C）110 kV 线路无短路电流，线路失压保护动作跳闸

（D）110 kV 线路断路器手动分闸

答案：【C】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

第 11.0.2 条及条文说明中，应保证在工作电源断开后投入备用电源。工作电源故障或断路器被错误断开时，自动投入装置应延时动作。手动断开工作电源、电压互感器回路断线和备用电源无电压情况下，不应启动自动投入装置。

答案 A、B 均为主变压器保护动作，10 kV 系统的备用电源自动投入装置，110 kV 电源均供电正常，不应启动自动投入装置。

答案 C 在 110 kV 线路失压保护动作，属于失去工作电源应投入备用电源。

答案 D 属于手动断开工作电源，不应启动自动投入装置。

综上所述，选 C。

9-50：若该变电站 10 kV 系统的主接线为单母线分段，工作中两电源互为备用，在电源进线处分别装设备用电源自动投入装置。下列哪项不满足作为备用电源和自动投入装置的要求？（供配电 2013 年考题改编）

（A）保证任意一段母线断开后，另一路电源有足够高的电压时才能投入自动装置的断路器

（B）保证任意一段母线上的电压，不论因何原因消失时，自动投入装置均应延时动作

（C）保证自动投入装置只动作一次

（D）电压互感器断线的情况下不应启动自动投入装置

答案：【B】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

第 11.0.2 条及条文说明中，手动断开工作电源、电压互感器回路断线和备用电源无电压情况下，不应启动自动投入装置，A、D 对；应保证自动投入装置只动作一次，C 对。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 637 页。

7.11.2.1 节中，工作电源或设备上的电压，不论何种原因消失，除有闭锁信号外，自动投入装置应延时动作，答案 B 缺少闭锁信号限制条文。

【知识点解析】

备用电源或备用设备的自动投入装置，应符合下列要求：

1）应保证在工作电源断开后投入备用电源。工作电源或设备上的电压，不论何种原因消失，除有闭锁信号外，自动投入装置应延时动作。

2）工作电源故障或断路器被错误断开时，自动投入装置应延时动作。

3）手动断开工作电源、电压互感器回路断线和备用电源无电压情况下，不应启动自动投入装置。

4）应保证自动投入装置只动作一次。

5）自动投入装置动作后，如备用电源或设备投到故障上，应使保护加速动作并跳闸。

6）自动投入装置中，可设置工作电源的电流闭锁回路。

7）一个备用电源或设备同时作为几个电源或设备的备用时，自动投入装置应保证在同一时间备用电源或设备只能作为一个电源或设备的备用。

9-51：若该变电所 110 kV 进线中，系统 1 为无穷大系统，系统 2 为一个热电厂的并网线，当非同步合闸的最大冲击电流超过规范规定的允许值时，该线路配置自动重合闸的正确原则为下列哪项？并说明根据和理由。（发输电 2010 年考题改编）

（A）设置不检查同步的三相重合闸　　（B）设置检查同步的三相重合闸

（C）设置同步检定和无压检定的三相自动重合闸　　（D）设置无压检定的三相重合闸

答案：【C】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

第 10.0.4 条中，双侧电源线路的自动重合闸方式的选择：并列运行的发电厂或电力网之间，具有两条联系的线路或三条不紧密联系的线路，当非同步合闸的最大冲击电流超过规范规定的允许值时，可采用同期检定和无压检定的三相自动重合闸。

9-52：继电保护和自动装置应满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求，下列哪一项不符合规范规定？

（A）继电保护和自动装置应具有自动在线检测、闭锁和装置异常或故障报警功能

（B）对相邻设备和线路有配合要求时，上下两级之间的灵敏系数和动作时间应相互配合

（C）当被保护设备和线路在保护范围内发生故障时，应具有必要的灵敏系数

（D）保护装置应能尽快地切除短路故障，当需要加速切除短路故障时，不允许保护装置无选择性地动作，但可利用自动重合闸或备用电源和内用设备的自动投入装置缩小停电范围

答案：【D】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008。

第 2.0.3 条中，继电保护和自动装置应满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求，并应符合下列规定：

1）继电保护和自动装置应具有自动在线检测、闭锁和装置异常或故障报警功能。

2）对相邻设备和线路有配合要求时，上下两级之间的灵敏系数和动作时间应相互配合。

3）当被保护设备和线路在保护范围内发生故障时，应具有必要的灵敏系数。

4）保护装置应能尽快地切除短路故障。当需要加速切除短路故障时，可允许保护装置无选择性地动作，但应利用自动重合闸或备用电源和备用设备的自动投入装置缩小停电范围。

答案 D 与原条文不符，选 D。

9.8　电流互感器和电压互感器选择（二次部分）

【知识点说明】

1）电流互感器的选择（二次部分）属于重要考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.7 节和 8.4 节。要求熟练掌握测量用电流互感器的二次负荷计算，保护用电流互感器的选择中额定二次极限电动势验算、10%误差曲线验算、二次负荷计算等。

2）电压互感器的选择（二次部分）属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.7 节和 8.4 节。要求掌握测量用电压互感器的选择要求，保护用电压互感器的选择要求。

3）《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）7.4 节增加了保护用电流互感器的选择中额定二次极限电动势验算，取消了 10%误差曲线验算内容，更加详细设计规定可参照《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》DL/T 866—2004。相关原理建议按照参考书目中学习。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》DL/T 866—2004

《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》崔家佩编著

《国家电网公司继电保护培训教材》（上、下册）

例题 9-53~9-54：有一台 10 kV、2500 kW 的异步电动机，$\cos\varphi=0.8$，效率为 0.92，起动电流倍数为 6.5，请回答以下问题。

9-53：若已知电动机设置计量用电流互感器，回路三相 Y 接线，电流互感器变比为 300/5，容量为 10 V·A，三相有功电度表负载为 6 V·A，接触电阻为 0.05 Ω，则连接导线的最大电阻应为下列何值？（发输电 2008 年考题改编）

（A）0.125 Ω　　（B）0.155 Ω　　（C）0.55 Ω　　（D）0.92 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 605 页（第三版第 440 页）。

查《配四》第 749 页表 8.3-5 中电流互感器三相星形接线时，导线接线系数为 1，仪表接线系数为 1，计量用电流互感器二次负荷为

$$Z_{\mathrm{b}}=K_{\mathrm{con2}}Z_{\mathrm{mr}}+K_{\mathrm{con1}}R_{\mathrm{cd}}+R_{\mathrm{t}}$$

推导出连接导线的最大电阻为

$$10/5^2\ \Omega=1\times6/5^2\ \Omega+1\times R_{\mathrm{cd}}+0.05\ \Omega$$

即

$$R_{\mathrm{cd}}=0.155\ \Omega$$

【知识点解析】

校验电流互感器的准确度时，电流互感器的实际二次负荷按下式计算：

$$Z_{\mathrm{b}}=K_{\mathrm{con2}}Z_{\mathrm{mr}}+K_{\mathrm{con1}}R_{\mathrm{cd}}+R_{\mathrm{t}}$$

式中，Z_{b} 为电流互感器的实际二次负荷（Ω）；K_{con2}、K_{con1} 分别为导线接线系数和仪表、继电器接线系数；Z_{mr} 为测量与计量仪表线圈阻抗（Ω）；R_{t} 为接触电阻，一般取 0.05~0.1 Ω；R_{cd} 为连接导线的电阻（Ω）。

9-54：如果该微机保护装置回路三相 Y 接线电流互感器变比为 300/5，容量为 30 V·A，该电流互感器与微机保护装置之间的控制电缆采用 KVV-4×2.5 mm^2，该微机保护装置的计算电阻与接触电阻之和为 0.55 Ω，忽略阻抗，则电流互感器至微机保护装置电缆的允许长度应为下列哪一项？（铜导线电阻率 0.0184 Ω·mm^2/m）（供配电 2014 年考题）

（A）52 m　　（B）74 m　　（C）88 m　　（D）163 m

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 605 页（第三版第

343～344 页）。

查表 7.7-2 中电流互感器三相星形接线时三相短路，继电器阻抗换算系数为 1，连接导线阻抗换算系数为 1，保护用电流互感器二次负荷为

$$Z_b = \sum K_{re} Z_r + K_{lc} R_l + R_c$$

推导出连接导线的最大电阻为

$$30/5^2\ \Omega = 1 \times R_l + 0.55\ \Omega$$

即

$$R_l = 0.65\ \Omega$$

计算电流互感器至微机保护装置电缆的允许长度为

$$l_{max} \leqslant S \frac{R_l}{\rho} = 2.5 \times \frac{0.65}{0.0184}\ \text{m} = 88.3\ \text{m}$$

【知识点解析】

1）保护用电流互感器的实际二次负荷按下式计算：

$$Z_b = \sum K_{re} Z_r + K_{lc} R_l + R_c$$

式中，Z_b 为电流互感器的实际二次负荷（Ω）；K_{re}、K_{lc} 分别为继电器阻抗换算系数和连接导线阻抗换算系数；Z_r 为测量与计量仪表线圈阻抗（Ω）；R_c 为接触电阻，一般取 0.05～0.1 Ω；R_l 为连接导线的电阻（Ω）。

2）电流互感器连线导线的最小允许截面可按下式计算：

$$S_{min} = \rho \frac{l}{R_{dx}}\ (\text{mm}^2)$$

连接导线的最大允许长度可按下式计算：

$$l_{max} = S \frac{R_{dx}}{\rho}\ (\text{m})$$

式中，S 为连接导线的截面（mm^2）；l 为连接导线的长度（m）；R_{dx} 为连接导线的电阻（Ω）；ρ 为电阻系数，铜为 0.0184×10^{-6} Ω·m，铝为 0.0310×10^{-6} Ω·m。

例题 9-55～9-60：已知某企业变电站变压器容量为 5000 kV·A，电压为 35/10.5 kV，Dyn11 接线，10 kV 侧为低电阻接地，若该变压器装设差动保护，35 kV 侧电流互感器连接线（单路）电阻为 1.43 Ω，10 kV 侧连接线电阻为 0.03 Ω，差动继电器高压侧绕组电阻为 0.1 Ω，低压侧绕组电阻为 0.025 Ω。最大运行方式下变压器低压侧故障通过高压侧的电流互感器一次电流为 1462 A。请回答以下问题。

9-55：变压器高压侧保护专用电流互感器电流比及保护专用电流互感器配置选择下列哪一组最合适？

（A）200/5 A，5P10　　（B）800 A/5 A，5P20

（C）2×200/5 A，5P10　　（D）600/5 A，5P20

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 601～603 页（第三版第 342 页）或《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）第 64 页表 20-13。

主变压器低压侧的额定电流：$I_N = \dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \dfrac{5\times10^3}{\sqrt{3}\times35}\ \text{A} = 82.25\ \text{A}$

可选电流互感器额定电流 200 A，变压器主回路宜采用复合误差较小的 5P 和 5PR 级电

流互感器。

综上所述，可选答案 200/5 A，5P10。

9-56：假设变压器高压侧保护专用电流互感器变比为 200/5，型号 5P10，容量为 30 V·A，内阻为 0.16 Ω，准确限值系数为 10。则额定二次极限电动势为下列哪一数值？

（A）65 V　　（B）68 V　　（C）70 V　　（D）75 V

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 601~603 页。

根据电流互感器型号已知准确限值系数为 10，变压器高压侧保护专用电流互感器额定准确极限电动势为

$$E_s = K_{alf} I_{sn}(R_{ct} + R_b) = 10 \times 5 \times (0.16 + 30/25)\ \text{V} = 68\ \text{V}$$

9-57：假设变压器高压侧保护专用电流互感器变比为 200/5，型号 5P10，容量为 30 V·A，内阻为 0.16 Ω，给定暂态系数为 1。则通过继电保护动作性能校验要求的二次感应电动势为下列哪一数值？

（A）61.8 V　　（B）63.8 V　　（C）70.2 V　　（D）73.5 V

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 601~603 页。

已知 35 kV 侧电流互感器连接线（单路）电阻为 1.43 Ω，差动继电器高压侧绕组电阻为 0.1 Ω，电流互感器内阻为 0.16 Ω，暂态系数为 1，通过继电保护动作性能校验要求的二次感应电动势为

$$E_s = KK_{pcf} I_{sn}(R_{ct} + R_b) = K\frac{I_{pcf}}{n_{TA}}(R_{ct} + R_b) = 1 \times \frac{1462}{200/5} \times (0.16 + 1.43 + 0.1)\ \text{V} = 61.8\ \text{V}$$

【知识点解析】

按额定二次极限电动势验算。对于低漏磁电流互感器可按额定二次极限电动势进行验算：

1）P 类电流互感器的额定二次极限电动势（E_{sl}）为（二次负荷仅计及电阻）

$$E_{sl} = K_{alf} I_{sn}(R_{ct} + R_{bn}) \tag{9-1}$$

式中，E_{sl}为额定二次极限电动势（V）；K_{alf}为准确限值系数；I_{sn}为额定二次电流（A）；R_{ct}为电流互感器二次绕组电阻（Ω）；R_{bn}为电流互感器额定负荷电阻（Ω）。

上述各参数制造部门应在产品说明书中标明。

2）继电保护动作性能校验要求的二次感应电动势（E_s）为

$$E_s = KK_{pcf} I_{sn}(R_{ct} + R_b) \tag{9-2}$$

式中，E_s为二次感应电动势（V）；K_{pcf}为保护校验系数，与继电保护动作原理有关；K为给定暂态系数；R_b为电流互感器实际二次负荷电阻（Ω）；

其他见式（9-1）。

3）电流互感器的额定二次极限电动势应大于保护校验要求的二次感应电动势，即

$$E_{sl} \geqslant E_s \tag{9-3}$$

9-58：若已知变压器设置纵联差动保护装置，最大运行方式下变压器外部短路时流过高压侧继电保护安装处的最大短路电流为 2300 A。若电流互感器型号为 LFZJB6-10，变比为 200/5（电流互感器 10%误差曲线见图 9-10），可靠系数为 1.3，则变压器高压侧纵联差动保护一次电流倍数和允许二次负荷为下列哪一项数值？（发输电 2012 年考题改编）

（A）15，0.6Ω　　（B）15，0.28Ω　　（C）11，0.52Ω　　（D）10，1.1Ω

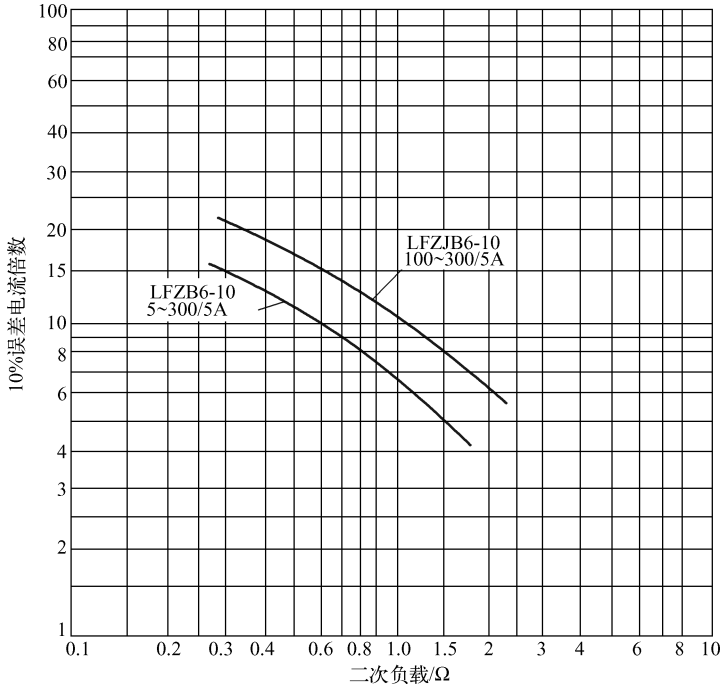


图 9-10　LFZB6-10、LFZJB6-10 型电流互感器 10%误差曲线

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）第 70 页或《工业与民用配电设计手册》第三版第 343 页。

纵联差动保护一次电流倍数为

$$m_{js}=\frac{K_k I_{d,max}}{I_e}=\frac{1.3\times2300}{200}=14.95$$

查图 9-10 中电流互感器 10%误差曲线 LFZJB6-10 型号对应的允许二次负荷约为 0.6Ω。

9-59：若已知变压器的无时限速断保护继电器整定电流为 50 A，动作时限为 0.5 s，采用 DL-11/200 过电流继电器。若电流互感器型号为 LFZB6-10，变比为 200/5（电流互感器 10%误差曲线见图 9-10），则无时限速断保护一次电流倍数和允许二次负荷为下列哪一项数值？（发输电 2012 年考题改编）

（A）15，0.6Ω　　（B）15，0.28Ω　　（C）11，0.55Ω　　（D）11，0.92Ω

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）第 70 页或《工业与民用配电设计手册》第三版第 343 页。

无时限速断保护一次电流倍数为

$$m_{js}=\frac{1.1I_{dz.bh}}{I_e}=\frac{1.1\times50}{5}=11$$

查图 9-10 中电流互感器 10%误差曲线 LFZB6-10 型号对应的允许二次负荷约为 0.55Ω。

9-60：若已知变压器高压侧用于后备保护的电流互感器二次负载能力为 10 V·A（三相星形接线），保护装置的第一整定值（变压器保护范围内三相短路差动保护动作）动作电流为 4 A，此时保护装置的二次负载为 8 V·A，若忽略接触电阻，则连接导线的最大电阻应为下列何值？（发输电 2008 年考题改编）

（A）0.125 Ω　　（B）0.28 Ω　　（C）0.55 Ω　　（D）0.92 Ω

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 605 页或《工业与民用配电设计手册》第三版第 344 页。

查表 7.7-2 中电流互感器三相星形接线时三相短路，继电器阻抗换算系数为 1，连接导线阻抗换算系数为 1，保护用电流互感器二次负荷为

$$Z_b = \sum K_{re} Z_r + K_{lc} R_l + R_c$$

推导出连接导线的最大电阻为

$$10/4^2\ \Omega = 1\times 8/4^2\ \Omega + 1\times R_l + 0$$

$$\Rightarrow R_l = 0.125\ \Omega$$

例题 9-61：某钢厂配电回路中电动机如图 9-11 所示，图中电流互感器 TA_1 为 ALH-0.66，150/5A，在准确度等级为 1.0 级时，额定容量为 5 V·A；机旁操作箱上电流表 PA_1 额定容量为 0.55 V·A，TA_1 到 PA_1 的距离为 50 m，忽略柜内导线及所有接触电阻，不计电抗，铜导体电阻率为 0.0184 mm^2/m。计算在电动机额定工作状态下，整个电流检测外部回路的损耗应为下列哪项数值，并判断电流互感器容量能否满足电流表指示精度要求。（供配电 2017 年考题）

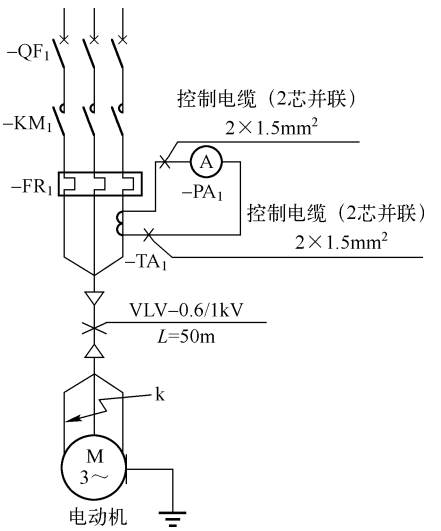


图 9-11　电动机配电回路图

（A）3.31 W，满足

（B）4.53 W，满足

（C）6.38 W，不满足

（D）7.38 W，不满足

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 748 页（第三版第 440 页）。

连接导线的电阻：$R_{cd} = \dfrac{\rho L}{S} = \dfrac{0.0184\times 50}{2\times 1.5}\ \Omega = 0.306\ \Omega$；接触电阻：$R_t = 0\ \Omega$

测量与计量仪表线圈阻抗（不计电抗）：$Z_{mr} = R_{mr} = \dfrac{S'}{I^2} = \dfrac{0.55}{5^2}\ \Omega = 0.022\ \Omega$

查《配三》表 8-21 中电流互感器单相接线时，导线接线系数为 2，仪表接线系数为 1，计量用电流互感器实际二次负荷为

$$Z_b = K_{con2} Z_{mr} + K_{con1} R_{cd} + R_t = (1\times 0.022 + 2\times 0.306 + 0)\ \Omega = 0.634\ \Omega$$

电动机额定电流：$I_e=\dfrac{P_e}{\sqrt{3}U_e\eta\cos\varphi}=\dfrac{45}{\sqrt{3}\times0.38\times0.9\times0.8}\text{A}=94.96\text{A}$

电流互感器实际二次电流：$I_{2e}=\dfrac{I_e}{n_{TA}}=\dfrac{94.96}{150/5}\text{A}=3.165\text{A}$

电流互感器实际二次容量：$S_{2e}=I_{2e}^2Z_b=3.165^2\times0.634\text{V}\cdot\text{A}=6.35\text{V}\cdot\text{A}$，大于电流互感器额定二次容量 5 V·A，该电流互感器不满足要求。

例题 9-62～9-64：某国外水电站安装的水轮发电机组，单机额定容量为 120 MW，发电机额定电压为 13.8 kV，$\cos\varphi=0.8$。发电机、主变压器采用发变组单元接线，未装设发电机断路器，主变高压侧三相短路时流过发电机的最大短路电流为 19.6 kA。发电机中性点接线及电流互感器配置如图 9-12 所示。

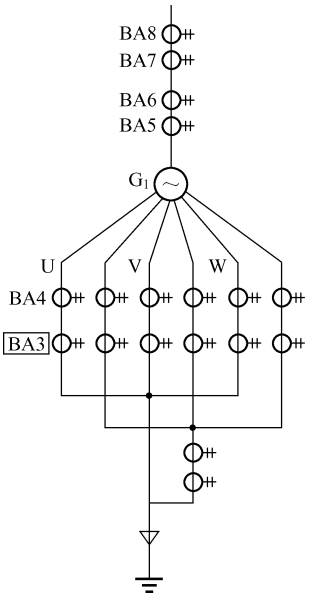


图 9-12　发电机中性点接线及电流互感器配置图

9-62：假如发电机出口电流互感器 BA8 采用 5P 级电流互感器，给定暂态系数 $K=10$，互感器实际二次负荷不大于额定二次负荷，试计算确定发电机出口中性点电流互感器 BA8、BA3 的变比以及发电机出口电流互感器的准确限制系数最小值，应为下列哪项。

（A）BA8 和 BA3 变比分别为 8000/1A，8000/1A，BA8 的准确限制系数为 20

（B）BA8 和 BA3 变比分别为 8000/1A，4000/1A，BA8 的准确限制系数为 20

（C）BA8 和 BA3 变比分别为 8000/1A，8000/1A，BA8 的准确限制系数为 30

（D）BA8 和 BA3 变比分别为 8000/1A，4000/1A，BA8 的准确限制系数为 30

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 601～603 页或《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》DL/T 866—2015。

发电机持续工作电流：$I_g=1.05\dfrac{P}{\sqrt{3}U_r\cos\varphi}=\dfrac{120}{\sqrt{3}\times13.8\times0.85}\text{kA}=6.2\text{kA}$，选择 8000/1 A；

BA3 处电流互感器的电流为发电机分支绕组电流，即 $0.5I_g=3.1\text{kA}$，选择 4000/1 A；

$KK_{pcf}=K\dfrac{I''_{k3max}}{I_{nr}}=10\times\dfrac{19600}{8000}=24.5$，BA8 的准确限制系数为 30。

综上所述，选 D。

9-63：假定该电站并网电压为 220 kV，220 kV 线路保护用电流互感器选用 5P30 级，变比为 500/1 A，额定二次容量为 20 V·A，二次绕组电阻为 6 Ω，给定暂态系数 $K=2$；线路距离保护第一段末端短路电流为 15 kA，保护装置安装处短路电流为 25 kA。计算该电流互感器允许接入的实际最大二次负载应为下列哪项。（发输电 2017 年考题）

（A）4.8 Ω　　（B）7 Ω　　（C）9.6 Ω　　（D）20 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 604～605 页或《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》DL/T 866—2015。

电流互感器的二次负荷阻抗：$R_b=\dfrac{S_2}{I_{2r}^2}=\dfrac{20}{1^2}\Omega=20\Omega$

额定二次极限感应电动势：$E_{sl}=K_{alf}I_{sn}(R_{ct}+R_b)=30\times1\times(6+20)\text{V}=780\text{V}$

在保护区末端故障时，I_{pcf}应为流过互感器最大短路电流。在保护安装点近处故障时，允许互感器误差超出规定值。继电保护动作性能校验要求的二次感应电动势：

$$K_{pcf}=\frac{I''_{k3max}}{I_{nr}}=\frac{15000}{500}=30$$

$$E_{sl}=780\text{V}\geqslant E_s=KK_{pcf}I_{sn}(R_{ct}+R'_b)=2\times30\times1\times(6+R')\Rightarrow R'\leqslant7\Omega$$

9-64：如发电机出口选用 5P 级电流互感器，三相星形连接。假定数字继电器线圈电阻为 1Ω，连接导线截面为 2.5mm²，铜导体导线长度为 200m，接触电阻为 0.1Ω。假设不计及继电器线圈电抗和导线电感的影响，计算单相接地时电流互感器实际二次负荷应为下列哪项。（发输电 2017 年考题）

（A）1.4Ω　　（B）2.5Ω　　（C）3.9Ω　　（D）4.9Ω

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 605 页或《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》DL/T 866—2015。

导线电阻：$R_l=\dfrac{l}{\gamma S}=\dfrac{200}{57\times2.5}\Omega=1.4\Omega$

实际二次负荷：$Z_b=\Sigma K_{re}Z_r+K_{lc}R_l+R_c=(1\times1+2\times1.4+0.1)\Omega=3.9\Omega$

例题 9-65～9-69：已知某企业变电所变压器容量为 800kV·A，电压为 10/0.4kV，Dyn11 接线，10kV 侧为低电阻接地，请回答关于电压互感器的问题。

9-65：若企业变电所变压器高压侧装设有功电能表等级为 1.0 级，下列关于电压互感器的二次回路电缆选择时，电缆允许电压降的要求中哪一项符合规范规定？（发输电 2010 年考题改编）

（A）不应大于额定二次电压的 3%　　（B）不应大于额定二次电压的 0.2%

（C）不应大于额定二次电压的 0.5%　　（D）不应超过额定电压的 5%

答案：【C】

解答过程：依据《电力装置的电气测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2008。

第 4.1.2 条中本企业属于负荷容量为 315kV·A 及以上的计费用户，属于Ⅲ类电能计量装置，其二次回路电压降不应大于额定二次电压的 0.5%。

9-66：下列关于电压互感器的二次绕组接地的要求中哪一项不符合规范规定？

（A）对于中性点有效接地或非有效接地系统，星形接线的电压互感器主二次绕组应采用中性点一点接地

（B）对非有效接地系统宜采用 B 相接地方式，也可采用中性点接地方式；对 V—V 接线的电压互感器，宜采用 B 相接地方式

（C）电压互感器剩余绕组的引出端之一应接地

（D）电压互感器接地点宜设在开关站电压互感器安装处接地网

答案：【D】

解答过程：依据《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB/T 50062—2008 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 752 页。

第 15.2.2-5 条中电压互感器接地点宜设在保护室。D 错。

【知识点解析】

电压互感器二次侧中性点或线圈引出端之一应接地。对有效接地系统，应采用二次侧中性点接地方式；对非有效接地系统宜采用 B 相接地方式，也可采用中性点接地方式；对 V-V 接线的电压互感器，宜采用 B 相接地方式。

电压互感器剩余绕组的引出端之一应接地。

电压互感器接地点宜设在保护室。

向交流操作的保护装置和自动装置供电的电压互感器，应通过击穿保险器接地。采用 B 相接地的电压互感器，其二次中性点也应通过击穿保险器接地。

9-67：若电压互感器有两条支路，控制回路支线熔断器额定电流为 2 A，测量计量回路支线熔断器额定电流为 2 A，则电压互感器的干线回路上熔断器额定电流宜选择下列哪一组最合适？

（A）2 A　　（B）4 A　　（C）6 A　　（D）8 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 756 页（第三版第 454 页）。

8.4.1.4 节中电压互感器的干线回路上熔断器额定电流应较支线上的大 2 级，所以宜选择为 6 A。

9-68：若电压互感器的干线断路器额定电流为 6 A，两相短路时的环路电阻为 0.15 Ω，则电压互感器的干线回路上低压断路器瞬时电流脱扣器的整定电流宜选择为哪一项数值？

（A）40 A　　（B）80 A　　（C）100 A　　（D）120 A

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 757 页（第三版第 455 页）。

电压互感器的干线回路上低压断路器瞬时电流脱扣器的整定电流为

$$I_{op}=\frac{15}{R_2}=\frac{15}{0.15}\text{ A}=100\text{ A}$$

9-69：若电压互感器的干线断路器额定电流为 6 A，则电压互感器的干线回路上低压断路器断开短路电流的时间宜选择为哪一项数值？（发输电 2011 年考题改编）

（A）15 ms　　（B）25 ms　　（C）30 ms　　（D）40 ms

答案：【A】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 757 页（第三版第 455 页）。

8.4.1.6 节中电压互感器的低压断路器断开短路电流的时间不应大于 20 ms。

【知识点解析】

电压互感器二次侧低压断路器的选择：

低压断路器瞬时脱扣器的动作电流应满足下列条件。

1）低压断路器脱扣器的动作电流，应按大于电压互感器二次回路的最大负荷电流来整定，即

$$I_{op} \geqslant I_{ld,max}$$

式中，I_{op}为低压断路器的动作电流（A）；$I_{ld,max}$为二次电压回路最大负荷电流（A）；

2）当电压互感器运行电压为90%额定电压时，二次电压回路末端两相经过渡电阻短路，而加于继电器绕组上的电压低于70%额定电压时（相当于低电压元件的动作值），低压断路器应瞬时动作。动作电流I_{op}的关系式如下：

$$U_{op,min} - K_{rel} I_{op} R_2 = 0.7 U_{sN}$$

经简化后

$$I_{op} = \frac{0.2 U_{sN}}{K_{rel} R_2} = \frac{15}{R_2}$$

式中，$U_{op,min}$为最小工作电压（V），取$0.9U_{sN}$；K_{rel}为可靠系数，取1.3；I_{op}为低压断路器瞬时电流脱扣器的整定电流（A）；R_2为两相短路时的环路电阻（Ω）；U_{sN}为电压互感器二次额定电压（V）。

3）瞬时电流脱扣器断开短路电流的时间应不大于20 ms。

4）低压断路器应附有用于闭锁有关保护误动的动合辅助触点和低压断路器跳闸时发报警信号的动断辅助触点。

5）瞬时电流脱扣器的灵敏系数K_{sen}，应按电压回路末端发生两相金属性短路时的最小短路电流来校验，即

$$K_{sen} = \frac{I_{2k,min}}{I_{op}}$$

式中，$I_{2k,min}$为二次电压回路末端发生两相短路时的最小短路电流（A）；I_{op}为低压断路器瞬时电流脱扣器的整定电流（A）；K_{sen}为灵敏系数，取$K_{sen} \geqslant 1.3$。

9.9 电气测量仪表装置二次回路的保护、控制、信号回路与综合自动化系统

【知识点说明】

1）电气测量与电能计量属于重要考点，依据《电力装置的电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2008和《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）8.3节。要求掌握电气测量装置、电能计量装置的仪表选择和配置规定。

2）二次回路的保护、控制、信号回路与综合自动化系统属于普通考点，依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）8.2~8.6节。要求掌握二次回路保护的配置与设备选择，二次回路电缆截面选择（详见第8章）；了解断路器的控制、信号回路，综合自动化系统。

依据书目：

《电力装置的电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2008

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）

《电力工程电气设计手册》（电气二次部分）

参考书目：

《火力发电厂、变电站二次接线设计技术》DL/T 5136—2012

《变电站二次回路及运行维护》王国光编著

《变电站综合自动化系统运行技术》王显平编著

例题 9-70~9-73：某企业从电网引来两路 6 kV 电源，变电所主接线如图 9-13 所示。工厂远离电源，系统容量为无穷大，请回答下列问题。

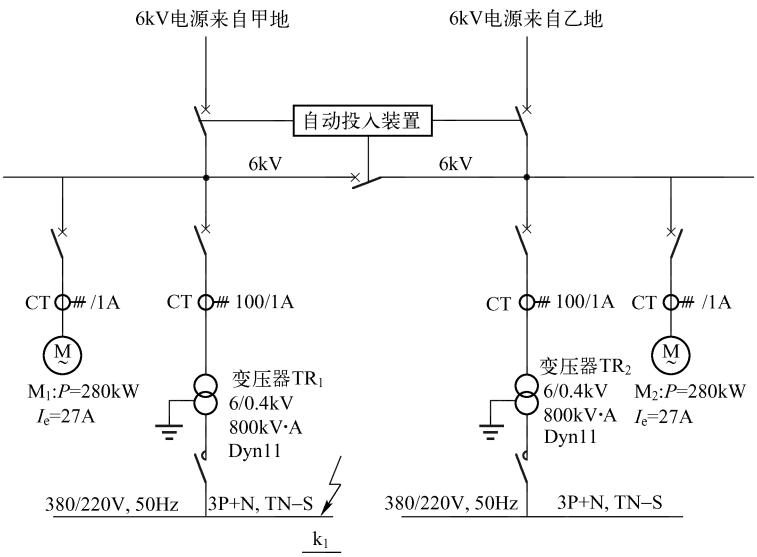


图 9-13　变电所主接线图

9-70：该企业计算有功功率为 6800 kW，年平均运行时间为 7800 h，年平均功率因数为 0.8。该企业的电能计量装置中有功电能表的准确度至少应为下列哪一项？（供配电 2013 年考题改编）

（A）0.2S　　（B）0.5S　　（C）1.0　　（D）2.0

答案：【C】

解答过程：依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB 50063—2017 条文说明第 4.1.2 条。

该企业电能计量装置应安装在 6 kV 侧，属于Ⅳ类电能计量装置，查条文说明表 1 中有功电能表应选用 1.0 级。

【知识点解析】

电能计量装置应符合现行行业标准《电能计量装置技术管理规程》DL/T 448—2016 的规定。其中，运行中的电能计量装置按计量对象重要程度和管理需要分为以下 5 类。

Ⅰ类电能计量装置：220 kV 及以上贸易结算用电能计量装置，500 kV 及以上考核用电能计量装置，计量单机容量 300 MW 及以上发电机发电量的电能计量装置。

Ⅱ类电能计量装置：10~220 kV 贸易结算用电能计量装置，220~500 kV 考核用电能计

量装置，计量单机容量100~300 MW发电机发电量的电能计量装置。

Ⅲ类电能计量装置：10~110 kV贸易结算用电能计量装置，10~220 kV考核用电能计量装置，计量100 MW以下发电机发电量、发电企业厂（站）用电量的电能计量装置。

Ⅳ类电能计量装置：380 V~10 kV电能计量装置，220 V单相供电、双向计量的电能计量装置。

Ⅴ类电能计量装置：220 V单相供电，单向计量的电能计量装置。

各类电能计量装置应配置的电能表、互感器的准确度等级不应低于表9-2所示值。

表9-2　电能计量装置准确度等级

电能计量装置类别	有功电能表	无功电能表	电压互感器	电流互感器
Ⅰ类	0.2S	2	0.2	0.2S
Ⅱ类	0.5S	2	0.2	0.2S
Ⅲ类	0.5S	2	0.5	0.5S
Ⅳ类	1	2	0.5	0.5S
Ⅴ类	2	—	—	0.5S

9-71：若该企业的6 kV母线上电压互感器接入的电压变送器输入电压倍数为1.5，则该企业的6 kV母线电压表的满刻度值为下列哪一项？

（A）6 kV　　（B）7 kV　　（C）8 kV　　（D）9 kV

答案：【D】

解答过程：依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017。

附录A中企业的6 kV母线电压表的满刻度值为

$$U_{b1}=KU_{1e}=1.5\times6\ \text{kV}=9\ \text{kV}$$

9-72：该企业变电所的6 kV侧应安装有功电能计量表的数量为下列哪一项？（不考虑母联断路器回路）（发输电2010年考题改编）

（A）6个　　（B）7个　　（C）8个　　（D）9个

答案：【A】

解答过程：依据《电力装置电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2017或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第746页表8.3-4（第三版第436页）。

有功电能计量表的数量：第4.1.2条中，双绕组厂（所）用变压器TR_1、TR_2的高压侧，2个；所用电源线路，2个；3 kV及以上高压电动机回路，2个；母联断路器回路不考虑。共计6个，选A。

9-73：关于变电所的二次接线设计中，下列做法哪一项不正确？

（A）有人值班的变电所，断路器的控制回路可不设监视信号

（B）有人值班的变电站，宜装设能重复动作、延时自动解除的就地事故信号装置

（C）无人值班的变电站，应装设满足远方运行要求的远动装置

（D）无人值班变电站的应能远方及就地控制所有的断路器、电动负荷开关

答案：【A】

解答过程：依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011。

第 3.10.5 条，断路器的控制回路，应有监视信号，A 错；第 3.10.2 条，无人值班变电站的应能远方及就地控制所有的断路器、电动负荷开关，D 对；第 3.10.4 条，有人值班的变电站，宜装设能重复动作、延时自动解除的就地事故信号装置。无人值班的变电站，应装设满足远方运行要求的远动装置，B、C 对。

例题 9-74：常规中央信号装置下列哪一项不属于其功能？（发输电 2008 年考题）

（A）断路器跳闸时，能瞬间发出音响信号及相应的灯光信号

（B）发生故障时，能瞬间发出预告音，并以光字牌显示故障性质

（C）能手动或自动复归音响，而保留光字牌信号

（D）在事故音响信号试验时，应停事故电钟

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 685 页（第三版第 447 页）。

8.2.2 节中，在事故音响信号试验时，不应停事故电钟，D 错。

例题 9-75：相电流不平衡的电力装置回路应装设三只电流表分别检测三相电流的条件是哪一项？

（A）三相负荷不平衡率大于 5%的 1200 V 及以上的电力用户线路

（B）三相负荷不平衡率大于 10%的 1200 V 及以上的电力用户线路

（C）三相负荷不平衡率大于 15%的 1200 V 及以上的电力用户线路

（D）三相负荷不平衡率大于 20%的 1200 V 及以上的电力用户线路

答案：【B】

解答过程：依据《电力装置的测量仪表装置设计规范》GB/T 50063—2008。

第 3.2.2 条中，三相负荷不平衡率大于 10%的 1200 V 及以上的电力用户线路，三相负荷不平衡率大于 15%的 1200 V 以下的供电线路，应测量三相交流电流，B 对。

例题 9-76：某 10/0.4 kV 企业变电所的 10 kV 侧使用手车式成套高压开关柜，进线断路器使用 VS1-12 型真空断路器，其控制信号回路如图 9-14 所示，图中点划框框内部分为 VSl-12 断路器手车内部回路，图中 S_8、S_9 为限位行程开关，SFA_1、SFA_2 为操作开关，SFB_1、SFB_2、SFB_3 为操作按钮，QF_1、QF_2 为直流空气断路器。请分析 VSl-12 断路器手车内部回路错误有几处。

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 690 页图 8.2-4。

VSl-12 型真空断路器操动机构的控制、信号回路如图 9-14 所示，当一个持久的合闸命令存在时，合闸整流桥输出经 K_0 的动断触点、S_1 动合触点、QA 动断触点、S_2 动合触点、Y_3 接通。当断路器合闸后，并联在合闸回路中的 QA 动合触点闭合，启动 K_0 线圈，K_0 的动断触点断开，动合触点闭合，断开合闸回路。若此时出现故障，继电保护动作，由于合闸回路已经断开，断路器无法合闸，从而防止了断路器的跳跃。

图 9-14 中防跳回路 S_1、S_2 的触点形式错误，应为动合触点，错误 2 处，选 B。

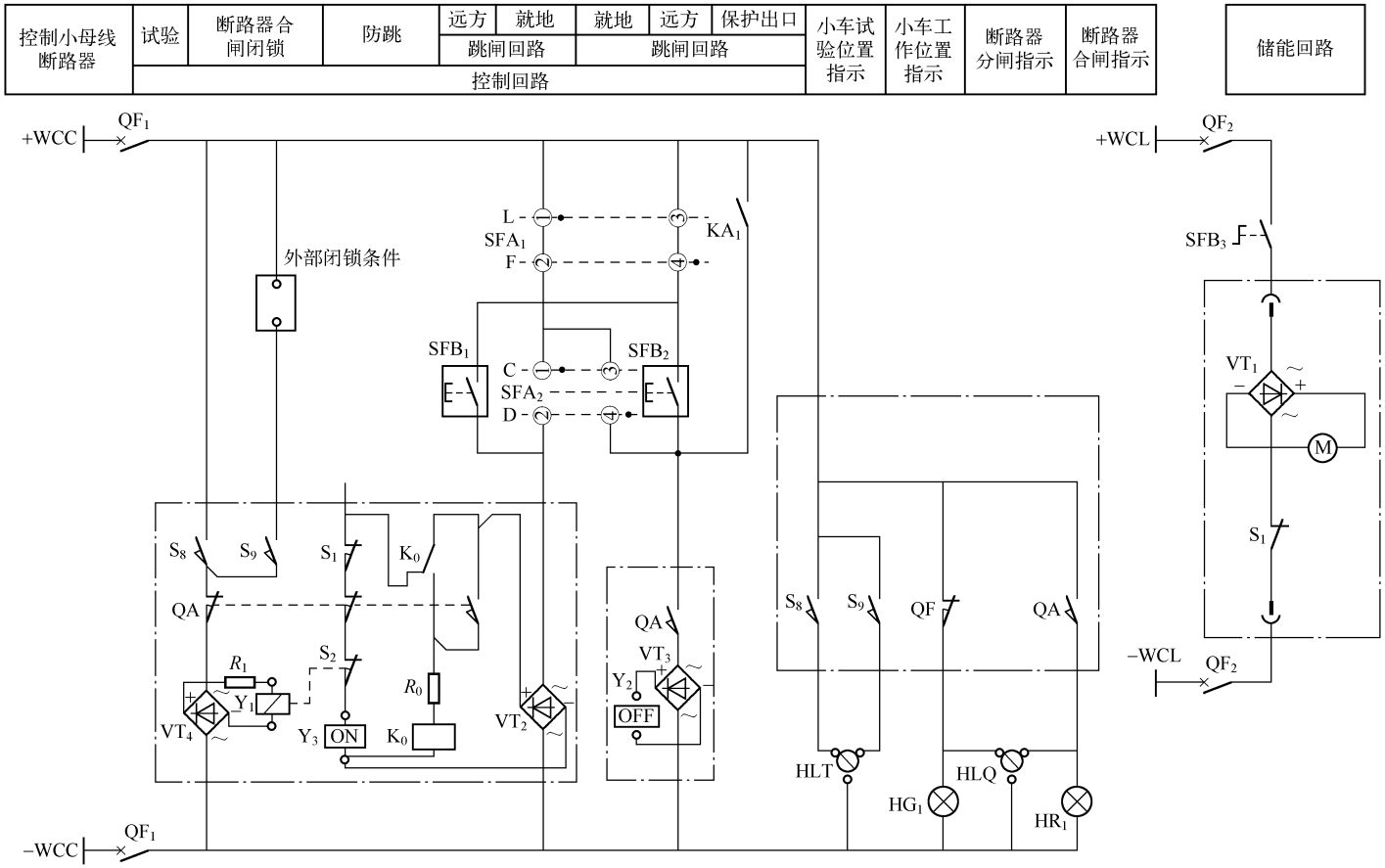


图9–14　VS1–12弹簧操动的断路器控制、信号回路图

第 10 章　直流电源系统与交流操作电源

【知识点导图】

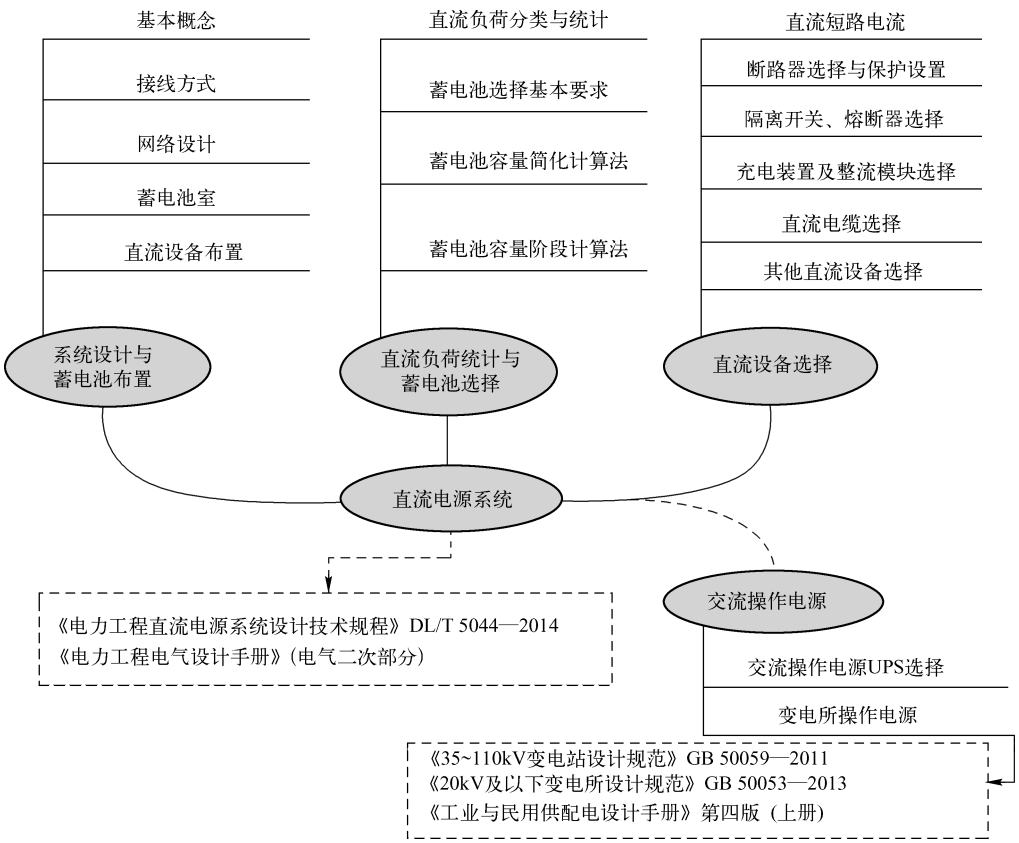


图 10-1　直流电源系统知识点导图

图 10-1 所示的直流电源系统知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点，由于规范和手册的更新对应内容有很大的改变，其中必考考点有直流负荷统计、蓄电池容量选择简化计算法、蓄电池容量选择阶段计算法和直流设备选择中直流电缆选择、断路器选择等；其中冷门考点有交流操作电源、蓄电池室布置、直流系统设计等。

10.1　直流电源系统设计与蓄电池布置

【知识点说明】

1)《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 对该部分内容做出了修订，增加了对直流网络接线形式和直流分电柜接线方式的要求；增加了蓄电池室布置安全性

的要求；增加了对直流电源系统网络规模和供电范围的限制等。

2）《电力工程直流系统设计手册》第二版和《蓄电池选用与安装 14D202-1》依旧使用 DL/T 5044—2004 版内容，请读者查看参考书目时注意。

依据书目：

《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014

参考书目：

《电力工程直流系统设计手册》第二版

《蓄电池选用与安装 14D202-1》

例题 10-1~10-3：某工程重要的 110 kV 变电站，其直流系统标称电压为 220 V，直流控制和动力负荷合并供电，选用阀控式铅酸蓄电池（贫液吸附式），请回答以下问题。

10-1：该变电所的蓄电池室内布置了 4 排蓄电池。其中 2 排靠墙布置，另 2 排合拢布置在中间，蓄电池室布置图如图 10-2 所示，长度单位为 mm。这个蓄电池室的 ABC 处的通道宽度为下列哪一项？

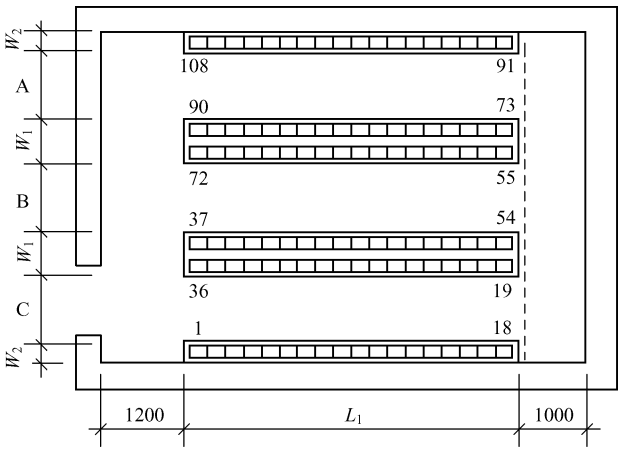


图 10-2　蓄电池室布置图

（A）800 mm，800 mm，1000 mm　　（B）1200 mm，800 mm，1000 mm

（C）1000 mm，1000 mm，1000 mm　　（D）800 mm，1200 mm，1000 mm

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014。

第 7.1.7 条　蓄电池室内应设有运行和检修通道。通道一侧装设蓄电池时，通道宽度不应小于 800 mm；两侧均装设蓄电池时，通道宽度不应小于 1000 mm。

10-2：若直流蓄电池容量为 800 A·h，下列蓄电池布置方式中哪一种是不合适的？

（A）蓄电池室内台上　　（B）蓄电池室内钢架上倾斜式安装

（C）直流电源成套装置柜内立式安装　　（D）蓄电池室内钢架上卧式安装

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第 6.10.2 条和第 7.2.2 条。直流电源成套装置阀控式密封铅酸蓄电池组容量应为 300 A·h 以下。

10-3：若该变电站装设两组 220V 蓄电池组时，其接线方式应为下列哪项？

（A）蓄电池采用单母线接线，两段母线之间应设联络电器。正常运行时，两段母线应分别独立运行

（B）蓄电池采用单母线分段接线，两段母线互联

（C）蓄电池采用单母线接线，正常运行时，两单母线互联

（D）蓄电池采用单母线分段接线，两段母线之间不互联

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第 3.5.2-1 条。

10.2 直流负荷统计与蓄电池选择

【知识点说明】

1）《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 对该部分内容做出了修订，调整部分直流负荷交流电源事故停电时间和负荷系数；对蓄电池容量计算方法以及附录、表格进行修改；调整对各类电力工程蓄电池组数设置等内容。其中最重要的是蓄电池容量选择计算方法的变更，将“电压控制法”改为“简化计算法”，保留了原“阶梯负荷法”计算方法。“简化计算法”和“阶梯负荷法”的差别在于：前者是以容量换算，并用初期（1 min）冲击负荷电流计算出实际最低母线电压值和校验计算容量；后者是用电流换算，事先设定母线电压值，不再进行校验计算，因最终选择的蓄电池容量总是大于计算值，所以，实际最低母线电压值只高不低，二者使用的系数可以互换，本质相同。直流负荷统计与蓄电池选择流程图详见图 10-3，本图根据 DL/T 5044—2014 绘制，可辅助考生对该内容的理解。

2）《电力工程直流系统设计手册》第二版关于各个直流负荷性质与计算要求写得更清晰明确，“阶梯负荷法”相关例题计算过程完整丰富。但是 DL/T 5044—2014 直流负荷的事故放电时间和负荷系数有新规定，如果两者冲突一定按照 DL/T 5044—2014 规定执行。

3）《工业与民用供配电设计手册》第四版对经常负荷中信号灯和位置指示器，控制、保护、监控系统的计算给出了详细计算方法；各型断路器操动机构给出了技术数据表；蓄电池容量选择的计算只给出了“阶梯负荷法”（也称电流换算法），对 DL/T 5044—2014“简化计算法”没有摘录；事故照明延续了第三版的内容，但在 DL/T 5044—2014 已经更改为直流应急照明。

依据书目：

《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014

《工业与民用供配电设计手册》第四版

参考书目：

《电力工程直流系统设计手册》第二版

例题 10-4~10-8：某城区 110/10.5 kV 无人值班变电站，全站设直流电源系统一套，直流系统电压采用 110 V，蓄电池拟选用阀控式密封铅酸蓄电池组。变电站直流负荷装置容量详见表 10-1，请解答下列问题。

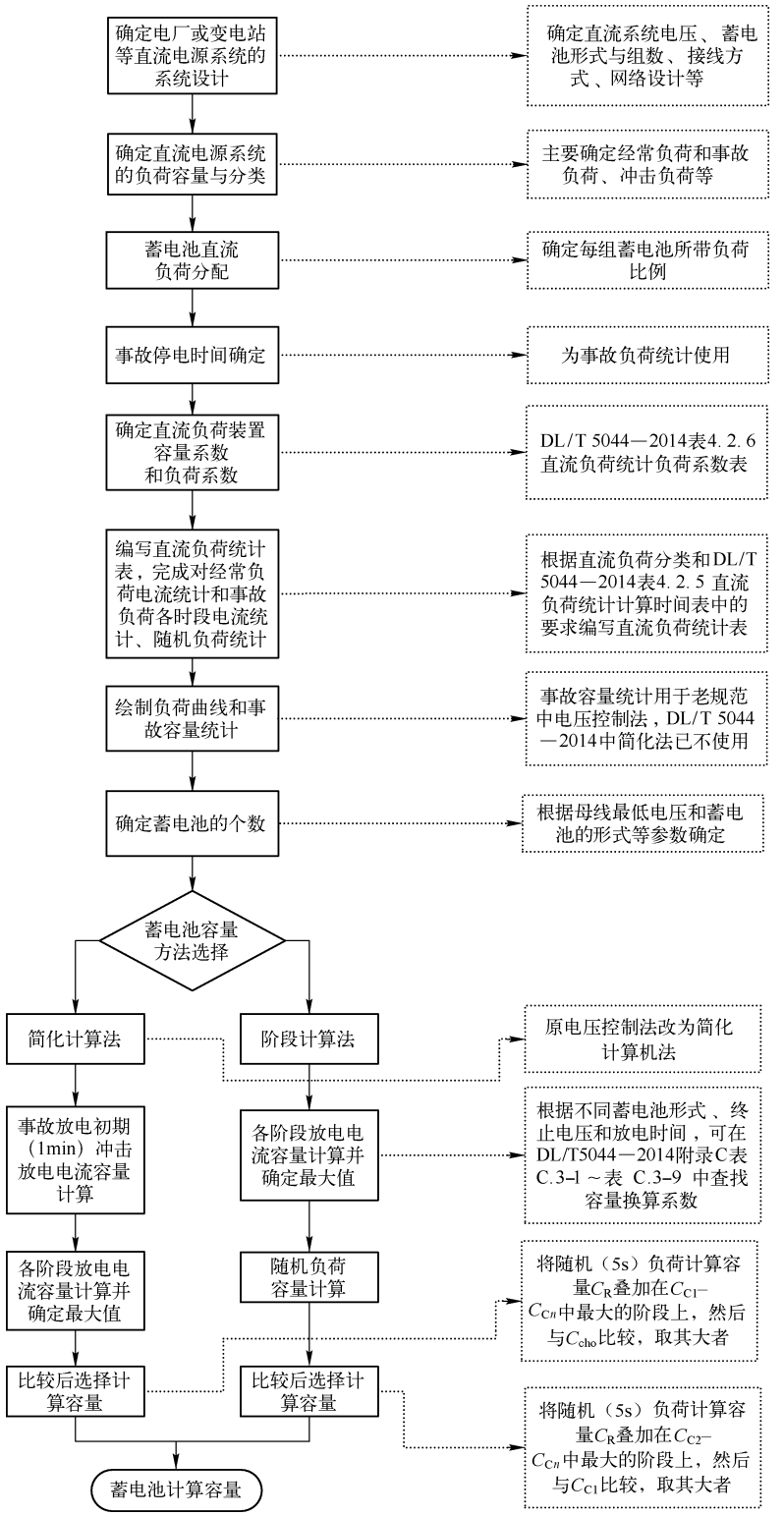


图 10-3　直流负荷统计与蓄电池选择流程图

表 10-1　直流负荷表

序号	负荷名称	装置容量/W	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{jc}/A	事故放电时间及对应放电电流/A				
						初期	事故持续时间/min			随机
						1 min	1~30	30~60	60~120	5 s
1	继电保护、信号测量负荷	1300								
2	监控系统负荷	2000								
3	高压断路器跳闸	6600								
4	高压断路器自投	600								
5	恢复供电高压断路器合闸	4200								
6	交流不间断电源	3000								
7	DC-DC 变换装置	3000								
8	直流应急照明	1000								
合计										

10-4：该变电站在事故全停电的情况下，与之相应持续放电时间的直流应急照明的事故放电容量是下列哪一项数值？

（A）18.2 A·h　　（B）11.5 A·h　　（C）12.5 A·h　　（D）16.5 A·h

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 4.2.5 和表 4.2.6。

无人值班变电所事故停电时间为 2 h，查表 4.2.5 直流应急照明为 2 h，查表 4.2.6 直流应急照明负荷系数为 1，因此放电容量为

$$I_j = k\frac{S}{U_n} = 1\times\frac{1000}{110}\text{ A} = 9.09\text{ A},\quad C = 9.09\times 2\text{ A}\cdot\text{h} = 18.18\text{ A}\cdot\text{h}$$

【知识点解析】

DL/T 5044—2014 条文说明第 4.2.2 条：无人值班变电站，考虑电气主接线和配电装置规模庞大、操作相对复杂以及维修人员前往变电站的路途时间等因素，事故停电时间按 2 h 计算。直流应急照明即 2004 版的事故照明，2014 版无人值班变电站直流应急照明负荷持续时间更改为 2 h。

10-5：该变电站的直流操作系统经常负荷电流 I_{jc} 是下列哪一项数值？

（A）$I_{jc}=68.91$ A　　（B）$I_{jc}=38.18$ A　　（C）$I_{jc}=43.46$ A　　（D）$I_{jc}=36.37$ A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 4.2.5 和表 4.2.6、附录 C 第 C.2.1 条。详见直流负荷统计表 10-2。

表 10-2　直流负荷统计表

序号	负荷名称	装置容量/W	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{jc}/A	事故放电时间及对应放电电流/A				
						初期	事故持续时间/min			随机
						1 min	1~30	30~60	60~120	5 s
1	继电保护、信号测量负荷	1300	0.6	7.09	7.09	7.09	7.09	7.09	7.09	
2	监控系统负荷	2000	0.8	14.55	14.55	14.55	14.55	14.55	14.55	
3	高压断路器跳闸	6600	0.6	36		36				
4	高压断路器自投	600	1	5.45		5.45				
5	恢复供电高压断路器合闸	4200	1	38.18						38.18
6	交流不间断电源	3000	0.6	16.36		16.36	16.36	16.36	16.36	
7	DC-DC 变换装置	3000	0.8	21.82	21.82	21.82	21.82	21.82	21.82	
8	直流应急照明	1000	1	9.09		9.09	9.09	9.09	9.09	
合计					43.46	110.36	68.91	68.91	68.91	38.18

【知识点解析】

经常负荷是指在直流电源系统正常和事故工况下均应可靠供电的负荷，其主要包括长明灯、连续运行的直流电动机、逆变器、电气控制、保护装置、DC-DC 变换装置、热工控制负荷等。

计算电流=直流负荷计算容量/标称电压=装置容量×负荷系数/标称电压(A)

10-6：该变电站在事故全停电的情况下事故持续放电时间为 1 min 时的事故放电电流是下列哪一项数值？

（A）43.46 A　　（B）110.36 A　　（C）38.18 A　　（D）68.91 A

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 4.2.5 和表 4.2.6、附录 C 第 C.2.1 条。详见直流负荷统计表 10-2。

【知识点解析】

事故初期（1 min）的冲击负荷应按如下原则统计：

1）备用电源断路器应按备用电源实际自投断路器台数统计。断路器自投是指厂（所）备用电源自动投入装置动作的断路器合闸，实际动作的断路器，其台数与实际变电所站用电接线运行方式有关，一般为 2 台，最多为 3 台。

2）低电压、母线保护、低频减载等跳闸回路应按实际数量统计。

3）电气及热工的控制、信号和保护回路等应按实际负荷统计。

4）事故初期（1 min）中需要起动的直流电动机按照起动电流统计。

10-7：该变电站在事故全停电的情况下，事故持续放电时间为 60~120 min 时的事故放电电流是下列哪一项数值？

（A）36.37 A　　（B）68.91 A　　（C）110.36 A　　（D）38.18 A

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 4.2.5 和

表 4.2.6、附录 C 第 C.2.1 条。详见直流负荷统计表 10-2。

【知识点解析】

事故持续放电时间对应的事故放电电流值是该事故持续放电时间时各种负荷事故放电电流的合计，也是事故放电电流放电曲线基础数据，本题的事故放电电流放电曲线如图 10-4 所示。

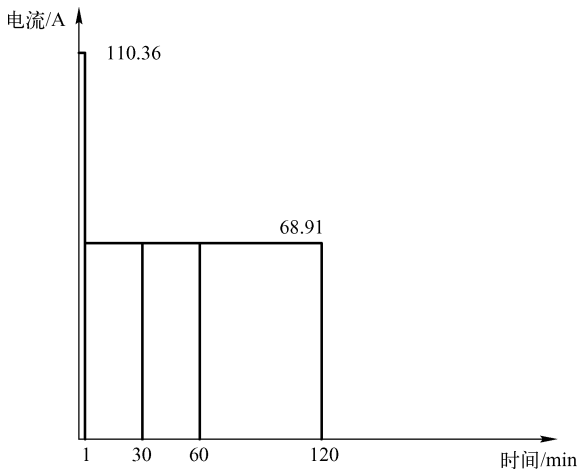


图 10-4　事故放电电流放电曲线

10-8：该变电站在事故全停电的情况下与之对应事故持续放电时间的全部负荷放电容量是下列哪一项数值？

（A）180.2 A·h

（B）121.5 A·h

（C）137.82 A·h

（D）166.5 A·h

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 4.2.5 和表 4.2.6、附录 C 第 C.2.1 条。详见直流负荷统计表 10-2。

无人值班变电所事故停电时间为 2 h，1~120 min 事故放电电流一直为 68.91 A，因此放电容量为

$$C_{\Sigma}=68.91\times2\ \text{A}\cdot\text{h}=137.82\ \text{A}\cdot\text{h}$$

【知识点解析】

当事故负荷在放电期间变化时，一般多为阶梯形负荷曲线，当不是阶梯形时，也可近似地用阶梯形代替。对于阶梯形负荷，可采用分段计算法计算。

对图 10-5 所示的阶梯负荷图，有 n 个时段 m_1、m_2、…、m_i、…、m_n，划分为 n 个计算分段 t_1、t_2、…、t_a、…、t_n。

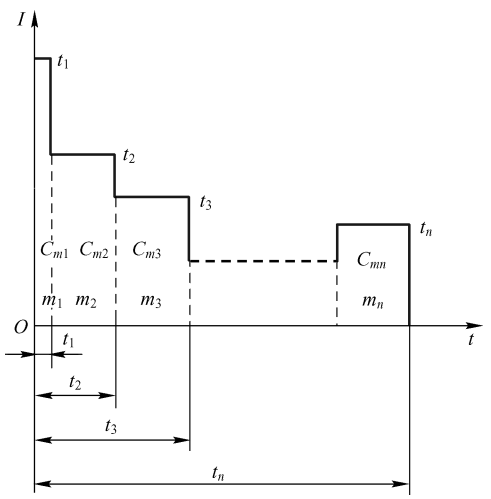


图 10-5　阶梯负荷分段计算的说明图

任意一个时段 m_i 的放电容量为

$$C_{mi}=I_iT_{mi}$$

从放电开始，到包含时段 m_i 的任意分段 t_a 结束，总的负荷容量为

$$C_{sa}=\sum_{i=1}^{a}C_{mi}\Big|_{a=1,2,\cdots,n}$$

在计算分段 t_a 内，所需要的蓄电池容量计算值为

$$C_{ca}=\frac{K_{\text{rel}}C_{sa}}{K_{cca}}\Bigg|_{a=1,2,\cdots,n}$$

其中容量系数 K_{cca} 按计算分段的时间 t_a 决定。

例题 10-9：某无人值守 110 kV 变电站，直流系统标称电压为 220 V，采用直流控制与动

力负荷合并供电。蓄电池采用阀控式密封铅酸蓄电池（贫液），容量为 300 A·h，单体 2 V。该系统直流负荷统计如下：控制与保护装置容量 2 kW，断路器跳闸装置容量 0.5 kW，恢复供电重合闸装置容量 0.8 kW，直流应急照明装置容量 2 kW，交流不间断电源（UPS）装置容量 1 kW。采用简化计算法计算蓄电池 10 h 放电率容量时，其计算容量值最接近下列哪项数值？（放电终止电压取 1.85 V）（供配电 2017 年考题）

（A）70 A·h　　（B）73 A·h　　（C）85 A·h　　（D）88 A·h

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014　附录 C。第 4.2.1 条，变电站蓄电池直流负荷统计见表 10-3。

表 10-3　直流负荷表

序号	负荷名称	装置容量/W	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{jc}/A	事故放电时间及对应放电电流/A				
						初期	事故持续时间/min			随机
						1 min	1~30	30~60	60~120	5 s
1	控制与保护负荷	2000	0.6	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45	
2	高压断路器跳闸	500	0.6	1.36		1.36				
3	恢复供电高压断路器合闸	800	1	3.64						3.64
4	交流不间断电源	1000	0.6	2.73		2.73	2.73	2.73	2.73	
5	直流应急照明	2000	1	9.09		9.09	9.09	9.09	9.09	
合计					5.45	18.36	17.27	17.27	17.27	3.64

简化计算法计算蓄电池 10 h 放电率容量：

1）查表事故放电初期（1 min）冲击放电电流 $I_{cho}=18.36$ A，容量换算系数 $K_{cho}=1.24$。

$$C_{cho}=K_k\frac{I_{cho}}{K_{cho}}=1.4\times\frac{18.36}{1.24}\text{ A}\cdot\text{h}=20.73\text{ A}\cdot\text{h}$$

2）按第一阶段计算容量：放电电流 $I_1=17.27$ A；查表 C.3-3，$t=30$ min 容量换算系数 $K_{c1}=0.78$。

$$C_{c1}=K_k\frac{I_1}{K_c}=1.4\times\frac{17.27}{0.78}\text{ A}\cdot\text{h}=31\text{ A}\cdot\text{h}$$

3）按第二阶段计算容量：放电电流 $I_2=17.27$ A；查表 C.3-3，$t=60$ min 容量换算系数 $K_{c1}=0.54$、$t=30$ min 容量换算系数 $K_{c2}=0.78$。

$$C_{c2}=K_k\left(\frac{I_1}{K_{c1}}+\frac{I_2-I_1}{K_{c2}}\right)=1.4\times\left(\frac{17.27}{0.54}+\frac{17.27-17.27}{0.78}\right)\text{ A}\cdot\text{h}=44.77\text{ A}\cdot\text{h}$$

4）按第三阶段计算容量：放电电流 $I_3=17.27$ A；查表 C.3-3，$t=120$ min 容量换算系数 $K_{c1}=0.334$、$t=90$ min 容量换算系数 $K_{c2}=0.428$、$t=60$ min 容量换算系数 $K_{c3}=0.54$。

$$C_{c3}=K_k\left(\frac{I_1}{K_{c1}}+\frac{I_2-I_1}{K_{c2}}+\frac{I_3-I_2}{K_{c3}}\right)=1.4\times\left(\frac{17.27}{0.344}+\frac{17.27-17.27}{0.428}+\frac{17.27-17.27}{0.54}\right)\text{ A}\cdot\text{h}=70.28\text{ A}\cdot\text{h}$$

各个阶段计算容量最大值是70.28 A·h。

5）随机（5 s）阶段计算容量：放电电流$I_1=3.64$ A；查表C.3-3，$t=5$ s容量换算系数$K_{cr}=1.34$。

$$C_r=\frac{I_r}{K_{cr}}=\frac{38.18}{1.34}\text{ A}\cdot\text{h}=2.72\text{ A}\cdot\text{h}$$

$$C_r+C_{c\,max}=(2.72+70.28)\text{ A}\cdot\text{h}=73\text{ A}\cdot\text{h}>C_{cho}=20.73\text{ A}\cdot\text{h}$$

所以蓄电池的选择容量是73 A·h，选B。

【知识点解析】

（1）直流负荷统计（见表10-4）

表10-4　直流负荷统计表（用于简化计算法）

序号	负荷名称	装置容量/kW	负荷系数	计算电流/A	经常负荷电流/A	事故放电时间及放电电流/A					
						初期	持续/min				随机
						1 min	1~30	30~60	60~120	120~180	5 s
					I_{jc}	I_{cho}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_r
1											
2											
…											
合计											

（2）容量换算系数

容量换算系数：计算容量时，根据不同蓄电池形式、终止电压和放电时间，可在DL/T 5044—2014附录C表C.3-1~表C.3-9中查找容量换算系数，容量换算系数可按下式计算：

$$K_c=I_t/C_{10}$$

式中，K_c为容量换算系数（1/h）；I_t为事故放电时间t小时的放电电流（A）；C_{10}为蓄电池10 h放电率标称容量（A·h）。

简化法只有1 min、0.5 h、1.0 h、2.0 h等整数计算时间；阶梯计算法会有29 min和59 min等非整数的计算时间。

（3）蓄电池容量简化计算法

1）满足事故放电初期（1 min）冲击放电电流容量要求，初期（1 min）冲击蓄电池10 h（或5 h）放电率计算容量应按下式计算：

$$C_{cho}=K_k\frac{I_{cho}}{K_{cho}}$$

2）满足事故全停电状态下持续放电容量要求，不包括初期1 min冲击放电电流，各个阶段计算容量应按下列公式计算：

第一阶段计算容量

$$C_{c1}=K_k\frac{I_1}{K_{c1}}$$

第二阶段计算容量

$$C_{c2} \geqslant K_k \left[\frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) \right]$$

第三阶段计算容量

$$C_{c3} \geqslant K_k \left[\frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) + \frac{1}{K_{c3}} (I_3 - I_2) \right]$$

第 n 阶段计算容量

$$C_{cn} \geqslant K_k \left[\frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) + \cdots + \frac{1}{K_{cn}} (I_n - I_{n-1}) \right]$$

随机负荷计算容量

$$C_r = \frac{I_r}{K_{cr}}$$

将 C_r 叠加在 $C_{c1} \sim C_{cn}$ 中最大的阶段上，然后与 C_{cho} 比较，取较大值，即为蓄电池的计算容量。

式中，C_{cho} 为初期（1 min）冲击蓄电池 10 h（或 5 h）放电率计算容量（A·h）；K_k 为可靠系数，取 1.40；I_{cho} 为初期（1 min）冲击放电电流（A）；K_{cho} 为初期（1 min）冲击负荷的容量换算系数（1/h）；$C_{c1} \sim C_{cn}$ 为蓄电池 10 h（或 5 h）放电率各阶段的计算容量（A·h）；$I_1 \sim I_n$ 为各阶段的负荷电流（A）；K_{c1} 为各计算阶段中全部放电时间的容量换算系数（1/h）；K_{c2} 为各计算阶段中除第 1 阶段时间外放电时间的容量换算系数（1/h）；K_{c3} 为各计算阶段中除第 1、2 阶段时间外放电时间的容量换算系数（1/h）；K_{cn} 为各计算阶段中最后 1 个阶段放电时间的容量换算系数（1/h）；C_r 为随机负荷计算容量（A·h）；I_r 为随机负荷电流（A）；K_{cr} 为随机（5 s）冲击负荷的容量换算系数（1/h）。

（4）简化法各阶段计算时间与容量换算系数设定

以无人值守变电站为例说明简化法各阶段计算时间与容量换算系数之间关系，见表 10-5 和图 10-6。

表 10-5　无人值守变电站简化法各阶段计算时间与容量换算系数设定表

事故电流	事故电流变化	事故时间阶段/min	事故分段时间/min	容量换算系数
第一阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 30$	$t_{11} = M_1 = 30$	K_{c1}
第二阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 30$	$t_{21} = M_1 + M_2 = 60$	K_{c1}
I_2	$I_2 - I_1$	$M_2 = 30$	$t_{22} = M_2 = 30$	K_{c2}
第二阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 30$	$t_{31} = M_1 + M_2 + M_3 = 120$	K_{c1}
I_2	$I_2 - I_1$	$M_2 = 30$	$t_{32} = M_2 + M_3 = 90$	K_{c2}
I_3	$I_3 - I_2$	$M_3 = 60$	$t_{33} = M_3 = 60$	K_{c3}
随机阶段				
I_r	I_r	$M_r = 5$ s	$t_r = M_r = 5$ s	K_{cr}

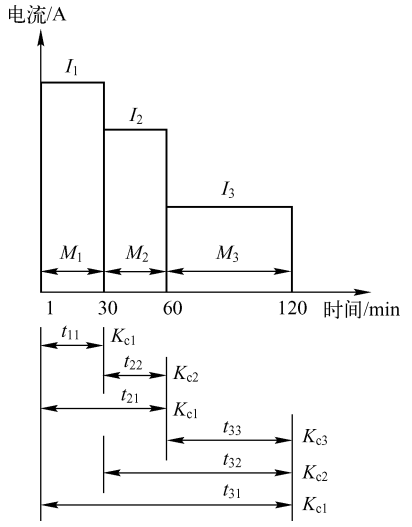


图 10-6　无人值守变电站简化法各阶段计算时间与容量换算系数设定示意图

例题 10-10：某 220 kV 无人值守变电站，直流系统标称电压为 220 V，直流控制与动力负荷合并供电，直流系统设 2 组蓄电池，蓄电池选用阀控式密封铅酸蓄电池（贫液，单体 2 V），不设端电池。已知直流负荷统计见表 10-6。若蓄电池所谓放电终止电压为 1.87 V，采用简化计算法，按事故放电初期（1 min）冲击条件选择，其蓄电池 10 h 放电率计算容量应为下列哪项数值？（计算结果保留两位小数）（发输电 2017 年考题）

表 10-6　直流负荷统计表

负 荷 名 称	负荷容量/kW
智能装置、智能组件装置容量	3
控制保护装置容量	3
高压断路器跳闸	13.2（仅在事故放电初期计及）
交流不间断电源装置容量	2×10（负荷平均分配在 2 组蓄电池上）
直流应急照明装置容量	2

（A）108.51 Ah　　（B）136.21 Ah　　（C）168.26 Ah　　（D）22.19 Ah

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014。

第 4.2.1 条，变电站一组蓄电池直流负荷统计见表 10-7。

表 10-7　蓄电池直流负荷统计表

负 荷 名 称	装置容量/kW	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{je}/A	事故放电时间及对应放电电流/A				
					初期	事故持续时间/min			随机
					1 min	1~30	30~60	60~120	5 s
智能装置、智能组件装置	3	0.8	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	
控制保护装置	3	0.6	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	
高压断路器跳闸	13.2	0.6	36		36				

（续）

负荷名称	装置容量/kW	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{jc}/A	事故放电时间及对应放电电流/A				
					初期	事故持续时间/min			随机
					1 min	1~30	30~60	60~120	5 s
交流不间断电源装置	10	0.6	27.27		27.27	27.27	27.27	27.27	
直流应急照明装置	2	1	9.09		9.09	9.09	9.09	9.09	
合计				19.09	91.45	55.45	55.45	55.45	

查表事故放电初期（1 min）冲击放电电流 $I_{cho}=91.45$ A，表 C.3-3 容量换算系数 $K_{cho}=1.18$。

$$C_{cho}=K_k\frac{I_{cho}}{K_{cho}}=1.4\times\frac{91.45}{1.18}\text{ A}\cdot\text{h}=108.5\text{ A}\cdot\text{h}$$

例题 10-11~10-15：某城区 110/10.5 kV 无人值班变电站，全站设直流操作系统，其直流负荷同例题 10-5 见表 10-2，直流系统标称电压采用 110 V，蓄电池拟选用阀控式密封铅酸蓄电池组（贫液）1 组，单体 2 V 放电终止电压为 1.85 V。按照阶段计算法进行蓄电池容量计算，并回答以下问题。

10-11：阀控式密封铅酸蓄电池单体 2 V 放电终止电压为 1.85 V，单体浮充电电压为 2.23 V，蓄电池个数是下列哪一项数值？

（A）52 个　　（B）50 个　　（C）53 个　　（D）54 个

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 式（C.1.1-1）。

蓄电池组个数 $n=1.05U_n/U_f=1.05\times110/2.23$ 个 $=51.79$ 个，取 52 个，此时，$U_m=1.85$ V $\geqslant0.875U_n/n=0.875\times110/52$ V $=1.85$ V，终止电压满足要求，与表 C.1.4-1 对应。

10-12：假设阀控式密封铅酸蓄电池满足事故全停电状态下持续放电容量要求，第一阶段计算容量最大值是下列哪一项数值？

（A）142.2 A·h　　（B）115.5 A·h　　（C）124.6 A·h　　（D）160.5 A·h

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 C.3-3 和式（C.2.3-7）。

查表 10-2 事故放电初期（1 min）冲击放电电流 $I_1=110.36$ A；容量换算系数 $K_c=1.24$，则

$$C_{c1}=K_k\frac{I_1}{K_c}=1.4\times\frac{110.36}{1.24}\text{ A}\cdot\text{h}=124.6\text{ A}\cdot\text{h}$$

10-13：假设阀控式密封铅酸蓄电池满足事故全停电状态下持续放电容量要求，除第一阶段外其他各阶段计算容量最大值是下列哪一项数值？

（A）124.6 A·h　　（B）278.02 A·h　　（C）281.9 A·h　　（D）216.5 A·h

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 表 C.2.1-1、式（C.2.3-8）~式（C.2.3-11）。

各个阶段计算容量应按下式计算：

第二阶段计算容量：事故放电初期（1 min）冲击放电电流 $I_1=110.36$ A，放电电流 $I_2=68.91$ A；查表 C.3-3 得 $t=30$ min 容量换算系数 $K_{c1}=0.78$、$t=29$ min 容量换算系数 $K_{c2}=0.80$，则

$$C_{c2}=K_k\left(\frac{I_1}{K_{c1}}+\frac{I_2-I_1}{K_{c2}}\right)=1.4\times\left(\frac{110.36}{0.78}+\frac{68.91-110.36}{0.80}\right)\text{A}\cdot\text{h}=125.54\text{A}\cdot\text{h}$$

第三阶段计算容量：放电电流 $I_3=68.91$ A；查表 C.3-3 得 $t=60$ min 容量换算系数 $K_{c1}=0.54$、$t=59$ min 容量换算系数 $K_{c2}=0.558$、$t=30$ min 容量换算系数 $K_{c3}=0.78$，则

$$C_{c3}=K_k\left(\frac{I_1}{K_{c1}}+\frac{I_2-I_1}{K_{c2}}+\frac{I_3-I_2}{K_{c3}}\right)=1.4\times\left(\frac{110.36}{0.54}+\frac{68.91-110.36}{0.558}+\frac{68.91-68.91}{0.78}\right)\text{A}\cdot\text{h}$$

$$=182.12\text{A}\cdot\text{h}$$

第四阶段计算容量：放电电流 $I_4=68.91$ A；查表 C.3-3 得 $t=120$ min 容量换算系数 $K_{c1}=0.334$、$t=119$ min 容量换算系数 $K_{c2}=0.347$、$t=90$ min 容量换算系数 $K_{c3}=0.428$、$t=60$ min 容量换算系数 $K_{c4}=0.54$，则

$$C_{c4}=K_k\left(\frac{I_1}{K_{c1}}+\frac{I_2-I_1}{K_{c2}}+\frac{I_3-I_2}{K_{c3}}+\frac{I_4-I_3}{K_{c4}}\right)$$

$$=1.4\times\left(\frac{110.36}{0.344}+\frac{68.91-110.36}{0.347}+\frac{68.91-68.91}{0.428}+\frac{68.91-68.91}{0.54}\right)\text{A}\cdot\text{h}=281.9\text{A}\cdot\text{h}$$

各个阶段计算容量最大值是 281.9 A·h。

10-14：假设阀控式密封铅酸蓄电池满足事故全停电状态下持续放电容量要求，随机（5 s）负荷计算容量是下列哪一项数值？

（A）19.5 A·h　　（B）31.5 A·h　　（C）42.5 A·h　　（D）28.49 A·h

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 式（C.2.3-11）。

随机（5 s）阶段计算容量：放电电流 $I_r=38.18$ A；$t=5$ s 查表 C.3-3 得容量换算系数 $K_{cr}=1.34$，则

$$C_r=\frac{I_r}{K_{cr}}=\frac{38.18}{1.34}\text{A}\cdot\text{h}=28.49\text{A}\cdot\text{h}$$

10-15：假设阀控式密封铅酸蓄电池满足事故全停电状态下持续放电容量要求，第一阶段计算容量是 124.6 A·h，其他各个阶段计算容量最大值是 281.9 A·h，随机（5 s）阶段容量是 28.49 A·h，蓄电池的选择容量是下列哪一项数值？

（A）28.49 A·h　　（B）310.39 A·h　　（C）306.51 A·h　　（D）124.6 A·h

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 的 C.2.3 节。

蓄电池的选择容量：$C_r+C_{cmax}=(28.49+281.9)\text{A}\cdot\text{h}=310.39\text{A}\cdot\text{h}>C_{c1}=124.6\text{A}\cdot\text{h}$

所以蓄电池的选择容量是 310.39 A·h。

【知识点解析】

（1）阶段法直流负荷统计（见表 10-8）

表 10-8　直流负荷统计表（用于阶梯计算法）

序号	负荷名称	装置容量/kW	负荷系数	计算电流/A	经常负荷电流/A	事故放电时间及放电电流/A					
						初期	持续/min				随机
						1 min	1~30	30~60	60~120	120~180	5 s
					I_{jc}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_R
1											
2											
…											
合计											

（2）蓄电池个数的选择

1）蓄电池个数选择：按浮充电运行时，直流母线电压为 $1.05U_n$ 选择蓄电池个数。

$$n=1.05U_n/U_f$$

蓄电池浮充电压应根据厂家推荐值选取，当无产品资料时可按以下规定选取：

① 固定型排气式铅酸蓄电池的单体浮充电电压值宜取 2.15~2.17 V。

② 阀控式密封铅酸蓄电池的单体浮充电电压值宜取 2.23~2.27 V。

③ 中倍率镉镍碱性蓄电池的单体浮充电电压值宜取 1.42~1.45 V。

④ 高倍率镉镍碱性蓄电池的单体浮充电电压值宜取 1.36~1.39 V。

2）蓄电池均衡充电电压选择：蓄电池均衡充电电压应根据蓄电池个数及直流母线电压允许的最高值选择单体蓄电池均衡充电电压值。单体蓄电池均衡充电电压应根据直流电源系统中直流负荷允许的最高电压值和蓄电池的个数来确定，但不得超出蓄电池规定的电压允许范围。单体蓄电池均衡充电电压值应符合以下要求：

① 对于控制负荷，单体蓄电池均衡充电电压值 $U_c \leqslant 1.10U_n/n$。

② 对于动力负荷，单体蓄电池均衡充电电压值 $U_c \leqslant 1.25U_n/n$。

③ 对于控制负荷和动力负荷合并供电，单体蓄电池均衡充电电压值 $U_c \leqslant 1.10U_n/n$。

3）单体蓄电池放电终止电压应根据直流电源系统中直流负荷允许的最低电压值和蓄电池的个数来确定，但不得低于蓄电池规定的最低允许电压值。单体蓄电池事故放电末期终止电压应按下式计算：

$$U_m \geqslant 0.875U_n/n$$

式中，U_n 为直流系统标称电压（V）；U_f 为单体蓄电池浮充电电压（V）；U_c 为单体蓄电池均衡充电电压（V）；U_m 为单体蓄电池放电末期终止电压（V）；n 为蓄电池个数。

（3）蓄电池容量阶段计算法

第一阶段计算容量

$$C_{c1}=K_k\frac{I_1}{K_c}$$

第二阶段计算容量

$$C_{c2} \geqslant K_k\left[\frac{1}{K_{c1}}I_1+\frac{1}{K_{c2}}(I_2-I_1)\right]$$

第三阶段计算容量

$$C_{c3} \geqslant K_k \left[\frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) + \frac{1}{K_{c3}} (I_3 - I_2) \right]$$

第 n 阶段计算容量

$$C_{cn} \geqslant K_k \left[\frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) + \cdots + \frac{1}{K_{cn}} (I_n - I_{n-1}) \right]$$

随机负荷计算容量

$$C_r = \frac{I_r}{K_{ct}}$$

将 C_r 叠加在 $C_{c2} \sim C_{cn}$ 中最大的阶段上，然后与 C_{c1} 比较，取较大者，即为蓄电池的计算容量。

式中，K_k 为可靠系数，取 1.40；$C_{c1} \sim C_{cn}$ 为蓄电池 10 h（或 5 h）放电率各阶段的计算容量（A·h）；$I_1 \sim I_n$ 为各阶段的负荷电流（A）；K_{c1} 为各计算阶段中全部放电时间的容量换算系数（1/h）；K_{c2} 为各计算阶段中除第 1 阶段时间外放电时间的容量换算系数（1/h）；K_{c3} 为各计算阶段中除第 1、第 2 阶段时间外放电时间的容量换算系数（1/h）；K_{cn} 为各计算阶段中最后 1 个阶段放电时间的容量换算系数（1/h）；C_r 为随机负荷计算容量（A·h）；I_r 为随机负荷电流（A）；K_c 为初期（1 min）冲击负荷的容量换算系数（1/h）；K_{ct} 为随机（5 s）冲击负荷的容量换算系数（1/h）。

（4）阶段计算法各阶段计算时间与容量换算系数设定

以无人值守变电站为例说明简化法各阶段计算时间与容量换算系数之间关系，见表 10-9 和图 10-7。

表 10-9　无人值守变电站阶段法各阶段计算时间与容量换算系数设定表

事故电流	事故电流变化	事故时间阶段/min	事故分段时间/min	容量换算系数
第一阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 1$	$t_{11} = M_1 = 1$	K_{c1}
第二阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 1$	$t_{21} = M_1 + M_2 = 30$	K_{c1}
I_2	$I_2 - I_1$	$M_2 = 29$	$t_{22} = M_2 = 29$	K_{c2}
第三阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 1$	$t_{31} = M_1 + M_2 + M_3 = 60$	K_{c1}
I_2	$I_2 - I_1$	$M_2 = 29$	$t_{32} = M_2 + M_3 = 59$	K_{c2}
I_3	$I_3 - I_2$	$M_3 = 30$	$t_{33} = M_3 = 30$	K_{c3}
第四阶段				
I_1	$I_1 - 0$	$M_1 = 1$	$t_{31} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 120$	K_{c1}
I_2	$I_2 - I_1$	$M_2 = 29$	$t_{31} = M_2 + M_3 + M_4 = 119$	K_{c2}
I_3	$I_3 - I_2$	$M_3 = 30$	$t_{32} = M_3 + M_4 = 90$	K_{c3}
I_4	$I_4 - I_3$	$M_4 = 60$	$t_{33} = M_4 = 60$	K_{c4}
随机阶段				
I_r	I_r	$M_r = 5$ s	$t_r = M_r = 5$ s	K_{cr}

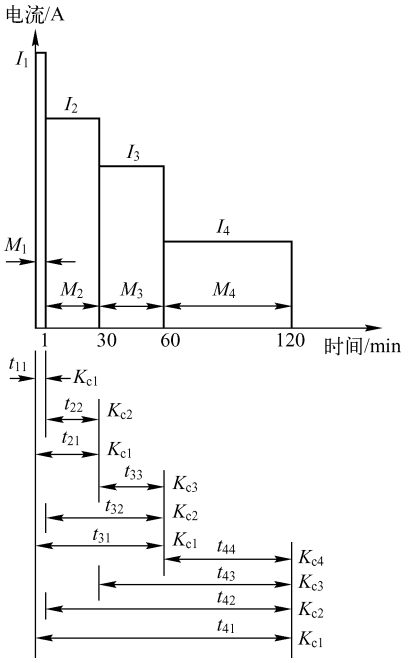


图 10-7　无人值守变电站阶段法各阶段计算时间与容量换算系数设定示意图

例题 10-16：某大型火力发电厂单机容量为 200 MW 级机组，每台机组装设 2 组供电的蓄电池，每台机组直流负荷见表 10-10，发电厂无保安电源，进行负荷统计时，每组蓄电池计算负荷容量为下列哪项数值？（断路器跳闸回路按照控制负荷统计）

表 10-10　每台机组直流负荷表

负 荷 名 称	容量/kW	负 荷 系 数	计算容量/kW	每组蓄电池计算容量/kW
6 kV 断路器跳闸	4×14			
信号系统	40×0. 1			
继电保护	20×0. 2			
热工控制	6×2			
氢密封油泵	2×2			
直流润滑油泵	20×0. 2			
交流不间断电源	4×2			
直流应急照明	20×1			
合计				

（A）71 kW　　（B）61 kW　　（C）29. 4 kW　　（D）63 kW

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第 4. 2. 1 条。

每组蓄电池计算负荷容量见表 10-11，因为无保安电源，故直流应急照明按照 60% 统计。

表 10-11　每台机组直流负荷表

负 荷 名 称	容量/kW	负 荷 系 数	计算容量/kW	每组蓄电池计算容量/kW
6 kV 断路器跳闸	4×14	0. 6	33. 6	33. 6
信号系统	40×0. 1	0. 6	2. 4	2. 4
继电保护	20×0. 2	0. 6	2. 4	2. 4
热工控制	6×2	0. 6	7. 2	7. 2
氢密封油泵	2×2	0. 8	3. 2	1. 6
直流润滑油泵	20×0. 2	0. 9	3. 6	1. 8
交流不间断电源	4×2	0. 5	4	2
直流应急照明	20×1	1	20	12
合计				63

【知识点解析】

直流负荷统计应符合下列规定：

1）装设 2 组控制专用蓄电池组时，每组负荷应按全部控制负荷统计。

2）装设 2 组动力和控制合并供电蓄电池组时，每组负荷应按全部控制负荷统计，动力负荷宜平均分配在两组蓄电池上；其中直流应急照明负荷，每组应按全部负荷的 60%（变电站和有保安电源的发电厂可按 100%）统计。

10. 3　直流设备选择

【知识点说明】

1）《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 修改了附录中有关充电装置、直流断路器选择等内容。其中直流断路器选择、直流电力电缆截面选择、充电装置及整流模块选择、蓄电池短路电流计算逐步变成必考考点，2016 年发输电专业考试中考到的 4 个题目全部是该章节考点，所以考生可以作为重点学习。

2）直流断路器选择考点中由集中辐射形系统、分层辐射形系统中的断路器选择配合增加了对应的保护电器选择性配合表，同时在条文说明中增加了多个保护电器选择性配合计算算例说明相关电器选择，所以这部分答题技巧会增加难度。

3）蓄电池短路电流计算，等同于直流电路计算，其有三种情况：蓄电池引出端子上短路、蓄电池组连接的直流母线上短路、各断路器安装处短路，附录 G 中只说明了前两种情况，第三种情况隐含在断路器灵敏度校检的附录 A 中。

4）直流电力电缆截面选择因为电压控制法取消，简化计算法和阶段计算法两种方式下电力电缆截面选择相同，考点变得更为简单。

依据书目：

《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014

《工业与民用供配电设计手册》第四版

参考书目：

《电力工程直流系统设计手册》第二版

例题 10-17~10-21：某城区 110/10.5 kV 无人值班变电站，全站设直流电源系统一套，直流系统电压采用 110 V，蓄电池拟选用阀控式密封铅酸蓄电池组：400 A·h、52 个蓄电池（蓄电池含连接条的总内阻为 17.94 mΩ）。变电站直流负荷装置容量详见表 10-12，直流系统接线如图 10-8 所示。请解答下列问题。

表 10-12　直流负荷统计表

序号	负荷名称	装置容量/W	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{je}/A	事故放电时间及对应放电电流/A				
						初期	事故持续时间/min			随机
						1 min	1~30	30~60	60~120	5 s
1	继电保护、信号测量负荷	1300	0.6	7.09	7.09	7.09	7.09	7.09	7.09	
2	监控系统负荷	2000	0.8	14.55	14.55	14.55	14.55	14.55	14.55	
3	高压断路器跳闸	6600	0.6	36		36				
4	高压断路器自投	600	1	5.45		5.45				
5	恢复供电高压断路器合闸	4200	1	38.18						38.18
6	交流不间断电源	3000	0.6	16.36		16.36	16.36	16.36	16.36	
7	DC-DC 变换装置	3000	0.8	21.82	21.82	21.82	21.82	21.82	21.82	
8	直流应急照明	1000	1	9.09		9.09	9.09	9.09	9.09	
合计					43.46	110.36	68.91	68.91	68.91	38.18

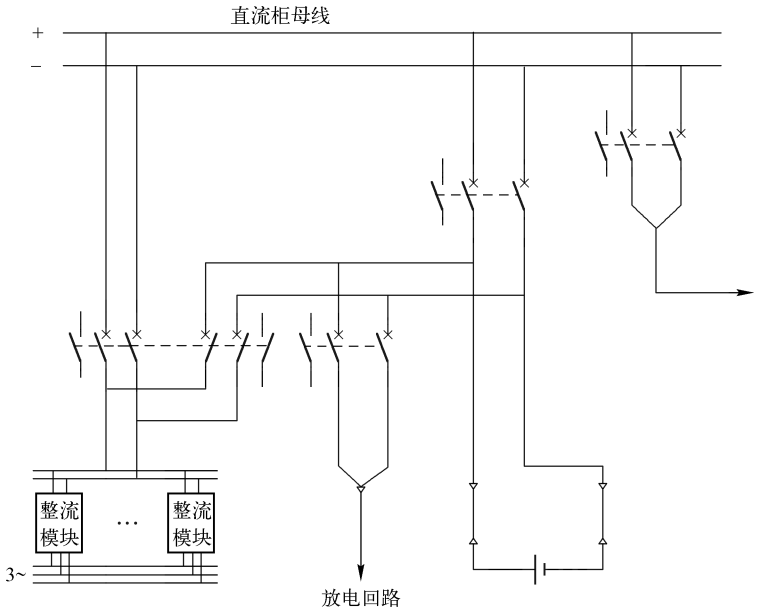


图 10-8　直流系统接线图

10-17：假设该变电所直流母线馈线中直流断路器最大的额定电流为 63 A，则蓄电池出口断路器的额定电流应为下列哪项数值？（供配电 2014 年考题）

（A）180 A　　（B）200 A　　（C）225 A　　（D）250 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 第 A.3.6 条。

按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择：$I_n \geqslant I_1 = 5.5I_{10} = 5.5\times400/10\ \text{A} = 220\ \text{A}$

按保护动作选择性条件选择，配合系数取最大值 3：$I_n > K_{c4}I_{n.max} = 3\times63\ \text{A} = 189\ \text{A}$

满足上述要求选择 225 A 直流断路器。

【知识点解析】

蓄电池组出口回路熔断器或断路器额定电流应选取以下两种情况中电流最大者为断路器额定电流，并应满足蓄电池出口回路短路时灵敏系数的要求，同时还应按事故初期（1 min）冲击放电电流校验保护动作时间。蓄电池组出口回路熔断器或断路器额定电流应按下列公式确定：

1）按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择，熔断器或断路器额定电流应按下式计算：

$$I_n \geqslant I_1$$

式中，I_1为蓄电池 1 h 或 2 h 放电率电流（A），可按厂家资料选取。无厂家资料时，铅酸蓄电池可取 $5.5I_{10}$（A）；中倍率镉镍碱性蓄电池可取 $7.0I_5$（A）；高倍率镉镍碱性蓄电池可取 $20.0I_5$（A）；I_{10}为铅酸蓄电池 10 h 放电率电流（A）；I_5为镉镍碱性蓄电池 5 h 放电率电流（A）。

2）按保护动作选择性条件选择，熔断器或断路器额定电流应大于直流母线馈线中最大断路器的额定电流，应按下式计算：

$$I_n > K_{c4}I_{n.max}$$

式中，$I_{n.max}$为直流母线馈线中直流断路器最大的额定电流（A）；K_{c4}为配合系数，一般取 2.0，必要时可取 3.0。

10-18：假设该变电所直流系统蓄电池出口采用熔断器，直流母线馈线中直流断路器最大的额定电流为 63 A，则蓄电池出口熔断器的额定电流应为下列哪项数值？（供配电 2014 年考题）

（A）100 A　　（B）160 A　　（C）200 A　　（D）250 A

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 第 A.3.6 条。

按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择，熔断器或断路器额定电流应按下式计算：

$$I_n \geqslant I_1 = 5.5I_{10} = 5.5\times400/10\ \text{A} = 220\ \text{A}$$

按保护动作选择性条件选择，配合系数取最大值 2，有

$$I_n > K_c I_{n.max} = 2\times63\ \text{A} = 126\ \text{A}$$

满足上述要求选择 250 A 直流熔断器。

【知识点解析】

熔断器的选择应符合以下规定：

1）额定电压应大于或等于回路的最高工作电压。

2）额定电流应大于回路的最大工作电流，最大工作电流的选择应符合下列要求：

① 蓄电池出口回路熔断器应按事故停电时间的蓄电池放电率电流和直流母线上最大馈线直流断路器额定电流的 2 倍选择，两者取大者。

② 高压断路器电磁操动机构的合闸回路可按 0.2~0.3 倍额定合闸电流选择，但熔断器的熔断时间应大于断路器固有合闸时间。

3）断流能力应满足安装地点直流电源系统最大预期短路电流要求。

10-19：假设该变电所直流系统蓄电池出口电缆至直流柜距离为 10 m，按蓄电池回路压降计算电缆最大截面（铜芯）应为下列哪项数值。（供配电 2014 年考题）

（A）95 mm^2　　（B）120 mm^2　　（C）150 mm^2　　（D）185 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 E。

计算蓄电池出口回路电缆截面（铜芯电缆长 10 m，蓄电池容量 400 A·h）：

$$I_{1min}=110.36\ A<I_{1h}=5.5\times400/10\ A=220\ A$$

$$0.005\times110\ V=0.55\ V<\Delta U_p<0.01\times110\ V=1.1\ V$$

题目中要求计算电缆最大截面，电压降取最小 0.55 V，蓄电池放电率电流 $I_{1h}=220$ A，则

$S_{cac}=\dfrac{\rho\cdot 2LI_{ca}}{\Delta U_p}=\dfrac{0.0184\times2\times10\times220}{0.55\sim1.1}\ mm^2=73.6\sim147.2\ mm^2$，所以取 120 mm^2。

【知识点解析】

电缆截面应按电缆长期允许载流量和回路允许电压降两个条件选择。其计算公式如下：

按电缆长期允许载流量：　　$I_{pc}\geqslant I_{ca}$

按回路允许电压降：　　$S_{cac}=\dfrac{\rho\cdot 2LI_{ca}}{\Delta U_p}$

式中，S_{cac}为电缆计算截面（mm^2）；I_{pc}为电缆允许载流量（A）；I_{ca}为计算电流［见 DL/T 5044—2014 表 E.2-1，取 I_{ca1}和 I_{ca2}中的大者；I_{ca1}为回路长期工作计算电流（A）；I_{ca2}为回路短时工作计算电流（A）］；ρ为电阻系数，铜导体 $\rho=0.0184\ \Omega\cdot mm^2/m$，铝导体 $\rho=0.031\ \Omega\cdot mm^2/m$；$L$为电缆长度（m）；$\Delta U_p$为回路允许电压降（V，见 DL/T 5044—2014 表 E.2-2）。

10-20：假设该变电所直流系统蓄电池出口断路器安装处上发生短路，蓄电池出口电缆至直流柜距离为 10 m，电缆截面积为 150 mm^2，内阻为 0.124 mΩ/m（单相铜芯）。蓄电池出口直流断路器额定电流为 250 A，单极内阻为 0.3 mΩ，则蓄电池出口断路器安装处短路电流应为下列哪项数值？（忽略母线和短路处接触电阻）（发输电 2013 年考题改编）

（A）5.64 kA　　（B）4.86 kA　　（C）5.23 kA　　（D）6.13 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 式（A.4.2-4）。

电缆电阻和断路器电阻：$r_j+r_k=(2\times0.3+2\times10\times0.124)\ m\Omega=3.08\ m\Omega$

$$I_k=\frac{U_n}{n(r_b+r_1)+r_j+r_k}=\frac{110}{17.94+3.08}\ kA=5.23\ kA$$

【知识点解析】

各断路器安装处短路电流应按下列公式计算：

$$I_{DK}=U_n/\left[n(r_b+r_1)+\sum r_j+\sum r_k\right]$$

式中，I_{DK}为断路器安装处短路电流（A）；U_n为直流电源系统额定电压，取 110 V 或 220 V；

r_b为蓄电池内阻（Ω）；r_l为蓄电池间连接条或导体电阻（Ω）；$\sum r_j$为蓄电池组至断路器安装处连接电缆或导体电阻之和（Ω）；$\sum r_k$为相关断路器触头电阻之和（Ω）；n为蓄电池个数。

计算各断路器安装处短路电流是用于校验各级断路器瞬时脱扣的灵敏系数。

10-21：若该变电所直流系统蓄电池出口直流断路器额定电流为250 A，采用标准B型瞬时脱扣器，其整定倍数为7（无限流功能），蓄电池出口直流断路器安装处短路电流为5.23 kA，则蓄电池出口直流断路器短路脱扣器瞬时保护整定值和灵敏系数应为下列哪项数值？（不考虑上下级配合）

