

邱利军 赵文锐 晁晓圆〇等编著

DIYA DIANGONG  
SHANGGANG JINENG SUCHENG

# 低压电工 上岗技能

# 速成



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 低压电工上岗技能速成

邱利军 赵文锐 晁晓圆 等编著



机械工业出版社

本书以图文并茂的形式，介绍广大电工在日常工作中所用的电工基础知识、电工测量、电工常用工具及电动工具、低压照明装置、低压电器及成套装置、电动机与电动机拖动、电气线路、电力电容器的名称、种类、规格、使用方法和注意事项、接线原理等多方面的实用知识。对部分产品，还介绍了常见故障的处理方法。同时还着重介绍了临时用电、安全用电、防雷、防静电等安全知识。

本书适合广大基层电工阅读，也可供职业技术院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

低压电工上岗技能速成/邱利军等编著. —北京：机械工业出版社，2013.7

ISBN 978-7-111-42691-2

I. ①低… II. ①邱… III. ①低电压-电工技术-基础知识 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 115492 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：徐明煜 责任编辑：徐明煜 吕 潇

版式设计：常天培 责任校对：申春香

封面设计：陈 沛 责任印制：杨 曜

北京市四季青双青印刷厂印刷

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 8.75 印张 · 272 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-42691-2

定价：29.90 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

社 服 务 中 心：(010) 88361066 教 材 网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010) 68326294 机 工 官 网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010) 88379649 机 工 官 博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前　　言

本书以图文并茂的形式，介绍广大电工在日常工作中所用的电工基础知识、电工测量、电工常用工具及电动工具、低压照明装置、低压电器及成套装置、电动机与电动机拖动、电气线路、电力电容器的名称、种类、规格、使用方法和注意事项、接线原理等多方面的实用知识。对部分产品，还介绍了常见故障的处理方法。同时还着重介绍了临时用电、安全用电、防雷、防静电等安全知识。

本书可作为广大基层电工的工具书，也可作为相关技术管理人员进行工具设备选型工作的参考资料，以及职业学校师生的教学参考书。

电工在日常工作当中，除了进行电力施工、安装或维修电气设备以外，还需要自己制造或配置很多与电气设备相关的器件，对于广大农村和较小企业、事业单位的电工来讲，更为突出。所以，本书给出的一些工具或设备，不只是局限于冠以“电工”的工具。

本书主要由邱利军（北京电子科技职业学院）、赵文锐和晁晓圆编著，其中第一章由王建民、王洪权编著，第二章由赵亚君、王二菊编著，第三章由付红、温淑霞编著，第四章由王琰、曾平编著，第五章由王一龙、颜勇军、沙玉海、马冬梅编著，第六章由段梦、邱家栋编著，第七章由赵文锐编著，第八、九章由林惠莉、邱利军编著，第十章由晁晓圆编著。在此向相关工作人员表示衷心的感谢。

由于作者技术水平有限和时间仓促，书中内容可能有不妥甚至错误之处，恳请广大读者批评指正。

作者  
2013年5月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 电工基础</b>	1
第一节 电路的基本概念和基本定律	1
一、电路和电路模型	1
二、电流、电压及其参考方向	3
三、电功率和电能	7
四、电阻元件和欧姆定律	8
第二节 直流电阻电路的分析计算	9
一、电阻的串联和并联	9
二、电阻的混联	15
第三节 单相正弦交流电路	16
一、正弦交流电的基本概念	16
二、相位和相位差	21
三、正弦量的相量表示法	23
四、单一参数电路元件的交流电路	25
五、电阻、电感、电容串联电路	32
六、电路的串联谐振	36
第四节 三相交流电路	38
一、三相交流电源	38
二、负载的星形联结	40
三、负载的三角形联结	43
四、三相电路的功率	45
<b>第二章 电工测量</b>	46
第一节 常用电工仪表	46
一、电流表	46
二、电压表	48
三、钳形电流表	49
四、万用表	52

---

五、绝缘电阻表 .....	58
第二节 电能表的接线及读表 .....	65
一、分类和选择原则 .....	65
二、低压单相交流电能表的直接接线方法 .....	66
三、通过电流互感器与电源相接的单相低压电能表接线方法 .....	67
四、三相三线制低压电能表直接接线方法 .....	68
五、三相三线制低压电能表接电流互感器时的接线方法 .....	69
六、三相四线制供电时低压电能表直接接线方法 .....	70
七、电能表的选用 .....	70
八、电能表的安装技术要求 .....	70
九、电能表的读数 .....	71
十、使用互感器注意事项 .....	72
<b>第三章 电工常用工具及电动工具 .....</b>	<b>73</b>
第一节 电工常用工具 .....	73
一、通用工具 .....	73
二、登高用具 .....	78
三、常用防护用具 .....	80
四、常用专用工具 .....	80
第二节 电钻 .....	82
一、电钻的基本结构 .....	82
二、电钻的性能 .....	83
三、电钻的使用方法 .....	83
第三节 导线的连接 .....	84
一、导线绝缘层的剖削 .....	84
二、导线的连接 .....	87
三、导线绝缘层的恢复 .....	91
四、导线与接线端的连接 .....	92
<b>第四章 低压照明装置 .....</b>	<b>97</b>
第一节 电气照明 .....	97
一、电气照明的方式与种类 .....	97
二、照明光源的选择 .....	99
三、灯具的选择照度标准 .....	102
第二节 常用照明配电箱及照明灯具 .....	104
一、常用照明配电方式 .....	104

---

二、照明配电箱的安装 .....	105
三、照明灯具的安装要求 .....	106
四、照明灯具、开关、插座的安装 .....	107
第三节 照明装置 .....	112
一、照明装置的一般运行要求 .....	112
二、照明装置的安全检查 .....	113
三、照明装置的巡视检查周期 .....	114
四、照明装置常见故障和处理 .....	115
<b>第五章 低压电器 .....</b>	<b>118</b>
第一节 常用低压控制电器和保护电器 .....	118
一、常用低压手动开关电器 .....	118
二、常用低压断路器 .....	122
三、剩余电流保护装置 .....	123
四、交流接触器 .....	125
五、主令电器 .....	130
六、低压熔断器 .....	133
七、热继电器 .....	137
第二节 低压成套配电装置 .....	140
一、配电箱 .....	140
二、低压配电装置 .....	143
<b>第六章 电动机与电动机拖动 .....</b>	<b>146</b>
第一节 异步电动机概述 .....	146
一、电动机的分类 .....	146
二、三相异步电动机的基本结构 .....	146
第二节 三相异步电动机的工作原理 .....	148
一、旋转磁场 .....	148
二、工作原理 .....	149
三、转向和转速 .....	149
四、电动机的机械特性 .....	150
第三节 三相异步电动机的使用 .....	151
一、电动机的主要技术参数 .....	151
二、电动机绕组的联结 .....	154
三、电动机的起动 .....	154
四、电动机的调速 .....	161

---

五、电动机的制动 .....	163
六、电动机的保护 .....	165
第四节 三相异步电动机常用控制电路 .....	166
一、具有自锁的正转控制电路 .....	166
二、具有过载保护的正转控制电路 .....	167
三、点动与连续运行控制电路 .....	168
四、接触器联锁的正反转控制电路 .....	168
五、按钮联锁的正反转控制电路 .....	169
六、按钮、接触器复合联锁的正反转控制电路 .....	170
七、自动往返控制电路 .....	171
八、接触器控制的手动Y-△减压起动电路 .....	172
第五节 直流电动机 .....	173
一、直流电动机的构造 .....	173
二、直流电动机的工作原理 .....	176
三、直流电动机的励磁 .....	176
<b>第七章 电气线路 .....</b>	<b>179</b>
第一节 架空线路 .....	179
一、架空线路的敷设 .....	179
二、架空线路的维护 .....	190
第二节 电缆线路 .....	193
一、电缆线路的结构 .....	194
二、电缆线路的敷设 .....	197
第三节 室内配线 .....	200
一、室内配线的基本知识 .....	200
二、常用配线方式 .....	201
<b>第八章 临时用电 .....</b>	<b>204</b>
第一节 临时用电的安全要求 .....	204
一、施工现场临时用电要求 .....	204
二、临时架空线的安全措施 .....	205
三、配电箱、开关箱的安全措施 .....	206
四、现场照明的安全措施 .....	207
五、临时用电的接地、接零及防雷保护 .....	207
六、各类临时用电人员的要求 .....	208
第二节 临时用电技术防护措施和管理 .....	208

---

一、临时用电技术防护措施 .....	208
二、施工现场临时用电设施的管理 .....	210
三、漏电保护器的管理 .....	210
第三节 手持式电动工具 .....	211
一、电动工具的分类及特点 .....	211
二、使用手持及移动式电动工具的安全技术要求 .....	212
三、移动式电气设备使用安全要求 .....	212
四、手携式和移动式电气设备的接地 .....	212
<b>第九章 电力电容器 .....</b>	<b>214</b>
第一节 电力电容器在电力系统中的作用 .....	214
一、电力电容器的作用 .....	214
二、电容补偿的原理 .....	214
三、补偿的基本原则 .....	216
四、电容补偿的方式 .....	216
第二节 电力电容器的结构与主要参数 .....	220
一、电力电容器的结构 .....	220
二、电力电容器的型号 .....	220
三、电力电容器的技术参数 .....	220
第三节 电容器的安装运行与维护 .....	221
一、电容器的放电装置 .....	221
二、电容器的安装要求 .....	221
三、电容器的运行规定 .....	222
<b>第十章 安全用电、防雷、防火 .....</b>	<b>223</b>
第一节 电流对人体的危害与触电事故 .....	223
一、电流对人体的伤害 .....	223
二、对人体作用电流的划分 .....	225
三、影响触电伤害程度的因素 .....	226
四、常见的触电方式 .....	227
五、触电事故的发生规律及一般原因 .....	228
六、触电急救 .....	229
第二节 电力系统接地 .....	233
一、接地保护 .....	233
二、接零保护 .....	237
三、重复接地 .....	243

---

四、人工接地体的埋设要求和接地线的要求 .....	243
五、接地装置的选择 .....	244
六、接地装置的安装 .....	247
第三节 防雷和防静电 .....	251
一、雷电的种类及危害 .....	251
二、防雷技术 .....	252
三、防静电 .....	254
第四节 电气火灾消防基本操作 .....	261
一、发生电气火灾的原因 .....	261
二、预防电气火灾的发生 .....	262
三、电气消防常识 .....	263
四、灭火器的使用 .....	264
参考文献 .....	267



# 第一章 电工基础

## 第一节 电路的基本概念和基本定律

### 一、电路和电路模型

#### 1. 电路

电路是电流的流通路径，它是由一些电气设备和元器件按一定方式连接而成的。这里给电路下一个定义，电路 (electric circuit) 是各种电路元件和设备按一定方式连接起来为人们生产、生活完成某种功能的整体，或通俗地说，是提供电流流通路径的“路”。任何实际电路必须包含电源 (electric source)、负载 (load) 和中间环节，如图 1-1 所示。

电源是将非电能转换成电能的装置。例如，干电池和蓄电池将化学能转换成电能，而发电机将热能、水能、风能、原子能等转换成电能。电源是电路中能量的来源，是推动电流运动的源泉，在它的内部进行着由非电能到电能的转换。

负载是将电能转换成非电能的装置。例如，电炉将电能转换成热能，电灯将电能转换成光能，电动机将电能转换成机械能等。负载是电路中的受电器，是取用电能的装置，在它的内部进行着由电能到非电能的转换。

中间环节是把电源与负载连接起来的部分，起传递和控制电能的作用，常用于电力及一般用电系统中的电路称为电力电路，它主要起电能的传输、转换和分配的作用。电力系统电路就是一个典型的例子：发电机组将其他形式的能量转换成电能，经变压器、输电线传输到各用电部门，在那里又把电能转换成光能、热能、机械能等其他形式的能量而加以利用。对于这一类电路，一般要求在传输和转换过程中尽可能地减少

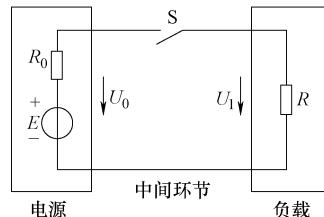


图 1-1 最简单的电路

能量损耗以提高效率。

电路按其功能可分为两大类：第一类是能量的产生、传输、分配电路，其典型例子是电力系统的输电线路。在电力电路中，发电厂将各种不同形式的能量（热能、水的势能、核能、光能等）转变成电能；负载将电能转变为机械能或光能或热能等；中间环节（如变压器、高低压输电线路、继电保护）起控制、传输和分配电能以及保护电路中的电器设备的作用。

第二类是信息的传递与处理电路，在这一类电路中，起电源作用的常称信号源（signal source），又称激励（excitation）；起负载作用的是各种终端设备（如计算机的打印机、收音机的扬声器、电话系统的电话机等），在这类电路中，传递的是各种信息，而不特别强调传输系统中的能量大小，信息的传递与处理电路的输出信号又称响应（response），它的能量只要能够满足负载设备的正常工作即可，这一类电路的中间环节由电子设备组成，是相当复杂的，主要起信号的处理、放大、传输和控制等作用。

先看一个例子：图 1-2 所示为一个大家都熟悉的手电筒的实际电路结构示意图，图中，电池是产生电能的元件（设备），它将化学能转变成电能，即电源；小灯泡是消耗电能的电路元件，它将电能转变成光能，即负载；开关是控制元件，控制电路的接通与断开；导线起传输电能的作用。

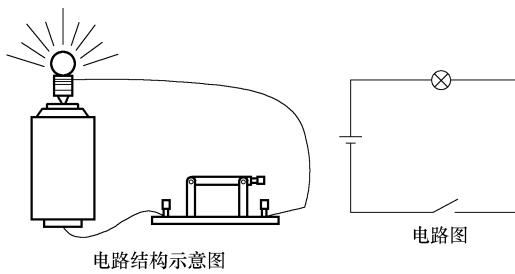


图 1-2 手电筒的示意图

## 2. 电路模型

实际电路可以用一个或若干个理想电路元件经理想导体连接起来模拟，这便构成了电路模型。

图 1-3 是一个最简单的电路模型（也是图 1-1 的电路模型）。图中  $U_s$  是一个理想电压源，给电路提供电能； $R$  是理想电阻元件，只消耗电能； $S$  是开关元件，控制电路的接通与断开；连接这三个元件的细实线是理想导线，起传输电能的作用。

实际的电路元件在工作时的电磁性质是比较复杂的，不是单一的。例如白炽灯、电阻炉，它在通电工作时能把电能转换成光能或热能，消耗电能，具有电阻的性质，但其电压和电流还会产生电场和磁场，故也具有储存电场能量和磁场能量即电容和电感的性质。

在电路的分析和计算中，如果对一个元件要考虑所有的电磁性质，则将是十分困难的。为此，对于组成实际电路的各种元件，我们忽略其次要因素，只抓住其主要电磁特性，使之理想化。例如，白炽灯可用只具有消耗电能的性质，而没有电场和磁场特性的理想电阻元件来近似表征；一个电感线圈可用只具有储存磁场能量性能，没有电阻及电容特性的理想电感元件来表征。这种由一个或几个具有单一电磁特性的理想电路元件所组成的电路就是实际电路的电路模型，我们在进行理论分析时所指的电路就是这种电路模型。根据对电路模型的分析所得出的结论有着广泛而实际的指导意义。理想电路元件简称电路元件，通常包括电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源和理想电流源。前三种元件均不产生能量，称为无源元件；后两种元件是电路中提供能量的元件，称为有源元件。

## 二、电流、电压及其参考方向

### 1. 电流及其参考方向

#### (1) 电流

水分子的流动形成了水流，而电流则是由电子的运动形成的。电流与水流有很多相似之处。实际上电路中电子所起的作用只不过是运送电荷。电荷或带电质点有规则地定向运动，形成电流（electric current）。我们知道，在金属导体中有大量的带负电荷的自由电子，在常态下，这些自由电子在金属内部作无规则的热运动，不能形成电流。若给导体两端加上电源，即施加电场力，如图 1-4 所示，在电场力的作用下自由电

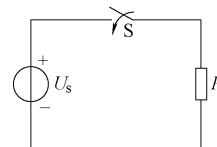


图 1-3 简单的  
电路模型

子逆电场力方向运动而形成电流，更确切地讲，这种电流称为传导电流（conduction current）。

在物理课中已经学过，电荷的定向移动形成电流（current）。电流的实际方向习惯上指正电荷运动的方向，电流的大小常用电流强度（current intensity）来表示。电流强度指单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度习惯上常简称为电流。电流主要分为两类：一类为大小和方向均不随时间改变的电流，称为恒定电流，即直流（direct current），常简写作dc或DC，其强度用符号 $I$ 表示；另一类为大小和方向都随时间变化的电流，称为变动电流，其强度用符号 $i$ 表示。其中一个周期内电流的平均值为零的变动电流称为交流（alternating current），常简写作ac或AC，其强度也用符号 $i$ 表示。

图1-5给出了几种常见电流，图a为直流，图b、图c均为交流。

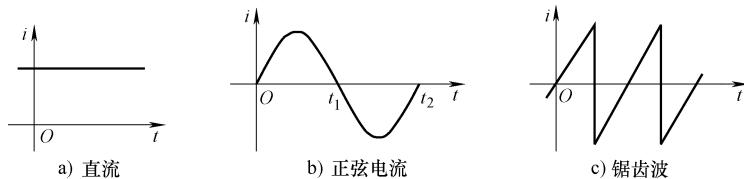


图1-5 几种电流

对于直流，单位时间内通过导体横截面的电荷量是恒定不变的，其电流为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

对于变动电流（含交流），若假设在一很小的时间间隔 $dt$ 内，通过导体横截面的电荷量为 $dq$ ，则该瞬间电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

电流的单位是安培（A），它表示1秒（s）内通过导体横截面的电荷量为1库仑（C）。有时也会用到千安（kA）、毫安（mA）或微安（ $\mu$ A）等，其关系如下：

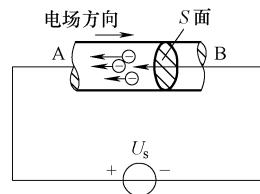


图1-4 电流的示意图

$$1\text{kA} = 1000\text{A} = 1 \times 10^3\text{A}, 1\text{mA} = 1 \times 10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A} = 1 \times 10^{-6}\text{A}$$

## (2) 电流的参考方向

在分析电路时, 对复杂电路中某一段电路里电流的实际方向很难立即判断出来, 有时电流的实际方向还会不断改变, 因此在电路中很难标明电流的实际方向。为分析方便, 在这里, 我们引入电流的“参考方向 (reference direction)”这一概念。

在一段电路或一个电路元件中事先选定一个电流方向作为电流的参考方向。本书中用虚线箭头表示电流的实际方向, 用箭头直接标在电路上表示电流的参考方向, 也可以用双下标表示, 如  $i_{ab}$  表示其参考方向由 a 指向 b。参考方向是任意选定的, 而电流的实际方向是客观存在的。因此, 所选定的电流参考方向并不一定就是电流的实际方向。当选定电流的参考方向与实际方向一致时,  $i > 0$ ; 当选定电流的参考方向与实际方向相反时,  $i < 0$ 。电流的参考方向与实际方向如图 1-6 所示。

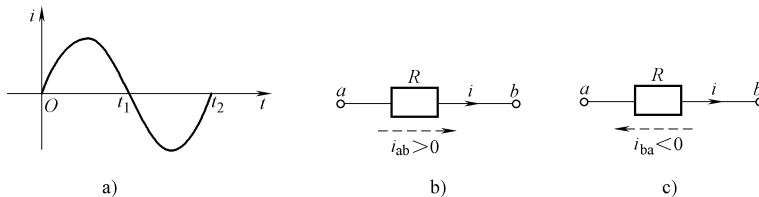


图 1-6 电流的参考方向与实际方向

电流的实际方向是客观存在的, 它不因其参考方向选择的不同而改变, 即存在  $i_{ab} = -i_{ba}$ 。本书中不加特殊说明时, 电路中的公式和定律都是建立在参考方向的基础上的。

## 2. 电压及其参考方向

### (1) 电压

电场中任意两点间的电位之差称为两点间的电压。

电压与水压相似。我们知道水压越大, 水流越急, 反之水压越小, 水流越缓, 在同样的外部条件下, 电压越高, 灯泡就越亮, 电压越低, 灯泡就越暗。

电压是衡量电场力做功大小的物理量。

电压的单位是伏特, 用字母 V 来表示。常用的单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV), 其关系如下:

$$1\text{kV} = 1 \times 10^3 \text{V} = 1 \times 10^6 \text{mV}$$

## (2) 电压的方向

电压也有正负,习惯上我们把电压的正方向规定为高电位指向低电位的方向。电压的正负是相对的。可以根据实际电路的需要进行规定。

在电路分析中,为了知道电压、电流的实际方向,常常引入参考方向的概念。电压、电流的参考方向可以任意选取,在电路中用箭头表示。选定的参考方向不一定是电压、电流的实际方向。当参考方向与实际方向相同时,电压、电流为正。当参考方向与实际方向相反时,电压、电流为负。这样在选定的参考方向下,根据电压、电流的正负,可以判断电压、电流的实际方向,在分析电路时先假定电压、电流的参考方向,并以此进行分析,最后根据计算结果的正负来确定电压、电流的实际方向。图 1-7 所示为电压的参考方向。

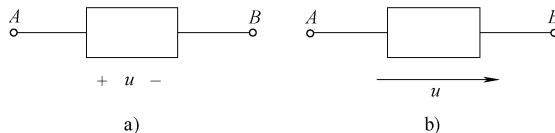


图 1-7 电压的参考方向

电压的参考方向量值和方向都不随时间变化的直流电压,用大写字母  $U$  表示。交流电压,用小写字母  $u$  表示。

元器件的电压参考方向与电流参考方向是一致的,称为关联参考方向,如图 1-8 所示。

### 3. 电位

#### (1) 电位

电位同水位有些相似,一个蓄水池中,水越多,水位越高,水越少,水位越低。电路中也有电位,电场力移动单位正电荷所做的功越多说明正电荷所在点的电位越高,反之越低。

我们知道带电体的周围存在看不见摸不着的电场,在电场中的电荷会受到电场力的作用,在电场力的作用下电荷会移动,在电路中我们把电场力将单位正电荷从某点移到参考点所做的功称为该点的电位。

电位的单位是伏特(简称伏),用字母  $V$  来表示。常用的单位还有

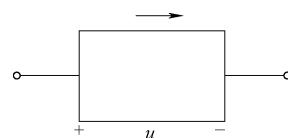


图 1-8 电流和电压的  
关联参考方向

千伏 (kV)、毫伏 (mV)。其关系如下：

$$1\text{kV} = 1 \times 10^3 \text{V} = 1 \times 10^6 \text{mV}$$

### (2) 电位的方向

电场中选择不同的参考点，某点的电位是不同的。为了方便，我们把参考点的电位规定为零，高于参考点的电位为正，反之为负。

实际用电器的金属外壳常被作为参考点。电位的正负就好比是河流的警戒水位，当水位超过警戒水位为正，低于则为负。

在电路中任选一点，叫做参考点，则某点的电位就是由该点到参考点的电压。如果已知 a、b 两点的电位各为  $U_a$ 、 $U_b$ ，则此两点间的电压

$$U_{ab} = U_{a0} + U_{0b} = U_{a0} - U_{b0} = U_a - U_b$$

可见，两点间的电压等于这两点的电位的差。

### (3) 电压与电位的关系

结论一：参考点改变，各点的电位随之改变，即各点的电位与参考点的选择有关。

结论二：不管参考点如何变化，两点间的电压（电位差）是不变的，即电位差与参考点的选择无关。

电路中，参考点可以任意选定。在电力工程中，常取大地为参考点。因此，凡是外壳接大地的电气设备，其外壳都是零电位；有些不接大地的设备，在分析其工作原理时，常常选用许多元器件汇集的公共点作为零电位点，即参考点，并在电路图中用符号“ $\perp$ ”表示；接大地则用符号“ $\equiv$ ”表示，以示区别。

## 三、电功率和电能

### 1. 功率

我们平时所说的 1000W 的微波炉、60W 的电灯泡、1500W 的空调器，这些数字指的就是这些家用电器的电功率。也就是这些电器在单位时间内消耗电能的多少（电场力在单位时间内做的功就称为电功率）。

$$P = W/t \quad (1-3)$$

电功率的大小用瓦特（简称瓦）来表示，用字母 W 来表示。表示电功率的单位还有千瓦 (kW)、兆瓦 (MW) 和毫瓦 (mW) 等。其关系如下：

$$1\text{W} = 1 \times 10^3 \text{mW}, 1\text{kW} = 1 \times 10^3 \text{W}, 1\text{MW} = 1 \times 10^3 \text{kW}$$

在纯电阻电路中，电功率与电流、电压的关系，可表述为

$$P = UI = RI^2 = U^2/R \quad (1-4)$$

我们经常提到的“一度电”是指电功率是1kW的设备使用1h所消耗的电能，又称千瓦·时(kW·h)。

如果电流、电压选用关联参考方向，则所得的P应看成支路接受的功率，计算所得功率为负值时，表示支路实际发出功率。

如果电流、电压选择非关联参考方向，P应看成支路发出的功率，即计算所得功率为正值时，表示支路实际发出功率；计算所得功率为负值时，表示支路接受功率。

根据实际，电路消耗的功率有以下几种情况：

- 1)  $P > 0$ ，说明该段电路发出功率为P；
- 2)  $P = 0$ ，说明该段电路不消耗功率；
- 3)  $P < 0$ ，说明该段电路接受功率为P。

## 2. 电能

在一段时间内，电流通过导体时，电源力所作的功，称为电能。用字母W表示，其单位是焦，用字母J表示。电能的大小跟通过用电器具气设备的电流大小及加在它们两端电压的高低和通电时间的长短成正比。用公式表示为

$$W = IUt \quad \text{或} \quad W = I^2Rt$$

式中 W——电能 (J)；

I——电流 (A)；

U——电压 (V)；

t——时间 (s)。

在电路的分析和计算中，能量和功率的计算是十分重要的。这是因为，一方面，电路在工作时总伴随有其他形式能量的相互交换；另一方面，电气设备和电路部件本身都有功率的限制，在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值，过载会使设备或部件损坏，或是不能正常工作。

## 四、电阻元件和欧姆定律

电阻元件是一个二端元件，它的电流和电压的方向总是一致的，它的电流和电压的大小成正比关系。

电流和电压的大小成比例的元件叫做线性元件，元件的电流与电压的关系曲线叫做元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性为通过坐标原点的直线，这个关系称为欧姆定律。在电流和电压的关联参考方向下，线性电阻元件的伏安特性如图1-9所示，欧姆定律的表达式为

$$U = IR \quad (1-5)$$

电阻的单位是欧姆（简称欧），符号为 $\Omega$ 。电阻的千进倍数单位有千欧（ $k\Omega$ ）、兆欧（ $M\Omega$ ）等。

线性电阻元件有两种特殊情况值得注意：一种情况是电阻值 $R$ 为无限大，电压为任何有限值时，其电流总是零，这时把它称为“开路”；另一种情况是电阻为零，电流为任何有限值时，其电压总是零，这时把它称为“短路”。

**【例 1-1】** 有 220V、100W 灯泡一个，其灯丝电阻是多少？每天用 5h，一个月（按 30 天计算）消耗的电能是多少度？

解：灯泡灯丝电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} \Omega = 484 \Omega$$

一个月消耗的电能为

$$W = Pt = 100W \times 5h \times 30 = 15000W \cdot h = 15kW \cdot h = 15 \text{ 度}$$

## 第二节 直流电阻电路的分析计算

### 一、电阻的串联和并联

#### 1. 等效网络的定义

一个二端网络的端口电压、电流关系和另一个二端网络的端口电压、电流关系相同，这两个网络叫做等效网络（见图 1-10）。

#### 2. 电阻的串联

##### (1) 电阻的串联及分压关系

在电路中，几个电阻的首尾依次相连，中间没有分支的连接方式，叫做电阻的串联。图 1-11 所示即为两个电阻的串联电路。

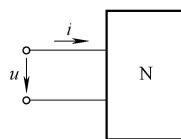
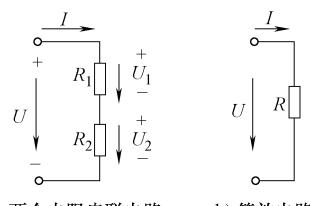


图 1-10 二端网络



a) 两个电阻串联电路 b) 等效电路

图 1-11 电阻串联电路

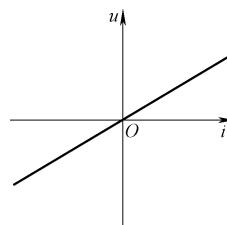


图 1-9 线性电阻元件的伏安特性曲线

串联电路的基本特征

① 在电阻串联电路中，不论各电阻的数值是否相等，通过各电阻的电流为同一电流，这是判断电阻串联的一个重要依据，即

$$I = I_1 = I_2 \quad (1-6)$$

② 根据全电路欧姆定律，串联电阻电路两端的总电压等于各电阻两端分电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 \quad (1-7)$$

上式表示串联电阻电路的总电压大于任何一个分电压。

③ 串联电阻的总电阻（等效电阻）等于各串联电阻之和，因为  $U = U_1 + U_2$ ，即  $IR = I_1 R_1 + I_2 R_2$ ，而  $I = I_1 = I_2$  所以

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表示串联电阻电路的总电阻大于任何一个分电阻。

电阻串联电路中，各电阻上的电压与它们的阻值成正比，根据欧姆定律：

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, I_2 = \frac{U_2}{R_2}, \text{且 } I = I_1 = I_2$$

$$\text{所以 } \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = I, \text{ 得 } I = \frac{U}{R_1 + R_2}, \text{ 有}$$

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \quad U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表明电阻串联时，电阻越大，分配到的电压越大，电阻越小，分配到的电压越小，这就是串联电阻电路的分压原理。通常把式 (1-9) 叫做电阻串联的分压公式。

串联电阻电路的总功率  $P$  等于消耗在各串联电阻上的功率之和，且电阻值大者消耗的功率大。

由于  $P = I^2 R = I^2 (R_1 + R_2) = I^2 R_1 + I^2 R_2$ ，所以

$$P = P_1 + P_2 \quad (1-10)$$

**【例 1-2】** 有一盏灯，额定电压  $U_1 = 40V$ ，正常工作时通过的电流  $I = 5A$ ，应该怎样把它连入  $U = 220V$  的照明电路中？

**解：**直接把灯连入照明电路是不行的，因为照明电路的电压比灯额定电压高得多，由于串联电路的总电压等于各个导体上的电压之和，因此，可以在灯上串联一个适当的电阻  $R_2$ ，分掉多余的电压，如图 1-12

所示。

$$\text{则 } U_2 = U - U_1 = 220V - 40V = 180V$$

$R_2$  与灯  $R_1$  串联, 灯正常工作时,  $R_2$  通过的电流为 5A。

$$\text{所以 } R_2 = (180 \div 5) \Omega = 36\Omega$$

**【例 1-3】** 有两台直流电动机, 电动机绕组的额定电流都是 10A, 电动机电阻为 1Ω, 电源电压为 220V, 因工作需要, 两台电动机必须同时起动。起动电流应限制在额定电流 1.5 ~ 2.5 倍。因此应加装电阻以限制起动电流。现有 5Ω、10Ω 两个电阻, 试问用哪个电阻串联?

解: 设  $R_1$ 、 $R_2$  为两台电动机电阻,  $R_3 = 5\Omega$ ,  $R_4 = 10\Omega$

先求  $R_1$ 、 $R_2$  的等效电阻  $R$ :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \times 1}{1 + 1} \Omega = 0.5\Omega$$

若直接起动电动机, 则起动电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{0.5} A = 440A$$

起动电流大大超过电动机的额定电流, 直接起动必然烧毁电动机。如果选择  $R_4$  串联限流, 其起动电流:

$$I = \frac{U}{R + R_3} = \frac{220}{0.5 + 10} A = 21A$$

此时起动电流为电动机额定电流的 1.05 倍, 可能造成起动困难。因此, 以串联 5Ω 电阻为宜, 起动后将电阻退出, 保证电动机正常运转。

$$I = \frac{U}{R + R_4} = \frac{220}{0.5 + 5} A = 40A$$

## (2) 串联电路的应用

### 1) 获得大阻值电阻

通过串联可以获得高阻值电阻, 这在电工及电子技术应用较为广泛。

### 2) 限流

在某些电路中, 通过串入电阻限制电流的大小, 保证电路正常运行。如直流电流机起动时, 为了避免较大的起动电流损坏设备, 将电阻串入起动电路, 即可限制其起动电流。

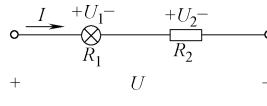


图 1-12 电路中串联电阻

## 3) 分压

电阻分压器如图 1-13 所示。在电路中,若输入电压太高时,多采用串联电阻,从恰当的连接点分出部分较低的电压供电路使用。其分压的大小,可用式(1-9)的分压公式进行计算。

## (3) 扩大电压表的量程

电压表由一只高灵敏度的电流表

(又称表头)和串联电阻构成。串联电阻越大,该电压表量程越大。

**【例 1-4】**如图 1-14 所示电流表,其内阻  $r_g = 1000\Omega$ ,量程  $I_g = 100\mu A$ ,如果要将其改装成量程为 5V 的电压表,问应串联多大的电阻  $R$ ?

解: 电流表测量的最大电压  $U_g = r_g I_g = 1000\Omega \times (100 \times 10^{-6}) A = 0.1 V$

要改装成量程为 5V 的电压表,即  $U = 5V$ ,根据分压公式:

$$U_g = \frac{r_g}{R + r_g} U$$

解得

$$R = 49000\Omega = 49k\Omega$$

所要串联的电阻为  $49k\Omega$ 。

## 3. 电阻并联电路及电流分配关系

在电路中,将若干个电阻的一端共同连在电路的一点上,把它们的另一端共同连在电路的另一点上,这种连接方式叫做电阻的并联。如图 1-15a 所示为两个电阻的并联电路,图 1-15b 所示是其等效电路。

(1) 电阻并联电路的基本特征

① 加在各并联电阻两端的电压为同一电压,即电阻两端电压相等,即

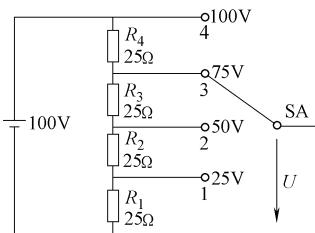


图 1-13 电阻分压器

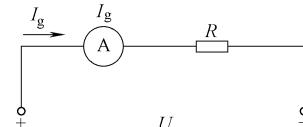


图 1-14 单量程电压表

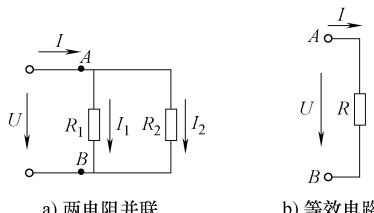


图 1-15 电阻并联电路

$$U = U_1 = U_2 \quad (1-11)$$

② 电路的总电流等于各并联电阻分电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-12)$$

如图 1-15a 所示, 由于形成电流的运动电荷不会在电路中停留, 所以流入 A 点的总电流, 始终等于从 B 点流出的电流 (即各支路电流之和)。这个结论可以用电流表测量总电流和各支路电流的大小予以验证。式 (1-12) 说明并联电路的总电流大于任何一个分电流。

③ 电路的总电阻 (等效电阻)  $R$  的倒数等于各电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表示并联电路的总电阻比任何一个并联电阻的阻值都小。

式 (1-13) 可根据欧姆定律求出:

因为

$$I = I_1 + I_2$$

所以

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

通常记为

$$R = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-14)$$

流过各并联电阻上的电流与其阻值成反比。根据欧姆定律, 有  $U_1 = R_1 I_1$ ,  $U_2 = R_2 I_2$ ,

又  $U_1 = U_2 = U$ , 所以  $R_1 I_1 = R_2 I_2 = RI$ , 有

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I \\ I_2 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I \end{aligned} \quad (1-15)$$

上式表明电阻并联时, 阻值越大的电阻分配到的电流越小, 阻值越小的电阻分配到的电流越大, 这就是并联电阻电路的分流原理。通常把式 (1-15) 叫做电阻并联的分流公式。

并联电阻电路的总功率  $P$  等于消耗在各并联电阻上的功率之和, 且电阻值大者消耗的功率小。

$$\begin{aligned}
 \text{由于} \quad P &= IU = (I_1 + I_2)U \\
 \text{又} \quad U_1 &= U_2 = U \\
 \text{所以} \quad P &= P_1 + P_2
 \end{aligned} \tag{1-16}$$

**【例 1-5】** 如图 1-16 所示, 电路中电压为 220V, 每根输电导线的电阻  $R_1 = 1\Omega$ , 电路中并联了 10 盏 220V、40W 的电灯。求 10 盏灯都打开时, 每盏灯的电压和功率。

$$\begin{aligned}
 \text{解: 每盏灯的电阻 } R &= \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1210\Omega \\
 \frac{220^2}{40} \Omega &= 1210\Omega
 \end{aligned}$$

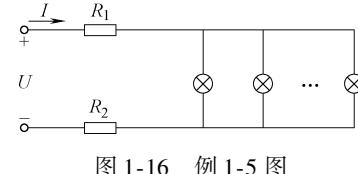


图 1-16 例 1-5 图

$$10 \text{ 盏灯的并联的电阻 } R_{\text{并}} = R \div 10 = 121\Omega$$

$$\text{电路中的总电阻 } R_{\text{总}} = R_{\text{并}} + 2R_1 = (121 + 2)\Omega = 123\Omega$$

$$\text{电路中的总电流 } I = U/R_{\text{总}} = (220/123)A \approx 1.8A$$

$$\text{输电导线上的总电压 } U_r = 2R_1I = (2 \times 1 \times 1.8)V = 3.6V$$

$$\text{电灯上的电压 } U_L = U - U_r = (220 - 3.6)V \approx 216V$$

$$\text{每盏灯的功率 } P = \frac{U_L^2}{R} = \frac{216^2}{1210}W \approx 39W$$

## (2) 并联电路的应用

### 1) 获得小阻值电阻

在电器维修中, 如果一时没有小阻值电阻时, 可通过电阻并联获得。

### 2) 增大电路电流和功率

在某些电流和功率要求较大的电路中, 可通过电阻的串、并联组合, 增大电阻所承受的电流和功率。

### 3) 分流

利用并联电路分流作用, 可在某支路上获得电流, 所需电流可通过分流公式计算。

### 4) 扩大电流表的量程

如前所述, 电流表表头是一只高灵敏度的电流表, 它的满刻度电流多在微安级, 要用它测量较大电流, 必须给它并联阻值很小的分流电阻, 使测量电路的大部分电流从分流电阻通过, 只有很小的电流通过表

头，即可实现扩大电流表量程。

**【例 1-6】** 有一微安表如图 1-17 所示，电阻  $r_g = 1000\Omega$ ，满偏电流  $I_g = 100\mu A$ ，现要改装成量程为 1A 的电流表，应并联多大的分流电阻  $R$ ？

解：流过分流电阻的电流

$$I_R = I - I_g = (1 - 0.0001) A = 0.9999 A$$

分流电阻两端电压

$$U_R = U_g = I_g r_g = (0.0001 \times 1000) V = 0.1 V$$

根据欧姆定律，分流电阻为

$$R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{0.1}{0.9999} \Omega \approx 0.1 \Omega$$

即应并联  $0.1\Omega$  的分流电阻。

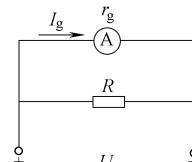


图 1-17 单量程  
电流表

## 二、电阻的混联

在一个电路中，既有电阻的串联，又有电阻的并联，这类电路称为混联电路。如图 1-18a 中， $R_1$  与  $R_2$  的串联，然后它们和  $R_3$  并联，图 1-18b 中  $R_3$  和  $R_4$  并联后又与  $R_1$ 、 $R_2$  串联，形成再串联，两者都是混联电路。

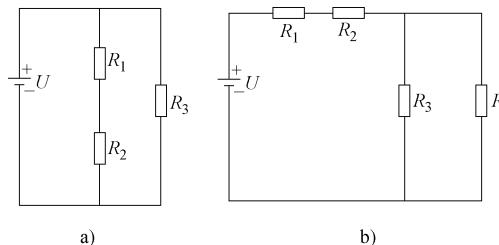


图 1-18 电阻的混联

我们在实际工作中，会遇到种类繁多，连接方式各异的混联电路。但只要我们能熟练地掌握串联和并联的分析方法，就可以依次进行等效简化，最后得解。

在计算混联电路时，常常先求出并联部分的等效电阻，把一个混联电路简化成一个较简单的串联电路，然后再进行计算。

**【例 1-7】** 如图 1-19a 所示的混联电路， $R_1 = 10\Omega$ ， $R_2 = 5\Omega$ ， $R_3 = 2\Omega$ ， $R_4 = 3\Omega$ ，电压  $U = 125V$ ，试求电流  $I_1$ 。

解：1) 如图 1-19b 所示的  $R_3$ 、 $R_4$  串联： $R_{34} = R_3 + R_4 = 2\Omega + 3\Omega = 5\Omega$

$$3\Omega = 5\Omega$$

2) 如图 1-19c 所示的  $R_2$  与  $R_{34}$  并联, 等效为  $R_{234} = R_2 R_{34} / (R_2 + R_{34}) = 2.5\Omega$

3) 如图 1-19d 所示的总电阻  $R$  可看成时  $R_1$  与  $R_{234}$  的串联:  $R = R_1 + R_{234} = (10 + 2.5)\Omega = 12.5\Omega$

4) 如图 1-19d 所示的电流:  $I_1 = U/R = (125/12.5)A = 10A$

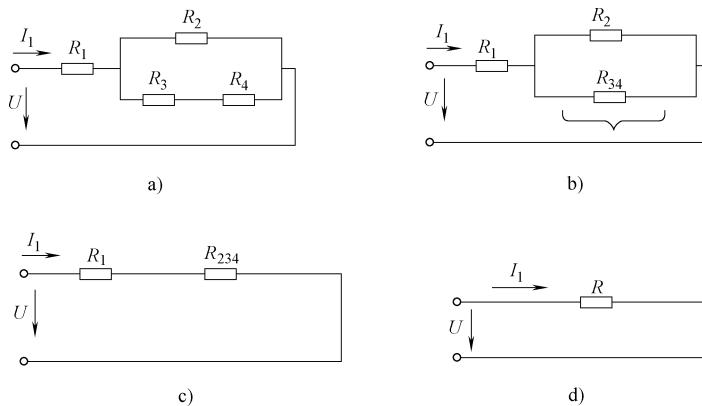


图 1-19 混联电路

### 第三节 单相正弦交流电路

#### 一、正弦交流电的基本概念

##### 1. 交流电

电流有交流电流和直流电流之分, 电压和电动势也有交流和直流之分, 如图 1-20 所示。电力输电线 90% 以上传输的都是交流电, 现在的电力照明和工厂动力用电很少使用直流电。我们日常生活中的电灯、电风扇、洗衣机等家用电器使用的也都是交流电。

在工程上常把大小和方向随时间作周期性变化, 并且在一个周期内平均值为零的电压、电流或电动势统称为交流电。交流电的类型有: 通过发电机直接产生的正弦交流电、通过波形变换得到的交流三角波、交流方波, 此外, 还有其他一些满足大小和方向随时间作周期性变化并且在一个周期内有正负变化的任意交流电。图 1-20 所示为直流电与交流电的波形。

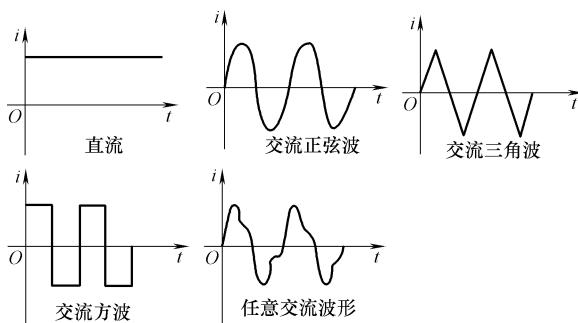


图 1-20 直流电与交流电的波形

需要指出的是，很多电流、电压、电动势也做周期性的交替变化，但它们在一个周期内的平均值不为零。比如，大小始终大于零的交流电压，它实际上是交流电压和直流电压进行叠加的结果，这样的电压我们通常叫做叠加交流电压。该电压不是纯正的交流电压，就像这样的含直流成分的电量不能称为交流电。

## 2. 正弦交流电

交流三角波、交流方波都有自己的变化规律。正弦交流电指的是电压、电流或电动势的变化规律符合正弦函数变化的一种交流电。

数学中的三角函数，正弦函数的基本表达式是  $y = \sin x$ ， $x$  是自变量， $y$  是因变量，即因变量  $y$  的大小随着自变量  $x$  的变化而变化，这是数学公式对于量值大小变化的一种规律性描述。对于电压、电流或电动势，它们都是随着时间作周期性变化的，其变化过程类似于正弦函数的变化规律，即这种变化规律和三角函数中的正弦函数相吻合，如图1-21 b 所示。而交流电压、交流电流或交流电动势的大小和方向都是随时间

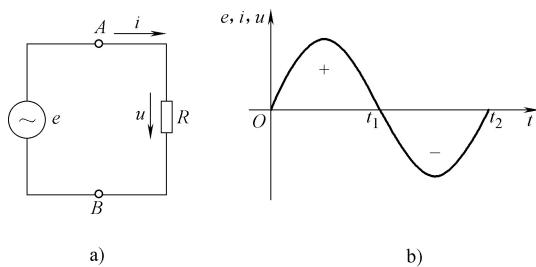


图 1-21 正弦交流电波形

变化的，所以自变量是时间，常用角速度与时间结合的参量“ $\omega t$ ”来表示；因变量自然是电压、电流或者电动势。

从数学角度上讲，波形中任意时刻的数值所对应的方向是该点的切线方向，即在每一时刻，不同数值的变化的趋向是不同的。但是对于交流电来说，有时说明量值的正负就足够了，因为这样就能够表示出电流是从导线的哪端流进，哪端流出的。所以用正弦交流电的正负，来表示正弦交流电的方向。如图 1-21b 所示为正弦交流电波形。

### 3. 单相正弦交流电动势的产生

正弦交流电的电压和电流是正弦交流电动势通过负载后表现出来的电参量。所以，讨论正弦交流电的产生，根源是讨论正弦交流电动势是如何产生的。

交流发电机的磁极是按照一定形状制作的，它的形状保证发电机磁极的磁感应强度  $B$  在转子铁心表面按正弦规律分布，如图 1-22 所示。图中  $aa'$  代表发电机磁场的中性面。中性面正好处于 N 极和 S 极的中间，所以通过中性面的磁感应强度为零。 $\alpha$  角是线圈的一边和转轴  $O$  所组成的平面与中性面的夹角。于是，转子铁心表面（线圈旋转时所经过的各位置）的磁感应强度可以表示为

$$B = B_m \sin \alpha$$

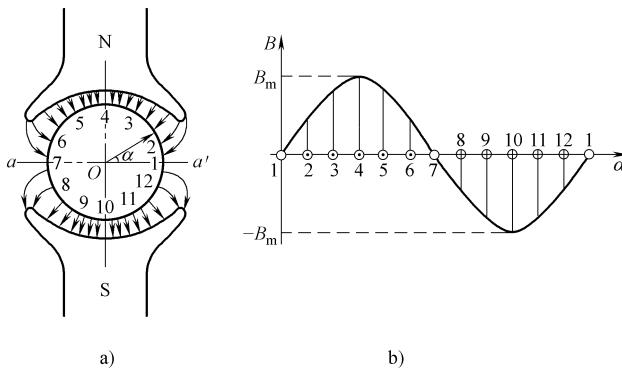


图 1-22 正弦交流电动势的产生

这是因为：在“1”的位置上 ( $\alpha=0$ ) 磁感应强度  $B=0$ ；在“4”的位置上 ( $\alpha=90^\circ$ ) 磁感应强度达到正的最大值  $B=B_m$ ；在“7”的位置上

( $\alpha = 180^\circ$ ) 磁感应强度为零；在“10”的位置上 ( $\alpha = 270^\circ$ ) 磁感应强度达到负的最大值  $B = -B_m$ 。随着线圈转子的继续旋转，转过一圈后又回到1 ( $\alpha = 0^\circ$ ) 的位置。可见对于线圈表面的导线，在连续转过不同的角度时（“ $\alpha$ ”称为相位角或简称相位），线圈转过的“ $\alpha$ ”角度不同，受到的磁感应强度的大小相应地就不同，其数值按照正弦规律分布。

根据电磁感应定律，在匀强磁场中，与磁场垂直并以匀速运动的定长为  $L$  的金属导线，会产生恒定的感应电动势，其大小为  $E$ 。若匀强磁场的磁感应强度为  $B_e$ ，则  $E = B_e LV$ 。对于交流发电机，当转子带着线圈以相同的转速旋转时，转速“ $V$ ”就成为一个定值；对于同一组线圈而言，线圈的有效作用长度“ $L$ ”也是一个定值；则产生的感应电动势的大小就取决于按正弦规律变化的磁感应强度  $B$ ，由于  $B = B_m \sin \alpha$ ，所以产生的瞬时电动势  $e$  的表达式就可以写成：

$$e = BLV = E_m \sin \alpha$$

当线圈绕组旋转的角速度为  $\omega$  时，相位  $\alpha$  随时间按照  $\omega t$  的规律变化， $\omega t$  为电动势  $e$  在  $t$  时刻的电角度。于是，产生的交流电动势就可以表示为

$$e = E_m \sin \omega t$$

简单地说，正弦交流电是匀速旋转的定长线圈在正弦变化的磁场中，周期性地切割磁力线所产生的。

#### 4. 正弦交流电的周期、频率、周期和频率的关系

##### (1) 正弦交流电的周期

当正弦交流电的电压或电流从某一数值的大小开始变化，经过一组完整的正负值后，我们就说，它完成了一个周期。如图 1-23 所示，比如一个交流电流从零开始，先朝一个方向上升到极大值，再下降到零值，然后向相反的方向升高到极大值，又降低到零值。这样的变化就完成了交流电流的一个周期，并且如果是持续的交流电，以后

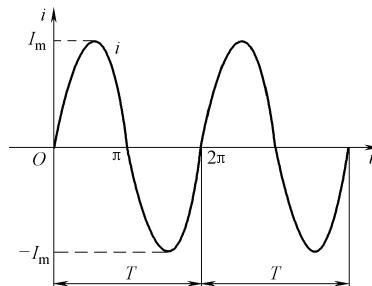


图 1-23 正弦交流电的周期

的波形都按照此周期重复变化。交流电压也是先朝着一个极性升高到极大值，然后再下降到零值，然后再朝相反极性升高到极大值，又降到零值，完成电压的一个变化周期。总之，无论是正弦交流电压还是正弦交流电流，每完成一组正负值就是一个周期。

为了描述不同的正弦交流电变化一个循环所用时间上的差别，我们把正弦交流电完成一个正负值的完整循环所用的时间称为一个周期。周期用大写字母“ $T$ ”表示，时间的国际单位是秒（s），所以周期的国际单位（基本单位）也是秒（s）。

## （2）正弦交流电的频率、周期和频率的关系

正弦交流电压和正弦交流电流的频率取决于正弦交流电动势的频率。当发电机的转子线圈旋转  $360^\circ$ （完整的一周）时，产生的电动势就完成了一个周期。

如果线圈以  $60\text{r/s}$  的转速旋转，产生的电压每秒钟将完成 60 个周期。我们就说该电压的频率是  $60\text{Hz}$ 。“赫兹”一词是为了纪念无线电波的发明者德国的物理学家赫里克·赫兹，而用作频率的单位的。简言之，正弦交流电的频率是指正弦交流电在  $1\text{s}$  内所完成的周期数。频率常用小写字母“ $f$ ”表示，频率的单位是赫兹，其符号用“ $\text{Hz}$ ”表示。

可见，正弦交流电的周期是完成一个正负值的完整循环所用的时间；而正弦交流电的频率是  $1\text{s}$  内所完成的周期数。如果以一个频率为  $50\text{Hz}$  的正弦交流电流为例进行说明，该电流  $1\text{s}$  变化 50 个周期，那么变化一个周期所用的时间就是  $1/50\text{s}$ ，所以周期和频率是倒数的关系。其关系为

$$T = \frac{1}{f}$$

我国工业和民用电的频率是  $50\text{Hz}$ ，称为标准工业频率或称工频。

## 5. 正弦交流电的角频率

正弦交流电变化一个循环所转过的角度和正弦函数变化一个周期在角度上的变化是完全一致的，都是  $360^\circ$ 。这是因为正弦交流电动势是发电机转子线圈的旋转产生的，电动势变化一个循环，线圈在空间上刚好转过了  $360^\circ$ 。正弦交流电变化的快慢，也就是前面讲过的“频率”，实际上正取决于线圈转动的快慢。对于作圆周运动的物体，其变化的快慢经常用单位时间内变化的空间角度来表示，即角频率。

角频率常用希腊字母“ $\omega$ ”表示，单位是“弧度/秒 (rad/s)”。 “弧度”是除“度”以外的表示空间角度的另外一种方式。空间  $360^\circ$  所对应的弧度是  $2\pi$ 。由于线圈在磁极下旋转一圈所需的时间是周期  $T$ ，同时经历的角度是  $2\pi$  ( $360^\circ$ )，所以单位时间内所转过的电角度，即角频率是  $\omega = 2\pi/T$ ，又因为  $T = 1/f$ ，所以角频率和频率之间的关系是  $\omega = 2\pi f$ 。

在讨论正弦量的变化规律时会经常用到角频率，比如必要时需要通过正弦交流电的解析式来分析正弦量瞬时值的变化；而频率一般直接用来区别各交流信号变化的快慢。

## 二、相位和相位差

### 1. 相位

如果周期电压和周期电流的大小和方向都随时间变化，且在一个周期内的平均值为零，则称其为交流电压和交流电流。随时间按正弦规律变化的电压和电流称为正弦电压和正弦电流，也称正弦量。正弦电流的数学表达式为

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$$

式中的三个常数  $I_m$ 、 $\omega$ 、 $\phi_i$  称为正弦量的三要素。

$I_m$  为正弦电流的振幅，它是正弦电流在整个变化过程中所能达到的最大值。 $\omega$  称为正弦电流  $i$  的角频率，正弦量随时间变化的核心部分是  $(\omega t + \phi_i)$ ，它反映了正弦量的变化进程，称为正弦量的相角或相位， $\omega$  就是相角随时间变化的速度，单位是 rad/s，它是反映正弦量变化快慢的要素，与正弦量的周期  $T$  和频率  $f$  有如下关系：

$$\omega = 2\pi/T$$

又因为  $T = 1/f$ ，所以角频率和频率之间的关系是  $\omega = 2\pi f$ 。

$\phi_i$  称为正弦电流  $i$  的初相角 (初相)，它是正弦量  $t = 0$  时刻的相位角，它的大小与计时起点的选择有关。初相角  $\phi_i$  在工程上用角度来度量，一般总是取小于或等于  $\pi$  的数值。我们以正弦交流电过零变正的时刻为一个周期的波形起始点，如在  $t = 0$  时，正弦交流电正好处于波形起始点，则认为初相角  $\phi_i = 0$ ；如正弦交流电在  $t = 0$  之前已经到达波形起始点，则认为  $\phi_i > 0$ ；如正弦交流电在  $t = 0$  之后才到达波形起始点，则认为  $\phi_i < 0$ 。用正弦交流电的三要素能完全地表征正弦交流电在任何瞬间的数值——瞬时值。图 1-24 所示为正弦电流的瞬时值波形。

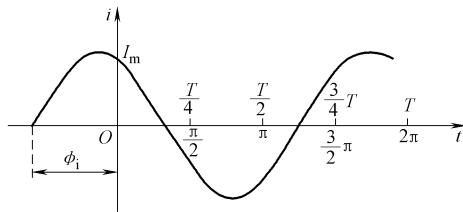


图 1-24 正弦电流的瞬时值波形

电压或电流瞬时值常用小写字母  $u(t)$  或  $i(t)$  来表示。

## 2. 相位差

在正弦电流电路的分析中，经常要比较同频率正弦量的相位差。设任意两个同频率的正弦量

$$i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) \quad (1-17)$$

$$i_2(t) = I_{2m} \sin(\omega t + \phi_2) \quad (1-18)$$

它们之间的相位之差称为相位差，用  $\phi$  表示，即

$$\phi = (\omega t + \phi_1) - (\omega t + \phi_2) = \phi_1 - \phi_2 \quad (1-19)$$

如图 1-25 所示，若  $\phi > 0$ ，表明  $i_1$  超前  $i_2$ ，称  $i_1$  超前  $i_2$  一个相位角  $\phi$ ，或者说  $i_2$  滞后  $i_1$  一个相位角  $\phi$ 。

若  $\phi = 0$ ，表明  $i_1$  与  $i_2$  同时达到最大值，则它们是同相位的，简称同相。

若  $\phi = \pm 180^\circ$ ，则称它们的相位相反，简称反相。

若  $\phi < 0$ ，表明  $i_1$  滞后  $i_2$  一个相位角  $\phi$ 。

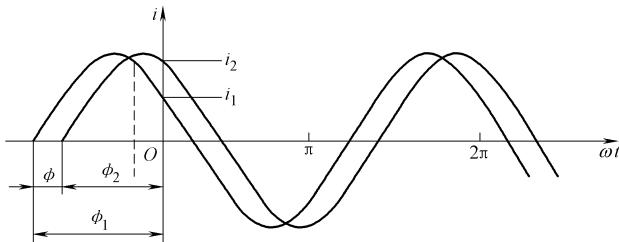


图 1-25 两个同频率正弦量之间的相位差

两个同频率的正弦量，可能相位和初相角不同，但它们之间的相位差不变。在研究多个同频率正弦量之间的关系时，可以选取其中某一正

弦量作为参考正弦量，令其初相为零，其他各正弦量的初相即为该正弦量与参考正弦量的相位差。

### 三、正弦量的相量表示法

#### 1. 解析式

解析式表示法是对正弦交流电进行理论分析常用的方法。因为正弦交流电符合正弦函数的变化规律，其每一时刻的数值的大小和方向都可以通过把不同的时间  $t$ ，带到解析式进行求解的方法得到准确的量值。因此，科学分析和精确计算会采用这种方法。

用解析式表示正弦量必须明确表示的正弦交流电的三个要素：幅值、角频率和初相位。把相应的数值填写到正弦量的一般表达式中。以交流电流 (A) 为例，其通式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

式中  $I_m$ ——正弦交流电流的幅值；

$\omega$ ——正弦交流电流的角频率；

$\phi$ ——正弦交流电流的初相位。

假设知道正弦交流电的幅值是 5A，角频率是 314rad/s，初相位是  $60^\circ$ ，则这个正弦交流电流量就唯一确定了，可以用解析式表示为  $i = 5 \times \sin(314t + 60^\circ)$ 。

交流电动势、电压、电流的解析式表达式分别如下：

$$e = E_m \sin(\omega t + \phi_e)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \phi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$$

以上三式用来表示电动势、电压、电流在  $t$  时刻的瞬时值，分别为  $e$ 、 $u$ 、 $i$ 。

#### 2. 旋转矢量法

旋转矢量法是指在平面直角坐标系中绕原点作逆时针方向的旋转的矢量  $E_m$  (或  $E$ ) 表示正弦交流电的方法。如图 1-26 所示，用矢量的长度代表正弦交流电的最大值 (或有效值)，用旋转矢量与横轴正相的夹角代表正弦交流电的初相位。这样就能把正弦交流电的三要素形象地表示出来，而且可以大大简化正弦量的加减计算。但必须注意只有同频率的正弦交流电才能在同一个图上表示，才能采用旋转矢量法进行计算。

旋转相量法，是定量地分析正弦交流电的常用方法，特别是分析多

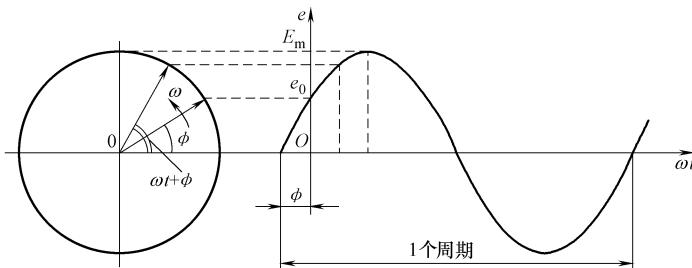


图 1-26 正弦交流电旋转矢量表示法

个正弦量的合成时，常采用正弦交流电相量叠加的方法，其前提就是用旋转的相量表示正弦交流电。该正弦量就可以表示为如图 1-27 所示。

用一段有向线段表示交流电的幅值和初相位：有向线段是用箭头表示方向的线段。当需要同时表示多个正弦量时，表示每个正弦量幅值的线段长度必须有相同的比例，幅值越大，线段越长；箭头的指向和水平轴正向构成一定的夹角，该角度表示正弦交流电的初相位，并在图中标出初相位的数值；在箭头端以外，沿圆周方向，按逆时针方向画一个圆周向的箭头，在其旁标注角频率的符号和数值。表示出了正弦交流电的三要素，就完成了对一个正弦量的相量表示。如一个正弦交流电流，其最大值是  $I_m$ ，在  $t=0$  时的相位是  $\phi_0$ ，并且以角速度  $\omega$  变化。

### 3. 波形图法

波形图表示法，是一种比较直观的描述正弦交流电变化的方法。常用来比较和区别两路或多路交流信号。

在波形图表示法中，必须把正弦交流电的三个要素都表示出来。幅值可以标在纵坐标上，频率可以转化为周期在一段完整的波形上标出，初相位可以表示在随时间变化的角度横轴上。注意：如果初相位是正值，画波形时，正弦量的零起点应该在负半轴上，然后在该位置到坐标原点标出初相位的绝对值；反之，如果初相位是负值，画波形时，正弦

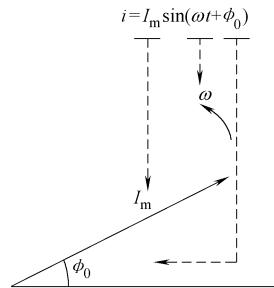


图 1-27 旋转相量表示的正弦交流电

量的零起点应该在正半轴上，同样在相应的位置标出初相位的绝对值。如果一交流电流的幅值为  $I_m$ ，周期为  $2\pi$ ，初相位为  $\phi_0$ ，则这个正弦交流电流可以用波形图表示，如图 1-28 所示。

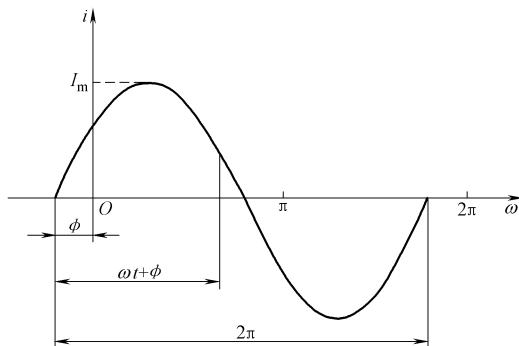


图 1-28 正弦交流电流的波形图表示法

#### 四、单一参数电路元件的交流电路

实际电路中有三种参数：电阻、电感和电容。严格来说，只包含单一参数的理想电路元件是不存在的，但当一个实际元件中只有一个参数起主要作用时，可以近似地把它看成单一参数的理想电路元件。实际电路可能比较复杂，但一般来说，除电源外，其余部分都可以用单一参数电路元件组成电路模型。本节将导出这三种基本元件电压与电流之间关系的相量形式。

##### 1. 电阻电路

###### (1) 电压电流关系

图 1-29a 是一个线性电阻元件的交流电路。电阻元件的电压电流关

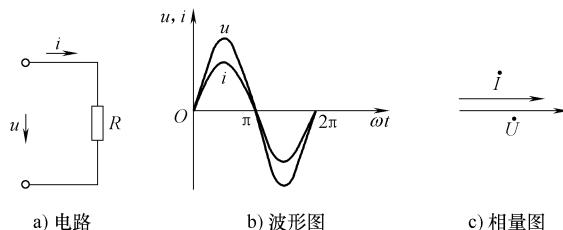


图 1-29 电阻元件的交流电路

系由欧姆定律确定，在 $u$ 、 $i$ 参考方向一致时，两者的关系为

$$u = Ri$$

设电流为参考正弦量，即

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-20)$$

则

$$u = Ri = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t \quad (1-21)$$

由式(1-20)和式(1-21)可见， $u$ 、 $i$ 为同频率的正弦量，可作出 $u$ 、 $i$ 的波形图和相量图如图1-29b、c所示。

比较式(1-20)和式(1-21)可知，电压 $u$ 和电流 $i$ 有如下大小和相位关系： $u$ 、 $i$ 的相位差 $\phi = \phi_u - \phi_i = 0$ ，即电阻元件上电压和电流同相。

$u$ 、 $i$ 的幅值关系为

$$U_m = RI_m$$

$u$ 、 $i$ 的有效值关系为

$$U = RI$$

电压电流的上述关系也可用相量形式表示。若电流相量为 $\dot{I} = I \angle \phi_i$ ，由于 $u$ 、 $i$ 同相，则 $\phi_u = \phi_i$ ，而电压有效值 $U = RI$ ，所以电压相量为

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U \angle \phi_u = RI \angle \phi_i \\ \dot{U} &= R\dot{I} \end{aligned} \quad (1-22)$$

式(1-22)就是电阻元件电压电流相量关系式。由于电阻 $R$ 为常数，式(1-22)既表明相量 $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ 的 $\phi_u = \phi_i$ ，即电压和电流同相位；又通过两边的模相等 $U = RI$ 表明了它们的有效值大小关系，体现了相量形式的欧姆定律。

## (2) 功率

电路任一瞬时所吸收的功率称为瞬时功率，用小写字母 $p$ 表示。它等于该瞬时电压 $u$ 和电流 $i$ 的乘积。电阻电路所吸收的瞬时功率为

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

由此可见，电阻从电源吸收的瞬时功率是由两部分组成的：第一部分是恒定值 $UI$ ；第二部分是幅值为 $UI$ ，并以 $2\omega$ 的角频率随时间变化的交变量 $UI\cos 2\omega t$ 。

如图 1-30 所示, 从曲线可以看出, 电阻所吸收的功率在任一瞬时总是大于等于零的, 即电阻是耗能元件。

## 2. 电感电路

### (1) 电压电流关系

电感电路如图 1-31a 所示。

在关联参考方向下, 电感元件的电压电流关系为

$$u = -e = L \frac{di}{dt}$$

若设电流  $i$  为参考正弦量, 即

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-23)$$

$$u = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1-24)$$

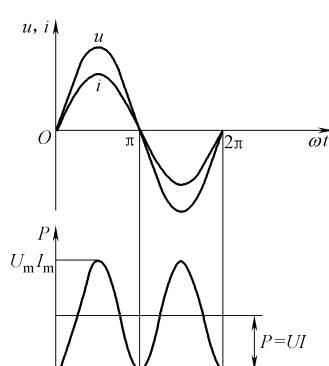


图 1-30 电阻元件的功率变化曲线

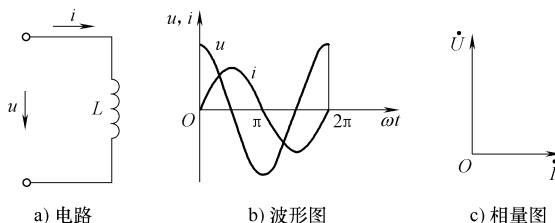


图 1-31 电感元件的交流电路

由式 (1-23)、(1-24) 可见, 电压、电流同频率, 其波形图和相量图如图 1-31b、c 所示。比较这两个式子, 可知电压  $u$  和电流  $i$  有如下大小和相位关系:

$u$ 、 $i$  的相位差为

$$\phi = \phi_u - \phi_i = 90^\circ$$

即电感元件上电流  $i$  比电压  $u$  滞后  $90^\circ$ 。

$u$ 、 $i$  的幅值关系为  $U_m = \omega L I_m$ 。

$u$ 、 $i$  的有效值关系为  $U = \omega L I = X_L I$ 。

$X_L$  称为感抗, 单位为欧姆 ( $\Omega$ ), 且  $X_L = \omega L = 2\pi f L$ 。

上式表明，同一个电感线圈其电感值为定值，它对不同频率的正弦电流体现出不同的感抗，频率越高，感抗越大。因此，电感元件对高频电流有较大的阻碍作用。在极端情况下  $f=0$ ，则  $X_L=0$ ，因此电感在直流电下相当于短路线；当  $f \rightarrow \infty$  时， $X_L \rightarrow \infty$ ，即通入交流电的频率越高，电感所呈现的感抗越大。

$u$ 、 $i$  的相量关系如下：若电流相量为  $\dot{I}=I\angle\phi_i$ ，根据前面的关系式可得电压相量为

$$\dot{U}=U\angle\phi_u=X_LI\angle(\phi_i+90^\circ)=(X_L\angle90^\circ)\times(I\angle\phi_i) \quad \dot{U}=jX_L\dot{I} \quad (1-25)$$

式 (1-25) 既表明了  $u$ 、 $i$  的相位关系，又表明了  $u$ 、 $i$  的有效值关系，是欧姆定律对电感元件的相量表示形式。

## (2) 功率

电感电路所吸收的瞬时功率为

$$p=ui=U_m\sin(\omega t+90^\circ)\times I_m\sin\omega t=UI\sin2\omega t$$

由此可见，电感从电源吸收的瞬时功率是幅值为  $UI$ 、以  $2\omega$  的角频率随时间变化的正弦量。

电感元件的功率变化曲线如图 1-32 所示。从功率曲线可以看出，曲线所包围的正、负面积相等，故平均功率（有功功率）为

$$p=\frac{1}{T}\int_0^T pdt=0$$

这就说明纯电感元件不消耗有功功率，但是电感与电源之间存在着能量交换。在第一个  $1/4$  周期内，随着电感中电流的增长，磁场建立，电感从电源中吸取能量，且此时电压、电流方向一致，所以  $p$  大于 0，这一过程电感将电能转换为磁场能；在第二个  $1/4$  周期内，电感中电流减小，磁场逐渐消失，此时电感将储存的能量释放出来反馈给电源，且电压、电流方向相反，所以  $p$  小于 0，这一过程

