

DIANQI KONGZHI
YIDIANTONG

电气控制

一点通

战祥森 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



将优质清洁能源送达各地？

ABB正在帮助建设世界上距离最远的离岸风电场。采用ABB环保型输电技术，这座装机容量400兆瓦的风电场预计每年可减少150万吨二氧化碳的排放量并提升电网稳定性。作为世界风能行业最大的电气元件与服务供应商之一，ABB拥有多种技术采用可再生能源应对气候变化。欲了解更多，请登录 www.abb.com.cn

当然能实现。

用电力与效率
创造美好世界™

ABB

电气控制一点通

战祥森 编著



机械工业出版社

本书在知识结构的安排上充分体现职业教育特色，面向就业，以突出实践技能为主线，介绍了电气控制技术的方法和思路，并结合作者的实践经验对一些电气线路进行了讲解。本书共分6章，主要包括常用电工仪表、低压电器、继电器—接触器控制电路、典型生产机械电气控制分析、直流电动机、特种电动机、可编程序控制器基本应用等内容。本书既有实用性，又有系统性，内容全面，同时还增加了对先进电器设备的介绍。书中配有许多插图，方便学生直观学习。

本书可作为职业技术院校、技师学院电气自动化、机电一体化等机电类专业的教材，也可作为机电行业岗位培训教材和机电爱好者自学及相关专业工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电气控制一点通/战祥森编著. —北京：机械工业出版社，2012.11
ISBN 978-7-111-40121-6

I. ①电… II. ①战… III. ①电气控制-职业教育-教材
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 248179 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：牛新国 责任编辑：牛新国 版式设计：霍永明

责任校对：张薇 封面设计：马精明 责任印制：张楠

北京四级青印刷厂印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13 印张·320 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-40121-6

定价：38.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

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

本书以培养应用型技能人才为根本目标，以电气自动化、机电一体化技术专业工作岗位的能力需求为依据，突出技术应用性和针对性，强化实践能力培养，兼顾理论教学、技能培训、职业资格鉴定考核等内容。全书共分6章，主要内容包括常用电工仪表、交流异步电动机、变压器、直流电动机、特种电动机、可编程序控制器等部分。每章都结合实际，具有很强的实用性，章后配有习题以提升能力。

本书编者具有多年的生产现场经验和职业技术学校教学、职业技能鉴定培训考核经验，在总结多年经验的基础上，编写了本书。本书具有以下几个特点：

(1) 本书将电动机原理和维修及电气控制有机结合为一体，做到简洁明了，重点突出，提高了教学效率和学习效率。

(2) 市面上能够通俗实用的介绍电工常用仪表、仪器的书尚少，而其使用又是广大电工电子从业者的基本功。为了更好地适应职业技术学校的教学需求，突出职业技术教育的特色，本书融合了常用电工仪表内容，使读者在不借助其他参考书或说明书的情况下，能够学会常用仪表的使用。

(3) 本书从以能力为本位的角度出发，努力打造轻松的学习环境，精炼简易的图解教学，以崭新的视角方式将理论与实践有机地结合起来，并以图文并茂的方式呈现给读者。

(4) 本书力求概念解释通俗化、动手能力兴趣化，适于职业学校的学生、电工电子初学者、农村电工、农村劳动力转移技能培训及相关操作、维修人员阅读。

(5) 在特种电动机一节中，根据当前实际情况，加入了直线电动机的内容，以便读者能更好地了解。

(6) 本书使基本知识、基本技能和国家职业资格考试鉴定考核内容有机地结合，为顺利获得中、高级职业资格证书和进一步提升奠定了基础。

本书在编写过程中，参考了一些有关的著作和文献，也查阅了网络上的一些知识资料，在此对这些著作文献和资料的作者表示衷心的感谢。

本书可作为职业技术院校自动化等电类专业及机电类专业的教学用书，也可作为从事电工技术、电力拖动技术，及农村劳动力转移技能培训及相关操作、维修人员学习使用。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中错误和不足之处在所难免，敬请广大使用者批评指正，来信请寄至 gzzzf@126. com。

编者

2012年6月

目 录

前言	
第1章 电工常用仪表及电工工具	1
1.1 万用电表的使用	1
1.2 晶体管毫伏表的使用	3
1.3 示波器的使用	4
1.4 钳形电流表的使用	7
1.5 直流电桥的使用	8
1.6 绝缘电阻表的使用	10
1.7 接地电阻表的使用	12
1.8 电参数测量仪	13
1.9 单相及三相电度表的使用	14
1.9.1 单相电度表	14
1.9.2 三相电度表	15
1.10 其他常用电工工具	16
本章小结	19
习题	19
第2章 三相交流异步电动机及电气控制	21
2.1 三相交流异步电动机的结构	21
2.1.1 结构	21
2.1.2 三相异步电动机的工作原理	22
2.1.3 三相异步电动机的铭牌及绕组连接方式	24
2.2 三相交流异步电动机定子绕组的维修	25
2.2.1 基本知识	25
2.2.2 三相四极 24 槽单层链式绕组	26
2.2.3 三相两极 24 槽单层同心式绕组	27
2.3 三相异步电动机定子绕组首尾端的判别方法	27
2.4 常用低压电器的认识	29
2.4.1 开关类电器	29
2.4.2 主令电器	31
2.4.3 熔断器	33
2.4.4 交流接触器	34
2.4.5 热继电器	36
2.4.6 时间继电器	38
2.5 三相异步电动机的点动控制电路	39
2.5.1 刀开关控制的直接起动电路	39
2.5.2 电气控制基本知识概述	40
2.5.3 点动控制电路	41
2.6 三相异步电动机的点动加自锁控制电路	42
2.6.1 自锁控制电路	43
2.6.2 具有过载保护的自锁控制电路	45
2.6.3 点动加自锁控制电路	47
2.7 三相异步电动机的正反转电路	48
2.7.1 接触器联锁的正反转控制电路	49
2.7.2 双重联锁的正反转控制电路	50
2.7.3 自动往返电路	51
2.8 三相异步电动机的顺序控制	52
2.8.1 按钮控制的顺序控制电路	53
2.8.2 时间继电器控制的顺序控制电路	54
2.9 三相异步电动机的多地控制	55
2.10 三相异步电动机的减压起动控制	56
2.10.1 笼型异步电动机直接起动	56
2.10.2 笼型异步电动机的减压起动	56
2.11 三相异步电动机的调速控制	61
2.11.1 变极调速	61
2.11.2 变频调速	63
2.11.3 改变电动机的转差率调速	65
2.12 三相异步电动机的制动控制	67
2.12.1 机械制动	67
2.12.2 电气制动	68
2.13 单相异步电动机	71
2.14 几种常用的电气控制电路举例	75
2.14.1 L-3 车床	75
2.14.2 电动葫芦	76
2.14.3 Z3040 型摇臂钻床电气控制	78
2.14.4 M7120 型平面磨床概述	80
本章小结	83
习题	83

第3章 变压器基础知识	87	4.8.1 能耗制动	136
3.1 变压器的用途和分类	87	4.8.2 反接制动	138
3.2 变压器的原理	88	4.8.3 回馈制动	139
3.3 电力变压器的基本结构	90	4.8.4 电动机的四象限运行	140
3.4 变压器的同名端和联结组标号	94	4.9 直流电动机的综合应用实例	141
3.4.1 同名端的含义	94	本章小结	143
3.4.2 三相变压器的联结组别号	95	习题	143
3.5 变压器的工作特性	98	第5章 特种电机	146
3.5.1 电压调整率和外特性	98	5.1 步进电动机	146
3.5.2 变压器的效率特性	99	5.1.1 步进电动机的工作原理	147
3.6 其他常用变压器	100	5.1.2 步进电动机的分类	148
3.6.1 电压互感器	100	5.1.3 步进电动机的主要技术指标与 型号说明	149
3.6.2 电流互感器	101	5.1.4 步进电动机的驱动电源	150
3.6.3 自耦变压器	103	5.2 测速发电机	151
3.6.4 电焊变压器	104	5.2.1 直流测速发电机的工作原理	152
3.6.5 整流变压器	105	5.2.2 交流测速发电机的工作原理	153
3.7 电力变压器常规检修与维护	106	5.3 伺服电动机	154
3.8 小型变压器线圈的绕制	108	5.3.1 直流伺服电动机	154
本章小结	111	5.3.2 交流伺服电动机	155
习题	111	5.4 直线电动机	157
第4章 直流电动机及电气控制	113	5.4.1 直线异步电动机的分类和结构	157
4.1 直流电动机的结构	113	5.4.2 直线异步电动机的工作原理	158
4.2 直流电机的工作原理	117	5.4.3 直线异步电动机的应用举例	159
4.2.1 直流发电机的工作原理	117	本章小结	160
4.2.2 直流电动机工作原理	118	习题	161
4.3 直流电机的铭牌及励磁方式	118	第6章 可编程序控制器基础知识	162
4.3.1 直流电机的铭牌	118	6.1 可编程序控制器的基础知识	162
4.3.2 直流电机的励磁方式	119	6.2 FX2N 系列 PLC 编程元件	166
4.4 直流电动机的基本方程式及机械 特性	122	6.2.1 FX2N 系列 PLC 编程元件分类和 编号	166
4.4.1 基本平衡方程式	122	6.2.2 FX 系列 PLC 型号	170
4.4.2 直流电动机的机械特性	123	6.3 可编程序控制器的基本指令	171
4.5 电力拖动系统稳定运行及负载的转矩 特性	125	6.4 可编程序控制器的基本指令应用	177
4.5.1 负载的转矩特性	125	6.5 可编程序控制器的步进指令	182
4.5.2 电力拖动系统稳定运行	127	6.6 PLC 应用指令基本知识	187
4.6 直流电动机的起动	127	6.6.1 部分功能指令简介	187
4.6.1 全压起动	128	6.6.2 运料小车控制实例	191
4.6.2 电枢回路串电阻起动	128	6.7 FX 系列 PLC 编程软件的应用	193
4.6.3 减压起动	129	本章小结	195
4.7 直流电动机的调速及反转	130	习题	195
4.7.1 直流电动机的调速	130	附录 三菱 FX 系列 PLC 功能 指令一览表	197
4.7.2 直流电动机的反转	135	参考文献	202
4.8 直流电动机的制动	136		



第1章 电工常用仪表及电工工具

学习目标

- 了解常用电工测量仪表的结构和工作原理。
- 掌握常用电工测量仪表的正确使用方法。
- 掌握单相及三相电度表的正确使用方法。
- 掌握常用电工工具的使用方法。

电路中的各个物理量（如电压、电流、功率、电能及电路参数等）的大小，除用分析与计算的方法外，还常用电工测量仪表测量。电工测量技术的应用主要有以下优点：

- (1) 电工测量仪表的结构简单，使用方便，并有足够的精确度。
- (2) 电工测量仪表可以灵活地安装在需要进行测量的地方，有的还可实现自动记录。
- (3) 电工测量仪表可实现远距离的测量。
- (4) 能利用电工测量方法对非电量进行测量。

1.1 万用电表的使用

万用电表简称万用表，是一种多功能、多量程的便携式电工仪表，一般的万用表可以测量直流电流、直流电压、交流电压和电阻等。有些万用表还可以测量电容、功率、晶体管共射极直流放大系数 h_{FE} 等，所以万用表是电工必备的仪表之一。

其基本结构由磁电系测量机构（简称表头）、测量线路和转换开关等组成。万用表可分为指针式万用表和数字式万用表。以下以 MF47 型万用表为例（它是具有 24 档旋转开关的高灵敏度指针式万用表），介绍万用电表的使用。

1. 使用方法

在使用前应检查仪表的指针是否在机械零位，如不在零位，用小螺钉旋具调节表盖上的调零旋钮，使指针指在零位上。

在使用前，打开后面电池盖板，装入 1.5V 和 9V 电池，将红黑表笔分别插入“+”及“COM”插孔内，即可以使用。电表的外形如图 1-1 所示。

(1) 直流电流测量 (DCmA)。测量 0.05 ~ 500mA 时，转换开关至所需电流档位，将电表串联在电路中，电流从红表笔流入，从黑表笔流出（红表笔接高电位，黑表笔接低电位）。在不能确定电流大小的情况下，先用最高档位测量，若指针偏转角度太小，再换用较小档测量。测量 10A 电流时，应将红表笔插入 10A 插孔内，转换开关在 500mA 档位，然后将电表串入电路中。

(2) 交流、直流电压测量 (ACV, DCV)。测量交流 10 ~ 1000V 或直流 0.25 ~ 1000V 时，先将转换开关打至所需档，直接进行测量即可（测量直流电压时，要注意红表笔接高

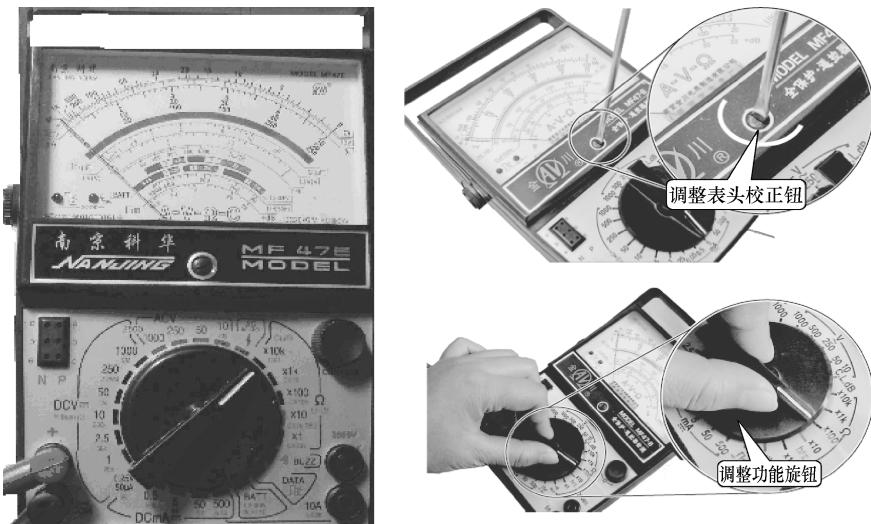


图 1-1 指针式万用表外形、调零及转换开关

电位端，若无法弄清电位的高低点，可以选用高电压档，用两表笔很快地碰一下两测试点，看指针的偏转方向，从而找出高低电位点）。测量 2500V 电压时，开关分别放在交流 1000V 或直流 1000V 档上。交流 10V 档表盘上设有专用刻度线，50V 以上电压和直流电压同刻度线。

(3) 直流电阻测量 (Ω)。转换开关打至所需电阻档，将两表笔短接，转动欧姆调零旋钮，进行调零（见图 1-2），使指针对准欧姆刻度 0 位置上，即可进行测量，所读数据与档位指示为倍数关系。

测量电路中的电阻时要先切断电源，如电路中有高电压或大容量电容时应先进行放电，然后才能测量。

(4) 晶体管直流放大倍数测量 (h_{FE})。转换开关至 $R \times 10h_{FE}$ 处，用与欧姆档相同方法进行调零，然后将 NPN 型或 PNP 型晶体管对应插入 N 或 P 插孔内（见图 1-3），指针指示值即为该管的直流放大倍数。如指针大于 1000 时应检查：①是否插错管脚。②晶体管是否已坏。

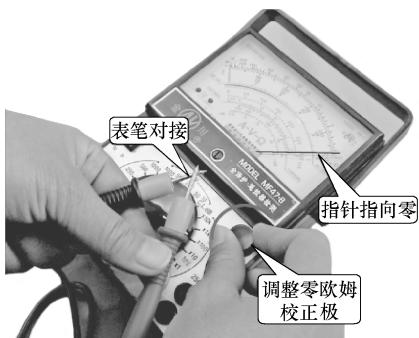


图 1-2 测量电阻零欧姆校正

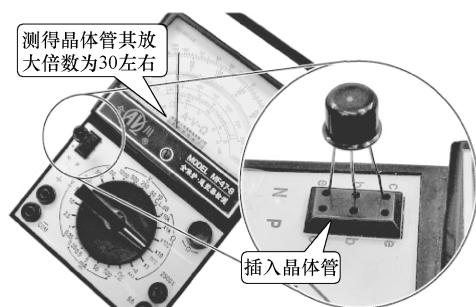


图 1-3 检测晶体管放大倍数

(5) 交流 220V 相线俗称火线判别（测电笔功能）。将仪表旋至 220V 相线判别功能档位，将红、黑表笔分别插入 220V 插孔内，此时红色指示灯应亮，将其中任意一根表笔拔

出，若红色指示灯继续点亮，则此时和万用表相连的那一个插孔为相线。使用此档时，如果发光二极管亮度不足应及时更换9V电池，以免发生误判。

2. 注意事项

- (1) 在进行欧姆调零时，若指针不能调到零位，应更换电池。
- (2) 测量电压或电流时，不能带电变换档位，以免烧坏开关。
- (3) 测量未知电压或电流时，应选择最高档位测量，再降至合适档位测量。
- (4) 测量高压时，要站在绝缘板上，并单手操作，另一只手不要触摸被测物。
- (5) 测量完毕后，要将档位开关扳到交流电压最高档位上。

3. 万用表的常见故障及检修方法

万用表发生故障时，首先检查外部元件，如表笔、引线、插孔等，外部故障的可能性排除后，再检查内部。检查的一般方法如下（见表1-1）。

- (1) 检查主要部件，如表头是否损坏，游丝是否卡住，转换开关是否接触不良等。若是只有某一档位故障，则应重点检查该档的零件，看是否有断线、接触不良、电阻值增大等情况。
- (2) 检查交直流电压及直流电流档的一般顺序是从一个表笔插孔经各元件到另一个插孔，检查电阻线路的方法是从内附电池的正极经各元件回到电池的负极。