（A）1.64 kA，1.51　　（B）1.75 kA，2.99

（C）235 kA，2.99　　（D）6.13 A，3.2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014附录A式（A.4.2-1）和式（A.4.2-5）。

蓄电池出口直流断路器短路脱扣器瞬时保护整定值：

$$I_{DZ1} \geqslant K_n I_n = 7 \times 250\ \text{kA} = 1.75\ \text{kA}$$

灵敏系数校验应按下列公式计算：

$$K_L = I_{DK} / I_{DZ} = 5230/1750 = 2.99 > 1.05$$，满足要求

【知识点解析】

1）直流断路器短路瞬时保护（脱扣器）整定计算应按下列公式计算：

① 按本级断路器出口短路，断路器脱扣器瞬时保护可靠动作整定，可按下式计算：

$$I_{DZ1} \geqslant K_n I_n$$

② 按下一级断路器出口短路，断路器脱扣器瞬时保护可靠不动作整定，可按下式计算：

$$I_{DZ1} \geqslant K_{ib} I_{DZ2} > I_{d2}$$

式中，I_{DZ1}、I_{DZ2}为上、下级断路器瞬时保护（脱扣器）动作电流（A）；K_n为额定电流倍数，脱扣器整定值正误差或脱扣器瞬时脱扣范围最大值；I_n为断路器额定电流（A）；I_{d2}为下一级断路器出口短路电流（A）；K_{ib}为上、下级断路器电流比系数，可按照DL/T 5044—2014附录A表A.5-1～表A.5-5中选取。

2）灵敏系数校验：应根据计算的各断路器安装处短路电流校验各级断路器瞬时脱扣的灵敏系数，还应考虑脱扣器整定值的正误差或脱扣范围最大值后的灵敏系数。

灵敏系数校验应按下列公式计算：

$$K_L = I_{DK} / I_{DZ}$$

式中，I_{DK}为断路器安装处短路电流（A）；K_L为灵敏系数，不宜低于1.05；I_{DZ}为断路器瞬时保护（脱扣器）动作电流（A）。

例题10-22～10-26：某城区110/10.5 kV无人值班变电站，全站设直流电源系统一套，直流系统电压采用110 V，采用1套高频开关电源模块型充电装置，一套放电装置，其他详细参数数据与例题10-4～10-8相同。变电站直流负荷装置容量详见表10-2，直流系统接线如图10-8所示。请解答下列问题。

10-22：计算变电所充电装置的额定电流（考虑充电时仍对经常负荷供电），其计算结果最大值最接近下列哪项数值？

（A）43.46 A　　（B）43.86 A　　（C）93.46 A　　（D）83.46 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 D 的 D.1.1 节式（D.1.1-1）和式（D.1.1-5）。

浮充电电流：$I_r=0.01I_{10}+I_{jc}=\left(0.01\times\frac{400}{10}+43.46\right)\text{A}=43.86\text{A}$

均衡充电电流 $I_r=1.25I_{10}+I_{jc}=\left(1.25\times\frac{400}{10}+43.46\right)\text{A}=93.46\text{A}$

充电装置的额定电流选取最大值为 93.46 A。

【知识点解析】

充电装置的额定电流的选择应满足下列条件：

1）满足浮充电要求，浮充输出电流应按蓄电池自放电电流与经常负荷电流之和计算。浮充输出电流应按下式计算：

铅酸蓄电池：$I_r\geqslant0.01I_{10}+I_{jc}$

镉镍碱性蓄电池：$I_r\geqslant0.01I_5+I_{jc}$

2）满足初充电要求，充电时蓄电池脱开直流母线，充电输出电流应按下式计算：

铅酸蓄电池：$I_r=(1.0\sim1.25)I_{10}$

镉镍碱性蓄电池：$I_r=(1.0\sim1.25)I_5$

3）满足均衡充电要求，蓄电池充电时仍对经常负荷供电，均衡充电输出电流：

铅酸蓄电池：$I_r=(1.0\sim1.25)I_{10}+I_{jc}$

镉镍碱性蓄电池：$I_r=(1.0\sim1.25)I_5+I_{jc}$

当均衡充电的蓄电池组不与直流母线连接时，$I_{jc}=0$。

式中，I_r为充电装置额定电流（A）；I_{jc}为直流系统的经常负荷电流（A）；I_{10}为铅酸蓄电池 10 h 放电率电流（A）；I_5为镉镍碱性蓄电池 5 h 放电率电流（A）。

选取最大值作为充电装置额定电流。当蓄电池脱开直流母线，单独进行均衡充电时，可不计入经常负荷电流。

10-23：变电所充电装置的高频开关电源模块额定电流为 20 A，则高频开关电源模块数量最接近下列哪项数值？

（A）3 个　　（B）6 个　　（C）9 个　　（D）12 个

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 D 的 D.2.1 节式（D.1.2-1）。

$$n_1=\frac{(1.0\sim1.25)I_{10}+I_{jc}}{I_{me}}=\frac{(1.0\sim1.25)\times400/10+43.46}{20}=4.17\sim4.67$$

$$n=n_1+n_2=(4.17\sim4.67)+1=5.17\sim5.67$$

故选取 6 个。

【知识点解析】

充电装置高频开关电源模块配置和数量选择：

方式 1　每组蓄电池配置一组高频开关电源模块，其模块选择方法如下。

$$n=n_1+n_2$$

基本模块的数量：

$$n_1=\frac{I_r}{I_{me}}$$

附加模块的数量：

$$n_2=1(\text{当 } n_1\leqslant 6 \text{ 时});\quad n_2=2(\text{当 } n_1\geqslant 7 \text{ 时})$$

方式2　一组蓄电池配置二组高频开关电源模块或二组蓄电池配置三组高频开关电源模块，其模块选择方法如下。

$$n=\frac{I_r}{I_{me}}$$

式中，I_r为充电装置的额定电流（A）；I_{me}为单个模块额定电流（A）；n为高频开关电源模块选择的数量，当模块选择数量不为整数时，可取邻近值。

10-24：假定充电装置额定电流为120 A，则充电装置回路的直流电流表测量范围是下列哪一项？

（A）0~80 A　　（B）0~100 A　　（C）0~150 A　　（D）0~200 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流系统设计技术规定》DL/T 5044—2014附录D表D.1.3（即表10-8）。

10-25：假定充电装置额定电流为120 A，则充电装置回路的充电装置隔离开关的额定电流是下列哪一项？

（A）80 A　　（B）100 A　　（C）160 A　　（D）200 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流系统设计技术规定》DL/T 5044—2014附录D表D.1.3。

【知识点解析】

充电装置回路设备选择表见表10-13。

表10-13　充电装置回路设备选择表　　（单位：A）

充电装置额定电流	10	20	25	30	40	50	60	80	
熔断器及隔离开关额定电流	63							100	
直流断路器额定电流	32			63			100		
电流表测量范围	0~30			0~50		0~80		0~100	
充电装置额定电流	100	120		160	200	250	315	400	500
熔断器及隔离开关额定电流	160			200	300		400	630	
直流断路器额定电流	225					400		630	
电流表测量范围	0~150			0~200	0~300		0~400	0~500	

注：充电装置额定电流不包括备用模块。

10-26：假定DC-DC变换装置额定电流为30 A，充电装置回路电缆采用VV型，长度为100 m，则充电装置回路电缆的计算截面最小值应为下列哪项数值？

（A）22.54 mm^2　　（B）15.44 mm^2　　（C）33.45 mm^2　　（D）35.59 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流系统设计技术规定》DL/T 5044—2014 附录 E 式（E.1.1-2）和表 E.2-2。

充电装置回路电缆电压降 $\Delta U_p=(3\%\sim6.5\%)U_n=(3\%\sim6.5\%)\times110\ V=3.3\sim7.15\ V$

电缆计算截面：$S_{cac}=\dfrac{\rho\cdot 2LI_{ca}}{\Delta U_p}=\dfrac{0.0184\times2\times100\times30}{3.3\sim7.15}\ mm^2=15.44\sim33.45\ mm^2$

注：VV 电缆全称聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆（铜芯）。

例题 10-27～10-30：某无人值守 110 kV 变电站，直流系统标称电压为 220 V，采用直流控制与动力负荷合并供电。蓄电池采用阀控式密封铅酸蓄电池（贫液），容量为 300 A·h，单体 2 V。直流系统接线如图 10-9 所示，其中电缆 L_1 电压降为 0.5%（计算电流取 1.05 倍蓄电池 1 h 放电率电流时），电缆 L_2 电压降为 4%（计算电流取 10 A 时）。请回答下列问题，并列出解答过程。

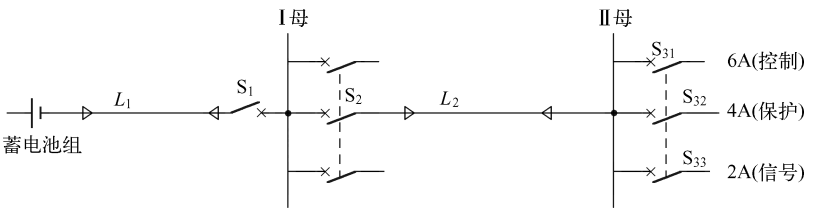


图 10-9　直流系统保护电器接线图

10-27：设控制、保护和信号回路的计算电流分别为 2 A、4 A 和 1 A，若该系统断路器不具备短延时保护功能，则直流系统图中直流断路器 S_2 的额定电流值宜选取下列哪项数值？（S_2 采用标准型 C 型脱扣器，S_{31}、S_{32}及 S_{33}采用标准型 B 型脱扣器）（供配电 2017 年考题）

（A）6 A　　（B）10 A　　（C）40 A　　（D）63 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 式（A.3.5）和表 A.5-1。

直流分电柜电源回路 S_2 断路器的额定电流应大于回路计算电流：

$$I_n\geqslant K_c\sum(I_{cc}+I_{cp}+I_{cs})=0.8\times(4+2+1)\ A=9.6\ A，取\ 10\ A$$

题目图中为集中辐射式供电，考虑选择性配合（不考虑到保护配合）：电压降要求为 $4\%U_n$，查表 A.5-1，直流分电柜电流比 S_2/S_3为 6 级差，查题目图中最大断路器额定电流为 6 A，选择 S_2 断路器的额定电流为 40 A。

【知识点解析】

断路器额定电流应按下式计算：

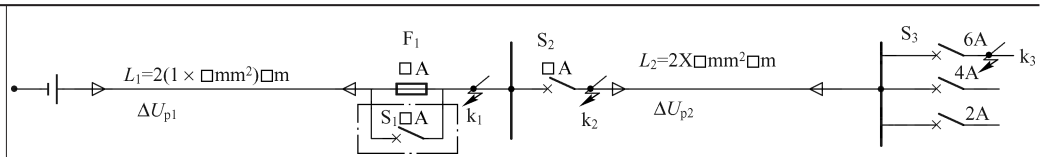
$$I_n\geqslant K_c(I_{cc}+I_{cp}+I_{cs})$$

式中，K_c为同时系数，取 0.8；I_{cc}为控制负荷计算电流（A）；I_{cp}为保护负荷计算电流（A）；I_{cs}为信号负荷计算电流（A）。

上、下级断路器的额定电流应满足选择性配合要求，选择性配合电流比宜符合 DL/T 5044—2014 附录 A 表 A.5-1～表 A.5-5（即表 10-14）。

表 10-14　集中辐射形系统保护电器选择性配合表（标准型）

网络图



L_2电缆电压降	$\Delta U_{p2}=3\%U_n$（110 V 系统） $\Delta U_{p2}=2\%U_n$（220 V 系统）			$\Delta U_{p2}=5\%U_n$（110 V 系统） $\Delta U_{p2}=4\%U_n$（220 V 系统）		
下级断路器 蓄电池组　S_2/S_3电流比	2 A	4 A	6 A	2 A	4 A	6 A
110 V 系统 200~1000 A·h	10（20 A）	7（32 A）	6.5（40 A）	8（16 A）	5（20 A）	5（32 A）
220 V 系统 200~2400 A·h	17（40 A）	12（50 A）	10.5（63 A）	12（25 A）	7（32 A）	6（40 A）

10-28：某直流电动机额定电流为 10 A，电源取自直流系统Ⅰ母线，母线至该电机电缆长度为 120 m，则电缆截面宜选取下列哪项数值？（假设电缆为铜芯，载流量按 4 A/mm²电流密度计算）（供配电 2017 年考题）

（A）2.5 mm²　　（B）4 mm²　　（C）6 mm²　　（D）10 mm²

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规范》DL/T 5044—2014 第 6.3.7 条、附录 E。

按照载流量选择：$S_{cac}=\dfrac{I_{ca}}{4}=\dfrac{10}{4}\text{ mm}^2=2.5\text{ mm}^2$

直流电动机电缆电压降：$\Delta U_p=5\%U_n=5\%\times220\text{ V}=11\text{ V}$

计算电流按照 2 倍直流电动机额定电流求得：$I_{ca}=2\times10\text{ A}=20\text{ A}$

直流电动机电缆计算截面：$S_{cac}=\dfrac{\rho\cdot2LI_{ca}}{\Delta U_p}=\dfrac{0.0184\times2\times120\times20}{11}\text{ mm}^2=8.03\text{ mm}^2$

两者取最大，选 D。

10-29：若该系统直流负荷统计如下：控制与保护装置容量为 8 kW，断路器跳闸装置容量为 0.5 kW，恢复供电重合闸装置容量为 0.2 kW，直流应急照明装置容量为 10 kW。充电装置采用一组高频开关电源，每个模块电流为 20 A，充电时蓄电池与直流母线不断开，计算充电装置所需的最少模块数量为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（A）2　　（B）3　　（C）4　　（D）5

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 D 的 D.1 和 D.2 节。

题目中控制和保护负荷是经常负荷电流，$I_{jc}=0.6\times8000/220\text{ A}=21.8\text{ A}$，满足充电要求，蓄电池充电时仍对经常负荷供电，蓄电池容量为 300 A·h，均衡充电输出电流：

$$n_1=\frac{(1.0\sim1.25)I_{10}+I_{jc}}{I_{me}}=\frac{(1.0\sim1.25)300/10+21.8}{20}=2.59\sim2.96$$，因 $n_1\leqslant6$ 时 $n_2=1$

故充电装置所需的最少模块数量为 $n=n_1+n_2=(2.59\sim2.96)+1=3.59\sim3.96$，选取 4 个。

10-30：某高压断路器，固有合闸时间为 200 ms，保护装置动作时间为 100 ms。其电磁操作机构合闸电流为 120 A，该合闸回路配有一直流断路器，该断路器最适宜的参数应选择下列哪项？（供配电 2017 年考题）

（A）额定电流 40 A，1 倍额定电流下过载脱扣器时间 200 ms

（B）额定电流 125 A，1 倍额定电流下过载脱扣器时间 200 ms

（C）额定电流 40 A，3 倍额定电流下过载脱扣器时间 200 ms

（D）额定电流 125 A，1 倍额定电流下过载脱扣器时间 300 ms

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第 6.5.2-2 条及条文说明。

直流断路器额定电流 $I_r=0.3\times120=40$ A，取 40 A。

直流断路器额定电流取 0.3 倍电磁操作机构合闸电流，是因为①考虑到电磁操动机构的合闸时间很短，等于合闸电流 120 A，断路器发热不用考虑；②可以降低保护的整定电流，提高可靠性，为防止直流断路器误动作，还应进行保护校验，确保直流断路器过载脱扣器时间 200 ms≥合闸时间 200 ms，选 C。

例题 10-31～10-35：某 2×200MW 火力发电厂，每台机组装设两组蓄电池，直流系统电压采用 220 V，对动力和控制合并供电，蓄电池拟选用阀控式密封铅酸蓄电池组（贫液），蓄电池容量为 1000 A·h，104 个（蓄电池含连接条的总内阻为 15.714 mΩ），布置在蒸汽机房。

已知：1）一台机组的直流负荷装置容量详见表 10-15。

表 10-15　直流负荷表

序号	负荷名称	装置容量/kW	负荷系数	计算电流 I_j/A	经常负荷电流 I_{je}/A	事故放电时间及对应放电电流/A			
						初期	事故持续时间/min		随机
						1 min	1～30	30～60	5 s
1	继电保护、信号测量负荷	5	0.6	13.64	13.64	13.64	13.64	13.64	
2	监控系统负荷	5	0.8	18.18	18.18	18.18	18.18	18.18	
3	热工控制负荷	5	0.6	13.64	13.64	13.64	13.64	13.64	
4	直流长明灯	2	1	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09	
5	汽轮机氢侧直流泵	4	0.8	14.55		29.09	14.55	14.55	
6	汽轮机空侧直流泵	6	0.8	21.82		43.64	21.82	21.82	
7	汽轮机润滑直流泵	20	0.9	81.82		163.64	81.82	81.82	
8	厂用电断路器跳闸	10	0.6	27.27		27.27			
9	厂用电恢复供电高压断路器合闸	15	1	68.18					68.18
10	交流不间断电源 UPS	60	0.5	136.36		136.36	136.36	136.36	
11	直流应急照明	2	1	9.09		9.09	9.09	9.09	
合计				413.64	54.55	463.64	318.19	318.19	68.18

2）直流断路器其系列为 4 A、6 A、10 A、16 A、20 A、25 A、35 A、40 A、50 A、63 A、80 A、100 A、125 A、160 A 、180 A、200 A、225 A、250 A、315 A、350 A、400 A、500 A、600 A、700 A、800 A、900 A、1000 A、1250 A、1400 A。

3）直流电柜Ⅰ母线上最大馈线断路器额定电流为 200 A；继电保护、信号测量负荷回路直流分电柜中Ⅱ母线上断路器额定电流见图 10-10。请根据上述条件计算下列各题。

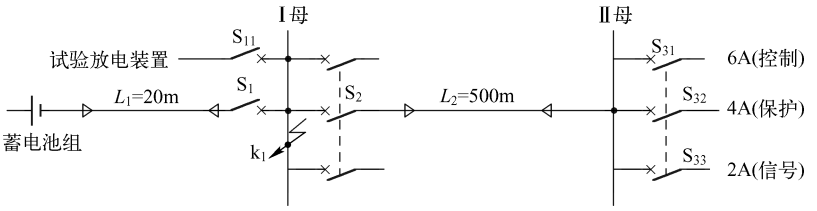


图 10-10　直流系统接线图

10-31：若发电厂直流电源系统采用集中辐射形供电，则直流柜中蓄电池出口 S_1断路器的额定电流应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）500 A　　（B）600 A　　（C）900 A　　（D）1000 A

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 第 A. 3. 6 条。

按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择：

$$I_n \geqslant I_1 = 5.5I_{10} = 5.5\times 1000/10\ \text{A} = 550\ \text{A} \geqslant I_{1min}$$

按保护动作选择性条件选择，配合系数为 2~3：

$$I_n > K_{c4} I_{n.max} = 3\times 200\ \text{A} = 600\ \text{A}$$

满足上述要求选择 600 A 直流断路器。

10-32：若发电厂直流电源系统采用集中辐射形供电，直流电源系统继电保护、信号测量负荷回路直流分电柜中Ⅱ母线上断路器额定电流见图 10-10，该回路电缆 L_2电压降要求为 $4\%U_n$，则直流分电柜电源回路 S_2断路器的额定电流应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）10 A　　（B）16 A　　（C）20 A　　（D）40 A

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 式（A. 3. 5）和表 A. 5-1。

直流分电柜电源回路 S_2断路器的额定电流为

$$I_n \geqslant K_c \sum (I_{cc} + I_{cp} + I_{cs}) = 0.8\times(6+4+2)\ \text{A} = 9.6\ \text{A}，取\ 10\ \text{A}$$

考虑到保护配合：电压降要求为 $4\%U_n$，查表 A. 5-1，直流分电柜电流比 S_2/S_3为 6 级差，选择 S_2断路器的额定电流为 40 A。

10-33：该火力发电厂在直流电源系统蓄电池出口的Ⅰ母线上安装有试验放电装置，试验放电装置 S_{11}断路器的额定电流应为下列哪项数值？（发输电 2013 年考题）

（A）80 A　　（B）100 A　　（C）125 A　　（D）160 A

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第6.4.1条。

$$I_{DZ}>I_n=(1.1\sim1.3)I_{10}=(1.1\sim1.3)\times1000/10\ A=110\sim130\ A$$

可选择160 A断路器。

【知识点解析】

断路器额定电流I_n应大于回路的最大工作电流，试验放电装置回路断路器额定电流应大于试验放电装置的额定电流，应符合下列要求：

1）铅酸蓄电池应为（1.10～1.30）I_{10}。

2）镉镍碱性蓄电池应为（1.10～1.30）I_5。

10-34：该火力发电厂，每台机组装设两组蓄电池，两组蓄电池分别接于不同的直流母线段。两段直流母线直接装设有联络开关D_1。该联络开关D_1的最小额定电流是下列哪一项？

（A）100 A　　（B）200 A　　（C）400 A　　（D）600 A

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第6.7.2-3条。

$$I>0.6I_n=0.6\times413.64\ A=248.18\ A$$

可选择400 A联络开关。

【知识点解析】

隔离开关额定电压应大于或等于回路的最高工作电压。隔离开关额定电流应大于回路的最大工作电流，最大工作电流的选择应符合下列要求：

1）蓄电池出口回路应按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择。

2）高压断路器电磁操动机构的合闸回路可按0.2～0.3倍额定合闸电流选择。

3）直流母线分段开关可按全部负荷的60%选择。

10-35：该火力发电厂在直流电源系统蓄电池出口电缆L_1选择YJV-2X（1×500 mm^2）时，Ⅰ母线上d_1点的短路电流应为下列哪项数值？（忽略断路器内阻和母线、短路点处电阻）（发输电2012年考题）

（A）12.80 kA　　（B）14.08 kA　　（C）21.13 kA　　（D）20.73 kA

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录G式（G.1.1-2）。

电缆电阻 $r_c=\dfrac{\rho 2L}{S}=\dfrac{0.0184\times2\times20}{500}\ m\Omega=1.472\ m\Omega$

Ⅰ母线上k_1点的短路电流 $I_k=\dfrac{U_n}{n(r_b+r_1)+r_c}=\dfrac{220}{15.714+1.472}\ kA=12.80\ kA$

【知识点解析】

在蓄电池组连接的直流母线上短路，则短路电流应按下式计算：

$$I_k=\frac{U_n}{n(r_b+r_1)+r_c}$$

式中，I_k为直流母线短路电流（A）；r_1为蓄电池连接条的电阻（Ω）；r_c为蓄电池组端子到

直流母线的连接电缆或导线电阻（Ω）；r_b为蓄电池内阻（Ω）；U_n为直流电源系统标称电压（V）；n为蓄电池组单体个数。

例题 10-36~10-39：某2×200 MW火力发电厂，每台机组装设两组蓄电池，直流系统电压采用220 V，对动力和控制合并供电，直流负荷和其他具体参数与例题10-31~10-35相同。

10-36：若该火力发电厂在直流电源系统每组蓄电池为104个，容量为1000 A·h，每台机组蓄电池充电装置参数选择中哪一项数据是错误的？

（A）充电装置额定电流满足浮充电要求为55.55 A

（B）充电装置额定电流满足充电要求为125 A（充电时蓄电池脱开直流母线）

（C）充电装置额定电流满足均衡充电要求为125.55 A（蓄电池充电时仍对经常负荷供电）

（D）充电装置充电装置输出电压249.6 V

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014附录D的D.1和D.2节。

满足浮充电要求，浮充输出电流 $I_r = 0.01I_{10} + I_{jc} = (0.01 \times 1000/10 + 54.55)\ \text{A} = 55.55\ \text{A}$，A对。

满足充电要求，充电时蓄电池脱开直流母线，充电输出电流：$I_r = (1.0 \sim 1.25)I_{10} = (1.0 \sim 1.25) \times 1000/10\ \text{A} = 100 \sim 125\ \text{A}$，B对。

满足均衡充电要求，蓄电池充电时仍对经常负荷供电，均衡充电输出电流：$I_r = (1.0 \sim 1.25)I_{10} + I_{jc} = [(1.0 \sim 1.25) \times 1000/10 + 54.55]\ \text{A} = 154.55 \sim 179.55\ \text{A}$，C错。

充电装置输出电压选择：$U_r = nU_{cm} = 104 \times 2.4\ \text{V} = 249.6\ \text{V}$，D对。

【知识点解析】

充电装置输出电压选择：

$$U_r = nU_{cm}$$

式中，U_r为充电装置的额定电压（V）；n为蓄电池组单体个数；U_{cm}为充电末期单体蓄电池电压（V），固体型排气式铅酸蓄电池为2.70 V，阀控式铅酸蓄电池为2.40 V，镉镍碱性蓄电池为1.70 V。

10-37：假设该火力发电厂直流电源系统每台机组蓄电池为2组蓄电池、3台充电装置的形式，充电装置的额定电流为180 A，采用高频开关电源模块，高频开关电源模块额定电流为25 A，则一台机组的充电装置所用高频开关电源模块数量为下列哪项数值？

（A）18个　　（B）24个　　（C）28个　　（D）30个

答案：【B】

解析：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014附录D的D.2.1节式（D.2.1-5）。

一台充电装置高频开关电源模块数量 $n = \dfrac{I_r}{I_{me}} = \dfrac{180}{25}$个$= 7.2$个，取8个。3台充电装置共计高频开关电源模块数量24个。

【知识点解析】

高频开关电源模块选择配置原则应符合下列规定：

1）1 组蓄电池配置 1 套充电装置时，应按额定电流选择高频开关电源基本模块。当基本模块数量为 6 个及以下时，可设置 1 个备用模块；当基本模块数量为 7 个及以上时，可设置 2 个备用模块。

2）1 组蓄电池配置 2 套充电装置或 2 组蓄电池配置 3 套充电装置时，应按额定电流选择高频开关电源基本模块，不宜设备用模块。

3）高频开关电源模块数量宜根据充电装置额定电流和单个模块额定电流选择，模块数量宜控制在 3～8 个之间。

10-38：该火力发电厂直流电源系统Ⅰ母线上有厂用电恢复供电高压断路器，合闸负荷计算电流为 68.18 A，合闸时间为 200 ms，则厂用电恢复供电高压断路器合闸回路所用直流断路器的额定电流和过载脱扣时间为下列哪组数据？

（A）额定电流 20 A，过载脱扣器时间 250 ms

（B）额定电流 25 A，过载脱扣器时间 250 ms

（C）额定电流 20 A，过载脱扣器时间 150 ms

（D）额定电流 25 A，过载脱扣器时间 150 ms

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 D 第 6.5.2-2 条。

额定电流 $I_r = 0.3 \times 68.18\ \text{A} = 20.45\ \text{A}$，取 25 A；过载脱扣器时间 250 ms>合闸时间 200 ms。

【知识点解析】

直流断路器的额定电流应大于回路的最大工作电流，高压断路器电磁操动机构的合闸回路可按 0.3 倍额定合闸电流选择，但直流断路器过载脱扣时间应大于断路器固有合闸时间。

10-39：假设该火力发电厂直流电源系统采用集中辐射形供电，监控系统负荷馈线回路采用具有限流功能标准 B 型脱扣器直流断路器，其额定电流为 20 A，限流系数为 0.75，Ⅰ母线短路电流为 14 kA，当下一级的断路器短路瞬时保护（脱扣器）动作电流取 50 A 时，该馈线回路断路器的短路瞬时保护脱扣器的整定电流应选下列哪项数值？是否满足灵敏度要求？

（A）66.67 A，满足　　（B）150 A，满足

（C）266.67 A，满足　　（D）466.67 A，不满足

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 附录 A 式（A.4.2-3）、式（A.4.2-5）和表 A.5.1 小注。

具有限流功能标准 B 型脱扣器直流断路器，瞬时脱扣范围为（4～7）I_n。

$$I_{DZ1} \geqslant K_n I_{DZ2} / K_{XL} = (4 \sim 7) \times 50 / 0.75\ \text{A} = 266.67 \sim 466.67\ \text{A}$$

$$K_L = I_{DK} / I_{DZ} = 14000 / (266.67 \sim 466.67) = (52.5 \sim 30) > 1.05$$，满足要求

【知识点解析】

当直流断路器具有限流功能时，可按下式计算：

$$I_{DZ1} \geqslant K_n I_{DZ2} / K_{XL}$$

式中，I_{DZ1}、I_{DZ2}为上、下级断路器瞬时保护（脱扣器）动作电流（A）；K_n为额定电流倍数，脱扣器整定值正误差或脱扣器瞬时脱扣范围最大值；K_{XL}为限流系数，其数值应由产品厂家

提供，可取 0.60～0.80。

断路器短路保护脱扣范围值及脱扣整定值应按照直流断路器厂家提供的数据选取，如无厂家资料，可按 DL/T 5044—2014 附录 A 表 A.5-1～表 A.5-5 选取。

灵敏系数校验：应根据计算的各断路器安装处短路电流校验各级断路器瞬时脱扣的灵敏系数，灵敏系数校验应按下列公式计算：

$$K_L = I_{DK} / I_{DZ}$$

式中，I_{DK}为断路器安装处短路电流（A）；K_L为灵敏系数，不宜低于 1.05；I_{DZ}为断路器瞬时保护（脱扣器）动作电流（A）。

例题 10-40～10-42：某 220 kV 无人值守变电站，直流系统标称电压为 220 V，直流控制与动力负荷合并供电，直流系统设 2 组蓄电池，蓄电池选用阀控式密封铅酸蓄电池（贫液，单体 2 V），不设端电池。请回答下列问题（计算结果保留两位小数）。

10-40：直流系统采用分层辐射形供电，分电柜馈线选用直流断路器，断路器安装出口处短路电流为 1.47 kA，回路末端短路电流为 450 A；其下级断路器选用额定电流为 6 A 的标准 B 型脱扣器微型断路器（其瞬时保护动作电流按脱扣器瞬时脱扣范围最大值考虑），该断路器安装处出口短路电流为 230 A。按下一级断路器出口短路，断路器脱扣器瞬时保护可靠不动作，计算该分电柜馈线断路器的短路瞬时保护脱扣器的整定电流及灵敏系数为下列哪组数值？（上下级断路器电流比系数取 10）（发输电 2017 年考题）

（A）240 A，1.88　　（B）240 A，1.63　　（C）420 A，1.07　　（D）420 A，3.50

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014。

题目分层辐射形供电，查表 A.5-2 标准 B 型脱扣器最大值为 7 倍，下级 S_4断路器脱扣器瞬时动作电流为 $I_{DZ2} = 6 \times 7\ A = 42\ A$。按下一级断路器出口短路，断路器脱扣器瞬时保护可靠不动作计算：

$$I_{DZ1} \geqslant K_{ib} I_{DZ2} \geqslant I_{d2} \Rightarrow I_{DZ1} \geqslant 10 \times 42\ A \geqslant 230\ A \Rightarrow I_{DZ1} \geqslant 420\ A$$

灵敏系数计算：$K_L = I_{DK} / I_{DZ1} = 1470/420 = 3.5$

10-41：蓄电池与直流柜之间采用铜导体 PVC 绝缘电缆连接，电缆截面为 70 mm^2，蓄电池回路采用直流断路器保护。直流断路器出口处短路电流为 4600 A，直流断路器短延时保护时间为 60 ms，断路器全分断时间为 50 ms。则蓄电池与直流柜间电缆达到极限温度的允许时间为下列哪项数值？（发输电 2017 年考题）

（A）0.11 s　　（B）2.17 s　　（C）3.06 s　　（D）4.75 s

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014。

条文说明第 E.1.1 条，铜导体 PVC 绝缘电缆 $K = 115$，极限温度的允许时间：

$$\sqrt{t} = K \frac{S}{I_d} \Rightarrow t = \left(115 \times \frac{70}{4600} \right)^2 s = 3.06\ s$$

10-42：请说明下列对本变电站直流系统的描述哪项是正确的？（发输电 2017 年考题）

（A）事故放电末期，蓄电池出口端电压不应小于 187 V，采用相控式充电装置时，宜配置 2 套充电装置

（B）事故放电末期，蓄电池出口端电压不应小于 187 V，高压断路器合闸回路电缆截面

的选择应满足蓄电池浮充电运行时，最远一台断路器可靠合闸，其允许电压降不大于 33 V

（C）采用相控式充电装置时，宜配置 2 套充电装置，高压断路器合闸回路电缆截面的选择应满足蓄电池浮充电运行时，最远一台断路器可靠合闸，其允许电压降不大于 33 V

（D）高压断路器合闸回路电缆截面的选择应满足蓄电池浮充电运行时，最远一台断路器可靠合闸，其允许电压降不大于 33 V。当蓄电池出口保护电器选用断路器时，应选择仅有过载保护和短延时保护脱扣器的断路器

答案：【D】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014。

第 C. 1. 3 条　终止放电电压为 $U_m = 87.5\% \times 220\ V = 192.5\ V$；

第 3. 4. 3-1 条　相控式宜配置 3 套充电装置；

第 6. 3. 4 条　浮充电运行时，保证最远一台断路器可靠合闸其允许电压降可取直流电源系统标称电压的 10%～15%，即 22～33 V；

第 6. 5. 1 条　直流断路器应具有电流速断和反限过电流保护，当不满足选择性保护配合时可增加短延时电流速断保护，A、B、C 项错误，D 项正确。

【知识点解析】

充电装置形式宜选用高频开关电源模块型充电装置，也可选用相控式充电装置。

1）1 组蓄电池时，充电装置的配置应符合下列规定：

① 采用相控式充电装置时，宜配置 2 套充电装置。

② 采用高频开关电源模块型充电装置时，宜配置 1 套充电装置；也可配置 2 套充电装置。

2）2 组蓄电池时，充电装置的配置应符合下列规定：

① 采用相控式充电装置时，宜配置 3 套充电装置。

② 采用高频开关电源模块型充电装置时，宜配置 2 套充电装置；也可配置 3 套充电装置。

3）1 组蓄电池配置 1 套充电装置的直流电源系统，充电装置宜设置 2 路交流电源。1 组蓄电池配置 2 套充电装置或 2 组蓄电池配置 3 套充电装置时，每个充电装置宜配置 1 路交流电源。

例题 10-43～10-46：某一接入电力系统的小型火力发电厂直流系统标称电压为 220 V，动力和控制共用。全厂设两组贫液吸附式的阀控式密封铅酸蓄电池，容量为 1600 A·h，每组蓄电池 103 只。蓄电池总内阻为 0.016 Ω。每组蓄电池负荷计算：事故放电初期（1 min）冲击放电电流为 747.41 A，经常负荷电流为 86.6 A，1～30 min 放电电流为 425.05 A，30～60 min 放电电流为 190.95 A，60～90 min 放电电流为 49.77 A，两组蓄电池设三套充电装置，蓄电池放电终止电压为 1.87 V。请根据上述条件分析计算并解答下列各题。

10-43：蓄电池至直流柜的距离为 50 m，采用铜芯动力电缆，该电缆允许的最小截面最接近下列哪项数值？（假定缆芯温度为 20℃）（发输电 2016 年考题）

（A）133.82 mm^2　　（B）625.11 mm^2　　（C）736 mm^2　　（D）1240 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规范》DL/T 5044—2014。

第 6. 3. 3 条和附录 E　蓄电池至直流屏回路电缆选择。

第 6.3.3 条　1 h 放电率电流 $I_{ca.1}=I_{d.1h}=5.5I_{10}=5.5\times1600/10\ \text{A}=880\ \text{A}$

事故初期（1 min）冲击放电电流 $I_{ca2}=I_{ch0}=747.41\ \text{A}$

取两者最大值 880 A。

第 6.3.3 条　蓄电池回路允许电压降 $0.5\%U_n\leqslant\Delta U_p\leqslant1\%U_n$，$1.1\ \text{V}\leqslant\Delta U_p\leqslant2.2\ \text{V}$。

第 E.1.1 条　缆芯温度为 20℃时，铜芯电缆电阻率直接取 0.184 Ω·mm²/m。

式（E.1.1-2）$S_{cac}=\dfrac{\rho\times2LI_{ca}}{\Delta U}=\dfrac{0.0184\times2\times50\times880}{1.1\sim2.2}\ \text{mm}^2=736\sim1472\ \text{mm}^2$

该电缆允许的最小截面最接近 736 mm²，选 C。

【知识点解析】

蓄电池组与直流柜之间连接电缆截面的选择应符合下列规定：

1）蓄电池组与直流柜之间连接电缆长期允许载流量的计算电流应大于事故停电时间的蓄电池放电率电流。

2）电缆允许电压降不宜大于直流电源系统标称电压的 1%；其计算电流应取事故停电时间的蓄电池放电率电流或事故放电初期（1 min）冲击负荷放电电流二者中的大者。

DL/T 5044—2014 附录 E 表 E.2-2 中列出回路不全时需要与前面的条文对应。

10-44：每组蓄电池及其充电装置分别接入不同母线段，第三套充电装置在蓄电池核对性放电后专门为蓄电池补充充电用，该充电装置经切换电器可直接对两组蓄电池进行充电。则第三套充电装置的额定电流至少应为下列哪项数值？（发输电 2016 年考题）

（A）88.2 A　　（B）200 A　　（C）286.6 A　　（D）300 A

答案：【B】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规范》DL/T 5044—2014。

第 6.2.2 条　第三套充电装置专门为蓄电池补充充电用，应满足蓄电池充电要求，充电时蓄电池脱开直流母线。

蓄电池 10 h 放电率电流 $I_{10}=C_{10}/10=1600/10\ \text{A}=160\ \text{A}$

充电装置的额定电流 $I_r=(1.0\sim1.25)I_{10}=(1.0\sim1.25)\times160\ \text{A}=160\sim200\ \text{A}$，选 B。

【知识点解析】

充电装置满足蓄电池均衡充电要求，其充电输出电流应按以下条件选择：

1）蓄电池脱开直流母线充电时，铅酸蓄电池应按 $(1.0\sim1.25)I_{10}$ 选择；镉镍碱性蓄电池应按 $(1.10\sim1.25)I_5$ 选择。

2）蓄电池充电同时还向经常负荷供电时，铅酸蓄电池应按 $(1.0\sim1.25)I_{10}$ 并叠加经常负荷电流选择；镉镍碱性蓄电池应按 $(1.10\sim1.25)I_5$ 并叠加经常负荷电流选择。

10-45：本工程润滑油泵直流电动机为 10 kW，额定电流为 55.3 A，在起动电流为 6 倍条件下，起动时间才能满足润滑油压的要求。直流电动机铜芯电缆长 150 m，截面积为 70 mm²，给直流电动机供电的直流断路器的脱扣器有 B 型［$(4\sim7)I_n$］、C 型［$(7\sim15)I_n$］，额定极限分断能力 M 值为 10 kA，H 值为 20 kA。在满足电动机起动和电动机侧短路时的灵敏度情况下（不考虑断路器触头和蓄电池间连接导线的电阻，蓄电池组开路电压为直流系统标称电压），下列哪组断路器选择是正确和合适的？并说明理由。（发输电 2016 年考题）

（A）63 A（B 型）额定极限短路分断能力 M

（B）63 A（B 型）额定极限短路分断能力 H

（C）63 A（C 型）额定极限短路分断能力 M

（D）63 A（C 型）额定极限短路分断能力 H

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规范》DL/T 5044—2014。

（1）按躲过电动机起动电流选择

润滑油泵直流电动机起动电流未按照第 6.12.3 条中限制在 2.0 倍，所以断路器选择不能完全按照第 6.5.2 条中按照电动机额定电流 55.3 A<63 A 选择，应结合脱扣器最小动作电流并避开直流电动机起动电流 55.3×6 A=331.8 A，63 A（B 型）最小动作电流为 63×4 A=252 A，63 A（C 型）最小动作电流为 63×7 A=441 A，故应选择 63 A（C 型）。

（2）按极限短路分断能力选择

直流电动机铜芯电缆长 150 m，截面积为 70 mm^2，直流回路铜芯电缆的总电阻 $\sum r_j=\rho\frac{2L}{S}=0.0184\times\frac{2\times150}{70}\Omega=0.079\,\Omega$，蓄电池总内阻为 0.016 Ω，直流电动机断路器出口侧短路电流为

$$I_{DK}=\frac{U_n}{n(r_b+r_1)+\sum r_j+\sum r_k}=\frac{220}{0.016+0.079+0}\text{ A}=2316\text{ A}$$

宜选择额定极限分断能力 M 值为 10 kA。

灵敏度校验：$K_L=\frac{I_{DK}}{I_{DZ1}}=\frac{2316}{(7\sim15)I_n}=2.45\sim5.25$，满足要求，选 C。

【知识点解析】

直流断路器的选择应符合以下规定：

1）额定电压应大于或等于回路的最高工作电压。

2）额定电流应大于回路的最大工作电流，直流电动机回路可按电动机的额定电流选择。直流电动机回路直流断路器额定电流应按电动机额定电流选择，这样可保证直流断路器长期运行，不致过热。同时，直流断路器脱扣电流为 $(7\sim8)I_n$，直流电动机起动电流一般被限制在额定电流的 2~3 倍，保护也不会误动作。

3）断流能力应满足安装地点直流电源系统最大预期短路电流要求。当采用短路短延时保护时，直流断路器额定短时耐受电流应大于装设地点最大短路电流。

10-46：该工程主厂房外有两个辅控中心 a、b，直流电源以环网供电。各辅控中心距直流电源的距离如图 10-11 所示，断路器电磁操作机构合闸电流为 3 A，断路器合闸最低允许电压为 85%标称电压，则断路器合闸电源回路铜芯电缆的最小截面计算值宜选用下列哪项数值？（假定缆芯温度为 20℃）（发输电 2016 年考题）

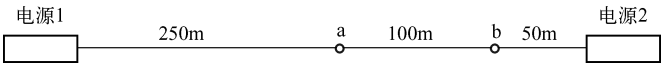


图 10-11　辅控中心与直流电源距离

（A）4.92 mm^2　　（B）1.16 mm^2　　（C）6.89 mm^2　　（D）7.87 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程直流电源系统设计技术规范》DL/T 5044—2014 附录 E。

表 E.2-2 小注 2　环形网络供电的控制、保护和信号回路的电压降，应按直流柜至环形网络最远断开点的回路计算。对于本题，按电源 1 至 b 作为最远断开点，距离 350 m。

第 6.3.4-2 条　事故放电电压直流母线电压最低值时，按直流母线最低电压值和高压断路器允许最低合闸电压值之差选取，不宜大于直流电源系统标称电压的 6.5%，最低允许电压为 $\Delta U_p = nU_m - 85\%U_n =$（103×1.87-2.5%×220）V = 5.61 V。

表 E.2-1　断路器合闸回路按电磁操作机构合闸电流为 3 A。

式（E.1.1-2）连接铜芯电缆计算截面为

$$S_{cac} = \frac{\rho \times 2LI_{ca}}{\Delta U_p} = \frac{0.0184 \times 2 \times 350 \times 3}{5.61}\ \text{mm}^2 = 6.89\ \text{mm}^2$$

【知识点解析】

计算断路器合闸回路电压降应保证最远一台断路器可靠合闸。在环形网络供电时，应按任一侧电源断开的最不利条件计算。对环形网络供电的控制、保护和信号回路的电压降，应按直流柜至环形网络最远断开点的回路计算。

10.4　交流操作电源

【知识点说明】

1）《工业与民用供配电设计手册》第四版对 UPS 交流操作电源容量选择没有大的改变，变电站的 UPS 的选择要求也可以参考《电力工程直流系统设计手册》第二版和《电力用直流和交流一体化不间断电源设备》DL/T 1074—2007 等。

2）站用电对于发输电专业是重要考点，对应规范《220~500 kV 变电所所用电设计技术规程》DL/T 5155—2002；但供配电专业要求不高，主要来自《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版。

依据书目：

《工业与民用供配电设计手册》第四版

《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011

参考书目：

《电力用直流和交流一体化不间断电源设备》DL/T 1074—2007

《电力工程直流系统设计手册》第二版

例题 10-47~10-48：一座 35/110 kV 有人值守的重要变电站，装有容量为 16000 kV·A 的主变压器两台，采用蓄电池直流操作系统，请根据设计规程解答如下问题。

10-47：该变电站操作电源及蓄电池容量的选择，下列表述中哪一项是不正确？并说明其理由。

（A）直流操作电源可装设二组 110 V 或 220 V 蓄电池组。

（B）变电站的直流母线，宜采用双母线接线。

（C）变电站的直流母线，宜采用单母线或单母线分段的接线。采用单母线分段时，蓄电池应能切换至任一母线。

（D）变电站蓄电池组的容量应按事故停电 1 h 的放电容量。

答案：【B】

解答过程：依据《35~110 kV 变电站设计规范》GB 50059—2011 第 3.7.2 条~第 3.7.4 条及解析；《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044—2014 第 3.3.3 条、第 3.5.2 条、第 4.2.2 条。

【知识点解析】

1 组蓄电池的直流电源系统接线方式应符合下列要求：

1）1 组蓄电池配置 1 套充电装置时，宜采用单母线接线。

2）1 组蓄电池配置 2 套充电装置时，宜采用单母线分段接线，2 套充电装置应接入不同母线段，蓄电池组应跨接在两段母线上。

3）1 组蓄电池的直流电源系统，宜经直流断路器与另一组相同电压等级的直流电源系统相连。正常运行时，该断路器应处于断开状态。

2 组蓄电池的直流电源系统接线方式应符合下列要求：直流电源系统应采用两段单母线接线，两段直流母线之间应设联络电器。正常运行时，两段直流母线应分别独立运行。

10-48：该变电站附近有一个小型变电所向民用建筑供电，若该变电所拟采用 220 V 在线 UPS 交流操作电源。交流操作电源负荷有控制、信号等经常负荷 5 A，断路器 3 台并使用弹簧储能交流操动机构，分闸电流为 5 A，断路器合闸电流为 15 A（假设负荷功率因数均为 1）。该变电所不设母联自投装置，则 UPS 容量最接近下列哪一项？（可靠系数取上限值）

（A）3.3 kV·A　　（B）6.6 kV·A　　（C）5.28 kV·A　　（D）2.2 kV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版第 411 页式（7.9-1）、式（7.9-2）。

正常的控制操作及信号回路所消耗的容量：$C_1=5\times0.22\ \text{kV}\cdot\text{A}=1.1\ \text{kV}\cdot\text{A}$

两台断路器同时分闸所消耗的容量：$C_2=(5+5)\times0.22\ \text{kV}\cdot\text{A}=2.2\ \text{kV}\cdot\text{A}$

一台断路器的合闸电磁铁的额定容量：$C_3=15\times0.22\ \text{kV}\cdot\text{A}=3.3\ \text{kV}\cdot\text{A}$

正常操作时所需容量：$C=K_{\text{rel}}(C_1+C_3)=1.2\times(1.1+3.3)\ \text{kV}\cdot\text{A}=5.28\ \text{kV}\cdot\text{A}$

事故操作时所需容量：$C'=K_{\text{rel}}(C_2+C_3)=1.2\times(2.2+3.3)\ \text{kV}\cdot\text{A}=6.6\ \text{kV}\cdot\text{A}$

取两式较大者，即 6.6 kV·A。

【知识点解析】

UPS 电源容量的选择：

当系统电源发生故障时，由 UPS 提供控制、操作及信号电源，而不考虑储能电源的容量，所以 UPS 电源容量主要考虑以下几个方面的负载。

1）由系统电源供电时，正常的控制操作及信号回路所消耗的容量 C_1。

2）当系统发生故障时，两台断路器同时分闸所消耗的容量 C_2。

3）系统电源正常供电或发生故障时一台断路器的合闸电磁铁的额定容量 C_3。

正常操作时所需容量为　　$C=K_{\text{rel}}(C_1+C_3)$

事故操作时所需容量为　　$C'=K_{\text{rel}}(C_2+C_3)$

式中，K_{rel}为可靠系数，取 1.1~1.2。

取两式中较大者作为 UPS 的选择容量。考虑到交流操作的经济性和实用性，UPS 电源的容量不宜超过 3 kV·A。

第11章　过电压保护、绝缘配合、建筑物防雷

【知识点导图】

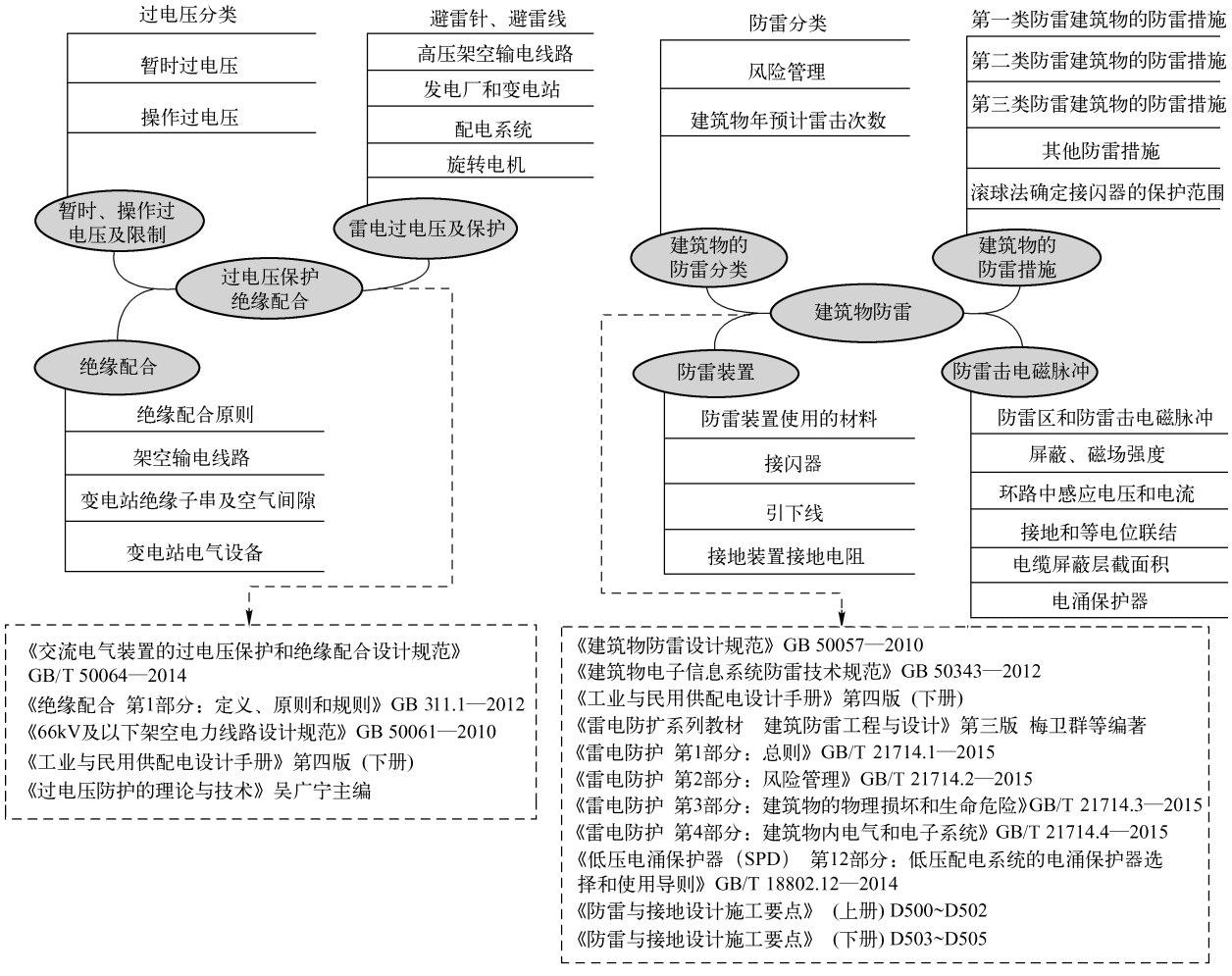


图11-1　过电压保护、绝缘配合、建筑物防雷知识点导图

图 11-1 所示的过电压保护、绝缘配合、建筑物防雷知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。其中过电压保护、绝缘配合考点比较集中，主要在折线法确定避雷针保护范围，暂时、操作过电压的要求，发电厂和变电站的雷电过电压 MOA 配置要求。建筑物防雷考点比较分散，但是滚球法确定接闪器的保护范围是必考点，其他考点众多，考题中轮换较快，冷门题目出现较多。防雷知识结构复杂学习难度很大，会消耗考生很多学习时间。

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 13 章中根据新规范的要求对过电压保护、绝缘配合、建筑物防雷、电涌保护器等章节都进行了更新。

11.1 暂时过电压、操作过电压及限制

【知识点说明】

1）过电压分类属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握基准电压计算、过电压分类。

2）暂时过电压属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握范围Ⅰ的各种暂时电压规定和计算。

3）操作过电压属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握范围Ⅰ的各种操作电压规定和计算，限制操作过电压用 MOA 的基本要求。

依据书目：

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则》GB 311.1—2012

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620—1997

《过电压防护的理论与技术》吴广宁主编

例题 11-1~11-7：某企业的 110 kV 变电所，地处海拔高度 900 m，110 kV 采用半高型室外配电装置，110 kV 配电装置母线高 10 m，35 kV 及 10 kV 配电装置选用移开式交流金属封闭开关柜，室内单层布置，主变压器布置在室外。请回答下列问题。

11-1：变电所的 110 kV 系统工频过电压一般不超过下列哪一项数值？并说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）94.6 kV　　（B）101.8 kV　　（C）126 kV　　（D）138.6 kV

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 3.2.2-1 条　110 kV 系统工频过电压的基准电压：$1.0\text{p.u.} = \dfrac{U_{\text{m}}}{\sqrt{3}} = 72.746\ \text{kV}$

第 4.1.1-3 条　变电所的 110 kV 系统工频过电压不应大于：$1.3\text{p.u.} = 1.3 \times 72.746\ \text{kV} =$

94.6 kV，选 A。

【知识点解析】

工频过电压幅值应符合下列要求：

1）范围Ⅰ中的不接地系统工频过电压不应大于 $1.1\sqrt{3}$ p. u.。

2）中性点谐振接地、低电阻接地和高电阻接地系统工频过电压不应大于 $\sqrt{3}$ p. u.。

3）110 kV 和 220 kV 系统工频过电压不应大于 1.3p. u.。

4）变电站内中性点不接地的 35 kV 和 66 kV 并联电容补偿装置系统工频过电压不应超过 $\sqrt{3}$ p. u.。

相对地暂时过电压和操作过电压标幺值的基准电压见表 11-1。

表 11-1　相对地暂时过电压和操作过电压标幺值的基准电压

设备最高电压 U_m/kV	3.6	7.2	12	24	40.5	72.5	126
工频过电压 1.0p. u. $=U_m/\sqrt{3}$	2.08	4.157	6.93	13.86	23.383	41.86	72.746
谐振、操作过电压、VFTO 1.0p. u. $=\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$	2.94	5.88	9.8	19.6	33.068	59.196	102.879

11-2：某工厂厂区内一台 10 kV 电动机的供电回路开关采用真空断路器。当断开空载运行的电动机时，操作过电压一般不超过下列哪项数值？（系统最高电压按 12 kV 计）（供配电 2014 年考题）

（A）24.5 kV　　（B）19.6 kV　　（C）17.3 kV　　（D）13.9 kV

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

条文说明第 4.2.9 条　开断空载电动机的过电压一般不超过 2.5p. u.。操作过电压一般不超过：

$$U=2.5\text{p. u.}=2.5\sqrt{\frac{2}{3}}U_m=2.5\sqrt{\frac{2}{3}}\times 12\text{ kV}=24.5\text{ kV}$$

11-3：该变电所 10 kV 母线带有一组并联电容器组，采用Y形接线方式 1 串 4 并，单台额定电压为 $11/\sqrt{3}$ kV，额定容量为 600 kvar，未配串联电抗器。当并联电容器组出口处断路器开断发生两相重击穿时，电容器组极间过电压可能会超过下列哪一项数值？并说明依据和理由。

（A）19.6 kV　　（B）22.45 kV　　（C）38.9 kV　　（D）49 kV

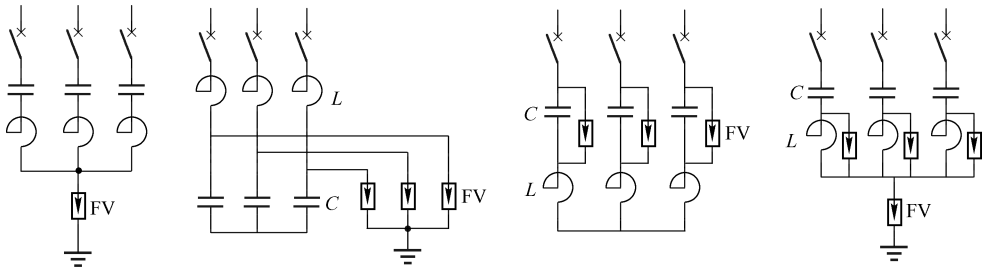
答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

条文说明第 4.2.7 条　电容器组出口处断路器开断发生两相重击穿时，电容器组极间过电压可能会超过：

$$U=2.5\sqrt{2}U_{n,C}=2.5\sqrt{2}\times 11\text{ kV}=38.89\text{ kV}$$

11-4：该变电所 10 kV 母线带有一组并联电容器组，当需要限制电容器极间和电源侧对地过电压时，10 kV 并联电容器组可采用哪一个图的接线方式？



答案：【B】

解答过程：依据《并联电容器装置设计规范》GB 50227—2008 第 4.2.8 条的图 4.2.8 或《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014 第 4.2.7 条的图 4.2.7。

并联电容器装置应装设抑制操作过电压的避雷器，不得采用三台避雷器星形连接后经第四台避雷器接地的接线方式。选 B。

11-5：变电所的 110 kV 系统相间操作过电压最大值为下列哪一项？并说明依据和理由。（供配电 2010 年考题改编）

（A）218 kV　　（B）305 kV　　（C）309 kV　　（D）432 kV

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 3.2.2-2 条　110 kV 系统相间操作过电压的基准电压：$1.0\text{p.u.}=\dfrac{\sqrt{2}U_{\text{m}}}{\sqrt{3}}=102.88\text{ kV}$

第 6.1.3-2 条　110 kV 相间操作过电压取相对地过电压的 1.3～1.4 倍，最大值为 1.4 倍。

故 110 kV 相间最大操作过电压：$1.4\text{p.u.}=1.4\times3\times102.88\text{ kV}=432.09\text{ kV}$。

11-6：在变电所的 110 kV 系统过电压保护中，下列哪一项无须采取限制措施？

（A）工频过电压　　（B）谐振过电压

（C）线路合闸和重合闸过电压　　（D）雷电过电压

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

条文说明第 4.2.1 条　线路合闸和重合闸过电压一般不超过 3.0p.u.，通常无须采取限值措施。

11-7：变电所中关于交流电气装置绝缘的过电压限值措施，下列说法正确的是？

（A）110 kV 有效接地系统中，形成局部不接地时，应装设中性点 MOA 进行保护

（B）旋转电机系统，接地故障持续时间大于 10 s 时，相对地 MOA 的持续运行电压不应

低于旋转电机额定电压的 1.3 倍

（C）对于 110 kV 有效接地系统，开断空载电缆线路宜采用重击穿概率极低的断路器

（D）10 kV 配电系统，当单相接地故障电容电流为 6 A 时，可采用中性点经高电阻接地方式

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 4.1.4 条　110 kV 有效接地系统中，形成局部不接地时，分为设置间隙和设有失地保护两种情况。答案 A 错误。

第 4.4.4 条　旋转电机系统，接地故障持续时间大于 10 s 时，相对地 MOA 的额定电压不宜低于旋转电机额定电压的 1.3 倍。答案 B 错误。

第 4.2.6 条　开断空载架空线路宜采用重击穿概率极低的断路器；开断电缆线路应采用重击穿概率极低的断路器。答案 C 错误。

第 3.1.5 条　6 kV、10 kV 配电系统，当单相接地故障电容电流≤7 A 时，可采用中性点高阻接地方式。答案 D 正确。

例题 11-8：某地区变电站 110 kV 主变压器高压侧作为工频过电压保护，配置了相地交流无间隙金属氧化锌避雷器 MOA，则 MOA 持续运行电压、额定电压应为下列哪组计算值？（发输电 2012 年考题改编）

（A）≥76.3 kV，≥98.1 kV　　（B）≥72.7 kV，≥94.5 kV

（C）≥71.8 kV，≥88.4 kV　　（D）≥70 kV，≥82 kV

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014 第 4.4.3 条。

相地持续运行电压：$$U_c \geqslant \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{126}{\sqrt{3}}\,\text{kV} = 72.75\,\text{kV}$$

相地额定电压：$$U_e \geqslant 0.75U_m = 0.75 \times 126\,\text{kV} = 94.5\,\text{kV}$$

例题 11-9：若某地区变电站 110 kV 主变压器中性点雷电冲击全波耐受电压为 400 kV，其中性点 MOA 标称放电电流下的最大残压取下列哪项数值最合理？并说明理由。（发输电 2016 年考题改编）

（A）280 kV　（B）300 kV　（C）340 kV　（D）380 kV

答案：【A】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 20.1.5 条　中性点无间隙金属氧化物避雷器 MOA 标称放电电流下的最大残压不应大于雷电冲击全波耐受电压 71%，即 0.71×400 kV = 284 kV。

例题 11-10：某工厂 10 kV 变电所，10 kV 侧采用消弧线圈接地。厂区内一台额定电压为 10 kV 的电动机供电回路接入一组旋转电机专用 MOA 作为操作过电压防护，相对地的 MOA 额定电压为下列哪项数值？

（A）24.5 kV　（B）19.6 kV　（C）17.3 kV　（D）13.0 kV

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 4.4.4 条　10 kV 侧采用消弧线圈接地，发生接地故障切除时间一定超过 10 s。

相对地的 MOA 额定电压：$U_e \geqslant 1.3U_r = 1.3\times10\,\text{kV} = 13\,\text{kV}$。

例题 11-11：66 kV 不接地系统或偶然脱离谐振接地系统的部分，若互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比 $K_{13}=\dfrac{66}{\sqrt{3}}\Big/\dfrac{0.1}{3}$，互感器单相绕组的励磁电抗 $X_m = 17.34\,\text{M}\Omega$，为限制电磁式电压互感器过饱和可能产生铁磁谐振过电压，宜在互感器的开口三角形绕组装设多大的电阻？

（A）$R = 19.21\,\Omega$　　（B）$R = 17.34\,\Omega$　　（C）$R = 15.28\,\Omega$　　（D）$R = 13.27\,\Omega$

答案：【D】

解题过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 4.1.11 条第 4 款　当 K_{13} 是互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比时，可在电压互感器的开口三角形绕组装设阻值不大于（X_m/K_{13}^2）的电阻或装设其他专门消除此类铁磁谐振的装置，即

$$R \leqslant X_m/K_{13}^2 = 17.34\times10^6\Big/\left(\frac{66}{\sqrt{3}}\Big/\frac{0.1}{3}\right)^2 = 13.27\,\Omega$$

例题 11-12：10 kV 不接地系统或偶然脱离谐振接地系统的部分，若互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比 $K_{13}=\dfrac{10}{\sqrt{3}}\Big/\dfrac{0.1}{3}$，互感器单相绕组的励磁电抗 $X_m = 1322\,\text{k}\Omega$，为限制电磁式电压互感器过饱和可能产生铁磁谐振过电压，可在 10 kV 及以下的母线上装设中性点接地的星形接地电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 X_{co}，使 X_{co} 小于下列何值？

（A）20440 Ω　　（B）17862 Ω　　（C）15280 Ω　　（D）13220 Ω

答案：【D】

解题过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 4.1.11 条第 4 款　当 X_{c0} 是系统每相对地分布容抗，X_m 为电压互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗时，可在 10 kV 及以下的母线上装设中性点接地的星形接地电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 X_{c0}，使 X_{c0} 小于 $0.01X_m$，即 $X_{co} \leqslant 0.01X_m = 0.01\times1322\times103\,\Omega = 13220\,\Omega$。

11.2　雷电过电压及保护

【知识点说明】

1）避雷针、避雷线属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握单支避雷针、两支等高避雷针保护范围计算，变电站独立避雷针（线）与配电

装置空气中距离、地中距离计算；掌握两支不等高避雷针、两支等高避雷线保护范围计算；了解多支避雷针保护范围计算。

2）高压架空输电线路的雷电过电压保护属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求熟练掌握导线与地线间的距离计算；掌握线路上的保护角、接地装置、线路交叉部分等。高压架空输电线路部分的例题详见第8章。

3）发电厂和变电站的雷电过电压保护属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求熟练掌握发电厂和变电站雷电侵入波过电压保护，MOA配置要求；掌握发电厂和变电站的避雷针或避雷线设置要求。

4）配电系统的雷电过电压保护属于普通考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求掌握配电系统过电压保护，MOA配置要求。

5）旋转电机的雷电过电压保护属于普通考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求掌握配电系统过电压保护，MOA配置要求。

依据书目：

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则》GB 311.1—2012

《66 kV及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010

《110~750 kV架空输电线路设计规范》GB 50545—2010

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620—1997

《发、变电站防雷保护及应用实例》江日洪等编

《电力系统过电压》解广润编

例题11-13：在工业场地内空旷地带设10 kV室外变电站一座，如图11-2所示。变电站占地尺寸为10 m×5 m（长×宽），变电站设备最高点为A点，高度为3 m。该变电站10 kV电源进线采用电缆直埋地敷设的方式。为了防止10 kV室外变电站遭受雷击，设计选用独立避雷针作为防直击雷保护措施。10 kV变电站和独立避雷针接地装置单独设置，室外地面位于同一标高，接地装置埋深相同。当独立避雷针的冲击接地电阻设计为8 Ω时，避雷针接地装置与变电所接地装置之间的最小距离和独立避雷针最小高度计算值为下列哪组数值？（供配电2016年考题）

（A）3.2 m，19.58 m　　（B）3.2 m，12.58 m

（C）2.4 m，13.53 m　　（D）2.4 m，12.93 m

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

（1）避雷针接地装置与变电所接地装置之间的最小距离

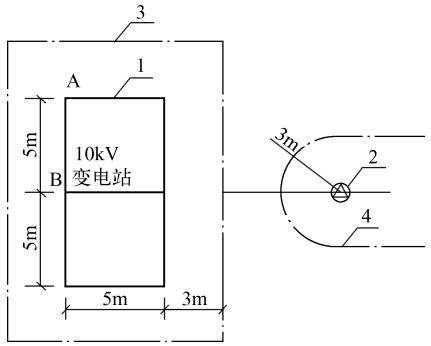


图 11-2　室外变电站示意

1—10 kV 变电站　2—独立避雷针　3—10 kV 变电站接地装置　4—独立避雷针接地装置

如图 11-2 所示空中距离条件不满足，可以计算的只有地中距离。最小地中距离（不宜小于 3 m）为

$$S_e \geqslant 0.3R_i = 0.3\times 8\ \text{m} = 2.4\ \text{m}$$

（2）独立避雷针最小高度

图 11-2 中所示独立避雷针位置为变电站的 2 点。最远最高保护距离为 A 点，所以保护距离为

$$r_x = \sqrt{5^2+(5+3+2.4+3)^2}\ \text{m} = 14.302\ \text{m}$$

题目已知避雷针高度小于 30 m，$P=1$，A 点高度为 3 m 小于 0.5 h。单支避雷针计算：

$$r_x = (1.5h-2h_x)P = (1.5h-2\times 3)\times 1 = 1.5h-6 = 14.302$$

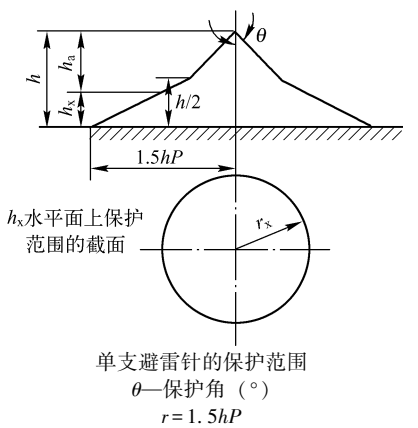
推导出独立避雷针最小高度：$h = 13.53$ m。

【知识点解析】

（1）避雷针计算

单支避雷针的保护范围计算见表 11-2。

表 11-2　单支避雷针的保护范围计算

步　骤	内　容
确定高度影响系数 P	当 $h\leqslant 30$ m，$P=1$；当 30 m$<h\leqslant$120 m 时，$P=\dfrac{5.5}{\sqrt{h}}$；当 $h>120$ m 时，$P=0.5$
在地面上的保护半径 r	 单支避雷针的保护范围 θ—保护角（°） $r=1.5hP$

（续）

步　骤	内　容
被保护物高度 h_x 水平面上的保护半径 r_x	当 $h_x \geqslant 0.5h$ 时，保护半径应按下式确定： $r_x=(h-h_x)P=h_aP$ 当 $h_x<0.5h$ 时，保护半径应按下式确定： $r_x=(1.5h-2h_x)P$
参数说明	h 为避雷针的高度（m）；P 为高度影响系数；r 为地面上的保护半径（m）；r_x 为避雷针在 h_x 水平面上的保护半径（m）；h_x 为被保护物的高度（m）；h_a 为避雷针的有效高度（m）

（2）空中距离和地中距离

1）独立避雷针与配电装置带电部分、发电厂和变电站电气设备接地部分、架构接地部分之间的空气中距离，应符合下式的要求：

$$S_a \geqslant 0.2R_i+0.1h_j$$

式中，S_a 为空气中距离（m）；R_i 为避雷针的冲击接地电阻（Ω）；h_j 为避雷针校验点的高度（m）。

2）独立避雷针的接地装置与发电厂或变电站接地网间的地中距离，应符合下式的要求：

$$S_e \geqslant 0.3R_i$$

式中，S_e 为地中距离（m）。

例题 11-14：某新建工厂内设 35/10 kV 变电所一座，35 kV 电源经架空线引入，线路长度 2 km。为减少因雷击架空线路避雷线、杆顶形成作用于线路绝缘的雷电反击过电压的危害，规范规定宜采取下列哪项措施？并说明理由。（供配电 2014 年考题）

（A）架设避雷线　　（B）增加线路上绝缘子的耐压水平

（C）降低杆塔的接地电阻　　（D）出入建筑物处设避雷器

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程高压送电线路设计手册》第二版第 134 页。

送电线路防雷综合措施——降低杆塔的接地电阻；对一般高度的杆塔，降低接地电阻是提高线路耐雷水平防止反击的有效措施。

例题 11-15～11-16：图 11-3 所示为一座 110/35/10 kV 变电站，110 kV 和 35 kV 采用敞开式配电装置，10 kV 采用户内配电装置，变压器三侧均采用架空套管出线。正常运行方式下任一路 110 kV 电源线路带全所负荷，另一路热备用，两台变压器分列运行，避雷器选用阀式避雷器。

其中：110 kV 电源进线为架空线路，约 5 km，进线段设有 2 km 架空避雷线，主变压器距 110 kV 母线避雷器最大电气距离为 60 m。

35 kV 系统以架空线路为主，架空线路进线段设有 2 km 架空避雷线，主变压器距 35 kV 母线避雷器最大电气距离为 60 m。

10 kV 系统以架空线路为主，主变压器距 10 kV 母线避雷器最大电气距离为 20 m。

请回答下列问题，并列出解答过程。

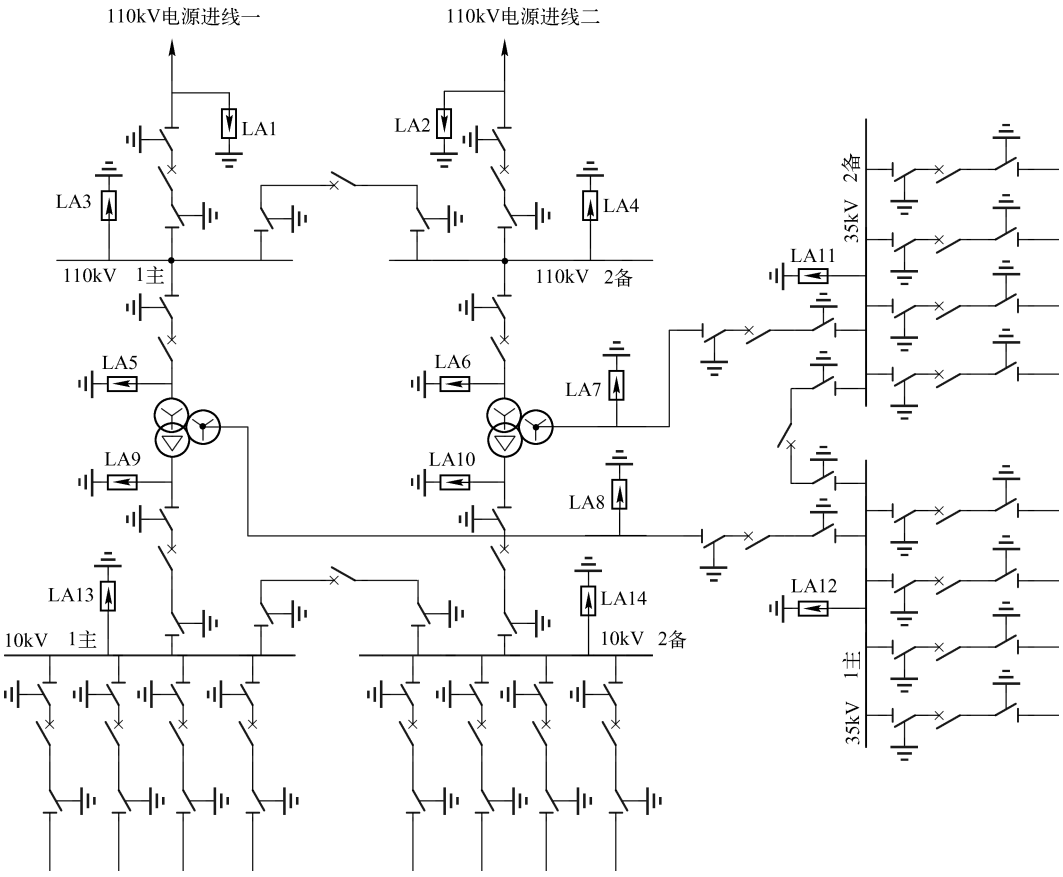


图 11-3 110/35/10 kV 变电站接线示意图

11-15：下列关于 110 kV 侧避雷器的设置哪一项是正确的？（供配电 2011 年考题）

（A）只设置 LA3、LA4

（B）只设置 LA1、LA2、LA3、LA4

（C）只设置 LA1、LA2

（D）设置 LA1、LA2、LA3、LA4、LA5、LA6

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 5.4.13 条的图 5.4.13-1 所示应设置的避雷器为 LA1、LA3、LA2、LA4。

第 5.4.13 条的表 5.4.13-1 中查 110 kV 进线为 1 路，进线长度为 2 km，避雷器到主变压器之间的最大电气距离为 125 m，主电压器距 110 kV 母线实际距离为 60 m，所以主变压器 110 kV 侧不用设置避雷器 LA5、LA6。

11-16：主变压器低压侧有开路运行的可能。下列关于 10 kV 侧、35 kV 侧避雷器的设置哪一项是正确的？（供配电 2011 年考题）

（A）只设置 LA7、LA8、LA9、LA10

（B）采用独立避雷针保护，不设置避雷器

（C）只设置 LA11、LA12、LA13、LA14

（D）设置 LA7、LA8、LA9、LA10、LA11、LA12、LA13、LA14

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 5.4.13 条　图 5.4.13-1 所示，应设置的避雷器为 LA11、LA12；图 5.4.13-4 所示，应设置的避雷器为 LA13、LA14。

第 5.4.13 条的表 5.4.13-1 中查 35 kV 进线为 4 路，进线长度 2 km，避雷器到主变压器之间的最大电气距离为 105 m，主电压器距 35 kV 母线实际距离为 60 m，所以主变压器 110 kV 侧不用设置避雷器 LA7、LA8。

第 5.4.13 条的表 5.4.13-2 中查 10 kV 进线为 4 路，避雷器到主变压器之间的最大电气距离为 30 m，主电压器距 10 kV 母线实际距离为 20 m，所以主变压器 10 kV 侧不用设置避雷器 LA7、LA8。

（GB/T 50064—2014 第 5.4.13-11 条对应 DL/ T 621—1997 第 7.3.8 条有重大变化。原 DL/T 621—1997 第 7.3.8 条中，与架空线路连接的三绕组主变压器的低压侧绕组如有开路运行的可能，应设置避雷器 LA7、LA8、LA9、LA10。）

综上所述，选 C。

【知识点解析】

范围Ⅰ发电厂和变电站高压配电装置的雷电侵入波过电压保护：

1）发电厂和变电站应采取措施防止或减少近区雷击闪络。未沿全线架设地线的 35～110 kV 架空输电线路，应在变电站 1～2 km 的进线段架设地线。35～110 kV 线路 1～2 km 进线保护段范围内的杆塔耐雷水平，应该符合表 11-3 的要求。

表 11-3　有地线线路的反击耐雷水平　（单位：kA）

系统标称电压/kV	35	66	110
单回线路	24～36	31～47	56～68
同塔双回线路	—	—	50～61

注：1. 反击耐雷水平的较高和较低值分别对应线路杆塔冲击接地电阻 7 Ω 和 15 Ω。
2. 雷击时刻工作电压为峰值且与雷击电流反极性。
3. 发电厂、变电站进线保护段杆塔耐雷水平不宜低于表中的较高数值。

2）未沿全线架设地线的 35～110 kV 线路，其变电站的进线段应采用图 11-4 所示的保护接线。在雷季，如变电站 35～110 kV 进线的隔离开关或断路器可能经常断路运行，同时线路侧又带电，必须在靠近隔离开关或断路器处装设一组 MOA。

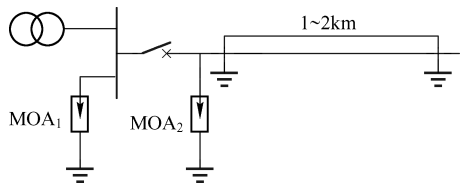


图 11-4　35～110 kV 变电站的进线保护接线

3）全线架设地线的 66～220 kV 变电站，其进线的隔离开关或断路器与上述情况相同时，宜在靠近隔离开关或断路器处装设一组 MOA。

例题 11-17：某企业的 110 kV 变电所，地处海拔高度 900 m，110 kV 采用半高型室外配电装置，110 kV 配电装置母线高 10 m，35 kV 及 10 kV 配电装置选用移开式交流金属封闭开关柜，室内单层布置，主变压器布置在室外。该变电所的 110 kV 配电装置的防直击雷采用

单支独立避雷针保护，避雷针高度为 30 m 时，该避雷针在地面上和离地面 10 m 高度的平面上的保护半径分别为下列哪一项？（供配电 2010 年考题）

（A）45 m，20 m　　（B）45 m，25 m

（C）45.2 m，20.1 m　　（D）45.2 m，25.1 m

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

避雷针高度为 30 m，影响系数 $P=1$。避雷针在地面上的保护半径为

$$r=1.5hP=1.5\times30\times1\ \text{m}=45\ \text{m}$$

因 $h_x=10\ \text{m}<0.5h=15\ \text{m}$，避雷针对离地面 10 m 高度的平面上的保护半径为

$$r_x=(1.5h-2h_x)P=(1.5\times30-2\times10)\times1\ \text{m}=25\ \text{m}$$

例题 11-18：某企业的 110 kV 变电所，地处海拔高度 900 m，110 kV 侧采用半高型室外配电装置，主变压器布置在室外。变电站采用独立避雷针进行直击雷保护，下列有关独立避雷针设计表述哪项是错误的？

（A）独立避雷针宜设独立的接地装置。在非高土壤电阻率地区，其接地电阻不宜超过 10 Ω

（B）独立避雷针宜设独立的接地装置，接地电阻难以满足要求时，该接地装置可与主接地网连接，但避雷针与主接地网的地下连接点至 35 kV 及以下设备与主接地网的地下连接点之间，沿接地体的长度不得小于 10 m

（C）独立避雷针不应设在人经常通行的地方，避雷针及其接地装置与道路或出入口等的距离不宜小于 3 m，否则应采取均压措施，或铺设砾石或沥青地面，也可铺设混凝土地面

（D）110 kV 及以上的配电装置，一般将避雷针装在配电装置的架构或房顶上，但在土壤电阻率大于 1000 Ω·m 的地区，宜装设独立避雷针。否则，应通过验算，采取降低接地电阻或加强绝缘等措施

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 5.4.6 条　独立避雷针宜设独立的接地装置，接地电阻难以满足要求时，该接地装置可与主接地网连接，但避雷针与主接地网的地下连接点至 35 kV 及以下设备与主接地网的地下连接点之间，沿接地体的长度不得小于 15 m，答案 B 错。

例题 11-19：某新建 66 kV 变电所，变电所内有 A、B 两个电气设备。室外布置，设备的半径均为 0.3 m，且与地面平行，高度分别为 16.5 m 和 11 m，拟在距 A 设备中心 15 m，距 B 设备中心 25 m 的位置处安装 32 m 高的避雷针一座，采用折线法计算避雷针在 A、B 两个设备顶端高度上的保护半径为下列哪组数值，并判断 A、B 两个电气设备是否在避雷针的保护范围内？（供配电 2013 年考题）

（A）11.75 m，18.44 m，均不在　　（B）15.04 m，25.22 m，均在

（C）15.04 m，25.22 m，均不在　　（D）15.50 m，26.0 m，均在

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》GB/T 50064—2014。

避雷针高：$h=32\ \text{m}>30\ \text{m}$，$P=\dfrac{5.5}{\sqrt{h}}=0.972$

A 电气设备高度 16.5 m，A 设备边缘到中心距 15.3 m，避雷针的保护范围计算：

$\dfrac{h}{2}=16\ \text{m}$，$h_{xA}=16.5\ \text{m}>\dfrac{h}{2}$，$r_{xA}=(h-h_{xA})P=(32-16.5)\times0.972\ \text{m}=15.066\ \text{m}<15.3\ \text{m}$，不在范围内

B 电气设备高度 11 m，B 设备边缘到中心距 25.3 m，避雷针的保护范围计算：

$h_{xB}=11\ \text{m}<\dfrac{h}{2}$，$r_{xB}=(1.5h-2h_{xB})P=(1.5\times32-2\times11)\times0.972\ \text{m}=25.27\ \text{m}<25.3\ \text{m}$，不在范围内

例题 11-20～11-22：某企业的 110 kV 变电所配电装置有 3 回架空出线，其中两回同塔架设。采用无间隙金属氧化物避雷器作为雷电过电压保护，其雷电冲击全波耐受电压为 480 kV。为防直击雷装设了独立避雷针，避雷针的工频冲击接地电阻为 10 Ω。请根据上述条件回答下列各题。（计算保留两位小数）

11-20：配电装置中装有两支独立避雷针，高度分别为 20 m 和 30 m，两针之间距离为 30 m，则两针之间的保护范围上部边缘最低点高度应为下列哪项数值？（发输电 2014 年考题改编）

（A）15 m　　（B）15.71 m　　（C）17.14 m　　（D）25.71 m

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

因避雷针最高为 30 m，高度影响系数为 $P=1$，因 $h_x\geqslant0.5h$，保护半径为

$$r_x=(30-20)\times1\ \text{m}=10\ \text{m}$$

高度 20 m 避雷针与等效高度 30 m 避雷针的距离：$D'=(30-10)\ \text{m}=20\ \text{m}$

两针之间的保护范围上部边缘最低点高度：

$$h_0=h-\frac{D}{7P}=\left(20-\frac{20}{7\times1}\right)\text{m}=17.14\ \text{m}$$

11-21：独立避雷针在 10 m 高度处与配电装置带电部分之间，允许的最小空气中距离为下列哪项数值？（发输电 2014 年考题改编）

（A）1 m　　（B）2 m　　（C）3 m　　（D）5 m

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

避雷针校验点高度 10 m，避雷针的工频冲击接地电阻为 10 Ω，允许的最小空气中距离为

$$S_a\geqslant0.2R_i+0.1h_j=(0.2\times10+0.1\times10)\ \text{m}=3\ \text{m}$$

第 5.4.11-5 条　最小空气中距离不宜小于 5 m，选 D。

11-22：独立避雷针在 10 m 高度处与配电装置带电部分之间，允许的最小地中距离为下列哪项数值？（发输电 2014 年考题改编）

（A）1 m　　（B）2 m　　（C）3 m　　（D）5 m

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

避雷针的工频冲击接地电阻为 10 Ω，允许的最小地中距离为

$$S_e \geqslant 0.3R_i = 0.3\times 10\ \text{m} = 3\ \text{m}$$

第 5.4.11-5 条　最小地中距离不宜小于 3 m，选 C。

例题 11-23：某发电厂（或变电所）的 110 kV 配电装置，采用户外敞开式中型布置，构架高度为 20 m，110 kV 采用无间隙金属氧化物避雷器和避雷针作为雷电过电压保护。该配电装置防直击雷保护采用在构架上装设避雷针的方式，当需要保护的设备为 10 m，要求保护半径不小于 18 m 时，需要增设的避雷针最低高度应为下列哪项数值？（发输电 2011 年考题改编）

（A）5 m　　（B）6 m　　（C）25 m　　（D）26 m

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

被保护物的高度 $h_x = 10$ m、被保护物的保护半径 $r_x \geqslant 18$ m，先假设避雷针高度 $h \leqslant 30$ m，则高度影响系数 $P = 1$。显然 $h_x < 0.5h$，根据规范中式（5.2.1-3）得 $h \geqslant \dfrac{\dfrac{r_x}{P}+2h_x}{1.5} = \dfrac{\dfrac{18}{1}+2\times 10}{1.5}$ m $= 25.33$ m，因为避雷针安装在构架上，构架高 20 m，所以需增设的避雷针最低高度为 6 m。

例题 11-24：某变电所电压等级为 110/10 kV，2 台容量为 60 MV·A 的主变压器，110 kV 系统为有效接地方式，10 kV 系统为消弧线圈接地方式。110 kV 为户外布置，母线均采用圆形铝管母线形式，10 kV 设备为户内开关柜。配电装置电气设备的直击雷保护采用在构架上设避雷针的方式，其中两支相距 60 m，高度为 30 m，当被保护设备的高度为 10 m 时，两支避雷针对被保护设备联合保护范围的最小宽度是下列哪项？（发输电 2010 年考题改编）

（A）13.5 m　　（B）15.6 m　　（C）17.8 m　　（D）19.3 m

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

被保护物的高度 $h_x = 10$ m；避雷针高度 $h \leqslant 30$ m，则高度影响系数 $P = 1$，两支避雷针相距 $D = 60$ m，有效高度 $h_a = h - h_x = (30-10)$ m $= 20$ m。

两针之间的保护范围上部边缘最低点高度：$h_0 = h - \dfrac{D}{7P} = \left(30 - \dfrac{60}{7}\right)$ m $= 21.43$ m

根据 $\dfrac{D}{h_aP} = \dfrac{60}{20\times 1} = 3$、$\dfrac{h_x}{h} = \dfrac{10}{30} = 0.333$，取 $\dfrac{h_x}{h} = 0.3$，查规范中图 5.2.2-2，得 $\dfrac{b_x}{h_aP} = 0.9$，故 $b_x = 20\times 1\times 0.9$ m $= 18$ m，因 $\dfrac{h_x}{h} = 0.333$，则两支避雷针对被保护设备联合保护范围的最小宽度 $b_x < 18$ m。

例题 11-25：某 10 kV 变电所，10 kV 母线上接有一台双绕组变压器，3 回架空出线，出线侧均装设避雷器，请问母线上是否需要装设避雷器，避雷器距变压器的距离不宜大于何值，并说明理由。

（A）需要装设避雷器，避雷器距变压器的距离不宜大于 20 m

（B）需要装设避雷器，避雷器距变压器的距离不宜大于 25 m

（C）需要装设避雷器，避雷器距变压器的距离不宜大于 30 m

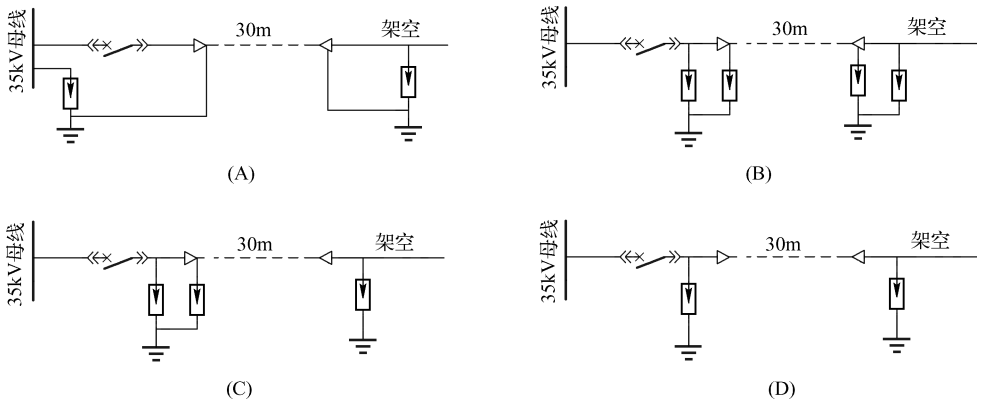
（D）不需装设避雷器，出线侧的避雷器可以保护母线设备及变压器

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

第 5.4.13-12 条中查表 5.4.13-2，变电所有 3 回架空出线，避雷器距变压器的距离不宜大于 25 m。

例题 11-26：35 kV 架空送电线路，经 30 m 三芯电缆接至 35 kV 变电站母线，为防止雷电侵入波过电压，在电缆段两侧装有氧化锌避雷器，下列选项中避雷器配置及保护接线正确的是哪一项？（发输电 2012 年考题）



答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

由第 5.4.13 条图 5.4.13a 可知，答案 A 符合规范要求。

11.3 绝缘配合

【知识点说明】

1）绝缘配合原则属于冷门考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握范围Ⅰ操作过电压绝缘配合。

2）架空线路绝缘配合属于冷门考点（发输电重要考点），依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版

（下册）第 13 章等。要求了解范围Ⅰ线路绝缘子串绝缘配合和空气间隙。

3）变电站绝缘子串及空气间隙属于冷门考点（发输电重要考点），依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求了解范围Ⅰ变电站绝缘子串及空气间隙。

4）变电站电气设备的绝缘配合属于重要考点，依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014、《绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则》GB 311.1—2012、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握变电站电气设备的额定耐受电压。

依据书目：

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014

《绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则》GB 311.1—2012

《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010

《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620—1997

《发、变电站防雷保护及应用实例》江日洪等编

《电力系统过电压》解广润编

例题 11-27～11-28：某企业的变电所电压等级为 110/35 kV，2 台主变压器，地处海拔高度 900 m，110 kV 采用半高型室外配电装置。请回答以下问题。

11-27：在选择 110 kV 变压器时，变压器的内绝缘相对地和相间的雷电冲击耐受电压应为下列哪项数值？并说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）200 kV，200 kV　　（B）395 kV，395 kV

（C）450 kV，450 kV　　（D）480 kV，480 kV

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

查表 6.4.6 中（注 1 分子分母对应的外绝缘和内绝缘）110 kV 变压器的内绝缘相对地和相间的雷电冲击耐受电压（分母值）分别为 480 kV、480 kV。

11-28：在选择 110 kV 变压器时，变压器的主变压器（内绝缘）的 1 min 工频耐受电压值应为下列哪项数值？并说明依据和理由。

（A）185 kV　　（B）200 kV　　（C）225 kV　　（D）285 kV

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

查表 6.4.6 中变压器的主变压器（内绝缘）的 1 min 工频耐受电压值为 200 kV。（内绝缘对应分母值）

例题 11-29：某企业的变电所电压等级为 35/0.4 kV，地处海拔高度 1900 m，35 kV 架空电力线路预防内部过电压措施中，带电部分与杆塔构件的最小间隙为下列哪项数值？并列出

解答过程。

（A）0.25 m　（B）0.2725 m　（C）0.45 m　（D）0.5 m

答案：【B】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010。

查表 6.0.9 中，35 kV 内部过电压带电部分与杆塔构件的最小间隙为 0.25 m。

第 6.0.10 条，海拔修正后：$N_H = N[1+0.1(H-1)] = 0.25[1+0.1\times(1.9-1)]$ m = 0.2725 m。

例题 11-30：某 110 kV 变电站配置有两台主变压器。变压器户外布置，110 kV 侧采用电缆进线。变电站所在位置最热月平均最高环境温度为 30℃，年最高温度为 40℃，海拔高度为 2000 m。该变电站 110 kV 进线电缆内绝缘额定雷电冲击耐受电压（峰值）为 450 kV，求其终端内、外绝缘雷电冲击耐受电压（峰值）最低值应分别为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（A）450 kV，450 kV　（B）450 kV，509 kV

（C）450 kV，550 kV　（D）509 kV，509 kV

答案：【B】

解答过程：依据《绝缘配合 第 1 部分 定义、原则和规则》GB 311.1—2012。

查表 4 得 110 kV 电缆外、内绝缘的额定雷电冲击耐受电压（峰值）为 450 kV，由附录 B，雷电冲击耐受电压 $q=1$，绝缘耐受电压海拔修正系数：$K_a = e^{q(H-1000)/8150} = e^{1000/8150} = 1.13$。

依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 第 4.1.3-2 条，电缆外绝缘需要修正，修正后电缆的外绝缘额定雷电冲击耐受电压为 $K_a U_s = 1.13\times450$ kV = 508.5 kV，内绝缘无须修正。

例题 11-31：若已知布置在海拔 2000 m 地区的某 110 kV 变电站（有效接地系统），年最高温度为 40℃，装设 MOA 处的高压电气设备外绝缘雷电冲击耐压（全波）为 505 kV 时，用 GB 50064—2014 规范选择避雷器，额定电压按系统工频过电压设计，则 MOA 的型号宜选下列哪项？

（A）Y10W-95/370　（B）Y10W-95/350

（C）Y5W-95/370　（D）Y5W-95/350

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014。

查表 4.4.3 中，MOA 额定电压：$U_r \geqslant 0.75U_m = 0.75\times126$ kV = 94.5 kV

MOA 雷电残压：$u_{e1.0} \geqslant k_{17}U_{1.p} \Rightarrow U_{1.p} \leqslant u_{e1.0}/k_{17} = 505/1.4$ kV = 360.7 kV

第 6.3.1 条条文说明，标称雷电流选择 5 kA。MOA 的型号宜选 Y5W-95/350。

例题 11-32：某 220 kV 变电站配置有两台主变压器。变压器户外布置，位于海拔 2000 m 处。若主变压器高压侧附近安装一组 Y10W-200/500 型避雷器，根据避雷器保护水平确定的变压器外绝缘雷电冲击耐受试验电压，在海拔 0 米处最低应为下列哪项数值？（发输电 2017 年考题）

（A）1086.4 kV　（B）894.7 kV　（C）850.0 kV　（D）700 kV

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014。

由题目中避雷器型号得出避雷器保护水平为500 kV，变压器外绝缘雷电冲击耐受试验电压为 $u_{e.1.0} \geqslant k_{17} U_{1.p} = 1.4 \times 500\,\text{kV} = 700\,\text{kV}$

海拔修正系数：$K_a = e^{qH/8150} = e^{2000/8150} = 1.278$

海拔修正后变压器外绝缘雷电冲击耐受试验电压为 $K_a u_{e.1.0} = 1.278 \times 700\,\text{kV} = 894.7\,\text{kV}$

11.4 建筑物的防雷分类

【知识点说明】

1）防雷分类属于重要考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求熟练掌握防雷分类。

2）风险管理属于冷门考点，依据《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求了解风险评估与管理。

3）建筑物年预计雷击次数属于重要考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求熟练掌握建筑物年预计雷击次数、等效面积计算。

依据书目：

《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010

《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《雷电防护 第2部分：风险管理》GB/T 21714.2—2015（IEC 62305-2—2010，IDT）

例题11-33：有一个大型超高层办公楼，高300 m，总建筑面积20万 m^2，地下4层，地上78层，有4层裙房。对本建筑物的电子信息系统雷击风险进行评估，已知裙房长108 m，宽81 m，高21 m；主楼长81 m，宽45 m，高300 m；如图11-5所示。当地雷暴天数取34 d/a；年预计雷击次数的校正系数按一般情况考虑。本建筑物预计雷击次数应为下列哪项数值？（供配电2016年考题）

（A）0.148次/a　　（B）1.23次/a　　（C）1.37次/a　　（D）12.3次/a

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012附录A或《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010附录A。

第A.1.3-3条　建筑物的等效面积：当建筑物各部位的高不同时，应沿建筑物周边逐点计算出最大的扩大宽度，其等效面积 A_e 应按各最大扩大宽度外端的连线所包围的面积计算。

裙房扩大宽度（相对于主楼）：$D_1 = 18 + \sqrt{H_1(200 - H_1)} = 18 + \sqrt{21(200-21)}\ \text{m} = 79.3\,\text{m}$

主楼（高于100 m）扩大宽度：$D_2 = H_2 = 300\,\text{m} > D_1$，所以按照扩大宽度300 m考虑。

建筑物（高于100 m）的等效面积 A_e 为

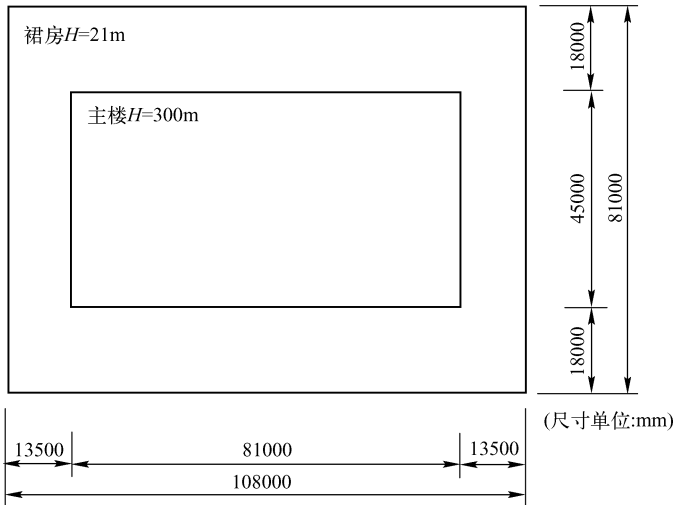


图 11-5　某办公楼尺寸参数

$$A_e=[LW+2H(L+W)+\pi H^2]\times10^{-6}$$

$$=[81\times45+2\times300\times(81+45)+\pi\times300^2]\times10^{-6}\ \text{km}^2=0.362\ \text{km}^2$$

本建筑物预计雷击次数，校正系数按一般情况考虑取 1：

$$N=kN_gA_e=1\times0.1\times34\times0.362\ \text{次/a}=1.23\ \text{次/a}$$

【知识点解析】

建筑物年预计雷击次数应按下式计算：

$$N=kN_gA_e$$

式中，N 为建筑物年预计雷击次数（次/a）；k 为校正系数，在一般情况下取 1；位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水露头处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物，以及特别潮湿的建筑物取 1.5；金属屋面没有接地的砖木结构建筑物取 1.7；位于山顶上或旷野的孤立建筑物取 2；N_g 为建筑物所处地区雷击大地的年平均密度（次/km^2/a）；A_e 为与建筑物截收相同雷击次数的等效面积（km^2）。

雷击大地的年平均密度，首先应按当地气象台、站资料确定；若无此资料，可按下式计算：

$$N_g=0.1T_d$$

式中，T_d 为年平均雷暴日（d/a），根据当地气象台、站资料确定。

与建筑物截收相同雷击次数的等效面积应为其实际平面积向外扩大后的面积，其计算方法应符合下列规定：

建筑物的高度小于 100 m 时，其每边的扩大宽度和等效面积应按下列公式计算：

$$D=\sqrt{H(200-H)}$$

$$A_e=[LW+2(L+W)\sqrt{H(200-H)}+\pi H(200-H)]\times10^{-6}$$

式中，D 为建筑物每边的扩大宽度（m）；L、W、H 为分别为建筑物的长、宽、高（m）。

当建筑物的高度大于或等于 100 m 时，其每边的扩大宽度应按等于建筑物的高计算；建筑物的等效面积应按下式计算：

$$A_e=[LW+2H(L+W)+\pi H^2]\times10^{-6}$$

当建筑物各部位的高不同时，应沿建筑物周边逐点算出最大扩大宽度，其等效面积应按每点最大扩大宽度外端的连接线所包围的面积计算。

例题 11-34：某 110 kV 变电站采用全户内布置，站内设三台主变压器，110 kV 采用中性点直接接地方式。变电站内仅设一座综合建筑物，建筑物长 54 m，宽 20 m，高 18 m，全站围墙长 73 m，宽 40 m。假定该变电站所在地区年平均雷暴日为 87.6 d/a，变电站综合楼的年预计雷击次数为下列哪一项？（供配电 2010 年考题）

（A）0.319 次/a　　（B）0.271 次/a　　（C）0.239 次/a　　（D）0.174 次/a

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 A 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 1256 页。

综合楼长、宽、高分别为 $L=54\ \text{m}$，$W=20\ \text{m}$，$H=18\ \text{m}$，$T_d=87.6\ \text{d/a}$。扩大宽度为

$$D=\sqrt{H(200-H)}=\sqrt{18\times(200-18)}\ \text{m}=57.24\ \text{m}$$

综合楼（小于 100 m）的等效面积 A_e 为

$$\begin{aligned}A_e&=[LW+2(L+W)\sqrt{H(200-H)}+\pi H(200-H)]\times10^{-6}\\&=[54\times20+2\times(54+20)\times\sqrt{18\times(200-18)}+\pi\times18\times(200-18)]\times10^{-6}\ \text{km}^2\\&=19\,842.84\times10^{-6}\ \text{km}^2=0.0198\ \text{km}^2\end{aligned}$$