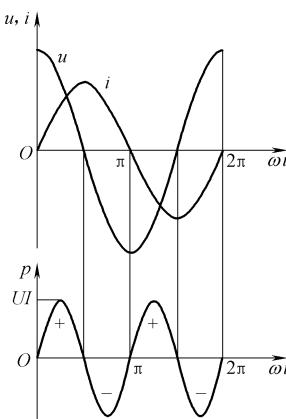


图 1-32 电感元件的功率

电感将磁场能转换为电能；

在第三个  $1/4$  周期内，电感又有一个储能过程；在第四个  $1/4$  周期内，电感又有一个放能过程。电感中的能量转换就这样交替进行，在一个周期内吸收和放出的能量相等，因而平均值为零。这一事实说明，电感不消耗能量，是一种储能元件，它在电路中起着能量的“吞吐”作用。

电感虽然不消耗功率，但与电源之间有能量的交换，电源要给电感提供电流，而实际电源的额定电流是有限的，所以电感元件对电源来说仍是一种负载，它要占用电源设备的容量。

电感与电源之间功率交换的最大值用  $Q_L$  表示，有

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L} \quad (1-26)$$

式 (1-26) 与电阻电路中的  $P = UI = RI^2 = U^2/R$  在形式上相似且有相同的量纲，但在本质上是有区别的。 $P$  是电路中消耗的功率，称为有功功率，其单位是 W；而  $Q_L$  只反映电感中能量互换的速率，不是消耗的功率，为了与有功功率区别，称之为无功功率，单位是乏 (var)。

**【例 1-8】** 已知一个电感线圈，电感  $L = 0.5\text{H}$ ，电阻可略去不计，接在  $50\text{Hz}$ 、 $220\text{V}$  的电源上，试求：①该电感的感抗  $X_L$ ；②电路中的电流  $I$  及其与电压的相位差  $\phi$ ；③电感占用的无功功率  $Q_L$ 。

解：①感抗为  $X_L = 2\pi fL = (2\pi \times 50 \times 0.5) \Omega = 157\Omega$

②选电压  $\dot{U}$  为参考相量，即  $\dot{U} = 220 \angle 0^\circ \text{V}$ ，则

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{jX_L} = \frac{220 \angle 0^\circ}{j157} \text{A} = 1.4 \angle -90^\circ \text{A}$$

即电流的有效值  $I = 1.4\text{A}$ ，相位滞后于电压  $90^\circ$ 。

③ 无功功率为

$$Q_L = I^2 X_L = (1.4^2 \times 157) \text{var} = 308 \text{var} \quad \text{或}$$

$$Q_L = UI = (220 \times 1.4) \text{var} = 308 \text{var}$$

### 3. 电容电路

#### (1) 电压电流关系

电容元件的交流电路如图 1-33a 所示。

在关联参考方向下，电容元件的电压电流关系为

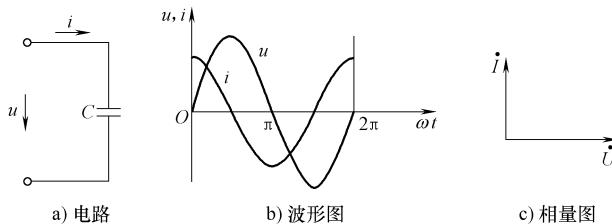


图 1-33 电容元件的交流电路

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-27)$$

在图 1-33a 所示电路中, 设电压为参考正弦量, 即

$$\begin{aligned} i &= C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t \\ &= \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ u &= U_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (1-28)$$

由此可知, 通过电容的电流  $i$  与它的端电压  $u$  是同频率的正弦量, 两者的波形图与相量图分别如图 1-33b、c 所示。比较式 (1-27) 和式 (1-28) 可知, 电压  $u$  和电流  $i$  有如下大小和相位关系:

$$u, i \text{ 的相位差为 } \phi = \phi_u - \phi_i = -90^\circ$$

即电容元件上电流比电压超前  $90^\circ$ 。

$u, i$  的幅值关系为

$$I_m = \omega C U_m \quad U_m = \frac{I_m}{\omega C}$$

$u, i$  的有效值关系为

$$U = \frac{1}{\omega C} = X_C I$$

式中  $X_C$ ——容抗 ( $\Omega$ ), 且

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-29)$$

式 (1-29) 表明, 对一定容量的电容, 通入不同频率的交流电时, 电容会表现出不同的容抗, 频率越高, 容抗越小。在极端情况下, 若  $f \rightarrow \infty$ , 则  $X_C \rightarrow 0$ , 此时电容可视为短路; 若  $f = 0$  (直流), 则  $X_C = \infty$ , 此时电容可视为开路; 这说明了电容元件的“隔直通交”作用。

$u$ 、 $i$  的相量关系如下：

由式 (1-28) 和式 (1-29) 可知,

$$\dot{I} = j\omega \dot{C}U = \frac{\dot{U}}{-j\frac{1}{\omega C}} = \frac{\dot{U}}{-jX_c}$$

$$\dot{U} = -jX_c \dot{I}$$

这是电容电路中欧姆定律的相量表示形式, 它既表达了纯电容元件电压电流有效值之间的关系, 又表达了它们的相位关系 ( $\phi_u - \phi_i = -90^\circ$ )。

## (2) 电容电路中的功率

电容电路所吸收的瞬时功率为

$$p = ui = U_m \sin \omega t \times I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t \quad (1-30)$$

功率瞬时值曲线如图 1-34 所示。

由式 (1-30) 可知, 电容从电源吸取的瞬时功率是幅值为  $UI$  并以角频率  $2\omega$  随时间变化的正弦量, 其曲线如图 1-34 所示。从功率曲线可以看出其平均功率仍为 0, 这说明电容不消耗有功功率, 但电容与电源之间仍存在着能量交换。在第一个  $1/4$  周期内, 随着电容中端电压增长, 电场逐渐增强, 电容从电源吸取能量, 此时  $p > 0$ , 这一过程中电容将电能转换为电场能 (充电); 在第二个  $1/4$  周期内, 电容将储存的能量释放出来反馈给电源, 此时  $p < 0$ , 这一过程电容释放能量 (放电); 在第三个  $1/4$  周期内, 电容反方向充电; 在第四个  $1/4$  周期内, 电容反方向放电。在一个周期内充放电能量相等, 平均值为零。这一事实说明, 电容不消耗能量, 但可储存能量, 是一个储能元件, 在电路中也起着能量的“吞吐”作用。

与电感相似, 电容与电源功率交换的最大值也称为无功功率, 用  $Q_c$  表示, 有

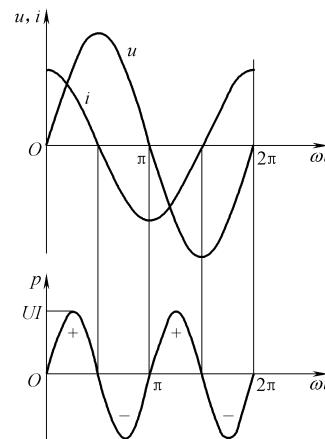


图 1-34 电容元件的功率瞬时值曲线

$$Q_c = UI = I^2 X_c = \frac{U^2}{X_c} \quad (1-31)$$

综上所述, 电容电路中电压与电源的关系可由欧姆定律  $\dot{U} = -jX_c \dot{I}$  来表示, 电容不消耗功率, 其占用的无功功率是  $Q_c = UI = I^2 X_c = U^2/X_c$ 。

## 五、电阻、电感、电容串联电路

在分析实际电路时, 我们一般将复杂电路抽象为由若干理想电路元件串联组成的典型电路模型进行简化处理。本节讨论的  $RLC$  串联电路就是一种典型电路, 从中引出的一些概念与结论可用于各种复杂的交流电路, 而单一参数电路、 $RL$  串联电路、 $RC$  串联电路则可看成是它的特例。

### 1. 电压与电流之间的关系

图 1-35a 所示为  $RLC$  串联电路。

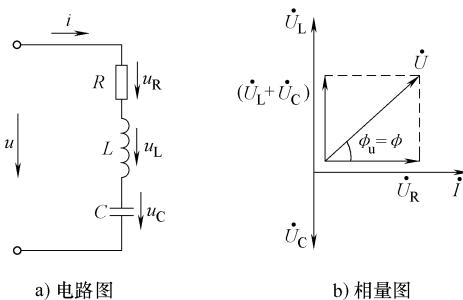


图 1-35  $RLC$  串联的交流电路

设有正弦电流  $i = I_m \sin \omega t$  通过  $RLC$  串联电路, 根据上一节的分析, 该电流在电阻、电感和电容上的电压降分别为

$$u_R = U_{Rm} \sin \omega t$$

$$u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

根据基尔霍夫电压定律, 总电压为

$$u = u_R + u_L + u_C$$

用相量形式表示为

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

现用相量表示法讨论  $u$ 、 $i$  的有效值关系及相位关系。

以  $\dot{I}$  为参考相量,  $\dot{I} = I \angle 0^\circ$ , 则

$$\dot{U}_R = R\dot{I} = U_R \angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_L = jX_L \dot{I} = U_L \angle 90^\circ$$

$$\dot{U}_C = jX_C \dot{I} = U_C \angle -90^\circ$$

作  $\dot{I}$ 、 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$ 、 $\dot{U}_C$  的相量图, 如图 1-35b 所示。

### (1) 电压有效值

将  $\dot{U}_L$  与  $\dot{U}_C$  的相量和定义为  $\dot{U}_X$ , 由相量图可知外接电压相量  $\dot{U}$ 、相量  $\dot{U}_R$  与  $\dot{U}_X = (\dot{U}_L + \dot{U}_C)$  构成一个直角三角形, 称为电压三角形, 如图 1-36a 所示。

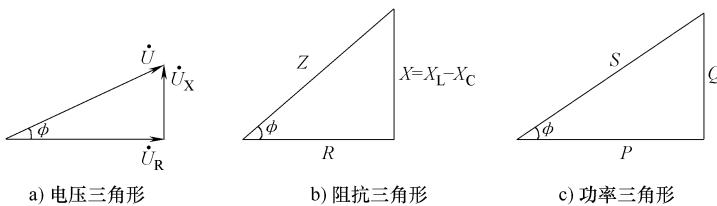


图 1-36 电压、阻抗及功率三角形

不难求出:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L + U_C)^2} \quad (1-32)$$

将  $U_R = RI$ ,  $U_L = X_L I$ ,  $U_C = X_C I$  代入式 (1-32), 得

$$U = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1-33)$$

根式  $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  具有阻碍电流的性质, 称为电路的阻抗, 用符号  $|Z|$  表示, 它的单位也是欧姆 ( $\Omega$ ), 即

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1-34)$$

### (2) 电压 $u$ 与电流 $i$ 有效值之间的关系

阻抗中的  $(X_L - X_C)$  被称为电抗, 用符号  $X$  表示, 将  $X = X_L - X_C$  代入式 (1-33), 有

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

阻抗  $|Z|$ 、 $R$  与  $X$  的关系也可用直角三角形表示, 称为阻抗三角

形, 如图 1-36b 所示。于是, 电压电流有效值关系为  $U = |Z|I$ 。

### (3) 电压 $u$ 与电流 $i$ 的相位差

由于以  $\dot{I}$  为参考相量,  $\phi_i = 0$ , 所以  $u$ 、 $i$  的相位差  $\phi = \phi_u - \phi_i = \phi_u$ , 由电压三角形可知

$$\phi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$$

可见, 当电源频率一定时, 电压  $u$  与电流  $i$  的相位关系和有效值关系都取决于电路参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 。

### (4) 电压 $u$ 与电流 $i$ 的相量关系

由单一参数电路的电压关系可得

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I} \quad (1-35)$$

式中  $R + j(X_L - X_C)$  称为复阻抗, 用符号  $Z$  表示, 即

$$Z = R + j(X_L - X_C) = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j\arctan \frac{X_L - X_C}{R}} = |Z| e^{j\phi}$$

式中  $\phi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$  是复阻抗的辐角, 也称阻抗角, 它决定了  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路中  $u$ 、 $i$  的相位差。复阻抗是一个复数, 具有大小和角度, 但它不是表示正弦量的相量, 所以其上方不加点。有了复阻抗的概念, 则式 (1-35) 可写成

$$\dot{U} = Z\dot{I} \quad (1-36)$$

式 (1-36) 与直流电路中的欧姆定律有相似的形式, 称为欧姆定律的相量形式。进一步展开推导, 有

$$\dot{U} = Z\dot{I} = |Z| \angle \phi \dot{I} = |Z| \dot{I} \angle \phi$$

可见, 式 (1-36) 既表达了电路中电压与电流有效值之间的关系  $U = |Z|I$ , 又表达了电压与电流之间的相位差  $\phi$ 。若  $\phi > 0$ , 说明电压超前电流  $\phi$  角, 这种电路称为感性电路; 若  $\phi < 0$ , 说明电压滞后于电流  $\phi$  角, 这种电路称为容性电路; 若  $\phi = 0$ , 说明电压与电流同相位, 这种电路称为电阻性电路。

## 2. 电阻、电感、电容串联电路的功率

在分析单一参数电路元件的交流电路时已经知道, 电阻是消耗能量的, 而电感和电容是不消耗能量的, 在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路中能量的交换情况是怎样的, 电路的功率又是如何计算的, 这些便是下面要讨论的

问题。

### (1) 平均功率 (有功功率)

在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联的正弦交流电路中, 若  $u$ 、 $i$  参考方向一致, 且设有正弦电流  $i = I_m \sin \omega t$  通过, 则电压  $U_m = \sin(\omega t + \phi)$ , 电路的瞬时功率为

$$\begin{aligned} P &= ui = I_m \sin \omega t \times U_m \sin(\omega t + \phi) \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi)] \\ &= UI \cos \phi - UI \cos(2\omega t + \phi) \end{aligned}$$

电路的平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \phi - UI(2\omega t + \phi)] dt = UI \cos \phi \quad (1-37)$$

式中  $\phi$ ——电压  $u$  与电流  $i$  的相位差,  $\cos \phi$  被称为功率因数, 这时  $\phi$  又被称为功率因数角。由电压三角形可知  $U \cos \phi = U_R$ , 所以

$$P = UI \cos \phi = U_R I = RI^2 \quad (1-38)$$

式 (1-38) 说明  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联的正弦交流电路的平均功率就是电阻元件消耗的平均功率, 因为电感元件和电容元件的平均功率为零。这为以后求解复杂电路的有功功率提供了理论根据。

### (2) 无功功率

在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联的正弦交流电路中, 电感元件的瞬时功率为  $p_L = u_L i$ , 电容元件的瞬时功率为  $p_C = u_C i$ 。由于电压  $u_L$  和  $u_C$  反相, 因此当  $p_L$  为正值时,  $p_C$  为负值, 即电感元件取用能量时, 电容元件正放出能量; 反之, 当  $p_L$  为负值时,  $p_C$  为正值, 即电感元件放出能量时, 电容元件正取用能量, 因此  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联的正弦交流电路中的无功功率为

$$Q = Q_L - Q_C$$

由于  $Q_L = U_L I$ ,  $Q_C = U_C I$ , 所以

$$\begin{aligned} Q &= Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = (U_L - U_C) I \\ &= U_x I = X I^2 = \frac{U_x^2}{X} \end{aligned}$$

由电压三角形可知  $U_x = U \sin \phi$ , 故

$$Q = UI \sin \phi \quad (1-39)$$

对于感性电路,  $X_L > X_C$ , 则  $Q = Q_L - Q_C > 0$ ; 对于容性电路,  $X_L < X_C$ , 则  $Q = Q_L - Q_C < 0$ 。为了计算的方便, 有时直接把容性电路的无功功率取为负值。例如, 一个电容元件的无功功率为  $Q = -Q_C = -U_C I$ 。

### (3) 视在功率

在正弦交流电路中, 把电流电压有效值的乘积定义为视在功率, 用  $S$  表示, 即

$$S = UI \quad (1-40)$$

为了与平均功率相区别, 视在功率不用瓦作单位, 而用伏安 (V · A) 作单位。

由图 1-36c 功率三角形可知  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  三者均成直角三角形, 故:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1-41)$$

$P$ 、 $Q$ 、 $S$  三者也构成直角三角形, 称为功率三角形, 如图 1-36c 所示。

## 六、电路的串联谐振

$R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路发生谐振的条件为  $I_m [Z(j\omega)] = X = 0$ , 设发生谐振时激励的频率为  $\omega_0$ , 则

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

$\omega_0$  为  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路的谐振角频率, 可解得

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

由于  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , 所以有

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$f_0$  称为串联电路的谐振频率, 它与电阻  $R$  无关, 反映了串联电路一种固有的性质, 对于每一个  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路, 总有一个对应的谐振频率, 而且改变  $\omega$ 、 $L$  或  $C$  都可使电路发生谐振或消除谐振。因此, 在需要利用谐振电路时, 可以设计出多种调谐方式。串联谐振的特性如下:

- ① 电流与电压同相位, 电路呈电阻性。
- ② 电路的阻抗最小, 电流最大。

因谐振时电路复阻抗虚部为零, 阻抗为纯电阻, 阻抗的模为最小值, 电路中的最大电流十分容易求出:

$$Z = R + jX = R, I = I_0 = \frac{U}{|Z|} = \frac{U}{R}$$

由  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路的阻抗表达式  $|Z| = \sqrt{R^2 + (2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C})^2}$  可

知, 如果电源输入电压不变, 当电源频率  $f > f_0$  或  $f < f_0$  时,  $|Z|$  都要增加,  $I$  都要下降。 $|Z|$  与  $f$  变化的关系曲线  $|Z| = f(f)$ 、 $I = f(f)$  分别称为阻抗特性曲线与电流响应曲线, 如图 1-37a、b 所示。

③ 电感端电压与电容端电压大小相等, 相位相反; 电阻端电压等于外加电压。谐振时, 电感端电压与电容端电压有效值相等, 相位相反, 相互完全抵消, 外施电压全部加在电阻上, 电阻上电压达到最大值, 即

$$\begin{aligned}\dot{U}_L &= -\dot{U}_C \\ \dot{U} &= \dot{U}_R\end{aligned}$$

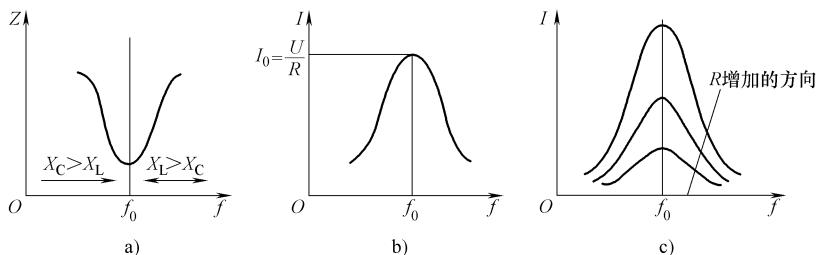


图 1-37 阻抗特性曲线与电流响应曲线

④ 电感和电容的端电压有可能大大超过外加电压。谐振时, 电感或电容的端电压与外加电压的比值为

$$\begin{aligned}Q &= \frac{U_L}{U} = \frac{X_L I}{R I} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 R C} \\ U_L &= U_C = Q U\end{aligned}$$

$Q$  称为谐振回路的品质因数或谐振系数。当  $X_L$  远大于  $R$  时,  $Q$  值一般可达几十至几百, 所以串联谐振时电感和电容的端电压有可能大大超过外加电压。在电子线路中, 当输入端含有多种频率成分的信号时,

通过调谐可调节电路的参数值，从而在电容或电感上获得所想要频率的放大信号，这种从多种频率信号中挑选出所需信号的能力称为“选择性”。电流响应曲线越尖锐，电路的选择性越好。电路的阻值越小，电流响应曲线就越尖锐，如图 1-37c 所示。

电路选择性的好坏使用品质因数来表示： $Q$  值越大，选择性越好； $Q$  值越小，选择性越差。因为  $Q$  值远大于 1，当电路在接近谐振时，电感和电容上会出现超过外施电压  $Q$  倍的高电压。在电力系统中，出现这种高电压是不允许的，这将引起某些电气设备的损坏；但在无线电技术中它是有用的。

## 第四节 三相交流电路

### 一、三相交流电源

三相交流电是由三相交流发电机产生的。在三相交流发电机中，有三个相同的绕组，三个绕组的始端分别用  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  表示，末端分别用  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  来表示。 $U_1U_2$ 、 $V_1V_2$ 、 $W_1W_2$  三个绕组分别称为 U 相、V 相、W 相绕组。由于发电机结构的原因，这三相绕组所发出的三相电动势幅值相等，频率相同，相位互差  $120^\circ$ 。

这样的三相电动势称为对称的三相电动势，可以表示为

$$e_U = E_m \sin \omega t$$

$$e_V = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_W = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

如果以相量形式来表示，则有

$$\dot{E}_U = \dot{E} \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_V = \dot{E} \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_W = \dot{E} \angle -240^\circ = \dot{E} \angle 120^\circ$$

它们的波形图及相量图如图 1-38 所示。

三相交流电在相位上的先后次序称为相序。如上述的三相电动势依次滞后  $120^\circ$ ，其相序为  $U \rightarrow V \rightarrow W$ 。

通常把发电机三相绕组的末端  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  连接成一点 N，而把始端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  作为与外电路相连接的端点。这种连接方式称为绕组的星形联结，如图 1-39 所示。N 点称为中性点或零点，从中点引出的导

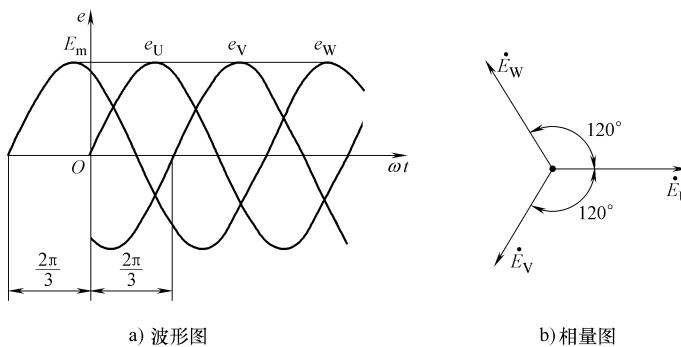


图 1-38 三相对称电动势的波形图和相量图

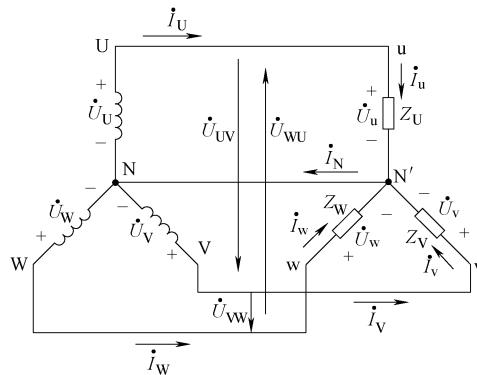


图 1-39 电源的星形联结

线称为中性线或零线，有时中性线接地又称为地线。从始端（ $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ ）引出的三根导线称为端线或相线，俗称火线，常用 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 表示。裸导线上可涂以黄、绿、红、淡蓝颜色标记以区分各导线，走线采用的导线颜色必须符合国家标准。

由三条相线和一条中线构成的供电系统称为三相四线制供电系统。通常低压供电网均采用三相四线制。常见的只有两条导线的供电电路一般只包括三相中的一相，由一条相线和一条中性线组成。三相四线制供电系统可输送两种电压：一种是相线与中性线之间的电压，称为相电压，用 $U_u$ 、 $U_v$ 、 $U_w$ 表示；另一种是相线与相线之间的电压，称为线电压，用 $U_{uv}$ 、 $U_{vw}$ 、 $U_{wu}$ 表示。

通常规定各相电动势的参考方向为从绕组的末端指向始端，相电压

的参考方向为从始端指向末端（从相线指向中性线）；线电压的参考方向，例如  $U_{UV}$ ，则是从 U 端指向 V 端。由图 1-39 可知各线电压与相电压之间的关系为

$$\dot{U}_{UV} = \dot{U}_U - \dot{U}_V$$

$$\dot{U}_{VW} = \dot{U}_V - \dot{U}_W$$

$$\dot{U}_{WU} = \dot{U}_W - \dot{U}_U$$

线电压与相电压的相量图如图 1-40 所示。由于三相电动势是对称的，故相电压也是对称的。由图可知，线电压也是对称的，在相位上比相应的相电压超前  $30^\circ$ 。

可知，线电压也是对称的，在相位上比相应的相电压超前  $30^\circ$ 。线电压的有效值用  $U_1$  表示，相电压的有效值用  $U_p$  表示。由相量图可知它们的关系为

$$U_1 = \sqrt{3} U_p$$

一般低压供电系统的线电压是

380V，它的相电压是  $380V/\sqrt{3} = 220V$ 。可根据额定电压决定负载的接法：若负载额定电压是 380V，就接在两条相线之间；若负载额定电压是 220V，就接在相线和中性线之间。必须注意，不加说明的三相电源和三相负载的额定电压都是指线电压。

## 二、负载的星形联结

三相交流电路中，负载的联结方式有两种：星形（Y）联结和三角形（Δ）联结。分析三相电路和分析单相电路一样，首先画出电路图，并标出电压和电流的参考方向，然后应用欧姆定律和基尔霍夫定律找出电压和电流之间的关系。负载星形联结的三相四线制电路如图 1-41 所示。若不计中性线阻抗 ( $Z_N = 0$ )，则电源中性点 N 与负载中性点  $N'$  等电位。若端线阻抗可以忽略不计 ( $Z_1 = 0$ )，则负载的相电压与电源的相电压相等，即

$$\dot{U}_u = \dot{U}_U, \dot{U}_v = \dot{U}_V, \dot{U}_w = \dot{U}_W$$

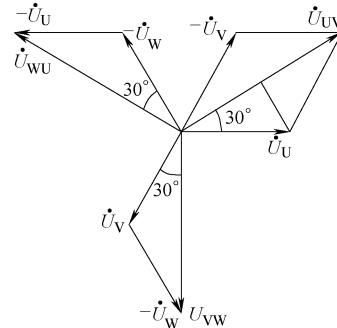


图 1-40 线电压与相电压的相量图

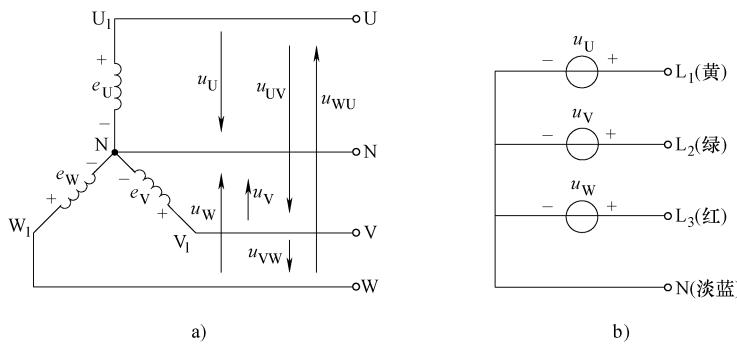


图 1-41 负载星形联结的三相四线制电路

负载的线电压与电源的线电压相等, 即

$$\dot{U}_{uv} = \dot{U}_{UV}, \dot{U}_{vw} = \dot{U}_{VW}, \dot{U}_{wu} = \dot{U}_{WU}$$

负载星形联结时, 电路有以下基本关系:

- ① 三相电路中的电流有相电流与线电流之分, 每相负载中的电流  $\dot{I}_u, \dot{I}_v, \dot{I}_w$  称为相电流, 每条端线中的电流  $\dot{I}_u, \dot{I}_v, \dot{I}_w$  称为线电流, 很显然, 相电流等于线电流, 即

$$\dot{I}_u = \dot{I}_U, \dot{I}_v = \dot{I}_V, \dot{I}_w = \dot{I}_W$$

如果用  $I_p$  表示相电流, 用  $I_l$  表示线电流, 一般可写成

$$I_p = I_l$$

- ② 三相四线制电路中, 各相电流可分成三个单相电路分别计算, 即

$$\dot{I}_u = \dot{I}_U = \frac{\dot{U}_u}{Z_u} = \frac{\dot{U}_u}{|Z_u| \angle \varphi_u} = \frac{\dot{U}_u}{|Z_u|} \angle -\varphi_u$$

$$\dot{I}_v = \dot{I}_V = \frac{\dot{U}_v}{Z_v} = \frac{\dot{U}_v}{|Z_v| \angle \varphi_v} = \frac{\dot{U}_v}{|Z_v|} \angle -\varphi_v$$

$$\dot{I}_w = \dot{I}_W = \frac{\dot{U}_w}{Z_w} = \frac{\dot{U}_w}{|Z_w| \angle \varphi_w} = \frac{\dot{U}_w}{|Z_w|} \angle -\varphi_w$$

$$\varphi_u = \arctan \frac{X_u}{R_u}, \varphi_v = \arctan \frac{X_v}{R_v}, \varphi_w = \arctan \frac{X_w}{R_w}$$

若三相负载对称, 即  $Z_u = Z_v = Z_w = Z = |Z| \angle \varphi$  时, 有

$$\dot{I}_u = \dot{I}_U = \frac{\dot{U}_u}{Z} = \frac{\dot{U}_u}{|Z|} \angle -\varphi$$

$$\dot{I}_v = \dot{I}_V = \frac{\dot{U}_v}{Z} = \frac{\dot{U}_v}{|Z|} \angle -\varphi$$

$$\dot{I}_w = \dot{I}_W = \frac{\dot{U}_w}{Z} = \frac{\dot{U}_w}{|Z|} \angle -\varphi$$

因而相电流或线电流也是对称的。显然，在三相负载对称的情况下，三相电路可归结到一相来计算。

③ 负载的线电压就是电源的线电压。在对称条件下，线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，且超前于相应的相电压 $30^\circ$ 。

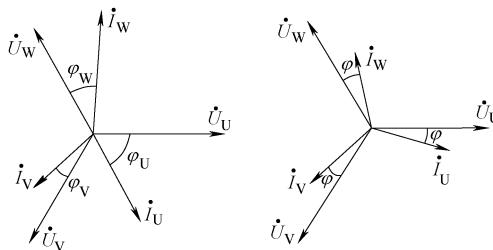
④ 中性线电流等于三个线（相）电流的相量和。根据图 1-41，由基尔霍夫电流定律有

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W$$

如果负载对称，即  $Z = Z_V = Z_W = Z_U = |Z| \angle \varphi$ ，则有

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$$

由于中线无电流，故可将中性线除去，而成为三相三线制电路系统。工业生产上所用的三相负载（比如三相电动机、三相电炉等）通常情况下都是对称的，可用三相三线制电路供电（一般低压系统都是采用三相四线制或五线制，因为中性点，接地是一些设备或电器的外壳接地，对人身安全有保障）。但是，如果三相负载不对称，中性线中就会有电流通过，此时中性线不能除去，否则会造成负载上三相电压严重不对称，使用电设备不能正常工作，如图 1-42 所示。



a) 三相负载不对称

b) 三相负载对称

图 1-42 负载星形联结时的相量图

### 三、负载的三角形联结

如果将三相负载的首尾相连，再将三个连接点与三相电源端线 U、V、W 连接，就构成了负载的三角形 (△) 联结的三相三线制电路，如图 1-43 所示。

图 1-43 中， $Z_{UV}$ 、 $Z_{VW}$ 、 $Z_{WU}$  分别是三相负载的复阻抗，各电量的参考方向按习惯标出。若忽略端线阻抗 ( $Z_1 = 0$ )，则电路具有以下基本关系：

① 由于各相负载都直接接在电源的线电压上，所以负载的相电压与电源的线电压相等。因此，无论负载对称与否，其相电压总是对称的，即

$$\begin{aligned}\dot{U}_{uv} &= \dot{U}_{UV}, \dot{U}_{vw} = \dot{U}_{VW}, \dot{U}_{wu} = \dot{U}_{WU} \\ \dot{U}_p &= \dot{U}_1\end{aligned}$$

② 各相电流可以分成三个单相电路分别计算，即

$$\begin{aligned}\dot{I}_{uv} &= \frac{\dot{U}_{uv}}{Z_{uv}} = \frac{\dot{U}_{UV}}{|Z_{uv}| \angle \varphi_{uv}} = \frac{\dot{U}_{UV}}{|Z_{uv}|} \angle -\varphi_{uv} \\ \dot{I}_{vw} &= \frac{\dot{U}_{vw}}{Z_{vw}} = \frac{\dot{U}_{VW}}{|Z_{vw}| \angle \varphi_{vw}} = \frac{\dot{U}_{VW}}{|Z_{vw}|} \angle -\varphi_{vw} \\ \dot{I}_{wu} &= \frac{\dot{U}_{wu}}{Z_{wu}} = \frac{\dot{U}_{WU}}{|Z_{wu}| \angle \varphi_{wu}} = \frac{\dot{U}_{WU}}{|Z_{wu}|} \angle -\varphi_{wu} \\ \varphi_{uv} &= \arctan \frac{X_{uv}}{R_{uv}}, \varphi_{vw} = \arctan \frac{X_{vw}}{R_{vw}}, \varphi_{wu} = \arctan \frac{X_{wu}}{R_{wu}}\end{aligned}$$

如果负载对称，即

$$Z_{uv} = Z_{vw} = Z_{wu} = Z = |Z| \angle \varphi$$

则负载的相电流也是对称的，此时，相电流可归结到一相来计算，即

$$I_{uv} = I_{vw} = I_{wu} = I_p = \frac{U_p}{|Z|} \quad \varphi_{uv} = \varphi_{vw} = \varphi_{wu} = \varphi = \arctan \frac{X}{R}$$

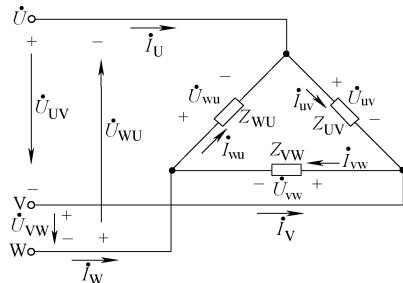


图 1-43 负载的三角形联结

负载三角形联结时的相量图如图 1-44 所示。

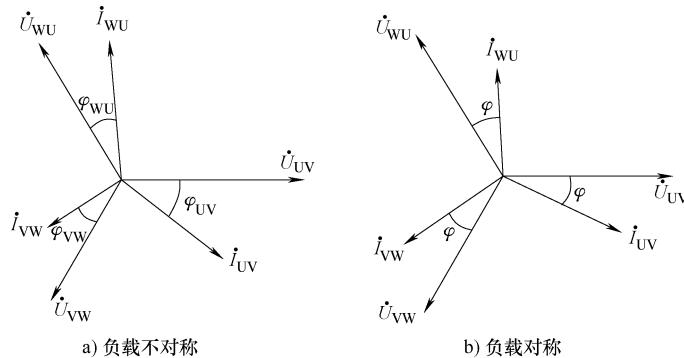


图 1-44 负载三角形联结时的相量图

各线电流可利用基尔霍夫电流定律计算如下：

$$\dot{I}_u = \dot{I}_{uv} - \dot{I}_{wu}$$

$$\dot{I}_v = \dot{I}_{vw} - \dot{I}_{uv}$$

$$\dot{I}_w = \dot{I}_{wu} - \dot{I}_{vw}$$

如果负载对称，负载的相电流也是对称的，通过上式可做出线电流和相电流之间的相量关系如图 1-45 所示。从图中不难看出，有  $\frac{1}{2}I_l = I_p$

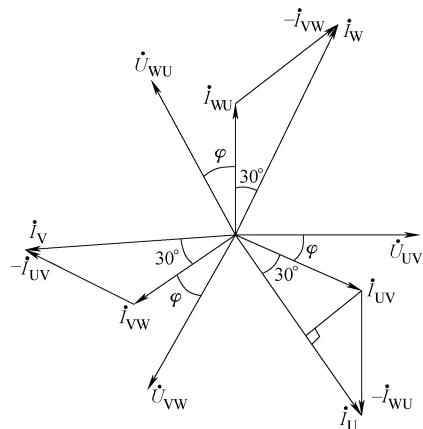


图 1-45 对称负载三角形联结时线电流与相电流之间的相量关系

$\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} I_p$ ,  $I_l = \sqrt{3} I_p$ , 即线电流是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍, 且滞后于相应的相电流 $30^\circ$ 。

#### 四、三相电路的功率

三相电路总的有功功率等于各相有功功率之和。当负载为星形联结时, 总功率为

$$P = P_u + P_v + P_w = U_u I_u \cos \varphi_u + U_v I_v \cos \varphi_v + U_w I_w \cos \varphi_w$$

式中,  $\varphi_u$ 、 $\varphi_v$ 、 $\varphi_w$  分别是各相相电压与相电流的相位差, 亦即各相负载的阻抗角或功率因数角。

如果三相负载对称, 则有

$$P = 3 U_p I_p \cos \varphi$$

对于三角形联结, 有

$$U_p = U_1, I_p = \frac{I_1}{\sqrt{3}}, P = 3 U_1 \frac{I_1}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi$$

综上所述, 无论负载是星形联结还是三角形联结, 三相电路总的有功功率均可用  $P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi$  来表达, 式中的  $\varphi$  均是指相电压与相电流的相位差角, 即负载  $Z$  的阻抗角。三相电路总的无功功率也等于三相无功功率之和, 在对称三相电路中, 三相无功功率为

$$Q = 3 U_p I_p \sin \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi$$

而三相视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 U_p I_p = \sqrt{3} U_1 I_1$$

在电源电压不变的情况下, 同一负载星形联结和三角形联结时所消耗的功率是不同的, 三角形联结时的功率是星形联结时的 3 倍。这就告诉我们, 若要使负载正常工作, 负载的接法必须正确。如果将正常工作为星形联结的负载误接成三角形, 则会因功率过大而烧毁负载; 如果将正常工作为三角形联结的负载误接成星形时, 则会因功率过小而不能使负载正常工作。

## 第二章 电工测量

在电能的生产、传输、分配和使用等各个环节中，都需要通过电工仪表对系统的运行状态（如电能质量、负载情况等）加以监测，从而保证系统安全而又经济地运行，所以人们常把电工仪表和测量称作电力工业的“眼睛”和“脉搏”。电工仪表和测量技术是从事电气工作的技术人员必须掌握的一门学科。本章主要介绍电工仪表及测量的基本知识。

### 第一节 常用电工仪表

#### 一、电流表

电流表用来测量电路的电流，也是最常用的电工仪表之一。同电压表一样，电流表也分为直流电流表和交流电流表。

电流表必须串联在被测电路中，以使电流表流过被测电路的电流，因此电流表的两个接线端必须接在被断开电路两端。在测量较高电压电路的电流时，电流表应串联在被测电路中的低电位端，以利于操作人员的安全。

直流电流表的两个接线端也标有“+”“-”符号，测量时电流应从“+”极流入、“-”极流出，否则指针会反向偏转。直流电流表的接线如图 2-1 所示。

交流电流表不分极性，只要串入电路即可。交流电流表的接线如图 2-2 所示。

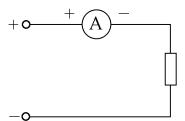


图 2-1 直流电流表接线

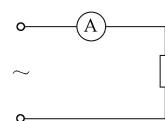


图 2-2 交流电流表接线

由于电流表是串联在电路中，因此电流表的内阻越小越好。

直流电流扩大量程采用并联分流电阻的方法，如图 2-3 所示。流过

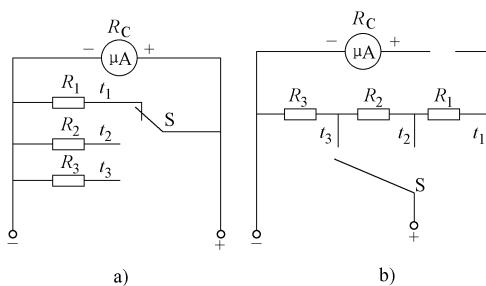


图 2-3 多量程直流电流表原理电路图

电流表的电流与流过分流电阻的电流成比例，则电流表即可按总电流值刻度。

交流电流表可通过电流互感器扩大量程，如图 2-4 所示。这时电流表的指示值是电流互感器一次侧的电流值。

除接线不同外，电流表使用时量程的选择、极性的确定等均可参照电压表的正确使用方法。

在选择和使用电流表时应注意以下几点：

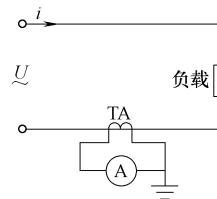
① 类型的选择。在直流电流的测量中主要用磁电系测量机构的仪表。

② 准确度的选择。仪表的准确度不能选得过高，要从测量要求的实际出发。通常 0.1 和 0.2 级仪表作为标准表选用；0.2 级仪表作为计量仪表选用；0.5 和 1.0 级仪表作为实验室测量选用；1.5 级以下的仪表一般作为工程测量选用。

③ 量程的选择。正确估计被测量的数值范围，合理地选择量程，一般使仪表对被测量的指示大于仪表最大量程的  $2/3$ ，而又不能超过其最大量程。

④ 内阻的选择。仪表内阻反映仪表本身功率的损耗；为了减小测量误差，测量电流时，应选用内阻尽可能小的电流表。

⑤ 正确接线。测量电流时，电流表应与被测电路串联；测量直流电流时，必须注意仪表的极性，应使仪表的极性与被测量的极性一致。

图 2-4 电流互感器扩  
大电流表量程

⑥ 量程的扩大。当电路中的被测量超过仪表的量时,可采用外附分流器或分压器,但应注意其准确度等级应与仪表的准确度等级相符。

另外，还应注意仪表的使用环境要符合要求，要远离外磁场。使用前应使指针处于零位，读数时应使视线与标度尺平面垂直等。

## 二、电压表

电压表用来测量电源或负载两端的电压，是最常用的电工仪表之一。电压表可分为交流电压表和直流电压表，分别用来测量交流电压和直流电压。

### 1. 电压表的接线

交流电压表有两个接线端，分别与被测量的两端连接。测量电源电压时与电源并联，测量负载两端电压时与被测量负载并联。交流电压表的接线如图 2-5 所示。

直流电压表两个接线端有“+”“-”符号，测量时“+”端接电路的高电位端，“-”端接电路的低电位端，直流电压表的接线如图2-6所示。

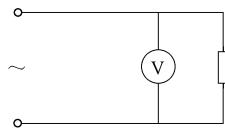


图 2-5 交流电压表接线

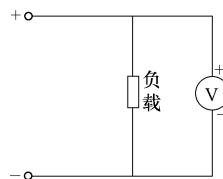


图 2-6 直流串压表接线

如扩大电压表的量程,测直流电压可采用串联分压电阻,测交流电压可接用电压互感器,分别如图2-7与图2-8所示。

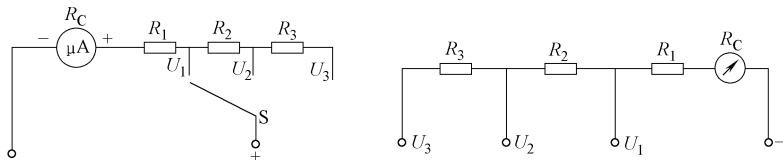


图 2-7 共用式分压电路

由于电压表是与电源并联，因此电压表的内阻越大越好，以减小测量时对电路的影响。

## 2. 电压表的正确使用

① 正确选择电压表的量程，尽量使指针偏转至满刻度的  $2/3$  左右。量程过大，可能无法准确读数，误差也会加大；量程过小，指针可能冲过满刻度，损坏仪表。

② 测量直流电压时，若事先不知道电压的极性，可用最大量程并将电压表的“-”端先接电源“-”端，用“+”端轻点电源的另一端，如指针正向偏转，则说明接线正确，如指针反向偏转，则接线错误。

在选择电压表时应注意以下几点：

① 类型的选择。在交流电压的测量中主要用电磁系和铁磁系测量机构的仪表。而电动系测量机构的仪表常用于交流电压的精密测量。

② 准确度的选择。仪表的准确度不一定选得过高，要从测量要求的实际出发。

③ 量程的选择。正确估计被测量的数值范围，合理地选择量程，一般使仪表对被测量的指示大于仪表最大量程的  $2/3$ ，而又不能超过其最大量程。

④ 高电压的测量。测量高电压时，必须采用电压互感器。电压表的量程应与互感器二次的额定值相符，一般电压为 100V。

另外，还应注意仪表的使用环境要符合要求，要远离外磁场。

## 三、钳形电流表

钳形电流表是便携式电流表的一种，它的特点是在不切断电路的情况下测量流过电路的电流。

### 1. 钳形电流表的组成及工作原理

钳形电流表是由电流互感器和电流表组成的；互感器的铁心有一活动部分同手柄相连。当握紧手柄时，电流互感器的铁心便张开，将被测电流的导线卡入钳口中，成为电流互感器的一次绕组。放开手柄，则铁心的钳口闭合。这时钳口中通过导线的电流，便在二次绕组产生感应电流，其大小取决于导线的工作电流和圈数比。电流表接在二次绕组的两

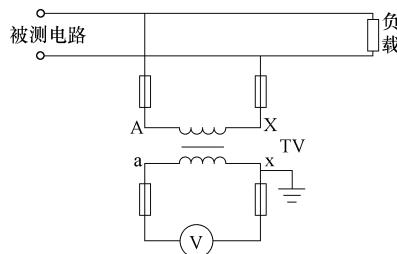


图 2-8 电压互感器扩大电压表量程

端, 它所指示的电流取决于二次绕组中的电流。该电流的大小与导线中的工作电流成正比。因此, 将折算好的刻度作为电流表的刻度, 当导线中有工作电流流过时, 与二次绕组相接的电流表指针便按比例偏转, 指示出所测的电流值。钳形电流表的结构如图 2-9 所示。

测量交流电流的钳形表工作原理实质上是由一个电流互感器和整流系仪表组成。被测导线相当于电流互感器的一次绕组, 绕在钳形电流表铁心上的线圈相当于电流互感器的二次绕组。当被测载流导线卡入钳口时, 二次绕组便感应出电流, 使指针偏转, 指示出被测电流值。

测量交、直流的钳形电流表工作原理实质上是一个电磁系仪表, 当被测载流导线卡入钳口时, 二次绕组便感应出电流, 使指针偏转, 指示出被测电流值。

## 2. 钳形电流表正确使用

### (1) 正确选择表计的种类

钳形表的种类和形式很多, 有用来测量交流电流的 T-301 型钳形电流表, 还有 MG21、MG22 型的交、直流两用的钳形电流表等。在进行测量时, 应根据被测对象的不同, 选择不同型式的钳形电流表。

### (2) 正确选择表计的量程

钳形电流表一般通过转换开关来改变量程, 也有通过更换表头的方式来改变量程的。测量前, 应对被测电流值进行粗略的估计, 选择适当的量程。如果被测电流无法估计时, 应先把钳形电流表的量程放在最大挡位, 然后根据被测电流指示值, 由大变小, 转换到合适的挡位。倒换量程挡位时, 应在不带电的情况下进行, 以免损坏仪表。

### (3) 正确测量

测量交流电流时, 使被测导线位于钳口中部, 并且使钳口紧密闭合。

### (4) 测量后的工作

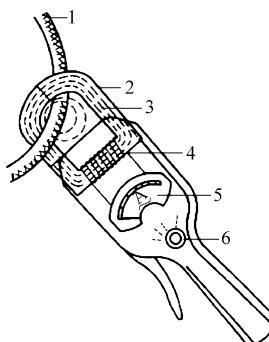


图 2-9 钳形电流表的结构图

1—载流导线 2—铁心 3—磁通  
4—线圈 5—电流表  
6—改变量程的旋钮

每次测量后，要把调节电流量程的切换开关放在最高挡位，以免下次使用时，因未经选择量程就进行测量而损坏仪表。

#### (5) 测量小电流注意事项

测量 5A 以下电流时，为得到较为准确的读数，在条件许可时，可将导线多绕几圈放进钳口进行测量，其实际电流数值应为仪表读数除以放进钳口内的导线根数。

钳形电流表使用方便，只要握紧把手使钳口张开，将被测导线置于钳口之内即可，如图 2-10 所示。

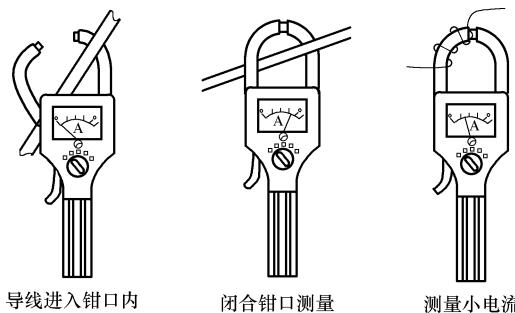


图 2-10 钳形电流表常规测量示意图

钳形电流表使用中应注意：

- ① 根据被测电流大小适当选择量程，不知被测电流大小时应先用最大量程试测，再选合适量程；
- ② 测试时应戴手套（绝缘手套或清洁干燥的线手套），必要时应设监护人；
- ③ 需换挡测量时，应先将导线自钳口内退出，换挡后再钳入导线测量；
- ④ 被测电流较小无法读数时，可将被测导线多绕几圈置入钳口，指示值除以钳口内导线圈数即为被测电流值；
- ⑤ 不可测量裸导体上的电流；
- ⑥ 测量时，注意与附近带电体保持安全距离，并应注意不要造成相间短路和相对地短路；
- ⑦ 使用后，应将挡位置于电流最高挡，有表套时将其放入表套，存放在干燥、无尘、无腐蚀性气体且不受振动的场所。

## 四、万用表

### 1. 分类和主要功能

万用电表简称万用表或三用表，在国家标准中又称为复用表，是电工日常工作中最常用的仪表之一，万用表有传统的指针式和现代的数字式两大类。虽然后者在很多方面优于前者，例如准确度可达到1级以上（指针式测量直流电时为2.5级，测量交流电时为5.0级），除可测量电压、直流电流和电阻之外，还可测量温度、电容量、频率，以及判定三相电源的相序等，但在某些需要观察连续变化过程的场合，指针式万用表的作用还是不可代替的。

万用表的品种极多，图2-11给出了常见的几种，但其功能和使用方法却大体相同。指针式万用表具有以下4项主要功能：



a) 指针式万用表



b) 数字式万用表

图2-11 几种常见的万用表

① 测量导体的直流电阻。最小分度为 $0.2\Omega$ ，最大量程（可读值）在 $5M\Omega$ 以内。

② 测量交流电压。一般最大量程为500V，有的可达到1500V或

2000V 等。

- ③ 测量直流电压。量程同交流电压。
- ④ 测量直流电流。一般最大量程在 2.5A 以下。

## 2. 指针式万用表的使用方法

下面以图 2-12 所示的指针式万用表为例，介绍它的 4 个主要功能的使用方法。

### (1) 测量前的检查工作

① 观测指针是否处于 0 位。不在时，旋动调零螺钉 1，使其处于 0 位。

② 检查两个表笔及引线有无断裂处，如有应更换新线或用绝缘胶布包扎好。这一点对测量较高的交流电压时尤为重要，否则有可能发生触电事故。

③ 检查引线插头是否松动。如松动应设法紧固。有时松动是因插孔的紧固螺母松动引起的，此时要打开表壳才能对其紧固。

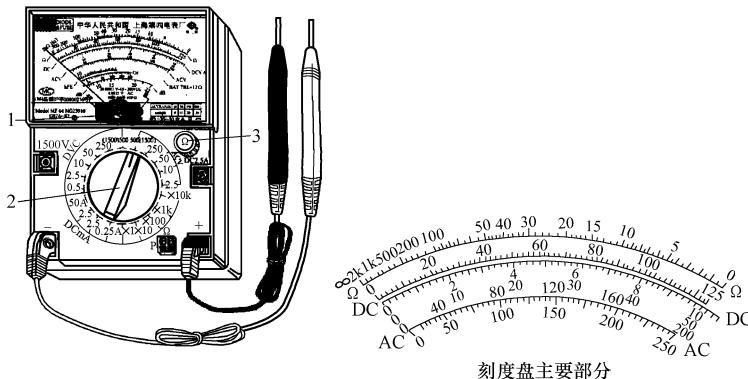


图 2-12 普通指针式万用表外形示例

1—机械调零螺钉 2—挡位和量程选择旋钮 3—电阻调零旋钮

### (2) 测量直流电阻

① 按估计的被测量数值，旋动图 2-12 的旋钮 2，使旋钮 2 的箭头指在  $\Omega$  栏某一挡上。例如，估计值为  $10k\Omega$  左右，则选择  $\times 100$  挡；当然，选择  $\times 1k$  挡也可读数，但读数精度不如前者。

应注意：选择挡位时，以示值尽可能在中间刻度的位置为最佳。

② 将两表笔短接，此时指针将打到  $0\Omega$  处或  $0\Omega$  点左右。不在  $0\Omega$  点时，旋动电阻调零旋钮 3，使指针指在  $0\Omega$  处，如图 2-13a 所示。

此项调整在每次换挡时均应进行一次。

若将旋钮 3 调到最大位置时，指针仍不能指到  $0\Omega$  点（在  $0\Omega$  点左侧，即有数值的一侧），则说明该表的电池电压已不能满足要求，应更换上新电池。

③ 用两表笔分别连接被测电阻的两个端头。指针则指示出一个读数。若示值过小或过大（超过 200 的位置），则应调换成更合适的挡位后再重新测量。

$$\text{测量读数} \times \text{倍数(挡位)} = \text{检测值}(\Omega)$$

如图 2-13b 所示，被测电阻值  $= 47\Omega \times 100 = 4700\Omega = 4.7k\Omega$

④ 测量完毕后，若还需接着使用，则注意防止两表笔相碰而短路；若不接着使用，则将旋钮 2 旋到交流电压最高挡（ACV-500）处。此操作对以下 3 项测量过程也适用，这是为了防止因粗心大意，在急着去测量较高的交流电压时，不看挡位在哪儿时就去接电测量，而将表中一些元件烧毁。

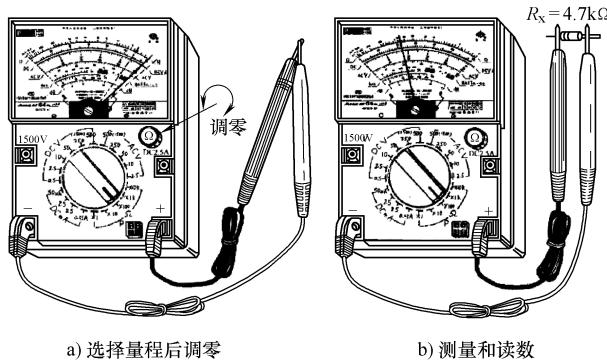


图 2-13 测量电阻

### (3) 测量交流电压

① 按估计被测电压值选择交流电压挡位。例如测量三相电动机的电源线电压时，应在 380V 左右，则将旋钮 2 旋到 ACV（或 V~）500V 挡上，如图 2-14 所示。

② 用两表笔各接被测电压一端（如两个电源端）。注意防止触电，

为此，应穿绝缘鞋或踩在与地绝缘的物体上，并戴手套。

③ 按所选挡位的数值选择一条 ACV (或 V~) 刻度线。

④ 根据所选挡位和指针指示的 ACV 或 (V~) 线的刻度，求得被测量的数值。如 ACV 刻度线满刻度

为 250，指针指在 187 刻度处，则实际电压值应为  $(500V \div 250) \times 187 = 374V$ 。

#### (4) 测量直流电压

① 按估计被测值选择直流电压挡位，即将旋钮 2 旋到 DCV (或 V-) 某挡上。例如测量一节干电池时，应选择 DCV 2.5V 挡，如图 2-15 所示。

② 确定被测电压的正、负极。

③ 用标“+”的表笔接被测电压正极，标“-”或“\*”的表笔接被测电压的负极。

④ 根据所选挡位和指针指示值得出被测电压值。如图 2-15 所示为：挡位是 2.5V，读 DCV · A 刻度线，用 125 刻度时，指针所指数为 72，则被测值为

$$(2.5V \div 125) \times 72 = 1.44V$$

⑤ 将旋钮 2 旋到 ACV-500V 挡。

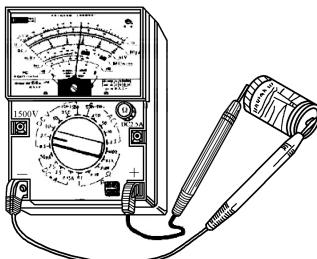


图 2-15 测量直流电压

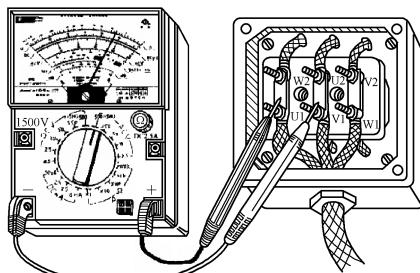


图 2-14 测量交流电压

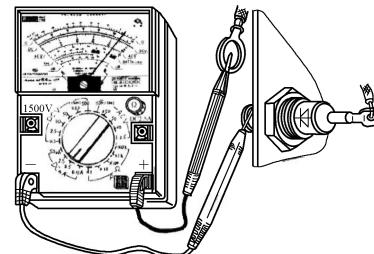


图 2-16 测量直流电流

### (5) 测量直流电流

请注意：万用表测量直流电流时的最大量程一般只有 2.5A，如图 2-16 所示。

① 按估计的被测电流值设置旋钮 2 的位置。

② 断开被测电路，并确定两断点的正、负。“+”表笔接电路正极端，“-”或“\*”表笔接电路负极端，即将万用表串联在被测电路中。

③ 按所选取挡位及指针指示的 DCV·A 刻度线上的读数，求得被测电流值。

如图 2-16 中所示：挡位是 25mA，指针指在 DCV·A 量程为 125 的刻度线的 112 格处，则被测电流为

$$(25\text{mA} \div 125) \times 112 = 22.4\text{mA}$$

④ 将旋钮 2 旋到 ACV-500V 处。

### 3. 数字式万用表

数字式万用表主要由数字式电压基本表、测量线路、量程转换开关组成。数字式电压基本表相当于指针式万用表的测量机构。测量线路将被测的各种电量转换为微小的直流电压，供数字式电压基本表以数码的形式显示数值。转换开关的作用是接通不同的测量线路。图 2-17 为常用的 DT-830 型数字式万用表的面板图。

数字式万用表可以测量交直流电压、电流、电阻及晶体管放大倍数等。数字式万用表通常具有自动调零和极性显示功能，测量时当被测电压、电流为负时，则在显示值前出现“-”号。当被测量大于仪表量程，则显示屏左端显示“1”或“-1”。小数点由量程开关同步控制，使小数点左移或右移。

数字式万用表通常有四个插孔，黑表笔接“COM”，红表笔应根据被测量的类型选择相应的插孔。

数字式万用表的使用方法与模拟式万用表基本相同。但不同的是：用电阻挡测量晶体管应注意，红表笔接“V、Ω”插孔，带正电，黑表笔接“COM”插孔，带负电，与模拟式万用表正好相反。

数字式万用表使用完毕应将电源开关拨至“OFF”位以避免空耗电池，若长期不用，应将电池取出。

### 4. 数字式万用表使用方法和注意事项

现在，数字式测量仪表已成为主流，有取代模拟式仪表的趋势。与

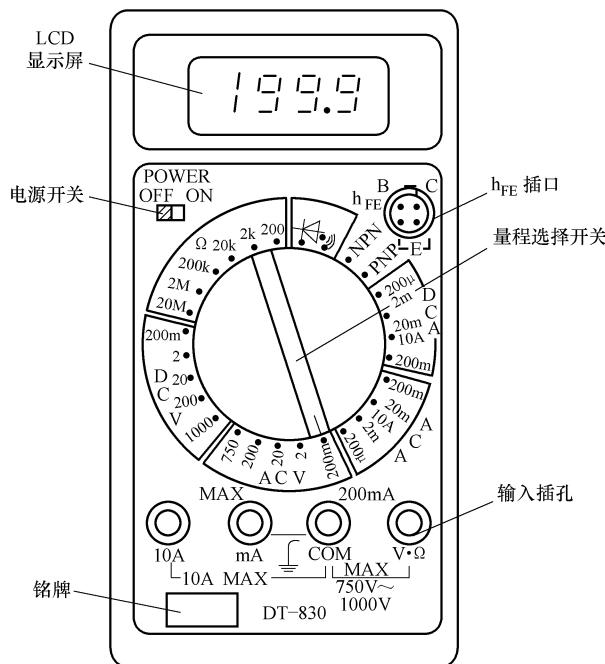


图 2-17 DT-830 型数字式万用表面板图

模拟式仪表相比，数字式仪表灵敏度高，准确度高，显示清晰，过载能力强，便于携带，使用更简单。下面以 VC9802 型数字万用表为例，简单介绍其使用方法和注意事项。

### (1) 使用方法

① 使用前，应认真阅读有关的使用说明书，熟悉电源开关、量程开关、插孔、特殊插口的作用；

② 将电源开关置于 ON 位置；

③ 交直流电压的测量：根据需要将量程开关拨至 DCA（直流）或 ACA（交流）的合适量程，红表笔插入 V·Ω 孔，黑表笔插入 COM 孔，并将表笔与被测线路并联，读数即显示；

④ 交直流电流的测量：将量程开关拨至 DCA（直流）或 ACA（交流）的合适量程，红表笔插入 mA 孔（ $< 200mA$  时）或 10A 孔（ $> 200mA$  时），黑表笔插入 COM 孔，并将万用表串联在被测电路中即可。

测量直流量时，数字式万用表能自动显示极性。

⑤ 电阻的测量：将量程开关拨至  $\Omega$  的合适量程，红表笔插入 V・ $\Omega$  孔，黑表笔插入 COM 孔。如果被测电阻值超出所选择量程的最大值，万用表将显示“1”，这时应选择更高的量程。测量电阻时，红表笔为正极，黑表笔为负极，这与指针式万用表正好相反。因此，测量晶体管、电解电容器等有极性的元器件时，必须注意表笔的极性。

## （2）使用注意事项

数字式万用表由于具有测量精确、取值方便、功能齐全等优点，因此深受无线电爱好者的欢迎。最普通的数字式万用表一般具有电阻测量、通断声响检测、二极管正向导通电压测量。交直流电压电流测量、晶体管放大倍数及性能测量等。有些数字式万用表则增加了电容容量测量、频率测量、温度测量、数据记忆及语音报数等功能，给实际检测工作带来很大的方便。但是，数字式万用表由于使用不当，在实际检测时易造成表内元件损坏，产生故障。注意事项如下：

① 如果无法预先估计被测电压或电流的大小，则应先拨至最高量程挡测量一次，再视情况逐渐把量程减小到合适位置。测量完毕，应将量程开关拨到最高电压挡，并关闭电源。

② 满量程时，仪表仅在最高位显示数字“1”，其他位均消失，这时应选择更高的量程。

③ 测量电压时，应将数字式万用表与被测电路并联。测电流时应与被测电路串联，测直流量时不必考虑正、负极性。

④ 当误用交流电压挡去测量直流电压，或者误用直流电压挡去测量交流电压时，显示屏将显示“000”，或低位上的数字出现跳动。

⑤ 禁止在测量高电压（220V 以上）或大电流（0.5A 以上）时换量程，以防止产生电弧，烧毁开关触点。

⑥ 当显示“”、“batt”或“low bat”时，表示电池电压低于工作电压。

⑦ 用毕将挡位拨到 OFF 挡。

## 五、绝缘电阻表

机械式绝缘电阻表俗称“摇表”，是电气测量中最常用的便携式仪表，主要测量电气设备的绝缘电阻。通过测量的绝缘电阻值，可以发现电气设备绝缘的脏污、异物、受潮、击穿等缺陷，从而判断电气设备是

否能继续运行。

### 1. 绝缘电阻表的组成

绝缘电阻表的种类很多，但基本结构相同，主要由一个磁电系的比率表和高压电源（常用手摇发电机或晶体管电路产生）组成。磁电系比率表一般由磁路部分、电路部分、指针等组成。磁路部分由永久磁铁、极掌、圆柱形铁心等构成。电路部分由两个可动的线圈（称之为动圈）构成。两个动圈彼此相交成一固定夹角，永久磁铁连同指针固定在同一轴上。可动线圈中的电流是通过导流丝导入的，当通入电流后，两个动圈内部的电流方向是相反的。此外，动圈内是有开口的铁心，所以磁路空气隙内的磁场是不均匀的。

绝缘电阻表的结构原理和线路原理如图 2-18 所示。从图中可以看出，被测的电阻  $R_x$  接于绝缘电阻表的“线”（线路）和“地”（接地）端钮之间，另外在“线”端钮外圈还有一个铜质圆环，叫保护环，又称屏蔽接线端钮，符号为“G”，它与发电机的负极直接相连。被测绝缘电阻  $R_x$  与附加电阻  $R_c$  及比率表中的可动线圈 1 串联，流过可动线圈 1 的电流  $I_1$  与被测电阻  $R_x$  的大小有关。

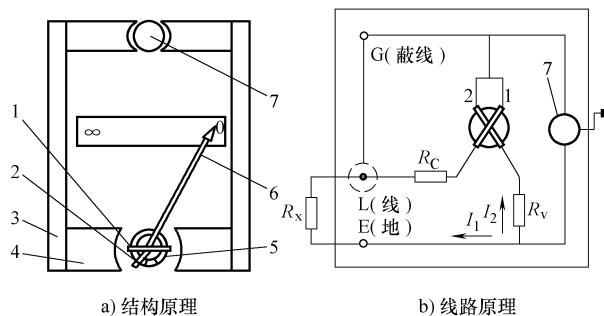


图 2-18 绝缘电阻表的结构原理和线路原理

1、2—可动线圈 3—永久磁铁 4—极掌 5—有缺口的圆环铁心  
 6—指针 7—手摇发电机  $R_C$ 、 $R_V$ —附加电阻  $R_X$ —被测电阻

## 2. 绝缘电阻表的正确使用

### (1) 绝缘电阻表选用

由绝缘电阻表的工作原理可知, 测量时将发电机的电压加在被测设备的绝缘介质上, 因此绝缘电阻表的额定电压应与被测设备的额定电压

相适应，一般可按表 2-1 选用。绝缘电阻表的有效指示范围应大于被测设备的绝缘电阻合格值。

表 2-1 绝缘电阻表选用

测量设备	设备状况	测量部位	绝缘电阻表电压等级/V	对绝缘电阻表的要求
低压电动机	新	各相绕组对机壳、各相绕组之间	1000	500MΩ 刻度
	运行中		500	
低压电力电容器	新	各极对外壳	1000	1000MΩ 刻度
	运行中		2000	2000MΩ 刻度
低压电力电缆	新	各极对外壳及其他相	1000	必须连接 G 端
	运行中			

## (2) 使用前的检查

### 1) 外观检查

绝缘电阻表使用前应做好检查工作，以确保安全操作。先检查表外观，绝缘电阻表的外观检查主要包括表的外壳是否完好；接线端子、摇柄、表头等状态是否完好；配件即测试用导线是否完好。再进行表内部检查（通过做开路、短路实验检查）。

### 2) 开路试验

将绝缘电阻表平稳放置，置于绝缘物上，将一条表线接在绝缘电阻表“E”端，另一条接在“L”端。表位放平稳，摇动手柄，使发电机转速达到额定转速 120r/min，这时指针应指向标尺的“∞”位置（有的绝缘电阻表上有“∞”调节器，可调节使指针指在“∞”位置）。

### 3) 短路试验

将“L”、“E”两端子短接，由慢到快摇动手柄，指针应指在标尺的零刻度处。否则，说明绝缘电阻表有故障，需要检修。另外，使用前，绝缘电阻表指针可停留在任意位置，这并不影响最后的测量结果。

## (3) 测量

### 1) 绝缘电阻表测量三相异步电动机的绝缘电阻

① 选用绝缘电阻表：测量三相笼型异步电动机绝缘电阻一般测量额定电压 500V 以下的运行过的电动机，选择 500V 绝缘电阻表。测量额定电压为 500~3000V 的电动机选 1000V 绝缘电阻表。测量额定电压在 3000V 以上电动机选 2500V 绝缘电阻表。额定电压在 500V 以下的新

电动机在使用前应使用 1000V 绝缘电阻表进行测量。

② 正确连接绝缘电阻表的接线：根据检测的项目可按图 2-19、图 2-20 所示正确连接绝缘电阻表的接线。

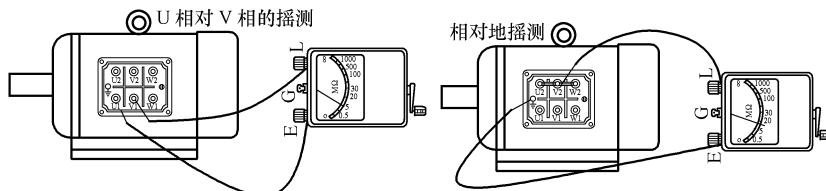


图 2-19 测量相间绝缘电阻的接线图

图 2-20 测量电动机定子绕组对地绝缘电阻的接线

③ 用绝缘电阻表测量三相异步电动机的相间绝缘电阻：相间绝缘电阻是指三相绕组彼此之间的绝缘电阻，测量相间绝缘时，先将电动机三相绕组的封接点断开，绝缘电阻表与电动机绕组接线如图 2-19 所示，绝缘电阻表的 L 与 E 两端子，分别接电动机的两相绕组，绕组各相间的绝缘电阻，可借助绕组的六个引出线接头来测量。测量时可将绝缘电阻表的两个接头轮流接到各相绕组的引线接头上，分三次测出 U—V、U—W、V—W 三个绝缘电阻值。

绝缘电阻表测量电动机定子绕组对地绝缘电阻接线如图 2-20 所示。测量时，应先拆除电动机与电源的连线，将绝缘电阻表上用来接地的一端与电动机的外壳相接，另一端依次与所测试绕组相接；然后均匀摇动摇柄（摇速以 120r/min 为宜），待指针稳定，所读取的绝缘电阻表数值即为绕组对地绝缘电阻。

④ 绝缘电阻表测量三相异步电动机的绝缘合格的判定标准：额定电压在 500V 以下运行过的电动机其最低合格值均为  $0.5\text{M}\Omega$ 。新安装的电动机绝缘电阻合格值不得低于  $1\text{M}\Omega$ 。

## 2) 用绝缘电阻表测量电缆的绝缘

① 选用绝缘电阻表：测量电缆时应按额定工作电压选择绝缘电阻表，额定工作电压在 1kV 以下的电缆应选用 1000V 绝缘电阻表，额定工作电压在 6000V 以上的电缆选用 2500V 绝缘电阻表。测量电缆绝缘电阻时，因其绝缘材料表面易产生漏电流，所以需使用绝缘电阻表的 G 端子，其屏蔽漏电流的原理如图 2-21 所示。

从图 2-21 中可看到, 磁电系比率表指针偏转与  $I_1$  有关。由于被测设备表面有漏电流  $I_g$ , 如果不加一个金属的保护环即 G 端子, 漏电流  $I_g$  就会沿导线表面直接进入 L 端子, 混入工作电流  $I_1$  中, 从而使测量产生误差。而加入保护环后, 漏电流  $I_g$  经 G 端子引入发电机负极, 而不经过动圈, 从而避免了测量的误差。