表1-1 常见故障分析

故障位置	故障现象	可能产生的原因
表头	晃动表头时，指针显示不正常	表头动圈被异物卡住或有锈迹
直流电流档	无指示	1. 表头被短路 2. 表头线圈开焊 3. 表头串联的电阻开焊或损坏 4. 转换开关接触不良
直流电压档	无指示	电压部分开关公共点脱焊，或开路或电阻损坏
	某档无指示或不准确	分压电阻开路或损坏
交流电压档	指针轻微摆动，指示值很小	整流器击穿
	读数减小一半左右	整流器部分损坏，全波整流变成半波整流
电阻档	调零时，指针不能调到零位	1. 电池容量不足 2. 转换开关接触电阻变大
	无指示	断线或开关接触不良

1.2 晶体管毫伏表的使用

晶体管毫伏表是电工电子实验中经常用到的仪器。本实验以EM2171型单通道晶体管毫伏表为例介绍其使用方法和注意事项。

1. EM2171 的技术参数

(1) 电压测量范围：100μV ~ 300V。仪器共分12个档位，为1mV、3mV、10mV、30mV、100mV、300mV、1V、3V、10V、30V、100V、300V。

分贝量程：-60dB、-50dB、-40dB、-30dB、-20dB、-10dB、0dB、+10dB、+20dB、+30dB、+40dB、+50dB。

- (2) 电压测量的频率范围：10Hz ~ 2MHz
- (3) 输入阻抗：1mV ~ 300mV，输入电阻 $\geq 2M\Omega$ ；
1V ~ 300V，输入电阻 $\geq 8M\Omega$ 。

(4) 仪表测量值为交流电压的有效值。

2. 仪表外形及档位开关（见图 1-4）

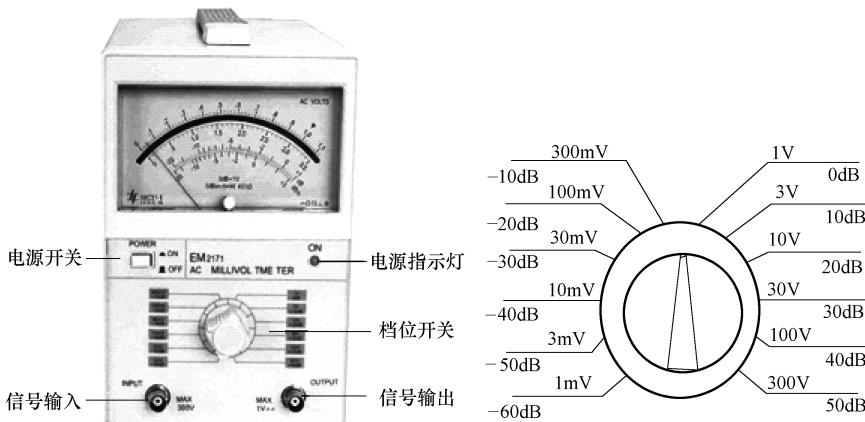


图 1-4 档位开关及仪表外形

3. 使用方法

- (1) 测量毫伏表表面和水平面垂直。
- (2) 通电前，调整电表的机械零位。
- (3) 接通电源，待电表的指针摆动数次至稳定后，即可进行测量。
- (4) 测量时，应正确选择档位，若无法确定量程时，应先用大量程粗测后再选择合适档位进行精测。
- (5) 读取数据时，应根据档位读取，特别注意有衰减时要应用公式衰减倍数等于 $20\lg A$ 进行计算。

1.3 示波器的使用

示波器是一种在工农业生产、科学的研究和教学实验等各个领域有着广泛应用的测量仪器。它可以直接观察电信号的波形，与其他仪器配合使用，可以测量电压的大小和频率、相位差、电流和电功率等。一切能转化为电压的电学量和非电学量，都可以用示波器来观察和测量。EM6510 单踪示波器外形如图 1-5 所示。

1. 面板操作说明

- (1) 电源开关。此开关按下（低），电源接通，电源指示灯点亮，预热后，仪器即可进行正常工作。再按一下此开关，电源关断。
- (2) 辉度调节旋钮。可以通过顺时针及逆时针旋转来调节轨迹的亮度。

(3) 聚焦调节旋钮。可以通过顺时针及逆时针旋转来调节轨迹的清晰度。

(4) 校准信号。提供 $0.5V$, $1kHz$ 的标准方波信号, 用来对仪器进行校准。

(5) 轨迹旋转。扫描线水平角度校正, 扫描线不水平时使用。

(6) 垂直移位旋钮。可以通过顺时针及逆时针旋转来调整轨迹在屏幕中的垂直位置。

(7) 水平移位旋钮。可以通过顺时针及逆时针旋转来调整轨迹在屏幕中的水平位置。

(8) V/div 。调节垂直偏转灵敏度档位开关 (即在垂直方向上每一格的读数)。

(9) DC、 \perp 、AC 档位。用于选择被测信号馈入至垂直通道的耦合方式。

(10) 垂直输入。垂直通道的输入插孔。

(11) T/div 。扫描速度选择档位开关。

(12) 扫描微调旋钮。顺时针旋到底时为校准位置。

(13) 电平。调节被测信号触发点电平, 使信号波形稳定。

(14) 水平输入。水平信号或外触发信号的输入插孔。

(15) 内、外档位。用于选择触发信号源。内: 内部触发。外: 用外接触发信号。

(16) 自动、TV、触发。扫描方式选择。

(17) +、-。触发极性选择。

2. 使用方法 (交流信号的测量)

(1) 接通电源, 电源指示灯亮, 预热, 屏幕中出现光迹, 调节旋钮, 使光迹居中, 亮度适中清晰。

(2) 接线。通过连接线将本机校准信号输入至垂直通道。

(3) 校准。接入本机校准信号, V/div 和 T/div 开关分别放在 $0.2V/div$ 档位和 $0.5ms/div$ 档位, 调节电平及微调旋钮, 使波形稳定, 调节 X 和 Y 方向移位, 方波垂直幅值占 5 格, 水平轴上占 2 格, 使波形如图 1-6 所示。

(4) 垂直系统的输入耦合方式开关置于 AC, V/div 和 T/div 开关根据信号的幅度和频率置于合适的位置, 微调置于校准位置, 调节触发电平, 使波形稳定, 如图 1-7 所示。

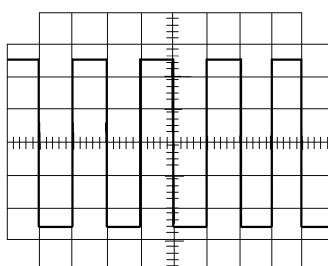


图 1-6 校准波形

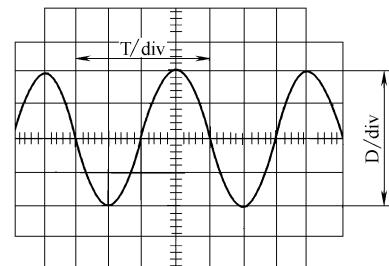


图 1-7 信号波形

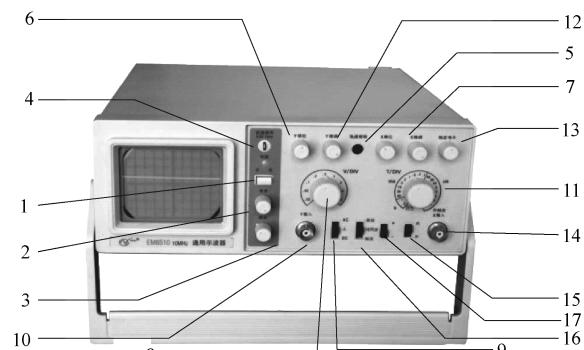


图 1-5 EM6510 单踪示波器外形

(5) 根据屏幕的坐标刻度, 被测信号波形峰-峰值为 D_{div} , 若此时仪器 V/div 处于 $0.1V/div$ 档, 且探极处于 $X1$ 位置, 则被测信号的峰-峰值为: $V_{P-P} = 0.1V/div \times D_{div} = 0.1 \times 4 = 0.4V$, 其有效值为 $U = V_{P-P}/2\sqrt{2}$, 其一个周期水平时间为 T_{div} , 若此时仪器 T/div 处于 $0.2ms/div$ 档, 则被测信号的周期为: $T = 0.2ms/div \times 4 = 0.8ms$, 频率为 $f = 1/T$ 。

(6) 将信号发生器、毫伏表和示波器按图 1-8 方法连接, 测量并填表 1-2。

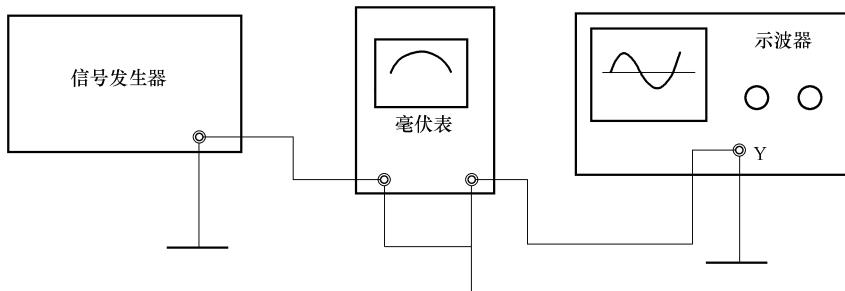


图 1-8 信号发生器、毫伏表和示波器连接方法

表 1-2 信号波形电压及频率数据记录

f/Hz	U/V	电压测量				频率测量			
		S $/(\text{V}/\text{div})$	H $/\text{div}$	V_{P-P} $/\text{V}$	$V_{P-P}/2\sqrt{2}$ $/\text{V}$	T $/(\text{V}/\text{div})$	L $/\text{div}$	T_Y $/\text{ms}$	F $/\text{Hz}$
500	0.5								
1000	1								
20000	2								

3. 注意事项

(1) 在要求读数时, 应将信号波形尽量调大, 以减小读数时的误差, 但要在屏幕上至少显示一个完整的波形。

(2) 要注意毫伏表的分贝衰减, 在计算时要按照 $20\lg A$ 进行倍数计算。

4. 常见故障 (见表 1-3)

表 1-3 常见故障

故障现象	故障原因	解决方法
开机后无显示, 电源指示灯不亮	1. 电源线未接好 2. 电源熔丝损坏	1. 将电源线重新接好 2. 更换合适的熔丝
开机后电源指示灯亮, 但无亮点	1. 亮度旋钮开得太暗 2. X 或 Y 移位设置得太偏 3. 扫描方式处于触发方式, 且无同步信号输入	1. 顺时针旋转亮度旋钮 2. X 或 Y 移位旋至适中位置 3. 扫描方式置于“自动”位置
输入信号后无信号波形显示	1. 输入方式开关处于“ \perp ” 2. 输入信号小而衰减设置过大 3. 探头或连接线未连接好	1. 输入方式开关置于 AC 或 DC 位置 2. 转动衰减开关, 选择合适的灵敏度 3. 重新连接探头或连接线
输入波形不能稳定显示	1. 触发源选择不对 2. 触发电平未调好	若非用外信号触发, 触发源应选“内”

1.4 钳形电流表的使用

钳形电流表是一种可以非常方便地测量交流电流大小的设备。它和其他电流表最大的区别之处就是在测量交流电流的过程中，不需将电表接入电路中，而是利用电磁感应原理将被测电路（即变压器的一次侧）的电流磁感应到电表中（二次侧），测出电流的大小。在实际测量中，应用非常方便。有的钳形电流表用外接表笔和转换开关相配合，还具有测量交直流电压及直流电阻的功能。

1. 钳形电流表的分类

从读数显示方式来分，有指针式和数字式两大类；从测量电压来分，有低压钳形电流表和高压钳形电流表；从测量功能来分，包括普通交流钳形电流表、交直流两用钳形电流表、漏电钳形电流表、带万用表的钳形电流表等。下面所讲到的就是一种指针式普通交流钳形电流表。数字式表和指针式表工作原理基本一致，不同的是采用液晶显示屏显示测量数字，能够记忆测量结果，可以先测量后读数。

2. 钳形电流表的组成

用来测量交流电流的钳形电流表主要由电流互感器、整流电路、磁电系电流表、量程转换开关及测量电路组成，如图 1-9 所示。其互感器的铁心有一活动部分在钳形表的上端，并与手柄相连。

3. 工作原理

使用时按动手柄使活动铁心张开，将通有被测电流的导线放入钳形铁心中，然后松开手柄使铁心闭合。此时载流导体相当于互感器的一次侧（只一匝），铁心中的磁通在二次绕组（多匝）中产生感应电流，通过整流电路之后，电流表指示出被测电流的数值大小。电流表的量程可由钳形电流表的转换开关来实现。

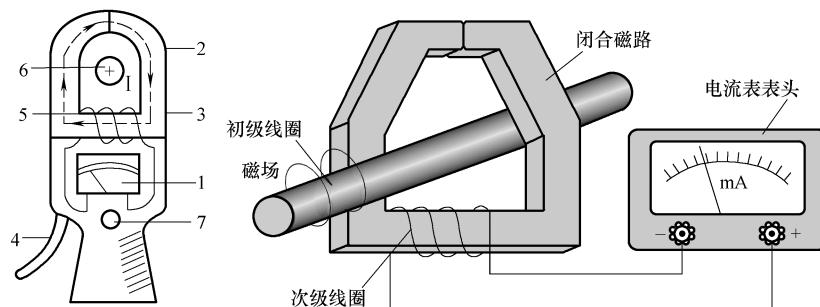


图 1-9 钳形电流表工作原理

1—电流表 2—电流互感器 3—铁心 4—手柄 5—二次绕组 6—被测电流 7—档位开关

4. 使用方法

- (1) 钳形电流表准确度等级不高，常用于对测量要求不高的场合。
- (2) 测量时将导线夹在钳口中间，使铁心的磁场均衡，以减少测量误差。
- (3) 测量前应根据被测电路的电流大小，选择相应的测量量程；当被测电路的电流难以估算时，应将量程开关置于最大测量量程。
- (4) 测量时应对应选择量程开关所置量程的标度尺。

(5) 所选的量程应能使指针指示在标度尺刻度的 $1/2 \sim 2/3$ 以上，以减小测量时产生的误差。

(6) 当被测量频率较低或正弦波有较大失真时，钳形电流表误差较大。

(7) 钳形电流表钳口的两个接触面应保持清洁和良好接触。若有污垢，可用汽油擦净，若接触不良，可重复开合几次。

(8) 当被测电流较小，指针偏转太小时，可将被测导线在钳口多绕几圈，所测数据只需除以在钳口所绕圈数，就可反映被测电流值，即实际电流 = 钳表读数/圈数。

(9) 测量完毕后，应将钳形电流表量程开关置于最高测量量程。

(10) 测量大电流后再测量小电流时，为了准确，要把钳表的钳口开合几次消除大电流所产生的剩磁，再进行小电流测量。

5. 使用钳形电流表时应注意的问题

(1) 由于钳形电流表要接触被测线路，所以测量前一定要检查表的绝缘性能是否良好，即外壳无破损，手柄清洁干燥。

(2) 测量时，应注意身体各部分与带电体保持安全距离。

(3) 钳形电流表不可测量裸导体的电流。

(4) 严禁在测量进行过程中切换钳形电流表的档位；若需要换档时，应先将被测导线从钳口退出再更换档位。

(5) 严格按电压等级选用钳形电流表。低电压等级的钳形电流表只能测低压系统中的电流，不能测量高压系统中的电流。严禁将低压钳形电流表用于 380V 以上电路的电流测量。

1.5 直流电桥的使用

在一般实验中用万用表测量电阻，但测量值不够精确。在工程上要求较准确测量电阻时，常用直流单臂电桥（也称惠斯顿电桥）。其主要特点是灵敏度和测试精度都很高，而且使用方便。

1. 电桥工作原理

图 1-10 是惠斯顿电桥电路。四个电阻 R_1 (R_x)、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，称作电桥的四个桥臂，组成四边形 abcd。对角 bd 之间连接检流计 G，构成“桥”，用以比较桥两端的电位。当 b 和 d 两点的电位相等时，检流计 G 指零，即 $I_G = 0$ ，电桥达到了平衡状态。此时有

$$U_{ab} = U_{ad}, \quad U_{bc} = U_{dc}$$

即

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_4$$

$$I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_3$$

两式相除，得

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

或者

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

上两式表明，当电桥达到平衡时，电桥相邻臂电阻之比相等，或者说电桥相对臂电阻之

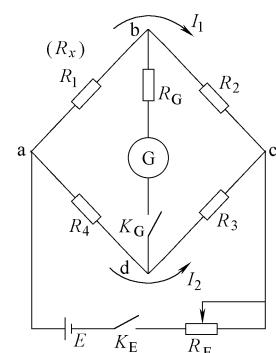


图 1-10 惠斯顿电桥原理图

乘积相等。若 R_2 、 R_3 、 R_4 为已知，则待测电阻 R_1 (R_x) 可由下式求出：

$$R_1 = \frac{R_2}{R_3} R_4 = R_x$$

通常称上式为平衡条件，称 R_1 为测量臂， R_2 、 R_3 为比例臂， R_4 为比较臂。所以电桥由四臂（测量臂、比较臂和比例臂）、检流计和电源三部分组成。与检流计串联的限流电阻 R_G 和电键 K_G 都是为在调节电桥平衡时保护检流计，不使其在长时间内有较大电流通过而设置的。

比值的选取：令比值 $R_2 / R_3 = N$ ，则

$$R_1 = N \cdot R_4 = R_x$$

通常取 N 为 10 的整数次方，例如，取 N 等于 0.01、0.1、1、10、100、1000 等。这样，就可以很方便地计算出 R_x 。

2. (QJ23 型直流电阻电桥) 使用方法

(1) 准备：卸下电桥背面铭牌，在电池盒内装入 2 节 1.5V 2 号干电池和 1 节 9V 叠层电池，装上铭牌；检查外接指零仪接线端钮是否正确短接；对指零仪进行机械调零，使指针与表面“0”线重合。