雷击大地的年平均密度：$N_g=0.1T_d=0.1\times87.6$ 次/km^2 年 $=8.76$ 次/km^2/年

综合楼预计雷击次数，校正系数按一般情况考虑取 1：

$$N=kN_gA_e=1\times8.76\times19\,842.84\times10^{-6}\text{次/年}=0.173\,8\ \text{次/年}$$

例题 11-35：某企业工业场地内有办公楼、10 kV 变电站等建筑物群。附近山坡下有一栋综合办公楼，附近土壤率较小。10 kV 变电站提供一回 380 V 电源给综合办公楼，进线电缆采用 1 kV，YJV-3×240+1×120，采用穿 PVC 管埋地敷设，综合办公楼尺寸为长 60 m，宽 13 m，高 16 m，当地年平均雷暴日为 75 d/a，则该综合办公楼为第几类防雷建筑物？（供配电 2016 年考题改编）

（A）第一类　　（B）第二类　　（C）第三类　　（D）其他

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

建筑物的等效面积：

$$\begin{aligned}A_e&=[LW+2H(L+W)+\pi H(200-H)]\times10^{-6}\\&=[60\times13+2\times16\times(60+13)+\pi\times16\times(200-16)]\times10^{-6}\ \text{km}^2=0.012\ \text{km}^2\end{aligned}$$

校正系数取 1，建筑物年预计雷击次数：

$$N=kN_gA_e=1.5\times0.1\times75\times0.012\ \text{次/a}=0.139\ \text{次/a}$$

根据第 3.0.4 条，预计雷击次数大于 0.05 次/a 且小于 0.25 次/a 的该办公楼为第三类防雷建筑物。

例题 11-36：当一座防雷建筑物中兼有第一、二、三类防雷建筑物时，其防雷分类和防雷措施中下列哪一项是不正确的？

（A）当第一类防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的 30%及以上时，该建筑物宜确

定为第一类防雷建筑物

（B）当第一类防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的30%以下，且第二类防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的30%及以上时，或当这两类防雷建筑物部分的面积均小于建筑物总面积的30%，但其面积之和又大于30%时，该建筑物宜确定为第二类防雷建筑物

（C）当第一、二类防雷建筑物部分的面积之和小于建筑物总面积的30%，且不可能遭直接雷击时，该建筑物可确定为第三类防雷建筑物；但对第一、二类防雷建筑物部分的防闪电感应和防闪电电涌侵入，应采取各自类别的保护措施；当可能遭直接雷击时，宜按各自类别采取防雷措施

（D）当一座建筑物中仅有一部分为第一、二、三类防雷建筑物，且防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的50%以上时，应采取最高类别的保护措施

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第4.5.2条　当一座建筑物中仅有一部分为第一、二、三类防雷建筑物，且防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的50%以上时，该建筑物宜按规范GB 50057—2010第4.5.1条的规定采取防雷措施。答案D错。

例题11-37~11-39：某一高级酒店有建筑物A高90 m，长45 m，宽30 m，地处湖边。据当地气象台统计，该地区年平均雷暴日为30 d/a。请回答下列问题。

11-37：如果在建筑物的两侧90 m处有两个与其尺寸完全一致的建筑物B、C，它们与建筑物A平行长度总和为70 m。若建筑物B、C不在所考虑建筑物A以$h_r=100$ m的保护范围内，则该建筑物的截收相同雷击次数的等效面积为下列哪一项？

（A）0.032 km^2　　（B）0.026 km^2　　（C）0.029 km^2　　（D）0.0439 km^2

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010附录A。

扩大宽度为

$$D=\sqrt{H(200-H)}=\sqrt{90\times(200-90)}\ \text{m}=99.5\ \text{m}$$

建筑物B、C不在所考虑建筑物A以$h_r=100$ m的保护范围内，则等效面积为

$$\begin{aligned}A_e&=[LW+2(L+W)\sqrt{H(200-H)}+\pi H(200-H)]\times10^{-6}\\&=[45\times30+2\times(45+30)\times\sqrt{90\times(200-90)}+90\times\pi\times(200-90)]\times10^{-6}\ \text{km}^2\\&=0.04738\ \text{km}^2\end{aligned}$$

第A.0.3-2条　这些建筑物不在所考虑建筑物以$h_r=100$ m的保护范围内时，按式（A.0.3-2）算出的A_e可减去$(D/2)\times$（这些建筑物与所考虑建筑物边长平行以m计的长度总和）$\times10^{-6}$（km^2），即

$$A'_e=A_e-\frac{D}{2}L'=0.04738\ \text{km}^2-\frac{\sqrt{H(200-H)}}{2}\times70\times10^{-6}=0.04738-\frac{\sqrt{90\times(200-90)}}{2}\times70\times10^{-6}\ \text{km}^2$$

$$=0.0439\ \text{km}^2$$

11-38：如果该建筑A高度不变，改成圆柱形建筑，屋面圆半径为36 m，周围无建筑物，则该建筑物的截收相同雷击次数的等效面积为下列哪一项？

（A）0.077 km^2　　（B）0.026 km^2　　（C）0.032 km^2　　（D）0.0577 km^2

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 A。

扩大宽度为

$$D=\sqrt{H(200-H)}=\sqrt{90\times(200-90)}\ \text{m}=99.5\ \text{m}$$

等效面积为

$$A_e=\pi(r+D)^2\times10^{-6}=\pi\times(36+99.5)^2\times10^{-6}\ \text{km}^2=0.05768\ \text{km}^2$$

11-39：如果该建筑 A 高度不变，四周 100 m 内都有比它高的其他建筑，该建筑物的年预计雷击次数的等效面积为下列哪一项？

（A）0.032 km^2　　（B）0.026 km^2　　（C）0.0485 km^2　　（D）0.0014 km^2

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 A。

扩大宽度为

$$D=\sqrt{H(200-H)}=\sqrt{90\times(200-90)}\ \text{m}=99.5\ \text{m}$$

四周在 $2D$（199 m）范围内有比它高的其他建筑物时，等效面积为

$$A_e=LW\times10^{-6}=45\times30\times10^{-6}\ \text{km}^2=0.00135\ \text{km}^2$$

【知识点解析】

建筑物防雷年预计雷击次数等效面积计算公式见表 11-4。

表 11-4　建筑物防雷年预计雷击次数等效面积计算公式汇总表

建筑物防雷年预计雷击次数等效面积 A_e/km^2		
建筑物高度	$H<100$ m	$H\geqslant100$ m
扩大宽度	$D=\sqrt{H(200-H)}$	$D=H$
基本公式	$A_{e1}=[LW+2(L+W)\sqrt{H(200-H)}+\pi H(200-H)]\times10^{-6}$	$A_{e2}=[LW+2H(L+W)+\pi H^2]\times10^{-6}$
周边在 X 范围内有等高或比它低的其他建筑物	在 $2D$ 范围内 $A'_{e1}=A_{e1}-\frac{D}{2}L'_\Sigma\times10^{-6}$	在 $2H$ 范围内 $A'_{e2}=A_{e2}-\frac{H}{2}L'_\Sigma\times10^{-6}$
四周在 X 范围内都有等高或比它低的其他建筑物时	在 $2D$ 范围内 $A'_{e1}=\left[LW+(L+W)\sqrt{H(200-H)}+\frac{\pi H(200-H)}{4}\right]\times10^{-6}$	在 $2H$ 范围内 $A'_{e2}=\left[LW+H(L+W)+\frac{\pi H^2}{4}\right]\times10^{-6}$
周边在 X 范围内有比它高的其他建筑物时	在 $2D$ 范围内 $A''_{e1}=A_{e1}-DL'_\Sigma\times10^{-6}$	在 $2H$ 范围内 $A_{e2}=A_{e2}-HL'_\Sigma\times10^{-6}$
四周在 X 范围内都有比它高的其他建筑物时	在 $2D$ 范围内 $A''_{e1}=LW\times10^{-6}$	在 $2H$ 范围内 $A''_{e2}=LW\times10^{-6}$

注：1. 当建筑物部位的高不同时，应沿建筑物周边逐点算出最大扩大宽度，其等效面积应按每点最大扩大宽度外端的连接线所包围的面积计算。

2. 式中参数：D 为建筑物每边扩大宽度（m）；L、W、H 分别为建筑物的长宽高（m）；A_e 为建筑物防雷年预计雷击次数等效面积（km^2）；L'_Σ 为周边在 X 范围内建筑物与所考虑建筑物边长平行的长度总和（m）。

11.5　建筑物的防雷措施

【知识点说明】

1）防雷建筑物的防雷措施属于重要考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—

2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。

要求熟练掌握各类防雷建筑物防直击雷的措施要点：接闪杆或架空接闪线或网、引下线、接地等设置要求；独立接闪杆和架空接闪线或网的支柱及其接地装置与被保护建筑物及与其有联系的管道、电缆等金属物之间的间隔距离；架空接闪线至屋面和各种突出屋面的风帽、放散管等物体之间的间隔距离等。

掌握第一、二类防雷建筑物防闪电感应的措施要点。

熟练掌握各类防雷建筑物防反击和防闪电电涌侵入的措施要点：架空线转换成电缆穿钢管埋地长度、装设电涌保护器相关要求、补加水平接地体、冲击电流值、电涌保护器等设置要求。

掌握各类防雷建筑物排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的管口防雷措施。

掌握各类建筑物高度超过滚球半径防雷保护措施要点。

掌握其他防雷措施：防接触电压和跨步电压的措施等。

2）滚球法确定接闪器的保护范围属于重要考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第13章等。要求熟练掌握单支接闪针、两支等高接闪针保护范围计算；掌握两支不等高接闪针、两支等高接闪线保护范围计算；了解多支接闪针保护范围计算。

3）建筑物防雷的基础知识考生可以按照参考书目学习。

依据书目：

《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010

《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《雷电防护系列教材　建筑防雷工程与设计》第三版　梅卫群等编著

《雷电防护 第1部分：总则》GB/T 21714.1—2015（IEC 62305-1—2010，IDT）

《雷电防护 第2部分：风险管理》GB/T 21714.2—2015（IEC 62305-2—2010，IDT）

《雷电防护 第3部分：建筑物的物理损坏和生命危险》GB/T 21714.3—2015（IEC 62305-3—2010，IDT）

《雷电保护 第4部分：建筑物内电气和电子系统》GB/T 21714.4—2015（IEC 62305-4—2010，IDT）

《低压电涌保护器（SPD）第12部分：低压配电系统的电涌保护器 选择和使用导则》GB/T 18802.12—2014

《防雷与接地设计施工要点》（上册）D500～D502

《防雷与接地设计施工要点》（下册）D503～D505

例题11-40：某企业工业场地内有办公楼、10 kV变电站等建筑物群。附近山坡下有一栋综合办公楼，附近土壤率较小。10 kV变电站提供一回380 V电源给综合办公楼，进线电缆采用1 kV，YJV-3×240+1×120，采用穿PVC管埋地敷设，综合办公楼尺寸为长60 m，宽13 m，高16 m，当地年平均雷暴日为75 d/a。地下引入的外来金属管道和线路的总数 n 为4，综合办公楼电源总配电箱处装设有Ⅰ级试验的电涌保护器，其每一保护模式的冲击电流值应为下列哪项数值？（供配电2016年考题）

（A）6.25 kA　　（B）4.688 kA　　（C）4.167 kA　　（D）3.125 kA

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

（1）确定建筑物的防雷分类

建筑物的等效面积为

$$A_e=[LW+2H(L+W)]+\pi H(200-H)\times10^{-6}$$
$$=[60\times13+2\times16\times(60+13)+\pi\times16\times(200-16)]\times10^{-6}\ \text{km}^2=0.012\ \text{km}^2$$

校正系数取1，建筑物年预计雷击次数：

$$N=kN_gA_e=1.5\times0.1\times75\times0.012\ \text{次/a}=0.139\ \text{次/a}$$

根据第3.0.4条，预计雷击次数大于0.05次/a且小于0.25次/a的办公楼为第三类防雷建筑物。

（2）冲击电流值计算

根据第4.4.7条，第三类防雷建筑物雷电流为100 kA；YJV型电缆无屏蔽层，$m=4$芯穿PVC。

$$I_{imp}=\frac{0.5I}{nm}=\frac{0.5\times100}{4\times4}\text{kA}=3.125\ \text{kA}$$

【知识点解析】

第一类防雷建筑物防闪电电涌侵入的措施应符合下列规定：

1）在电源引入的总配电箱处应装设Ⅰ级试验的电涌保护器。电涌保护器的电压保护水平值应小于或等于2.5 kV。每一保护模式的冲击电流值，当无法确定时，冲击电流应取等于或大于12.5 kA。

2）电源总配电箱处所装设的电涌保护器，其每一保护模式的冲击电流值，当电源线路无屏蔽层时宜按式（11-1）计算，当有屏蔽层时宜按式（11-2）计算：

$$I_{imp}=\frac{0.5I}{nm}\tag{11-1}$$

$$I_{imp}=\frac{0.5IR_s}{n(mR_s+R_c)}\tag{11-2}$$

式中，I为雷电流（kA），取200 kA；n为地下和架空引入的外来金属管道和线路的总数；m为每一线路内导体芯线的总根数；R_s为屏蔽层每公里的电阻（Ω/km）；R_c为芯线每公里的电阻（Ω/km）。

第三类防雷建筑物防止雷电流流经引下线和接地装置时产生的高电位对附近金属物或电气和电子系统线路的反击，应符合下列规定：

低压电源线路引入的总配电箱、配电柜处装设Ⅰ级试验的电涌保护器，以及配电变压器设在本建筑物内或附设于外墙处，并在低压侧配电屏的母线上装设Ⅰ级试验的电涌保护器时，电涌保护器每一保护模式的冲击电流值，当电源线路无屏蔽层时可按式（11-1）计算，当有屏蔽层时可按式（11-2）计算，式中的雷电流应取100 kA。

例题11-41：厂区内有一露天场地，场地布置如图11-6所示。图中二类防雷建筑物的高度为5 m。拟利用设在场地中央的一座20 m高灯塔上安装的6 m长的接闪杆作为防直击雷保护措施。请按滚球法计算，该接闪杆能否满足图中二类防雷建筑物的防雷要求，并确定下列表述哪项是正确的。（供配电2014年考题）

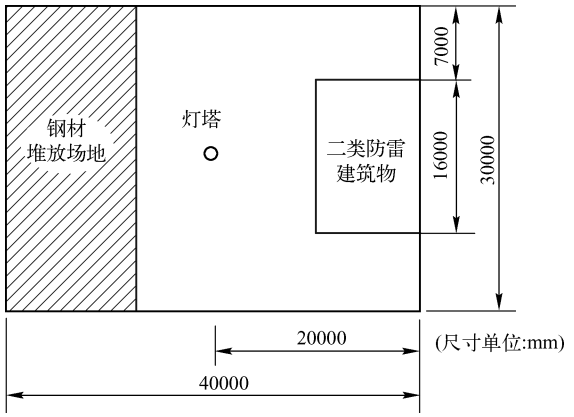


图 11-6　露天堆放场地布置图

（A）不满足此二类防雷建筑物和钢材堆放场地的防雷要求

（B）不满足此二类防雷建筑物的防雷要求，钢材堆放场地不需要防雷

（C）满足此二类防雷建筑物的防雷要求，钢材堆放场地不需要防雷

（D）满足此二类防雷建筑物和钢材堆放场地的防雷要求

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

接闪杆高 26 m，第二类防雷建筑物，滚球半径 45 m。灯塔上的接闪杆对二类防雷建筑物 5 m 高度时防雷保护半径为

$$r_x=\sqrt{h(2h_r-h)}-\sqrt{h_x(2h_r-h_x)}=[\sqrt{(20+6)\times(2\times45-20-6)}-\sqrt{5\times(2\times45-5)}\,]\text{m}=20.18\text{m}$$

其最远点距离：$S=\sqrt{8^2+20^2}\ \text{m}=21.54\ \text{m}>20.18\ \text{m}$，不在灯塔上的接闪杆保护范围内。

第 4.5.5 条，钢材堆放场地不需要防雷。选 B。

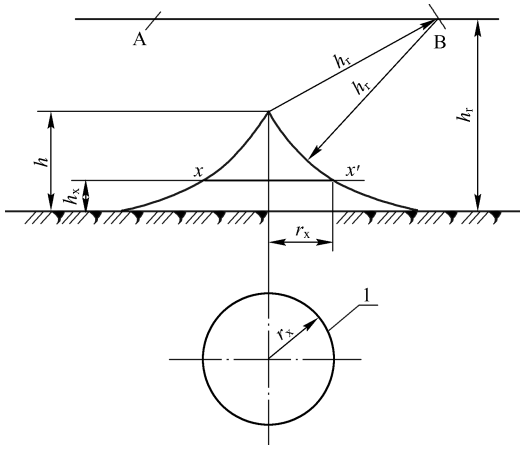
【知识点解析】

单支接闪杆的保护范围见表 11-5。

表 11-5　单支接闪杆的保护范围

步　骤	内　容
建筑物防雷分类	确定建筑物的防雷分类
滚球半径	根据建筑物的防雷分类，来确定接闪器滚球半径 h_r，第一类防雷建筑物 30 m；第二类防雷建筑物 45 m；第三类防雷建筑物 60 m。粮、棉及易燃物大量集中的露天堆场，当其年预计雷击次数大于或等于 0.05 次/a 时，其采用独立接闪杆或架空接闪线防直击雷的滚球半径可取 100 m
单支接闪杆的保护半径	当接闪杆高度 h 小于或等于滚球半径 h_r 时，按照以下顺序确定保护范围； 1）距地面 h_r 处作一平行于地面的平行线。 2）以杆尖为圆心，h_r 为半径作弧线交于平行线的 A、B 两点。 3）以 A、B 为圆心，h_r 为半径作弧线，弧线与杆尖相交并与地面相切。弧线到地面为其保护范围。保护范围为一个对称的锥体，如下所示： 4）在地面上的保护半径 $r_0=\sqrt{h(2h_r-h)}$　(11-3) 5）被保护物高度水平面 $x-x'$ 上的保护半径

（续）

步　骤	内　容
单支接闪杆的保护半径	$r_x=\sqrt{h(2h_r-h)}-\sqrt{h_x(2h_r-h_x)}$　（11-4） 当接闪杆高度 h 大于 h_r 时，在接闪杆上取高度等于 h_r 的一点代替单支接闪杆杆尖作为圆心。其余的做法应符合上条要求，式（11-3）和式（11-4）中的 h 用 h_r 代入
单支接闪杆的保护半径	 单支接闪杆的保护范围 1—xx'平面上保护范围的截面
参数说明	r_0 为地面上的保护半径（m）；h 为接闪杆高度（m）；h_r 为滚球半径（m）；r_x 为避雷针在 h_x 水平面上的保护半径（m）；h_x 为被保护物的高度（m）

例题 11-42：某新建工厂，厂区内有普通砖混结构办公建筑一座，预计雷击次数为 0.1 次/a，屋顶采用连成闭合环路的接闪带，共设 4 根引下线。办公建筑内设有电话交换设备，选用塑料绝缘屏蔽铜芯市话通信电缆架空引入，选用电涌保护器对电话交换设备进行雷击电磁脉冲防护。接闪带与建筑物内的电气设备、各种管线及电话交换设备电涌保护器共用接地装置，并在进户处做等电位联结，从引下线到等电位联结点的长度为 30 m。办公建筑的接闪带引下线与架空引入的通信电缆之间的最小空气间隔距离为下列哪项数值？（供配电 2014 年考题改编）

（A）0.53 m　　（B）0.79 m　　（C）1.19 m　　（D）1.25 m

答案：【A】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 3.0.4 条　预计雷击次数大于或等于 0.05 次/a，且小于或等于 0.25 次/a 的住宅、办公楼，该办公楼属于第三类防雷建筑。

附录 E 第 E.0.1 条中屋顶采用连成闭合环路的接闪带，共设 4 根引下线，取 $k_c=0.44$。

第三类防雷建筑的接闪带引下线与架空引入的通信电缆之间的最小空气间隔距离为

$$S_{a3}\geqslant 0.04k_c l_x=0.04\times 0.44\times l_x=0.04\times 0.44\times 30\ \text{m}=0.528\ \text{m}$$

例题 11-43～11-44：某新建项目，包括生产车间、66 kV 变电所、办公建筑等。当地的平均雷暴日为 20 d/a，预计雷击次数为 0.2 次/a。请解答下列问题。

11-43：该项目厂区内有一个第一类防雷建筑，电源由 500 m 处 10 kV 变电所通过架

空线路引来，在距离该建筑物 18 m 处改由电缆穿钢管埋地引入该建筑物配电室。电缆由室外引入室内后沿电缆沟敷设，长度为 5 m，电缆规格为 YJV-10 kV，3×35 mm^2。电缆埋地处土壤电阻率为 200 Ω·m。电缆穿钢管埋地的最小长度宜为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）29 m　　（B）23 m　　（C）18 m　　（D）15 m

答案：【A】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

电缆不带金属铠装，所以穿钢管埋地的最小长度为

$$l \geqslant 2\sqrt{\rho} = 2\times\sqrt{200}\ \text{m} = 28.28\ \text{m}, \text{取}\ 29\ \text{m}$$

11-44：该项目厂区某普通办公建筑，低压电源线路采用带内屏蔽层的 4 芯电力电缆架空引入，作为建筑内用户 0.4 kV 电气设备的电源。电缆额定电压为 1 kV，土壤电阻率为 5000 Ω·m；屏蔽层电阻率为 17.24×10^{-9} Ω·m，屏蔽层每公里电阻为 1.4Ω，电缆芯线每公里的电阻为 0.2 Ω，电缆线路总长度为 100 m，电缆屏蔽层在架空前接地，架空距离为 80 m，通过地下和架空引入该建筑的金属管道和线路总数为 3，则电力电缆屏蔽层的最小截面积宜为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）0.37 mm^2　　（B）2.22 mm^2　　（C）2.77 mm^2　　（D）4.44 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 3.0.4 条　预计雷击次数大于或等于 0.05 次/a，且小于或等于 0.25 次/a 的住宅、办公楼，该办公楼属于第三类防雷建筑。

根据第 4.4.7 条第三类防雷建筑物雷电流为 100 kA；金属管道和线路总数为 $m=3$，屏蔽层每公里电阻为 1.4 Ω，电缆芯线每公里的电阻为 0.2 Ω，冲击电流值为

$$I_f = \frac{0.5IR_s}{n(mR_s+R_c)} = \frac{0.5\times100\times1.4}{3\times(4\times1.4+0.2)}\ \text{kA} = 4.023\ \text{kA}$$

表 H.0.1-1 中架空距离 L_c 为 80 m；表 H.0.1-2、表 H.0.1-3 中耐冲击电压 U_w：0.4 kV 电气设备为 $U_w=2.5$ kV，电力电缆 $U_n \leqslant 1$ kV 的为 $U_w=15$ kV，按照耐冲击电压最低值考虑（题目中未说明防护措施）。

电力电缆屏蔽层的最小截面积为

$$S_c \geqslant \frac{I_f\rho_c L_c\times10^6}{U_w} = \frac{4.023\times17.24\times10^{-9}\times80\times10^6}{2.5}\ \text{mm}^2 = 2.22\ \text{mm}^2$$

例题 11-45：某 110 kV 变电站采用全户内布置，站内设三台主变压器，110 kV 采用中性点直接接地方式。变电站内仅设一座综合建筑物，建筑物长 54 m，宽 20 m，高 18 m，全站围墙长 73 m，宽 40 m。变电站平面布置如图 11-7 所示。该变电站综合楼为第三类防雷建筑物，设两支等高的接闪杆进行防雷保护，接闪杆针尖距地面最小距离应为下列哪项数值？（接闪针位置如图 11-7 所示，要求按滚球法计算，数值计算按四舍五入取小数点后一位）（供配电 2010 年考题）

（A）50 m　　（B）52 m　　（C）54 m　　（D）56 m

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 A 或《工业与民用供配

电设计手册》第四版（上册）第 1256 页。

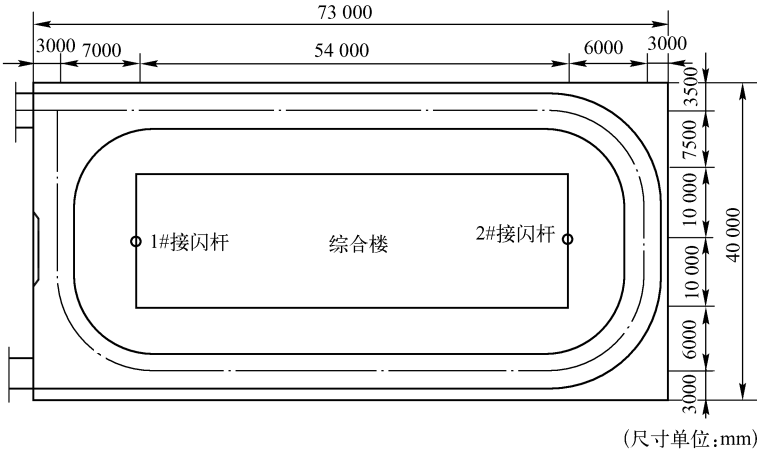


图 11-7　变电站平面布置图

该变电站综合楼为第三类防雷建筑物，滚球半径 60 m。假设 $D<2\sqrt{h(2h_r-h)}$ 时，按以下步骤计算：

1）根据两等高接闪杆 ABCE 外侧保护范围，以综合楼宽度为保护半径 r_x，计算接闪杆在楼高 $h_x=18$ m 上的高度：

$$r_x=\sqrt{h(2h_r-h)}-\sqrt{h_x(2h_r-h_x)}$$

代入数值得 $10=\sqrt{h(2\times60)-h}-\sqrt{18\times(2\times60-18)}$，计算出接闪杆高度为 31.6 m。

2）根据两等高接闪杆在 AOB 轴线上，建筑物长度为 $D=54$ m，中心线上的最低保护高度应按下式计算：

$$h_x=h_r-\sqrt{(h_r-h)^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2-x^2}$$

代入数值得 $18=60-\sqrt{(60-h)^2+\left(\frac{54}{2}\right)^2-0^2}$，计算出接闪杆高度为 27.83 m。

3）根据两等高接闪杆 ABCE 内侧保护范围，以综合楼宽度为 $x=0$ 处最小保护宽度 b_x，计算接闪杆在楼高 $h_x=18$ m 的高度：

$$b_x=\sqrt{h(2h_r-h)-\left(\frac{D}{2}\right)^2}-\sqrt{h_x(2h_r-h_x)-x^2}$$

代入数值得 $10=\sqrt{h(2\times60-h)-\left(\frac{54}{2}\right)^2}-\sqrt{18\times(2\times60-18)-0^2}$，计算出接闪杆高度为 51.2 m（取最小值）。

综上所述，选 B 时，两支等高的接闪杆可以对综合楼完全保护。

【知识点解析】

两支等高接闪杆的保护范围如图 11-8 所示，在接闪杆高度 h 小于或等于 h_r 的情况下，两支接闪杆距离 D：

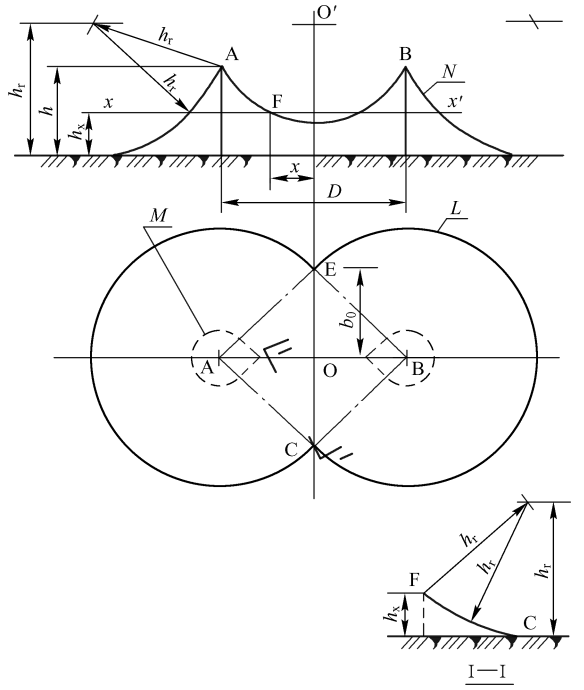


图 11-8　两支等高接闪杆的保护范围

当 $D \geqslant 2\sqrt{h\ (2h_r - h)}$ 时，按单支接闪杆计算；当 $D < 2\sqrt{h\ (2h_r - h)}$ 时，两支接闪杆之间的最小保护高度和最小保护宽度计算如下：

1）在 AOB 轴线上，距中心线任一距离 $x=0$ 处在 h_x 高度是最低点，O 点的最小保护高度应按下式计算：

$$h_x = h_r - \sqrt{(h_r - h)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

2）确定 x—x' 平面上的保护范围截面 M 的方法。以单支接闪杆的保护半径 r_x 为半径，以 A、B 为圆心作弧线与四边形 AEBC 相交；以单支接闪杆的（$r_0 - r_x$）为半径，以 E、C 为圆心作弧线与上述弧线相交，见图 11-9 中的截面 M。在 x—x' 平面上距中心线任一距离 x 处，每侧的最小保护宽度 b_x 可按下式计算：

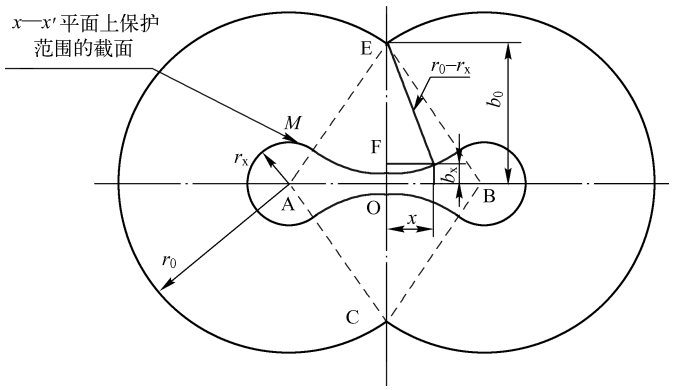


图 11-9　x—x' 平面上的保护范围截面 M

$$b_x=\sqrt{h(2h_r-h)-\left(\frac{D}{2}\right)^2}-\sqrt{h_x(2h_r-h_x)-x^2}$$

例题 11-46：某工厂一个第二类防雷建筑物接闪网及引下线布置如图 11-10 所示，找出图中有几处不符合规范的要求，并请逐条说明正确的做法。（供配电 2006 年考题）

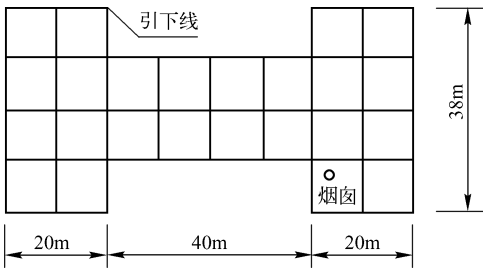


图 11-10　接闪网及引下线布置图

注：1. 避雷网网格最大尺寸 10 m×10.5 m。

2. 引下线共 12 处，利用建筑物四周柱子的钢筋，平均间距为 22.5 m。

3. 金属烟囱高出屋顶 3 m，不装接闪器，不排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘。

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 4.3.1 条　应在整个屋面组成不大于 10 m×10 m 的接闪网格，题干网格为 10 m×10.5 m，不符合规范要求。

第 4.3.2 条　不排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的金属烟囱应在屋面接闪器保护范围之外的非金属物体装接闪器，并应和屋面防雷装置相连。不符合规范要求。

第 4.3.3 条　防雷引下线应沿建筑物四周均匀布置，其间距不应大于 18 m，题干为 22.5 m，不符合规范要求。

注：题目中未详细叙述建筑物的结构，同时还应考虑第 5.3.8 条第二类防雷建筑物或第三类防雷建筑物为钢结构或钢筋混凝土建筑物时，在其钢构件或钢筋之间的连接满足 GB 50057—2010 规定并利用其作为引下线的条件下，当其垂直支柱均起到引下线的作用时，可不要求满足专设引下线之间的间距。

例题 11-47：某高层住宅楼，预计雷击次数为 0.38 次/a，建筑物高 90 m，该建筑物顶部防雷已按规范做好，其防侧击雷高度范围应为下列哪一项？

（A）60～90 m　　（B）72～90 m　　（C）60～72 m　　（D）68～90 m

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 3.0.3 条　预计雷击次数大于 0.25 次/a 的住宅、办公楼，该住宅楼属于第二类防雷建筑。

第 4.3.9-2 条　第二类防雷建筑高于 60 m 的建筑物，其上部占高度 20%并超过 60 m 的部位应防侧击雷，在建筑物上部占高度 20%并超过 60 m 的部位，各表面上的尖物、墙角、边缘、设备以及显著突出的物体，应按屋顶上的保护措施处理。

防侧击雷起点 90 m-90 m×20% = 72 m，到顶部，即 72～90 m。

例题 11-48：某省委办公楼为钢筋混凝土框架结构，预计雷击次数为 0.12 次/a，利用建筑物钢筋做防雷引下线，同时建筑物钢筋、钢结构等金属物与被利用部分连成整体，为了防止雷电流流经引下线和接地装置产生高电位对附近金属物或电气线路的反击，金属物与引下线之间距离是多少？

（1）大于 1 m　　（B）大于 3.2 m　　（C）大于 5.6 m　　（D）可不受限制

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 3.0.3 条　预计雷击次数大于 0.05 次/a 的部、省级办公建筑物，该办公楼属于第二类防雷建筑。

第 4.3.8-1 条　第二类防雷建筑在金属框架结构建筑物中，或在与钢筋连接在一起、电气贯通的钢筋混凝土框架建筑物中，金属物或线路与引下线之间的间隔距离可无要求。

例题 11-49：某接闪针高度为 32 m，在用折线法和滚球法计算其保护范围时，下列哪种观点是正确的？并说明理由。（$h_r=60$ m）。

（A）在 16 m 以下，折线法的保护面积更大

（B）在地面上滚球法的保护面积更大

（C）在 16 m 以上时，折线法的保护面积更大

（D）在整个高度内，折线法保护面积都大于滚球法

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 D 和《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014 的 5.2 节。

折线法和滚球法保护范围计算见表 11-6。

表 11-6　折线法和滚球法保护范围计算

被保护物高度	滚球法 GB 50057—2010	折线法 GB/T 50064—2014
地面	$r_0=\sqrt{2h_rh-h^2}=\sqrt{2\times60\times32-32^2}$ m $=53.06$ m	$r=1.5hP=1.5\times32\times\dfrac{5.5}{\sqrt{32}}$ m $=46.67$ m
<16 m 如 14 m	$r_x=\sqrt{2h_rh-h^2}-\sqrt{2h_rh_x-h_x^2}$ $=\sqrt{2\times60\times32-32^2}-\sqrt{2\times60\times14-14^2}$ m $=23.444$ m	$r_x=(1.5h-2h_x)P$ $=(1.5\times32-2\times14)\times\dfrac{5.5}{\sqrt{32}}$ m $=19.445$ m
>16 m 如 20 m	$r_x=\sqrt{2h_rh-h^2}-\sqrt{2h_rh_x-h_x^2}$ $=\sqrt{2\times60\times32-32^2}-\sqrt{2\times60\times20-20^2}$ m $=8.344$ m	$r_x=(h-h_x)P=(32-20)\times\dfrac{5.5}{\sqrt{32}}$ m $=11.66$ m

综合表中对比，选 C。

例题 11-50～11-53：某厂一化工及危险品库房，建筑长×宽×高为 12 m×6 m×6 m，内储存有炸药、起爆药等爆炸性物质及其他危险化工品，其中炸药、起爆药等爆炸性物质储存面积占库房总面积的 40%。请回答以下问题。

11-50：该库房应按几类防雷建筑物考虑？下列选项中对该库房防直击雷防护说法中哪项是正确的？

（A）第二类防雷建筑物，采用屋顶接闪杆保护

（B）第三类防雷建筑物，沿屋顶四周女儿墙敷设接闪带保护

（C）第一类防雷建筑物，将屋顶混凝土屋面板内的钢筋焊接成 6 m×6 m 的网格并接地

（D）第一类防雷建筑物，应装设独立接闪杆或架空接闪线或网

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 3.0.2 条　化工危险品库房内储存有炸药、起爆药等爆炸性物质的部分应属第一类防雷建筑物，且其储存面积已超过该建筑物总面积的 30%，故按规范第 4.5.1 条规定，应划为第一类防雷建筑物。

第 4.2.1-1 条　对第一类防雷建筑物的直击雷防护，应装设独立接闪杆或架空接闪线或网。

11-51：若该库房设置独立接闪杆，其接地装置的冲击接地电阻为 10 Ω，该库房与生产车间有联系的管道，管道从接近房顶处进入库房，该独立接闪杆及其接地装置与库房以及有联系的管道的空气中距离和地中距离最小为下列哪一项数值？

（A）3.8 m，3 m　　（B）4.24 m，3.2 m　　（C）4.24 m，4 m　　（D）5 m，3 m

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

库房高度为 6 m，地上部分的空气中距离：

因 $h_x=6\ \text{m}<5R_i=50\ \text{m}$，故 $S_{a1}\geqslant 0.4(R_i+0.1h_x)=0.4(10+0.1\times 6)\ \text{m}=4.24\ \text{m}$

地中距离：$S_{e1}\geqslant 0.4R_i=0.4\times 10\ \text{m}=4\ \text{m}$

11-52：若该库房设置两支等高接闪杆，分别置于该库房长度方向两侧距建筑物 5 m 的中心线上，两针间距 D 为 22 m，接闪针高 h 取为 12 m。两支等高接闪杆之间保护范围内最低点保护高度为下列哪一项数值？是否高于库房高度？

（A）5.5 m，低于　（B）7.3 m，高于　（C）8.1 m，高于　（D）8.9 m，高于

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 D。

接闪杆设置在该库房长度方向两侧距建筑物 5 m 的中心线上，两针间距 D 为 22 m，接闪针高 h 取为 12 m，滚球半径为 30 m。两支等高接闪杆之间保护范围内 $x=0$ 处最低点保护高度为

$$h_x=h_r-\sqrt{(h_r-h)^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2-x^2}=\left[30-\sqrt{(30-12)^2+\left(\frac{22}{2}\right)^2-0^2}\right]\text{m}=8.9\ \text{m}>6\ \text{m}$$，高于库房高度

11-53：若该库房设置两支等高接闪杆，分别置于该库房长度方向两侧距建筑物 5 m 的中心线上，两针间距 D 为 22 m，接闪针高 h 取为 12 m。两支等高接闪杆之间保护范围 ABCE 内最小保护宽度为下列哪一项数值？是否大于库房宽度？

（A）6.1 m，小于　（B）6.6 m，大于　（C）7.1 m，大于　（D）8.9 m，大于

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 D。

第 D.0.2 条　接闪杆设置在该库房长度方向两侧距建筑物 5 m 的中心线上，两针间距 D

为 22 m，接闪针高 h 取为 12 m，滚球半径为 30 m。两支等高接闪杆之间保护范围 ABCE 内 $x=0$ 处最小保护宽度为

$$b_x=\sqrt{h(2h_r-h)-\left(\frac{D}{2}\right)^2}-\sqrt{h_x(2h_r-h_x)-x^2}$$

$$=\left[\sqrt{12\times(2\times30-12)-\left(\frac{22}{2}\right)^2}-\sqrt{6\times(2\times30-6)-0^2}\right]\text{m}=3.33\text{ m}$$

保护范围最小宽度为 $2b_x=2\times3.33\text{ m}=6.66\text{ m}>6\text{ m}$，大于库房宽度。

例题 11-54：某鞭炮厂厂房，长 54 m，宽 20 m，高 18 m，采用两根等高接闪线进行保护，接闪线高 26 m，两线间距 16 m，两根等高接闪线端头内位移为下列哪项？（忽略接闪线弧垂影响）

（A）0.76 m　　（B）0.93 m　　（C）1.54 m　　（D）2.32 m

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 D。

第 3.0.2 条　鞭炮厂属于制造、使用易爆场所，该厂房属于一类防雷建筑，滚球半径为 30 m。

双接闪线间保护最低高度为

$$h_0=\sqrt{h_r^2-(0.5D)^2}+h-h_r=[\sqrt{30^2-(0.5\times16)^2}+26-30]\text{ m}=24.914\text{ m}$$

端头地面保护宽度为

$$b_0=\sqrt{2h_rh-h^2-(0.5D)^2}=\sqrt{2\times30\times26-26^2-(0.5\times16)^2}\text{ m}=28.635\text{ m}$$

端头内位移距离为

$$X=\sqrt{2h_rh_0-h_0^2}-b_0=(\sqrt{2\times30\times24.914-24.914^2}-28.635)\text{ m}=0.9307\text{ m}$$

11.6　建筑物的防雷装置

【知识点说明】

防雷装置属于重要考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握防雷等电位联结各联结部件的最小截面；掌握接闪器的材料、结构和最小截面，专门敷设的接闪器布置，引下线要求；熟练掌握接地体的材料、结构和最小尺寸，接地装置冲击接地电阻与工频接地电阻的换算、接地体的有效长度、建筑物的环形接地体冲击接地电阻。接地装置和接地电阻部分的例题详见第 12 章。

依据书目：

《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010

《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《雷电防护系列教材　建筑防雷工程与设计》第三版　梅卫群等编著

《雷电防护 第 1 部分：总则》GB/T 21714.1—2015（IEC 62305-1—2010，IDT）

《雷电防护 第 2 部分：风险管理》GB/T 21714.2—2015（IEC 62305-2—2010，IDT）

《雷电防护 第3部分：建筑物的物理损坏和生命危险》GB/T 21714.3—2015（IEC 62305-3—2010，IDT）

《雷电保护 第4部分：建筑物内电气和电子系统》GB/T 21714.4—2015（IEC 62305-4—2010，IDT）

《防雷与接地设计施工要点》（上册）D500~D502

《防雷与接地设计施工要点》（下册）D503~D505

例题 11-55：某新建工厂，厂区内有普通砖混结构办公建筑一座，预计雷击次数为0.1次/a，屋顶采用连成闭合环路的接闪带，共设4根引下线。办公建筑内设有电话交换设备，选用塑料绝缘屏蔽铜芯市话通信电缆架空引入，选用电涌保护器对电话交换设备进行雷击电磁脉冲防护。接闪带与建筑物内的电气设备、各种管线及电话交换设备电涌保护器共用接地装置，并在进户处做等电位联结。办公建筑内电话交换设备的电涌保护器至进户等电位联结箱之间的导体采用铜材时，其最小截面积应为下列哪项数值？（供配电2014年考题）

（A）16 mm^2　　（B）12.5 mm^2　　（C）6 mm^2　　（D）1.2 mm^2

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第3.0.4条　预计雷击次数大于或等于0.05次/a，且小于或等于0.25次/a的住宅、办公楼，该办公楼属于第三类防雷建筑。

第4.4.7-3条　在电子系统的室外线路采用金属线时，当雷电流无法确定时应选用1.0 kA。

电话交换设备的电涌保护器至进户等电位联结箱之间的导体采用铜材时最小截面积应为

$$S_{min} \geqslant I_{imp}/8 = 1/8\ mm = 0.125\ mm^2$$

或者查规范中表5.1.2，电子系统电涌保护器连接部件的最小截面积为1.2 mm^2。

例题 11-56：某厂房为现浇钢筋混凝土框架结构，柱网间距为9 m×9.6 m，每个柱子独立基础尺寸为2000 mm×3200 mm，基础底部水平钢筋网采用横向 ϕ10 和纵向 ϕ12 圆钢，纵横间距为200 mm，横向10根和纵向16根，如图11-11所示。厂房内有部分2区爆炸危险环境，其面积约占厂房总面积的35%；土壤电阻率为1000 Ω·m。若利用该建筑物全部柱子和基础内钢筋作为防雷引下线和接地装置，忽略每根柱子距地面0.5 m以下的立筋表面积，则每个柱子基础内水平钢筋网的表面积总和是下列哪一项数值？若分流系数为0.44，每根引下线所连接的钢筋表面积总和是否满足规范要求？

（A）4.24 m^2，符合　　（B）2.56 m^2，符合

（C）1.89 m^2，符合　　（D）0.82 m^2，不符合

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第3.0.3-7条、第4.5.1条　该厂房内有部分2区爆炸危险环境，且其面积已超过厂房总面积的30%；故该厂房为第二类防雷建筑物。

采用 ϕ10 圆钢，共计2000/200=10根，每根长2 m，ϕ10 钢筋的总表面积为

$$S_1 = 0.01\pi \times 2 \times 10\ m^2 = 0.2\pi\ m^2$$

采用 ϕ12 圆钢，共计3200/200=16根，每根长3.2 m，ϕ12 钢筋的总表面积为

$$S_2 = 0.012\pi \times 3.2 \times 16\ m^2 = 0.6144\pi\ m^2$$

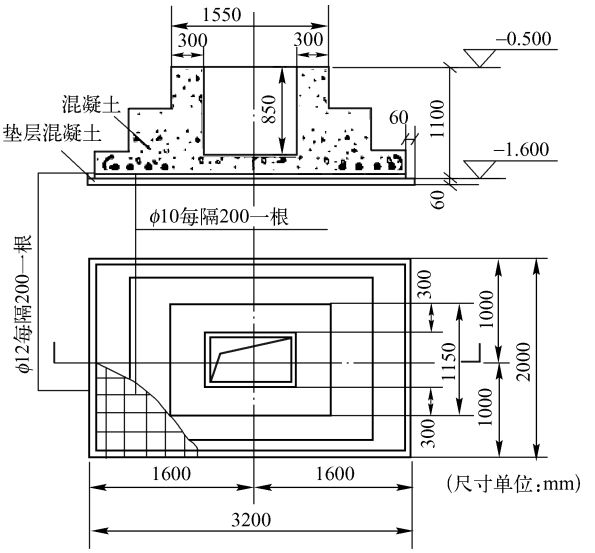


图 11-11　某厂房尺寸参数

基础钢筋的总表面积为上述两项之和，即

$$S=S_1+S_2=(0.2\pi+0.6144\pi)\,\mathrm{m}^2=0.8144\pi\,\mathrm{m}^2=2.56\,\mathrm{m}^2$$

利用基础内钢筋网作为接地体时，校验每根引下线所连接的钢筋表面积总和：

$$S=2.56\,\mathrm{m}^2\geqslant 4.24k_c^2=4.24\times 0.44^2\,\mathrm{m}^2=0.82\,\mathrm{m}^2$$，符合规范要求

例题 11-57~11-58：某多层住宅楼，长 72 m，宽 12 m，高 20 m；为平屋面、砖混结构、混凝土条形基础，该建筑物年预计雷击次数为 0.2 次/a。请回答以下关于防雷措施问题。

11-57：该建筑的屋顶防直击雷接闪器的设置，下述做法符合现行标准要求的是哪一项？

（A）沿屋顶周边女儿墙顶部敷设 ϕ6 镀锌圆钢接闪带

（B）沿屋顶周边女儿墙顶部敷设 20 mm×2 mm 镀锌扁钢接闪带

（C）沿屋顶周边敷设接闪带，整个屋面敷设明装 ϕ10 镀锌圆钢接闪网，网格尺寸为 12 m×24 m

（D）只沿屋顶周边女儿墙顶部敷设一圈镀锌圆钢 ϕ10 接闪带

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 3.0.4 条　预计雷击次数大于或等于 0.05 次/a，且小于或等于 0.25 次/a 的住宅、办公楼，该办公楼属于第三类防雷建筑。

第 5.2.1 条　接闪器的最小规格为圆钢直径不应小于 8 mm；扁钢截面不应小于 50 mm^2，其厚度不应小于 2.5 mm。

第 4.4.1 条　第三类防雷建筑物外部防雷的措施接闪网、接闪带，应按 GB 50057—2010 的规定沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设，并应在整个屋面组成不大于 20 m×20 m 或 24 m×16 m 的网格；当建筑物高度超过 60 m 时，首先应沿屋顶周边敷设接闪带，接闪带应设在外墙外表面或屋檐边垂直面上，也可设在外墙外表面或屋檐边垂直面外。接闪器之间应互相连接。

答案 C 符合上述条件。

11-58：该建筑为防雷电反击，进入建筑的穿管电气线路已与防雷接地装置相连或通过过电压保护器相连。若分流系数为 0.44，建筑引下线到连接点的长度为 20 m，穿管电气线路与引下线之间的最小空气中距离应为下列哪一项？

（A）0.352 m　　（B）0.441 m　　（C）0.532 m　　（D）0.664 m

答案：【A】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

穿管电气线路与引下线之间的最小空气中距离为

$$S_{a3} \geqslant 0.04 k_c L_x = 0.04 \times 0.44 \times 20\ \text{m} = 0.352\ \text{m}$$

例题 11-59：某普通多层工业办公楼，长 72 m，宽 12，高 20 m，为平屋面，砖混结构，混凝土基础，当地年平均雷暴日为 154.5 d/a。若该建筑物周边为无钢筋闭合条形混凝土基础，基础内敷设人工接地体的最小规格尺寸应为哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）圆钢 2×ϕ8 mm　　（B）扁钢 4×25 mm

（C）圆钢 2×ϕ12 mm　　（D）扁钢 5×25 mm

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

建筑物的等效面积：

$$\begin{aligned} A_e &= [LW + 2(L+W)\sqrt{H(200-H)} + \pi H(200-H)] \times 10^{-6} \\ &= [72 \times 12 + 2 \times (72+12) \times \sqrt{20(200-20)} + \pi \times 20 \times (200-20)] \times 10^{-6}\ \text{km}^2 \\ &= 0.0225\ \text{km}^2 \end{aligned}$$

校正系数取 1，建筑物年预计雷击次数：

$$N = kN_g A_e = k \times 0.1 \times T_d A_e = 1 \times 0.1 \times 154.5 \times 0.0225\ \text{次/a} = 0.344\ \text{次/a}$$

根据第 3.0.3-10 条，预计雷击次数大于 0.25 次/a 的工业建筑为第二类防雷建筑物。第二类防雷建筑物当在建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础内敷设人工基础接地体时，接地体的规格尺寸应符合表 4.3.5，该建筑周长为 2×(72+12) m = 168 m，答案中扁钢 4×25mm 符合要求规格最小，选 B。

11.7　建筑物的防雷击电磁脉冲

【知识点说明】

1）防雷区和防雷击电磁脉冲属于重要考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求熟练掌握磁场强度、屏蔽系数等计算，环路中感应电压和电流的计算；掌握接地和等电位联结、电缆屏蔽层截面积。

2）电涌保护器属于普通考点，依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章等。要求掌握电涌保护器安装位置和放电电流的选择、电涌保护器的有效电压保护水平、最大持续运行电压、接线形式。

依据书目：

《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010

《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343—2012

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《雷电防护系列教材　建筑防雷工程与设计》第三版　梅卫群等编著

《雷电防护 第1部分：总则》GB/T 21714.1—2015（IEC 62305-1—2010，IDT）

《雷电防护 第2部分：风险管理》GB/T 21714.2—2015（IEC 62305-2—2010，IDT）

《雷电防护 第3部分：建筑物的物理损坏和生命危险》GB/T 21714.3—2015（IEC 62305-3—2010，IDT）

《雷电保护 第4部分：建筑物内电气和电子系统》GB/T 21714.4—2015（IEC 62305-4—2010，IDT）

《低压电涌保护器（SPD）第12部分：低压配电系统的电涌保护器 选择和使用导则》GB/T 18802.12—2014

《防雷与接地设计施工要点》（上册）D500～D502

《防雷与接地设计施工要点》（下册）D503～D505

例题 11-60：某企业工业场地内有办公楼、10 kV 变电站等建筑物群。工业场地内一综合楼为框架结构，二类防雷建筑物，采用屏蔽格栅，钢筋直径为16 mm，网格宽度为2.0 m，该建筑LPZ1区内某环路宽为0.5 m，长为1.0 m，当综合楼附近发生首次正极性雷电闪击（10/350 μs）时，雷击点与综合楼最小平均距离为100 m，计算该环路的最大感应电压应为下列哪项数值，并说明理由。（供配电2016年考题）

（A）0.114 V　　（B）3.995 V　　（C）19.957 V　　（D）39.913 V

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

闪电击于建筑物以外附近时，首次正极性雷电闪击时，磁场强度计算

查表6.3.2-1屏蔽系数为

$$SF=20\log\left(\frac{\frac{8.5}{\omega}}{\sqrt{1+\frac{18\times10^{-6}}{r^2}}}\right)=20\log\left(\frac{\frac{8.5}{2}}{\sqrt{1+\frac{18\times10^{-6}}{0.008^2}}}\right)\text{dB}=20\log3.755\text{ dB}=11.49\text{ dB}$$

查表F.0.1-1首次正极性雷电闪击二类防雷建筑物的雷电流 $i_0=150$ kA。

无屏蔽时所产生的无衰减磁场强度为

$$H_0=\frac{i_0}{2\pi S_a}=\frac{150000}{2\pi\times100}\text{ A/m}=238.732\text{ A/m}$$

在格栅形大空间屏蔽内，即在LPZ1区内的磁场强度为

$$H=H_0/10^{SF/20}=238.732/10^{11.49/20}=63.593$$

附录G格栅形屏蔽建筑物附近遭雷击时，在LP21区内环路的最大感应电压为

$$U_{oc/max}=\frac{\mu_0 bLH_{1/max}}{T_1}=\frac{4\pi\times10^{-7}\times0.5\times1\times63.593}{10\times10^{-6}}\text{ V}=3.995\text{ V}$$

例题 11-61：某二类防雷建筑物为一通信机房，内部装有大量重要通信电子装置，其建筑物长×宽×高为30 m×12 m×10 m，该建筑为现浇钢筋混凝土框架结构，利用建筑物钢筋及

金属体构成笼式屏蔽体。格栅形屏蔽建筑物附近遭雷击时，在其室内屏蔽空间（LPZ1 区）内环路会产生感应电压，若该环路的长为 5 m，宽为 4 m。首次雷击屏蔽系数为 18.5 dB。假设闪电中出现的雷击为首次正极性雷击。该室内屏蔽空间（LPZ1 区）内环路开路最大感应电压为下列哪项数值？

（A）77 V　　（B）88 V　　（C）83 V　　（D）103 V

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

闪电击于建筑物以外附近时，查表 6.3.2-2 二类防雷建筑首次正极性雷击雷电流为 150 kA，对应的滚球半径为 260 m，因 $H=10\ \text{m}<R=260\ \text{m}$，故雷击点距建筑物屏蔽空间的平均距离为

$$s_a=\sqrt{H(2R-H)}+L/2=(\sqrt{10(2\times260-10)}+L/2)\ \text{m}=86.41\ \text{m}$$

首次雷击屏蔽系数为 18.5 dB，该室内屏蔽空间（LPZ1 区）内磁场强度为

$$H_1=\frac{H_0}{10^{\frac{SF}{20}}}=\frac{\frac{i_0}{2\pi S_a}}{10^{\frac{SF}{20}}}=\frac{\frac{150000}{2\pi\times86.41}}{10^{\frac{18.5}{20}}}\ \text{A/m}=32.84\ \text{A/m}$$

环路开路最大感应电压为

$$U_{oc/max}=\frac{\mu_0 bLH_{1/max}}{T_1}=4\pi\times10^{-7}\times5\times4\times\frac{32.84}{10\times10^{-6}}\ \text{V}=82.5\ \text{V}$$

例题 11-62：某建筑物内具有网格形等电位联结空间网络，圆钢材质。网格宽为 8 m，网格钢导体直径为 16 mm。发生首次雷击时，无屏蔽时产生的无衰减磁场强度 H_0 为 121 A/m，在此建筑物附近遭雷击时，在 LPZ1 区中有一长 4 m，宽 2 m 的环路内感应的电流最大值为下列哪项数值？（假设矩形环路开路自感为 10 μH）

（A）12.16 A　　（B）8.21 A　　（C）6.42 A　　（D）2.42 A

答案：【A】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

网格宽为 8 m，网格钢导体直径为 16 mm，首次雷击时，无屏蔽时产生的无衰减磁场强度 H_0 为 121 A/m，在此建筑物附近遭雷击时，屏蔽空间屏蔽系数为

$$SF=20\log\frac{8.5/\omega}{\sqrt{1+\frac{18\times10^{-6}}{r^2}}}+6=\left(20\log\frac{8.5/1.5}{\sqrt{1+\frac{18\times10^{-6}}{0.008^2}}}+6\right)\text{dB}=20\ \text{dB}$$

屏蔽空间在 LPZ1 区内最大磁场强度为

$$H_{1/max}=\frac{H_0}{10^{\frac{SF}{20}}}=\frac{121}{10^{\frac{20}{20}}}\ \text{A/m}=12.1\ \text{A/m}$$

环路开路最大感应电流为

$$i_{sc/max}=\frac{\mu_0 bLH_{1/max}}{T_1}=\frac{4\pi\times10^{-7}\times4\times2\times12.1}{10\times10^{-6}}\ \text{A}=12.16\ \text{A}$$

例题 11-63：二类防雷建筑物（见图 11-12），首次正极性雷击直接击于格栅形大屏蔽空间 LPZ1，如屏蔽顶部距待测点距离为 10 m，屏蔽墙面与待测点距离为 5 m，建筑物屏蔽网

格宽度为 5 m，LPZ1 格栅空间屏蔽系数为 10 dB，LPZ2 区屏蔽系数为 20 dB。则 H_1 点、H_2 点磁场强度分别为多少？

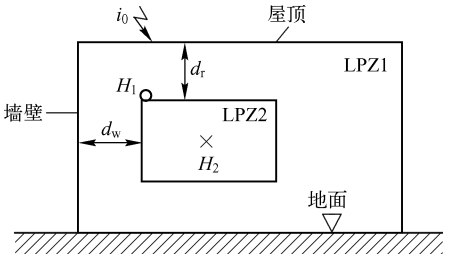


图 11-12　二类防雷建筑物示意

（A）0.47 A/m，0.047A/m　　（B）0.47 A/m，0

（C）474 A/m，47 A/m　　（D）474 A/m，160 A/m

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

查表 F.0.1-1 二类防雷建筑首次正极性雷击雷电流为 150 kA，屏蔽顶部距待测点距离为 10 m，屏蔽墙面与待测点距离为 5 m，建筑物屏蔽网格宽度为 5 m，LPZ1 格栅空间屏蔽系数为 10 dB。

LPZ1 格栅空间 H_1 点的磁场强度为

$$H_1=\frac{k_{\mathrm{H}}i_0\omega}{d_{\mathrm{w}}\sqrt{d_{\mathrm{r}}}}=\frac{0.01\times150\times10^3\times5}{5\times\sqrt{10}}\ \mathrm{A/m}=474\ \mathrm{A/m}$$

LPZ2 区屏蔽系数为 20 dB，格栅空间 H_2 点的磁场强度为

$$H_{n+1}=\frac{H_n}{10^{\frac{SF}{20}}}=\frac{474}{10}\ \mathrm{A/m}=47.4\ \mathrm{A/m}$$

例题 11-64：某变电站内有一座独立综合建筑物，建筑物长 54 m，宽 20 m，高 18 m，全站围墙长 73 m，宽 40 m。该建筑物为二类防雷建筑物，采用钢制格栅型网格屏蔽，网格宽 2 m，网格导体采用 ϕ20 mm 圆钢。如果雷击点距建筑 300 m，则首次正极性雷击时的屏蔽空间内与屏蔽间的安全距离是多少？

（A）1.86 m　　（B）2.27 m　　（C）3.62 m　　（D）3.72 m

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

查表 F.0.1-1 二类防雷建筑首次正极性雷击雷电流为 150 kA。

滚球半径：$R=10i_0^{0.65}=260$ m（或者查表 6.3.2-2）。

因为 $H=18\ \mathrm{m}<R=260\ \mathrm{m}$，雷击点与屏蔽空间最小距离为

$$S_{\mathrm{a}}=\sqrt{H(2R-H)}+\frac{L}{2}=\left(\sqrt{18\times(2\times260-18)}+\frac{54}{2}\right)\mathrm{m}=122\ \mathrm{m}$$

因 122 m<300 m，可判断此雷击未直接击中建筑物屏蔽，而是在建筑物附近。

格栅大空间屏蔽系数为

$$SF=20\log\frac{\frac{8.5}{\omega}}{\sqrt{1+\frac{18\times10^{-6}}{r^2}}}=20\log\frac{\frac{8.5}{2}}{\sqrt{1+\frac{18\times10^{-6}}{0.01^2}}}=11.85>10$$

屏蔽空间内安全距离为

$$d_{s/1}=\omega^{SF/10}=2^{11.85/10}\ \text{m}=2.27\ \text{m}$$

例题 11-65：某企业 110 kV 变电站内仅设一座综合办公楼，建筑物长 54 m、宽 20 m、高 18 m；全站围长 73 m、宽 40 m，该变电站所在地区年平均雷暴日为 87.6 d/a，综合办公楼的一条引下线与内部钢筋网的一根钢筋有一部分平行，平行长度为 8 m，两者相距 0.5 m，试计算当发生首次正极性雷击（雷电电流 100 kA）时，引下线与该段钢筋上由雷电流产生的电动力是多少。

（A）28 kN　　（B）30 kN　　（C）32 kV　　（D）36 kN

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

建筑物的等效面积：

$$\begin{aligned}A_e&=[LW+2(L+W)\sqrt{H(200-H)}+\pi H(200-H)]\times10^{-6}\\&=[54\times20+2\times(54+20)\times\sqrt{18(200-18)}+\pi\times18\times(200-18)]\times10^{-6}\ \text{km}^2\\&=0.01984\ \text{km}^2\end{aligned}$$

校正系数取 1，建筑物年预计雷击次数：

$$N=kN_gA_e=k\times0.1\times T_dA_e=1\times0.1\times87.6\times0.01984\ \text{次/a}=0.174\ \text{次/a}$$

根据第 3.0.4 条，该办公楼为第三类防雷建筑物。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1255 页。

引下线与该段钢筋上由雷电流产生的电动力为

$$F(t)=\frac{\mu_0}{2\pi}\times i^2(t)\times\frac{l}{d}=2\times10^{-7}\times100^2\times10^6\times\frac{8}{0.5}\ \text{kN}=32\ \text{kN}$$

例题 11-66：在建筑物防雷击电磁脉冲设计中，当无法获得设备的耐冲击电压时，220/380 V 三相系统中设备绝缘耐冲击过电压额定值下列哪些选用是正确的？

（A）家用电器，手提工具为 4 kV

（B）配电线路和最后分支线路的设备为 4 kV

（C）电缆、母线、分线盒、开关、插座等系统布线系统为 6 kV

（D）永久接至固定装置的固定安装的电动机为 6 kV

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

查表 6.4.4 中，配电线路和最后分支线路的设备属于Ⅲ类，耐冲击电压为 4 kV。

例题 11-67：某二类防雷建筑物为一大型通信机房，所有进入通信机房的外来导电物均应在 $LPZO_A$ 或 $LPZO_B$ 与 LPZ1 区的界面处做等电位联结的做法中，下述正确的是哪一项？

（A）所有进入建筑物的导电管道、电力线、通信线等宜尽量在同一地点进入建筑物，并应在入户一处就近做等电位联结并接地

（B）内部各种大尺寸导电物，如导电地板、金属吊顶龙骨、电梯轨道、金属门框架、设施管道、电缆桥架等均应相互连接并就近接至接地的等电位联结带

（C）宜设若干等电位联结带，并应将其就近连到环形接地体、内部环形导体或在电气上贯通并连通到接地体或基础接地体的钢筋上

（D）环形接地体和内部环形导体应连到钢筋或金属立面等其他屏蔽构件上，宜每隔10 m 连接一次

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第6.3.4-1条　所有进入建筑物的外来导电物均应在 $LPZO_A$ 或 $LPZO_B$ 与 LPZ1 区的界面处做等电位联结。当外来导电物、电气和电子系统的线路在不同地点进入建筑物时，宜设若干等电位联结带，并应将其就近连到环形接地体、内部环形导体或在电气上贯通并连通到接地体或基础接地体的钢筋上。环形接地体和内部环形导体应连到钢筋或金属立面等其他屏蔽构件上，宜每隔5 m 连接一次。

答案 C 与原条文相符合。

例题 11-68~11-70：为防雷电电磁脉冲，在建筑物低压配电系统中选择和安装电涌保护器（SPD）时，对下列各条做出正确的回答。

11-68：在220/380 V 三相配电的 TN-S 系统中装设的电涌保护器，按规范要求，每一相线与中线之间的最大持续运行电压最小值应为下列哪一项？

（A）253 V　　（B）275 V　　（C）297 V　　（D）341 V

答案：【A】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 J。

查表 J.1.1 中 TN-S 系统中装设的 SPD 每一相线与中线之间的最大持续运行电压最小值为

$$1.15U_0 = 1.15 \times 220\ \text{V} = 253\ \text{V}$$

11-69：为防雷电电磁脉冲，建筑物低压配电系统为220/380 V，三相电源进线为 TN-C 系统，在低压电源的总配电盘处，系统由 TN-C 改为 TN-S 时，不适于安装 SPD 是下列哪一项？

（A）每一相线与 N 线间　　（B）各相线之间

（C）N 线与 PE 线间　　（D）每一相线与 PEN 线间

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 J。

查表 J.1.2 中每一相线与 PEN 线间不适于安装 SPD。

11-70：在 LPZ0A 或 LPZ0B 区与 LPZ1 区交界处，在从室外引来的线路上总配电盘处安装的 D1 类高能量试验类型的电涌保护器，按规范规定计算其通过的 10/350 μs 雷电流设为总雷电流的5.6%，则对第二类防雷建筑物 SPD 通过的幅值电流 I_{peak} 应不小于下列哪一项？

（A）2.8 kA　　（B）5.6 kA　　（C）8.4 kA　　（D）11.2 kA。

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第4.3.8-7条　第二类防雷建筑物的雷电流幅值为 150 kA，可得出 $I_{peak} = 0.056 \times$

150 kA = 8.4 kA。

例题 11-71：某普通多层工业办公楼，假设该办公楼为第二类防雷建筑物，在 LPZ0A 区与 LPZ1 区交界处，从室外引来的线路上总配电箱处安装Ⅰ级实验 SPD，若限压型 SPD 的保护水平为 1.5 kV，两端引线的总长度为 0.4 m，引线电感为 1.1 μH/m，当不计反射波效应时，线路上出现的最大雷电流电涌电压为下列哪项数值？（假定通过 SPD 的雷电流陡度 di/dt 为 9 kA/μs）（供配电 2017 年考题）

（A）1.8 kV　　（B）2.0 kV　　（C）5.1 kV　　（D）5.46 kV

答案：【D】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 第 6.4.6 条。

当被保护设备距电涌保护器的总长度为 0.4 m（≤5 m）时，$U_{p/f} \leqslant U_w$，线路上出现的最大雷电流电涌电压应不大于电涌保护器的有效电压保护水平，则

$$U_{p/f} = U_p + \Delta U = U_p + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = (1.5 + 0.4 \times 1.1 \times 9)\,\mathrm{kV} = 5.46\,\mathrm{kV}$$

第 12 章　接　　地

【知识点导图】

图 12-1　接地知识点导图

图 12-1 所示的接地知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点，由于规范和手册的更新对应内容有很大的改变，其中必考考点有接地电阻计算，包含了电气装置接地电阻计算、建筑物接地电阻计算、建筑物防雷接地电阻计算等；接地导体（线）、接地极设计

与选择的考点中热稳定校验，接触电位差、跨步电位差计算等详见各小节的知识点说明。

12.1 高压电气装置接地和发电厂与变电站的接地网

【知识点说明】

1）《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 新规范（原《工业与民用电力装置的接地设计规范》GBJ 65—1983 升级版，整合了《交流电气装置的接地》DL/T 621—1997 相关内容）对很多内容做出了修订。关键考点有有效接地系统和低电阻接地系统的接地电阻，不接地、谐振接地、谐振-低电阻接地和高电阻接地系统的接地电阻，变电站接地网入地故障电流，地电位的升高，接触电位差，跨步电位差，表层衰减系数，网孔电压，最大接触电位差，最大跨步电位差等。

2）《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）中已经根据 GB/T 50065—2011 等规范对接地章节做出了对应更改。

依据书目：

《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

参考书目：

《电力系统接地技术手册》

例题 12-1~12-4：在某市远离发电厂的工业区拟建设一座 110/10 kV 变电站。装有容量为 20 MV·A 的主变压器两台，110 kV 配电装置室外布置、10 kV 配电装置室内布置；主变压器 110 kV 中性点直接接地，10 kV 系统经消弧线圈接地；变电所所在场地土壤为均匀土壤，土壤电阻率为 100 Ω·m，请解答下列问题。

12-1：该当变电所 110 kV 系统发生接地故障时，最大接地故障对称电流有效值为 9950 A，流经变压器中性点的短路电流为 4500 A。已知衰减系数为 1.06，变电所接地网的工频接地电阻为 0.6 Ω，冲击接地电阻为 0.4 Ω，变电所内、外发生接地故障时的分流系数分别为 0.6 和 0.7，当发生接地故障时，接地网地电位的升高为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）2080 V　　（B）2003 V　　（C）1962 V　　（D）1386 V

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 附录 B 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1379 页。

经接地网的入地接地故障对称电流有效值为

$$I_g = (I_{max} - I_n) S_{f1} = (9950 - 4500) \times 0.6\ \text{A} = 3270\ \text{A}$$

$$I_g = I_n S_{f2} = 4500 \times 0.7\ \text{A} = 3150\ \text{A}$$

取两者最大值。

最大接地故障不对称电流有效值为

$$I_G = D_f I_g = 1.06 \times 3270\ \text{A} = 3466\ \text{A}$$

接地网地电位的升高：

$$U = I_G R = 3466 \times 0.6\ \text{V} = 2080\ \text{V}$$

【知识点解析】

经发电厂和变电站接地网的入地故障电流及地电位升高的计算：

经发电厂和变电站接地网的入地接地故障电流，应计及故障电流直流分量的影响，设计接地网时应按经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值 I_G 进行设计。

（1）I_G 的计算

I_G 可按下列具体步骤确定：

1）确定接地故障接地对称电流 I_f。

2）根据系统及线路设计采用的参数确定故障电流分流系数 S_f，进而计算经接地网的入地接地故障对称电流有效值 I_g。

3）计算衰减系数 D_f，将其乘以经接地网的入地接地故障对称电流有效值 I_g，得到计及直流偏移的经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值 I_G，即

$$I_G = D_f I_g$$

4）发电厂和变电站内、外发生接地短路时，经接地网的入地接地故障对称电流有效值 I_g 可分别按下列二式计算，并取两者中的最大值：

$$I_g = (I_{max} - I_n) S_{f1}$$

$$I_g = I_n S_{f2}$$

式中，I_{max} 为发电厂和变电站内发生接地故障时的最大接地故障对称电流有效值（A）；I_n 为发电厂和变电站内发生接地故障时流经其设备中性点的电流（A）；S_{f1}、S_{f2} 分别为厂站内 S_{f1}、厂站外 S_{f2} 发生接地故障时的分流系数，相关计算也可以在 GB/T 50065—2011 附录 B 中查出。

衰减系数 D_f，是接地计算中对接地故障电流中对称分量电流引入的校正系数，以考虑短路电流的过冲效应。典型的衰减系数 D_f 值可按表 12-1 中故障时间 t_f 和 X/R 的关系确定。

表 12-1　典型的衰减系数 D_f 值

故障时延 t_f/s	50 Hz 对应的周期	衰减系数 D_f			
		$X/R=10$	$X/R=20$	$X/R=30$	$X/R=40$
0.05	2.5	1.268 5	1.417 2	1.496 5	1.544 5
0.10	5	1.147 9	1.268 5	1.355 5	1.417 2
0.20	10	1.076 6	1.147 9	1.212 5	1.268 5
0.30	15	1.051 7	1.101 0	1.147 9	1.191 9
0.40	20	1.039 0	1.076 6	1.113 0	1.147 9
0.50	25	1.031 3	1.061 8	1.091 3	1.120 1
0.75	37.5	1.021 0	1.041 6	1.061 8	1.081 6
1.00	50	1.015 8	1.031 3	1.046 7	1.061 8

（2）地电位升高的计算

在系统单相接地接地故障电流入地时，地电位的升高可按下式计算：

$$U = I_G R$$

式中，U 为接地网地电位升高（V）；I_G 为经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值（A）；R 为接地网的工频接地电阻（Ω）。

12-2：若已知接地短路故障电流的持续时间为 0.5 s，地表面的土壤电阻率为 120 Ω·m，

表层衰减系数为0.85，经计算，该变电所当110 kV系统发生单相接地故障时，其最大接触电位差$U_{tmax}=180$ V，最大跨步电位差$U_{smax}=340$ V。试分析确定该变电所接地网接触电位差和跨步电位差是否符合规范要求，下列哪种说法是正确的？

（A）接触电位差和跨步电位差均符合要求

（B）仅最大接触电位差符合要求

（C）仅最大跨步电位差符合要求

（D）接地电位差和跨步电位差均不符合要求

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第1377页。

接触电位差允许值计算与最大接触电位差校验：

$$U_t=\frac{174+0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t}}=\frac{174+0.17\times120\times0.85}{\sqrt{0.5}}\text{ V}=270.6\text{ V}>180\text{ V}$$，校验后满足要求

跨步电位差允许值计算与最大跨步电位差校验：

$$U_s=\frac{174+0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t}}=\frac{174+0.7\times120\times0.85}{\sqrt{0.5}}\text{ V}=347\text{ V}>340\text{ V}$$，校验后满足要求

【知识点解析】

有效接地、低电阻接地系统接触电位差和跨步电位差允许值：

110 kV及以上有效接地系统和6~35 kV低电阻接地系统发生单相接地或同点两相接地时，发电厂和变电站接地网的接触电位差U_t和跨步电位差U_s允许值由下列两式计算所得：

$$U_t=\frac{174+0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}},\quad U_s=\frac{174+0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}}$$

式中，U_t为接触电位差允许值（V）；U_s为跨步电位差允许值（V）；ρ_s为地表层的电阻率（m）；C_s为表层衰减系数，相关计算详见GB/T 50065—2011附录C；t_s为接地故障电流持续时间，与接地装置热稳定校验的接地故障等效持续时间t_e取相同值（s）。

12-3：已知高压系统计算用的流经接地网的最大接地故障不对称电流为800 A，则高压系统接地网最大允许的接地电阻是下列哪个数值？

（A）1 Ω　　（B）2.5 Ω　　（C）4 Ω　　（D）5 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第1376页。

供电电源110 kV电网中性点为有效接地系统，接地网的接地电阻为

$$R\leqslant2000/I_G=2000/800\ \Omega=2.5\ \Omega$$

【知识点解析】

有效接地系统和低电阻接地系统中，保护接地要求的发电厂和变电站接地网的接地电阻，应符合下列要求：

1）接地网的接地电阻宜符合下式的要求，且保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压应采用TN系统，低压电气装置应采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统：

$$R \leqslant 2000/I_G$$

式中，R 为考虑季节变化的最大接地电阻（Ω）；I_G 为计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值（A）。

I_G 应采用设计水平年系统最大运行方式下在接地网内、外发生接地故障时，经接地网流入地中，并计及直流分量的最大接地故障电流有效值。对其计算时，还应计算系统中各接地中性点间的故障电流分配，以及避雷线中分走的接地故障电流。

2）当接地网的接地电阻不符合上述的要求时，可通过技术经济比较适当增大接地电阻。有效接地和低电阻接地系统中发电厂和变电站接地网在发生接地故障后地电位升高超过2000 V，接地网及有关电气装置符合要求的规定时，接地网地电位升高可提高至 5 kV。

12-4：该变电站 110 kV 侧当发生单相接地故障，变电站的接地网电阻不满足要求时，下面哪条规定不符合接地故障后地电位升高超过 2000V 时接地要求？

（A）接触电位差和跨步电位差满足要求

（B）应采用扁铜（或铜绞线）与二次电缆屏蔽层并联敷设。扁铜应至少在两端就近与接地网连接

（C）保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压侧，应采用 TT 系统

（D）应采取防止转移电位引起危害的隔离措施

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 第 4.3.3 条。

【知识点解析】

有效接地和低电阻接地系统中发电厂和变电站接地网在发生接地故障后地电位升高超过2000 V 时，接地网及有关电气装置应符合下列要求：

1）保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压侧，应采用 TN 系统，且低压电气装置应采用（含建筑物钢筋的）保护等电位联结接地系统。

2）应采用扁铜（或铜绞线）与二次电缆屏蔽层并联敷设。扁铜应至少在两端就近与接地网连接。当接地网为钢材时，尚应防止铜、钢连接产生腐蚀。扁铜较长时，应多点与接地网连接。二次电缆屏蔽层两端应就近与扁铜连接。扁铜的截面应满足热稳定的要求。

3）应评估计入短路电流非周期分量的接地网电位升高条件下，发电厂、变电站内 6 kV 或 10 kV 金属氧化物避雷器吸收能量的安全性。

4）可能将接地网的高电位引向厂、站外或将低电位引向厂、站内的设备，应采取下列防止转移电位引起危害的隔离措施：

① 站用变压器向厂、站外低压电气装置供电时，其 0.4 kV 绕组的短时（1 min）交流耐受电压应比厂、站接地网地电位升高 40%。向厂、站外供电用低压线路采用架空线，其电源中性点不在厂、站内接地，改在厂、站外适当的地方接地。

② 对外的非光纤通信设备加隔离变压器。

③ 通向厂、站外的管道采用绝缘段。

④ 铁路轨道分别在两处加绝缘鱼尾板等。

5）设计接地网时，应验算接触电位差和跨步电位差，并应通过实测加以验证。

例题 12-5：若变电所附近有一座工厂，该工厂变电所电源 10 kV 侧采用消弧线圈接地系统，地表层土壤电阻率为 800 Ω·m，则变电站接地网的接触电位差和跨步电位差不应超

过下列哪组数值？（地表层衰减系数取 0.5）（供配电 2016 年考题）

（A）$U_t=70\ V$，$U_s=130\ V$　　（B）$U_t=70\ V$，$U_s=150\ V$

（C）$U_t=90\ V$，$U_s=130\ V$　　（D）$U_t=90\ V$，$U_s=150\ V$

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1376 页。

接触电位差：$U_t=50+0.05\rho_s C_s=(50+0.05\times800\times0.5)\ V=70\ V$

跨步电位差：$U_s=50+0.2\rho_s C_s=(50+0.2\times800\times0.5)\ V=130\ V$

【知识点解析】

6~66 kV 不接地、谐振接地、谐振-低电阻接地和高电阻接地的系统，发生单相接地故障后，当不迅速切除故障时，发电厂和变电站接地装置的接触电位差 U_t 和跨步电位差 U_s 允许值由下列二式计算所得：

$$U_t=50+0.05\rho_s C_s$$

$$U_s=50+0.2\rho_s C_s$$

式中，U_t 为接触电位差允许值（V）；U_s 为跨步电位差允许值（V）；ρ_s 为地表层的电阻率（m）；C_s 为表层衰减系数，相关计算详见 GB/T 50065—2011 附录 C。

例题 12-6~12-8：若某工厂变电所电源 20 kV 侧采用小电阻接地系统，该变电所接地网如图 12-2 所示，接地网只有少数分散在整个接地网的垂直接地极，垂直接地极长度为 40 m，埋地深度为 0.5 m，地表层土壤电阻率为 500 Ω·m，发生接地故障时的入地最大接地故障对称电流有效值为 80 A，切除故障时间为 1 s，等效时间常数 X/R 为 40，请回答以下问题。

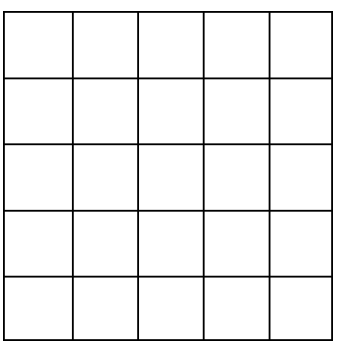


图 12-2　变电所接地网

方格均为（8×8）m^2

12-6：若网孔电压几何校正系数为 1.2，不规则校正系数为 2，该变电所接地网初始设计时的网孔电压为下列哪组数值？

（A）105.9 V　　（B）196.0 V　　（C）148.5 V　　（D）99.1 V

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1380 页。

发生单相接地故障时的入地最大接地故障不对称电流有效值：查《配四》表 14.2-3 中切除故障时间为 1 s，等效时间常数 X/R 为 40，衰减系数 D_f 为 1.0618，则

$$I_G=D_f I_g=1.0618\times80\ A=84.944\ A$$

接地网只有少数分散在整个接地网的垂直接地极，其有效埋设长度为

$$L_M=L_C+L_R=(2\times6\times8\times5+40)\ m=520\ m$$

网孔电压为

$$U_m=\frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}=\frac{500\times84.944\times1.2\times2}{520}\ V=196.02\ V$$

12-7：若几何校正系数为 1.3，不规则校正系数为 2，该变电所接地网的最大跨步电位差为下列哪组数值？

（A）205.9 V　　（B）249.5 V　　（C）280.3 V　　（D）181.1 V

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1381 页。

入地最大接地故障不对称电流有效值：查表 14.2-3 中切除故障时间为 1 s，等效时间常数 X/R 为 40，衰减系数 D_f 为 1.0618，则

$$I_G = D_f I_g = 1.0618 \times 80\ \text{A} = 84.944\ \text{A}$$

有效埋设长度为

$$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R = (0.75 \times 2 \times 6 \times 8 \times 5 + 0.85 \times 40)\ \text{m} = 394\ \text{m}$$

最大跨步电位差为

$$U_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_s} = \frac{500 \times 84.944 \times 1.3 \times 2}{394}\ \text{V} = 280.3\ \text{V}$$

【知识点解析】

（1）网孔电压的计算等间距布置接地网的网孔电压与最大跨步电位差

接地网初始设计时的网孔电压可按下列公式计算：

$$U_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

式中，ρ 为土壤电阻率（Ω·m）；K_m 为网孔电压几何校正系数；K_i 为接地网不规则校正系数，用来计及推导 K_m 时的假设条件引入的误差；I_G 为经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值（A）；L_C 为水平接地网导体的总长度（m）；L_R 为所有垂直接地极的总长度（m）；L_M 为有效埋设长度（m），$L_M = L_C + L_R$（对于无垂直接地极的接地网，或只有少数分散在整个接地网的垂直接地极，这些垂直接地极没有分散在接地网四角或接地网的周边上）。

（2）最大跨步电位差的计算

跨步电位差 U_s 与几何校正系数 K_s、校正系数 K_i、土壤电阻率 ρ、接地系统单位导体长度的平均流散电流有关，可按下式计算：

$$U_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_s}$$

式中，I_G 为接地网入地故障电流；L_s 为埋入地中的接地系统导体有效长度（m），$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R$。

12-8：若该工厂变电所电源 20 kV 侧改用消弧线圈接地系统，该工厂变电所接地网最大允许的接地电阻是下列哪个数值？

（A）1 Ω　　（B）1.4 Ω　　（C）1.5 Ω　　（D）2.2 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1376 页。

供电电源 20 kV 电网中性点为消弧线圈接地系统，接地网的接地电阻为

$$R \leqslant 120/I_g = 120/84.944\ \Omega = 1.4\ \Omega$$

【知识点解析】

不接地、谐振接地、谐振-低电阻接地和高电阻接地系统中，保护接地要求的发电厂和变电站接地网的接地电阻，应符合下列要求：

1）接地网的接地电阻应符合下式的要求，但不应大于 4 Ω，且保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压侧电气装置，应采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统：

$$R \leqslant 120/I_g$$

式中，R 为采用季节变化的最大接地电阻（Ω）；I_g 为计算用的经接地网的入地接地故障对称电流有效值（A）。

2）谐振接地和谐振-低电阻接地系统中，计算发电厂和变电站接地网的入地对称电流时，对于装有自动跟踪补偿消弧装置（含非自动调节的消弧线圈）的发电厂和变电站电气装置的接地网，计算电流等于接在同一接地网中同一系统各自动跟踪补偿消弧装置额定电流总和的 1.25 倍；对于不装自动跟踪补偿消弧装置的发电厂和变电站电气装置的接地网，计算电流等于系统中断开最大一套自动跟踪补偿消弧装置或系统中最长线路被切除时的最大可能残余电流值。

例题 12-9：若变电所电源 110 kV 侧变压器中性点直接接地，配电装置设置了水平接地极为主不等间距布置的接地网，其接地电阻为 0.65 Ω，配电装置（人脚站立处）土壤电阻率为100 Ω·m，当配电装置发生单相短路时，经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值不大于且最接近于哪个值时，接地装置可同时满足接触电位差和跨步电位差的要求？（接地故障电流持续时间为 0.06 s，表层衰减系数取 1，最大接触电位差的影响系数为 0.75，最大跨步电位差的影响系数为 0.6）（发输电 2014 年考题改编）

（A）1000 A　　（B）1500 A　　（C）2000 A　　（D）2500 A

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 第 4.2.2 条和附录 D。

接触电位差允许值：$U_t = \dfrac{174+0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t}} = \dfrac{174+0.17\times100\times1}{\sqrt{0.06}}\ \text{V} = 779.75\ \text{V}$

接触电位差时最大接地故障不对称电流有效值：

$$I_G = \frac{U_t}{R} = \frac{U}{k_{TL}k_{Th}k_{Td}k_{TS}k_{TN}k_{Tm}R} = \frac{779.75}{0.75\times0.65}\ \text{A} = 1599.5\ \text{A}$$

跨步电位差允许值计算：

$$U_s = \frac{174+0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t}} = \frac{174+0.7\times100\times1}{\sqrt{0.06}}\ \text{V} = 996.13\ \text{V}$$

跨步电位差时最大接地故障不对称电流有效值：

$$I_G = \frac{U_s}{R} = \frac{U}{k_{SL}k_{Sh}k_{Sd}k_{SS}k_{SN}k_{Sm}R} = \frac{996.13}{0.6\times0.65}\ \text{A} = 2554.2\ \text{A}$$

取两者最小值，最大接地故障不对称电流有效值不大于 1500 A，可同时满足接触电位差和跨步电位差的要求，选 B。

【知识点解析】

1）最大接触电位差 U_t 可按下式计算：

$$U_t = k_{TL}k_{Th}k_{Td}k_{TS}k_{TN}k_{Tm}U$$

式中，$U=I_G R$，为接地网的最大接地电位升高；R 为接地网接地电阻；k_{TL}、k_{Th}、k_{Td}、k_{TS}、k_{TN}、k_{Tm} 分别为最大接触电位差的形状、埋深、接地导体直径、接地网面积、接地体导体根数及接地网网孔数目影响系数。

2）最大跨步电位差 U_s 可按下式计算：

$$U_s = k_{SL}k_{Sh}k_{Sd}k_{SS}k_{SN}k_{Sm}U$$

式中，k_{SL}、k_{Sh}、k_{Sd}、k_{SS}、k_{SN} 和 k_{Sm} 分别为最大跨步电位差的形状、埋深、接地导体直径、接地网面积、接地体导体根数及接地网网孔数目影响系数。

3）不等间距布置接地网的接地电阻可按下列公式计算：

$$R = k_{Rh}k_{RL}k_{Rm}k_{Rn}k_{Rd}(1.068\times10^{-4}+0.445/\sqrt{S})\rho$$

式中，k_{Rh}、k_{RL}、k_{Rm}、k_{Rn}、k_{Rd} 分别为接地电阻的埋深、形状、网孔数目、导体根数及导体直径影响系数。

注：相关影响系数计算详见 GB/T 50065—2011 附录 D。

例题 12-10：若某电厂内 500 kV 升压站最大接地故障短路电流为 39 kA，折算至 500 kV 母线的厂内零序阻抗为 0.03（标幺值），系统侧零序阻抗为 0.02（标幺值），发生单相接地故障时切除故障时间为 1 s，等效时间常数 X/R 为 40，厂内、厂外发生接地故障时接地网的工频分流系数分别为 0.4、0.9，接地网接地电阻为 0.2 Ω。则厂内单相接地时地电位升高为下列哪项数值？（发输电 2016 年考题改编）

（A）2.81 kA　　（B）2.98 kA　　（C）3.98 kA　　（D）4.97 kA

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 附录 B 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1379 页。

发生单相接地故障时的最大接地故障电流有效值为

$$I_{max} = 39\ \text{kA}$$

变电站内发生接地故障时流经其设备中性点的电流为（见图 12-3）

$$I_n = I_{max}\frac{X_{*s}}{X_{*s}+X_{*n}} = 39\times\frac{0.02}{0.03+0.02}\ \text{kA} = 15.6\ \text{kA}$$

经接地网的入地接地故障对称电流有效值为

$$I_g = (I_{max}-I_n)S_{f1} = (39-15.6)\times0.4\ \text{kA} = 9.36\ \text{kA}$$

$$I_g = I_n S_{f2} = 15.6\times0.9\ \text{kA} = 14.04\ \text{kA}$$

取两者最大值。

查表 B.0.3 切除故障时间为 1 s，等效时间常数 X/R 为 40，衰减系数 D_f 为 1.0618，最大接地故障不对称电流有效值：

$$I_G = D_f I_g = 1.0618\times14.04\ \text{kA} = 14.908\ \text{kA}$$

接地网地电位的升高：

$$U = I_G R = 14.908\times0.2\ \text{kV} = 2.98\ \text{kV}$$

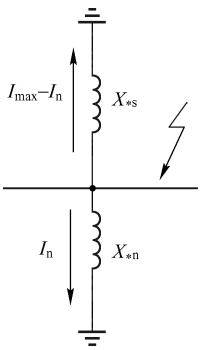


图 12-3　变电站故障时等效电路图

例题 12-11：某新建变电所构建接地网，已知变电所地表层土壤厚度为 0.2 m，地表层土壤电阻率为 1200 Ω·m，底层土壤电阻率为 1000 Ω·m，接地网以水平接地极为主，水平接地极埋设深度为 0.5 m，发生单相接地故障时最大接地故障不对称短路电流为 3 kA，切除故障时间为 1 s。该变电站接地网的地表层衰减系数为下列哪组数值？（允许误差在 5%以内）

（A）0.52　　（B）0.61　　（C）0.87　　（D）0.97

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1378 页。

（1）查图法求地表层衰减系数

查图 C.0.1：$k=\dfrac{\rho-\rho_s}{\rho+\rho_s}=\dfrac{1000-1200}{1000+1200}=-0.09$，$h=0.2$，查出 $C_s=0.97$

（2）公式法求地表层衰减系数

由式 C.0.2：$C_s=1-\dfrac{0.09\left(1-\dfrac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s+0.09}=1-\dfrac{0.09\times\left(1-\dfrac{1000}{1200}\right)}{2\times0.2+0.09}=0.97$

【知识点解析】

C_s 与 h_s 和 k 的关系曲线如图 12-4 所示。

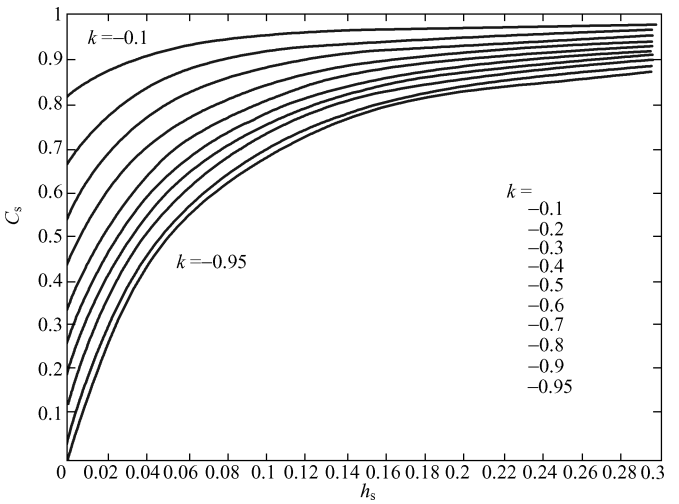


图 12-4　C_s 与 h_s 和 k 的关系曲线

$$k=\frac{\rho-\rho_s}{\rho+\rho_s}$$

式中，k 为不同电阻率土壤的反射系数。

工程中对地网上方跨步电位差和接触电位差允许值的计算精度要求不高（误差在 5%以内）时，也可采用下式计算：

$$C_s=1-\frac{0.09\left(1-\dfrac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s+0.09}$$

例题 12-12：若 110/10 kV 变电站的接地网，水平接地极采用 ϕ20 圆钢，垂直接地极采用 L50×50×5 角钢；接地网采用不等间距布置，埋深 0.8 m，已知本站接地短路时接地装置的最大接地故障不对称电流有效值为 4 kA，工频接地电阻为 0.5 Ω，则接地网地表面的最大接触电位差和最大跨步电位差应为哪一组数据？（已知最大接触电位差接地网网孔数目影响系数为 0.2254，最大跨步电位差接地网网孔数目影响系数为 0.0831）（供配电 2009 年考题改编）

（A）202.0 V，316.8 V　　（B）450.8 V，166.2 V

（C）507.5 V，169.9 V　　（D）592.7 V，175.2 V

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 附录 D。

接地网地电位的升高：

$$U = I_G R = 4 \times 0.5 = 2\ \text{kV}$$

最大接触电位差为

$$U_t = k_{TL} k_{Th} k_{Td} k_{TS} k_{TN} k_{Tm} U = 0.2254 \times 2000\ \text{V} = 450.8\ \text{V}$$

最大跨步电位差为

$$U_s = k_{SL} k_{Sh} k_{Sd} k_{SS} k_{SN} k_{Sm} U = 0.0831 \times 2000\ \text{V} = 166.2\ \text{V}$$

例题 12-13：若某高层楼宇变电所设置有室内 6 kV 中压柜以及 0.4 kV 低压开关柜等设备，6 kV 侧采用不接地系统，0.4 kV 侧采用 TN-S 接地形式。当高层楼宇变电所保护总等电位联结、保护接地、防雷接地、信息系统机房接地采用一个共同接地装置时，接地装置的工频总电阻不应大于下列哪一项数值？并说明理由。（供配电 2006 年考题改编）

（A）1 Ω　　（B）4 Ω　　（C）10 Ω　　（D）30 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011。

第 4.2.1 条　保护总等电位联结为 4 Ω，保护接地为 4 Ω，

依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010。

第 4.2.1 条~第 4.2.4 条　第一类防雷建筑物冲击接地电阻不宜大于 10 Ω，防闪电感应的接地装置应与电气和电子系统的接地装置共用，其工频接地电阻不宜大于 10 Ω。

依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

第 8.4.1 条~第 8.4.2 条　保护性接地和功能性接地宜共用一组接地装置，其接地电阻按其中最小值确定。

电阻最小值为 4 Ω，选 B。

例题 12-14~12-15：若某钢铁企业工厂，因附近污染特别严重，该工厂变电所 66 kV 侧采用 GIS 配电装置，采用消弧线圈接地系统，GIS 配电装置设有专用接地网，接地网以水平接地极为主，水平接地极埋设深度为 0.5 m，表层土壤电阻率为 800 Ω·m，发生单相接地故障时接地网的最大接触电位差为 79 V。请回答以下问题。

12-14：变电所发生单相接地故障时为保证接触电压在允许值以内，此时 GIS 配电装置设备外壳感应产生的最大电压差不应超过下列哪组数值？（地表层衰减系数取 0.8）

（A）22 V　　（B）29.5 V　　（C）35.3 V　　（D）39.5 V

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《3~110 kV 高压配电装置设计规范》GB 50060—2008 第 6.0.5 条。

接地网的接触电压允许值：$U_t = 50+0.05\rho_s C_s = (50+0.05\times800\times0.8)\ \text{V} = 82\ \text{V}$

接地网的最大接触电位差：$U_{t\,max} = 79\ \text{V}$

GIS 配电装置设备外壳感应产生的最大电压差为

$$\sqrt{U_{t\,max}^2+(U'_{to\,max})^2} = U_t$$

$$U'_{to\,max} = \sqrt{U_t^2-U_{t\,max}^2} = \sqrt{82^2-79^2}\ \text{V} = 22\ \text{V} < 24\ \text{V}$$

同时满足 GIS 设备外壳感应电压不应超过 24 V，选 A。

【知识点解析】

气体绝缘金属封闭开关设备外部近区故障人触摸其金属外壳时，区域专用接地网应保证触及者手-脚间的接触电位差符合下式的要求：

$$\sqrt{U_{t\,max}^2+(U'_{to\,max})^2} < U_t$$

式中，$U_{t\,max}^2$为设备区域专用接地网最大接触电位差，由人脚下的点决定；$U'_{to\,max}$为设备外壳上、外壳之间或外壳与任何水平/垂直支架之间金属到金属因感应产生的最大电压差；U_t 为接触电位差允许值。气体绝缘金属封闭开关设备配电装置宜采用多点接地方式。外壳和支架上的感应电压，正常运行条件下不应大于 24 V，故障条件下不应大于 100 V。

12-15：该变电所 GIS 配电装置的接地线及其连接，下述表述中哪一条不符合要求？请说明理由。(发输电 2014 年考题)

(A) 三相共箱式或分相式的 GIS，其基座上的每一接地母线，应按照制造厂要求与该区域专用接地网连接

(B) 校验接地线截面的热稳定时，对只有 4 条接地线，其截面热稳定的校验电流应按单相接地故障时最大不对称电流有效值的 30%取值

(C) 当 GIS 露天布置时，设备区域专用接地网宜采用铜导体

(D) 室内布置的 GIS 应敷设环形接地母线，室内环形接地母线还应与 GIS 设备区域专用接地网相连接

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 第 4.4.5~4.4.9 条。

气体绝缘金属封闭开关设备区域专用接地网与变电站总接地网的连接线，不应少于 4 根。连接线截面的热稳定校验应符合规范要求。4 根连接线截面的热稳定校验电流，应按单相接地故障时最大不对称电流有效值的 35%取值。B 错。

【知识点解析】

1) 气体绝缘金属封闭开关设备的接地导体（线）及其连接，应符合下列要求：

① 三相共箱式或分相式设备的金属外壳与其基座上接地母线的连接方式，应按制造厂要求执行。其采用的连接方式，应确保无故障时所有金属外壳运行在地电位水平。当在指定点接地时，应确保母线各段外壳之间电压差在允许范围内。

② 设备基座上的接地母线应按制造厂要求与该区域专用接地网连接。连接线的截面，应满足设备接地故障（短路）时热稳定的要求。

2）当气体绝缘金属封闭开关设备置于建筑物内时，建筑物地基内的钢筋应与人工敷设的接地网相连接。建筑物立柱、钢筋混凝土地板内的钢筋等与建筑物地基内的钢筋，应相互连接，并应良好焊接。室内还应设置环形接地母线，室内各种需接地的设备（包括前述各种钢筋）均应连接至环形接地母线。环形接地母线还应与气体绝缘金属封闭开关设备区域专用接地网相连接。

3）气体绝缘金属封闭开关设备置于建筑物内时，设备区域专用接地网可采用钢导体。置于户外时，设备区域专用接地网宜采用铜导体。主接地网也宜采用铜或铜覆钢材。

12.2 高压架空线路和电缆线路的接地

【知识点说明】

1）高压架空线路部分《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 与《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010、《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 这两个规范的接地部分有重叠的规定，主要考点在于高压架空线路的接地要求，接地电阻计算详见本章接地电阻计算。

2）电缆线路部分《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 与《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 之间关于单相电缆接地规定有冲突，建议使用 GB 50217—2007，主要考点在于交流系统单芯电力电缆金属层接地方式和正常感应电动势计算部分。

依据书目：

《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010

《110～750 kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 等

参考书目：

《电力系统接地技术手册》

例题 12-16：某企业变电站拟新建一条 35 kV 架空电源线路，属小接地电流系统，线路采用钢筋混凝土电杆、铁横担、钢芯铝绞线。小接地电流系统中，无地线的架空线路杆塔在居民区宜接地，其接地电阻不宜超过下面哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）1 Ω　　（B）4 Ω　　（C）10 Ω　　（D）30 Ω

答案：【D】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 第 6.1.16 条。

【知识点解析】

小接地电流系统的设计应符合下列规定：

1）无地线的杆塔在居民区宜接地，其接地电阻不宜超过 30 Ω。

2）有地线的杆塔应接地。

3）在雷雨季，当地面干燥时，每基杆塔工频接地电阻不宜超过表 12-2 所列数值。

表 12-2　杆塔的最大工频接地电阻

土壤电阻率 ρ/Ω·m	$\rho<100$	$100\leqslant\rho<500$	$500\leqslant\rho<1000$	$1000\leqslant\rho<2000$	$\rho\geqslant2000$
工频接地电阻/Ω	10	15	20	25	30

例题 12-17：某 66 kV 架空线路，采用钢筋混凝土电杆、铁横担、钢芯铝绞线、架空地线，地线支架与接地引下线相连，杆塔的接地装置接地以水平接地极为主，埋设深度为 0.5 m，在安装杆塔时实测潮湿土壤电阻率为 1500 Ω·m，在雷雨季土壤干燥时，杆塔的工频接地电阻不宜超过哪一项数值？（供配电 2009 年考题改编）

（A）4 Ω　　（B）10 Ω　　（C）20 Ω　　（D）30 Ω

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011。

第 5.1.6 条　查表 5.16 中土壤干燥时的季节系数为 1.4～1.8，雷季中所采用的土壤电阻率为

$$\rho=\rho_0\varphi=1500\times(1.4\sim1.8)\,\Omega\cdot m=2100\sim2700\,\Omega\cdot m$$

第 5.1.3 条　查表 5.1.3 中有地线的线路杆塔的工频接地电阻不宜超过 30 Ω。选 D。

【知识点解析】

有地线的线路杆塔的工频接地电阻，不宜超过表 12-3 的规定。

表 12-3　有地线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率 ρ/Ω·m	$\rho\leqslant100$	$100<\rho\leqslant500$	$500<\rho\leqslant1000$	$1000<\rho\leqslant2000$	$\rho>2000$
接地电阻/Ω	10	15	20	25	30