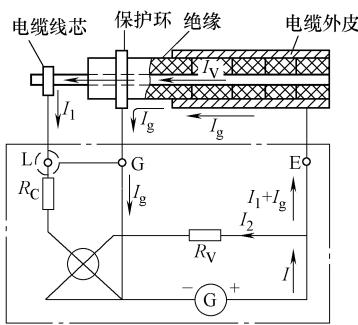


图 2-21 使用 G 端子作用原理

② 正确连接绝缘电阻表的接线: 根据检测的项目可按图 2-22 所示正确连接绝缘电阻表的接线。

③ 用绝缘电阻表测量电缆的绝缘: 电力电缆各缆芯及与外皮间均有较大的电容。因此, 对电力电缆绝缘电阻的测量, 应首先断开电缆的电源及负荷, 并经充分放电之后方可进行, 而且一般应在干燥的气候条件下进行测量。

现在以 1kV 以下的电力电缆为例, 说明使用绝缘电阻表对其测量的方法和步骤如下:

- 对运行中的电缆要先停电, 然后对停电电源验电, 防止错拉闸。
- 对已退出运行的电缆放电, 先将各缆芯对地放电, 然后相间放电, 电缆越长, 放电时间也要越长, 直到看不出火花或听不到放电声为止。

c) 拆除电缆两端与设备或线路的接线。

d) 测量项目如下:

- U 相对 V 相、W 相、N 线及外皮;
- V 相对 U 相、W 相、N 线及外皮;
- W 相对 U 相、V 相、N 线及外皮;
- N 线对 U 相、V 相、W 相及外皮。
- 摇测 U 相对 V 相、W 相、N 线及外皮。

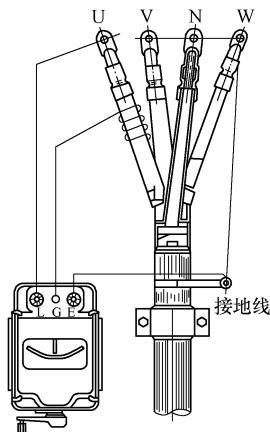


图 2-22 测量电缆 U 相对 V 相、W 相、N 线及外皮的实际接线图

外皮的绝缘电阻接线见图 2-22。绝缘电阻表的 L 端子应与 U 相导体连接（注意摇测前先不接，而是用绝缘杆将 L 线挑起待接）；V 相、W 相与 N 线用裸导线封接后与电缆的外层连接。同时，绝缘电阻表的 E 端子也接在电缆的外层上，G 端子与包敷 U 相导体的绝缘层连接。

f) 摆测时要两人操作。一人摇表，一人去搭接 L 线。一人先将绝缘电阻表摇到额定转速 120r/min，另一人去将 L 线接在 U 相上，绝缘电阻表指针稳定 1min 后指针稳定读数，然后先将 L 线撤下再停止摇表。

g) 停摇后 U 相要对地放电，然后按此方法步骤测量 V 相、W 相、N 线对地的绝缘电阻。

### 3) 用绝缘电阻表测量电缆的绝缘合格的判定标准

测量 1kV 电力电缆应选用 1000V 绝缘电阻表，其绝缘电阻合格值是，在电缆长度为 500m 及以下、电缆温度为 20℃ 时，应不低于  $10M\Omega$ 。测量 10kV 电力电缆应选用 2500V 绝缘电阻表，其绝缘电阻合格值是，在电缆长度为 500m 及以下、电缆温度为 20℃ 时，应不低于  $400M\Omega$ ；三相不平衡系数不大于 2.5；与上次测量值相比下降程度不超过 30%。

### 4) 绝缘电阻表怎样测量电容器的绝缘

① 正确选用绝缘电阻表：测量新低压电容器（交接试验）应选用 1000V 绝缘电阻表，并有  $2000M\Omega$  的刻度；测量运行中的低压电容器（预防性试验）应选 500V 或 1000V 绝缘电阻表，并有  $1000M\Omega$  的刻度；测量高压电容器时，选 2500V 绝缘电阻表。

② 正确连接绝缘电阻表的接线：根据检测的项目可按图 2-23 所示正确连接绝缘电阻表的接线。

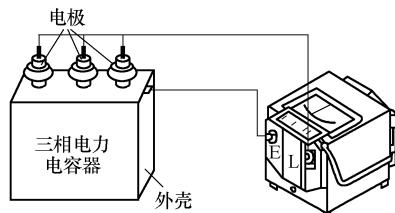


图 2-23 电力电容器绝缘电阻测量接线图

③ 用绝缘电阻表测量电容器的绝缘：三相电力电容器绝缘电阻的测量，以运行中的三相电力电容器为例，应按以下顺序进行：测量电容

器前首先需要停电→静候 3min (使其在自动放电装置上放电)→人工放电 (先各极对地放电、再极间放电)→拆除电容器上原接线→擦拭电容器瓷套管→将电容器 3 个接线端用裸导线短路→将绝缘电阻表的 E 端子接线与电容器的外壳 (电容器已在架构上, 可以接在架构上) 连接→绝缘电阻表的 L 端子接线固定在绝缘杆端部的金属部分→一人手持绝缘杆, 将线挑起悬空 (并指挥摇表人)→另一人摇动绝缘电阻表 (120r/min)→持杆人使 L 线接触被测电容器的电极 (并开始计时)→1min 后读取读数→读数完毕, L 端线先撤下→再停止摇表 (听持杆人的指挥)→放电。

④ 用绝缘电阻表测量电容器的绝缘合格的判定标准: 额定电压为 0.4kV 新电力电容器的绝缘电阻值应不小于  $2000\text{M}\Omega$ , 运行过的绝缘电阻值应不小于  $1000\text{M}\Omega$ 。

#### (4) 绝缘电阻表在使用中应注意的事项

① 正确地选择绝缘电阻表并做充分的检查。

② 测量前, 应切断被测设备的电源, 并对被测设备进行充分的放电, 保证被测设备不带电。用绝缘电阻表测试过的电气设备, 也要及时放电, 以确保安全。

③ 被测对象的表面应清洁、干燥, 以减小测量误差。

④ 绝缘电阻表与被测设备间的连接线应用单根绝缘导线分开连接, 应使用专用测量线。两根连接线不可缠绞在一起, 也不可与被测设备或地面接触, 以避免导线绝缘不良而引起误差。

⑤ 测量时, 摆动手柄的速度由慢逐渐加快, 并保持在 120r/min 左右的转速, 测量 1min 左右, 这时读数才是准确的结果。如果被测设备短路, 指针指零, 应立即停止摇动手柄, 以防表内线圈发热而损坏仪表。

⑥ 对大型电动机摇测前后要放电 (大型电动机指 Y 系列电动机中心高 630mm 以上, JO2 系列 16 号机座以上)。

⑦ 测量电解电容器的介质绝缘电阻时, 应按电容器耐压的高低选用绝缘电阻表, 注意电容器的正极接 “L”, 负极接 “E”, 不可反接, 否则会使电容器击穿。

⑧ 被测电缆停电后应采取必要的安全技术措施, 被测电缆的另一端应有人看守或装设临时遮拦, 挂警告牌。

⑨ 测量电感性或电容性设备时，例如大容量电动机、电力电容器、电力电缆等，除测前须放电，测量完毕后也应充分放电后再拆线。测量时对“L”线应遵循“先摇后接，先撤后停”的原则。不允许带电测量绝缘电阻，以防发生人身触电事故或设备损坏事故的发生。

⑩ 测量前，还应掌握环境温度及相对湿度，以便进行绝缘分析，当湿度较大时，应接屏蔽线。测量时，注意与附近带电体的安全距离，必要时应设监护人。

⑪ 防止无关人员靠近，人体不得接触被测端和绝缘电阻表上的接线端。测量时，测试人员应注意与周围带电体保持安全距离，应远离大电流导体和强磁场。

⑫ 禁止在有雷电时或邻近有高压设备时使用绝缘电阻表，以免发生危险。

## 第二节 电能表的接线及读表

### 一、分类和选择原则

交流电能表俗称电动表，简称电表，是记录电路用电数值的仪表，计量单位一般用千瓦·时，用符号表示为“ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ”，俗称“度”，即 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 为1度。 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 即功率为 $1\text{kW}$ 的用电设备通电工作 $1\text{h}$ 所耗费的电能。

当用电设备的耗电元件为纯电阻时，在一段时间 $t$ （h）内所消耗的电能 $W$ （ $\text{W} \cdot \text{h}$ ）即等于其两端的电压 $U$ （V）、流过的电流 $I$ （A）以及通电时间 $t$ （h）三者的乘积，即

$$W = UIt$$

交流电能表分为单相和三相两大类，每一类中，又可分为传统的感应式和新型的电子数显式、电子预付费式等品种。

图2-24所示为一台单相和一台三相感应式交流电能表的内部主要结构和接线示意图。

每一个品种又可按其额定电流分成若干个规格。普通电能表的准确度等级为1.5级。

选择电能表的依据有两个，一个是额定电压，另一个是额定电流（习惯称为标定电流）。我国单相电源电压一般为220V，所以单相电能表的额定电压也应为220V。额定电流的选择应根据所带用电设备的总

电流值，电能表标定的额定电流应不小于该总电流值，但为了保证仪表的准确度，也不应大于用电总电流值的4倍。用电总电流值可用所用电器总功率（有功功率）除以额定电压求得。当额定电压  $U_N$  为220V，功率  $P_N$  单位用kW，在用电设备全为电阻性负载时，用电总电流值  $I_Z$  (A) 应为

$$I_Z = \frac{1000P_N}{U_N} = \frac{1000P_N}{220} \approx 4.5455P_N \approx 5P_N$$

简单计算时，可用  $I_Z \approx 5P_N$ 。

在现代生活中，单相用电设备中的大部分已不是纯电阻负载了，所以其电流要大于上式计算的结果，一般大10%~20%。所以按总功率的5倍计算用电的总电流值应该是比较合理的。

但考虑到所有电器不会同时使用的现实，以及电能表4（或2）倍标定电流值的“过载”能力，为了节约购置电能表的投资，核算选择电能表额定电流的数值不应按上述计算的总电流数值。实践证明，按功率千瓦总数的3倍即可满足要求。

在仪表的表盘上标出的电流值有两个，其中一个放在括号内，例如5(20)A。两个数值均成倍数关系，一般为2倍或4倍。其中括号外的数值较小，叫做标定值，或称为额定值，是选择配套电路电流的主要依据，也是保证仪表准确度和正常工作的电流值；括号内的数值较大，叫做允许过电流值，仪表可在其范围内工作，但其准确度将不能保障，并且不适宜长期使用。

## 二、低压单相交流电能表的直接接线方法

如图2-25所示，较小电流（几十安培以下）低压（300V以下）单相电能表有4个接线端口（或称接线孔）。从左到右标号为1、2、3、4时，若直接与电源线相接（即电能表的最大允许电流和额定电压不小于被测电路的最大电流和电压，所以不用通过电流互感器和电压互感器扩大量程）时，从电源端来的相线接1端；2端接去向负载的相线；3端接电源端的零线（即中性线，下同）；4端接去向负载的零线。

若将进（由电源端来为进）、出（去向负载端为出）两条相线接颠倒，电能表的转盘将不能正常旋转（反转），并得出错误的计量结果。但因零线的进、出端在接线盒内实际上是一条线，所以颠倒后无任何影响，只是不符合规矩而已。

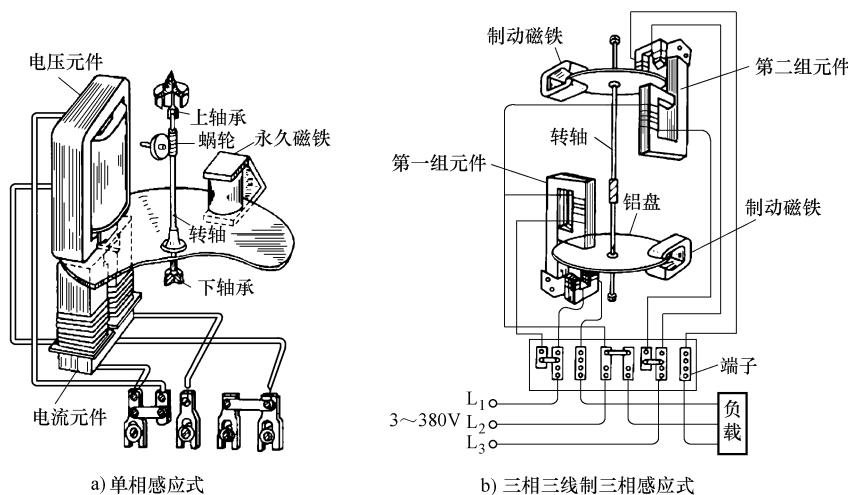


图 2-24 感应式交流电能表的结构和接线

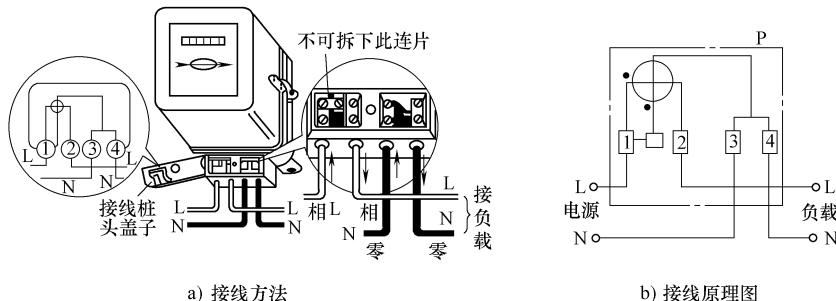


图 2-25 单相交流电能表的直接接线方法

接线时，一定要注意将各条线用紧固螺钉压紧，但又要注意不要因用力过大而压断部分导线。为此，应尽可能地使用独股硬导线，若导线较细，可打一回头成双股；对于多股软导线，最好事先将接线部分搪锡。为了避免压断导线，可在导线与压紧螺钉之间垫上一块铜片。

另外要注意的是，接相线的部位有一个小的连接片，它是连接表内电压线圈的，所以千万不要拆下，否则仪表的转盘将不会转动。

### 三、通过电流互感器与电源相接的单相低压电能表接线方法

单相电能表电流和电压的量限是具有一定限度的，电流最高可达到几

十安培，电压最高在几百伏特。当被计量的用电线路电流或电压超过电能表的最高量限时，则要通过电流互感器（字母符号为 TA，早期曾用过 CT）和电压互感器（字母符号为 TV，早期曾用过 PT）扩大量程。对于低压供电线路，一般只用电流互感器。

如图 2-26 所示为电流互感器的外形图和接线图，电流互感器一次侧接被测电路，其  $L_1$  端接电源相线的来线， $L_2$  端接负载。电流互感器二次侧“ $K_2$ ”接线柱的外壳和铁心都必须可靠接地，安装时电流互感器应装在电能表的上方。流过它的电流即为电路电流的实际值。因此，在选择电流互感器时，其一次电流标定值应在被测量线路最大电流的 1.1 倍左右。

常用的电流互感器二次侧额定电流为 5A，所以要求配用电能表的电流量程也应为 5A。

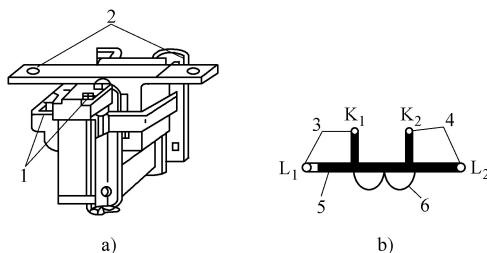


图 2-26 电流互感器

1—二次绕组接线柱 2—一次绕组接线柱 3—进线柱  
4—出线柱 5—一次绕组 6—二次绕组

接入电流互感器后，电能表显示的用电数值乘以电流互感器的电流比即为被测量电路所用的电量实际值。例如一段时间后，电能表显示的用电量为  $10\text{kW} \cdot \text{h}$ ，电流互感器的电流比为  $100/5 = 20$ ，则被测量电路所用的电量实际值为  $20 \times 10\text{kW} \cdot \text{h} = 200\text{kW} \cdot \text{h}$ ，如图 2-27 所示。

#### 四、三相三线制低压电能表直接接线方法

为三相电源供电的用电设备的供电线路一般为三相三线制，即只有三条相线。若电流较小，即在电能表电流容许的范围之内，电压也在电能表电压容许的范围之内，则可将来自电源的三条线和去向用电设备的三条线直接接在电能表的接线端上，如图 2-28 所示。

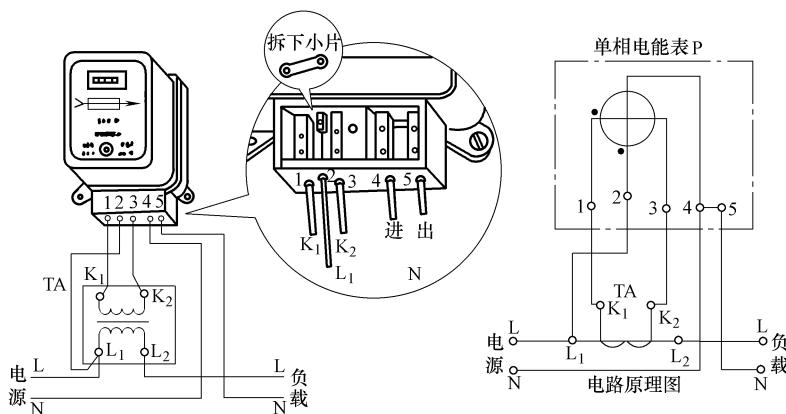


图 2-27 通过电流互感器与电源相接的单相电能表接线方法

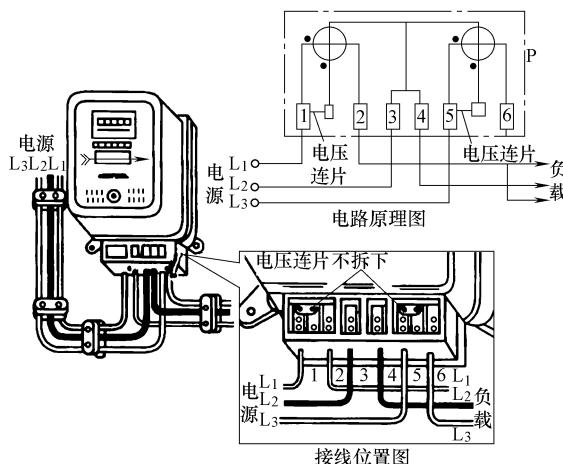


图 2-28 三相三线制三相电能表直接接线的接线方法

## 五、三相三线制低压电能表接电流互感器时的接线方法

当要计量的三相三线制供电线路电流较大时，就必须通过电流互感器扩大电能表的电流量程。

需要注意的是，一定要按规定的接线顺序连接电流互感器的一次和二次线，一旦有误，则会造成计量失准的后果；如电压线和电流线相互接错，还可能造成短路事故。

电流互感器的  $K_2$  端和铁心应接地，电压线中应串联熔断器，是保

证电能表及用电线路安全的措施。

用电流互感器电流比乘以电能表的读数，即为实际用电量。例如电流互感器电流比为 50A/5A，电能表的读数为 5kW·h，则实际用电量为

$$(50A/5A) \times 5kW \cdot h = 10 \times 5kW \cdot h = 50kW \cdot h$$

接线方法如图 2-29 所示。

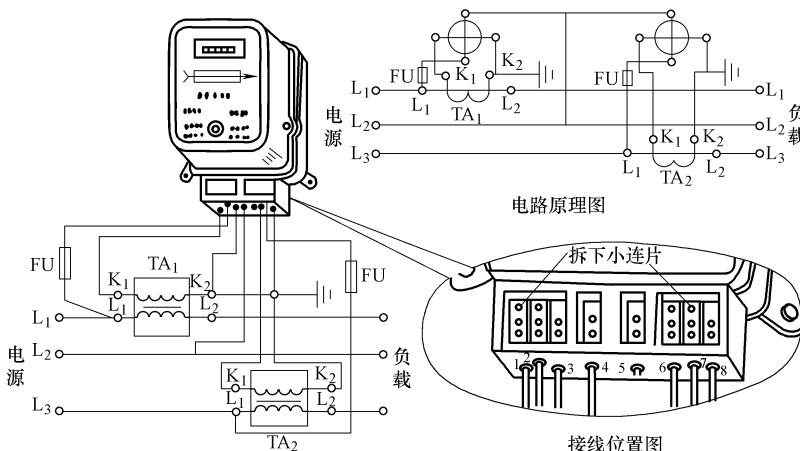


图 2-29 三相三线制供电时低压电能表接电流互感器的接线方法

### 六、三相四线制供电时低压电能表直接接线方法

用于直接计量三相四线制供电电路用电量的三相电能表有 8 个接线端子，还是从左到右排列，则前面 6 个（3 对）接线端子接三相相线的进出线，其接线规定同三相三线制无互感器的接法；后两个端子（7、8 号端子）接零线。电压连接片不拆下。如图 2-30 所示。

### 七、电能表的选用

① 根据电力系统的相数和线数选择单相电能表、三相三线电能表或三相四线电能表。

② 电能表的额定电压应与电力系统电压一致。

③ 电能表的额定电流应不小于被测电路的最大负荷电流。电能表铭牌上的额定电流通常标有两个数值，应以括号外的数值为准。

### 八、电能表的安装技术要求

照明电能表的安装通常是在完成布线和安装完灯具、灯泡、灯管之

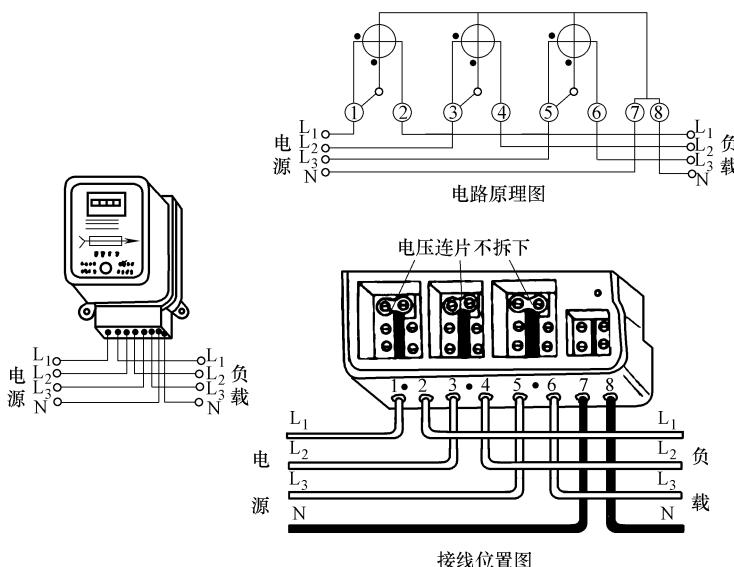


图 2-30 三相四线制供电时低压电能表直接接线方法

后，才安装配电箱、电能表等。

安装技术要求：

- ① 电能表应安装在塑料底板上。
- ② 电能表不得安装过高，一般以距地面 1.8 ~ 2.2m 为宜。
- ③ 电能表不得倾斜，其垂直方向的偏移不大于 1°，否则会增大计量误差。
- ④ 电能表的安装部位，现住宅多采用集表箱安装在走廊。
- ⑤ 电能表的进线出线，应使用铜芯绝缘线，芯线截面积不得小于 4mm<sup>2</sup>。接线要牢固，但不可焊接，裸露的线头部分，不可露出接线盒。

### 九、电能表的读数

使用电能表的目的是要知道被测负载所消耗电能的度数，所以一定要了解怎样从电能表的读数求得实际消耗的电能数。

- ① 如果电能表未经互感器直接接入线路，可以从电能表直接读得实际电能数。
- ② 如果电能表利用电压互感器和电流互感器扩大量程时，应考虑电压互感器和电流互感器的电压比和电流比，实际消耗的电能应为电能

表的读数乘以电流互感器和电压互感器的变比值。

#### 十、使用互感器注意事项

电流互感器和电压互感器在安装及运行时要注意三点：

- ① 在电流互感器二次侧不得开路，电压互感器不得短路；
- ② 电流互感器和电压互感器的二次侧有一端必须接地；
- ③ 电流互感器和电压互感器两侧接线端子的极性必须接对。

# 第三章 电工常用工具及电动工具

## 第一节 电工常用工具

### 一、通用工具

#### 1. 验电器

验电器又叫电压指示器，是用来检查导线和电器设备是否带电的工具。验电器分为高压和低压两种。

##### (1) 低压验电器

低压验电器又称试电笔，是检验导线、电器是否带电的一种常用工具，检测范围为 60~500V，有钢笔式、旋具式和组合式多种。

低压验电器由笔尖、降压电阻、氖管、弹簧、笔尾金属体等部分组成，如图 3-1 所示。

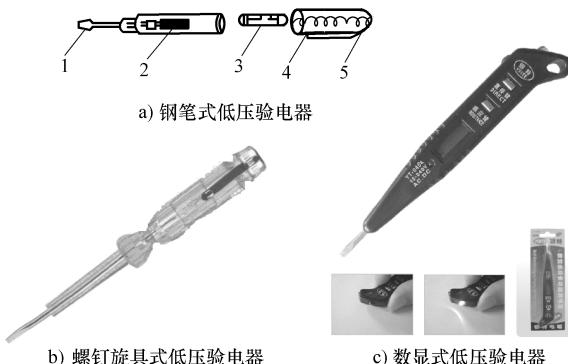


图 3-1 低压验电器

1—笔尖 2—降压电阻 3—氛管 4—弹簧 5—笔尾金属体

使用低压验电器时，注意手指必须接触笔尾的金属体（钢笔式）或测电笔顶部的金属螺钉（螺丝刀式）。这样，只要带电体与大地之间的电位差超过 50V 时，电笔中的氖泡就会发光。

低压验电器的使用方法和注意事项：

① 使用前，先要在有电的导体上检查电笔是否正常发光，检验其可靠性。

② 在明亮的光线下往往不容易看清氖泡的辉光，应注意避光。

③ 电笔的笔尖虽与螺丝刀形状相同，它只能承受很小的扭矩，不能像螺丝刀那样使用，否则会损坏。

④ 低压验电器可以用来区分相线和零线，氖泡发亮的是相线，不亮的是零线。低压验电器也可用来判别接地故障。如果在三相四线制电路中发生单相接地故障，用电笔测试中性线时，氖泡会发亮；在三相三线制线路中，用电笔测试三根相线，如果两相很亮，另一相不亮，则这相可能有接地故障。

⑤ 低压验电器可用来判断电压的高低。氖泡越暗，则表明电压越低；氖泡越亮，则表明电压越高。

## (2) 高压验电器

高压验电器又称为高压测电器。主要类型有发光型高压验电器、声光型高压验电器。发光型高压验电器由握柄、护环、紧固螺钉、氖管窗、氖管和金属探针（钩）等部分组成。图 3-2 所示为发光型 10kV 高压验电器。

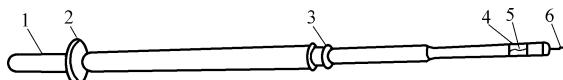


图 3-2 10kV 高压验电器

1—握柄 2—护环 3—紧固螺钉 4—氖管窗 5—氖管 6—金属探针

### 高压验电器使用注意事项：

① 使用前首先确定高压验电器额定电压必须与被测电气设备的电压等级相适应，以免危及操作者人身安全或产生误判。

② 验电时操作者应戴绝缘手套，手握在护环以下部分，同时设专人监护。同样应在有电设备上先验证验电器性能完好，然后再对被验电设备进行检测。注意操作中是将验电器渐渐移向设备，在移近过程中若有发光或发声指示，则立即停止验电。

③ 使用高压验电器时，必须在气候良好的情况下进行，以确保操作人员的安全。

④ 验电时人体与带电体应保持足够的安全距离，10kV 以下的电压

安全距离应为 0.7m 以上。

⑤ 验电器应每半年进行一次预防性试验。

## 2. 常用旋具和电工刀

### (1) 常用旋具

螺丝刀又称起子或旋凿，是用来紧固或拆卸带槽螺钉的常用工具。

螺丝刀按头部形状的不同，有一字形和十字形两种，如图 3-3 所示。



图 3-3 螺丝刀

一字形螺丝刀用来紧固或拆卸带一字槽的螺钉，其规格用柄部以外的体部长度表示，电工常用的有 50mm、150mm 两种。

十字形螺丝刀是专供紧固或拆卸带十字槽螺钉的，其长度和十字头大小有多种，按十字头的规格分为四种型号：1 号适用的螺钉直径为 2~2.5mm，2 号为 3~5mm，3 号为 6~8mm，4 号为 10~12mm。

另外，还有一种组合式螺丝刀，它配有一种规格的一字头和十字头，可以方便更换，具有较强的灵活性，适合紧固和拆卸多种不同的螺钉。

此外多用改锥是一种组合式工具，既可作改锥使用，又可作低压验电器使用，此外还可用来进行锥、钻、锯、扳等。它的柄部和螺丝刀是可以拆卸的，并附有规格不同的螺丝刀、三棱锥体、锯片、锉刀等附件。

螺丝刀是电工最常用的工具之一，使用时应选择带绝缘手柄的螺丝刀，使用前先检查绝缘是否良好；螺丝刀的头部形状和尺寸应与螺钉尾槽的形状和大小相匹配，严禁用小螺丝刀去拧大螺钉，或用大螺丝刀拧小螺钉；更不能将其当凿子使用。

### (2) 电工刀

电工刀是用来剖削导线、电缆的绝缘层和切割木台缺口，削制木枕等电工器材的常用工具，电工刀外形如图 3-4 所示。

电工刀的刀口磨制成分面呈圆弧状的刀口，刀刃部分锋利一些。在剖削电线绝缘层时，可把刀略微向内倾斜，用



图 3-4 电工刀

刀刃的圆角抵住线芯，刀口向外推出。这样既不易削伤线芯，又防止操作者受伤。

切忌把刀刃垂直对着导线切割绝缘，以免削伤线芯。严禁在带电体上使用没有绝缘柄的电工刀进行操作。

### 3. 钢丝钳和尖嘴钳

#### (1) 钢丝钳

钢丝钳又称克丝钳、老虎钳，是电工应用最频繁的工具。

电工钢丝钳由钳头和钳柄两部分组成。钳头包括钳口、齿口、刀口、侧口四部分，其结构如图 3-5 所示。其中钳口可用来钳夹和弯绞导线；齿口可代替扳手来拧小型螺母；刀口可用来剪切电线、掀拔铁钉；侧口可用来侧切钢丝等硬金属丝。电工用尖嘴钳采用绝缘手柄，其耐压等级为 500V。

使用钢丝钳时应注意：

① 使用前，必须检查其绝缘柄，确定绝缘状况良好，否则，不得带电操作，以免发生触电事故。

② 用钢丝钳剪切带电导线时，必须单根进行，不得用刀口同时剪切相线和零线或者两根相线，以免造成短路事故。

③ 使用钢丝钳时要刀口朝向内侧，便于控制剪切部位。

④ 不能用钳头代替手锤作为敲打工具，以免变形。钳头的轴销应经常加机油润滑，保证其开闭灵活。

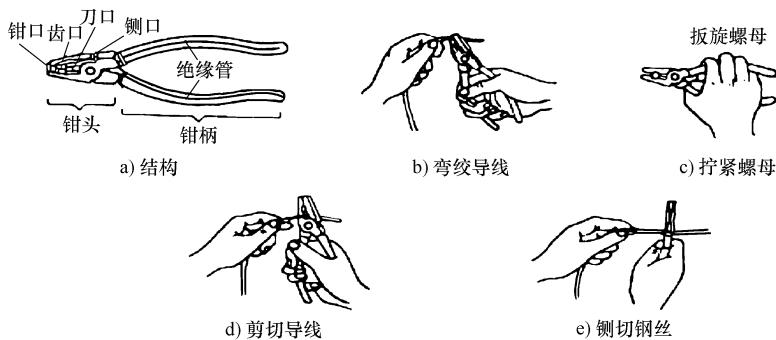


图 3-5 钢丝钳的结构用途

电工用钢丝钳的柄部套有绝缘套管（耐压 500V），其规格用钢丝钳全长的毫米数表示，常用的有 150mm、175mm、200mm 等。

### (2) 尖嘴钳

尖嘴钳的外形图如图 3-6 所示，用法与钢丝钳相似，其特点是尖嘴钳的头部尖细，适用于在狭小的工作空间操作，能夹持较小的螺钉、垫圈、导线及电器元件。在安装控制线路时，尖嘴钳能将单股导线弯成接线端子（线鼻子），尖嘴钳的小刀口用于剪断导线、金属丝、剥削导线的绝缘层等。电工用尖嘴钳采用绝缘手柄，其耐压等级为 500V。



图 3-6 尖嘴钳

## 4. 断线钳和剥线钳

### (1) 断线钳

断线钳又称斜口钳，断线钳的头部“扁斜”，因此叫斜口钳、扁嘴钳或剪线钳，是专供剪断较粗的金属丝、线材及导线、电缆等用的。它的柄部有铁柄、管柄、绝缘柄之分，电工用斜口钳的钳柄采用绝缘柄，外形如图 3-7 所示，其耐压等级为 1000V。



图 3-7 断线钳

### (2) 剥线钳

剥线钳用来剥削直径 3mm 及以下绝缘导线的塑料或橡胶绝缘层，其外形如图 3-8 所示。它由钳口和手柄两部分组成。剥线钳钳口分有 0.5~3mm 的多个直径切口，用于不同规格线芯的剥削。使用时应使切口与被剥削导线芯线直径相匹配，切口过大难以剥离绝缘层，切口过小会切断芯线。剥线钳手柄也装有绝缘套。电工用剥线钳采用绝缘手柄，其耐压等级为 500V。



图 3-8 剥线钳

## 5. 扳手

### (1) 活扳手

活扳手如图 3-9 所示，是一种旋紧或拧松有角螺钉或螺母的工具。

常用的有 150mm、200mm、250mm、300mm 等几种。使用时应根据螺母的大小选配。使用时，右手握手柄。手越靠后，扳动起来越省力。扳动小螺母时，因需要不断地转动蜗轮，调节扳口的大小，所以手应握在靠近固定扳口，并用大拇指调制蜗轮，以适应螺母的大小。活扳手的扳口夹持螺母时，固定扳口在上，活动扳口在下。活扳手切不可反过来使用。

在扳动生锈的螺母时，可在螺母上滴几滴煤油或机油，这样就好拧动了。在拧不动时，切不可采用钢管套在活扳手的手柄上来增加扭力，因为这样极易损伤活动扳口。扳动大螺母时，需用较大力矩，手应握在靠近柄尾处。扳动小螺母时，需用力矩不大，但螺母过小，易打滑，因此手应握在接近头部的地方并且可随时调节蜗轮，收紧活动扳口，防止打滑。

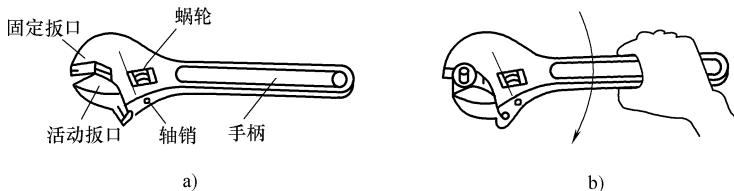


图 3-9 活扳手的构造及使用

注意：活扳手不可反用，也不可用钢管接长手柄来施加较大的扳拧力矩。活扳手不得当作撬棒或手锤使用。

## (2) 固定扳手

固定扳手（俗称呆扳手）的扳口为固定口径，不能调整，但使用时不易打滑。

## 二、登高用具

### 1. 安全帽

安全帽如图 3-10 所示，是用来保护施工人员头部的，必须由专门

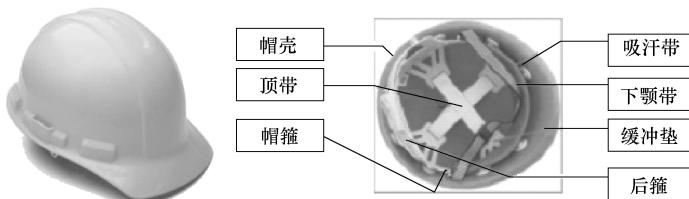


图 3-10 安全帽

工厂生产。

### 2. 安全带

安全带如图 3-11 所示，是大带和小带的总称，用来防止发生空中坠落事故。腰带用来系挂保险绳、腰绳和吊物绳，系在腰部以下、臀部以上的部位。

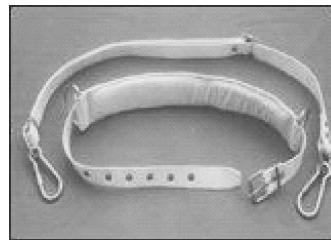


图 3-11 安全带

### 3. 踏板

踏板又叫登高板，用于攀登电杆，由板、绳、钩组成，如图 3-12 所示。

### 4. 脚扣

脚扣也是攀登电杆的工具，主要由弧形扣环、脚套组成，分为木杆脚扣和水泥杆脚扣两种，如图 3-13 所示。

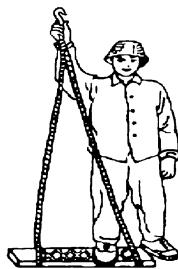


图 3-12 踏板

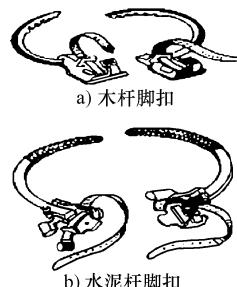


图 3-13 脚扣

### 5. 梯子

梯子如图 3-14 所示，是最常用的登高工具之一，有单梯、人字梯（合页梯）、升降梯等几种，用毛竹、硬质木材、铝合金等材料制成。使用梯子应注意以下几点：



图 3-14 梯子

- ① 使用前要检查有无虫蛀、折裂等。
- ② 使用单梯时，梯根与墙的夹角以  $60^{\circ}$  为宜，以防滑落和翻倒。
- ③ 使用人字梯时，人字梯的两腿应加装拉绳，以限制张开的角度，防止滑塌。
- ④ 采取有效措施，防止梯子滑落。

### 三、常用防护用具

#### 1. 绝缘棒

绝缘棒主要是用来闭合或断开高压隔离开关、跌落熔断器，以及用于进行测量和实验工作。绝缘棒由工作部分、绝缘部分和手柄部分组成，如图 3-15 所示。

#### 2. 绝缘夹钳

绝缘夹钳如图 3-16 所示，主要用于拆装低压熔断器等。绝缘夹钳由钳口、钳身、钳把组成，所用材料多为硬塑料或胶木。钳身、钳把由护环隔开，以限定手握部位。绝缘夹钳各部分的长度也有一定要求，在额定电压  $10\text{kV}$  及以下时，钳身长度不应小于  $0.75\text{m}$ ，钳把长度不应小于  $0.2\text{m}$ 。使用绝缘夹钳时应配合使用辅助安全用具。

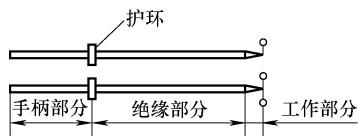


图 3-15 绝缘棒

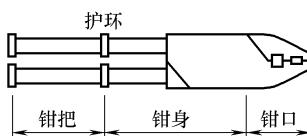


图 3-16 绝缘夹钳

#### 3. 绝缘手套

绝缘手套是用橡胶材料制成的，一般耐压较高。它是一种辅助性安全用具，一般常配合其他安全用具使用。

#### 4. 携带型接地线

携带型接地线也就是临时性接地线，在检修配电线路或电气设备时作临时接地之用，以防意外事故。携带型接地线如图 3-17 所示。

### 四、常用专用工具

#### 1. 叉杆

叉杆是外线电工立杆时使用的专用工具，由 U 形铁叉和撑杆组成，



图 3-17 携带型接地线

其外形如图 3-18 所示。

#### 2. 架杆

架杆是由两根相同直径、相同长度的圆木组成的立杆工具，其外形如图 3-19 所示。

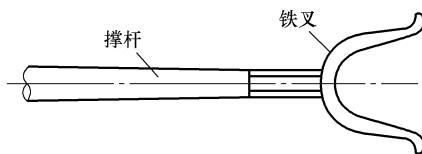
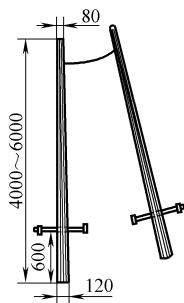


图 3-18 叉杆

#### 3. 紧线器

紧线器是用来收紧户内瓷瓶线路和户外架空线路导线的专用工具，由夹线钳、滑轮、收线器、摇柄等组成，分为平口式和虎口式两种，其外形如图 3-20 所示。



单位: mm

图 3-19 架杆



图 3-20 紧线器

#### 4. 导线压接钳

导线压接钳是连接导线时将导线与连接管压接在一起的专用工具，分为手动压接钳和手提式油压钳两类，如图 3-21 所示。

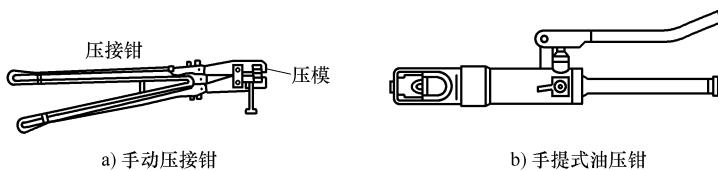


图 3-21 导线压接钳

## 第二节 电 钻

### 一、电钻的基本结构

电钻的基本结构如图 3-22 所示。它主要由电动机、减速器、手柄、钻夹头或圆锥套筒及电源连接装置等部件组成。

电钻中采用的电动机一般有单相串励电动机、三相工频笼型异步电动机和三相 200Hz 中频笼型异步电动机等三种基本型式。

电钻按其选用的电动机的型式不同可分为交直流两用串励电钻（即单相串励电钻）、三相工频电钻、三相中频电钻等。三相中频电钻因需要相应的中频电源供电，目前在国内应用较少。除了上述三种电钻外，国外有些国家已逐步采用适宜于野外作业的以直流永磁电动机作动力的小型轻巧的直流永磁电钻。

电钻在工作时，需要有一定的轴向推压力，使用时可借助于手柄来加力。手柄的结构随电钻的规格大小而有所不同，但也有利用电动机外壳作手柄的电钻。6mm 电钻一般采用手枪式结构，如图 3-23 所示。10mm 电钻采用环式后手柄结构，如图 3-24 所示，有的在左侧再加一个螺纹连接的侧手柄。13~23mm 电钻采用双侧手柄结构并带有后托架（板），它的一个侧手柄直接与机壳铸成一体或用螺钉连接成一体，另

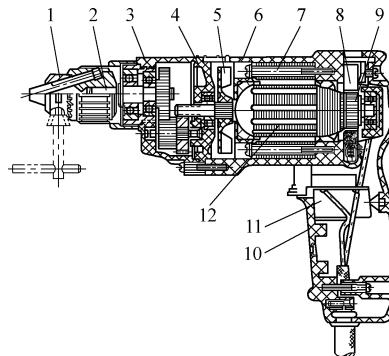


图 3-22 电钻的基本结构原理图  
 1—钻夹头 2—钻轴 3—减速器 4—中间盘  
 5—风扇 6—机壳 7—定子 8—电刷  
 9—整流子 10—手柄 11—开关 12—转子

一个侧手柄用圆锥螺纹连接。这种中型电钻单靠双手的推力还不够，还要利用后托架（板）用胸顶或用杠棒加力。32mm 以上的电钻采用双侧手柄结构并带有进给装置，以此来获得大的推力。

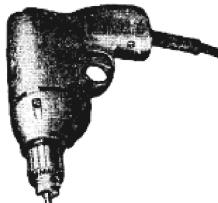


图 3-23 6mm 电钻手柄外形

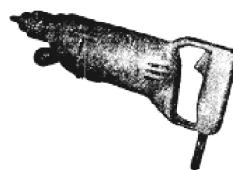


图 3-24 环式后手柄结构外形

## 二、电钻的性能

### 1. 规格

电钻的规格用加工钢铁材料（45 号钢）的最大钻孔直径来表示。对有色金属、塑料、木材等钻孔时，最大钻孔直径可相应增大 30% ~ 50%。电钻的规格按有关部门的实际使用需要、切削效率、重量等因素予以分级，一般分为 6mm、10mm、13mm、16mm、19mm、23mm、32mm、38mm、49mm 等规格。

### 2. 转速

交直流两用串励电钻的空载转速比满载转速高 40% ~ 50%。交直流两用串励电钻的负载不同，其转速也不同，以满足当轴向推力及钻孔直径不同时其转速也不同的要求。对不同的钻孔直径，为了达到理想的切削速度，要求的转速也不相同。换句话说，钻大孔时，转速应较低，反之则转速应较高。

### 3. 电钻的工作制（即工作方式）

电钻的工作方式有连续工作和断续工作两种。一般三相工频电钻为连续工作制，大部分交直流两用串励电钻为断续工作制。

## 三、电钻的使用方法

### 1. 选用

在钻孔时，对不同的钻孔直径应该尽可能选择相应的电钻规格，以充分发挥各规格电钻的性能结构特点，达到良好的切削效率，避免不必要的过载而烧坏电钻。

## 2. 接地

橡皮软线中黑色的一根为接地线，应牢固地接在机壳上。

## 3. 通风

电钻必须保持清洁、畅通，应经常清除尘埃和油污，并注意防止铁屑等杂物进入电钻内而损坏零件。

## 4. 空转

电钻使用前，先空转1min，以检查传动部分是否运转正常。

## 5. 整流子

为保证电钻正常工作，整流子的清洁和保养尤为重要，必须随时注意清除污垢。

## 6. 注意事项

①使用的钻头必须锋利。

②移动电钻时，必须握持电钻手柄，不能拖拉橡皮软线搬动电钻，并随时防止橡皮软线擦破、割破和轧坏。

③电钻一般不能在空气中含有易燃、易爆或腐蚀性气体及潮湿等特殊环境中使用，亦不能存放在潮湿、有腐蚀性气体的环境中。

④使用前应核查使用电压是否与铭牌上的电压相符，不能在超过或低于10%额定电压的电源上使用，以免烧坏电动机。

⑤轴承温升不得超过60℃。在运转时轴承和齿轮发出的声音应均匀。

⑥长期搁置不用的电钻，包括领用的新电钻，在运用前必须用500V绝缘电阻表测定绝缘电阻。

## 第三节 导线的连接

### 一、导线绝缘层的剖削

#### 1. 截面积不大于4mm<sup>2</sup>的塑料硬线绝缘层的剖削

对于截面积不大于4mm<sup>2</sup>的塑料硬线绝缘层的剖削，人们一般用钢丝钳进行，剖削的方法和步骤如下：

①根据所需线头长度用钢丝钳刀口切割绝缘层，注意用力适度，不可损伤芯线。

②接着用左手抓牢电线，右手握住钢丝钳钳头用力向外拉动，即可剖下塑料绝缘层，如图3-25所示。

③ 剥削完成后，应检查线芯是否完整无损，如损伤较大，应重新剥削。塑料软线绝缘层的剥削，只能用剥线钳或钢丝钳进行，不可用电工刀剖，其操作方法与此同。

### 2. 截面积大于 $4\text{mm}^2$ 的塑料硬线绝缘层的剥削

对于芯线截面积大于  $4\text{mm}^2$  的塑料硬线，可用电工刀来剖削绝缘层。

其方法和步骤如下：

① 根据所需线头长度用电工刀以约  $45^\circ$  角倾斜切入塑料绝缘层，注意用力适度，避免损伤芯线。

② 然后使刀面与芯线保持  $25^\circ$  角左右，用力向线端推削，在此过程中应避免电工刀切入芯线，只削去上面一层塑料绝缘。

③ 最后将塑料绝缘层向后翻起，用电工刀齐根切去。操作过程，如图 3-26 所示。

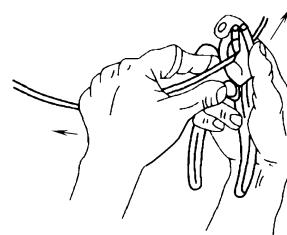


图 3-25 钢丝钳剖削塑料硬线绝缘层

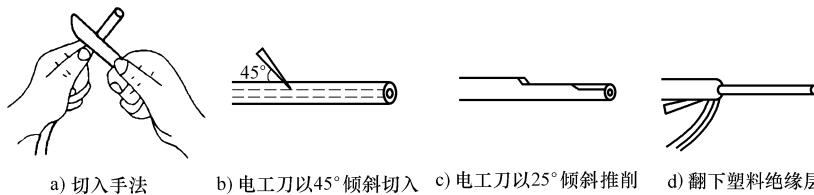


图 3-26 电工刀剖削塑料硬线绝缘层

### 3. 塑料护套线绝缘层的剖削

塑料护套线绝缘层的剖削必须用电工刀来完成，剖削方法和步骤如下：

① 首先按所需长度用电工刀刀尖沿芯线中间缝隙划开护套层，如图 3-27a 所示。

② 然后向后翻起护套层，用电工刀齐根切去，如图 3-27b 所示。

③ 在距离护套层  $5\sim10\text{mm}$  处，用电工刀以  $45^\circ$  角倾斜切入绝缘层，其他剖削方法与塑料硬线绝缘层的剖削方法相同。

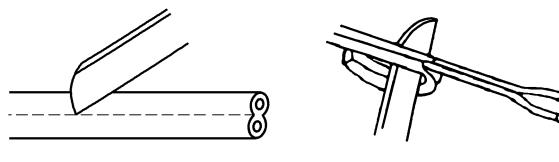


图 3-27 塑料护套线绝缘层的剖削

#### 4. 橡皮线绝缘层的剖削

橡皮线绝缘层的剖削方法和步骤如下：

- ① 先把橡皮线编织保护层用电工刀划开，其方法与剖削护套线的护套层方法类同。
- ② 然后用剖削塑料线绝缘层相同的方法剖去橡皮层。
- ③ 最后剥离棉纱层至根部，并用电工刀切去。操作过程，如图 3-28 所示。

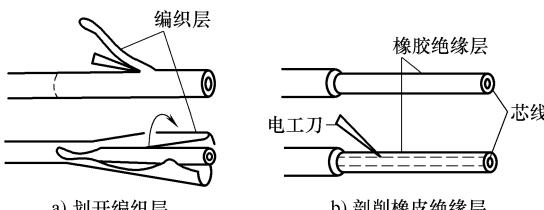


图 3-28 橡皮线绝缘层的剖削

#### 5. 花线绝缘层的剖削

花线绝缘层的剖削方法和步骤如下：

- ① 首先根据所需剖削长度，用电工刀在导线外表织物保护层割切一圈，并将其剥离。
- ② 距织物保护层 10mm 处，用钢丝钳刀口切割橡皮绝缘层。注意不能损伤芯线，拉下橡皮绝缘层，方法与图 3-25 类同。
- ③ 最后将露出的棉纱层松散开，用电工刀割断，如图 3-29 所示。

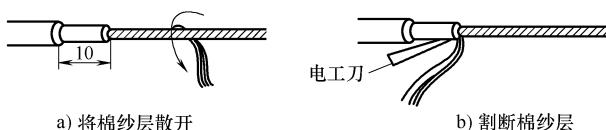


图 3-29 花线绝缘层的剖削

### 6. 铅包线绝缘层的剖削

铅包线绝缘层的剖削方法和步骤如下：

- ① 先用电工刀围绕铅包层切割一圈，如图 3-30a 所示。
- ② 接着用双手来回扳动切口处，使铅包层沿切口处折断，把铅包层拉出来，如图 3-30b 所示。
- ③ 铅包线内部绝缘层的剖削方法与塑料硬线绝缘层的剖削方法相同。



图 3-30 铅包线绝缘层的剖削

## 二、导线的连接

在进行电气线路、设备的安装过程中，如果当导线不够长或要分接支路时，就需要进行导线与导线间的连接。常用导线的线芯有单股、7芯和 19 芯等几种，连接方法随芯线的金属材料、股数不同而异。

### 1. 单股铜线的直线连接

- ① 首先把两线头的芯线做 X 形相交，互相紧密缠绕 2~3 圈，如图 3-31a 所示。
- ② 接着把两线头扳直，如图 3-31b 所示。
- ③ 然后将每个线头围绕芯线紧密缠绕 6 圈，并用钢丝钳把余下的芯线切去，最后钳平芯线的末端，如图 3-31c 所示。

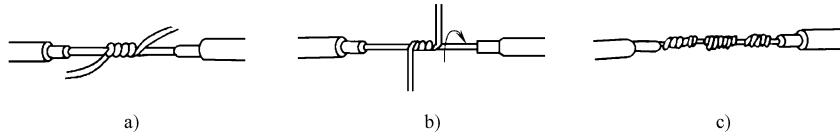


图 3-31 单股铜线的直线连接

### 2. 单股铜线的 T 形连接

- ① 如果导线直径较小，可按图 3-32a 所示方法绕制成立结状，然后再把支路芯线线头拉紧扳直，紧密地缠绕 6~8 圈后，剪去多余芯线，

并钳平毛刺。

②如果导线直径较大，先将支路芯线的线头与干线芯线做十字相交，使支路芯线根部留出约3~5mm，然后缠绕支路芯线，缠绕6~8圈后，用钢丝钳切去余下的芯线，并钳平芯线末端，如图3-32b所示。

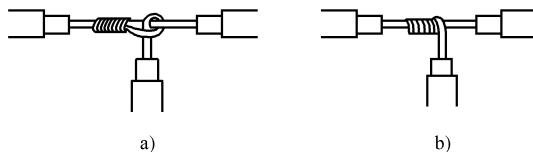


图 3-32 单股铜线的 T 形连接

### 3. 七股铜线的直线连接

①先将剖去绝缘层的芯线头散开并拉直，然后把靠近绝缘层约1/3线段的芯线绞紧，接着把余下的2/3芯线分散成伞状，并将每根芯线拉直，如图3-33a所示。

②把两个伞状芯线隔根对叉，并将两端芯线拉平，如图3-33b所示。

③把其中一端的7股芯线按两根、三根分成三组，把第一组两根芯线扳起，垂直于芯线紧密缠绕，如图3-33c所示。

④缠绕两圈后，把余下的芯线向右拉直，把第二组的两根芯线扳直，与第一组芯线的方向一致，压着前两根扳直的芯线紧密缠绕，如图3-33d所示。

⑤缠绕两圈后，也将余下的芯线向右扳直，把第三组的三根芯线扳直，与前两组芯线的方向一致，压着前四根扳直的芯线紧密缠绕，如图3-33e所示。

⑥缠绕三圈后，切去每组多余的芯线，钳平线端，如图3-33f所示。

⑦除了芯线缠绕方向相反，另一侧的制作方法与图3-33相同。

### 4. 七股铜线的 T 形连接

①把分支芯线散开钳平，将距离绝缘层1/8处的芯线绞紧，再把支路线头7/8的芯线分成4根和3根两组，并排齐；然后用螺钉旋具把干线的芯线撬开分为两组，把支线中4根芯线的一组插入干线两组芯线之间，把支线中另外3根芯线放在干线芯线的前面，如图3-34a所示。

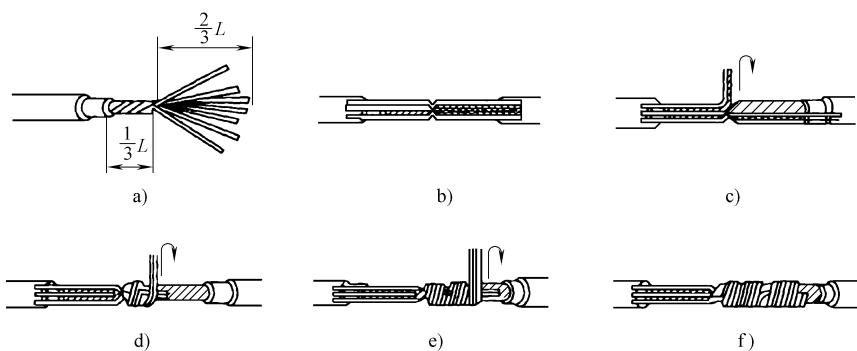


图 3-33 七股铜线的直线连接

② 把 3 根芯线的一组在干线右边紧密缠绕 3~4 圈，钳平线端；再把 4 根芯线的一组按相反方向在干线左边紧密缠绕，如图 3-34b 所示。缠绕 4~5 圈后，钳平线端，如图 3-34c 所示。

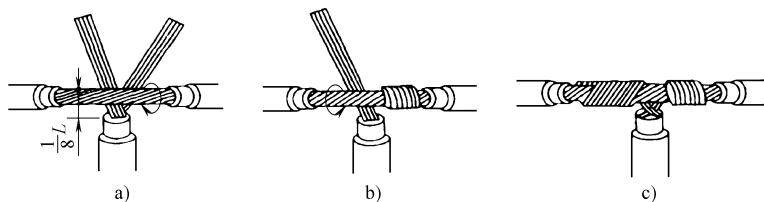


图 3-34 七股铜线的 T 形连接

七股铜线的直线连接方法同样适用于 19 股铜导线，只是芯线太多可剪去中间的几根芯线；连接后，需要在连接处进行钎焊处理，这样可以改善导电性能和增加其力学强度。19 股铜线的 T 形分支连接方法与 7 股铜线也基本相同。将支路导线的芯线分成 10 根和 9 根两组，而把其中 10 根芯线那组插入干线中进行绕制。

##### 5. 铜芯导线接头处的锡焊处理

① 电烙铁锡焊。如果铜芯导线截面积不大于  $10\text{mm}^2$ ，它们的接头可用 150W 电烙铁进行锡焊。可以先将接头上涂一层无酸焊锡膏，待电烙铁加热后，再进行锡焊即可。

② 浇焊。对于截面积大于  $16\text{mm}^2$  的铜芯导线接头，常采用浇焊法。首先将焊锡放在化锡锅内，用喷灯或电炉使其熔化，待表面呈磷黄色

时，说明焊锡已经达到高热状态，然后将涂有无酸焊锡膏的导线接头放在化锡锅上面，再用勺盛上熔化的锡，从接头上面浇下，如图 3-35 所示。因为起初接头较凉，锡在接头上不会有很好的流动性，所以应持续浇下去，使接头处温度提高，直到全部缝隙焊满为止。最后用抹布擦去焊渣即可。

#### 6. 压接管压接法连接

由于铝极易氧化，而铝氧化膜的电阻率很高，严重影响导线的导电性能，所以铝芯导线直线连接不宜采用铜芯导线的方法进行，多股铝芯导线常用压接管压接法连接（此方法同样适用于多股铜导线）。

压接管压接法适用于较大负荷的多股铝芯导线的直线连接，需要用压接钳和压接管，如图 3-36a、b 所示。

① 根据多股铝芯线规格选择合适的压接管，除去需连接的两根多股铝芯导线的绝缘层，用钢丝刷清除铝芯线头和压接管内壁的铝氧化层，涂上中性凡士林。

② 将两根铝芯线头向对穿入压接管，并使线端穿出压接管 25~30mm，如图 3-36c 所示。

③ 然后进行压接，压接时第一道压坑应在铝芯线头一侧，不可压反，压坑的数目与连接点所处的环境有关，通常情况下，室内为 4 个，室外为 6 个，如图 3-36d 所示。压接完成后的铝芯线如图 3-36e 所示。

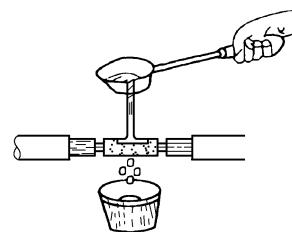


图 3-35 铜芯导线接头的浇焊

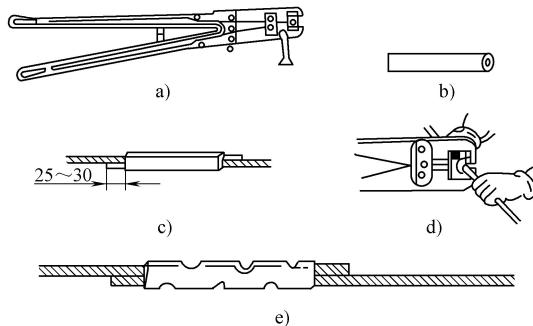


图 3-36 压接管压接法

### 三、导线绝缘层的恢复

当发现导线绝缘层破损或完成导线连接后，一定要恢复导线的绝缘。要求恢复后的绝缘强度不应低于原有绝缘层。所用材料通常是黄蜡带、涤纶薄膜带和黑胶带，黄蜡带和黑胶带一般选用宽度为20mm的。

#### 1. 直线连接接头的绝缘恢复

①首先将黄蜡带从导线左侧完整的绝缘层上开始包缠，包缠两根带宽后再进入无绝缘层的接头部分，如图3-37a所示。

②包缠时，应将黄蜡带与导线保持约55°的倾斜角，每圈叠压带宽的1/2左右，如图3-37b所示。

③包缠一层黄蜡带后，把黑胶布接在黄蜡带的尾端，按另一斜叠方向再包缠一层黑胶布，每圈仍要压叠带宽的1/2，如图3-37c、d所示。

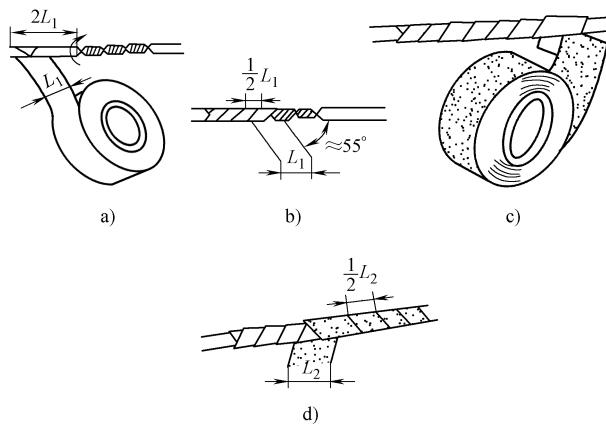


图3-37 直线连接接头的绝缘恢复

#### 2. T形连接接头的绝缘恢复

①首先将黄蜡带从接头左端开始包缠，每圈叠压带宽的1/2左右，如图3-38a所示。

②缠绕至支线时，用左手拇指顶住左侧直角处的带面，使它紧贴于转角处芯线，而且要使处于接头顶部的带面尽量向右侧斜压，如图3-38b所示。

③当围绕到右侧转角处时，用手指顶住右侧直角处带面，将带面在干线顶部向左侧斜压，使其与被压在下边的带面呈X状交叉，然后

把带再回绕到左侧转角处, 如图 3-38c 所示。

④ 使黄蜡带从接头交叉处开始在支线上向下包缠, 并使黄蜡带向右侧倾斜, 如图 3-38d 所示。

⑤ 在支线上绕至绝缘层上约两个带宽时, 黄蜡带折回向上包缠, 并使黄蜡带向左侧倾斜, 绕至接头交叉处, 使黄蜡带围绕过干线顶部, 然后开始在干线右侧芯线上进行包缠, 如图 3-38e 所示。

⑥ 包缠至干线右端的完好绝缘层后, 再接上黑胶带, 按上述方法包缠一层即可, 如图 3-38f 所示。

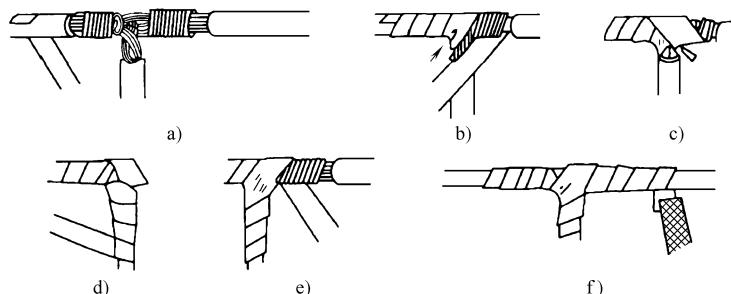


图 3-38 T 形连接接头的绝缘恢复

### 3. 注意事项

① 在为工作电压为 380V 的导线恢复绝缘时, 必须先包缠 1~2 层黄蜡带, 然后再包缠一层黑胶带。

② 在为工作电压为 220V 的导线恢复绝缘时, 应先包缠一层黄蜡带, 然后再包缠一层黑胶带, 也可只包缠两层黑胶带。

③ 包缠绝缘带时, 不能过疏, 更不能露出芯线, 以免造成触电或短路事故。

④ 绝缘带平时不可放在温度很高的地方, 也不可浸染油类。

## 四、导线与接线端的连接

导线与用电器或电气设备之间, 常用接线柱连接。导线与接线柱的连接, 要求接触面紧密, 接触电阻小, 连接牢固。常用接线柱有针孔式和螺钉平压式两种。

### 2. 导线线头与针孔式接线柱的连接

把单股导线除去绝缘层后插入合适的接线柱针孔, 旋紧螺钉。如果

单股线芯较细，把线芯折成双根，再插入针孔。对于软线芯线，须先把软线的细铜丝都绞紧涮锡后，再插入针孔，孔外不能有铜丝外露，以免发生事故，如图 3-39 所示。

### 3. 导线线头与螺钉平压式接线桩的连接

对于较小截面积的单股导线，先去除导线的绝缘层，把线头按顺时针方向弯成圆环，圆环的圆心应在导线中心线的延长线上，环的内径比压接螺钉外径稍大些，环尾部间隙为 1~2mm，剪去多余线芯，把环钳平整，不扭曲。然后把制成的圆环放在接线桩上，放上垫片，把螺钉旋紧，如图 3-40 所示。

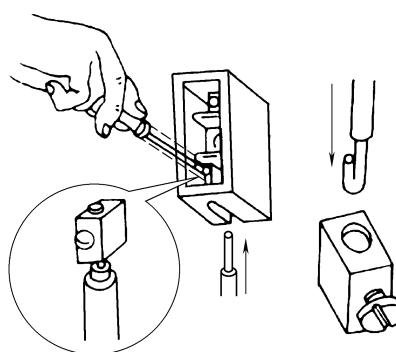


图 3-39 导线线头与针孔式接线桩的连接

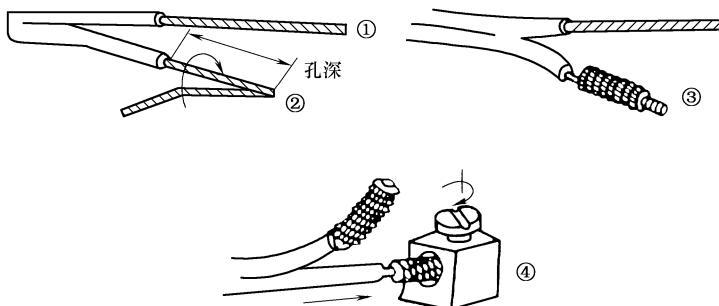


图 3-40 较小截面积导线的压接法

对于较大截面积的导线，须在线头装上接线端子，由接线端子与接线桩连接。

各种电气设备、电气装置和电气用具，均有接线端供连接导线使用，电器的常用接线端有多种形式：针孔式和螺钉平压式、瓦型垫压接等。导线与接线端连接时，应掌握以下几个主要方面。

① 绝缘层的剥削后要将线芯表面打磨干净，然后再与接线端连接。

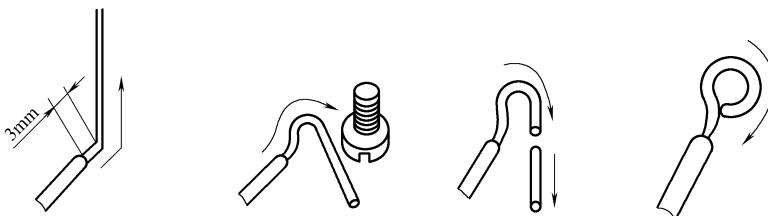
②需要分清相位的接线端，必须先弄清导线的相位，然后方可连接，单相电路必须弄清相线和零线，按电气装置的要求进行连接，如相线必须与开关连接；导线有色标的，必须按规定连接。

③接线盒内的导线应留有一定余量，便于再次剥削线头，否则线头断裂后将无法再与接线端连接，留出的线头应盘绕成弹簧状（见图3-40），使之安装开关面板时接线端不会因受力而松动。先清除线芯表面的氧化层搪锡完毕后，应将导线表面的助焊剂残液清理干净。

#### 4. 导线用螺钉的压接

①小截面积的单股导线用螺钉压接在接线端时，必须把线头盘成圆圈形似羊眼圈再连接，弯曲方向应与螺钉的拧紧方向一致，圆圈的内径不可太大或太小，以防拧紧螺钉时散开，在螺母较小时，应加平垫圈。

②压接时不可压住绝缘层，有弹簧垫时以弹簧垫压平为度，如图3-41所示。



①离绝缘层2~3mm折角 ②略大于螺钉直径弯圆弧 ③剪去余线 ④修正圆圈呈圆形

图3-41 导线用螺钉的压接

#### 5. 软线用螺钉的压接

软线线头与接线端子连接时，不允许有芯线松散（涮锡紧固）和外露的现象。在平压式接线端上连接时，按图3-42所示的方法进行连接，以保证连接牢固。较大截面积的导线与平压式接线端连接时，线头须使用接线端子，线头与接线端子要连接紧固，然后再由接线端子与接线端连接。

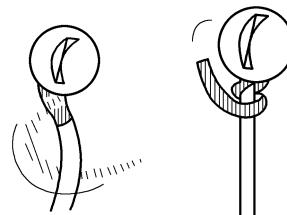


图3-42 软线用螺钉压接法

### 6. 导线压接接线端子

导线与大容量的电气设备接线端子的连接不宜采用直接压接，需经过先压线端子作为过渡，然后将线端子的一端压在电气设备的接线端子处。这时需选用与导线截面积相同的接线端子，清除接线端子内和线头表面的氧化层，导线插入接线端子内，绝缘层与接线端子之间应留有5mm裸线，以便恢复绝缘，然后用压接钳进行压接，压接时应使用同截面积的压模。压接后的形状如图3-43所示。压接次序如图的①、②。

7. 多股软线的盘压  
 ① 根据所需的长度剥去绝缘层，将1/2长的线芯重新拧紧涮锡紧固。

- ② 将拧紧的部分，向外弯折，然后弯曲成圆弧。
- ③ 弯成圆弧后，将线头与原线段平行捏紧。
- ④ 将线头散开按2、2、3分成组，扳直一组线垂直与芯缠绕。
- ⑤ 按多股线对接的缠绕法，缠紧导线。加工成型（见图3-44）。