(2) 测量电阻前可用万用表粗测一下电阻值。

(3) 将被测电阻器接到“RX”两接线柱上。

(4) 将 B、G 打到内接（“B”用来接通电源，“G”用来接通检流计）。然后调零。

(5) 根据待测电阻的粗略值（万用表测出的数值），选定合适的比例臂的数值，使电桥平衡时，比较臂的四个旋钮都能用上（测出四位有效数字）。若 R_x 为数百欧，比例臂应选 0.1。若 R_x 为数千欧。比例臂应选 1。其他以此类推。

(6) 将比例臂旋钮旋到 R_x 的粗略值上。

进行测量，先按下按钮“B”，再点按按钮“G”（即按一下立即放开），迅速观察检流计指针偏转方向，指针如偏向“+”一边，则应增加 R_s 值，如偏向“-”一边，则应减小 R_s 的值。直到点按按钮“G”时，检流计指针不动为止。此时比例臂 R_4 的数值乘以倍率 (R_2/R_3) 的数值就是被测电阻 R_x 的数值。即被测电阻器阻值为 $R_x = \text{倍率} \times \text{测量盘示值}$ 。

(7) 测量时，有时会遇到下列情况：旋钮置于某一位置时，检流计指针都不指零。如旋钮置于 4 时，指针偏向“+”方 2 格，旋钮置 5 时，指针偏向“-”方 6 格，说明测量值最后一位在 4 和 5 之间某一值，这时可根据指针“+”“-”偏转格数大小来取其中一个值。如上述情况，则取 4 不取 5。

(8) 使用完毕应将“B”和“G”按钮松开。（先放开“B”，再放开“G”。这样操作可防止在测量电感性元时损坏检流计）。

3. 注意事项

(1) 在进行阻值测量时，不应让“ $\times 1000\Omega$ ”测量盘示值为 0，使测量盘有足够的读数位数，以确保测量精度。

(2) 指零仪偏转方向：电桥设计时规定，指零仪偏转方向与测量盘旋转方向（顺时针或逆时针）应保持一致；

(3) 测量过程中“B”、“G”按钮应尽量间断使用，以延长桥路干电池寿命。若指零仪工作电流为 3mA，由于没有自动关机功能，故其平均功耗极小。

(4) 对电动机、变压器等带电感的电阻进行测量时，必须先按“B”后按“G”；测量完毕，应先放“G”后放“B”，防止电感反电动势损坏指零仪。

(5) 电桥只能对无源（不带电）电阻器进行测量；严禁市电或其他电源从电桥输入端引入，以防烧坏电桥。

(6) 干电池容量判别。

1) 指零仪电池：当点按“B”或“G”按钮（注意不要同时按！），即指零仪只接通电源而无信号输入时，若指零仪指针瞬间抖动并立即回零，则为正常；若发现指针偏转后不回零，则表示9V电池已用完，应更换叠层电池。

2) 桥路电池：若电桥灵敏度明显下降，则应更换2号干电池。

(7) 电桥使用完毕，将“B”和“G”按钮复位，桥路电源切断，指零仪电源自动切断。电桥若长期不用，应将所有干电池取出。

1.6 绝缘电阻表的使用

绝缘电阻表俗称摇表，是一种常用的电工测量仪表。绝缘电阻表主要用来检查电气设备、家用电器或电气线路对地及相间的绝缘电阻，以保证这些设备、电器和线路工作在正常状态，避免发生触电伤亡及设备损坏等事故。绝缘电阻表大多采用手摇发电机供电，故又称摇表。它的刻度是以兆欧（ $1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$ ）为单位的。

1. 绝缘电阻表的结构

常用的手摇式绝缘电阻表，主要由磁电系流比计、手摇直流发电机和三个接线柱（即线路端L、接地端E、屏蔽端G）组成，输出电压有500V、1000V、2500V、5000V几种。随着电子技术的发展，现在也出现用干电池及晶体管直流变换器把电池低压直流转换为高压直流，来代替手摇发电机的绝缘电阻表（如ZC30型）。图1-11是ZC25-4型绝缘电阻表外形、表盘、接线端子。

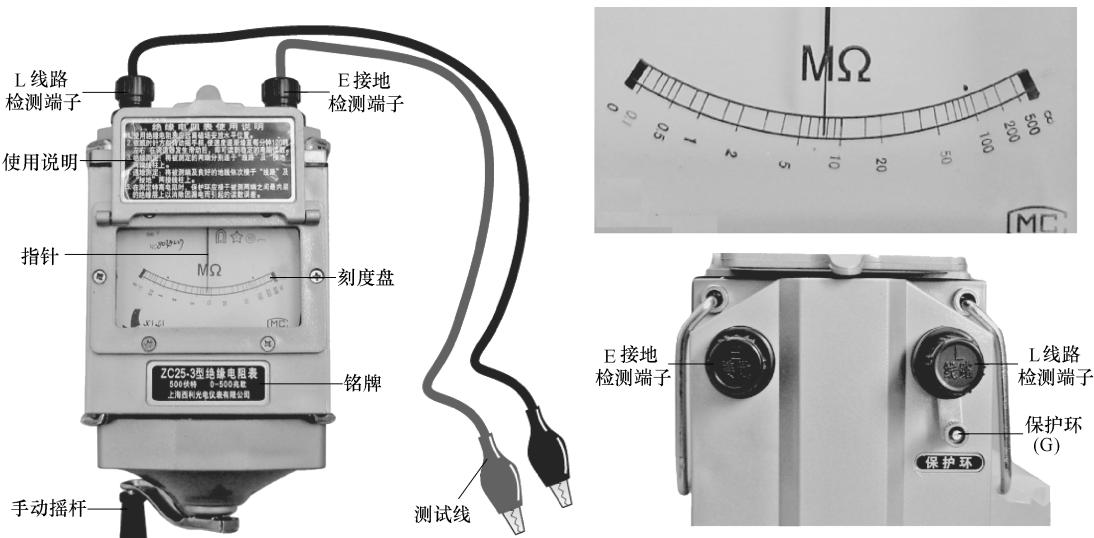


图1-11 绝缘电阻表外形、表盘、接线端子

2. 绝缘电阻表的使用

(1) 选用符合电压等级的绝缘电阻表。一般情况下，额定电压在 500V 以下的设备，应选用 500V 的绝缘电阻表；额定电压在 500V 以上的设备，选用 1000~2500V 的绝缘电阻表。

(2) 测量只能在设备不带电，也没有感应电的情况下进行。

(3) 测量前应将绝缘电阻表进行一次开路和短路试验，检查绝缘电阻表是否良好。将两连接线开路，摇动手柄，指针应指在“ ∞ ”处，再把两连接线短接一下，轻轻摇动手柄指针应指在“0”处，指针指零时要立即停摇，若继续摇动，绝缘电阻表可能会因表内线圈过热而损坏。符合上述条件者为良好，否则不能使用。

(4) 测量绝缘电阻时，一般只用“L”和“E”端，但在测量电缆对地的绝缘电阻或被测设备的漏电流较大时，就要使用“G”端，并将“G”端接屏蔽层或外壳。接线如图 1-12 所示。

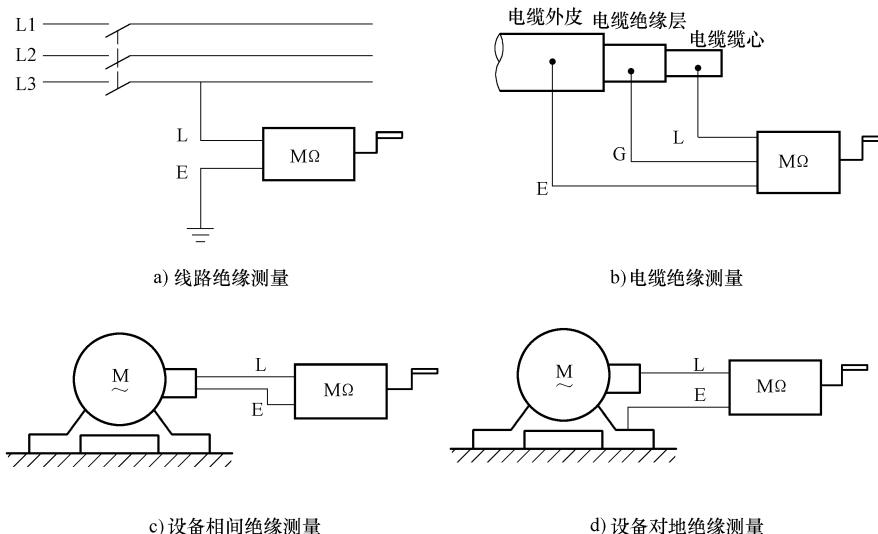


图 1-12 绝缘电阻表接线

(5) 线路接好后，可按顺时针方向转动摇把，摇动的速度应由慢而快，当转速达到每分钟 120 转左右时，保持匀速转动，并且要边摇边读数，不能停下来读数。

(6) 测量电动机定子绕组及照明线路的绝缘电阻时，测量结果要大于 $0.5\text{ M}\Omega$ 才为合格，低于 $0.5\text{ M}\Omega$ 视为不合格，特殊场所也可按相应技术条件值判定是否合格。

(7) 测量完毕，待绝缘电阻表停止转动和被测物接地放电后方能拆除连接导线。

3. 注意事项

因绝缘电阻表本身工作时产生高电压，为避免人身及设备事故必须注意以下几点：

(1) 不能在设备带电的情况下测量其绝缘电阻。测量前被测设备必须切断电源和负载，并进行放电；已用绝缘电阻表测量过的设备如要再次测量，也必须先接地放电。绝缘电阻表应远离强磁场，水平放置。

(2) 与被测设备的连接导线应用绝缘电阻表专用测量线或选用绝缘强度高的两根单芯多股软线，两根导线切忌绞在一起，以免影响测量准确度。

(3) 测量过程中，如果指针指向“0”位，表示被测设备短路，应立即停止转动手柄。

(4) 绝缘电阻表未停止转动之前或被测设备未放电之前，严禁用手触及。测量结束时，要对大电容设备进行放电。

1.7 接地电阻表的使用

接地电阻表用于直接测量各种接地装置的接地电阻值，也可以用于测量一般低电阻。常用的有ZC-8型等，分别有三端钮式和四端钮式，其中四端钮式还可以用来测试土壤电阻率。

这种仪表由手摇发电机、相敏整流放大器、电位器、电流互感器及检流计组成，全部封在便携式外壳内。其外形如图1-13所示。

1. 使用方法

(1) 校准。将电阻表水平放置，检查检流计指针是否在中心刻度线上，如有偏离，就要进行调零。

(2) 埋设探测针。将探测针按图1-14方式连接，并使接地体、电位探测针、电流探测针在一条直线上并且彼此相距20m。



图1-13 接地电阻表

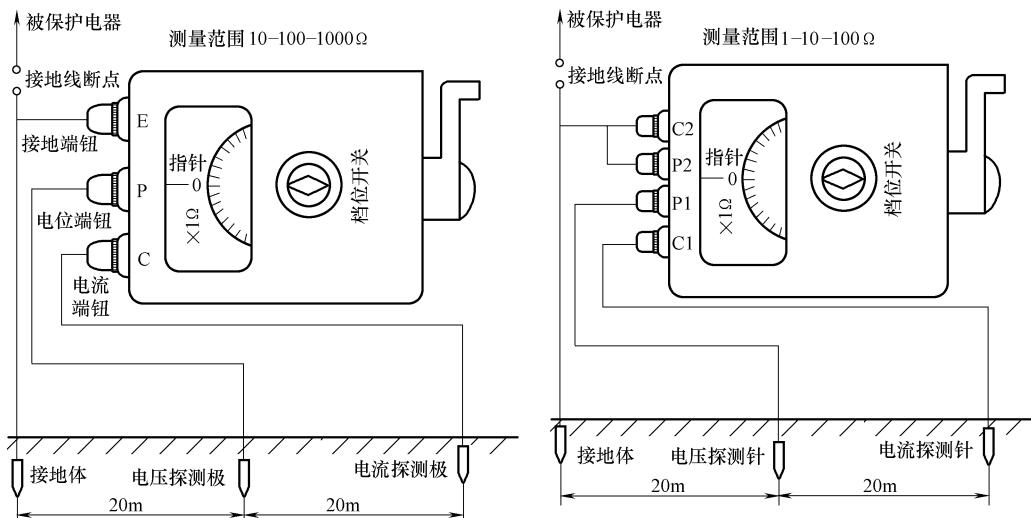


图1-14 接地电阻的测量

(3) 将倍率标度置于最大倍数，慢慢转动手柄，同时旋转测量标度盘，使检流计指针指在中心线上。

(4) 当检流计指针接近中心线时，加快发电机手柄的转速，使其达到每分钟120转左右，转动同时调整测量标度盘，使指针指在中心线上。

(5) 如果测量读数太小，应将倍率标度置于较小倍数，再重新测量，以得到正确电阻值。

(6) 用测量的读数乘以倍率标度的倍数即是所测的接地电阻值。

(7) 如果是用来测量导体的电阻，则应按图1-15所示方法进行接线，测量方法同上。

2. 注意事项

(1) 当检流计的灵敏度过高时, 可将电位探测针插入土壤浅一些, 当检流计灵敏度不够时, 可沿电位探测针注水湿润。

(2) 当大地干扰信号较强时, 可以适当改变发电机的转速, 以获得平稳的读数。

(3) 当接地极和电流探测针之间的距离大于 40m 时, 电位探测针可以插在离开中间位置直线几米以内, 测量误差可忽略不计。当接地极和电流探测针之间的距离小于 40m 时, 则应将电位探测针插在直线中间位置。

(4) 测量时, 接地体要和被保护的设备断开连接。

1.8 电参数测量仪

在电工测量中, 除了要测量电压、电流之外, 还需要测量功率因数和功率的大小, 为此会经常用到功率表和功率因数表, 可以分别用来测量上面的两个参数。在这里, 我们介绍一种电参数测量仪, 电参数测量仪有三相 (例如 PF300) 和单相 (例如 PF1200) 两种, 可以同时测量上述的四个参数以及频率, 使用起来非常方便。下面我们以单相 PF1200 型为例来说明电参数测量仪的使用。

PF1200 型测量仪能够准确测量单相用电设备的电压、电流、功率、功率因数、频率等参数的有效值, 电压测量范围 500/150V, 电流测量范围 20/4/0.8A, 能够自动切换, 测量结果采用发光二极管数字显示。其面板如图 1-16 所示。

1. 使用方法

(1) 功能及显示。按键 PF/Hz: 在面板左下角功率因数/频率显示窗口下面有 PF/Hz 显示功能转换键, 其操作为

按键 → PF → Hz → PF → Hz

初始状态显示 PF, 每按一次 PF/Hz 键, 交替显示功率因数和频率。

采样: 闪烁时表示仪器正在采样测量

V: 电压显示 A: 电流显示 PF: 功率因数显示

Hz: 频率显示 W: 功率显示

(2) 按图 1-17 所示方法接线 (任一种接线方法都可以), 并仔细检查接线是否正确。

(3) 线路无误后, 接通电源, 预热几分钟。

(4) 对各参数进行正确读数。

(5) 交替按下 PF/Hz 键, 观察功率因数和频率。

2. 常见故障及排除

(1) 仪表开机后数码管不亮

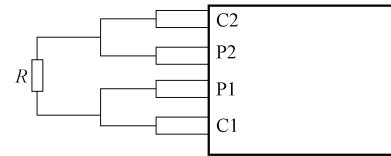


图 1-15 测量导体的电阻

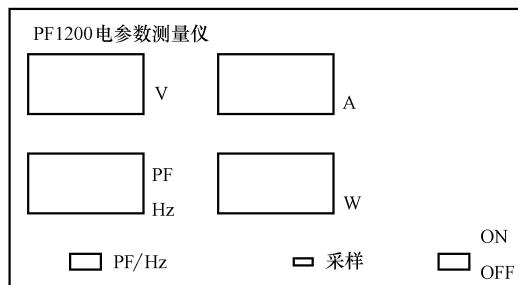


图 1-16 PF1200 型测量仪面板

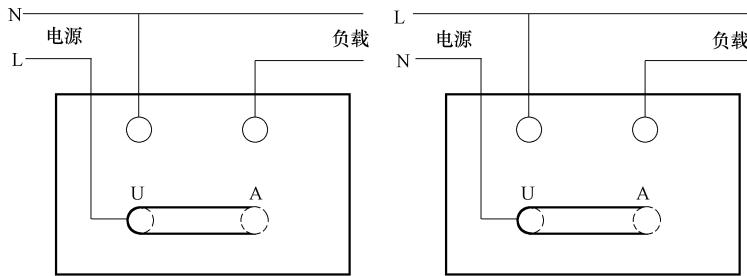


图 1-17 电参数测量仪接线图

处理措施：检查电源线连接是否可靠，熔丝是否烧坏。

(2) 开机后仪表不能正常工作

处理措施：关机后再重新开机。

1.9 单相及三相电度表的使用

电度表是用来进行电能计量的仪表，根据用户的不同，可以分为单相电度表和三相电度表。其中三相电度表又有三相有功电度表和三相无功电度表两种。

1.9.1 单相电度表

现在一般的家用单相电度表有两种，一种是机械式的，又叫感应式，还有一种是电子式的。区别很明显，机械式的有个铝盘会在用电时转动，而电子式的通常是 LED 显示屏直接显示已用度数，通常还有一个红色的 LED 在闪烁，闪烁的频率与用电功率成正比。我们以机械式电度表为例来说明其用法。