当需要计算雷电保护接地装置的工频接地电阻所采用的土壤电阻率时，应取雷季中最大值，并应按下式计算：

$$\rho=\rho_0\varphi$$

式中，ρ 为土壤电阻率，土壤和水的电阻率可参考 GB 50065—2011 附录 J 的规定取值（Ω·m）；ρ_0 为雷季中无雨水时所测得的土壤电阻率（Ω·m）；φ 为土壤干燥时的季节系数，应按表 12-4 的规定取值。

表 12-4　土壤干燥时的季节系数

埋深/m	φ 值	
	水平接地极	2～3 m 的垂直接地极
0.5	1.4～1.8	1.2～1.4
0.8～1.0	1.25～1.45	1.15～1.3
2.5～3.0	1.0～1.1	1.0～1.1

例题 12-18：高压架空线路杆塔的接地装置一般根据土壤电阻率的大小而采用不同的形式。现已知某线路杆塔是在土壤电阻率为 $100\,\Omega\cdot m<\rho\leqslant300\,\Omega\cdot m$ 的地区，其接地装置可应用的形式为下列哪一种？

（A）利用铁塔和钢筋混凝土杆自然接地，可不设人工接地装置

（B）除自然接地外，并增设放射形人工接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.6 m

（C）人工接地装置围绕杆塔基础敷设成闭合环形

（D）人工接地装置采用水平敷设，接地极埋设深度不宜小于 0.5 m

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 第 5.1.5 条。

【知识点解析】

高压架空线路杆塔的接地装置，可采用下列形式：

1）在土壤电阻率 $\rho \leqslant 100\,\Omega \cdot m$ 的潮湿地区，可利用铁塔和钢筋混凝土杆自然接地。发电厂和变电站的进线段，应另设雷电保护接地装置。在居民区，当自然接地电阻符合要求时，可不设人工接地装置。

2）在土壤电阻率 $100\,\Omega \cdot m < \rho \leqslant 300\,\Omega \cdot m$ 的地区，除应利用铁塔和钢筋混凝土杆的自然接地外，并应增设人工接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.6 m。

3）在土壤电阻率 $300\,\Omega \cdot m < \rho \leqslant 2000\,\Omega \cdot m$ 的地区，可采用水平敷设的接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.5 m。

4）在土壤电阻率 $\rho > 2000\,\Omega \cdot m$ 的地区，接地电阻很难降到 30 Ω 以下时，可采用 6~8 根总长度不超过 500 m 的放射形接地极或采用连续伸长接地极。放射形接地极可采用长短结合的方式。接地极埋设深度不宜小于 0.3 m。接地电阻可不受限制。

5）居民区和水田中的接地装置，宜围绕杆塔基础敷设成闭合环形。

6）放射形接地极每根的最大长度应符合表 12-5 的规定。

表 12-5　放射形接地极每根的最大长度

土壤电阻率/Ω·m	$\rho \leqslant 500$	$500 < \rho \leqslant 1000$	$1000 < \rho \leqslant 2000$	$2000 < \rho \leqslant 5000$
最大长度/m	40	60	80	100

7）在高土壤电阻率地区应采用放射形接地装置，且在杆塔基础的放射形接地极每根长度的 1.5 倍范围内有土壤电阻率较低的地带时，可部分采用引外接地或其他措施。

例题 12-19：某 66 kV 架空线路，采用钢筋混凝土电杆、铁横担、钢芯铝绞线、架空地线，地线支架与接地引下线相连，杆塔的接地装置接地以水平接地极为主，埋设深度为 0.5 m。接地引下线哪一项要求不正确？

（A）接地体引出线的截面不应小于 50 mm^2，并应采用热镀锌

（B）部分预应力钢筋混凝土杆的非预应力钢筋可兼作接地引下线

（C）外敷的接地引下线可采用镀锌钢绞线，其截面不应小于 25 mm^2，可不用热稳定校验

（D）利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆，其钢筋与接地螺母和铁横担间应有可靠的电气连接

答案：【C】

解答过程：依据《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061—2010 第 6.1.17 条。

【知识点解析】

钢筋混凝土杆铁横担和钢筋混凝土横担架空电力线路的地线支架、导线横担与绝缘子固定部分之间，应有可靠的电气连接并与接地引下线相连，并应符合下列规定：

1）部分预应力钢筋混凝土杆的非预应力钢筋可兼作接地引下线。

2）利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆，其钢筋与接地螺母和铁横担间应有可靠的电气连接。

3）外敷的接地引下线可采用镀锌钢绞线，其截面积不应小于 25 mm^2。

4）接地体引出线的截面不应小于 50 mm^2，并应采用热镀锌。

例题 12-20：某 35 kV 变电所的进线采用单芯电缆，下列单芯电缆的要求中哪一项不正确？

（A）单芯电缆在线路上应至少有一点直接接地，且任一非接地处金属护套或屏蔽层上的正常感应电压，在正常满负载情况下，未采取防止人员任意接触金属护套或屏蔽层的安全措施时，不得大于 50 V

（B）单芯电缆在线路上应至少有一点直接接地，且任一非接地处金属护套或屏蔽层上的正常感应电压，其他已采取措施情况，不得大于 300 V

（C）线路不长，且能满足正常感应电压要求时，应采取在线路两端直接接地

（D）线路较长，单点直接接地方式无法满足正常感应电压的要求时，水下电缆、35 kV 及以下电缆或输送容量较小的 35 kV 及以上电缆，可采取在线路两端直接接地

答案：【C】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 第 4.1.10 条和第 4.1.11 条。

【知识点解析】

交流单芯电力电缆的金属层上电缆线路的正常感应电势最大值应满足下列规定：

1）未采取能有效防止人员任意接触金属层的安全措施时，不得大于 50 V。

2）除上述情况外，不得大于 300 V。

交流系统单芯电力电缆金属层接地方式的选择，应符合下列规定：

1）线路不长，且能满足本规范第 4.1.10 条要求时，应采取在线路一端或中央部位单点直接接地。

2）线路较长，单点直接接地方式无法满足本规范第 4.1.10 条的要求时，水下电缆、35 kV 及以下电缆或输送容量较小的 35 kV 及以上电缆，可采取在线路两端直接接地。

3）除上述情况外的长线路，宜划分适当的单元，且在每个单元内按 3 个长度尽可能均等区段，应设置绝缘接头或实施电缆金属层的绝缘分隔，以交叉互联接地。

注：《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 与《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 对应规定有冲突。

例题 12-21：某 110 kV 变电站配置有两台主变压器，变压器铭牌为 SF11-50000/110，50 MV·A，110±2×2.5%/10.5 kV。正常情况下每台主变负荷率为 50%，一台主变故障检修情况下另一台主变负荷率为 100%。该变电站采用一回 110 kV 电缆进线，电缆长度为 500 m，采用 3 根单芯电缆直线并列紧靠敷设。电缆金属层平均半径为 20 mm，电缆外半径为 25 mm。若回路正常工作电流 400 A，请通过计算确定该电缆金属层宜采用下述哪种接地方式。

（A）线路一端或中央部位单点直接接地　　（B）分区段交叉互联接地

（C）不接地　　（D）线路两端直接接地

答案：【A】

解答过程：依据《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 附录 F。

题目已知 3 根单芯电缆直线并列紧靠敷设，查表 F.0.2 中，得

$$X_0=\left(2\omega\ln\frac{S}{r}\right)\times10^{-4}=\left[2\times50\times2\pi\times\ln\frac{(0.02+0.025)\times2}{0.02}\right]\times10^{-4}\ \Omega/\mathrm{km}=0.0945\ \Omega/\mathrm{km}$$

$$\alpha=(2\omega\ln2)\times10^{-4}=0.04355\ \Omega/\mathrm{km}$$

$$Y=X_0+\alpha=(0.0945+4.355\times10^{-3})\ \Omega/\mathrm{km}=0.138\ \Omega/\mathrm{km}$$

电缆线路中相间（B 相）单位长度的正常感应电动势：

$$E_{s0B}=IX_0=I\left(2\omega\ln\frac{S}{r}\right)\times10^{-4}=400\times0.0945\ \mathrm{V/km}=37.8\ \mathrm{V/km}$$

电缆线路边相（A、C 相）单位长度的正常感应电动势：

$$E_{s0A}=\frac{I}{2}\sqrt{3Y^2+\left(X_0-\frac{\alpha}{2}\right)^2}$$

$$=\frac{400}{2}\sqrt{3\times0.138^2+\left(0.0945-\frac{0.04355}{2}\right)^2}\ \mathrm{V/km}=49.97\ \mathrm{V/km}$$

取三相正常感应电动势最大值，正常感应电动势最大值为

$$E_s=LE_{s0A}=0.5\times51.24\ \mathrm{V}=24.98\ \mathrm{V}$$

该电缆线路不长，其正常感应电动势最大值小于 50 V，满足规范第 4.1.10 条要求，根据第 4.1.11 条应采取在线路一端或中央部位单点直接接地。

12.3 高压配电电气装置接地与低压系统接地相关要求

【知识点说明】

1）高压配电电气装置的接地部分《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 的考点主要有接地电阻要求。《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）提出了高压系统接地故障时对各种接地形式的低压系统的影响，按照《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010 的要求执行。

2）低压系统的接地要求部分依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 与《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护 》GB 16895.21—2011、《低压配电设计规范》GB 50054—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）等相关规范和手册，其中关于接地电阻、保护导体、等电位联结、特殊场所接地要求等考点有所重合，如有冲突请严格按照 GB 16895.21—2011、GB 50054—2011 规范执行，该部分考点众多，详见第 1 章，本章省略。

依据书目：

《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护 》GB 16895.21—2011

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010

《建筑物电气装置 第 5-54 部分：电气设备的选择和安装 接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3-2004

《系统接地的形式及安全技术要求》GB 14050—2008

参考书目：

《电力系统接地技术手册》

《建筑物电气装置600问》

例题12-22~12-25：若某工厂变电所电源10 kV侧采用谐振接地系统，使用自动跟踪补偿消弧装置，发生接地故障时的故障残余电流不大于10 A，供电系统使用TN系统，请回答以下问题。

12-22：若该工厂综合办公楼380/220 V供电系统使用TN系统，楼内采用了接地故障保护并进行了总等电位联结。示意图12-5中，连接线4代表哪项？（供配电2007年考题改编）

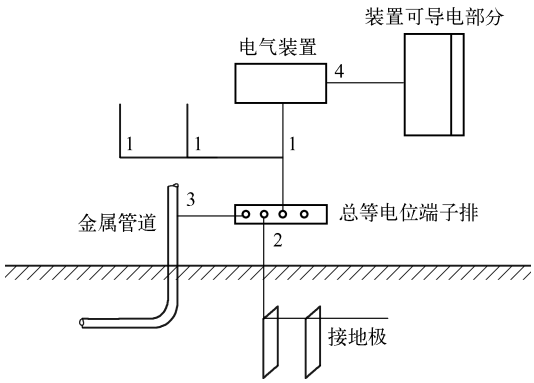


图12-5　工厂综合办公楼示意图

（A）保护线　　（B）接地线　　（C）总等电位联结线　　（D）辅助等电位联结线

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011附录H和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第1403页。

【知识点解析】

1）总等电位联结：在保护等电位联结中，将总保护导体、总接地导体或总接地端子、建筑物内的金属管道和可利用的建筑物金属结构等可导电部分连接到一起。

2）辅助等电位联结：在导电部分间用导线直接连通，使其电位相等或接近，而实施的保护等电位联结。

3）局部等电位联结：在一局部范围内将各导电部分连通，而实施的保护等电位联结。

接地配置、保护导体和保护联结导体如图12-6所示。

12-23：该工厂综合办公楼工程电气装置的保护线由以下几部分构成，哪项不符合规范要求？（供配电2007年考题改编）

（A）多芯电缆的芯线

（B）固定的裸导线或绝缘线

（C）受机械外力，但不受化学损蚀的装置外导电部分

（D）有防止移动措施的装置外导电部分

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011第8.2.2条，（A）（B）（D）符合要求和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第1397页。

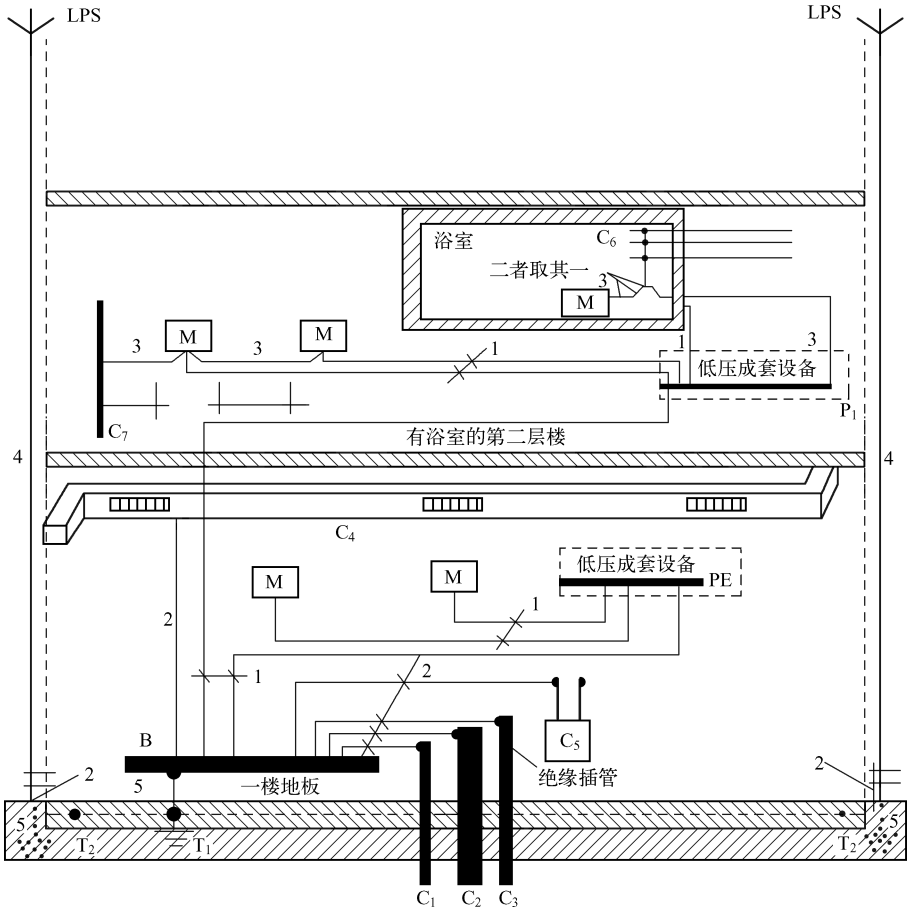


图 12-6　接地配置、保护导体和保护联结导体

M—外露可导电部分　C—外界可导电部分　C_1—外部进来的金属水管

C_2—外部进来的金属排弃废物、排水管道　C_3—外部进来的带绝缘插管的金属可燃气体管道　C_4—空调

C_5—供热系统　C_6—金属水管，比如浴池里的金属水管　C_7—在外露可导电部分的伸臂范围内的外界可导电部分

B—总接地端子（总接地母线）　T_1—基础接地　T_2—LPS（防雷装置）的接地极（若需要）　1—保护导体

2—保护联结导体　3—用作辅助联结用的保护联结导体　4—LPS（防雷装置）的引下线　5—接地导体

“能利用结构或适当的连接，使对机械、化学或电化学损伤的防护性能得到保护，并保持电气连续性”可用作保护导体，所以 C 错。

【知识点解析】

PE 类型应符合下列要求：

1）PE 应由下列一种或多种导体组成：

① 多芯电缆中的芯线。

② 与带电线共用的外护物（绝缘的或裸露的线）。

③ 固定安装的裸露的或绝缘的导体。

④ 符合以上条件的金属电缆护套、电缆屏蔽层、电缆铠装、金属编织物、同心线、金属导管。

⑤ PE 的配置，还应符合保护和功能共用接地的规定。

2）装置中包括带金属外护物的设备，其金属外护物或框架同时满足下列要求时，可用作保护导体：

① 能利用结构或适当的连接，使对机械、化学或电化学损伤的防护性能得到保护，并保持电气连续性。

② 符合 GB/T 50065—2011 第 8.2.1 条的规定。

③ 在每个预留的分接点上，允许与其他保护导体连接。

3）下列金属部分不应作为 PE 或保护联结导体：

① 金属水管。

② 含有可燃性气体或液体的金属管道。

③ 正常使用中承受机械应力的结构部分。

④ 柔性或可弯曲金属导管（用于保护接地或保护联结目的而特别设计的除外）。

⑤ 柔性金属部件。

⑥ 支撑线。

12-24：若该工厂车间供电的高压侧有 10 kV 配电电气装置，并设置专用变压器向低压侧供电，则该 10 kV 配电电气装置保护接地的接地电阻是下列哪个数值？

（A）1 Ω　　（B）2.5 Ω　　（C）4 Ω　　（D）5 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1386 页。

车间供电 10 kV 电网中性点为谐振接地系统，向 1 kV 及以下低压电气装置供电的高压配电电气装置保护接地的接地电阻为

$$R \leqslant 50/I = 50/10\ \Omega = 5\ \Omega$$

且不应大于 4 Ω，选 C。

【知识点解析】

工作于不接地、谐振接地和高电阻接地系统，向 1 kV 及以下低压电气装置供电的高压配电电气装置，其保护接地的接地电阻应符合下式的要求，且不应大于 4 Ω：

$$R \leqslant 50/I$$

式中，R 为考虑季节变化的最大接地电阻（Ω）；I 为计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值（A）。

12-25：假设工厂车间向低压侧供电的专用变压器 10 kV 侧采用小电阻接地系统，发生接地故障时的流经接地网的最大接地故障不对称电流为 800 A，若低压系统电源中性点与该变压器保护接地共用接地装置，则下列哪一项不符合规范要求？（发输电 2013 年考题改编）

（A）变压器保护接地可为 5 Ω

（B）车间建筑物低压电气装置采用 TN-C 系统

（C）车间建筑物低压电气装置采用 TN-C-S 系统

（D）低压电气装置（建筑物钢筋）保护总等电位联结系统

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1386 页。

供电电源 10 kV 侧变压器中性点为小电阻接地系统，接地网的接地电阻为

$$R \leqslant 2000/I_G = 2000/800\ \Omega = 2.5\ \Omega$$

A 不符合要求。

【知识点解析】

有效接地系统和低电阻接地系统中，保护接地要求的发电厂和变电站接地网的接地电阻，应符合下列要求：接地网的接地电阻宜符合下式的要求，且保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压应采用 TN 系统，低压电气装置应采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统：

$$R \leqslant 2000/I_G$$

式中，R 为考虑季节变化的最大接地电阻（Ω）；I_G 为计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值（A）。

向低压电气装置供电的配电变压器的高压侧工作于低电阻接地系统，变压器的保护接地装置的接地电阻符合低电阻接地系统接地要求，建筑物内低压采用 TN 系统且低压电气装置采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统时，低压系统电源中性点可与该变压器保护接地共用接地装置。当建筑物内低压电气装置虽采用 TN 系统，但未采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统，以及建筑物内低压电气装置采用 TT 或 IT 系统时，低压系统电源中性点严禁与该变压器保护接地共用接地装置，低压电源系统的接地应按工程条件研究确定。

12.4 接地导体（线）、接地极设计与选择

【知识点说明】

1）接地导体（线）、接地极设计与选择依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011，其摘录了《交流电气装置的接地》DL/T 621—1997 大部分内容，主要区别在于热稳定校检中短路电流 GB/T 50065—2011 使用的是流过接地导体（线）的最大接地故障不对称电流有效值，由于材料的增加对热稳定系数做了补充。本部分考点有接地导体（线）、接地极热稳定校验，GIS 和高压开关柜接地导体热稳定校检中短路电流的规定。

2）《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）增加了自然接地体的热稳定计算章节，当采用钢筋混凝土体中的钢筋作为自然接地体时短时通过故障工频电流的热稳定校验有了依据，作为新增考点考生需要注意。

依据书目：

《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005

参考书目：

《电力系统接地技术手册》

例题 12-26：已知变电所 110 kV 系统发生接地故障时，流经接地线的短路电流稳定值为 4000 A，变电所配有一套速动主保护，第一级后备保护的动作时间为 1.1 s，断路器开断时间为 0.11 s，接地线采用扁钢。试对变电所电气设备的接地线进行热稳定校验，当未考虑腐蚀

时，其接地线的最小截面和接地极的截面应取下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）80 mm^2，40 mm^2　　（B）80 mm^2，60 mm^2

（C）40 mm^2，60 mm^2　　（D）20 mm^2，60 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1411 页。

热稳定校验用的时间：

$$t_e = t_o + t_r = (0.11 + 1.1)\,s = 1.21\,s$$

接地线截面积的热稳定校验：

$$S_g \geqslant \frac{I_g}{C}\sqrt{t_e} = \frac{4000}{70} \times \sqrt{1.21}\ mm^2 = 62.8\ mm^2$$，取 80 mm^2

接地极截面积：

$S = 0.75S_g \geqslant 0.75 \times 62.8\ mm^2 = 47\ mm^2$，取 60 mm^2

查表 4.3.4-1 中，接地线截面积和接地极截面积大于 48 mm^2，满足最小尺寸要求。

【知识点解析】

（1）接地导体（线）的热稳定校验

高压电气装置接地导体（线）的热稳定校验符合下式要求：

$$S_g \geqslant \frac{I_G}{C}\sqrt{t_e}$$

接地装置接地极的截面，不宜小于连接至该接地装置的接地导体（线）截面的 75%，即

$$S_G \geqslant 0.75S_g$$

式中，S_g 为接地导体（线）的最小截面（mm^2）；S_G 为接地极的最小截面（mm^2）；I_G 为流过接地导体（线）的最大接地故障不对称电流有效值（A），按工程设计水平年系统最大运行方式确定；t_e 为接地故障的等效持续时间（s）；C 为接地导体（线）材料的热稳定系数，根据材料的种类、性能及最大允许温度和接地故障前接地导体（线）的初始温度确定。

（2）最大接地故障不对称电流有效值选择

1）在校验接地导体（线）的热稳定时，I_G 应采用表 12-6 所列数值。

表 12-6　校验接地导体（线）热稳定用的 I_G

系统接地方式	I_G
有效接地	三相同体设备：单相接地故障电流 三相分体设备：单相接地或三相接地流过接地线的最大接地故障电流
低电阻接地	单相接地故障电流

2）气体绝缘金属封闭 GIS 开关设备：设置区域专用接地网与变电站总接地网的连接线应不少于 4 根。4 根连接线截面的热稳定校验电流，应按单相接地故障时最大不对称电流有效值的 35%取值。

3）交流金属封闭开关设备（开关柜）：沿开关柜的整个长度延伸方向应设有专用的接地导体，专用接地导体所承受的动、热稳定电流应为额定短路开断电流的 86.6%。

注：开关柜的热稳定规定来自 DL5222—2005。

（3）接地导体（线）热稳定系数

在校验接地导体（线）的热稳定时，接地导体（线）的初始温度取 40℃。对钢和铝材的最大允许温度分别取 400℃和 300℃。钢和铝材的热稳定系数 C 值分别为 70 和 120。

铜和铜镀钢材采用放热焊接方式时的最大允许温度，应根据土壤腐蚀的严重程度经验算分别取 900℃、800℃或 700℃。爆炸危险场所，应按专用规定选取。铜和铜镀钢材的热稳定系数 C 值可采用表 12-7 给出的数值。

表 12-7　校验铜和铜镀钢材接地导体（线）热稳定用的 C 值

最大允许温度/℃	铜	电导率 40% 铜镀钢绞线	电导率 30% 铜镀钢绞线	电导率 20% 铜镀铜棒
700	249	167	144	119
800	259	173	150	124
900	268	179	155	128

（4）热稳定校验用的时间

热稳定校验用的时间可按下列规定计算：

1）发电厂和变电站的继电保护装置配置有 2 套速动主保护、近接地后备保护、断路器失灵保护和自动重合闸时，t_e 应按下式取值：

$$t_e \geqslant t_m + t_f + t_o$$

式中，t_m 为主保护动作时间（s）；t_f 为断路器失灵保护动作时间（s）；t_o 为断路器开断时间（s）。

2）配有 1 套速动主保护、近或远（或远近结合的）后备保护和自动重合闸，有或无断路器失灵保护时，t_e 应按下式取值：

$$t_e \geqslant t_o + t_r$$

式中，t_r 为第一级后备保护的动作时间（s）。

3）系统接地方式采用有效接地和低电阻接地热稳定校验用的时间按第 1）、2）条进行计算。

4）接触电位差与跨步电位差用的时间等于热稳定校验用的时间，可按第 1）、2）条进行计算。

5）当采用不接地、消弧线圈接地和高电阻接地时，可按第 1）、2）条进行计算。

注：当采用不接地、消弧线圈接地和高电阻接地时，I_G 采用异点两相接地短路电流，t_e 取 2 s，来自 DL/T 621—1997 附录 C，GB/T 50065—2011 中没有规定。

（5）接地材料的要求和尺寸

钢接地材料的最小尺寸见表 12-8。

表 12-8　钢接地材料的最小尺寸

种　　类	规格及单位	地　　上	地　　下
圆钢	直径/mm	8	8/10
扁钢	截面/mm^2	48	48
	厚度/mm	4	4

（续）

种　　类	规格及单位	地　　上	地　　下
角钢	厚度/mm	2.5	4
钢管	管壁厚/mm	2.5	3.5/2.5

注：1. 地下部分圆钢的直径，其分子、分母数据分别对应于架空线路和发电厂、变电站的接地网。
2. 地下部分钢管的壁厚，其分子、分母数据分别对应于埋于土壤和埋于室内混凝土地坪中。
3. 架空线路杆塔的接地极引出线，其截面应不小于 50 mm^2，并应热镀锌。

例题 12-27：某火电厂厂内 220 kV 配电装置最大接地故障短路电流为 30 kA。折算至 220 kV 母线的厂内零序阻抗（标幺值）为 0.01、系统侧零序阻抗（标幺值）为 0.02，发生单相接地故障时故障切除时间为 200 ms，220 kV 的等效时间常数 $X/R=30$。若采用扁钢作为接地极，计算确定变压器中性点扁钢接地线的热稳定截面最小不宜小于下列哪项数值。（发输电 2017 年考题改编）

（A）143.7 mm^2　　（B）154.9 mm^2　　（C）174.3 mm^2　　（D）232.4 mm^2

答案：【 B 】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1379 页。

发生单相接地故障时的最大接地故障电流有效值：$I_{max}=30\ kA$

厂内发生接地故障时流经其设备中性点的电流：

$$I_n=I_{max}\frac{X_{*s}}{X_{*s}+X_{*n}}=30\times\frac{0.02}{0.02+0.01}\ kA=20\ kA$$

查表 B.0.3 切除故障时间为 0.2 s、等效时间常数 X/R 为 30，衰减系数 D_f 为 1.2125，最大接地故障不对称电流有效值：$I_G=D_fI_g=1.2125\times20\ kA=24.25\ kA$

热稳定校验用的时间：$t_e=0.2\ s$

接地线截面积的热稳定校验：$S_g\geqslant\frac{I_g}{C}\sqrt{t_e}=\frac{24250}{70}\times\sqrt{0.2}\ mm^2=154.9\ mm^2$。

例题 12-28：某新建项目包括生产车间、66 kV 变电所、办公建筑等。当地的平均雷暴日为 20d/a，预计雷击次数为 0.2 次/a。该项目厂区有一烟囱建筑，高 20 m，防雷接地的水平接地体形式为近似边长为 6 m 的正方形。测得引下线的冲击接地电阻为 35 Ω，土壤电阻率为 1000 Ω·m。请确定是否需要补加水平接地体，若需要，补加的最小长度宜为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）需要，1.61 m　（C）需要，16.08 m　（B）需要，5.16 m　（D）不需要

答案：【A】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1267 页。

第 3.0.4-4 条　烟囱为第三类防雷建筑物。

第 4.4.6 条　烟囱防雷引下线的冲击接地电阻为 35 Ω，大于 30 Ω，需要补加水平接地体。补加水平接地体的最小长度计算如下：

$$l_r=5-\sqrt{\frac{A}{\pi}}=\left(5-\sqrt{\frac{6\times6}{\pi}}\right)m=1.61\ m$$

【知识点解析】

第三类防雷建筑物补加水平接地体的相关要求：

第三类防雷建筑物共用接地装置的接地电阻应按 50 Hz 电气装置的接地电阻确定，不应大于按人身安全所确定的接地电阻值。在土壤电阻率小于或等于 3000 Ω·m 时，外部防雷装置的接地体当符合下列规定之一以及环形接地体所包围面积的等效圆半径等于或大于所规定的值时可不计及冲击接地电阻；当每根专设引下线的冲击接地电阻不大于 30 Ω，但对建筑物年预计雷击次数 0.05 次/a≥N≥0.01 次/a 的部、省级办公建筑物和其他重要或人员密集的公共建筑物，以及火灾危险场所，则不大于 10 Ω 时，可不按本条第 1 项敷设接地体。

1）对环形接地体所包围面积的等效圆半径 $\sqrt{\frac{A}{\pi}}<5$ m 时，每一引下线处应补加水平接地体或垂直接地体。当补加水平接地体时，其最小长度应按式（12-1）计算；当补加垂直接地体时，其最小长度应按式（12-2）计算。

2）本条第 1 项（$\rho\leqslant 500\,\Omega\cdot$m，$S<25\pi$）补加水平接地体时，其最小长度应按下式计算：

$$l_r = 5-\sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{12-1}$$

式中，$\sqrt{\frac{A}{\pi}}$ 为环形接地体所包围面积的等效圆半径（m）；l_r 为补加水平接地体的最小长度（m）；A 为环形接地体所包围的面积（m^2）。

3）本条第 1 项（$\rho\leqslant 500\,\Omega\cdot$m，$S<25\pi$）补加垂直接地体时，其最小长度应按下式计算：

$$l_v = \frac{5-\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{2} \tag{12-2}$$

式中，l_v 为补加垂直接地体的最小长度（m）。

例题 12-29：某变电所的 110 kV GIS 配电室内接地网的布置如图 12-7 所示，如果 110 kV 母线单相接地故障最大不对称电流有效值为 5 kA。由 GIS 引向室内环形接地母线的接地线截面热稳定校验电流可以取下列哪项数值？依据是什么？（发输电 2013 年考题）

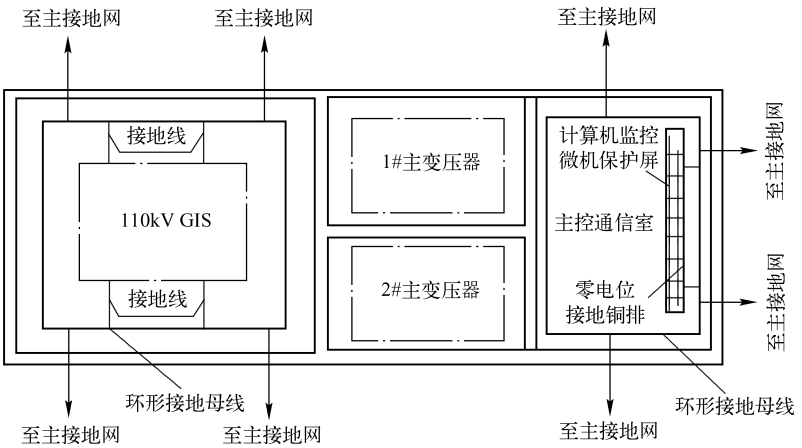


图 12-7　GIS 配电室内接地网布置

（A）5 kA　　（B）3.5 kA　　（C）2.5 kA　　（D）1.75 kA

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1383 页。

如图 12-7 所示变电所的 110 kV GIS 配电室内接地网有 4 根引向主接地网，按照第 4.4.5 条连接线截面的热稳定校验电流，应按单相接地故障时最大不对称电流有效值的 35% 取值，即 5 kA×35% = 1.75 kA。

【知识点解析】

气体绝缘金属封闭开关设备区域专用接地网与变电站总接地网的连接线，不应少于 4 根。连接线截面应符合热稳定校验要求。4 根连接线截面的热稳定校验电流，应按单相接地故障时最大不对称电流有效值的 35%取值。

例题 12-30：已知变电所 110 kV 系统发生接地故障时，流经接地线的短路电流稳定值为 4000 A，变电所配有一套速动主保护，第一级后备保护的动作时间为 1.1 s，断路器开断时间为 0.11 s，接地网土壤电阻率为 200 Ω·m。试对变电所电气设备的接地线进行热稳定校验，当按照最严重腐蚀考虑使用 40 年时，其接地极的截面应取下列哪一项？

（A）20×4 mm^2 扁钢　　（B）20×4 mm^2 热镀锌扁钢

（C）25×2 mm^2 扁钢　　（D）25×2 mm^2 热镀锌扁钢

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1411 页。

热稳定校验用的时间：

$$t_e = t_o + t_r = (0.11 + 1.1)\,s = 1.21\,s$$

接地线截面积的热稳定校验：

$$S_g \geqslant \frac{I_g}{C}\sqrt{t_e} = \frac{4000}{70} \times \sqrt{1.21}\ mm^2 = 62.8\ mm^2,\ 取\ 80\ mm^2$$

接地极截面积：

$$S = 0.75 S_g \geqslant 0.75 \times 62.8\ mm^2 = 47\ mm^2$$

接地线截面积和接地极截面积大于 48 mm^2，厚度 4 mm，答案 A、B 满足尺寸要求。

按照最严重腐蚀考虑，查表 12-9 中，扁钢最严重腐蚀速率 0.2 mm/a，厚度 4 mm 时为 20 年，热镀锌扁钢腐蚀速率为 0.065 mm/a，厚度 4 mm 时为 61.5 年，答案 B 满足耐腐蚀要求。

【知识点解析】

接地导体（线）、接地极材料一般采用镀锌钢。镀锌钢的镀锌层必须采用热镀铸的方法。且镀层要有足够的厚度，以满足接地装置设计使用年限的要求。接地设计应按站址当地土壤腐蚀条件选择适当的材料和防腐蚀措施。表 12-9 给出了若干土壤腐蚀情况的参考值。

表 12-9　接地导体（线）和接地极年平均最大腐蚀速率（总厚度）

土壤电阻率 /Ω·m	扁钢腐蚀速率 /(mm/a)	圆钢腐蚀速率 /(mm/a)	热镀锌扁钢腐蚀速率/(mm/a)
50~300	0.2~0.1	0.3~0.2	0.065
>300	0.1~0.07	0.2~0.07	0.065

例题 12-31：假设工厂变电站 35 kV 侧采用小电阻接地系统，变电所采用 35 kV 室内开关柜，沿开关柜整个长度设有专用的接地导体，接地导体采用铜导体。已知 35 kV 室内开关柜进线断路器额定开断电流为 10 kA，其接地导体的截面最小取下列哪一项？

（A）30 mm^2　　（B）40 mm^2　　（C）50 mm^2　　（D）60 mm^2

答案：【C】

解答过程：依据《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222—2005。

第 13.0.6 条及其条文说明　专用接地导体所承受的动、热稳定电流应为额定短路开断电流的 86.6%。接地线截面积的热稳定校验，接地导体为铜质时其电流密度在规定的接地故障时不应超过 200 A/mm^2，其最小截面不得小于 30 mm^2。

$$S \geqslant \frac{86.6\% I_k}{200} = \frac{0.86 \times 10000}{200}\ mm^2 = 43\ mm^2 > 30\ mm^2，取\ 50\ mm^2$$

【知识点解析】

沿开关柜的整个长度延伸方向应设有专用的接地导体，专用接地导体所承受的动、热稳定电流应为额定短路开断电流的 86.6%。沿所有高压开关柜的整个长度延伸方向应设有专用的接地导体，如果是铜质的，其电流密度在规定的接地故障时不应超过 200 A/mm^2，其最小截面不得小于 30 mm^2，该接地导体应设有与接地网相连的固定的连接端子，并有明显的接地标志。如果接地导体不是铜质的，也应满足相同的动热稳定要求。

12.5　接地电阻计算

【知识点说明】

1）电气装置的工频接地电阻计算依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 的附录 A。

2）架空线路杆塔接地电阻和冲击接地电阻的计算依据 GB/T 50065—2011 的附录 F，该考点要注意雷电防护时季节系数和冲击利用系数法、冲击系数的应用。

3）建筑物的接地电阻计算依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）的 14.6 节接地电阻的计算，同时注意季节系数的应用。

4）建筑物防雷接地装置的接地电阻计算依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 的附录 C，主要考点有工频接地电阻计算、冲击接地电阻与工频接地电阻的换算、接地体的有效长度、补加水平接地体的计算。

依据书目：

《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010

参考书目：

《电力系统接地技术手册》

例题 12-32～12-35：一座 35/10 kV 变电站附属于某公共建筑物内并为该建筑物供电。建筑物内下级 10/0.4 kV 变压器兼站用变。35 kV 系统采用高电阻接地方式，10 kV 侧单相接地电容电流为 15A，采用经消弧线圈接地，0.4 kV 侧采用 TN-S 系统，各变电站及建筑物共

用接地系统，利用建筑物桩基础钢筋作自然接地体，并围绕建筑物设置以水平接地体为主边缘闭合的人工接地体，建筑物底板平面为 30 m×21 m，放在钻孔中的钢筋混凝土杆形桩基按 6×4 的矩形布置，闭环接地体包围的面积为 36×24 m^2。水平接地体埋深 1.0 m。请回答下列有关问题。

12-32：建筑物场地为陶土，假定在测量土壤电阻率时，土壤具有中等含水量，测得的土壤电阻率为 35 Ω·m，该自然接地装置的工频接地电阻最接近下列哪项数值？（基础接地极的形状系数 $K_2=0.5$）（供配电 2016 年考题）

（A）0.52 Ω　　（B）1.03 Ω　　（C）1.14 Ω　　（D）1.63 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1417 页表 14.6-4；第 1422 页表 14.6-14。

$$C_1=\frac{n}{A}=\frac{24}{30\times21}=3.8\times10^{-2}\frac{1}{m^2}\in(2.5\sim6)\times10^{-2}\frac{1}{m^2}$$

查看表 14.6-4，$K_1=1.4$，混凝土杆形桩基自然接地装置的工频接地电阻为

$$R=K_1K_2\frac{\rho}{L_1}=1.4\times0.5\times\frac{35}{30}\Omega=0.817\ \Omega$$

土壤电阻率为实测值，需要考虑季节系数，查表 14.6-14 季节系数为 1.4，则

$$R'=\psi_2R=1.4\times0.817\ \Omega=1.14\ \Omega$$

【知识点解析】

（1）建筑物接地电阻计算

建筑物或建筑群的基础接地极的接地电阻计算式见表 12-10。

表 12-10　建筑物或建筑群的基础接地极的接地电阻计算式　　（单位：Ω）

基础接地极的布置和形式	接地电阻计算式	形状系数的数值
由 n 根桩基构成的基础接地极，由 n 根钢柱或 n 根放在杯口形基础中的钢筋混凝土构成的基础接地极，由 n 根放在钻孔中的钢筋混凝土杆构成的基础接地极，建筑物的基底面积为 A，用 C_1 表示其特征，其值为 $C_1=n/A$	$R=K_1K_2\frac{\rho}{L_1}$	当 $C_1=(2.5\sim6)\times10^{-2}\frac{1}{m^2}$ 时，$K_1=1.4$，K_2 从图 14.6-1 中查出。该图中 L_1 为基底面积 A 的长边，L_2 为短边
由 n 个加钢筋的块状基础或 n 个有底板钢筋的杯口基础组成；第 n 个基础的平面积为 A_n，整个建筑物的基底平面积为 A，用 C_2 表示其特征，其值为 $C_2=\frac{\sum_1^n A_n}{A}$		当 $C_2=0.15\sim0.4$ 时，$K_1=1.5$，K_2 从图 14.6-1 中查出，该图中 L_1 为基底面积 A 的长边，L_2 为短边
由 m 个任意几何形状的钢筋混凝土基础组成的基础接地极；这些基础（第 m 个基础的平面积为 A_m）任意布置在综合建筑群所占的基底平面积 A_K 之内，用 C_0 表示其特征，其值为 $C_3=\frac{\sum_1^m A_m}{A_K}$		K_1 从图 14.6-6 中查出，K_2 从图 14.6-1 中查出。这时 t 为各基础深度的平均值，L_1 为基底面积 A_K 的长边，L_2 为短边

注：表中面积单位为 m^2，长度单位为 m。

图 14.6-1～图 14.6-6 在《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1417 页。

（2）季节系数

非雷电保护接地实测的接地电阻值或土壤电阻率，要乘以表 12-11 中的季节系数 ψ_1 或 ψ_2 或 ψ_3 进行修正。

表 12-11　季节系数

土壤类别	深度/m	ψ_1	ψ_2	ψ_3
黏土	0.5～0.8 0.8～3	3 2	2 15	1.5 1.4
陶土	0～2	2.4	1.4	1.2
砂砾盖于陶土	0～2	1.8	1.2	1.1
园地	0～3	—	1.3	1.2
黄沙	0～2	2.4	1.6	1.2
混有黄沙的砂砾	0～2	1.5	1.3	1.2
泥炭	0～2	1.4	1.1	1.0
石灰石	0～2	2.5	1.5	1.2

注：ψ_1 用于测量前数天下过较长时间的雨，土壤很潮湿时。

ψ_2 用于测量土壤较潮湿，具有中等含水量时。

ψ_3 用于测量土壤干燥或测量前降雨量不大时。

12-33：假定该场地土壤电阻率为 120Ω·m，其中某一段建筑物防雷引下线连接到四边形闭合人工接地体的顶点。接地体采用扁钢，其等效直径为 15mm，根据场地及接地网条件计算该引下线的冲击接地电阻，其计算结果最接近下列哪项数值？（不考虑自然接地体的散流作用，接地极形状系数取-0.18）（供配电 2016 年考题）

（A）3.2Ω　　（B）5.05Ω　　（C）7.4Ω　　（D）10.5Ω

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 C 和《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 附录 A、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1286 页。

第 C.0.3 条　接地体有效长度 $l_e=2\sqrt{\rho}=2\sqrt{120}=21.909\text{m}$；因为 $l=(36+24)\text{m}>l_e=21.9\text{m}$，闭环接地体的周长一半大于接地体有效长度，所以工频接地电阻计算长度 $L=2l_e=43.818\text{m}$，换算系数 A 等于 1。

建筑物防雷的工频接地电阻，题目中给出该场地土壤电阻率为 120Ω·m，可以认为已经考虑季节系数，由于 GBJ65—1983 已经废止同时根据题目要求应使用 GB/T 50065—2011 中式（A.0.2）：

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)=\frac{120}{2\pi\times43.818}\left(\ln\frac{43.818^2}{1\times0.015}-0.18\right)\Omega=5.047\,\Omega$$

建筑物防雷的冲击接地电阻为

$$R_i=R_\sim/A=5.047/1\,\Omega=5.047\,\Omega$$

【知识点解析】

（1）接地极工频电阻计算

均匀土壤中不同形状水平接地极的接地电阻，可按下式计算：

$$R_h=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)$$

式中，R_h 为水平接地极的接地电阻（Ω）；L 为水平接地极的总长度（m）；h 为水平接地极的埋设深度（m）；d 为水平接地极的直径或等效直径（m）；A 为水平接地极的形状系数。

当需要计算雷电保护接地装置的工频接地电阻所采用的土壤电阻率时，应取雷季中最大值，并应按下式计算：

$$\rho=\rho_0\varphi$$

式中，ρ 为土壤电阻率，土壤和水的电阻率可参数 GB/T 50065—2011 附录 J 的规定取值（Ω·m）；ρ_0 为雷季中无雨水时所测得的土壤电阻率（Ω·m）；φ 为土壤干燥时的季节系数，应按表 12-12 的规定取值。

表 12-12　土壤干燥时的季节系数

埋深/m	φ 值	
	水平接地极	2~3 m 的垂直接地极
0.5	1.4~1.8	1.2~1.4
0.8~1.0	1.25~1.45	1.15~1.3
2.5~3.0	1.0~1.1	1.0~1.1

（2）建筑物防雷冲击电阻计算

接地装置冲击接地电阻与工频接地电阻的换算，应按下式计算：

$$R_{\sim}=AR_i$$

式中，$R_{\sim}$ 为接地装置各支线的长度取值小于或等于接地体的有效长度的工频电阻（Ω）；A 为换算系数，其值宜按图 12-8 确定；R_i 为所要求的接地装置冲击接地电阻（Ω）。

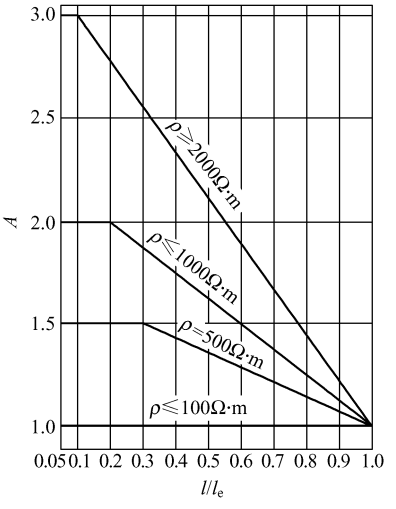


图 12-8　换算系数 A

注：l 为接地体最长支线的实际长度，其计量与 l_e 类同；当它大于 l_e 时，取其等于 l_e。

接地体的有效长度应按下式计算：

$$l_e=2\sqrt{\rho}$$

式中，l_e 为接地体的有效长度（m），应按图 12-9 计量；ρ 为敷设接地体处的土壤电阻率（Ω·m）。

环绕建筑物的环形接地体应按以下方法确定冲击接地电阻：

1）当环形接地体周长的一半大于或等于接地体的有效长度时，引下线的冲击接地电阻应为从与引下线的连接点起沿两侧接地体各取有效长度算出的工频接地电阻，这时换算系数等于 1。

2）当环形接地体周长的一半小于有效长度时，引下线的冲击接地电阻应为以接地体的实际长度算出的工频接地电阻再除以换算系数。

与引下线连接的基础接地体，当其钢筋从与引下线的连接点量起大于 20 m 时，其冲击接地电阻应为以换算系数等于 1 和以该连接点为圆心 20 m 为半径的半球体范围内的钢筋体的工频接地电阻。

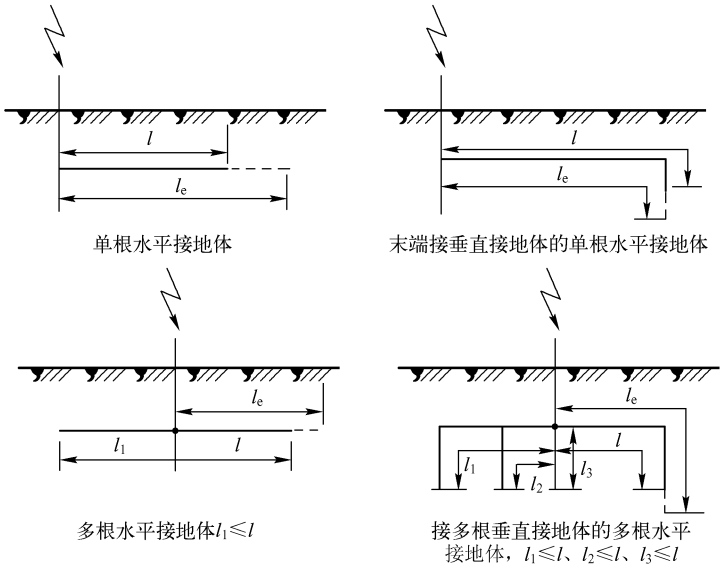


图 12-9　接地体有效长度的计量

12-34：若该企业工业场地内某建筑物采用水平铺设的多根人工接地体作为防雷接地装置，该地区土壤电阻率为 500 Ω·m，最长支线为 19 m，接地装置埋深距地面 1.0 m，工频接地电阻为 $R(\Omega)$，则该接地体的冲击接地电阻正确的是下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）$1.4R$　（B）R　（C）$R/1.4$　（D）$R/1.5$

答案：【C】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 C 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1286 页。

接地体有效长度：$l_e = 2\sqrt{\rho} = 2\sqrt{500}\ \text{m} = 44.72\ \text{m}$

$$l/l_e = 19/44.72 = 0.42$$

查图 C.0.1，得 $A = 1.4$。

该接地体的冲击接地电阻：$R_i = \dfrac{R}{A} = \dfrac{R}{1.4}$

12-35：若该企业内某独立建筑物防雷接地采用人工接地装置，接地装置为一根水平铺设的接地体，该地区土壤电阻率为 1000 Ω·m，为降低接地电阻采用换土的方式，引下线与接地体连接点两侧沿水平接地体方向各 5 m 范围内采用 500 Ω·m 土壤进行更换，该接地体的总有效长度应为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）59.10 m　（B）61.17 m　（C）73.25 m　（D）107.97 m

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 附录 C 式（C.0.2）和条文说明第 5.4.6 条或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1286 页。

如图 12-10 所示，接地体的总有效长度只计算其一侧数值，一侧 500Ω·m 土壤长度为 5m。计算如下：

$$l_e = l_1 + l_{e2} = l_1 + (l_{e1} - l_1)\sqrt{\rho_2/\rho_1} = l_1 + (2\sqrt{\rho_1} - l_1)\sqrt{\rho_2/\rho_1}$$

$$= [5 + (2\times\sqrt{500} - 5)\times\sqrt{1000/500}]\,\text{m} = 61.17\,\text{m}$$

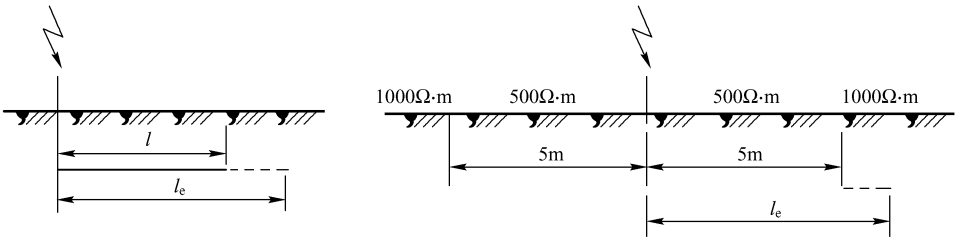


图 12-10　单根水平接地体

【知识点解析】

接地体有效长度按下式计算：

$$l_e = 2\sqrt{\rho}$$

式中，l_e 为接地体有效长度（m）；ρ 为敷设接地体处的土壤电阻率（Ω·m）。

注：当水平接地体敷设于不同土壤电阻率区域时接地体有效长度应分段计算。例如，敷设于 ρ_1 土壤内的水平接地体长度为 l_1，其计算有效长度为 l_{e1}，当 $l_1 \leqslant l_{e1}$ 时，余下敷设于 ρ_2 中的有效长度 l_{e2} 应换算为 $l_{e2} = (l_{e1} - l_1)\sqrt{\rho_2/\rho_1}$，总有效长度为 $l_e = l_1 + l_{e2}$。

例题 12-36~12-37：某普通多层工业办公楼长 72m，宽 12m，高 20m，为平屋面，砖混结构，混凝土基础，当地年平均雷暴日为 154.5d/a。请回答下列问题。

12-36：建筑物钢筋混凝土基础由 4 个长×宽×高为 11m×0.8m×0.6m 和 2 个长×宽×高为 72m×0.8m×0.6m 的块状基础组成，基础埋深 3m，土壤电阻率为 72Ω·m。请计算此建筑物的接地电阻值为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（A）0.551Ω　　（B）0.975Ω　　（C）1.125Ω　　（D）1.79Ω

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1417 页（第三版第 893 页）。

钢筋混凝土块状基础的系数：

$$C_2 = \frac{\sum_1^n A_n}{A} = \frac{4\times 11\times 0.8 + 2\times 72\times 0.8}{72\times 12} = 0.174$$，查表 14-13，$K_2 = 0.15$

$$\frac{t}{L_2} = \frac{3}{11} = 0.273,\ \frac{L_1}{L_2} = \frac{72}{11} = 6.545$$，查图 14-9，$K_1 = 0.75$

钢筋混凝土块状基础的工频接地电阻为

$$R = K_1 K_2 \frac{\rho}{L_1} = 1.5\times 0.75\times\frac{72}{72}\,\Omega = 1.125\,\Omega$$

12-37：假设建筑物外引一段水平接地体，长度为100 m，先经过长50 m电阻率为2000 Ω·m的土壤，之后经过电阻率为1500 Ω·m的土壤。请计算此段水平接地体的有效长度为下列哪项数值。(供配电2017年考题)

(A) 77.46 m　　(B) 84.12 m　　(C) 89.4 m　　(D) 100 m

答案：【B】

解答过程：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010附录C式(C.0.2)和条文说明第5.4.6条或《工业与民用供配电设计手册》第四版(下册)第1286页。

接地体的总有效长度计算如下：

$$l_e = l_1 + l_{e2} = l_1 + (l_{e1} - l_1)\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} = l_1 + (2\sqrt{\rho_1} - l_1)\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} = \left[50 + (2\times\sqrt{2000} - 50)\times\sqrt{\frac{1500}{2000}}\right] \text{m} = 84.12 \text{ m}$$

例题12-38：在某市远离发电厂的工业区拟建设一座110/10 kV变电所。主变压器110 kV中性点直接接地，10 kV系统经消弧线圈接地；变电所所在场地土壤为均匀土壤，土壤电阻率为100 Ω·m，变电所场地内敷设以水平接地为主边缘闭合的人工复合接地网，接地网长×宽为70 m×60 m，均压带间隔为5 m，水平接地极采用ϕ12圆钢，埋设深度为1 m，采用简易计算式计算接地网的接地电阻值，其值最接近的是下列哪一项？(供配电2014年考题)

(A) 30 Ω　　(B) 3 Ω　　(C) 0.745 Ω　　(D) 0.01 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011或《工业与民用供配电设计手册》第四版(下册)第1420页。

接地网的接地电阻值为

$$R \approx 0.5\frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.5\times\frac{100}{\sqrt{70\times60}}\ \Omega = 0.745\ \Omega$$

【知识点解析】

均匀土壤中人工接地极工频接地电阻的简易计算，可相应采用下列公式。

垂直式：

$$R \approx 0.3\rho$$

单根水平式：

$$R \approx 0.03\rho$$

复合式(接地网)：

$$R \approx 0.5\frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28\frac{\rho}{r}$$

或

$$R \approx \frac{\sqrt{\pi}}{4}\times\frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

式中，S为大于100 m^{2}的闭合接地网的面积；R为与接地网面积S等值的圆的半径，即等效半径(m)。

例题12-39~12-41：某110/10 kV变电站的接地网，水平接地极采用ϕ20圆钢，垂直接地极采用L50×50×5角钢；接地网埋深0.8 m，方格8 m×8 m按图12-11敷设。

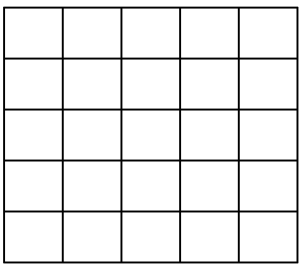


图12-11　5×5个方格

12-39：变电站场地均匀土壤电阻率为 50Ω·m，则本站复合接地网的接地电阻为哪项？（要求精确计算，小数点保留 4 位）（供配电 2009 年考题）

（A）0.5886Ω　　（B）0.5826Ω

（C）0.4741Ω　　（D）0.4692Ω

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 附录 A.0.3［式（A.0.3-1）~式（A.0.3-4）］或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1419 页。

外缘边线总长度：　　$L_0=5\times8\times4\ \text{m}=160\ \text{m}$

水平接地体总长度：　　$L=40\times12\ \text{m}=480\ \text{m}$

接地网总面积：　　$S=40\times40\ \text{m}^2=1600\ \text{m}^2;\sqrt{S}=40\ \text{m}$

系数 B：

$$B=\frac{1}{1+4.6\dfrac{h}{\sqrt{S}}}=\frac{1}{1+4.6\times\dfrac{0.8}{40}}=0.9158$$

等值接地电阻：

$$R_e=0.213\frac{\rho}{\sqrt{S}}(1+B)+\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{S}{9hd}-5B\right)$$

$$=\left[0.213\times\frac{50}{40}\times(1+0.9158)+\frac{50}{2\pi\times480}\left(\ln\frac{1600}{9\times0.8\times0.02}-5\times0.9158\right)\right]\Omega$$

$$=[0.5101+0.01658\times(9.3157-4.5788)]\Omega=0.58864\ \Omega$$

系数 α_1：

$$\alpha_1=\left(3\ln\frac{L_0}{\sqrt{S}}-0.2\right)\frac{\sqrt{S}}{L_0}=\left(3\ln\frac{160}{40}-0.2\right)\times\frac{40}{160}=0.9897$$

复合接地网的接地电阻：　　$R_n=\alpha_1R_e=0.9897\times0.58864\ \Omega=0.5826\ \Omega$

【知识点解析】

均匀土壤中水平接地极为主边缘闭合的复合接地极（接地网）的接地电阻，可按下列公式计算：

$$\begin{cases}R_n=a_1R_e\\ a_1=\left(3\ln\dfrac{L_0}{\sqrt{S}}-0.2\right)\dfrac{\sqrt{S}}{L_0}\\ R_e=0.213\dfrac{\rho}{\sqrt{S}}(1+B)+\dfrac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\dfrac{S}{9hd}-5B\right)\\ B=\dfrac{1}{1+4.6\dfrac{h}{\sqrt{S}}}\end{cases}$$

式中，R_n 为任意形状边缘闭合接地网的接地电阻（Ω）；R_e 为等值（即等面积、等水平接地极总长度）方形接地网的接地电阻（Ω）；S 为接地网的总面积（m^2）；d 为水平接地极的直径或等效直径（m）；h 为水平接地极的埋设深度（m）；L_0 为接地网的外缘边线总长度（m）；L 为水平接地极的总长度（m）。

注：相关参数计算，L_0 为接地网的外缘边线总长度；L 为水平接地极的总长度，要根据接地网的不同形状计算。

12-40：在某市 110/10kV 变电所，主变压器 110kV 中性点直接接地，10kV 系统经消弧线圈接地；变电所所在场地土壤为均匀土壤，土壤电阻率为 1000Ω·m，变电所场地内敷设以水平接地为主边缘闭合的人工复合接地网，接地网如图 12-12 所示，采用简易计算式计算接地网的接地电阻值，其值最接近的是下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）5Ω　（B）10Ω　（C）20Ω　（D）30Ω

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1420 页。

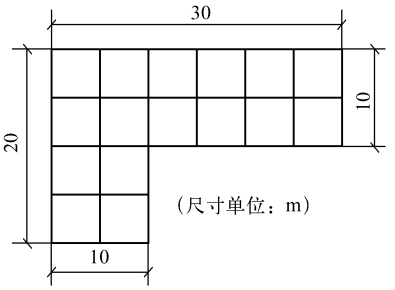
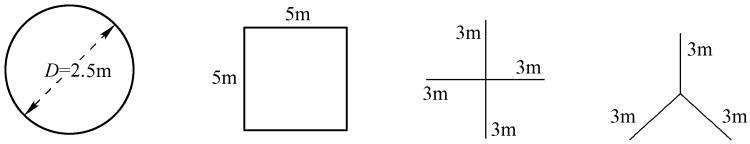


图 12-12　接地网示意图

接地网的接地电阻值为

$$R\approx\frac{\sqrt{\pi}}{4}\times\frac{\rho}{\sqrt{S}}+\frac{\rho}{L}=\left(\frac{\sqrt{\pi}}{4}\times\frac{1000}{\sqrt{30\times10+10\times10}}+\frac{1000}{21\times10}\right)\Omega=26.92\,\Omega$$

12-41：假设变电站站内避雷针的独立接地装置采用水平接地极，水平接地极采用直径为 10mm 的圆钢，埋深 0.8m，土壤电阻率为 100Ω·m，要求接地电阻不大于 10Ω。当接地装置采用下列哪种形式时，能满足接地电阻不大于 10Ω 的要求？



答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1419 页。

接地装置接地电阻值：

圆形水平接地极：$L=\pi d=78.5\,\text{m}$，$A=0.48$。

$$R_{\text{h}}=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)=\frac{100}{2\times3.14\times7.85}\left(\ln\frac{7.85^2}{0.8\times0.01}+0.48\right)\Omega=19\,\Omega$$

正方形水平接地极：$L=4d=20\,\text{m}$，$A=1$。

$$R_{\text{h}}=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)=\frac{100}{2\times3.14\times20}\left(\ln\frac{20^2}{0.8\times0.01}+1\right)\Omega=9.4\,\Omega$$

十字形水平接地极：$L=4d=12\,\text{m}$，$A=0.89$。

$$R_{\text{h}}=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)=\frac{100}{2\times3.14\times12}\left(\ln\frac{12^2}{0.8\times0.01}+0.89\right)\Omega=14.1\,\Omega$$

星形水平接地极：$L=3d=9\,\text{m}$，$A=0$。

$$R_{\text{h}}=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)=\frac{100}{2\times3.14\times9}\left(\ln\frac{9^2}{0.8\times0.01}+0\right)\Omega=16.3\,\Omega$$

【知识点解析】

均匀土壤中不同形状水平接地极的接地电阻，可按下式计算：

$$R_h=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A\right)$$

式中，R_h 为水平接地极的接地电阻（Ω）；L 为水平接地极的总长度（m）；h 为水平接地极的埋设深度（m）；d 为水平接地极的直径或等效直径（m）；A 为水平接地极的形状系数，可按表 12-13 的规定采用。

表 12-13　水平接地极的形状系数

水平接地极形状	—	L	人	○	+	□	六	米	星	星
形状系数 A	-0.6	-0.18	0	0.48	0.89	1	2.19	3.03	4.71	5.65

例题 12-42：若某水电站站内接地网采用水平接地极，接地网面积为 200 m²，水平接地极采用直径为 10 mm 的圆钢，埋深 0.5 m，因站内土壤电阻率 $\rho_1=2000\ \Omega\cdot m$ 过高，接地电阻接地电阻不符合要求，故将一半接地网安装在水下，如图 12-13 所示，水下电阻土壤电阻率 $\rho_2=20\ \Omega\cdot m$。接地网的接地电阻值最接近的是下列哪一项？

（A）1 Ω　（B）1.5 Ω　（C）4 Ω　（D）10 Ω

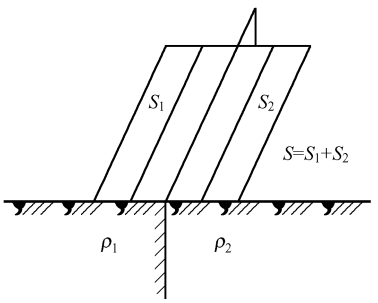


图 12-13　接地网示意图

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1424 页。

接地网的接地电阻值：

$$R\approx\frac{0.5\rho_1\rho_2\sqrt{S}}{\rho_1S_2+\rho_2S_1}=\frac{0.5\times2000\times20\sqrt{200}}{2000\times100+20\times100}\Omega=1.4\ \Omega$$ 最接近于 1.5 Ω

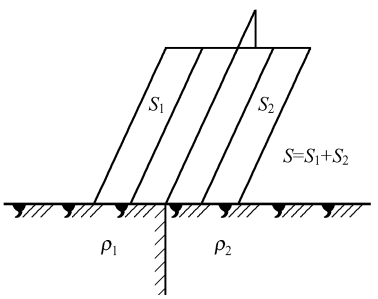


图 12-14　两种土壤电阻率的接地网

【知识点解析】

土壤具有图 12-14 所示的两个剖面结构时，水平接地网的接地电阻 R 为

$$R=\frac{0.5\rho_1\rho_2\sqrt{S}}{\rho_1S_2+\rho_2S_1}$$

式中，S_1、S_2 为覆盖在 ρ_1、ρ_2 土壤电阻率上的接地网面积（m²）；S 为接地网总面积（m²）。

例题 12-43：假定某垂直接地极所处的场地为双层土壤，如图 12-15 所示，上层土壤电阻率为 $\rho_1=70\ \Omega\cdot m$，土壤深度为 0～-3 m，下层土壤电阻率为 $\rho_2=100\ \Omega\cdot m$，土壤深度为-3～-5 m；垂直接地极长 3 m，顶端埋设深度为-1 m，等效土壤电阻率最接近下列哪项数值？

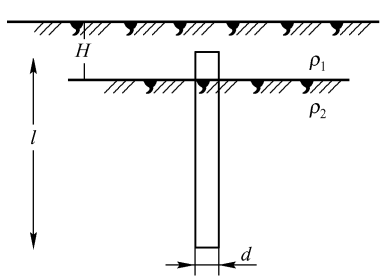


图 12-15　双层土壤的接地网

（A）70Ω·m　　（B）75Ω·m

（C）85Ω·m　　（D）100Ω·m

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB 50065—2011 附录 A 或《工业及民用供配电设计手册》第四版第 1424 页。

垂直接地极长度为 3m，上层土壤深度为 3m，等效土壤电阻率为

$$\rho_{12}=\frac{\rho_1\rho_2}{\frac{H}{l}(\rho_2-\rho_1)+\rho_1}=\frac{70\times100}{\frac{3}{3}\times(100-70)+70}\Omega\cdot m=70\Omega\cdot m$$

【知识点解析】

典型双层土壤中几种接地装置的接地参数，可按下列公式计算。

深埋垂直接地极的接地电阻（图 12-16）：

$$R=\frac{\rho_a}{2\pi l}\left(\ln\frac{4l}{d}+C\right)$$

$l<H$ 时　　$\rho_a=\rho_1$

$l>H$ 时　　$\rho_a=\dfrac{\rho_1\rho_2}{\frac{H}{l}(\rho_2-\rho_1)+\rho_1}$

$$C=\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1}\right)^n\ln\frac{2nH+l}{2(n-1)H+l}$$

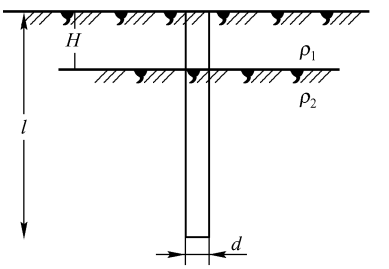


图 12-16　深埋接地体示意图

例题 12-44：若某变电站站内接地网采用水平接地极，接地网面积为 200m²，水平接地极采用直径为 10mm 的圆钢，埋深 0.5m。由于站内土壤较为潮湿，土壤电阻率未知，采用四极法测量如图 12-17 所示，测量探头极间距 a 为 2m。现已知本次测得的电阻值为 20Ω，则站内接地网用于雷电保护时采用的土壤电阻率下列哪一项符合要求？写出依据。

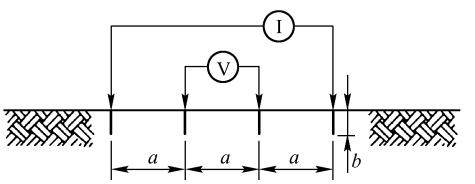


图 12-17　四极法测量示意图

（A）200Ω·m　　（B）250Ω·m　　（C）400Ω·m　　（D）500Ω·m

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 第 4.1.1 条。

测量的接地网的土壤电阻率为

$$\rho_a\approx2\pi aR=2\pi\times2\times20\Omega\cdot m=251.2\Omega\cdot m$$

接地网用于雷电保护时应考虑土壤干燥时的季节系数，查表 12-12 季节系数为 1.4~1.8，采用的土壤电阻率为

$$\rho\approx\rho_0\varphi=251.2\times(1.4\sim1.8)\Omega\cdot m=351.68\sim452.16\Omega\cdot m$$，C 符合要求

【知识点解析】

目前，我国接地电阻测量中国家标准推荐采用的土壤电阻率测量方法是四极法，一般采用等测量间距的温纳（Wenner）四极法，如图 12-17 所示。四个测量电极沿着一条直线被打进土壤中，相隔等距离 a，打入深度为 b。然后测量两个中间电极（电极）之间的电压，用它除以两个外侧的电流极之间的电流就给出一个电阻值 R。

视在土壤电阻率可以由测量得到的电阻值和极间距换算得到：

$$\rho_a=\frac{4\pi aR}{1+\dfrac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}-\dfrac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}}} \tag{12-3}$$

式中，ρ_a 为土壤的视在电阻率；R 为测量到的电阻；a 为相邻测试电极之间的距离；b 为测量电极打入地中的深度。

如果 b 远小于 a，即在探头仅仅穿透地面一小段距离时，式（12-3）可简化为

$$\rho_a=2\pi aR \tag{12-4}$$

例题 12-45~12-50：某企业变电站拟新建一条 35 kV 架空线路，当考虑不同设施时，请解答下列问题。

12-45：图 12-18 为某钢筋混凝土电杆环形水平接地装置的示意图，已知水平接地极采用 50×5 mm² 的扁钢，埋深 $h=0.8$ m，土壤电阻率为 500 Ω·m，$L_1=4$ m，$L_2=2$ m，该装置工频接地电阻最接近下列哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）48 Ω　　（B）52 Ω　　（C）57 Ω　　（D）90 Ω

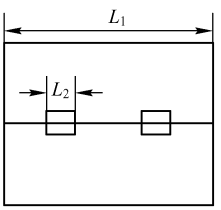


图 12-18　环形水平接地装置示意图

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1420 页。

杆塔水平接地装置工频接地电阻：

$$L=4L_1=4\times4\text{ m}=16\text{ m}$$

$$A_t=1.0$$

$$d=b/2=50/2\text{ mm}=25\text{ mm}=0.025\text{ m}$$

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A_t\right)=\frac{500}{2\times16\pi}\left(\ln\frac{16^2}{0.8\times0.025}+1\right)\Omega=4.9736\times(9.4572+1)\Omega=52\ \Omega$$

12-46：图 12-19 为某架空线路钢筋混凝土电杆放射形水平接地装置的示意图，已知水平接地极采用 50×5 mm² 的扁钢，埋深 $h=0.8$ m，土壤电阻率为 500 Ω·m，$L_1=L_2=3$ m，该装置工频接地电阻最接近下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

（A）55 Ω　　（B）57 Ω　　（C）60 Ω　　（D）126 Ω

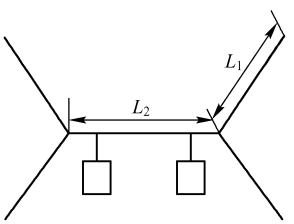


图 12-19　放射形水平接地装置示意图

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1420 页。

杆塔水平接地装置工频接地电阻：

$$L=4L_1+L_2=4\times3+3\ \text{m}=15\ \text{m}$$

$$A_t=2.0$$

$$d=b/2=50/2\ \text{mm}=25\ \text{mm}=0.025\ \text{m}$$

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A_t\right)=\frac{500}{2\times15\pi}\left(\ln\frac{15^2}{0.8\times0.025}+2\right)\Omega=60.1\ \Omega$$

12-47：图 12-20 为某架空线路钢筋混凝土电杆放射形水平接地装置的示意图，已知水平接地极采用 50×5 mm²的扁钢，埋深 $h=0.8$ m，土壤电阻率为 500 Ω·m，$L_1=L_2=2$ m，该装置工频接地电阻最接近下列哪项数值？（供配电 2010 年考题）

（A）10 Ω　　（B）30 Ω　　（C）55 Ω　　（D）100 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1420 页。

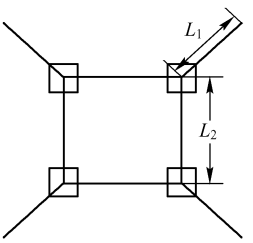


图 12-20　放射形水平接地装置示意图

杆塔水平接地装置工频接地电阻：

$$L=4(L_1+L_2)=4\times(2+2)\ \text{m}=16\ \text{m}$$

$$A_t=1.76$$

$$d=b/2=50/2\ \text{mm}=25\ \text{mm}=0.025\ \text{m}$$

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A_t\right)=\frac{500}{2\times16\pi}\left(\ln\frac{16^2}{0.8\times0.025}+1.76\right)\Omega=55\ \Omega$$

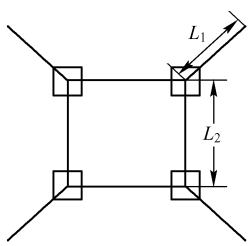
【知识点解析】

杆塔水平接地装置的工频接地电阻可按下式计算：

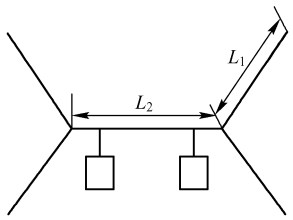
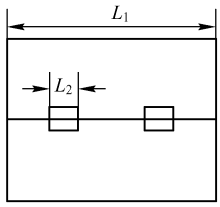
$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{hd}+A_t\right)$$

式中，A_t 和 L 的意义及取值见表 12-14；h 为水平接地极的埋设深度（m）；d 为水平接地极的直径或等效直径（m）；ρ 为土壤电阻率。

表 12-14　A_t 和 L 的意义与取值

接地装置种类	形　状	参　数
铁塔接地装置		$A_t=1.76$ $L=4(L_1+L_2)$

（续）

接地装置种类	形　　状	参　　数
钢筋混凝土杆放射形接地装置		$A_t=2.0$ $L=4L_1+L_2$
钢筋混凝土杆环形接地装置		$A_t=1.0$ $L=8L_2$（当 $L_1=0$ 时） $L=4L_1$（当 $L\neq0$ 时） $L=4L_1$

12-48：架空线路杆塔的接地装置由较多水平接地极或垂直接地极组成时，垂直接地极的间距及水平接地极的间距应符合下列哪一规定？（供配电 2011 年考题）

（A）垂直接地极的间距不应大于其长度的两倍；水平接地极的间距不宜大于 5 m

（B）垂直接地极的间距不应小于其长度的两倍；水平接地极的间距不宜大于 5 m

（C）垂直接地极的间距不应大于其长度的两倍；水平接地极的间距不宜小于 5 m

（D）垂直接地极的间距不应小于其长度的两倍；水平接地极的间距不宜小于 5 m

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 第 5.1.8 条。

12-49：若架空线路其中一个钢筋混凝土电杆接地装置采用 3 根等长度的水平放射形接地极组成，水平接地极采用 40×4 mm^2的扁钢，长度为 10 m，埋深 $h=0.5$ m。已知单根水平接地极工频接地电阻为 13.9 Ω，使用冲击利用系数法计算该装置工频接地电阻，其值最接近下列哪项数值？

（A）1 Ω　　（B）3 Ω　　（C）5.15 Ω　　（D）8.4 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011。

单根水平接地极工频接地电阻 $R_{hi}=13.9\ \Omega$，根数 $n=3$，查附录 F 第 F.0.4 条工频利用系数取 0.9，使用冲击利用系数法计算杆塔水平接地装置工频接地电阻为

$$R_i=\frac{R_{hi}}{n}\frac{1}{\eta_i}=\frac{13.9}{3}\times\frac{1}{0.9}\ \Omega=5.15\ \Omega$$

12-50：架空线路其中一个钢筋混凝土电杆接地装置如图 12-21 所示，已知接地装置由单根水平接地极连接的 $n=3$ 根垂直接地极组成、土壤电阻率 $\rho=100\ \Omega\cdot m$；垂直接地极为 50×50×5 mm^3 的角钢，每根长度 2.5 m，间距 5 m；水平接地极为 40×4 mm^2 的扁钢，计算长度 10 m；单根垂直接地极工频接地电阻为 32 Ω、水平接地极工频接地电阻为 14 Ω。该接地装置的冲击利用系数为 0.7，垂直接地极冲击系数为 0.65，水平接地极的冲击系数为 0.7。

使用冲击利用系数法计算该装置冲击接地电阻，其值最接近下列哪项数值？

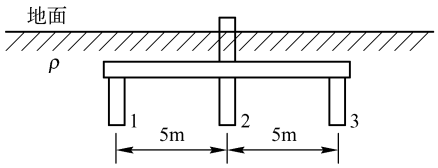


图 12-21　接地装置示意图

（A）3.5Ω　　（B）5.8Ω　　（C）6.9Ω　　（D）8.4Ω

答案：【B】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011 或《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1427 页。

单根垂直接地极和单根水平接地极冲击接地电阻分别为

$$R_{vi}=\alpha R_v=0.65\times 32\,\Omega=20.8\,\Omega$$

$$R'_{hi}=\alpha R_h=0.7\times 14\,\Omega=9.8\,\Omega$$

该接地装置的冲击利用系数为 0.7，使用冲击利用系数法计算冲击接地电阻为

$$R_i=\frac{\frac{R_{vi}}{n}R'_{hi}}{\frac{R_{vi}}{n}+R'_{hi}}\cdot\frac{1}{\eta_i}=\frac{\frac{20.8}{3}\times 9.8}{\frac{20.8}{3}+9.8}\times\frac{1}{0.7}\,\Omega=5.8\,\Omega$$

【知识点解析】

单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻，可按下式计算：

$$R_i=\alpha R$$

式中，R_i 为单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻（Ω）；R 为单独接地极或杆塔接地装置的工频接地电阻（Ω）；α 为单独接地极或杆塔接地装置的冲击系数。

1）当接地装置由较多水平接地极或垂直接地极组成时，垂直接地极的间距应不小于其长度的 2 倍；水平接地极的间距不宜小于 5m。

由 n 根等长水平放射形接地极组成的接地装置，其冲击接地电阻可按下式计算：

$$R_i=\frac{R_{hi}}{n}\frac{1}{\eta_i}$$

式中，R_{hi} 为每根水平放射形接地极的冲击接地电阻（Ω）；η_i 为计及各接地极间相互影响的冲击利用系数。

2）由水平接地极连接的 n 根垂直接地极组成的接地装置，其冲击接地电阻可按下式计算：

$$R_i=\frac{\frac{R_{vi}}{n}R'_{hi}}{\frac{R_{vi}}{n}+R'_{hi}}\cdot\frac{1}{\eta_i}$$

式中，R_{vi} 为每根垂直接地极的冲击接地电阻（Ω）；R'_{hi} 为水平接地极的冲击接地电阻（Ω）。

3）各种形式接地极的冲击利用系数 η_i 可采用表 12-15 的数值。工频利用系数可取为 0.9。自然接地极，工频利用系数取为 0.7。

表 12-15　接地极的冲击利用系数 η_i

接地极形式	接地导体（线）的根数	冲击利用系数	备　　注
n 根水平射线（每根长 10~80 m）	2 3 4~6	0.83~1.00 0.75~0.90 0.65~0.80	较小值用于较短的射线
以水平接地极连接的垂直接地极	2 3 4 6	0.80~0.85 0.70~0.80 0.70~0.75 0.65~0.70	$\frac{D(\text{垂直接地极间距})}{l(\text{垂直接地极长度})}=2\sim3$ 较小值用于 $\frac{D}{l}=2$ 时
自然接地极	拉线棒与拉线盘间 铁塔的各基础间门型、各种拉线杆塔的各基础间	0.6 0.4~0.5 0.7	—

12.6　其他环境接地

【知识点说明】

由于电气技术领域各种接地要求种类繁多，每个行业和场所都有对应规范接地要求，考试中常见的考点有：

1）交流电气装置过电压的接地要求依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 和《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章。

2）爆炸危险环境的接地要求依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014。

3）建筑物防雷接地依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 和《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 13 章。

4）防静电接地要求依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014 和《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）的 14.8 节。

5）信息技术装置接地依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008 和《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）的 14.7 节等相关信息技术规范的接地部分。

依据书目：

《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014

《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010

《建筑物电子信息系统防雷技术规范 》GB 50343—2012

《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006

《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007 等相关规范的接地部分

例题 12-51：在火灾和爆炸危险厂房中低压配电系统接地要求中哪一条错误？

（A）爆炸性环境中的 TN 系统应采用 TN-S 型

（B）爆炸性环境中的 TN 系统应采用 TN-C 型

（C）危险区中的 TT 型电源系统应采用剩余电流动作的保护电器

（D）爆炸性环境中的 IT 型电源系统，应设置绝缘监测装置

答案：【B】

解答过程：依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014 第 5.5.1 条。

【知识点解析】

火灾和爆炸危险 1000 V 交流/1500 V 直流以下的电源系统的接地必须满足下列要求：

1）TN 系统：爆炸性环境中的 TN 系统应采用 TN-S 型。

2）TT 系统：危险区中的 TT 型电源系统应采用剩余电流动作的保护电器。

3）IT 系统：爆炸性环境中的 IT 型电源系统，应设置绝缘监测装置。

例题 12-52：关于静电保护基本防护要求中，下列哪些叙述是不正确的？

（A）每组专设的静电接地体的接地电阻值一般不应大于 100 Ω

（B）非金属静电导体或静电亚导体与金属导体相互连接时紧密接触的面积应大于 20 cm^2

（C）防静电接地线可利用电源保护线与防直击雷地线共用

（D）振动和频繁移动的器件上用的接地导体禁止用单股线及金属链，应采用 6 mm^2 以上的裸绞线或编织线

答案：【C】

解答过程：依据《防止静电事故通用导则》GB 12158—2006。

第 6.1.2 条，A 对；第 6.1.10 条，B 对；第 6.2.3 条，C 错；第 6.2.6 条，D 对。

【知识点解析】

1）静电导体与大地间的总泄漏电阻值在通常情况下均不应大于 1×106 Ω。每组专设的静电接地体的接地电阻值一般不应大于 100 Ω，在山区等土壤电阻率较高的地区，其接地电阻值也不应大于 1000 Ω。

2）使用静电消除器迅速中和静电。

静电消除器是利用外部设备或装置产生需要的正或负电荷以消除带电体上的电荷。

静电消除器原则上应安装在带电体接近最高电位的部位。

消除属于静电非导体物料的静电，应根据现场情况采用不同类型的静电消除器。

静电危险场所要使用防爆型静电消除器。

3）防静电接地线不得利用电源零线、不得与防直击雷地线共用。

4）在振动和频繁移动的器件上用的接地导体禁止用单股线及金属链，应采用 6 mm^2 以上的裸绞线或编织线。

例题 12-53：机房内设备最高频率为 2500 MHz，等电位采用 SM 混合型，设等电位联结

网格，网格四周设等电位联结带时，对高频信号设备接地设计应采用下列哪项措施符合规范要求？

（A）采用悬浮不接地

（B）避免接地导体长度为干扰频率波的 1/4λ 或奇数倍

（C）采用 2 根相同长度的接地导体就近与等电位联结网络连接

（D）采用 1 根接地导体汇聚连接至接地汇流排一点接地

答案：【B】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 12.7.2 条　电子计算机的信号系统，不宜采用悬浮接地，A 错。

第 12.7.1 条　接地系统的接地导体长度不得等于 λ/4 或 λ/4 的奇数倍，B 对。

依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

第 8.4.5 条　每台电子信息设备（机柜）应采用两根不同长度的等电位联结导体就近与等电位联结网格连接，C 错。

条文说明第 8.4.4 条　具体做法为设置一个等电位联结网格，以满足高频信号接地的要求；再以单点接地方式连接到同一接地装置，以满足低频信号接地要求，D 错。

【知识点解析】

电子设备接地系统应符合下列规定：

1）电子信息设备有两个接地，一个是为电气安全而设置的保护接地，另一个是为实现其功能性而设置的信号接地。在 TN-S 系统中，设备外壳的保护接地和信号接地是通过连接 PE 线实现接地的。

S 型（星形结构、单点接地）等电位联结方式适用于易受干扰的、频率在 0～30 kHz（也可高至 300 kHz）的电子信息设备的信号接地。从配电箱 PE 母排放射引出的 PE 线兼作设备的信号接地线，同时实现保护接地和信号接地。对于 C 级电子信息系统机房中规模较小（建筑面积 100 m^2 以下）的机房，电子信息设备可以采用 S 型等电位联结方式。

M 型（网形结构、多点接地）等电位联结方式适用于易受干扰的、频率大于 300 kHz（也可低至 30 kHz）的电子信息设备的信号接地。电子信息设备除连接 PE 线作为保护接地外，还采用两条（或多条）不同长度的导线，尽量短直地与设备下方的等电位联结网格连接，大多数电子信息设备应采用此方案实现保护接地和信号接地。

SM 混合型等电位联结方式是单点接地和多点接地的组合，可以同时满足高频和低频信号接地的要求。具体做法为设置一个等电位联结网格，以满足高频信号接地的要求；再以单点接地方式连接到同一接地装置，以满足低频信号接地要求。

2）采用 M 型或 SM 型等电位联结方式时，主机房应设置等电位联结网格，网格四周应设置等电位联结带，并应通过等电位联结导体将等电位联结带就近与接地汇流排、各类金属管道、金属线槽、建筑物金属结构等进行连接。每台电子信息设备（机柜）应采用两根不同长度的等电位联结导体就近与等电位联结网格连接。

3）接地系统的接地导体长度不得等于 λ/4 或 λ/4 的奇数倍。

4）大、中型电子计算机接地系统应符合下列规定：电子计算机应同时具有信号电路接地、交流电源功能接地和安全保护接地三种接地系统；该三种接地的接地电阻值均不宜大于 4 Ω。电子计算机的信号系统，不宜采用悬浮接地。

例题 12-54：某 110 kV 变电站土壤电阻率 $\rho=300\ \Omega\cdot m$，设置独立避雷针作为直接防雷保护装置，该装置接地电阻不宜大于下列哪项数值？

（A）10 Ω　　（B）15 Ω　　（C）20 Ω　　（D）30 Ω

答案：【A】

解答过程：依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014。

第 5.4.6 条　在非高土壤电阻率地区，接地电阻不宜超过 10 Ω，选 A。

【知识点解析】

独立避雷针的接地装置应符合下列要求：

1）独立避雷针宜设独立的接地装置。

2）在非高土壤电阻率地区，接地电阻不宜超过 10 Ω。

3）该接地装置可与主接地网连接，避雷针与主接地网的地下连接点至 35 kV 及以下设备与主接地网的地下连接点之间，沿接地极的长度不得小于 15 m。

4）独立避雷针不应设在人经常通行的地方，避雷针及其接地装置与道路或出入口的距离不宜小于 3 m，否则应采取均压措施或铺设砾石或沥青地面。

例题 12-55：某 110 kV 变电站中接地设计的原则中，哪些表述中是不正确的？

（A）配电装置构架上避雷针的接地引下线应与接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。引下线与接地网的连接点至变压器接地导体（线）与接地网连接点之间沿接地极的长度，不应小于 15 m

（B）悬挂避雷线架构的接地引下线应与接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。引下线与接地网的连接点至变压器接地导体（线）与接地网连接点之间沿接地极的长度，不应小于 15 m

（C）独立避雷针的接地装置设独立的接地装置，该接地装置可与主接地网连接，避雷针与主接地网的地下连接点至 35 kV 及以下设备与主接地网的地下连接点之间，沿接地极的长度不得小于 15 m

（D）独立避雷针不应设在人经常通行的地方，避雷针及其接地装置与道路或出入口的距离不宜小于 5 m，否则应采取均压措施或铺设砾石或沥青地面

答案：【D】

解答过程：依据《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011。

第 4.5.1 条，A、B 对。

依据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB 50064—2014。

第 5.4.6 条　独立避雷针不应设在人经常通行的地方，避雷针及其接地装置与道路或出入口的距离不宜小于 3 m，否则应采取均压措施或铺设砾石或沥青地面，C 对，D 错。

【知识点解析】

发电厂和变电站配电装置构架上避雷针（含悬挂避雷线的架构）的接地引下线应与接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。引下线与接地网的连接点至变压器接地导体（线）与接地网连接点之间沿接地极的长度，不应小于 15 m。

第 13 章　照　　明

【知识点导图】

图 13-1 所示的照明知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点，由于《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 的更新，对应的照度标准值和照明功率密度限制以及部分条文有了较大的变化。其中必考点照度计算有点、线、面光源和投光灯照度计算，一般会结合各种环境模式给出案例题目，核心考点的平均照度计算分类很细，包含室空间比（室形指数）、有效空间反射比、墙面平均反射比、利用系数选用、平均照度计算及照明功率密度计算。

由于《照明设计手册》已更新到第三版，本章中按照《照明设计手册》第三版进行解答。

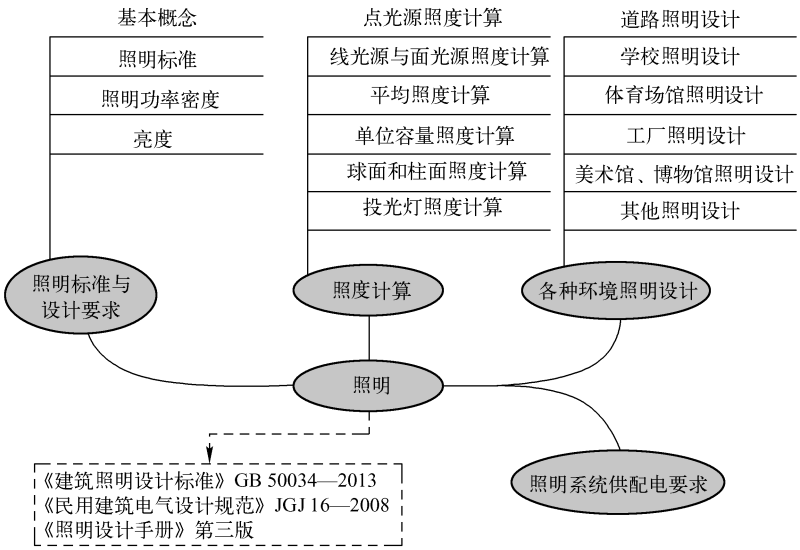


图 13-1　照明知识点导图

13.1　照明标准与设计要求

【知识点说明】

1）《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 部分内容做出了修订，修改了原标准规定的照明功率密度限值；更严格地限制了白炽灯的使用范围；增加了 LED 应用于室内照明的技术要求；补充了科技馆、美术馆、金融建筑、宿舍、老年住宅和公寓等场所的照明标准值等。《照明设计手册》第三版中的重叠内容如有不同应遵守 GB 50034—2013。

2）《照明设计手册》第三版中详细地写明了各种计算方法及照明设计全套知识，但是基础知识介绍不足，《电气照明技术》（孙建民主编）一书可作为电气照明技术的基础理论、

照明设备、照明计算、照明设计等基础知识的补充。

依据书目：

《建筑照明设计标准》GB 50034—2013

《照明设计手册》第三版

参考书目：

《建筑照明术语标准》JGJ/T 119—2008

《电气照明技术》孙建民主编

例题 13-1：某办公室室内面积为 99.4 m^2，有平吊顶，高度为 3.1 m，灯具嵌入顶棚安装，为满足工作面照度为 500 lx，经计算均匀布置 14 套嵌入式 3×28 W 格栅荧光灯具，单只 28 W 荧光灯管配的电子整流器功耗为 4 W，T5 荧光灯管 28 W 光通量为 2660 lm，格栅灯具效率为 0.64，维护系数为 0.8，该办公室的照明功率密度值为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）9.7 W/m^2　　（B）11.8 W/m^2　　（C）13.5 W/m^2　　（D）16 W/m^2

答案：【C】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 第 2.0.53 条。

该办公室的照明功率密度值为

$$LPD=\frac{P}{A_0}=\frac{14\times3\times(28+4)}{99.4}\ \mathrm{W/m^2}=13.52\ \mathrm{W/m^2}$$

例题 13-2：某会议室面积为 100 m^2，维修中采用 9 套嵌入式 3×28 W 格栅荧光灯具，用 T5 直管荧光灯配电子镇流器，格栅灯具效率为 0.64，每支 T5 灯管配电子镇流器，每个电子镇流器损耗为 4 W；维修中还采用 4 套装饰性灯具，每套装饰性灯具采用 2 支输入功率为 18 W 的紧凑型荧光灯，该会议室的照明功率密度为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）8.28 W/m^2　　（B）8.64 W/m^2　　（C）9.36 W/m^2　　（D）10.08 W/m^2

答案：【C】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

条文说明第 6.3.16 条　装饰性灯具总功率按照其的 50% 计入 *LPD* 值：

$$LPD=\frac{P+0.5P_z}{A_0}=\frac{9\times3\times(28+4)+0.5\times4\times2\times18}{100}\ \mathrm{W/m^2}=9.36\ \mathrm{W/m^2}$$

例题 13-3：某培训活动中心工程，健身房的面积为 500 m^2，灯具数量及参数统计见表 13-1，灯具额定电压均为 AC220 V，计算健身房 LPD 值应为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

表 13-1　灯具功率统计表

序　号	灯具名称	数　量	光源功率	输入电流	功率因数	用　途
1	荧光灯	48 套	2×28 W/套	0.29 A/套	0.98	一般照明
2	筒灯	16 套	1×18 W/套	0.09 A/套	0.98	一般照明
3	线型 LED	50 m	5 W/m	0.05 A/m	0.56	暗槽装饰灯
4	天棚造景	100 m^2	10 W/m^2	0.1 A/m^2	0.56	装饰灯
5	艺术吊灯	1 套	2×28 W/套	0.4 A/套	0.56	装饰灯
6	枝型花灯	10 套	2×28 W/套	0.03 A/套	0.56	装饰灯
7	壁灯	15 套	2×28 W/套	0.03 A/套	0.56	装饰灯

（A）7.9 W/m^2　　（B）8.3 W/m^2　　（C）9.5 W/m^2　　（D）10 W/m^2

答案：【B】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

实际输入功率（包含镇流器）计算统计表见表 13-2。

表 13-2　实际输入功率计算统计表

序　　号	灯具名称	数　　量	实际输入功率/W
1	荧光灯	48 套	3001.15
2	筒灯	16 套	310.46
3	线型 LED	50 m	308
4	天棚造景	100 m^2	1232
5	艺术吊灯	1 套	49.28
6	枝型花灯	10 套	36.96
7	壁灯	15 套	55.44

条文说明第 6.3.16 条，装饰性灯具总功率按照其 50% 计入 LPD 值，总 LPD 计算如下：

$$LPD=\frac{P+0.5P_z}{A_0}=\frac{(3001.15+310.46)+(308+1232+49.28+36.96+55.44)/2}{500}\text{ W/m}^2=8.3\text{ W/m}^2$$

【知识点解析】

1）照明功率密度：单位面积上一般照明的安装功率（包括光源、镇流器或变压器等附属用电器件）。

$$LPD=\frac{\sum(P_L+P_0)}{A}$$

式中，P_L为光源功率（W）；P_0为镇流器或变压器功耗（W）；A 为房间或场所面积（mm^2）。

2）当房间或场所的室形指数值等于或小于 1 时，其照明功率密度限值应增加，但增加值不应超过限值的 20%。

3）当房间或场所的照度标准值提高或降低一级时，其照明功率密度限值应按比例提高或折减。

4）设装饰性灯具场所，可将实际采用的装饰性灯具总功率的 50%计入照明功率密度值的计算。

5）应在满足规定的照度和照明质量要求的前提下，进行照明节能评价。

6）照明节能应采用一般照明的照明功率密度值（*LPD*）作为评价指标。

例题 13-4~13-6：某医院外科手术室的面积为 30 m，院方要求手术室一般照明与室内医疗设备均为一级负荷，一般照明平均照度按 1000 lx 设计，医疗设备采用专用电源配电盘，与一般照明、空调、电力负荷电源分开，请回答下列照明设计相关问题。

13-4：手术室设计一般照明灯具安装总功率为 1000 W（含镇流器功耗 125 W），手术无影灯功率为 450 W，计算照明功率密度值（*LPD*），并判断下列哪项结果正确。（供配电 2007 年考题）

（A）*LPD* 约为 29.2 W·m^2，低于国家标准规定

（B）*LPD* 约为 33.3 W·m^2，低于国家标准规定

（C）*LPD* 约为 33.3 W·m^2，高于国家标准规定

（D）*LPD* 约为 48.3 W·m^2，高于国家标准规定

答案：【B】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

第 2.0.53 条，第 6.1.2 条　手术无影灯不在功率密度限制要求中，手术室照明的一般照明的照明功率密度（*LPD*）：$LPD=\frac{1000}{30}\text{W}/\text{m}^2=33.33\text{W}/\text{m}^2$。

第 6.3.15 条　当房间或场所的照度标准值提高或降低一级时，其照明功率密度限值应按比例提高或折减。医院手术室照度标准值为 750 lx，当折算到 1000 lx 时，《照明设计手册》第三版第 224 页（第二版第 534 页表 23-9）（GB 50034—2013 表 6.3.6 取消了医院手术室功率密度限值）中照明功率密度限值应按比例从 30 W·m^2提高到 40 W·m^2，$\frac{1000}{750}\times30\text{W}/\text{m}^2=40\text{W}/\text{m}^2$，低于规范照明功率密度限制要求。

13-5：解释说明手术室的 *UGR* 和 R_a按国家标准规定，应选择下列哪项。（供配电 2007 年考题）

（A）*UGR* 不大于 19，R_a不小于 90

（B）*UGR* 大于 19，R_a小于 90

（C）*UGR* 不大于 22，R_a大于 90

（D）无具体指标要求

答案：【A】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

第 5.3.6 条及表 5.3.6　医院手术室的 *UGR* 不大于 19，R_a不小于 90，照度标准值为 750 lx。

【知识点解析】

1）统一眩光值 *UGR*：国际照明委员会（CIE）用于度量处于室内视觉环境中的照明装置发出的光对人眼引起不舒适感主观反应的心理参量，具体取值见表 13-3。

表 13-3　*UGR* 值对应的不舒适眩光的主观感受

UGR 值	不舒适眩光的主观感受	*UGR* 值	不舒适眩光的主观感受
28	严重眩光，不能忍受	16	轻微眩光，可忽略
25	有眩光，有不舒适感	13	极轻微眩光，无不舒适感
22	有眩光，刚刚有不舒适感	10	无眩光
19	轻微眩光，可忍受		

2）一般显色指数 R_a：光源对国际照明委员会（CIE）规定的第 1~8 种标准颜色样品显色指数的平均值，通称显色指数。长期工作或停留的房间或场所，照明光源的显色指数（R_a）不应小于 80。在灯具安装高度大于 8 m 的工业建筑场所，R_a可低于 80，但必须能够辨别安全色。

13-6：手术室手术台备用照明设计最佳照度应为下列哪一项？（供配电 2007 年考题）

（A）50 lx　　（B）100 lx　　（C）500 lx　　（D）1000 lx

答案：【D】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

第 5.5.2 条　备用照明的照度标准值规定：医院手术室、急诊抢救室、重症监护室等应维持正常照明的照度；题目已知正常照明平均照度按 1000 lx 设计，备用照明设计最佳照度应为 1000 lx。

例题 13-7：若某工厂的精密焊接车间，因某产品需要更精细操作增加局部照明，据相关规范的要求，此局部照明的最大设计照度标准值为多少？

（A）500 lx　　（B）750 lx　　（C）1000 lx　　（D）1500 lx

答案：【B】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

查表 5.4.1 中精密焊接车间照度标准值为 300 lx，表注需增加局部照明的作业面，增加的局部照明值宜按该场所一般照明照度值的 1.0～3.0 倍选取，局部照明的最大设计照度标准值为

$$E_{\text{local}}=(1\sim3)E_{\text{av}}=(1\sim3)\times300\ \text{lx}=300\sim900\ \text{lx}，取\ 750\ \text{lx}$$

例题 13-8～13-10：某工厂的一个办公室吊顶高 3.8 m，采用格栅式荧光灯灯具嵌入顶棚，灯具内有 2 支 36 W 直管荧光灯，每支荧光灯光通量输出为 3250 lm，维护系数为 0.8，灯具的下端为出光口，其发光面积为 0.25×1.30 m^2，横向光源光强分布见表 13-4，请回答下列问题。

表 13-4　光源光强分布（1000 lm）

θ/(°)	0	30	45	55	60	90
I_θ/cd	230	201	218	160	90	1

13-8：该办公室的灯具照射如图 13-2 所示，则灯具发光面其横向在 45°方向上的投影面积为下列哪项？

（A）0.325 m^2　　（B）0.302 m^2

（C）0.256 m^2　　（D）0.23 m^2

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 82 页（第二版第 104 页）。

查表 3-18 中，该灯具属于暗侧面积灯具，其横向在 45°方向上的投影面积为

$$A_{\text{p}}=A_{\text{h}}\cos\theta=0.25\times1.3\times\cos45°\ m^2=0.23\ m^2$$

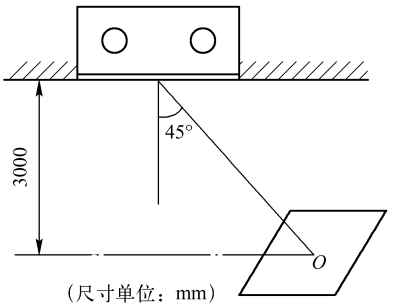


图 13-2　灯具照射图

13-9：该办公室的灯具照射如图 13-2 所示，则灯具发光面其横向在 45°方向上的平均亮度为下列哪项？

（A）3080 cd/m^2　　（B）2045 cd/m^2　　（C）1887 cd/m^2　　（D）1687 cd/m^2

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 82 页（第二版第 104 页）。

灯具横向在 45°方向上的平均亮度为

$$L_\theta=\frac{\Phi I_\theta}{1000A_p\cos\theta}=\frac{3250\times218}{1000\times0.23}\,\mathrm{cd/m^2}=3080\,\mathrm{cd/m^2}$$