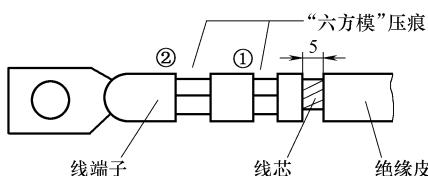


图3-43 导线压接接线端子法

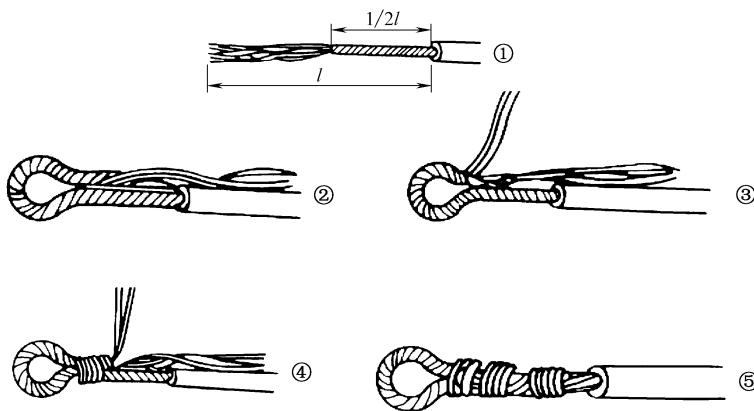


图3-44 多股软线的盘压

### 8. 瓦型垫的压接

① 将剥去绝缘层的线芯弯成U形，将其卡入瓦型垫进行压接，如果是两个线头，应将两个线头都弯成U形对头重合后卡入瓦型垫内

压接。

② 剥去导线端头绝缘层，线芯插入瓦型垫内压紧即可。若为两根导线时，应每侧压接一根。瓦型垫外遗留导线不可过长，也不可将绝缘层压在瓦型垫下，如图 3-45 所示。

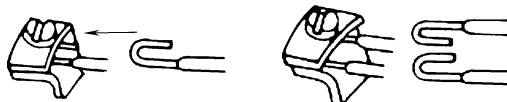


图 3-45 瓦型垫的压接

#### 9. 导线连接工作中应注意的事项

- ① 剥削导线绝缘层应正确使用电工工具，电工刀的使用要注意安全；
- ② 剥削导线绝缘层时不能损伤线芯；
- ③ 作导线连接时缠绕方法要正确，缠绕要平直、整齐和紧密，最后要钳平毛刺，以便于恢复绝缘；
- ④ 护套线线头与熔断器连接时不应露铜；
- ⑤ 导线作平压式接线桩连接时，先用尖嘴钳把线头弯成圆环；螺钉拧紧方向与导线弯环方向一致。
- ⑥ 多股软导线要涮锡铸头。

# 第四章 低压照明装置

## 第一节 电气照明

### 一、电气照明的方式与种类

#### 1. 照明电压

① 一般房间不论是正常照明还是局部照明，固定安装的灯具均采用对地电压不大于 250V 的电压，即 220V。

② 事故照明一般也采用 220V 的电压，以便与工作照明线路互相切换。

③ 一般场所的局部照明和移动照明，如行灯宜采用 36V 或 24V 的电压。

④ 恶劣工作环境，如坑道、金属容器中的移动照明应采用 12V 工作电压。

#### 2. 照明种类

照明的种类按用途分为正常照明、应急照明、值班照明、警卫照明、景观照明和障碍照明。

##### (1) 正常照明

在正常情况下使用的室内外照明。所有居住房间、工作场所、运输场地、人行车道以及室内外小区和场地等，都应设置正常照明。

##### (2) 应急照明

因正常照明的电源失效而启动的照明。它包括备用照明、安全照明和疏散照明。所有应急照明必须采用能瞬时可靠点燃的照明光源，一般采用白炽灯和卤钨灯。

##### 1) 备用照明

用于确保正常活动继续进行的照明。在由于工作中断或误操作容易引起爆炸、火灾和人身伤亡或造成严重后果和经济损失的场所，均应设有备用照明。例如医院的手术室和急救室、商场、体育馆、剧院、变配电室、消防控制中心等，都应设置备用照明。

### 2) 安全照明

用于确保处于潜在危险之中的人员安全的照明。如使用圆形锯、处理热金属作业和手术室等处应装设安全照明。

### 3) 疏散照明

用于确保疏散通道被有效地辨认和使用的照明。对于一旦正常照明熄灭或发生火灾，将引起混乱的人员密集的场所，如宾馆、影剧院、展览馆、大型百货商场、体育馆、高层建筑的疏散通道等，均应设置疏散照明。照度不低于正常照度的10%，最低不低于15lx。

### (3) 值班照明

非工作时间为值班所设置的照明。值班照明宜利用正常照明中能单独控制的一部分或应急照明的一部分或全部。

### (4) 警卫照明

为加强对人员、财产、建筑物、材料和设备的保卫而采用的照明，如用于警戒以及配合闭路电视监控而配备的照明。

### (5) 景观照明

用于室内外特定建筑物、景观而设置的带艺术装饰性的照明，包括装饰建筑外观照明、喷泉水下照明、用彩灯勾画建筑物的轮廓、给室内景观投光以及广告照明灯等。

### (6) 障碍照明

在建筑物上装设的作为障碍标志的照明，称为障碍照明。例如为保障航空飞行安全，在高大建筑物和构筑物上安装的障碍标志灯。障碍标志灯的电源应按主体建筑中最高负荷等级要求供电。

## 3. 照明方式

由于建筑物的功能和要求不同，对照度和照明方式的要求也不相同。照明方式可分为一般照明、局部照明和混合照明。

### (1) 一般照明

一般照明是为照亮整个场所而设置的均匀照明。一般照明由若干个灯具均匀排列而成，可获得较均匀的水平照度。

对于工作位置密度很大而对光照明方向无特殊要求或受条件限制不适宜装设局部照明的场所，可只单独装设一般照明，如办公室、体育馆和教室等。

### (2) 局部照明

局部照明是为特定视觉作用的、为照亮某个局部而设置的照明。其优点是开、关方便，并能有效地突出对象。

### (3) 混合照明

由一般照明和局部照明组成的照明，称为混合照明。

对于工作位置需要有较高照度并对照射方向有特殊要求的场合，应采用混合照明。混合照明的优点是，可以在工作面（平面、垂直面或倾斜面）表面上获得较高的照度，并易于改善光色，减少照明装置功率和节约运行费用。

## 4. 照明配电

380V/220V 中性点直接接地有 TN、TT 两种系统。TN-S 为三相五线制系统，为普遍采用的一种型式，其 PE 线与 N 线从电源处就分开。

TN-C-S 三相四线局部五线制系统，电源在进入住宅楼前，将 PEN 线作重复接地后，再分为 N 线与 PE 线。

## 二、照明光源的选择

电光源的选择应以实施绿色照明工程为基点。绿色照明工程旨在节约能源，保护环境。其具体内容是：采用高光效、低污染的电光源，提高照明质量，保护视力，提高劳动生产率和能源有效利用率，达到节约能源，减少照明费用，减少水电工程建设，减少有害物质的排放和逸出，达到保护人类生存环境的目的。

### 1. 限制普通白炽灯的应用

所有的固体、液体以及气体如果达到足够高的温度，都会产生可见光。大约 3000K 时，白炽灯中的固体钨的炽热可能是现今最为人熟悉的人造光源。

白炽灯是根据热辐射原理制成的，灯丝在将电能转变成可见光的同时，还要产生大量的红外辐射和少量的紫外辐射。为了提高光效率，灯丝应在尽可能高的温度下工作。由于发光效率很低，有淘汰趋势。

普通白炽灯的结构如图 4-1 所示，它由灯丝、支架、芯柱、引线、玻璃泡壳（简称泡壳）和灯头等部分组成，其中常用的灯头如图 4-2 所示。

### 2. 采用卤钨灯取代普通白炽灯

卤钨灯和普通照明的白炽灯是同属白炽灯类产品，均系电流通过灯丝白炽发光，是普通白炽灯的升级换代产品。卤钨灯光效和寿命比普通

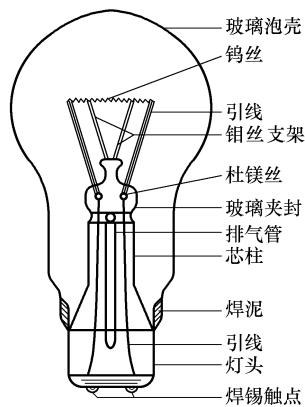


图 4-1 白炽灯的结构

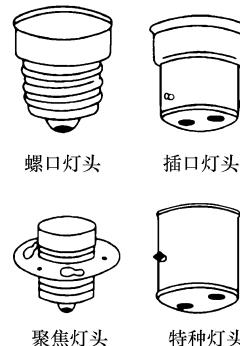


图 4-2 几种灯头外形

白炽灯高一倍以上，因此，在许多照明场所如商业橱窗、展览厅（包括一般商业产品、文化艺术品以及历史文物的展览展示等）以及摄影照明等，要求显色性高，高档冷光或聚光的场合，可采用各种结构形式不同的卤钨灯取代普通白炽灯，来达到节约能源，提高照明质量的目的。

理论上氟、氯、溴、碘四种卤素都能在灯泡内产生再生循环，区别就在于循环时，产生各种反应所需的温度不同。目前，广泛采用的是溴、碘两种卤素，制成的灯分别称为溴钨灯和碘钨灯，并统称为卤钨灯。卤钨灯分为两端引出和单端引出两种，如图 4-3 所示。两端引出的灯管用于普通照明；单端引出的用于投光照明、电视、电影、摄影等场所。

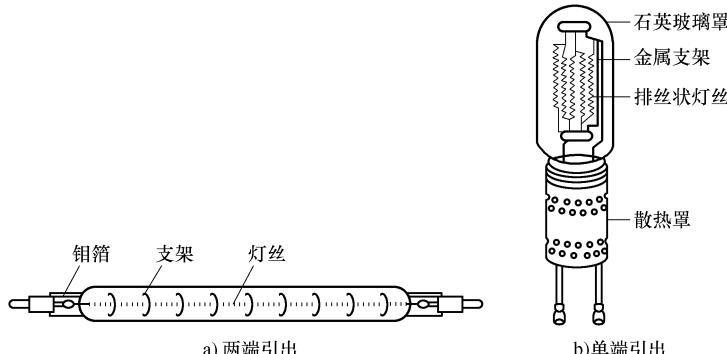


图 4-3 卤钨灯的外形

### 3. 荧光灯

为了把放电过程中产生的紫外线辐射转化为可见光，低压汞蒸气弧光放电灯在它的玻璃管内壁上涂有荧光材料，叫荧光灯，俗称日光灯。

荧光灯具有高效能、良好的光输出、光输出的持久性、颜色的多样性以及较长的使用寿命，使之成为上述照明领域中的理想选择。

荧光灯的结构如图 4-4 所示。它由内壁涂有荧光粉的钠钙玻璃管组成，其两端封接上涂覆氧化物电子粉的双螺旋形的钨电极，电极常常套上电极屏蔽罩。尤其在较高负载的荧光灯中，电极屏蔽罩一方面可以减轻由于电子粉蒸发而引起的荧光灯两端发黑，使蒸发物沉积在屏蔽罩上；另一方面可以减少灯的闪烁现象。灯管内还充有少量的汞，所产生的汞蒸气放电可使荧光灯发光。

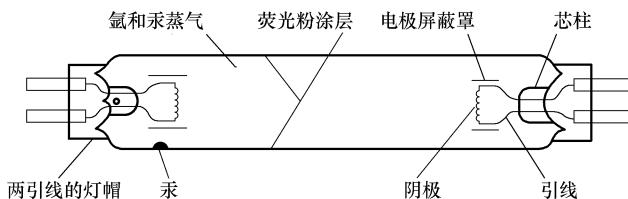


图 4-4 荧光灯的结构

### 4. 高压汞灯

高压汞灯又称荧光高压汞灯，荧光高压汞灯的典型结构，如图 4-5 所示。

#### (1) 放电管

采用耐高温、高压的透明石英管，管内除充有一定量的汞外，同时还充有少量氩气以降低启动电压和保护电极。

#### (2) 主电极

由钨杆及外面重叠绕成螺旋的钨丝组成，并在其中填充碱土氧化物作为电子发射材料。

#### (3) 外玻壳

一般采用椭球形，玻壳除了起保

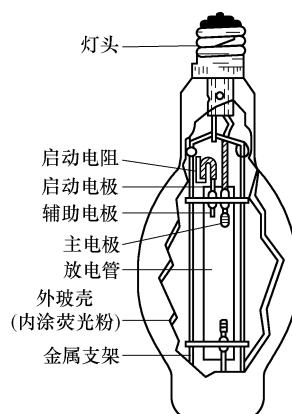


图 4-5 荧光高压汞灯的典型结构

温作用外，还可防止环境对灯的影响。玻壳内壁上还涂敷适当的荧光粉，其作用是将灯的紫外辐射或短波长的蓝紫光转变为长波的可见光，特别是红色光。此外，玻壳内通常还充入数千帕的氖气或氖-氩混合气体作绝热用。

#### (4) 辅助电极（或启动电极）

通过一个启动电阻和另一主电极相连，这有助于荧光高压汞灯在干线电压作用下顺利启动。

荧光高压汞灯的主要辐射来源于汞原子激发，以及通过玻壳内壁上的荧光粉将激发后产生的紫外线转换为可见光。

### 三、灯具的选择照度标准

照度是工程中的常见量，它说明了被照面或工作面上被照射的程度，即单位面积上的光通量的大小。照度以  $E$  表示，单位是勒克斯，符号为 lx。不同情况照度对比见表 4-1。在照明工程设计中，照度的大小是根据建筑物的功能、对保护视力的要求、要达到的艺术照明效果等因素以及国家标准给定的各种照度标准值进行各种灯具样式、类型的选择和位置、数量确定。工业场所的照明功率密度见表 4-2。

表 4-1 不同情况照度对比

光源及被照条件	被照面照度/lx	光源及被照条件	被照面照度/lx
夏季阴天中午室外地面	8000 ~ 20000	40W 白炽灯 1m 处	30
晴天中午阳光下室外地面	80000 ~ 120000	晴朗月夜的地面	0.2

表 4-2 工业场所的照明功率密度表

房间或场所		照明功率密度/(W/m <sup>2</sup> )		对应照度值/lx
		现行值	目标值	
通用房间	试验室	一般	11	300
		精细	18	500
或场所	检验	一般	11	300
		精细, 有颜色要求	27	750
间变、配电站	计量室, 测量室		18	500
	配电装置室	8	7	200
或场所	变压器室		5	100
	电源设备室、发电机室		8	200
或场所	控制室	一般控制室	11	300
		主控制室	18	500
	电话站、网络中心、计算机站		18	500

(续)

房间或场所			照明功率密度/(W/m <sup>2</sup> )		对应照度值 /lx
			现行值	目标值	
通用房间或场所	动力站	风机房、空调机房	5	4	100
		泵房	5	4	100
		冷冻站	8	7	150
		压缩空气站	8	7	150
		锅炉房、煤气站的操作层	6	5	100
	仓库	大件库(如钢坯、钢材、大成品、气瓶)	3	3	50
		一般件库	5	4	100
		精细件库(如工具、小零件)	8	7	200
		车辆加油站	6	5	100
机电工业	机械加工	粗加工	8	7	200
		一般加工,公差 $\geq 0.1\text{ mm}$	12	11	300
		精密加工,公差 $<0.1\text{ mm}$	19	17	500
	机电 仪表 装配	大件	8	7	200
		一般件	12	11	300
		精密	19	17	500
		特精密	27	24	750
	电线、电缆制造		12	11	300
	线圈绕制	大线圈	12	11	300
		中等线圈	19	17	500
		精细线圈	27	24	750
	线圈浇注		12	11	300
	焊接	一般	8	7	200
		精密	12	11	300
	钣金		12	11	300
	冲压、剪切		12	11	300
	热处理		8	7	200
	铸造	熔化、浇铸	9	8	200
		造型	13	12	300
	精密铸造的制模、脱壳		19	17	500
	锻工		9	8	200
	电镀		13	12	300
	喷漆	一般	15	14	300
		精细	25	23	500
	酸洗、腐蚀、清洗		15	14	300
	抛光	一般装饰性	13	12	300
		精细	20	18	500
	复合材料加工、铺叠、装饰		19	17	500
	机电修理	一般	8	7	200
		精密	12	11	300

(续)

房间或场所		照明功率密度/(W/m <sup>2</sup> )		对应照度值/lx
		现行值	目标值	
电 子 工 业	电子元器件	20	18	500
	电子零部件	20	18	500
	电子材料	12	10	300
	酸、碱、药液及粉配制	14	12	300

## 第二节 常用照明配电箱及照明灯具

### 一、常用照明配电方式

照明配电系统由配电装置（配电箱）及配电线路（干线及支线）组成。一组照明设备接入一条支线，若干条支线接入一条干线，若干条干线接入一条总进户线。汇集支线接入干线的配电装置称为分配电箱，汇集干线接入总进户线的配电装置称为总配电箱。

照明配电方式有多种，可根据实际情况选定。基本照明配电方式如图4-6所示。

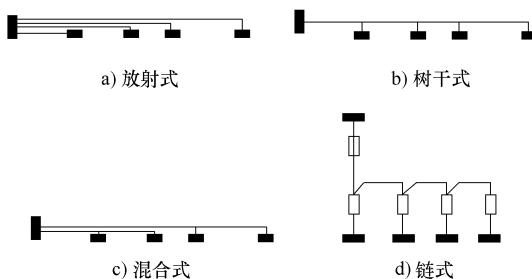


图4-6 基本照明配电方式

#### 1. 放射式

放射式接线就是各个分配电箱都由总配电柜（箱）用一条独立的干线连接，干线的独立性强而互不干扰。其优点是各负荷独立受电，线路发生故障时，不影响其他回路继续供电，故可靠性较高；回路中电动机起动引起的电压波动，对其他回路的影响较小。但建设费用较高，有色金属耗量较大。放射式配电一般用于重要的负荷。

## 2. 树干式

树干式是仅从总配电柜（箱）引出一条干线，各分配电箱都从这条干线上直接接线。与放射式相比，其优点是结构简单、建设费用低。但干线出现故障时影响范围大，可靠性差。一般适用于不重要的照明场所（或小型建筑照明）。

## 3. 混合式

混合式配电系统是放射式和树干式的综合运用，具有两者的优点。这种接线方式可根据负荷的重要程度、负荷的位置、容量等因素综合考虑，在实际工程中应用最为广泛。

## 4. 链式

链式配电系统接线方式与树干式相似。这种接线方式费用低，适用于距离配电所较远，而彼此之间相距又较近的不重要的小容量设备。链接的设备一般不超过3~4台。

# 二、照明配电箱的安装

照明配电箱有标准型和非标准型两种。标准配电箱可向厂家直接订购，非标准配电箱可自行制作。照明配电箱型号很多，安装方式有悬挂式（明装）与嵌入式（暗装）两种。安装配电箱前应核对图样，确定型号是否符合设计要求，检查外观有无锈蚀及损坏等。确定无误后即可进行安装。

## 1. 悬挂式照明配电箱的安装

悬挂式（明装）照明配电箱既可安装在墙上，也可安装在柱上。

直接安装在墙上时，应先埋设固定螺栓，或用膨胀螺栓。螺栓的规格应根据配电箱的型号和质量选择。其长度应为埋设深度加箱壁厚度以及螺母和垫圈的厚度，再加3~5扣的裕量长度。

悬挂式照明配电箱的安装高度应符合设计规定，如果设计无明确规定，一般箱底边距地面高度不宜小于1.8m。

## 2. 嵌入式照明配电箱的安装

嵌入式照明配电箱的安装（暗装）一般与土建配合进行，砌墙时将箱体预埋在墙内。面板四周边缘紧贴墙面，箱体与墙体接触部分应刷防腐漆；按需要敲掉孔压片；有贴脸的箱体，应将贴脸揭掉。一般当主体工程砌至安装高度时，可预埋配电箱。照明配电箱的宽度超过300mm时，箱上应加过梁，避免安装后受压变形。放入照明配电箱时

应使其保持水平和垂直，应根据墙体的结构和墙面的装饰厚度来确定突出墙体的尺寸。预埋的电线管均应配入照明配电箱内。

照明配电箱安装之前，应对箱体和管线的预埋质量进行检查，确定符合设计要求后再进行安装。暗装照明配电箱的安装高度一般为箱底边距地面不宜小于1.5m；导线引照明配电箱，均应套绝缘管。

### 三、照明灯具的安装要求

① 灯泡容量100W及以下时，可用胶木灯口；100W以上及潮湿场所，防潮封闭式灯具用瓷质灯口。

② 相线经开关进入灯头，接在螺扣灯头中心的接线柱上，零线接在螺口的接线柱上。

③ 导线的绝缘强度，不低于500V。自在器式吊灯灯头线放开长度至地面0.8m为宜。

④ 灯头线两端（吊盒及灯头）导线不能受力，需系保险扣见图4-7，软线需涮锡。顺时针弯环，接入接线柱并压紧，剪断多余部分。

⑤ 吊链灯导线应编插在链中，导线不应受力。

⑥ 灯具重量：1kg以下可采用灯头软线吊挂，并在灯头内打保险扣；1~3kg采用吊链吊杆；大于3kg需设预埋件，并应按灯具重量的1.25倍作过载试验。预埋件结构如图4-8所示。



图4-7 灯头

线保险扣

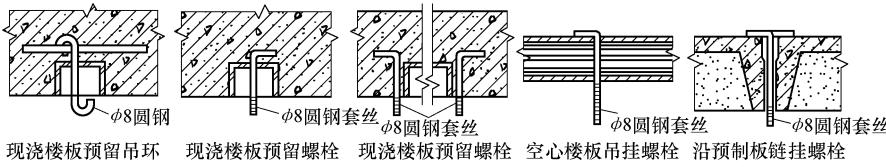


图4-8 预埋件结构

⑦ 吊杆灯，管内径不小于10mm，钢管壁厚不小于1.5mm，导线穿入管中，并不许有接头。

⑧ 距地面低于2.4m灯具，需做接地。接地时，必须经灯具专用接地螺钉接地，接地线经平垫片及弹簧垫片压紧。保护接地线需用铜芯导线，截面积不小于1.5mm<sup>2</sup>。

⑨ 室外灯具引入线需做防水弯；灯具可能产生凝结水时，需打泄水孔。

⑩ 荧光灯灯管、镇流器、辉光启动器，必须与灯管的容量相匹配。

⑪ 嵌入顶棚内灯具安装。灯具固定在专设的框架上，电源线不能贴近灯具外壳，并留有余量，灯罩的边框边缘应紧贴在顶棚面上。

⑫ 户外大型玻璃罩灯，应有防止其破碎后溅落措施。

⑬ 大容量气体放电灯，灯管、灯头、控照器都由制造厂配套生产供货。购置时连同触发器、镇流器及升压变压器等配套订货，按安装使用说明书进行安装。

⑭ 照明灯具距地面最低悬挂高度的规定值见表 4-3。

表 4-3 照明灯具距地面最低悬挂高度的规定值

光源种类	灯具形式	光源功率/W	最低悬挂高度/m
白炽灯	有反射罩	≤60	2.0
		100 ~ 150	2.5
		200 ~ 300	3.5
		≥500	4.0
	有乳白玻璃漫反射罩	≤100	2.0
		150 ~ 200	2.5
		300 ~ 500	3.0
卤钨灯	有反射罩	≤500	6.0
		1000 ~ 2000	7.0
荧光灯	无反射罩	<40	2.0
		>40	3.0
	有反射罩	≥40	2.0
高压汞灯	有反射罩	≤125	3.5
		125 ~ 250	5.0
		≥400	6.0
	有反射罩带格栅	≤125	3.0
		125 ~ 250	4.0
		≥400	5.0
金属卤化灯	搪瓷反射罩	250	6.0
	铝抛光反射罩	1000	7.5
高压钠灯	搪瓷反射罩	250	6.0
	铝抛光反射罩	400	7.0

#### 四、照明灯具、开关、插座的安装

##### 1. 灯头盒位置的确定

###### (1) 现浇混凝土楼板

当室内只有一盏灯时，其灯头盒应设在纵横轴中心的交叉处，有两盏灯时，灯头盒应设在短轴线中心与墙内净距离  $L/4$  的交叉处，如图 4-9 所示。当现浇混凝土楼板上设置按几何图形组成的灯具时，灯头盒的位置应相互对称。

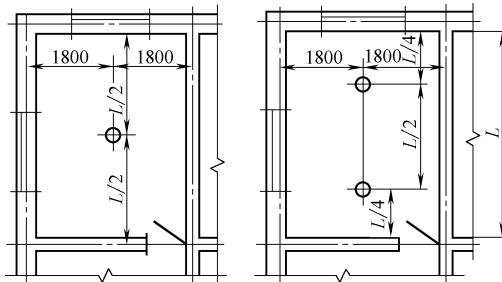


图 4-9 现浇混凝土楼板屋顶头位盒位置

### (2) 预制楼板

配线管路需沿板缝敷设，应与土建配合调整板块的排列顺序，使板缝处于室内的中心。灯头盒安装方法如图 4-10 所示。当室内只有一盏灯时，灯头盒应设在室内中心的板缝上。但有时由于受土建楼板宽度的限制，板缝不在室内中心，此时灯头盒应设在略偏向窗户一侧的板缝内。如室内设置两盏（排）灯时，两盏灯之间的距离，应尽量等于灯头盒与墙距离的 2 倍。如室内有梁时，灯头盒距梁侧面的距离应与距墙的距离相等。

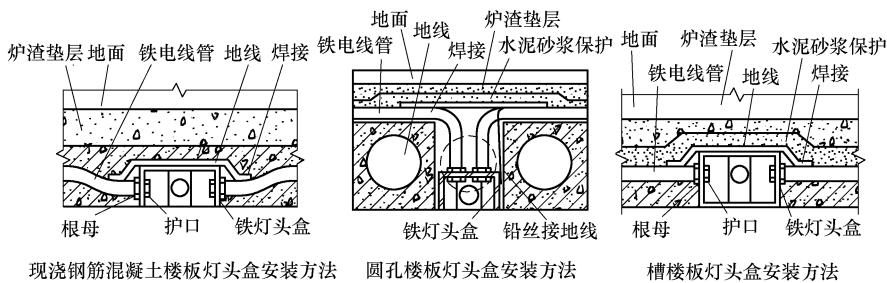


图 4-10 预制楼板灯头盒安装方法

### (3) 成套组装吊链荧光灯灯头盒设置

应先考虑好灯具吊链的开档距离。安装简易直管吊链荧光灯的两个

灯头盒的中心距离应符合 20W 荧光灯 600mm, 30W 荧光灯 900mm, 40W 荧光灯 1200mm。

#### (4) 楼(屋)面板

设置三个及以上成排灯头盒时, 应沿灯头盒中心处拉通线定灯位, 成排的灯头盒应在同一条直线上, 允许偏差不应大于 5mm。

#### (5) 室外照明灯具

室外照明灯具在墙上安装时, 不可低于 2.5m; 室内灯具一般不低于 2.4m; 住宅壁灯(或起夜灯)由于楼层高度的限制, 灯具安装高度可以适当降低, 但不得低于 2.2m; 旅馆床头灯不宜低于 1.5m。

#### (6) 壁灯

壁灯如安装在柱上, 灯头盒位置应设在柱的中心位置上。成排埋设安装壁灯的灯头盒, 应在同一条直线上, 高低差不应大于 5mm。

### 2. 照明灯具的安装

照明灯具的安装一般在照明线路敷设完毕后进行。照明灯具的安装方式, 要根据灯具的构造、建筑物的结构、设计的要求等决定。常见照明灯具安装固定方式如图 4-11 所示。

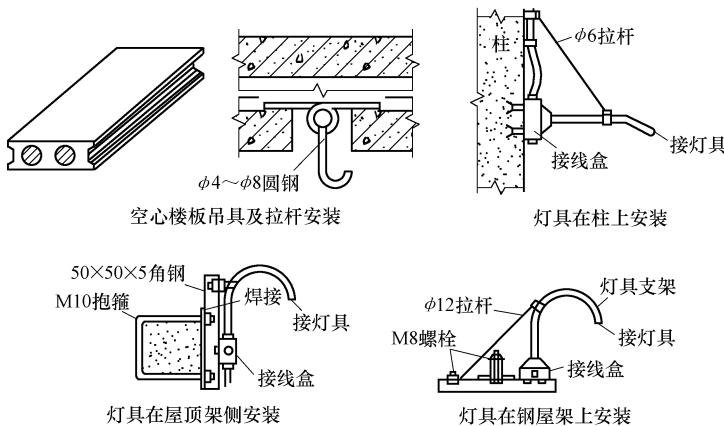


图 4-11 常见照明灯具安装固定方式

嵌入式照明灯具安装在顶棚吊顶上。灯具质量与吊装方式应符合下面的规定: 当灯具的质量大于 3.0kg 时, 应采用预埋吊钩或螺栓固定; 当软线吊灯灯具质量大于 1.0kg 时, 应增设吊链; 固定灯具的吊钩, 其

圆钢直径不应小于灯具吊挂销、钩的直径，且不得小于6mm，安装固定方式如图4-12所示。

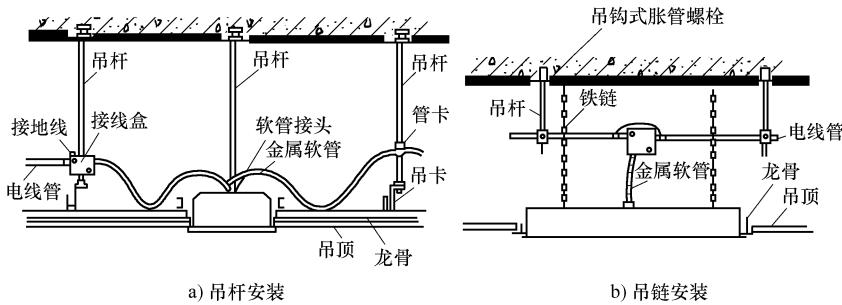


图4-12 嵌入式照明灯具在吊顶上的安装方式

吊杆安装的灯具由吊杆、法兰、嵌入式照明灯具组成。采用钢管或吊杆时，钢管内径一般不小于10mm，钢管壁厚不应小于1.5mm。超过3.9kg的灯具，吊杆应吊挂在预埋的吊钩上。吊钩和吊挂螺栓的埋设方法如图4-13所示。

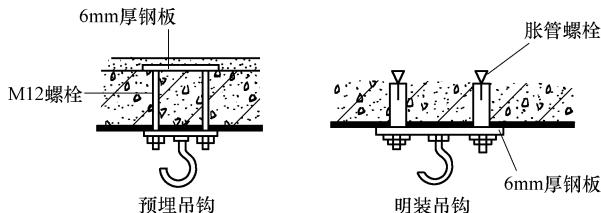


图4-13 吊钩安装方法

### 3. 开关、插座的安装

开关、插座等电气装置件与面板能通用组合称为活装式；装置件固定在面板上的称为固定式。开关、插座安装方法如图4-14所示。

#### (1) 开关的安装要求

① 安装在同一建筑物、构筑物内的开关，应采用同一系列产品。开关的通断位置应一致，且操作灵活，接触良好。一般向上为闭合，向下为断开。

② 开关安装的位置应便于操作，开关边缘距门框的距离为0.15~0.2m，开关距地面高度应为1.3m。拉线开关距地面高度应为1.8m，且

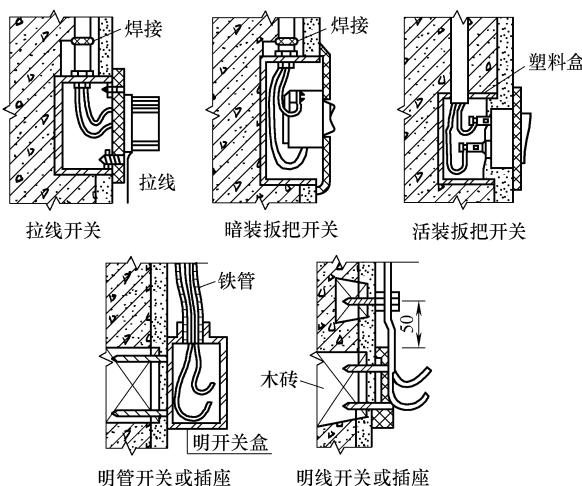


图 4-14 明、暗装开关及插座安装方法

拉线出口应垂直向下。

③ 并列安装的相同型号的开关，距地面高度应一致，高度差不应大于1mm。同一室内安装的开关高度差不应大于5mm。并列安装的拉线开关其相邻间距应不小于20mm。

④ 相线应经开关控制灯，居民住宅严禁装设床头开关。

⑤ 暗装开关应采用与开关相匹配的接线盒。

⑥ 室外应采用防水开关。

⑦ 防爆场所应采用与防爆介质相适应的防爆等级的防爆开关。

## (2) 插座的安装要求

① 按《电气设备安装标准规范》规定，每套住宅中的空调电源插座、电器电源插座，应与照明分路设计，有条件时，厨房、卫生间电源插座应设置独立回路，分支回路导线截面积不小于 $2.5\text{mm}^2$ 。

② 插座的安装高度一般应不低于1.3m，托儿所、幼儿园及小学应不低于1.8m。同一场所安装的插座高度应一致。车间及试验室的插座安装高度距地面不应小于0.3m。落地插座应有牢固可靠的保护盖板。

③ 面对插座，“左零、右火”（或“上火、下零”）。带保护零的三相插座，从保护零逆时针数起为L1、L2、L3相序进行接线。

④ 单相三孔、三相四孔及三相五孔插座的保护接地线，均应接在

上孔，插座的接地端子不应与工作零线端子连接。

⑤当交流、直流或不同电压等级的插座安装在同一场所时，应有明显的区别，且必须选用不同结构、不同规格和不能互换的插座。

⑥同一场所的三相插座，其接线的相位必须一致。

⑦暗装插座应采用与其相匹配的接线盒，且盖板应端正并紧贴墙面。

⑧在潮湿场所，应采用密封良好的防水、防溅插座。

⑨儿童活动场所应采用安全插座。

⑩防爆场所应采用与爆炸危险介质相适应的防爆等级的防爆插座。

### 第三节 照明装置

#### 一、照明装置的一般运行要求

照明装置不正常运行极易发现，如开灯不亮，电灯突然熄灭。从电源配电箱，经过熔断器、开关线路，接到每个灯也需要进行检查维修，如荧光灯镇流器声音增大，拉线开关的拉绳易磨损拉断；灯泡离易燃物距离太近，易发生火灾；刀开关因过负荷，高热甚至发红；灯泡受外力破碎等。照明装置故障，与其他用电设备相同，大体分为短路、开路和漏电等。

##### 1. 漏电

线路绝缘破损或老化，电流从绝缘结构中泄漏出来，这部分泄漏电流不经过原定电路形成回路，而是通过建筑物与大地形成回路或超近在相线、中性线之间构成局部回路。漏电若不严重，没有明显的故障现象；较严重时，就会出现建筑物带电和电量无故增加等故障现象。

发生漏电的原因归纳起来有以下几种：

- ①施工中，损伤了电线和照明灯附件的绝缘结构。
- ②线路和照明灯附件年久失修，绝缘老化。
- ③违规安装，如导线直埋在建筑物的粉刷层内。

##### 2. 过载

实际电量超过线路导线的额定容量。故障现象为保护熔丝烧断、过载部分的装置温度剧升。若保护装置未能及时起到保护作用，就会引起

严重电气事故。

引起过载故障的主要原因有：

① 导线截面积小，原设计的线路和实际应用的情况不配套或由于盲目过量用电引起。

② 电源电压过低，电扇、洗衣机、电冰箱等输出功率无法相应减小的设备就会自行增加电流来弥补电压的不足，从而引起过载。

### 3. 短路

许多电气火灾就是在短路状态下酿成的。造成短路的原因很多，主要有：

① 施工质量不佳，不按规范化的要求进行加工。

② 用电器具内部存在短路故障引起。

③ 线路年久失修。

④ 导线或附件等受外力破坏而引起。

## 二、照明装置的安全检查

电力线路是电力系统的重要组成部分，担负着输送电能的重要任务。但目前在部分工厂中，往往对电力线路的安全检查和运行维护重视不够，导致个别区段的电力线路的安全性降低，增大了发生电气事故的可能性。因此，加强工厂电力线路的安全检查是非常必要的。

### 1. 架空线路的安全检查

对厂区架空线路，一般要求每月进行1次安全检查。如遇大风大雨及发生故障等特殊情况时，还需临时增加安全检查次数。架空线路的安全检查应重点检查以下项目：

① 电线杆子有无倾斜、变形、腐朽、损坏及基础下沉等现象。

② 沿线路的地面是否堆放有易燃易爆和强腐蚀性物质。

③ 沿线路周围，有无危险建筑物。应尽可能保证在雷雨季节和大风季节里，这些建筑物不致对线路造成损坏。

④ 线路上有无树枝、风筝等杂物悬挂。

⑤ 拉线和板桩是否完好，绑托线是否紧固可靠。

⑥ 导线的接头是否接触良好，有无过热发红、严重老化、腐蚀或断脱现象；绝缘子有无污损和放电现象。

⑦ 避雷接地装置是否良好，接地线有无锈断情况。在雷雨季节到来之前，应重点检查。

## 2. 电缆线路的安全检查

电缆线路一般是敷设在地下的，要做好电缆的安全运行与检查工作，就必须全面了解电缆的敷设方式、结构布置、走线方向及电缆头位置等。对电缆线路一般要求每季度进行1次安全检查，并应经常监视其负荷大小和发热情况。如遇大雨、洪水等特殊情况及发生故障时，还须临时增加安全检查次数。电缆线路的安全检查应重点检查以下项目：

- ① 电缆终端及瓷套管有无破损及放电痕迹。对填充电缆胶（油）的电缆终端头，还应检查有无漏油溢胶现象。
- ② 对明敷的电缆，应检查电缆外表有无锈蚀、损伤，沿线挂钩或支架有无脱落，线路上及附近有无堆放易燃易爆及强腐蚀性物质。
- ③ 对暗设及埋地的电缆，应检查沿线的盖板和其他覆盖物是否完好，有无挖掘痕迹，路线标是否完整。
- ④ 电缆沟内有无积水或渗水现象，是否堆有杂物及易燃易爆物品。
- ⑤ 线路上各种接地是否良好，有无松动、断股和锈蚀现象。

## 3. 车间配电线路的安全检查

要搞好车间配电线路的安全检查工作，也必须全面了解车间配电线路的布线情况、结构形式、导线型号规格及配电箱和开关的位置等，并了解车间负荷的大小及车间变电室的情况。对车间配电线路，有专门的维护电工时，一般要求每周进行1次安全检查，其检查项目如下：

- ① 检查导线的发热情况。
- ② 检查线路的负荷情况。
- ③ 检查配电箱、分线盒、开关、熔断器、母线槽及接地接零装置等的运行情况，着重检查母线接头有无氧化、过热变色和腐蚀等情况，接线有无松脱、放电和烧毛的现象，螺栓是否紧固。
- ④ 检查线路上及线路周围有无影响线路安全运行的异常情况。绝对禁止在绝缘导线上悬挂物体，禁止在线路旁堆放易燃易爆物品。
- ⑤ 对敷设在潮湿、有腐蚀性物体的场所的线路，要定期对绝缘进行检查，绝缘电阻一般不得低于 $0.5\text{M}\Omega$ 。

## 三、照明装置的巡视检查周期

定期维修其中包括定期检查项目，如每隔半年或一年测量一次线路

和设备的绝缘电阻，每年在3~4月测量一次接地电阻等，还应将日常维修不易做的工作组织定期维修。

- ① 更换和调整线路的导线。
- ② 增加或更新用电设备。
- ③ 拆换部分或全部线路和设备。
- ④ 更换接地线或接地装置。
- ⑤ 变更或调整线路走向。
- ⑥ 瓷瓶和瓷珠配线的线路，视情况需要，重新紧线或更换损坏瓷件。
- ⑦ 调整供电方式或用电设备布局。
- ⑧ 重新压接进出线电缆、中性线接线鼻子，或重新制作电缆头等。

#### 四、照明装置常见故障和处理

##### 1. 照明装置常见故障

工矿企业的电工，一般分片进行管理，首先应熟悉管片内线路走向、各地段环境特点，开关容量，线径大小及负荷情况，经常查看电压、电流是否正常，并注意以下问题：

- ① 在全部线路上，是否有未经允许私拉乱接负荷，擅自拆装开关和保护装置。
- ② 线路熔断器，有无私自更换熔丝。如不符合规范要求，易造成线路过载，甚至引起火灾。
- ③ 用电设备及其保护装置，结构是否完整、外壳有无破损，运行是否正常，有无过热，控制是否失灵。
- ④ 各接地点是否完好，接点有无松动和脱开，接地线是否发热、断裂。
- ⑤ 线路的各支持点、固定点是否牢固。导线绝缘层是否破损，包扎绝缘是否完整。
- ⑥ 观察连接点是否过热，判断连接点是否松脱，经常在线路送出端，用钳形电流表检测三相电流是否平衡，有无存在过负荷情况。
- ⑦ 整个线路、开关、熔断器、启动控制设备是否受潮、过热。
- ⑧ 在正常运行情况下，用电量是否有明显的增加，建筑物、电气设备外壳等是否存在带电现象。

上述各项一经检查发现问题，应立即采取措施加以消除，若涉及较

大的维修工作量时，视情况的严重程度，组织停电检修。

## 2. 照明电路的主要故障

据其属性，可归纳为短路、断路、过载、接触不良、连接错误五类。

### (1) 断路

如灯丝断了，灯座、开关、挂线盒断路，熔丝熔断或进户线断路等。断路会造成用电器无法用电工作。

### (2) 短路

如接在灯座两个接线柱上的相线和零线相碰，插座内两根接线相碰。短路会把熔丝熔断而使整个照明电路断电，严重者会烧毁线路引起火灾。

### (3) 过载

电路中用电器的总功率过大或单个用电器的功率过大。产生的现象和后果同短路。

### (4) 接触不良

如灯座、开关、挂线盒接触不良，熔丝接触不良，线路接头处接触不良等。这样会使电灯忽明忽暗，用电器不能连续工作。

### (5) 连接错误

如插座的两个接线柱都接在相线或零线上，开关接在主线中的相线上，用电器串联接在电路中等。

## 3. 照明电路发生故障后的检修

### (1) 检修断路

先用测电笔检查总刀开关处，如有电，再用校火灯头（一盏好的白炽灯，在灯座上引出两根线就成为校火灯头）并联在刀开关下的两个接线柱上。如灯亮，说明进户线正常（如灯不亮，说明进户线断路，修复进户线即可）。再用测电笔检查各个支路中的相线，如氖管不发光，表明这个支路中的相线断路，应修复接通相线。如果支路中的相线正常，则再用校火灯头分别接到各个支路中，哪个支路的灯不亮，就表明这个支路的零线断路了，需要修复。

### (2) 检修短路

先取下干路熔断器的盒盖，将校火灯头串接入熔断器的上下两端，如灯亮，表明电路中有短路。同样，在各个支路开关的接点用上述方法

---

将校火灯头串接进去，哪个支路的灯亮，就表明这个支路短路了，只要检修这条支路就能解决问题。

(3) 检修过载

线路中出现过载时的现象同短路相似，检修时只要减小负载即可。

(4) 接触不良

检修电路中出现接触不良现象，只要将相应的接触部位旋紧即可。

(5) 连接错误

检修电路中出现连接错误，需要将错误电路重新正确连接。

# 第五章 低 压 电 器

## 第一节 常用低压控制电器和保护电器

### 一、常用低压手动开关电器

#### 1. 常用刀开关

刀开关又称闸刀开关或隔离开关，它是手控电器中最简单而使用又较广泛的一种低压电器，刀开关是带有动触头（闸刀），并通过它与底座上的静触头相楔合（或分离），以接通（或分断）电路的一种开关，用于设备配电中隔离电源，也可用于不频繁地接通与分断额定电流以下负载，如不频繁地接通和分断容量不大的低压电路或直接起动小容量电动机。刀开关处于断开位置时，可明显观察到，能确保电路检修人员的安全。

#### （1）胶盖开关

胶盖开关是一种带熔断器的开启式负荷开关，如图 5-1 所示。

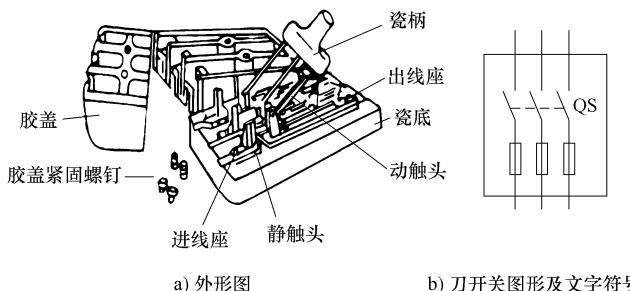


图 5-1 HK 系列瓷底胶盖刀开关

#### （2）封闭式负荷开关（铁壳开关）

铁壳开关是带灭弧装置和熔断器的封闭式负荷开关，其图形符号及文字符号与胶盖开关相同。外形结构如图 5-2 所示。

#### （3）HD 系列单投刀开关和 HS 系列双投刀开关

HD 系列单投刀开关和 HS 系列双投刀开关，均为开启式。适用于

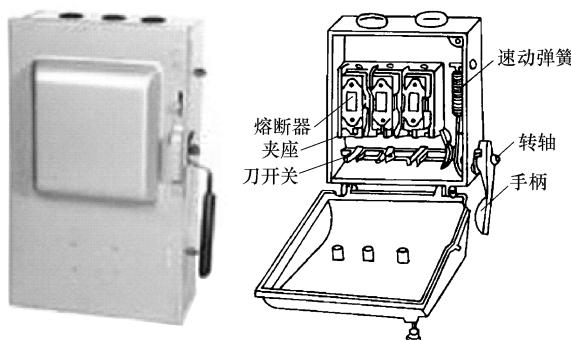


图 5-2 封闭式负荷开关外形结构图

交流频率 50Hz, 额定电压 380V 或直流 440V, 额定电流 1500A 及以下的低压成套配电装置中, 作为不频繁地手动接通和分断交、直流电路或做隔离开关用。

带有杠杆操动机构的刀开关, 用来切断额定电流的装有灭弧罩, 以保证分断时的安全、可靠。操动机构具有明显的分合指示和可靠的定位装置。有板前或板后出线可供选择, 根据需要选用机构型式, 可实现板前正面或侧面操作。双投开关可用于双电源的切换。

在用的有 HD11 ~ HD14、HD17、HD18 及 HS11 ~ HS13 等型号。HD13 型低压刀开关外形见图 5-3。

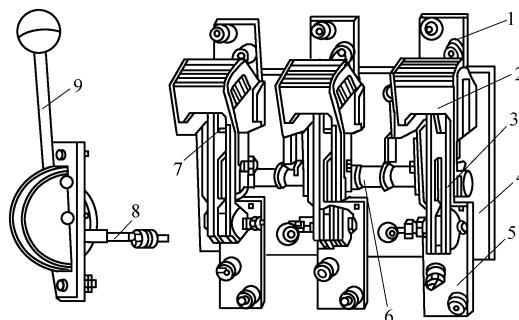
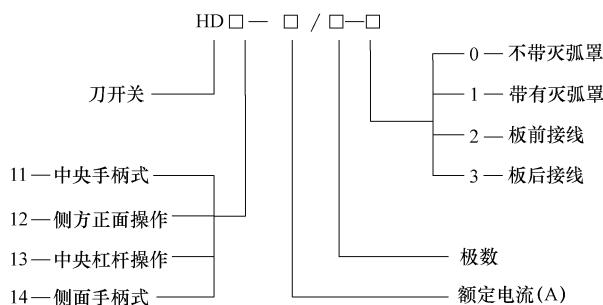


图 5-3 HD13 型低压刀开关外形 (中央杠杆操作)

1—上接线端子 2—钢栅片灭弧罩 3—刀开关 4—底座  
5—下接线端子 6—主轴 7—静触头 8—连杆 9—操作手柄

#### (4) 刀开关的类别和型号含义

刀开关的型号含义如下：



#### (5) 刀开关的选用

① 380V 动力线路，应选耐压 500V，开关的额定电流应为负载电流的 3 倍。

② 用于 220V 照明线路，应选耐压 250V，开关的额定电流应略大于负载电流。

#### (6) 适应刀开关应注意事项

① 胶木壳刀开关直接控制电动机，只能控制 5.5kW 以下的电动机。

② 没有胶木壳的刀开关不能使用。

③ 铁壳开关的外壳应保护接零或接地。

④ 铁壳开关接线时，电源线应接在刀座上，熔断器接在负荷侧。

⑤ 安装刀开关时，开关距地面的高度为 1.3~1.5m。

⑥ 刀开关在接、拆线时，应首先断电。

#### (7) 刀开关的检修

刀开关在长期的使用过程中，由于电蚀和过热，会使刀片与刀座失去弹性，产生接触不良，使设备不能正常工作，严重时会烧毁电动机。在日常维护中，应注意刀开关的温度，刀开关进出线的连接螺钉应拧紧。

① 若刀座间隙增大时，可用绝缘体压合校整。

② 当刀片和刀座烧毛时，应及时用细锉刀锉平并用砂纸抛光。

#### 2. 组合开关（转换开关）

组合开关又称转换开关，其操作较灵巧，靠动触片的左右旋转来代

替刀开关的推合与拉开。

组合开关的作用：不频繁地接通和断开电路、换接电源和负载以控制4kW及以下的小容量异步电动机的正反转和星-三角起动。常用的有HZ5、HZ10、HZ12、HZ15等型号。HZ5系列组合开关主要用于电气线路中做电源开关和电动机的起动、换向、变速开关，也可做控制线路转换之用。

HZ10系列组合开关主要是在电路中做手动不频繁地接通、分断与转换电阻电感混合负载电流、电阻负载电流，也可控制小容量交流电动机。

组合开关的结构组成如图5-4所示。

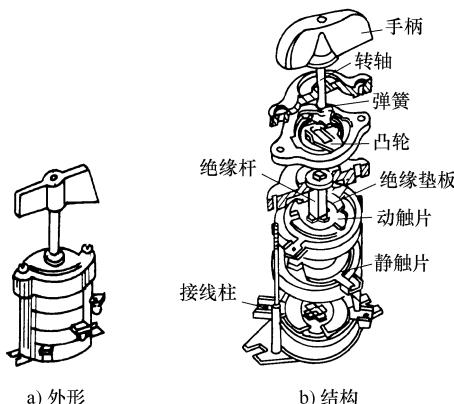


图 5-4 HZ10-10/3 型组合开关结构

组合开关的图形和文字符号如图5-5所示。

组合开关的选用：组合开关用作隔离开关时，其额定电流应为不低于被隔离电路中各负载电流的总和；用于控制电动机时，其额定电流一般取电动机额定电流的1.5~2.5倍。应根据电气控制线路中实际需要，确定组合开关接线方式，正

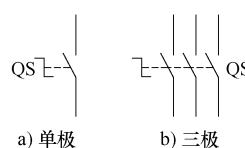


图 5-5 组合开关的图形和文字符号

确选择符合接线要求的组合开关规格。

## 二、常用低压断路器

### 1. 低压断路器的作用

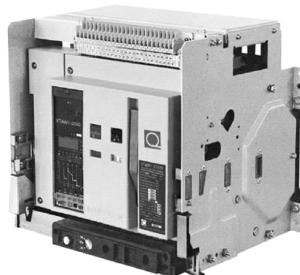
断路器曾称自动开关，是指能接通、承载以及分断正常电路条件下的电流，也能在规定的非正常电路条件（如短路）下接通、承载一定时间和分断电流的一种机械开关电器。按规定条件，对配电电路、电动机或其他用电设备实行通断操作并起保护作用，即当电路内出现过载、短路或欠电压等情况时能自动分断电路。

通俗地讲，断路器是一种可以自动切断故障线路的保护开关，它既可用来接通和分断正常的负载电流，也可用来接通和分断短路电流，在正常情况下还可以用于不频繁地接通和断开电路。

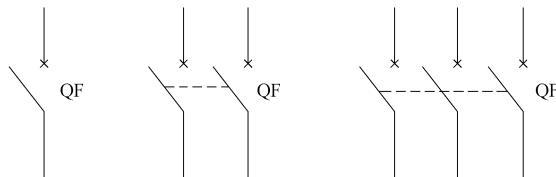
断路器具有动作值可调整，兼具控制和保护两种功能，安装方便、分断能力强，特别是在分断故障电流后一般不需要更换零部件，因此应用非常广泛。断路器的外形如图 5-6a、b 所示。常用低压断路器的图形符号和文字符号如图 5-6c 所示。



a) YTAm1 系列塑壳式断路器



b) DW45 系列智能型万能式低压断路器



c) 常用低压断路器的图形符号和文字符号

图 5-6 断路器

## 2. 配电断路器的选用

配电用断路器是指在低压配电回路中专门用于分配电能的断路器，包括电源总开关和负载支路开关。在选用这类断路器时，除应遵循一般选用原则外，还应把限制系统故障范围和防止电路故障的扩大作为考虑的重点。因此，需要增加下列选用原则：

① 断路器的长延时动作电流整定值 $\leq$ 导线容许载流量。对于采用电线电缆配电时，可取电线电缆容许载流量的80%。

② 3倍长延时动作电流整定值的可返回时间 $\geq$ 线路中最大起动电流的电动机起动时间。

③ 短延时动作电流整定值 $\geq 1.1(I_{jx} + 1.35kI_n)$

式中  $I_{jx}$ ——线路计算负载电流；

$k$ ——电动机的起动电流倍数；

$I_n$ ——电动机额定电流。

④ 瞬时电流整定值 $\geq 1.1(I_{jx} + 1.35k_1kI_{nm})$

式中  $k_1$ ——电动机起动电流的冲击系数，一般取  $k_1 = 1.7 \sim 2$ ；

$I_{nm}$ ——最大的一台电动机的额定电流。

⑤ 短延时的时间阶梯，按配电系统的通断而定。一般时间阶梯为2~3级。每级之间的短延时时差为0.1~0.2s，视断路器延时机构的动作精度而定，其可返回时间应保证各级的选择性动作。短延时阶梯选定后，最好再对被保护对象的热稳定性加以校核。

## 3. 低压断路器的安全使用与维护

断路器目前在低压配电系统中应用极为普遍，是供用电中重要设备，也是保证配电网安全、人身安全和生产、生活用电的关键设备。由于使用不当或选用不当造成的事故经常发生。特别是DZ型断路器，大部分不带失电压脱扣器，当故障停电时不能使其控制的电气设备和线路与电源脱离，若供电线路突然恢复供电，所带负荷立即投入运行。如果是不允许自行启动的设备，一旦其自行启动，就有可能造成设备损坏或造成较大的经济损失，甚至可能造成人身伤亡事故，应予以必要的重视。

## 三、剩余电流保护装置

剩余电流动作保护装置（漏电保护装置）简称为剩余电流保护装置，它是在电路中带电导线对地故障所产生的剩余电流超过规定值时能

够自动切断电流或报警的保护装置，包括各类带剩余电流保护功能的断路器、移动式剩余电流保护装置和剩余电流动作电气火灾监控系统、剩余电流继电器及其组合电器。低压配电装置中装设剩余电流保护装置是防止直接接触电击事故和间接接触电击事故的有效措施之一，也是防止电气绝缘或电气设备接地故障引起电气火灾和电气设备损坏事故的技术措施。

现在生产的剩余电流保护装置为电流动作型。其工作原理如图 5-7 所示。在电气设备正常运行时，各相线路上电流相量（矢量）和为零。当设备或线路发生接地故障或人触及外壳带电设备时，电流相量和不为零即由高灵敏零序电流互感器检出剩余电流，将剩余电流与基准值相比，当超过基准值时，脱扣器动作断路器切断电源，从而起到了剩余电流保护作用。试验回路一端接在零序电流互感器前端，另一端接在零序电流互感器后端。试验按钮串联限流电阻，试验回路中电流小于额定动作电流，脱扣器能动作断路器切断电源，则保护装置能正常工作。

剩余电流保护装置按其脱扣器来分，可分为电磁式和电子式两种。电磁式是由互感器检测的信号直接驱动高灵敏度的释放式剩余电流脱扣器，使剩余电流保护器动作。电子式则是互感器检测到的电流信号，通过电子线路比较放大后触发晶闸管或导通晶体管开关电路，接通剩余电流脱扣器的线圈而使剩余电流动作保护器动作。电磁式不需要辅助电源，其剩余电流脱扣器结构较复杂，加工制造的精度要求高；电子式灵敏度高，制造技术比电磁式简单，需要辅助电源，抗干扰能力较弱。

### 1. 剩余电流保护装置使用时的要求

### (1) 安装前的检查

① 根据电源电压、负荷电流及负载要求，选用剩余电流保护装置的额定电压、额定电流和极数。

② 根据保护的要求,选用剩余电流保护装置的额定漏电动作电流

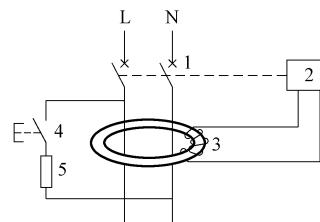


图 5-7 剩余电流  
保护装置工作原理  
1—断路器 2—脱扣器  
3—零序电流互感器  
4—试验按钮 5—限流电阻

( $I_{\Delta N}$ ) 和额定漏电动作时间 ( $\Delta t$ )。

③ 检查剩余电流保护装置的外壳是否完好，接线端子是否齐全，手动操作机构是否灵活有效等。

#### (2) 安装与接线注意事项

① 应按规定位置进行安装，以免影响动作性能。在安装带有短路保护的剩余电流保护装置时，必须保证在电弧喷出方向有足够的飞弧距离。

② 注意剩余电流保护装置的工作条件，在高温、低温、高湿、多尘以及有腐蚀性气体的环境中使用时，应采取必要的辅助保护措施，以防剩余电流保护装置不能正常工作或损坏。

③ 注意剩余电流保护装置的负载侧与电源侧。剩余电流保护装置上标有负载侧和电源侧时，应按此规定接线，切忌接反。

④ 注意分清主电路与辅助电路的接线端子。对带有辅助电源的剩余电流保护装置，在接线时要注意哪些是主电路的接线端子，哪些是辅助电路的接线端子，不能接错。

⑤ 注意区分工作中性线和保护线。对具有保护线的供电线路，应严格区分工作中性线和保护线。在进行接线时，所有工作相线及工作中性线必须接入剩余电流保护装置，否则，剩余电流保护装置将会产生误动作。而所有保护线绝对不能接入剩余电流保护装置，否则，剩余电流保护装置将会出现拒动现象。因此，通过剩余电流保护装置的工作中性线和保护线不能公用。

⑥ 剩余电流保护装置的漏电、过载和短路保护特性均由制造厂调整好，用户不允许自行调节。

⑦ 使用之前，应操作试验按钮，检验剩余电流保护装置的动作功能，只有能正常动作方可投入使用。

⑧ 剩余电流保护装置的接线如图 5-8 所示。

#### 2. 剩余电流保护装置三级配置的接线

剩余电流保护装置三级配置的接线示意图如图 5-9 所示。

### 四、交流接触器

#### 1. 交流接触器的作用

接触器是一种遥控电器，在机床电气自动控制中常用它来频繁地接通和切断交直流电路。它具有低电压释放保护功能、控制容量大，能实

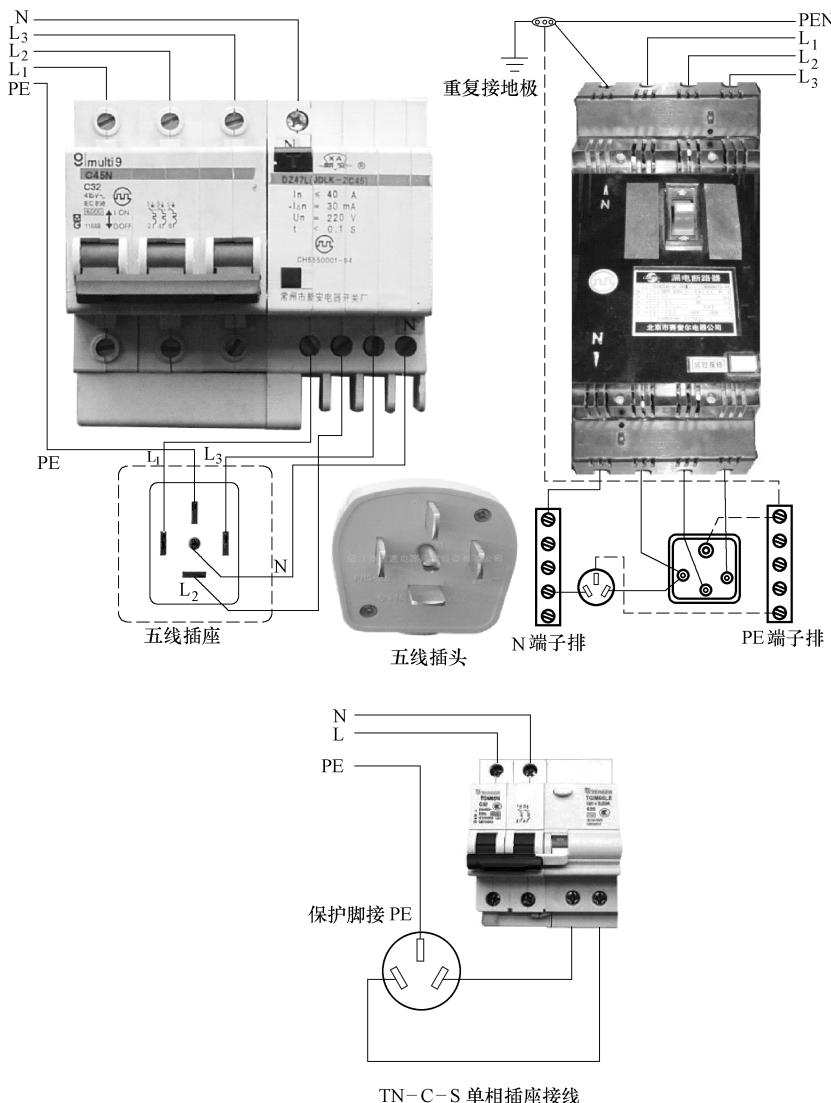


图 5-8 剩余电流保护装置的接线

现远距离控制等优点，因此在自动控制系统中，它的应用非常广泛，如图 5-10 所示。

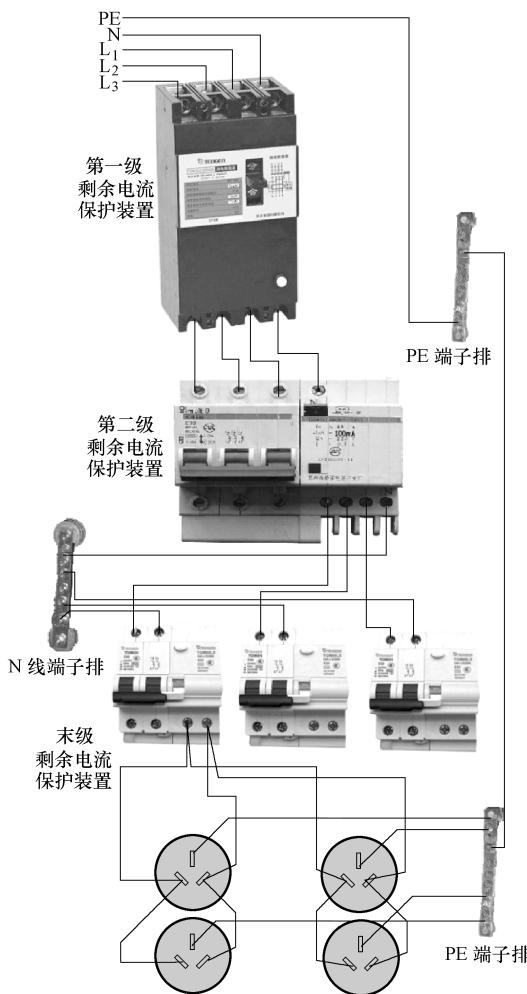


图 5-9 剩余电流保护装置三级配置的接线示意图

## 2. 交流接触器的工作原理

交流接触器具有一个套着线圈的静铁心，一个与触头固定在一起的动铁心（衔铁）。线圈通电后将静铁心磁化，产生电磁吸引力使动铁心与之对合在一起，动触头随动铁心的吸合与静触头闭合而接通电路。当线圈断电后或加在线圈上的电压低于额定值的 40% 时，动铁心就会因

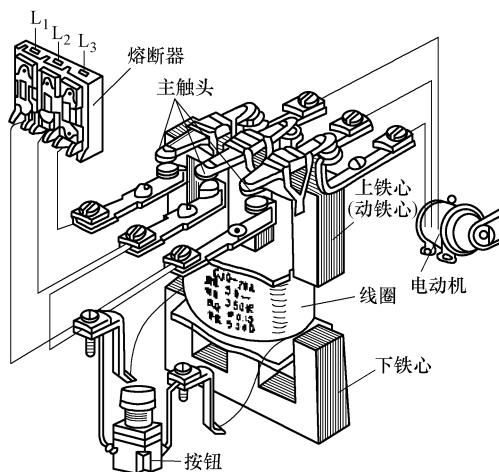


图 5-10 交流接触器的结构

电磁吸引力过小而在弹簧的作用下释放，使动、静触头分开。

### 3. 交流接触器的主要结构

交流接触器主要由电磁系统、触头系统、灭弧装置，此外交流接触器还有支持这些部件的固定件、外壳、弹簧及传动机构等。

#### (1) 电磁系统

电磁系统是用来控制触头闭合与断开的，包括吸引线圈、动铁心和静铁心，如图 5-11 所示。

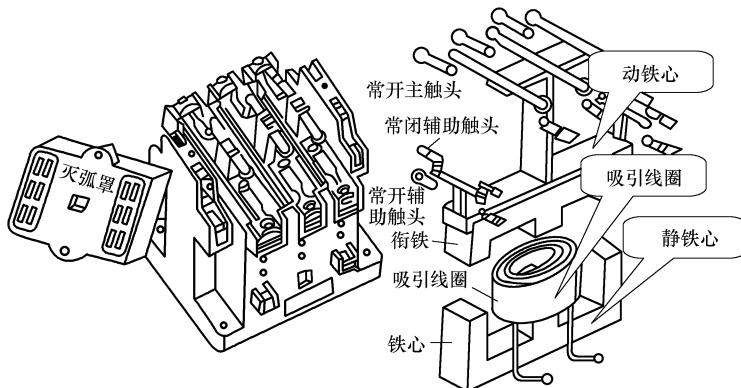


图 5-11 电磁系统

### (2) 触头系统

交流接触器的触头起断开或闭合电路的作用，因此，要求触头的导电性能良好，所以触头通常用纯铜制成。铜的表面容易氧化而生成氧化铜，使之接触不良。而银的接触电阻小，且银的黑色氧化层对接触电阻影响不大，故在触头的上半部分镶嵌银块。触头系统可分为为主触头和辅助触头两种，主触头用以通断电流较大的主电路，体积较大，一般由三对动合（常开）触头组成；辅助触头用以通断小电流的控制电路，体积较小，它有动合（常开）和动断（常闭）两种触头。所谓动合、动断是指电磁系统未通电动作前触头的状态。动合触头（常开辅助触头）和动断触头（常闭辅助触头）是一起动作的，当线圈通电时，动断触头先断开，动合触头随即闭合，如图 5-12 所示。

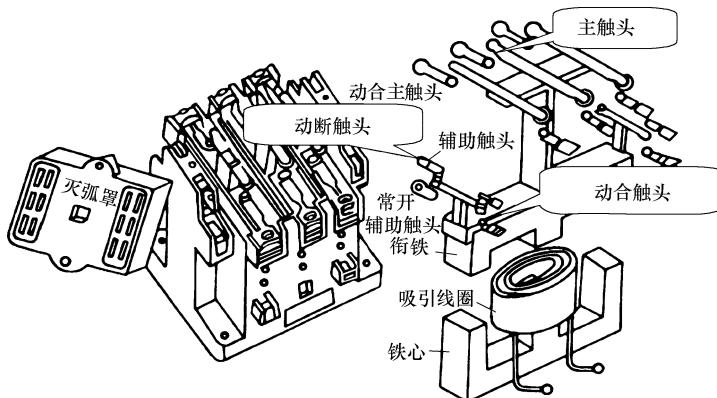


图 5-12 触头系统

### (3) 灭弧装置

交流接触器在断开大电流电路或高电压电路时，在动、静触头之间会产生很大的电弧。电弧是触头间气体在强电场作用下产生的放电现象，会发光发热，灼伤触头并使电路切断时间延长，甚至会引起其他事故，因此，为电弧能迅速熄灭，灭弧装置内有灭弧栅片，灭弧栅片装置的结构如图 5-13 所示。

常用交流接触器的图形符号和文字符号如图 5-14 所示。

## 4. 交流接触器的选用

选用交流接触器应全面考虑额定电压、额定电流、吸引线圈电压、

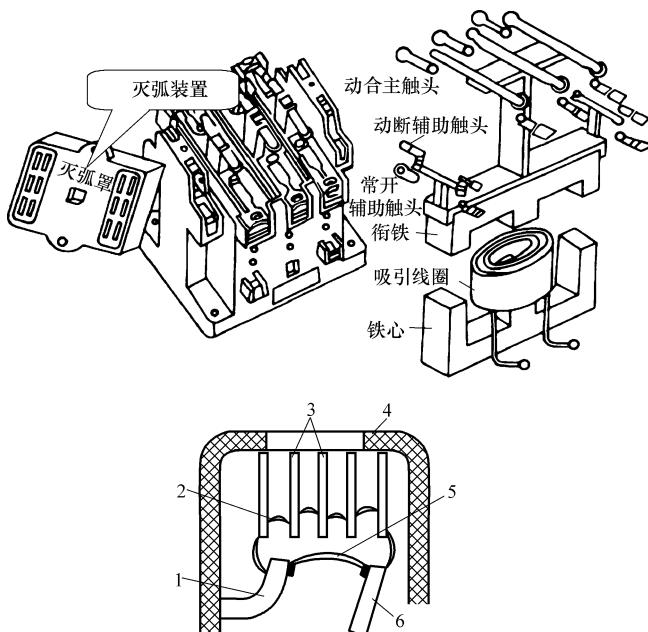


图 5-13 灭弧栅片装置

1—静触头 2—短电弧 3—灭弧栅片 4—灭弧罩 5—电弧 6—动触头

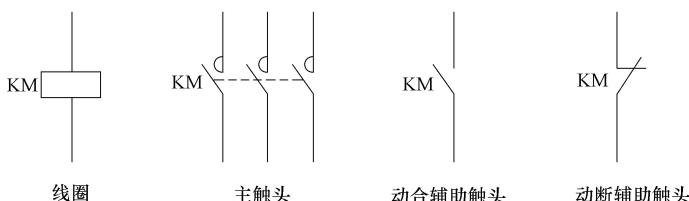


图 5-14 交流接触器的图形符号和文字符号

辅助触头数量的要求。接触器的额定电压应大于或等于主电路的额定电压，吸引线圈的额定电压应等于控制电路电压，额定电流应大于线路工作电流，辅助触头类别及数量，根据控制电路需要选定。