1. 基本结构

机械式电度表内主要由电压线圈、电流线圈、铝质表盘、永久磁体、硅钢片铁心、机械传动机构、电度数的显示码盘、校准装置等组成。

2. 接线方式及工作原理

机械式电度表下部从左到右有四个接线孔用于接进线、出线，从左到右依次编号为 1、2、3、4，其中 1、3 为进线，2、4 为出线；1 接相线，3 接零线。其接线图如 1-18 所示。

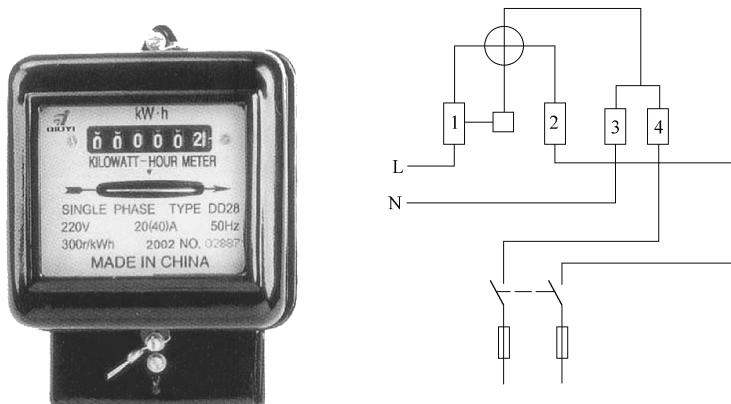


图 1-18 单相电度表

在内部，1、3孔接电压线圈，因为220V的电压是直接加在线圈两端的，所以该线圈的漆包线细而长；1、2孔串接一个电流线圈，用电电流会全部经过这个线圈，所以导线较粗，圈数很少，一般就绕几圈。电压线圈与电流线圈均绕在一个硅钢片叠成的铁心上，铝质表盘就从这个铁心之间通过，表盘与磁路方向垂直。

由上面的介绍知道，电压线圈是一直通电的，而电流线圈决定用户是否用电，不用电的话就没有电流，用电时就有电流。当用电时，电压线圈与电流线圈产生的两个电磁场在铝质表盘上相互作用，会产生推动铝质表盘从左向右的正向转动，从而带动齿轮机构并最终带动机械数字码盘实现用电计量，线圈的圈数、硅钢片的导磁性、绕线方式、铝盘厚度、间隙、齿轮组等，经设计并校正后，确保铝盘转速正比于用电功率。

另外，紧贴铝质表盘表面还会附加一个永久磁体，这个磁体是一种磁性很强的磁钢，它主要有两个作用，一方面是平衡铝盘转速，确保转速与功率成正比，其次是确保当用户关闭用电器后铝盘迅速停止转动，潜动小。

铝质表盘在永久磁体形成的强磁场间转动，会产生涡流，该涡流又受到强磁场力作用，而作用力将产生阻碍铝盘转动的反向力矩。在用电时，这个反向力矩会与电压线圈、电流线圈产生的驱动力矩平衡，保证匀速转动；停止用电时因为没有了驱动力矩，铝盘将迅速停下来。

3. 主要参数

机械式电度表主要有额定电压、额定电流、准确度等级、转/千瓦时等参数。

4. 使用电度表的注意事项

- (1) 不允许将电度表安装在负载小于10%额定负载的电路中，以免造成计量不准确。
- (2) 不允许电度表经常在超过额定负载值125%的电路中使用，以免造成仪表损坏。

1.9.2 三相电度表

三相电度表用于测量三相交流电路中电源输出（或负载消耗）的电能。它的工作原理与单相电度表完全相同，只是在结构上采用多组驱动部件和固定在转轴上的多个铝盘的方式，以实现对三相电能的测量。

1. 分类

根据被测电能的性质，三相电度表可分为有功电度表和无功电度表；由于三相电路的接线形式的不同，又有三相三线制和三相四线制之分。下面简要介绍一下三相有功电度表的一些特性。

2. 原理

三相四线制有功电度表与单相电度表不同之处，只是它由三个驱动元件和装在同一转轴上的三个铝盘所组成，它的读数直接反映了三相所消耗的电能。也有些三相四线制有功电度表采用三组驱动部件作用于同一铝盘的结构，这种结构具有体积小、重量轻、减小摩擦力矩等优点，有利于提高灵敏度和延长使用寿命等。

三相三线制有功电度表采用两组驱动部件作用于装在同一转轴上的两个铝盘（或一个铝盘）的结构，其原理与单相电度表完全相同。

至于三相无功电度表的结构和原理读者可参阅有关资料书籍。

3. 外形及接线图 (见图 1-19)

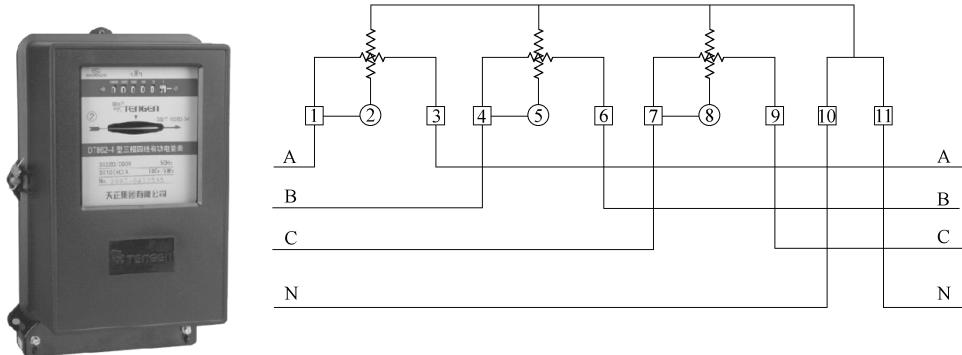


图 1-19 三相电度表

4. 注意事项

(1) 三相电度表接线较复杂，一定要按照接线图认真接线，否则会出现电表反转的现象，其原因可能是：一是电压的相序不对；二是如果有电流互感器的话，是电流互感器接线 (K1、K2 反接) 反了。

(2) 凡经互感器接入的电度表，其读数要乘以互感器的变比才是实际读数值。

(3) 电度表要垂直安装，倾斜度不能大于 2°。

1.10 其他常用电工工具

常用电工工具是指一般专业电工经常使用的工具。对电气操作人员而言，能否熟悉和掌握电工工具的结构、性能、使用方法和规范操作，将直接影响工作效率和工作质量以及人身安全。

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，检测范围为交流 50~500V，有钢笔式、螺丝刀式和组合式多种。低压验电器由金属笔尖、降压电阻、氖管、弹簧、笔尾金属体等部分组成，如图 1-20 所示。

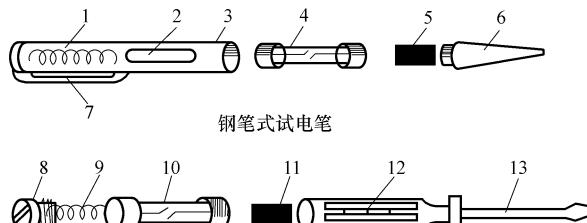


图 1-20 低压验电器结构图

1、9—弹簧 2、12—观察孔 3—笔身 4、10—氖管 5、11—电阻

6—笔尖探头 7—金属笔挂 8—金属螺钉 13—刀体探头

使用低压验电器时，必须注意正确的握法操作。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），否则由于错误操作会将带电体误判为非带电体。一定要注意手指不能触及笔尖的金属部分，以免造成触电事故。这样，当用电笔测试带电体时，电流经带电体、电笔、人体及大地形成通电回路，只要带电体与大地之间的电位差超过 60V 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试电笔是否正常发光，检验其可靠性，确保使用的验电器完好，应注意正确的握法（见图 1-21）。

(2) 应注意避免在明亮的光线下操作，因为明亮的光线下往往不容易看清氖泡发出的辉光，在室外使用时要注意遮光并仔细观察。

(3) 电笔的笔尖虽与螺丝刀形状相同，但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，用试电笔测试中性线时，氖泡会发亮；在三相三线制线路中，用试电笔测试三根相线，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，但不可超过额定电压使用。

(6) 验电时，应使验电器逐渐靠近被测物体，直至氖管发亮，不可直接接触被测体。

2. 高压验电器

高压验电器是用来检查高压线路和高压电力设备是否带电的工具，是变电所常用的最基本的安全用具。老式高压验电器都依靠氖泡发光指示有电，新式继电器一般有音响及灯光作为指示。还有一种风车式高压验电器。高压验电器由金属工作触点、小氖泡、电容器、手柄等组成。验电是保证在停电的电气设备上操作的工作人员安全的重要手段之一，高压验电器及使用方法如图 1-22 所示。



图 1-22 高压验电器及使用方法

验电有关规定介绍如下：

- (1) 使用高压验电器必须穿戴高压绝缘手套、绝缘鞋，并有专人监护。
- (2) 投入使用的高压验电器必须是经电气试验合格的验电器，高压验电器必须定期试验，确保其性能良好。
- (3) 在使用验电器之前，应首先检验验电器是否良好。在确认有电的设备上进行检验，禁止使用电压等级不对应的验电器进行验电，以免现场测验时得出错误的判断。
- (4) 对线路的验电应逐相进行，使用时应特别注意手握的部位不能超过护环。
- (5) 在使用高压验电器时，必须一人操作一人监护。
- (6) 验电时让验电器顶端的金属工作触点逐渐靠近带电部分，至氖泡发光或发出音响报警信号为止，不可直接接触电气设备的带电部分。只有在氖管不亮时，才能与被测量的物体直接接触。
- (7) 在电容器组上验电，应待其放电完毕后再进行。
- (8) 在室外使用高压验电器时，必须在气候良好的情况下进行，在雨雾及潮湿天气下不宜使用。
- (9) 验电时如果需要使用梯子，应使用绝缘材料的牢固梯子，并应采取必要的防滑措施，禁止使用金属材料梯。

3. 钳子

电工常用的钳子主要有钢丝钳、尖嘴钳、剥线钳及斜口钳等多种（见图 1-23）。钢丝钳有 150mm、175mm、200mm 及 250mm 等多种规格，可根据内线或外线工种需要进行选购。尖嘴钳主要用来剪切线径较细的单股与多股线导线以及给单股导线接头弯圈、剥塑料绝缘层等。剥线钳为内线电工、电机修理、仪器仪表电工常用的工具之一，主要用于塑料、橡胶绝缘电线、电缆芯线的剥皮等。

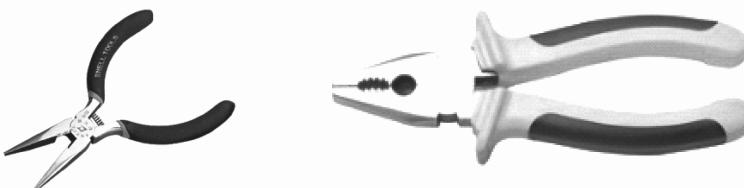


图 1-23 尖嘴钳、钢丝钳

钳子的使用方法：

- (1) 使用钳子时应该用右手操作，将钳口朝内侧，便于控制钳切部位，用小指伸在两钳柄中间来抵住钳柄，张开钳头，这样分开钳柄较灵活。
- (2) 钳子的刀口可用来剖切软电线的橡皮或塑料绝缘层，也可用来剪切电线、铁丝，刀口在剪较粗的铁丝时，应用刀刃绕表面来回割几下，然后只需轻轻一扳，铁丝即被切断。侧口可以用来切断较粗的电线、钢丝等较硬的金属线。
- (3) 用尖嘴钳弯曲导线接头时，应先将线头向左折，然后紧靠螺杆依顺时针方向向右弯曲就可以了。
- (4) 钳子的绝缘塑料管耐压为交流 500V，可以带电剪切单根电线，但不可用钳子剪切双股带电电线，会导致短路。使用中切忌乱扔，以免损坏绝缘塑料护套，切勿把钳子当锤子

使用。

(5) 一般情况下，钳子的强度有限，所以不能够用它操作力量所达不到的工作。特别是型号较小的或者普通尖嘴钳，用它弯折强度大的棒料板材时都可能将钳口损坏。

(6) 剥线钳为维修电工、电机修理、仪器仪表电工常用的工具之一。它适用于单根塑料、橡胶绝缘电线、电缆芯线的剥皮。使用方法是：将待剥皮的线头置于钳头的合适的刃口中，用手将两钳柄一捏，然后一松，绝缘皮便与线芯脱开，剥线时要注意线头长度，还要防止夹伤手指。

4. 电工刀

电工刀（见图1-24）是用来剖削和切割电工器材的常用工具。在使用电工刀时，刀口应朝外切削，使用完毕随即把刀口折入刀柄内。使用时要特别注意，电工刀的刀柄是不绝缘的，不得在带电体上使用，以防触电。同时，要注意保护好电工刀的刀尖，应避免在过硬物体上划损或碰缺，经常保持刀口的锋利。



图1-24 电工刀

电工刀的使用方法：

(1) 电工刀是电工常用的一种切削工具。它由刀片、刀刃、刀把、刀挂等构成。不用时，把刀片及时收缩到刀把内，以免伤手。

(2) 用电工刀剖削电线绝缘层时，可把刀略微翘起一些，用刀刃的圆角抵住线芯。切忌把刀刃垂直对着导线切割绝缘层，因为这样容易割伤电线线芯。

(3) 导线接头之前应把导线上的绝缘剥除。用电工刀切剥时，千万别割伤线芯。常用的剥削方法有分段剥落法和斜削法。

(4) 新买的电工刀没有刀口，需要打磨。电工刀的刀刃部分要磨得锋利才好用，但不可太锋利，太锋利容易削伤线芯。磨得太钝，则无法剥削绝缘层。

(5) 对双芯护套线的外层绝缘的剥削，可以用刀刃对准两线芯的中间部位，把导线一剖为二，此时要注意刀口放正以免割伤线芯。

本章小结

本章主要讲述了常用电工仪表和常用电工工具的使用，主要内容有：

(1) 万用电表、交流毫伏表、示波器、钳形电流表、直流电桥、绝缘电阻表、接地电阻表、电参数测量仪、单相及三相电度表的简单原理和正确的使用方法，各种仪表的使用注意事项。

(2) 其他常用电工工具的使用。

习题

一、判断题

1. 接地绝缘电阻表是用来测量绝缘电阻的。（ ）
2. 测量绝缘电阻，被测设备应处于停电状态。（ ）
3. 用万用表测量线路中的某一电阻时，线路必须与电源断开，不能在带电的情况下测量电阻值。（ ）
4. 用钳形电流表测量电动机的额定电流时，可以三相相线同时钳入钳口内，其额定电

流为读数除以 3。()

5. 用钳形电流表测量电流时，被测线路应断电进行。()
6. 钳形电流表可以测量高压线路的电流。()
7. 用万用表交流电压档测出的值是交流电压的最大值。()
8. 绝缘电阻表输出的电压是直流电压。()
9. 万用表是电压表的一种，可用来测量交、直流电压。()
10. 用万用表测量交流电压或电流时应注意极性。()
11. 摆动绝缘电阻表手柄的速度没有具体要求，可快可慢。()
12. 用钳表测量 5A 以下的小电流时，可把电源线在钳口绕 10 匝，此时，实际电流值等于钳表读数除以 10。()

二、问答题

1. 万用表由哪些部分组成，通常有什么功能？
2. 绝缘电阻表在使用过程中应注意哪些事项？
3. 简述校验绝缘电阻表的方法。
4. 钳表在使用过程中应注意哪些事项？
5. 常用电工测量仪表有哪几类？
6. 怎样用钳形表测量小电流？
7. 单相电度表测量负载的电能怎样接线，试画出原理图。
8. 三相四线制电度表测量小电流负载的电能怎样接线，试画出原理图。
9. 三相四线制电度表测量大电流负载的电能怎样接线，试画出原理图（用电流互感器）。



第2章 三相交流异步电动机及电气控制

学习目标

- 熟悉交流电动机的构造、工作原理、使用方法
- 掌握三相交流异步电动机定子绕组的维修
- 掌握常用低压电器的原理、构造及使用方法
- 掌握电动机的常用控制线路
- 掌握单相电动机的基本知识

电动机是把电能转换成机械能的设备。在机械、冶金、石油、煤炭、化学、航空、交通、农业以及其他各种工业中，电动机被广泛地应用。随着工业自动化程度不断提高，需要采用各种各样的控制电动机作为自动化系统的元件，人造卫星的自动控制系统中，电动机也是不可缺少的。此外在国防、文教、医疗及日常生活中（现代化的家电工业中），电动机也越来越多地应用起来。三相异步电动机是应用最为广泛的一种电动机。

2.1 三相交流异步电动机的结构

2.1.1 结构

三相交流异步电动机是一种将电能转化为机械能的电力拖动装置。根据电动机转子结构的不同，其可以分为笼型异步电动机（见图 2-1）和绕线转子异步电动机（图 2-2）。不论哪一种电动机，都主要由两部分组成：固定部分称为定子，旋转部分称为转子。另外还有端盖、风扇、罩壳、机座、接线盒等。