【知识点解析】

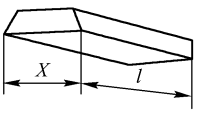
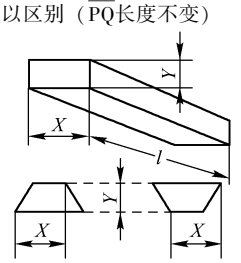
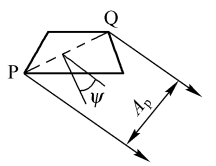
1）灯具的平均亮度 L_θ 可由下式计算：

$$L_\theta=\frac{I_\theta}{A_p\cos\theta}$$

式中，L_θ 为灯具在 θ 方向的发光强度（$\mathrm{cd/m^2}$）；A_p 为灯具发光面在 θ 方向的投影面积（$\mathrm{m^2}$）。

2）常用灯具的投影面积 A_p，见表 13-5。

表 13-5　灯具发光面投影面积计算方法

水平投影面积 A_h 和垂直投影面积 A_v	在 θ 方向的投影面积 A_p
暗侧面积暗端面（包括各类灯具） $A_h=Xl$ $A_v/A_h=0$ 	$A_p=A_h\cos\theta$
壳侧面、暗端面 侧面和底面可以区别（$\overline{PQ}$长度不变） 	 $A_p=\overline{PQ}l\cos\psi$ 用 A_h 和 A_v/A_h 计算，θ 在 40°~85°内，结果是准确的

13-10：若该办公室的只有一组灯具，一支荧光灯电子镇流器的功率为 4 W，镇流器流明系数值为 1.92，计算该办公室的镇流器能效因数 *BEF* 为下列哪一项数值。（供配电 2017 年考题改编）

（A）2.0　　（B）2.2　　（C）2.4　　（D）2.6

答案：【 C 】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 62 页（第二版第 78 页）。

镇流器能效因数 *BEF*：$BEF=\dfrac{\mu}{P}\times100=\dfrac{1.92}{2\times(36+4)}\times100=2.4$

13.2　点光源、线光源与面光源照度计算

【知识点说明】

1）点光源照度计算属于重要考点。要求熟练掌握距离平方反比定律与余弦定律在各个环境中的应用；掌握点光源照度应用直角坐标的计算，一般结合投光灯在广场、体育场、电视演播室等在三维场景的应用；掌握当被照面发生倾斜时对应水平面照度计算；熟练掌握多光源照度计算和光源光强分布表、照度曲线的应用。

2）线光源照度计算属于重要考点。要求熟练掌握连续线光源方位系数法照度计算和方位系数的应用，以及不连续线光源确定和修正系数计算；了解线光源在不同平面上的点照度计算。

3）面光源照度计算属于冷门考点。要求了解矩形等亮面光源水平面和倾斜面照度计算、面光源表面亮度计算。

依据书目：

《照明设计手册》第三版

参考书目：

《电气照明技术》孙建民主编

例题 13-11：若车间内局部采用 4 盏 400 W 金属卤化物灯进行照明，400 W 金属卤化物灯的光源光通量为 36000 lm，工作面高 0.75 m，灯具出口面到工作面的高度为 12 m，维护系数 $K=0.7$，光源光强分布（1000 lm）见表 13-6，灯具布置如图 13-3 所示，则工作面上 P 点的水平面照度为下列哪个数值？（不计反射光及其他灯具的影响。）（供配电 2016 年考题）

表 13-6　光源光强分布（1000 lm）

θ/(°)	0	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5
I_θ/cd	346.3	338.7	329.4	321.8	306.9	283.6	261.3	239.6
θ/(°)	42.5	47.5	52.5	57.5	62.5	67.5	72.5	77.5
I_θ/cd	219.6	197	170.8	108.8	54.2	34.8	22.2	13.3

（A）72 lx　　（B）140 lx

（C）157 lx　　（D）200 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 119 页、第 122 页（第二版第 188 页、第 191 页）。

S 点到 P 点的距离 $D=\sqrt{5.4^2+3^2}$ m = 6.18 m，$R=\sqrt{12^2+6.18^2}$ m = 13.5 m

计算照射角：$\cos\theta=\dfrac{12}{13.5}=0.889$，$\theta=27.24°$，查表 13-6 的光源光强（1000 lm），得 $I_\theta=283.6$ cd。

一个点光源的水平照度（1000 lm）为

$$E_h=\frac{I_\theta}{R^2}\cos\theta=\frac{283.6}{13.5^2}\times0.889\ \text{lx}=1.383\ \text{lx}$$

四个点光源的水平照度为

$$E_{Ph}=\frac{\Phi\Sigma\varepsilon K}{1000}=\frac{36000\times4\times1.383\times0.7}{1000}\ \text{lx}=139.44\ \text{lx}$$

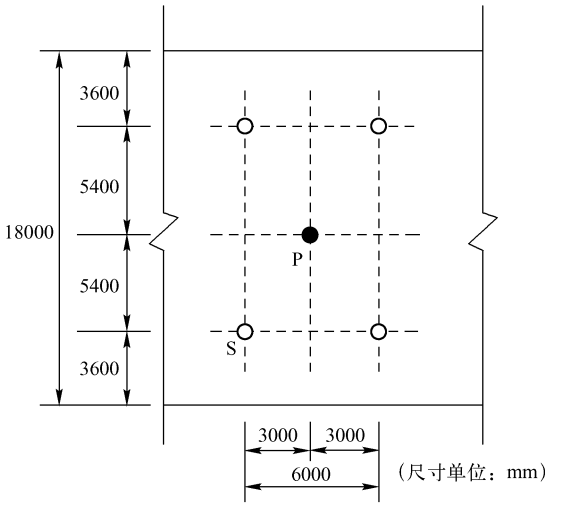


图 13-3　车间局部灯具布置方案图

【知识点解析】

（1）点光源水平面和垂直面照度的计算

1）点光源在水平面照度 E_h 的计算：按照余弦定律，点光源 S 水平面照度

$$E_h=\frac{I_\theta}{R^2}\cos\theta$$

2）点光源在垂直面照度 E_v 的计算：按照余弦定律，点光源 S 垂直面照度

$$E_v=\frac{I_\theta}{R^2}\cos\beta=\frac{I_\theta}{R^2}\sin\theta$$

3）E_h 和 E_v 应用光源安装高度 h 的计算：已知光源的安装高度（指计算高度）h 时，E_h 和 E_v 的计算式为

$$E_h=\frac{I_\theta}{R^2}\cos\theta=\frac{I_\theta\cos\theta}{\left(\frac{h}{\cos\theta}\right)^2}=\frac{I_\theta\cos^3\theta}{h^2}$$

$$E_v=\frac{I_\theta}{R^2}\sin\theta=\frac{I_\theta\sin\theta}{\left(\frac{h}{\cos\theta}\right)^2}=\frac{I_\theta\cos^2\theta\sin\theta}{h^2}$$

式中，h 为光源距所计算水平面的安装高度，即计算高度（m）；其他符号含义同上。

（2）查光源光强分布值表法

已知灯具类型和灯具的照射角 θ，可以在对应灯具的光源光强分布表 13-7 中查出光强。I_θ 为光源的光强分布值，则水平照度 E_h 可由下式算出：

$$E_h=\frac{I_\theta\cos^3\theta}{h^2}$$

表 13-7　某类型灯具的光源光强分布（1000 lm）

θ/(°)	0	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5
I_θ/cd	243.4	235.0	235.6	239.1	240.3	240.5	233.4	224.8	215.1	205.0
θ/(°)	47.5	52.5	57.5	62.5	67.5	72.5	77.5	82.5	87.5	
I_θ/cd	197.6	187.9	176.7	162.1	112.6	48.9	22.5	11.6	3.3	

（3）实际照度折算

已知等照度曲线可直接查出的或光源光强分布表中计算出的光源 1000 lm 时水平照度为 ε，光源光通量为 Φ，灯具的维护系数为 K，则计算点的折算到实际水平照度为

$$E_h=\frac{\Phi\varepsilon K}{1000}$$

则计算点的实际垂直照度为

$$E_v=\frac{D}{h}E_h$$

（4）多个光源点照度计算

在多光源照射下的水平面的点照度是不同光源照度之和，可按照下式计算：

$$E_{h\Sigma}=E_{h1}+E_{h2}+\cdots+E_{hn}=\sum_{i=1}^{n}E_{hi}$$

式中，$E_{h\Sigma}$为多光源照射下的水平面上的点照度（lx）；E_{h1}，…，E_{hi}，…，E_{hn}为各光源照射下在水平面上的点照度（lx）。

当有多个相同灯具投射到同一点时，其实际水平面照度可按照下式计算：

$$E_h=\frac{\Phi\sum\varepsilon K}{1000}$$

式中，Φ为光源的光通量（lm）；$\sum\varepsilon$为各灯（1000 lm）对计算点产生的水平照度之和（lx）；K为灯具的维护系数。

例题 13-12：某博物馆为陈列物设一展示柜，长 2000 mm、高 1000 mm、深 800 mm，展示柜中嵌顶安装一盏 12 W 点光源灯具，灯具配光曲线为旋转轴对称，灯具光轴垂直对准柜下表面，柜内下表面与光轴成 30°，P 点处放置一件均匀漫反射率$\rho=0.8$的平面展品（见图 13-4，厚度忽略不计），光源光通量为 900 lm，光源光强度分布（1000 lm）见表 13-8，灯具维护系数为 0.8。若不计柜内反射光影响，该灯具照射下展品 P 点的亮度为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

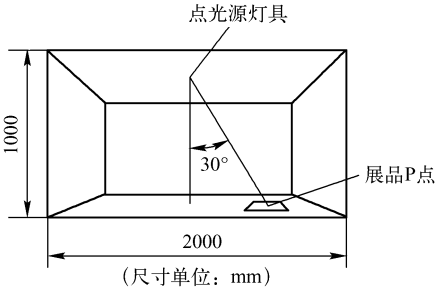


图 13-4　展品布置示意图

表 13-8　光源光强分布

θ/(°)	0	5	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
I_θ/cd	489	485	473	428	397	361	322	282	199	119	52	9.8	0.3

（A）24.8 cd/m^2　　（B）43.0 cd/m^2　　（C）47.8 cd/m^2　　（D）58.3 cd/m^2

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 119 页、第 3 页（第二版第 189 页、第 2 页）。

展品 P 点的水平照度为

$$E_h=\frac{I_\theta\cos^3\theta}{h^2}=\frac{361\times\cos^3(30°)}{1^2}\text{ lx}=234.48\text{ lx}$$

考虑维护系数及灯具实际光通量的水平照度为

$$E'_h=\frac{\Phi E_h K}{1000}=\frac{900}{1000}\times234.48\times0.8\text{ lx}=168.82\text{ lx}$$

展品 P 点的亮度为

$$L=\frac{\rho E'_h}{\pi}=\frac{0.8\times168.82}{\pi}\text{ cd/m}^2=43.0\text{ cd/m}^2$$

例题 13-13：若某办公室平面长 14.4 m，宽 7.2 m，高度 3.6 m，墙厚 0.2（照明计算平面按长 14.2 m，宽 7.0 m），工作面高度为 0.75 m。该办公室墙面上有一幅挂面，画中心距地 1.8 m，采用一射灯对该画局部照明，灯具距地 3 m，光轴对准画中心，与墙面成 30°，位置示意如图 13-5 所示，射灯光源的光强分布见表 13-9，该画中心点的垂直照度应为下列哪

项数值？（供配电 2013 年考题）

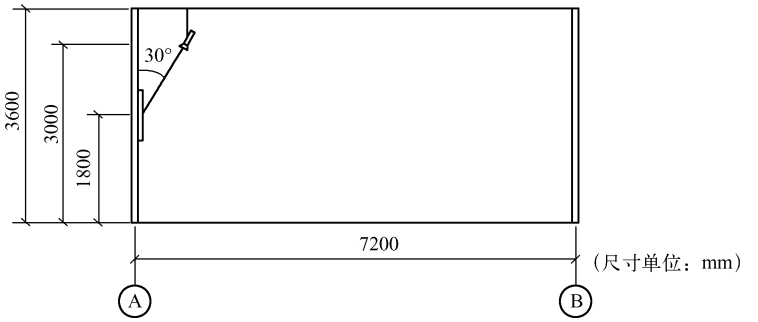


图 13-5　墙上挂画采用射灯照明位置（B-B）剖面图

表 13-9　光源光强分布表

θ/(°)	0	10	20	25	30	35	40	45	50
I_θ/cd	3220	2300	1150	470	90	23	15	9	5

（A）23 lx　　（B）484 lx　　（C）839 lx　　（D）1452 lx

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 119 页、第 122 页（第二版第 189 页）。

光轴对准画中心夹角为 0°，查光源光强分布表 13-9 中 I_θ 为 3220cd。

画（水平放置时）中心点的垂直照度为

$$E_v=\frac{I_\theta\cos^2\theta\sin\theta}{h^2}=\frac{3220\times\cos^2(60°)\sin(60°)}{[(3-1.8)\times\tan(30°)]^2}\text{ lx}=1452.3\text{ lx}$$

画（垂直放置时，需要旋转 90°）中心点的垂直照度为

$$E'_v=\frac{D}{h}E_v=\frac{(3-1.8)\times\tan(30°)}{3-1.8}\times1452.3\text{ lx}=839\text{ lx}$$

【知识点解析】

1）点光源在不同平面上 P 点的法线方向照度之比：

方向照度之比等于点光源 S 到该平面上的垂直线长度之比（见图 13-6）

$$E_1=\frac{I}{R^2}\cos\theta_1,\ E_2=\frac{1}{R^2}\cos\theta_2$$

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}=\frac{\frac{h_1}{R}}{\frac{h_2}{R}}=\frac{h_1}{h_2}$$

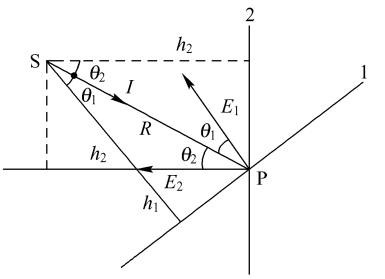


图 13-6　点光源在不同平面上 P 点的法线方向照度

2）垂直平面上的照度可按照下式计算：

垂直照度　$E_v=\frac{D}{h}E_h$

例题 13-14：若该会议室旁有一发言准备室，内设点光源嵌入吊顶顶棚安装，两光源间

距 7 m，如图 13-7 所示，发言准备室中间有一倾斜桌面，桌面中心点为 P，两光源 L_1、L_2 照射于 P 点，则 P 点的倾斜面照度为多少？

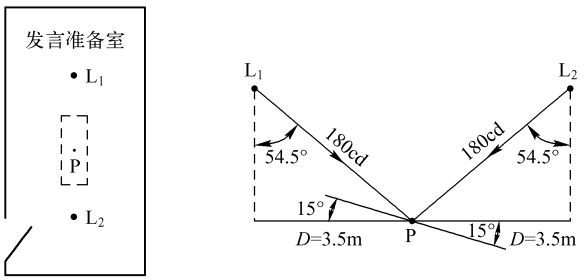


图 13-7　发言准备室光源布置图

（A）23.1 lx　　（B）16.16 lx　　（C）12.6 lx　　（D）10.9 lx

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 119~120 页（第二版 第 190 页）。

由于两侧光强角度都相同，P 点照度又是两者之和，所以 L_1 和 L_2 点到 P 点水平面高度为

$$h = D/\tan\theta = 3.5/\tan 54.5^\circ \text{ m} = 2.5 \text{ m}$$

L_1 和 L_2 点到 P 点水平面照度 E_{L1}、E_{L2}（即 E_h）为

$$E_h = \frac{I_\theta \cos^3\theta}{h^2} = \frac{180\times\cos^3 54.5^\circ}{2.5^2}\text{ lx} = 5.64 \text{ lx}$$

L_1 和 L_2 点到 P 点倾斜面照度为

$$E_\varphi = \psi_1 E_{L1} + \psi_2 E_{L2} = \left(2\cos\theta + \frac{D}{h}\sin\theta - \frac{D}{h}\sin\theta\right)E_h = 2\cos\theta \cdot E_h = 2\times\cos 15^\circ \times 5.64 \text{ lx} = 10.9 \text{ lx}$$

例题 13-15：某客房床头中轴线正上方安装有 25 W 阅读灯，如图 13-8 所示（图中标注的尺寸单位均为 mm），灯具距墙 0.5 m，距地 2.7 m，灯具光通量为 2000 lm，光强分布见表 13-10，维护系数为 0.8，假定书面 P 点在中轴线上方，书面与床面水平倾角为 70°，P 点距墙水平距离为 0.8 m，距地垂直距离为 1.2 m，按点光源计算书面 P 点照度值应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

表 13-10　光源光强分布表（1000 lm）

θ(°)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	90
I_θ/cd	396	384	360	324	276	231	186	150	117	90	72	0

（A）64 lx　　（B）102 lx　　（C）111 lx　　（D）196 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 119~120 页（第二版第 90 页）。

灯到 P 点水平面的夹角：$\theta = \arctan\dfrac{D}{h} = \arctan\dfrac{300}{(2700-1200)} = 11.3^\circ$

查表 13-10 中 11.3°光强为（插值法）287.2 cd，灯到 P 点水平面照度 E_h：

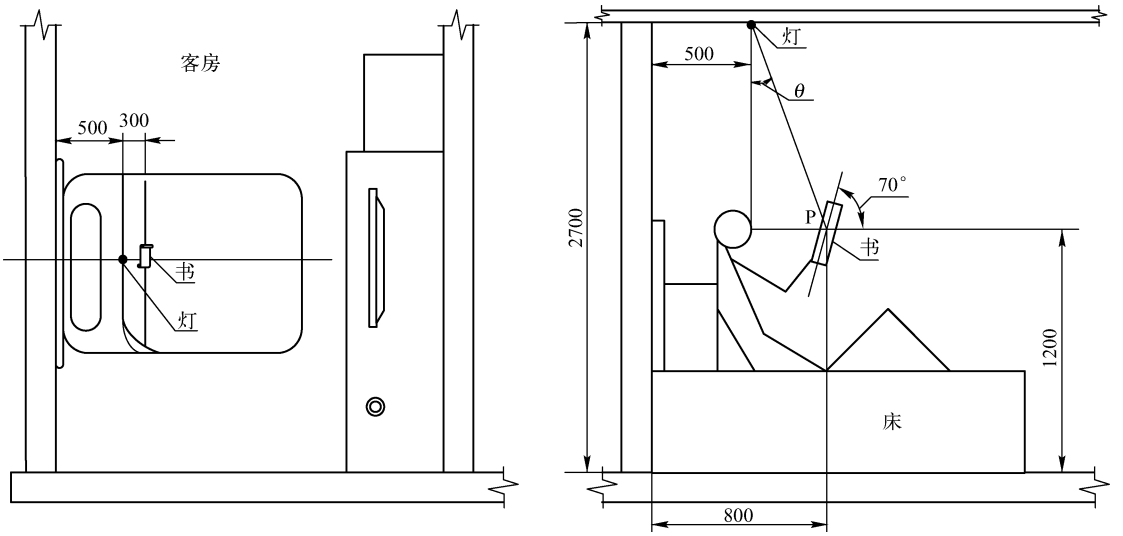


图 13-8　客房点光源照射位置示意图

$$E_h=\frac{\Phi I_\theta\cos^3\theta K}{1000h^2}=\frac{2000\times287\times\cos^3 11.3°\times0.8}{1000\times(2.7-1.2)^2}\text{lx}=192.45\text{lx}$$

灯的光轴线 P 点倾斜面照度：

$$E_\varphi=\psi E_h=\left(\cos\theta+\frac{D}{h}\sin\theta\right)E_h=\left(\cos70°+\frac{0.3}{1.5}\sin70°\right)\times192.45\text{lx}=102\text{lx}$$

【知识点解析】

点光源倾斜面照度 E_φ 可由下式计算：

$$E_\varphi=\left(\cos\theta\pm\frac{D}{h}\sin\theta\right)E_h=\psi E_h$$

式中，E_φ 为倾斜面上 P 点的照度（lx）；E_h 为水平面上 P 点的照度（lx）；h 为光源至水平面上的计算高度（m）；D 为光源在水平面上的投影至倾斜面与水平面交线的垂直距离；ψ 为比值，可从图 13-9 查出。

例题 13-16~13-18：某圆形办公室，半径为 5 m，吊顶高 3.3 m，采用格栅式荧光灯嵌入顶棚布置成三条光带。平面布置如图 13-10 所示，请回答下列问题，并列出解答过程。

13-16：在题干图中，若各段光源采用相同的灯具，并按同一轴线布置，计算光带 1 在距地面 0.75 m 高的 P 点的直射水平照度时，当灯具间隔 s 小于下列哪一项数值时，误差小于 10%，发光体可以按连续线光源计算照度？（供配电 2011 年考题）

（A）0.29 m　　（B）0.64 m　　（C）0.86 m　　（D）0.98 m

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 131 页（第二版第 200 页）。

发光体可以按连续线光源计算条件的灯具间隔 s 为

$$s\leqslant\frac{h}{4\cos\theta}=\frac{3.3-0.75}{4\cos\left(\arctan\dfrac{3}{2.55}\right)}\text{m}=0.98\text{m}$$

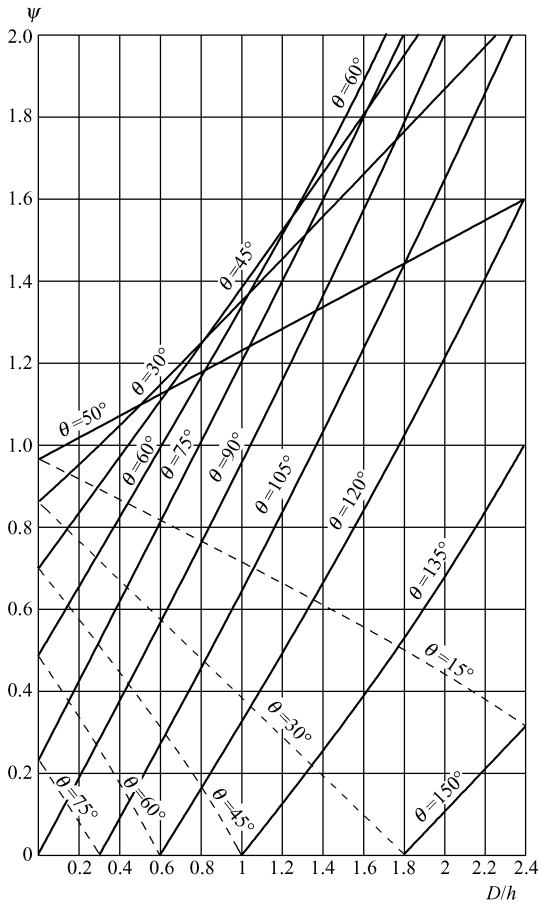


图 13-9　ψ 与 D/h 关系曲线

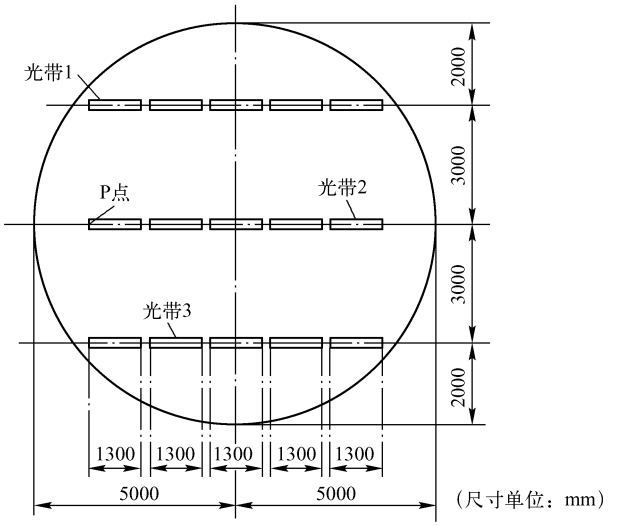


图 13-10　圆形办公室平面布置图

13-17：在题干图中，若已知光带 1 可按连续线光源计算照度，各灯具之间的距离 s 为 0.2 m，此时不连续线光源光强的修正系数为下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）0.62　　（B）0.78　　（C）0.89　　（D）0.97

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 131 页（第二版第 200 页）。

不连续线光源光强的修正系数为

$$C=\frac{Nl'}{N(l'+s)-s}=\frac{5\times1.3}{5\times(1.3+0.2)-0.2}=0.89$$

【知识点解析】

不连续线光源按连续光源计算照度，当其距离 $s\leqslant\frac{h}{4\cos\theta}$ 时，误差小于 10%。但此时光强或单位长度光强应乘以一个修正系数，公式为

$$C=\frac{Nl'}{N(l'+s)-s}$$

式中，l' 为各段光源（灯具）长度（m）；s 为各段光源（灯具）间的距离（m）；N 为整列光源中的各段光源（灯具）数量；h 为灯具到该点的高度。

13-18：若每套灯具采用 2 支 36 W 直管型荧光灯，每支荧光灯光通量为 3250 lm，各灯具之间的距离 s 为 0.25 m，不连续线光源按连续光源计算照度的修正系数 C 为 0.87，已知灯具的维护系数 K 为 0.8，灯具在纵轴向的光强分布确定为 C 类灯具，荧光灯具的发光强度值见表 13-11，若距地面 0.75 m 高的 P 点水平方位系数（AF）为 0.662，试用方位系数计算法求光带 2 在 P 点直射水平照度为下列哪一项数值。（供配电 2011 年考题）

表 13-11　嵌入式格栅荧光灯的发光强度值

θ/(°)	0	30	45	60	90
$I_{\theta(A-A)}$/cd	278	244	214	123	0
$I_{\theta(B-B)}$/cd	278	218	160	90	1

（A）194 lx　　（B）251 lx　　（C）289 lx　　（D）379 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 126 页（第二版第 194 页）。

如图 13-10 所示，P 点与光带 2 的夹角 $\theta=0°$，查表 13-11 中 $I_{\theta(A-A)}=278$ cd，修正后的单位长度的灯具发光强度为

$$I'_{\theta\cdot0}=C\frac{I_{\theta\cdot0}}{l}=0.87\times\frac{278}{1.3}\text{cd/m}=186\text{ cd/m}$$

方位系数计算法求光带 2 在 P 点直射水平照度

$$E_h=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot0}K}{1000h}\cos^2\theta\cdot AF=\frac{2\times3250\times186\times0.8}{1000\times2.55}\times\cos^20°\times0.662\text{ lx}=251\text{ lx}$$

【知识点解析】

（1）方位系数法相关参数（见图 13-11）

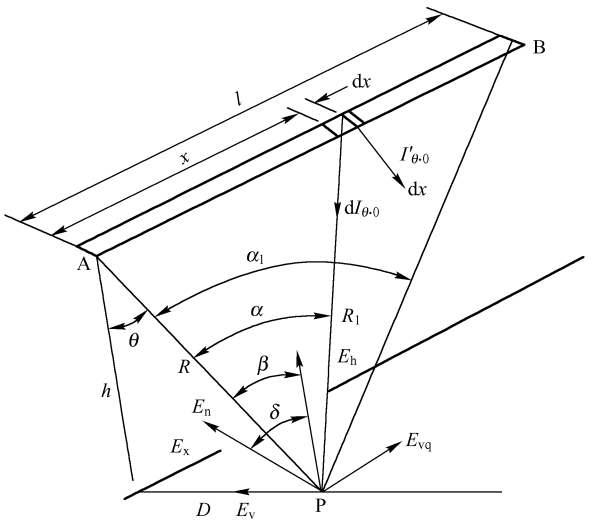


图 13-11　线光源在 P 点产生的法线照度

1）确定方位角 θ、光强 I_θ 和单位长度光强 I'_θ。

$$\theta=\arctan\frac{D}{h}$$

I_θ 在线光源灯具光强分布表或曲线按 θ 角值查出，当为不连续光源应进行修正。

$$I'_{\theta\cdot0}=\frac{I_{\theta\cdot0}}{l}$$

2）确定方位角 α 和方位系数 $AF(af)$。

$$\alpha=\arctan\frac{l}{\sqrt{h^2+D^2}}$$

（2）方位系数法水平照度计算

线光源水平面照度计算（按照光通量为 1000 lm 时的光强）：

$$E_h=\frac{I_{\theta\cdot0}}{lR}\frac{h}{R}\cdot AF=\frac{I'_{\theta\cdot0}}{h}\cos^2\theta\cdot AF$$

折算到实际水平照度为

$$E_h=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot0}K}{1000h}\cos^2\theta\cdot AF$$

水平方位系数 AF 按照《照明设计手册》第三版第 126~127 页表 5-3（第二版第 195 页表 5-2），根据灯具类型和 α 角查出。

例题 13-19：某培训活动中心工程，某办公室长 6 m、宽 3 m、高度 3 m，布置如图 13-12 所示（图中标注的尺寸单位均为 mm），2 张办公桌长 1.5 m、宽 0.8 m、高 0.8 m，距地 2.8 m 连续拼接吊装 4 套 LED 平板盒式灯具构成光带，每套灯具长 1.2 m、宽 0.1 m、高 0.08 m，灯具光强分布值见表 13-12，单灯功率为 40 W，灯具光通量为 4400 lm，维护系数为 0.8，按线光源方位系数法计算桌面中 P 点表面照度值最接近下列哪项数值？（供配电 2017 年考题改编）

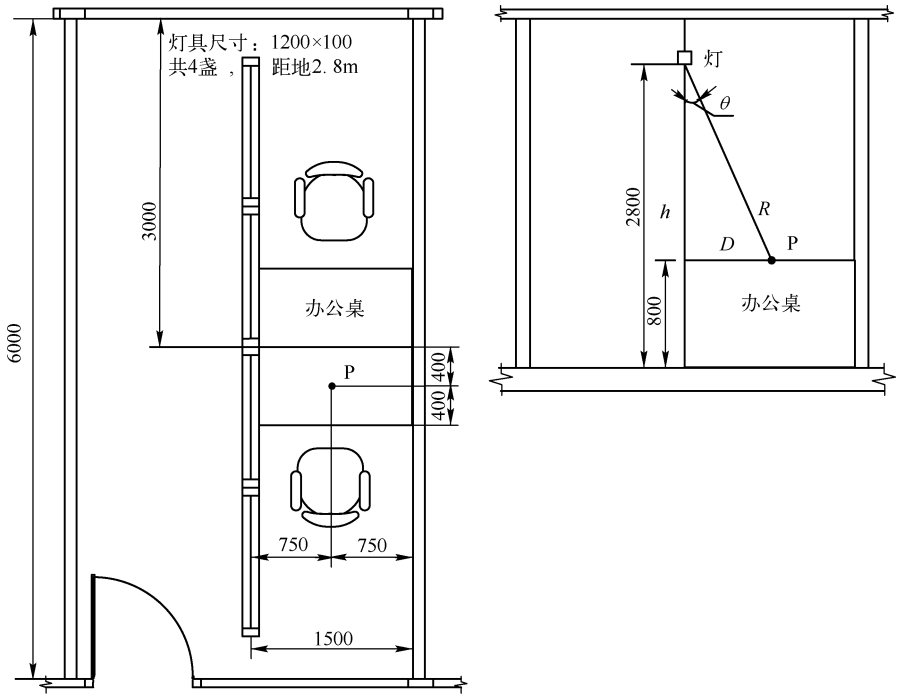


图 13-12　办公室灯具布置示意图

表 13-12　光源光强分布表（1000 lm）

θ(°)		0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
I_θ/cd	A-A	361	383	443	473	379	168	42	46	18	2	0
	B-B	361	360	398	433	389	198	46	19	12	9	2

（A）117 lx　　（B）359 lx　　（C）363 lx　　（D）709 lx

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 126 页（第二版第 194 页）。

如题目中图示 P 点与光带的夹角 θ：$\theta=\arctan\dfrac{D}{h}=\arctan\dfrac{0.75}{2.8-0.8}=20.56°$

查光强分布表（A-A）中（插值法），$I_{\theta(A-A)}=458$ cd。

灯具长边侧夹角 $\alpha_1=\arctan\dfrac{l_1}{\sqrt{h^2+D^2}}=\arctan\dfrac{2.4+0.4}{\sqrt{2^2+0.75^2}}=52.66°$

灯具短边侧夹角 $\alpha_2=\arctan\dfrac{l_2}{\sqrt{h^2+D^2}}=\arctan\dfrac{2.4-0.4}{\sqrt{2^2+0.75^2}}=43.12°$

查《照明设计手册》表 5-3 中灯具长边侧 C 类水平方位系数 AF_1 为 0.6275，灯具短边侧 C 类水平方位系数 AF_2 为 0.576。

光源属于连续线光源，不需要修正，单位长度的灯具发光强度：

$$I'_{\theta\cdot0}=\frac{I_{\theta\cdot0}}{l}=\frac{458}{1.2}\text{ cd/m}=381.7\text{ cd/m}$$

方位系数计算法求光带灯具长边侧在 P 点水平面照度：

$$E_{h1}=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot 0}K}{1000h}\cos^2\theta\cdot AF_1=\frac{4400\times 381.7\times 0.8}{1000\times 2}\times\cos^2 20.56°\times 0.645\,\text{lx}=369.26\,\text{lx}$$

方位系数计算法求光带灯具短边侧在 P 点水平面照度：

$$E_{h2}=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot 0}K}{1000h}\cos^2\theta\cdot AF_2=\frac{4400\times 381.7\times 0.8}{1000\times 2}\times\cos^2 20.56°\times 0.619=339.23\,\text{lx}$$

因 P 点受光带两侧照射，故 $E'_h=E_{h1}+E_{h2}=(369.26+339.23)\,\text{lx}=708.49\,\text{lx}$

例题 13-20～13-21：某商场一层的售货柜台如图 13-13 所示，售货柜台 A 点正上方由 4 套 2×36 W 的荧光灯灯具组成的 5 m 连续长光带进行照明，每台灯具长度为 1.25 m，若荧光灯灯具在横向、纵向均是 A 类光强分布曲线，该双管荧光灯的发光强度值见表 13-13，单只荧光灯的光通量为 3200 lm，维护系数为 0.8。请回答以下问题。

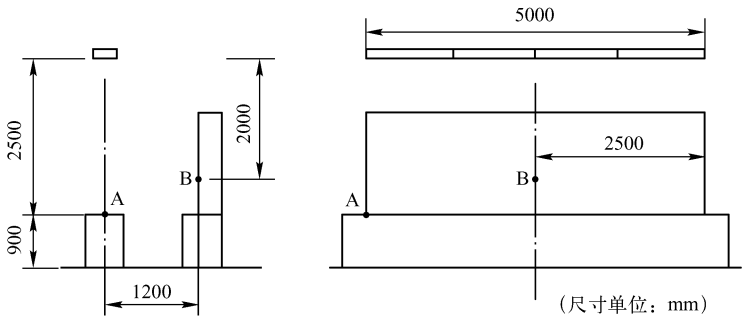


图 13-13　售货柜台示意图

表 13-13　双管荧光灯的发光强度值表（1000 lm）

θ/(°)	0	30	45	60	90
$I_{\theta(A-A)}$/cd	260	215	196	102	0
$I_{\theta(B-B)}$/cd	260	205	156	82	1

13-20：光带售货柜台 A 点处的直射水平面照度为下列哪一项？

（A）310 lx　　（B）321 lx　　（C）335 lx　　（D）342 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 126～127 页（第二版第 194 页）。

如题目中图示 A 点与光带的夹角 $\theta=0°$，查表 13-13 中 $I_{\theta(A-A)}=260\,\text{cd}$，单位长度的灯具发光强度为

$$I'_{\theta\cdot 0}=\frac{I_{\theta\cdot 0}}{l}=\frac{260}{1.25}\,\text{cd/m}=208\,\text{cd/m}$$

计算高度为 2.5 m，灯具 A 类光强分布曲线，夹角 $\alpha=\arctan\dfrac{l}{\sqrt{h^2+D^2}}=\arctan\dfrac{5}{2.5}=63.4°$，查《照明设计手册》第三版表 5-3 中水平方位系数 AF 为 0.754（插值法）。

方位系数计算法求光带在 A 点直射水平面照度：

$$E_h=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot 0}K}{1000h}\cos^2\theta\cdot AF=\frac{2\times 3200\times 208\times 0.8}{1000\times 2.5}\times\cos^2 0°\times 0.754\,\text{lx}=321\,\text{lx}$$

13-21：货架 B 点处的垂直面照度为下列哪一项？

（A）320 lx　　（B）289 lx　　（C）256 lx　　（D）228 lx

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 126~127 页（第二版第 194 页）。

如题目中图示计算高度为 2.0 m，B 点与光带的夹角 $\theta=\arctan\frac{D}{h}=\arctan\frac{1.2}{2}=31°$，查表 13-13 中 $I_{\theta(A-A)}=215\,\text{cd}$。

单位长度的灯具发光强度：$I'_{\theta\cdot0}=\frac{I_{\theta\cdot0}}{l}=\frac{215}{1.25}\,\text{cd/m}=172\,\text{cd/m}$

灯具 A 类光强分布曲线，夹角 $\alpha=\arctan\frac{l}{\sqrt{h^2+D^2}}=\arctan\frac{2.5}{\sqrt{2^2+1.2^2}}=47°$，查《照明设计手册》第三版表 5-3 中水平方位系数 AF 为 0.660（插值法）。

方位系数计算法求一侧光带在 B 点直射水平面照度：

$$E_v=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot0}K}{1000h}\cos\theta\sin\theta\cdot AF=\frac{2\times3200\times172\times0.8}{1000\times2}\times\cos31°\times\sin31°\times0.66\,\text{lx}=128\,\text{lx}$$

因 B 点受光带两侧照射，故 $E'_v=2E_v=256\,\text{lx}$，选 C。

【知识点解析】

在平行于线光源轴线的平面上 P 点的垂直照度 E_v 的计算（见图 13-14）：

$$h\neq0:\ E_v=\frac{I'_{\theta\cdot0}}{h}\cdot\cos\theta\sin\theta\cdot AF$$

$$h=0:\ E_v=\frac{I'_{\theta\cdot0}}{D}\cdot AF$$

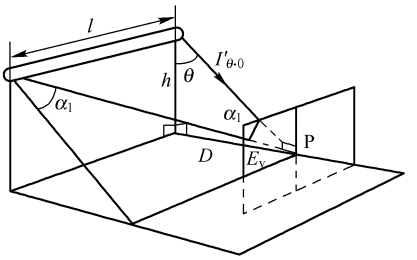


图 13-14　垂直照度计算示意图

折算到实际垂直照度 $h\neq0$：$E_v=\frac{\Phi I'_{\theta\cdot0}K}{1000h}\cos\theta\sin\theta\cdot AF$

例题 13-22：某办公室如图 13-15 所示，房间平面尺寸为 7 m×15 m，净高 5 m，在顶棚正中布置一表面亮度为 500 cd/m^2 的发光天棚，亮度均匀，其尺寸为 5 m×13 m。求发光天棚对办公室正中 P_1 点的照度。（假定不考虑室内反射光）

（A）320 lx　　（B）430 lx　　（C）620 lx　　（D）660 lx

答案：【C】

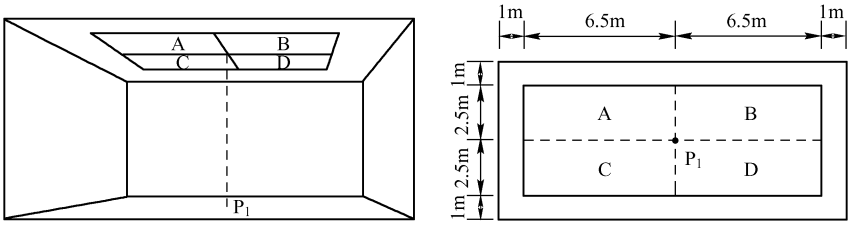


图 13-15　办公室示意图

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 136~138 页（第二版第 202~204 页）。

对于矩形 A：　　$X=a/h=6.5/5=1.3$；$Y=b/h=2.5/5=0.5$

矩形 A 对中点 P_1 的照度：

$$E_{hA}=\frac{L}{2}\left(\frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}}\arctan\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}+\frac{X}{\sqrt{1+X^2}}\arctan\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}}\right)$$

$$=\frac{500}{2}\left(\frac{0.5}{\sqrt{1+0.5^2}}\arctan\frac{1.3}{\sqrt{1+0.5^2}}+\frac{1.3}{\sqrt{1+1.3^2}}\arctan\frac{0.5}{\sqrt{1+1.3^2}}\right)\text{lx}=155\text{ lx}$$

或者查《照明设计手册》第三版中图 5-17，得形状因数为 0.31，则

$$E_{hA}=Lf_h=500\times0.31\text{ lx}=155\text{ lx}$$

因图中发光天棚矩形 A、B、C、D 参数相同，故发光天棚对中点 P_1 的照度：

$$E_h=E_{hA}+E_{hB}+E_{hC}+E_{hD}=4\times155\text{ lx}=620\text{ lx}$$

【知识点解析】

计算点位于矩形光源顶点的投影如图 13-16 所示，水平面照度按照下式计算：

$$E_h=\frac{L}{2}\left(\frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}}\arctan\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}+\frac{X}{\sqrt{1+X^2}}\arctan\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}}\right)=Lf_h$$

垂直面照度按照下式计算：

$$E_{vp}=\frac{L}{2}\left[\arctan\left(\frac{1}{Y}\right)-\frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}}\arctan\frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}}\right]=Lf_v$$

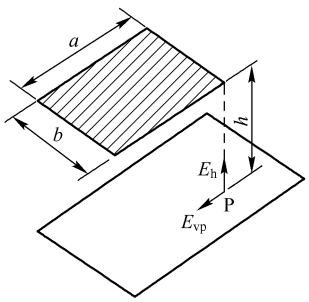


图 13-16　计算点位于矩形光源顶点

式中，$X=a/h$；$Y=b/h$；E_h为与面光源平行的被照面上 P 点的水平面照度（lx）；E_{vp}为与面光源平行的被照面上 P 点的垂直面照度（lx）；L 为面光源的亮度（cd/m^2）；a 和 b 分别为长、宽；h 为灯具到计算点的高度；f_h为水平形状因数（《照明设计手册》第三版第 137 页图 5-17）；f_v为垂直形状因数（图 5-20）。计算点在矩形投影外时，按照矩形光源顶点位置总面积产生的照度减去无光源的面积产生的照度。

注：arctan 计算出来的值是弧度，计算点必须是矩形面角上的计算点。

例题 13-23：某培训活动中心工程，室内挂墙广告灯箱宽 3 m×高 2 m×深 0.2 m，灯箱内均匀布置高光效直管荧光灯，每套荧光灯功率为 32 W，光通量为 3400 lm，色温为 6500 K，效率为 90%，维护系数为 0.80。灯箱设计表面亮度不宜超过 100 cd/m^2，广告表面透光材料入射比为 0.5，反射比为 0.5，灯具利用系数为 0.78，计算广告灯箱所需灯具数量为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（1）2　　（B）3　　（C）4　　（D）5

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 142 页、第 148 页（第二版第 210 页、第 214 页）。

广告灯箱表面照度：$E'=\dfrac{L\pi}{\rho\tau}=\dfrac{100\times\pi}{0.5\times0.5}\text{lx}=400\pi\text{ lx}$

照明计算面积：$A_0=3\times2\text{ m}^2=6\text{ m}^2$

灯具数量：$N=\dfrac{A_0E_{av}}{\Phi UK}=\dfrac{6\times400\pi}{3400\times0.78\times0.8}=3.55$，因灯箱设计表面亮度不宜超过 100 cd/m^2，可取 3 盏。

【知识点解析】

对于已知面光源内表面照度 E，其面光源出口面的外表面亮度 L 为

$$L=\frac{E\rho}{\pi}\tau$$

式中，L 为出口面的外表面亮度（cd/m^2）；ρ 为出口面透光材料反射比；τ 为出口面透光材料透射系数；π 为常数 3.1416。

13.3　平均照度计算

【知识点说明】

1）点光源照度计算属于重要考点，本节给出了解题流程图以辅助了解照明设计过程。要求熟练掌握室空间比（室形指数）计算、墙面平均反射比和有效顶棚（地板）反射比计算、利用系数的应用、平均照度的计算、利用平均照度计算灯具数量。

2）熟练掌握照度校验和功率密度校验，照度标准值和功率密度限值可在《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 查出，在计算出的灯具数量下的设计照度与照度标准值的偏差应不超过-10%~+10%，当灯具小于或等于 10 个时，允许适当超过此偏差，功率密度校验参见 13.1 节。

依据书目：

《建筑照明设计标准》GB 50034—2013

《照明设计手册》第三版

参考书目：

《电气照明技术》孙建民主编

解题流程图（见图 13-17）：

例题 13-24：某培训活动中心工程，多功能厅长 36 m，宽 18 m，吊顶高度 3.4 m，无窗。设计室内地面照度标准为 200 lx，拟选用嵌入式 LED 灯盘（功率为 40W，光通量为 4000 lm，色温为 4000 K），灯具维护系数为 0.80，已知有效顶棚反射比为 0.7，墙面反射比为 0.5，地面反射比为 0.1，灯具利用系数见表 13-14，计算多功能厅所需灯具数量为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

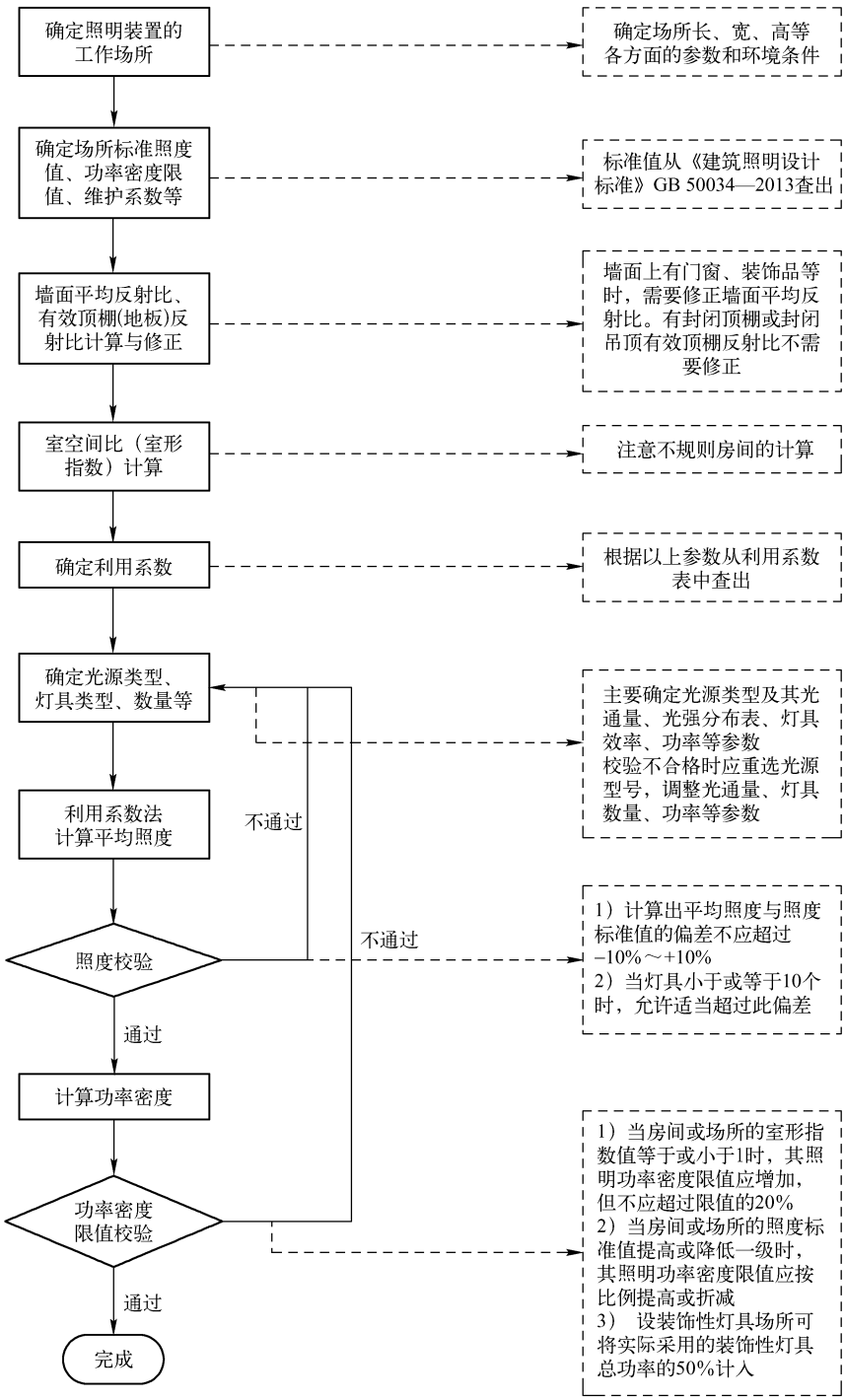


图 13−17　平均照度计算流程图

表 13-14　灯具利用系数表

室形指数 *RI*	顶棚、墙面、地面反射系数（表格从上往下顺序）										
	0.80		0.70				0.50		0.30		0
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	0.3	0.1	0
	0.3	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
0.60	0.62	0.59	0.62	0.60	0.59	0.53	0.53	0.49	0.52	0.49	0.47
0.80	0.73	0.69	0.72	0.70	0.68	0.62	0.62	0.58	0.61	0.58	0.56
1.00	0.82	0.76	0.80	0.78	0.75	0.70	0.69	0.65	0.68	0.65	0.63
1.25	0.90	0.82	0.88	0.84	0.81	0.76	0.76	0.72	0.75	0.72	0.70
1.50	0.95	0.86	0.93	0.89	0.86	0.81	0.80	0.77	0.79	0.76	0.75
2.00	1.04	0.92	1.01	0.96	0.92	0.88	0.87	0.84	0.84	0.83	0.81
2.50	1.09	0.96	1.06	1.00	0.95	0.92	0.91	0.89	0.89	0.88	0.86
3.00	1.12	0.98	1.09	1.03	0.97	0.95	0.93	0.92	0.92	0.90	0.88
4.00	1.17	1.04	1.13	1.06	1.00	0.98	0.96	0.95	0.95	0.93	0.91
5.00	1.19	1.12	1.16	1.08	1.01	1.00	0.98	0.96	0.96	0.95	0.93

（A）40 盏　　（B）48 盏　　（C）52 盏　　（D）56 盏

答案：【A】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 145 页（第二版第 211~213 页）。

题目给出照度室内地面照度标准为 200 lx，题目计算高度取 3.4 m（顶棚到地面）。

室形指数 *RI* 值：$RI=\dfrac{lb}{h_r(l+b)}=\dfrac{36\times18}{3.4\times(36+18)}=3.53$

查表 13-14，利用系数（插值法）约为 $U=0.986$。

照明计算面积：$A_0=36\times18\ \text{m}=648\ \text{m}^2$

灯具数量：$N=\dfrac{A_0E_{av}}{\Phi UK}=\dfrac{648\times200}{4000\times0.986\times0.8}$盏$=41.08$ 盏，可取 40 盏。

40 盏设计照度值：$E_{av}=\dfrac{N\Phi UK}{A_0}=\dfrac{40\times4000\times0.986\times0.8}{648}\text{lx}=194.6\text{ lx}$，设计照度与照度标准值的偏差不应超过±10%，满足设计要求。

例题 13-25~13-27：某办公室平面长 14.4 m，宽 7.2 m，高度 3.6 m，墙厚 0.2（照明计算平面按长 14.2 m，宽 7.0 m），工作面高度为 0.75 m，平面如图 13-18 所示，办公室中均匀布置荧光灯具，请回答照明设计中的下列问题，并列出解答过程。

13-25：若该办公室无吊顶，采用杆吊式格栅荧光灯具，灯具安装高度 3.1 m，其 A—A 剖面如图 13-19 所示，其室内顶棚反射比为 0.7，地面反射比为 0.2，墙面反射比为 0.5，玻璃窗反射比为 0.09，窗台距地面高 0.9 m，窗高 1.8 m，玻璃窗面积为 12.1 m^2，若挂画的反射比与墙面反射比相同，该办公室空间墙面平均反射比 ρ_{wav} 应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）0.40　　（B）0.45　　（C）0.51　　（D）0.55

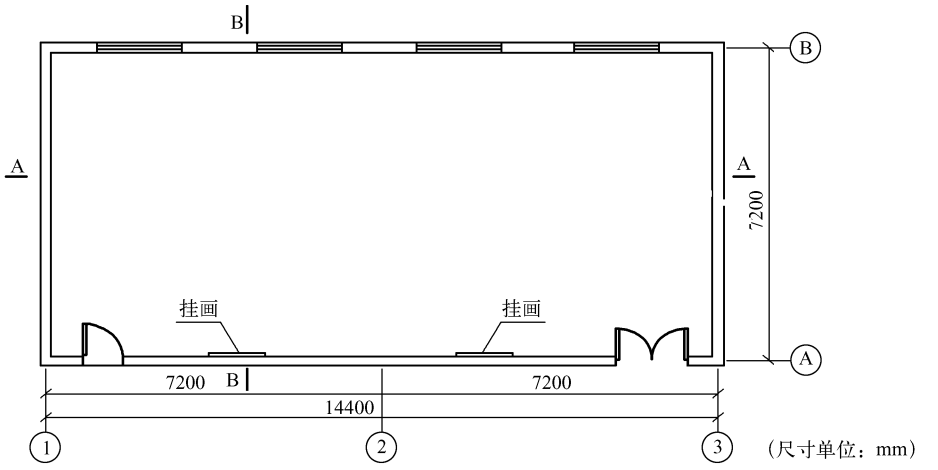


图 13-18　某办公室平面图

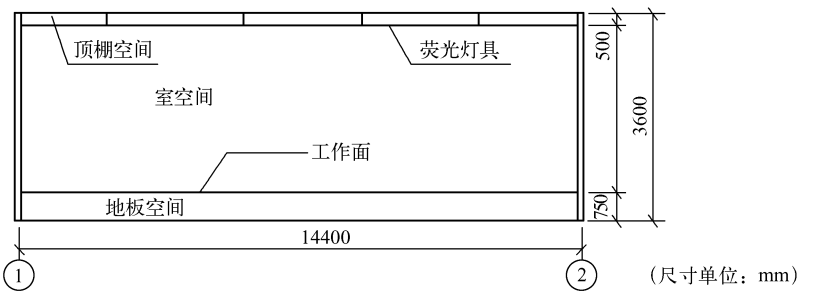


图 13-19　办公室 A—A 剖面图

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 147 页（第二版第 213 页）。

办公室空间墙面平均反射比 ρ_{wav} 为

$$A_w = 2\times(14.2+7.0)\times(3.6-0.5-0.75)\,m^2 = 99.64\,m^2$$

$$\rho_{wav} = \frac{\rho_w(A_w-A_g)+\rho_g A_g}{A_w} = \frac{0.5\times(99.64-12.1)+0.09\times12.1}{99.64} = 0.45$$

【知识点解析】

1）墙面平均反射比 ρ_{wav} 按照下式计算：

$$\rho_{wav} = \frac{\rho_w(A_w-A_g)+\rho_g A_g}{A_w}$$

式中，A_w、ρ_w 分别为墙的总面积（包括窗户面积，m^2）和墙面反射比；A_g、ρ_g 分别为玻璃窗或装饰物的面积（m^2）和玻璃窗或装饰物的反射比。

把墙面看成一个均匀的漫射表面，将窗子和墙上的装饰品等综合考虑，求出墙面平均反射比 ρ_{wav}。无窗户或装饰品时 $\rho_{wav}=\rho_w$。

2）顶棚（地板）平均反射比按照下式计算：

$$\rho=\frac{\sum_{i=1}^{N}\rho_i A_i}{\sum_{i=1}^{N}A_i}$$

式中，ρ_i 为第 i 个表面的反射比，顶棚或地板面积只计算一个；A_i 为第 i 个表面的面积；N 为表面数量。

室内各表面的反射比如图 13-20 所示。

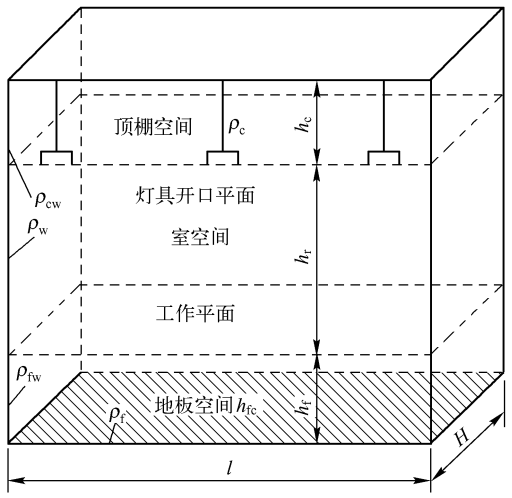


图 13-20　室内各表面的反射比

13-26：若该办公室有平吊顶，高度为 3.1 m，灯具嵌入顶棚安装。已知室内有效顶棚反射比为 0.7，墙面反射比为 0.5，地面反射比为 0.2。现均匀布置 8 套嵌入式 3×28 W 格栅荧光灯具，用 T5 直管荧光灯配电子镇流器，28 W 荧光灯管光通量为 2660 lm，格栅灯具效率为 0.64，其利用系数见表 13-15，计算中 RCR 取小数点后一位数字，维护系数为 0.8。该房间的平均照度为下列哪一项？（供配电 2013 年考题）

表 13-15　荧光灯格栅灯具利用系数表

有效顶棚反射比（%）	70			50			30		
墙反射比（%）	50	30	10	50	30	10	50	30	10
墙面反射比（%）	0.2								
室空间比 *RCR*									
1	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61
1.2	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59
1.5	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.57
2.0	0.61	0.60	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53
2.5	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49
3.0	0.54	0.52	0.51	0.53	0.50	0.48	0.51	0.48	0.46

（A）275 lx　　（B）293 lx　　（C）313 lx　　（D）329 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 145~146 页（第二版第 211~213 页）。

照明计算面积：$A_0=14.2\times7.0\ \text{m}^2=99.4\ \text{m}^2$

室空间比：$RCR=\dfrac{2.5A_w}{A_0}=\dfrac{2.5\times99.64}{99.4}=2.5$，查利用系数表 13-15，$U=0.57$

平均照度：$E_{av}=\dfrac{N\Phi UK}{A_0}=\dfrac{8\times3\times2660\times0.57\times0.8}{99.4}\text{lx}=293\text{lx}$

【知识点解析】

（1）室空间比与室形指数（见图 13-21）

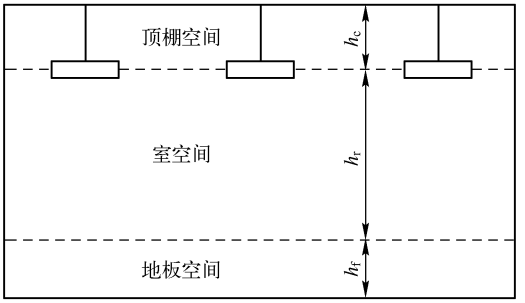


图 13-21　图室内空间的划分

1）室空间比：房间是正六面体，按照下式计算：

$$RCR=\frac{5h_r(l+b)}{lb}$$

2）室形指数：房间是正六面体，按照下式计算：

$$RI=\frac{lb}{h_r(l+b)}=\frac{5}{RCR}$$

3）室空间比：房间不是正六面体，而是不规则的房间时，按照下式计算：

$$RCR=\frac{2.5\times\text{墙面积}}{\text{地面积}}$$

4）室形指数：房间不是正六面体，而是不规则的房间时，按照下式计算：

$$RI=\frac{2\times\text{地面积}}{\text{墙面积}}$$

（2）应用利用系数法计算平均照度

$$E_{av}=\frac{N\Phi UK}{A}$$

式中，E_{av}为工作面上的平均照度（lx），应符合 GB 50034—2013 第 5 条照度标准要求；Φ为光源的光通量（lm）；N为光源数量；U为利用系数；A为工作面的面积（m^2）；K为灯具的维护系数。

计算出的灯具数量下的设计照度与照度标准值的偏差不应超过-10%～+10%，当灯具小于或等于 10 个时，允许适当超过此偏差。

13-27：若该办公室平吊顶高度为 3.1 m，采用嵌入式格栅灯具均匀安装，每套灯具 4×14 W，采用 T5 直管荧光灯，每支荧光灯管光通量为 1050 lm，灯具的利用系数为 0.62，灯具效率为 0.71，灯具维护系数为 0.8，要求工作面照度为 500 lx，则需要灯具套数为下列哪项数值？（取整数）（供配电 2013 年考题）

（A）14　　（B）21　　（C）24　　（D）27

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 148 页（第二版第 211 页）。

灯具数量：$N=\frac{E_{av}A_0}{\Phi UK}=\frac{500\times99.48}{4\times1050\times0.62\times0.8}=23.9$，取 24 套。

【知识点解析】

（1）公式法平均照度推算灯具数量

$$N=\frac{E_{av}A}{\Phi UK}$$

式中，参数同平均照度。

（2）曲线法

灯数概算曲线参照《照明设计手册》第三版第 148 页图 5-29（略）。S 是工作面面积，h 是计算高度灯具到计算点水平面的垂直高度。该曲线是根据已知光源的光通量，照度为 100 lx，房间的长宽比、表面的反射比及灯具吊挂高度固定，编制出灯数 N 与工作面面积的关系。所需照度值不是 100 lx 时，则所求灯数可由下式计算：

$$N=\text{由概算曲线上查出的灯数}\times\frac{\text{实际照度值}}{100}$$

例题 13-28~13-30：某教室平面为扇形面积减去三角形面积，扇形的圆心角为 60°，布置如图 13-22 所示，圆弧形墙面的半径为 30 m，教室中均匀布置格栅荧光灯具，计算中忽略墙体面积，请回答下列问题并列出解答过程。

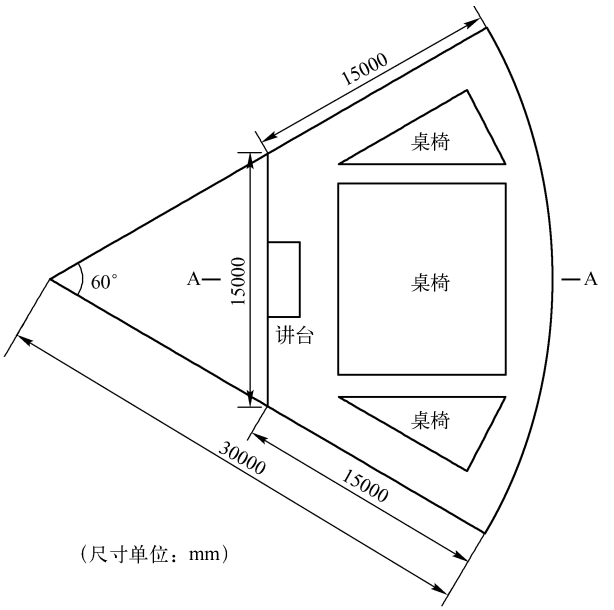


图 13-22　某教室平面布置图

13-28：若该教室室内空间 A—A 剖面如图 13-23 所示，无光源。采用嵌入式格栅荧光

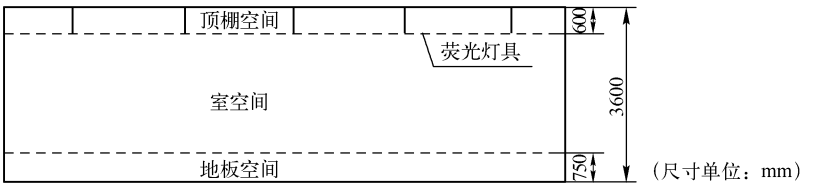


图 13-23　A—A 剖面图

灯具，已知顶棚空间表面平均反射比为 0.77，则顶棚的有效空间反射比为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）0.69　　（B）0.75　　（C）0.78　　（D）0.83

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 146 页（第二版第 213 页）。

顶棚空间开口面积：

$$A_0 = S - S_\Delta = \frac{1}{6}\pi R^2 - \frac{1}{2}a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}a = \left(\frac{1}{6}\pi \times 30^2 - \frac{1}{2}\times 15\times 15\times \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\mathrm{m}^2 = 373.8\ \mathrm{m}^2$$

顶棚空间表面面积：

$$L = \frac{1}{3}\pi R + 3a = \left(\frac{1}{3}\pi \times 30 + 3\times 15\right)\mathrm{m} = 76.4\ \mathrm{m}$$

$$A_s = A_0 + Lh_c = (373.8 + 76.4\times 0.6)\,\mathrm{m}^2 = 419.64\ \mathrm{m}^2$$

顶棚的有效空间反射比：

$$\rho_{eff} = \frac{\rho A_0}{A_s - \rho A_s + \rho A_0} = \frac{\rho A_0}{A_s(1-\rho) + \rho A_0} = \frac{0.77\times 373.8}{419.64\times(1-0.77) + 0.77\times 373.8} = 0.749$$

【知识点解析】

有效顶棚（地板）反射比：

$$\rho_{eff} = \frac{\rho A_0}{A_s - \rho A_s + \rho A_0}$$

式中，ρ_{eff}为有效空间反射比；A_0 为空间开口平面的面积（m^2），即灯具所在的顶棚（地板）空间开口平面面积；A_s 为空间表面面积（m^2），去掉灯具所在空间开口平面面积是顶棚（地板）和墙面积之和；ρ 为顶棚平均反射比。

13-29：若该教室顶棚高度为 3.6 m，灯具嵌入顶棚安装，工作面高 0.75 m，该教室室空间比为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）1.27　　（B）1.34　　（C）1.46　　（D）1.54

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 146 页（第二版第 212 页）。

教室室空间比：

$$RCR = \frac{2.5Lh_r}{A_0} = \frac{2.5\times 76.4\times(3.6-0.75)}{373.8} = 1.46$$

13-30：若该教室平均高度为 3.6 m，采用嵌入式格栅灯具均匀安装，每套灯具 2×20 W，采用节能型荧光灯。若荧光灯灯管光通亮为 3250 lm，教室灯具的利用系数为 0.6，灯具效率为 0.7，灯具维护系数为 0.8，要求 0.75 m 工作面的平均照度为 300 lx，则需要多少套灯具？（取整数）（供配电 2012 年考题）

（A）46　　（B）42　　（C）36　　（D）32

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 148 页（第二版第 211 页）。

教室光源数：$N=\dfrac{E_{av}A}{\Phi UK}=\dfrac{300\times378.7}{3250\times0.6\times0.8}$个≈72 个

教室灯具套数：$n=\dfrac{N}{2}=\dfrac{72}{2}$套=36 套

例题 13-31～13-34：某车间长 30 m，宽 18 m，高 12 m，工作面高 0.8 m，灯具距工作面高 10 m，顶棚反射比为 0.5，墙面反射比为 0.3，地面反射比为 0.2，现均匀布置 10 盏400 W 金属卤化物灯，灯具平面布置如图 13-24 所示，已知金属卤化物灯光通量为 32000 lm，灯具效率为 77%，灯具维护系数为 0.7，请回答下列问题。

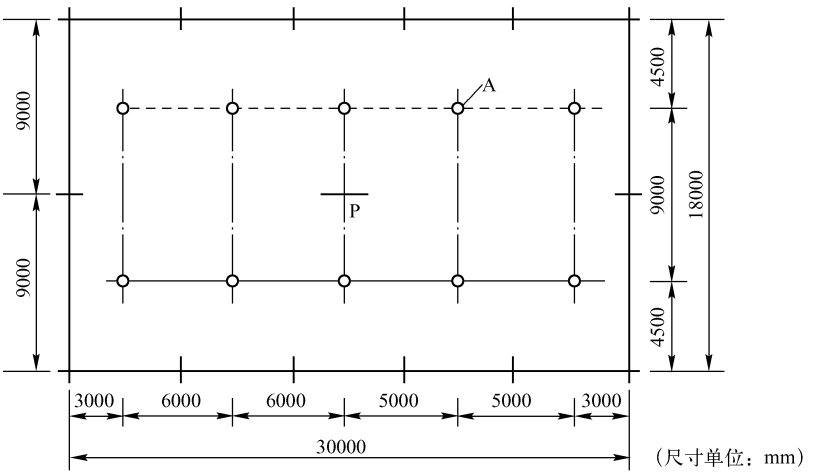


图 13-24　车间灯具平面布置图

13-31：若按车间的室形指数 *RI* 值选择不同配光的灯具，下列说法哪项是正确的？请说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）当 *RI*=3～5 时，宜选用特窄配光灯具

（B）当 *RI*=1.65～3 时，宜选用窄配光灯具

（C）当 *RI*=0.8～1.65 时，宜选用中配光灯具

（D）当 *RI*=0.5～0.8 时，宜选用宽配光灯具

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 146 页、第 436 页（第二版第 212 页、第 231 页）。

室形指数 *RI* 值：

$$RI=\frac{lb}{h_r(l+b)}=\frac{30\times18}{10\times(30+18)}=1.125$$

工厂内的车间照明因 *RI* 值在 0.8～1.65 之间，宜选用中配光灯具，选 C。

13-32：已知金属卤化物灯具的利用系数见表 13-16，该车间工作面上的平均照度应为下列哪一项数值？（供配电 2010 年考题）

表 13-16　金属卤化物灯具的利用系数表

顶棚反射比（%）	70			50			30		
墙面反射比（%）	50	30	10	50	30	10	50	30	10
地面反射比（%）	20								
室空间比 *RCR*									
1.00	0.81	0.79	0.77	0.78	0.76	0.74	0.75	0.74	0.72
1.11	0.80	0.78	0.78	0.77	0.75	0.73	0.74	0.73	0.71
2.00	0.74	0.70	0.67	0.71	0.68	0.65	0.69	0.66	0.64
2.22	0.72	0.68	0.65	0.69	0.66	0.63	0.67	0.64	0.62
3.00	0.67	0.62	0.58	0.64	0.60	0.57	0.62	0.59	0.56
3.33	0.65	0.60	0.56	0.62	0.58	0.55	0.60	0.57	0.54
4.00	0.61	0.55	0.51	0.59	0.54	0.51	0.57	0.53	0.50
4.44	0.58	0.52	0.48	0.56	0.51	0.48	0.55	0.51	0.47
5.00	0.55	0.49	0.45	0.53	0.48	0.45	0.52	0.48	0.44
5.55	0.52	0.46	0.42	0.50	0.45	0.42	0.49	0.45	0.41

（A）212 lx　　（B）242 lx　　（C）311 lx　　（D）319 lx

答案：【A】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 145~146 页（第二版第 211~213 页）。

室空间比 $RCR=\dfrac{5}{RI}=\dfrac{5}{1.125}=4.44$，已知顶棚反射比 0.5，墙面反射比 0.3，地面反射比 0.2，查金属卤化物灯具的利用系数表 13-16 得，利用系数 $U=0.51$。

已知灯具数量 $N=10$，$\Phi=32000$ lm，灯具维护系数 $K=0.7$，工作面面积 $A=30\times18$ m^2，则平均照度为

$$E_{av}=\frac{N\Phi UK}{A}=\frac{10\times32000\times0.51\times0.7}{30\times18}\text{ lx}=211.56\text{ lx}$$

13-33：某普通工厂的车间平面为矩形加两个半圆如图 13-25 所示，其中矩形为长 36 m，宽 18 m，半圆形的直径为 18 m（计算中不计墙的厚度），车间高 16 m，工厂内有办公室和材料堆场。若车间内均匀布置 400 W 金属卤化物灯作为一般照明，灯具距地面高 14.75 m，工作面高 0.75 m，该车间室形指数为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

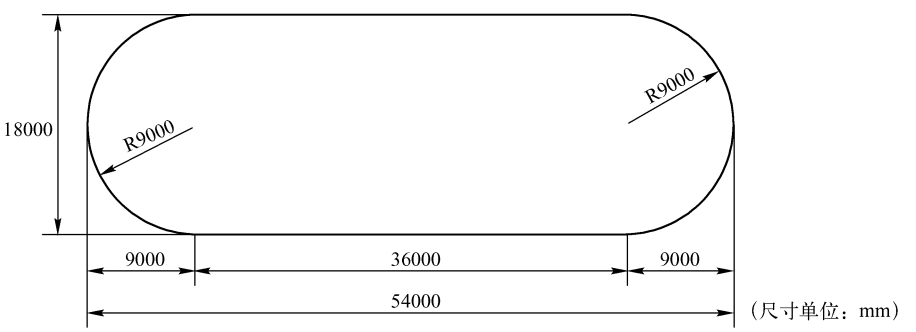


图 13-25　某普通工厂的车间平面布置图

（A）0.7　　（B）0.9　　（C）1.0　　（D）1.2

答案：【C】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 第 2.0.54 条或者《照明设计手册》第三版第 146 页（第二版第 212 页）。

假设布置图中车间内部空间没有任何实体墙，计算过程如下：

房间面积　$S=(36\times18+\pi\times9^2)\,\mathrm{m}^2=902.47\,\mathrm{m}^2$

房间周长　$L=(36\times2+18\pi)\,\mathrm{m}=128.55\,\mathrm{m}$

室形指数　$RI=\dfrac{2S}{(H-h)L}=\dfrac{2\times902.47}{(14.75-0.75)\times128.55}=1.0$

13-34：该工厂的某处办公室长 8 m，宽 6 m，高 3 m，选择照度标准 500 lx，设计 8 盏双管 2×36 W 荧光灯，计算最大照度为 512 lx，最小照度为 320 lx，平均照度为 445 lx，对于该设计下述答案中哪个是正确的？

（A）平均照度低于照度标准，不符合规范要求

（B）平均照度与照度标准值偏差值，不符合规范要求

（C）照度均匀度值不符合规定要求

（D）平均照度、偏差、均匀度符合规范要求

答案：【D】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 第 4.1.7 条、第 2.0.32 条和表 5.3.2。

实际设计平均照度 445 lx 与标准值 500 lx 相差略超出-10%的范围，但是题目中小于 10 盏灯具，允许适当超过此偏差，符合规范要求，所以 A 错、B 错。照度均匀度是最小照度与平均照度之比，即 $U_0=320/445=0.72>0.6$（表 5.3.2），符合规范，所以 C 错，只有 D 对。

【知识点解析】

设计照度与照度标准值的偏差不应超过±10%。考虑到照明设计时布灯的需要和光源功率及光通量的变化不是连续的这一实际情况，根据我国国情，规定了设计照度值与照度标准值比较，可有-10%~+10%的偏差。此偏差适用于装 10 个灯具以上的照明场所；当小于或等于 10 个灯具时，允许适当超过此偏差。

照度标准值是指维持平均照度值。它是在照明装置必须进行维护的时刻，在规定表面上的平均照度，这是为确保工作时视觉安全和视觉功效所需要的照度。

照度均匀度 U_0：规定表面上的最小照度与平均照度之比。

13.4　单位容量、球面和柱面照度、投光灯照度计算

【知识点说明】

1）投光灯照度计算属于重要考点。要求掌握投光灯单位面积容量法计算；熟练掌握投光灯平均照度法（光通量法）计算，该考点已经连续两年考到；熟练掌握投光灯点照度方位系数法（逐点法）计算，该计算等同于点光源水平面应用直角坐标的计算。

2）单位容量照度计算属于冷门考点。要求掌握单位容量照度计算，了解单位容量和相关系数的查询方法。

3）球面、柱面照度计算属于冷门考点。要求了解球面、柱面照度计算。

依据书目：

《建筑照明设计标准》GB 50034—2013

《照明设计手册》第三版

参考书目：

《电气照明技术》孙建民主编

例题 13-35：某一工厂职工宿舍房间的面积 A 为 6 m×9 m。房间吊顶高度 3.6 m，已知房间内顶棚反射比 $\rho_c=70\%$，墙面反射比 $\rho_w=50\%$，地板反射比 $\rho_f=20\%$，利用系数 $U=0.4$，维护系数 $K=0.7$，拟选用 36 W 普通 T8 型单管荧光吊链灯（吊链长 0.6 m、电子镇流器功率为灯具功率的 10%），灯具效率为 70%，荧光灯光通量为 3200 lm，使用单位容量计算出所需灯具数量并确定是否符合设计要求。（写出依据和计算过程）

（A）6 套，不符合　（B）9 套，符合　（C）10 套，符合　（D）12 套，不符合

答案：【A】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 145～146 页、第 152～155 页（第二版第 217～219 页）和《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

职工宿舍：查 GB 50034—2013 表 5.2.2 中照度标准值为 100 lx，表 6.3.1 中功率密度限值为 4 W/m^2。

该宿舍的室空间比：$RCR=\dfrac{5h_r(l+b)}{lb}=\dfrac{5\times(3.6-0.6)\times(6+9)}{6\times9}=4.167$

查《照明设计手册》第三版表 5-21 中该灯具属于简式荧光灯半直接型配光灯具；由表 5-20 根据 RCR 和半直接型配光灯具查出 $P_0=0.0565$（插值法）；由表 5-18 根据 $\rho_c=70\%$、$\rho_w=50\%$、$\rho_f=20\%$ 查出 $C_1=1$；由表 5-19 根据 T8 型 36 W 单管荧光灯查出 $C_2=0.675$；因灯具效率为 70% 故 $C_3=1$。

该宿舍的灯具总功率为

$$P=P_0AEC_1C_2C_3=0.0565\times6\times9\times100\times1\times0.675\times1\ \text{W}=205.9\ \text{W}$$

该宿舍的灯具数量为：$N=205.9/36=5.7$，取 6 盏。

该宿舍的平均照度校检：$E_{av}=\dfrac{N\Phi UK}{A_0}=\dfrac{6\times3200\times0.4\times0.7}{6\times9}\text{lx}=99.6\text{lx}$，满足设计要求。

该宿舍的功率密度校验：$LPD=\dfrac{P}{A_0}=\dfrac{6\times36\times1.1}{6\times9}\text{W/m}^2=4.4\text{W/m}^2$，大于 4 W/m^2，不满足设计要求，选 A。

【知识点解析】

1）在方案设计或初步设计时，采用单位容量估算照明用电量，单位容量是以达到设计照度时 1 m^2 需要安装的电功率（W/m^2）或光通量（lm/m^2）。

2）单位容量的公式：

$$\begin{cases}P=P_0AE\\ \Phi=\Phi_0AE\\ P=P_0AEC_1C_2C_3\end{cases}$$

式中，P 为在设计照度条件下房间需要安装的最低电功率（W）；P_0 为照度为 1 lx 时的单位

容量（W/m^2），当采用高压气体放电光源时，按 40 W 荧光灯的 P_0 值计算；A 为房间面积（m^2）；E 为设计照度（平均照度 lx）；Φ 为在设计照度条件下房间需要的光源总光通量（lm）；Φ_0 为照度达到 1 lx 时所需的单位光辐射量（lm/m^2）；C_1 为当房间内各部分的光反射比不同时的修正系数；C_2 为当光源不是 100 W 的白炽灯或 40 W 的荧光灯时的调整系数；C_3 为当灯具效率不是 70% 时的校正系数，当 $\eta=60\%$，$C_3=1.22$，当 $\eta=60\%$，$C_3=1.470$。

3）公式中参数查询：

① 确定常用灯具配光分类，根据灯具形式查出其配光分类。

② 单位容量 P_0 查询，根据室空间比或室形指数和配光类型查到单位容量或单位光辐射量。

相关参数查询可在《照明设计手册》第三版第 152~155 页表 5-18~表 5-21。灯具的效率详见 GB 50034—2013 第 3.3.2 条规定。

例题 13-36：某一办公室房间面积为 8 m×6 m，房间高度 3.3 m，工作面高度为 0.75 m，工作面上的水平面照度 E_h 为 260 lx，若该房间的顶棚、墙面、地板空间反射比分别为 0.7、0.5、0.2，直接型灯具光强分布近似 BZ5，办公室的标量照度（平均球面照度）最接近下列哪一项？

（A）115 lx　　（B）120 lx　　（C）125 lx　　（D）130 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 146 页、第 156 页（第二版第 221 页）。

办公室房间室形指数为

$$RI=\frac{lb}{h_r(l+b)}=\frac{8\times6}{(3.3-0.75)\times(8+6)}=1.34$$

根据 $\rho_w=0.5$ 和 $RI=1.34$，查《照明设计手册》第三版图 5-32 中标量照度换算系数 K_s 为 0.37。

办公室的标量照度为

$$E_s=E_h(K_s+0.5\rho_f)=260\times(0.37+0.5\times0.2)\ lx=122.2\ lx$$

例题 13-37：某一办公室房间面积为 10 m×6 m，房间高度 2.5 m，水平面照度 E_h 为 256 lx，若该房间的顶棚、墙面、地板空间反射比分别为 0.7、0.5、0.2，直接型灯具光强分布近似 BZ6，若已知标量照度换算系数 K_s 为 0.4，则办公室的平均柱面照度最接近下列哪一项？

（A）115 lx　　（B）120 lx　　（C）125 lx　　（D）130 lx

答案：【A】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 159 页（第二版第 223 页）。

标量照度换算系数 K_s 为 0.4 时，换算系数为 $K_c=1.5K_s-0.25=0.35$。

办公室的平均柱面照度为

$$E_c=E_h(K_c+0.5\rho_f)=256\times(0.35+0.5\times0.2)\ lx=115.2\ lx$$

【知识点解析】

1）平均球面照度也称标量照度，按照下式计算：

$$E_s=E_h(K_s+0.5\rho_f)$$

式中，E_s 为标量照度（lx）；E_h 为水平面照度（lx）；K_s 为根据照明灯具的配光特性（BZ 分类）、室形指数和墙面平均反射比等参数得出的标量照度换算系数，查《照明设计手册》第三版第 156 页图 5-32；ρ_f 为地板反射比。

对于没有上射光通量的直接型灯具及上射光通比小于25%的半直接型灯具，由相应的BZ1～BZ10曲线求K_s。如果照明灯具是间接型全部光通均向顶棚照射，由相应的C曲线求K_s。对于均匀漫射型和半间接型灯具，要根据其上射光通量与下射光通量在水平面上分别产生的照度占工作面总照度的比例，在BZ曲线、C曲线所求K_s值之间求内插值。

2）平均柱面照度的计算公式如下：

$$E_c = E_h(K_c + 0.5\rho_f)$$

式中，E_c为平均柱面照度（lx）；K_c为换算系数，$K_c = 1.5K_s - 0.25$，使用配光特性（BZ分类）、室形指数RI和墙面平均反射比ρ_w，根据灯具类型查图5-32得出换算系数K_s，再进行换算；其余符号意义同上。

例题13-38：某一文化广场，广场面积为15000 m^2，已知对该广场的最低水平面照度要求不小于5 lx，若已知采用400 W的金属卤化物灯，灯具的效率为0.6，利用系数为0.7，照度均匀度为0.75，维护系数为0.7，则需要多少盏金属卤化物灯能满足要求？

（A）8盏　　（B）10盏　　（C）12盏　　（D）14盏

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第159～160页（第二版第224页）。

按$\eta = 0.6$，$U = 0.7$，$U_1 = 0.75$，$K = 0.7$条件，查《照明设计手册》第三版表5-23中金属卤化物灯的m值为0.064，故投光灯总功率为

$$PA = mE_{min}A = 0.064 \times 5 \times 15000\ \text{W} = 4800\ \text{W}$$

故墙面投光灯数量为

$$N = \frac{PA}{P_L} = \frac{4800}{400}\text{盏} = 12\ \text{盏}$$

【知识点解析】

单位面积功率按下列公式计算：

$$N = \frac{PA}{P_L}$$

$$P = \frac{P_L E_{min}}{\Phi_1 \eta U U_1 K} = \frac{E_{min}}{\eta_1 \eta U U_1 K} = mE_{min}$$

$$m = \frac{1}{\eta_1 \eta U U_1 K}$$

式中，η_1光源的光效率（lm/W）；N为投光灯盏数；A为被照面的面积（m^2）；E_{min}为被照水平面上的最低照度（lx）；Φ_1为投光灯中光源的光通量（lm）；η为灯具的效率；U为利用系数；U_1为照度均匀度；K为灯具的维护系数，一般取0.65～0.70。

按照$\eta = 0.6$，$U = 0.7$，$U_1 = 0.75$，$K = 0.7$，表13-17给出了不同光源的m值。

表13-17　不同光源的m值

光源种类	白炽灯	卤钨灯	荧光高压汞灯	金属卤化铁灯	高压钠灯	氙灯
m	0.234	0.222	0.089	0.064	0.049	0.148

例题13-39：该建筑物一外墙面积为900 m^2，前面材料采用浅色大理石，反射比为0.6，拟用400 W的金属卤化物投光灯作泛光照明，要求立面平均照度为50 lx，投光灯光源光通量

为 32000 lm，灯具效率为 0.63，灯具维护系数为 0.65，若光通量入射到被照面上的投光灯盏数占总数的 50%，查得利用系数为 0.7，按光通法计算该墙面投光灯数量至少应为下列哪一项。(供配电 2014 年考题)

(A) 4 盏　　(B) 5 盏　　(C) 7 盏　　(D) 10 盏

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 160 页（第二版第 224 页）。

墙面投光灯数量为

$$N=\frac{E_{av}A_0}{\Phi_1\eta UU_1K}=\frac{50\times900}{32000\times0.63\times0.7\times0.65}=4.9，取\ 5\ 盏$$

【知识点解析】

1）投光灯的平均照度（光通量法）按照下式计算：

$$E_{av}=\frac{N\Phi_1U\eta K}{A}$$

式中，E_{av}为工作面上的平均照度（lx）；Φ_1为投光灯中光源的光通量（lm）；N 为光源数量；U 为利用系数；A 为工作面的面积（m^2）；K 为灯具的维护系数；η 为灯具的效率。

2）利用系数是指光源的光通量入射到工作面上的百分比，可根据光通量全部入射到被照面上的投光灯盏数的百分比，从表 13-18 中选取。

表 13-18　利用系数 U 值选择表

光通量全部入射到被照面上的投光灯盏数占总盏数的百分比（%）	U
80 及其以上	0.9
60 及其以上	0.8
40 及其以上	0.7
20 及其以上	0.6
20 以下	0.5

注：① 夜景照明中的光通量法与投光灯的平均照度法相同。

② 投光灯的平均照度法计算时的利用系数是指光源的光通量入射到工作面上的百分比对应的利用系数，其与单位面积容量法、普通室内计算不同。

例题 13-40～13-41：某小区项目地下一层车库，整个地下车库室外地面为别墅建筑区，导光管采光系统位于绿化区，地下车库长度为 62.7 m，进深 40.8 m，梁底距离地下车库室内地面高度为 4.95 m。本工程拟用 DS530 产品，地下车库地面照度要求为 30 lx，以此标准进行导光管照明设计。截取设计布点如图 13-26 所示。导光管采光系统设计间距为 8.4 m，设计布置 25 套导光管采光系统，每套导光管采光系统的有效采光面积为 50 m^2，导光管采光面积为 1250 m^2，其地区室外天然光设计照度值为 15000 lx。请回答以下设计问题。

13-40：该建筑物导光管采光系统的直径为 530 mm，平均每个导光管直线段长度为 3000 mm（不含弯头），中间有一个 60°弯头，采光罩的可见光透射比为 0.87，漫射器的透射比为 0.88，反射比为 0.99，计算导光管采光系统漫射器的设计输出光通量为下列哪一项数值。

(A) 1950 lm　　(B) 2203 lm　　(C) 2350 lm　　(D) 2405 lm

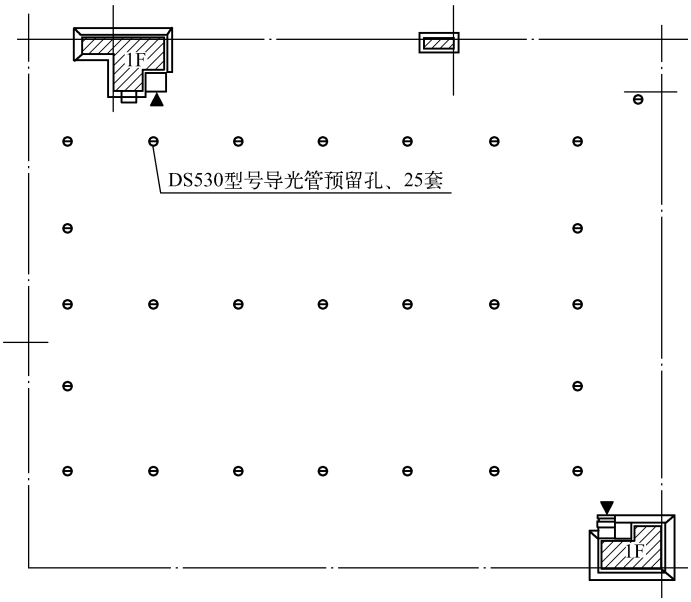


图 13-26　导光管采光系统地上采光罩及预留空间示意图

答案：【 B 】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 167~170 页。

查表 5-29 中 60°弯头等效长度为 4.5，导光管的等效长度为

$$M=L/D+M'=\frac{300}{530}+4.5=10.16$$

查表 5-30 中 $M=10.16$ 时，TTE=0.872（插值法），导光管的系统效率：

$$\eta=\tau_1\times TTE\times\tau_2=0.87\times0.872\times0.88=0.6676$$

查表 5-31 中 $A_t=0.22$ 导光管采光系统漫射器的设计输出光通量为

$$\Phi_U=E_sA_t\eta=15000\times0.22\times0.6676\,\text{lm}=2203.08(\text{lm})$$

13-41：若建筑物导光管采光系统漫射器的设计输出光通量为 2310 lm，顶棚反射比为 0.5，墙面反射比为 0.1，地面反射比为 0.2，维护系数为 0.9，请计算使用导光管采光系统的地下车库地面平均照度为下列哪一项数值，是否满足设计要求。

（A）23.6 lx，不满足　（B）28.3 lx，不满足　（C）33.8 lx，满足　（D）38.3 lx，满足

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 167~170 页。

室形指数 RCR 值：　$RCR=\dfrac{5h_x(l+b)}{lb}=\dfrac{5\times4.95\times(62.7+40.8)}{62.7\times40.8}=1$

查表 5-27 采光利用系数为 $CU=0.92$，地下车库地面平均照度为

$$E_{av}=\frac{n\times\Phi_U\times CU\times MF}{S}=\frac{25\times2310\times0.92\times0.9}{1250}\,\text{lx}=38.3\,\text{lx}>30\,\text{lx},\text{满足设计要求}$$

13.5 其他环境照明设计

【知识点说明】

其他环境照明设计一般根据平均照度计算、点光源计算等结合实际场景做出简单的照明设计。重要多次考到的环境计算特殊性的有道路照明、学校照明、体育场照明、医院照明、夜景照明；普通的多次考到的有办公室照明、工厂照明；冷门未考到的有电视演播室照明、会展展品照明等。

1）道路照明设计属于重要考点。要求掌握道路照明标准和灯具选择、道路灯具布置和安装高度与间距的计算；熟练掌握道路平均照度计算和利用系数计算。由于《城市道路照明设计标准》CJJ 45—2015 的更新，《照明设计手册》第三版中的对应内容已经改变，请各位考生注意。

2）学校照度计算属于重要考点。要求掌握学校照明标准和灯具选择；熟练掌握教室一般照明、黑板照明设计和照度计算。

3）体育场、医院、办公室、工厂照明设计属于重要考点。要求掌握相关照明标准和灯具选择。

4）电视演播室、会展展品等照明设计属于冷门考点。要求了解该环境的照明设计特点。

依据书目：

《建筑照明设计标准》GB 50034—2013

《照明设计手册》第三版

参考书目：

《城市道路照明设计标准》CJJ 45—2015

《体育场馆照明设计及检测标准》JGJ 153—2007

《建筑照明术语标准》JGJ/T 119—2008

《电气照明技术》孙建民主编

例题 13-42~13-45：某城市道路，路面为沥青混凝土，路宽 21 m，采用双侧对称布置灯，灯具仰角 θ 为 15°，如图 13-27 所示，请回答下列问题。

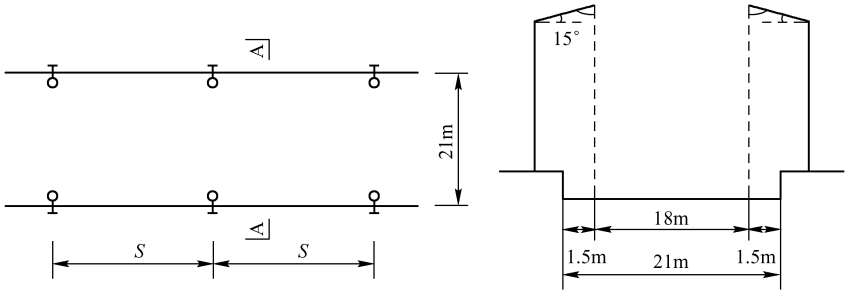


图 13-27　道路灯具布置示意图及 A—A 剖面

13-42：道路表面为均匀漫反射表面，其表面亮度为 1.0 cd/m^2，已知路面反射比为 0.2，则道路表面照度值应为下列哪项数据？（供配电 2009 年考题）

（A）10 lx　　（B）16 lx　　（C）21 lx　　（D）31 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 3 页（第二版第 2 页）。

路面为均匀漫反射时，根据 $L=\frac{\rho}{\pi}E$ 推导出道路表面照度值为

$$E=L\frac{\pi}{\rho}=1.0\times\frac{3.142}{0.2}\text{lx}=15.71\text{ lx}$$

【知识点解析】

对于均匀漫反射表面，其表面亮度 L 与表面照度 E 有以下关系：

$$L=\frac{\rho}{\pi}E$$

对于均匀漫透射表面，其表面亮度 L 与表面照度 E 则有：

$$L=\frac{\tau E}{\pi}$$

式中，L 为表面亮度（cd/m^2）；ρ 为表面反射比；τ 为表面透射比；E 为表面的照度（lx）；π 为常数 3.1416。

13-43：若道路的路面平均亮度维持值 L_{av} 为 1.5 cd/m，该道路的路面亮度符合下列哪一种路照明设计标准？（供配电 2009 年考题）

（A）居住区道路　　（B）支路　　（C）次干路　　（D）主干路

答案：【D】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 393 页（第二版第 446 页）。

查表 18-3，快速路、主干路的平均亮度维持值为 1.5/2.0 cd/m^2，其中 1.5 cd/m^2 用于中小城市，符合主干道标准，选 D。

【知识点解析】

中国道路照明设计标准见表 13-19。

表 13-19　中国道路照明设计标准

级别	道路类型	路面亮度			路面照度		眩光限制最大初始值 TI（%）	环境比最小值 SR
		平均亮度维持值 L_{av}/（cd/m^2）	总均匀度最小值 U_0	纵向均匀度最小值 U_L	平均照度维持值 E_{av}/lx	均匀度最小值 U_E		
Ⅰ	快速路、主干路（含迎宾路、通向政府机关和大型公共建筑的主要道路、位于市中心或商业中心的道路）	1.5/2.0	0.4	0.7	20/30	0.4	10	0.5
Ⅱ	次干路	0.75/1.0	0.4	0.5	10/15	0.35	10	0.5
Ⅲ	支路	0.5/0.75	0.4	—	8/10	0.3	15	—

注：1. 表中所列的平均照度仅适用于沥青路面。若系水泥混凝土路面，其平均照度值可相应降低约 30%。

2. 计算路面的平均维持亮度或平均维持照度时应考虑光源种类、灯具防护等级和擦拭周期。

3. 表中各项数值仅适用于干燥路面。

4. 表中对每一级道路的平均亮度和平均照度给出了两档标准值，斜线的左侧为抵档值，右侧为高档值。

13-44：若灯具采用半截光型，灯具高度为 13 m，按灯具的配光类型、布置方式，计算灯具的间距不宜大于下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

（A）32.5 m　　（B）30 m　　（C）45.5 m　　（D）52 m

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 401 页（第二版第 452 页）。

查图 18-3、表 18-18，采用半截光型灯具，双侧对称布置时，灯具的间距 $s \leqslant 3.5h$。

灯具高度 $h=13$ m，所以灯具的间距 $s \leqslant 3.5 \times 13\ \text{m} = 45.5\ \text{m}$。

【知识点解析】

常规道路照明：

常规照明灯具的布置如图 13-28 所示，可分为单侧布置、双侧交错布置、双侧对称布置、中心对称布置和横向悬索布置。灯具的悬挑长度不宜超过安装高度的 1/4，灯具的仰角不宜超过 15°。

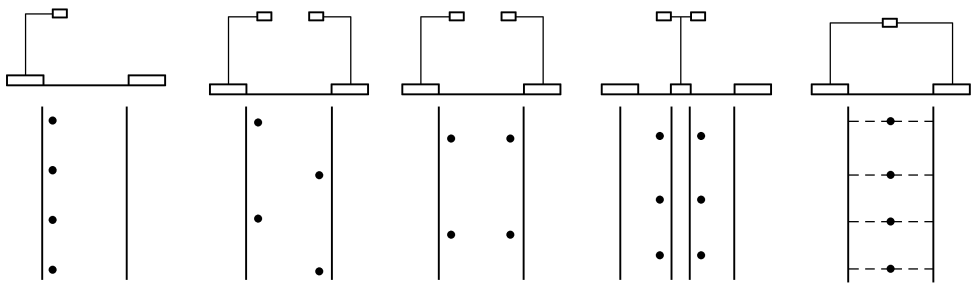


图 13-28　常规照明灯具布置的基本方式

灯具的布置方式、安装高度和间距按表 13-20 计算确定。

表 13-20　灯具的配光类型、布置方式与灯具的安装高度、间距的关系

配光类型	截光型		半截光型		非截光型	
布置方式	安装高度 h/m	间距 s/m	安装高度 h/m	间距 s/m	安装高度 h/m	间距 s/m
单侧布置	$h \geqslant w$	$s \leqslant 3h$	$h \geqslant 1.2w$	$s \leqslant 3.5h$	$h \geqslant 1.4w$	$s \leqslant 4h$
双侧交错布置	$h \geqslant 0.7w$	$s \leqslant 3h$	$h \geqslant 0.8w$	$s \leqslant 3.5h$	$h \geqslant 0.9w$	$s \leqslant 4h$
双侧对称布置	$h \geqslant 0.5w$	$s \leqslant 3h$	$h \geqslant 0.6w$	$s \leqslant 3.5h$	$h \geqslant 0.7w$	$s \leqslant 4h$

注：w 为路面有效宽度（m）。

13-45：若灯具高度为 13 m，光源采用 150 W 高压钠灯，光通量为 16000 lm，维护系数为 0.65，灯具间距 25 m，灯具在人行道侧和车道侧的利用系数按表 13-21 和表 13-22 选择，则道路平均照度为下列哪项数值？（供配电 2009 年考题）

表 13-21　人行道侧灯具利用系数

横向距离比 oh/h	0.100	0.115	0.140	0.165
利用系数 U_2	0.03	0.04	0.05	0.06

表 13-22　车道侧灯具利用系数

横向距离比 w_1/h	1.100	1.200	1.300	1.400
利用系数 U_1	0.27	0.29	0.31	0.33

（A）7 lx　　（B）15 lx　　（C）23 lx　　（D）29 lx

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 405~406 页（第二版第 455 页）。

查题目中图，灯具高度 $h=13\ \text{m}$，人行道侧宽 $oh=1.5\ \text{m}$，车道侧宽 $w_1=19.5\ \text{m}$。

人行道宽 $oh/h=1.5/13=0.115$，查表 13-21，利用系数 $U_1=0.04$。

车道宽 $w_1/h=19.5/13=1.5$，查表 13-22，利用系数 $U_2=0.34$（插值法）。

利用系数合计：$U=U_1+U_2=0.04+0.34=0.38$

道路平均照度：$E_{av}=\dfrac{\Phi UKN}{sw}=\dfrac{16000\times0.38\times0.65\times2}{25\times21}\text{ lx}=15\text{ lx}$

【知识点解析】

计算道路平均照度 E_{av} 和灯间距 s 的公式如下：

$$E_{av}=\frac{\Phi UKN}{sw},\quad s=\frac{\Phi UKN}{E_{av}w}$$

式中，Φ 为光源的总光通量（lm）；U 为利用系数（由灯具利用系数曲线查出）；K 为维护系数；w 为道路宽度（m）；s 为路灯安装间距（m）；N 为与排列方式有关的数值，当路灯一侧排列或交错排列时 $N=1$，相对矩形排列时 $N=2$。

注：常规道路照明利用系数确定：

路灯的利用系数曲线是以灯垂直路面的垂线为界，一侧为车道侧，另一侧为人行道侧的条件绘制的。利用系数的变化按照路宽 w 与灯的安装高度 h 之比 w/h 给出相关曲线值。

路灯在道路一侧照明利用系数 U 应分别按照图 13-29a 灯具布置和图 13-29b 利用系数曲线求出，总利用系数 $U=U_1+U_2$，即人行道 oh/h 对应的利用系数 U_2 与车道宽 w_1/h 对应的利用系数 U_2 之和。

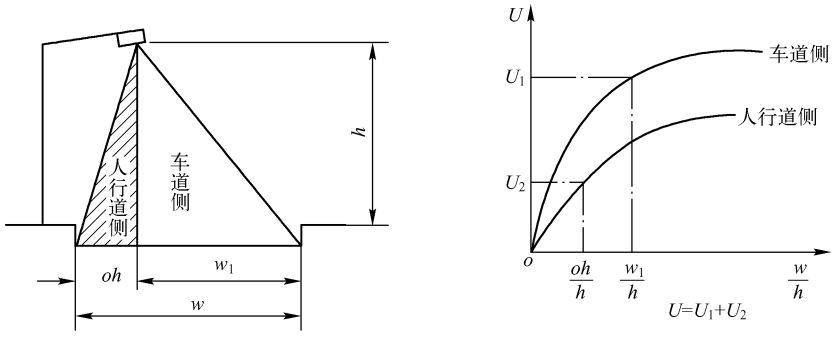


图 13-29　路灯在道路一侧照明利用系数计算

a）灯具布置　b）利用系数曲线

例题 13-46~13-50：某大学有多个教室需要照明设计，请回答下列问题并列出解答过程。

13-46：若该大学某教室按多媒体室选择光源色温，照明器具统一光值和照度标准值，下列哪一项是正确的？（供配电 2012 年考题）

（A）色温 4900 K，统一眩光值不大于 19，0.75 m 水平面照度值 300 lx

（B）色温 4900 K，统一眩光值不大于 19，地面照度值 300 lx

（C）色温 6500 K，统一眩光值不大于 22，0.75 m 水平照度值 500 lx

（D）色温 6500 K，统一眩光值不大于 22，地面照度值 500 lx

答案：【A】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

多媒体教室色温应为 3300～5300 K，眩光值不大于 19，0.75 m 水平面照度值为 300 lx，选 A。

【知识点解析】

室内照明光源色表特征及适用场所宜符合表 13-23 的规定。

表 13-23　光源色表特征及适用场所

相关色温/K	色表特征	适用场所
<3300	暖	客房、卧室、病房、酒吧
3300～5300	中间	办公室、教室、阅览室、商场、诊室、检验室、实验室、控制室、机加工车间、仪表装配
>5300	冷	热加工车间、高照度场所