## 五、主令电器

主令电器是用作闭合或断开控制电路，以发出命令或作程序控制的开关电器，主要包括控制按钮、万能转换开关、按动开关、行程开关和

微动开关。

### 1. 控制按钮

控制按钮又称按钮开关，是一种短时间接通或断开小电流电路的手动控制器，一般用于电路中发出起动或停止指令，以控制电磁起动器、接触器、继电器等电器线圈电流的接通或断开，再由它们去控制主电路；按钮也可用于信号装置的控制，其图形符号和文字符号如图 5-15 所示。

按钮的一般结构是上方有两个静触头，通过下方的公共桥式触头构成一对动断的自复位常闭触头，再下方又有两个静触头，公共桥式触头与它们又构成了一对动合的常开触头。

LA10 系列按钮虽为老产品，但因结构坚固，经久耐用，故仍在普遍使用。此系列控制按钮适用于交流频率为 50Hz、电压为 380V、直流电压为 220V、额定电流不大于 5A 的控制电路中，作为遥控接通或开断起动器、接触器、继电器及其他电气线路用。

### 2. 万能转换开关

LW 系列万能转换开关可装在配电柜、控制屏、控制台上，对各种开关设备作远距离控制及小型三相笼型异步电动机的直接起动，亦可作为部分电气仪表的转换开关，触头长期允许接通电流为 5~10A。其文字符号为 SA。

目前常用的万能转换开关有 LW2、LW5、LW8 等。LW5 系列万能转换开关适用于交流频率为 50Hz，额定交流电压为 500V 及直流电压为 440V 的电路中，作为电气控制电路的转换以及电压为 380V、功率为 5.5kW 及以下的三相笼型异步电动机的直接控制（起动、可逆转换、多速电动机变速）用。

### 3. 行程开关和微动开关

#### (1) 行程开关的作用

生产机械中，常需要控制某些运动部件的行程，或运动一定行程使其停止，或在一定行程内自动返回或自动循环。这种控制机械行程的方式叫“行程控制”或“限位控制”。

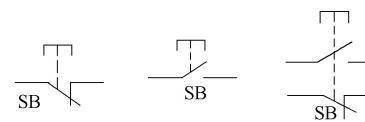


图 5-15 常用控制按钮的图形符号和文字符号

行程开关又叫限位开关，是实现行程控制的小电流（5A 以下）主令电器，其作用与控制按钮相同，只是其触头的动作不是靠手按动，而是利用机械运动部件的碰撞使触头动作，即将机械信号转换为电信号，通过控制其他电器来控制运动部件的行程大小、运动方向或进行限位保护。

## （2）行程开关的结构

常用行程开关的外形如图 5-16 所示，JLXKI 系列行程开关结构原理如图 5-17 所示，它主要由滚轮、杠杆、转轴、凸轮、撞块、调节螺钉、微动开关和复位弹簧等部件组成。

其结构形式多种多样，但其基本结构可以分为三个主要部分：摆杆（操作机构）、触头系统和外壳。其中摆杆形式主要有直动式、杠杆式和万向式三种，每种摆杆形式又分多种不同形式，如直动式又分金属直动式、钢滚直动式和热塑滚轮直动式等，滚轮又有单轮、双轮等形式。触头类型有一常开一常闭、一常开二常闭、二常开一常闭、二常开二常闭等形式，动作方式可分为瞬动、蠕动、交叉从动式三种。

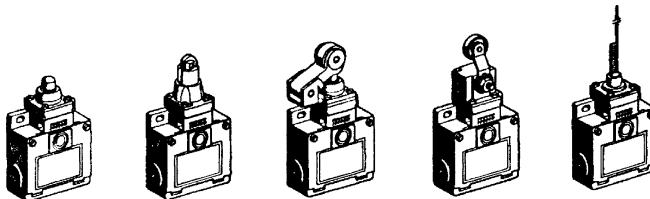


图 5-16 常用行程开关外形

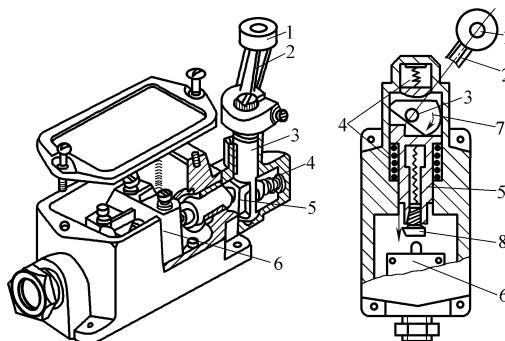


图 5-17 JLXKI 系列行程开关结构原理图

1—滚轮 2—杠杆 3—转轴 4—复位弹簧 5—撞块  
6—微动开关 7—凸轮 8—调节螺钉

## (3) 行程开关的图形符号及文字符号

行程开关的图形符号和文字符号如图 5-18 所示。

**六、低压熔断器****1. 用途和分类**

低压熔断器在用电设备和电路中用作短路保护。熔断器串联在电路中，当电路或用电设备发生短路故障时，熔断器的熔体迅速熔断，使用电设备与电源断开，起到保护作用。

低压熔断器是当电流超过规定值足够长时间后通过熔断一个或几个专门设计的部件，断开其接入的电路，并分断电流的电器，其结构简单、使用方便、价格低廉。低压熔断器主要由熔断管件、熔体和支持熔断管件的导电部件组成。熔体在电路出现短路或过载情况时，经一定时间熔断。低压熔断器的图形符号和文字符号如图 5-19 所示。

低压熔断器一般装配在 500V 及以下的低压电路中，主要用作短路保护，在无冲击负荷的情况下可用作过载保护，但其过载保护的性能较差。

**2. RCIA 系列瓷插式熔断器**

瓷插式熔断器，如图 5-20 所示。常用为 RCIA 系列瓷插式熔断器，这种熔断器一般用于民用交流频率为 50Hz、额定电压为 380V、额定电流为 200A 的低压照明电路末端或分支电路中，作为短路保护及高倍过电流保护。目前已日渐少用。其规格有 5A、10A、15A、30A、60A、100A、200A。RCIA 系列熔断器由瓷盖、瓷座、动触头、熔体、瓷插件和静触头组成。

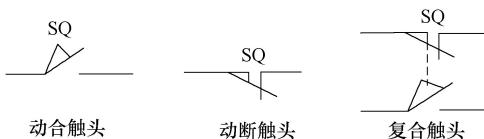


图 5-18 常用行程开关的图形符号和文字符号



图 5-19 常用低压熔断器的图形符号和文字符号

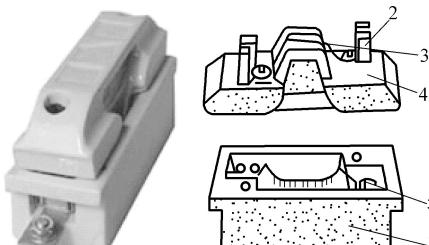


图 5-20 瓷插式熔断器  
1—瓷底座 2—动触头 3—熔体  
4—瓷插件 5—静触头

### 3. RM10 系列无填料封闭管式熔断器

RM10 系列结构也比较简单, 为可拆卸, 便于更换熔体, 它由熔断管、熔体及夹座组成。熔断管为钢纸制成, 两端通过螺纹拧上金属管帽、管帽中心压着金属圆片, 从圆片中心扁孔伸出触刀, 安装在熔断管内的熔体两端, 用螺钉分别连接。插座上固定有两闸嘴, 熔断管两端的触刀就插入夹座中。熔体为金属锌片或变截面铝片。其规格有 15A、80A、100A、200A、350A、600A、1000A 七种。

### 4. RL 系列螺旋式熔断器

螺旋式熔断器广泛应用于工矿企业低压配电设备、机械设备的电气控制系统中作短路和过电流保护。常用产品系列有 RL5、RL6 系列螺旋式熔断器, 如图 5-21 所示。螺旋式熔断器由瓷帽、熔管、瓷套、上接线端、下接线端、底座组成。熔体是一个瓷管, 内装有石英砂和熔丝, 熔丝的两端焊在熔体两端的导电金属端盖上, 其上端盖中有一个染有漆色的熔断指示器, 当熔体熔断时, 熔断指示器弹出脱落, 透过瓷帽上的玻璃孔可以看见。一般用于 200A 及以下电路中作为过载及短路的保护元件, 规格有 15A、60A、100A、200A 四种。

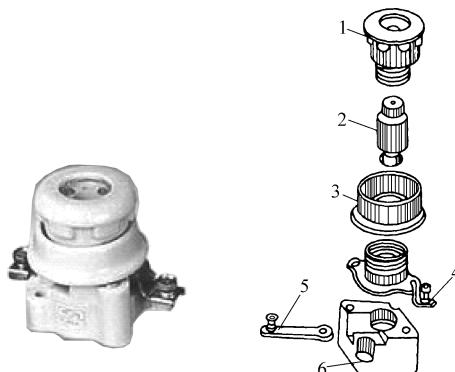


图 5-21 螺旋式熔断器

1—瓷帽 2—熔管 3—瓷套 4—上接线端 5—下接线端 6—底座

### 5. RTO 系列有填料封闭管式熔断器

有填料高分断能力熔断器广泛应用于各种低压电气电路和设备中作为短路和过电流保护。该系列熔断器由底座和熔断管组成, 熔断管内的熔体由薄紫铜片冲制而成变截面熔片, 熔管内填充石英砂, 其外形和结构

如图 5-22 所示。它的主要特点是：灭弧能力强，分断速度快；熔断管上装有熔断指示器，能在熔体熔断后立即动作跳出，因此很容易识别熔断器的通断状态；熔断器可插专用的绝缘手柄，可以在带电压的情况下更换熔断器（操作时需有人监护并戴绝缘手套）；极限分断能力较高，填料管式低压熔断器比纤维管式熔断器分断能力强。但熔断管只能一次性使用，相对维修费用也高，适用于配电电路或断流能力要求较高的场所作为过载和短路保护用。

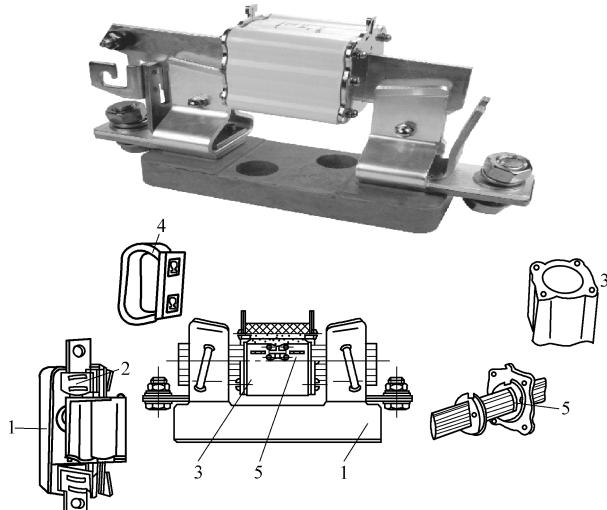


图 5-22 有填料封闭管式熔断器外形和结构  
1—瓷底座 2—弹簧片 3—管体 4—绝缘手柄 5—熔体

## 6. 快速熔断器

快速熔断器主要型号有 RS0、RS3、RLS 系列，如图 5-23 所示。RS 系列的外形与 RT 系列相似，RLS 系列与 RL 系列相似，它们都是在熔体上有所区别。

快速熔断器的熔断管都是有石英填料的，这是能快速熔断的一个条件，而熔体皆用导热性强、热容量小的银片制成，为了进一步减少熔体的热容量，熔体皆制成一组（由几片并联构成），采用变截面形状，热容量越小，熔化速度越快，一般在 6 倍额定电流时，熔断时间不大于 20ms，熔断时间约为 RLI 系列的 1/50。可用于保护半导体器件，如整流二极管、晶闸管等过载能力差的器件。

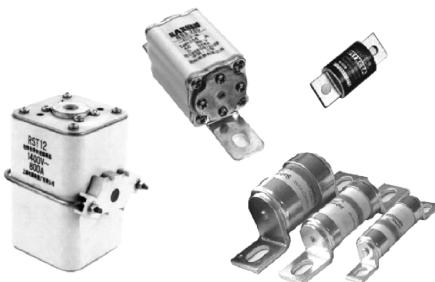


图 5-23 快速熔断器

## 7. 熔断器的选用和安全使用

### (1) 熔断器的选用

熔断器及熔体的容量，应符合设计要求，并核对所保护电气设备的容量与熔体容量相匹配；对后备保护、限流、自复、半导体器件保护等有专用功能的熔断器，严禁替代。

熔断器选用时应首先考虑对熔体额定电流的选择，要同时满足正常负荷电流和起动冲击电流两个条件。熔断器的额定电流应不小于熔体的额定电流。在其接触良好，正常散热时，通过额定电流的熔体是不会熔断的。

熔体的选择：

① 对于阻性负载：

$$I_{\text{FR}} = 1.1 I_{\text{R}}$$

式中  $I_{\text{FR}}$ ——熔体额定电流；

$I_{\text{R}}$ ——负载额定电流。

② 单台电动机：

$$I_{\text{FR}} \geq (1.5 \sim 2.5) I_{\text{R}}$$

式中  $I_{\text{FR}}$ ——熔体额定电流；

$I_{\text{R}}$ ——负载额定电流。

③ 多台电动机：

$$I_{\text{FR}} \geq (1.5 \sim 2.5) I_{\text{R}_{\text{max}}} + \sum I_{\text{R}}$$

式中  $I_{\text{FR}}$ ——熔体额定电流；

$I_{\text{R}_{\text{max}}}$ ——最大一台电动机额定电流；

$\sum I_{\text{R}}$ ——其余小容量电动机额定电流之和。

### (2) 熔断器的安全使用

- ① 熔体熔断，先排除故障后再更换熔体。安装熔体时，应将熔体“盘圈”，盘圈方向应与螺钉（或螺母）紧固熔体的方向一致。
- ② 在更换熔体管时应停电操作。
- ③ 半导体器件构成的电路应采用快速熔断器。
- ④ 熔断器安装位置及相互间距离，应便于更换熔体。
- ⑤ 有熔断指示器的熔断器，其指示器应装在便于观察的一侧。
- ⑥ 瓷质熔断器在金属底板上安装时，其底座应垫软绝缘衬垫。
- ⑦ 安装具有几种规格的熔断器，应在底座旁标明规格。
- ⑧ 有触及带电部分危险的熔断器，应配齐绝缘抓手。
- ⑨ 带有接线标志的熔断器，电源线应按标志进行接线。
- ⑩ 螺旋式熔断器的安装，其底座严禁松动，电源应接在熔芯引出的端子上。

### (3) 使用熔断器注意事项

- ① 铭牌不清的熔体不能使用。
- ② 不能用铜丝或铁丝代替熔体。
- ③ 熔体的额定值不能大于熔断器的额定值。
- ④ 更换熔断器应首先断电。

## 七、热继电器

### 1. 用途和结构

热继电器是热过载继电器的简称，它是一种利用电流的热效应来切断电路的保护电器，常与接触器配合使用，热继电器具有结构简单、体积小、价格低和保护性能好等优点，主要用于电动机的过载保护、断相及电流不平衡运行的保护及其他电气设备发热状态的控制。常用热继电器的图形符号和文字符号如图 5-24 所示。

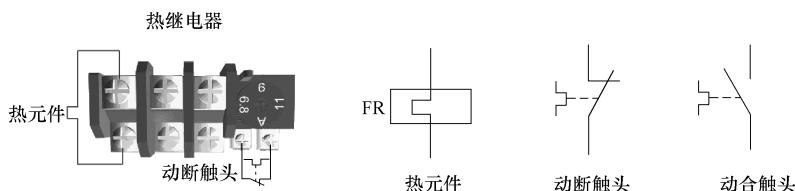


图 5-24 常用热继电器的图形符号和文字符号

热元件（感温元件）是用两种热膨胀系数不同的金属片（双金属片）用机械碾压或熔焊的方式紧密结合在一起而制成的。有的双金属片上绕有电阻丝，当过负载电流流过电阻丝或双金属片时，使之温度升高而发生弯曲变形，利用弯曲力通过联动板和弹簧使常闭触头断开，切断控制电路，致使被控制的接触器释放，分断负荷的主电路，起到保护作用。热继电器外形结构如图 5-25 所示。

图 5-26 所示为双金属片式热继电器的结构原理示意图。由图可见，热继电器由热元件、双金属片、复位按钮、导杆、拉簧、连杆、触头和接线端子等组成，另外还有外壳、电流整定机构和温度补偿双金属片等部件。

## 2. 选用热继电器

选用热继电器时应根据使用条件、工作环境、电动机的型式及其运行条件及要求，电动机起动情况及负载情况等几个方面综合加以考虑。必要时应进行合理计算。

① 热继电器型式的选择：一般热继电器的安装方式应按实际安装情况选择。安装时热继电器应布置在整个开关柜（箱）的下部。

② 原则上热继电器（热元件）的额定电流等于或略大于电动机的额定电流；一般按电动机的额定电流的  $0.95 \sim 1.05$  倍选择热继电器（热元件）的额定电流。热继电器选定后，再根据电动机的额定电流调整热继电器的整定电流，使整定电流与电动机的额定电流相等。对于过载能力较差的电动机，所选的热继电器的额定电流应适当小一些，并且将整定电流调到电动机额定电流。当电动机因带负载起动而起动时间较长或电动机的负载是冲击性的负载（如冲床等）时，则热继电器的整定电流应稍大于电动机的



图 5-25 热继电器外形结构

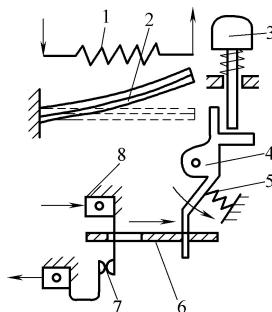


图 5-26 双金属片式热继电器的结构原理示意图

1—热元件 2—双金属片

3—复位按钮 4—导杆

5—拉簧 6—连杆

7—辅助触头 8—接线端子

额定电流。

③ 热继电器的主要参数是热元件的整定电流范围，该参数选择得好坏，直接影响热继电器的保护性能和动作的可靠性。通常选择的整定电流范围的中间值应等于或稍大于电动机的额定电流，每一种额定工作电流等级的热继电器有若干不同额定电流的热元件可供选择。

④ 由于热继电器有热惯性，不能作短路保护，应考虑与短路保护配合问题。

⑤ 当电动机工作于重复短时工作制时，要注意确定热继电器的允许操作频率。因为热继电器的操作频率是很有限的，操作频率较高时，热继电器的动作特性会变差，甚至不能正常工作。对于可逆运行和频繁通断的电动机，不宜采用热继电器作保护，必要时可选用装入电动机内部的温度保护。

⑥ 热继电器安装接线时应注意连线的导线截面积和长度在允许范围内。

### 3. 热继电器在使用时的要求和注意事项

① 热继电器必须按产品使用说明书的规定进行安装。当它与其他电器装在一起时，应将其装在其他电器的下方，以免其动作特性受到其他电器发热的影响。

② 热继电器的连接导线应符合规定要求。

③ 安装时，应清除触头表面等部位的尘垢，以免影响继电器的动作性能。

④ 运行前，应检查接线和螺钉是否牢固可靠，动作机构是否灵活、正常。

⑤ 运行前，还要检查其整定电流是否符合要求。

⑥ 若热继电器动作后，必须对电动机和设备状况进行检查，为防止热继电器再次脱扣，一般采用手动复位；而对于易发生过载的场合，一般采用自动复位。

⑦ 对于点动、重载起动、连续正反转及反接制动运行的电动机，一般不宜使用热继电器。

⑧ 使用中，应定期清除污垢，双金属片上的锈斑可用布蘸汽油轻轻擦拭。

⑨ 每年应通电校验一次。

## 第二节 低压成套配电装置

### 一、配电箱

低压配电箱又叫开关屏或配电盘、配电柜，它是将低压电路所需的开关设备、测量仪表、保护装置和辅助设备等，按一定的接线方案安装在金属柜内构成的一种组合式电气设备，用以进行控制、保护、计量、分配和监视等。适用于发电厂、变电所、厂矿企业中作为额定工作电压不超过380V低压配电系统中的动力配电、照明配电之用。

#### 1. 低压配电箱结构特点

我国生产的低压配电箱基本可分为固定式和手车式（抽屉式）两大类，基本结构方式可分为焊接式和组合式两种。常用的低压配电柜主要有GCD、GCK、GCS、MNS这几种型号。

##### （1）GCD型配电柜的特点

GCD型低压配电柜是固定式低压柜，该开关柜具有机构合理，安装维护方便，防护性能好，分断能力高，容量大，动稳定性强等优点；但其回路少，单元之间不能任意组合，且占地面积大，还不能与计算机通信，不利于远程控制。

##### （2）GCK型配电柜的特点

GCK型低压配电柜是抽屉式低压柜，具有分断能力高、动热稳定性好、结构先进合理、电气方案灵活。一台柜体，容纳的回路数较多、节省占地面积、防护等级高、安全可靠、维修方便等优点。但其水平母线设在柜顶垂直母线没有阻燃型塑料功能板，其安全性受到一定影响，且标准化不强，各个厂家生产的GCK型柜配件不统一，其从抽屉的推进方式上又基本上分单拔插式、双拔插式、摇进式；抽屉单元大多数没有清晰的3段位置，只能实现基本的联锁，大多数没有试验位置，此外同样不能与计算机通信，不利于远程控制。

##### （3）GCS型配电柜的特点

GCS型配电柜是抽屉式低压柜，具有较高技术性能指标，能够适应电力市场发展需要。还具有分断、接通能力高、动热稳定性好、电气方案灵活、组合方便、系列性实用性强、结构新颖、防护等级高等特点。但是其结构制作，尤其是装配十分麻烦，都采用螺栓连接，速度较慢，工作量大。

#### (4) MNS 型配电柜的特点

MNS 型配电柜是抽屉式低压柜，它是按照 ABB 公司转让技术制造的产品，配电柜的基本柜架为组合式装配结构，柜架的全部结构件都经过镀锌处理，柜体分隔为母线室、抽屉小室、电缆室三个室。室与室之间用高强度阻燃塑料功能板及钢板相互隔开，抽屉之间有带孔的金属板，可以有效防止开关元件弧光放电或母线、线缆短路造成事故。配电柜内零部件尺寸，隔室尺寸，及抽出式功能单元均采用标准化生产，且抽出式功能单元与柜体有机械联锁装置，只有当主电路和辅助电路全部断开的状态下才能抽出，抽屉具有试验位置、分断位置、连接位置和分离位置，便于检修和更换。相比较而言，MNS 型柜通用化、标准化程度最高，设计更为合理，产品技术更成熟完备，安全可靠性更高，供电可靠性高。

### 2. 低压配电箱安装及投运前检查

#### (1) 配电箱安装要求

① 配电箱应安装在安全、干燥、易操作的场所，如设计无特殊要求，配电箱底边距地高度应为 1.5m，照明配电板底边距地高度不应小于 1.8m。

② 导线剥削处不应损伤线芯或线芯过长，导线压头应牢固可靠，如多股导线与端子排连接时，应加装压线端子（鼻子），然后一起涮锡，再按压在端子排上。如与压线孔连接时，应把多股导线涮锡后穿孔用顶丝压接，注意不得减少导线股数。

③ 导线引出面板时，面板线孔应光滑无毛刺，金属面板应装设绝缘保护套。一般情况一孔只穿一线，但下列情况除外：

- a) 指示灯配线；
- b) 控制两个分闸的总闸配线线号相同；
- c) 一孔进多线的配线。

④ 配电箱内装设的螺旋熔断器，其电源线应接在中间触头的端子上，负载线应接在螺钉的端子上。

⑤ 配电箱内盘面闸具位置应与支路相对应，其下面应装设卡片框，标明回路名称。

⑥ 配电箱内的交流、直流或不同电压等级电源，应具有明显的标志。

⑦ 配电箱盘面上安装的各种刀开关及断路器等，当处于断路状态时，刀片可动部分均不应带电（特殊情况除外）。

⑧ 配电箱上的小母线应带有黄（L1相）、绿（L2相）、红（L3相）、淡蓝（N线）等颜色，黄绿相间双色线为保护地线。

⑨ 配电箱上电具、仪表应牢固平正整洁、间距均匀，铜端子无松动，启闭灵活，零部件齐全，其排列间距应符合表5-1的要求。

表5-1 零部件排列间距表

间距	最小尺寸/mm
仪表侧面之间或侧面与盘面	60以上
仪表顶面或出线孔与盘边	50以上
闸具侧面之间或侧面与盘边	30以上
上下出线之间	隔有卡片框；40以上；未隔卡片框；20以上

⑩ 在照明配电工程中，当采用TN-C系统时，N线干线不应设接线端子板（排）。当采用TN-C-S系统时，一般应在建筑物进线II接配电箱内分别设置N母线和PE母线，并自此分开。电源进线的PEN线应先接到PE母线上，再以连接板或其他方式与N母线相连，N线应与地绝缘，PE线应采用专门的导线，并应尽量靠近相线敷设。

⑪ 配电箱内应分别设置零线（N）和保护地线（PE线）汇流排，各支路零线和保护地线应在汇流排上连接，不得绞接，并应有编号。

⑫ 配电箱内的接地应牢固良好。保护接地线的截面积应按表5-2的规定选择，并应与设备的主接地端子有效连接。

表5-2 保护接地线的截面积的选择

装置的相、导线的截面积 $S/\text{mm}^2$	相应的保护导线的最小截面积 $S_p$
$S \leq 16$	$S_p = S$
$16 < S \leq 35$	$S_p = 16$
$35 < S \leq 400$	$S_p = S/2$

⑬ 配电箱的箱体及二层金属覆板均应与保护接地电路连接，在订货时应提出设置专用的、不可拆卸的接地螺钉，其保护接地线截面积按表5-2的规定选择，并应与其专用接地螺钉有效连接。注意：PE线不允许利用箱体、盒体串接。

配电箱如装有超过50V电器设备可开启的门、活动面板、活动台面，必须用裸铜软线与接地良好的金属构架可靠连接。

## (2) 低压配电箱运行前的检查要求

低压配电箱在安装或检修后，投入运行前应进行下列各项检查试验：

- ① 检查柜体与基础型钢固定是否牢固，安装是否平直。箱面油漆应完好，箱内应清洁，无积垢。
- ② 各开关操作灵活，无卡涩，各触头接触良好。
- ③ 用塞尺检查母线连接处接触是否良好。
- ④ 二次电路接线应整齐牢固，线端编号符合设计要求。
- ⑤ 检查接地是否良好。
- ⑥ 抽屉式配电箱应检查推抽是否灵活轻便，动、静触头应接触良好，并有足够的接触压力。
- ⑦ 试验各表计是否准确，继电器动作是否正常。

⑧ 用 1000V 绝缘电阻表测量绝缘电阻，应不小于  $0.5\text{M}\Omega$ ，并按标准进行交流耐压试验，一次电路的试验电压为工频 1kV，也可用 2500V 绝缘电阻表试验代替。

## 二、低压配电装置

### 1. 低压配电装置的巡检

为了保证对用电场所的正常供电，对配电屏上的仪表和电器应经常进行检查和维护，并做好记录，以便随时分析运行及用电情况，及时发现问题和消除隐患。

对运行中的低压配电屏，通常应检查以下内容：

- ① 配电屏及屏上的电气元件的名称、标志、编号等是否清楚、正确，盘上所有的操作把手、按钮和按键等的位置与现场实际情况是否相符，固定是否牢靠，操作是否灵活。
- ② 配电屏上表示“合”、“分”等信号灯和其他信号指示是否正确。
- ③ 隔离开关、断路器、熔断器和互感器等的触头是否牢靠，有无过热、变色现象。
- ④ 二次电路导线的绝缘是否破损、老化，并摇测其绝缘电阻。
- ⑤ 配电屏上标有操作模拟板时，模拟板与现场电气设备的运行状态是否对应。
- ⑥ 仪表或表盘玻璃是否松动，仪表指示是否正确，并清扫仪表和

其他电器上的灰尘。

⑦ 配电室内的照明灯具是否完好，照度是否明亮均匀，观察仪表时有无眩光。

⑧ 巡视检查中发现的问题应及时处理，并记录。

## 2. 低压配电装置运行维护

① 对低压配电装置的有关设备，应定期清扫和摇测绝缘电阻（对工作环境较差的应适当增加次数），如用500V绝缘电阻表测量母线、断路器、接触器和互感器的绝缘电阻，以及二次电路的对地绝缘电阻等均应符合规程要求。

② 低压断路器故障跳闸后，应检修或更换触头和灭弧罩，只有查明并消除跳闸原因后，才可再次合闸运行。

③ 对频繁操作的交流接触器，每三个月进行检查，测试项目有：检查时应清扫一次触头和灭弧栅，检查三相触头是否同时闭合或分断，摇测相间绝缘电阻。

④ 定期校验交流接触器的吸引线圈，在线路电压为额定值的85%~105%时吸引线圈应可靠吸合，而电压低于额定值的40%时则应可靠地释放。

⑤ 经常检查熔断器的熔体与实际负载是否相匹配，各连接点接触是否良好，有无烧损现象，并在检查时清除各部位的积灰。

⑥ 注意铁壳开关的机械闭锁是否正常，速动弹簧是否锈蚀、变形。

⑦ 检查三相瓷底胶盖刀开关是否符合要求，用作总开关的瓷底胶盖刀开关内的熔体是否已更换为铜或铝导线，在开关的出线侧是否加装了熔断器与之配合使用。

## 3. 低压配电装置异常运行及故障处理

① 低压母线和设备连接点超过允许温度时，应迅速停下次要负荷，以控制温度上升，然后再停缺陷设备进行检修。遇异常现象时，除作紧急停电外，应报告电气主管上级。

② 各种电器触头和接点过热时，应检查触头压力或接触连接点紧固程度，消除氧化层，打磨接点，调整压力，拧紧连接处。

③ 电磁铁噪声过大，应检查铁心接触面是否平整、对齐，有无污垢、杂质和铁心锈蚀，检查短路环有无断裂，检查电源电压是否降低等，然后采取检修措施。

- ④ 低压电器内发生放电声响，应立即停止运行，取下灭弧罩或外壳，检查触头接触情况，并摇测对地及相间绝缘电阻是否合格。
- ⑤ 如灭弧罩或灭弧栅损坏或掉落，即便是一相，均应停止该设备运行，待修复后方准使用。
- ⑥ 三相电源发生断相运行或电流互感器二次开路时，应及时停电进行处理。
- ⑦ 使用不同型号空气断路器发生越级掉闸时，应校验定值配合是否正确。
- ⑧ 室外电器、控制箱操作前应遥测绝缘，以防漏水或绝缘老化短路，不合格应立即检修或更换元器件。

# 第六章 电动机与电动机拖动

## 第一节 异步电动机概述

电动机是根据电磁感应原理，将电能转换为机械能并输出机械转矩的一种动力装置。在电动机中，由于异步电动机具有结构简单、运行可靠、维护方便、坚固耐用、使用交流电源等优点，所以它是在机床、起重机械、水泵、风机、各种生产机械、电力排灌、农副产品加工设备中使用极为广泛的动力机。

### 一、电动机的分类

电动机的种类繁多，用途各异，可以有多种不同的分类方法。

① 按工作电源分类。根据电动机工作电源的不同，可分为直流电动机和交流电动机。其中交流电动机还分为单相电动机和三相电动机。

② 按结构及工作原理分类。电动机按结构及工作原理可分为异步电动机和同步电动机。同步电动机还可分为永磁同步电动机、磁阻同步电动机和磁滞同步电动机。异步电动机可分为感应电动机和交流换向器电动机。

③ 按起动与运行方式分类。电动机按起动与运行方式可分为电容起动式电动机、电容运转式电动机、电容起动运转式电动机和分相式电动机。

### 二、三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机由固定的定子和旋转的转子两个基本部分组成，转子装在定子内腔里，借助轴承被支撑在两个端盖上。为了保证转子能在定子内自由转动，定子和转子之间必须有一间隙，称为气隙。电动机的气隙是一个非常重要的参数，其大小及对称性等对电动机的性能有很大影响。图 6-1 所示为三相笼型异步电动机的组成部件。

#### 1. 定子

定子由定子三相绕组、定子铁心和机座组成。

定子三相绕组是异步电动机的电路部分，在异步电动机的运行中起

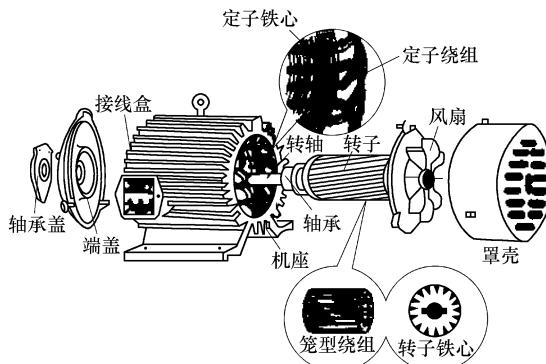


图 6-1 三相笼型异步电动机的组成部件

着很重要的作用，是把电能转换为机械能的关键部件。定子三相绕组的结构是对称的，一般有六个出线端  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ ，置于机座外侧的接线盒内，根据需要接成星形 ( $\text{Y}$ ) 或三角形 ( $\Delta$ )，如图 6-2 所示，定子三相绕组的构成、连接规律及其作用将在下节中专门介绍。

定子铁心是异步电动机磁路的一部分，由于主磁场以同步转速相对定子旋转，为减小在铁心中引起的损耗，铁心采用 0.5mm 厚的高导磁硅钢片叠成，硅钢片两面涂有绝缘漆以减小铁心的涡流损耗。

机座又称机壳，它的主要作用是支撑定子铁心，同时也承受整个电动机负载运行时产生的反作用力，运行时由于内部损耗所产生的热量也是通过机座向外散发。中、小型电动机的机座一般采用铸铁制成。大型电动机因机身较大浇注不便，常用钢板焊接成型。

## 2. 转子

异步电动机的转子由转子铁心、转子绕组及转轴组成。

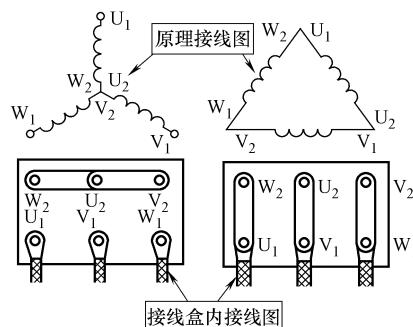


图 6-2 三相笼型异步电动机出线端

转子铁心也是电动机磁路的一部分，也是用硅钢片叠成。与定子铁心冲片不同的是，转子铁心冲片是在冲片的外圆上开槽，叠装后的转子铁心外圆柱面上均匀地形成许多形状相同的槽，用以放置转子绕组。

转子绕组是异步电动机电路的另一部分，其作用为切割定子磁场，产生感应电势和电流，并在磁场作用下受力而使转子转动。其结构可分为笼型绕组和绕线式绕组两种类型。这两种转子各自的主要特点是：笼型转子结构简单，制造方便，经济耐用；绕线式转子结构复杂，价格贵，但转子回路可引入外加电阻来改善起动和调速性能。

笼型转子绕组由置于转子槽中的导条和两端的端环构成。为节约用钢和提高生产率，小功率异步电动机的导条和端环一般都是融化的铝液一次浇铸出来的；对于大功率的电动机，由于铸铝质量不易保证，常用铜条插入转子铁心槽中，再在两端焊上端环。笼型转子绕组自行闭合，不必由外界电源供电，其外形像一个笼子，故称笼型转子，如图 6-3 所示。

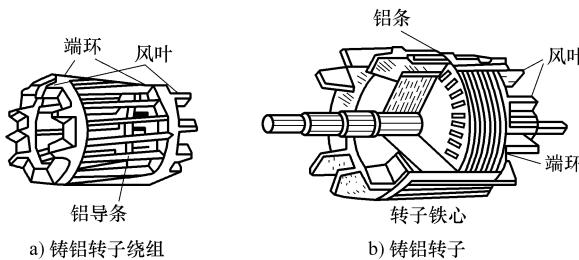


图 6-3 笼型转子结构

### 3. 气隙

异步电动机的气隙是很小的，中小型电动机一般为  $0.2 \sim 2\text{mm}$ 。气隙越大，磁阻越大，要产生同样大小的磁场，就需要较大的励磁电流。由于气隙的存在，异步电动机的磁路磁阻远比变压器为大，因而异步电动机的励磁电流也比变压器的大得多。变压器的励磁电流约为额定电流的 3%，异步电动机的励磁电流约为额定电流的 30%。励磁电流是无功电流，因而励磁电流越大，

## 第二节 三相异步电动机的工作原理

### 一、旋转磁场

三相异步电动机的定子绕组是三相对称的。也就是说，三相绕组的

线圈数及匝数均相同，且在空间沿定子铁心的内圆均匀分布，互差 $120^\circ$ 电角度。图 6-4 所示为一最简单的三相定子绕组，其每相仅有一个线圈，分别用  $U_1-U_2$ 、 $V_1-V_2$ 、 $W_1-W_2$  表示。

如将三相绕组按  $\text{Y}$  联结后接至三相电源上，在三相绕组内就会流过三相对称电流，按照电磁学原理，其每相绕组中的电流均将产生磁场，三相绕组会产生一个合成磁场，此合成磁场是一个旋转磁场。在对称条件下，合成磁场的大小不变。

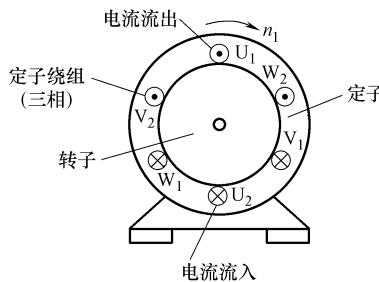


图 6-4 三相定子绕组

## 二、工作原理

按照电磁学原理，三相异步电动机定子的三相对称绕组接入三相对称电源后，在电动机中就会产生大小不变的旋转磁场。在旋转磁场的作用下，转子绕组中即产生感应电动势和感应电流。转子电流与旋转磁场相互作用，产生电磁作用力，使转子转动，这就是异步电动机的工作原理。由于三相异步电动机的转动是基于电磁感应原理而工作的，所以又称其为三相感应电动机。

## 三、转向和转速

### 1. 旋转方向

旋转磁场的方向与电流达到正的最大值的那一相绕组的轴线总是一致的，所以旋转磁场的旋转方向总是与三相绕组电流的相序一致，即从前相的位置向滞后的位臵旋转。三相异步电动机的三相定子绕组  $U_1-U_2$ 、 $V_1-V_2$ 、 $W_1-W_2$  是按照三相电流的相序分别接到三相电源  $U$ 、 $V$ 、 $W$  上的。显然，任意对调两根电源线，就可使旋转磁场方向发生变化，就可以实现改变三相异步电动机旋转方向的目的。

## 2. 旋转速度

电流变化的角度与旋转磁场变化的角度相同。电流变化一个周期，旋转磁场转过  $360^\circ$  电角度。磁场极对数  $p = 1$  时，电角度等于机械角度。也就是电流变化一周，磁场转过  $360^\circ$  机械角度，亦即转了一转。磁极对数为  $p$  时，从 N 极到 N 极是  $360^\circ/p$  机械角度。电流变化一周，旋转磁场转过  $360^\circ/p$  机械角度，即转过  $1/p$  转。因此，旋转磁场每分钟的转速与定子绕组电流频率及磁极对数  $p$  之间存在以下关系：

$$n_1 = 60f_1/p$$

式中  $n_1$ ——旋转磁场每分钟的转速（同步转速或旋转磁场速度）；

$f_1$ ——定子绕组的电流频率；

$p$ ——磁极对数。

因为  $n_1$  与  $f_1$  保持恒定的关系，故  $n_1$  称为同步转速。电源频率  $f_1 = 50\text{Hz}$  时，磁极对数  $p$  与同步转速  $n_1$  之间的关系见表 6-1。

表 6-1 磁极对数与同步转速的关系

磁极对数 $p$	1	2	3	4	5	6
同步转速 $n_1/(\text{r}/\text{min})$	3000	1500	1000	750	600	500

## 3. 转差率

电动机转子转动方向与磁场旋转的方向相同，但转子的转速  $n$  不可能达到与旋转磁场的转速  $n_0$  相等，否则转子与旋转磁场之间就没有相对运动，因而磁力线就不切割转子导体，转子电动势、转子电流以及转矩也就都不存在。也就是说旋转磁场与转子之间存在转速差，因此我们把这种电动机称为异步电动机，又因为这种电动机的转动原理是建立在电磁感应基础上的，故又称为感应电动机。

旋转磁场的转速  $n_0$  常称为同步转速。

转差率  $s$  是用来表示转子转速  $n$  与磁场转速  $n_0$  相差的程度的物理量，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} \quad (6-1)$$

转差率是异步电动机的一个重要的物理量 ( $0 \leq s \leq 1$ )。

## 四、电动机的机械特性

电动机的机械特性就是电动机的转速与转矩的关系曲线。如图 6-5

所示，异步电动机的机械特性是一条有最大值的特性曲线。

电动机在刚起动瞬间，即  $n=0$  瞬间的转矩称为堵转转矩，其值不大，见图 6-5 中的  $M_s$ 。当  $M_s$  大于电动机轴上的反抗转矩（由负载力矩、电动机风阻和摩擦等产生）时，电动机开始旋转，并逐渐加速。由机械特性曲线可知，此时电磁转矩沿  $CB$  部分上升，经最大转矩  $M_m$  后，又沿着曲线的  $BA$  部分逐渐下降，最后当电磁转矩等于反抗转矩时，就以某一转速等速旋转。如果达到额定转速，则转矩等于零。

电动机的堵转转矩越大，电动机的起动性能越好。一般电动机的起动转矩为电动机额定转矩的 1.1~2 倍。

电动机的最大转矩越大，电动机的过载能力越强。一般异步电动机的过载能力为 1.8~2.5 倍额定转矩。

电动机的额定转矩必须小于最大转矩  $M_m$ ，使用中还不能过于靠近最大转矩，否则当电动机稍有过载时，就会立即停转。在实际应用中，常使电动机的额定转矩比最大转矩小得多。最大转矩与额定转矩的比值称为电动机的过载能力。

应该指出，异步电动机的转矩与定子绕组的外加电压的二次方成正比。电动机外加电压的变动对异步电动机的转矩影响较大。

### 第三节 三相异步电动机的使用

#### 一、电动机的主要技术参数

##### 1. 铭牌

每台异步电动机机壳上都装有铭牌，把它的运行额定值印刻在上面，如图 6-6 所示。

##### 2. 主要技术参数

电动机按铭牌上所规定的条件运行时，就称为电动机的额定运行状态。根据国家标准规定，异步电动机的额定值主要有：

① 额定功率  $P_N$ ：指电动机在制造厂（铭牌）所规定额定运行状态下运行时，轴端输出的机械功率，单位为 W 或 kW。

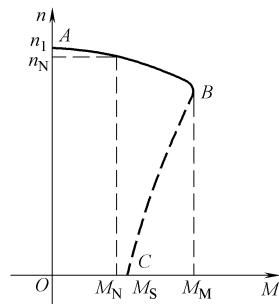


图 6-5 异步电动机的机械特性曲线

三相异步电动机			
型号 Y-112M-4		编号	
4.0kW		8.8A	
380kV	1440r/min	LW82dB	
接法△	防护等级 IP44	50Hz	45kg
标准编号	工作制 S1	B级绝缘	年月
××电机厂			

图 6-6 三相异步电动机铭牌

② 定子额定电压  $U_N$ ：指电动机在额定状态下运行时，定子绕组应加的线电压，单位为 V 或 kV。

③ 定子额定电流  $I_N$ ：指电动机在额定电压下运行，输出额定功率时，流入定子绕组的电流，单位为 A。

对三相异步电动机，额定功率为

$$P_N = \sqrt{3}U_N I_N \eta_N \cos\varphi_N \quad (6-2)$$

式中  $\eta_N$ ——额定运行时异步电动机的效率；

$\cos\varphi_N$ ——额定运行时异步电动机的功率因数。

④ 额定转速  $n_N$ ：指电动机在额定状态下运行时，转子的转速，单位为 r/min。

⑤ 额定频率  $f_N$ ：我国工频为 50Hz。

除上述数据外，铭牌上有时还标明定子相数和绕组接法、额定运行时电动机的功率因数、效率、温升或绝缘等级、定额等。对绕线转子异步电动机还标出定子加额定电压、转子开路时集电环间的转子电压和转子的额定电流等数据。下面对绕组接法、温升和定额作简要说明。

绕组接法：三相异步电动机的定子绕组可接成星形或三角形，视额定电压和电源电压的配合情况而定。例如星形联结时额定电压为 380V，则改为三角形时就可用于 220V 的电源上。为了满足这种改接的需要，通常把三相绕组的 6 个端头都引到接线板上，以便于采用两种不同联结，如图 6-7 所示。

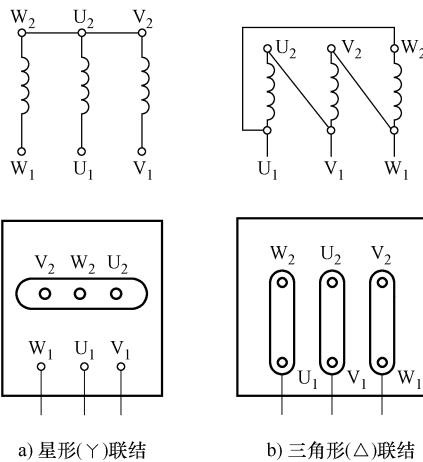


图 6-7 三相异步电动机的接线板

**温升：**指电动机按规定方式运行时，绕组容许的温度升高，即绕组的温度比周围空气温度高出的数值。容许温升的高低取决于电动机所使用的绝缘材料。例如 Y 系列电动机一般采用 B 级绝缘，其最高容许温度为 130℃，如周围空气温度按 40℃ 计算，并计入 10℃ 的裕量，则 B 级绝缘的容许温升为  $130^{\circ}\text{C} - (40^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) = 80^{\circ}\text{C}$ 。

**定额：**我国电动机的定额分为 3 类，即连续定额、短时定额和断续定额。连续定额是指电动机按铭牌规定的数据长期连续运行。短时定额和断续定额均属于间歇运行方式，即运行一段时间后就停止运行一段时间。可见，短时定额和断续定额方式下，有一段时间电动机不发热，所以，容量相同时这类电动机的体积可以做得小一些，或者连续定额的电动机用作短时定额或断续定额运行时，所带的负载可以超过铭牌上规定的数值。但是，短时定额和断续定额的电动机不能按其容量作连续运行，否则会使电动机过热而损坏。

每台电动机的机座上都安装有一块铭牌。铭牌上标明了电动机的型号和主要技术数据。了解铭牌上的数据的意义，才能正确选择、使用和维护电动机。

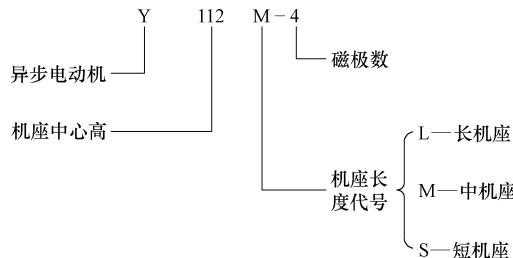
**绝缘等级：**指电动机内部所有绝缘材料所具备的耐热等级。它规定了电动机绕组和其他绝缘材料可承受的允许温度。绝缘材料的耐热分级

见表 6-2。

表 6-2 绝缘材料的耐热分级

级别	Y 级	A 级	E 级	B 级	F 级	H 级	C 级
允许工作温度/℃	90	105	120	130	155	180	180 以上

型号：用英文字母和阿拉伯数字表示电动机的类型，如：



Y 系列电动机是我国 1982 年统一设计的更新换代产品，具有效率高、起动转矩大、噪声低、振动小、防护性能好、安全可靠、采用 B 级绝缘材料等优点，各项参数符合国际电工委员会（IEC）标准，现已被广泛采用。

## 二、电动机绕组的联结

三相异步电动机的三相绕组共有六个引出线头，分别接于机壳上接线盒内的六个接线柱。接线柱上标有首、末端符号  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 、 $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ 。如图 6-7 所示，将  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  连接在一起，将  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  接三相电源，即成为星形（ $\text{Y}$ ）联结；将  $U_1$  与  $W_2$  连接在一起， $V_1$  与  $U_2$  连接在一起， $W_1$  与  $V_2$  连接在一起，而将  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  连接到电源，即成为三角形（ $\Delta$ ）联结。

## 三、电动机的起动

三相异步电动机接通三相交流电源后，转速由零逐渐加速到额定转速的过程称为起动。起动时间根据电动机功率大小和所带负载轻重决定，中、小电动机一般约为数秒。在生产过程中，电动机要经常起动与停止，因此电动机起动性能的好坏，直接对生产有很大影响。故而对异步电动机的起动一般有以下几点要求：

① 有足够大的起动转矩，因起动转矩必须大于起动时电动机的反抗转矩，才能起动，起动转矩越大，加速越快，起动时间越短。

② 在具有足够起动转矩的前提下，起动电流应尽可能地小。起动电流过大，将使电网电压明显降低，以至影响其他电气设备的正常运行。

③ 起动设备应结构简单、经济可靠、操作方便。

④ 起动过程中的能量损耗要小。

异步电动机固有的起动性能是起动电流大。这是因为开始起动瞬间，电动机转速  $n = 0$ ，旋转磁场切割转子导体的速度最大，感应电动势最大，转子电流最大，定子电流也最大。这时的定子电流称为异步电动机的起动电流  $I_s$ ，其数值可达额定电流  $I_N$  的 4~7 倍。

### 1. 笼型异步电动机的起动

笼型异步电动机的起动方式有两类：一类是直接起动；另一类是减压起动。

#### (1) 直接起动

直接起动又称为全压起动，是将电动机的定子绕组直接接到额定电压的电源上起动，如图 6-8 所示。

直接起动的优点是设备简单、操作方便、起动转矩较大、起动快；其缺点是起动电流大、造成电网电压波动大，从而影响同一电源供电的其他负载的正常运行。影响的程度取决于电动机的容量与电源（变压器）容量的比例大小。一台异步电动机能否直接起动与以下因素有关：

- ① 供电变压器容量的大小。
- ② 电动机起动的频繁程度。
- ③ 电动机与供电变压器间的距离。
- ④ 同一变压器供电的负载种类及允许电压波动的范围。

综上所述，在使用电动机时，应根据配电系统情况、电动机的容量及电动机起动的频繁程度，确定电动机的起动方式。一般要求是：

- ① 由公用低压电网供电时，电动机容量在 10kW 及以下者，可直接起动。

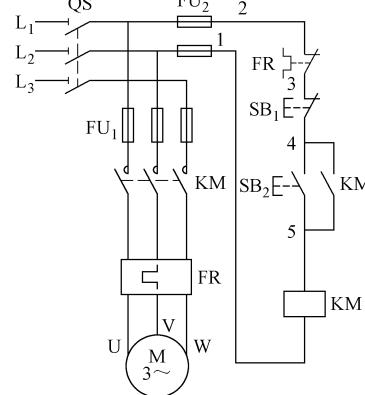


图 6-8 直接起动电路图

②由小区配电室供电时，电动机容量在14kW及以下者，可直接起动。

③由专用变压器供电时，经常起动的电动机电压损失值不超过10%；不经常起动的电动机不超过15%，可直接起动。

### (2) 减压起动

笼型异步电动机的减压起动是利用一定的设备先行降低电压，来起动电动机，待转速达到一定时，再加额定电压运行。降压起动的目的在于减小起动电流，但由于起动转矩与电压的二次方成正比，所以起动转矩相应减小。

常用的减压起动方法有星-三角起动、自耦变压器减压起动等。

#### 1) 星-三角形(丫-△)起动

正常运行时为△联结的电动机允许采用星-三角形起动方式，即如图6-9所示，在起动时将定子绕组接成丫联结，以使得加在每相绕组上的电压降至额定电压的 $1/\sqrt{3}$ ，因而起动电流就可减小到直接起动时的 $1/3$ ，待电动机转速接近额定转速时，再通过开关将定子绕组改接为△联结，使电动机在额定电压下运转。由于电压降为 $1/\sqrt{3}$ 的额定电压，起动转矩与电压的二次方成正比，所以起动转矩降为△联结直接起动时的 $1/3$ 。

丫-△起动方式的优点是设备比较简单、成本较低、维修方便、可以频繁起动；缺点是起动转矩较小，只有直接起动时的 $1/3$ ，而且仅适用于正常运行时定子绕组为三角形联结电动机空载或轻载起动。

#### 2) 自耦减压起动

自耦变压器减压起动又叫补偿器减压起动，这种减压起动适用于电动机容量为20~150kW。起动器有QJ型和XJ型两种：

- ① QJ型：用操作手柄控制，其起动原理接线图如图6-10所示。
- ② XJ型：自动控制式，分用按钮操作方式和用按钮时间继电器操作方式两种。

自耦变压器备有不同的电压抽头，如80%、65%的额定电压，以供根据负载转矩大小来选择不同的起动电压。起动电压越高，起动转矩

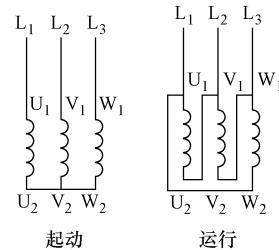


图6-9 异步电动机丫-△起动控制电路原理图

就越大。

自耦减压起动方式的优点是，起动时对电网的电流冲击小，功率损耗小。缺点是，自耦变压器相对结构复杂，价格较高。这种方式主要用于较大容量的电动机，以减小起动电流对电网的影响。

## 2. 异步电动机起动前的检查

- ① 检查铭牌是否与实际相等。
- ② 检查电线的规格是否合适，接线是否牢固、正确。
- ③ 检查接触器的容量是否合适、触头是否完好。
- ④ 检查熔断器、热继电器的额定值与电动机的容量是否匹配、热继电器是否复位。
- ⑤ 用手盘车应均匀平稳灵活，窜动不应超过规定值。
- ⑥ 检查轴承是否缺油，油路有无堵塞。
- ⑦ 检查传动装置、传动带不能过紧或过松。
- ⑧ 检查电动机外壳有无裂纹，接地是否可靠，地脚螺钉、端盖螺栓是否有松动。
- ⑨ 起动器的开关或手柄位置是否正确。
- ⑩ 检查旋转装置的防护罩等防护措施是否完好。
- ⑪ 通风系统是否完好。
- ⑫ 检查电动机内部是否有杂物。
- ⑬ 对于不可逆转的电动机检查其旋转方向是否与标注的方向一致。
- ⑭ 新安装的电动机或停用三个月以上的电动机应摇测电动机绕组相间和对地绝缘是否良好，绝缘电阻应符合要求。
- ⑮ 检查直流电阻（转、定子绕组）与规定值的偏差应小于2%，最大不超过5%。
- ⑯ 对于绕线式电动机应检查电刷接触是否良好、电刷压力是否正常。

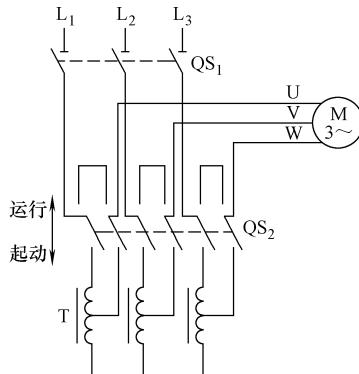


图 6-10 自耦减压起动电路原理图

### 3. 异步电动机起动时的注意事项

① 电动机的起动与停机均应严格遵守操作规程，操作步骤不得颠倒。

② 合闸起动后，如电动机不转或转速过低时，应迅速切断电源，查找原因、排除故障。

③ 新安装或检修后初次投入运行的电动机，应检查电动机的转向是否正确。对要求固定转向的设备，应先将电动机的转向试好，再安装设备。

④ 必须限制电动机的连续起动次数。

⑤ 电动机起动后，应检查电动机、传动装置及生产机械有无异常现象，电压表、电流表的读数应正常。

⑥ 几台电动机由一台变压器供电时，不得同时起动，应按照由大到小一台一台起动的原则来进行。

### 4. 电动机的使用和维护

#### （1）电动机的日常运行和维护

为了保证电动机的正常运行，延长使用寿命，电动机日常运行中的监视和维护很重要，它可以防微杜渐，把事故消灭在萌芽之中。

##### 1) 电动机的日常检查

① 监督电动机发热情况。电动机在运行中发热情况十分重要，如不注意，容易烧毁电动机或减少其使用寿命。实用中电动机温度超过其允许值时，即便不烧毁电动机，也要损坏绝缘，使电动机寿命缩短。如A级绝缘的电动机在允许温度100℃以下使用，一般可用20年，如在140℃下使用，只能用一个半月；如在225℃下使用，仅3h就坏了。

② 监督电动机电流额定值。电动机铭牌上所标定的电流值是额定电流值，是指室温为35℃（某些国产电动机为40℃）时的数值。在35℃（或40℃）时，电动机电流不允许超过铭牌上所规定的电流值，否则电动机定子线圈将因过热而损坏。电动机散热一般随气温升高而恶化，气温下降而改善，相应地电动机额定电流也随着变动。

③ 注意电源电压的变化。电源电压的变化是影响电动机发热原因之一。电源电压增高或过高，则电动机电流增大，发热增加；电源电压过低，当电动机负荷不变时，则电流又要增大，定子线圈也会增加发热，因此电动机运行中电源电压要求稳定在一个范围内。一般在电动机

出力不变的情况下。允许电源电压在  $+5\% \sim -10\%$  范围内变化。

④ 注意三相电压和三相电流的不平衡程度。三相电压的不平衡也会引起电动机的额外发热。电动机在运行中，应检查其三相电压是否平衡。三相电压的不平衡程度在额定功率下，允许相间电压差不大于 5%；电动机的三相电压不平衡，电流也要出现相应地不平衡；或者由于定子绕组三相阻抗的不相等，也会造成电流的不平衡。一般情况，电动机三相电流的不平衡不是由三相电源电压引起的，而是表明电动机有故障或定子绕组有层间短路现象。一般三相电流的不平衡程度不允许大于 10%，严重的三相电流不平衡一般是由一相熔丝熔断造成电动机单相运行所致。

⑤ 注意电动机的振动。电动机振动过大，必须详细检查基础是否牢固，地脚螺钉是否松动，带轮或联轴器是否松动等。有时振动是由转子不正常而引起的，也有因短路等引起的，应详细查找原因，设法消除。

⑥ 注意电动机的声音和气味。电动机正常运行时声音应均匀，无杂音和特殊声。如声音不正常，可能有下述几种情况：特大嗡嗡，说明电流过量，可能是超负载或三相电流不平衡引起的，特别是电动机单相运行时，嗡嗡声更大。

## 2) 电动机的故障停机

运行中电动机有下列情况之一时，应立即切断电源，停机检查：

① 运行中发生人身事故。

② 电动机发响发热的同时，转速急速下降。

③ 电动机起动设备冒烟起火，电动机所拖动的机械发生故障，所带机械的传动装置结构折断（断轴等）。

④ 电动机轴承超过规定的高热，电流超过铭牌规定或运行中电流猛增。

⑤ 电动机发生强大振动。

## 3) 电动机的定期维护

电动机除了做好运行中的维护监视外，经过一定时间运行后，还应进行定期检查和维护保养，这样才能保证电动机的安全运行并延长使用寿命。

在日常维护保养中，一般规定电动机的检修有：大修每 1~2 年 1 次；中修每年 2 次；小修是对主要电动机或在环境不良情况下（潮湿、

粉尘、腐蚀等处所)运行的电动机,每年4次,其他电动机可酌减,每年2次。

## (2) 异步电动机的常见故障及处理

异步电动机的故障较多,但一般可分为电气和机械两部分。电气部分故障包括各种类型的开关、按钮、熔断器、电刷、定子绕组及起动设备等。机械方面的故障包括轴承、风叶、机壳、联轴器、端盖、轴承盖、转轴等。

电动机发生故障之后,必须迅速准确地掌握故障发生的原因,以便尽快修复。一般分析电动机故障的步骤为

①清楚地了解电动机的规格和构造,并详细询问,了解故障发生的情况,尤其是故障发生前后的变化。

②仔细观察电动机所发生的现象,有无怪声、振动、发热、冒烟、焦臭味等。

③若最初的故障现象还不够明显,可借助仪器进行测试。

④根据现象和理论分析,作出判断。

三相异步电动机的几种故障及处理方法分别介绍如下:

### 1) 电动机定子耐压强度不良

经验表面,成品电动机返修的原因大部分由于绕组绝缘方面的缺陷,造成绕组绝缘被击穿。

### 2) 电动机空载电流偏大

电动机空载电流包含两个分量:空载电流励磁分量和空载电流的有功分量。空载电流与设计、导磁材料和制造水平等有关,还与电动机的功率和极数有关。一般情况下,电动机空载电流与满载电流存在着一定的比例关系。功率小、极数多、空载电流与满载电流的比值就大。

### 3) 电动机三相电流不平衡

当三相电源对称时,异步电动机在额定电压下的三相空载电流,任一相与平均值的偏差不得大于平均值的10%。只有在三相电压不平衡过大,或电动机本身有了故障,电动机才会产生较大的三相电流不平衡。

三相电流不平衡除会使电动机产生额外发热外,还会造成三相旋转磁场不平衡,使电动机发出特殊的低沉声响,机身也因此而振动。

为使电动机三相电流平衡,必须使定子(半成品)三相电流保持

平衡。当定子通以三相对称的中频低电压时，定子三相电流中的最大值同最小值之差与三相电流平均值之比，不得大于1%。

#### 4) 电动机温升高

电动机是使电能转变成机械能的机器，在能量转换过程中，会有损耗，这种损耗主要是：铁损耗（包括磁滞损耗和涡流损耗）。其大小与铁心磁通密度、硅钢板性能、制造工艺有关。

#### 5) 电动机起动性能

三相异步电动机的短路试验，是将转子堵住，在定子绕组上施以三相电压下进行。短路试验是确定电动机在额定电压下的最初起动电流（堵转电流）与最初起动转矩（堵转转矩），以考核笼型转子的铸铝质量及转子槽形尺寸等设计的合理性。

#### 6) 电动机的振动与噪声

电动机在正常运行时，机身应该平稳，声音应该低而且均匀。电动机的振动，包括电磁振动和机械振动。电磁振动是由于电动机气隙磁场相互作用，产生随时间和空间变化的径向力，是定子铁心和机座作周期性变形，即定子发生振动。另外，因气隙磁场中含有各种谐波磁场，因而产生谐波转矩，也使电动机振动。

#### 7) 电动机扫膛

电动机转动时转子与定子内圆相碰撞，称为电动机扫膛。扫膛分实扫与虚扫，电动机扫膛时转子外表面和定子内圆会出线擦痕。

#### 8) 电动机轴承过热

在小型电动机中，一般前、后端均应采用滚珠轴承。在中型电动机中，一般传动端采用滚柱轴承，另一端采用滚珠轴承，也有采用滑动轴承结构。轴承发热是异步电动机最常见的故障之一。

### 四、电动机的调速

根据生产机械的需要，在负载一定的条件下，来改变电动机的转速称为调速。

由异步电动机的转速公式  $n = (1 - s) n_1 = (1 - s) 60f_1/p$  可以看出，异步电动机的转速与电源的频率、磁极的对数以及转差率有关，因此电动机调速有三种方法。

#### 1. 变频调速

改变电源的频率  $f_1$  就可以改变电动机转速。当  $f_1$  增加时，电动机

转速增加；当  $f_1$  减小时，电动机转速降低。随着电源频率  $f_1$  的变化，可得到平滑且宽范围的调速性能。近年来由于交流变频技术的迅猛发展，因此变频调速得到广泛应用。

### 2. 变极调速

异步电动机的同步转速与磁极对数成反比，极对数增加一倍，同步转速下降一半，电动机的转速也近似下降一半，所以改变极对数可以达到调速的目的。

改接绕组就可以改变磁极对数。图 6-11 中画出了三相异步电动机的一相定子绕组。该电动机每相定子绕组由两个线圈组成。图 6-11a 的接法为两对磁极；图 6-11b 的接法为一对磁极。这种调速方法是有级的。由一套绕组得到两种转速，通常称为单绕组双速电机。其变速比为 2:1。如在定子绕组上装设两套极对数不同的绕组，便可得到三种或四种不同的转速。

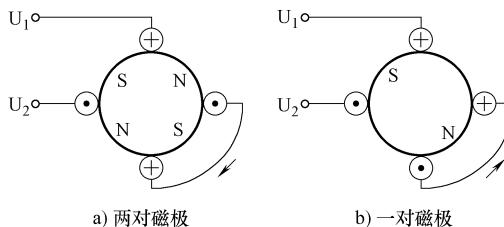


图 6-11 改接绕组改变磁极对数

变极调速的电动机一般都是笼型电动机。变极调速的优点是控制设备简单、损耗小；其缺点是调速范围不大，而且不能平滑调速。在机床上常将这种调速方法与齿轮变速配合使用。

### 3. 变压调速

由于转矩  $M$  与定子绕组输入电压的二次方成正比，当电压降低时，起动转矩  $M_s$ 、最大转矩  $M_M$  将减小，使转子转速降低，而同步转速  $n_1$  与电压无关。变压调速为向下调速，且调速范围比较窄。起动时，将电动机绕组与电感或电阻串联，可实现变压调速。此调速方法用于电风扇等小容量电动机。

### 4. 绕线转子异步电动机调速

对于绕线转子异步电动机，在负载转矩不变的情况下，如果改变转

子电路的电阻，就可以改变电动机转差率，从而改变电动机的转速。当在转子回路中串联的电阻越大，转速将越低。这种方法的调速范围为3:1。

此方法调速较为简单，调速范围较大，但会使电动机的机械特性变坏，并且消耗的电能较大。因此，常用于要求短时间调速且调速又不太大的中、小型绕线转子电动机。

## 五、电动机的制动

电动机的电磁转矩方向与转子的转动方向相同的工作状态是最常见的所谓拖动状态。如果其电磁转矩方向与转子转动的方向相反，则电磁转矩变为制动转矩，这种工作状态称为制动状态。为了生产和安全的需要，有时也需要对电动机进行制动，以使转动的电动机迅速停车。常用的制动方法有机械制动和电力制动两大类。

### 1. 机械制动

机械制动是利用机械装置，在电动机切断电源后，依靠外加机械制动闸（一般采用电磁抱闸）作用于电动机轴上，使电动机迅速停止转动。

电磁抱闸由制动电磁铁和闸瓦制动器构成。电磁铁与电动机为同一电源，当电动机通电时，电磁抱闸松闸，电动机开始转动；当切断电动机电源时，电磁抱闸抱闸，电动机被迅速制动而停转。

#### (1) 电路图

电磁抱闸制动控制电路如图 6-12 所示。

#### (2) 工作原理

按下按钮  $SB_2$ ，接触器  $KM$  线圈获电动作，电动机通电。电磁抱闸的线圈  $YB$  也通电，铁心吸引衔铁而闭合，同时衔铁克服弹簧拉力，迫使制动杠杆向上移动，从而使制动器的闸瓦与闸轮松开，电动机正常运转。按下停止按钮  $SB_1$  之后，接触器  $KM$  线圈断电释放，电动机的电源被切断，电磁抱闸的线圈也同时断电，衔铁释放，在弹簧拉力的作用下使闸瓦紧紧抱住闸轮，电动机就迅速被制动停转。这种制动在起重机械上以及要求制动较严格的设备上被广泛采用。

### 2. 电力制动

电力制动是指电动机的电磁转矩方向与电动机的实际旋转方向相反的制动。电力制动的方法有：发电制动（又称再生制动或回馈制动）、

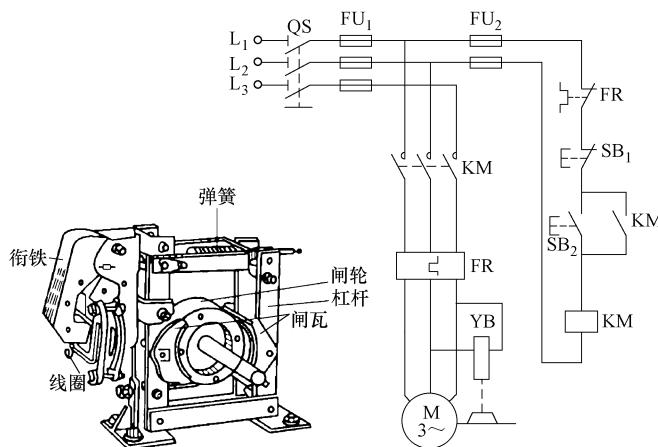


图 6-12 电磁抱闸制动控制电路

反接制动和能耗制动三种方式。

### (1) 发电制动

这种制动方法在起重机中有所应用。如高处下放重物时，由于重物迅速下降使电动机的转速大于电动机的同步转速，从而产生制动转矩，如图 6-13 所示。

### (2) 能耗制动

将异步电动机定子绕组三相交流电源断开的同时，向定子绕组通入一定的直流电流，可产生制动转矩。还可在转子电路中串入适当的电阻，以调节制动的强弱。

### (3) 反接制动

反接制动分为电源反接和转速反向两种方式。

#### 1) 电源反接的反接制动

电动机有制动要求时，将电源的任意两相对调，就可以立即使电动机的旋转方向改变，转子由于惯性仍保持原来的转动方向。这时转子感

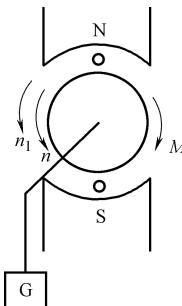


图 6-13 发电制动原理  
 $n_1$ —旋转磁场转向  $n$ —转子转向  
 $M$ —当  $n > n_1$  时电磁转矩方向

应电动势和电流方向改变，因此电磁转矩的方向也随之改变，变为与转子旋转方向相反，起到制动作用，从而使电动机迅速停车。

这种方式常用于笼型电动机，为限制制动转矩和电流，常用定子绕组两相串联电阻的方法。这种方式也适用于绕线转子电动机，在制动时在转子回路串联一定的电阻，可以使得制动迅速且平稳。

这种方式的优点是制动转矩大、制动迅速；其缺点是转速接近于零时应迅速切断电源，否则电动机会反转。为此，可采用速度继电器来控制。当速度接近于零时，继电器动作，使电路断开。对于经常需要正反转的机械采用这种方法较为合适。