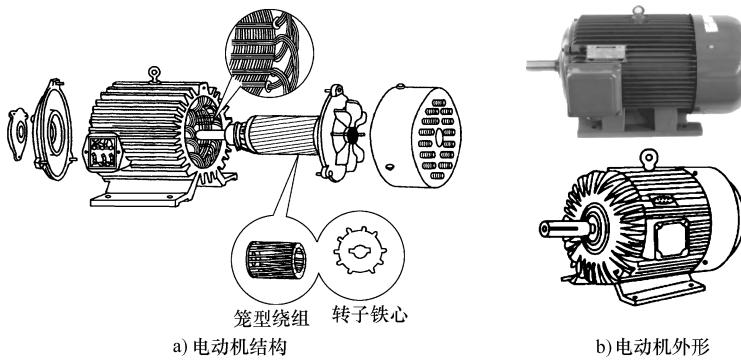


图 2-1 三相笼型异步电动机结构示意图

电动机的定子是静止不动的部分，主要由定子铁心、定子绕组和机座三部分组成。定子绕组镶嵌在定子铁心中，定子绕组是电动机的电路部分。定子绕组由绝缘导线绕制而成的线

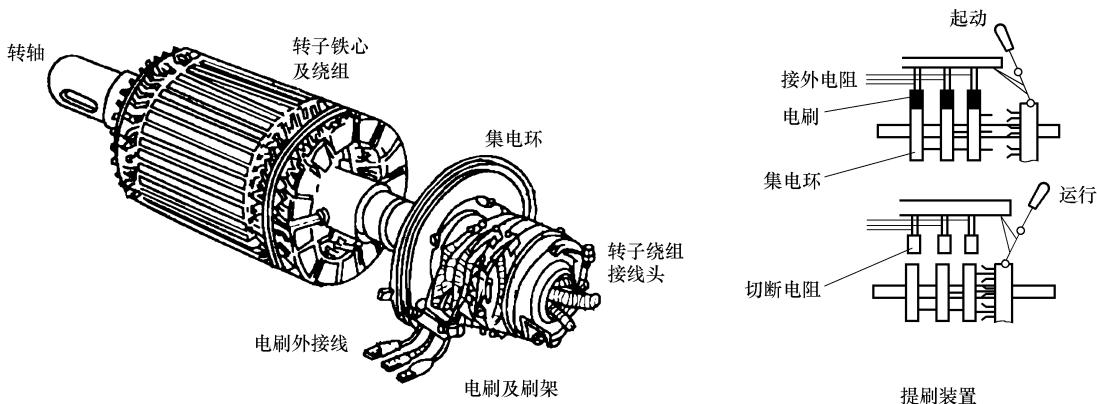


图 2-2 三相绕线转子异步电动机结构示意图

圈按照一定的规律组成，按照嵌线规则嵌放在定子槽内，嵌放时要注意保持两者之间的绝缘。接通三相交流电源后，产生旋转磁场，实现电磁能量转换。定子铁心对材料的要求是既要有良好的导磁性能，又要尽量降低涡流损耗，故一般用0.3~0.5mm厚表面有绝缘层的硅钢片叠压而成。定子铁心的内圆冲有沿圆周均匀分布的槽，用来嵌放定子绕组。机座的作用主要是固定和支撑定子铁心，来作为电动机的机械支撑。电动机运行时，因内部损耗而发生的热量通过铁心传给机座，再由机座表面散发到周围空气中。为了增加散热面积，电动机的外表面设计成散热片状。

转子是旋转部分，由转子铁心、转子绕组、转轴、风扇等组成。转子绕组的作用是感应电动势，通过电流而产生电磁转矩。转子绕组有笼型和绕线型，笼型转子是在转子铁心槽里插入铝条，再将全部铝条两端焊在两个铝端环上而组成；绕线型转子绕组与定子绕组一样，由线圈组成绕组放入转子铁心槽里。笼型与绕线型转子两种电动机虽然结构不一样，但工作原理是一样的。转子铁心是电动机磁路的重要组成部分，转子绕组镶嵌在铁心里，其一般采用0.5mm厚的硅钢片叠压而成，片间彼此绝缘，以减小涡流损耗。转轴是支撑转子的重量、传递转矩、输出机械功率的主要部件。

在定子与转子之间有一定的气隙，一般在0.2~2mm。气隙越大，电动机的功率因数就越低，为此，气隙不应过大。但气隙过小会造成装配困难和电动机运行不可靠，因此对转子轴承要求较高。

2.1.2 三相异步电动机的工作原理

下面以三相二极电动机为例。

如图2-3所示，在三相定子绕组中通入三相交流电，产生如图箭头所示方向的旋转磁场，且随三相电流的时间变化一周，磁场在空间也旋转一周。

图2-4是三相交流异步电动机转子转动的原理图（图中只画出两根导条），当磁极沿顺时针方向旋转时，磁极的磁力线切割转子导条，导条中就产生感应电动势。电动势的方向由右手定则来确定。因为运动是相对的，假如磁极不动，转子导条沿逆时针方向旋转，则导条中同样也能产生感应电动势。在电动势的作用下，闭合的导条中就会产生电流。该电流与旋转磁极的磁场相互作用，而使转子导条受到电磁力F，电磁力的方向可用左手定则确定。进

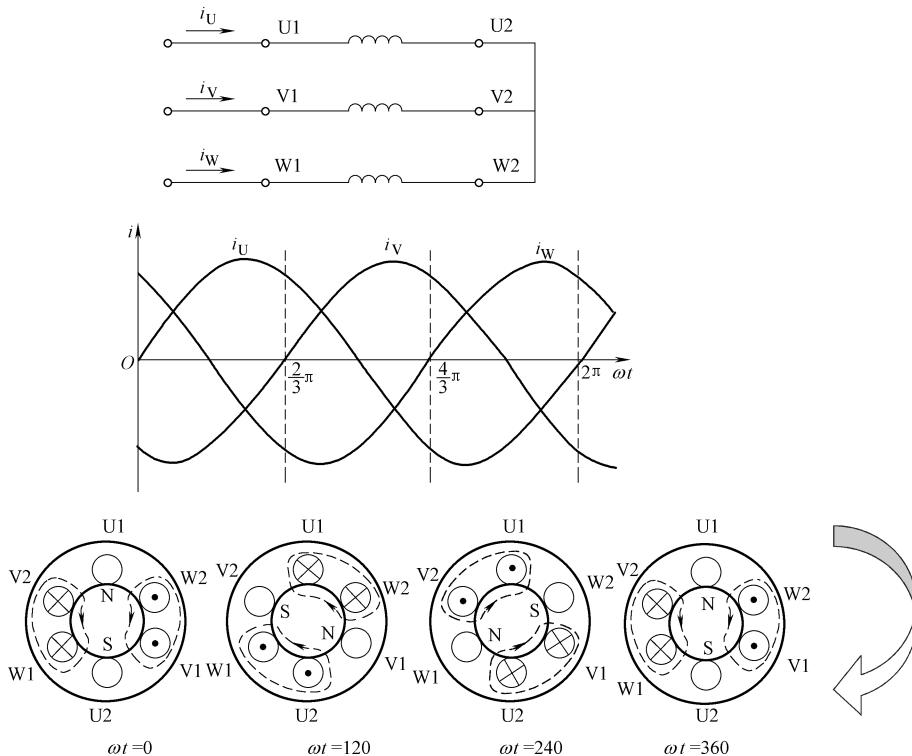


图 2-3 三相异步电动机的旋转磁场

而由电磁力产生电磁转矩，转子就转动起来。当改变三相电流中任意两相的相序时，就改变了旋转磁场的方向，电动机就会反转起来。

综上所述可得其工作原理为：如果在定子绕组中通入三相对称电流，则定子内部产生某个方向转速为 n_0 的旋转磁场。这时转子导体与旋转磁场之间存在着相对运动，切割磁力线而产生感应电动势。电动势的方向可根据右手定则确定。由于转子绕组是闭合的，于是在感应电动势的作用下，绕组内有电流流过。转子电流与旋转磁场相互作用，便在转子绕组中产生电磁力 F 。力 F 的方向可由左手定则确定。该力对转轴形成了电磁转矩 T_e ，使转子按旋转磁场方向转动。异步电动机的定子和转子之间能量的传递是靠电磁感应作用的，故异步电动机又称感应电动机。

转子的转速 n 不可能与旋转磁场的转速 n_0 相同，因为一旦转子的转速和旋转磁场的转速相同，两者便无相对运动，转子也不能产生感应电动势和感应电流，也就没有电磁转矩了。只有两者转速有差异时，才能产生电磁转矩，驱使转子转动。可见，转子转速 n 总是略小于旋转磁场的转速 n_0 。正是由于这个关系，这种电动机被称为异步电动机。

三相交流电产生的旋转磁场的转速

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \text{ 转/分 (r/min)}$$

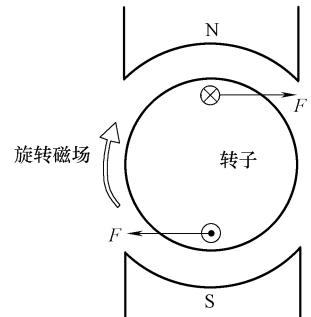


图 2-4 电动机转子转动的原理图

式中 f_1 ——电源频率；
 p ——磁极对数。

转差为电动机的同步转速 n_0 与转子的转速 n 之差，转差率 s 为转差与同步转速 n_0 的比值 ($0 \leq s \leq 1$)。

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$$

2.1.3 三相异步电动机的铭牌及绕组连接方式

应了解电动机铭牌数据的含义。

例：Y132M-4 型三相异步电动机。

三相异步电动机					
型号	Y132M-4	功率	7.5 kW	频率	50Hz
电压	380V	电流	15.4A	接法	△
转速	1440r/min	绝缘等级	B	工作方式	连续
年 月 日				× × × 电机厂	

型号：表示电动机类型、用途和技术特征的代号。

Y132M-4

Y——三相笼型异步电动机，名称代号的意义；

132——机座中心高 132mm；

M——机座长度代号 (L：长机座，M：中机座，S：短机座)；

4——磁极数 (磁极对数 $p=2$)。

根据电动机绕组所用的绝缘材料、按使用时的最高允许温度而划分的不同等级 (见表 2-1)。

表 2-1 常用绝缘材料的等级及其最高允许温度

绝缘等级	A	E	B	F	H	C
最高允许温度/℃	105	120	130	155	180	>180

1. 工作方式

(1) 连续工作方式 S1。额定状态下可长期连续工作。如机床、水泵和通风机等设备所用的异步电动机。

(2) 短时工作 S2。额定情况下，持续运行时间不允许超过规定的时限，否则会使电动机过热。短时工作分为 10、30、60、90 (min) 等 4 种。

(3) 断续工作 S3。可以间歇方式运行。如吊车、起重机等。

2. 定子绕组的连接

定子绕组由三相对称绕组构成，有星形联结和三角形联结 (见图 2-5) 两种。

首端 (U1、V1、W1)，末端 (U2、V2、W2)。

通常 4kW 以下电动机多采用星形联结，4kW 及以上电动机多采用三角形联结。

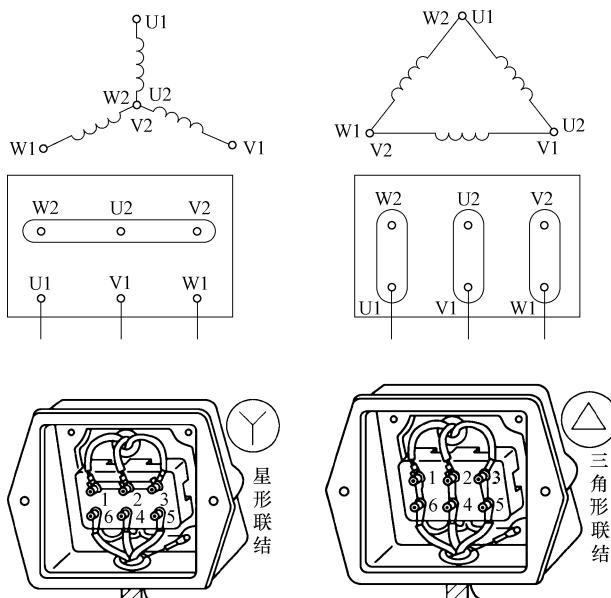


图 2-5 定子绕组的星形 (Y) 和三角形 (△) 联结

2.2 三相交流异步电动机定子绕组的维修

2.2.1 基本知识

(1) 线圈有效边：线圈的直线部分，起切割磁力线的作用（见图 2-6）。

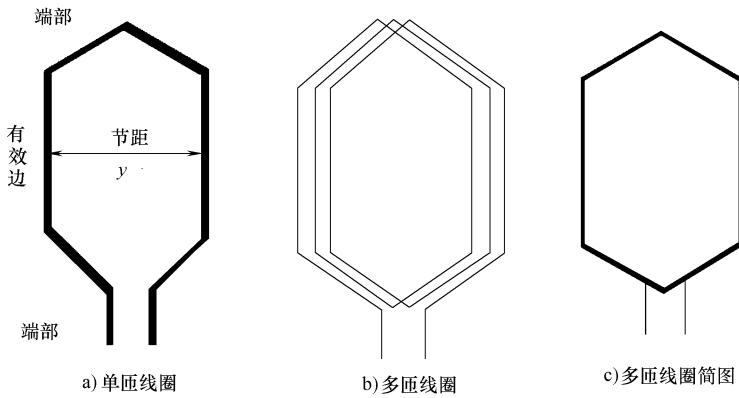


图 2-6 线圈

端部：线圈的棱角部分。

(2) 极距 τ ：每个磁极所占定子圆周表面的距离用槽数表示。

$$\tau = \frac{z}{2p} \quad (\text{槽})$$

式中 z ——电动机定子总槽数；

p ——电动机定子磁极对数。

(3) 节距 y : 单个线圈两条有效边所跨占的槽数，电动机在维修时一般取短距。

$$\begin{cases} y > \tau, \text{长距} \\ y = \tau, \text{等距} \\ y < \tau, \text{短距} \end{cases}$$

(4) 电角度：反映各线圈、绕组间的相对位置。

$$\text{电角度} = p \times \text{机械角度}(360^\circ)$$

(5) 槽距角 α : 相邻两槽间的电角度。

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot p}{z}$$

(6) 每极每相槽数 q : 每个磁极下每相绕组所占的槽数。

$$q = \frac{z}{2p \cdot m}$$

(7) 相带。每个磁极下每相绕组所占电角度。三相异步电动机每对磁极占 360° ，一个磁极 180° ，分为三相，故每相占 60° 电角度，有 60° 相带之称。

(8) 极相组。将一对磁极下属于同相的 q 个线圈按一定方式连接后组成的线圈组。

2.2.2 三相四极 24 槽单层链式绕组

每个槽仅嵌一条有效边的绕组称为单层绕组，线圈数等于总槽数的一半。

(1) 接线原则。

- 1) 端部连线尽可能短，尽量减少交叉；
- 2) 定子铁心平分 $2p$ 个磁极，共 $6p$ 个相带；
- 3) 每相绕组首（或末）端之间彼此互隔 120° 电角度。
- (2) 在三相四极 24 槽单层链式绕组中，由上述公式可知 $\tau=6$ 槽， $y=5$ 槽（取短距）， $\alpha=30^\circ$ ， $q=2$ 槽。
- (3) 嵌线工艺：嵌一空一吊二。
- (4) 定子绕组展开图（见图 2-7）。

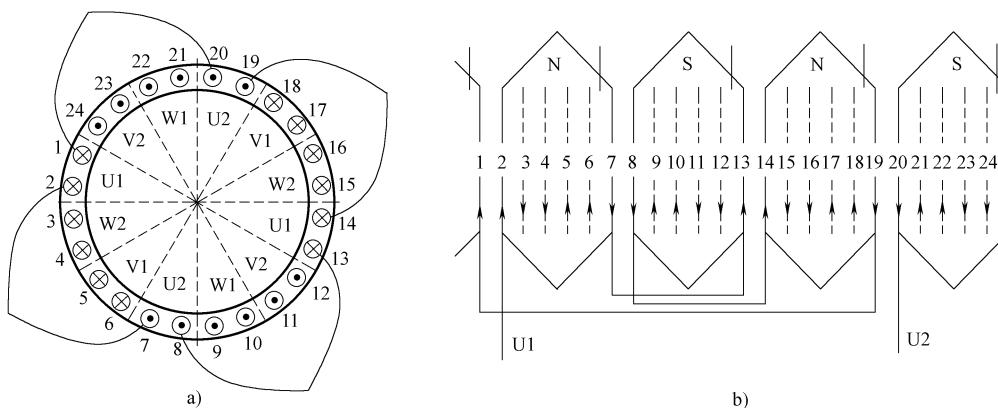


图 2-7 三相四极 24 槽单层链式绕组

第一个线圈的第一个边可以从任意槽开始嵌线，然后遵循嵌线工艺，将各线圈嵌入相应定子槽内。各个线圈嵌好后，按照尾接尾、头接头的顺序依次将 U 相的各线圈连接起来，再按照三相相位差 120° 的原则，分别定位 V1 和 W1，并将 V 相和 W 相的连接线接起来。在本例中，U1 端子为第二槽，则 V1 为第六槽，W1 为第十槽。同样方法，U2 端子为二十槽，V2 为第二十四槽，W2 为第四槽。三相的头尾分别相隔四槽 (120°)。

2.2.3 三相两极 24 槽单层同心式绕组

(1) 由上述公式可知

$\tau = 12$ 槽， $y_大 = 11$ 槽（取短距）， $y_小 = 9$ 槽， $\alpha = 15^\circ$ ， $q = 4$ 槽。

同心式节矩不等， $y_大 = 11$ 槽（取短距） $y_小 = 9$ 槽。线圈端连接线短，磁势波形较好，但嵌线较难。

(2) 嵌线工艺：嵌二空二吊四。

(3) 定子绕组展开图（见图 2-8）

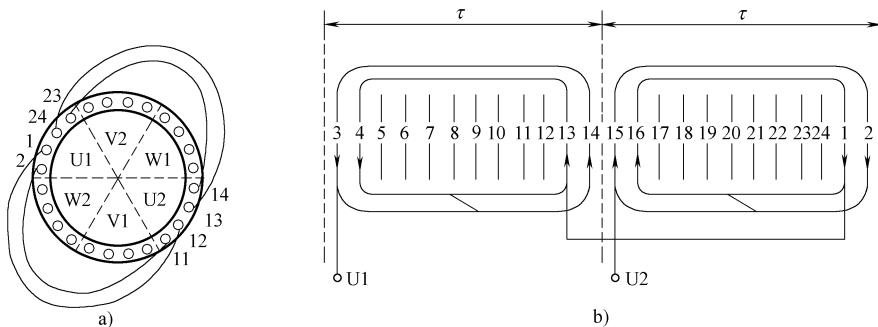


图 2-8 三相两极 24 槽单层同心式绕组

在连接时要注意正确的连接方式，连接方式为：大尾接小头，小尾接小尾。

第一个线圈的第一个边可以从任意槽开始嵌线，然后遵循嵌线工艺，将各线圈嵌入相应定子槽内。各个线圈嵌好后，按照大尾接小头，小尾接小尾的顺序依次将 U 相的各线圈连接起来，再按照三相相位差 120° 的原则，分别定位 V1 和 W1，并将 V 相和 W 相的连接线接起来。在本例中，U1 端子为第三槽，则 V1 为第十二槽，W1 为第二十槽。同样方法，U2 端子为十五槽，V2 为第二十三槽，W2 为第七槽。三相的头尾分别相隔八槽 (120°)。