13-47：该大学的某普通教室顶棚、墙面四白落地，水泥地面，前面讲台和后面班级板报均有黑板。若教室采用在顶棚上均匀布置荧光灯的一般照明方式，灯具的长轴和黑板垂直，另外，为保证黑板的垂直照度高于教室平均照度及较好的均匀度，设置黑板照明专用灯具，则黑板照明应选择下列哪种配光特性的专用灯具？（供配电 2006 年考题）

（A）非对称光强分布　　（B）蝙蝠翼式光强分布

（C）对称光强分别　　（D）余弦光强分布

答案：【A】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 191 页（第二版第 247 页）。

黑板照明选择宜采用有非对称光强分布特性的专用灯具。灯具在学生侧保护角宜大于 40°，使学生不感到直接炫光，选 A。

13-48：若该大学某教室的黑板采用对称光强分布特性的专用灯具照明，黑板照明灯具安装位置如图 13-30 所示。若在讲台上教室的水平视线距地 1.85 m，距黑板距离为 0.7 m，为使黑板等不会对教师产生较大的直接眩光，黑板灯具不应安装在教师水平视线 θ 度以内位置，黑板灯安装位置与黑板的水平距离 L 不应大于下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）1.85 m　　（B）1.92 m　　（C）2.45 m　　（D）2.78 m

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 192 页（第二版第 248～249 页）。

为使黑板等不会对教师产生较大的直接眩光，黑板灯具不应安装在教师水平视线 $\theta=45°$，如图 13-27 所示，黑板灯安装位置与黑板的水平距离不应大于：

$$L=[0.7+(3.6-1.85)\times\cot 45°]\,\mathrm{m}=2.45\,\mathrm{m}$$

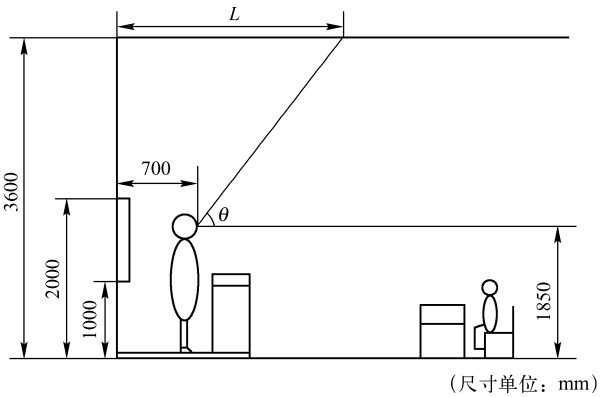


图 13-30　黑板照明示意图

【知识点解析】

黑板照明：

教室内如果仅设置一般照明灯具，黑板上的垂直照度很低，均匀度差，因此对黑板应设专用灯具照明，其照明要求如下：

1）宜采用有非对称光强分布特性的专用灯具，其光强分布如图 13-31 所示。灯具在学生侧保护角宜大于 40°，使学生不感到直接眩光。

2）黑板照明不应对教师产生直接眩光，也不应对学生产生反射眩光。在设计时，应合理确定灯具的安装高度及与黑板墙面的距离。

图 13-32 示出了教师、学生、黑板与灯具之间的关系。

由图 13-32 可得到以下布灯原则：

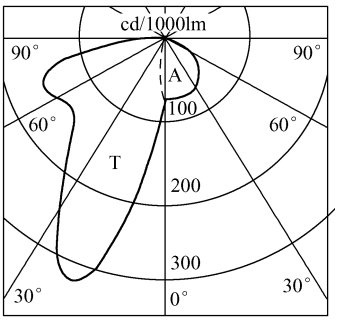


图 13-31　黑板照明灯具非对称光强分布图

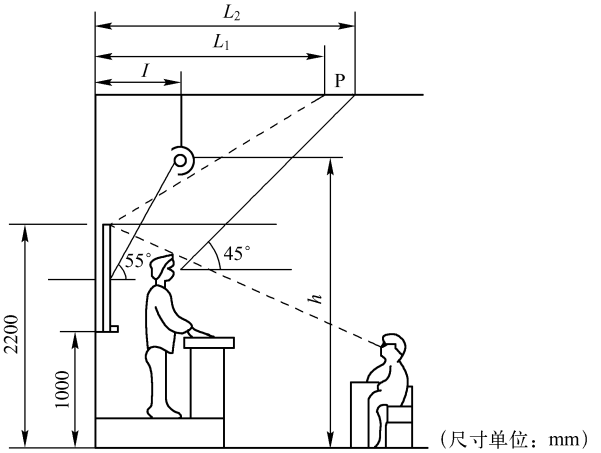


图 13-32　黑板照明灯具安装位置示意图

① 为避免对学生产生反射眩光，黑板灯具的布灯区为：第一排学生看黑板顶部，并以此视线反射至顶棚求出映像点距离 L_1，以 P 点与黑板顶部作虚线连接，如图 13-32 所示，灯具应布置在该连接虚线以上区域内。

② 灯具不应布置在教师站在讲台上水平视线 45°仰角以内位置，即灯具与黑板的水平距

离不应大于 L_2，否则会对教师产生较大的直接眩光。

③ 为确保黑板有足够的均匀度，灯具光轴最好以 55°入射到黑板水平中心线上，或灯具光轴瞄准点下移至距黑板底部向上 1/3 处更为理想。

黑板照明灯具有三种安装方式，分别为嵌入式、吊装式和壁装式。

13-49：该大学的某普通教室宽约 10 m，长约 15 m，高约 3.5 m，顶棚、墙面四白落地，水泥地面，前面讲台和后面班级板报均有黑板。为使教室照度分布均匀，宜采用下列哪种规格的灯具？（供配电 2006 年考题）

（A）三管 36 W 格栅灯　　（B）三管 40 W 格栅灯

（C）三管普通支架荧光灯　　（D）单管配照型三基色荧光灯

答案：【D】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

第 3.2.2 条 灯具安装高度较低的房间宜采用细管直管形三基色荧光灯。

第 3.3.2 条 在满足眩光限制和配光要求条件下，应选用效率或效能高的灯具，直管形荧光灯灯具的效率表 3.3.2-1 中，开敞式灯具效率 75%最高。

依据《照明设计手册》第三版第 246~247 页。

教室照明宜采用灯具效率不低于 75%配照型稀土三基色直管荧光灯。

13-50：该大学的某普通教室宽约 10 m，长约 15 m，高约 3.5 m，顶棚、墙面四白落地，水泥地面，前面讲台和后面班级板报均有黑板。如果选用 T8 型 36 W 荧光灯，已知 T8 型 36 W 光源光通量为 3250 lm，灯具维护系数为 0.8，计算利用系数为 0.58，每个灯管配置的整流器功率为 4 W。在不考虑黑板专用照明的前提下，应配置多少只光源才能满足平均照度及照明功率密度值的要求？（供配电 2006 年考题）

（A）30，满足　　（B）32，不满足　　（C）34，不满足　　（D）50，满足

答案：【A】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 和《照明设计手册》第三版第 148 页（第二版第 214 页）。

第 5.3.7 条表 5.3.7　教室课桌面照明标准值为 300 lx，满足标准的灯源数量为

$$N=\frac{E_{av}A}{\Phi UK}=\frac{300\times10\times15}{3250\times0.58\times0.8}=29.8,\text{取 30 盏}$$

依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013。

第 2.0.53 条　30 盏时功率密度：$LPD=\frac{\sum P}{A}=\frac{30\times(36+4)}{10\times15}\text{W/m}^2=8\text{ W/m}^2$

第 6.3.7 条表 6.3.7　教室功率密度限值为 9 W/m^2，本教室功率密度满足规范要求。

例题 13-51~13-53：某体育场有照明设施和管理用房，其场地灯光布置采用四塔照明方式，其中灯塔位置如图 13-33 所示，灯塔距离场地中心点水平距离为 103 m，场地照明灯具采用金属卤化物灯，请回答下列问题。

13-51：该体育场灯塔最下排的投光灯至体育场地的垂直距离最少不宜小于下列哪个数值？（供配电 2008 年考题）

（A）27.6 m　　（B）37.5 m　　（C）48.0 m　　（D）54.8 m

答案：【C】

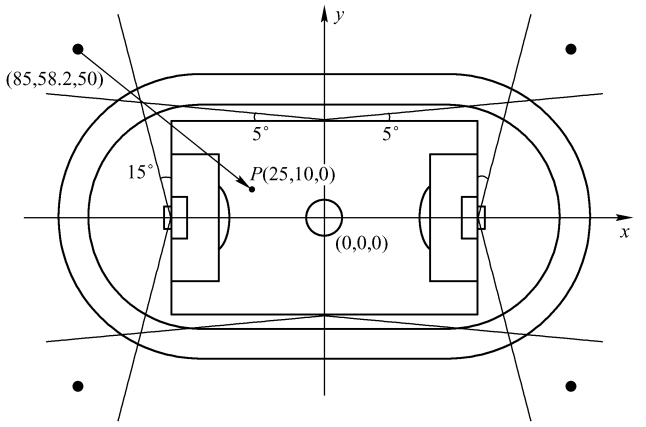


图 13-33　体育场平面示意图

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 320 页（第二版第 377 页）。

体育场照明设施是四塔式布置，灯塔恰当位置见图 13-34，最下排投光灯至场地中心连线与水平线的夹角宜为 25°，由此确定灯塔的高度。故设最下排的高度为 h，灯塔距离场地中心点水平距离 d 为 103 m，$\frac{h}{d}=\tan 25°$，灯塔最下排的投光灯至体育场地的垂直距离为

$$h = d \cdot \tan 25° = 103 \times 0.4663\ \text{m} = 48\ \text{m}$$

【知识点解析】

体育场的照明设施常用四塔式的布置，在场地四角设置四灯塔，塔高一般为 35～60m，常用窄光束灯具。灯塔恰当位置如图 13-34 所示，最下排投光灯至场地中心与地面夹角宜为 25°，由此确定灯塔的高度，因此，灯塔距场地中心点的距离不同，灯塔的高度也不同，见表 13-24；球门中线与场地端线成 15°以及半场中心线与边线成 5°的两条相交叉点后延长线形成的三角区域内为布置灯塔的位置。

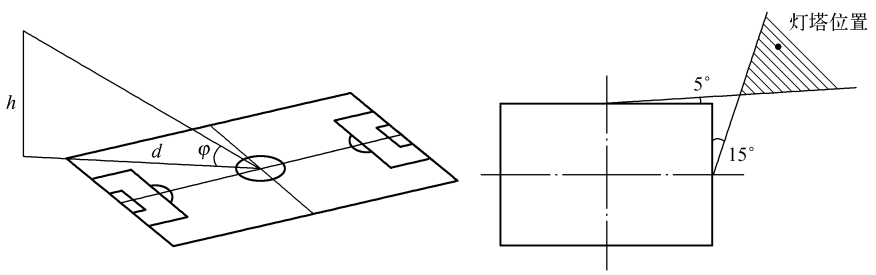


图 13-34　四塔布灯灯塔的位置

表 13-24　灯塔高度 h 与灯塔至场地中心点距离 d 的关系

d/mm	76	80	85	90	95	100
h/m	35.4	37.3	39.6	42.0	44.3	46.6

注：表中 $\varphi=25°$，h 为灯塔最下排投光灯至场地的垂直距离。因此，灯塔的实际高度应加上灯塔的高度。

13-52：假设场地面积为 17360 m^2，要求场地水平面上的平均照度为 1600 lx，场地照明灯具采用 2000 W 金属卤化物灯，光源光通量为 200000 lm，镇流器功率为光源功率的 10%，

灯具效率为0.8，利用系数取0.8，灯具维护系数取0.7，则场地照明总功率为下列哪项数值？（不考虑四塔灯数量的均等）（供配电2008年考题）

（A）385 kW　　（B）550 kW　　（C）682 kW　　（D）781 kW

答案：【C】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第160页（第二版第225页）。

体育场场地照明灯具数量：

$$N=\frac{E_{av}A}{\Phi_1 U\eta K}=\frac{1600\times 17360}{200000\times 0.8\times 0.8\times 0.7}=310$$

场地照明总功率：$\sum P=NP'(1+10\%)=310\times 2\times 1.1\ \text{kW}=682\ \text{kW}$

13-53：假设场地中心为参考坐标原点(0,0,0)，现灯塔上某一灯具S，其坐标$x=-85\ \text{m}$，$y=58.2\ \text{m}$，$z=50\ \text{m}$，其瞄准点为P，坐标为$x_p=-25\text{m}$，$y_p=10\ \text{m}$，$z_p=0$。若灯具为2000 W金属卤化物灯，光源光通量为200000 lm。查得投光灯S射向P点的光强值$I=2100000\ \text{cd}$，灯具维护系数取0.7，考虑灯具维护系数后在P点处垂直面照度应为下列哪项数值？（供配电2008年考题）

（A）146 lx　　（B）95 lx　　（C）209 lx　　（D）114 lx

答案：【A】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第161~163页（第二版第226页）。

投光灯S射向P点处垂直面照度：

$$\begin{aligned}E_v&=\frac{I_{(\alpha\cdot\beta)}[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2]}{[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2]^{\frac{3}{2}}}\\&=\frac{2100000\times[(-25+85)^2+(10-58.2)^2]}{[(-25+85)^2+(10-58.2)^2+(0-50)^2]^{\frac{3}{2}}}\ \text{lx}\\&=209\ \text{lx}\end{aligned}$$

考虑灯具维护系数后：$E'_v=0.7\times 209\ \text{lx}=146\ \text{lx}$

【知识点解析】

点照度方位系数法（逐点法）计算：

投光灯S对P点产生的点照度计算，计算方法等同于点照度水平面坐标系，关键在求出SP距离（相等于R）和与水平面（XY面）的法线的夹角δ，其他等同于点照度计算。投光灯S对P点产生的照度计算，如图13-35所示。

入射角

$$\cos\delta=\frac{z-z_0}{[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2]^{1/2}}$$

$$\delta=\arccos\frac{z-z_0}{[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2]^{1/2}}$$

水平面照度

$$E_h=\frac{I_{(\alpha\cdot\beta)}\cos\delta}{(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2}$$

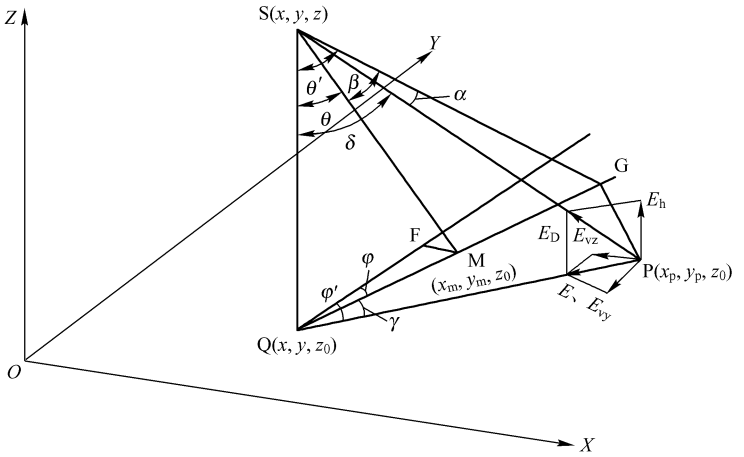


图 13-35　投光灯的各方向点照度

$$=\frac{I_{(\alpha\cdot\beta)}(z-z_0)}{[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2]^{3/2}}\ (\mathrm{lx})$$

垂直面照度

$$E_v=\frac{I_{(\alpha\cdot\beta)}\sin\delta}{(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2}$$

$$=\frac{I_{(\alpha\cdot\beta)}[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2]^{1/2}}{[(x_p-x)^2+(y_p-y)^2+(z_0-z)^2]^{3/2}}\ (\mathrm{lx})$$

计算照度时，需应用投光灯的等光强曲线图或光强光通分布图，查得投光灯射向 P 点的光强值 $I_{(\alpha\cdot\beta)}$。

例题 13-54：已知大型绘画展其中一绘画展品台如图 13-36 所示，S 点为荧光灯光源，绘画展品悬挂在垂直墙面上，若观赏者的水平视线高度为 1.55 m，最小观赏距离为 1 m，为使观赏者欣赏绘画展品时有良好的亮度对比，光源距墙壁的距离为下列哪一项数值？

（A）1.36 m　　（B）1.44 m　　（C）1.56 m　　（D）1.62 m

答案：【B】

解答过程：依据《照明设计手册》第三版第 364 页（第二版第 418 页）。

根据垂直面上平面展品与光源位置关系（图 13-36），光源 S 与吊顶的夹角宜为 30°，光源 S 距墙壁的距离 L 为

$$L=y\tan30°=2.5\times\tan30°\,\mathrm{m}=1.44\,\mathrm{m}$$

【知识点解析】

垂直墙面上的展品一般采用荧光灯，使得垂面有良好的亮度对比。垂面上平面展品与光源位置关系为

$$x=y\tan30°$$

式中，x 为灯具与展墙的距离；y 为空间净高减去平均眼高。

采用发光板照明时，发光板周围的亮度应小于发光板亮度的 1/10，但也不宜小于 1/50，展柜中可以使用荧光灯也使用白炽灯（注意解决散热），要隐藏柜中的光源，保证大型展柜

的柜内照度均匀，均匀度不宜小于0.3。垂直面上平面展品之光源位置如图13-37所示。

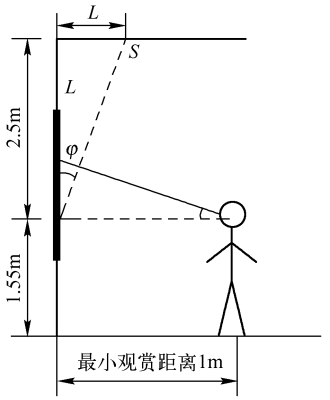


图13-36　绘画展品台示意图

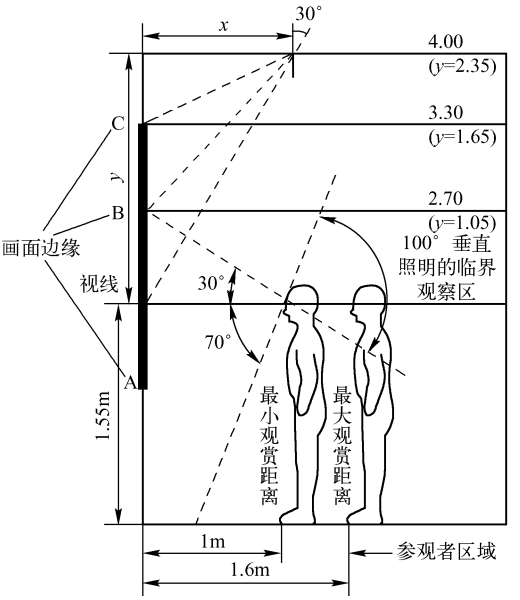


图13-37　垂直面上平面展品之光源位置

13.6　照明系统供配电要求

【知识点说明】

照明系统供配电要求与其他多个章节有重合内容，如照明的负荷等级对配电设计和照明电压的要求，需要结合《供配电系统设计规范》GB 50052—2009、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《20 kV及以下变电所设计规范》GB 50053—2013，对配电系统进行设计；如照明电缆的选择需要结合《低压配电设计规范》GB 50054—2011和《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007，特别是谐波含量较大时的电缆选择；如应急照明设计需要结合《建筑设计防火规范》GB 50016—2014相关设计要求。考生需要理解对应的重叠内容。

依据书目：

《建筑照明设计标准》GB 50034—2013

《照明设计手册》第三版

《供配电系统设计规范》GB 50052—2009

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《电力工程电缆设计规范》GB 50217—2007

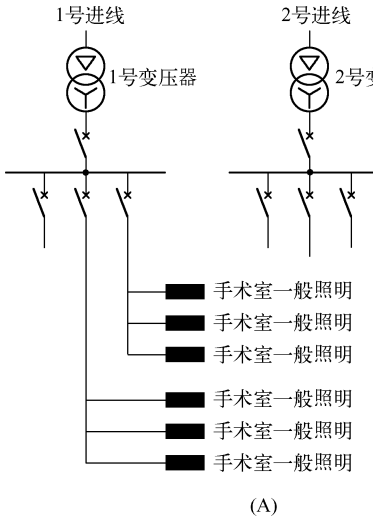
《建筑设计防火规范》GB 50016—2014

《低压配电设计规范》GB 50054—2011

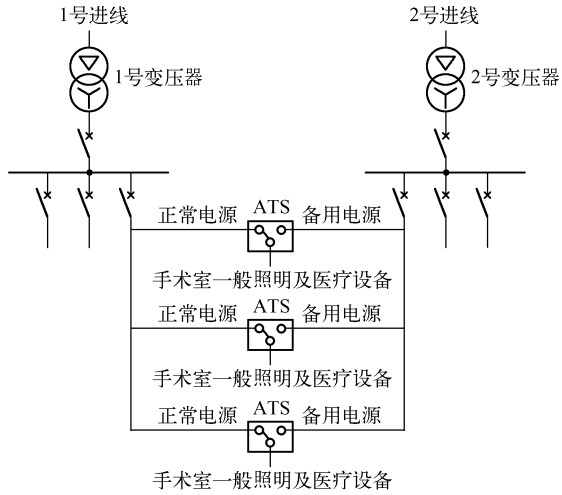
参考书目：

《电气照明技术》孙建民主编

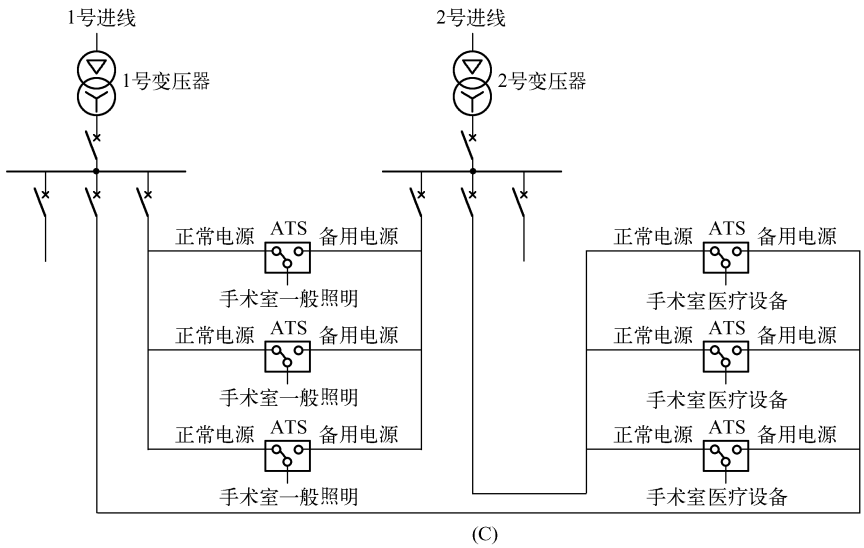
例题 13–55：某三甲级医院变电室由两个高压电源供电，各带 1 台变压器，每台变压器低压单母线配出，1 号变压器主要带照明负荷，2 号变压器主要带动力负荷。下述 4 个手术室供电电源方案中，哪个设计符合要求？



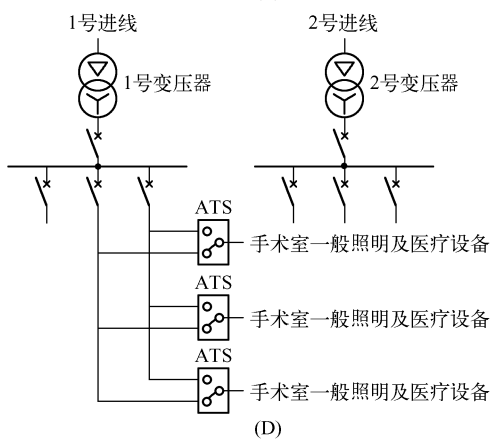
(A)



(B)



(C)



(D)

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 附录 A。

查表 A 中，普通手术室属于一级负荷。

依据《供配电系统设计规范》GB 50052—2009。

第 3.0.2 条　一级负荷应由双重电源供电，当一电源发生故障时，另一电源不应同时受到损坏。对应答案 A、D 只有一路电源供电，错误。

依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 4.4.3 条　手术室出于功能需要的某些特殊设备，可设专用变压器，该手术室 1 号变压器主要带照明负荷、2 号变压器主要带动力负荷。答案 B 中手术室一般照明和医疗设备混合供电不符合专用变压器的用途，错误。答案 C，手术室一般照明正常 1 号变压器供电，手术室医疗设备正常 2 号变压器供电，符合规范要求，选 C。

【知识点解析】

一级负荷供电要求：

一级负荷应由双重电源供电，当一电源发生故障时，另一电源不应同时受到损坏。

同时供电的两回及以上供配电线路中，当有一回路中断供电时，其余线路应能满足全部一级负荷及二级负荷。一级负荷容量较大或有高压用电设备时，应采用两路高压电源。一级负荷容量不大时，可采用从电力系统取得第二低压电源，亦可采用柴油发电动机组等，以维持继续供电。一级负荷的用电单位难以从地区电力网取得两个电源而有可能从邻近单位取得第二电源时，宜从该单位取得第二电源。

例题 13-56：当移动式和手提式灯具采用Ⅲ类灯具时，应采用安全特低电压（SELV）供电，在潮湿场所其电压限值应符合下列哪项规定？

（A）交流供电不大于 36 V，无波纹直流供电不大于 60 V

（B）交流供电不大于 36 V，无波纹直流供电不大于 100 V

（C）交流供电不大于 25 V，无波纹直流供电不大于 60 V

（D）交流供电不大于 25 V，无波纹直流供电不大于 100 V

答案：【C】

解答过程：依据《建筑照明设计标准》GB 50034—2013 第 7.1.3-2 条。

【知识点解析】

1）一般照明光源的电源电压应采用 220 V；1500 W 及以上的高强度气体放电灯的电源电压宜采用 380 V。

2）安装在水下的灯具应采用安全特低电压供电，其交流电压值不应大于 12 V，无纹波直流供电不应大于 30 V。

3）当移动式和手提式灯具采用Ⅲ类灯具时，应采用安全特低电压（SELV）供电，其电压限值应符合下列规定：

① 在干燥场所交流供电不大于 50 V，无纹波直流供电不大于 120 V。

② 在潮湿场所不大于 25 V，无纹波直流供电不大于 60 V。

4）照明灯具的端电压不宜大于其额定电压的 105%，且宜符合下列规定：

① 一般工作场所不宜低于其额定电压的 95%。

② 当远离变电所的小面积一般工作场所难以满足第 1 条要求时，可为 90%。

③ 应急照明和用安全特低电压（SELV）供电的照明不宜低于其额定电压的 90%。

例题 13-57：某市为某一个主干道安装 250 W 的高压钠灯作为道路照明，高压钠灯配用的镇流器为 38 W，为了提高功率因数，采用单独就地无功补偿，高压钠灯的功率因数补偿前为 0.4，补偿后为 0.9，给高压钠灯供电的变压器的容量为 100 kV·A，负载率按 80%考虑，计算高压钠灯补偿前及其补偿后的变压器可供电的路灯数量为下列哪项数值。

（A）95 盏，212 盏　（B）99 盏，222 盏　（C）111 盏，250 盏　（D）125 盏，272 盏

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 313 页例 13。

补偿前可供电的路灯个数：$N_1=\dfrac{\beta S}{S_1}=\dfrac{100\times 0.8}{(0.25+0.038)/0.4}$盏$=111.1$ 盏

补偿后可供电的路灯个数：$N_2=\dfrac{\beta S}{S_2}=\dfrac{100\times 0.8}{(0.25+0.038)/0.9}$盏$=250$ 盏

第 14 章　电 气 传 动

【知识点导图】

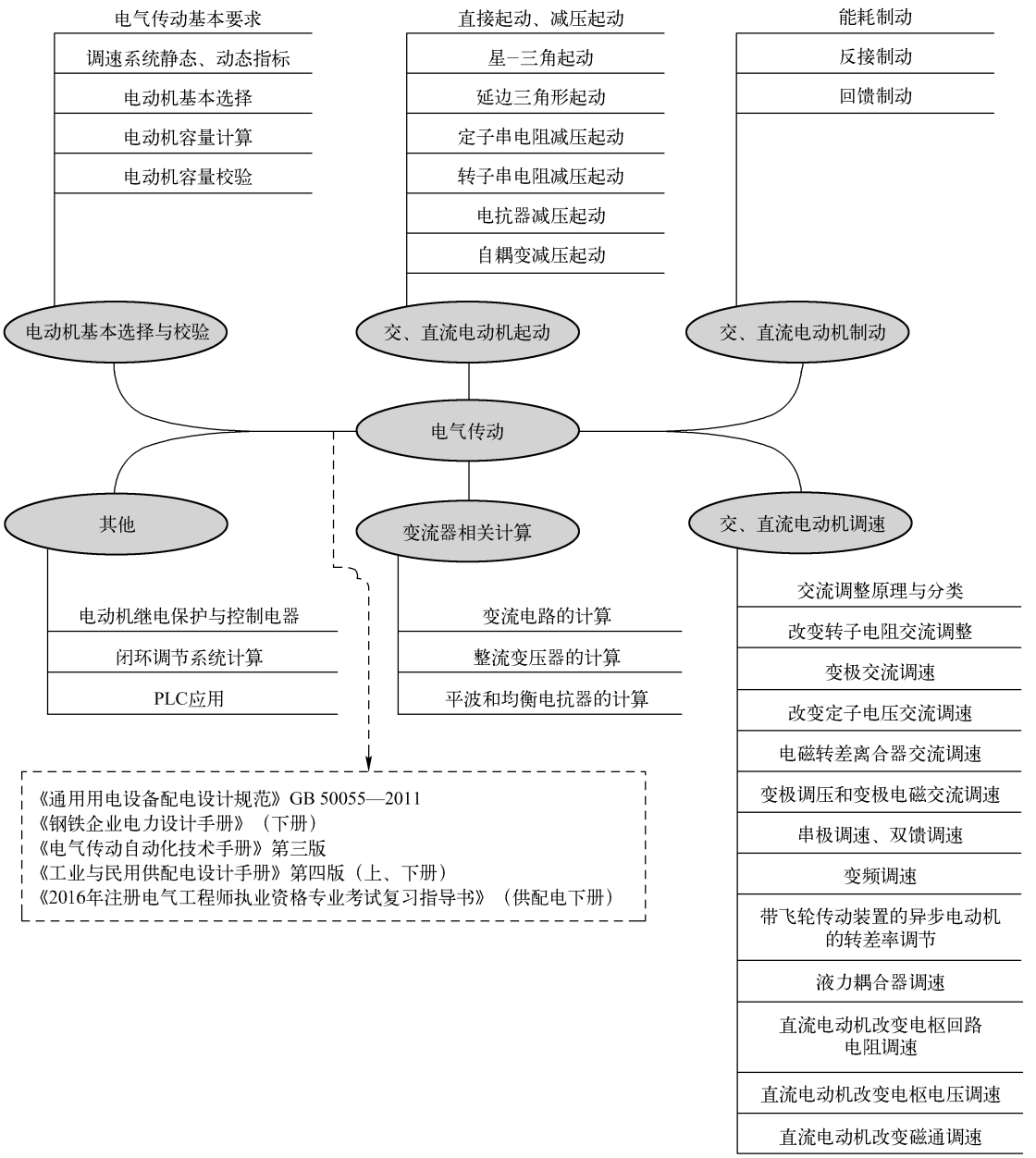


图 14-1　电气传动知识点导图

图 14-1 所示的电气传动知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。其中必考点是电动机起动时的电压降，其他考点众多，每年的题目都会轮换，冷门题目最多，一般都会超出大纲要求，请考生注意，本章给出了更多的未出现的冷门考点题目以供考生参考学习。

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）增加了 6.5 节电压暂降与短时中断小节，将电动机起动时的电压降归入电压暂降，该考点是电气传动的必考点，请考生注意。《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）12.1 节中对中小型电动机的选择和附属设备内容进行了更新，增加了 16.5 节电动机及调速的节电设计。

14.1 电动机基本选择与校验

【知识点说明】

1）电气传动基本要求属于普通考点，依据《电气传动自动化技术手册》第三版等。要求掌握电动机分类、工作制、生产机械负荷特性，以及调速系统的静态、动态指标。

2）电动机基本选择属于普通考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）12.1 节等。要求掌握电动机类型、调速要求、转速选择、外壳结构形式等。

3）电动机容量选择与校验属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求熟练掌握各种电动机容量计算、恒定负载连续工作制下电动机的校验；掌握短时工作制下电动机的校验、变动负载连续工作制下电动机的校验、电动机容量的修正。

依据书目：

《钢铁企业电力设计手册》（下册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

例题 14-1：某台 10 kV 笼型感应电动机的工作方式为负荷平稳连续工作制，额定功率为 800 kW。额定转速为 2975 r/min，电动机起动转矩倍数为 0.72，起动过程中的最大负荷转矩为 899 N·m。已知电动机的额定效率为 0.89，额定功率因数为 0.85，则电动机的额定电流为下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）35 A　　（B）48 A　　（C）54 A　　（D）61 A

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1072 页。

电动机的额定电流为

$$I_r=\frac{P_r}{\sqrt{3}U_r\eta\cos\varphi}=\frac{800}{\sqrt{3}\times10\times0.89\times0.85}\text{A}=61.05\text{A}$$

例题 14-2：某企业供电系统末端有一台交流异步电动机，如果电动机端子电压偏差为 -5%，忽略运行中其他参数变化，该电动机电磁转矩偏差百分数为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）10.6%　　（B）-9.75%　　（C）5%　　（D）0.25%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 256 页表 6-2 和《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 1 页表 23-1。

由式 $T=\dfrac{m_1}{\omega_s}\dfrac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s+r_2')^2+s^2 x_k^2}$，说明电动机电磁转矩与电动机端子电压的二次方成正比，即 $T\propto U^2$，$\Delta T=(1-0.05)^2-1=-9.75\%$。

例题 14-3：已知调速系统电动机空载转速为 470 r/min，电动机额定转速为 465 r/min，电动机带实际负载时转速为 468 r/min，则调速系统的静差率应为下列哪个数值？（供配电 2008 年考题）

（A）0.4%　　（B）0.6%　　（C）1.06%　　（D）1.08%

答案：【D】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 359 页。

调速系统的静差率为

$$静差率=\frac{n_0-n}{n}\times 100\%=\frac{470-465}{465}=1.075\%$$

例题 14-4：根据工艺要求，某热连轧机组 F1 机架基速为 180 r/min，额定负载工作时最高速为 426 r/min，最低速为 50 r/min。该机组调速范围为下列哪个数值？

（A）2.37∶1　（B）3.6∶1　（C）8.52∶1　（D）10∶1

答案：【C】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 359 页。

机组调速范围为

$$D=\frac{n_{max}}{n_{min}}=\frac{426}{50}=8.52$$

【知识点解析】

静差率又称为转速变化率，是指在某一设定转速下，负载由空载（$T=0.1T_N$）到额定负载（T_N）变化时，空载转速 n_0 与额定负载下的转速 n 之差的相对值（%），其基值是 n（见图 14-2）。

$$静差率=\frac{n_0-n}{n}\times 100\%$$

静差率与调速系统机械特性的硬度有关，特性越硬，静差率越小；另外，静差率还与工作转速有关，转速越低，静差率越大。

调速范围又称为调速比，是指在符合规定的静差率条件下，电动机从最高转速 n_{max} 到最低转速 n_{min} 的转速变化倍数（见图 14-3）。

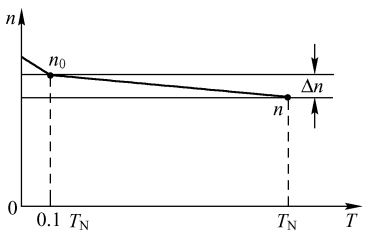


图 14-2　静差率示意

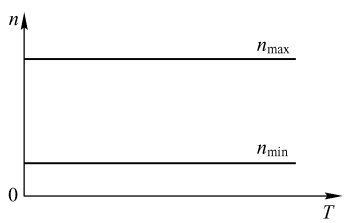


图 14-3　调速范围示意

$$\text{调速范围}=\frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

调速范围和静差率两项指标不是相互孤立的，必须同时提出才有意义。

例题 14-5：图 14-4 所示为同步电动机、异步电动机、串励直流电动机和他励直流电动机的自然机械特性曲线，图中曲线 3 是什么电动机的自然机械特性曲线？

（A）同步电动机　　（B）他励直流电动机

（C）串励直流电动机　（D）异步电动机

答案：【D】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 270 页。

曲线 3 为异步电动机的自然机械特性曲线。

例题 14-6：某台他励直流电动机改变电枢回路附加电阻时，特性曲线也随之变化，图 14-5所示为一台直流电动机电枢回路附加电阻分别为 R_0、R_1、R_2三种情况下的特性曲线。R_0、R_1、R_2的大小关系式为下列哪一项？

（A）$R_0<R_1<R_2$　　（B）$R_0>R_1>R_2$

（C）$R_0<R_2<R_1$　　（D）$R_0>R_2>R_1$

答案：【A】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 272 页。

由他励直流电动机的自然机械特性中附加电阻与转速的关系可知，$R_0<R_1<R_2$。

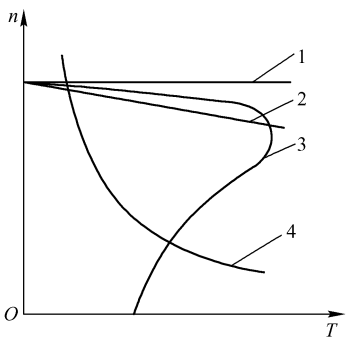


图 14-4　电动机的自然机械特性曲线

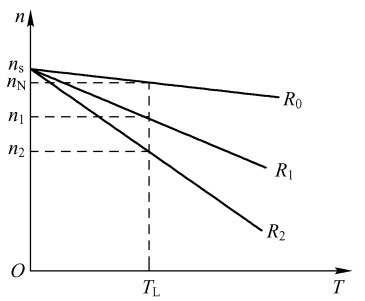
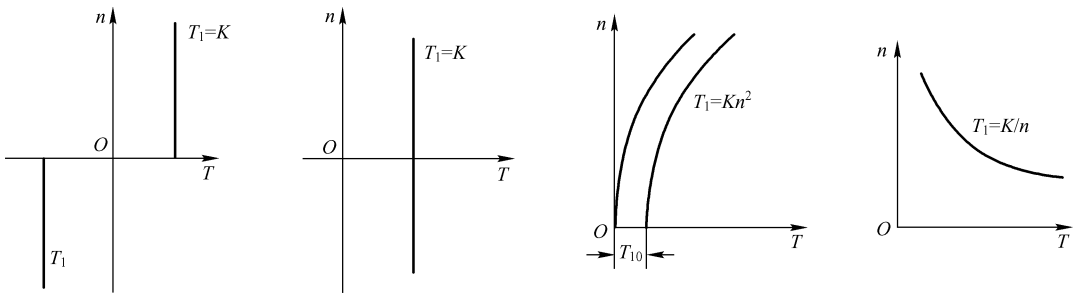


图 14-5　直流电动机特性曲线

例题 14-7：在工程设计中通常根据生产机械的负荷类型及工作制选用不同的电动机与之配套。生产机械的负载转矩 T 随转速 n 变化的特性 $T=f(n)$ 称为负载特性。选项中 4 组曲线为不同生产机械的负载曲线。4 个选项中哪个是恒功率负载？



答案：【D】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 274 页。

恒功率负载对应答案 D 曲线。

例题 14-8：图 14-6 所示为笼型异步电动机的起动特性，其中曲线 1、2 是不同定子电压时的起动机械特性，直线 3 是电动机的恒定静阻转矩线，下列哪些解释是正确的？

（A）曲线 1 的定子电压低于曲线 2

（B）曲线 2 的定子电源频率低于曲线 1

（C）电动机在曲线 2 时起动成功

（D）电动机已起动成功，然后转变至曲线 2 的定子电压，可继续运行

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 2 页续表 23-1。

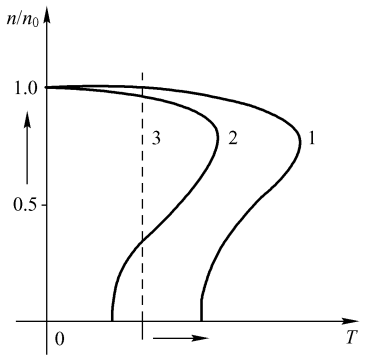


图 14-6　笼型异步电动机的起动特性曲线

曲线 1 的起动电压大于曲线 2，曲线 1 起动力矩大于曲线 2，A 错；

没有使用变频起动，起动时电源频率是相同的，B 错；

电动机在曲线 2 低速时小于直线 3 的静阻转矩，无法起动，C 错；

电动机在曲线 1 低速时大于直线 3 的静阻转矩，起动成功，电动机可从曲线 1 变至曲线 2 继续运行，D 对。

例题 14-9：某工程设计一电动机控制中心（MCC），其中最大一台笼型电动机额定功率 $P_{ed}=200\,kW$，关于电动机转速的选择，下列哪一项是错误的？（供配电 2012 年考题）

（A）对于不需要调速的高转速或中转速的机械，一般应选用相应转速的异步或同步电动机直接与机械相连接

（B）对于不需要调速的低转速或中转速的机械，一般应选用相应转速的电动机通过减速机来传动

（C）对于需要调速的机械，电动机的最高转速应与机械要求的最高转速相适应，并留存 5%~8%的向上调速的余量

（D）对于反复短时工作的机械，电动机的转速除能满足最高转速外，还需从保证生产机械达到最大的加减速度而选择最适合的传动比

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 9 页。

对于需要调速的机械，电动机的最高转速应与机械要求的最高转速相适应，并留存10%~15%的向上调速的余量。C 错。

例题 14-10~14-14：电动机负载转矩 $T_L = 1477\ \text{N}\cdot\text{m}$，起动过程中的最大静阻转矩 $T_{Lmax} = 562\ \text{N}\cdot\text{m}$，要求电动机转速 $n = 2900 \sim 3000\ \text{r/min}$，传动机械折算到电动机轴上的总飞轮力矩 $GD^2_{mec} = 1962\ \text{N}\cdot\text{m}^2$。初选笼型异步电动机，其参数如下：$P_N = 500\ \text{kW}$，$n_N = 2975\ \text{r/min}$，最大转矩倍数为 2.5，最小起动转矩倍数为 0.73，电动机转子飞轮力矩 $GD^2_M = 441\ \text{N}\cdot\text{m}^2$，包括电动机在内的整个传动系统所允许的最大飞轮力矩 $GD^2_o = 3826\ \text{N}\cdot\text{m}^2$。请回答以下问题。

14-10：负载功率最接近下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）400 kW　　（B）460 kW　　（C）600 kW　　（D）500 kW

答案：【B】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 288 页。

负载功率：

$$P = \frac{T_L n}{9550} = \frac{1477 \times (2900 \sim 3000)}{9550}\ \text{kW} = 448.51 \sim 463.98\ \text{kW}$$

14-11：所选 500 kW 电动机的额定转矩最接近下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）1200 N·m　　（B）1400 N·m　　（C）1600 N·m　　（D）1800 N·m

答案：【C】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 288 页。

电动机的额定转矩：

$$T_N = \frac{9550 P_N}{n_N} = \frac{9550 \times 500}{2975}\ \text{N}\cdot\text{m} = 1605.04\ \text{N}\cdot\text{m}$$

14-12：设电动机的负载功率为 470 kW，电动机的实际负载率最接近下列哪项数值？（供配电 2007 年考题）

（A）1.0　　（B）1.1　　（C）0.94　　（D）0.85

答案：【C】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 299 页例 2-1。

电动机的实际负载率：

$$\varepsilon = \frac{P_L}{P_N} = \frac{470}{500} = 0.94$$

14-13：校验最小起动转矩：假定电动机全压起动，电压波动系数为 0.85。则电动机最小起动转矩最接近下列哪项数值？（用于检验是否小于制造厂所提供的电动机实际最小起动转矩。）（供配电 2007 年考题）

（A）700 N·m　　（B）970 N·m　　（C）1250 N·m　　（D）1400 N·m

答案：【B】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 293 页。

电动机最小起动转矩：

$$T_{Mmin} \geqslant \frac{T_{Lmax} K_s}{K_u^2} = \frac{562 \times 1.25}{0.85^2}\ \text{N}\cdot\text{m} = 972\ \text{N}\cdot\text{m}$$

14-14：设电动机平均起动转矩为2500 N·m，起动时电压波动系数为0.85。则允许机械最大飞轮力矩最接近下列哪一项？

（A）3385 N·m^2　　（B）1800 N·m^2　　（C）2195 N·m^2　　（D）2500 N·m^2

答案：【C】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第294页。

允许机械最大飞轮力矩：

$$GD^2_{xm}=GD^2_0\left(1-\frac{T_{Lmax}}{T_{sav}K^2_u}\right)-GD^2_M=\left[3826\times\left(1-\frac{562}{2100\times0.85^2}\right)-441\right]\text{N}\cdot\text{m}=2194.6\text{N}\cdot\text{m}^2$$

【知识点解析】

恒定负载连续工作制下电动机的校验：根据负载转矩及转速，计算出所需要的负载功率P_L，选择电动机的额定功率P_N略大于P_L，即

$$P_N>P_L=\frac{T_Ln_N}{9550}(\text{kW}) \tag{14-1}$$

式中，T_L为折算到电动机轴上的负载转矩（N·m）；n_N为电动机的额定转速（r/min）。

当负载转矩恒定且需要在基速以上调速时，其额定功率应按所要求的最高工作转速计算，即

$$P_N\geqslant\frac{T_Ln_{max}}{9550}(\text{kW}) \tag{14-2}$$

式中，n_{max}为电动机的最高工作转速（r/min）。

对起动条件严酷（静阻转矩较大或带有较大的飞轮力矩）而采用笼型异步电动机或同步电动机传动的场合，在初选电动机的额定功率和转速后，还要按式（14-3）和式（14-4）分别校验起动过程中的最小转矩和允许的最大飞轮力矩，以保证生产机械能顺利地起动和在起动过程中电动机不致过热。

电动机的最小起动转矩

$$T_{Mmin}\geqslant\frac{T_{Lmax}K_s}{K^2_u}(\text{N}\cdot\text{m}) \tag{14-3}$$

式中，T_{Lmax}为起动过程中可能出现的最大负载转矩（N·m）；K_s为保证起动时有足够加速转矩的系数，一般取$K_s=1.15\sim1.25$；K_u为电压波动系数，即起动时电动机端电压与额定电压之比，全压起动时$K_u=0.85$。

允许的最大飞轮力矩为

$$GD^2_{mec}\leqslant GD^2_{xm}=GD^2_0\left(1-\frac{T_{Lmax}}{T_{sav}K^2_u}\right)-GD^2_M(\text{N}\cdot\text{m}^2) \tag{14-4}$$

式中，GD^2_{mec}为折算到电动机轴上传动机械的最大飞轮力矩（N·m^2）；GD^2_0为包括电动机在内的整个传动系统所允许的最大飞轮力矩（N·m^2）；折算到电动机轴上的数值，由电动机资料中查取；GD^2_M为电动机转子的飞轮力矩（N·m^2）；T_{sav}为电动机的平均起动转矩（N·m^2）；按式（14-3）和式（14-4）两项校验均能通过，则可以采用所选电动机功率。

例题14-15：某企业设10 kV车间变电所，所带低压负荷为若干台标称电压为380 V的低压笼型电动机。其车间变电所380 V低压配电母线短路容量为15 MV·A。车间有最大功

率约为 150 kW 的离心风机，且有在较大范围内连续改变电动机转速用于调节风量的要求。下列哪项电气传动方案是适宜选用的？并说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）笼型电动机交-交变频传动　　（B）笼型电动机交-直-交变频传动

（C）直流传动　　（D）笼型电动机变极传动

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 271 页表 25-2 和第 310 页表 25-11。

笼型电动机交-交变频传动，可以无极连续调速，但是调速范围小；价格较高，A 不符合条件；

笼型电动机交-直-交变频传动，可以无极连续调速，并且调速范围大；价格较高，B 符合条件；

交流与直流电动机调速系统相比，交流调速系统的调速性能与直流调速系统性能完全一样，甚至还优于直流调速，交流调速系统要比直流调速系统调速范围大、价格贵，C 不符合条件；

笼型电动机变极传动，可以有极调速，但是调速范围不大；价格低，D 不符合条件。

综上所述，在较大范围内连续改变电动机转速宜选择交-直-交变频传动。

【知识点解析】

交-直-交变频器与交-交变频器主要特点比较见表 14-1。

表 14-1　交-直-交变频器与交-交变频器主要特点比较

类型 / 比较项目	交-直-交变频器	交-交变频器
换能方式	两次换能，效率略低	一次换能，效率较高
晶闸管换相方式	强迫换相或负载换相	电网电压换相
所用器件数量	较少	较多
调频范围	频率调节范围宽	一般情况下，输出最高频率为电网频率的 1/3～1/2
电网功率因数	采用可控整流器调压，低频低压时功率因数较低；采用斩波器或 PWM 方式调压，功率因数高	较低
适用场所	可用于各种电力拖动装置，稳频稳压电源和不间断电源	适用于低速大功率拖动

例题 14-16：某企业设 10 kV 车间变电所，所带低压负荷为若干台标称电压为 380 V 的低压笼型电动机。要求车间某台电动机整体结构防护形式能承受任何方向的溅水，且能防止直径大于 1 mm 的固体异物进入壳内，电动机整体结构防护等级（IP 代码）宜为下列哪项？请说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）IP53　　（B）IP44　　（C）IP43　　（D）IP34

答案：【B】

解答过程：依据《外壳防护等级（IP）代码》GB 4208—2008 的 4.2 节或依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 178 页 1.9.7 节。

能承受任何方向的溅水，防止直径大于 1 mm 的固体异物进入壳内，电动机整体结构防护等级（IP 代码）对应 IP44。

例题 14-17：关于交、直流电动机的选择，下列哪一项是正确的？请说明依据和理由。

（供配电 2010 年考题）

（A）机械对起动、调速及制动无要求时，应采用绕线转子电动机

（B）调速范围不大的机械，且低速运行时间较短时宜采用笼型电动机

（C）变负载运行的风机和泵类机械，当技术经济合理时，应采用调速装置，并应选用相应类型的电动机

（D）重载起动的机械，选用绕线转子电动机不能满足起动要求时宜采用笼型电动机

答案：【C】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011。

第 2.1.2 条　变负载运行的风机和泵类机械，当技术经济合理时，应采用调速装置，并应选用相应类型的电动机，与原条文相同，选 C。

例题 14-18：某厂为进行节能技术改造，拟将原由晶闸管整流器供电的直流电动机改用交流调速同步电动机，电动机水冷方式不变。在该厂改造方案讨论中，对于直流电动机与同容量、同转速的同步电动机进行技术性能比较，如下观点中哪一项是错误的？（供配电 2009 年考题）

（A）同步电动机的结构比直流电动机的简单，价格便宜

（B）直流电动机的 GD^2 比同步电动机的大

（C）直流电动机的外形尺寸及重量大于同步电动机

（D）直流电动机冷却用水量比同步电动机少

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 8 页。

交流电动机结构简单、价格便宜、维护方便，但起动及调速性能不如直流电动机。直流电动机 GD^2 大、功率受限制、效率低、能耗大、散热条件差。

直流电动机散热差，直流电动机冷却用水量比同容量的同步电动机要多，故 D 错。

例题 14-19：某水泵站一台离心式水泵，总扬程为 8.5 m，流量为 260 L/s，水泵效率为 0.82，电动机效率为 0.92，电动机备用系数选为 1.15。该水泵配套电动机的容量应接近下列哪一项数值？

（A）20.49 kW　　（B）24 .91 kW　　（C）28.71 kW　　（D）33.03 kW

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 42 页。

题目已知离心式水泵总扬程 H 为 8.5 m，流量 Q 为 0.26 m^3/s，水泵效率 η_{pum} 为 0.82，电动机效率 $\eta_m=0.92$，电动机备用系数 K_C 为 1.15，水的密度 γ 为 1000 kg/m^3，离心式水泵配套电动机的容量为

$$P=K_C\frac{P_2}{\eta_m}=K_C\frac{\gamma QH}{102\eta_{pum}\eta_m}=1.15\times\frac{1000\times0.26\times8.5}{102\times0.82\times0.92}\text{kW}=33.03\text{kW}$$

例题 14-20：某锻造车间安装一台三相异步电动机，额定电流为 59.5 A，其在一周期 60 s 内工作电流如图 14-7 所示，图中，$I_{L1}=50$ A，$t_1=10$ s；$I_{L2}=80$ A，$t_2=20$ s；$I_{L3}=40$ A，$t_3=30$ s。该电动机的等效电流为下列哪一项？是否符合要求？

（A）45.12 A，符合　　（B）57.88 A，符合

（C）61.14 A，不符合　　（D）66.52 A，不符合

答案：【B】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 294 页。

该电动机的等效电流为

$$I_N > I_L = \sqrt{\frac{I_{L1}^2 t_1 + I_{L2}^2 t_2 + I_{L3}^2 t_3}{T_c}}$$

$$= \sqrt{\frac{50^2 \times 10 + 80^2 \times 20 + 40^2 \times 30}{60}}\ \text{A} = 57.88\ \text{A}$$

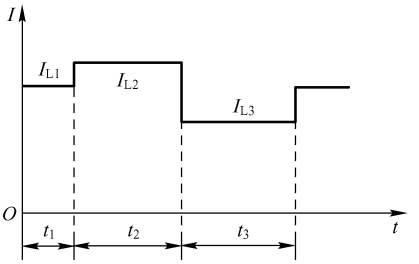


图 14-7　三相异步电动机-周期内工作电流

例题 14-21：某车间安装一台电动机，额定功率为 30 kW，B 级绝缘，额定环境温度为 40℃，实际车间工作环境温度为 50℃，若固定损耗与可变损耗的比值为 1 时，该电动机实际工作环境时的可用功率为下列哪一项？

（A）20.49 kW　　（B）25.98 kW　　（C）28.71 kW　　（D）33.03 kW

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 19 页、第 56~57 页

查表 23-15 中 B 级绝缘在额定环境温度为 40℃时的额定温升为 80℃，固定损耗与可变损耗的比值为 1 时，修正系数为

$$X = \sqrt{1 - \frac{\Delta\tau}{\tau}(\gamma + 1)} = \sqrt{1 - \frac{10}{80} \times (1 + 1)} = 0.866$$

该电动机实际工作环境温度时的可用功率为

$$P = XP_N = 0.866 \times 30\ \text{kW} = 25.98\ \text{kW}$$

例题 14-22：为某厂一斜桥卷扬机选配电动机，如图 14-8 所示。有关机械技术参数：料车重 $G = 3$ t，平衡重 $G_{ph} = 2$ t，料车卷筒半径 $r_1 = 0.4$ m，平衡重卷筒半径 $r_2 = 0.3$ m，斜桥倾角 $\alpha = 60°$，料车与斜桥面的摩擦系数 $\mu = 0.1$，卷筒效率 $\eta = 0.97$，为确定卷扬机预选电动机功率，除上述资料外，下列哪项资料不是选择电动机时必要资料？

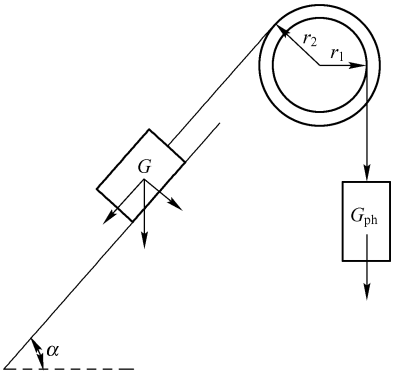


图 14-8　卷扬机示意

（A）料车的运行速度

（B）运动部分的飞轮力矩

（C）要求的起、制动及稳速运行时间

（D）现场供配电系统资料

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第4页。

电动机选择中，现场供配电系统资料不是电动机选择时的必要资料。

例题 14-23：某电动机铭牌上的负载持续率为 $FC=25\%$，现所拖动的生产机械的负载持续率为 $FC=28\%$，负载转矩 T_t 与电动机铭牌上的额定转矩 T_N 应符合下列哪种关系？

（A）$T_t \leqslant 1.12T_N$　　（B）$T_t \leqslant 1.058T_N$

（C）$T_t \leqslant 0.989T_N$　　（D）$T_t \leqslant T_N$

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第54页。

负载转矩 T_t 与电动机铭牌上的额定转矩 T_N 关系为

$$T_t \leqslant \sqrt{\frac{FC_s}{FC_N}}T_N = \sqrt{\frac{0.28}{0.25}}T_N = 1.058T_N$$

例题 14-24～14-26：某短时工作制电动机容量选择发热校验，初选为 JZ-12-6 型电动机，其运行参数为：短时工作制，每次接电时间 $t_x=15\ \text{min}$；静阻转矩 $M_l=44.1\ \text{N}\cdot\text{m}$；$FC_N$ 为25%时额定转矩 $M_{N25}=38.3\ \text{N}\cdot\text{m}$；过载转矩 $M_{max}=2.6M_{N25}$；FC_N 为100%时允许损耗为 $\Delta P_{N100}=780\ \text{W}$；1 h 允许损耗为 $\Delta P_{1h}=1080\ \text{W}$；固定损耗 $\Delta P_c=397\ \text{W}$，转子损耗 $\Delta P_{2m}=475\ \text{W}$，定子损耗 $\Delta P_{1m}=578\ \text{W}$。请回答下列问题。

14-24：计算该电动机的短时负荷转矩标幺值和温升时间常数为下列哪一项。

（A）1.15，46.84 min　　（B）1.85，40.24 min

（C）1.35，41.84 min　　（D）1.55，49.3 min

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第62～63页例题。

短时负荷转矩标幺值：$M_{*1}=M_l/M_{N25}=44.1/38.3=1.15$

温升时间常数：$T=\dfrac{t_{1h}}{\ln\left(\dfrac{\Delta P_{1h}}{\Delta P_{1h}-\Delta P_{N100}}\right)}=\dfrac{60}{\ln\left(\dfrac{1080}{1080-780}\right)}\ \text{min}=46.84\ \text{min}$

14-25：计算该电动机在静阻转矩 M_l 为 44.1 N·m 时的总功率损耗为下列哪一项。

（A）2740 W　　（B）2348 W　　（C）1789 W　　（D）1450 W

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第62～63页例题。

短时负荷转矩标幺值：$M_{*1}=M_l/M_{N25}=44.1/38.3=1.15$

总功率损耗：$\Delta P_Z=\Delta P_c+M_{*1}^2(\Delta P_{1m}+\Delta P_{2m})=[397+1.15^2\times(578+475)]\ \text{W}=1789\ \text{W}$

14-26：计算该电动机在静阻转矩 M_l 为 44.1 N·m 时的允许接电时间为下列哪一项。

（A）26.83 min　　（B）30.24 min　　（C）41.84 min　　（D）49.3 min

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第62～63页例题。

总功率损耗 ΔP_Z 和温升时间常数 T 计算见例题 14-24、例题 14-25。

允许接电时间：$t_{jd}=T\ln\left(\dfrac{\Delta P_Z}{\Delta P_Z-\Delta P_{N100}}\right)=46.84\times\ln\left(\dfrac{1789}{1789-780}\right)\text{ min}=26.83\text{ min}$

14.2 交、直流电动机的起动

【知识点说明】

1）异步电动机的起动属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.5节、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求熟练掌握电动机的起动电压暂降、电压允许值、电动机起动时间的计算；熟练掌握直接起动、星-三角起动、延边三角形起动、电抗器减压起动、自耦变减压起动；掌握定子、转子串电阻减压起动等。

2）同步电动机的起动属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）6.5节、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求熟练掌握电动机的起动电压暂降、电压允许值、电动机起动时间的计算；熟练掌握直接起动、电抗器减压起动、自耦变减压起动。

3）直流电动机的起动属于冷门考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版。了解直接起动、电枢回路串电阻起动。注意直流电动机并励、串励、复励对于起动计算的不同。

依据书目：

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011

《钢铁企业电力设计手册》（下册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）

《2016年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）

例题14-27~14-31：某轧钢车间6kV配电系统向轧钢机电动机配电，假设其配电柜距离很短，可忽略配电电缆阻抗。

6kV系统参数如下：6kV母线短路容量$S_{d1}=48$ MV·A；6kV母线预接无功负荷$Q_{fh}=2.9$ Mvar。

轧钢机电动机参数如下：额定功率$P_e=1500$ kW；额定电压$U_e=6$ kV；效率$\eta=0.95$；功率因数$\cos\varphi=0.8$；电动机全压起动时电流倍数$K_{iq}=6$，电压标幺值$U_{qe}^*=1$；静阻转矩标幺值$M_j^*=0.15$；电动机全压起动时转矩标幺值$U_q^*=1$；电动机起动时平均转矩标幺值$U_{qp}^*=1.1$；额定转速$n_e=500$ r/min；电动机起动时要求母线电压不低于母线额定电压的85%，$U_m^*=0.85$。

请回答下列问题，并列出解答过程。

14-27：计算电动机起动容量及母线最大允许起动容量应为下列哪组数值，并判断是否满足直接起动条件。（供配电2017年考题）

（A）11.84 MV·A，8.96 MV·A，不满足　　（B）12.14 MV·A，9.76MV·A，不满足

（C）7.5 MV·A，9.76 MV·A，满足　　（D）7.5 MV·A，8.96 MV·A，满足

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 232 页和《电气传动自动化技术手册》第 3 版第 397 页。

大型同步电动机全压起动时起动容量：

$$K_{iq}S_e = K_{iq}\frac{P_e}{\cos\varphi\eta} = 6\times\frac{1.5}{0.8\times0.95}\ \text{MV}\cdot\text{A} = 11.84\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

母线电压不低于母线额定电压的 85%、$U_m^* = 0.85$、$\alpha = 0.176$，大型同步电动机母线最大允许起动容量：

$$\alpha(S_{dl}+Q_{fh}) = 0.176(48+2.9)\ \text{MV}\cdot\text{A} = 8.96\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

因 $K_{iq}S_e = 11.84\ \text{MV}\cdot\text{A} > \alpha(S_{dl}+Q_{fh}) = 8.96\ \text{MV}\cdot\text{A}$，不满足电动机全压起动要求，选 A。

14-28：计算该电动机直接起动时的母线电压应为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（A）4.56 kV　　（B）4.86 kV　　（C）5.06 kV　　（D）5.56 kV

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 482 页表 6.5-4（第三版第 270 页）。

大型同步电动机全压起动时起动容量：

$$S_{stM} = k_{st}S_{rM} = k_{st}\frac{P_{rM}}{\cos\varphi\eta} = 6\times\frac{1.5}{0.8\times0.95}\ \text{MV}\cdot\text{A} = 11.84\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

起动回路额定输入容量：$S_{st} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{S_{stM}}+\dfrac{X_l}{U_m^2}} = S_{stM} = 48\ \text{MV}\cdot\text{A}$

电动机全压起动时母线电压降：$u_{stm} = \dfrac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_{st}} = \dfrac{48+2.9}{48+2.9+11.84} = 0.811$

电动机的额定起动电压为 6 kV，$U_{stm} = u_{stm}U_{rM} = 0.811\times6 = 4.86\ \text{kV}$

14-29：计算确定电动机电抗器起动时的可能性及电抗器的电抗器值。（供配电 2017 年考题）

（A）可以，1.99 Ω　　（B）可以，0.99 Ω

（C）不可以，0.55 Ω　　（D）不可以，0.49 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 233 页。

母线电压不低于母线额定电压的 85%、$U_m^* = 0.85$ 时 $\beta = 7$，采用电抗器减压起动条件的不等式为

$$U_{*qe}\frac{S_{dl}+Q_{fh}}{K_{iq}S_e} = 1\times\frac{48+2.9}{11.84} = 4.298 > \beta\sqrt{\frac{M_{*j}}{M_{*q}}} = 7\sqrt{\frac{0.15}{1}} = 2.711$$，满足起动要求

已知电动机的全压起动电压标幺值 $U_{qe}^* = 1$，$U_m^* = 0.85$、$\gamma = 5.67$，同步电动机减压起动电抗器的电抗值为

$$X_k = U_e^2\left(\frac{\gamma}{S_{dl}+Q_{fh}}-\frac{1}{K_{iq}S_e}\right) = 6^2\times\left(\frac{5.67}{48+2.9}-\frac{1}{11.84}\right)\Omega = 0.97\ \Omega$$

14-30：如果该电动机采用电抗器起动，计算电动机起动时母线的电压及电动机的端电压。（起动电抗器按 1.0 Ω 计算）（供配电 2017 年考题）

（A）4.5 kV，3.67 kV　　（B）4.8 kV，3.87 kV

（C）5.1 kV，3.67 kV　　（D）5.1 kV，3.87 kV

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 233 页。

母线短路容量：$S'_q=\dfrac{1}{\dfrac{U^2_{*qe}}{K_{iq}S_e}+\dfrac{X_k}{U^2_e}}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{11.84}+\dfrac{1}{6^2}}\text{MV}\cdot\text{A}=8.91\text{MV}\cdot\text{A}$

电动机采用电抗器起动的母线电压标幺值：

$$U_{*m}=\frac{S_{dl}+Q_{fh}}{S_{dl}+Q_{fh}+S'_q}=\frac{48+2.9}{48+2.9+8.91}=0.851$$

$$U_{*m}U_e=0.851\times6\text{ kV}=5.1\text{ kV}$$

采用电抗器起动时电动机端电压标幺值：

$$U_{*q}=U_{*qe}(1-U_{*m})\frac{S_{dl}+Q_{fh}}{K_{iq}S_e}=1\times(1-0.851)\times\frac{48+2.9}{11.84}=0.645$$

$$U_{*q}U_e=0.645\times6\text{ kV}=3.87\text{ kV}$$

14-31：如果该电动机采用电抗器起动，当电动机旋转体等效直径为 1.2 m，重量为 10000 kg 时，该电动机的起动时间应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）10.7 s　　（B）13.7 s　　（C）14.7 s　　（D）15.7 s

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 16 页、第 234 页。

母线短路容量：$S'_q=\dfrac{1}{\dfrac{U^2_{*qe}}{K_{iq}S_e}+\dfrac{X_k}{U^2_e}}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{11.84}+\dfrac{1}{6^2}}\text{MV}\cdot\text{A}=8.91\text{MV}\cdot\text{A}$

电动机采用电抗器起动时母线电压标幺值：

$$U_{*m}=\frac{S_{dl}+Q_{fh}}{S_{dl}+Q_{fh}+S'_q}=\frac{48+2.9}{48+2.9+8.91}=0.851$$

采用电抗器起动时电动机端电压标幺值：

$$U_{*q}=U_{*qe}(1-U_{*m})\frac{S_{dl}+Q_{fh}}{K_{iq}S_e}=1\times(1-0.851)\times\frac{48+2.9}{11.84}=0.645$$

同步电动机的总飞轮力矩为

$$GD^2=\frac{mD^2_t}{2}g=\frac{10\times(1.2)^2}{2}\times9.807\text{ kN}\cdot\text{m}^2=70.61\text{ kN}\cdot\text{m}^2$$

同步电动机的起动时间为

$$t_q=\frac{GD^2n^2_e}{3580P_e(U^2_{*q}M_{*qp}-M_{*j})}=\frac{70.61\times500^2}{3580\times1500\times(0.645^2\times1.1-0.15)}\text{s}=10.68\text{ s}$$

例题 14-32～14-36：某变电所设一台 400 kV·A 动力变压器，$U_d\%=4$，二次侧母线给电动机负荷供电。其中一台笼型电动机，额定功率 $P=132$ kW，额定电压为 380 V，额定电流为 240 A，额定转速为 1480 r/min，$\cos\varphi_{ed}=0.89$，额定效率为 0.94，起动电流倍数为 6.8，

起动转矩倍数为 1.8，接至电动机的沿桥架敷设的电缆线路电抗为 0.0245 Ω。变压器一次侧的短路容量为 20 MV·A，母线已有负荷为 200 kV·A，$\cos\varphi_{fh}=0.73$。请回答以下问题。

14-32：电动机起动时母线电压为下列哪项数值？（忽略母线阻抗，仅计线路电抗）（供配电 2013 年考题）

（A）337.32 V　　（B）336.81 V　　（C）335.79 V　　（D）335.30 V

答案：【D】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 482 页表 6.5-4（第三版第 270 页）。

母线短路容量为

$$S_{km}=\frac{S_{rT}}{x_T+\frac{S_{rT}}{S_k}}=\frac{0.4}{0.04+\frac{0.4}{20}}\text{ MV·A}=6.667\text{ MV·A}$$

预接负荷无功功率为

$$Q_{fh}=S_{fh}\sqrt{1-\cos^2\varphi_{fh}}=0.2\times\sqrt{1-0.73^2}\text{ Mvar}=0.137\text{ Mvar}$$

忽略线路阻抗影响，起动回路额定输入容量为

$$S_{stM}=k_{st}S_{rM}=k_{st}\sqrt{3}U_{rM}I_{rM}=6.8\times\sqrt{3}\times0.38\times0.24\text{ MV·A}=1.074\text{ MV·A}$$

$$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_1}{U_m^2}}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_1}{U_m^2}}=\frac{1}{\frac{1}{1.074}+\frac{0.0245}{0.38^2}}\text{ MV·A}=0.908\text{ MV·A}$$

母线电压降为

$$u_{stm}=\frac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_{st}}=\frac{6.667+0.137}{6.667+0.137+0.908}=0.8823$$

母线电压为

$$U=U_m u_{stm}=380\times0.8823\text{ V}=335.27\text{ V}$$

【知识点解析】

无限大容量电源系统供电的电动机起动时电压下降计算见表 14-2。

表 14-2　无限大容量电源系统供电的电动机起动时电压下降计算

起动方式	全压起动	变压器-电动机组（全压起动）	电抗器减压起动	自耦变压器减压起动
计算电路	S_k S_{rT}, x_T S_{km} Q_{fh} U_m, U_{stm} X_1, I_{st} U_{stM}, I_{stM} S_{rM}, S_{stM} S_{st} M 3～	S_{km} Q_{fh} U_m, U_{stm} X_1, I_{st} S_{rTM}, x_{TM} U_{stM}, I_{stM} S_{rM}, S_{stM} S_{st} M 3～	S_{km} Q_{fh} U_m, U_{stm} X_1, I_{st} X_r, I_{stk} U_{stM}, I_{stM} S_{rM}, S_{stM} S_{st} M 3～	S_{km} Q_{fh} U_m, U_{stm} X_1, I_{st} S_{rTz}, k_z U_{stM}, I_{stM} S_{rM}, S_{stM} S_{st} M 3～
起动回路的额定输入容量	$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_1}{U_m^2}}$	$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_{TM}}{S_{rTM}^2}+\frac{X_1}{U_m^2}}$	$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_r}{U_m^2}+\frac{X_1}{U_m^2}}$	$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{k_z^2S_{stM}}+\frac{X_1}{U_m^2}}$

（续）

起动方式		全压起动	变压器-电动机组（全压起动）	电抗器减压起动	自耦变压器减压起动
电压相对值	母线	$u_{stm}=\dfrac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_{st}}$			
	电动机端子	$u_{stM}=u_{stm}\dfrac{S_{st}}{S_{stM}}$			$u_{stM}=u_{stm}\dfrac{S_{st}}{kS_{stM}}$
起动电流		$I_{st}=u_{stm}\dfrac{S_{st}}{\sqrt{3}U_m}$			
起动电流		$I_{stM}=I_{st}$	$I_{stM}=u_{stM}\dfrac{S_{stM}}{\sqrt{3}U_{rM}}$	$I_{stM}=I_{st}$	$I_{stM}=u_{stM}\dfrac{S_{stM}}{\sqrt{3}U_{rM}}$
校验起动电器过负荷能力			$k_1=u_{stM}\dfrac{S_{stM}}{S_{rTM}}$	$I_{stk}>I_{st}\dfrac{t_{st}}{60}\dfrac{N}{2}$	$S_{rTz}>u_{stm}S_{st}\dfrac{t_{st}}{60}\dfrac{N}{2}$
符号说明		S_k——供电变压器一次侧短路容量（MV·A） S_{rT}——供电变压器的额定容量（MV·A） x_T——供电变压器的电抗相对值，取为阻抗电压相对值 u_T S_{km}——母线短路容量(MV·A) $S_{km}=\dfrac{S_{rT}}{x_T+\dfrac{S_{rT}}{S_k}}$ Q_{fh}——预接负荷的无功功率(Mvar)，在供电变压器二次侧母线上，可取 $0.6(S_T-0.75S_{rM})$；如预接负荷为 S_{fh}，其功率因数为 $\cos\varphi_{fh}$，则 $Q_{fh}=S_{fh}\sqrt{1-\cos^2\varphi_{fh}}$ X_l——导线穿管或≤10 kV 电缆的线路电抗（Ω），取为 $0.08l$；长线路计入电阻因素时铜芯线取 $(0.08+6.1/S)l$；≤150 mm² 时可取 $(18.3/S)l$；铝芯线取 $(0.08+10/S)/l$；≤240 mm² 时可取 $(30/S)l$；用于 10 kV 交联聚乙烯电缆时 0.08 改为 0.09；6 kV 纸绝缘时 0.08 改为 0.07 S——导线或电缆芯的截面（mm²） l——线路长度（km）	S_{rTM}——变压器电动机组的变压器额定容量（MV·A） x_{TM}——变压器电动机组的变压器电抗相对值，取为阻抗电压相对值 u_{TM} k_1——电动机起动时变压器输出电流与其额定电流的比值 S_{rM}——电动机额定容量（MV·A）其值为 $\sqrt{3}U_{rM}I_{rM}$ S_{stM}——电动机额定起动容量(MV·A)，其值为 $k_{stm}S_{rM}$ k_{st}——电动机额定起动电流倍数 I_{rM}——电动机额定电流（kA） U_{rM}——电动机额定电压（kV） S_{st}——电动机起动时起动回路的额定输入容量（MV·A） I_{st}——电动机起动时起动回路的额定输入电流（kA） I_{stM}——电动机起动电流（kA）	X_r——每相电抗器额定电抗（Ω） I_{stk}——电抗器起动电流（kA），选取≥I_{st} S_{rTz}——自耦变压器额定容量（MV·A），选取≥$u_{stm}S_{st}$ k_z——自耦变压器变比 N——连续起动次数，按制造厂规定取 2 次 t_{st}——电动机起动一次的时间（s） U_m——母线标称电压（kV），$U_m=U_n$ U_n——网络标称电压（kV） U_{stm}——电动机起动时母线电压（kV） u_{stm}——电动机起动时母线电压相对值，即 $U_{stm}/U_m=U_{stm}/U_n$ U_{stM}——电动机起动时的端子电压（kV） u_{stM}——电动机起动时的端子电压相对值，即 U_{stM}/U_{rM}

14-33：若该低压笼型电动机具有 9 个出线端子，现采用延边三角形减压起动，设星形部分和三角形部分的抽头比为 2∶1，电动机的起动电压和起动电流应为下列哪组数值？（供配电 2013 年考题）

（A）242.33 V，699.43 A　　（B）242.33 V，720 A

（C）242.33 V，979.2 A　　（D）283.63 V，699.43 A

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 102 页。

电动机的额定起动电流为

$$I_{st}=k_{st}I_{rM}=6.8\times240\ \text{A}=1632\ \text{A}$$

电动机的起动电压为

$$\frac{U'}{U}=\frac{1+\sqrt{3}K}{1+3K},U'=U\frac{1+\sqrt{3}K}{1+3K}=380\times\frac{1+2\sqrt{3}}{1+3\times2}\text{ V}=242.33\text{ V}$$

电动机的起动电流为

$$\frac{I'}{I}=\frac{1+K}{1+3K},I'=I_{st}\frac{1+K}{1+3K}=1632\times\frac{1+2}{1+3\times2}\text{ A}=699.43\text{ A}$$

或者：从第 90 页表 24-3 中查到对应起动电压系数 0.64 和起动电流系数 0.43，则

$$U'=0.64U=380\times0.64\text{ V}=246.2\text{ V}$$

$$I'=0.43I_{st}=1632\times0.43\text{ A}=701.76\text{ A}$$

【知识点解析】

延边三角形减压起动：

采用此种起动方式时，电动机的起动电压和起动转矩与定子绕组的抽头匝数有关，工程设计中可按下述方法估算。

（1）电动机的起动电压

$$\frac{U'_{st\Delta}}{U_{st\Delta}}=\frac{1+\sqrt{3}K}{1+3K}\tag{14-5}$$

式中，$U'_{st\Delta}$为电动机延边起动时的起动电压（V）；$U_{st\Delta}$为电动机全压起动时的起动电压，即 380 V；K 为星形部分和三角形部分的抽头比，即 $K=\frac{a}{b}$。

（2）电动机的起动电流和起动转矩

$$\frac{I'_{st\Delta}}{I_{st\Delta}}=\frac{1+K}{1+3K}\tag{14-6}$$

式中，$I'_{st\Delta}$为电动机延边起动时的起动电流（A）；$I_{st\Delta}$为电动机全压起动时的起动电流（A）。

由于电动机用此种方法减压后的起动转矩与全压起动转矩之比和起动电流与全压起动电流之比相同。因此式（14-6）可改写为

$$\frac{T'_{st\Delta}}{T_{st\Delta}}=\frac{1+K}{1+3K}\tag{14-7}$$

式中，$T'_{st\Delta}$为电动机延边起动时的起动转矩（N·m）；$T_{st\Delta}$为电动机全压起动时的起动转矩（N·m）。

14-34：若采用定子回路接入对称电阻起动，设电动机的起动电压与额定电压之比为 0.7，忽略线路电阻，每相外电阻应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）0.385 Ω　　（B）0.186 Ω　　（C）0.107 Ω　　（D）0.104 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 104 页。

电动机起动电阻为

$$Z_{st}=\frac{380}{\sqrt{3}I_{st}}=\frac{380}{\sqrt{3}\times1632}\Omega=0.134\Omega$$

$$R_{st}=0.25Z_{st}=0.0336\Omega;X_{st}=0.97Z_{st}=0.1304\Omega$$

定子回路接入对称电阻起动，每相外电阻为

$$R_w=\sqrt{\left(\frac{Z_{st}}{a}\right)^2-X_{st}^2}-R_{st}=\left[\sqrt{\left(\frac{0.134}{0.7}\right)^2-0.1304^2}-0.0336\right]\Omega=0.107\,\Omega$$

【知识点解析】

（1）定子回路接入对称电阻起动

起动电阻的计算步骤如下：

1）根据生产机械的静阻转矩 T_j 与电动机的起动转矩 T_{st}，求出电动机的允许起动电压为

$$U_{st}\geqslant U_e\sqrt{\frac{1.1T_j}{T_{st}}}$$

式中，U_{st}为电动机允许起动电压（V）；U_e为电动机额定电压（V）。

2）计算电动机的起动阻抗

$$Z_{st}=\frac{380}{\sqrt{3}I_{st}}$$

式中，Z_{st}为起动阻抗（Ω）；I_{st}为电动机起动电流（A）。

3）计算每相允许的全部外加电阻

$$R_w=\sqrt{\left(\frac{Z_{st}}{a}\right)^2-X_{st}^2}-R_{st}$$

式中，R_w 为全部外加电阻（Ω）；a 为电动机的起动电压与额定电压之比，$\alpha=\frac{U_{st}}{U_e}$；$X_{st}$为电动机的起动电抗（Ω）；$R_{st}$为电动机的起动电阻（Ω）。

$$X_{st}=Z_{st}\sin\varphi_{st}$$

$$R_{st}=Z_{st}\cos\varphi_{st}$$

在工程计算中，电动机起动时的功率因数 $\cos\varphi_{st}$ 可取 0.25，则 $\sin\varphi_{st}$ 为 0.97。

4）计算外加减压电阻

$$R=R_w-R_i$$

式中，R 为外加减压电阻（Ω）；R_i 为线路电阻（Ω），当线路较短时可忽略不计。

5）按等效起动电流及外加减压电阻值选择起动电阻器。

（2）定子回路接入单相电阻起动

笼型电动机的定子回路接入单相电阻起动，可以限制起动转矩，但不能减少未接电阻的其他两相的起动电流，所以只适用于要求降低起动转矩而对起动电流并无限制的生产机械。

起动电阻的计算步骤如下：

1）生产机械所允许的起动转矩 T'_{st} 与电动机的额定起动转矩 T_{st} 之比为

$$\mu_{st}=\frac{T'_{st}}{T_{st}}$$

2）计算电动机的起动阻抗

$$Z_{st}=\frac{380}{\sqrt{3}I_{st}}$$

3）求外加电阻

$$R_{\mathrm{w}}=\frac{3}{2}Z_{\mathrm{st}}\left[\frac{1-2\mu_{\mathrm{st}}}{2\mu_{\mathrm{st}}}\cos\varphi_{\mathrm{st}}+\sqrt{\left(\frac{1-2\mu_{\mathrm{st}}}{2\mu_{\mathrm{st}}}\right)^2\cos^2\varphi_{\mathrm{st}}+\frac{1-\mu_{\mathrm{st}}}{\mu_{\mathrm{st}}}}\right]$$

式中，$\cos\varphi_{\mathrm{st}}$为电动机起动时的功率因数，一般可取 $\cos\varphi_{\mathrm{st}}=0.25$。

4）计算流过电阻的电流

$$I'_{\mathrm{st}}=\frac{3I_{\mathrm{st}}}{\sqrt{4\left(\frac{R_{\mathrm{w}}}{Z_{\mathrm{st}}}\right)^2+12\frac{R_{\mathrm{w}}}{Z_{\mathrm{st}}}\cos\varphi_{\mathrm{st}}+9}}$$

式中，I'_{st}为流过电阻的电流（A）。

14-35：若采用定子回路接入单相电阻起动，设电动机的允许起动转矩为 $1.2T_{\mathrm{e}}$，忽略线路电阻，流过单相电阻的电流应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）1272.60 A　　（B）1245.11 A　　（C）1236.24 A　　（D）1231.02 A

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 105 页。

外加电阻计算：

$$\mu_{\mathrm{st}}=\frac{T'_{\mathrm{st}}}{T_{\mathrm{st}}}=\frac{1.2}{1.8}=0.667$$

$$R_{\mathrm{w}}=\frac{3}{2}Z_{\mathrm{st}}\left[\frac{1-2\mu_{\mathrm{st}}}{2\mu_{\mathrm{st}}}\cos\varphi_{\mathrm{st}}+\sqrt{\left(\frac{1-2\mu_{\mathrm{st}}}{2\mu_{\mathrm{st}}}\right)^2\cos\varphi_{\mathrm{st}}^2+\frac{1-\mu_{\mathrm{st}}}{\mu_{\mathrm{st}}}}\right]$$

$$=\frac{3}{2}\times0.134\times\left[\frac{1-2\times0.667}{2\times0.667}\times0.25+\sqrt{\left(\frac{1-2\times0.667}{2\times0.667}\right)^2\times0.25^2+\frac{1-0.667}{0.667}}\right]\Omega=0.1305\,\Omega$$

定子回路接入单相电阻起动，流过单相电阻的电流为

$$I'_{\mathrm{st}}=\frac{3I_{\mathrm{st}}}{\sqrt{4\left(\frac{R_{\mathrm{w}}}{Z_{\mathrm{st}}}\right)^2+12\frac{R_{\mathrm{w}}}{Z_{\mathrm{st}}}\cos\varphi_{\mathrm{st}}+9}}=\frac{3I_{\mathrm{st}}}{\sqrt{4\left(\frac{R_{\mathrm{w}}}{Z_{\mathrm{st}}}\right)^2+12\frac{R_{\mathrm{w}}}{Z_{\mathrm{st}}}\cos\varphi_{\mathrm{st}}+1}}$$

$$=\frac{3\times1632}{\sqrt{4\times\left(\frac{0.1305}{0.134}\right)^2+12\times\frac{0.1305}{0.134}\times0.25+9}}\,\mathrm{A}=1236.24\,\mathrm{A}$$

14-36：当采用自耦变压器减压起动时，设电动机起动电压为额定电压的 70%，允许每小时起动 6 次，电动机一次起动时间为 12 s。自耦变压器的容量应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）450.62 kV·A　（B）324.71 kV·A　（C）315.44 kV·A　（D）296.51 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 106 页。

定子回路接入单相电阻起动，流过单相电阻的电流为

$$S_{\mathrm{st}}=\left(\frac{U_{\mathrm{st}}}{U_{\mathrm{e}}}\right)^2S_{\mathrm{stM}}=0.7^2\times1.074\,\mathrm{MV\cdot A}=0.5257\,\mathrm{MV\cdot A}$$

$$S_{bz}=\frac{S_{st}Nt_{st}}{2}=\frac{0.5257\times6\times\frac{12}{60}}{2}\text{ MV}\cdot\text{A}=0.315437\text{ MV}\cdot\text{A}=315.44\text{ kV}\cdot\text{A}$$

【知识点解析】

自耦变压器减压起动：

自耦变压器减压起动通常用于要求起动转矩较高而起动电流较小的场合。

起动用的自耦变压器的容量可按下式计算：

$$S_{bz}=\frac{S_{st}Nt_{st}}{2}$$

或

$$S_{bz}=\frac{S_{st}t_{js}}{2}$$

$$S_{st}=\left(\frac{U_{st}}{U_e}\right)^2K_{ist}S_e$$

式中，S_{st}为电动机起动容量（kV·A）；U_{st}为电动机起动电压（V）；U_e为电动机额定电压（V）；K_{ist}为电动机起动电流倍数；S_e为电动机额定容量（kV·A）；N为电动机允许连续起动次数；t_{st}为电动机一次起动时间（min）；t_{js}为电动机计算起动时间（min）；$t_{js}=t_{st}N$；S_{bz}为自耦变压器容量（kV·A）。

自耦变压器一般具有65%和80%额定电压的两组抽头，相应的起动转矩和起动电流分别为其额定值的42.3%和64%。

例题14-37~14-41：某工程项目设计中有一台同步电动机，额定功率$P_e=1450\text{ kW}$，额定容量$S_{rM}=1.9\text{ MV}\cdot\text{A}$，额定电压$U_e=6\text{ kV}$，额定电流$I_e=183\text{ A}$，起动电流倍数$K_{st}=5.9$，额定转速$n_e=500\text{ r/min}$，折算到电动机轴上的总飞轮力矩$GD^2=80\text{ kN}\cdot\text{m}^2$，电动机全电压起动时的转矩相对值$T_{st}^*=1.0$，电动机起动时的平均转矩相对值$T_{stp}^*=1.1$，生产机械的静阻转矩$T_j^*=0.16$，6 kV母线短路容量$S_{km}=46\text{ MV}\cdot\text{A}$，6 kV母线其他无功负载$Q_{fh}=2.95\text{ Mvar}$。要求分别计算及讨论有关该同步电动机的起动电压及起动时间，请回答下列问题，并列出解答过程。

14-37：如采用全电压起动，起动前，母线电压相对值为1.0，忽略电动机馈电线路阻抗，起动电动机定子端电压相对值应为下列哪一项数值？（供配电2011年考题）

（A）0.77　　（B）0.814　　（C）0.856　　（D）1.0

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第482页表6.5-4（第三版第270页）。

电动机起动容量为

$$S_{st}=S_{stM}=k_{st}S_{rM}=5.9\times1.9\text{ MV}\cdot\text{A}=11.21\text{ MV}\cdot\text{A}$$

电动机起动时母线电压相对值为

$$u_{stm}=\frac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_{st}}=\frac{46+2.95}{46+2.95+11.21}=0.8136$$

电动机起动时端子电压相对值为

$$u_{stM}=u_{stm}\frac{S_{st}}{S_{stM}}=0.8136\times\frac{11.21}{11.21}=0.8136$$

14-38：为满足生产机械所要求的起动转矩，该同步电动机起动时定子端电压相对值最小应为下列哪一项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）0.42　　（B）0.40　　（C）0.38　　（D）0.18

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 92 页。

同步电动机起动时定子端电压相对值最小为

$$u_{stM}\geqslant\sqrt{\frac{1.1T_j^*}{T_{st}^*}}=\sqrt{\frac{1.1\times0.16}{1.0}}=0.42$$

【知识点解析】

电动机的起动方式，一般分为直接起动和减压起动。起动时应满足下述条件：

1）起动时，对电网造成的电压降不超过规定的数值。

2）电动机起动时，供电变压器容量的校验如下：若每昼夜起动不超过 6 次，每次持续时间 $t\leqslant15$ s，变压器的负荷率 $\beta<0.9$（或 $t\leqslant30$ s 而 $\beta<0.7$）时，起动时的最大电流允许为变压器额定电流的 4 倍；若每昼夜起动 10~20 次，则允许最大起动电流相应地减为 3~2 倍。变压器-电动机组的变压器容量应大于电动机容量，经常起动或重载起动时，变压器容量应比电动机容量大 15%~30%。

3）起动时电动机端子电压应能保证传动机械要求的起动转矩，即

$$u_{stM}\geqslant\sqrt{\frac{1.1T_j}{T_{stM}}}$$

式中，u_{stM} 为起动机电动机端子电压相对值，即端子电压与标称电压的比值；T_{stM} 为电动机起动转矩相对值，即起动转矩与额定转矩的比值；T_j 为电动机传动机械的静阻转矩相对值，常用数据参数见相关手册。

换算到电动机轴上的静阻转矩为

$$T_j=\frac{T_e}{i\eta}$$

式中，T_j 为电动机轴上的静阻转矩（N·m）；T_e 为机械轴上的静阻转矩，即滚动摩擦静阻转矩 T_f 或滑动摩擦的静阻转矩 T_μ（N·m）；η 为机械传动效率；i 为速比。当 ω_M、n_M 与 ω_m、n_m 分别为电动机及机械的角速度、转速时，$i=\frac{\omega_M}{\omega_m}=\frac{n_M}{n_m}$。

14-39：如上述同步电动机允许起动一次的时间为 $t_{st}=14$ s，该同步电动机起动时所要求的定子端电压相对值最小应为哪一项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）0.50　　（B）0.63　　（C）0.66　　（D）1.91

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 239 页。

同步电动机允许起动一次的时间 $t_{st}=14$ s 对应的起动时定子端电压相对最小值为

$$t_{st}=\frac{GD^2n_e^2}{3580P_e(u_{stM}^2T_{st}^*-T_j^*)}=\frac{80\times500^2}{3580\times1450(u_{stM}^2\times1.1-0.16)}=14$$

解方程后得 $u_{stM}=0.63$。

14-40：如上述同步电动机的中的阻尼条重量为 32.6 kg，起动时定子端电压相对值为 0.65，该同步电动机连续起动时所要求最大允许起动时间应为哪一项数值？

（A）11.37 s　　（B）12.52 s　　（C）16.17 s　　（D）18.23 s

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 239 页。

要求最大允许起动时间应为

$$t_{stmax}=235\frac{G}{P_e T_{st}^* u_{stM}^2}=235\times\frac{32.6}{1450\times1.1\times0.65^2}\text{ s}=11.37\text{ s}$$

14-41：下列影响同步电动机起动时间的因素，哪一项是错误的？（供配电 2011 年考题）

（A）电动机额定电压　　（B）电动机所带的起动转矩相对值

（C）折合到电动机轴上的飞轮力矩　（D）电动机起动时定子端电压相对值

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 239 页。

同步电动机实际起动时间 $t_{st}=\dfrac{GD^2n_e^2}{3580P_e(u_{stM}^2T_{st}^*-T_j^*)}$，分析公式中的参数没有电动机额定电压，选 A。

【知识点解析】

大型高压电动机的起动方式，应符合制造厂的规定，具体计算式如下：

电动机起动时间为

$$t_{st}=\frac{GD^2n_r^2}{3580P_{rM}(u_{stM}^2T_{st}^*-T_j^*)}(\text{s})$$

为使同步电动机铜质阻尼笼温度不超过 30℃，在冷却状态下连续起动 2 次（或在热状态下起动 1 次）时，电动机的最长允许起动时间为

$$t_{st\cdot max}=\frac{235G}{P_{rM}u_{stM}^2T_{st}^*}(\text{s})$$

上两式中，P_{rM}为电动机的额定功率（kW），n_r 为电动机的额定转速（r/min）；G 为同步电动机阻尼笼中阻尼条的铜重（kg）；T_j^* 为电动机传动机械的静阻转矩相对值；GD^2 为机组总飞轮力矩（kN·m^2）；T_{st}^*为电动机平均起动转矩相对值，同步电动机为 T_{stM}^*，但当 $T_{stM}^*<T_y^*$ 时，为 $1.1T_{stM}^*$，普通笼型电动机为 $T_{stM}^*+0.2(T_{max}^*-T_{stM}^*)$；$T_{stM}^*$为电动机的起动转矩相对值；$T_y^*$ 为同步电动机的牵入转矩相对值；T_{max}^*为电动机的最大转矩相对值。

例题 14-42～14-43：某企业设 10 kV 车间变电所，所带低压负荷为若干标称电压为 380 V 的低压笼型电动机。其车间变电所 380 V 低压配电母线短路容量为 15 MV·A。请回答下列问题。

14-42：车间某电动机额定容量为 250 kV·A，额定起动电流倍数为 6.5，当计算中忽略低压配电线路阻抗的影响且不考虑变压器预接负荷的无功功率时，该电动机起动时低压母线电压相对值为下列哪一项？（供配电 2010 年考题）

（A）0.43　　（B）0.87　　（C）0.9　　（D）0.92

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 482 页表 6.5-4（第三版第 270 页）。

母线短路容量为

$$S_{km}=15\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

电动机起动容量为

$$S_{stM}=k_{st}S_{rM}=6\times0.25\ \text{MV}\cdot\text{A}=1.625\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

预接负荷无功功率为 $Q_{fh}=0$ Mvar，忽略线路阻抗影响 $X_1=0$。

起动回路额定输入容量为

$$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_1}{U_m^2}}=S_{stM}=1.625\ \text{MV}\cdot\text{A}$$

母线电压降为

$$u_{stm}=\frac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_{st}}=\frac{15+0}{15+0+1.625}=0.902$$

14-43：车间某笼型异步电动机通过一减速比为 20 的减速器与一静阻转矩为 30kN·m 的生产机械相连，减速器效率为 0.9，如电动机在额定电压下起动转矩为 3.5 kN·m。为了保证生产机械要求的起动转矩，起动时电动机端子电压相对值（起动时电动机端子电压与标称电压的比值）至少应为下列哪一项？（供配电 2010 年考题）

（A）0.66　　（B）0.69　　（C）0.73　　（D）0.79

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 14 页和第 92 页。

减速比 $i=20$，减速器效率 $\eta=0.9$，静阻转矩 $T_e=30$ kN·m，换算到电动机轴上的静阻转矩为

$$T_j\geqslant\frac{T_e}{i\eta}=\frac{30}{20\times0.9}\ \text{kN}\cdot\text{m}=1.667\ \text{kN}\cdot\text{m}$$

起动时电动机端子电压相对值为

$$u_{stM}\geqslant\sqrt{\frac{1.1T_j}{T_{stM}}}=\sqrt{\frac{1.1\times1.667}{3.5}}=0.7237$$

例题 14-44～14-46：某台空压机传动电动机的技术数据：额定功率 $P=130$ kW，转子开路额定电压为 285 V，转子额定电流为 270 A，属于轻载起动，当采用起动频敏变阻器时，请计算主回路参数。

14-44：当起动频敏变阻器采用 2 号铁心时，铁心片数 $\sum N$ 为下列哪一项数值？

（A）9 片　　（B）10 片　　（C）12 片　　（D）14 片

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 122 页。

轻载起动，2 号铁心，查表 24-20 得系数 $K_N=0.0897$，铁心片数为

$$\sum N=K_NP_e=0.0897\times130\ \text{片}=11.7\ \text{片}，\text{取 }12\ \text{片}$$

14-45：当起动频敏变阻器采用一串 10 片 2 号铁心时，绕组匝数 W 为下列哪一项数值？

（A）31　　（B）33　　（C）35　　（D）42

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第122页。

轻载起动，2号铁心，查表24-21得系数$K_W=868.8$，绕组匝数W为

$$W=K_W\frac{P_e}{CNI_{se}}=868.8\times\frac{130}{1\times10\times270}\text{匝}=41.8\text{匝}，取42\text{匝}$$

14-46：当起动频敏变阻器采用一串10片2号铁心时，并联数为1，其连接铜导线截面为下列哪一项数值？

（A）11.2 mm^2　　（B）13.5 mm^2　　（C）14.8 mm^2　　（D）16.1 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第122页。

轻载起动，查表24-22，铜导线截面经济电流密度$j_e=20\ A/mm^2$，铜导线截面为

$$S=\frac{I_{se}}{bj_e}=\frac{270}{1\times20}mm^2=13.5\ mm^2$$

例题14-47：在10/0.4 kV变压器为电动机供电时，当系统短路容量是变压器容量的50倍以上时，笼型电动机全压直接经常起动的最大电动机额定功率不宜大于电源变压器容量的多少？

（A）15%　　（B）20%　　（C）25%　　（D）30%

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第486页（第三版第273页）。

表6.5-7中，经常起动电动机（允许全压起动）的额定功率不宜大于电源变压器容量的20%。

例题14-48~14-51：某工厂配电站10 kV母线最大运行方式时短路容量为150 MV·A，最小运行方式短路容量为100 MV·A，该10 kV母线供电的一台功率最大的异步电动机额定功率为4000 kW，额定电压为10 kV，额定电流为260 A，起动电流倍数为6.5，起动转矩相对值为1.1，此电动机驱动的风机静阻转矩相对值为0.3，母线上其他计算负荷为10 MV·A，功率因数为0.9，请回答下列问题。

14-48：本案例中4000 kW电动机驱动的风机起动时，电动机端电压最小应为下列哪项数值？（供配电2009年考题）

（A）10 kV　　（B）5.5 kV　　（C）5.22 kV　　（D）3 kV

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第92页。

定子端电压相对值最小为$U_{*qd}\geqslant\sqrt{\frac{1.1M_{*j}}{M_{*qd}}}=\sqrt{\frac{1.1\times0.3}{1.1}}=0.548$

定子端电压：$U_{qd}=U_{*qd}U_n=0.548\times10\ kV=5.48\ kV$

14-49：本案例中4000 kW电动机若采用变比为64%自耦变压器起动时，起动回路的额定输入容量为下列哪项数值？（忽略供电电缆电抗）（供配电2009年考题）

（A）10.65 MV·A　　（B）11.99 MV·A　　（C）18.37 MV·A　　（D）29.27 MV·A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第482页表6.5-4（第三版第270页）。

起动回路的额定输入容量：

$$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{t^2S_{stM}}+\frac{X_1}{U_m^2}}=t^2k_{st}S_{rM}=0.64^2\times6.5\times\sqrt{3}\times10\times0.26\,\text{MV}\cdot\text{A}=11.99\,\text{MV}\cdot\text{A}$$

14-50：如本案例中 4000 kW 电动机采用电抗器减压起动。电抗器每相额定电抗为 1 Ω，电动机起动时母线电压相对值为 0.82，计算电动机起动转矩与全压起动转矩的相对值为下列哪项数值。（忽略电抗器与母线和电抗器与电动机之间的电缆电抗）（供配电 2009 年考题）

（A）41%　　（B）64%　　（C）67%　　（D）112%

答案：【C】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 479 页表 6.5-1（第三版第 268 页）。

电动机起动转矩与全压起动转矩的相对值：

$$M_{dk}/M_{st}=k^2=0.82^2=0.6724$$

14-51：本案例中 4000 kW 电动机采用串联电抗器方式起动，计算为满足设计规范中在电动机不频繁起动时及一般情况下对配电母线电压的要求，电抗器的最小电抗值为下列哪项数值。（忽略电抗器与母线和电抗器与电动机之间的电缆电抗）（供配电 2009 年考题）

（A）0.27 Ω　　（B）0.43 Ω　　（C）1.8 Ω　　（D）2.03 Ω

答案：【D】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011。

第 2.2.2 条　交流电动机起动时，配电母线上的电压电动机不频繁起动时，不宜低于额定电压的 85%。

依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（上册）第 482 页表 6.5-4（第三版第270 页）。

母线电压降：$u_{stm}=\dfrac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_{st}}=\dfrac{100+4.36}{100+4.36+1.625}=0.85\Rightarrow S_{st}=18.41\,\text{MV}\cdot\text{A}$

$$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_R}{U_m^2}+\frac{X_1}{U_m^2}}=\frac{1}{\frac{1}{29.25}+\frac{X_R}{10^2}}=18.41\,\text{MV}\cdot\text{A}\Rightarrow X_R=2.013\,\Omega$$

例题 14-52：某轧钢车间有一台额定功率为 1450 kW，额定转速为 500 r/min 的轧钢用同步电动机，电动机的额定起动电压为 6 kV，额定容量为 1.9 MV·A，额定起动电流倍数为 5.9 倍，额定电压下起动转矩标幺值为 1。若同步电动机采用电抗器起动，起动时电动机端电压标幺值为 0.655，同步电动机起动一次时间为 12.4 s，连续起动三次电抗器所必备的热稳定度（$\text{kA}\cdot\text{s}^{\frac{1}{2}}$）最接近于下列哪一项数值？