## 2) 转速反向的反接制动

这种方法一般用于绕线转子电动机。起重机下放重物时，保持电源相序不变，也就是使旋转磁场和电磁转矩方向仍为提升重物方向。但应加大转子回路电阻，改变其机械特性。当电动机  $n = 0$  时的转矩小于负载转矩时，电动机在重物的位能下逆转，转速为负，重物下放。当下放速度达到一定时，电磁转矩与负载转矩平衡，转速稳定，以匀速下放重物。改变转子电路所串电阻的大小，就可以改变下放速度，电阻越大，下放速度越快。

## 六、电动机的保护

电动机通常应具有短路、过载及失电压保护措施，现分述如下。

### 1. 短路保护

三相异步电动机定子绕组发生短路故障时，会产生很大的短路电流，造成线路过热甚至导线熔化，有可能引起火灾。熔断器就是电动机常用的短路保护装置之一。当电动机发生短路故障时，熔断器的熔体迅速熔断，切断电源，以防止事故扩大。

一台电动机熔体的选择：

$$I_{\text{NFU}} = (1.5 \sim 2.5) I_{\text{N}}$$

式中  $I_{\text{NFU}}$ ——熔断器熔体的额定电流 (A)；

$I_{\text{N}}$ ——电动机的额定电流 (A)。

当电动机直接起动或重载起动时，起动电流较大，且起动时间较长，可取较大的系数；当电动机轻载起动或减压起动时，起动电流较小，且起动时间较短，可取较小的系数。

## 2. 过载保护

运行中的电动机有时会出现过热。其主要原因有：电网电压太低；机械过载过重；起动时间过长或电动机频繁起动；电动机断相运行；机械方面故障等。

短时间的过载不会造成电动机的损坏，较长时间的持续过载会损坏电动机的绝缘乃至将电动机烧毁。因此，必须采取过载保护措施。对过载保护装置通常采用热继电器来实现。热继电器可以反映电动机的过热状态并能发出信号。当电动机通过额定电流时，热继电器应长期不动作；当电动机通过额定电流的 1.05 倍电流时，从冷态开始运行，热继电器在 2h 内不应动作；当电流升至额定电流的 1.2 倍时，则应在 2h 内动作。

用来对电动机进行过载保护的热继电器，其动作电流值一般按电动机的额定电流值整定。

## 3. 欠电压保护

运行中的电动机电压过低时，如负载功率不变，电流必然增大。长此运行电动机也将因过热而烧毁。因此，在电网电压过低时，应及时切断电动机的电源。同时，当电网电压恢复时，也不允许电动机自行起动，以防发生设备事故和人身事故。为此，电动机通常应有欠电压保护装置。

使用接触器控制电动机时，即具有欠电压保护功能。

# 第四节 三相异步电动机常用控制电路

## 一、具有自锁的正转控制电路

### 1. 电路图

具有自锁的正转控制电路如图 6-14 所示。

### 2. 工作原理

当起动电动机时，合上电源开关 QS，按下起动按钮 SB<sub>2</sub>，接触器 KM 线圈获电，KM 主触头闭合，使电动机 M 运转；松开 SB<sub>2</sub>，由于接触器 KM 常开辅助触头闭合自锁，控制电路仍保持接通，电动机 M 继续运转。停止时按 SB<sub>1</sub>，接触器 KM 线圈断电，KM 主触头断开，电动机 M 停转。

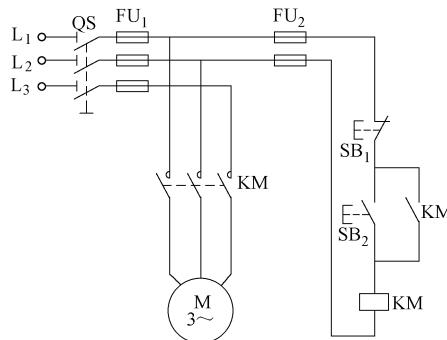


图 6-14 具有自锁的正转控制电路

### 3. 应用

具有自锁的正转控制线路具有欠电压与失电压（或零电压）保护功能，用于连续单向运转的电动机。

## 二、具有过载保护的正转控制电路

### 1. 电路图

具有过载保护的正转控制电路如图 6-15 所示。

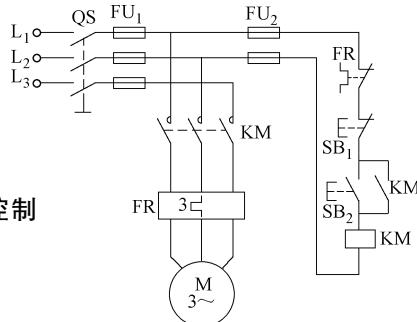


图 6-15 具有过载保护的正转控制电路

### 2. 工作原理

当电动机过载时，主电路

热继电器 FR 的热元件所通过的电流超过额定电流值，使 FR 内部发热，其内部金属片弯曲，推动 FR 闭合触头断开，接触器 KM 的线圈断电释放，电动机便脱离电源停转，起到了过载保护作用。

### 3. 应用

有很多生产机械由于负载过大、操作频繁等原因，电动机定子绕组中长时间流过较大的电流，有时熔断器在这种情况下尚未及时熔断，以致引起定子绕组过热，影响电动机的使用寿命，严重时甚至烧坏电动机。因此，对电动机必须要实行过载保护。

### 三、点动与连续运行控制电路

#### 1. 电路图

点动与连续运行控制电路如图 6-16 所示。

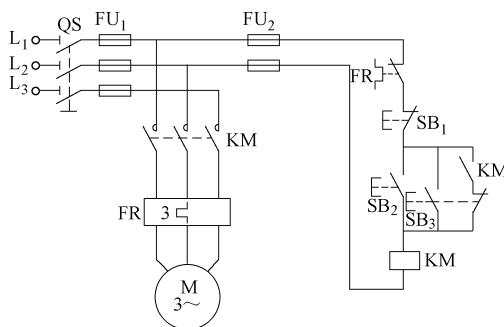


图 6-16 点动与连续运行控制电路

#### 2. 工作原理

需要点动控制时，按下点动复合按钮 SB<sub>3</sub>，其常闭触头先断开 KM 的自锁电路，随后 SB<sub>3</sub> 常开触头闭合，接通起动控制电路，接触器 KM 线圈获电吸合，KM 主触头闭合，电动机 M 起动运转。松开 SB<sub>3</sub> 时，其已闭合的常开触头先复位断开，使接触器 KM 失电释放，KM 主触头断开，电动机停转。

若需要电动机连续运转，按下长动按钮 SB<sub>2</sub>，由于按钮 SB<sub>3</sub> 的常闭触头处于闭合状态，将 KM 自锁触头接入电路，所以接触器 KM 获电吸合并自锁，电动机 M 连续运行。停机时按下停止按钮 SB<sub>1</sub> 即可。

#### 3. 应用

点动与连续运行控制电路适用于需断续或连续单向运行的电动机。

### 四、接触器联锁的正反转控制电路

#### 1. 电路图

接触器联锁的正反转控制电路如图 6-17 所示。

#### 2. 工作原理

图中采用了两个接触器，即正转用的接触器 KM<sub>1</sub> 和反转用的接触器 KM<sub>2</sub>。由于接触器的主触头接线的相序不同，所以当两个接触器分别工作时，电动机的旋转方向相反。

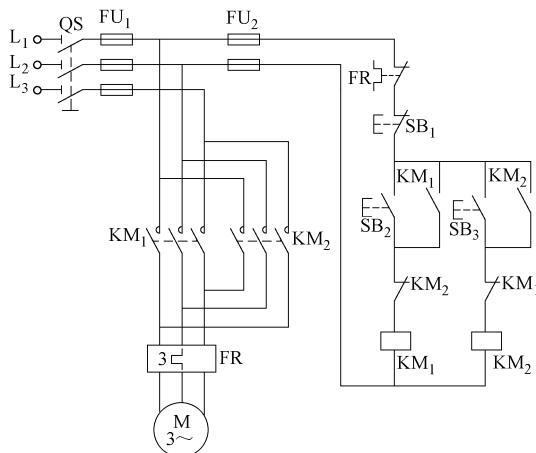


图 6-17 接触器联锁的正反转控制电路

电路要求接触器不能同时通电。为此，在正转与反转控制电路中分别串联了  $KM_2$  和  $KM_1$  的常闭触头，以保证  $KM_1$  和  $KM_2$  不会同时通电。

### 3. 应用

生产中常要求电动机能以正、反两个方向旋转。例如起重机的升降，机床工作台的前后运行等，可使用正反转控制电路。

## 五、按钮联锁的正反转控制电路

### 1. 电路图

按钮联锁的正反转控制电路如图 6-18 所示。

### 2. 工作原理

它采用了复合按钮，按钮互锁连接。当电动机正向运行时，按下反转按钮  $SB_3$ ，首先是使接在正转控制电路中的  $SB_3$  的常闭触头断开，于是，正转接触器  $KM_1$  的线圈断电释放，触头全部复原，电动机断电后做惯性运行，紧接着  $SB_3$  的常开触头闭合，使反转接触器  $KM_2$  的线圈获电动作，电动机立即反转起动。这既保证了正反转接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  不会同时通电，又可不按停止按钮而直接按反转按钮进行反转起动。同样，由反向运行转换成正向运行，也只需直接按正转按钮。

这种电路的优点是操作方便，缺点是如正转接触器主触头发生熔焊分断不开时，直接按反转按钮进行换向，会产生短路事故。

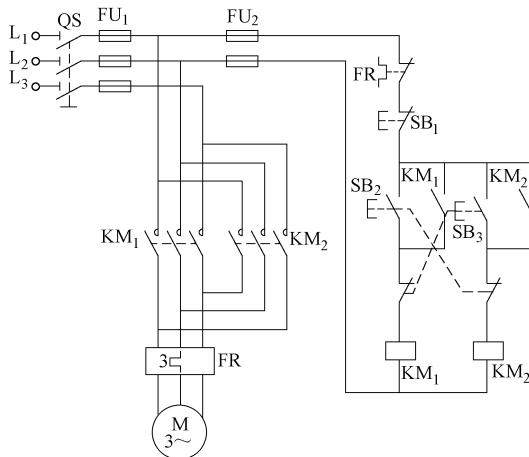


图 6-18 按钮联锁的正反转控制电路

### 3. 应用

适用于要求反接运转的场合，即电动机正转时不必先按停止按钮就可直接按反转起动按钮，使它反转。

## 六、按钮、接触器复合联锁的正反转控制电路

### 1. 电路图

按钮、接触器复合联锁的正反转控制电路如图 6-19 所示。

### 2. 工作原理

正转控制时，按下 SB<sub>2</sub>，SB<sub>2</sub> 常开触头闭合，KM<sub>1</sub> 线圈得电，KM<sub>1</sub> 主触头闭合、自锁触头闭合自锁，电动机 M 起动连续正转。SB<sub>2</sub> 常闭触头先分断对 KM<sub>2</sub> 联锁，同时，KM<sub>1</sub> 联锁触头分断对 KM<sub>2</sub> 联锁，切断反转控制电路。

反转控制时，按下 SB<sub>3</sub>，SB<sub>3</sub> 常开触头闭合，KM<sub>2</sub> 线圈得电，KM<sub>2</sub> 主触头闭合、自锁触头闭合自锁，电动机 M 起动连续反转。SB<sub>3</sub> 常闭触头先分断对 KM<sub>1</sub> 联锁，同时，KM<sub>2</sub> 联锁触头分断对 KM<sub>1</sub> 联锁，切断正转控制电路。

若要停止，按下 SB<sub>1</sub>，整个控制电路失电，主触头分断，电动机 M 失电停转。

### 3. 应用

此电路集中了按钮联锁、接触器联锁的优点，即当正转时，不用按

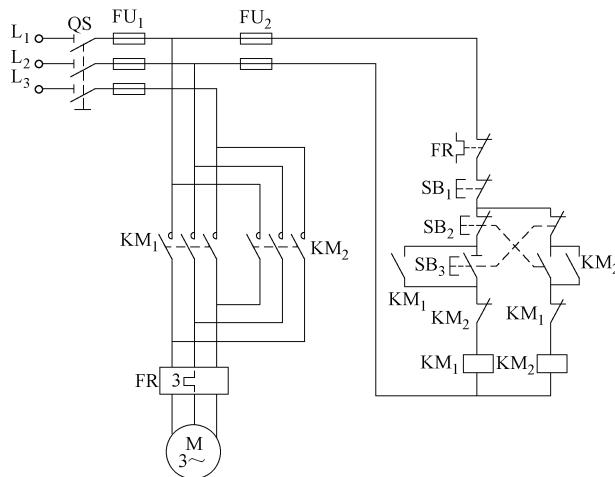


图 6-19 按钮、接触器复合联锁的正反转控制电路

停止按钮即可反转，还可避免接触器主触头发生熔焊分断不开时，造成短路事故。

## 七、自动往返控制电路

### 1. 电路图

自动往返控制电路如图 6-20 所示。

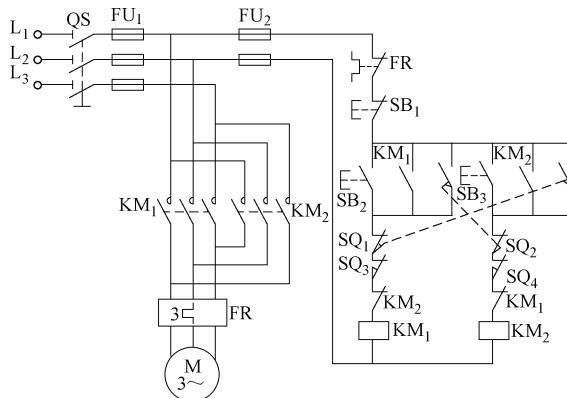


图 6-20 自动往返控制电路

### 2. 工作原理

按下 SB<sub>2</sub>，接触器 KM<sub>1</sub> 线圈获电动作，电动机起动正转，通过机械

传动装置拖动工作台向左运动；当工作台上的挡铁碰撞行程开关  $SQ_1$ （固定在床身上）时，其常闭触头断开，接触器  $KM_1$  线圈断电释放，电动机断电停转；与此同时  $SQ_1$  的常开触头闭合，接触器  $KM_2$  线圈获电动作并自锁，电动机反转，拖动工作台向右运动；这时行程开关  $SQ_1$  复原。当工作台向右运动行至一定位置时，挡铁碰撞行程开关  $SQ_2$ ，使常闭触头断开，接触器  $KM_2$  线圈断电释放，电动机断电停转，同时  $SQ_2$  常开触头闭合，接通  $KM_1$  线圈线路，电动机又开始正转。这样往复循环直到工作完毕。按下停止按钮  $SB_1$ ，电动机停转，工作台停止运动。另外，还有两个行程开关  $SQ_3$ ， $SQ_4$  安装在工作台往返运动的方向上，它们处于工作台正常的往返行程之外，起终端保护作用，以防  $SQ_1$ 、 $SQ_2$  失效，造成事故。

### 3. 应用

生产中常需控制某些机械运行的行程。例如，提升料斗时要求它达到预定位置时便自动停止；某些机械工作台要在一定距离内自动往返等。为实现这种限位控制，可采用自动往返控制电路。

## 八、接触器控制的手动Y-△减压起动电路

### 1. 电路图

接触器控制的手动Y-△减压起动电路如图 6-21 所示。

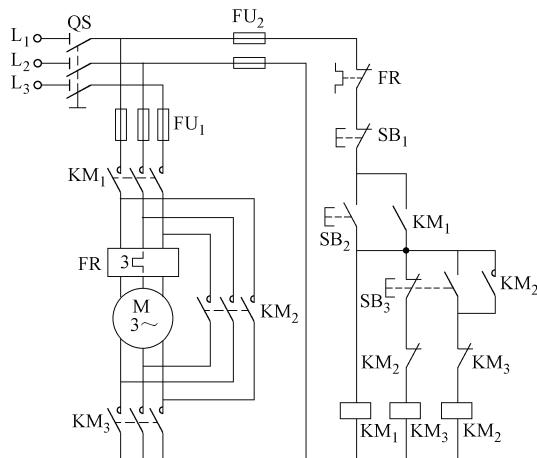


图 6-21 接触器控制的手动Y-△减压起动电路

### 2. 工作原理

合上电源开关  $QS$ ，按下起动按钮  $SB_2$ ，接触器  $KM_1$  得电吸合并自

锁，随后  $KM_3$  得电吸合，电动机定子绕组接成  $\text{Y}$  联结减压起动。当电动机转速达到正常值时，按下按钮  $SB_3$ ，首先使接触器  $KM_3$  失电释放，电动机定子绕组解除  $\text{Y}$  联结，同时  $SB_3$  接通接触器  $KM_2$  线圈回路，接触器  $KM_2$  得电吸合并自锁，电动机接成  $\Delta$  联结全压运行。

$\text{Y}$ - $\Delta$  减压起动适用于定子绕组  $\Delta$  联结，容量较大的电动机起动。

## 第五节 直流电动机

直流发电机与直流电动机在理论上是可逆的。

### 一、直流电动机的构造

#### 1. 定子

定子由机座、主磁极、换向磁极、电刷组件组成，如图 6-22 所示。

定子的横剖平面图如图 6-23 所示。

#### (1) 机座

用铸钢或铜板焊成，用作支撑和保护整机结构，同时又是电机磁路的一部分，有良好的导磁性能和机械强度。

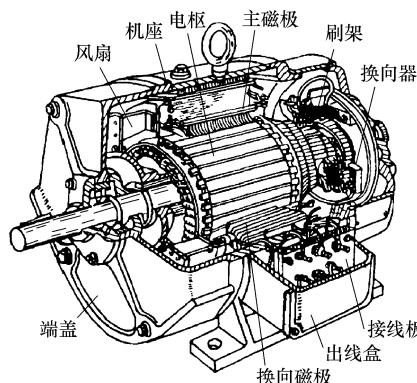


图 6-22 直流电动机的构造

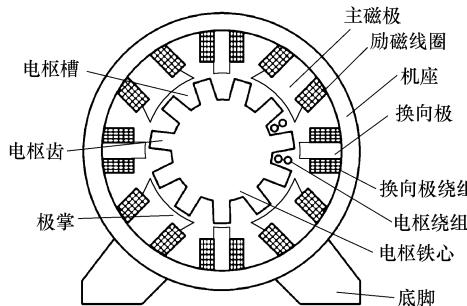
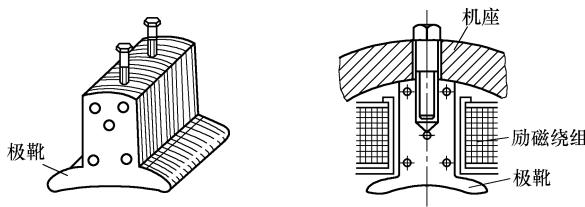


图 6-23 定子的横剖平面图

#### (2) 主磁极

由铁心和励磁绕组组成。铁心由极身和极靴两部分组成，如图 6-24

所示。



a) 用薄钢片叠成的主磁极铁心    b) 主磁极和励磁绕组一起固定在机座上

图 6-24 主磁极

励磁绕组绕在铁心外面，主磁极的作用是在励磁绕组中通入励磁电流时产生主磁通。

### (3) 换向磁极

换向磁极的作用是为了改善换向性能，减小换向火花。换向磁极与转子间气隙较大，涡流较小，可用整块钢制成。其上的绕组一般与电枢绕组串联，用截面积较大的铜导线绕制。

### (4) 电刷组件

电刷组件由电刷、刷握、刷杆、刷杆座及压紧弹簧组成，如图6-25所示。

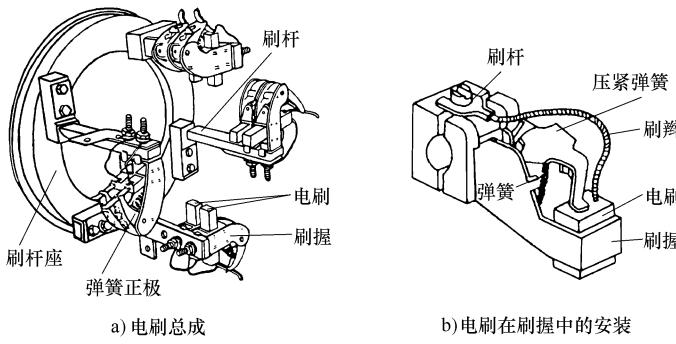


图 6-25 电刷组件

电刷内有用细铜丝编织成的刷辫与外电路导通，从而连接电枢、电刷及电路，引入或导出电枢电流。

## 2. 电枢

电枢又称转子，作用是在励磁磁场作用下，产生感应电动势和电磁转矩，实现电能与机械能之间的转换。其结构如图 6-26 所示。

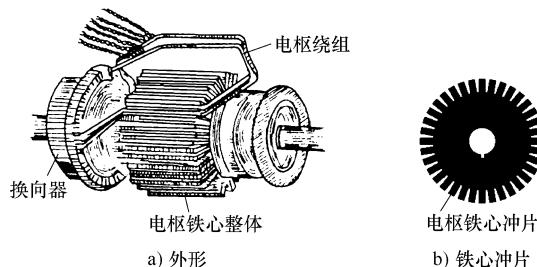


图 6-26 电枢

### (1) 电枢铁心

电机磁路的另一部分，为减小涡流由硅钢片叠压而成。在电区外缘有嵌放绕组的铁心槽，整个铁心固定在转动轴上，随轴一起转动。

### (2) 电枢绕组

由绝缘铜导线或扁铜线在模上绕制成型后嵌放在转子铁心槽中，伸出铁心槽的端部，均用非磁性丝带扎紧，每个线圈的首尾端，均按一定规律，焊接到换向片上。

### (3) 换向器

由若干个楔形铜片装成一圆柱体，片与片之间用云母绝缘。结构如图 6-27 所示。

换向片与转轴之间又用塑料绝缘，固定在转轴的一端，按照一定规律与电枢绕组连接。它的作用是变换电枢电流方向并通过电刷将电枢绕组与电路接通。

## 3. 直流电动机的其他部分

直流电动机的其他部分还有端盖、轴承、转轴、风扇、接线板、接线盒等。

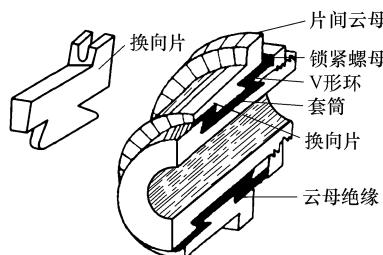


图 6-27 换向器

## 二、直流电动机的工作原理

直流电动机原理示意图如图 6-28 所示。

(1) 在图中所示位置时

电源正极接 A、负极接 B，电枢绕组中电流流向  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，电枢受力朝逆时针方向旋转。

(2) 电枢转过  $90^\circ$  时

电源中断，电枢凭惯性旋转。

(3) 电枢转过  $180^\circ$  时

电枢中电流流向为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ，电枢受力朝逆时针方向旋转。

(4) 反电动势

电枢转动后，其绕组切割励磁磁场磁感线产生与电枢电流方向相反的感应电动势，其值为

$$E_a = C_e \Phi n$$

式中  $C_e$ ——电动机电动势常数。

(5) 电源电压

加在电枢绕组上的电压必须用于解决两个部分的需要，即平衡反电动势和克服电枢绕组的电阻电压。

$$U = E_a + R_a I_a$$

式中电枢电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$$

当负载增大时，电枢电流增大，电动机功率增大，但转速下降；当负载减小时，情况与上述规律相反。

## 三、直流电动机的励磁

### 1. 并励电动机

电动机励磁绕组与电枢绕组并联，共用一个直流电源供电，如图 6-29 所示。

为了保证电枢的输出功率，电枢绕组线径粗、匝数少、电阻小，应有足够大的工作电流。

### 2. 串励电动机

电动机的励磁绕组与电枢绕组串联于同一电源，如图 6-30 所示。

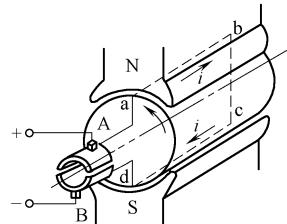


图 6-28 直流电动机原理示意图

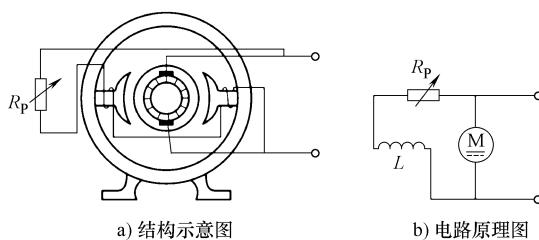


图 6-29 并励电动机

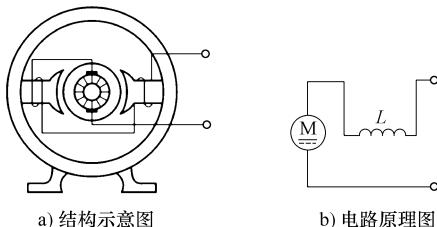


图 6-30 串励电动机

为了减小励磁电压，励磁绕组的线径粗、匝数少、电阻小。

### 3. 复励电动机

电动机主磁极上嵌放两套独立的绕组，一套与电枢绕组并联，另一套与电枢绕组串联，如图 6-31 所示。

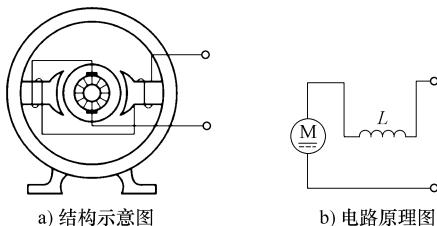


图 6-31 复励电动机

### 4. 他励电动机

以上三种励磁方式的直流电动机作发电机时，它们的励磁电流都是由自己发出的，所以通称为自励电动机。

他励电动机的励磁电流由另外的直流电源供给，如图 6-32 所示。

这类电动机设备较复杂，但它的优点是：励磁电流不受电枢电压影

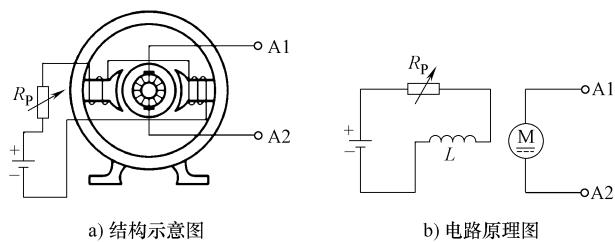


图 6-32 他励电动机

响，而只与励磁电源电动势和励磁绕组有关。

# 第七章 电气线路

电气线路是电力系统的重要组成部分。电气线路可分为电力线路和控制线路。前者完成输送电能的任务；后者供保护和测量的连接之用。本章所称电气线路主要指电力线路。电气线路种类很多。按照敷设方式，分为架空线路、电缆线路、穿管线路等；按照导体的绝缘，分为塑料绝缘线、橡皮绝缘线、裸线等。

## 第一节 架空线路

### 一、架空线路的敷设

架空线路主要指架空明线，架设在地面之上，架设及维修比较方便，成本较低，但容易受到气象和环境（如大风、雷击、冰雪等）的影响而引起故障，同时整个输电走廊占用土地面积较多，易对周边环境造成电磁干扰。输电电缆则不受气象和环境的影响，主要通过电缆隧道或电缆沟架设，造价较高，发现故障及检修维护等不方便。电缆线路可分为架空电缆线路和地下电缆线路，电缆线路不易受雷击、自然灾害及外力破坏，供电可靠性高，但电缆的制造、施工、事故检查和处理较困难，工程造价也较高，故远距离输电线路多采用架空输电线路。

#### 1. 架空线路的结构

架空线路由导线、电杆、横担、绝缘子、线路金具（包括避雷线）等组成，其结构如图 7-1 所示。有的电杆上还装有拉线或扳桩，用来平衡电杆各方向的拉力，增强电杆稳定性；也有的架空线路上架设避雷线来防止雷击。

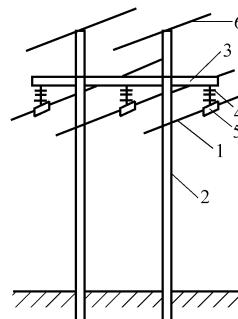


图 7-1 架空线路结构  
1—导线 2—电杆 3—横担  
4—绝缘子 5—金具  
6—避雷线

### (1) 架空导线

架空线路导线是传送电能的导体元件，运行中还将承受各种热效应和机械应力，所以对导线有如下要求：导电能力强、机械强度大、抗腐蚀、重量轻、价格便宜。农村配电线路一般采用裸铝绞线，居民密集的城镇低压配电线路宜采用绝缘导线。架空导线应采用符合国家技术标准的产品，禁止使用单股铝线、拆股线和铁线。导线按结构分为单股线和多股绞线，按材质分为铝（L）、钢（G）、铜（T）、铝合金（HL）等类型。导线截面积  $10\text{mm}^2$  以上的导线都是多股绞合的，称为多股绞线。由于多股绞线耐机械强度较高，供电可靠性好，故架空导线多采用多股绞线。

#### 1) 架空导线截面积的选择

架空线路所用导线的正确选择直接关系到线路的安全经济运行和供电质量，同时直接影响到线路投资。更重要的是供电安全，导线截面积选择要满足以下基本要求：

① 按导线通入电流发热条件选择导线：电流通过导线后，即在导线上产生热量，导线温度升高，将使导线绝缘损坏而发生故障。所以要根据导线的允许载流量来选择导线。按导线线芯长期允许温度  $70^\circ\text{C}$ ，周围环境温度  $30^\circ\text{C}$  时，架空聚氯乙烯绝缘导线允许载流量见表 7-1。

表 7-1 架空聚氯乙烯绝缘导线允许载流量

项目	架空聚氯乙烯绝缘导线允许载流量/A									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
铜线	102	138	170	209	266	332	384	442	515	615
铝线	79	107	132	162	207	257	299	342	399	476
铝合金线	73	99	122	149	191	238	276	320	369	440

② 按电压损失进行核算导线截面积：用电设备对电压变化的影响非常敏感，如白炽灯当电压低于额定值 5% 时，光通量减小 18%，而当电压较额定值高 5% 时，其寿命将降低一半。因此，规定在照明电路中，电压偏差的允许值为  $-10\% \sim +5\%$  的额定电压。对电动机而言，其转矩与电压的二次方成正比，当电压太低时，电动机将出现过载。电压越低，当负载不变时，电流越大，使绕组温度升高，加速绝缘老化。因此，对电动机而言，电压偏差的允许值为  $-5\% \sim +10\%$  的额定电压。

③ 按机械强度确定导线允许最小截面积：架空导线本身具有一定

的重量，同时还要承受风雪、覆冰等外力，温度变化时还会因热胀冷缩引起受力变化，所以为了防止断线事故，导线应具有一定的机械强度，为此规定了导线的最小允许截面积，见表 7-2。

表 7-2 导线的最小允许截面积 (单位: mm<sup>2</sup>)

导线种类	10kV 配电线路		低压配电线路	接户线
	居民区	非居民区		
铝绞线	35	25	16	绝缘线 10.0
钢芯铝绞线	25	16	16	
铜线	16	16	直径 3.2mm	绝缘铜线 4.0

配电线路不应采用单股的铝线或铝合金线，高压配电线路不应采用单股铜线。三相四线制的零线截面积应等于相线截面积；单相制的零线截面积应与相线截面积相同。

## 2) 导线的绑扎与固定

架空配电线路的导线在直线杆针式绝缘子和耐张杆蝶式绝缘子上的固定，普遍采用绑线缠绕法。

铝绞线和钢芯铝绞线绑线材料与导线材料相同，但铝镁合金导线应使用铝绑线，绝缘导线应使用有外皮的铁绑线。铝绑线的直径应在 2.0~2.6mm 范围内。铝导线在绑扎之前，将导线与绝缘子接触的地方缠裹宽 10mm、厚 1mm 的铝包带，其缠绕长度要超出绑扎长度 5mm。

① 绝缘子顶绑：直线杆一般情况下都采用顶绑法绑扎，如图 7-2 所示。

绝缘子顶绑的绑扎步骤如下：

a) 绑扎处的导线上缠绕铝包带，若是铜线则不缠绕铝包带，把绑线盘成一个圆盘，留出一个短头，其长度为 250mm 左右，用短头在绝缘子侧面的导线上绕 3 圈，方向是从导线外侧，经导线上方向导线内侧，如图 7-2a 所示。

b) 用盘起来的绑线在绝缘子脖颈内侧绕到绝缘子右侧导线上，并再绑 3 圈，其方向是由导线下方经外侧绕向上方，如图 7-2b 所示。

c) 用盘起来的绑线在绝缘子脖颈内侧绕到绝缘子右侧导线上，并再绑 3 圈，其方向是由导线下方经内侧绕到导线上方，如图 7-2c 所示。

d) 把盘起来的绑线自绝缘子脖颈内侧绕到绝缘子右侧导线上，并再绑 3 圈，其方向是由导线下方经外侧绕到导线上方，如图 7-2d 所示。

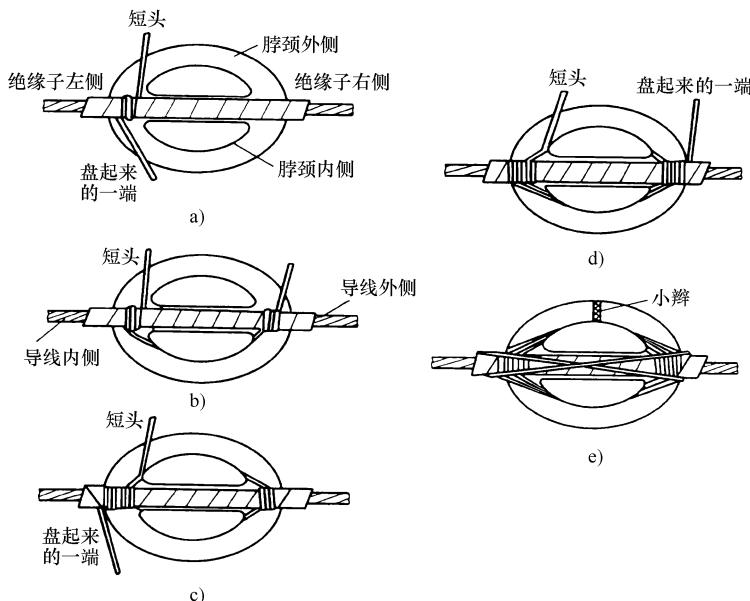


图 7-2 顶绑法绑扎示意图

e) 把盘起来的绑线自绝缘子外侧绕到左侧导线下面，并自导线内侧上来，经过绝缘子顶部交叉压在导线上，然后从绝缘子右侧导线外侧绕到绝缘子脖颈内侧，并从绝缘子左侧的导线下侧经过导线外侧上来，经绝缘子顶部交叉压在导线上，此时已有一个十字压在导线上。重复上述方法再绑一个十字（如果是单十字绑法，此步骤略去），把盘起来的绑线从绝缘子右侧的导线内侧，经下方绕到脖颈外侧，与绑线短头在绝缘子外侧中间拧一小辫，将其余绑线剪断并将小辫压平，如图 7-2e 所示。

绑扎完毕后，绑线在绝缘子两侧导线上应绕够 6 圈。

② 绝缘子的侧绑：侧绑法适用于转角杆，此时导线应放在绝缘子脖颈外侧，如图 7-3 所示。其绑扎方法如下：

- 在绑扎处的导线上缠绕铝包带，若是铜线则可不缠铝包带。
- 把绑线盘成一个圆盘，在绑线的一端留出一个短头，其长度为 250mm 左右，用绑线的短头在绝缘子左侧的导线上绑 3 圈，方向上自导线外侧经导线上方绕向导线内侧，如图 7-3a 所示。

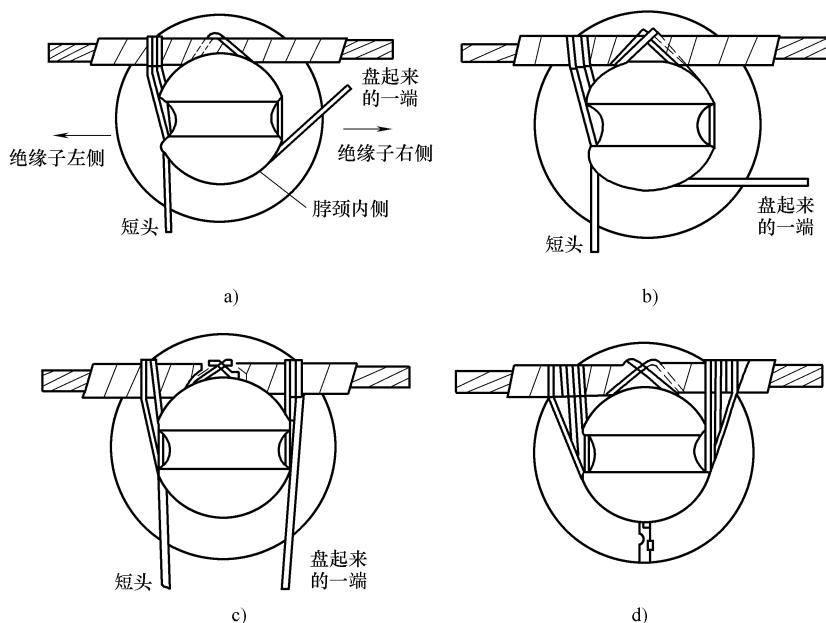


图 7-3 瓷绝缘子的侧绑示意图

c) 用盘起来的绑线自绝缘子脖颈内侧绕过，绕到绝缘子右侧导线上方，即交叉在导线上方，并自绝缘子左侧导线外侧经导线下方绕到绝缘子脖颈内侧。在绝缘子内侧的绑线绕到绝缘子右侧导线下方，交叉在导线上，并自绝缘子左侧导线上方绕到绝缘子脖颈内侧，如图 7-3b 所示。此时导线外侧已有一个十字。

d) 重复按 c) 的方法再绑一个十字（如果是单十字绑法，此步骤略去），用盘起来的绑线绕到右侧导线上，再绑 3 圈，方向是自导线上方绕到导线外侧，再到导线下方，如图 7-3c 所示。

e) 用盘起来的绑线从绝缘子脖颈内侧绕回到绝缘子左侧导线上，并再绑 3 圈，方向是从导线下方经过外侧绕到导线上方，然后再经过绝缘子脖颈内侧回到绝缘子右侧导线上，并再绑 3 圈，方向是从导线上方经外侧绕到导线下方，最后回到绝缘子脖颈内侧中间，与绑线短头拧一个小辫，剪去压平，如图 7-3d 所示。

绑扎完毕后，绑线在绝缘子两侧导线上应绕够 6 圈。

③ 绝缘子终端绑扎：终端绑扎适用于蝶式绝缘子，如图 7-4 所示。

其绑扎方法如下：

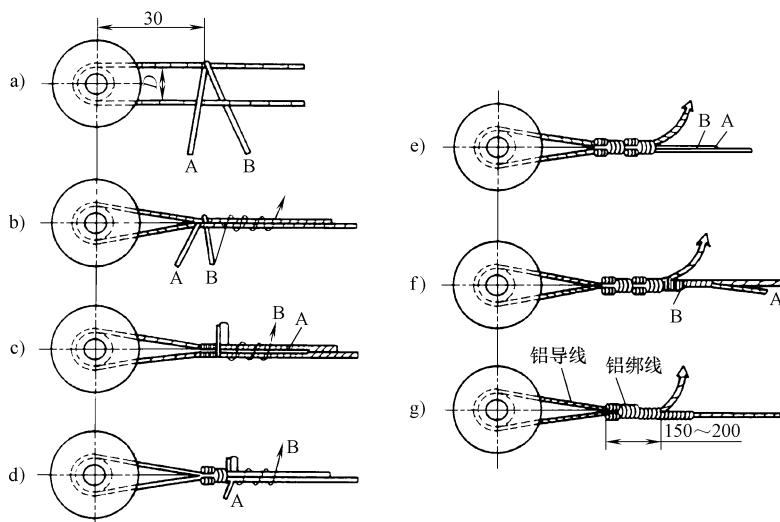


图 7-4 蝶式绝缘子上的绑扎

a) 导线与蝶式绝缘子接触部分，用宽 10mm、厚 1mm 软铝带包缠，若是铜线可不绑铝包带。

b) 导线截面积为 LJ—35、TJ—35 及以下者，绑扎长度为 150mm；导线截面积为 LJ—50 以上、TJ—50 以上者，用钢线卡子固定。

c) 把绑线绕成圆盘，在绑线一端留出一个短头，长度比绑扎长度多 50mm。

d) 把绑线端头夹在导线与折回导线中间凹进去的地方，然后用绑线在导线上绑扎，如图 7-4a~e 所示。

e) 绑扎到规定长度后，与端头拧 2~3 下，呈小辫并压平在导线上，如图 7-4f 所示。

f) 把导线端部折回，压在扎线上，如图 7-4g 所示。

绑扎方法的统一要求是：绑扎平整、牢固，并防止钢丝钳伤导线和扎线。

## (2) 电杆

电杆是架空配电线路中的基本设备之一，按所用材质可分为木杆、水泥杆和金属杆三种。水泥杆具有使用寿命长、维护工作量小等优点，

使用较为广泛。水泥杆中使用最多的是拔梢杆，锥度一般均为 $1/75$ ，分为普通钢筋混凝土杆和预应力型钢筋混凝土杆。电杆按其在线路中的用途可分为直线杆、耐张杆、转角杆、分支杆、终端杆和跨越杆等。

### 1) 直线杆

直线杆又称中间杆或过线杆。用在线路的直线部分，主要承受导线重量和侧面风力，故杆顶结构较简单，一般不装拉线。直线杆占线路全部电杆数量的 $70\% \sim 80\%$ 左右。固定导线用针式绝缘子。

### 2) 耐张杆

耐张杆也称张力杆，位于直线段之间承受两侧导线的拉力，为限制倒杆或断线的事故范围，需把线路的直线部分划分为若干耐张段，在耐张段的两侧安装耐张杆。耐张杆除承受导线重量和侧面风力外，还要承受邻档导线拉力差所引起的沿线路方面的拉力。为平衡此拉力，通常在其前后方各装一根拉线。

### 3) 转角杆

转角杆用在线路改变方向的地方。转角杆的结构随线路转角不同而不同：转角在 $15^\circ$ 以内时，可仍用原横担承担转角合力；转角在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时，可用两根横担，在转角合力的反方向装一根拉线；转角在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时，除用双横担外，两侧导线应用跳线连接，在导线拉力反方向各装一根拉线；转角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时，用两对横担构成双层，两侧导线用跳线连接，同时在导线拉力反方向各装一根拉线。

### 4) 分支杆

分支杆设在分支线路连接处，在分支杆上应装拉线，用来平衡分支线拉力。分支杆结构可分为丁字分支和十字分支两种：丁字分支是在横担下方增设一层双横担，以耐张方式引出分支线；十字分支是在原横担下方设两根互成 $90^\circ$ 的横担，然后引出分支线。

### 5) 终端杆

终端杆设在线路的起点和终点处，承受导线的单方向拉力，为平衡此拉力，需在导线的反方向装拉线。

除此之外，在特殊情况下还有跨越杆、换位杆（导线各相的位置进行调换）等。

电杆的埋设深度，应根据电杆的材料、高度、土壤情况而定。 $10kV$ 及以下电力线路一般采用 $15m$ 以下电杆，埋设深度为杆长的

$1/10 + 0.7\text{m}$ ，使电杆在正常情况应能承受风、冰等荷载而稳定不致倒杆。为使电杆在运行中有足够的抗倾覆裕度，对电杆的稳定安全系数有如下规定：直线杆不应小于  $1.5\text{m}$ ；耐张杆不应小于  $1.8\text{m}$ ，转角、终端杆、变台电杆不应小于  $2.0\text{m}$ 。土质松软、流沙、地下水位较高地带，电杆基础还应做加固处理。一般电杆埋设深度参见表 7-3。

表 7-3 电杆埋设深度

杆长/m	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	15.0
埋设深度/m	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.3

### (3) 横担

横担的作用是支持绝缘子、导线等设备，并使线路导线间保持有一定距离，所以横担必须要有一定的长度和机械强度。

配电线路目前使用的主要有铁横担和瓷横担。铁横担由角钢制成，瓷横担是一种实心陶瓷构件，起绝缘子和横担的双重作用；能节约钢材并提高线路的绝缘水平，但机械强度较低，一般用于较小截面导线的架空线路。10kV 线路多采用  $65\text{mm} \times 65\text{mm} \times 6\text{mm}$  的角钢，380V 线路多采用  $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$  的角钢。铁横担的机械强度较高，应用比较广泛。横担用以支持绝缘子、导线，并维持导线间的一定距离。导线间最小距离按档距大小确定，见表 7-4。

表 7-4 低压架空线路导线间最小水平距离

档距/m	40	50	60	70	80
导线间距/mm	300	400	450	500	500

横担材料多为角钢，低压 1kV 以下配电线路多采用  $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ ；当导线截面为  $50\text{mm}^2$  及以上亦采用  $65\text{mm} \times 65\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。横担长度参见表 7-5。

表 7-5 低压架空线路横担长度选择

横担架线数	二线	四线	六线
横担长度/mm	700	1500	2300

### (4) 绝缘子

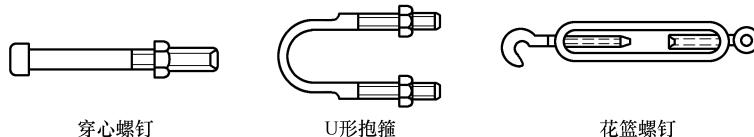
绝缘子是一种隔电产品，一般是用电工陶瓷制成的，又叫瓷瓶。另

外还有钢化玻璃制作玻璃绝缘子和用硅橡胶制作的合成绝缘子。

绝缘子的用途是使导线之间以及导线和大地之间绝缘，保证线路具有可靠的电气绝缘强度，并用来固定导线，承受导线的垂直荷重和水平荷重。换句话说，绝缘子既要能满足电气性能的要求，又要能满足机械强度的要求。常用针式绝缘子和碟式绝缘子如图 7-5 所示。

### (5) 线路金具

用于连接、固定导线或固定绝缘子、横担等的金属部件。常用的线路金具如图 7-6 所示，有安装针式绝缘子的直、弯角，安装碟式绝缘子的穿心螺钉，固定横担的 U 形抱箍，调节拉线松紧的花篮螺钉等。

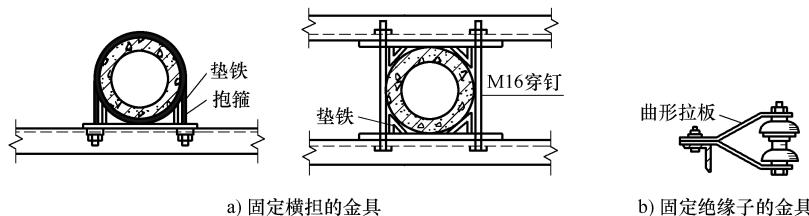


#### 1) 横担

低压横担用  $65\text{mm} \times 65\text{mm} \times 6\text{mm}$  的角钢制作。2 线、4 线和 5 线横担的长度分别为 850mm、1400mm 和 1800mm。

#### 2) 固定金具

固定金具主要指用于固定横担、绝缘子的金属件，如横担支撑、抱箍、垫铁、拉板等。一些固定金具如图 7-7 所示。



### 3) 拉线金具

拉线金具是用于拉线的连接和安装的金属制件，包括镀锌钢绞线、拉线棒、楔形线夹、UT形线夹、钢线卡子、拉线环等。拉线金具如图7-8所示、拉线连接金具如图7-9所示。

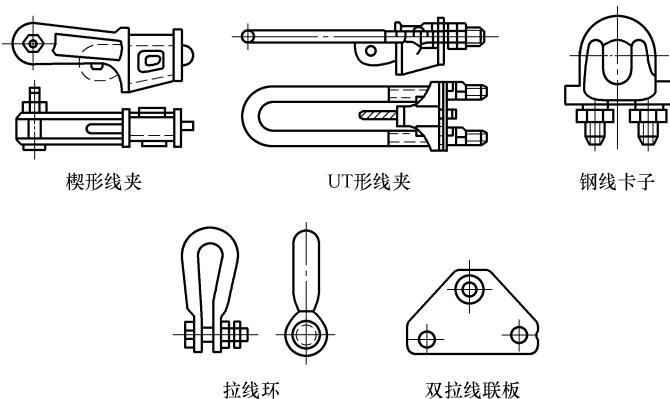


图7-8 拉线金具

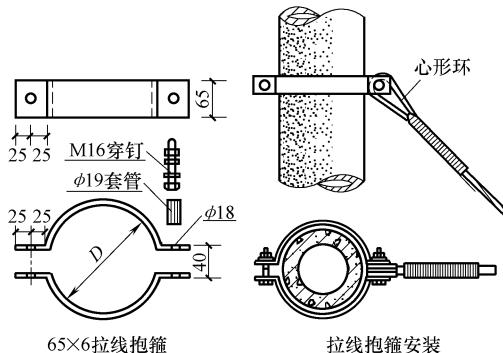


图7-9 拉线连接金具

### 4) 拉线的种类、用途和结构

为了防止架空线路杆塔倾覆、杆塔承受过大的弯矩和横担扭歪等，需要在杆塔或横担等部位打设拉线。

拉线的作用是使拉线产生的力矩平衡杆塔承受的不平衡力矩，增加杆塔的稳定性。凡承受固定性不平衡荷载比较显著的电杆，如终端杆、

角度杆、跨越杆等均应装设拉线。为了避免线路受强大风力荷载的破坏，或在土质松软的地区为了增加电杆的稳定性，也应装设拉线。

## 2. 架空线路的敷设

### (1) 架空线路的敷设原则

① 在施工和竣工验收中必须遵循有关的规程，保证施工质量和线路的安全。

② 合理选择路径，要求路径短、转角少、交通运输方便，与建筑物应保持一定的安全距离。

③ 按相关规程要求，必须保证架空线路与大地及其他设施在安全距离范围以内。

④ 电杆尺寸应符合下列要求：

a) 不同电压等级的线路，档距不同。

架空线路的档距是指同一线路中相邻两电杆之间的水平距离。一般380V的线路档距应保持在50~60m，6~10kV的线路档距应控制在80~120m。

b) 同杆导线的线距，380V

线路的线距约为0.3~0.5m，  
10kV线路的线距约为0.6~1m。

c) 弧垂要根据档距、导线型号与截面积、导线所承受的拉力以及气温条件等决定。导线的弧垂是指导线的最低点与档距两端电杆上的导线悬挂点之间的垂直距离，如图7-10所示。弧垂过大易碰线，过小则易造成断线或倒杆。

### (2) 架空线路的施工

#### 1) 导线的排列方式

架空配电线路一般采用三角形排列或水平排列，大多采用三角形排列；低压架空线路一般采用水平排列；多回路导线可采用三角形排列、水平排列或垂直排列，如图7-11所示。

单回线路一般采用三角形或水平排列，三角形排列较为经济。垂直

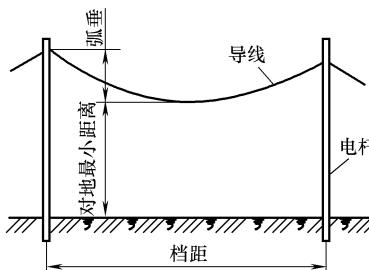


图7-10 架空线路的档距、  
弧垂和对地最小距离

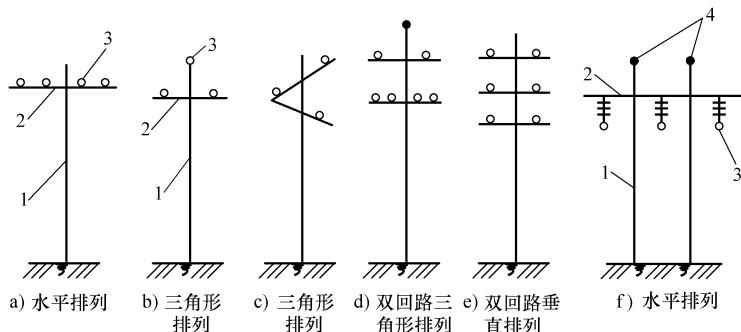


图 7-11 导线在电杆上的排列方式

1—电杆 2—横担 3—导线 4—避雷线

排列方式的可靠性较差，特别是重冰区，当下层导线在冰层突然脱落时，易发生上下跳跃，会发生相间闪络。水平排列电杆结构比垂直排列复杂，投资成本增加。

## 2) 导线在电杆上按相序排列的原则

① 高压电力线路，面向负荷从左侧起依次为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 。

② 低压电力线路，在同一横担架设时，导线的相序排列，面向负荷从左侧起依次为  $L_1$ 、 $N$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 。

③ 有保护零线在同一横担架设时，导线的相序排列，面向负荷从左侧起依次为  $L_1$ 、 $N$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $PE$ 。

④ 动力线照明线，在两个横担上分别架设时，动力线在上，照明线在下。

上层横担：面向负荷，从左侧起依次为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 。

下层横担：面向负荷，从左侧起依次为  $L_1$ 、 $(L_2$ 、 $L_3)$ 、 $N$ 、 $PE$ 。

## 二、架空线路的维护

工厂架空线路造价低廉，施工方便，但长期在露天架设，受自然环境影响，容易发生线路故障，因此需要在运行中加强巡视和维护，提高架空线路的安全运行水平，保证供电的稳定性。

### 1. 架空线路的故障原因

#### (1) 自然环境影响

架空线路露天架设，受大自然季节变化的影响明显。在夏季潮湿、雷雨季节常会发生单相触电事故；在大雾季节会发生闪络放电事故，由于城市配电线路多装设避雷装置，所以雷击事故常在农村电网中发生，遭受雷害事故的架空绝缘线路比架空裸线多，损害情况也比较严重。原因在于架空绝缘导线常常采用半导体材料作为绝缘层，其半导体材料具有单向导电性能，在雷云对地放电的大气过电压中，很容易在绝缘导线的导体中，产生感应过电压，且很难沿绝缘导线表皮释放，容易造成雷击断线事故；在大风、大雪天气条件下容易发生导杆或大风引起导线摆动造成短路等事故；由于导线的热胀冷缩特点，在气候炎热时导线弧垂过大，而在冬季严寒的地区，导线的弧垂又过小，易发生短路或断路事故。

### （2）外部因素影响

架空线路的运行安全除受自然环境影响外，还受外部因素的影响。如由车辆撞断电杆、超高车挂断导线、搭在线路上的异物（如大风时刮到线路上的带铝箔的塑料纸、高层建筑工地的废铁丝、录音带、彩条、风筝等）、铁塔的塔材金具被盗引起的倒杆断路或短路事故；空气中的粉尘、煤烟、水汽、可溶性盐类和有腐蚀性气体，会使供电线路的绝缘材料绝缘水平降低，发生短路事故；飞鸟落到线路上或在供电网周围筑巢易造成相间短路，因为鸟类在下落或起飞时翅膀展开，很容易发生相间短路，而且供电线网密集的地区也是鸟类筑巢的良好场所，筑巢的树枝、铁丝等，往往也会引起相间短路。

### （3）人为因素影响

工业生产受季节的影响，使用电负荷在不同的季节里变化显著，有时为生产需要长时间超负荷运行，使供电导线的接头处过热而接触不良，或过热烧断跌落式熔断器，发生断路事故。当线路电压过低时还会烧毁用电器等。同时线路在架设的过程中，如果使用的材料不符合工程要求，线路安装施工不符合设计要求或使用的架空线路构件常年暴露在自然环境下年久失修，导线的接头松动接触不良，当负荷过大时发生短路等。

## 2. 架空线路故障点的判断

### （1）故障的分类

① 按线路的机械性能可以分为倒杆和断线两类：

**倒杆：**由于外力作用（杆基失土、洪水冲刷或外力撞杆等）使杆塔倾倒或折断，造成供电中断的事故。倒杆是架空线路运行事故中的恶性事故。

**断线：**由于外力的作用致使供电导线断裂，造成断路事故。

② 按电气性能分为单相接地、双相短路、三相短路：

**单相接地：**配电系统中最常见的故障，多发生在潮湿多雨天气，或由于导线断裂、树枝碰线等。单相接地不仅影响正常供电，而且可能产生过电压，烧坏设备，甚至引起相间短路而扩大事故。当发生故障相不完全接地时，即通过高电阻或电弧接地，这时故障相的电压降低，非故障相的电压升高，大于相电压，但达不到线电压；如果发生故障相完全接地，则故障相的电压降到零，非故障相的电压升高到线电压，会引起非故障相绝缘的损坏。寻找和处理单相接地故障时，应作好安全措施，保证人身安全。当设备发生接地时，室内人体不得接近距故障点4m以内，室外不得接近距故障点8m以内，进入上述范围的工作人员必须穿绝缘靴，戴绝缘手套，使用专用工具。

**两相短路：**线路的任两根相线相互短接，称为两相短路故障。两相短路时，通过导线的电流比正常工作时高出许多倍，在放电点形成强烈的放电电弧，会烧毁导线，造成供电中断。情节严重的，还会在断路点放电时，产生高温，发生火灾。

**三相短路：**在供电线路中的三根相线相互短接，称为三相短路故障。三相短路是供电线路最为严重的电气事故，在工业生产中出现的概率较低。

（2）故障点的查找

不管线路出现的故障是何种原因，首先要从继电保护装置的显示上迅速对故障线路进行初步判断，了解故障的电气类型，查出事故发生的原因，特别是对可能发生的故障点的正确判断尤为关键，它是能否快速隔离故障、恢复供电的前提。

查找故障点的总原则是：先主干线，后分支线。对经巡查没有发现故障的线路，可以在断开分支线断路器后，先试送电，然后逐级查找恢复没有故障的其他线路。

① 短路故障的查找：在线路的主干线及各分支线上一般都装设断路器保护，在发生断路器跳闸的时候，首先应查看主干线分段断路器及各分支线断路器是否跳闸，然后对跳闸后的线路，对照上面讲过的可能

发生的各种故障进行逐级分段查找，对于长距离的高压线路，可以通过线路上的断路器切除部分线路，对余下的部分分别试送，通过试送成功分别故障线路和非故障线路，缩小查找范围，直到查出故障点。

注意：当查出故障点后，不能认为只要对故障点进行抢修后，线路就可以恢复供电，而中止了线路的巡查，这样是非常错误的。因为当线路发生短路故障时，短路电流还要流经故障点上面的线路，所以对线路中的薄弱环节，如线路分段点、断路器 T 接点、引跳线，会造成冲击而引起断线，所以还应对有短路电流通过的线路全面认真巡查一遍。

② 接地故障的查找：线路永久性接地故障点（外力破坏、线路绝缘老化等）的查找，可以按照上面所讲的在确定接地故障段后，根据它可能形成的原因和各种环境因素进行查找，而对瞬时性接地故障（树木碰线单相接地、雷雨天气闪络放电等），由于在供电设备上造成的机械损伤不明显，大多是瞬时性的，则只能是对全线进行查找。

在故障巡查过程中对架空线路经过的一些特殊地段，如采石场、重污染区、沿海线路、土地开发区等要特别留意，因为人为造成的原因，如违章爆破损伤导线，违章开发破坏杆基。还有各种环境污染以及自然因素对线路形成的腐蚀，都有可能是引起线路故障的起因，有些轻微的电气故障，往往不易查找，但故障点常伴有电弧放电引起的烧伤痕迹，需要在线路故障巡查的时候，加倍小心，细心查找，不放过任何蛛丝马迹。同时在自己查找外，还要认识到有很多故障信息是来自于广大群众的积极报告，在处理线路故障的过程中，要与电力抢修服务台联系，收集一切有用的故障信息，采用询问当地居民的方法加以判定。

### 3. 架空线路的运行管理

为了加强电力线路的运行管理，使供电线路的运行管理标准化、科学化、现代化，保证供配电线路安全、经济、可靠运行，我国特制定了《架空线路和电缆运行管理标准》，目的是要求输电部门在线路的运行上必须认真贯彻电力生产“安全、经济、多供、少损”的方针，积极采用新技术、新设备和新的管理手段，逐步提高供配电线路设备的安全运行水平。

## 第二节 电缆线路

电缆线路是将电缆敷设在地下、水底、电缆沟、电缆桥架或电缆隧道

道中。由于架空线路具有经济、易施工和维护检修方便等优点，因而被广泛采用，但它的运行安全受自然条件的影响较大，且有碍交通和观瞻，现代城市为了提高供电安全水平和美化环境，35kV 以下的供电系统有全部采用电缆线路的趋势。

## 一、电缆线路的结构

电缆线路的结构主要由电缆、电缆接头和终端头、电缆支架和电缆夹等组成，具有运行可靠、不易受外界影响、美观等优点。

### 1. 电缆

#### (1) 电缆的结构

电缆是一种特殊的导线，由线芯、绝缘层、铅包（或铝包）和保护层几个部分构成。

线芯导体一般由多股铜线或铝线绞合而成，便于弯曲同时又具有很好的导电性，线芯多采用扇形，以便减小电缆的外径。绝缘层要能将线芯导体间或线芯与大地之间良好地绝缘。保护层又分内保护层和外保护层，内保护层用来直接保护绝缘层，而外保护层用来承受在运输和敷设时的机械力，防止内保护层遭受机械损伤和外部潮气腐蚀，外保护层通常为钢丝或钢带构成的钢缆，外覆沥青、麻被或塑料护套。电缆结构示意图如图 7-12 所示。

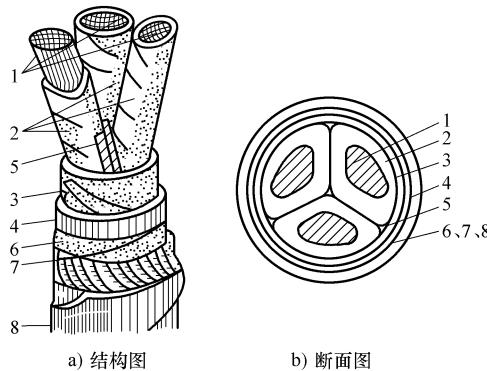


图 7-12 电缆结构示意图

1—线芯 2—绝缘层 3—统包绝缘层 4—密封护套  
5—填充物 6—纸带 7—钢带内衬 8—钢带铠装

## (2) 电缆的型号

电缆的型号由8个部分组成。拼音字母表明电缆的用途、绝缘材料及线芯材料；数字表明电缆外保护层材料及铠装包层方式。电缆型号的字母、数字含义详见表7-6。

表7-6 电缆型号中各符号的含义

项目	型号	含义	旧型号	项目	型号	含义	旧型号
类别	Z	油浸纸绝缘	Z	外护套	22	双钢带铠装聚氯乙烯外套	22,29
	V	聚氯乙烯绝缘	V		23	双钢带铠装聚乙烯外套	30,130
	YJ	交联聚乙烯绝缘	YJ		32	单细圆钢丝铠装聚氯乙烯外套	50,150
	X	橡胶绝缘	X		33	单细圆钢丝铠装聚乙烯外套	5,15
导体	L	铝芯	L	外护套	41	单粗圆钢丝铠装	59,25
	T	铜芯(一般不注)	T		42	单粗圆钢丝铠装聚氯乙烯外套	
内护套	Q	铅包	Q		43	粗圆钢丝铠装纤维外套	
	L	铝包	L		441	双粗圆钢丝铠装纤维外套	
	V	聚氯乙烯护套	V		241	双钢第一单粗圆钢丝铠装	
特征	P	滴流式	P				
	D	不滴流式	D				
	F	分相铅包式	F				
外护套	02	聚氯乙烯套	—				
	03	聚乙烯套	1,11				
电力电缆全型号表示示意图	ZLQ20—1000—3×120,其中 ZLQ20——铝心纸绝缘包裸钢带铠装电力电缆(Z:纸绝缘 L:铝导线 Q:铅包) 1000——额定电压(V) 3——三芯 120——线芯额定截面积( $\text{mm}^2$ )						
备注	表中“外护套”型号,系按国家标准GB/T 2952—2008规定						

## 2. 电缆接头

电缆接头包括电缆中间的接头和电缆的终端头。

电缆终端头分户外型和户内型两种。户内型电缆终端头型式较多,常用的是铁皮漏斗型、塑料干封型和环氧树脂终端头。其中环氧树脂终端头具有工艺简单、绝缘和密封性能好、体积小、重量轻、成本低等优

点，目前在施工中被广泛采用。

从工程实践中总结经验发现，电缆的接头是电力电缆线路中最为薄弱的环节，线路中的很多部分故障都是发生在接头处，因而应给予特别关注，以免发生短路故障。为确保绝缘，两段电缆的连接处应采用电缆连接盒。电缆的末端也应采用电缆终端盒与电气设备连接。图 7-13 所示为环氧树脂中间连接盒的结构示意图；图 7-14 所示为环氧树脂终端盒的结构示意图。

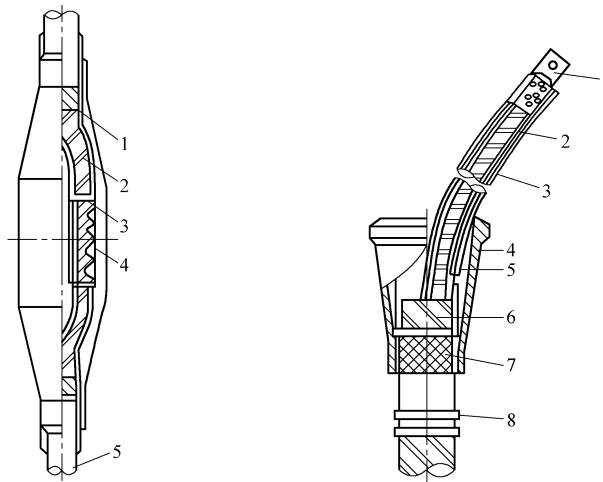


图 7-13 环氧树脂中间连接盒的结构示意图

1—统包绝缘层 2—缆芯绝缘  
3—扎锁管（管内两线芯对接）  
4—扎锁管涂包层 5—铅包

图 7-14 环氧树脂终端盒的结构示意图

1—引线接卡 2—缆芯绝缘 3—外包绝缘层  
4—预制环氧化壳（可代以铁皮模具）  
5—环氧化树脂胶（现场浇注） 6—统  
包绝缘 7—铅包 8—接地线卡

### 3. 电缆支架和电缆夹

电缆支架用于支持电缆，使其相互之间保持一定的距离，便于散热、修理及维护，在短路时，避免波及邻近的电缆。

在地面电缆支架中多用钢制作，将电缆排放在支架上，并加以固定。在永久性电缆隧道中，采用电缆钩悬挂电缆。对于非永久性电缆隧道，可采用木楔或帆布袋吊挂，以便在电缆承受意外重力时，吊挂物首

先损坏，电缆自由坠落免遭破坏。

在需要对电缆进行固定或承担电缆自重的地方敷设电缆时，应采用电缆夹固定，但应防止电缆被夹伤。电缆夹的型式可按敷设要求进行选择。

## 二、电缆线路的敷设

### 1. 电缆线路的敷设原则

① 电缆类型要符合所选敷设方式的要求。如选择直埋式敷设，电缆是否有铠装和防腐层保护。

② 电缆敷设前必须检查电缆表面有无损伤，并测量电缆绝缘电阻，检查是否受潮。低压电缆用 1000V 绝缘电阻表测试绝缘电阻，合格后方可使用。检查潮气的方法，可将电缆绝缘纸点燃，如若纸的表面有泡沫并发出嘶嘶声，则表明此时有潮气存在，即火燃法。

③ 电缆敷设的路径要严防电缆扭伤或过度弯曲，电缆的弯曲半径与电缆外径的比值不得小于表 7-7 中的倍数。

表 7-7 电缆弯曲半径与电缆外径比值的规定

名称	倍数	名称	倍数
油浸纸绝缘多芯电缆 (铝包铠装)	15, 30	塑料、橡胶绝缘电缆 (有铠装、无铠装)	15, 10
油浸纸绝缘多芯电缆 (裸铅包或铝包)	20	油浸纸绝缘多芯 控制电缆	10
干绝缘油质铅包多芯电缆	25		

④ 垂直或延陡坡敷设的电缆，在最高与最低点之间的最大允许高差不应超出表 7-8 的规定值。

表 7-8 电缆最大允许高差

类型	铅护套/m	铝护套/m
35kV 及以下 铠装或无铠装	25 20	25 25
干绝缘统铅包	100	—

⑤ 有黄麻保护层的电缆，敷设时在电缆沟、隧道、竖井内应将麻护层剥掉，然后涂抹防腐漆。敷设时还应避免破坏电缆沟、隧道的防水层。

⑥ 电缆通过下列地段时，应采用一定机械强度的保护措施，以防

电缆受到损伤，一般用钢管保护。

- 引入、引出建筑物、隧道，穿过楼板及墙壁处。
- 通过道路、铁路及可能受到机械损伤的地段。
- 从沟道或地面引至电杆、设备，墙外表面或室内人容易碰触处，从地面起，保护高度不低于2m。

## 2. 电缆线路的敷设方式

### (1) 直接埋地敷设

直接埋地敷设方式通常是沿敷设路径事先挖好壕沟，在沟底辅以软土或沙层，然后把电缆埋在里面，在电缆上面再铺软土或沙层，加盖混凝土保护板，在回填土。这种方式施工简单且施工进度快，散热效果好、投资少，但后期检修维护不方便，易受机械损伤或酸性土壤的腐蚀。为防止某一段电缆受到

机械损伤或土壤中酸性物质的腐蚀，常用的做法是在电缆外套一根镀锌钢管或塑料管。直接埋地敷设方式适用于电缆数量少，敷设途径较长的场合，如图7-15所示。

### (2) 电缆沟敷设

电缆沟敷设是将电缆敷设在电缆沟的电缆支架上。电缆沟由砖砌成或混凝土浇注而成，上面加盖板，内侧有电缆架。此种敷设方式投资略高，电缆沟内易产生积水，但维护检修方便，占地面积小，因此在工程实践中采用比较广泛，如图7-16所示。

### (3) 电缆悬挂(吊)式敷设

电缆悬挂(吊)式敷设是用挂架悬吊，是电力电缆在室内外明敷设中以及在地下室、地下管道敷设中的常用方式之一。有架空悬吊和沿墙挂架悬挂两种。电缆悬挂敷设具有结构简单、装置周期短、维护更换方便等优点。但易积累灰尘，易受周围环节影响并影响环境美观。