电动机定子绕组连接完成后，再对端口进行整形，使其呈喇叭口状（见图 2-9）。

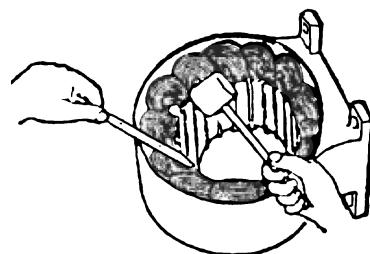


图 2-9 整形

2.3 三相异步电动机定子绕组首尾端的判别方法

U1、V1、W1 分别为三相绕组的首端，U2、V2、W2 分别为三相绕组的尾端，三相共六个抽头按一定规律接在电动机外壳接线盒的六个接线柱上。当电动机接线板损坏或电动机绕

组重新绕制后，定子绕组的六个线头无法分清时，千万不能盲目接线，以免电动机在运行时引起三相电流不平衡，使电动机不能正常运转或由于电动机定子绕组过热而烧毁等严重事故。因此必须正确分清六个线头的首尾端后，才允许接线。

常用的定子绕组首尾端的判别方法主要有以下几种。

1. 用低压交流电源和白炽灯判别首尾端

判别时的接线方式及步骤如下：

(1) 用万用表的电阻 $R \times 10$ 档，分别找出三相绕组各相的两个线头（见图 2-10a）。

(2) 先任意给三相绕组的线头分别编号为 U1 和 U2、V1 和 V2、W1 和 W2。并把 V1、U2 连接起来，构成两相绕组串联（见图 2-10b）。

(3) U1、V2 线头上接一只灯泡。

(4) W1、W2 两个线头上接通 36V 交流电源，如果灯泡发亮，说明线头 U1、U2 和 V1、V2 的编号正确。如果灯泡不亮，则把 U1、U2 或 V1、V2 中任意两个线头的编号对调一下即可。

(5) 再按上述方法对 W1、W2 两线头进行判别。

2. 用万用表或微安表判别首尾端（见图 2-11）

判别时的接线方式及步骤如下：

(1) 先用万用表的 $R \times 10\Omega$ 电阻档，分别找出三相绕组各相的两个线头。

(2) 给各相绕组假设编号为 U1 和 U2、V1 和 V2、W1 和 W2。

(3) 按所示接线，将三相绕组假设的三首三尾分别连在一起，接上万用表，用毫安档或微安档测量。用手转动电动机转子，如万用表指针不动或有轻微摆动，则证明假设的编号是正确的；若指针有偏转，说明其中有一相首尾端假设编号不对。应逐相对调重测，直到万用表指针不动为止，此时连在一起的三首三尾正确。

3. 干电池法（见图 2-12）

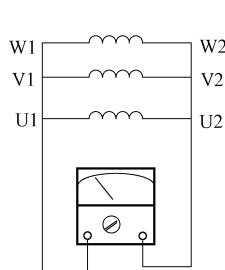


图 2-11 用万用表判别首尾端

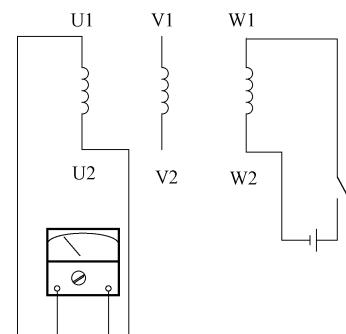


图 2-12 干电池法判别首尾端

判别时的接线方式及步骤如下：

(1) 先用万用表的 $R \times 10\Omega$ 电阻档，分别找出三相绕组各相的两个线头。并将各相绕组端子分别假设为 U1 和 U2、V1 和 V2、W1 和 W2。

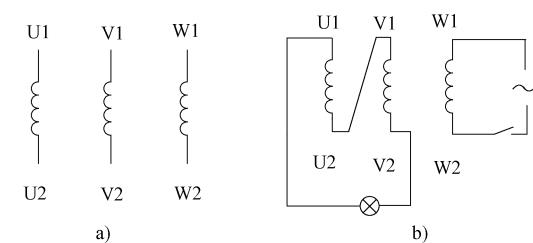


图 2-10 用低压交流电源和灯泡判别首尾端

(2) 将万用表的档位打在直流微安档或直流毫伏档。并用1.5V电池按图接线。

(3) 在开关合上瞬间，仔细注意万用表指针摆动的方向，若指针摆向正方向的一边，则电池正极与万用表黑表笔所接的端子同为首端或末端；如指针反向摆动，则表明电池正极与万用表红表笔所接的端子同为首端或末端。

(4) 再将电池和开关接另外一相的两个端子，进行测量，就可正确判别各相的首尾端。

2.4 常用低压电器的认识

控制电器按其工作电压的高低，以交流1200V、直流1500V为界，可划分为高压电器和低压电器两大类。

低压电器是一种能根据外界的信号和要求，手动或自动地接通、断开电路，以实现对电路或非电对象的切换、控制、保护、检测、变换和调节的元件或设备，是电力拖动自动控制系统的基本组成元件。

总的来说，低压电器可以分为配电电器（如刀开关、断路器等）和控制电器（如接触器、继电器等）两大类。在工业、农业、交通、国防以及民用部门中，大多数采用低压供电，因此电器元件的质量将直接影响到低压供电系统的可靠性。

配电电器：主要用于配电线路，对电路及设备进行通断、保护以及转换电源及负载。

控制电器：用于各种控制电路及控制系统中，控制受电设备并使其达到预期工作状态要求的电器。

低压电器技术的发展，取决于国民经济发展和现代工业自动化发展的需要，以及新技术、新工艺、新材料研究与应用，目前正朝着高性能、高可靠性、小型化、数字化、模块化、组合化和零部件通用化的方向发展。

2.4.1 开关类电器

刀开关是手动控制电器中最简单而使用又较广泛的一种低压电器。

刀开关在电路中的作用是：隔离电源，以确保电路和设备维修的安全；分断负载，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。

转换开关用于主电路将一组已连接的器件转换到另一组已连接的器件。采用刀开关结构形式的转换开关称为刀形转换开关；采用叠装式触点元件组合成旋转操作的，称为组合开关。

常用的刀开关有HD型单掷刀开关、HS型双掷刀开关（刀形转换开关）、HR型熔断器式刀开关、HZ型组合开关、HK型闸刀开关、HY型倒顺开关和HH型铁壳开关等。

刀开关通常由绝缘底板、动触刀、静触座、灭弧装置和操作机构组成。只作为电源隔离用的刀开关则不需要灭弧装置。动作过程是刀开关通过动触点—闸刀与底座上的静触点—刀夹座相契合（或分离），以接通（或分断）电路。其中以熔断体作为动触点的，称为熔断器式刀开关，简称刀熔开关（见图2-13）。

通常要求刀开关在电路中能承受短路电流产生的电动力和热的作用。因此，刀开关的结构在设计时，要确保在很大的短路电流作用下，触刀不会弹开、焊牢或烧毁。

(1) 刀开关的使用方法、结构（见图2-14）及图形符号（见图2-15）如下。

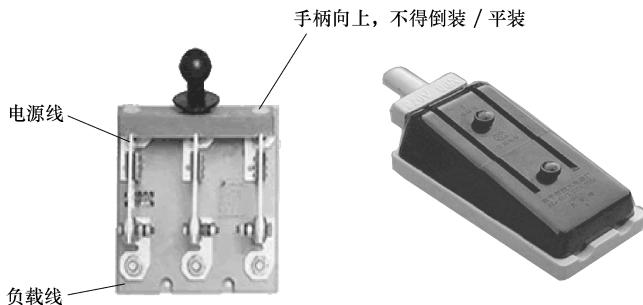


图 2-13 刀开关的使用方法

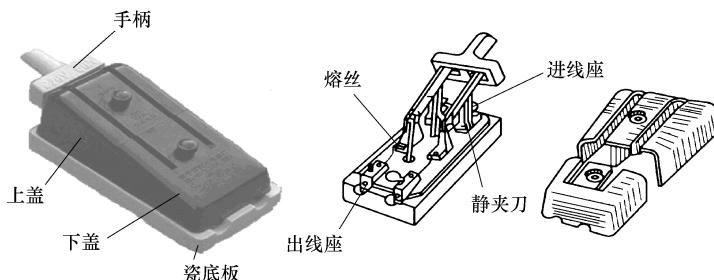


图 2-14 刀开关的结构图

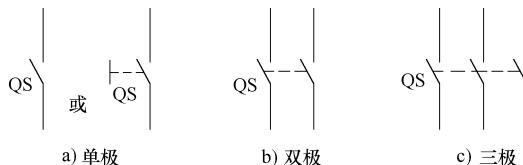


图 2-15 图形符号

(2) 铁壳开关（见图 2-16）

(3) 断路器是低压配电网络和电力拖动系统中非常重要的一种电器，它集控制和多种保护功能于一身。除了能完成接触和分断电路外，还能对电路或电气设备发生的短路、严重过载及欠电压等进行保护，同时也可以用于不频繁地起动电动机。

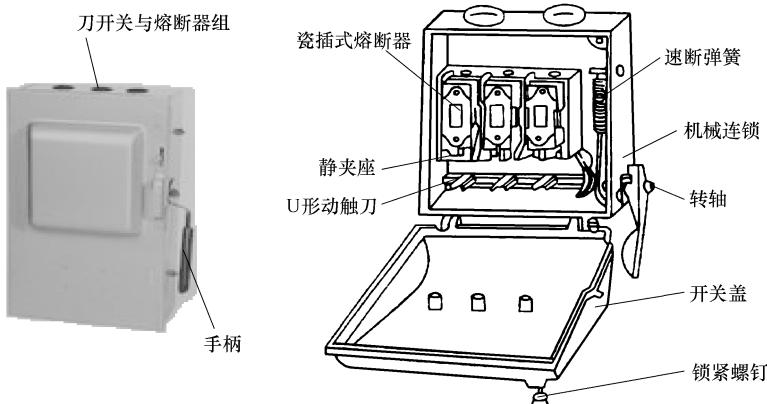


图 2-16 铁壳开关构造

如图 2-17 所示，2 为断路器三副主触点（动触点及静触点），它们串联在被控制的三相电路中。当按下接触按钮时，外力使锁扣 3 克服反力弹簧 1 的斥力，将固定在锁扣上的动触点与静触点闭合，并由锁扣锁住搭钩 4，使开关处于接通状态。

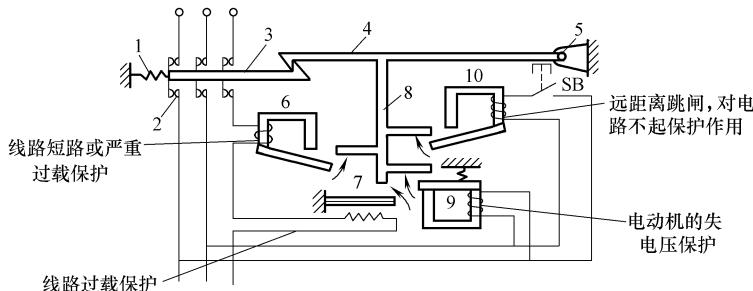


图 2-17 断路器原理图

1—反力弹簧 2—主触点 3—锁扣 4—搭钩 5—轴 6—过电流脱扣器
7—过载脱扣器 8—杠杆 9—欠电压、失电压脱扣器 10—分励脱扣器

当开关接通电源后，电磁脱扣器、热脱扣器及欠电压脱扣器若无异常反应，开关运行正常。当线路发生短路或出现严重过载电流时，短路电流超过瞬时脱扣整定电流值，电磁脱扣器 6 产生足够大的吸力，将衔铁吸合并撞击杠杆 8，使搭钩 4 绕转轴座 5 向上转动与锁扣 3 脱开，锁扣在反力弹簧 1 的作用下将三副主触点分断，切断电源。

当线路发生一般性过载时，过载电流虽不能使电磁脱扣器动作，但能使热元件 7 产生一定热量，促使双金属片受热向上弯曲，推动杠杆 8 使搭钩与锁扣脱开，将主触点分断，切断电源。

欠电压脱扣器 9 的工作过程与电磁脱扣器恰恰相反，当线路电压正常时欠电压脱扣器 9 产生足够的吸力，克服拉力弹簧的作用将衔铁吸合，衔铁与杠杆脱离，锁扣与搭钩才得以锁住，主触点方能闭合。当线路上电压全部消失或电压下降至某一数值时，欠电压脱扣器吸力消失或减小，衔铁被拉力弹簧拉开并撞击杠杆，主电路电源被分断。同样道理，在无电源电压或电压过低时，断路器也不能接通电源。

检验可靠性分断电路时，按下试验按钮即可（见图 2-18）。



图 2-18 断路器外形及符号

2.4.2 主令电器

主令电器是指自动控制系统中用于发送控制指令的电器。

常用的主令电器包括：按钮、行程开关和万能转换开关。

主令电器型号说明如图 2-19 所示。

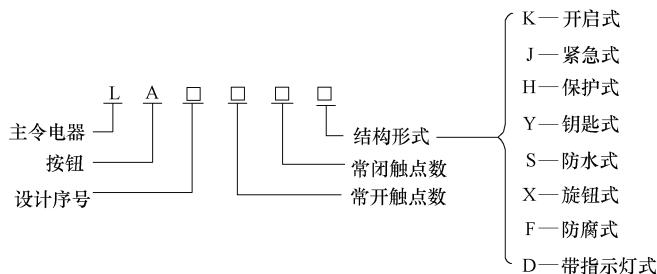


图 2-19 主令电器型号

1. 控制按钮

控制按钮（SB）是在低压控制电路中，用于手动短时接通或断开小电流控制电路的开关（见图 2-20）。

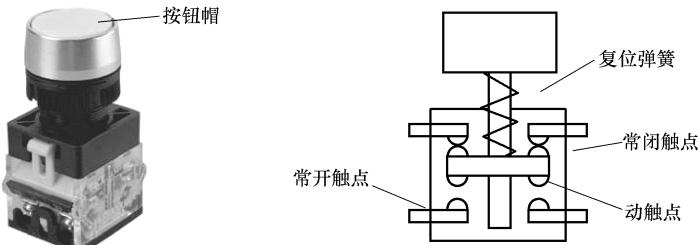


图 2-20 控制按钮结构

控制按钮按用途和结构分有如下 3 种。

(1) 起动按钮：常开触点。按钮帽用绿色表示。手指按下按钮帽，常开触点闭合；手指松开，常开触点复位。

(2) 停止按钮：带常闭触点。按钮帽用红色表示。手指按下按钮帽，常闭触点断开；手指松开，常闭触点复位。

(3) 复合按钮：具有常开触点和常闭触点。手指按下按钮帽，常闭触点断开，常开触点闭合；手指松开，常开触点和常闭触点复位。常用来实现联锁控制，电气符号如图 2-21 所示。

2. 行程开关

行程开关（SQ）又称限位开关，用于控制机械设备运动部件的运动方向、行程大小或进行位置保护。在实际生产中，将行程开关安装在预先安排的位置，当装在生产机械运动部件上的模块撞击行程开关时，行程开关的触点动作，实现电路的切换。因此，行程开关是一种根据运动部件的行程位置来切换电路的电器，它的作用原理与按钮类似。行程开关广泛用于各类机床和起重机械，用以控制其行程、进行终端限位保护。在电梯的控制电路中，还利用行程开关来控制开关轿门的速度、自动开关门的限位，轿厢的上、下限位保护。