（A）1.76　　（B）2.49　　（C）3.82　　（D）4.96

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 234 页。

题目已知电动机的额定起动电压为 6 kV，额定容量为 1.9 MV·A，额定起动电流倍数为 5.9 倍，电动机端电压标幺值为 0.655，电动机的起动电流为

$$I_{st}=U_{st}^*K_{ist}\frac{S_e}{\sqrt{3}U_e}=0.655\times5.9\times\frac{1900}{\sqrt{3}\times6}\,\text{A}=707\,\text{A}$$

同步电动机连续起动3次电抗器所必备的热稳定度为

$$I\sqrt{t}=0.9I_{st}\sqrt{tN}\times10^{-3}=0.9\times707\sqrt{12.4\times3}\times10^{-3}\ \text{kA}\cdot\text{s}^{\frac{1}{2}}=3.82\ \text{kA}\cdot\text{s}^{\frac{1}{2}}$$

例题14-53~14-55：某机械每小时起动300次，选用S4和S5工作制，负荷持续率$FC=40\%$，绕线电动机的型号为YZR355M-10，其额定功率为60 kW，转子额定电压为330 V，转子额定电流为112 A，机械静阻转矩标幺值为0.8，电动机最大转矩标幺值为3.1，理想空载转速为600 r/min，额定转速为590 r/min，转子导线长30 m，转子导线电阻为0.0102 Ω。请回答以下问题。

14-53：该绕线型异步电动机的额定转差率为下列哪一项数值？

（A）0.0167　　（B）0.0221　　（C）0.0316　　（D）0.0366

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第2页续表23-1。

异步电动机的额定转差率为

$$s_e=\frac{n_0-n_e}{n_0}=\frac{600-590}{600}=0.0167$$

14-54：该绕线型异步电动机转子串3级电阻起动时，若额定转差率为0.0167，电动机最大起动转矩标幺值为最大转矩标幺值0.8倍，最大起动转矩与切换转矩之比λ为下列哪一项数值？

（A）1.77　　（B）3.5　　（C）2.6　　（D）4.8

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第177页。

转子额定电阻$R_{ze}=\dfrac{U_{ze}}{\sqrt{3}I_{ze}}=\dfrac{330}{\sqrt{3}\times112}\Omega=1.7\ \Omega$

转子导线电阻：$R=0.0102\ \Omega$

等效转差率：$s_{dx}=R_*+s_e=\dfrac{R}{R_{ze}}+s_e=\dfrac{0.0102}{1.7}+0.0167=0.0227$

电动机最大起动转矩标幺值：$T_1^*=0.8T_{dmax}^*=0.8\times3.1=2.5$

异步电动机转子串3级电阻：$m=3$

最大起动转矩与切换转矩之比λ为

$$\lambda=\sqrt[m]{\frac{1}{s_{dx}T_1^*}}=\sqrt[3]{\frac{1}{0.0227\times2.5}}=2.6$$

14-55：该绕线型异步电动机转子串3级电阻起动时，若最大起动转矩与切换转矩之比λ为2.6，转子内电阻标幺值为0.0227，各级起动电阻为下列哪一组数值？

（A）$r_3=0.07\ \Omega$，$r_2=0.26\ \Omega$，$r_1=1.42\ \Omega$　（B）$r_3=0.06\ \Omega$，$r_2=0.16\ \Omega$，$r_1=0.42\ \Omega$

（C）$r_3=0.04\ \Omega$，$r_2=0.09\ \Omega$，$r_1=0.22\ \Omega$　（D）$r_3=0.05\ \Omega$，$r_2=0.11\ \Omega$，$r_1=0.32\ \Omega$

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第177页。

转子额定电阻：$R_{ze}=\dfrac{U_{ze}}{\sqrt{3}I_{ze}}=\dfrac{330}{\sqrt{3}\times112}=1.7\ \Omega$

转子内电阻：$r_n^* = 0.0227$

各级起动电阻标幺值：

$$r_3^* = r_n^*(\lambda - 1) = 0.0227 \times (2.6 - 1) = 0.036$$

$$r_2^* = r_3^* \lambda = 0.036 \times 2.6 = 0.094$$

$$r_1^* = r_2^* \lambda = 0.094 \times 2.6 = 0.245$$

换算为有名值：

$$r_3 = r_3^* R_{ze} = 0.036 \times 1.7\,\Omega = 0.06\,\Omega$$

$$r_2 = r_2^* R_{ze} = 0.094 \times 1.7\,\Omega = 0.16\,\Omega$$

$$r_1 = r_1^* R_{ze} = 0.245 \times 1.7\,\Omega = 0.42\,\Omega$$

例题 14-56：某低压交流异步电动机额定电压为 380 V，额定功率为 90 kW，额定电流为 169.5 A，全压起动时起动电流为 1186.5A，星-三角减压起动时，起动电流为下列哪一项数值？

（A）396 A　　（B）685 A　　（C）839 A　　（D）1186 A

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 90 页表 24-3。

异步电动机起动电流为

$$I = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 I_{st} = \frac{1}{3} \times 1186.5\,\text{A} = 395.5\,\text{A}$$

例题 14-57：某并励直流电动机额定功率为 10 kW，额定电压为 220 V，额定转速为 1500 r/min，电动机效率为 84.5%，电枢回路总电阻为 0.316 Ω，励磁回路总电阻为 178 Ω。现要求电动机电枢起动电流限制为额定电枢电流的 1.5 倍，起动变阻器的电阻应为下列哪一项数值？

（A）0.31 Ω　　（B）1.86 Ω　　（C）2.47 Ω　　（D）178 Ω

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 2 页续表 23-1。

额定电枢电流：$I_a = \dfrac{P_N}{U_N \eta_N} - \dfrac{U_N}{R_f} = \left(\dfrac{10000}{220 \times 0.845} - \dfrac{220}{178}\right)\text{A} = 52.556\,\text{A}$

起动变阻器的电阻：$R_{st} = \dfrac{U_N}{1.5 I_a} - R_a = \left(\dfrac{220}{1.5 \times 52.556} - 0.316\right)\Omega = 2.47\,\Omega$

14.3　交、直流电动机的制动

【知识点说明】

1）异步、同步电动机和直流电动机的能耗制动属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求熟练掌握能耗制动电阻计算、能耗制动原理和特点、适用场合等。

2）异步电动机和直流电动机的反接制动属于普通考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求掌握反接制动电阻计算、反接制动

原理和特点、适用场所等。

3）异步电动机和直流电动机的回馈制动属于冷门考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求了解回馈制动原理和特点、适用场合等。

依据书目：

《钢铁企业电力设计手册》（下册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

例题 14-58~14-60：某工程设计一电动机控制中心（MCC），其中最大一台笼型电动机额定功率 $P_{ed}=200\,kW$，额定电压 $U_e=380\,V$，额定电流 $I_e=263\,A$，额定转速 $N_e=1490\,r/min$，功率因数 $\cos\varphi_e=0.89$，效率 $\eta_e=0.945$，起动机电流倍数 $K_{IQ}=6.8$，MCC 由一台 $S_B=1250\,kV\cdot A$的变压器（$U_d\%=4$）供电，变压器二次侧的短路容量 $S_{dl}=150\,MV\cdot A$，MCC 除最大一台笼型电动机外，其他负荷总计 $S_{fh}=650\,kV\cdot A$，功率因数 $\cos\varphi=0.72$。请回答下列问题，并列出解答过程。

14-58：关于交流电动机能耗制动的性能，下述哪一项不是能耗制动的特点？

（A）制动转矩较平滑，可方便地改变制动转矩

（B）制动转矩基本恒定

（C）可使生产机械较可靠地停止

（D）能量不能回馈单位，效率较低

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 95~96 页。

表 24-6 交流电动机能耗制动的性能中，制动转矩随转速降低而减小。故答案 B 不是能耗制动的特点，选 B。

14-59：如果该电动机的空载电流 $I_{kz}=55\,A$，定子电阻 $R_d=0.12\,\Omega$，采用能耗制动时，外加直流电压 $U_{ZD}=60\,V$，忽略线路电阻，通常为获得最大制动转矩，外加能耗制动电阻值为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）$0.051\,\Omega$　　（B）$0.234\,\Omega$　　（C）$0.244\,\Omega$　　（D）$0.124\,\Omega$

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 114 页 24.2.7 节。

最大制动转矩时，制动电流为 3 倍空载电流。

制动回路总电阻：$R=\dfrac{U_D}{3I_{kz}}=\dfrac{60}{3\times55}\,\Omega=0.364\,\Omega$

外加制动电阻：$R_{ad}=R-2R_d=(0.364-2\times0.12)\,\Omega=0.124\,\Omega$

14-60：如果该电动机每小时接电次数为 20 次，每次制动时间为 12 s，则制动电阻接电持续率为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）0.67%　　（B）6.67%　　（C）25%　　（D）66.7%

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 115 页 24.2.7 节例题。

制动电阻接电持续率：

$$FC=\frac{12\times20}{3600}=0.0667=6.67\%$$

例题 14-61~14-65：车间一台笼型电动机采用能耗制动方式。该电动机型号规格为YZ180L-8，额定电压为380 V，额定转速为694 r/min，P_c=40%额定电流I_{ed}=25.8 A，空载电流I_{kz}=12.5 A，定子单相电阻R_d=0.56 Ω，制动电压为直流60 V，制动时间为2 s，电动机每小时接电次数为30次，制动回路电缆为6 mm^2铜芯电缆，其电阻值可忽略不计。请回答以下问题。

14-61：取制动电流为空载电流的3倍，其外加制动电阻值与下列哪项数值相近？（供配电2009年考题）

（A）0.22 Ω　　（B）0.48 Ω　　（C）1.04 Ω　　（D）1.21 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第114页24.2.7节。

取制动电流为空载电流的3倍，I_{zd}=3×12.5 A=37.5 A

制动电压为固定直流电压60 V，即U_{zd}=60 V，制动回路的全部电阻（包括定子两相绕组电阻、供电电缆电阻和外加电阻），电缆电阻忽略不计，因此制动回路的外加电阻为

$$R_w=\frac{U_{zd}}{I_{zd}}-2R_d=\left(\frac{60}{37.5}-2\times0.56\right)\Omega=0.48\ \Omega$$

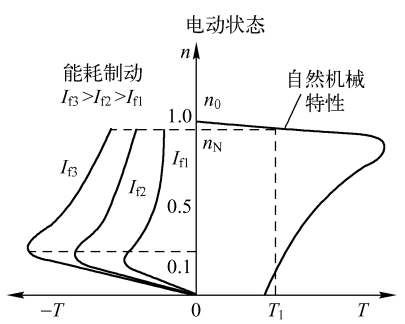
【知识点解析】

能耗制动，是将运转中的电动机与电源断开并改接为发电机，使电能在其绕组中消耗（必要时还可消耗在外接电阻中）的一种电制动方式。

交流笼型和绕线转子异步电动机采用能耗制动时，应在交流供电电源断开后，立即向定子绕组（可取任意两相绕组）通入直流励磁电流I_f，以便产生制动转矩。制动转矩的大小取决于直流励磁电流I_f的大小及电动机的转速。当$n\approx n_0$时，制动转矩较小；随着转速n的降低，制动转矩增大，当$n=(0.1\sim0.2)n_0$时，制动转矩最大。为获得较好的制动特性，励磁电流I_f通常取电动机定子空载电流I_0的1~3倍。绕线转子异步电动机能耗制动时，应在转子回路中串接（0.3~0.4）R_{2N}的常接电阻，可使平均制动转矩等于额定转矩（此时平均制动转矩值为最大）。制动时，励磁所用直流电源U_b可为48 V、10 V或220 V，为减小在附加制动电阻R_b上的能量损耗，在供电条件允许的情况下，U_b越小越好。在多电动机集中控制而又都采用能耗制动的情况下（如大型轧钢车间），可设置专用的直流48 V能耗制动电源，这样更为经济。

异步电动机能耗制动特性见表14-3。

表14-3　异步电动机能耗制动特性

异步电动机能耗制动	制动特性曲线
一般取$I_f=(1\sim3)I_0$ I_f越大，制动转矩越大 $$R_b=\frac{U_f}{I_f}-2r_{Ms}$$ 式中，I_f为励磁电流（A）；U_f为直流励磁电压（V）；R_a为电枢电阻（Ω）；r_{Ms}为电动机定子绕组每相电阻（包含制动回路电缆电阻）（Ω）	

14-62：若将制动电压改为直流220 V，取制动电流为空载电流的3倍，假设已知制动电压为直流60 V时制动回路外加电阻为1.08 Ω，220 V制动方案比60 V方案在外加电阻上每天多消耗的电能为下列哪项数值？（供配电2009年考题）

（A）69 W·h　　（B）86 W·h　　（C）2064 W·h　　（D）2672 W·h

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第114页24.2.7节。

取制动电流为空载电流的3倍：$I_{zd}=3\times12.5\ \text{A}=37.5\ \text{A}$。

60 V外加制动电阻：$R_{w1}=1.08\ \Omega$。

220 V外加制动电阻：$R_{w2}=\dfrac{U_{zd}}{I_{zd}}-2R_d=\left(\dfrac{220}{3\times12.5}-2\times0.56\right)\Omega=4.75\ \Omega$。

制动时间2 s，每小时制动次数30次，220 V制动方案比60 V方案每天多消耗的电能为

$$W=(P_2-P_1)T=I_{zd}^2(R_{w2}-R_{w1})T=37.5^2\times(4.75-1.08)\times(24\times30\times2/3600)\ \text{W}\cdot\text{h}=2064\ \text{W}\cdot\text{h}$$

注：原供配电2009真题题目没有考虑到外加制动电阻变化时制动电流也会变化，即：当制动电压为直流60 V外加制动电阻$R_{w1}=1.08\ \Omega$时制动电流应为$I_{zd1}=\dfrac{60}{1.08+2\times0.56}\ \text{A}=27.3\ \text{A}$。特别说明，本题假设制动电流为空载电流的3倍，直流60 V外加制动电阻$R_{w1}=1.08\ \Omega$直接替代$R_{w1}=0.48\ \Omega$，按60 V改为220 V前后制动电流为空载电流的3倍不变计算。

14-63：制动电阻持续率*FCR*为下列哪项数值？（供配电2009年考题）

（A）0.83%　　（B）1.7%　　（C）16.7%　　（D）40%

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第115页24.2.7节例题。

制动电阻接电持续率：$FCR=\dfrac{Nt}{T}=\dfrac{30\times2}{3600}=1.67\%$

14-64：比较制动电压为直流60 V和直流220 V时制动回路的不同外加电阻值，则该电动机能耗制动的运行状况，下列结论错误的是哪一项？

（A）对于产生同样的制动电流，制动电压越高所需接入的外加电阻越大

（B）制动电压较低时可以减小甚至不用外加制动电阻

（C）采用直流220 V制动电压比采用直流60 V制动电压外加电阻小

（D）对于产生同样的制动电流，应尽量采用较低的制动电压

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第114页24.2.7节。

对于产生同样的制动电流，直流220 V制动电压比直流60 V制动电压外加电阻大，答案C错。

14-65：笼型电动机的能耗制动转矩在转速下降到下列哪项数值附近时达最大值？（供配电2009年考题）

（1）（0.5~0.09）倍同步转速　　（B）（0.1~0.2）倍同步转速

（C）（0.25~0.3）倍同步转速　　（D）（0.35~0.4）倍同步转速

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第114页24.2.7节。

当转速降到（0.1~0.2）同步转速时，制动转矩达到最大值。

例题 14-66~14-68：某机械每小时起动 300 次，选用 S4 和 S5 工作制，负荷持续率 $FC=40\%$，绕线转子电动机的型号为 YZR315s-10，其额定功率为 40 kW，转子额定开路电压为 242 V，转子额定电流为 102.2 A。请回答以下问题。

14-66：若反接制动转矩标幺值为 1.9，该绕线转子异步电动机的转子回路总电阻标幺值为下列哪一项数值？

（A）1.67　　（B）1.01　　（C）1.05　　（D）2.61

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 222 页。

反接制动时电动机的转差率一般取 $s_{fj}=2$。

绕线转子异步电动机的转子回路标幺值：$R_{\Sigma}^{*}=\dfrac{s_{fj}}{T_{fj}^{*}}=\dfrac{2}{1.9}=1.05$

14-67：该绕线转子异步电动机转子串两级电阻起动时，两级起动电阻为 $r_2=0.104\ \Omega$，$r_1=0.375\ \Omega$，若异步电动机的转子回路总电阻标幺值为 $R_{\Sigma}^{*}=1.05$，该绕线转子异步电动机的转子回路反接制动电阻为下列哪一项数值？（转子导线电阻忽略不计）

（A）1.67 Ω　　（B）0.956 Ω　　（C）0.78 Ω　　（D）0.61 Ω

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 177 页、第 222 页。

转子额定电阻：$R_{ze}=\dfrac{U_{ze}}{\sqrt{3}I_{ze}}=\dfrac{242}{\sqrt{3}\times102.2}\ \Omega=1.367\ \Omega$

转子回路反接制动电阻标幺值为

$$R_{fj}^{*}=R_{\Sigma}^{*}-R_{q}^{*}=1.05-\frac{0.104+0.375}{1.367}=0.6996$$

转子回路反接制动电阻有名值为

$$R_{fj}=R_{fj}^{*}R_{ze}=0.6996\times1.367\ \Omega=0.956\ \Omega$$

14-68：若该绕线转子异步电动机的转子回路采用反接制动，则反接制动电阻的发热等效电流为下列哪一项数值？

（A）16.7 A　　（B）66.2 A　　（C）58.6 A　　（D）40.9 A

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 222 页。

每小时起动 300 次，反接制动电阻的发热等效电流标幺值为 0.4。反接制动电阻的发热等效电流为

$$I_{dxfj}=0.4I_{ze}=0.4\times102.2\ \text{A}=40.9\ \text{A}$$

例题 14-69：某车间有一台同步电动机，额定电压为 6000 V，额定容量为 5200 kV·A，额定转速为 1000 r/min，额定电流为 500 A，定子绕组相电阻为 0.03 Ω，星形连接。其制动采用能耗制动方式，当定子由电源断开后接到星形连接的三相电阻上。根据同步电动机能耗制动特性曲线分析，当定子回路总电阻的标幺值为 0.4 时，制动时间最短。按制动时间最短的要求，制动时每相定子应接入的能耗制动电阻为下列哪项？

（A）17.3 Ω　　（B）4.77 Ω　　（C）3.37 Ω　　（D）2.74 Ω

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 241 页 24.4.3.1 节 。

定子额定电阻：$Z_s=\dfrac{U_N}{\sqrt{3}I_s}=\dfrac{6000}{\sqrt{3}\times500}\Omega=6.93\,\Omega$

定子每相总阻抗：$\sum R=K_1Z_s=0.4\times6.93\,\Omega=2.77\,\Omega$

每相定子应接入的能耗制动电阻：$R_b=\sum R-R_b=(2.77-0.03)\,\Omega=2.74\,\Omega$

14.4 交、直流电动机调速

【知识点说明】

1）交流电动机简单调速属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）等。要求熟练掌握调速系统的特点、调速方案比较；熟练掌握改变转子电阻调速、变极调速、电磁转差离合器交流调速、液力耦合器调速；掌握改变定子电压交流调速、变极调压和变极电磁交流调速等。

2）交流电动机变频调速属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版。要求熟练掌握变频调速原理和特性、交-直-交电压型变频调速、交-直-交电流型变频调速、交-交变频调速；了解无换向器电动机调速等。

3）交流电动机串极调速、双馈调速、带飞轮传动装置的异步电动机的转差率调节属于冷门考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）。

4）直流电动机调速属于重要考点，依据《电气传动自动化技术手册》第三版、《钢铁企业电力设计手册》（下册）。要求熟练掌握改变电枢回路电阻调速、改变电枢电压调速、改变磁通调速。注意直流电动机并励、串励、复励对于调速计算的不同。

依据书目：

《钢铁企业电力设计手册》（下册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）

例题 14-70~14-75：某台风机电动机采用电流型变频器控制，选用串联二极管式电流型变频器，如图 14-9 所示。该风机电动机额定功率 $P=160\,\text{kW}$，额定电压为 380 V，额定电流为 279 A，额定效率为 94.6%，额定功率因数为 0.92，电动机为星形接线，每相漏感为 $L=620\,\mu\text{H}$，要求调速范围为 5~50 Hz，请计算主回路参数。

14-70：该风机拟采用变频调速，下列哪一项是采用变频调速方案的缺点？（供配电 2011 年考题）

（A）调速范围　　（B）起动特性　　（C）节能效果　　（D）初始投资

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 271 页。

查表 25-2，变频调速初期投资大是变频调速方案的缺点。

14-71：直流侧电压 U_d 为下列哪一项数值？（供配电 2014 年考题）

（A）431 V　　（B）452 V　　（C）475 V　　（D）496 V

答案：【C】

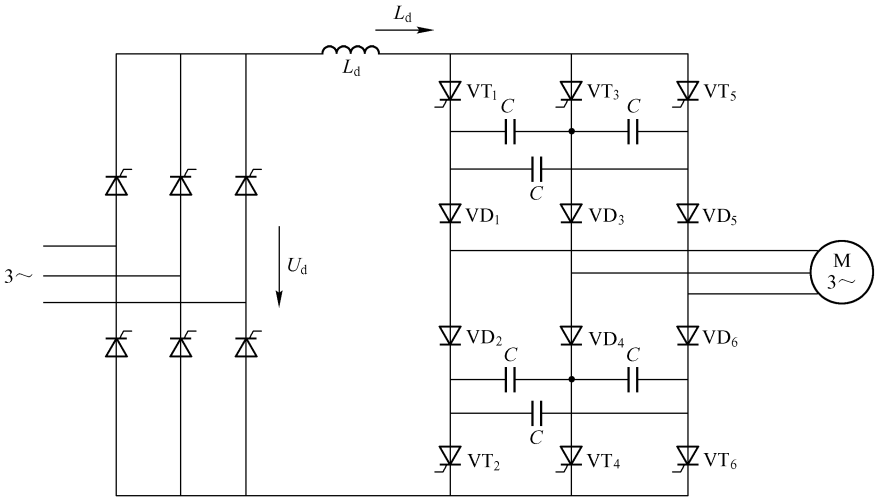


图 14-9　电流型变频器主回路图

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 324 页。

直流侧电压 U_d：

$$U_d = AU\cos\varphi + 2U_{df} = (1.35\times380\times0.92+2\times1.5)\ \text{V} = 475\ \text{V}$$

【知识点解析】

电流型变频器主回路参数计算：

典型的电流型变频器主回路如图 14-9 所示。假设整流后的电流波形完全平直，换相过程较短，所引起的电压尖波可忽略不计，变频器输出电流为理想的矩形波。变频器主回路参数计算如下。

1）直流侧电压由下式确定：

$$U_d = AU_L\cos\varphi + 2U_{df}$$

式中，U_L 为电动机的线电压（V）；A 为三相桥式整流电路的电压转换系数，$A=\dfrac{3\sqrt{2}}{\pi}=1.35$；$\cos\varphi$ 为负载功率因数；U_{df} 为晶闸管管压降，取 1.5 V。

2）直流侧电流 I_d。变频器输出电流是矩形波，将输出电流分解成傅氏级数得

$$i_L = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}I_d\left(\sin\omega t-\frac{1}{5}\sin5\omega t-\frac{1}{7}\sin7\omega t+\frac{1}{11}\sin11\omega t+\cdots\right)$$

输出基波电流的有效值为

$$I_L = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{2}\,\pi}I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_d = 0.78I_d$$

基波电流为电动机产生有效转矩的电流，电动机实际通过的电流是矩形波电流的有效值。

$$I_{\sim} = \sqrt{\frac{2}{3}}I_d = 0.816I_d$$

所以，直流侧电流为

$$I_d=\frac{\pi}{\sqrt{6}}I_L=\sqrt{\frac{3}{2}}I_{\sim}$$

式中，I_L 为电动机负载电流基波有效值（A）；$I_{\sim}$ 为电动机定子电流有效值（A）。

对电动机负载，一般要求考虑一定的过载能力，因此要计算出最大直流电流

$$I_{dm}=KI_d$$

式中，K 为过载倍数（一般取 1.5~2.0）。

3）换向电容由下式确定：

$$C=\frac{t_0^2}{3L}$$

式中，C 为换相电容（μF）；t_0 为晶闸管计算用反压时间（μs）；L 为星形接线电动机的每相漏感（μH）。

电容器峰值电压

$$U_{cm}=I_{dm}\sqrt{\frac{4L}{3C}}+\sqrt{2}U_L\sin\varphi$$

式中，$\sin\varphi$ 为电动机电流滞后正弦值。

4）逆变侧晶闸管的电压、电流值。逆变侧晶闸管所承受的正、反最大的电压为

$$U_{VT}=I_d\sqrt{\frac{4L}{3C}}+\sqrt{2}U_L\sin\varphi$$

逆变侧晶闸管流过的电流 I_L，考虑到晶闸管导通角为 120°，则晶闸管电流有效值为

$$I_{VT}=\frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

5）隔离二极管的电压与电流。隔离二极管承受的最大反向电压为

$$U_{VD}=I_d\sqrt{\frac{4L}{3C}}+2\sqrt{2}U_L\sin\varphi$$

隔离二极管的电流等级选用与主晶闸管相同的电流等级。

6）平波电抗器。平波电抗器用于限制直流电流脉动，较大的平波电感可增加系统运行的稳定性，平波电感的理论计算较复杂，在工程实际中，常采用经验公式计算所需平波电感值

$$L_d=(10\sim20)L$$

14-72：设计考虑变频器过载倍数 K 为 1.7 时，直流侧电流为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）573 A　　（B）592 A　　（C）608 A　　（D）620 A

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 325 页。

直流侧电流为

$$I_{dm}=KI_d=K\frac{\pi}{\sqrt{6}}I=\frac{\pi}{\sqrt{6}}\times1.7\times279\text{ A}=608\text{ A}$$

14-73：设晶闸管计算用反压时间为 400 μs，直流侧最大直流电流为 600 A，换相电容 C

的电容量和峰值电压为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）82 μF，1820 V　　（B）86 μF，2071 V

（C）91 μF，2192 V　　（D）95 μF，2325 V

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 325 页。

换相电容 C 的电容为

$$C=\frac{t_0^2}{3L}=\frac{400^2}{3\times620}\mu\text{F}=86\ \mu\text{F}$$

峰值电压为

$$U_{\text{cm}}=I_{\text{dm}}\sqrt{\frac{4L}{3C}}+\sqrt{2}U\sin\varphi=\left(600\sqrt{\frac{4\times620}{3\times86}}+\sqrt{2}\times380\times0.392\right)\text{V}=2071\text{ V}$$

14-74：设直流侧最大直流电流 $I_{\text{d}}=I_{\text{dm}}=600$ A，换相电容值为 90 μF，逆变侧晶闸管承受的最大电压和电流有效值为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）1931 V，325 A　　（B）2029 V，346 A

（C）2145 V，367 A　　（D）2196 V，385 A

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 325 页。

逆变侧晶闸管承受的最大电压为

$$U_{\text{VT}}=I_{\text{d}}\sqrt{\frac{4L}{3C}}+\sqrt{2}U\sin\varphi=\left(600\sqrt{\frac{4\times620}{3\times90}}+\sqrt{2}\times380\times0.392\right)\text{V}=2029\text{ V}$$

逆变侧晶闸管承受的电流有效值为

$$I_{\text{VT}}=\frac{I_{\text{d}}}{\sqrt{3}}=\frac{600}{\sqrt{3}}\text{A}=346\text{ A}$$

14-75：设直流侧最大直流电流 $I_{\text{d}}=I_{\text{dm}}$ 为 600 A，换相电容值为 85 μF，逆变侧隔离二极管承受的最大反向电压为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）2012 V　　（B）2186 V　　（C）2292 V　　（D）2432 V

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 325 页。

逆变侧隔离二极管承受的最大反向电压为

$$U_{\text{VD}}=I_{\text{d}}\sqrt{\frac{4L}{3C}}+2\sqrt{2}U\sin\varphi=\left(600\sqrt{\frac{4\times620}{3\times90}}+2\sqrt{2}\times380\times0.392\right)\text{V}=2292\text{ V}$$

例题 14-76～14-80：某炼钢厂除尘风机电动机额定功率 $P_{\text{e}}=2100$ kW，额定转速 $n_{\text{e}}=1500$ r/min，额定电压 $U_{\text{e}}=10$ kV，除尘风机额定功率 $P_{\text{ef}}=2000$ kW，额定转速 $n_{\text{ef}}=1491$ r/min，根据工艺状况，工作在高速或低速状态，高速时转速为 1350 r/min，低速时为 300 r/min，年作业 320 天，每天 24 h，进行方案设计时，需做液力耦合器调速方案和变频器调速方案的技术比较，变频器效率为 0.96，忽略风机电动机效率和功率因数影响。请回答下列问题，并列出解答过程。

14-76：在做液力耦合器调速方案时，计算确定液力耦合器工作轮有效工作直径 D 是多

少？（供配电 2012 年考题）

（A）124 mm　　（B）246 mm　　（C）844 mm　　（D）890 mm

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 362 页。

液力耦合器工作轮有效工作直径 D，按电动机功率、转速计算：

$$D=K\sqrt[5]{\frac{P_e}{n_e^3}}=14.7\times\sqrt[5]{\frac{2100}{1500^3}}\ \text{mm}=844\ \text{mm}$$

【知识点解析】

一般厂家提供的产品样本都列有耦合器的适用条件和范围，但在使用时仍应进行校验计算，以满足最不利工况的需要。下面介绍两种简单的方法。

1）查表法。用计算出的负荷容量和转速，从产品样本的有关曲线和参数表中初步选定。

2）确定耦合器有效工作直径法。可按下式：

$$D=K\sqrt[5]{\frac{P_N}{n_B^3}}$$

式中，D 为耦合器的有效工作直径（m）；K 为系数，与耦合器性能有关，$K=14.7\sim13.8$，工程一般选用 14.7；P_N 为负载额定轴功率（kW）；n_B 为泵轮转速（r/min）。

14-77：若该电动机工作在额定状态，液力耦合器输出转速为 300 r/min 时，电动机的输出功率是多少？（供配电 2012 年考题）

（A）380 kW　　（B）402 kW　　（C）420 kW　　（D）444 kW

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 362 页。

液力耦合器输出转速为 300 r/min 时，电动机的输出功率为

$$\frac{P_T}{P_e}=\frac{n_T}{n_e}\Rightarrow P_T=P_e\frac{n_T}{n_e}=2100\times\frac{300}{1500}\ \text{kW}=420\ \text{kW}$$

14-78：下列有关液力耦合器调速的描述，哪一项是错误的？

（A）液力耦合器是装于电动机和负载轴之间的机械无级调速装置，由两个互不接触的金属叶轮组成，在两个轮之间充满油，利用轮和轮之间的摩擦力来传输转矩

（B）上述油压越大，所传输的转矩越大，因此可通过调节油压来改变转矩，从而实现调速

（C）液力耦合器是一种高效的调速方法

（D）液力耦合器调速的转差能量变成油的热能而消耗掉，并存在漏油和机械磨损现象

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 361 页。

25.7 节中，液力耦合器属于转差率调速，是低效调速方法，答案 C 错。

14-79：若该电动机采用变频调速器，除尘风机转速为 300 r/min 时，电动机的输出功率是多少？（供配电 2012 年考题）

（A）13.32 kW　　（B）16.29 kW　　（C）16.8 kW　　（D）80.97 kW

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第306页。

根据风机轴功率与转速的特性关系，电动机的输出功率为

$$\frac{P_T}{P_{ef}}=\left(\frac{n_T}{n_{ef}}\right)^3 \Rightarrow P_T=P_{ef}\left(\frac{n_T}{n_{ef}}\right)^3=2000\times\left(\frac{300}{1491}\right)^3\ \text{kW}=16.29\ \text{kW}$$

14-80：若该风机拟采用变频调速，说明除变频调速方式外，下列风量控制方式中哪种节能效果好？（供配电2012年考题）

（A）风机出口挡板控制　　（B）电动机变极调速加风机出口挡板控制

（C）风机入口挡板控制　　（D）电动机变极调速加风机入口挡板控制

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第307页、第310页例11。

第307页中结论，电动机变极调速加风机挡板控制要比风机挡板控制节能效果好，第310页查图6-11：电动机变极调速加风机入口挡板控制对比电动机变极调速加风机出口挡板控制的功率消耗相对值低，节能效果好。选D。

例题14-81~14-83：某厂为进行节能技术改造，拟将原由晶闸管整流器供电的直流电动机改用交流调速同步电动机，电动机水冷方式不变，原直流电动机的功率$P_e=2500\ \text{kW}$，转速$n_e=585\ \text{r/min}$，要求调速比大于15:1，请回答下列问题。

14-81：本工程选用哪种交流调速系统最合适？

（1）由变频电源供电的交流调速系统　（B）定子调压调速系统

（C）串级调速系统　　（D）调速型液力耦合器

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第271页。

表25-2中，变频调速调速比为10:1或更大，满足要求，选A。

14-82：改造方案如选6极同步电动机，要求电动机的转速为585 r/min，同步电动机的定子变频电源频率接近下列哪一项？

（A）29 Hz　　（B）35 Hz　　（C）39 Hz　　（D）59 Hz

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第269页表25-1。

6极对应磁极对数为3，同步电动机的定子频率为

$$f_1=\frac{np}{60}=\frac{585\times3}{60}\ \text{Hz}=29.25\ \text{Hz}$$

【知识点解析】

交流电动机的转速为

异步电动机　　$$n=n_0(1-s)=\frac{60f_1}{p}(1-s)$$

同步电动机　　$$n=n_0=\frac{60f_1}{p}$$

式中，n为电动机转速（r/min）；n_0为电动机同步转速（r/min）；p为电动机极对数；s为转差率；f_1为电源频率（Hz）。

14-83：改造方案如选交-交变频器调速系统，关于电动机的交-交变频器调速系统的描述，下列哪一项是错误的？（供配电 2006 年考题）

（A）用晶闸管移相控制的交-交变频调速系统，适用于大功率（3000 kW 以上）、低速（600 r/min 以下）的调速系统

（B）交-交变频调速电动机可以是同步电动机或异步电动机

（C）当电源频率为 50 Hz 时，交-交变频最大输出频率被限制为 $f \leqslant 16 \sim 20$ Hz

（D）当输出频率超过 16~20 Hz 后，随输出频率增加，输出电流的谐波分量减少

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 331 页。

25.5.4 节中，交-交变频调速系统输出频率在 1/3~1/2 范围内，随输出频率增加，输出电流的谐波分量增加，答案 D 错。

例题 14-84：某厂有一台变频调速异步电动机，额定功率为 75 kW，额定电压为 380 V，额定转速为 985 r/min，额定频率为 50 Hz，最高弱磁转速为 1800 r/min，采用通用电压型变频装置供电，如果电动机拖动恒转矩负载，当电动机运行在 25 Hz 时，变频器输出电压最接近下列哪项数值？

（A）380 V　　（B）190 V　　（C）400 V　　（D）220 V

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 308 页。

25.1.1.1 节中变频调速原理 $U_1 \approx E_1 = K_e f_1 \Phi_m$ 中，可以看出变频器输出电压与频率大致成正比，故电动机运行在 25 Hz 时变频器输出电压约在 190 V。

例题 14-85~14-86：某车间使用的电磁转差离合器传动电动机功率为 45 kW，额定转速为 1480 r/min，离合器调速范围为 10∶1，离合器额定转差率为 3%，离合器系数 K 为 1.5。请回答以下问题。

14-85：电磁转差离合器额定工作条件下的传递效率为下列哪项数值？

（A）92%　　（B）97%　　（C）95%　　（D）97%

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 283 页。

电磁转差离合器额定工作条件下的传递效率为

$$\eta = \frac{n_2}{n_1} = 1 - s = 1 - 0.03 = 0.97 = 97\%$$

14-86：某车间使用的电磁转差离合器将从动部分转速调整到 1200 r/min，若此时离合器转矩为 215.6 N·m，励磁电压为 73 V。电磁转差离合器励磁电流为下列哪项数值？

（A）9.63 A　　（B）3.41 A　　（C）3.97 A　　（D）4.78 A

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 284 页。

电磁转差离合器调速特性经验公式：

$$n_2 = n_1 - K\frac{T^2}{I_f^4} = \left[1480 - 1.5 \times \frac{(215.6)^2}{I_f^4}\right] \text{r/min} = 1200 \text{ r/min}$$

推导出电磁转差离合器励磁电流为

$$I_f=\sqrt[4]{\frac{KT^2}{n_1-n_2}}=\sqrt[4]{\frac{1.5\times(215.6)^2}{1480-1200}}\ \text{A}=3.97\ \text{A}$$

例题 14-87～14-89：某电动机的主要数据：额定功率为 2500 kW，定子额定电压为 6000 V，额定转速 $n=490$ r/min，转子额定电压为 1440 V，转子额定电流为 1070 A，采用双星形连接的转差率调节器。请回答下列问题。

14-87：若双星形连接的转差率调节器的常接电阻选用 7 号铸铁电阻器，每箱电阻值为 0.14 Ω，每箱长期允许电流为 181 A，请计算常接电阻值和选用几箱并联。

（A）0.0148 Ω，2 箱　　（B）0.0467 Ω，3 箱

（C）0.0648 Ω，3 箱　　（D）0.0741 Ω，4 箱

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 358 页。

转子电阻：

$$r_{*N}=s_N=\frac{n_0-n_N}{n_0}=\frac{500-490}{500}=0.02;\ R_{RN}=\frac{U_{ze}}{\sqrt{3}I_{ze}}=\frac{1440}{\sqrt{3}\times1070}\ \Omega=0.778\ \Omega$$

常接电阻：

$$r_{*1}=2(0.05-r_{*N})=2\times(0.05-0.02)=0.06;\ r_1=r_{*1}R_{RN}=0.06\times0.778\ \Omega=0.0467\ \Omega$$

$N=\frac{0.14}{r_1}=\frac{0.14}{0.0467}$箱$=3$ 箱，允许电流 $I=3\times181$ A $=543$ A，大于双星形连接的转子电流 1070/2 A = 535 A，可选 3 箱。

14-88：请计算转差率调节电阻值。若双星形连接的转差率调节器的每相转差率调节电阻选用 7 号铸铁电阻器，3 箱并联 2 组串联，每箱电阻值为 0.14 Ω，每箱长期允许电流为 181A，是否满足设计要求？

（A）0.0778 Ω，是　　（B）0.0467 Ω，是

（C）0.0648 Ω，否　　（D）0.0778 Ω，否

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 358 页。

转差率调节电阻：$r_t=0.1R_{RN}=0.1\times0.778\ \Omega=0.0778\ \Omega$

每相转差率调节电阻选用 3 箱并联 2 组串联，$R=\frac{0.14}{3}\times2\ \Omega=0.0932\ \Omega>0.0778\ \Omega$，允许电流 $I=3\times181$ A $=543$ A，大于双星形连接的转子电流 1070/2 A = 535 A，满足要求。

14-89：若该转差继电器吸引电流为 4 A，释放电流为 3.4 A，转差继电器附加电阻为 0.4 Ω，请计算转差继电器附加电阻值和转差继电器连接点电阻值为下列哪项数值。

（A）0.778 Ω，0.0467 Ω　　（B）0.8969 Ω，0.0416 Ω

（C）0.0778 Ω，0.0467 Ω　　（D）8.969 Ω，0.0416 Ω

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电气设计手册》（下册）第 358 页。

转差继电器附加电阻：$r_f=\frac{1.5I_{RN}}{2I_{RN}}r_1-r_{*1}=\left(\frac{1.5\times1070}{2\times4}\times0.467-0.4\right)\Omega=8.969\ \Omega$

转差继电器连接点电阻：$r_x=0.89r_1=0.89\times0.0467\ \Omega=0.0416\ \Omega$

例题 14-90~14-92：某台直流他励电动机的主要数据为：额定功率 $P=22\,\text{kW}$，额定电压 $U=220\,\text{V}$，额定转速 $n=1000\,\text{r/min}$，额定电流为 110 A，电枢回路电阻为 $0.1\,\Omega$。请回答下列问题。

14-90：下列关于直流电动机电枢回路串联电阻调速方法的特性，哪一项是错误的？（供配电 2010 年考题）

（A）电枢回路串联电阻的调速方法，属于恒转矩调速

（B）电枢回路串联电阻的调速方法，一般在基速以上需要提高转速时使用

（C）电枢回路串联电阻的调速方法，因某机械特性变软，系统转速受负载的影响较大，轻载时达不到调速的目的，重载时还会产生堵转

（D）电枢回路串联电阻的调速方法在串联电阻中流过的是电枢电流，长期运行损耗大

答案：【B】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 469~470 页 6.1.1.1 节。

电枢回路串联电阻的调速方法，属于恒转矩调速，A 正确。并且只能在需要向下调速时使用，B 错误。电动机电枢回路中串联附加电阻时，特性的斜率增加，机械特性变软，系统转速受负载的影响较大，轻载时达不到调速的目的，重载时还会产生堵转；而且在串联电阻中流过的是电枢电流，长期运行损耗也大，C、D 正确。

14-91：该电动机若采用电枢串电阻的方法调速，调速时保持直流电源电压和励磁电流为额定值，负载转矩为电动机的额定转矩，该直流电动机运行在 $n=800\,\text{r/min}$ 时，反电动势及所串电阻为下列哪组数值？（供配电 2010 年考题）

（A）167.2 V，$0.38\,\Omega$　　（B）176 V，$0.30\,\Omega$

（C）188.1 V，$0.19\,\Omega$　　（D）209 V，$0.01\,\Omega$

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 3 页表 23-1 或《电气传动自动化技术手册》第三版第 469~470 页。

已知额定功率 $P=22\,\text{kW}$，额定电压 $U_N=220\,\text{V}$，额定转速 $n_N=1000\,\text{r/min}$，额定电流为 110 A，电枢回路电阻为 $0.1\,\Omega$，则电势常数为

$$K_e\Phi=\frac{U_N-I_aR_a}{n_N}=\frac{220-110\times0.1}{1000}=0.209$$

直流电动机运行在 $n=800\,\text{r/min}$ 时，反电动势为

$$E=K_e\Phi n=0.209\times800\,\text{V}=167.2\,\text{V}$$

此时电枢所串电阻为

$$R=\frac{U_s-K_e\Phi n-I_aR_a}{I_a}=\frac{220-0.209\times800-110\times0.1}{110}\,\Omega=0.38\,\Omega$$

14-92：若采用改变磁通实现调速，当电枢电流为 100 A，电动机电动势常数为 0.175 V/(r/min)时，直流电动机的转速应为下列哪项？（供配电 2010 年考题）

（A）1004 r/min　　（B）1138 r/min　　（C）1194 r/min　　（D）1200 r/min

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 3 页表 23-1 或《电气传动自动化技术手册》第三版第 472 页。

直流电动机的转速为

$$n=\frac{U_s-I_aR_a}{K_e\Phi}=\frac{220-100\times0.1}{0.175}\text{ r/min}=1200\text{ r/min}$$

例题 14-93~14-95：某台直流他励电动机主要数据：额定功率为 22 kW，额定电压为 220 V，额定转速为 1000 r/min，效率为 0.909、电枢回路电阻为 0.1 Ω。请回答以下问题。

14-93：若采用电枢串电阻的方法调速，调速时保持该直流电动机端电压和励磁电流均为额定值不变，负载转矩不变且等于电动机的额定转矩。若将直流电动机转速调整为 800 r/min 时，直流电动机电枢回路所需的串联电阻为下列哪项数值？

（A）0.38 Ω　　（B）0.45 Ω　　（C）0.29 Ω　　（D）0.15 Ω

答案：【A】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 272 页表 2-1。

他励直流电动机电枢电流为

$$I_a=\frac{P}{U\eta}=\frac{22\times1000}{220\times0.909}\text{ A}=110\text{ A}$$

他励直流电动机转速 800 r/min 的电动势为

$$E_1=K_e\Phi n_1=\frac{E}{n}n_1=\frac{U-I_aR}{n}n_1=\frac{220-110\times0.1}{1000}\times800\text{ V}=167.2\text{ V}$$

他励直流电动机电枢回路所需的串联电阻为

$$R_1=\frac{U-I_aR-E_1}{I_a}=\frac{220-110\times0.1-167.2}{110}\Omega=0.38\ \Omega$$

14-94：若采取改变电枢电压的方法来调速，调速时保持该直流电动机励磁电流和电枢电阻均为额定值不变，负载转矩不变且等于电动机的额定转矩。若将直流电动机转速调整为 600 r/min 时，直流电动机的电枢电压为下列哪项数值？

（A）110.7 V　　（B）128.6 V　　（C）136.4 V　　（D）140.4 V

答案：【C】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 272 页表 2-1。

他励直流电动机转速 600 r/min 的电动势为

$$E_2=K_e\Phi n_2=\frac{E}{n}n_2=\frac{209}{1000}\times600\text{ V}=125.4\text{ V}$$

他励直流电动机转速调整为 600 r/min 时，直流电动机的电枢电压为

$$U_2=E_2+I_aR=(125.4+110\times0.1)\text{ V}=136.4\text{ V}$$

14-95：某并励直流电动机参数：额定功率为 17 kW，额定电压为 220 V，额定转速为 3000 r/min，额定电流为 88.9 A，电枢回路总电阻为 0.0896 Ω，励磁回路总电阻为181.5 Ω，该直流电动机为恒转矩负载，忽略电枢反应影响。当采用电枢回路串联电阻调速时，额定运行时在电枢回路串入串联电阻为 0.1552 Ω，则直流电动机的转速为下列哪项数值？

（A）2267 r/min　　（B）2815 r/min　　（C）3000 r/min　　（D）3120 r/min

答案：【B】

解答过程：依据《电气传动自动化技术手册》第三版第 272 页表 2-1。

并励直流电动机额定电枢电流为

$$I_a = I_N - \frac{U_N}{R_f} = \left(88.9 - \frac{220}{181.5}\right) A = 87.69 A$$

并励直流电动机的电动势结构常数为

$$K_e \Phi = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 87.69 \times 0.0896}{3000} = 0.0707$$

额定运行时电枢回路串入串联电阻为 0.1552 Ω，直流电动机的转速为

$$n = \frac{U_N - I_a (R_a + R)}{K_e \Phi} = \frac{220 - 87.688 \times (0.0896 + 0.15)}{0.0707} r/min = 2815 r/min$$

14.5 变流器相关计算

【知识点说明】

变流器相关计算属于重要考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）、《电气传动自动化技术手册》第三版等。要求熟练掌握整流变压器计算容量、平波和均衡电抗器、二次侧电压电流的相关计算。由于考试依据中两本手册对应内容略有不同，会影响计算结果，请考生注意。

依据书目：

《钢铁企业电力设计手册》（下册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

例题 14-96~14-97：某车间变电所设 10/0.4 供电变压器一台，变电所设有低压配电室，用于布置电压配电柜。变压器容量为 1250 kV·A，$U_d\% = 5$，△/丫接线，短路损耗为 13.8 kW。变电所低压侧总负荷为 836 kW，功率因数为 0.76。低压用电设备中电动机 M_1 的额定功率为 45 kW，额定电流为 94.1 A，额定转速为 740 r/min，效率为 92.0%，功率因数为 0.79，最大转矩比为 2。电动机 M_1 的供电电缆型号为 VV-0.6/1 kV，$3\times25+1\times16\ mm^2$，长度为 220 m，单位电阻为 0.723 Ω/km。请回答下列问题，并列出解答过程。（计算中忽略变压器进线侧阻抗和变压器至低压配电柜的母线阻抗）

14-96：车间内设有整流系统，整流变压器额定容量为 118 kV·A，$U_d\% = 5$，△/丫接线，额定电压为 380/220 V，二次相电流为 300 A，接三相桥式整流电路。求额定直流输出电流 I_{ed} 计算值为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（A）259 A　（B）300 A　（C）367 A　（D）519 A

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 395 页表 26-18。

△/丫接线，整流变压器额定直流输出电流 I_{ed}：

$$I_{b2} = 0.816 I_{ed} \Rightarrow I_{ed} = I_{b2}/0.816 = 367.6 A$$

14-97：车间设有整流系统，整流变压器额定容量为 118 kV·A，$U_d\% = 5$，△/丫接线，额定电压为 380/227 V，接三相桥式整流电路。若三相桥式整流电路直流输出电压平均值 $U_d = 220$ V，直流输出电流 I_d 为额定直流输出电流 I_{de} 的 1.5 倍时，计算的换相角 γ 应为下列哪项数值？（供配电 2017 年考题）

（A）4.36°　（B）5.23°　（C）6.18°　（D）7.32°

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（上册）第 378 页例题、第 394 页。

已知 $U_d=220\,\text{V}$，$I_d=1.5I_{de}$，$X_{*c}=5\%$，查图 26-26 中 $C=0.5$，$U_{d0}=2.34U_2=2.34\times\dfrac{227}{\sqrt{3}}\,\text{V}=306.69\,\text{V}$。

整流角 α 计算：

$$U_d=U_{d0}\left(\cos\alpha-CX_{*c}\frac{I_d}{I_{de}}\right)$$

$$\Rightarrow 220=306.69\times(\cos\alpha-0.5\times5\%\times1.5)$$

$$\Rightarrow\alpha=40.97^\circ$$

换相角 γ 计算：

$$\frac{U_d}{U_{d0}}=CX_{*c}\frac{I_d}{I_{de}}=\frac{\cos\alpha-\cos(\alpha+\gamma)}{2}$$

$$\Rightarrow\frac{U_d}{U_{d0}}=0.5\times5\%\times1.5=\frac{\cos 40.97^\circ-\cos(40.97^\circ+\gamma)}{2}$$

$$\Rightarrow\gamma=6.18^\circ$$

例题 14-98～14-102：某小型轧机主传动电动机型号为 Z560-4B，额定功率 $P_e=800\,\text{kW}$，额定电压 $U_e=660\,\text{V}$，额定转速 $n_e=410\,\text{r/min}$，最高转速为 1100 r/min，极对数 $p=3$，电枢电流为 1305 A，电枢电阻为 0.028 Ω，电动机过载倍数为 2.5 倍，效率为 91.9%，Z 系列电动机有补偿；整流变压器为 Y/Y 联结，$U_d\%=5$，整流桥为三相桥式反并联接线，$a_{zx}=30^\circ$，设均衡电流为额定电流的 5%；电流电源为三相 10 kV，电网波动系数 $\beta=0.95$，控制方式为速度反馈可逆系统。请回答下列问题。

14-98：整流变压器计算容量应为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）1217.08 kV·A　　（B）1275.04 kV·A

（C）1329.52 kV·A　　（D）1338.79 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 401～404 页 26.3 节和 26.3.7 节示例。

因为均衡电流为额定电流的 5%，所以正常工作时，变流器的额定电流为

$$I_{dc}=I_e+I_{jh}=1.05I_e=1.05\times1305\,\text{A}=1370.25\,\text{A}$$

最大可能的整流电流为

$$I_{dm}=2.5I_e+I_{jh}=2.55I_e=2.55\times1305\,\text{A}=3327.75\,\text{A}$$

$$r=I_e/U_e r_a=1305/660\times0.028=0.055$$

变压器二次相电压为

$$U_2=\frac{U_e\left[1+r\left(\dfrac{I_d}{I_e}-1\right)\right]}{A\beta\left(\cos\alpha_{cx}-C\dfrac{U_d\%}{100}\dfrac{I_d}{I_e}\right)}=\frac{660[1+0.055(2.5-1)]}{2.34\times0.95\left(0.866-0.5\times\dfrac{5}{100}\times2.5\right)}\,\text{V}=399.1\,\text{V}$$

整流桥为三相桥式反并联接线，查表 26-18 中系数 $K_2=0.816$，整流变二次相电流为

$$I_2=0.816I_{dc}=1118.12\ \text{A}$$

二次侧整流变压器计算容量为

$$S_{b2}=3U_2I_2=3\times399.1\times1118.12\times10^{-3}\ \text{kV}\cdot\text{A}=1338.73\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

变压器相一次电压和变比为

$$U_1=\frac{10000}{\sqrt{3}}\text{V},K=\frac{U_1}{U_2}$$

整流桥为三相桥式反并联接线，查表 26-18 中系数 $K_1=0.816$，整流变一次相电流为

$$I_1=0.816I_{dc}/K=\frac{1118.12}{\frac{10000}{\sqrt{3}\times399.1}}\text{A}=127.8\ \text{A}$$

一次侧整流变压器计算容量为

$$S_{b1}=3U_1I_1=3\times\frac{10000}{\sqrt{3}}\times127.8\times10^{-3}\ \text{kV}\cdot\text{A}=1338.73\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

整流变压器计算容量为

$$S_b=\frac{S_{b1}+S_{b2}}{2}=1338.73\ \text{kV}\cdot\text{A}$$

14-99：若整流变压器二次相电压 $U_2=410$ V，电动机允许的电流脉动率 $U_d=5\%$，此时按限制电流脉动选择电抗器，则电抗器电感应为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）4.60 mH　　（B）5.65 mH　　（C）5.77 mH　　（D）5.83 mH

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 404~408 页 26.3 节和 26.4.5 节示例 2。

因为均衡电流为额定电流的 5%，电动机电感为

$$L_d=K_d\frac{19.1U_e}{2pn_eI_e}=0.1\times\frac{19.1\times660}{2\times3\times410\times1305}\text{mH}=0.393\ \text{mH}$$

三相桥式电压器电感按两倍计算为

$$L_b=2\times K_b\frac{U_d\%U_2}{100\ I_{dc}}=2\times\frac{5}{100}\times\frac{410}{1.05\times1305}\text{mH}=0.116\ \text{mH}$$

整流桥为三相桥式反并联接线，查表 26-19 中系数 $K'_{md}=1.05$，按限制电流脉动选择电抗器电感为

$$L_{dk1}=K'_{md}\frac{U_2}{V_dI_{dc}}-(L_d+L_b)=\left[1.05\times\frac{410}{5\%\times1.05\times1305}-(0.393+0.116)\right]\text{mH}=5.77\ \text{mH}$$

14-100：若整流变压器二次相电压 $U_2=410$ V，取最小工作电流 $I_{js}=5\%I_{ed}$（I_{ed}为变流器的额定电流），此时按电流连续选择电抗器，电抗器电感应为下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）2.68 mH　　（B）3.74 mH　　（C）3.86 mH　　（D）3.92 mH

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第404~408页26.3节和26.4.5节示例2。

因为均衡电流为额定电流的5%，电动机电感为

$$L_d = K_d \frac{19.1U_e}{2pn_e I_{ed}} = 0.1 \times \frac{19.1 \times 660}{2 \times 3 \times 410 \times 1305}\,\text{mH} = 0.393\,\text{mH}$$

三相桥式电压器电感按两倍计算为

$$L_b = 2 \times K_b \frac{U_d\% U_2}{100\, I_{dc}} = 2 \times \frac{5}{100} \times \frac{410}{1.05 \times 1305}\,\text{mH} = 0.116\,\text{mH}$$

整流桥为三相桥式反并联接线，查表26-19中系数 $K'_{js} = 0.695$，按电流连续选择电抗器电感

$$L_{dk1} = K'_{js}\frac{U_2}{I_{js}} - (L_d + L_b) = \left[0.695 \times \frac{410}{5\% \times 1305} - (0.393 + 0.116)\right]\text{mH} = 3.86\,\text{mH}$$

14-101：若整流变压器二次相电压 $U_2 = 410\,\text{V}$，取均衡电流 $I_{jh} = 5\% I_{ed}$（I_{ed}为变流器的额定电流），此时按均衡电流选择电抗器，则电抗器电感应为下列哪项数值？（供配电2016年考题）

（A）9.37 mH　　（B）17.36 mH　　（C）17.48 mH　　（D）17.54 mH

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第404~408页26.3节和26.4.5节示例2。

因为均衡电流为额定电流的5%，电动机电感为

$$L_d = K_d \frac{19.1U_e}{2pn_e I_e} = 0.1 \times \frac{19.1 \times 660}{2 \times 3 \times 410 \times 1305}\,\text{mH} = 0.393\,\text{mH}$$

三相桥式电压器电感按两倍计算：

$$L_b = 2 \times K_b \frac{U_d\% U_2}{100\, I_{dc}} = 2 \times \frac{5}{100} \times \frac{410}{1.05 \times 1305}\,\text{mH} = 0.116\,\text{mH}$$

整流桥为三相桥式反并联接线，查表26-19中系数 $K'_{jh} = 2.8$，按均衡电流选择电抗器电感：

$$L_{dk3} = K'_{jh}\frac{U_2}{I_{jh}} - L_b = \left(2.8 \times \frac{410}{5\% \times 1305} - 0.116\right)\text{mH} = 17.47\,\text{mH}$$

14-102：若整流变压器二次相电压 $U_2 = 410\,\text{V}$，交流侧相电流 $I_2 = 1050\,\text{A}$，计算系数 K_j 取50，则交流侧进线电抗器电感应为下列哪项数值？（供配电2016年考题）

（A）0.05 mH　　（B）0.06 mH　　（C）0.07 mH　　（D）0.10 mH

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第409页。

交流侧进线电抗器电感为

$$L_j = K_j \frac{U_2}{\omega I_2} = 50 \times \frac{410}{314 \times 1050}\,\text{mH} = 0.06\,\text{mH}$$

例题14-103~14-107：某轧钢厂有一台轧机传动直流电动机，额定功率为1000 kW，额定转速为600 r/min，最高弱磁转速为1200 r/min，电枢回路额定电压为750 V，效率为0.92。

采用三相桥式晶闸管整流装置供电，电枢回路可逆，四象限运行。电动机的过载倍数为1.5倍。车间变电所的电压等级为10 kV，拟在传动装置进线侧设置一台整流变压器，需要进行变压器的参数设计。请回答下列问题。

14-103：下列整流变压器接线形式哪一种是不可采用的？（供配电2006年考题）

（A）Dd0　　（B）Dy11　　（C）Yy0　　（D）Yd5

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第403页26.3.6节。

由于三相中含有三次谐波电流，一般整流变压器的一次绕组或二次绕组应至少一侧采用三角形接法，使激磁电流中三次谐波分量在三角形绕组中环流。选项C不符合要求。

14-104：整流变压器的二次侧额定电压最接近下列哪项数值？（供配电2006年考题）

（A）850 V　　（B）600 V　　（C）700 V　　（D）800 V

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第402页26.3.3节。

三相桥式可逆调速系统二次线电压为

$$U_N=\sqrt{3}U_2=(1\sim1.1)U_e=(1\sim1.1)\times750\ \text{V}=750\sim825\ \text{V}$$

14-105：电动机在额定电流下运行，整流变压器二次绕组Y接，其相电流有效值最接近哪项数值？（供配电2006年考题）

（A）1182 A　　（B）1088 A　　（C）1449 A　　（D）1522 A

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第402页。

三相桥式晶闸管整流装置二次绕组Y接线，查表26-18中$K_2=0.816$，整流变压器二次相电流为

$$I_2=K_2I_{de}=0.816\times[1000/(0.75\times0.92)]\ \text{A}=1182.6\ \text{A}$$

14-106：若整流变压器二次额定电压为825 V，整流装置最小移相角为30°，当电网电压跌落10%时，整流装置的最大输出电压最接近下列哪项数值？（供配电2006年考题）

（A）1505 V　　（B）869 V　　（C）965 V　　（D）1003 V

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第402页。

三相桥式晶闸管整流装置查表26-18中$A=2.34$，整流装置直流输出电压最大为

$$U_d=AU_2\beta\cos\alpha=2.34\times\frac{825}{\sqrt{3}}\times0.9\times\cos30^\circ\ \text{V}=868.725\ \text{V}$$

14-107：若整流变压器二次侧计算额定电压为780 V，计算电流为1100 A，则整流变压器额定容量最接近下列哪项数值？（供配电2006年考题）

（A）1250 kV·A　　（B）1000 kV·A　　（C）1600 kV·A　　（D）1050 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第402页。

三相桥式晶闸管整流装置查表26-18中，$S_2=3U_2I_2$、$\frac{S_{bj}}{S_2}=1$，整流装置整流变压器二次侧容量为

$$S_{bj}=S_2=3U_2I_2=3\times\frac{780}{\sqrt{3}}\times1100\,\text{kV}\cdot\text{A}=1486\,\text{kV}\cdot\text{A}$$

例题 14-108~14-111：某工程中有一台直流电动机，额定功率为 1500 kW，额定电压为 660 V，额定电流为 2500 A，采用晶闸管变流器调速，速度反馈不可逆速度调节系统，变流器主电路为三相全控桥接线，电网额定电压为 10 kV，电压波动系数为 0.95。请回答下列问题。

14-108：整流变压器阀侧绕组为 Y 接线，则绕组最低相电压应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）660 V　　（B）622 V　　（C）326 V　　（D）381 V

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 402 页 26.3.3 节或《电气传动自动化技术手册》第三版第 503 页。

直流电动机采用不可逆调速系统，则 Y 形联结的阀侧相电压 U_2 为

$$U_2=\frac{(0.95\sim1.0)U_e}{\sqrt{3}}=\frac{(0.95\sim1.0)\times660}{\sqrt{3}}\,\text{V}=362\sim381\,\text{V}$$

14-109：若整流变压器阀侧绕组为 Y 接线，相电压为 390 V，变流器最小触发延迟角为 30°，该变流器输出空载电压应为下列哪项？

（A）751 V　　（B）375 V　　（C）790 V　　（D）867 V

答案：【A】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 402 页。

三相桥式晶闸管整流装置查表 26-18 中 $A=2.34$，整流装置直流输出电压最大为

$$U_d=AU_2\beta\cos\alpha=2.34\times390\times0.95\times\cos30^\circ\,\text{V}=750.8\,\text{V}$$

14-110：整流变压器阀侧绕组 D 接线，则电动机额定运行时该整流变压器阀侧绕组相电流为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）2500 A　　（B）2040 A　　（C）589 A　　（D）1178 A

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 402 页。

整流变压器阀侧绕组 Δ 接线，对应三相桥式 D/d、Y/d，查表 26-16 中或查图 26-29 和图 26-30 中 $I_{b2}/I_d=0.471$。整流变压器阀侧绕组相电流为

$$I_{b2}=0.471I_d=0.471\times2500\,\text{A}=1177.5\,\text{A}$$

14-111：若整流变压器阀侧绕组为 Y 接线，当变压器空载整流电压为 800 V 时，整流变压器的等值容量应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题改编）

（A）3464 kV·A　　（B）2100 kV·A　　（C）2000 kV·A　　（D）2826 kV·A

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 402 页。

变流器三相全控桥接线，查表 26-18 中，$S_2=3U_2I_2$、$\frac{S_{bj}}{S_2}=1$、$K_2=0.816$，整流装置整流变压器容量为

$$S_{bj}=S_2=3U_2I_2=3U_2K_2I_2=3\times\frac{800}{\sqrt{3}}\times0.816\times2500\,\text{kV}\cdot\text{A}=2826.7\,\text{kV}\cdot\text{A}$$

14.6 电动机继电保护、PLC、控制电器闭环调节系统

【知识点说明】

1）低压电动机继电保护属于重要考点，依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011、《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）12.1 节等。要求熟练掌握低压电动机继电保护配置要求、过载保护和热继电器的整定计算等。高压电动机继电保护配置详见第 9 章，低压电动机保护电器、控制电器详见第 1 章。

2）PLC 属于普通考点，依据《电气传动自动化技术手册》第三版、《钢铁企业电力设计手册》（下册）。要求掌握 PLC 的工作原理、选择，现场总线、输入/输出（I/O）模块的选择等。

3）控制电器闭环调节系统属于冷门考点，依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）。要求了解二阶闭环调节系统。

依据书目：

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011

《钢铁企业电力设计手册》（下册）

《电气传动自动化技术手册》第三版

《工业与民用供配电设计手册》第四版（上、下册）

例题 14-112～14-114：某住宅建筑其一台水泵由异步电动机驱动，电动机参数如下：额定功率为 15 kW，额定电压为 380 V，额定效率为 0.87，额定功率因数为 0.89，起动电流倍数为 7.0，起动时间为 4 s。请回答以下问题。

14-112：该水泵频繁起动且系统瞬时停电恢复供电时需要自起动，则该水泵电动机不宜设置下列哪项保护？并说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）短路保护　　（B）接地故障保护　　（C）断相保护　　（D）低电压保护

答案：【D】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011。

第 2.3.1 条　交流电动机应装设短路保护和接地故障的保护。A、B 应装设。

第 2.3.10 条　连续运行的三相电动机，当采用熔断器保护时，应装设断相保护；当采用低压断路器保护时，宜装设断相保护。在条文说明中采用接触器作为控制电器宜装设断相保护。C 宜装设。

第 2.3.12 条　该水泵属于非重要电动机且系统瞬时停电恢复供电时需要自起动。在条文说明中交流电动机装设低电压保护是为了限制自起动，而不是保护电动机本身。所以 D 不应装设。

14-113：该水泵电动机采用电动机过载保护时，若已知电流互感器变比为 50/5，星形接线，过载保护动作于断电时，其整定电流和动作时间应为下列哪项数值？

（A）3.42 A，4 s　　（B）4.15 A，4 s　　（C）3.42 A，6 s　　（D）4.15 A，6 s

答案：【D】

解答过程：依据《通用用电设备配电设计规范》GB 50055—2011。

三相电动机的额定电流为

$$I_r=\frac{P_r}{\sqrt{3}U_r\eta\cos\varphi}=\frac{15\times10^3}{\sqrt{3}\times380\times0.87\times0.89}\text{ A}=29.43\text{ A}$$

过载保护动作于断电时可靠系数为 1.2，热过载继电器整定电流为

$$I_{zd}=K_kK_{jx}\frac{I_r}{n_{TA}K_h}=1.2\times1\times\frac{29.43}{50/5\times0.85}\text{ A}=4.15\text{ A}$$

热过载继电器的动作时间应大于电动机的起动时间 4 s，取 6 s。

14-114：假设该电动机采用热继电器作过载和断相保护器件。为提高运行功率因数及减少起动时对电网的冲击，设计方案中考虑星-三角起动方式和电动机单独补偿电容器。接线如图 14-10 所示。采用星-三角起动方式时热继电器的装设方式有图中 3 个位置。位置 1、位置 2、位置 3 热继电器的整定电流为下列哪一组数值？

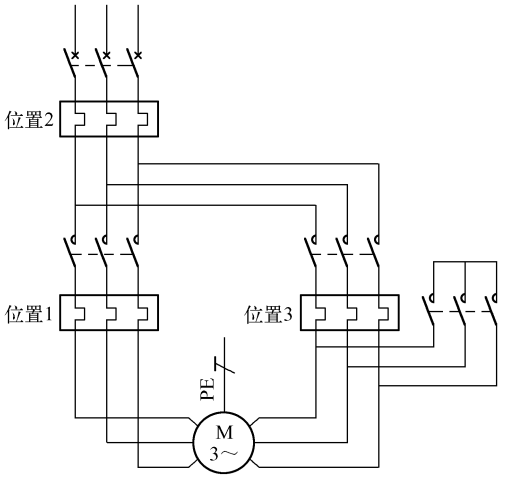


图 14-10　星-三角起动电路中热继电器的装设位置

（A）13.22 A，22.79 A，13.22 A

（B）17.07 A，29.43 A，17.07 A

（C）29.43 A，17.07 A，29.43 A

（D）22.79 A，13.22 A，22.79 A

答案：【B】

解答过程：依据《工业与民用供配电设计手册》第四版（下册）第 1091～1092 页（第三版第 670 页）。

三相电动机的额定电流为

$$I_r=\frac{P_r}{\sqrt{3}U_r\eta\cos\varphi}=\frac{15\times10^3}{\sqrt{3}\times380\times0.87\times0.89}\text{ A}=29.43\text{ A}$$

12.1.6.2 节中，对应图 12.1-25 中的位置：

位置 1 热继电器整定电流应为电动机额定电流乘以 0.58，即 0.58×29.34＝17.07A；

位置 2 热继电器整定电流应为电动机额定电流，即 29.34 A；

位置 3 热继电器的整定电流和位置 1 相同。

例题 14-115~14-116：图 14-11 为二阶闭环调节系统的标准形式，请回答下列问题。

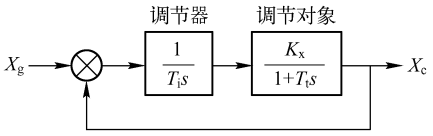


图 14-11　二阶闭环调节系统

14-115：二阶闭环调节系统的描述中，下列哪些项描述是错误的？（供配电 2009 年考题）

（A）该系统的调节器为时间常数 T_i 的积分调节器

（B）该系统的调节对象为时间常数 T_t、放大系数 K_x 的惯性环节

（C）该系统为二阶闭环调节系统

（D）该系统的闭环传递函数为 $(1+K)/(1+T_t s+T_t s^2)$

答案：【D】

解答过程：依据《钢铁企业设计电力手册》（下册）第 457 页。

二阶闭环传递函数为

$$K(s)_b=\frac{1}{1+2T_t s+2T_t^2 s^2}$$

，

答案 D 错。

14-116：假设 $K_x=2.0$，$T_t=0.02$，为将调速系统校正为二阶闭环调节系统的标准形式，该积分调节器的积分调节时间 T_i 应为下列哪一项？（供配电 2010 年考题）

（A）0.04　　（B）0.08　　（C）0.16　　（D）0.8

答案：【B】

解答过程：依据《钢铁企业电力设计手册》（下册）第 457 页。

为了得到二阶预期系统的过渡过程，当积分调节器的积分时间为 $T_i=2K_xT_t$，可以将调速系统校正为二阶闭环调节系统的标准形式。

积分调节时间 T_i 为

$$T_i=2K_xT_t=2\times2\times0.02=0.08$$

例题 14-117：图 14-12 为某移动设备的正反方向运行原理系统图及接线图，该移动设备运行区间受 PLC（可编程序控制器）控制，到达两端位置受限位开关（LS_1、LS_2）控制停止，请对图中标注的 a、b、c、d 环节中原理、逻辑或电缆接线进行分析，判断错误有几处，并对错误环节的原因进行解释说明。（供配电 2017 年考题）

（A）1 处　　（B）2 处　　（C）3 处　　（D）4 处

答案：【A】

解答过程：

1）题目图中 a 处，该处 KM_1、KM_2 处 L_1、L_3 两相接线回路互换，可以实现正反转切换功能，正确。

2）题目图中 d 处，该处为两端位置受限位开关（LS_1、LS_2），到达限位处 PLC 控制 LS_1 或 LS_2 开关闭合，KA_2 或 KA_3 线圈通电，可以使 KA_2 或 KA_3 常闭触头断开，KM_1 或 KM_2 线圈断电，KM_1 或 KM_2 接触器主触头断开，可以实现到达限位处控制 PLC 停止移动设备，正确。

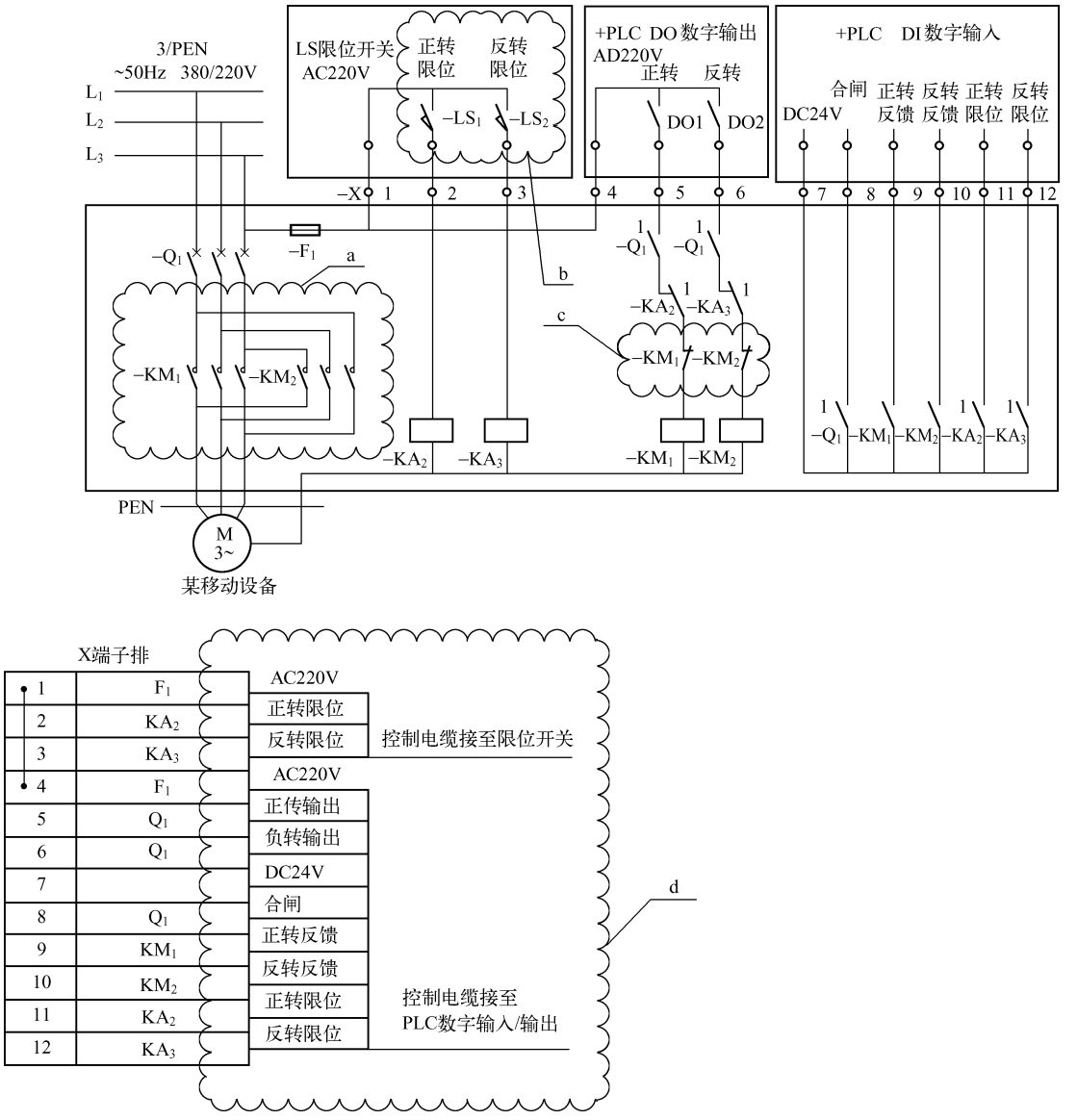


图 14-12　移动设备的正反方向运行原理图及接线图

3）题目图中 c 处，该处为通过 KM_1 或 KM_2 接触器辅助常闭触头实现移动设备正反转工作状态闭锁。当 KM_1 线圈通电时 KM_1 接触器辅助常闭触头断开使对应的 KM_2 线圈无法通电；当 KM_2 线圈通电时 KM_2 接触器辅助常闭触头断开使对应的 KM_1 线圈无法通电，从而实现正反转切换时闭锁功能。题目图中无法显示该功能，错误。

4）题目图中 d 处，该处为 X 端子排接线说明，波浪号范围内从上图中编号 1~12 接口内容对应，正确；图中给出的端子排接线说明明显错位半格。波浪号范围外编号 7 中 DC24V 对应接线未写明。

共计 1 处错误，选 A。

第 15 章　建筑智能化

【知识点导图】

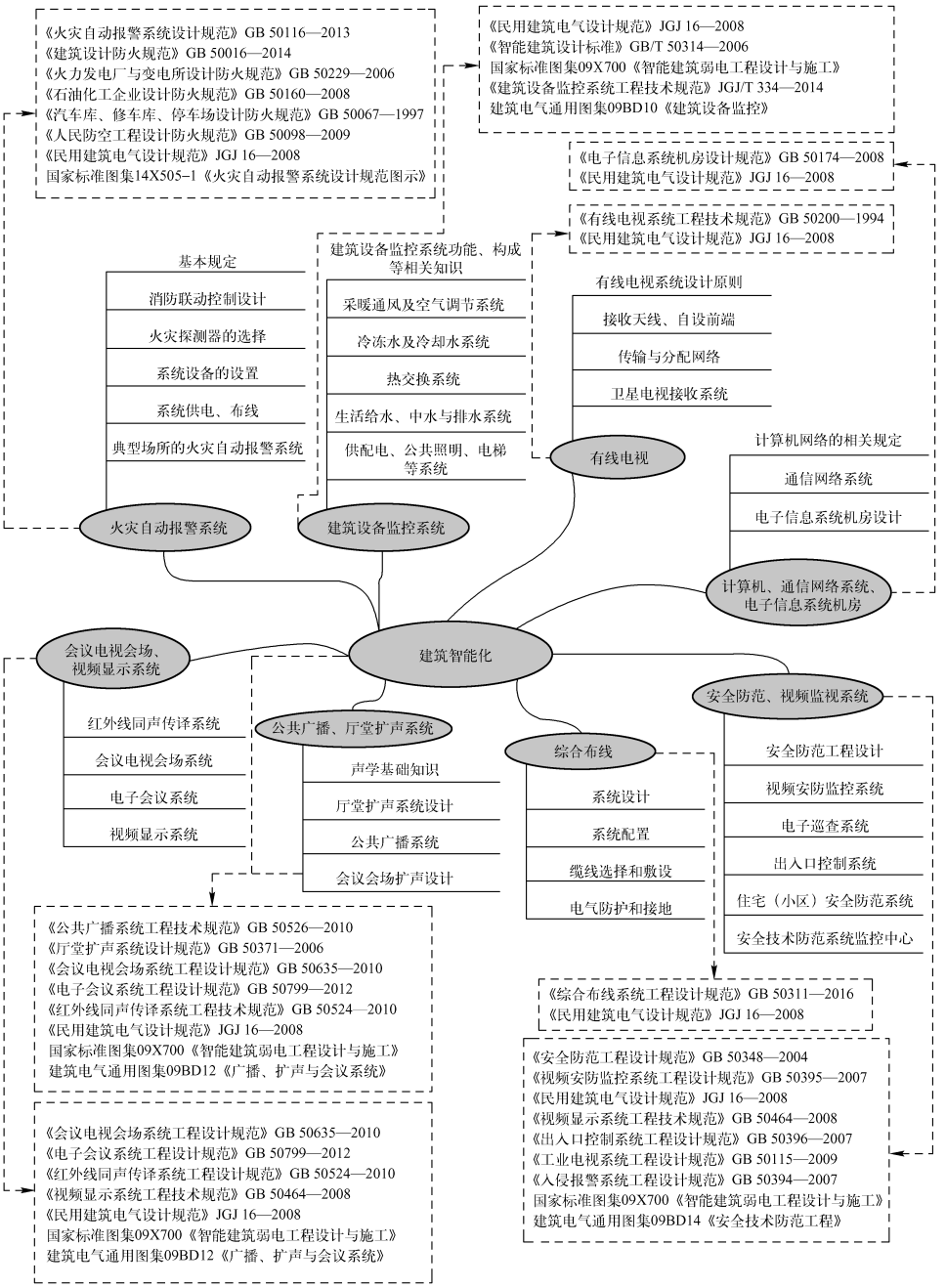


图 15-1　建筑智能化知识点导图

图 15-1 所示的建筑智能化知识点导图中列出了本章节的历年考试中的主要考点。本章考点繁多，比较散乱，规范结合与冲突较多，详见各小节的知识点说明和相应例题。

其中《综合布线系统工程设计规范》GB 50311 已经更新到 2016 版，2017 年考试会用到。

15.1 火灾自动报警系统

【知识点说明】

1）火灾自动报警系统基本规定属于普通考点，依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 等。要求掌握火灾自动报警系统形式的选择与设计、报警区域的划分、消防控制室的要求。

2）消防联动控制设计属于普通考点，依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 等。要求掌握防烟排烟系统、防火门及防火卷帘系统、火灾警报和消防应急广播系统等的联动控制设计。

3）火灾探测器的选择属于重要考点，依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 等。要求熟练掌握火灾探测器各种情况下设计与选择。

4）系统设备的设置属于普通考点，依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 等。要求掌握消防专用电话的设置、消防应急广播的设置、火灾警报器的设置等。

5）系统供电、布线属于普通考点，依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 等。要求掌握剩余电流式、测温式电气火灾监控探测器的设置，火灾自动报警系统传输线路形式和截面选择、系统接地等。

6）典型场所的火灾自动报警系统属于普通考点，依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 等。要求掌握住宅建筑、道路隧道、油罐区电缆隧道、高度大于 12 m 的空间场所火灾自动报警系统，可燃气体探测报警系统，电气火灾监控系统。

7）其他场所防火设计详见各自专业规范，具体防火设计要求可以参照一级注册消防工程师《消防安全技术实务》。由于《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013 规定条款较为粗略，详细的设计可参照国家标准图集 14X505-1《火灾自动报警系统设计规范图示》。

依据书目：

《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013

《建筑设计防火规范》GB 50016—2014

《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229—2006

《石油化工企业设计防火规范》GB 50160—2008

《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》GB 50067—1997

《人民防空工程设计防火规范》GB 50098—2009

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

参考书目：

国家标准图集 14X505-1《火灾自动报警系统设计规范图示》

一级注册消防工程师《消防安全技术实务》

例题 15-1：有一个大型超高层办公楼，高 300 m，总建筑面积 20 万 m^2，地下 4 层，地上 78 层，有 4 层裙房。地下 1、2 层层高 5.5 m，主要为设备机房和功能性用房；地下 3、4 层层高 3.5 m，主要为停车场；在裙房 4 层有一大型会议室，能召开国际会议。预计在楼内办公人员 1.1 万人。该会议室长 30 m、宽 20 m、地面至吊顶 6.5 m（为平吊顶）。在会议室内需设置火灾探测器，则至少应设置多少个点型感烟探测器？（供配电 2016 年考题）

（A）10 个　　（B）12 个　　（C）14 个　　（D）16 个

答案：【A】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

查规范中表 6.2.2，一个感烟探测器的保护面积 A 为 80 m^2。第 6.2.2 条，楼内办公人员 1.1 万人，系数 K 取 0.7~0.8。

点型感烟探测器个数为

$$N=\frac{S}{KA}=\frac{30\times20}{(0.7\sim0.8)\times80}=9.37\sim10.71,\text{取 10 个}$$

【知识点解析】

点型火灾探测器的设置应符合下列规定：

1）探测区域的每个房间应至少设置一只火灾探测器。

2）感烟火灾探测器和 A1、A2、B 型感温火灾探测器的保护面积和保护半径，应按表 15-1确定；C、D、E、F、G 型感温火灾探测器的保护面积和保护半径，根据生产企业设计说明书确定，但不应超过表中的规定。

表 15-1　感烟火灾探测器和 A1、A2、B 型感温火灾探测器的保护面积和保护半径

火灾探测器的种类	地面面积 S/m^2	房间高度 h/m	一只探测器的保护面积 A 和保护半径 R					
			屋顶坡度 θ					
			$\theta\leqslant15°$		$15°<\theta\leqslant30°$		$\theta>30°$	
			A/m^2	R/m	A/m^2	R/m	A/m^2	R/m
感烟火灾探测器	$S\leqslant80$	$h\leqslant12$	80	6.7	80	7.2	80	8.0
	$S>80$	$6<h\leqslant12$	80	6.7	100	8.0	120	9.9
		$h\leqslant6$	60	5.8	80	7.2	100	9.0
感温火灾探测器	$S\leqslant30$	$h\leqslant8$	30	4.4	30	4.9	30	5.5
	$S>30$	$h\leqslant8$	20	3.6	30	4.9	40	6.3

注：建筑高度不超过 14 m 的封闭探测空间，且火灾初期会产生大量的烟时，可设置点型感烟火灾探测器。

3）感烟火灾探测器、感温火灾探测器的安装间距，应根据探测器的保护面积 A 和保护半径 R 确定，并不应超过图 15-2 所示探测器安装间距的极限曲线 D_1~D_{11}（含 D_9'）规定的范围。

4）一只探测区域内所需设置的探测器数量，不应少于下式的计算值：

$$N=\frac{S}{KA}$$

式中，N 为探测器数量（只），N 应取整数；S 为该探测区域面积（m^2）；K 为修正系数，容纳人数超过 1000 人的公共场所宜取 0.7~0.8；容纳人数为 2000~10000 人的公共场所宜取 0.8~0.9，容纳人数为 500~2000 人的公共场所宜取 0.9~1.0，其他场所可取 1.0；A 为探测器的保护面积（m^2）。

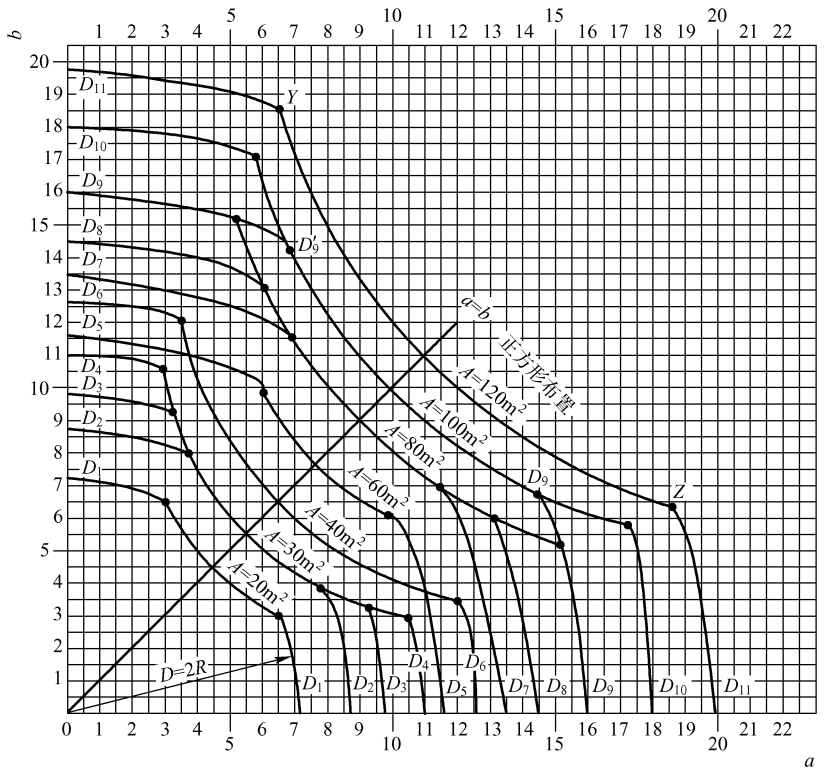


图 15-2　探测器安装间距的极限曲线

A—探测器的保护面积（m^2）　a、b—探测器的安装间距（m）

$D_1 \sim D_{11}$（含 D'_9）—在不同保护面积 A 和保护半径下确定探测器安装间距 a、b 的极限曲线

Y、Z—极限曲线的端点（在 Y 和 Z 两点间的曲线范围内，保护面积可得到充分利用）

例题 15-2：火灾报警区域的划分，下列哪些符合规范的规定？（供配电 2016 年考题改编）

（A）一个火灾报警区域只能是一个防火分区

（B）一个火灾报警区域只能是一个楼层户

（C）一个火灾报警区域可以是发生火灾时不用同时联动消防设备的几个相邻防火分区

（D）一个火灾报警区域可以是发生火灾时需要同时联动消防设备的几个相邻楼层

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 3.3.1-1 条　报警区域应根据防火分区或楼层划分；可将一个防火分区或一个楼层划分为一个报警区域，也可将发生火灾时需要同时联动消防设备的相邻几个防火分区或楼层划分为一个报警区域。

例题 15-3：有一高度为 15 m 的空间场所，当设置线型光束感烟火灾探测器时，下列哪一项不符合规范的要求？（供配电 2016 年考题改编）

（A）探测器应设置在建筑顶部

（B）探测器宜采用分层组网的探测方式

（C）宜在 6~7 m 和 11~12 m 处各增设一层探测器

（D）分层设置的探测器保护面积可按常规计算，并宜与下层探测器交错布置

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 12.4.3 条　线型光束感烟火灾探测器的设置：

探测器应设置在建筑顶部。A 对。

探测器宜采用分层组网的探测方式。B 对。

建筑高度不超过 16 m 时，宜在 6~7 m 增设一层探测器。C 错。

分层设置的探测器保护面积可按常规计算，并宜与下层探测器交错布置。D 对。

例题 15-4：交通隧道内火灾自动报警系统的设置，下列哪一项不符合规范的要求？（供配电 2016 年考题改编）

（A）应设置火灾自动探测装置

（B）隧道出入口和隧道内每隔 200 m 处，应设置报警电话

（C）应设置火灾应急广播

（D）每隔 100~150 m 处设置声光报警装置

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 12.1.1 条　城市道路隧道、特长双向公路隧道和道路中的水底隧道，应同时采用线型光纤感温火灾探测器和点型红外火焰探测器（或图像型火灾探测器）；其他公路隧道应采用线型光纤感温火灾探测器或点型红外火焰探测器。A 对。

第 12.1.4 条　隧道出入口以及隧道内每隔 200 m 处应设置报警电话，每隔 50 m 处应设置手动火灾报警按钮和闪烁红光的火灾声光警报器。隧道入口前方 50~250 m 内应设置指示隧道内发生火灾的声光警报装置。B 对，D 错。

第 12.1.8 条　消防应急广播可与隧道内设置的有线广播合用，C 对。

例题 15-5：某大型超市，建筑物中做防火分隔的防火门及防火卷帘系统有联动控制设计要求，下面哪一项是错误的？（供配电 2006 年考题改编）

（A）疏散通道上设置的防火卷帘联动控制方式，防火分区内任两只独立的感烟火灾探测器或任一只专门用于联动防火卷帘的感烟火灾探测器的报警信号应联动控制防火卷帘下降至距楼板面 1.8 m 处；任一只专门用于联动防火卷帘的感温火灾探测器的报警信号应联动控制防火卷帘下降到楼板面；在卷帘的任一侧距卷帘纵深 0.5~5 m 内应设置不少于两只专门用于联动防火卷帘的感温火灾探测器

（B）非疏散通道上设置的防火卷帘的联动控制设计联动控制方式，应由防火卷帘所在防火分区内任两只独立的火灾探测器的报警信号，作为防火卷帘下降的联动触发信号，并应联动控制防火卷帘直接下降到楼板面

（C）疏散通道上各防火门的开启、关闭及故障状态信号应反馈至防火门监控器

（D）防火卷帘下降至距楼板面 0.8 m 处、下降到楼板面的动作信号和防火卷帘控制器直接连接的感烟、感温火灾探测器的报警信号，应反馈至消防联动控制器

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 4.6.5 条　防火卷帘下降至距楼板面 1.8 m 处、下降到楼板面的动作信号和防火卷帘控制器直接连接的感烟、感温火灾探测器的报警信号，应反馈至消防联动控制器。D 错。

例题 15-6~15-10：某设有几种空调的办公建筑，建筑高度 105 m，地下共两层，其中地下二层为停车库，地下一层设有消防水泵房、变配电室、备用发电机房、通风机排烟合用机房，地上共 29 层，裙房共 5 层，其中在三层有一多功能共享大厅（长×宽×高 = 54 m×54 m×15 m，无窗，设有防排烟系统），消防控制室设在首层。请回答下列问题。

15-6：在三层的多功能共享大厅内设置线型光束感烟火灾探测器，探测器至侧墙的水平距离应为多少？（供配电 2007 年考题）

（A）小于或等于 7 m　　（B）小于或等于 9 m

（C）小于或等于 7 m，但大于或等于 0.5 m　（D）小于或等于 9 m，但大于或等于 0.5 m

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 6.2.15 条　探测器至侧墙水平距离不应大于 7 m，且不应小于 0.5 m。

【知识点解析】

线型光束感烟火灾探测器的设置应符合下列规定：

1）探测器的光束轴线至顶棚的垂直距离宜为 0.3~1.0 m，距地高度不宜超过 20 m。

2）相邻两组探测器的水平距离不应大于 14 m，探测器至侧墙水平距离不应大于 7 m，且不应小于 0.5 m，探测器的发射器和接收器之间的距离不宜超过 100 m。

3）探测器应设置在固定结构上。

4）探测器的设置应保证其接收端避开日光和人工光源直接照射。

5）选择反射式探测器时，应保证在反射板与探测器间任何部位进行模拟试验时，探测器均能正确响应。

15-7：在三层的多功能共享大厅内设置线型光束感烟火灾探测器。则线型光束感烟火灾探测器最少需要多少组？（供配电 2007 年考题）

（A）2 组　　（B）3 组　　（C）4 组　　（D）5 组

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 6.2.15 条　相邻两组探测器的水平距离不应大于 14 m，探测器至侧墙水平距离不应大于 7 m，且不应小于 0.5 m。多功能共享大厅长、宽均为 54 m，当选 4 组时探测器至侧墙水平距离 6 m，即(3×14+6+6) m = 54 m，探测器的发射器和接收器之间的距离 54 m 小于 100 m，满足规范要求，选 C。

15-8：地下室发生火灾时，当确认火灾后，发出报警程序顺序如何？请说明理由。（供配电 2007 年考题改编）

（A）先接通地下二层　　（B）先接通地下各层

（C）应同时向全楼进行报警　　（D）先接通地下及地上各层

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 4.8.1 条　火灾自动报警系统应设置火灾声光警报器，并应在确认火灾后起动建筑内的所有火灾声光警报器。

第 4.8.8 条　消防应急广播系统的联动控制信号应由消防联动控制器发出。当确认火灾后，应同时向全楼进行广播。

15-9：在该建筑地下一层下列哪项所列场所必须设置消防专用电话分机？请说明依据。（供配电 2007 年考题）

（A）仅在消防水泵设置

（B）仅在消防水泵房、备用发电机房设置

（C）在消防水泵房、备用发电机房、配变电室、通风及排烟合用机房需设置

（D）仅在疏散走道设置

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 6.7.4 条　电话分机或电话插孔的设置，消防水泵房、发电机房、配变电室、计算机网络机房、主要通风和空调机房、防排烟机房、灭火控制系统操作装置处或控制室、企业消防站、消防值班室、总调度室、消防电梯机房及其他与消防联动控制有关的且经常有人值班的机房应设置消防专用电话分机。消防专用电话分机，应固定安装在明显且便于使用的部位，并应有区别于普通电话的标识。

15-10：在三层的多功能共享大厅内发生火灾并报警后，消防控制设备应对防烟、排烟系统的联动控制方式中哪一条不符合规定？（供配电 2007 年考题改编）

（A）应由加压送风口所在防火分区内的两只独立的火灾探测器或一只火灾探测器与一只手动火灾报警按钮的报警信号，作为送风门开启和加压送风机起动的联动触发信号，并应由消防联动控制器联动控制相关层前室等需要加压送风场所的加压送风口开启和加压送风机起动

（B）应由同一防烟分区内的两只独立的火灾探测器的报警信号，作为排烟口、排烟窗或排烟阀开启的联动触发信号，并应由消防联动控制器联动控制排烟口、排烟窗或排烟阀的开启，同时停止该防烟分区的空气调节系统

（C）送风口、排烟口、排烟窗或排烟阀开启和关闭的动作信号，防烟、排烟风机起动和停止及电动防火阀关闭的动作信号，均应反馈至消防联动控制器

（D）排烟风机入口处的总管上设置的 180℃排烟防火阀在关闭后应直接联动控制风机停止，排烟防火阀及风机的动作信号应反馈至消防联动控制器

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 4.5.4 条　排烟风机入口处的总管上设置的 280℃排烟防火阀在关闭后应直接联动控制风机停止，排烟防火阀及风机的动作信号应反馈至消防联动控制器。答案 D 不符合规定。

例题 15-11～15-13：某城市有一甲级写字楼，总建筑面积约 7 万 m^2，地下 3 层，地上 24 层，可容纳人数为 9000 人，三层设有一多功能厅，地下室为车库。请回答以下问题，并列出解答过程。

15-11：若多功能厅长 33 m、宽 15 m，从地面到吊顶高度为 9 m，吊顶平整，多功能厅容纳人数为 2000 人。在多功能厅设置感烟火灾探测器，最少需要设置多少个？请列出解答过程。（供配电 2006 年考题改编）

（A）6 个　　（B）8 个　　（C）10 个　　（D）12 个

答案：【B】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

写字楼容纳人数为9000人的公共场所K修正系数为0.8；多功能厅大于80 m²、高度为9 m时一个感烟火灾探测器保护面积为80 m²，最少需要设置感烟火灾探测器个数为

$$N=\frac{S}{KA}=\frac{15\times33}{0.8\times80}=7.7344,\text{取}8\text{个}$$

15-12：该建筑地下三层（包含车库）设有35只3 W扬声器，首层大厅中设有20只3 W扬声器，地上第二、三层（含多功能厅）设有35只3 W扬声器，第四层以上在走道上设有3W扬声器，走道长度为360 m（按照直线距离估算）。火灾应急广播功率放大器的容量为下列哪项数值？（供配电2006年考题改编）

（A）1000 W　　（B）1200 W　　（C）1600 W　　（D）2000 W

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013第6.6.1条。

建筑二层走道长度为400 m，应安装扬声器个数360/25个=14.4个，取15个，满足规范中距离要求。

依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010第3.7.3条。

火灾应急广播功率放大器的容量为

$\sum P=1.5\times(35\times3+20\times3+35\times3+21\times15\times3)\text{ kW}=1822.5\text{ kW}$，2000 W满足功率要求

【知识点解析】

消防应急广播扬声器的设置，民用建筑内扬声器应设置在走道和大厅等公共场所。每个扬声器的额定功率不应小于3 W，其数量应能保证从一个防火分区内的任何部位到最近一个扬声器的直线距离不超过25 m，走道末端距最近的扬声器距离不应超过12.5 m。用于紧急广播的广播功率放大器，额定输出功率不应小于其所驱动总和的1.5倍，全部紧急广播功率放大器的功率总容量，应满足所有广播的要求。

15-13：该建筑地下两层停车库，车库长99 m、宽58.8 m，每跨的间距为9 m×8.4 m，主梁高0.7 m，每跨中间有十字次梁，次梁高0.6 m，无吊顶，楼板厚130 mm，层高4.2 m。在进行火灾自动报警系统设计时，车库装设感温探测器的总数应为下列哪项数值？（供配电2006年考题改编）

（A）616个　　（B）462个　　（C）308个　　（D）154个

答案：【A】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

1）两层的停车库总面积$S=2\times99\times58.8\text{ m}^2=11642.4\text{ m}^2$。主梁间面积为$9\times8.4\text{ m}^2=75.6\text{ m}^2$。主梁间构成的单独空间块数为11642.4/75.6块=154块。主梁间构成的单独空间又被十字次梁分割成4个，十字次梁分割后小块的面积为$75.6/4\text{ m}^2=18.9\text{ m}^2$，共计154×4块=616块。

2）主梁间面积75.6 m²和主梁高0.7 m，设感温探测器根据第6.2.3条至少设置一个。

3）十字次梁分割后小块的面积为18.9 m²和十字次梁高0.6 m，查附录F中图F层高4.2 m对应梁高要求0.2 m，查附录G表G中至少每个十字次梁分割后小块应设置一个感温探测器。故应设置616个感温探测器。

注：一般整体浇铸梁的厚度包括楼板厚度，预制件梁的厚度不包括楼板厚度。因题目未说明梁的形式，故本题按照梁高未减去楼板厚计算。

【知识点解析】

在有梁的顶棚上设置点型感烟火灾探测器、感温火灾探测器时，应符合下列规定：

1）当梁突出顶棚的高度小于200 mm时，可不计梁对探测器保护面积的影响。

2）当梁突出顶棚的高度为200~600 mm时，应按图15-3、表15-2确定梁对探测器保护面积的影响和一只探测器能够保护的梁间区域的数量。

3）当梁突出顶棚的高度超过600 mm时，被梁隔断的每个梁间区域应至少设置一只探测器。

4）当被梁隔断的区域面积超过一只探测器的保护面积时，被隔断的区域应按规范规定正常计算探测器的设置数量。

5）当梁间净距小于1 m时，可不计梁对探测器保护面积的影响。

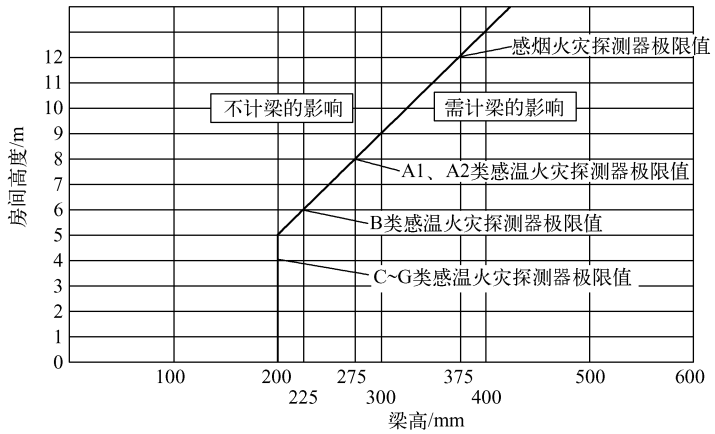


图15-3　不同高度的房间梁对探测器设置的影响

表15-2　按梁间区域面积确定一只探测器保护的梁间区域的个数

探测器的保护面积 A/m²		梁隔断的梁间区域面积 Q/m²	一只探测器保护的梁间区域的个数/个
感温探测器	20	$Q>12$	1
		$8<Q\leqslant12$	2
		$6<Q\leqslant8$	3
		$4<Q\leqslant6$	4
		$Q\leqslant4$	5
	30	$Q>18$	1
		$12<Q\leqslant18$	2
		$9<Q\leqslant12$	3
		$6<Q\leqslant9$	4
		$Q\leqslant6$	5
感烟探测器	60	$Q>36$	1
		$24<Q\leqslant36$	2
		$18<Q\leqslant24$	3
		$12<Q\leqslant18$	4
		$Q\leqslant12$	5
	80	$Q>48$	1
		$32<Q\leqslant48$	2
		$24<Q\leqslant32$	3
		$16<Q\leqslant24$	4
		$Q\leqslant16$	5