### (4) 排管敷设

排管敷设方式适用于电缆数量不多(一般不超过12根)，与其他建筑物、公路或铁路交叉较多、路径拥挤，又不宜采用直埋或电缆沟敷

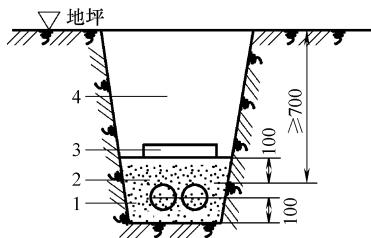


图7-15 电缆直接埋地敷设

1—电力电缆 2—砂 3—保护  
盖板 4—填土

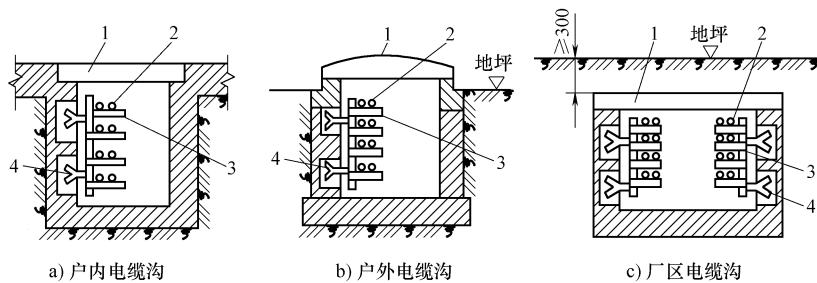


图 7-16 电缆在电缆沟内敷设

1—盖板 2—电缆 3—电缆支架 4—预埋铁牛

设的地段。此种方式的优点是易排除故障，检修方便迅速；利用备用的管孔随时可以增设电缆而无需挖开路面。但缺点是工程费用高，散热不良且施工复杂。排管一般采用陶土管、石棉水泥管或混凝土管等，管子内部必须光滑，如图 7-17 所示。

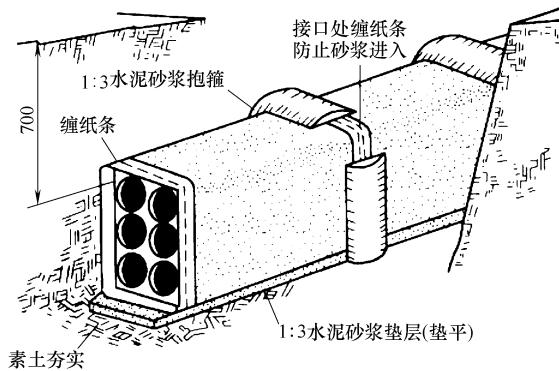


图 7-17 电缆排管敷设做法示意图

### (5) 电缆桥架敷设

电力电缆采用金属桥架敷设是一种新的电缆敷设方式。通常做法是电缆敷设在电缆桥架内，电缆桥架装置是由支架、盖板、支臂和线槽等组成。图 7-18 所示为电缆桥架敷设示意图。

电缆桥架的采用，克服了电缆沟敷设电缆时存在积水、积灰、易损坏电缆等多种不利因素，具有结构简单、安装灵活、占地空间少、投资省、建设周期短、可任意走向、便于采用全塑电缆和工厂系列化生产等

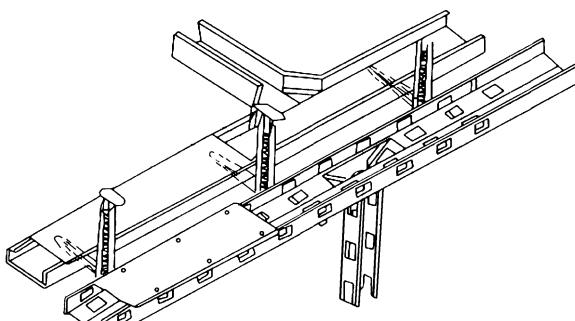


图 7-18 电缆桥架敷设示意图

诸多优点，因此目前在国外已被广泛使用，近年来也开始在国内逐步推广。

### 第三节 室内配线

室内配线是指在建筑内安装低压动力线路和照明线路。敷设方法有明敷和暗敷，明敷是指将绝缘导线用鼓型绝缘子、瓷夹板安装于建筑墙体上或梁架上和将绝缘护套线用线卡安装于建筑墙体上等方法。暗敷是指将绝缘导线穿于埋设在建筑墙体内的线管的暗管敷设方法和将绝缘导线穿于明装在建筑墙体上线管的明管敷设方法，以及用线槽布线的方法等。

#### 一、室内配线的基本知识

##### 1. 室内配线的类型

室内配线就是敷设室内用电器具、设备的供电和控制线路。室内配线有明线安装和暗线安装两种。明线安装是指导线沿墙壁、天花板、梁及柱子等表面敷设的安装方法。暗线安装是指导线穿管埋设在墙内、地下、顶棚里的安装方法。

##### 2. 室内配线的主要方式

室内配线的主要方式通常有瓷（塑料）夹板配线、瓷瓶配线、槽板配线、护套线配线、电线管配线等。照明线路中常用的是瓷夹板配线、槽板配线和护套线配线；动力线路中常用的是瓷瓶配线、护套线配线和电线管配线。目前瓷瓶配线使用较少，多用塑料槽板配线和护套线配线。

### 3. 室内配线的技术要求

室内配线不仅要使电能传送安全可靠，而且要使线路布置正规、合理、整齐、安装牢固，其技术要求如下：

① 所用导线的额定电压应大于线路的工作电压。导线的绝缘应符合线路的安装方式和敷设环境的条件。导线的截面积应满足供电安全电流和机械强度的要求，一般的家用照明线路选用  $2.5\text{mm}^2$  的铝心绝缘导线或  $1.5\text{mm}^2$  的铜心绝缘导线为宜。

② 配线时应尽量避免导线接头。必须有接头时，应采用压接和焊接，并用绝缘胶布将接头缠好。要求导线连接和分支处不应受到机械力的作用，穿在管内的导线不允许有接头，必要时尽可能把接头放在接线盒或灯头盒内。

③ 配线时应水平或垂直敷设。水平敷设时，导线距地面不小于  $2.5\text{m}$ ；垂直敷设时，导线距地面不小于  $2\text{m}$ 。否则，应将导线穿在钢管内加以保护，以防机械损伤。同时所配线路要便于检查和维修。

④ 当导线穿过楼板时，应设钢管加以保护，钢管长度应从离楼板面  $2\text{m}$  高处至楼板下出口处。导线穿墙要用瓷管保护，瓷管两端的出线口伸出墙面不小于  $10\text{mm}$ ，这样可以防止导线和墙壁接触，以免墙壁潮湿而产生漏电现象。当导线互相交叉时，为避免碰线，在每根导线上均应套塑料管或其他绝缘管，并将套管固定紧，以防其发生移动。

⑤ 为了确保安全用电，室内电气管线和配电设备与其他管道、设备间的最小距离都有明确规定。施工时如不能满足所要求的距离，则应采取其他的保护措施。

## 二、常用配线方式

### 1. 塑料护套线明敷配线

#### (1) 使用场合

塑料护套线是一种将双芯或多芯绝缘导线并在一起，外加塑料保护层的双绝缘导线，具有防潮、耐酸、耐腐蚀及安装方便等优点。广泛用于家庭、办公等室内配线中。塑料护套线一般用铝片或塑料线卡作为导线的支持物，直接敷设在建筑物的墙壁表面，有时也可直接敷设在空心楼板中。

#### (2) 护套线配线的步骤与工艺要求

##### 1) 画线定位

① 确定起点和终点位置，用弹线袋画线。

② 设定铝片卡的位置，要求铝片卡之间的距离为 150 ~ 300mm。在距开关、插座、灯具的木台 50mm 处及导线转弯两边的 80mm 处，都需设置铝片卡的固定点。

### 2) 铝片卡或塑料卡的固定

铝片卡或塑料卡的固定应根据具体情况而定。在木质结构、涂灰层的墙上，选择适当的小铁钉或小水泥钉即可将铝片卡或塑料卡钉牢；在混凝土结构上，可用小水泥钉钉牢，也可采用环氧树脂粘接。

① 此类配线应用带护套的绝缘导线，固定护套线用钢精轧头（铝片卡）或塑料线卡。安装如图 7-19 所示。

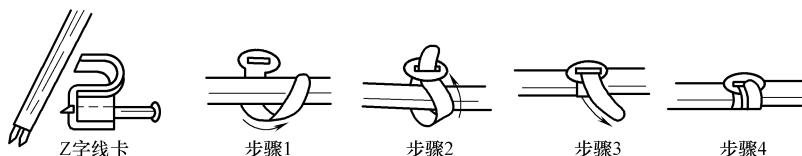


图 7-19 护套线配线

② 用于环境温度 20 ~ 40℃，清洁，无腐蚀性气体，干燥的装饰要求不高的室内。

③ 线卡间距不大于 0.2m，与电器连接应增设线卡，减小间距，间距不大于 50mm。

④ 护套线弯曲，弯曲半径不小于护套线外径 4 倍。固定线卡的墙体应坚实，使固定线卡的钢钉能牢固，否则应采用加固的方式。

⑤ 护套线连接应采用接线盒或电器端子，穿越建筑物应加管保护。

⑥ 易燃易爆场所不得采用。

### 3) 敷设导线

为了使护套线敷设得平直，可在直线部分的两端各装一副瓷夹板。敷线时，先把护套线一端固定在瓷夹内，然后拉直并在另一端收紧护套线后固定在另一副瓷夹中，最后把护套线依次夹入铝片卡或塑料卡中。护套线转弯时应成小弧形，不能用力硬扭成直角。

## 2. 塑料槽板配线

① 目前常用塑料槽板敷设导线，槽板为用阻燃性硬塑料材料制成，

如图 7-20 所示。施工先固定线槽底再放入导线，最后将线槽盖盖上。

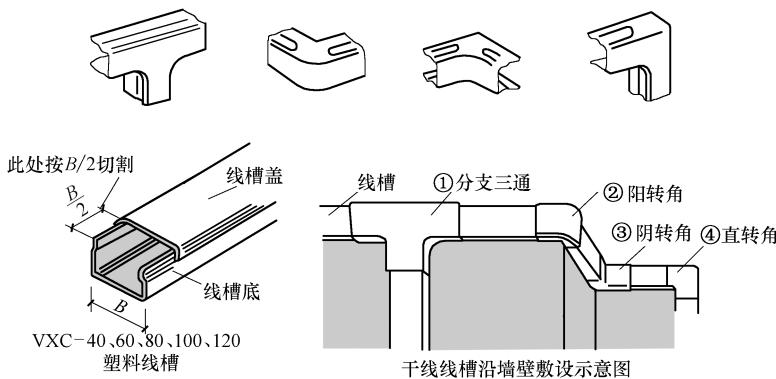


图 7-20 塑料槽板配线

② 用于环境温度  $-40 \sim +40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 85%，一般用电环境的室内。

③ 槽板施工对墙面较高，墙面应平坦坚实，能使槽板用螺钉或粘接时牢固、平直，不应凸凹。墙体使螺钉的紧固力应能承受 5 倍以上的两个紧固点间槽板和导线的重量。

④ 槽板规格应与导线规格和根数相适应，一般规定导线（含绝缘层）的总截面积不大于槽板内径  $1/3$ 。

⑤ 槽板底槽和槽盖应楔合紧密，无松脱、无歪扭。槽连接处，底槽和槽盖应错开，错开距离不小于 0.2m。

⑥ 槽板固定点的间距不应大于 0.5m，距接缝处不大于 30mm。

⑦ 槽板分支、转角、接线应用专用槽板配线附件。

⑧ 槽板配线的导线截面积不超过  $6\text{mm}^2$ ，不同电压、不同回路的导线禁止敷设在同一槽板内。

⑨ 槽板内导线不得有接头，接头应采用接线盒。

⑩ 槽板底槽和槽盖应扣接，不得粘接。

# 第八章 临时用电

## 第一节 临时用电的安全要求

### 一、施工现场临时用电要求

- 1) 电工及其他用电人员必须经过国家现行标准考核合格后，持证上岗。
- 2) 安装、巡检、维修、或拆除临时用电设备和线路，必须由电工完成，并应有专人监护。电工等级应同工程的难易程度和技术复杂性相适应。
- 3) 技术资料要求：
  - ① 用电组织设计的安全资料；
  - ② 用电技术交底资料；
  - ③ 用电工程检查验收表；
  - ④ 接地电阻、绝缘电阻和漏电保护器漏电动作参数测定记录表必须建立安全技术档案。
- 4) 场地要求：
  - ① 在建工程不得在外电架空线路正下方施工、搭设作业棚、建造生活设施或堆放构件、架具、材料及其他杂物等。
  - ② 施工现场开挖沟槽边缘与外电埋地电缆沟槽边缘的距离不得小于 0.5m。
- 5) 现场临时用电电缆架空（埋地）按规范敷设。配电箱盘必须是省备案产品，否则予以置换。
- 6) 现场各标段临时用电按三级配电两级保护和“一机、一闸、一漏、一箱”要求，否则予以整改。
- 7) 用电设备要求：
  - ① 电气设备周围不得存放易燃易爆物、污染源和腐蚀介质。
  - ② 电气设备场所应能避免物体打击和机械损伤。
  - ③ 电气设备场所应做到防雨、防水、防坠落的要求。

- ④ 接地、接零必须按规范进行施工。
- 8) 各类用电人员应掌握安全用电基本知识和所用设备的性能，并应符合下列要求：
- ① 使用电气设备前必须按规定穿戴和配备好相应的劳动防护用品，并应检查电气装置和保护设施，严禁设备带缺陷运转。
  - ② 保管和维护所用设备，发现问题及时报告解决。
  - ③ 暂时停用设备的开关箱必须分断电源隔离开关，并关门上锁。
  - ④ 移动电气设备时，必须经电工切断电源并做妥善处理后进行。
- 9) 配电要求：
- ① 主电缆要使用三相五线制，从总配电箱（见图 8-1）到二级、三级分配电箱的主电缆型号必须按国家规范。

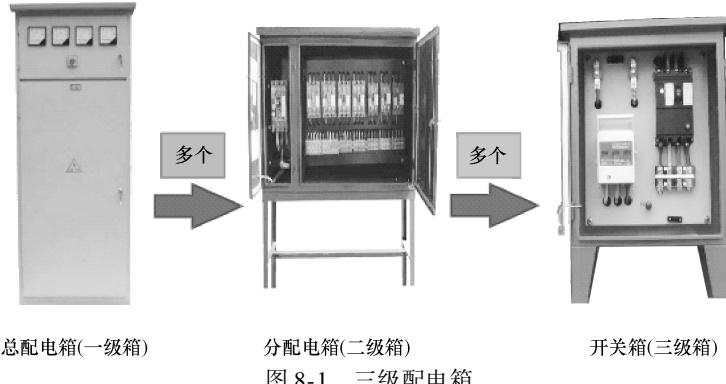


图 8-1 三级配电箱

- ② 埋地电缆必须穿管敷设。
- ③ 配电箱（盘）必须要有警示标志。
- ④ 配电箱必须上锁，专人看管。

## 二、临时架空线的安全措施

- 1) 临时架空线必须采用绝缘导线。
  - 2) 临时架空线的档距不得大于 35m，线距不得小于 30cm，临时架空线的最大弧垂处与地面的最小垂直距离不小于 4m。
  - 3) 临时架空线的导线选择不仅要通过负荷计算，还须考虑其机械强度确定，以保持其最小截面积为限定条件。
- ① 保护零线严禁通过任何开关和熔断器。

② 保护零线作为接零保护的专用线，必须独用，不能他用，电缆要用五芯线。

③ 保护零线除了从总配电箱电源侧零线引出外，在任何地方不得与工作零线有电气连接。

④ 保护零线的截面积不小于工作零线的截面积，同时必须满足机械强度的要求。

⑤ 重复接地必须接在保护零线上。工作零线不能加重复接地。

⑥ 保护零线除必须在配电室处重复接地外，还必须在配电线路的中间处及末端做重复接地。

4) 实行“一机、一闸、一漏、一箱”制。

### 三、配电箱、开关箱的安全措施

1) 配电箱、开关箱的材质应符合下列要求：

① 配电箱、开关箱采用铁板或优质绝缘材料制作，铁板的厚度大于1.5mm。

② 配电箱内的电器应安装在金属或非木质的绝缘电器安装板上。

2) 配电箱、开关箱内部开关电器安装要求。

① 箱内电器安装按左大右小，大容量的控制开关，熔断器在左面，右面安装小容量的开关电器。

② 箱内所有的开关电器应安装端正、牢固，不得有任何松动、歪斜。

③ 内部设置电器元件之间的距离和开关箱体之间的距离应符合电气规范。

④ 配电箱、开关箱及其内部开关电器的所有正常不带电的金属部件均作保护接零。保护零线必须用标准的黄/绿双色线，并通过专用的接线端子板连接，与工作零线区别。

3) 配电箱、开关箱导线进出口处应符合下列要求：

① 配电箱、开关箱内应采用绝缘导线，其性能要良好，接头不得松动，不得有外露导电部分。

② 配电箱、开关箱内应尽量采用铜线，保护零线采用绝缘铜线。

4) 配电箱、开关箱制作应符合下列要求：

① 配电箱、开关箱必须防雨、防尘，箱体应严密、端正，箱门开关松紧适当，便于开关，必须有门锁。

② 端子板放在箱体内配电板下部或箱内底侧边，并分别标明“N”、“PE”。

5) 固定式配电箱、开关箱的下底面安装高度以1.3~1.5m为宜。移动式配电箱、开关箱，其下底面安装高度以0.6~1.0m为宜。

6) 禁止将配电箱、开关箱置于地面并随意拖拉。

7) 配电箱、开关箱应在其箱门处标注其编号、名称、用途和分路情况，配电箱和开关箱必须专箱专用，不得随意另引接其他零时用电设备。

8) 配电箱、开关箱每月进行一次检查维修。

#### 四、现场照明的安全措施

1) 照明开关箱（板）中的所有正常不带电的金属部件都必须作保护接零，所有灯具的金属外壳必须作保护接零。

2) 照明开关箱（板）应装设漏电保护器。

3) 照明线路的相线必须经过开关才能进入照明器，不得直接进入照明器。

4) 螺口灯头的中心触头必须与相线相连接，其螺口部分必须与工作零线连接。

5) 室外灯具距地面不得低于3m，室内灯具距地面不得低于2.4m。

#### 五、临时用电的接地、接零及防雷保护

1) 所有电气设备的金属外壳以及和电气设备连接的金属构架必须采取妥善的接地或接零保护。

2) 当外接电源时，应首先了解外借电力系统中电气设备采用何种保护，方可确定采用接地或接零保护，不可盲目行事；严禁在同一供电系统中采用两种保护。

3) 工作零线兼做接零保护时，零线截面积应不小于规定；零线上不得装设开关及熔断器。

4) 电气设备的接地线或接零线应使用多股铜线，禁止使用独股铝线。

5) 接地线或接零线中间不得有接头，与设备及端子连接必须牢固可靠，接触良好，压接点一般应设在明显处，导线不应承受拉力。

6) 采用接零保护的单相220V电气设备，不得利用设备自身的工作零线兼做接零保护。

7) 接地装置及防雷保护装置的做法及要求，应符合当地《电气工程安装标准》的各项规定。

8) 施工现场及临时生活区高度在20m及以上的井子架、高大架子、在施高大建筑工程，塔吊及高大机具，高烟囱、水塔等，以及大模板施工中模板就位后应装设防雷保护装置，并及时用导线与建筑物接地线连接。

9) 塔式起重机的轨道，一般应设两组接地装置；对塔线较长的轨道每隔20m应补做一组接地装置。

## 六、各类临时用电人员的要求

- 1) 掌握安全用电的基本知识和所用设备的性能。
- 2) 使用设备前必须按规定穿戴和配备相应的劳动保护用品，检查安全装置和防护设施是否完好，严禁设备带“病”运转。
- 3) 停用设备必须拉闸断电，锁好开关箱。
- 4) 负责保护所用的开关箱、负载线和保护零线，发现问题及时报告解决。
- 5) 经外观检查认定有关配电箱、用电设备、电气线路和保护设施完好后方可进行操作。
- 6) 配电箱、开关箱操作后出现异常现象，应立即拉闸断电，进行检查处置。
- 7) 搬迁或移动电器设备必须经电工切断电源，并做妥善处理后进行。

## 第二节 临时用电技术防护措施和管理

### 一、临时用电技术防护措施

1) 新开工程施工现场采用电源中性点直接接地的供配电线路中必须采用TN-S接零保护系统。

① 保护零线（PE）由变压器的工作零线或总配电箱第一级漏电保护器电源侧零线引出后，形成三相五线。

② 自总配电箱处重复接地后，该供配电系统内保护零线（PE）及工作零线（N）应严格分开，禁止混用。

③ 保护零线（PE）在总配电箱、线路中端及末端做重复性接地不应少于3处，其每处接地电阻  $R \leq 10\Omega$ 。

④ 保护零线（PE）截面积不能小于工作零线（N）截面积，且要采用满足机械强度要求的多股铜芯线材。

⑤ 在同一供配电系统内严禁一部分用电设备采用接零保护，另一部分设备采用接地保护。

⑥ 保护零线（PE）一律采用黄绿的双色线。禁止用黄绿双色线作负荷线。

2) 配电箱、开关箱的制作、配置、接线、使用和维修保养。

① 配电箱、开关箱应采用铁板或优质绝缘材料制作，铁板厚度应大于1.5mm，箱内电器应安装在金属或非木质的绝缘安装板上。

② 按三级配电、二级保护的要求，施工现场应设置总配电箱、分配电箱和开关箱，其箱内电器配置、接线应符合规范要求。

③ 配电箱的使用与维护：

a) 施工现场中使用固定式配电箱、开关箱的下底面与地面垂直距离大于1.5m；移动式分配电箱、开关箱的下底面与地面垂直距离大于0.6m，小于1.5m。

b) 配电箱、开关箱应统一编号，箱内有接线系统图、分路标记、所控用电设备名称。

c) 配电箱、开关箱内外保持整洁、干燥且防雨，严禁放置杂物，箱门应配锁，并指定专人负责管理。

d) 配电箱、开关箱进出线口应设在箱体底部，进出线应有防护措施，箱内电器、线路严禁带电部位裸露。

e) 配电箱、开关箱的金属箱体，必须有可靠的接零保护，并置于明显易查部位。其箱内金属安装板、电器金属外壳应与箱体作可靠电气连接。

3) 配电箱、开关箱中漏电保护器的漏电动作电流选择。

① 总配电箱内各路漏电保护器的漏电动作电流应根据线路长短、设备多少，可选100~300mA，动作时间≤0.1s的低灵敏度延时型漏电保护器，或对干、支路测定后的漏电电流，合理选择漏电保护器。

② 分配电箱内各路漏电保护器的漏电动作电流可根据实际选择50~75mA，动作时间≤0.1s。

③ 开关箱内漏电保护器，属末级保护，其漏电动作电流应≤30mA，动作时间≤0.1s。

4) 电焊机。

① 电焊机一次侧电源线长度应不大于 5m，电焊机二次侧电缆长度应不大于 30m，且进出线处必须设置防护罩。

② 电焊机外壳必须做接零保护。

③ 电焊机一次侧应装漏电保护器，二次侧应装降压保护器或安装弧焊机触电保护器（一次和二次均能保护）。

5) 临时照明。

① 施工现场照明灯具高度距地面不得小于 2.5m，其金属结构部分必须作接零保护，并在照明回路中安装漏电保护器。

② 用于工程部位照明的工作行灯，必须根据使用场所选择不同等级的安全电压其变压器必须使用双绕组隔离变压器。

③ 每条照明线路上的灯具（插座）室内不多于 20 只，室外不多于 10 只。

④ 照明线路上的开关应能同时切断相线和零线，不得使用单级开关。

⑤ 照明开关应有明显的开合位置，即上开、下闭。相邻开关插座的相位应为左孔零线、右孔相线、上部孔为（PE）保护零线。

⑥ 照明线路的熔体额定电流应为正常额定电流的 1~1.5 倍，不应超过 20A。

## 二、施工现场临时用电设施的管理

1) 施工现场临时变压器必须设有安全围栏并有明显的警示标牌。

2) 电线或电缆敷设时在有可能受外力损伤的部位，应加有符合安全技术要求的防护措施。

3) 施工现场禁止私拉乱接电线和电缆，室内配线必须用绝缘导线，并用电线管按明配管要求敷设。

## 三、漏电保护器的管理

1) 为确保漏电保护器的安全运行，购置漏电保护器必须符合国家标准，并经国家有关部门认证，由单位有关部门认可，到指定或定点厂商购买。

2) 漏电保护器投入运行后，使用单位应建立运行记录，并建立相应的管理制度。

3) 漏电保护器投入运行后，每月需在通电状态下，按动试验按

钮，检查其动作是否可靠，并将检查情况记入运行记录，雨季应增加实验次数。

4) 为检验漏电保护器在运行中的动作特性，每半年应定期进行动作特性试验。特性试验项目如下：

- ① 测试漏电动作电流值。
- ② 测试漏电不动作电流值。
- ③ 测试分断时间。

5) 漏电保护器须经专门培训的电气技工按使用要求进行安装。

6) 发现有问题的漏电保护器不得随意拆检，应送交生产厂家或经培训认可的技术人员进行检修。

### 第三节 手持式电动工具

#### 一、电动工具的分类及特点

按防止电击的保护分类，电动工具分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类。

Ⅰ类手持工具的特点是：仅依靠基本绝缘作为电击防护的电气设备。其可触及的导电部分不与电气装置的PE线相连接。如果基本绝缘失效，其安全性只能靠环境条件来保证。

Ⅰ类手持工具的特点是：本身仅有基本绝缘（工作绝缘），除靠基本绝缘防止电击外，还将易触及的外露可导电部分（金属外壳部分指正常情况下不带电的金属部件）连接到PE线上；一旦基本绝缘失效时，外露可导电部分一般不带危险电位。这是早期的产品，安全性能差，现已停止生产，但仍有相当一部分目前还在继续使用中。

Ⅱ类电动工具的特点是：本身除基本绝缘外，还有一层独立的附加绝缘，具备双重加强绝缘（基本绝缘加附加绝缘）。一旦基本绝缘损坏时，操作者仍能与带电体隔离，不致发生电击的危险。这类工具是当今手持电动工具的主流和发展方向。具有双重绝缘的这种设备由于设备外壳为绝缘体，因此不可能发生接地故障，因此无需为防电击而接PE线和采取其他防止电击的措施。

Ⅲ类电动工具的特点是：采用安全电压（42V及以下）作为供电电源的手持工具，其安全电压的获得必须是通过一个加强绝缘的安全隔离变压器提供，这样即使外壳漏电，由于接触电压很低流过人体的电流很小，不致造成电击事故。

## 二、使用手持及移动式电动工具的安全技术要求

① 初次使用前应仔细阅读使用说明书，尤其是涉及安全使用的内容。

② 工作环境应与防溅结构相适应，操作现场必须有适度的照明。注意不能靠近易燃、易爆的气体或液体。

③ I类工具的金属外壳应具备良好的接地措施，保护接地（PE）线应与电网系统PE线可靠连接，不应用自来水管、暖气管道等代替保护线。

④ 电动工具的插座电源必须具备双极的剩余电流动作保护装置。

⑤ 移动式电动工具的电源线必须采用绝缘良好的多股铜芯橡胶绝缘护套软线或铜芯聚氯乙烯绝缘护套软线。

⑥ 在金属容器内或潮湿地区工作时应使用Ⅲ类（安全电压）的工具，并应附加防止直接接触电击的安全措施。

⑦ 在使用电动工具时，如果因故离开工作场地或暂时停止工作以及临时停电时，须立即切断电动工具的电源。

⑧ 移动式电动工具应定期摇测绝缘电阻。对长期停用的移动式电动工具，使用前应摇测绝缘电阻。

## 三、移动式电气设备使用安全要求

① 移动式电气设备应采用两级以上剩余电流动作保护装置（漏电断路器）并配置与设备容量相适应的过载及短路保护装置。

② 移动电气设备的正常不带电的金属外壳、架构，应采取接地（或接零）保护，大型移动电气设备（如室外龙门吊、塔吊等）应按照等电位的保护要求做接地。

③ 大型相对固定设置的移动电气设备（如上述的龙门吊、塔吊等）的电源线应采取埋地穿管敷设或架空敷设，严禁拖地明敷。

④ 对于频繁移动的电气设备（如空气压缩机、打夯机等）的电源线应采用加强绝缘移动橡套电缆（重型橡套电缆）中间不应有接头。

⑤ 移动电缆的零线（N）和地线（PE）应与相线为同一电缆，严禁采用外敷设线替代。

⑥ 移动电气设备的动力与照明电源的开关不应共用，应由两个支路开关分别控制。

## 四、手携式和移动式电气设备的接地

① 手携式电气设备应用专用芯线接地，严禁利用其他用电设备的

PEN 线接地；PEN 线和接地线应分别与接地装置相连接。

② 手携式电气设备的接地线应采用软铜绞线，其截面积不小于  $1.5\text{mm}^2$ 。

③ 由固定的电源或由移动式发电设备供电的移动式机械的金属外壳或底座，应和这些供电电源的接地装置有金属连接；在中性点不接地的电网中，可在移动式机械附近装设接地装置，以代替敷设接地线，并应首先利用附近的自然接地体。

④ 移动式电气设备和机械的接地应符合固定式电气设备接地的规定，但下列情况可不接地：

a) 移动式机械自用的发电设备直接放在机械的同一金属框架上，又不供给其他设备用电。

b) 当机械由专用的移动式发电设备供电，机械数量不超过 2 台，机械距移动式发电设备不超过 50m，且发电设备和机械的外壳之间有可靠的金属连接。

# 第九章 电力电容器

## 第一节 电力电容器在电力系统中的作用

### 一、电力电容器的作用

并联电容器又称移相电容器，它在配电系统中承担改变电流相位的任务。而这种作用是无形的，在众多电力设备中，它是一种特殊的电路元件，默默无闻，表面上看不到它在电力系统中的明显作为，它不能将电能转换其他形式的能量输出服务于生产和生活的作用（例如电动机、照明灯具、变压器、电热炉、中高频炉等），也没有对电路实现控制和保护的作用。但是，在具有自动投切的低压电容补偿开关柜中，它的投、切频率可以达到每班数十次甚至上百次的切换。它的任务就是抵消由于用电设备中的感性负载所产生出的大量无功功率，提高整个系统的功率因数  $\cos\phi$ 。

电力电容器的作用概括为

- ① 补偿由于感性元件造成的无功功率，使功率三角形的无功  $Q$  边减小，从而提高了功率因数。
- ② 在供电设备容量不变的情况下，无功的减少，提高了设备的利用效率。例如，变压器所带负载的能力，在减少了无功功率后得到不同程度的提高，供电设备的利用效率也得到改善。
- ③ 降低了自输电线路直至用户之间的各种损耗。其中主要是变压器和线路在无功交换时所造成各种损耗。
- ④ 在减少了无功损耗之后，线路及各级变压器的压降损失也随之降低，供电电压质量得到有效提高。

### 二、电容补偿的原理

在交流电路中，电阻、电感、电容元件的电压、电流的相位特点为在纯电阻电路中，电流与电压同相位；在纯电容电路中电流超前电压  $90^\circ$ ；在纯电感电路中电流滞后电压  $90^\circ$ 。从供电角度，理想的负载是  $P$  与  $S$  相等，功率因数  $\cos\phi$  为 1。此时的供电设备的利用率为最高。而在

实际上是不可能的，只有假设系统中的负荷，全部为电阻性才有这种可能。电路中的大多数用电负荷设备的性质都为电感性，这就造成系统总电流滞后电压，使得在功率因数三角形中，无功  $Q$  边加大，则功率因数降低，供电设备的效率下降。

功率三角形是一个直角三角形，用  $\cos\phi$  (即  $\phi$  角的余弦) 来反映用电质量的高低，大量的感性负载使得在电力系统中，从发电一直到用电的电力设备没有得到充分的应用，相当一部分电能，经发、输、变、配电系统与用户设备之间进行往返交换。

从另一个方面来认识无功功率，无功功率并非无用，它是感性设备建立磁场的必要条件，没有无功功率，我们的变压器和电动机就无法正常工作。因此，设法解决减少无功功率才是正解。

实际应用中，电容电流与电感电流相位差为  $180^\circ$  称作互为反相，可以利用这一互补特性，在配电系统中并联相应数量的电容器。用超前于电压的无功容性电流抵消滞后于电压的无功感性电流，使系统中的有功功率成分增加， $\cos\phi$  得到提高，实现了无功电流在系统内部设备之间互相交换。这样就减少了无功占用的部分电源设备容量，从而提高了系统的功率因数，从而也就提高了电能的利用率。

对功率三角形以及  $RLC$  混联电路中的电压与电流的特点和变化规律如图 9-1 所示。电路的两个支路中，电阻和电感组成  $RL$  支路，它的电流相位由于电阻  $R$  与电感  $L$  的串联作用，显然与电压的相位存在着滞后，电阻的存在使得这种滞后不再是  $90^\circ$ ，在阻抗三角形中，它取决于电阻  $R$  与感抗  $X_L$  的比值。按平行四边形作法，可以根据其电阻和电感

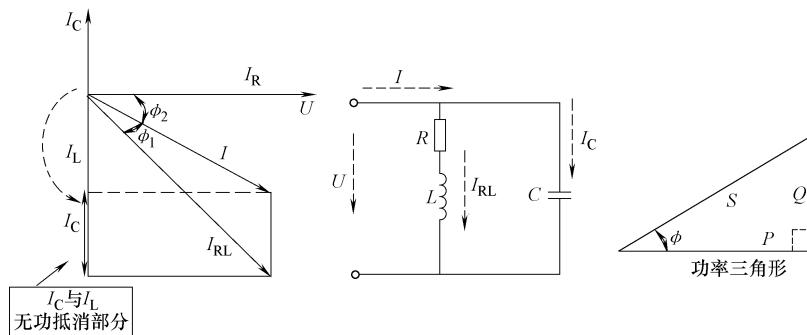


图 9-1  $RLC$  混联电路中的电压与电流变化规律

的数值得到阻抗三角形，并得到  $\phi_1$  的角度。而在另一个支路中，电容  $I_c$  的电流相位则超前电压  $90^\circ$ 。系统中的总电流不是以上两者的代数和，而是电容与电感和电阻电流的相量和。由此可见，在补偿电容投入后，由于电容电流抵消了一部分电感电流后，仍按平行四边形作法得到  $\phi_2$  的角度。由此可见  $\phi_2$  的角度比  $\phi_1$  小；其余弦值  $\cos\phi$  得到提高，无功功率减小，降低了系统的总电流。

### 三、补偿的基本原则

#### 1. 欠补偿

补偿的电容电流要求小于被抵消的电感电流。补偿后仍存在一定数量的感性无功电流，令  $\cos\phi$  小于 1 但接近 1。

#### 2. 全补偿

按照感性实际负荷电流配置电容器， $I_c = I_L$  将感性电流用容性电流全部抵消掉，令  $\cos\phi$  等于 1。

#### 3. 过补偿

大量投入电容器，在全部抵消掉电感电流后，还剩余一部分电容电流，此时原感性负载转化为容性负载性质。功率因数  $\cos\phi$  仍然小于 1。

在以上的三种情况中，按电路规律进行分析后，确定补偿的基本原则为欠补偿最为合理。全补偿在  $RLC$  混联电路中，如若电感电流与电容电流相等时，系统中就会发生电流谐振，设备中将产生几倍于额定值的冲击电流，危及系统和设备安全。

过补偿既不经济也不合理，当系统负载性质转换为容性时，在功率因数超过 1 以后，反而降低。而且在超过 1 的同时也可能引起电路电流谐振。以上两种补偿方式显然都不可取。

补偿的基本原则就是必须采用欠补偿方式，补偿后的功率因数则要求小于 1，并且尽量接近 1。为了防止谐振，一般将上限确定在 0.95。

### 四、电容补偿的方式

#### 1. 个别补偿

对电动机等大容量的感性设备，采

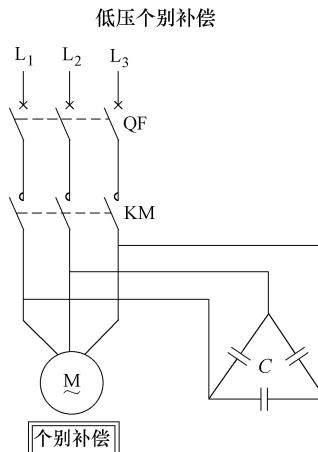


图 9-2 个别补偿

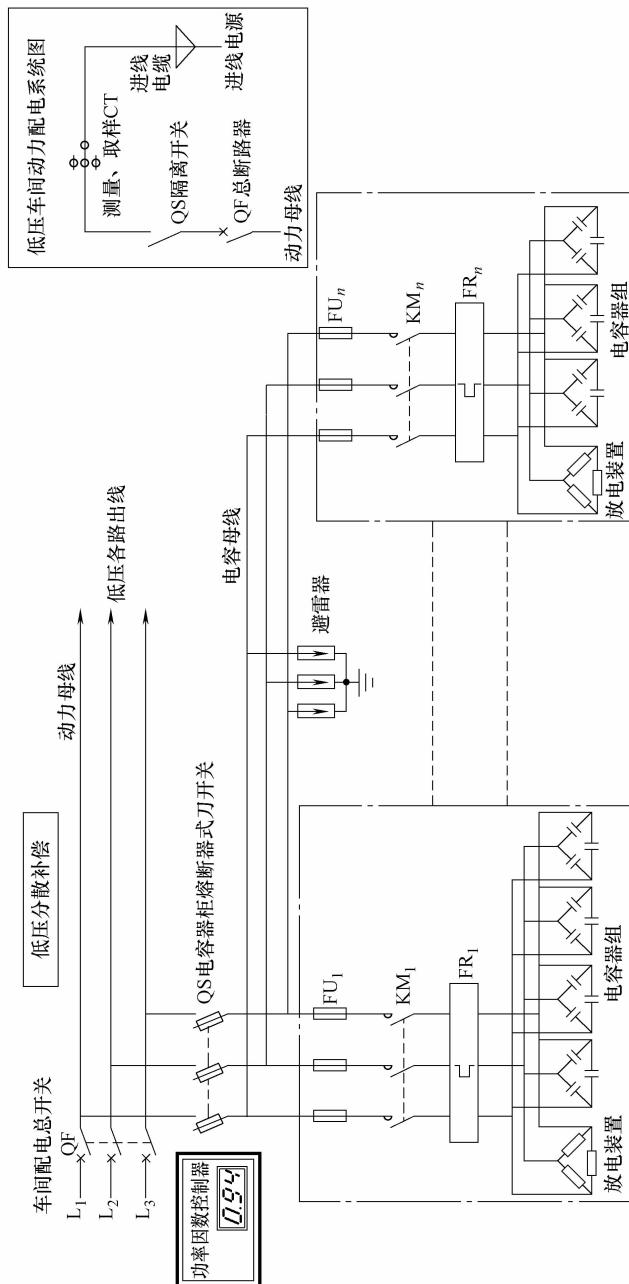
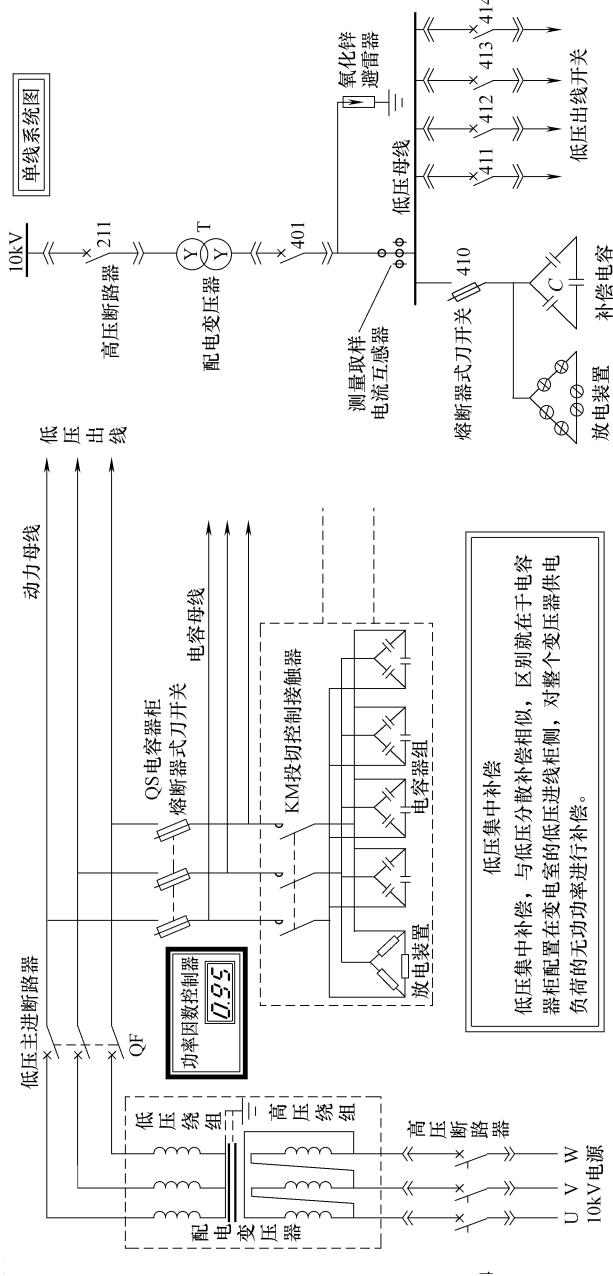


图 9-3 分散补偿



**低压集中补偿**  
低压集中补偿，与低压分散补偿相似，区别就在于电容器柜配置在变电室的低压进线柜侧，对整个变压器供电负荷的无功功率进行补偿。

图 9-4 低压集中补偿

用专用电容器，比较准确地计算出补偿容量，运行中与用电设备同步投入。补偿效果最好，但是电容器的利用率低，投资大。个别补偿如图 9-2 所示。

低压个别补偿中，将电动机与电容器并联，补偿电容量则按电动机的无功电流来确定，因此，这种方式的补偿效率最高。但经济效益相对比较低，接触器断电后电动机绕组可以直接作为放电装置。

### 2. 分散补偿

变、配电室通过线路将电源送至车间总配电柜或用户侧总配电点，并在此设置电容补偿柜，对所有已运行的感性设备根据  $\cos\phi$  的需要，动态进行补偿并自动调整。电容器的利用率相对高一些，补偿效益一般。分散补偿如图 9-3 所示。

### 3. 集中补偿

在变压器的主进柜旁，装设电容补偿开关柜，按照整个低压系统的感性负载  $\cos\phi$  的需要自动投入补偿电容。电容的利用率高，补偿效益较好，应用比较广泛。集中补偿如图 9-4 和图 9-5 所示。

高压集中补偿

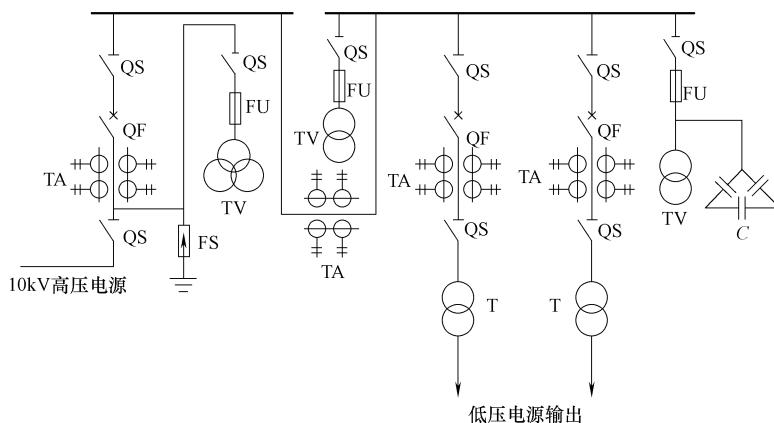


图 9-5 高压集中补偿

在高压侧集中补偿、低压侧则采用分散补偿。相对补偿效果最佳，但投资较大。在 3~6kV 的高压侧使用电容补偿时，一般是在具有高压

电动机的场合。大多都按个别补偿的方式。

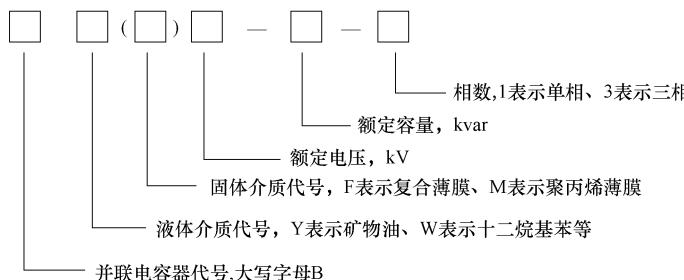
## 第二节 电力电容器的结构与主要参数

### 一、电力电容器的结构

任何平行导体之间若存在绝缘介质，在导体通电后就形成可以存储电荷的电容器，雷云之间、电力电缆之间等都存在这种特性。电力电容器的结构就是将导电的两层铝箔中间夹垫一层绝缘材料的电容器纸，然后卷成卷再浸入液体绝缘的矿物油之中，引出电极并进行干燥处理后封装。单相则直接引出电极，三相电容器内部多为三角形联结，并引出接电源。电容器的固体绝缘介质是电容器纸；液体绝缘介质是矿物油，导体多为铝箔。现在应用的干式电容器，其内部具有可自愈熔丝和放电电阻器。

### 二、电力电容器的型号

电力电容器的型号表示含义如下：



电容器的额定电压多为 0.4kV 和 10.5kV，也有 0.23kV、0.525kV、6.3kV 产品。

例如：BW-0.4-12-3——并联；十二烷基苯；0.4kV；12kvar；三相。

BWF-10.5-25-1W——并联；十二烷基苯；纸、薄膜复合介质；10.5kV；25kvar；单相。

### 三、电力电容器的技术参数

#### 1. 电容值

铭牌上的电容值单位是  $\mu\text{F}$ ，其为每台电容器实测电容值，与根据标称容量换算成的电容值误差不超过  $\pm 10\%$ 。

## 2. 频率

频率指并联电容器的额定工作频率。

## 3. 接法△

接法△指电容器接线为三角形联结。

## 第三节 电容器的安装运行与维护

### 一、电容器的放电装置

电容器的放电装置具有两个作用：一是防止电容器在带电荷情况下合闸，若电容器内部残存电荷的情况下，再次合闸可能会造成电容器在瞬间承受  $2\sqrt{2}$  倍电压的冲击。另一是避免检修人员发生剩余电荷的触电事故。因此要求电容器必须具有合格的放电装置。其标准为切断电容器电源后 30s，电容器的残存电压应保证在 65V 以下，每千乏放电电阻的功率不大于 1W。检修操作时，按规程要求，执行停电、验电（隔离电器的电源与负荷侧）、静置 3min 后再补充人工放电的安全措施，确无电压后才能进行检修操作。

电容器的放电装置多采用白炽灯六只两两串联后再接成三角形并联接入电容器电路，要求放电装置与电容器之间无开关和熔断器。现在应用的干式电容器，由于其内部设置的放电电阻，就无需再接放电灯，低压个别补偿时，补偿对象都为电动机，因此可以利用电机绕组直接作为放电装置，而在高压补偿中，通常将电容器与电压互感器相连，利用电压互感器兼作放电装置。

### 二、电容器的安装要求

环境温度  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度 80%；海拔 1000m 以下；无腐蚀性气体及尘埃场合；无易燃、易爆、及剧烈振动冲击场所；电容器室最好为单独的建筑物，耐火等级不低于 2 级；通风良好，加装百叶窗和铁丝网以防小动物入内；电容器室的门应能双向开启  $180^{\circ}$ 。

① 分层安装，不超过三层，电容母线距上层构架垂直距离不小于 20cm，下层电容器距地不小于 30cm。

② 电容器构架间距不小于 50cm，电容器间距不小于 5cm，电容器柜的通道不小于 1.5m，铭牌应面向通道。

③ 外壳与构架可靠接地，各连接点接触良好。

④ 电容器分组接线，每组不超过 4 台。

- ⑤ 具有合格的放电装置。
- ⑥ 具有温度监测环节（试温蜡片或温度计）。
- ⑦ 配置可靠的短路、过载保护装置。
- ⑧ 低压电容器 100kvar 以上安装带过电流脱扣的断路器。
- ⑨ 30kvar 及以上每相应装电流表，60kvar 及以上应安装电压表。
- ⑩ 总油量在 300kvar 以上的高压电容器应设专用电容室。
- ⑪ 高压电容器 100kvar 以下可以用跌落式熔断器保护。
- ⑫ 100 ~ 300kvar 可以用负荷开关保护控制。
- ⑬ 300kvar 以上时则用断路器保护控制。

### 三、电容器的运行规定

#### 1. 正常运行时的操作顺序

在正常情况下，配电系统全站停电时，应先拉开电容器柜的开关，然后再拉开出线负荷开关，最后拉开电源进线开关。

送电时应先合上电源进线开关，再合上出线负荷开关，最后合上电容柜的开关。此时功率因数控制器将自动控制电容器的投入/退出（通常功率因数控制器的投/切的设定值： $\cos\phi$  为 0.9 ~ 0.95，手动操作时则以  $\cos\phi$  低于 0.9 时投入运行中，若高于 0.95 时则退出）。

#### 2. 异常时的退出

运行中有下列之一情况时需将电容器退出：

- ① 电压超过额定值的 1.1 倍时。
- ② 电流超过额定值的 1.3 倍时。
- ③ 室温超过 40℃ 时。
- ④ 电容器壳温超过 60℃ 时。

#### 3. 紧急情况下的退出

- ① 电容器爆炸。
- ② 电容器喷油起火。
- ③ 瓷套管严重闪络放电。
- ④ 接点严重过热或已经熔化。
- ⑤ 电容器内部严重异常声响。
- ⑥ 电容器外壳变形。

# 第十章 安全用电、防雷、防火

## 第一节 电流对人体的危害与触电事故

### 一、电流对人体的伤害

随着社会生产的发展和科学技术的进步，电与人们的关系日益密切，但由于使用不当或违反了电器安全操作规程造成的电器事故对人们的危害也是相当严重的，除了电器火灾和爆炸危险，还有电流对人体的伤害。

#### 1. 电击

电击是电流对人体内部组织造成伤害。仅  $50\text{mA}$  的工频电流即可使人遭到致命电击，神经系统受到电流强烈刺激，引起呼吸中枢衰竭，严重时心室纤维性颤动，以至引起昏迷和死亡。

按照人体触及带电体的方式和电流通过人体的途径，电击触电可分为三种情况：

##### (1) 单相触电

单相触电是指在地面上或其他接地导体上，人体某一部位触及一相带电体的触电事故。对于高电压，人体虽然没有触及，但因超过了安全距离，高电压对人体产生电弧光放电，也属于单相触电。

单相触电的危险程度与电网运行方式有关，一般情况下，接地电网的单相触电比不接地电网的危险性大。

中性点接地：如图 10-1 所示，在电网中性点接地系统中，当人接触任一相导线时，一相电流通过人体、大地、系统中性点接电装置形成回路。因为中性点接地装置的接地电阻比人体电阻小得多，所以相电压几乎全部加在人体上，使人体触电。但是如果人体站在绝缘材料上，流经人体的电流会很小，人体不会触电。

中性点不接地：如图 10-2 所示，在电网中性点不接地系统中，当人体接触任一相导线时，接触相经人体流入地中的电流只能经另两相对地的电容阻抗构成闭合回路。在低压系统中，由于各相对地电容较小，

相对地的绝缘电阻较大，故通过人体的电流会很小，对人体不至于造成触电伤害；若各相对地的绝缘不良，则人体触电的危险性会很大。在高压系统中，各相对地均有较大的电容。这样一来，流经人体的电容电流较大，造成对人体的危害也较大。

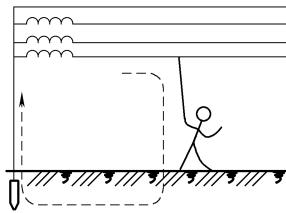


图 10-1 中性点接地人体触电回路

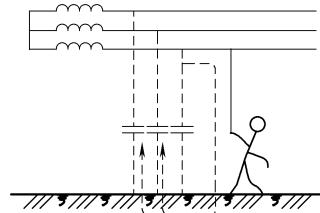


图 10-2 中性点不接地人体触电回路

### (2) 两相触电

两相触电如图 10-3 所示，是指人体两处同时触及两相带电体而发生的触电事故，无论电网的中性点接地与否，两相触电比单线触电危险性更大。

### (3) 跨步电压触电

当电网或电气设备发生接地故障时，流入地中的电流在土壤中形成电位，地表面也形成以接地点为圆心的径向电位差分布。如果人行走时前后两脚间（一般按 0.8m 计算）电位差达到危险电压而造成触电，称为跨步电压触电，如图 10-4 所示。

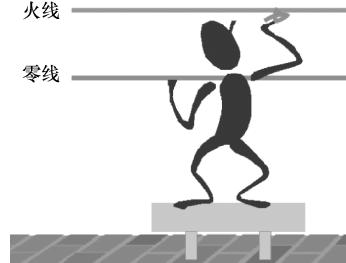


图 10-3 两相触电

漏电处地电位的人走到离接地点越近，跨步电压越高，危险性越大。一般在距接地点 20m 以外，可以认为地电位为零。

在高压故障接地处，或有大电流流过接地装置附近，都可能出现较高的跨步电压，因此要求在检查高压设备的接地故障时，室内不得接近接地点 4m 以内，室外不得接近故障点 8m 以内。若进入上述范围，工作人员必须穿绝缘靴。

## 2. 电伤

电伤是电流的热效应、化学效应、光效应或机械效应对人体造成的

伤害。电伤会在人体上留下明显伤痕，有灼伤、电烙印和皮肤金属化三种。

电弧灼伤是电弧光放电引起的。比如低压系统带负荷（特别是感性负荷）拉裸露刀开关，错误操作造成的线路短路、人体与高压带电部位距离过近而放电，都会造成强烈弧光放电。电弧灼伤也能使人致命。

电烙印通常是在人体与带电体紧密接触时，由电流的化学效应和机械效应而引起的伤害。

皮肤金属化是由于电流熔化和蒸发的金属微粒渗入表皮所造成的伤害。

## 二、对人体作用电流的划分

对于工频交流电，按照通过人体的电流大小而使人呈现不同的状态，可将电流划分为三级。

### 1. 感知电流

引起人的感觉的最小电流称感知电流。人接触这样的电流会有轻微麻感。实验表明，成年男性平均感知电流有效值约为  $1.1\text{mA}$ ，成年女性约为  $0.7\text{mA}$ 。

感知电流一般不会对人造成伤害，但是接触时间长，表皮被电解后电流增大时，感觉增强，反应变大，可能造成高空作业人员坠落等间接事故。

### 2. 摆脱电流

电流超过感知电流并不断增大时，触电者会因肌肉收缩，发生痉挛而紧握带电体，不能自行摆脱电源。人触电后能自行摆脱电源的最大电流称为摆脱电流。一般成年男性平均摆脱电流约为  $16\text{mA}$ ，成年女性约为  $10.5\text{mA}$ 。儿童的摆脱电流较成年人小。

摆脱电流是人体可以忍受而一般不会造成危险的电流。若通过人体的电流超过摆脱电流且时间过长，会造成昏迷、窒息，甚至死亡。因此，人摆脱电流能力随着触电时间的延长而降低。

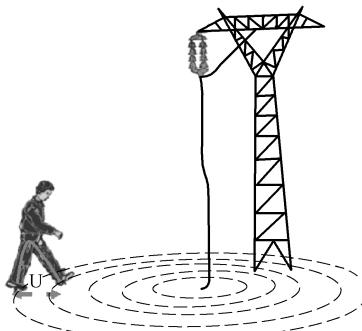


图 10-4 跨步电压触电

### 3. 致命电流

在较短时间内危及生命的电流，称为致命电流。电流达到 50mA 以上，就会引起心室颤动，有生命危险，100mA 以上的电流，则足以致死。而接触 30mA 以下的电流通常不会有生命危险。

不同电流对人体的影响见表 10-1。

表 10-1 不同电流对人体的影响

电流 /mA	通电时间	工频电流	直流电流
		人体反应	人体反应
0 ~ 0.5	连续通电	无感觉	无感觉
0.5 ~ 5	连续通电	有麻刺感、疼痛、无痉挛	无感觉
5 ~ 10	数分钟内	痉挛、剧痛，但可摆脱电源	有针刺感、有压迫及灼热感
10 ~ 30	数分钟	迅速麻痹、呼吸困难、血压升高，不能摆脱电源	压痛、刺痛、灼热强烈、有抽搐
30 ~ 50	数秒 ~ 数分	心跳不规则、昏迷、强烈痉挛、心脏开始颤动	感觉强烈、有剧痛、痉挛
50 至 数百	低于心脏 搏动周期	受强烈冲击，但没发生心室 颤动	剧痛、强烈痉挛、呼吸困难 或麻痹
	超过心脏 搏动周期	昏迷、心室颤动、呼吸麻痹、 心脏麻痹或停跳	

## 三、影响触电伤害程度的因素

影响触电的危险程度同很多因素有关，而这些因素是互相关联的，只是某种因素突出到相当程度，都会使触电者达到危险程度。

### 1. 电流的大小

一般通过人体的电流越大，人的生理反应越明显，越强烈，死亡危险性也越大。通过人体的电流取决于触电电压和人体电阻。人体电阻主要由表皮电阻和体内电阻构成，体内电阻一般较为稳定，约在  $500\Omega$ ，表皮电阻则与表皮湿度、粗糙程度、触电面积等有关。一般人体电阻在  $1 \sim 2k\Omega$  之间。

### 2. 持续时间

通电时间越长，电击伤害程度越严重。因为电流通过人体时间越长，触电面要发热出汗，而且电流对人体组织有电解作用，是人体电阻降低，导致电流很快增加；另外，人体的心脏每收缩扩张一次有 0.1s 的间歇，在这 0.1s 内，心脏对电流最敏感，若电流在这一瞬间通过心

脏，即使电流较小，也会引起心脏颤动，造成危险。

### 3. 电流的途径

电流通过头部会使人立即昏迷，甚至死亡；电流通过脊髓，会导致半截肢体瘫痪；电流通过中枢神经，会引起中枢神经强烈失调，造成呼吸窒息而导致死亡。所以电流通过心脏、呼吸系统和中枢神经系统时，危险性最大。从外部来看，左手至脚的触电最危险，脚对脚的触电对心脏影响最小。

### 4. 电流频率

常用的 50 ~ 60Hz 的工频交流电对人体伤害最严重。低于 20Hz 时，危险性相对减小；2000Hz 以上时死亡危险性降低，但容易引起皮肤灼伤。直流电危险性比交流电小得多。

### 5. 人体健康状况

触电伤害程度与人的身体状况有密切关系。除了人体电阻各有区别外，女性比男性对电流敏感性高；遭电击时小孩比成年人严重；身体患心脏病、结核病、精神病、内分泌器官疾病或醉酒的人，由于抵抗力差，触电后果更为严重。另外，对触电有心理准备的，触电伤害轻。

## 四、常见的触电方式

按照人体触及带电体的方式和电流流过人体的途径，电击可分为单相触电、两相触电和跨步电压触电。

### 1. 单相触电

当人体直接触及碰带点设备一相时，电流通过人体流入大地，这种触电现象称为单相触电。对于高压带电体，人体虽然未直接接触，但由于超过了安全距离，高电压对人体放电，造成单相接地而引起的触电，也属于单相触电。

### 2. 两相触电

人体同时接触带点设备或线路中的两相，或在高压系统中，人体同时接近不同相的两相带电导体，而发生电弧放电，电流从一相导体通过人体流入另一相导体，构成一个闭合回路，这种触电方式称为两相触电。

发生两相触电时，作用于人体的电压等于线电压这种触电是最危险的。

### 3. 跨步电压触电

当电气设备发生接地故障，接地电流通过接地体向大地流散，在地面上形成电位分布时，若人在接地短路点周围行走，其两脚之间电位差，就是跨步电压。由跨步电压引起的人体触电，称为跨步电压触电。

下列情况和部位可能发生跨步电压电击：

① 带电导体，特别是高压导体接地处，流散电流在地面各点产生的电位差造成跨步电压电击。

② 接地装置流过故障电流时，流散电流在附近地面各点产生的电位差造成跨步电压电击。

③ 正常时有较大的工作电流流过接地装置附近，流散电流在地面各点产生的电位差造成跨步电压电击。

④ 防雷装置接受雷击时，极大的流散电流在其接地装置附近地面各点产生的电位差造成跨步电压电击。

⑤ 高大设施或高大树木遭受雷击时，极大的流散电流在附近地面各点产生的电位差造成跨步电压电击。

跨步电压的大小受接地电流大小、鞋和地面特征、两脚之间的跨距、两脚的方位以及离接地点的远近等很多因素的影响。人的跨距一般按0.8m考虑。

## 五、触电事故的发生规律及一般原因

为防止触电事故，应该了解触电事故的规律。根据对触电事故的分析，从触电事故的发生率上看，可找到以下规律：

### 1. 触电事故季节性明显

统计资料表明，每年二三季度事故多，特别6~9月，事故最为集中。主要原因：一是这段时间天气炎热、人体衣单而多汗，触电危险性较大；二是这段时间多雨、潮湿、地面导电性增强，容易构成电击电流的回路，而且电气设备的绝缘电阻降低，容易漏电。其次，这段时间在大部分农村都是农忙季节，农村用电量增加，触电事故因而增加。

### 2. 低压设备触电事故多

国内外统计资料表明，低压触电事故远远多于高压触电事故。其主要原因是低压设备远远多于高压设备，与之接触的人比高压设备的人较多，而且都比较缺乏电气安全知识。应当指出，在专业电工中，情况是相反的，即高压触电事故比低压触电事故多。

### 3. 携带式设备和移动式设备触电事故多

携带式设备和移动式设备触电事故多的主要原因是这些设备是在人的紧握之下运行，不但接触电阻小，而且一旦触电就难以摆脱电源；另一方面，这些设备需要经常移动，工作条件差，设备和电源线都容易发生故障或损坏；此外，单相携带式设备的保护零线与工作零线容易接错，也会造成触电事故。

### 4. 电气连接部位触电事故多

大量触电事故的统计资料表明，很多触电事故发生在接线端子、缠接接头、压接接头、焊接接头、电缆头、灯座、插销、插座、控制开关、接触器、熔断器等分支线、接户线处。主要是由于这些连接部位机械牢固定性较差、接触电阻较大、绝缘强度较低以及可能发生化学反应的缘故。

### 5. 错误操作和违章作业造成的触电事故多

大量触电事故的统计表明，有 85% 以上的事故是由于错误操作和违章作业造成的。其主要原因是由于安全教育不够、安全制度不严和安全措施不完善、操作者素质不高等。

触电事故的规律不是一成不变的。在一定条件下，触电事故的规律也会发生一定的变化。例如，低压触电事故多于高压触电事故在一般情况下是成立的，但对于专业电气工作人员来说，情况往往相反的。因此，应当在实践中不断分析和总结触电事故的规律，为做好电气安全工作积累经验。

## 六、触电急救

触电急救必须做到：使触电者迅速脱离电源；分秒必争就地抢救；用正确的方法进行施救。

触电急救是生产经营单位所有从业人员必须掌握的一项基本技能，是电工从业的必备条件之一。

第一步：使触电者迅速地脱离电源。

第二步：正确实施现场救护。触电急救必须分秒必争，据统计资料，触电者在 3min 内就地实施有效急救，救活率 90% 以上。6min 后才实施急救措施，救活率仅为 10%。12min 后抢救，救活率几乎为 0。

所以，对救护者的要求是：救护要及时，救护方法要正确。

脱离电源的方法

(1) 脱离低压电源的方法

就近拉闸断电；切断电源线；挑开导线；拽触电者的衣服使其脱离电源；在触电者身体的下方垫上绝缘物质。

#### (2) 脱离高压电源的方法

① 立即电话通知供电部门拉闸停电。

② 可以拉开断路器停电，或用绝缘棒拉开跌落式熔断器切断电源（非专业电工不可进行）。

③ 在非常情况下可以采用短路法使高压线路短路（非专业电工不可进行）。

#### (3) 电伤的处理

① 一般性的外伤：有条件者可以用生理盐水清洗伤口后，用消毒的纱布或干净的布包扎，然后送医院治疗。

② 伤口大出血：伤口大出血时应立即设法止血，同时火速送医院治疗。

③ 摔伤骨折：应先止血、包扎，然后用木板固定肢体后送医院处理。

#### (4) “假死”表现形式与诊断方法

由于呼吸、心跳等生命指征十分衰微，从表面看几乎完全和死人一样，如果不仔细检查，很容易误认为已经死亡，甚至将“尸体”处理或埋葬，只是其呼吸、心跳、脉搏、血压十分微弱，用一般方法查不出，这种状态称作假死。简单地说，就是无呼吸、无心跳、无致命外伤的情况视为假死。

##### ① “假死”的表现形式：

a) 心跳停止，但呼吸尚存在。

b) 呼吸停止，但心跳尚存在。

c) 呼吸心跳都停止。

② 简单诊断：听、看、试，如图 10-5 所示。

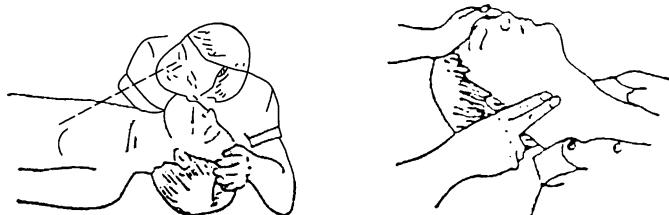


图 10-5 假死的简单诊断

③ 处理方法：

- a) 病人神志清醒，但乏力、头昏、心悸、出冷汗，有恶心或呕吐。此类病人应就地安静休息，以减轻心脏负担，加快恢复。
- b) 病人呼吸、心跳尚在，但神志昏迷，此时应严密地观察，还要做好人工呼吸和心脏按压的准备工作。
- c) 如经检查后，病人处于“假死”状态，则应立即针对不同类型的“假死”进行对症处理。

(5) 口对口人工呼吸

在做人工呼吸之前，首先要检查触电者口腔内有无异物，呼吸道是否堵塞，特别要注意清理喉头部分有无痰堵塞。其次，要解开触电者身上妨碍呼吸的衣裤，且维持好现场秩序。主要方法：口对口（鼻）人工呼吸法不仅方法简单易学且效果最好，较为容易掌握。

将触电者仰卧，并使其头部充分后仰，一般应用一手托在其颈后，使其鼻孔朝上，以利于呼吸道畅通，但头下不得垫枕头，同时将其衣扣解开，如图 10-6 所示。

救护人在触电者头部的侧面，用一只手捏紧其鼻孔，另一只手的拇指和食指掰开其嘴巴，准备向鼻孔吸气，即口对鼻，如图 10-7 所示。



图 10-6 将触电者仰卧  
使其头部充分后仰



图 10-7 准备向触电  
者口中吸气

救护人深吸一口气，紧贴掰开的嘴巴向内吹气，也可隔一层纱布。吹气时要用力并使其胸部膨胀，一般应每 5s 吹一次，吹 2s，放松 3s。对儿童可小口吹气。向鼻吹气与向口吹气相同，如图 10-8 所示。

吹气后应立即离开其口或鼻，并松开触电者的鼻孔或嘴巴，让其自动呼气，约 3min，如图 10-9 所示。

在实行口对口（鼻）人工呼吸时，当发现触电者胃部充气膨胀，应用手按住其腹部，并同时进行吹气和换气。

(6) 胸外心脏按压法



图 10-8 救护人紧贴瓣开的  
嘴巴向内吹气



图 10-9 松开鼻孔或嘴巴  
让其自动呼气

### 1) 胸外心脏按压法的口诀

手根下压不冲击，突然放手手不离。手腕略弯压一寸，一秒一次较适宜。

用人工方法，将触电者两手压在胸部，帮助其血液循环。当将触电者两手向左右扩胸时，达到助其有一定呼吸效果。

### 2) 操作方法

a) 使触电者仰卧，头部后仰。

b) 操作者在触电者头部，一只脚作跪姿，另一只脚作半蹲。两手将触电者的两手向后拉直，压胸时，将触电者的手向前顺推。至胸部位置时，将两手向胸部靠拢。用触电者两手压胸位置，在同一时间内要完成以下几个动作；半蹲的前脚向前倒，跪着的一只脚向后蹬（成前弓后箭状），然后用身体重量自然向胸部压下。压胸动作完成后，将触电者的两手向左右扩张，完成后，将两手往后顺拉直，恢复原来位置，如图 10-10 所示。



图 10-10 胸外心脏按压法

c) 压胸时不要有冲击力，两手关节不要弯曲，压胸深浅要看对象，对小孩不要用力过猛。对成年人每分钟完成 14~16 次。

### (7) 触电急救应注意事项

发现了人身触电事故，发现者一定不要惊慌失措，要动作迅速，救护得当。首先要迅速将触电者脱离电源，其次，立即就地进行现场救护，同时找医生救护。

① 脱离电源电流对人体的作用时间越长，对生命的威胁越大。所以，触电急救是首先要使触电者迅速脱离电源。救护人员既要救人也要注意保护自己。

② 在使触电人脱离开电源时应注意的事项：防止自身及他人触电并防止伤者二次伤害。

③ 对症抢救：

a) 将触电者脱离电源后，立即移到通风处，并将其仰卧，迅速鉴定触电者是否有心跳、呼吸。

b) 抢救过程要不停地进行。在送往医院的途中也不能停止抢救。当抢救者出现面色好转、嘴唇逐渐红润、瞳孔缩小、心跳和呼吸迅速恢复正常，即为抢救有效的特征。

c) 告诫医生慎用强心针。

④ 夜间救护应解决临时照明。

## 第二节 电力系统接地

保护接地、保护接零、加强绝缘、电气隔离、等电位联结，以及特低电压和剩余电流动作保护都是防止间接接触电击的技术措施。其中，保护接地和保护接零是防止间接接触电击最基本的技术措施。这两种技术措施还与低压系统的防火性能有关。

### 一、接地保护

#### 1. 接地保护

接地保护又称保护接地，就是将电气设备的金属外壳与接地体连接，以防止因电气设备绝缘损坏使外壳带电时，操作人员接触设备外壳而触电，如图 10-11 所示。

由于绝缘破坏或其他原因而可能呈现危险电压的金属部分，都应采取保护接地

措施。如电动机、开关设备、照明器具及其他电气设备的金属外壳都应予以接地。一般低压系统中，保护接电电阻值应小于  $4\Omega$ 。

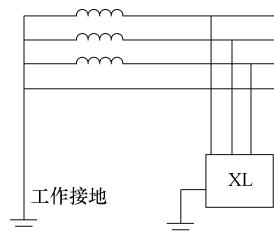


图 10-11 保护接地

## 2. 采用接地保护的情况

在中性点不接地的低压系统中，在正常情况下各种电力装置的不带电的金属外露部分，除有规定外都应接地。如：

- ① 电动机、变压器、电器、携带式及移动式用电器具的外壳。
- ② 电力设备的传动装置。
- ③ 配电屏与控制屏的框架。
- ④ 电缆外皮及电力电缆接线盒、终端盒的外壳。
- ⑤ 电力线路的金属保护管、敷设的钢索及起重机轨道。
- ⑥ 装有避雷器电力线路的杆塔。
- ⑦ 安装在电力线路杆塔上的开关、电容器等电力装置的外壳及支架。