图 2-21 按钮的图形符号

行程开关按其结构可分为直动式、滚轮式、微动式和组合式。行程开关的外形及工作原理图如图 2-22 所示。



图 2-22 行程开关的外形及工作原理

1—滚轮 2—弹簧 3—动触点 4—静触点

3. 万能转换开关

万能转换开关是一种多档位、多段式、控制多回路的主令电器，当操作手柄转动时，带动开关内部的凸轮转动，从而使触点按规定顺序闭合或断开。

万能转换开关是由多组相同结构的触点组件叠装而成的多回路控制电器。它由操作机构、定位装置和触点等三部分组成（见图 2-23）。

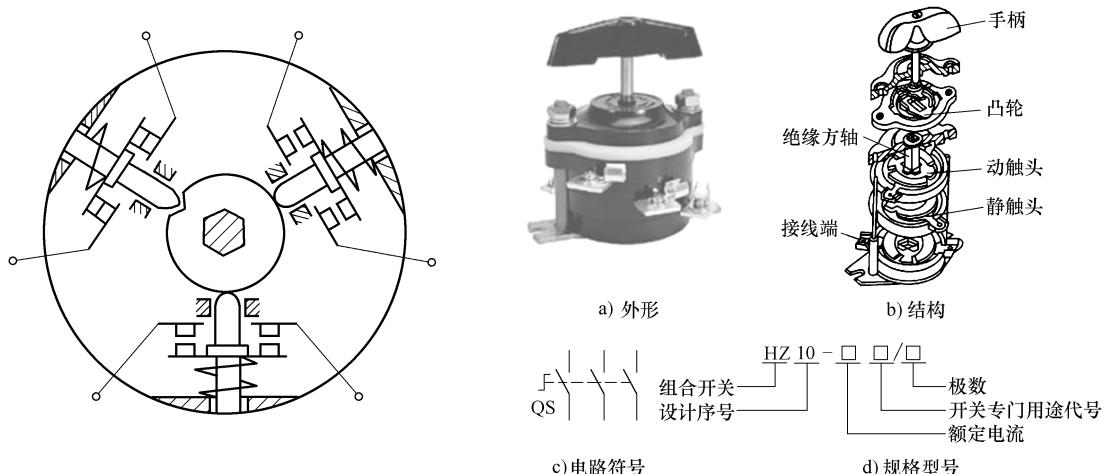


图 2-23 万能转换开关单层结构示意图

万能转换开关主要用于各种控制线路的转换、电压表、电流表的换相测量控制、配电装置线路的转换和遥控等。万能转换开关还可以用于直接控制小容量电动机的起动、调速和换向。

2.4.3 熔断器

1. 结构

熔断器 (FU) 串联安装在电路中，是保证电路安全运行的电器元件。当电路发生故障

或异常时，伴随着电流不断升高，就有可能损坏电路中的某些重要器件或贵重器件，也有可能烧毁电路甚至造成火灾。若电路中正确地安装了熔断器，那么，熔断器就会在电流异常升高到一定值时，自身熔断切断电流，从而起到保护电路安全运行的作用。

熔断器是最简单有效的保护电器，主要用作短路保护和严重过载保护。

熔断器由熔体、熔管和熔座三部分组成。

熔体：熔体常做成丝状或片状，制作熔体的材料一般有铅锡合金和铜。小电流的电路中：铅合金或锌制成的熔体（熔丝）。对大电流的电路：铜或银制成片状或笼状的熔体。

熔管：安装熔体，作熔体的保护外壳并在熔体熔断时兼有灭弧作用。

熔座：起固定熔断管和连接引线作用。

2. 分类（见图 2-24）

(1) 插入式熔断器。它常用于 380V 及以下电压等级的线路末端，作为配电支线或电气设备的短路保护用。



图 2-24 熔断器外形

(2) 螺旋式熔断器。熔体的上端盖有一熔断指示器，一旦熔体熔断，指示器马上弹出，可透过瓷帽上的玻璃孔观察到，安装时将指示器向外安装。底座中间的接线端子接电源的进线，螺旋部分接电源的出线。

(3) 自复熔断器。采用金属钠作熔体，在常温下具有高电导率。当电路发生短路故障时，短路电流产生高温使钠迅速汽化，汽态钠呈现高阻态，从而限制了短路电流。当短路电流消失后，温度下降，金属钠恢复原来的良好导电性能。自复熔断器只能限制短路电流，不能真正分断电路。其优点是不必更换熔体，能重复使用（见图 2-25）。

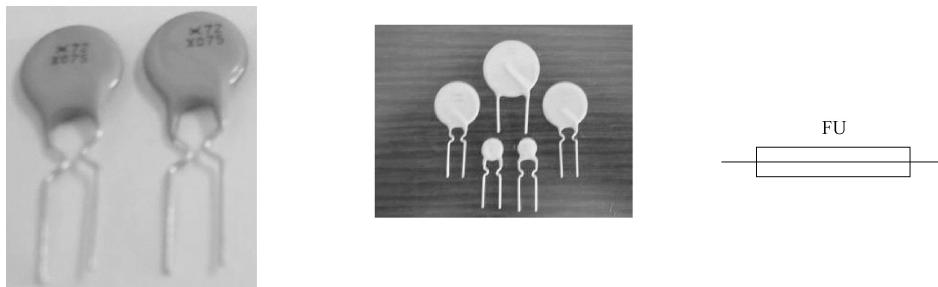


图 2-25 自复熔断器

2.4.4 交流接触器

交流接触器（KM）的外形、构造及符号如图 2-26 所示。

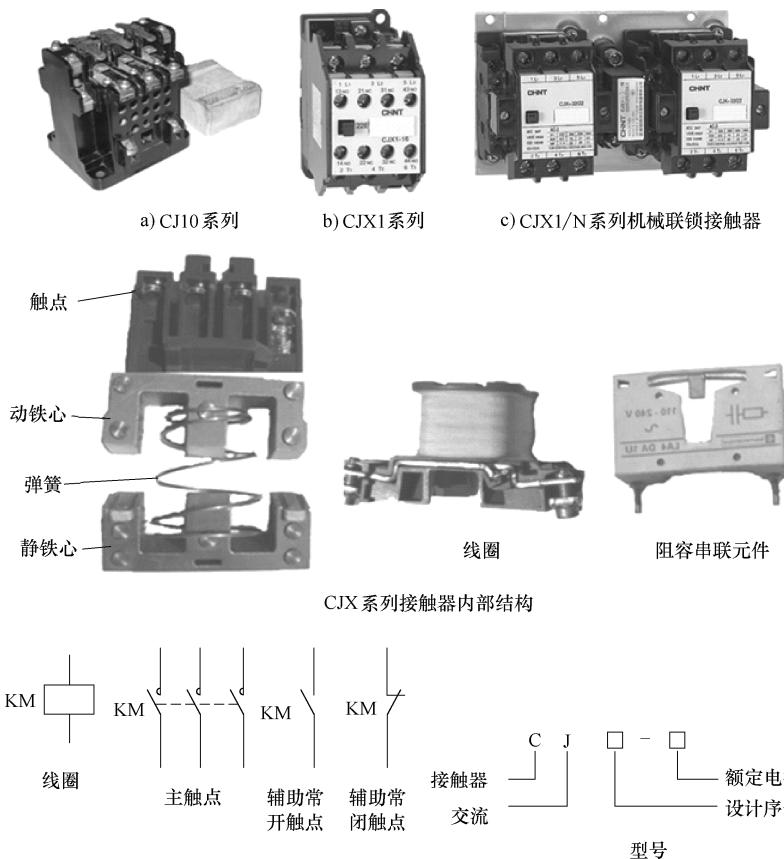


图 2-26 交流接触器外形、构造及符号

作用：用来频繁地接通或分断带有负载的主电路，可以实现远距离控制。

应用：主要控制电动机，有欠（零）电压保护功能。

1. 外形及内部结构

接触器主要由电磁系统、触点系统、灭弧系统及其他部分组成。

(1) **电磁系统：**电磁系统包括电磁线圈和铁心，是接触器的重要组成部分，依靠它带动触点的闭合与断开。

(2) **触点系统：**触点是接触器的执行部分，包括主触点和辅助触点。主触点的作用是接通和分断主回路，控制较大的电流，而辅助触点是在控制回路中，满足各种控制方式的要求。

在没有接通电源或无外力作用时，保持断开的触点称为常开触点，保持闭合的触点称为常闭触点。

(3) **灭弧系统：**灭弧装置用来保证触点断开电路时，产生的电弧能可靠地熄灭，减少电弧对触点的损伤。为了迅速熄灭断开时的电弧，通常主电流大于 20A 的接触器都装有灭弧装置。

(4) **其他部分：**有绝缘外壳、弹簧、短路环、传动机构等。

2. 工作原理

当线圈通电时，静铁心线圈产生电磁吸力，将动铁心吸合，由于触点系统是与动铁心联

动的，因此动铁心带动三组动触片同时运行，常开触点闭合，从而接通电源。当线圈断电时，吸力消失，动铁心联动部分依靠弹簧的反作用力而分离，使主触点断开，切断电源（见图 2-27）。为防止铁心振动，需加短路环。

3. 使用时的注意事项

(1) 按负载容量选择接触器主触点的额定电流，应大于或等于被控回路的额定电流，有 5A、10A、20A、40A、60A、100A、150A 等。

(2) 对于吸引线圈的电压等级和电流种类，应考虑控制电源的要求，使其等于控制回路的电源电压。

交流接触器线圈的额定电压有 36V、110（127）V、220V、380V 等几种。

(3) 要正确选择接触器主触点的额定电压。

(4) 还要考虑辅助触点的数量与种类、操作频率、机械寿命、电寿命等。

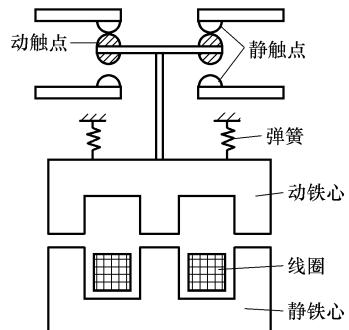


图 2-27 交流接触器工作原理

2.4.5 热继电器

热继电器（FR）主要用于电力拖动系统中电动机负载的过载保护。电动机在实际运行中，常会遇到过载情况，但只要过载不严重、时间短，绕组不超过允许的温升，这种过载是允许的。但如果过载情况严重、时间长，则会加速电动机绝缘的老化，缩短电动机的使用年限，甚至烧毁电动机，因此必须对电动机进行过载保护。

1. 外形及结构

热继电器的外形如图 2-28 所示。热继电器主要由热元件、双金属片和触点组成，在使用时串联在电路中。如图 2-29 所示，热元件由发热电阻丝制成。双金属片由两种热膨胀系数不同的金属辗压而成，当双金属片受热时，会出现弯曲变形。使用时，把热元件串接于电动机的主电路中，而常闭触点串接于电动机的控制电路中。



图 2-28 热继电器外形

热继电器是利用电流的热效应原理来工作的。当电动机正常运行时，热元件产生的热量虽能使双金属片弯曲，但还不足以使热继电器的触点动作。当电动机过载时，电流增大，发热量大，双金属片弯曲位移增大，推动导板使常闭触点断开，从而切断电动机控制电路以起保护作用，如图 2-30 所示。热继电器动作后一般不能自动复位，要等双金属片冷却后按下手动复位按钮复位。热继电器动作电流的调节可以借助调节旋转凸轮（电流调节旋钮），使其位于不同的位置来实现。

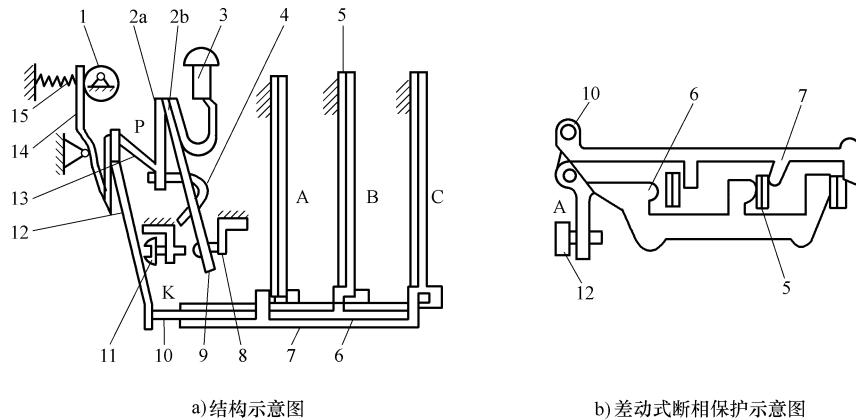


图 2-29 热继电器构造

1—电流调节凸轮 2—片簧 (2a, 2b) 3—手动复位按钮 4—弓簧片 5—主金属片 6—外导板
 7—内导板 8—常闭静触点 9—动触点 10—杠杆 11—常开静触点 (复位调节螺钉)
 12—补偿双金属片 13—推杆 14—连杆 15—压簧

2. 工作原理

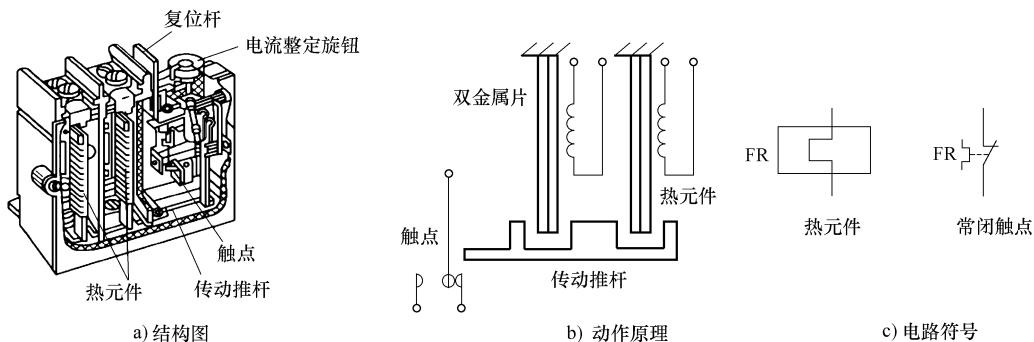


图 2-30 热继电器工作原理

3. 热继电器的主要技术参数

- (1) 额定电压：热继电器能够正常工作的最高电压值，一般为交流 220V、380V、600V。
- (2) 额定电流：热继电器的额定电流主要是指通过热继电器的电流。
- (3) 额定频率：一般而言，其额定频率按照 50Hz 设计。
- (4) 整定电流范围：整定电流的范围由本身的特性来决定。它描述的是在一定的电流条件下热继电器的动作时间和电流的平方成正比。

4. 热继电器的型号及选用

常用的热继电器主要有 JR1、JR2、JR9、JR10 等系列（见图 2-31）。有些型号的热继电器还具有断相保护功能。

热继电器的断相保护功能是由内、外推杆组成的差动放大机构提供的。当电动机正常工作时，通过热继电器热元件的电流正常，内外两推杆均向前移至适当位置。当出现电源一相

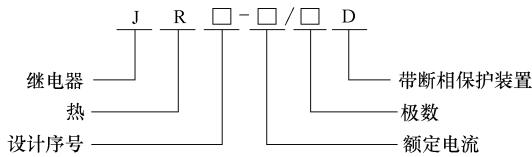


图 2-31 热继电器型号

断线而造成断相时，该相电流为零，该相的双金属片冷却复位，使内推杆向右移动，另两相的双金属片因电流增大而弯曲程度增大，使外推杆更向左移动，由于差动放大作用，在出现断相故障后很短的时间内就推动常闭触点使其断开，使交流接触器释放，电动机断电停车从而得到保护。

2.4.6 时间继电器

时间继电器（KT）是一种利用电磁原理或机械原理来实现延时控制的控制电器。

定义：从获得输入信号（线圈的通电或断电）时起，经过一定的延时后才有信号输出（触点的闭合或断开）的继电器，是一种用来实现触点延时接通或断开的控制电器。有通电延时型和断电延时型。

1. 结构及分类

按动作原理与构造分为电磁式、空气阻尼式、电动式、晶体管式及数字式等类型（见图 2-32）。



图 2-32 时间继电器外形

2. 工作原理及电气符号

空气阻尼型时间继电器的延时范围大（有 0.4~60s 和 0.4~180s 两种），它结构简单，但准确度较低。

当线圈通电时，衔铁及托板被铁心吸引而瞬时下移，使瞬时动作触点接通或断开。但是活塞杆和杠杆不能同时跟着衔铁一起下落，因为活塞杆的上端连着气室中的橡皮膜，当活塞杆在释放弹簧的作用下开始向下运动时，橡皮膜随之向下凹，上面空气室的空气变得稀薄而使活塞杆受到阻尼作用而缓慢下降。经过一定时间，活塞杆下降到一定位置，便通过杠杆推动延时触点动作，使动断触点断开，动合触点闭合。从线圈通电到延时触点完成动作，这段时间就是继电器的延时时间。延时时间的长短可以用螺钉调节空气室进气孔的大小来改变。其电气符号如图 2-33 所示。

吸引线圈断电后，继电器依靠恢复弹簧的作用而复原，空气经出气孔被迅速排出。

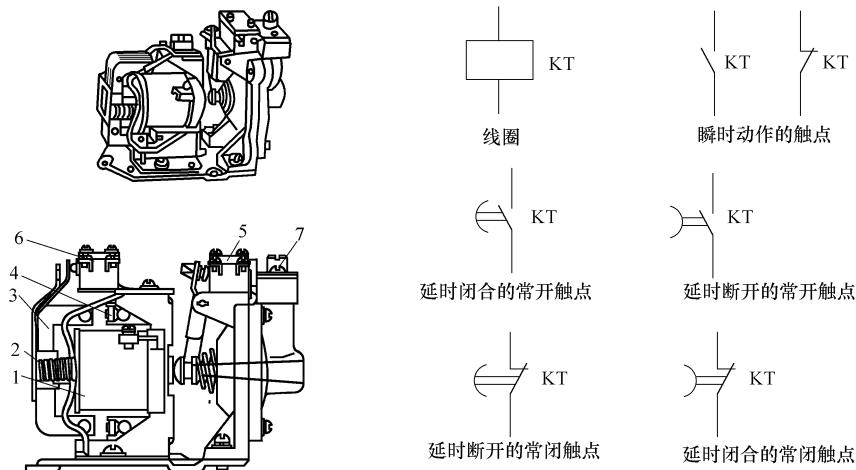


图 2-33 时间继电器构造及电气符号

1—线圈 2—弹簧片 3—铁心 4—衔铁 5—瞬时触点 6—延时触点 7—调节螺钉

2.5 三相异步电动机的点动控制电路

电动机的起动是指从定子接入电源开始转动时起，直至达到额定转速为止的这一过程。按照起动时定子电压的高低不同，起动又可分为直接起动和减压起动。

2.5.1 刀开关控制的直接起动电路

有一些常用的小型生产设备，如小型台钻等，其控制电路非常简单，就是用一个刀开关来实现直接控制。在这里，刀开关起到负荷开关的作用。

电气原理图是分析电路工作原理，安装、调试和维修电气电路的重要依据。在如图2-34所示控制线路中，负荷开关QS起控制作用，熔断器FU起短路保护作用。

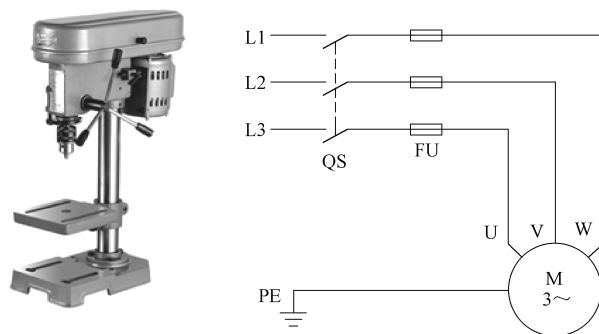


图 2-34 电动机的刀开关控制电路

工作原理分析：

起动：合上负荷开关 QS→电动机 M 通电运转。

停止：断开负荷开关 QS→电动机 M 断电停转。

2.5.2 电气控制基本知识概述

工业上用的生产机械动作过程是各式各样的，因而满足生产机械动作要求的继电器—接触器控制电路也是多种多样的，但各种控制电路一般都由一些基本控制环节按照一定的要求连接而成。下面以工业生产中最常用的三相笼型异步电动机的控制电路为例，说明继电器—接触器控制的基本环节，主要介绍对电动机实现起动运转控制、正反转控制、顺序控制、时间控制等基本控制电路。