例题 15-14~15-16：某新建办公建筑高 126 m，设避难层和屋顶直升机停机坪，请回答下列问题，并列出解答过程。

15-14：本建筑物按民用建筑分类和楼板的耐火极限，应为下列哪一项？（供配电 2011 年考题改编）

（A）一类，≥2 h　（B）一类，1.5 h　（C）二类，≥1.5 h　（D）二类，≥1 h

答案：【A】

解答过程：依据《建筑设计防火规范》GB 50016—2014。

表 5.1.1 中，大于 50 m 办公建筑为民用建筑一类。

第 5.1.4 条　建筑高度大于 100 m 的民用建筑，其楼板的耐火极限不应低于 2.00 h。

15-15：建筑物设置火灾自动报警系统时，其形式的选择，下面哪一项不符合规范要求？（供配电 2011 年考题改编）

（A）仅需要报警，不需要联动自动消防设备的保护对象，宜采用区域报警系统

（B）不仅需要报警，同时需要联动自动消防设备，且只设置一台具有集中控制功能的火灾报警控制器和消防联动控制器的保护对象，应采用集中报警系统，并应设置一个消防控制室

（C）设置一个消防控制室的保护对象应采用控制中心报警系统

（D）已设置两个及以上集中报警系统的保护对象，应采用控制中心报警系统

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50016—2013。

第 3.2.1 条　火灾自动报警系统形式的选择中：仅需要报警，不需要联动自动消防设备的保护对象宜采用区域报警系统。A 对。不仅需要报警，同时需要联动自动消防设备，且只设置一台具有集中控制功能的火灾报警控制器和消防联动控制器的保护对象，应采用集中报警系统，并应设置一个消防控制室。B 对。设置两个及以上消防控制室的保护对象，或已设置两个及以上集中报警系统的保护对象，应采用控制中心报警系统。D 对，C 错。

15-16：本建筑物的消防设备供电干线及分支干线，应采用哪一种电缆？（供配电 2011 年考题）

（A）有机绝缘耐火类电缆　　（B）难燃型电缆

（C）矿物绝缘电缆　　（D）耐热型电缆

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 13.10.4.1 条　火灾自动报警系统保护对象分级为特级的建筑物，其消防设备供电干线及分支干线，应采用矿物绝缘电缆。

依据《建筑设计防火规范》GB 50016—2014。

第 10.1.10 条　消防配电线路应满足火灾时连续供电的需要，其敷设应符合：

1）明敷时（包括敷设在吊顶内），应穿金属导管或采用封闭式金属槽盒保护，金属导管或封闭式金属槽盒应采取防火保护措施；当采用阻燃或耐火电缆并敷设在电缆井、沟内时，可不穿金属导管或采用封闭式金属槽盒保护；当采用矿物绝缘类不燃性电缆时，可直接明敷。

2）暗敷时，应穿管并应敷设在不燃性结构内且保护层厚度不应小于 30 mm。

3）消防配电线路宜与其他配电线路分开敷设在不同的电缆井、沟内；确有困难需敷设在同一电缆井、沟内时，应分别布置在电缆井、沟的两侧，且消防配电线路应采用矿物绝缘类不燃性电缆。

综上所述，选 C。

例题 15-17：某大学图书馆有一间书库长 22 m、宽 8 m、高 3 m，房间内有 10 个书架（最后一个书架靠墙），书架高度 2.9 m，应选择几个感烟探测器？

（A）2　　（B）3　　（C）10　　（D）12

答案：【C】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 6.2.7 条　房间被书架、设备或隔断等分隔，其顶部至顶棚或梁的距离小于房间净高的 5%时，每个被隔开的部分应至少安装一只点型探测器。房高 3 m，书架高度 2.9 m，书架至房顶小于房间净高的 5%，房间内有 10 个书架（最后一个书架靠墙），应布置 10 个感烟探测器。

例题 15-18：有一办公建筑需设计火灾自动报警系统。在第六层的设计中，按照区域共划分 3 个相邻的防火分区，分别为 1、2、3 区，设计了一回树形结构总线，从 1 区进入，总线横跨 1、2、3 区，在 2 区连接了 80 个设备，在 3 区连接了 80 个设备，穿越 1 区，在 1 区没有连接设备。这回总线应该设置最少多少个总线短路隔离器？

（A）5　　（B）6　　（C）7　　（D）8

答案：【B】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 3.1.6 条　系统总线上应设置总线短路隔离器，每只总线短路隔离器保护的火灾探测器、手动火灾报警按钮和模块等消防设备的总数不应超过 32 点；总线穿越防火分区时，应在穿越处设置总线短路隔离器。

第 2 区和 3 区中总线短路隔离器 80/32 个 = 2.5 个，取 3 个；第 1 区无设备不用安装总线短路隔离器；所以总线短路隔离器设置 6 个。

【知识点解析】

国家标准图集 14X505-1《火灾自动报警系统设计规范图示》第 12 页中，树形结构系统总线穿越防火分区时总线短路隔离器设置如图 15-4 所示。

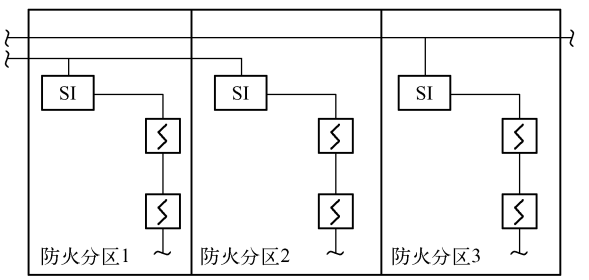


图 15-4　总线穿越防火分区时总线短路隔离器设置图

例题 15-19：有一办公建筑需设计火灾自动报警系统。建筑内所需的火灾探测器、手动火灾报警按钮和模块的设备和地址总数为 12000 点，其中消防联动模块地址 3000 点。采用

单独的火灾报警控制器和消防联动控制器，其中消防联动控制器一台可接 12 回总线，每回总线的额定容量为 100 个点。若只考虑总线余量，不考虑具体布点方式，至少需要几台消防联动控制器才能符合规范规定？

（A）2　　（B）3　　（C）4　　（D）5

答案：【B】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 3.1.5 条　任一台消防联动控制器地址总数所控制的各类模块总数不应超过 1600 点，每一联动总线回路连接设备的总数不宜超过 100 点，且应留有不少于额定容量 10%的余量。

故每回总线实际最大能带地址总数为 90 个，消防联动控制器 1 台可接地址总数为 1080 个。

消防联动控制器台数为 3000/1080=2.8 台，取 3 台。

【知识点解析】

任一台火灾报警控制器所连接的火灾探测器、手动火灾报警按钮和模块等设备总数和地址总数，均不应超过 3200 点，其中每一总线回路连接设备的总数不宜超过 200 点，且应留有不少于额定容量 10%的余量；任一台消防联动控制器地址总数或火灾报警控制器（联动型）所控制的各类模块总数不应超过 1600 点，每一联动总线回路连接设备的总数不宜超过 100 点，且应留有不少于额定容量 10%的余量。火灾报警控制器与消防联动控制器的容量要求如图 15-5 所示。

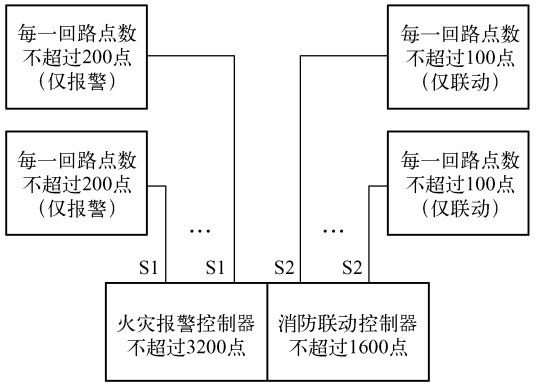


图 15-5　火灾报警控制器与消防联动控制器的容量要求

例题 15-20：有一小型会展中心长 60 m、宽 40 m、高 15 m。在设计火灾自动报警系统时，在长度方向设置线型光束感烟火灾探测器，不考虑环境和对流的影响，宜选择多少组探测器？

（A）4　　（B）5　　（C）8　　（D）10

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013　第 6.2.15 条、第 12.4.3 条。

会展中心属于高度大于 12 m 的空间场所，高度在 12~16 m 之间，宜在 6~7 m 增设一层探测器。

相邻两组探测器的水平距离不应大于14 m，探测器至侧墙水平距离不应大于7m，且不应小于0.5 m。小型会展中心长60 m，选5组时探测器至侧墙水平距离2 m，即(4×14+2+2) m=60 m，上下两层交错布置，至侧墙水平距离可以调整，宜选择10组。

例题15-21：某电厂有一电缆隧道长度1200 m，在电缆接头、端子等发热部位敷设时设置了分布式线型光纤感温火灾探测器，若探测单元长度与隧道长度相同，其感温光缆的延展长度应铺设长度不应小于下列哪一项？

（A）1000 m　　（B）1200 m　　（C）1500 m　　（D）1800 m

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013　第12.3.5条。

感温光缆的延展长度不应少于探测单元长度的1.5倍，即1.5×1200 m=1800 m。

例题15-22：火灾应急广播系统在火灾发生期间的最少连续供电时间为哪一项是符合规范要求的？

（A）≥10 min　　（B）≥20 min　　（C）≥40 min　　（D）≥60 min

答案：【B】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

表13.9.13中火灾应急广播系统最少持续供电时间≥20 min。

例题15-23：下列建筑或场所应设置火灾自动报警系统，哪一项不符合规范要求？

（A）任一层建筑面积大于1500 m^2或总建筑面积大于3000 m^2的制鞋、制衣、玩具、电子等类似用途的厂房

（B）建筑高度大于54 m，但不大于100 m的住宅建筑

（C）每座占地面积大于1000 m^2的棉、毛、丝、麻、化纤及其制品的仓库

（D）特等、甲等剧场，座位数超过1500个的其他等级的剧场或电影院

答案：【B】

解答过程：依据《建筑设计防火规范》GB 50016—2014。

第8.4.2条　建筑高度大于54 m，但不大于100 m的住宅建筑，其公共部位应设置火灾自动报警系统，套内宜设置火灾探测器。答案B与规范条文不同。

例题15-24：火灾自动报警系统线路设计施工中，下面剩余电流式电气火灾监控探测器设计时哪一项是不符合规范要求的？

（A）剩余电流式电气火灾监控探测器应设置在低压配电系统首端

（B）具有探测线路故障电弧功能的电气火灾监控探测器，其保护线路的长度不小于100 m

（C）供电线路泄漏电流大于500 mA时，宜在其下一级配电柜（箱）设置

（D）选择剩余电流式电气火灾监控探测器时，应计及供电系统自然漏流的影响，并应选择参数合适的探制器；探测器报警值宜为300~500 mA

答案：【B】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第9.2.1条　剩余电流式电气火灾监控探测器应以设置在低压配电系统首端为基本原则，宜设置在第一级配电柜（箱）的出线端。在供电线路泄漏电流大于500 mA时，宜在其下一级配电柜（箱）设置。A、C对。

第9.2.3条　选择剩余电流式电气火灾监控探测器时，应计及供电系统自然漏流的影

响，并应选择参数合适的探制器；探测器报警值宜为 300~500 mA。D 对。

第 9.2.4 条　具有探测线路故障电弧功能的电气火灾监控探测器，其保护线路的长度不宜大于 100 m。B 错。

例题 15-25：火灾自动报警系统线路设计施工中，下面铜芯绝缘导线和铜芯电缆满足机械强度要求的线芯最小截面积选择中哪一项是符合规范要求的？

（A）穿管敷设的绝缘导线 0.75 mm^2

（B）线槽内敷设的绝缘导线 0.5 mm^2

（C）多芯电缆 0.4 mm^2

（D）线槽内敷设的绝缘导线 0.75 mm^2

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

表 11.1.2 中，穿管敷设的绝缘导线 1.00 mm^2；线槽内敷设的绝缘导线 0.75 mm^2；多芯电缆 0.50 mm^2，选 D。

例题 15-26：有一综合建筑，总建筑面积为 110000 m^2，总高度为 98 m。地下 3 层，每层建筑面积为 7830 m^2，地上 25 层，其中 1~4 层为裙房，每层建筑面积为 4000 m^2，5~24 层每层建筑面积为 3470 m^2，第 25 层为 1110 m^2。该建筑能容纳 2000 人以上，不超过 10000 人。设建筑地下 2、3 层各设有 20 只 5W 扬声器，地下 1 层各设有 21 只 5 W 扬声器，首层设有 20 只 3 W 扬声器、4 只 5 W 扬声器，2~4 层设有 14 只 3 W 扬声器，5~24 层各层设有 8 只 3 W 扬声器，顶层设有 3 只 3 W 扬声器。试计算当广播系统业务广播和消防应急广播合用时，其功率放大器的容量应为下列哪项数值。（供配电 2017 年考题）

（A）1500 W　　（B）1460 W　　（C）1300 W　　（D）1269 W

答案：【A】

解答过程：依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010。

第 3.7.3 条，火灾应急广播功率放大器的容量为

$$\sum P = 1.5\times(2\times20\times5+21\times5+20\times3+4\times5+3\times14\times3+20\times8\times3+3\times3)\ W = 1500\ W$$

例题 15-27：有一个大型超高层办公楼，高 300 m，总建筑面积 20 万 m^2，地下 1 层主要为设备机房和功能性用房，其中消防控制室如图 15-6 所示，消防控制室为单列布置布置，屏长度为 6 m，屏前有值班人员经常工作，请分析图中的 A、B、C 处的三个尺寸哪一组数据是合理的？

（A）1.0 m、0.5 m、3.0 m　　（B）2.0 m、1.1 m、2.3 m

（C）2.5 m、1.0 m、0.5 m　　（D）3.0 m、1.0 m、1.0 m

答案：【D】

解答过程：依据《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116—2013。

第 3.4.8 条中，消防控制室内设备的布置应符合下列规定：

A 点，在值班人员经常工作的一面，设备面盘至墙的距离不应小于 3 m。

B 点，设备面盘后的维修距离不宜小于 1 m。

C 点，设备面盘的排列长度大于 4 m 时，其两端应设置宽度不小于 1 m 的通道。

综上所述，选 D。

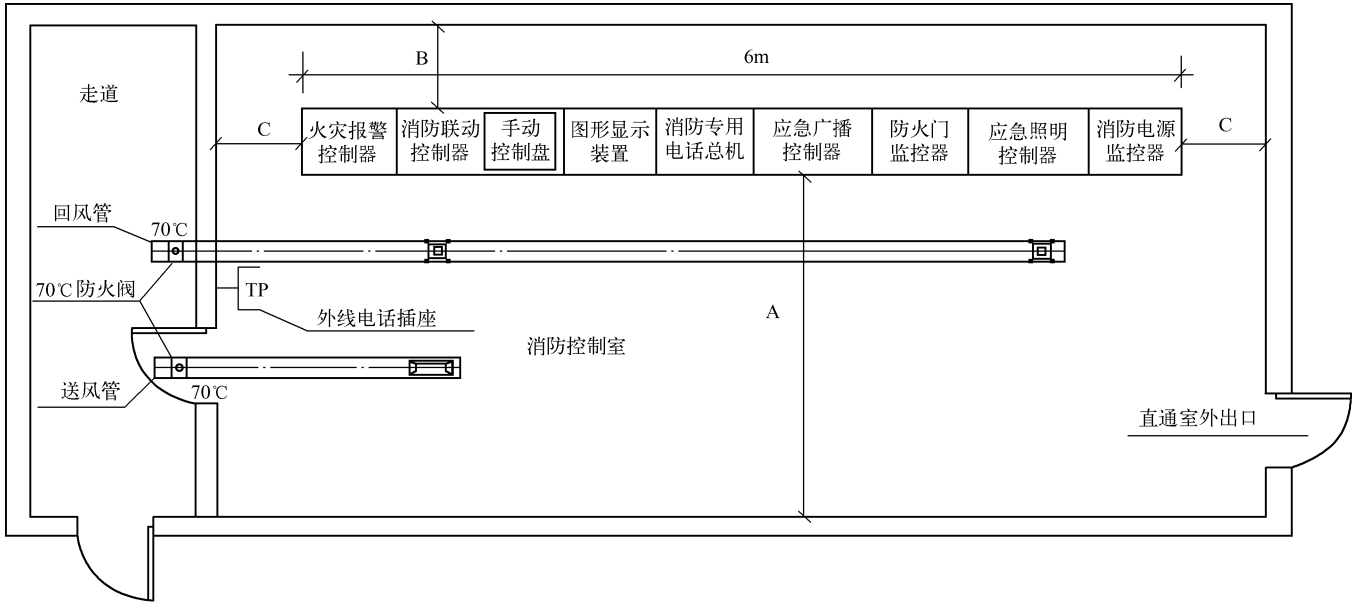


图15–6　单列布置的消防控制室布置图

15.2 建筑设备监控系统

【知识点说明】

1）建筑设备监控系统功能、构成等相关知识属于普通考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《智能建筑设计标准》GB/T 50314—2006 等。要求掌握建筑设备监控系统网络结构、现场仪表的选择、监控表。

2）各种设备监控系统属于重要考点，依据国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求熟练掌握各种设备监控系统的 DDC 的 AI、DI、AO、DO 点数设置，各种设备监控系统的选择要求。

3）各种设备监控系统图摘自国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》、国家标准图集 12DX603《住宅小区建筑电气设计与施工》，请考生学习参考。

依据书目：

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《智能建筑设计标准》GB/T 50314—2006

《2016 年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）

参考书目：

国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

《建筑设备监控系统工程技术规范》JGJ/T 334—2014

建筑电气通用图集 09BD10《建筑设备监控》

例题 15-28~15-32：建筑物内某区域一次回风双风机空气处理机组（AHU），四管制送/冷热风+加湿控制，定风量送风系统，空气处理流程如图 15-7 所示。

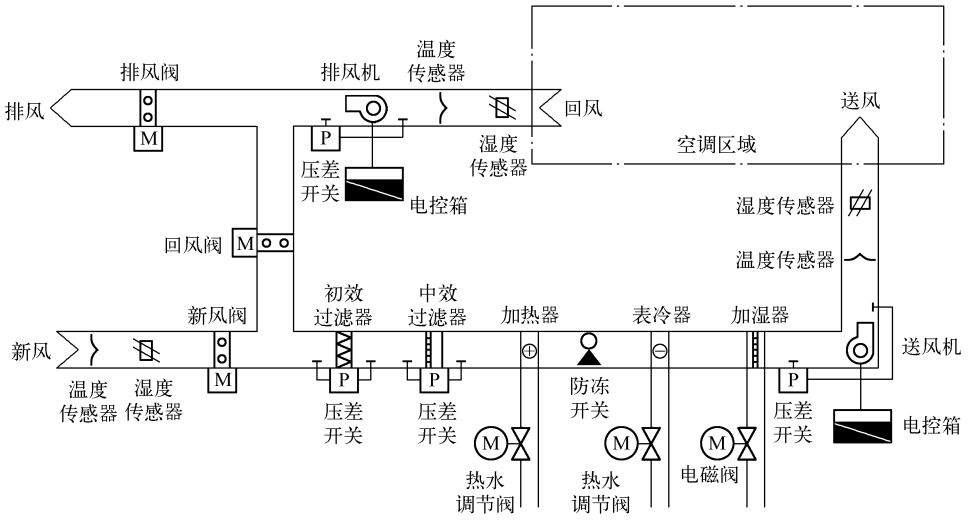


图 15-7 空气处理流程图

要求采用建筑设备监控系统（BAS）的 DDC 控制方式，监控功能要求详见表 15-3。请回答下列问题，并列出解答过程。

表 15-3　监控功能

序号	监 控 内 容	控 制 策 略
1	检测内容	新风、回风、送风湿温度（PT1000，电容式），过滤器差压开关信号、风机压差开关信号，新风、回风、排风风阀阀位（DC 0~10 V），冷/热电动调节阀阀位（DC 0~10 V），风机起停、工作、故障及手/自动状态
2	回风温度自动控制	串级 PID 调节控制冷/热电动调节阀，主阀回风温度，副阀送风温度，控制回风温度
3	回风湿度自动控制	串级 PID 调节控制加湿电磁阀，主阀回风温度，副阀送风湿度，控制回风湿度
4	新风量自动控制	过渡季根据新风、回风的温湿度计算焓值，自动调节新风、回风、排风风阀的开度，设定最小新风量
5	过滤器堵塞报警	两级空气过滤器，分别设堵塞超压报警，提示清扫
6	机组定时起停控制	根据事先排定的工作及节假日作息时间表，定时起停机组，自动统计机组工作时间，提示定时维修
7	联锁及保护控制	风机起停、风阀、电动调节阀联动开闭，风机起动后，其前后压差过低时，故障报警并联锁停机，热盘管出口处设防冻开关，当温度过低时，报警并打开热水阀

15-28：根据控制功能要求，统计输入 DDC 的 AI 点数为下列哪项数值。（风阀、水阀均不考虑联控制）（供配电 2011 年考题）

（A）9　　（B）10　　（C）11　　（D）12

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 附录 K 或《智能建筑弱电工程设计与施工》（上册）09X700 第 2~113 页。

AI 点即模拟量输入点，一般为 DDC 需要检测的模拟量，如温度、湿度、阀门阀位开度信号的检测等，在监控功能表中应查看监控内容一栏：

1）新风、回风、送风湿度和温度（PT1000，电容式）检测：共计 6 个 AI 点。

2）新风、回风、排风风阀阀位（DC 0~10 V）检测：共计 3 个 AI 点。

3）冷/热电动调节阀阀位（DC 0~10 V）检测：共计 2 个 AI 点。

因此共 11 个 AI 点。

《2016 年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）第 896 页有定风量送风系统示例。

【知识点解析】

只有开或关两档的信号属于数字量信号，如灯的开、关状态输入信号（DI），控制普通风机起、停的继电器触点输出信号（DO）等。

随着时间的推移呈现规则或不规则多种状态的信号，属于模拟量信号，如温度、湿度、压力、流量、CO_2含量等的模拟量输入信号（AI），控制调节阀门开度、变频风机转速的模拟量输出信号（AO）等。

15-29：下列哪项属于 DI 信号？（供配电 2011 年考题）

（A）防冻开关信号　　（B）新风温度信号

（C）回风湿度信号　　（D）风机起停控制信号

答案：【A】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 附录 K 或《智能建筑弱电工程设计与施工》（上册）09X700 第 2-113 页。

DI 点即开关量输入点，一般为 DDC 需要检测的开关量，如开关信号、风机起停信号、阀门开闭信号的检测等，在监控功能表中应查看监控内容一栏；

防冻开关信号为 DI 点；新风温度信号为 AI 点；回风湿度信号为 AI 点；风机起停控制信号为 DO 点。

15-30：若要求检测及保障室内控制品质，宜根据下列哪项参数自动调节控制 AHU 的最小新风量？（供配电 2011 年考题）

（A）回风温度　　（B）室内焓值　　（C）室内 CO 浓度　　（D）室内 CO_2

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.10.3.7 条　在定风量控制系统中，宜设置根据回风或室内 CO_2 浓度控制新风量的自动调节系统。

15-31：若该 AHU 改为变风量送风系统，下列哪项控制方式不适宜送风量的控制？（供配电 2011 年考题）

（A）定静压法　　（B）变静压法　　（C）总风量法　　（D）定温度法

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.10.3.9 条　在变风量空调机组中，送风量的控制宜采用定静压法、变静压法或总风量法。

15-32：选择室内温湿度传感器时，规范规定其响应时间不应大于下列哪项数值？（供配电 2011 年考题）

（A）25 s　　（B）50 s　　（C）100 s　　（D）150 s

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.7.1.2 条　温度传感器量程应为测点温度的 1.2～1.5 倍，管道内温度传感器热响应时间不应大于 25 s，当在室内或室外安装时，热响应时间不应大于 150 s。

例题 15-33～15-37：北方某地新建的综合楼内设有集中空调系统，在地下一层制冷内设螺杆式冷水机、热交换器、冷冻水泵和冷却水泵等设备，楼上会议室设定风量空调系统，办公室设变风量空调系统。请回答下列问题。

15-33：下列哪一种控制是由建筑设备监控系统完成的？（供配电 2009 年考题）

（A）冷水机的压缩机运行　　（B）冷水机的冷凝器运行

（C）冷冻水供水压差恒定闭环控制　（D）冷水机的蒸发器运行

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.8.1 条第 2 款　建筑设备监控系统，应具有下列控制功能，第 2)项为冷冻水供水压差恒定闭环控制。

15-34：在热交换系统中，为使二次侧热水温度保持在设定范围，应根据下列哪一项设定值来控制一次侧温度调节阀开度？（供配电 2009 年考题）

（A）一次供水温度　　（B）二次供水温度

（C）一次供回水压力　　（D）二次供回水压力

答案：【B】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.9.1 条第 2 款　自动调节系统应根据二次供水温度设定值控制一次侧温度调节阀开度。

15-35：在冬季，为保证空调机组内供，回水盘管的安全使用，通常会采用下列哪一项措施？（供配电 2009 年考题）

（A）设温度检测　　（B）风机停止运行

（C）设防冻开关报警和联锁控制　　（D）关闭电动调节阀

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.10.3 条第 4 款　在寒冷地区，空调机组应设置防冻开关报警和联锁控制。

15-36：在会议室使用的空调系统，是根据下列哪一项的温度设定值来调节冷水阀或热水阀的开度，保持会议室的温度不变？（供配电 2009 年考题）

（A）送风处　　（B）排风处　　（C）新风处　　（D）回风处

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.10.3 条第 5 款　在定风量空调系统中，应根据回风或室内温度设定值，比例、积分连续调节冷水阀或热水阀开度，保持回风或室内温度不变。

15-37：在办公室使用空调系统中，根据送风静差设定值控制下列哪一项？（供配电 2009 年考题）

（A）变速风机转速　　（B）变风量末段设备

（C）风机的起停　　（D）比例、积分连续调节冷水阀或热水阀的开度

答案：【A】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 18.10.3 条第 9 款第 1）项，当采用定静压法时，应根据送风静压设定值控制变速风机转速。

15.3　安全防范和视频监视系统

【知识点说明】

1）安全防范系统工程设计属于普通考点，依据《安全防范工程设计规范》GB 50348—2004、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求掌握安全防范工程设计、供电设计等。

2）视频安防监控系统属于重要考点，依据《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395—2007、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求熟练掌握摄像机选择和设置，掌握视频安防监控系统设计要求等。

3）其他安全防范系统属于冷门考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求了解电子巡查系统、出入口控制系统、住宅（小区）安全防范系统等和监控中心设计要求。

依据书目：

《安全防范工程设计规范》GB 50348—2004

《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395—2007

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008

《出入口控制系统工程设计规范》GB 50396—2007

《工业电视系统工程设计规范》GB 50115—2009

《入侵报警系统工程设计规范》GB 50394—2007

《2016年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）

参考书目：

国家标准图集09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

建筑电气通用图集09BD14《安全技术防范工程》

《民用闭路监视电视系统工程技术规范》GB 50198—2011

例题15-38~15-39：有一综合建筑，总建筑面积为110000 m^2，总高度为98 m。地下3层，每层建筑面积为7830 m^2，地上25层，其中1~4层为裙房，每层建筑面积为4000 m^2，5~24层每层建筑面积为3470 m^2，第25层为1110 m^2。该建筑能容纳2000人以上，不超过10000人。请回答以下火灾报警灯弱电设计问题，并列出解答过程。

15-38：在建筑中设数据中心，其视频安防监控系统采用数字信号在IP网络中传输，采用704×576分辨率，计算其视频编码应为下列哪项数值。（供配电2017年考题）

（A）256 kbit/s　（B）512 kbit/s　（C）1024 kbit/s　（D）2048 kbit/s

答案：【D】

解答过程：依据《民用闭路监视电视系统工程技术规范》GB 50198—2011。

第3.3.10条，已知摄像头分辨率为704×576，该摄像头视频编码应为

$$B=\frac{HV}{352\times288}\times0.512=\frac{704\times576}{352\times288}\times0.512\ \text{kbit/s}=2048\ \text{kbit/s}$$

15-39：在建筑中设置有视频安防监控系统，已知某处设置的一台摄像机，其焦距为50 mm，像场高15 mm，视场高4.5 m，试计算该台摄像机监视的距离应为下列哪一项。（供配电2017年考题）

（A）15 m　（B）13.3 m　（C）4.5 m　（D）1.35 m

答案：【A】

解答过程：依据《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395—2007。

第6.0.2条，摄像机的焦距为50 mm，像场高15 mm，视场高4.5 m，监视的距离为

$$f=\frac{AL}{H}\Rightarrow L=\frac{fH}{A}=\frac{50\times4.5}{15}\ \text{m}=15\ \text{m}$$

例题15-40：有一栋写字楼，在首层大厅设置视频安防摄像机，已知该摄像机的镜头焦距为24.99 mm，物体成像的像距为25.01 mm，则摄像机观察物体的物距应为下列哪项数值？（供配电2013年考题）

（A）25.65 m　（B）31.25 m　（C）43.16 m　（D）51.5 m

答案：【B】

解答过程：依据《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395—2007。

条文说明第 6.0.2.3 条，摄像机观察物体的物距为

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}\Rightarrow u=\frac{vf}{v-f}=\frac{25.01\times24.99}{25.01-24.99}\text{m}=31.25\text{m}$$

【知识点解析】

在物理原理上，式中的 f 应为像距，但摄像机镜头通常都是使用在物距远大于像距和镜头焦距的情况下，物距通常为米级，而焦距通常为毫米级，根据下述的焦距公式，可以得出，像距通常非常接近于镜头的焦距，在近似计算中，可将像距直接代换为镜头焦距。

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}$$

式中，f 为镜头焦距；u 为观察的物体的物距；v 为物体所成像的像距。

例题 15-41：有一个大型超高层办公楼，在建筑物中有一视频会议室，其中安装了一台摄像机用于对主席台及演讲嘉宾的摄像。摄像机安装高度为 3 m，距离主席台 7 m，要求摄像机能拍摄主席台全景 4 m 高画面，也能对嘉宾拍摄高度为 0.5 m 个人特写镜头。已知摄像机像场高 20 mm。摄像机要满足上述要求至少需要几倍变焦？（供配电 2016 年考题）

（A）8 倍　　（B）11.4 倍　　（C）35 倍　　（D）280 倍

答案：【A】

解答过程：依据《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395—2007。

第 6.0.2 条　主席台全景 4 m 高画面和嘉宾拍摄高度为 0.5 m 的焦距计算如下：

拍摄主席台全景的焦距：$f_1=\frac{AL}{H_1}=\frac{20\times7}{4}\text{mm}=35\text{mm}$

个人特写镜头的焦距：$f_2=\frac{AL}{H_2}=\frac{20\times7}{0.5}\text{mm}=280\text{mm}$

变焦倍数：$k=\frac{f_1}{f_2}=\frac{280}{35}=8$

【知识点解析】

1）镜头像面尺寸应与摄像机靶面尺寸相适应，镜头的接口与摄像机的接口配套。

2）用于固定目标监视的摄像机，可选用固定焦距镜头，监视目标离摄像机距离较大时可选用长焦镜头；在需要改变监视目标的观察视角或视场范围较大时应选用变焦距镜头；监视目标离摄像机距离近且视角较大时可选用广角镜头。监视视野狭长的区域，可选择视角在 40°以内的长焦（望远）镜头。监视目标视距小而视角较大时，可选择视角在 55°以上的广角镜头；景深大、视角范围广，且被监视目标为移动时，宜选择变焦距镜头；有隐蔽要求或特殊功能要求时，可选择针孔镜头或棱镜头。

3）摄像机镜头有两个光学参数，一是孔径比，二是焦距。工程设计时，焦距应按下式计算

$$f=hL/H=uL/W$$

式中，f 为焦距（mm）；h 为像场高（mm）；u 为像场宽（mm）；L 为镜头到监视目标（物体）的距离（mm）；W 为视场宽度（mm）；H 为视场高度（mm）。

当采用 $\frac{1''}{3}$ 型镜头时，焦距按下式计算：

$$f=uL/W=4.8L/W$$

$$f=hL/H=3.6L/H$$

光学成像关系如图 15-8 所示。

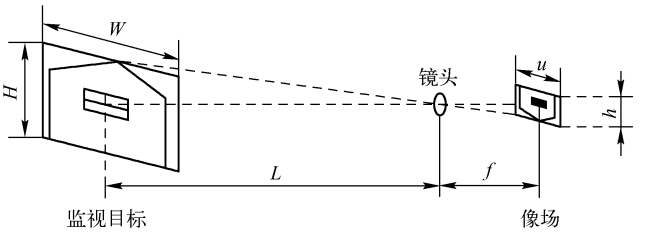


图 15-8　光学成像关系图

例题 15-42：有一栋高层写字楼，设置有入侵报警系统、视频安防监控系统、出入口控制系统等系统。首层大厅设置安防监控中心，其所带负荷有入侵报警系统 10 kW、视频安防监控系统 30 kW、出入口控制系统 10 kW，各负荷功率因数均为 0.9。若安防控制室采用 UPS 作为主电源供电，该 UPS 电源的容量最小为下列哪项数值？

（A）61.5 kV·A　　（B）73.8 kV·A　　（C）83.3 kV·A　　（D）92.3 kV·A

答案：【C】

解答过程：依据《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395—2007。

第 3.12.4 条　应根据入侵报警系统、视频安防监控系统、出入口控制系统等的不同供电消耗，按总系统额定功率的 1.5 倍设置主电源容量：

$$E=1.5P=1.5\times\frac{10+30+10}{0.9}\text{kV}\cdot\text{A}=83.3\text{kV}\cdot\text{A}$$

例题 15-43：假设用 1/2 in 摄像头观测，被测物体宽 2400 mm、高 1800 mm，镜头焦点距物体 3000 mm，所选摄像头镜头的焦距需选用下列哪项数值？

（A）6 mm　　（B）8 mm　　（C）10 mm　　（D）16 mm

答案：【B】

解答过程：依据《工业电视系统工程设计规范》GB 50115—2009。

条文说明第 4.1.7~4.1.9 条　查表 2 中 1/2 in 镜头成像像场宽 6.4 mm、高 4.8 mm，题目已知被测物体宽 2400 mm、高 1800 mm，镜头焦点距物体 3000 mm，镜头的焦距为

被测物体宽对应焦距：$f=\dfrac{uL}{W}=6.4\times\dfrac{3000}{2400}\text{mm}=8\text{mm}$

被测物体高对应焦距：$f=\dfrac{hL}{H}=4.8\times\dfrac{3000}{1800}\text{mm}=8\text{mm}$

例题 15-44：有一栋高层写字楼，在其中一层安装 16 个摄像头，数字高清摄像头分辨率为 1000 线（1920×1080），采用磁盘阵列存储，其中 16 路均要求做采集存储，要求 4 路可在监视器上回放监视，请问该磁盘阵列存储的存储读写的总带宽应大于为下列哪项数值。

（A）42.1 Mbit/s　　（B）30.6 Mbit/s　　（C）26.2 Mbit/s　　（D）10.5 Mbit/s

答案：【C】

解答过程：依据《民用闭路监视电视系统工程技术规范》GB 50198—2011。

分辨率为 1920×1080 的视频图像编码率为

$$B=\frac{HV}{352\times288}\times0.512=\frac{1920\times1080}{352\times288}\times0.512\ \text{Mbit/s}=10.47\ \text{Mbit/s}$$

条文说明第 3.4.3 条，16 路采集，4 路回放，磁盘阵列存储的存储读写的总带宽为

$$S=(16+4)B/8=(16+4)\times10.47/8\ \text{Mbit/s}=26.18\ \text{Mbit/s}$$

15.4 计算机网络、通信网络系统、电子信息系统机房

【知识点说明】

1）电子信息系统机房属于重要考点，依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求熟练掌握电子信息系统机房面积计算、静电防护、接地、机房供电；了解电子信息系统机房分级、电磁屏蔽等。

2）通信网络系统属于普通考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。要求掌握数字程控用户电话交换机系统、数字程控调度交换机系统、通信配线与管道；了解无线通信系统。

3）计算机网络属于冷门考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

4）《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008 已经更新为《数据中心设计规范》GB 50174—2017，其实施日期为 2018 年 1 月 1 日，2018 年考试中依然使用 2008 版，故本节按照 2008 版编写。

依据书目：

《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

参考书目：

《用户电话交换系统工程设计规范》GB/T 50622—2010

《住宅区与住宅建筑内通信设施工程设计规范》GB/T 50605—2010

《住宅区和住宅建筑内光纤到户通信设施工程设计规范》GB 50846—2012

《通信管道与通道工程设计规范》GB 50373—2006

《民用建筑电气设计计算及示例》12SDX101-2

国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

例题 15-45~15-48：某交通调度大楼总建筑面积 50000 m^2，其中地下 2 层、地上 10 层，该大厦是某交通调度系统的指挥中心，共 4450 个信息点。其中语音点 2000 个，数据点 2450 个，数据垂直干线采用多模光纤。请回答以下问题。

15-45：若大楼设置专用通信机房，但数字程控交换机及配套设备尚未选定，机房的使用面积宜采用下列哪项数值？

（A）≥30 m^2　　（B）≥35 m^2　　（C）≥40 m^2　　（D）≥45 m^2

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 20.2.7-1 条　用户交换机的实装内线分机的容量，不宜超过交换机容量的 80%，语音点 2000 个对应交换机容量约为 2500 门。查表 20.2.8 中交换机容量为 2500 门时，要求机

房的面积≥45 m^2。

15-46：若大楼设置专用局域网作为行政内网，连接互联网的计算机网络作为行政外网，内网与外网连接采用隔离装置。计算机网络的拓扑结构应采用下列哪种？

（A）总线型　　（B）环形　　（C）星形　　（D）混合型

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

条文说明第 19.3.2 条的表 19-6 中，交通调度大楼计算机网络结构复杂，应采用混合型。

15-47：大楼内通信配线电缆的保护导管的选用，下列哪些符合规范的要求？

（A）在地下层、首层和潮湿场所宜采用壁厚不小于 1.5 mm 的金属导管

（B）在其他楼层、墙内和干燥场所敷设时，宜采用壁厚不小于 1.0 mm 的金属导管

（C）穿放电缆时直线管的管径利用率宜为 50%~60%

（D）穿放电缆时弯曲管的管径利用率宜为 50%~60%

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 20.7.2-10 条　建筑物内通信配线电缆的保护导管，在地下层、首层和潮湿场所宜采用壁厚不小于 2 mm 的金属导管，在其他楼层、墙内和干燥场所敷设时，宜采用壁厚不小于 1.5 mm 的金属导管；穿放电缆时直线管的管径利用率宜为 50%~60%，弯曲管的管径利用率宜为 40%~50%。其中只有答案 C 与条文一致。

15-48：若大楼内按规范规定，在移动通位信号室内覆盖系统中，基站接收端到系统的上行噪声电平应小于下列哪项数值？

（A）-100 dBm　　（B）100 dBm　　（C）12 dBm　　（D）-120 dBm

答案：【D】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第 20.5.2-9 条　室内覆盖系统的信号源输出功率不宜高于+43 dBm；基站接收端收到系统的上行噪声电平应小于-120 dBm。

例题 15-49：办公楼高 140 m，地上 30 层，地下 3 层，其中第 16 层为避难层，消防控制室与安防监控中心共用，设在首层。在二层分别设置计算机网络中心和程控电话交换机房。在二层的计算机网络主机房设计时，已确定在该主机房内要设置 20 台 19 in 标准机柜（宽 600 mm、深 1100 mm），主机房的最小面积应为下列哪项？说明依据和理由。（供配电 2010 年考题）

（A）60 m^2　　（B）95 m^2　　（C）120 m^2　　（D）150 m^2

答案：【B】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008 第 4.2.2 条或《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 23.2.3 条。

单个标准机柜的投影面积为 0.6 m×1.1 m=0.66 m^2，主机房的面积为

$$A=K\sum S=(5\sim7)\ \text{m}\times(20\times0.66)\ \text{m}=66\sim92.4\ \text{m}^2$$

【知识点解析】

1）电子信息系统机房的组成应根据系统运行特点及设备具体要求确定，一般宜由主机

房、辅助区、支持区和行政管理区等功能区组成。其他详细规定详见 GB 50174—2010 附录 A。

2）主机房的使用面积应根据电子信息设备的数量、外形尺寸和布置方式确定，并预留今后业务发展需要的使用面积。在电子信息设备外形尺寸不完全掌握的情况下，主机房的使用面积可按下列方法确定：

当电子信息设备已确定规格时，可按下式计算：

$$A=K\sum S$$

式中，A 为主机房使用面积（m^2）；K 为系数，可取 5~7；S 为电子信息设备的摄影面积（m^2）。

当电子信息设备尚未确定规格时，可按下式计算：

$$A=FN$$

式中，F 为单台设备占用面积（m^2/台），可取 3.5~5.5 m^2/台；N 为主机房内所有设备（机柜）的总台数。

3）辅助区的面积宜为主机房面积的 0.2~1 倍。

4）用户工作室可按每人 3.5~4 m^2 计算。硬件及软件人员办公室等有人长期工作的房间，可按每人 5~7 m^2 计算。

例题 15-50：某工程通信机房设有静电架空地板，用绝缘缆线敷设，室内要求有通信设备、网络、UPS 及接地设备。当防静电地板与接地导体采用导电胶粘接时，规范要求其接触面积不宜小于下列哪一项数值。

（A）10 cm^2　　（B）20 cm^2　　（C）50 cm^2　　（D）100 cm^2

答案：【B】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

第 8.3.5 条　静电接地的连接线应有足够的机械强度和化学稳定性，宜采用焊接或压接，当采用导电胶与接地导体粘接时，其接触面积不宜小于 20 cm^2。

例题 15-51：某工程通信机房设有静电架空地板，用绝缘缆线敷设，室内要求有通信设备、网络、UPS 及接地设备。在进行机房防静电设计时，机房内绝缘体的静电电位不应大于下列哪项数值？

（A）100 V　　（B）500 V　　（C）1000 V　　（D）3000 V

答案：【C】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008 或《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 23.4.3-2 条。

第 5.2.5 条　机房内绝缘体的静电电位不应大于 1 kV。

例题 15-52：某省会城市的三级医院的高层楼房，设置信息中心机房。若该医院的高层楼房附近有一飞机场，则该医院信息中心机房到飞机场的距离不应小于下列哪一项数值？

（A）900 m　　（B）1200 m　　（C）1400 m　　（D）1600 m

答案：【D】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

条文说明第 3.1.3 条中三级医院电子信息系统机房是 B 级，查附录 A 中 B 级机房到飞机场的距离不应小于 1600 m。

例题 15-53：某省会城市的三级医院的高层楼房，设置信息中心机房，机房内机柜等设备布置密集，该医院信息中心机房设置等电位联结网格下列哪一项不符合规范要求？

（A）等电位联结网格应采用截面积不小于 25 mm^2的铜带或裸铜线

（B）等电位联结网格应在防静电活动地板下构成边长为 0.6~3 m 的矩形网格

（C）每台电子信息设备（机柜）应采用一根不同长度的等电位联结导体就近与等电位联结网格连接

（D）等电位联结网格的尺寸取决于电子信息设备的摆放密度，机柜等设备布置密集时网格尺寸宜取小值（600 mm×600 mm）

答案：【C】

解答过程：依据《电子信息系统机房设计规范》GB 50174—2008。

第 8.4.5 条　每台电子信息设备（机柜）应采用两根不同长度的等电位联结导体就近与等电位联结网格连接。C 错。

第 8.4.6 条　等电位联结网格应采用截面积不小于 25 mm^2的铜带或裸铜线，应在防静电活动地板下构成边长为 0.6~3 m 的矩形网格。A、B 对。

条文说明第 8.4.6 条，等电位联结网格的尺寸取决于电子信息设备的摆放密度，机柜等设备布置密集时（成行布置，且行与行之间的距离为规范规定的最小值时），网格尺寸宜取小值（600 mm×600 mm）；设备布置宽松时，网格尺寸可视具体情况加大。D 对。

15.5　综合布线

【知识点说明】

1）系统设计与配置属于重要考点，依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求熟练掌握开放型办公室布线、主干电缆和光缆所需的容量要求及配置、缆线布放在管与线槽内的管径与截面利用率；掌握工作区、设备间、电信间设备配置。

2）缆线选择和敷设属于普通考点，依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求熟练掌握综合布线电缆与附近电磁干扰；掌握缆线敷设的最小弯曲半径。

3）电气防护和接地属于重要考点，依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 等。要求熟练掌握综合布线电缆与电力电缆的间距、综合布线缆线及管线与其他管线的间距；掌握接地要求。

依据书目：

《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

参考书目：

《综合布线系统工程验收规范》GB 50312—2007

国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

建筑电气通用图集 09BD15《综合布线系统》

例题 15-54：有一综合建筑，总建筑面积为 110000 m^2，总高度为 98 m。地下 3 层，每层建筑面积为 7830 m^2，地上 25 层，其中 1~4 层为裙房，每层建筑面积为 4000 m^2，5~24 层每层建筑面积为 3470 m^2，第 25 层为 1110 m^2。在建筑中 5~10 层为某分支机构办公用房，每层

建筑面积的70%为纯办公面积，按照10 m^2一个工位，每个工位均设有一个语音点和普通数据点，另外在70%的工位设置了内部网络数据点。试计算建筑设备间BD至上述楼层的楼层配线架FD的内网按最大量配置需要多少芯的光缆。（内网网络交换机每台按36口计算）（供配电2017年考题改编）

（A）26芯　　（B）18芯　　（C）14芯　　（D）12芯

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008第21.3.7条。

内网的信息点数量为（不考虑备用）：$N=\dfrac{0.7\times3470\times0.7}{10}=170$。

最大量配置：以每个SW为36端口计，170个数据信息点需设置5个SW；以每一个SW（36个端口）设置1个主干端口，加上两个群（5/4=1.25每四个为一个群，一个群备份一个，所以备份是两个）备份端口，则共需设置7个主干端口；主干缆线采用光缆，每个光端口按2芯光纤考虑，则光纤的需求量为14芯。

依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第3.7.3条BD至FD是干线子系统，第5.3.5条5个SW每台SW一主一备配置，主干缆线采用光缆，按照双工配置每个光端口2芯，则光纤的需求量为10芯。选C。

【知识点解析】

干线子系统主干电缆和光缆所需的容量要求及配置应符合以下规定：

1）对于语音业务，大对数主干电缆的对数应按每一个电话8位模块通用插座配置1对线，并在总需求线对的基础上至少预留约10%的备用线对。如语音信息点8位模块通用插座连接ISDN用户终端设备，并采用S接口（4线接口）时，相应的主干电缆则应按2对线配置。

2）对于数据业务，应以集线器（HUB）或交换机（SW）群（按4个HUB或SW组成1群）；或以每个HUB或SW设备设置1个主干端口配置。每1群网络设备或每4个网络设备宜考虑1个备份端口。主干端口为电端口时，应按4对线容量配置，为光端口时则按2芯光纤容量配置。

主干缆线的配置应符合下列规定：

1）对于语音业务，大对数主干电缆的对数，应按每一个语音信息点（8位模块）配置1对线。当语音信息点8位模块通用插座连接ISDN用户终端设备，并采用S接口（4线接口）时，相应的主干电缆应按2对线配置，并在总需求线对的基础上至少预留10%的备用线对。

2）（JGJ 16—2008）对于数据业务，主干缆线配置，应符合下列规定：

① 最小量配置：宜按集线器（HUB）或交换机（SW）群（宜按4个HUB或SW组群）设置一个主干端口，每一个主干端口宜考虑一个备份端口。

② 最大量配置：按每个集线器（HUB）或交换机（SW）设置一个主干端口，每4个主干端口宜考虑一个备份端口。当主干端口为电接口时，每个主干端口应按4对线容量配置。当主干端口为光接口时，每个主干端口应按2芯光纤容量配置。

③（GB 50311—2016）对于数据业务，主干缆线配置，应符合下列规定：对数据业务，应按每台以太网交换机设置1个主干端口和1个备份端口配置。当主干端口为电接口时，应

按4对线容量配置，当主干端口为光端口时，应按1芯（单工）或2芯（双工）光纤容量配置。

例题15-55~15-56：办公楼高140 m，地上30层，地下3层，其中第16层为避难层，消防控制室与安防监控中心共用，设在首层。首层大厅高度为9 m，宽30 m，进深15 m；在二层分别设置计算机网络中心和程控电话交换机房；3~29层为标准层，为大开间办公室，标准层面积为2000 m^2/层，其中核心筒及公共走廊面积占25%，该建筑在第30层有一多功能厅，长25 m、宽19 m，吊顶高度为6 m，为平吊顶，第30层除多功能厅外还有净办公面积1125 mm^2，在建筑中设置综合布线系统。请回答下列问题。

15-55：在第30层设置综合布线系统，按照办公区每7.5 m^2设置一个语音点和一个数据点，另外在多功能厅也设置5个语音点。语音主干采用三类大对数铜缆，根据规范确定该层语音主干电缆的最低配置数量为下列哪项，并说明依据和理由。（供配电2010年考题）

（A）150对　　（B）175对　　（C）300对　　（D）400对

答案：【B】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016第5.3.5条和条文说明第5.1.2条或《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008第21.2.3条。

第30层除多功能厅外还有净办公面积1125 mm^2，净办公面积每7.5 m^2设置一个普通语音点，该层语音主干电缆的最低配置数量：$\left(\frac{1125}{7.5}+5\right)\times(1+10\%)$对=170.5对，可选答案175对。

15-56：在标准层办公区按照办公区每7.5 m^2设置一个语音点和一个数据点，水平子系统采用6类UPT铜缆（直径为5.4 mm），从弱电间配线架出线采用金属线槽，缆线在线槽内的截面积利用率为35%，则线槽最小规格为下列哪项？说明依据和理由。（供配电2010年考题）

（A）150 mm×100 mm　　（B）300 mm×100 mm

（C）400 mm×100 mm　　（D）500 mm×100 mm

答案：【B】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016第7.6.5条及条文说明。

标准层的面积为2000 m^2，其中核心筒及公共走廊面积占25%，该层需设置的语音点和数据点的数量为

$$N=\frac{2000\times(1-25\%)}{7.5}\times2=400$$

金属线槽的截面积最小值：$A=\frac{\pi r^2 n}{35\%}=\frac{\pi\times(5.412)^2\times400}{35\%}\ m^2=26174\ m^2$，选项中300 mm×100 mm=30000 mm^2满足要求。

【知识点解析】

缆线布放在管与线槽内的管径与截面利用率，应根据不同类型的缆线做不同的选择。管内穿放大对数电缆或4芯以上光缆时，直线管路的管径利用率应为50%~60%，弯管路的管径利用率应为40%~50%。管内穿放4对对绞电缆或4芯光缆时，截面利用率应为25%~30%。布放缆线在线槽内的截面利用率应为30%~50%。某些结构（如“+”型等）的6类电

缆在布放时为减少对绞电缆之间串音对传输信号的影响，不要求完全做到平直和均匀，甚至可以不绑扎，因此对布线系统管线的利用率提出了较高要求。对于综合布线管线可以采用管径利用率和截面利用率的公式加以计算，得出管道缆线的布放根数。

$$管径利用率=d/D$$

式中，d 为缆线外径；D 为管道内径。

$$截面利用率=A_1/A$$

式中，A_1 为穿在管内的缆线总截面积；A 为管子的内截面积。

例题 15-57：有一栋写字楼，地下一层，地上 10 层，其中 1~4 层带有裙房，每层建筑面积为 3000 m^2；5~10 层为标准办公层，每层面积为 2000 m^2。标准办公层每层公共区域面积占该层面积的 30%，其余为纯办公区域。在第 6 层办公区域按照每 5 m^2一个语音点，语音点采用 8 位模块通用插座，连接综合业务数字网，并采用 S 接口。该层的语音主干线若采用 50 对的三类大对数电缆，在考虑备用后，至少配置的语音主干电缆根数应为下列哪项数值？（供配电 2013 年考题）

（A）15　　（B）14　　（C）13　　（D）7

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 27.3.7.1 条或《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016 条文说明第 5.3.5 条、第 5.2.4 条。

已知在第 6 层办公区域按照每 5 m^2一个语音点，语音点采用 8 位模块通用插座，连接综合业务数字网，并采用 S 接口。该层的信息点数：

$$N=\frac{2000\times(1-30\%)\times(1+10\%)}{5}=308$$

该层的语音主干线电缆根数：

$$N'=\frac{2N}{50}=\frac{2\times308}{50}=12.32，取\ 13$$

例题 15-58：有一新建工厂，厂区内有普通砖混结构办公建筑一座，预计雷击次数为 0.1 次/a，屋顶采用连成闭合环路的接闪带，共设 4 根引下线。办公建筑内设有电话交换设备，选用塑料绝缘屏蔽铜芯市话通信电缆架空引入，选用电涌保护器对电话交换设备进行雷击电磁脉冲防护。接闪带与建筑物内的电气设备、各种管线机电话交换设备电涌保护器公用接地装置，并在进户外做等电位联结。若通信电缆到办公楼处沿墙壁敷设距地面的高度为 10.6 m，则办公建筑的接闪带引下线与架空引入的通信电缆之间的最小垂直交叉净距为下列哪项数值？（供配电 2014 年考题改编）

（A）0.3 m　　（B）0.9 m　　（C）1.0 m　　（D）1.5 m

答案：【A】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第 8.0.2 条，表 8.0.2 中接闪带引下线与架空引入的通信电缆之间的最小垂直交叉净距 0.3 m。

【知识点解析】

墙上敷设的综合布线缆线及管线与其他管线的间距应符合表 15-4 的规定。

表 15-4　综合布线缆线及管线与其他管线的间距

其 他 管 线	最小平行净距/mm	最小垂直交叉净距/mm
避雷专设引下线	1000	300
保护地线	50	20
给水管	150	20
压缩空气管	150	20
热力管（不包封）	500	500
热力管（包封）	300	300
煤气管	300	20

例题 15-59～15-65：某新建办公建筑，地上共 29 层，层高均为 5 m，地下共 2 层，其中地下层为汽车库，地下一层机电设备用房并设有电信进线机房，裙房共 4 层，5～29 层为开散办公空间，每层开敞办公面积为 1200 m^2，各层平面相同，各层弱电竖井位置均上下对应。请回答以下问题，并列出解答过程。（供配电 2008 年考题）

15-59：在 5～29 层开敞办公空间内按一般办公区功能设置综合布线系统时，每层按规定至少布置多少双孔（一个语音点和一个数据点）5e 类或以上等级的信息插座？（供配电 2008 年考题）

（A）120 个　　（B）110 个　　（C）100 个　　（D）90 个

答案：【A】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016 条文说明第 5.1.2 条或《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 第 21.2.3 条。

布置双孔信息插座个数：N=1200/(5～10)个=120～240 个，最少取 120 个。

【知识点解析】

综合布线系统设计的工作区面积划分，一个独立的需要设置终端设备的区域宜划分为一个工作区，对于一般办公区的工作区面积可按 5～10 m^2 估算或按不同的应用场合调整面积的大小，可参照表 15-5。

表 15-5　工作区面积划分表

建筑物类型及功能	工作区面积/m^2
网管中心、呼叫中心、信息中心等终端设备较为密集的场地	3～5
办公区	5～10
会议、会展	10～60
商场、生产机房、娱乐场所	20～60
体育场馆、候机室、公共设施区	20～100
工业生产区	60～200

15-60：如果 5～29 层每层电信竖井至本层最远点信息插座的水平电缆长度为 83 m，则楼层配线设备可每几层居中设一组？（供配电 2008 年考题）

（A）9 层　　（B）7 层　　（C）5 层　　（D）3 层

答案：【D】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第 3.2.2 条，水平电缆长度限制在 90 m。已知本层最远水平电缆长度为 83 m，楼层高度

为 5 m，则 90 m 长度可以到达本层、上一层及下一层，共 3 层。

15-61：若本建筑综合布线接地系统中存在有两个不同的接地体，其接地电位差（电压有效值）不应大于下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）2 Vr. m. s　　（B）1 Vr. m. s　　（C）3 Vr. m. s　　（D）4 Vr. m. s

答案：【B】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第 8. 0. 5 条，如布线系统的接地系统中存在两个不同的接地体时，其接地电位差不应大于1 Vr. m. s。

15-62：设在弱电竖井中具有接地的金属线槽内敷设的综合布线电缆沿竖井内明敷设，当竖井内有容量有 8 kV · A 的 380 V 电力电缆平行敷设时，它们之间的最小净距应为下列哪项数值？（供配电 2008 年考题）

（A）100 mm　　（B）150 mm　　（C）200 mm　　（D）300 mm

答案：【D】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

查表 8. 0. 1 中 380 V 电力电缆容量大于 5 kV · A，有一方在接地的金属线槽或钢管中，最小间距为 300 mm。

15-63：如果自弱电竖井配出至二层平面的综合布线专用金属线槽内设有 100 根直径为 6 mm 的非屏蔽超五类电缆，则此处应选用下列哪种规格的金属线槽才能满足规范要求？（供配电 2008 年考题）

（A）75 mm×50 mm　　（B）100 mm×50 mm

（C）100 mm×75 mm　　（D）50 mm×50 mm

答案：【C】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第 7. 6. 5 条，电缆布置在线槽内，截面利用率取 30%~50%，推导出金属线槽截面为 $A=\dfrac{\pi r^2 n}{30\%\sim 50\%}=\dfrac{\pi\times(6/2)^2\times 100}{30\%\sim 50\%}\text{mm}^2=5654\sim 9423\text{ mm}^2$，金属线槽截面 100 mm×75 mm 满足要求。

15-64：如果 5~29 层自每层电信竖井至本层最远点信息插座的水平电缆长度为 83 m，每层设计信息插座 200 个，则 5~29 楼层电信间最少可设置多少个？（供配电 2008 年考题改编）

（A）9 个　　（B）7 个　　（C）5 个　　（D）13 个

答案：【D】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第 3. 2. 2 条，水平电缆长度限制在 90 m。已知本层最远水平电缆长度为 83 m，楼层高度为 5 m，则 90 m 长度可以到达本层、上一层及下一层，共 3 层。

第 7. 2. 1 条，两层信息点为 400 个，25 层楼最少设置 13 个电信间。

15-65：某办公楼需进行综合布线设计。对开放型办公室布线时，采用多用户信息插座的方式，采用 5 类线线缆（24 号线规），电信间跳线和设备电缆的长为 5 m，工作区电缆最大长度为 20 m，请计算水平电缆长度最大为下列哪项数值。

（A）72 m　　（B）75 m　　（C）79 m　　（D）85 m

答案：【A】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016。

第 3.2.2 条，已知工作区电缆最大长度 $C=W+T=(20+5)\ \text{m}=25\ \text{m}$。

由 $C=(102-H)/(1+D)=(102-H)/(1+0.2)=25\ \text{m}$ 推出水平电缆的长度 $H=72\ \text{m}$。

例题 15-66：某住宅小区有多栋高层住宅楼，某电信公司在小区入口处设置总光纤配线箱，每个住宅楼一楼入口旁均设置用户单元光纤配线箱，采用 1310 nm 波长的 G.652 光纤传输，在光纤配线箱接入处均为光纤接头热熔接方式，用户接入点用户侧配线设备至用户单元光纤配线箱光纤接头采用冷接方式，接头数为 1。若住宅楼最近距小区入口 50 m，最远 1800 m，楼高 60 m，请计算该住宅小区用户接入点用户侧配线设备至用户单元光纤配线箱的光纤链路全程衰减限值最大为下列哪项数值。(供配电 2013 年考题)

(A) 0.18 dB　　(B) 0.22 dB　　(C) 0.24 dB　　(D) 0.32 dB

答案：【D】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016 第 4.5.1 条。

已知光纤接头冷接 1 处，用 1310 nm 波长的 G.652 光纤，光衰常数为 0.36 dB/km，光纤链路全程衰减限值最大为

$$\beta=a_{\text{f}}L_{\max}+(N+2)a_{\text{j2}}=[0.36\times0.06+(1+2)\times0.1]\ \text{dB}=0.3216\ \text{dB}$$

例题 15-67：某一大型综合建筑，总建筑面积为 150000 m^2，总高度为 500 m，总层数 100 层。其中 11～40 层为标准办公层，每层面积为 1500 m^2，每一标准办公用户单元为 60 m^2。如光纤配线区（用户接入点）按照最大用户数量配置，请计算光纤配线区最少为下列哪项数值。(供配电 2013 年考题)

(A) 2 个　　(B) 3 个　　(C) 4 个　　(D) 5 个

答案：【B】

解答过程：依据《综合布线系统工程设计规范》GB 50311—2016 第 4.2.1 条及条文说明。

每层面积为 1500 m^2，每一标准办公用户单元为 60 m^2，每层有 25 个，30 层共计 750 个用户单元，一个光纤配线区最大用户数量为 300 个，750/300=2.5 个，取 3 个光纤配线区。

15.6　有线电视

【知识点说明】

1）有线电视系统设计原则属于普通考点，依据《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。要求掌握有线电视系统主要的性能指标等；了解线路敷设、供电、防雷与接地。

2）接收天线、自设前端、传输与分配网络、卫星电视接收系统属于冷门考点，依据《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。要求了解接收天线、自设前端、传输与分配网络、卫星接收天线的相关计算。

依据书目：

《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

参考书目：

《民用建筑电气设计计算及示例》12SDX101-2

国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

建筑电气通用图集 09BD14《安全技术防范工程》

例题 15-68~15-72：上海市某新建住宅小区有线电视系统设计中有以下问题请回答。

15-68：小区内一有线电视前端宽带混合放大器，其宽带混合放大器每个频道标称最大输出电平标称值为 110 dBμV，系统传输频道数为 12 个，分配给前端的交扰调制比系数为 0.2，则该宽带放大器每个频道输出电平设计值为下列哪项数值？

（A）96.2 dBμV　　（B）95.2 dBμV　　（C）94.2 dBμV　　（D）93.2 dBμV

答案：【B】

解答过程：依据《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994。

分配给前端的交扰调制比：$CM_h = 47-20\lg b = 47-20\lg 0.2$

该宽带放大器每个频道输出电平设计值为

$$S'_{h0} = S'_{hmax} - 7.5\lg(N-1) - 0.5(CM_h - 47)$$

$$= [110 - 7.5\lg(12-1) - 0.5(47-20\lg 0.2-47)]\ \text{dBμV} = 95.2\ \text{dBμV}$$

15-69：某干线放大器的标称最大输出电平为 106 dBμV，串接 3 个放大器，传输频道为 51 个，分配给干线的交扰调制比系数为 0.2。此时，该干线放大器常温下的最大输出电平应为下列哪项数值？

（A）95.45 dBμV　　（B）90.45 dBμV　　（C）85.45 dBμV　　（D）81.45 dBμV

答案：【D】

解答过程：依据《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994。

分配给干线的交扰调制比：$CM_a = 47-20\lg b = 47-20\lg 0.2$

该干线放大器常温下的最大输出电平值为

$$S'_{oa} = S'_{oamax} - 10\lg n - 7.5\lg(N-1) - 0.5(CM_a - 47)$$

$$= [106 - 10\lg 3 - 7.5\lg(51-1) - 0.5(47-20\lg 0.2-47)]\ \text{dBμV} = 81.45\ \text{dBμV}$$

15-70：在该小区位于东经 121.48°，北纬 31.22°，小区高层楼顶上接收中星 10 号卫星（东经 110.5°）信号，则卫星接收天线的方位角、仰俯角应为下列何值？

（A）20.3°，51.7°　　（B）200.3°，51.7°

（C）27.3°，48.7°　　（D）250.3°，61.1°

答案：【A】

解答过程：依据《2016 年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）。

公式法，相对经度差值为 $\phi = \varphi - \lambda_S = 121.48° - 110.5° = 11.02°$。

方位角：$\alpha = \arctan\left(\dfrac{\tan\phi}{\tan Q}\right) = \arctan\left(\dfrac{\tan 10.98°}{\tan 31.22°}\right) = 20.3°$

中国位于北半球，对于卫星的方位角为 180°+20.3° = 200.51°。

$$\cos\beta = \cos Q\cos\phi = \cos 31.22°\cos 11.02° = 0.839,\quad \sin\beta = 0.544$$

仰角：$\delta = \arctan\left(\dfrac{\cos\beta - 0.1513}{\sin\beta}\right) = \arctan\left(\dfrac{0.839-0.1513}{0.544}\right) = 51.7°$

查图法，查《2016年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》图15.6.6中方位角 $\alpha=20.3°$，仰角 $\delta=51.7°$。

15-71：该小区高层楼房设置独立塔式接收天线，接收地级电视发射的VHF频段信号，接收频道的中频频率为168.25 MHz，已知电视发射塔的绝对高度为232 m，接收天线到电视塔的直线距离为30 km，则塔式接收天线的最佳高度下列哪项数值？

（A）47 m　（B）50 m　（C）58 m　（D）66 m

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

波长：$\lambda=\dfrac{C}{f}=\dfrac{3\times10^8}{168.25\times10^6}\text{ m}=1.783\text{ m}$

塔式接收天线的最佳高度为

$$h=\frac{\lambda d}{4h_j}=\frac{1.783\times30\times10^3}{43\times232}\text{ m}=57.64\text{ m}$$

15-72：某有线电视系统内的电气设备接地装置和埋地金属管道与防雷接地装置不相连时，两者间的距离不宜小于哪一项？

（A）1 m　（B）3 m　（C）5 m　（D）10 m

答案：【B】

解答过程：依据《有线电视系统工程技术规范》GB 50200—1994。

第2.9.11条，系统内的电气设备接地装置和埋地金属管道应与防雷接地装置相连，当不相连时，两者间的距离不宜小于3 m。

15.7　公共广播及厅堂扩声系统

【知识点说明】

1）声学基础知识属于普通考点，依据《2016年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）。要求掌握声学基础知识相关计算。

2）厅堂扩声系统设计属于重要考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《厅堂扩声系统设计规范》GB 50371—2006。要求熟练掌握厅堂声压级、扬声器声压及功率、扬声器最远供声距离、扬声器所需功率、扬声器的线路缆线的计算；掌握扩声系统设计的设计要求、混响时间设计值等。

3）公共广播系统属于重要考点，依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。要求熟练掌握民用广播系统功放容量、公共广播功放设备、公共广播系统线路设计的计算；掌握扩声系统设计要求、广播控制室、电源、接地等。

4）会议会场扩声设计属于重要考点，依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008、《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524—2010、《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010、《电子会议系统工程设计规范》GB 50799—2012等。要求熟练掌握会议会场扩声设计。

5）声学基础知识可以学习《声学理论与工程应用》作为补充，公共广播系统和厅堂扩

声系统设计可以参照国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》和建筑电气通用图集 09BD12《广播、扩声与会议系统》学习。

依据书目：

《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010

《厅堂扩声系统设计规范》GB 50371—2006

《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010

《电子会议系统工程设计规范》GB 50799—2012

《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524—2010

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

参考书目：

《声学名词术语》GB/T 3947—1996

《体育场馆声学设计及测量规范》JGJ/T 131—2012

国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

建筑电气通用图集 09BD12《广播、扩声与会议系统》

《声学理论与工程应用》何琳、朱海潮等著

例题 15-73：有一个大型超高层办公楼，高 300 m，总建筑面积 20 万 m^2，地下 4 层，地上 78 层，有 4 层裙房。在建筑中设置公共广播系统，传输线缆采用铜芯导线，其电阻率为 $1.75\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$，采用 100 V 定压输出，线路上接有 30 个扬声器，每个扬声器功率为 5 W，这 30 个扬声器沿线路均匀布置，长度达到 650 m，要求线路的衰减为 2 dB，则在 1000 Hz 时，传输线路的截面积至少不小于下列哪项数值？（供配电 2016 年考题）

（A）0.132 mm^2　　（B）1.32 mm^2　　（C）13.2 mm^2　　（D）132 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010。

条文说明第 3.3.2.9 条，传输线路的截面积为

$$S=\frac{2\rho Lp}{U^2(10^{r/20}-1)}=\frac{2\times1.75\times10^{-8}\times10^9\times0.65\times30\times5}{100^2(10^{2/20}-1)}\text{mm}=\frac{3412.5}{2589.25}\text{mm}^2=1.32\text{mm}^2$$

例题 15-74：有一会议中心建筑，首层至四层为会议楼层，首层有一进门大厅，三层设有会议电视会场，五至七层为办公层。在建筑的会议中心公共走廊设置公共广播，从广播室至现场最远的距离为 1000 m，共计有 80 个，无源扬声器的功率为 10 W，根据规范判断额定传输电压宜采用下面哪一项。（供配电 2014 年考题）

（A）100 V　　（B）150 V　　（C）200 V　　（D）250 V

答案：【A】

解答过程：依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010 第 3.5.4 条。

最远的距离为 1000 m，80 个无源扬声器的功率为 10 W 共计 800 W，$dP=1\times80\times10\ \text{km}\cdot\text{W}=0.8\ \text{km}\cdot\text{W}<1\ \text{km}\cdot\text{W}$，宜选择 70 V、100 V。答案中只有 100 V，选 A。

【知识点解析】

公共广播系统线路敷设，应符合下列规定：

1）公共广播信号应通过布设在广播服务区的有线广播线路、同轴电缆或五类线缆、光缆等网络传输。

2）当传输距离在3 km以内时，广播传输线路宜采用普通线缆传送广播功率信号；当传输距离大于3 km，且终端功率在kW级以上时，广播传输线路宜采用五类线缆、同轴电缆或光纤传送低电平广播信号。

3）当广播扬声器为无源扬声器，且传输距离大于100 m时，额定传输电压宜选用70 V、100 V；当传输距离与传输功率的乘积大于1 km·kW，额定传输电压可选用150 V、200 V、250 V。

4）公共广播系统室内广播功率传输线路，衰减不宜大于3 dB（1000 Hz）。

就公共广播工程的使用效果而言，只要其应备声压级符合规范的规定，则线路衰减本可不予限定。但是，推荐一个衰减标准，会为线路设计提供方便。

传输距离、负载功率、线路衰减和传输线路截面之间的关系。可按下式计算

$$S=\frac{2\rho LP}{U^2(10^{\gamma/20}-1)} \tag{15-1}$$

式中，S为传输线路截面（mm^2）；ρ为传输线材电阻率（$\Omega\cdot mm^2/km$）；L为传输距离（km）；P为负载扬声器总功率（W）；U为额定传输电压（V）；γ为线路衰减（dB）。

当传输线采用铜导线、额定传输电压为100 V、线路衰减为3 dB，且广播扬声器沿线均布时，式（15-1）可简化为

$$S\approx 5LP \tag{15-2}$$

式中，S为传输线路截面（mm^2）；L为传输距离（km）；P为负载扬声器总功率（kW）。

例题15-75：某会议中心非紧急广播系统共计有200个扬声器，每个扬声器10 W，其广播功率放大器的额定输出功率最小应为下列哪一项？（供配电2014年考题）

（A）2000 W　　（B）2600 W　　（C）3000 W　　（D）4000 W

答案：【B】

解答过程：依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010第3.7.2条。

按照公共广播系统规范规定，非紧急广播系统宜为

$$P=1.3\sum P_n=1.3\times 200\times 10\ \text{W}=2600\ \text{W}$$

【知识点解析】

公共广播系统功放设备的规定：驱动无源终端的广播功率放大器，宜选用定压式功率放大器，其标称输出电压应与广播线路额定传输电压相同。非紧急广播用的广播功率放大器，额定输出功率不应小于其所驱动的广播扬声器额定功率总和的1.3倍。用于紧急广播用的广播功率放大器，额定输出功率不应小于其所驱动的广播扬声器额定功率总和的1.5倍；全部紧急广播功率放大器的功率总容量，应满足所有广播分区同时发布紧急广播要求。

例题15-76：有一综合建筑，总建筑面积为110000 m^2，总高度为98 m。在建筑中4层为一会议厅，根据建筑装修设计的情况，将扬声器箱安装布置在吊顶，间距为9 m，安装高度为4.75 m。根据此布置的扬声器箱，其辐射角应为下列哪一项？（供配电2017年考题）

（A）94.5°　　（B）98.4°　　（C）101°　　（D）105°

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

扬声器的辐射角：$L=2(H-1.3)\tan\dfrac{\theta}{2}\Rightarrow 9=2(4.75-1.3)\tan\dfrac{\theta}{2}\Rightarrow\theta=101°$。

例题 15-77～15-81：有一新建办公楼，地下 2 层，地上 20 层，在第 20 层有一个多功能厅和一个大会议厅，层高均为 5.5 m，吊顶为平吊顶，高度为 5 m，多功能厅长 25 m、宽 15 m，会议厅长 20 m、宽 10 m。请解答下列问题，并列出解答过程。

15-77：在多功能厅设有 4 组扬声器音箱，每组音箱额定噪声功率为 25 W，配置的功率放大器峰值功率为 1000 W，如果驱动每组扬声器的有效值功率为 25 W，则工作室其峰值余量的分贝数为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）6 dB　　（B）10 dB　　（C）20 dB　　（D）40 dB

答案：【B】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 附录 G。

由公式 $L_W=10\lg W_a+120$ 推出 $L_W=10\lg W_e+120$ 可知，声压每提高 10 dB，所要求的电功率（或声功率）就必须增加 10 倍，一般为了峰值工作，扬声器的功率留出必要的功率余量是十分必要的。

因此，峰值余量的分贝数为

$$\Delta L_W=10\lg W_{a2}-10\lg W_{a1}=[10\lg 1000-10\lg(4\times 25)]\ \text{dB}=(30-20)\ \text{dB}=10\ \text{dB}$$

15-78：在会议厅设扬声器，为嵌入式安装，其辐射角为 100°，根据规范要求计算，扬声器的间距不应超过下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）8.8 m　　（B）10 m　　（C）12.5 m　　（D）15 m

答案：【A】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

扬声器的间距：$L=2(H-1.3)\tan\dfrac{\theta}{2}=2\times(5-1.3)\times\tan\dfrac{100°}{2}\ \text{m}=8.8\ \text{m}$

【知识点解析】

背景音乐扬声器的布置应符合下列规定：

1）扬声器（箱）的中心间距应根据空间净高、声场均匀度要求、扬声器的指向性等因素确定。要求较高的场所，声场不均匀度不宜大于 6 dB。

2）扬声器箱在吊顶安装时，应根据场所按下列公式确定其间距。

① 门厅、电梯厅、休息厅内扬声器箱间距可按下式计算：

$$L=(2\sim 2.5)H$$

式中，L 为扬声器箱安装间距（m）；H 为扬声器箱安装高度（m）。

② 走道内扬声器箱间距可按下式计算：

$$L=(3\sim 3.5)H$$

③ 会议厅、多功能厅、餐厅内扬声器箱间距可按下式计算：

$$L=2(H-1.3)\tan\frac{\theta}{2}$$

式中，θ 为扬声器的辐射角，宜大于或等于 90°。

15-79：在多功能厅中有一反射声是由生源扬声器经反射面（体）到测试点，整个反射声的声程为 18 m，该反射声达到测试点的时间为下列哪一项？（供配电 2012 年考题）

（A）56.25 ms　　（B）52.94 ms　　（C）51.43 ms　　（D）50 ms

答案：【B】

解答过程：依据《2016 年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）第 986 页。

声速为 340 m/s，回声声程为 18 m，则反射声到达测试点时间为

$$t=\frac{s}{v}=\frac{18}{340}\text{ s}=0.05294\text{ s}=52.94\text{ ms}$$

【知识点解析】

为使声、像一致，扬声器发出的声音，宜比自然声源延迟 5～30 ms。声音传播速度为 340 m/s。先入为主，要让观众先听到直达声，必要时可在扩声系统中加延迟器，推迟扩声信号从扬声器到达观众耳朵的时间，使得声像一致。

15-80：在会议厅中，当会场中某一点位置两只扬声器单独扩声时，第一只扬声器在该点产生的声压级为 80 dB，另一只扬声器在该点产生的声压级为 90 dB，当两只扬声器同时作用时，在该点测得的声压级下面哪个值是正确的？（供配电 2012 年考题）

（A）90 dB　　（B）90.414 dB　　（C）92.762 dB　　（D）120 dB

答案：【B】

解答过程：依据《2016 年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）第 981 页。

声强级定义：

$$L_p=10\lg\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right)\Rightarrow\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right)=10^{\frac{L_p}{10}}$$

两只扬声器同时作用时该点测得的声压级：

$$L_p=10\lg\left(\frac{p_1^2}{p_0^2}+\frac{p_2^2}{p_0^2}\right)=10\lg\left(10^{\frac{L_{p1}}{10}}+10^{\frac{L_{p2}}{10}}\right)=10\lg\left(10^{\frac{80}{10}}+10^{\frac{90}{10}}\right)\text{ dB}=90.414\text{ dB}$$

15-81：在会议厅，将扬声器靠一墙角布置，已知会议厅平均吸声系数为 0.2，$D(0)=1$，则扬声器的供声临界距离为下列哪个数据？（供配电 2012 年考题）

（A）1.85 m　　（B）2.62 m　　（C）3.7 m　　（D）5.24 m

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

室内总面积：$S=(20\times10\times2+(20+10)\times2\times5)\text{ m}^2=700\text{ m}^2$

房间常数：$R=\frac{S\overline{\alpha}}{1-\overline{\alpha}}=\frac{700\times0.2}{1-0.2}=175$

靠一墙角布置时，查 JGJ 16—2008 中表 G.0.1 声源的指向性因数 $Q=4$。

临界距离：$r_c=0.14D(\theta)\sqrt{QR}=0.14\times1\times\sqrt{4\times175}\text{ m}=3.7\text{ m}$

例题 15-82：办公楼高 140 m，地上 30 层，地下 3 层，其中第 16 层为避难层，消防控制室与安防监控中心共用，设在首层。在本建筑中需设置广播系统，该系统与火灾应急广播合用。已知地上每层扬声器为一个支路，10 个扬声器，每个 3 W；地下每层为一个支路，有 16 个扬声器，每个扬声器为 5 W。假定广播线路衰耗为 2 dB。根据规范的要求说明广播系统功放设备的最小容量应选择下列哪一项。（老化系数取 1.35）（供配电 2010 年考题）

（A）1140 W　　（B）1939 W　　（C）2432 W　　（D）3648 W

答案：【C】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

该系统与火灾应急广播合用，K_i为 1，各支路广播系统功放设备容量合计：

$$\sum P_0=\sum K_iP_i=[1\times30\times(10\times3)+1\times3\times(16\times5)]\ \text{W}=1140\ \text{W}$$

已知老化系数 $K_2=1.35$，线路衰耗为 2 dB，则线路衰耗补偿系数 $K_1=1.58$。该广播系统功放设备的最小容量为

$$P=K_1K_2\sum P_0=1.58\times1.35\times1140\ \text{W}=2431.62\ \text{W}$$

【知识点解析】

民用建筑物广播系统功放设备的容量，宜按下列公式计算：

$$P=K_1K_2\sum P_0$$

$$P_0=K_iP_i$$

式中，P 为功放设备输出总电功率（W）；P_0 为每分路同时广播时最大电功率（W）；P_i为第 i 支路的用户设备额定容量（W）；K_i为第 i 支路的同时需要系数（服务性广播时，客房节目每套 K_i应为 0.2～0.4；背景音乐系统 K_i应为 0.5～0.6；业务性广播时，K_i应为 0.7～0.8；火灾应急广播时，K_i应为 1.0）；K_1为线路衰耗补偿系数（线路衰耗 1 dB 时应为 1.26，线路衰耗 2 dB 时应为 1.58）；K_2为老化系数，宜取 1.2～1.4。

例题 15-83：有一会议中心建筑，首层至四层为会议楼层，首层有一进门大厅，三层设有会议电视会场，五至七层为办公层。若在建筑中设置公共广播系统，传输线缆采用铜芯导线，其电阻率为 $1.75\times10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$，采用定压输出，线路上接有 30 个扬声器，每个扬声器功率为 5 W，这 30 个扬声器沿线路均匀布置，长度达到 650 m，要求线路的衰减为 3 dB，额定电压为 100 V。用简化法计算传输线路的截面积至少不小于下列哪项数值。（供配电 2016 年考题改编）

（A）0.132 mm^2　　（B）0.49 mm^2　　（C）13.2 mm^2　　（D）132 mm^2

答案：【B】

解答过程：依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010。

条文说明第 3.3.2.9 条　线路的衰减为 3 dB，额定电压 100 V，扬声器沿线路均匀布置，采用铜芯导线，传输线路的截面积为

$$S=5LP=5\times0.65\times30\times0.05\ \text{mm}^2=0.49\ \text{mm}^2$$

例题 15-84：某省会城市一个四星级酒店设计公共广播，酒店客厅区域的背景广播为二级。对该区域进行电声性能测量，只选了五个测量点，测量点的宽带稳态有效声压值声压级分别为 90 dB、85 dB、78 dB、80 dB、88 dB。该区域的应备声压级为下列哪项？并判断是否符合规定。

（A）83.28 dB，符合　　（B）89.67 dB，不符合

（C）86.25 dB，符合　　（D）86.25 dB，不符合

答案：【C】

解答过程：依据《公共广播系统工程技术规范》GB 50526—2010 第 5.5.2 条。

应备声压级为宽带稳态有效声压值声压级的平均值：

$$L_a = 10\log\sum_{i=1}^{n}(10^{L_i/10}) - 10\log n = [10\log(10^{90/10}+10^{85/10}+10^{78/10}+10^{80/10}+10^{88/10}) - 10\log 5]\ \text{dB}$$
$$= 86.25\ \text{dB}$$

酒店客厅区域的背景广播为二级，查 GB 50526—2010 中表 3.3.1 应备声压级≥80 dB，符合规定要求。

例题 15-85~15-87：一个多用途厅堂观众厅作为电视会议会场，长为 30 m，宽为 20 m，高为 7 m，会场的平均吸声系数为 0.2，2 个音箱靠一边墙放置，音箱 θ 方向的指向性系数 $D(\theta)=1$。请回答下列问题。

15-85：若该会场内满场时在 500 Hz 的空气衰减系数为 0.008，该情况下电视会议会场混响时间为下列哪一项？

（A）0.80 s　　（B）1.20 s　　（C）1.23 s　　（D）2.55 s

答案：【C】

解答过程：依据《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010 条文说明第 5.3.1 条。

电视会议会场的容积：$V = 30\times20\times7\ \text{m}^3 = 4200\ \text{m}^3$

电视会议会场的表面积：$S = 2\times(30\times20+7\times20+30\times7)\ \text{m}^2 = 1900\ \text{m}^2$

该情况下电视会议会场混响时间：

$$T_{60} = \frac{0.163\ \text{V}}{-S\ln(1-\bar{\alpha})+4\ \text{mV}} = \frac{0.163\times4200}{-1900\times\ln(1-0.2)+4\times0.008\times4200}\ \text{s} = 1.23\ \text{s}$$

15-86：已知会场内房间常数为 50，计算人在离声源 1.2 m 处的语言传输指数为下列哪一项。

（A）0.517　　（B）1.06　　（C）1. 23　　（D）1.37

答案：【A】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008 附录 G。

第 H.0.1 条，靠墙布置，指向性因数 $Q=2$，θ 方向的指向性系数 $D(\theta)=1$，临界距离为 $D_C = r_c = 0.14D(\theta)\sqrt{QR} = 0.14\times1\times\sqrt{2\times50}\ \text{m} = 1.4\ \text{m}$，声源 1.2 m 小于 D_C

依据《电子会议系统工程设计规范》GB 50799—2012 条文说明第 7.3.2 条。

混响时间 $T_{60}=1.23$ s，$D<D_C$，人在离声源 1.2 m 处的语言传输指数：

$$AL\% = \frac{200\times D^2T_{60}^2\times N}{QVM} = \frac{200\times1.2^2\times1.23^2\times2}{2\times4200\times1} = 10.37\%$$

$$STI = 0.9482-0.1845\times\ln(AL) = 0.9482-0.1845\times\ln(10.37) = 0.5167$$

15-87：某电视电话会议会场，需在墙上安装主显示器和摄像头，两侧安装两组扬声器，每组扬声器 100 W，则电视电话会议会场扬声器功率放大器的额定输出功率最小应为下列哪一项？（供配电 2014 年考题）

（A）200 W　　（B）260 W　　（C）300 W　　（D）400 W

答案：【C】

解答过程：依据《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010。

第 3.2.5-2 条　电视电话会议会场扬声器功率放大器的额定输出功率为

$$P = 1.5\sum P_n = 1.5\times2\times100\ \text{W} = 300\ \text{W}$$

15.8 会议电视会场及视频显示系统

【知识点说明】

1）红外线同声传译系统属于重要考点，依据《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524—2010。要求熟练掌握调频副载波频率、红外发射主机同轴电缆的计算；了解系统设备、同声传译室、线路设计的相关要求。

2）会议电视会场系统属于重要考点，依据《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010。要求熟练掌握屏幕显示器的布置、摄像机的布置；掌握音频系统、视频系统、电缆敷设、会议电视会场等相关要求。

3）电子会议系统属于普通考点，依据《电子会议系统工程设计规范》GB 50799—2012、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。要求熟练掌握语言清晰度的计算；了解电子会议系统设计的相关要求。

4）视频显示系统属于重要考点，依据《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008、《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。要求熟练掌握 LED 显示屏的设计、投影机显示器的亮度、投影幕的视距计算；了解视频显示系统设计的相关要求。

依据书目：

《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010

《电子会议系统工程设计规范》GB 50799—2012

《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524—2010

《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008

《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008

《2016 年注册电气工程师执业资格专业考试复习指导书》（供配电下册）

参考书目：

《民用闭路监视电视系统工程技术规范》GB 50198—2011

国家标准图集 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》

建筑电气通用图集 09BD12《广播、扩声与会议系统》

例题 15-88：某裙房 4 层大型会议室，长 30 m，宽 20 m，具备召开国际会议功能。会场设置数字红外线同声传译系统，使用调频副载波频率（中心频率）编号为 CC5。需在会场红外服务区安装红外辐射单元。已知会场共设置了 4 个红外辐射单元，2 个负责会场前区，2 个负责会场后区。从红外发射主机到红外辐射单元采用同轴电缆。从红外发射主机至后区第一个红外辐射单元的长度为 25 m。则从红外发射主机至后区第二个红外辐射单元的长度，下列哪项数值负荷规范要求？（供配电 2016 年考题）

（A）15 m　　（B）30 m　　（C）35 m　　（D）40 m

答案：【B】

解答过程：依据《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524—2010。

查表 3.1.1-2　调频副载波频率编号 CC5 为 5.0 MHz。

条文说明第 3.3.2.9 条　连接线总长度差：

$$L_{\Delta}=\frac{1}{4ft}=\frac{1}{4\times5\times10^{6}\times5.6\times10^{-9}}\text{ m}=8.93\text{ m}$$

从红外发射主机至后区第二个红外辐射单元的长度：

$$L_2=L_1\pm8.93\text{ m}=(25\pm8.93)\text{ m}=16.07\sim33.93\text{ m}$$

【知识点解析】

需要在会场红外服务区内安装多个红外辐射单元时，覆盖同一区域的各个红外辐射单元间的信号延时差不宜超过载波周期的1/4。

从红外发射主机到红外辐射单元经过同轴线缆进行传输，线缆传输会产生时延（延时常数为5.6 ns/m）。由于多个红外辐射单元与红外发射主机之间的线缆长度不等，导致红外辐射单元之间的信号相位会产生差别，从而导致信号重叠区的接收信号变差，甚至出现红外信号接收盲区。实际工程中，覆盖同一区域的两个红外辐射单元间的信号延时差不超过载波周期的1/4时，信号重叠区的接收信号变差状况不明显，两个红外辐射单元到红外发射主机的连接线缆总长度差允许的最大值可通过以下公式计算：

$$L=1/(4ft)$$

式中，f为载波频率（MHz）；t为线缆传输延时常数，为5.6ns/m。

数字红外线同声传译系统使用的调频副载波频率（中心频率）范围宜为2~6 MHz，并应符合表15-6中的规定。

表15-6　副载波编号及副载波频率

副载波编号	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	…
频率/MHz	2.333 333	3.000 000	3.666 667	4.333 333	5.000 000	5.666 667	…

例题15-89：有一会议中心建筑，首层至四层为会议楼层，首层有一进门大厅，三层设有会议电视会场，五至七层为办公层。在首层大厅设有一LED显示屏，已知理想视距为10 m，则在理想视距时，LED的像素中心距为下列哪一项？（供配电2014年考题）

（A）1.8 mm　　（B）3.6 mm　　（C）7.2 mm　　（D）28.98 mm

答案：【B】

解答过程：依据《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008。

条文说明第4.2.1条，理想视距：$H=\frac{1}{2}kd=\frac{1}{2}k\cdot16P=\frac{1}{2}\times345\times16P=2760P=10\text{ m}$

像素中心距：$P=\frac{10\times10^{3}}{2760}\text{ mm}=3.6\text{ mm}$

【知识点解析】

显示屏视距与像素中心距的关系：

视距和像素中心距$H=kP$公式来源，已公布的《体育场馆设备使用要求及检验方法第一部分：LED显示屏》TY/T 1001.1—2005给出了最大视距和字符高度的公式。

$$H=kd$$

式中，H为最大视距（m）；k为视距系数，一般取345；d为字符高度（m），字符为16点阵汉字。

因此$H=kP=345\times16P=5520P$；P为像素中心距（m），k为视距系数，最大视距系数k

一般取 5520，根据经验数据：

理想视距＝1/2 最大视距，理想视距系数 k 一般取 2760；

最小视距＝1/2 理想视距，最小视距系数 k 一般取 1380；

合理视距范围为，最小视距(＝1/2 理想视距)≤合理视距≤最大视距(＝2×理想视距)。

在选取像素中心距时，一般采用理想视距值。

提示：视距系数 k 有两种，含义不同，一个是相对于字符高度的视距系数 k；另一个是相对于像束中心距的视距系数。为防混淆，在此称为 k'，则 $H=kd=345\times16P=5520P=k'P$。

最大视距、理想视距、最小视距关系示意图如图 15-9 所示。

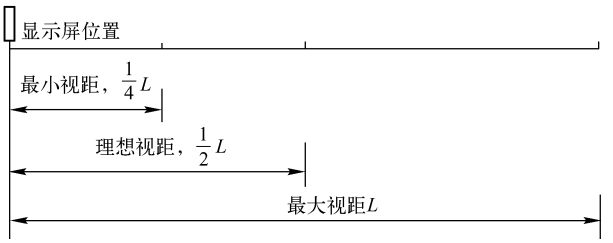


图 15-9　最大视距、理想视距、最小视距关系示意图

例题 15-90：有一会议中心建筑，首层至四层为会议楼层，首层有一进门大厅，三层设有会议电视会场，五至七层为办公层。该会议中心三层有一中型电视会场，需在墙上安装主显示器。已知主显示器高 1.5 m，参会人员与主显示器之间的水平距离为 9 m，参会者坐姿平均身高 1.40 m，参会者与主显示器中心线的垂直视角为 15°，无主席台。主显示器底边距地的正常高度为下列哪一项？(供配电 2014 年考题)

(A) 2.41 m　　(B) 3.06 m　　(C) 3.81 m　　(D) 4.56 m

答案：【B】

解答过程：依据《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010 第 3.5.2 条。

主显示器中心线距地的高度 H 为

$$H=H_1+H_2+H_3=(9\tan15°+1.4+0)\ \text{m}=3.81\ \text{m}$$

主显示器底边距地的正常高度 h 为

$$h=H-\frac{1.5}{2}\ \text{m}=(3.81-0.75)\ \text{m}=3.06\ \text{m}$$

【知识点解析】

会场主显示器在墙上安装高度宜按下列公式计算确定（见图 15-10）：

$$H'=H_1'+H_2'+H_3'$$

$$H_1'=D'\tan\theta'$$

式中，H' 为显示器的安装高度（m）；D' 为参会者与显示器之间的水平距离（m）；H_1' 为参会者坐姿水平视线与显示器中心水平线之间的垂直距离（m）；H_2' 为参会者坐姿平均身高(m)，宜取 1.40 m；H_3' 为主席台高度（m），取 0.20~0.40 m；当无主席台时，取 0；(注：

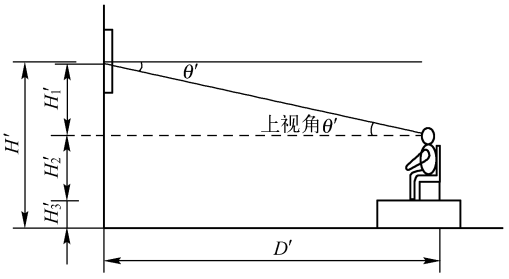


图 15-10　显示器安装高度示意

H_3'也可为观众席与主席台地面的高差。）θ'为参会者与显示器中心法线的垂直视角。

参会者与会场主显示器屏幕垂直观看角宜小于或等于20°，与会场主显示器屏幕水平观看角应小于主屏幕显示器的水平视角参数。

例题15-91：有一栋写字楼，地下一层，地上10层，其中1~4层带有裙房，每层建筑面积为3000 m^2；5~10层为标准办公层，每层面积为2000 m^2。在四层有一设有主席台的大型电视会议室，在主席台后部设有投影幕，观众席第一排至会议的投影幕布的距离为8.4 m，观众席共设有24排座位，两排座席之间的距离为1.2 m。为满足最后排人员能看清投影幕的内容，投影幕的最小尺寸（对角线）应为下列哪项数值？（供配电2013年考题）

（A）4.0 m　　（B）4.13 m　　（C）4.5 m　　（D）4.65 m

答案：【A】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第20.4.8.6条　会场前排与会人员观看投影机幕布的最小视距，宜按视频画面对角线的规格尺寸2~3倍计算；最远视距宜按视频画面对角线的规格尺寸8~9倍计算。

前排视距校验：$D=\dfrac{8.4}{2\sim3}\text{m}=2.8\sim4.2\text{m}$

末排视距校验：$D=\dfrac{[8.4+1.2\times(24-1)]}{8\sim9}\text{m}=4\sim4.5\text{m}$

综上$D=4\sim4.2$ m，选项A为满足要求最小尺寸。

例题15-92：某一个大型商场在户外设置三基色LED显示屏。供应商给出显示屏产品参数如下：显示器中心方向与法线下夹角为10°时亮度为4200 cd/m^2，下夹角为20°时亮度为3600 cd/m^2，下夹角为30°时亮度为2600 cd/m^2；夹角为0°时亮度为5200 cd/m^2；上夹角为10°时亮度为3600 cd/m^2，上夹角为20°时亮度为2600 cd/m^2，上夹角为30°时亮度为1200 cd/m^2。该全彩LED显示屏产品的垂直视角为下列哪一项数值？显示器的垂直视角和亮度是否符合规范要求？

（A）30°，不符合　　（B）30°，符合　　（C）50°，不符合　　（D）50°，符合

答案：【D】

解答过程：依据《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008。

第4.2.2条和第2.1.34条　显示器垂直方向与法线夹角为0°时亮度为5200 cd/m^2，下夹角为30°时（为0°时亮度的一半）>20°，上夹角为20°时（为0°时亮度的一半）>10°，符合规范要求。显示器的垂直视角为20°+30°=50°。该显示器的亮度最大为5200 cd/m^2，大于表4.2.2中规定的室外三基色LED显示屏亮度5000 cd/m^2，符合规范要求。

例题15-93：某商业会展中心的其中一个展示厅有一个投影显示屏，屏幕为100 in（2214 mm×1245 mm），投影机光强3000 cd，屏幕亮度增益为2，箱体光利用率为30%，该显示屏的单元亮度为下列哪一项数值？

（A）80 cd/m^2　　（B）105 cd/m^2　　（C）208 cd/m^2　　（D）250 cd/m^2

答案：【C】

解答过程：依据《视频显示系统工程技术规范》GB 50464—2008。

条文说明4.2.4-7　显示屏单元亮度=投影机亮度×屏幕亮度增益×箱体光利用率/屏幕面积/π=3000×2×0.3/(2.214×1.245)/π cd/m^2=208 cd/m^2。

例题 15-94：某电视电话会议会场，需在墙上安装主显示器和摄像头。已知摄像头在墙面上安装，摄像头中心线距地的高度为 2 m，参会人员与主显示器之间的水平距离为 6 m，参会者坐姿平均身高 1.40 m，无主席台。参会者与摄像头中心线的垂直视角为下列哪一项？是否符合要求？

（A）3.2°，符合　　（B）5.7°，符合　　（C）8.1°，符合　　（D）12°，不符合

答案：【B】

解答过程：依据《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635—2010 第 3.5.1 条。

摄像头中心线距地的高度 H 为

$H=H_1+H_2+H_3=H_1+1.4\text{ m}+0=2\text{ m}$，推导出 $H_1=0.6\text{ m}$

参会者与摄像头中心线的垂直视角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{H_1}{D}\right)=\arctan\left(\frac{0.6}{6}\right)=5.7°<10°$$，符合规范要求

【知识点解析】

摄像机的布置应符合下列规定：

1）摄像机的安装高度宜按下列公式确定，如图 15-11 所示。

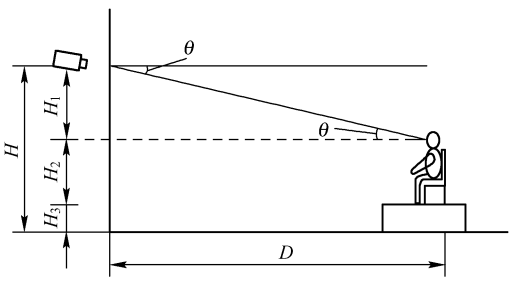


图 15-11　摄像机安装高度示意

$$H=H_1+H_2+H_3$$

$$H_1=D\tan\theta$$

式中，H 为摄像机的安装高度（m）；D 为摄像机与被摄对象之间的水平距离（m）；H_1 为摄像机与被摄对象坐姿水平视线之间的垂直距离（m）；H_2 为被摄对象坐姿平均身高（m），宜取 1.40m；H_3 为主席台高度（m），取 0.20~0.40 m，当无主席台时，取 0；θ 为摄像机的垂直摄像角（°）。

2）摄取发言者图像的主摄像机垂直摄像角宜小于或等于 10°，水平左摄角或水平右摄角宜小于或等于 45°。

3）摄取会场全景或局部场景的辅助摄像机宜根据会场的规模和布置设置。

4）摄像机的图像画面内不应有灯具、前投影等遮挡画面的物体，并应避免强光直射干扰。

5）摄像机可采用固定安装或流动安装方式。

6）当摄像机在墙面固定安装时，摄像机的安装高度宜小于或等于 2.50 m；当摄像机吊挂安装时，摄像机底部高度宜大于或等于 2.20 m。

例题 15-95：有一栋高层写字楼，设置有入侵报警系统、视频安防监控系统、出入口控

制系统等系统。首层大厅设置安防监控中心，机房中设置一个电视墙为主监视器，电视墙由4块55 in的拼接屏组成，尺寸如图15-12所示，则电视墙上的主监视器到操作人员的距离下列哪一项符合要求？

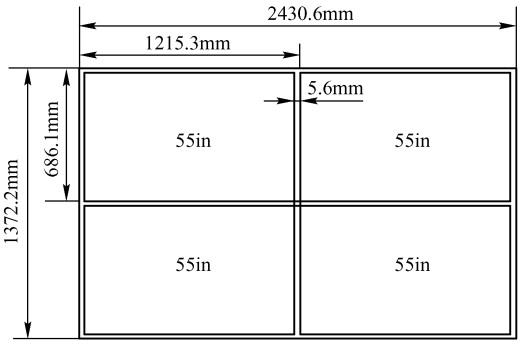


图15-12　电视墙尺寸

（A）6 m　　（B）8 m　　（C）10 m　　（D）14 m

答案：【B】

解答过程：依据《民用建筑电气设计规范》JGJ 16—2008。

第23.2.4-6条　视频监控系统，电视墙与值班人员之间的距离，应大于主监视器画面对角线长度的5倍。

本监控中心的电视墙对角线长度为 $L=\sqrt{1372.2^2+2430.6^2}$ mm = 2791.2 mm，主监视器到操作人员的距离为13956 mm，答案D符合要求。

注：《民用闭路监视电视系统工程技术规范》GB 50198—2011第3.4.11-3条电视墙后侧距墙不应小于0.8 m，若电视墙后侧靠窗，应在窗外加装遮阳伞。电视墙上的主监视器到操作人员的距离应是监视器屏面高度的4~6倍。

在线互动交流平台
官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

注册电气工程师执业资格专业考试

典型考点详解

（供配电专业）

- 按照注册考试中心最新规范、手册编写
- 覆盖90%案例考试内容
- 解题步骤清晰明确、规整全面，附有知识点解析
- 提供短视频例题讲解

注电考试交流QQ群

扫码入群，提供答疑解惑等多项增值服务

计算机分社微信服务号

关注计算机分社官方微信，回复您购买图书书号中间的五位数字，即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

ISBN 978-7-111-59797-1

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

机械工业出版社
微信公众号

上架指导 电气工程/资格考试

ISBN 978-7-111-59797-1

策划编辑◎ 汤 枫 / 封面设计◎ 子时文化 ZiShi Culture

ISBN 978-7-111-59797-1

9 787111 597971 >

定价：169.00 元