## 3. 接地电阻的要求

低压电力网的电力装置对接地电阻的要求如下：

- ① 低压电力网中，电力装置对地的接地电阻不宜超过  $4\Omega$ 。
- ② 由单台容量在  $100\text{kVA}$  的变压器供电的低压电力网中，电力装置接地电阻不宜大于  $10\Omega$ 。
- ③ 使用同一接地装置并联运行的变压器，总容量不超过  $100\text{kVA}$  的低压电力网中，电力装置的接地电阻不宜超过  $10\Omega$ 。
- ④ 土壤电阻率高地区，达到以上接地电阻值有困难时，低压电力设备接地电阻允许提高到  $30\Omega$ 。

## 4. 中性点直接接地与中性点非直接接地

中性点直接接地（TT 方式供电系统）：将发电机或变压器的中性点直接与接地装置连接，或中性点经小阻抗与接地装置连接。

中性点非直接接地（IT 方式供电系统）：中性点不接地，或中性点经消弧线圈、电压互感器、高电阻接地的总称。

## 5. TT 方式供电系统应用范围

TT 方式是指将电气设备的金属外壳直接接地的保护系统，称为保护接地系统，也称 TT 系统。第一个符号 T 表示电力系统中性点直接接地；第二个符号 T 表示负载设备外露不与带电体相接的金属导电部分与大地直接连接，而与系统如何接地无关。在 TT 系统中负载的所有接地均为保护接地，如图 10-12 所示。这种供电系统的特点如下。

- ① 当电气设备的金属外壳带电（相线碰壳或设备绝缘损坏而漏电）

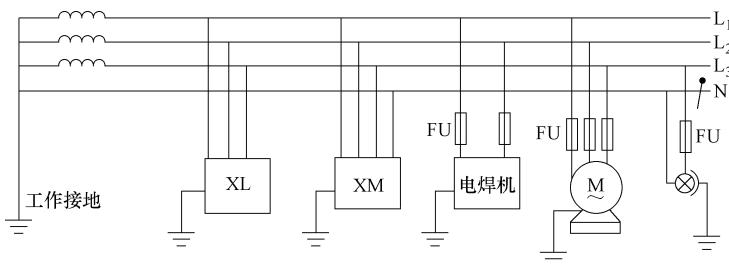


图 10-12 在 TT 系统中负载的保护接地

时，由于有接地保护，可以大大减少触电的危险性。但是，低压断路器不一定能跳闸，造成漏电设备的外壳对地电压高于安全电压，属于危险电压。

② 当漏电电流比较小时，即使有熔断器也不一定能熔断，所以还需要漏电保护器作保护，因此 TT 系统难以推广。

③ TT 系统接地装置耗用钢材多，而且难以回收、费工时、费料。

现在有的建筑单位是采用 TT 系统，施工单位借用其电源作临时用电时，应用一条专用保护线，以减少需接地装置钢材用量，如图 10-13 所示。

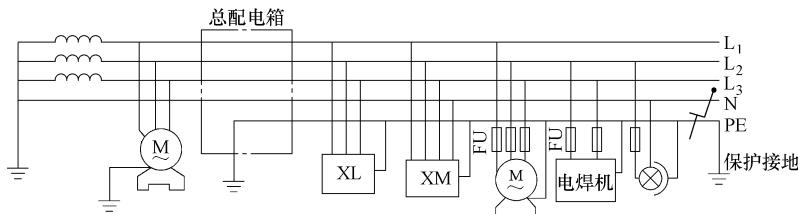


图 10-13 TT 系统

施工单位借用其电源作临时用电时应用一条专用保护线。

图中点画线框内是施工用电总配电箱，把新增加的专用保护线（PE）和工作零线（N）分开，其特点是：共用接地线与工作零线没有电的联系；正常运行时，工作零线可以有电流，而专用保护线没有电流；TT 系统适用于接地保护很分散的地方。

#### 6. IT 方式供电系统应用范围

I 表示电源侧没有工作接地，或经过高阻抗接地。第二个字母 T 表示负载侧电气设备进行接地保护，如图 10-14 所示。

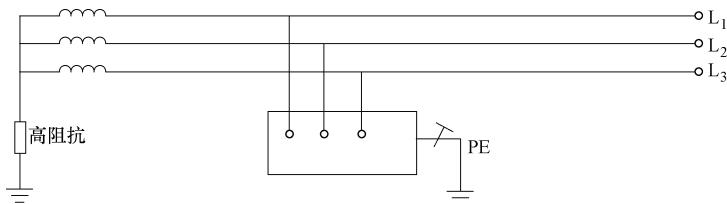


图 10-14 电源侧经过高阻抗接地

IT 方式供电系统在供电距离不是很长时，供电的可靠性高、安全性好。一般用于不允许停电的场所，或者是要求严格地连续供电的地方，例如电力炼钢、大医院的手术室、地下矿井等处。地下矿井内供电条件比较差，电缆易受潮。运用 IT 方式供电系统，即使电源中性点不接地，一旦设备漏电，单相对地漏电流仍小，不会破坏电源电压的平衡，所以比电源中性点接地的系统还安全。

但是，如果用在供电距离很长时，供电线路对大地的分布电容就不能忽视了。由图 10-15 可见，在负载发生短路故障或漏电使设备外壳带电时，漏电电流经大地形成回路，保护设备不一定动作，这是危险的。只有在供电距离不太长时才比较安全。这种供电方式在工地上很少见。

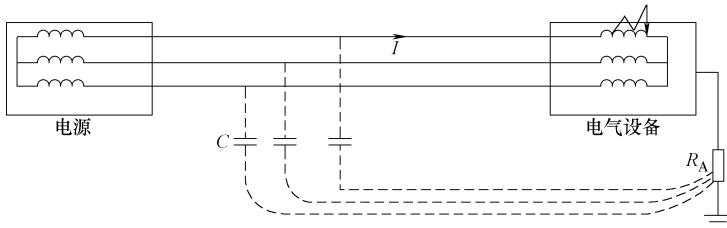


图 10-15 供电线路对大地的分布电容

### 7. 在国际电工委员会 (IEC) 规定中 TN、TT 和 IT 的含义

我国配电系统的接地方式已使用 IEC 规定，其分类仍然是以配电系统和电气设备的接地组合来分，一般分为 TN、TT、IT 系统等。上述字母表示的含义：第一个字母表示电源接地点对地的关系。其中 T 表示直接接地；I 表示不接地或通过阻抗接地。第二个字母表示电气设备的外露可导电部分与地关系。其中 T 表示与电源接地点无连接的单独直接接地；N 表示直接与电源系统接地点或与该点引出的导体连接。

根据中性线与保护线是否合并的情况，TN 系统又分为 TN-C、TN-

S 及 TN-C-S 系统。

TN-C 系统：保护线与中性线合并为 PEN 线。

TN-S 系统：保护线与中性线分开。

TN-C-S 系统：在靠近电源侧一段的保护线和中性线合并为 PEN 线，从某点以后分为保护线和中性线。

## 二、接零保护

### 1. 接零保护 (TN 方式供电系统)

接零保护是为了防止电气设备因绝缘损坏而使人身遭受触电危险，将电气设备的金属外壳与供电变压器的中性点相连接者称为接零保护，如图 10-16 所示。

### 2. 接零应满足以下要求

① 在同一系统中，不应把一部分电气设备接地，而把另一部分电气设备接零。

② 在三相四线制的零干线上，不允许装设开关和熔断器（如果在单相二线的零线上规定要装熔断器，则熔断器后面的零线已不能供保护接零使用，如果要保护接零，必须从零干线上另接一根零支线到设备的外壳上，对于单相三眼插孔，应注意接地孔必须用单独导线接到有重复接地的零干线上，设备的地线插头插地线孔，零线插头插零线孔，相线插头插相线孔，零线孔和地线孔不得用导线直接相连，否则是错误的）。

③ 避免出现零线断线故障，三相变压器迁移时，切勿忘记输出零线的搭接，否则会造成三相电压不稳定，照明电不能用或不好用，甚至烧毁照明灯具。应该设足够的重复接地装置，重复接地的接地电阻，应不大于  $10\Omega$ 。

④ 所有电气设备的接零线，应以并联方式连接在接零干线或支线上。

⑤ 零线的截面积应不小于相线截面积。

### 3. TN 方式供电系统的特点

这种供电系统是将电气设备的金属外壳与工作零线相接的保护系统，称作接零保护系统，用 TN 表示。它的特点如下：

① 一旦设备出现外壳带电，接零保护系统能将漏电电流上升为短路电流，这个电流很大，实际上就是单相对地短路故障，熔断器的熔丝

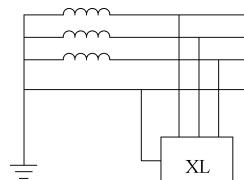


图 10-16 接零保护

会熔断，低压断路器的脱扣器会立即动作而跳闸，使故障设备断电，比较安全。

② TN 系统节省材料、工时，在我国和其他许多国家广泛得到应用，可见比 TT 系统优点多。TN 方式供电系统中，根据其保护零线是否与工作零线分开而划分为 TN-C 和 TN-S 等两种。

#### 4. TN-C 方式供电系统

它是用工作零线兼作接零保护线，可以称作保护中性线，可用 PEN 表示，如图 10-17 所示。这种供电系统的特点如下：

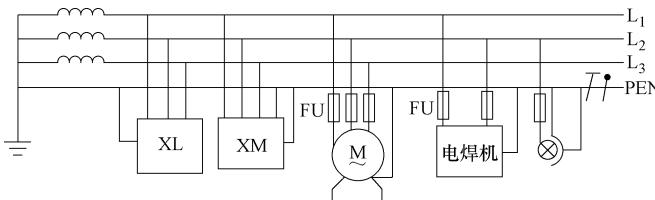


图 10-17 TN-C 方式供电系统

① 由于三相负载不平衡，工作零线上有不平衡电流，对地有电压，所以与保护线所连接的电气设备金属外壳有一定的电压。

② 如果工作零线断线，则保护接零的漏电设备外壳带电。

③ 如果电源的相线碰地，则设备的外壳电位升高，使中性线上的危险电位蔓延。

④ TN-C 系统干线上使用漏电保护器时，工作零线后面的所有重复接地必须拆除，否则漏电开关合不上，而且工作零线在任何情况下都不得断线。所以，实用中工作零线只能让漏电保护器的上侧有重复接地。

⑤ TN-C 方式供电系统只适用于三相负载基本平衡情况。

#### 5. TN-S 方式供电系统

它是把工作零线（N）和专用保护线（PE）严格分开的供电系统，称作 TN-S 供电系统，如图 10-18 所示，TN-S 供电系统的特点如下：

① 系统正常运行时，专用保护线上不有电流，只是工作零线上有不平衡电流。专用保护线（PE）对地没有电压，所以电气设备金属外壳接零保护是接在专用保护线（PE）上，安全可靠。

② 工作零线只用作单相照明负载回路。

③ 专用保护线（PE）不许断线，也不许进入漏电开关。

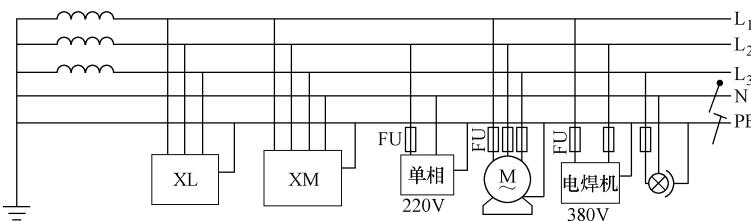


图 10-18 TN-S 方式供电系统

④ 干线上使用漏电保护器，工作零线不得有重复接地，而专用保护线（PE）有重复接地，但是不经过漏电保护器，所以 TN-S 系统供电干线上也可以安装漏电保护器。

⑤ TN-S 方式供电系统安全可靠，适用于工业与民用建筑等低压供电系统。在建筑工程开工前的“三通一平”（电通、水通、路通和地平）中必须采用 TN-S 方式供电系统。

#### 6. TN-C-S 方式供电系统

在建筑施工临时供电中，如果前部分是 TN-C 方式供电，而施工规范规定施工现场必须采用 TN-S 方式供电系统，则可以在系统后部分现场总配电箱分出专用保护线（PE），如图 10-19 和图 10-20 所示，这种系统称为 TN-C-S 供电系统。TN-C-S 系统的特点如下：

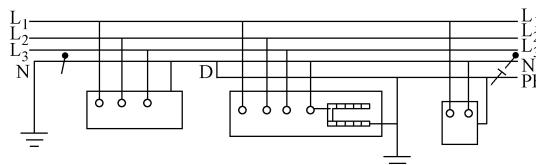


图 10-19 TN-C-S 方式供电系统

① 工作零线（N）与专用保护线（PE）相联通，如图 10-19 中 ND 这段线路不平衡电流比较大时，电气设备的接零保护受到零线电位的影响。D 点至后面专用保护线（PE）上没有电流，即该段导线上没有电压降，因此，TN-C-S 系统可以降低电动机外壳对地的电压，然而又不能完全消除这个电压，这个电压的大小取决于 ND 线的负载不

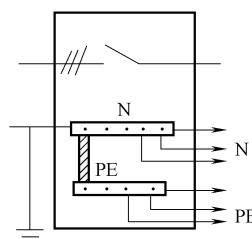


图 10-20 工地总配电箱分出专用保护线（PE）

平衡的情况及 ND 这段线路的长度。负载越不平衡，ND 线又很长时，设备外壳对地电压偏移就越大。所以要求负载不平衡电流不能太大，而且在专用保护线（PE）上应作重复接地。

② 专用保护线（PE）在任何情况下都不能进入漏电保护器，因为线路末端的漏电保护器动作会使前级漏电保护器跳闸造成大范围停电。

③ 对专用保护线（PE）除了在总箱处必须和零线（N）相接以外，其他各分箱处均不得把零线（N）和专用保护线（PE）相连，专用保护线（PE）上不许安装开关和熔断器，也不得用大地兼作专用保护线（PE）。

通过上述分析，TN-C-S 供电系统是在 TN-C 系统上临时变通的做法。当三相电力变压器工作接地情况良好、三相负载比较平衡时，TN-C-S 系统在施工用电实践中效果还是可行的。但是，在三相负载不平衡、建筑施工工地有专用的电力变压器时，必须采用 TN-S 方式供电系统。

## 7. 等电位接地及常用术语

在每个厂矿、企业、民用建筑物中，电气设备、各种用电机械繁多、形形色色的管道错综复杂，如果某个电气设备可导电部分或装置外可导电部分发生带电，某些设备对地呈现高电压，某些设备呈现低电压，人体若触及，就有触电的危险。为了防止发生接触电压触电，在一个允许范围内，将所有外露可导电部分、装置外可导电部分、各种管道用导电体连接在一起，形成一个等电位空间，实际上就是保护线的再一次延伸和细化，这就是等电位连接。等电位连接分为总等电位连接和辅助等电位连接。

总等电位连接一般设总等电位连接箱，在箱内设一总接地端子排，该端子排与总配电柜的 PE 母线作电气连接，再由此端子引出足够的等电位连接线至各辅助等电位连接箱及其他需要作等电位连接的各种管线，等电位连接一般使用 40mm×4mm 的镀锌扁钢。

辅助等电位连接一般设辅助等电位连接箱，在该箱内再设一辅助接地端子排，该端子排与总等电位连接箱连接，再由此引出足够的辅助等电位连接线至各用电设备外露导电部分、装置外可导电部分及其他需要等电位连接的设备，如各种管线（暖气片、洗手盆、浴盆、坐便器，如图 10-21 所示）的金属部分、插座保护导体以及相关的金属部件。等

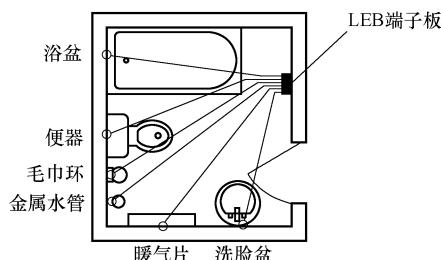


图 10-21 卫生间局部等电位联结示意图

电位连接的系统图如图 10-22 所示。

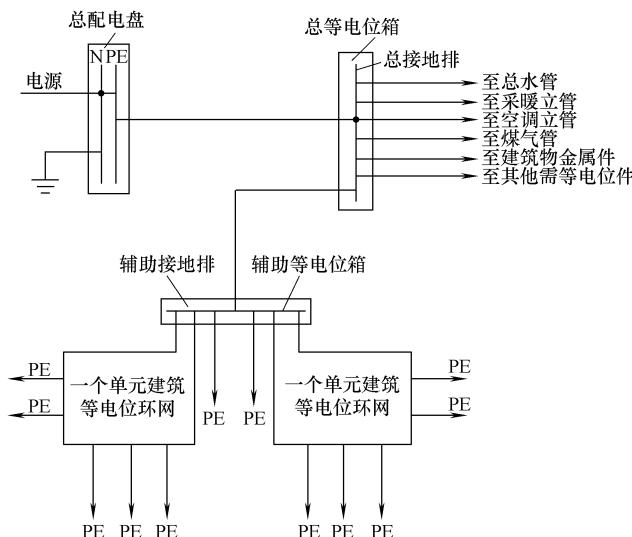


图 10-22 等电位联结的系统图

需要指出的是，各种易燃、易爆管道不能作为电气上的自然接地体，一定要作等电位连接。

① 等电位接地（等电位联结）：使每个外露可导电部分及装置外导电部分的电位实质上相等的连接。

② 总等电位联结：在建筑物电源进线处，将专用保护线（PE）、接地干线、总水管、煤气管、暖气管、空调立管以及建筑物基础、金属构件等作相互电气连接，如图 10-23 所示。

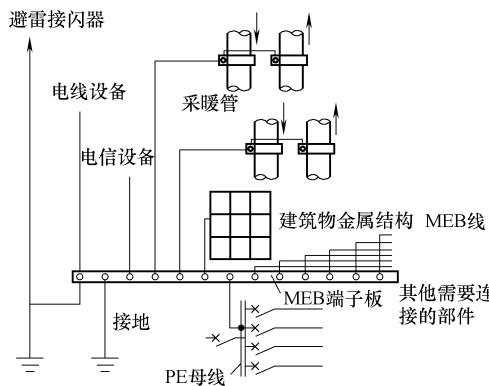


图 10-23 总等电位联结示意图

- ③ 辅助等电位连接：在某一局部范围内的等电位连接。
- ④ 等电位连接线：作为等电位连接的保护导体。
- ⑤ 总接地端子、总接地母线：将保护导体接至接地设施的端子或母线。保护导体包括总等电位连接线。

#### 8. 等电位连接要求

- ① 在总电位连接不能满足间接保护（故障情况下的电击保护）要求时，应采取辅助电位连接。
- ② 处于等电位连接作用区以外的 TN、TT 系统的配电线路系统，应采取漏电保护。
- ③ 建筑物内的总等电位连接必须与下列导电部分相互连接：
  - a) 保护导体干线。
  - b) 接地干线和总接地端子。
  - c) 建筑物内的输送管道及类似金属件。
  - d) 集中采暖及空气调节系统的升压管。
  - e) 建筑物内金属构件等导电体。
  - f) 钢筋混凝土基础、楼板及平房的地板。
- ④ 辅助等电位连接必须包括固定设备的所有能同时触及的外露可导电部分和装置外导电部分。等电位系统，必须与所有设备的保护导体（包括插座的保护导体）连接。
- ⑤ 等电位连接线的截面积应满足下列要求：
  - a) 总等电位连接主母线的截面积不小于装置最大保护导体截面积

的  $1/2$ ，但不小于  $6\text{mm}^2$ ；若采用铜线，其截面积不超过  $25\text{mm}^2$ ；若为其他金属，其截面积应能承受与之相等的截流量。

b) 连接两个外露可导电部分的辅助等电位线，其截面积不小于接至该两个外露可导电部分较小保护导体的截面积。

c) 连接外露可导电部分与装置外可导电部分的辅助等电位连接线，不应小于相应保护导体截面积的一半。

⑥ 在某一个局部单元建筑内，等电位连接线应做成闭合环形。

### 三、重复接地

#### 1. 重复接地

重复接地是将接地保护线（PE）的一处或多处与大地进行再一次的接地连接，重复接地的电阻值总箱处不大于  $4\Omega$ ，总箱以下各处不大于  $10\Omega$ 。

#### 2. 应进行重复接地的处所

应进行重复接地的处所有：

- ① 低压架空线的终端。
- ② 分支线长度超过  $200\text{m}$  的分支处或终端。
- ③ 线路每  $1\text{km}$  处。
- ④ 电缆和架空线路引入屋内的进线附近。

⑤ 在较大的车间内部，零线应增加重复接地点，并将零线与所有的低压开关板和控制屏台的接地装置连接。

#### 3. 重复接地的作用

① 当零线断开且相线碰壳时，重复接地可降低人体接触外壳的触电电压（简称接触电压  $U$ ），从而减小触电的危险性。

② 三相四线保护接零系统中，当三相负荷显著不平衡时，一旦无重复接地的零线断线，由于零点飘移即使没有漏电的设备，接零设备上也会出现危险的对地电压，设置重复接地，可减轻或消除这种危险性。

③ 当零线与相线接错时，借助于重复接地便形成一相对地短路，使熔断器熔丝熔断或开关动作，切断电源。若短路电流不足以使熔断器或开关动作，此时重复接地还具有降低人体接触电压的作用。

### 四、人工接地体的埋设要求和接地线的要求

#### 1. 人工接地体的埋设要求

人工接地体不应埋设在垃圾、炉渣和强烈腐蚀性土壤处。埋设要求

如下：

- ① 接地体的埋设深度不应小于 0.6m。
- ② 垂直接地体的长度不应小于 2.5m。
- ③ 垂直接地体的间距一般不小于 5m。
- ④ 埋入后的接地体周围要用新土夯实。

为降低接触电阻和跨步电压，水平接地体的局部埋深不应小于 1m。

## 2. 接地线的要求

接地线的最小截面积见表 10-2。

表 10-2 接地线的最小截面积

材料	类 别	最小截面积/mm <sup>2</sup>
铜	裸导体	4
	绝缘导体	1.5
铝	裸导体	6
	绝缘导体	2.5
扁钢	户内；厚度不小于 3mm	24
	户外；厚度不小于 4mm	48
圆钢	户内；直径不小于 5mm	19.6
	户外；直径不小于 6mm	28.3
铜	电缆接地线以及与相线包在同一保护壳内的多芯导线的接地线	1.0
铝		1.5

## 五、接地装置的选择

### 1. 交流电气设备的接地可以利用的自然接地体

- ① 埋设在地下的金属管道，但不包括有可燃或有爆炸物质的管道。
- ② 金属井管。
- ③ 与大地有可靠连接的建筑物的金属结构。
- ④ 水工构筑物及其类似的构筑物的金属管、桩。

### 2. 交流电气设备的接地线可利用的接地体

- ① 建筑物的金属结构（梁、柱等）及设计规定的混凝土结构内部的钢筋。
- ② 生产用的起重机的轨道、配电装置的外壳、走廊、平台、电梯竖井、起重机与升降机的构架、运输皮带的钢梁、电除尘器的构架等金属结构。

③ 配线的钢管。

### 3. 明敷接地线

① 明敷接地线的安装应符合下列要求：

a) 应便于检查。

b) 敷设位置不应妨碍设备的拆卸与检修。

c) 支持件间的距离，在水平直线部分宜为 0.5~1.5m；垂直部分宜为 1.5~3m；转弯部分宜为 0.3~0.5m。

d) 接地线应按水平或垂直敷设，亦可与建筑物倾斜结构平行敷设；在直线段上，不应有高低起伏及弯曲等情况。

e) 接地线沿建筑物墙壁水平敷设时，离地面距离宜为 250~300mm；接地线与建筑物墙壁间的间隙宜为 10~15mm。

f) 在接地线跨越建筑物伸缩缝、沉降缝处时，应设置补偿器。补偿器可用接地线本身弯成弧状代替。

② 明敷接地线的表面应涂以用 15~100mm 宽度相等的绿色和黄色相间的条纹。在每个导体的全部长度上或只在每个区间或每个可接触到的部位上宜作出标志。当使用胶带时，应使用双色胶带。中性线宜涂淡蓝色标志。

③ 在接地线引向建筑物的入口处和在检修用临时接地点处，均应刷白色底漆并标以黑色记号，其代号为 “ $\perp$ ”（接地）。

④ 进行检修时，在断路器室、配电间、母线分段处、发电机引出线等需临时接地的地方，应引入接地干线，并应设有专供连接临时接地线使用的接线板和螺栓。

⑤ 当电缆穿过零序电流互感器时，电缆头的接地线应通过零序电流互感器后接地；由电缆头至穿过零序电流互感器的一段电缆金属护层和接地线应对地绝缘。

⑥ 直接接地或经消弧线圈接地的变压器、旋转电动机的中性点与接地体或接地干线的连接，应采用单独的接地线。

⑦ 变电所、配电所的避雷器应用最短的接地线与主接地网连接。

⑧ 全封闭组合电器的外壳应按制造厂规定接地；法兰片间应采用跨接线连接，并应保证良好的电气通路。

⑨ 高压配电间隔和静止补偿装置的栅栏门铰链处应用软铜线连接，以保持良好接地。

⑩ 高频感应电热装置的屏蔽网、滤波器、电源装置的金属屏蔽外壳，高频回路中外露导体和电气设备的所有屏蔽部分以及与其连接的金属管道均应接地，并宜与接地干线连接。

⑪ 接地装置由多个分接地装置部分组成时，应按设计要求设置便于分开的断接卡。自然接地体与人工接地体连接处应有便于分断的断接卡。断接卡应有保护措施。

#### 4. 接地体（线）的连接

① 接地体（线）的连接应采用焊接，焊接必须牢固无虚焊。接至电气设备上的接地线，应用镀锌螺栓连接；有色金属接地线不能采用焊接时，可用螺栓连接。螺栓连接处的接触面应按现行国家标准 GB 50149—2010《电气装置安装工程 母线装置施工及验收规范》的规定处理。

② 接地体（线）的焊接应采用搭接焊，其搭接长度必须符合下列规定：

- a) 钢为其宽度的2倍（且至少3个棱边焊接）。
- b) 圆钢为其直径的6倍。
- c) 圆钢与扁钢连接时，其长度为圆钢直径的6倍。
- d) 扁钢与钢管、扁钢与角钢焊接时，为了连接可靠，除应在其接触部位两侧进行焊接外，还应焊以由钢带弯成的弧形（或直角形）卡子或直接由钢带本身弯成弧形（或直角形）与钢管（或角钢）焊接。

③ 利用各种金属构件、金属管道等作为接地线时，应保证其全长为完好的电气通路。利用串联的金属构件、金属管道作接地线时，应在串接部位焊接金属跨接线。

#### 5. 避雷针（线、带、网）的接地

① 避雷针（线、带、网）的接地除应符合本章上述有关规定外，尚应遵守下列规定：

- a) 避雷针（带）与引下线之间的连接应采用焊接。
- b) 避雷针（带）的引下线及接地装置使用的紧固件均应使用镀锌制品。当采用没有镀锌的地脚螺栓时，应采取防腐措施。
- c) 建筑物的防雷设施采用多根引下线时，宜在各引下线距地面的1.5~1.8m处设置断接卡，断接卡应加保护措施。
- d) 装有避雷针的金属筒体，当其厚度不小于4mm时，可作避雷针。

的引下线。筒体底部应有两处与接地体对称连接。

e) 独立避雷针及其接地装置与道路或建筑物的出入口等的距离应大于3m。当小于3m时，应采取均压措施或铺设卵石或沥青地面。

f) 独立避雷针（线）应设置独立的集中接地装置。当有困难时，该接地装置可与接地网连接，但避雷针与主接地网的地下连接点至35kV及以下设备与主接地网的地下连接点，沿接地体的长度不得小于15m。

g) 独立避雷针的接地装置与接地网的地中距离不应小于3m。

h) 配电装置的架构或屋顶上的避雷针应与接地网连接，并应在其附近装设集中接地装置。

② 建筑物上的避雷针或防雷金属网应和建筑物顶部的其他金属物体连接成一个整体。

③ 装有避雷针和避雷线的构架上的照明灯电源线，必须采用直埋于土壤中的带金属护层的电缆或穿入金属管的针线。电缆的金属护层或金属管必须接地，埋入土壤中的长度应在10m以上，方可与配电装置的接地网相连或与电源线、低压配电装置相连接。

④ 避雷针（网、带）及其接地装置，应采取自下而上的施工程序。首先安装集中接地装置，后安装引下线，最后安装接闪器。

## 六、接地装置的安装

### 1. 接地体

接地体是指埋入大地中直接与土壤接触的金属导体或金属导体组，是连接电流流向土壤的流散体。接地体包括两大类。

#### （1）自然接地体

自然接地体指兼作接地体用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑物内的钢筋、金属管道和设备。

可作为自然接地体的有：与大地有可靠连接的建筑物的钢结构和钢筋、行车的钢轨、埋地的非可燃可爆的金属管道及埋地敷设的不少于两根的电缆金属外皮等。利用自然接地体时，一定要保证良好的电气连接。

#### （2）人工接地体

人工接地体是指人为埋入地中的金属构件，按打入的方式不同可分为垂直接地体和水平接地体。

人工接地体有垂直埋设的和水平埋设的基本结构型式,如图 10-24 所示。最常用的垂直接地体为直径 50mm、长 2.5m 的钢管。为了减少外界温度变化对流散电阻的影响,埋入地下的接地体,其顶面埋设深度不宜小于 0.6m。

## 2. 接地装置

接地装置是指电气设备接线和埋入大地中的金属接地体组的总和。

垂直埋设的接地体一般采用热镀锌的角钢、钢管、圆钢等,垂直敷设的接地体长度不应小于 2.5m。圆钢直径不应小于 19mm;钢管直径不应小于 50mm,壁厚不应小于 3.5mm;角钢不应小于  $40mm \times 40mm \times 4mm$ 。

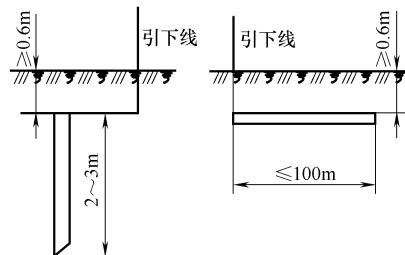
水平埋设接地体一般采用热镀锌的扁钢、圆钢等。扁钢截面积不应小于  $100mm^2$ 。

(1) 钢质接地装置应采用焊接连接。其搭接长度应符合下列规定:

- ① 扁钢与扁钢搭接为扁钢宽度的 2 倍,不少于三面施焊。
- ② 圆钢与圆钢的搭接为圆钢直径的 6 倍,双面施焊。
- ③ 圆钢与扁钢搭接为圆钢直径的 6 倍,双面施焊。
- ④ 扁钢和圆钢与钢管、角钢、互相焊接时,除应在接触部位两侧施焊外,还应增加圆钢搭接件。
- ⑤ 焊接部位应作防腐处理。

(2) 人工接地装置的基本要求

- ① 人工接地体在土壤中的埋设深度不应小于 0.6m,宜埋设在冻土层以下;水平接地体应挖沟埋设。
- ② 钢质垂直接地体宜直接打入地沟内,为了减少相邻接地体的屏蔽作用,垂直接地体的间距不宜小于其长度的 2 倍并均匀布置。
- ③ 垂直接地体坑内、水平接地体沟内宜用低电阻率土壤回填并分层夯实。
- ④ 接地装置宜采用热镀锌钢质材料。在高土壤电阻率地区,宜采



a) 垂直埋设的棒形接地体 b) 水平埋设的带形接地体

图 10-24 人工接地体

用换土法、降阻剂法或其他新技术、新材料降低接地装置的接地电阻。铜质接地装置应采用焊接或熔接，钢质和铜质接地装置之间连接应采用熔接方法连接，连接部位应作防腐处理。

⑤ 接地装置连接应可靠，连接处不应松动、脱焊、接触不良。

⑥ 接地装置施工完工后，测试接地电阻值必须符合设计要求，隐蔽工程部分应有检查验收合格记录。

### （3）接地装置的基本要求

① 自然接地体的接地电阻，如符合设计要求时，一般可不再另设人工接地体。

② 直流电力回路不应利用自然接地体，要用人工接地体。

③ 交流电力回路同时采用自然、人工两接地体时，应设置分开测量接地电阻的断开点。自然接地体，应不少于两根导体在不同部位与人工接地体相连接。

④ 车间接地干线与自然接地体或人工接地体连接时，应不少于两根导体在不同地点连接。

⑤ 接地体埋设位置应距建筑物、人行通道不小于1.5m，不应在垃圾、灰渣等地段埋设。经过建筑物、人行通道的接地体，应采用帽檐式均压带做法。

⑥ 变配电所的接地装置，应敷设以水平接地体为主的人工接地网。

⑦ 交流电气装置的接地线，应尽量利用金属构件、钢轨、混凝土构件的钢筋，电线管及电力电缆的金属皮等，但必须保证全长有可靠的金属性连接。

⑧ 不得利用有爆炸危险物质的管道作为接地线，在有爆炸危险物质环境内使用的电气设备应根据设计要求，设置专门的接地线。该接地线若与相线敷设在同一保护管内时，应具有与相线相等绝缘水平。金属管道、电缆的金属外皮与设备的金属外壳和构架都必须连接成连续整体，并予以接地。

⑨ 金属结构件作为接地线时用螺栓或铆钉紧固的连接外，应用扁钢跨接。作为接地干线的扁钢跨接线，截面积不小于100mm<sup>2</sup>，作为接地分支跨接线时不应小于48mm<sup>2</sup>。

⑩ 不得使用蛇皮管、管道保温层的金属层以及照明电缆铅皮作为接地线，但这些金属外皮应保证其全长有完好的电气通路并接地。

⑪ 在电源处，架空线路干线和分支线的终端及沿线每千米处，电缆和架空线，在引入车间或大型建筑物内的配电柜等处，零线应重复接地。

⑫ 金属管配线时，应将金属管和零线连接在一起，并作重复接地。各段金属不应中断金属性连接，丝扣连接的金属管应在连接管箍两侧用不小于  $\phi 10\text{mm}$  的钢线跨接。

⑬ 塑料管配线时，在管外应敷直径不小于  $10\text{mm}$  的钢线跨接。

⑭ 高压架空线路与低压架空线路同杆架设时，同杆架设段的两端低压零线应做重复接地。

⑮ 接地体与接地干线的连接应留有测定接地电阻的断开点，此点采用螺栓连接。

#### (4) 电气装置应安装接地的部分

① 变压器、电动机、电器、携带或移动式用电器具等的金属底座和外壳。

② 电气设备的传动装置。

③ 互感器的二次绕组。

④ 配电屏与控制屏的框架。

⑤ 屋内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构，以及靠近带电部分的金属围栏和金属门。

⑥ 交、直流电力电缆接线盒，终端的外壳和电缆外皮，穿线的钢管等。

⑦ 装有避雷线的电力线路杆塔。

⑧ 在非沥青地面的居民区内，无避雷线小接地短路电流架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔。

⑨ 装在配电线路杆上的开关设备、电容器等电气设备。

⑩ 铠装控制电缆的外皮，非铠装或非金属护套电缆的1~2根屏蔽线。

总之，凡因绝缘损坏或其他原因可能出现危险电压的金属部分，均应按规定做接地或接零保护。

#### (5) 接地线的连接和敷设

① 接地装置应在不同处采用两根连接导体与室内总等电位接地端子板相连接。

② 接地装置与室内总等电位连接带的连接导体截面积，铜质接地

线不应小于  $50\text{mm}^2$ ，钢质接地线不应小于  $80\text{mm}^2$ 。

③ 等电位接地端子板之间应采用螺栓连接，其连接导线截面积应采用不小于  $16\text{mm}^2$  的多股铜芯导线，穿钢管敷设。

④ 铜质接地线的连接应焊接或压接，并应保证有可靠的电气接触。钢质接地线应采用焊接。

⑤ 接地线与接地体的连接应采用焊接。安全保护地线（PE）与接地端子板的连接应可靠，连接处应有防松动或防腐蚀措施。

⑥ 接地线与金属管道等自然接地体的连接，应采用焊接。如焊接有困难时，可采用卡箍连接，但应有良好的导电性和防腐措施。

⑦ 人工接地线穿越建筑物时，应加保护管，过伸缩缝时，应留有适当富裕度或采用软连接。

⑧ 室内明敷的水平接地干线，距地面高度不应小于  $0.2\text{m}$ 。固定点间距，直线段应不大于  $1\text{m}$ ，拐弯处或分支处应不大于  $0.3\text{m}$ 。距离墙面应不小于  $10\text{mm}$ 。并在必要的地方，增设带燕尾螺母的螺栓。明敷接地干线，表面应涂黑漆或黑色条纹。

⑨ 室内暗敷（敷设在混凝土墙或砖墙内）的接地干线两端应有明露部分，并设置接线端子盒。

### 第三节 防雷和防静电

#### 一、雷电的种类及危害

##### 1. 雷电的种类

###### (1) 直击雷

直击雷是带电积云接近地面至一定程度时，与地面目标之间的强烈放电。直击雷的每次放电含有先导放电、主放电、余光三个阶段。大约  $50\%$  的直击雷有重复放电特征。每次雷击有三四个冲击至数十个冲击。一次直击雷的全部放电时间一般不超过  $500\text{ms}$ 。

###### (2) 感应雷

感应雷也称雷电感应，分为静电感应雷和电磁感应雷。静电感应雷是由于带电积云在架空线路导线或其他导电凸出物顶部感应出大量电荷，在带电积云与其他客体放电后，感应电荷失去束缚，以大电流、高电压冲击波的形式，沿线路导线或导电凸出物的传播。电磁感应雷是由于雷电放电时，巨大的冲击雷电流在周围空间产生迅速变化的强磁场在

邻近的导体上产生的很高的感应电动势。

### (3) 球雷

球雷是雷电放电时形成的发红光、橙光、白光或其他颜色光的火球。从电学角度考虑，球雷应当是一团处在特殊状态下的带电气体。

此外，直击雷和感应雷都能在架空线路或在空中金属管道上产生沿线路或管道的两个方向迅速传播的雷电冲击波。

## 2. 雷电的危害

雷电具有雷电流幅值大（可达数千安至数百千安）、雷电流陡度大（可达  $50\text{kA}/\mu\text{s}$ ）、冲击性强、冲击过电压高（可达数百千安至数千千安）的特点。其特点与其破坏性有紧密的关系。

雷电有电性质、热性质、机械性质等多方面的破坏作用，均可能带来极为严重的后果。

### (1) 火灾和爆炸

直击雷放电的高温电弧、二次放电、巨大的雷电流、球雷侵入可直接引起火灾和爆炸；冲击电压击穿电气设备的绝缘等破坏可间接引起火灾和爆炸。

### (2) 触电

积云直接对人体放电、二次放电、球雷打击，雷电流产生的接触电压和跨步电压可直接使人触电；电气设备绝缘因雷击而损坏也可使人遭到电击。

### (3) 设备和设施毁坏

雷击产生的高电压、大电流伴随的汽化力、静电力、电磁力可毁坏重要电气装置和建筑物及其他设施。

### (4) 大规模停电

电力设备或电力线路破坏后即可能导致大规模停电。

## 二、防雷技术

### 1. 防雷建筑物分类

建筑物按其火灾和爆炸的危险性、人身伤亡的危险性、政治经济价值分为三类。不同类别的建筑物有不同的防雷要求。

① 第一类防雷建筑物：指制造、使用或贮存炸药、火药、起爆药、火工品等大量危险物质，遇电火花会引起爆炸，从而造成巨大破坏或人身伤亡的建筑物。

② 第二类防雷建筑物：指对国家政治或国民经济有重要意义的建筑物以及制造、使用和贮存爆炸危险物质，但电火花不易引起爆炸，或不致造成巨大破坏和人身伤亡的建筑物。

③ 第三类防雷建筑物：指除第一类、第二类防雷建筑物以外需要防雷的建筑物。

## 2. 直击雷防护

第一类、第二类、第三类防雷建筑物的易受雷击部位，遭受雷击后果比较严重的设施或堆料，高压架空电力线路、发电厂和变电站等，应采取防直击雷的措施。

装设避雷针、避雷线、避雷网、避雷带是直击雷防护的主要措施。避雷针分独立避雷针和附设避雷针。独立避雷针不应设在人经常通行的地方。避雷针的保护范围按滚球法计算。

## 3. 二次放电防护

为了防止二次放电，不论是空气中或地下，都必须保证接闪器、引下线、接地装置与邻近导体之间有足够的安全距离。在任何情况下，第一类防雷建筑物防止二次放电的最小距离不得小于3m，第二类防雷建筑物防止二次放电的最小距离不得小于2m。不能满足间距要求时应予跨接。

## 4. 感应雷防护

有爆炸和火灾危险的建筑物、重要的电力设施应考虑感应雷防护。

为了防止静电感应雷的危险，应将建筑物内不带电的金属装备、金属结构连成整体并予以接地。为了防止电磁感应雷的危险，应将平行管道、相距不到100mm的管道用金属线跨接起来。

## 5. 雷电冲击波防护

变配电装置、可能有雷电冲击波进入室内的建筑物应考虑雷电冲击波防护。

为了防止雷电冲击波侵入变配电装置，可在线路引入端安装阀型避雷器。阀型避雷器上端接在架空线路上，下端接地。正常时避雷器对地保持绝缘状态；当雷电冲击波到来时，避雷器被击穿，将雷电引入大地，冲击波过去后，避雷器自动恢复绝缘状态。

对于建筑物，可采用以下措施：

① 全长直接埋地电缆供电，入户处电缆金属外皮接地。

② 架空线转电缆供电，架空线与电缆连接处装设阀型避雷器，避雷器、电缆金属外皮、绝缘子铁脚、金具等一起接地。

③ 架空线供电，入户处装设阀型避雷器或保护间隙，并与绝缘子铁脚、金具一起接地。

## 6. 人身防雷

雷暴时，应尽量减少在户外或野外逗留；在户外或野外最好穿塑料等不浸水的雨衣；如有条件，可进入有宽大金属构架或有防雷设施的建筑物、汽车或船只。

雷暴时，应尽量离开小山、小丘、隆起的小道，应尽量离开海滨、湖滨、河边、池塘旁，应尽量避开铁丝网、金属晒衣绳以及旗杆、烟囱、塔、孤独的树木附近，还应尽量离开没有防雷保护的小建筑物或其他设施。

雷暴时，在室内应离开照明线、动力线、电话线、广播线、收音机和电视机电源线、收音机和电视机天线以及与其相连的各种金属设备。雷雨天气应注意关闭门窗。

## 三、防静电

### 1. 静电的产生

物质是由分子组成的，分子是由原子组成的，原子是由原子核和其外围电子组成的。两种物质紧密接触后再分离时，一种物质把电子传给另一种物质而带正电，另一种物质得到电子而带负电，这样就产生了静电。一般认为，两种接触的物质相距小于  $25 \times 10^{-8}$  cm 时，即会发生电子转移，产生静电。两种物质摩擦时，增加两种物质达到  $25 \times 10^{-8}$  cm 以下距离的接触面积，并且不断地接触与分离，可产生较多的静电。

以下生产工艺过程比较容易产生静电：

① 固体物质大面积的摩擦，如纸张与辊轴摩擦，橡胶或塑料碾炼，传动带与带轮或辊轴摩擦等；固体物质在压力下接触而后分离，如塑料压制、上光等；固体物质在挤出、过滤时，与管道、过滤器等发生摩擦，如塑料的挤出、赛璐珞的过滤等。

② 高电阻液体在管道中流动且流速超过 1m/s 时，液体喷出管口时，液体注入容器发生冲击、冲刷或飞溅时等。

③ 液化气体或压缩气体在管道中流动和由管口喷出时，如从气瓶放出压缩气体、喷漆等。

④ 固体物质的粉碎、研磨过程，悬浮粉尘的高速运动等。

⑤ 在混合器中搅拌各种高电阻物质，如纺织品的涂胶过程等。

产生静电电荷的多少与生产物料的性质和料量、摩擦力大小和摩擦长度、液体和气体的分离或喷射强度、粉体粒度等因素有关。

## 2. 静电的危害

### (1) 静电火花引起燃烧爆炸

如果在接地良好的导体上产生静电后，静电会很快泄漏到大地中，但如果是绝缘体上产生静电，则电荷会越聚越多，形成很高的电位。当带电体与不带电体或静电电位很低的物体接近时，如电位差达到300V以上，就会发生放电现象，并产生火花。静电放电的火花能量达到或大于周围可燃物的最小点火能量，而且可燃物在空气中的浓度或含量也已在爆炸极限范围以内时，就能立即引起燃烧或爆炸。

### (2) 电击

人在活动过程中，由于衣着等固体物质的接触和分离及人体接近带电体产生静电感应，均可产生静电。当人体与其他物体之间发生放电时，人即遭到电击。因为这种电击是通过放电造成的，所以电击时人的感觉与放电能量有关，也就是说静电电击严重程度决定于人体电容的大小和人体电压的高低。人体对地电容多为数十至数百皮法，当人体电容为100pF时，人体静电放电电击强度见表10-3。

表 10-3 人体静电放电电击强度

人体带电电位/kV	电击强度	备注
1	完全无感觉	
2	手指外侧有感觉，但不疼	发出微弱的放电声
2.5	有针触的感觉，有哆嗦感，但不疼	
3	有被针刺的感觉，微疼	
4	有被针深刺的感觉，手指微疼	看见放电的晕光
5	从手掌到前腕感到疼	从指尖延展放电，发光
6	手指感到剧疼，后腕感到沉重	
7	手指和手掌感到剧疼，有微麻木感觉	
8	从手掌到前腕有麻木的感觉	
9	手腕子感到剧疼，手感到麻木沉重	
10	整个手感到疼，有电流过的感觉	
11	手指感到剧麻，整个手感到被强烈地电击	
12	整个手感到被强烈地打击	

由于静电能量较小，所以生产过程中产生的静电所引起的电击不会对人体产生直接危害，但人体可能因电击坠落或摔倒而造成所谓的二次事故。电击还可能使工作人员精神紧张，妨碍工作。

### (3) 妨碍生产

在某些生产过程中，如不消除静电，将会妨碍生产或降低产品质量。随着涤纶、腈纶和锦纶等合成纤维的应用，静电问题变得十分突出。例如，在抽丝过程中，每根丝都要从直径百分之几毫米的小孔挤出，产生较多静电，由于静电电场力的作用，使丝飘动、粘合、纠结等，妨碍工作。在粉体加工行业，生产过程中产生的静电除带来火灾爆炸危险外，还会降低生产效率，影响产品质量。例如，粉体筛分时，由于静电电场力的作用而吸附细微的粉末，使筛目变小，降低生产效率。在塑料和橡胶行业，由于制品和辊轴的摩擦及制品的挤压和拉伸，会产生较多静电，如果不能迅速消散会吸附大量灰尘。

### 3. 静电的作用

静电有危害，但也有许多积极作用，譬如大家了解得最多的是静电复印（见图 10-25），现在得到广泛使用。静电除尘（见图 10-26），具有效率高的优点，现在很多空气净化器就是用静电能吸除空气中的很小的尘埃，使空气净化，静电在环境保护中能发挥重要作用。在农业中，利用静电喷雾能大大提高效率和降低农药的使用，既经济又环保。静电处理的种子抗病能力强，减小病害发生，而且发芽率高，产量得到提高；静电放电产生的臭氧是强化剂，有很强的杀菌作用，可用静电来处理水，经过静电处理的水，既能杀菌又不易起水垢。带有静电的驻极体膜还能治疗各种软组织损伤，它有活血化瘀、消炎消肿的作用。静电还可用于喷涂，用静电喷涂（见图 10-27）轿车、家用电器（如洗衣机、电冰箱）的外壳非常均匀。总之，静电这个神秘的东西，虽然我们不能用肉眼看见又不能用手摸到，但是静电在我们的身边不断产生和消失，而在干燥的季节能产生很高电压的静电，它既给人类造成危害，又能人类所利用，为人类造福。



图 10-25 静电复印



图 10-26 静电除尘



图 10-27 静电喷涂

#### 4. 静电放电的形式

由于带电体可能是固体、液体、粉体以及其他条件的不同，静电放电可能有多种形态，根据其特点，主要有以下三种。

##### (1) 电晕放电

电晕放电是发生在极不均匀的电场中，空气被局部电离的一种主要放电形式。若要引发电晕放电，通常要求电极或带电体附近的电场较强。对于两极间的静电放电，只有当某一电极或两个电极本身的尺寸比起极间距离小得多时才会出现电晕放电。

##### (2) 静电火花放电

当静电电位比较高的带电导体或人体靠近其他导体、人体或接地导体，便会引发静电火花放电。静电火花放电是一个瞬间的过程，放电时两放电体之间的空气被击穿，形成“快如闪电”的火花通道，与此同时还伴随着“噼啪”的爆裂声，爆裂声是由火花通道内空气温度的急剧上升形成的气压冲击波造成的。

##### (3) 刷形放电

这种放电往往发生在导体与带电绝缘体之间，带电绝缘体可以是固体、气体或低电导率的液体。产生刷形放电时形成的放电通道在导体一端集中在某一点上，而在绝缘体一端有较多分叉，分布在一定空间范围内。根据其放电通道的形状，这种放电被称为刷形放电。当绝缘体相对于导体的电位的极性不同时，其形成的刷形放电所释放的能量和在绝缘体上产生的放电区域及形状是不一样的。

#### 5. 静电安全防护措施

静电危害的防止措施主要有减少静电的产生、设法导走或消散静电和防止静电放电等。其方法有接地法、中和法和防止人体带静电等。具体采用哪种方法，应结合生产工艺的特点和条件，加以综合考虑后

选用。

### (1) 接地

接地是消除静电最简单最基本的方法，它可以迅速地导走静电。但要注意带静电物体的接地线，必须连接牢固，并有足够的机械强度，否则在松断部位可能会产生火花。

### (2) 静电中和

绝缘体上的静电不能用接地的方法来消除，但可以利用极性相反的电荷来中和，目前“中和静电”的方法是采用感应式消电器。消电器的作用原理是：当消电器的尖端接近带电体时，在尖端上能感应出极性与带电体上静电极性相反的电荷，并在尖端附近形成很强的电场，该电场使空气电离后，产生正、负离子在电场作用下，分别向带电体和消电器的接地尖端移动，由此促使静电中和。

### (3) 防止人体带静电

人在行走、穿、脱衣服或座椅上起立时，都会产生静电，这也是一种危险的火花源，经试验，其能量足以引燃石油类蒸气。因此，在易燃的环境中，最好不要穿化纤类衣物，在放有危险性很大的炸药、氢气、乙炔等物质的场所，应穿用导电纤维制成的防静电工作服和导电橡胶做成的防静电鞋。

## 6. 电气设备防爆、防火

### (1) 电气防火防爆基本措施

根据场所特点电气防火防爆所采取的基本措施有：

① 正确选用电气设备。具有爆炸危险场所应按规范选择防爆电气设备。

② 按规范选择合理的安装位置，保持必要的安全间距是防火防爆的一项重要措施；

③ 加强维护保养检修，保持电气设备正常运行，包括保持电气设备的电压、电流、温升等参数不超过允许值，保持电气设备足够的绝缘能力，保持电气连接良好等。

④ 通风：在爆炸危险场所，如有良好的通风装置，能降低爆炸性混合物的浓度。

⑤ 采用耐火设施对现场防火有很重要的作用。如为了提高耐火性能，木质开关箱内表面衬以白铁皮。

⑥ 接地：爆炸危险场所的接地（或接零），较一般场所要求高，必须按规定接地。

### （2）引起火灾爆炸的原因

电气线路、电动机、油浸电力变压器、开关设备、电灯、电热设备等由于结构、运行特点不同，火灾和爆炸的危险性和原因也各不相同。但总的看来，除设备缺陷、安装不当等原因外，在运行中，电流的热量和电流的火花或电弧是引起火灾爆炸的直接原因。

#### 1) 电气设备过热

电气设备本身的温升是有规定的，这与绝缘材料允许耐受温度有关。当温度大大超过绝缘材料允许温升后，不仅会引起加速老化，还会引起绝缘材料燃烧。当电气设备正常运行遭破坏时，发热量增加，温度升高，在一定条件下引起火灾。引起电气设备过热的原因是：

① 短路：相线与零线之间或相线之间造成金属性接触即为短路。短路时温度急剧升高，引起绝缘材料燃烧而产生火灾。

② 过载：电气线路或设备所通过的电流值超过其允许的数值则为过载。过载可引起绝缘烧毁。

③ 接触不良：电器连接部分常用焊接或螺栓连接，一旦松动，则连接部分接触电阻增加，接头过热，导致灾害。

④ 铁心发热：铁心绝缘损坏因发热量增大会产生高温。

⑤ 散热不良：电器散热措施受到破坏，会造成过热。

#### 2) 电火花或电弧

电弧是大量电火花汇集而成的。电弧温度可高达6000℃。因此电火花或电弧不仅能引起绝缘物质燃烧，而且可以引起金属熔化、飞溅，构成火灾、爆炸的火源。

电火花可分为工作火花和事故火花。工作火花如开关或接触器触头分合时的火花。事故火花是电器或线路发生故障时产生的火花。如发生短路时产生的火花，绝缘损坏或熔丝熔断时出现的闪络等。事故火花还包括外来原因产生的火花，如雷电火花、静电火花、高频感应电火花等。

#### 3) 电动机的防火防爆措施

电动机是将电能转变为机械能的电气设备。电动机易着火的部位是定子绕组、转子绕组和铁心。引线接头处如接触不良、轴承过热、熔断

器及配电装置也存在着火因素。电动机防火防爆要注意：

① 电动机过负载运行，造成外壳过热，电流超过额定电流值时，要迅速查明原因。

② 电动机匝间或相间短路或接地。

③ 电动机接线处各接点接触不良或松动，引起绝缘损坏，造成短路，导致燃烧。

④ 三相电动机单相运行，危害极大，轻则烧毁电动机，重则引起火灾。

⑤ 机械摩擦：如轴承摩擦，轴承最高允许温度是滑动轴承不超过80℃，滚动轴承不超过100℃，否则轴承就会磨损。轴承磨损后使转子、定子互相摩擦发生扫膛，摩擦部位温度可达1000℃以上，而破坏定子和转子的绝缘，造成短路，产生火花电弧。

⑥ 电动机接地不良，外壳就会带电，所以机壳必须装有良好的接地保护。

#### 4) 电气线路发生火灾爆炸主要原因

电气线路往往是因短路、过载和接触电阻过大等原因产生电火花或引起电线电缆达到危险高温而发生火灾的。电气线路发生火灾爆炸主要原因有：

① 电气线路短路起火，短路瞬间放电发热相当大，能烧毁绝缘，使导线金属熔化，引起火灾。

② 电气线路过负载，一般导线最高允许温度为65℃，长时间过载导线温度就会超过这个允许温度，会加快导线绝缘老化、损坏，引起火灾。

③ 导线连接处接触电阻过大，导线接头处不牢固，接触不良，发生过热，甚至导致导线接头处熔化，引起火灾。

要针对以上原因采取防范措施。

#### 5) 电力变压器的防火防爆措施

电力变压器是电力系统中输配电力的主要设备。电力变压器主要是将电网的高压电降低为可以直接使用的6000V或380V电压，给用电设备供电。如变压器内部发生过载或短路，绝缘材料或绝缘油就会因高温或电火花作用而分解，膨胀以至气化，使变压器内部压力急剧增加，可能引起变压器外壳爆炸，大量绝缘油喷出燃烧，油流又会进一步扩大火

灾危险。

运行中防火爆炸要注意：

- ① 不能过载运行：长期过载运行，会引起线圈发热，使绝缘逐渐老化，造成短路。
- ② 经常检验绝缘油质：油质应定期化验，不合格油应及时更换，或采取其他措施。
- ③ 防止变压器铁心绝缘老化损坏，铁心长期发热造成绝缘老化。
- ④ 防止因检修不慎破坏绝缘，如果发现擦破损伤，就及时处理。
- ⑤ 保证导线接触良好，接触不良产生局部过热。
- ⑥ 防止雷击，变压器会因击穿绝缘而烧毁。
- ⑦ 短路保护：变压器线圈或负载发生短路，如果保护系统失灵或保护定值过大，就可能烧毁变压器。为此要安装可靠的短路保护。
- ⑧ 保护良好的接地。
- ⑨ 通风和冷却：如果变压器线圈导线是 A 级绝缘，其绝缘体以纸和棉纱为主。温度每升高 8℃，其绝缘寿命要减少一半左右；变压器在正常温度 90℃ 以下运行，寿命约 20 年；若温度升至 105℃，则寿命为 7 年。变压器运行，要保持良好的通风和冷却。

## 第四节 电气火灾消防基本操作

### 一、发生电气火灾的原因

在火灾事故中，电气火灾所占比重比较大，几乎所有的电气故障都可能导致电气火灾，特别是在可能存在着石油液化气、煤气、天然气、汽油、柴油、酒精、棉、麻、化纤织物、木材、塑料等易燃易爆物的场所；另外一些设备本身可能会产生易燃易爆物质，如设备的绝缘油在电弧作用下分解和汽化，喷出大量的油雾和可燃气体；酸性电池排出氢气并形成爆炸性混合物等。一旦这些环境遇到较高的温度和微小的电火花即有可能引起着火或爆炸。例如：短路时，短路电流为正常电流的几十甚至上百倍，可在短时间内使周边温度急剧升高，从而导致火灾；过载时，流经电路的电流将超过电路的安全载流量，电气设备长时间的工作在此状态下，由于设备、电路过热而引起火灾；此外漏电、照明及电热设备、开关动作、熔断器烧断、接触不良以及雷击、静电等，都可能引起高温、高热或者产生电弧、放电火花，从而导致火灾或爆炸事故。

## 二、预防电气火灾的发生

为了防止电气火灾事故的发生，首先应当正确地选择、安装、使用和维护电气设备及电气线路，并按规定正确采用各种保护措施。所有电气设备均应与易燃易爆物保持足够的安全距离，有明火的设备及工作中可能产生高温高热的设备如喷灯、电热设备、照明设备等，使用后应立即关闭。其次，对于火灾及爆炸危险场所，即含有易燃易爆物、导电粉尘等容易引起火灾或爆炸的场所，应按要求使用防爆或隔爆型电气设备，禁止在易燃易爆场所使用非防爆型的电气设备，特别是携带式或移动式设备；对可能产生电弧或电火花的地方，必须设法隔离或杜绝电弧及电火花的产生。外壳表面温度较高的电气设备应尽量远离易燃易爆物，易燃易爆物附近不得使用电热器具，如必须使用时，应采取有效的隔热措施爆炸危险场所的电气线路应符合防火防爆要求，保证足够的导线截面积和接头的紧密接触，采用钢管敷设并采取密封措施，严禁采用明敷方式。爆炸危险场所的接地（或接零）应高于一般场所的要求，接地（零）线不得使用铝线，所有接地（零）应连接成连续的整体，以保证电流连续不中断，接地（零）连接点必须可靠并尽量远离危险场所。火灾及爆炸危险场所必须具有更加完善的防雷和防静电措施。此外，火灾及爆炸危险场所及与之相邻的场所，应用非可燃材料或耐火材料构筑。在爆炸危险场所，一般不应进行测量工作，也应避免带电作业，更换灯泡等工作也应在断电之后进行。

预防电气火灾，首先应了解和预防静电的产生。静电的产生比较复杂，大量的静电荷积聚，能够形成很高的电位。油在车船运输中，在管道输送中，会产生静电；传送带上，也会产生静电。这类静电现象在塑料、化纤、橡胶、印刷、纺织、造纸等生产行业是经常发生的，而这些行业发生火灾与爆炸的危险又往往很大。

静电的特点是静电电压很高，有时可高达数万伏；静电能量不大，发生人身静电电击时，触电电流往往瞬间被释放，一般不会有生命危险：绝缘体上的静电泄放很慢，静电带电体周围很容易发生静电感应和尖端放电现象，从而产生放电火花或电弧。静电最严重的危害就是可能引起火灾和爆炸事故。特别是在易燃易爆场所，很小的静电火花即可能带来严重的后果。因此，必须对静电的危害采取有效的防护措施。

对于可能引起事故危险的静电带电体，最有效的措施就是通过接地，将静电荷及时释放，从而消除静电的危害。通常防静电接地电阻不大于  $100\Omega$ 。对带静电的绝缘体应采取用金属丝缠绕、屏蔽接地的方法；还可以采用静电中和器。对容易产生尖端放电的部位应采取静电屏蔽措施。对电容器、长距离线路及电力电缆等，在进行检修或试验工作前应先放电。静电带电体的防护接地应有多处，特别是两端，都应接地。因为当导体因静电感应而带电时，其两端都将积聚静电荷，一端接地只能消除部分危险，未接地端所带电荷不能释放，仍存在事故隐患。

凡用来加工、储存、运输各种易燃性液体、气体和粉尘性材料的设备，均须妥善接地。比如运输汽油的汽车，应带金属链条，链条一端和油槽底盘相连，另一端拖在地面上，装卸油之前，应先将油槽车与储油罐相连并接地。

### 三、电气消防常识

当发生电气设备火警时，或邻近电气设备附近发生火灾时，应立即拨打 119 火警电话报警。扑救电气火灾时应注意触电危险，首先应立即切断电源，通知电力部门派人到现场指导扑救工作。灭火时，应注意运用正确的灭火知识，采取正确的方法灭火。

夜间断电救火应有临时照明措施。切断电源时应有选择，尽量局部断电，同时应该注意安全，防止触电，不得带负荷拉刀开关或隔离开关。火灾发生后，由于受潮或烟熏，使开关设备的绝缘能力降低，所以拉闸时最好使用绝缘工具。剪断导线时应使用带绝缘手柄的工具，并注意防止断落的导线伤人；不同相线应在不同部位剪断，以防造成短路；剪断空中电线时，剪断位置应选择在靠电源方向的支持物附近。带电灭火时，灭火人员应占据合理的位置，与带电部位保持安全距离。在救火过程中应同时注意防止发生触电事故或其他事故。用水枪带电灭火时，宜采用泄漏电流小的喷雾水枪，并将水枪喷嘴接地，灭火人员应戴绝缘手套、穿绝缘靴或穿均压服操作；喷嘴至带电体的距离应遵循以下规定：110kV 及以下者不应小于 3m，220kV 以上者不应小于 5m。使用不导电性的灭火剂灭火时，灭火器机体、喷嘴至带电体的距离应遵循以下规定：10kV 不小于 0.4m，35kV 不小于 0.6m。设备中如果充油，在救火时应该考虑油的安全排放，设法将油、火隔离；电动机着火时，应防

止轴和轴承由于冷热不均而变形，并不得使用干粉、沙子、泥土灭火，以防损伤设备的绝缘。

#### 四、灭火器的使用

##### 1. 千粉灭火器

干粉灭火器主要适用于扑救石油及其衍生产品、油漆、可燃气体和电气设备的初期火灾，但不可用于电动机着火时的扑救。

使用干粉灭火器时先打开保险销，一手拿喷筒把喷口对准火源，另一手紧握导杆提环，将顶针压下，干粉即喷出。干粉灭火器的日常维护需要每年检查一次干粉是否结块，每半年检查一次压力。发现结块应立即更换，压力小于规定值时应及时充气、检修。干粉灭火器的结构及使用方法如图 10-28 所示。

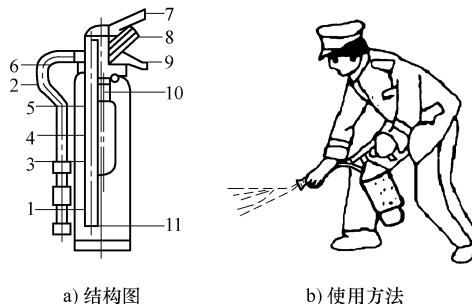


图 10-28 干粉灭火器的结构及使用方法

1—进气管 2—出粉管 3—钢瓶 4—粉筒 5—喷管 6—钢盖 7—后把  
8—保险销 9—提把 10—钢字 11—防潮堵

##### 2. 二氧化碳灭火器

二氧化碳灭火器主要适用于扑救额定电压低于 600V 电气设备、仪器仪表、档案资料、油脂及酸类物质的初起火灾，但不适用于扑灭金属钾、钠、镁、铝的燃烧。

二氧化碳灭火器使用时，一手拿喷筒，喷口对准火源，另一手握紧鸭舌，气体即可喷出。二氧化碳导电性差，当着火设备电压超过 600V 时必须先停电后灭火；二氧化碳怕高温，存放点温度不得超过 42℃。使用时不要用手摸金属导管，也不要把喷筒对着人，以防冻伤。喷射时应朝顺风方向进行。日常维护需要每月检查一次，重量减少 1/10 时，应充气。发现结块应立即更换，压力小于规定值时应及时充气。二氧

碳灭火器的结构及使用方法如图 10-29 所示。

### 3. 1411 灭火器

1411 灭火器适用于扑救电气设备、仪表、电子仪器、油类、化工、化纤原料、精密机械设备，以及文物、图书、档案等的初期火灾。

使用时，拔掉保险销，握紧压把开关，由压杆使密封阀开启，在氮气压力作用下，灭火剂喷出，松开压把开关，喷射即停止。1411 灭火器的日常维护需要每年检查一次重量。1411 灭火器的结构及使用方法如图 10-30 所示。

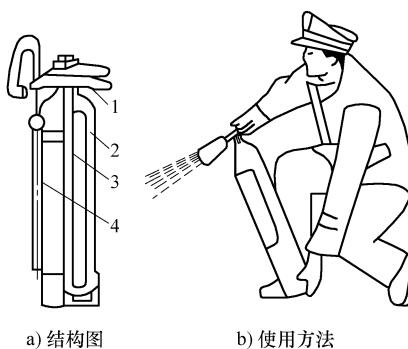


图 10-29 二氧化碳灭火器的结构及使用方法  
1—启闭阀门 2—钢瓶 3—虹吸管 4—喷筒

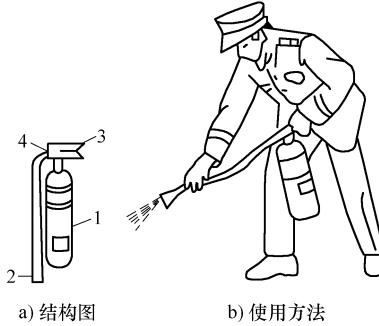


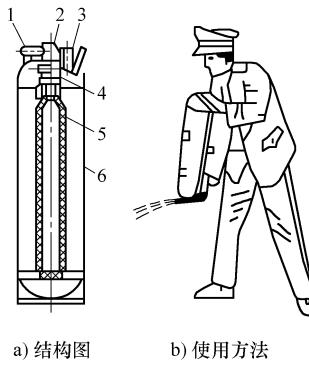
图 10-30 1411 灭火器的结构及使用方法  
1—筒身 2—喷嘴 3—压把 4—安全销

### 4. 泡沫灭火器

泡沫灭火器适用于扑救油脂类、石油类产品及一般固体物质的初期火灾，但绝不可用于带电体的灭火。

使用泡沫灭火器时将筒身颠倒过来，使碳酸氢钠与硫酸两溶液混合并发生化学作用，产生的二氧化碳气体泡沫由喷嘴喷出使用时，必须注意不要将筒盖、筒底对着人体，以防意外爆炸伤人。泡沫灭火器只能立

着放置。泡沫灭火器需要每年检查一次泡沫发生倍数，若低于4倍时，应更换药剂。泡沫灭火器的结构及使用方法如图10-31所示。

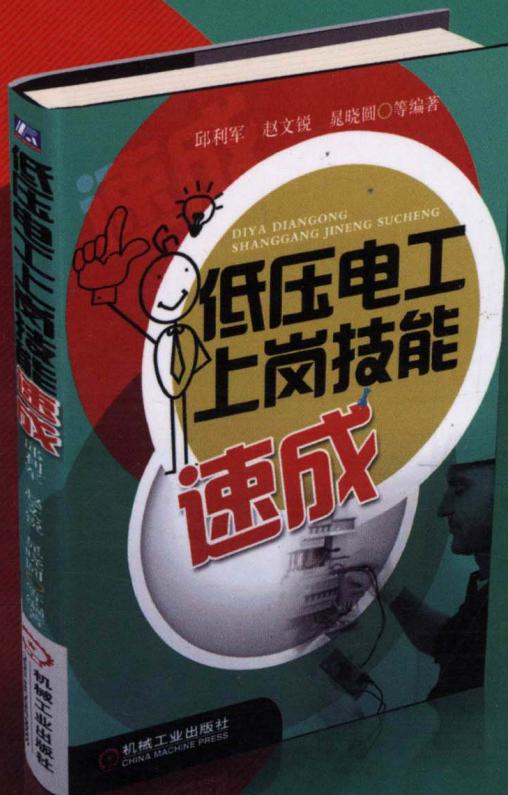


10-31 泡沫灭火器的结构及使用方法

1—喷嘴 2—筒盖 3—螺母  
4—瓶胆盖 5—瓶胆 6—筒身

## 参 考 文 献

- [1] 邱利军. 电工轻松入门 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 白玉岷. 照明电路及单相电气装置的安装 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 邱利军, 于曰浩. 电工基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [4] 邱利军, 于曰浩. 电工操作技能 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [5] 才家刚. 电工工具和仪器仪表的使用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [6] 孙琴梅. 工厂供配电技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [7] 田建芬, 张文燕, 朱小琴. 电力拖动控制线路与技能训练 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 张建霞. 电工仪表与测量 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] 陈惠群. 电工测量 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] 闫和平. 常用低压电器与电气控制技术问答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.



地址:北京市百万庄大街22号

邮政编码:100037

电话服务

社服务中心:010-88361066

销售一部:010-68326294

销售二部:010-88379649

读者购书热线:010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-42691-2



9 787111 426912 >

上架指导 工业技术 / 电工技术

ISBN 978-7-111-42691-2

策划编辑◎徐明煜 / 封面设计◎陈沛

定价: 29.90元