1. 继电器—接触器控制电路的表示方法

继电器—接触器控制电路一般有安装接线图和工作原理图两种表示方法。

(1) 安装接线图：这种表示方法能形象地表示出控制电路中各电器的安装情况及相互之间的连线。

特点：

- 1) 比较适合初看电路者；
- 2) 绘制时难度大；
- 3) 电器施工的依据。

(2) 工作原理图：根据工作原理和便于阅读而绘制的电路图。

特点：便于阅读和设计较复杂的控制电路。它是生产机械电气设备的设计基本和重要的技术资料。

2. 原理图的绘制规则

- (1) 主电路：粗线，位于整张图纸的左部或上部；控制线路：细线，位于右部或下部。
- (2) 控制线路的电源线分列两边，按电器元件的动作顺序由上而下平行绘制。
- (3) 所有电器元件不画实际外形，而用标准图形和文字符号表示。器件的各部分名称分别画在完成作用的地方。各电器部件的状态处于未动作前（常态）的状态。
- (4) 同类电器在文字符号前或后加序号区分，如 KM1，KM2 等。
- (5) 两条以上导线连接处用小圆点表示电气连接，每一接点标一编号。

3. 电器元件的布置原则

- (1) 体积大和较重的电器元件应装在元器件安装板的下方，发热元件应装在上方。
- (2) 强弱电分开，弱电应屏蔽。
- (3) 需经常维护、检修、调整的元器件的安装位置不宜过高。
- (4) 布置应整齐、美观、对称。
- (5) 元器件之间应留有一定间距。

4. 电气系统中的基本保护

(1) 短路保护：防止用电设备（电动机、接触器等）短路而产生大电流冲击电网，损坏电源设备或保护用电设备突然流过短路电流而引起用电设备、导线和机械上的严重损坏。

采用的电器一般有熔断器、自动断路器等。

原理：熔断器或自动断路器串入被保护的电路中，当电路发生短路或严重过载时，熔断器的熔体部分自动迅速熔断，自动断路器的过电流脱钩器脱开，从而切断电路，使导线和电器设备不受损坏。

(2) 过载保护：防止用电设备（如电动机等）长期过载而损坏用电设备。

采用的电器一般有热继电器、自动断路器等。

原理：热继电器的线圈接在电动机的回路中，而触点接在控制回路中。当电动机过载时，长时间的发热使热继电器的线圈动作，从而使触点动作，断开控制回路，使电动机脱离电网。

(3) 零压（或欠电压）保护：防止因电源电压的消失或降低引起机械设备停止运行，以及当故障消失后，在没有人工操作的情况下，设备自动起动运行而可能造成的机械或人身事故。

2.5.3 点动控制电路

所谓点动，也就是按下按钮时电动机转动工作，松开按钮时电动机停止运转。

点动控制电路常用于短时工作制电气设备或者需要精确定位的设备中，如用于机床刀架、横梁、立柱等快速移动和机床对刀或者电动门、吊车钩控制等场合。

1. 电路原理图（见图 2-35）

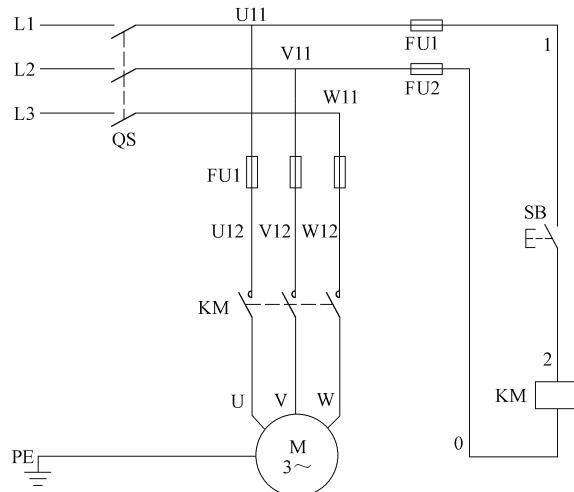


图 2-35 点动控制

2. 安装接线图（见图 2-36）

本电路所使用的元件列表

序号	元 件	数 量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	一台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	一个
7	电工工具及导线	若干

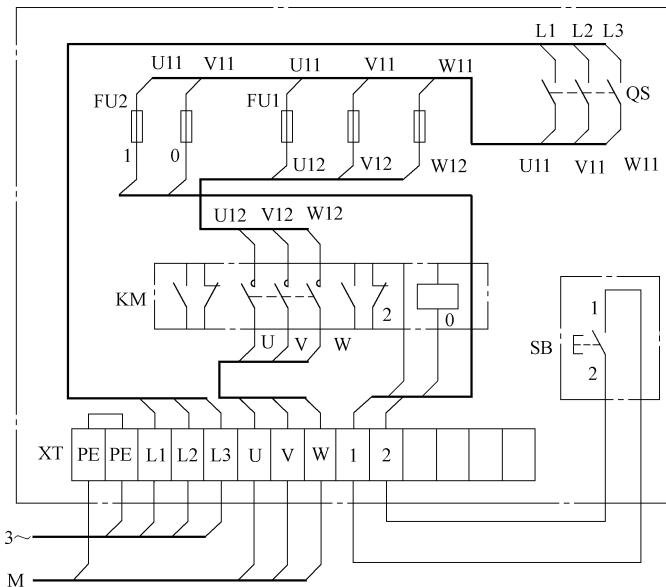


图 2-36 点动控制安装接线图

3. 工作原理分析

合上电源开关 QS。

起动：按下按钮 SB → KM 线圈得电 → KM 主触点闭合 → 电动机 M 通电起动 → 运转。

停止：松开按钮 SB → KM 线圈失电 → KM 主触点分断 → 电动机 M 断电 → 停止。

4. 注意事项

(1) 在接线时，相线可以使用黄、绿、红等颜色，但 PE 线一定只能使用黄、绿双色线，黄、绿双色线只能用来作为保护线使用。

(2) 点动按钮可以使用绿色或黑色，不可以用红色。

(3) 接线要牢固可靠无松动。

(4) 凡是需要穿孔过的导线一定要穿孔，如电动机接线盒中的导线必须从接线盒下方的孔中穿过。

(5) 为保证安全，一定不要忘记接上接地线。

(6) 经仔细检查，确认无误后方可通电试机。通电过程中，一定要仔细观察，如有异常情况，应立即断电，查明原因后方可再次试机。

(7) 根据负载的要求，主电路要用较粗的导线，控制电路用较细的导线。

5. 思考与讨论

(1) 画出电路图，说说你画电路及接线是按什么顺序进行的？

(2) 分析电路的动作原理。

2.6 三相异步电动机的点动加自锁控制电路

10kW 以下交流电动机，在需要频繁关断时，常采用按钮和接触器进行间接通断。

2.6.1 自锁控制电路

有的地方需要连续工作，点动控制就不再适用了，需要具有长动功能的电路才能满足其要求。例如抽水机、粉碎机等设备。

1. 电路原理图（见图 2-37）

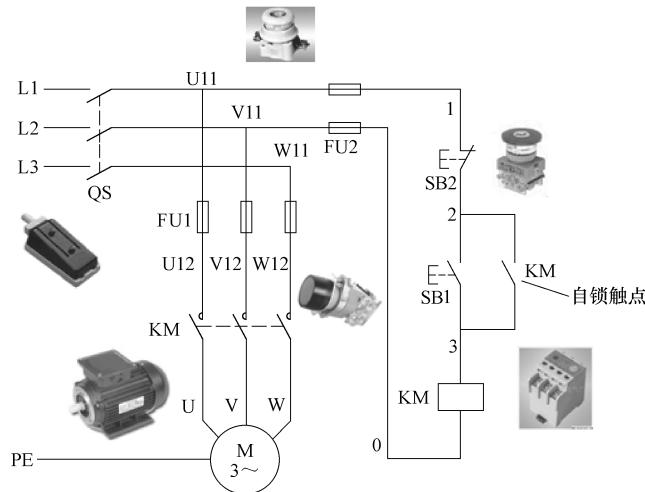


图 2-37 具有自锁功能的电路

2. 安装接线图（见图 2-38）

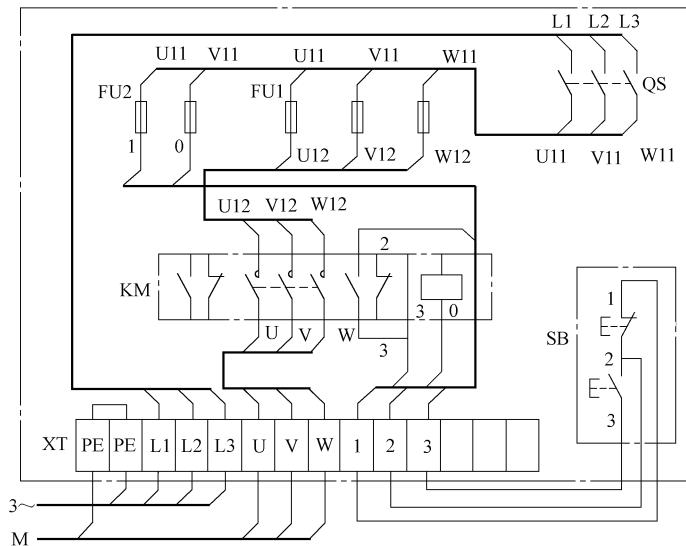


图 2-38 自锁控制安装接线图

本电路所使用的元件列表

序号	元件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	一台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	二个
7	电工工具及导线	若干

3. 工作原理分析

自锁：依靠接触器自身辅助常开触点而使接触器线圈保持通电的现象。

自锁的作用：①合上QS，按下SB2，KM线圈吸合，KM主触点闭合，电动机运转。KM辅助常开触点闭合，自锁。②实现欠电压和失电压保护。

各个元件的作用分别为：

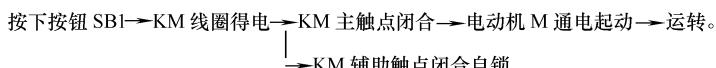
(1) 刀开关QS作为隔离开关使用，当需要对电动机或电路进行检查、维修时，用它来隔离电源，确保操作安全。因此隔离开关一般不能用于带负载切断或接通电源。起动或断电时应注意刀开关QS动作的先后次序，起动时应先合上QS，再按起动按钮SB2；断电时则应先按停止按钮SB1，再断开QS。

(2) 熔断器FU在电路中起短路保护作用，一旦发生短路事故，熔丝熔断，切断电源，电动机立即停转。

(3) 电路在停电或电压过低时，接触器线圈的电磁吸力消失或不足，使主触点断开，切断了电动机的电源，同时也使自锁触点断开。而当电源恢复正常时，必须再按起动按钮才能使电动机重新起动。因此此电路还具有零压保护和欠电压保护。

动作过程：合上电源开关QS。

起动：



停止：



4. 注意事项及常见故障及处理方法

(1) 在本例中用到了两个控制按钮，起动按钮一定要使用绿色，停止按钮一定要使用红色。

(2) 在接线时，相线可以使用黄、绿、红等颜色，但PE线一定只能使用黄、绿双色线，黄、绿双色线只能用来作为保护线使用。

(3) 接线要牢固可靠无松动，并要注意自锁的接法。

(4) 凡是需要穿孔过的导线一定要穿孔，如电动机接线盒中的导线必须从接线盒下方的孔中穿过。

(5) 为保证安全，一定不要忘记接上接地线。

(6) 经仔细检查，确认无误后方可通电试机。通电过程中，一定要仔细观察，如有异

常情况，应立即断电，查明原因后方可再次试机。

(7) 根据负载的要求，主电路要用较粗的导线，控制电路用较细的导线。

5. 常见故障及处理方法

(1) 按下起动按钮，接触器不工作：检查熔断器是否熔断，检查热继电器是否动作，检查电源电压是否正常，检查按钮触点是否接触不良，检查接触器线圈是否损坏。

(2) 不能自锁：检查起动按钮是否有损坏，检查接触器常开辅助触点是否未闭合或被卡住（触点损坏）。

6. 思考与讨论：

(1) 自锁电路和点动电路的最大区别是什么？

(2) 交流接触器的主、辅助触点有什么区别？

(3) 以上电路能否实现过载、短路、欠电压保护？为什么？

(4) 在操作中如果发生故障应怎么处理？

2.6.2 具有过载保护的自锁控制电路

电动机在运行过程中，可能会出现过载现象。造成过载的原因是多方面的，如电源电压的波动、负载的变化、轴承的老化等都可能造成过载。此时我们希望电动机能够及时停止，如果不能及时停机的话，就有可能损坏电动机。为了防止这种情况出现，我们就要求线路具有过载保护功能，在电气控制中，这种功能是由热继电器来实现的。电路如图 2-39 所示，当电动机出现过载时，接于控制线路中的热继电器常闭触点由于过热自动断开，切断电路，使电动机停止运行。

1. 工作原理分析

基本原理同上一电路，但是要注意在本电路中多了一个热继电器，其作用是过载保护。热继电器在使用时将发热元件串联接在主电路中，而将常闭触点串联接在控制电路中，如果需要在电路中接入报警指示电路，则需将热继电器的常开触点接入指示电路中，这样在热继电器动作时，该触点闭合，接通指示电路。

2. 电路原理图（见图 2-39）

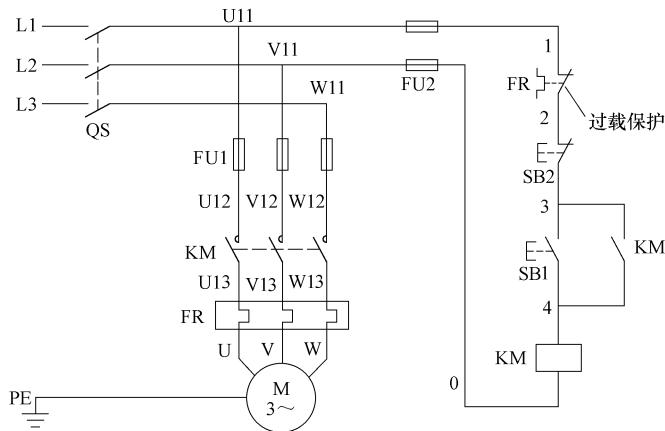


图 2-39 具有过载保护功能的自锁电路

3. 安装接线图 (见图 2-40)

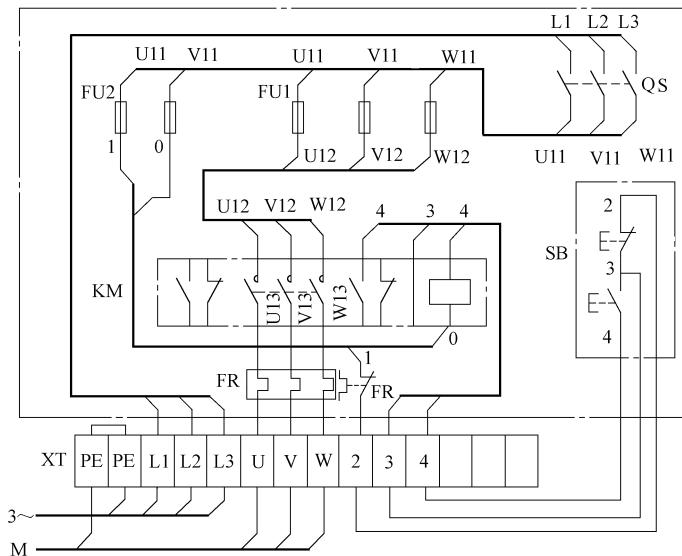


图 2-40 具有过载保护功能的自锁电路安装接线图

4. 接线时的注意事项

除了遵循上述电路的注意事项之外，还要注意以下几点。

- (1) 由于线路较以前的复杂一些，所以在接电路时要按照一定的原则进行。
 - (2) 先接主电路，后接控制电路。
 - (3) 逐点接线，从上向下，从左往右，就近接线。
 - (4) 热继电器的保护线路接在常闭触点上。
 - (5) 每个接线端子上最多接三条线。

本电路所使用的元件列表

序号	元件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	一台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	二个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台

5. 思考与讨论：

- (1) 在这个电路中，所使用的元件和上一个电路有什么不同？
 - (2) 热继电器在接线时要注意什么问题？
 - (3) 你知道这个电路在实际中有哪些应用？
 - (4) 交流接触器的线圈电压是 380V，如果误接成 220V，会怎么样？

2.6.3 点动加自锁控制电路

1. 电路原理图 (见图 2-41)

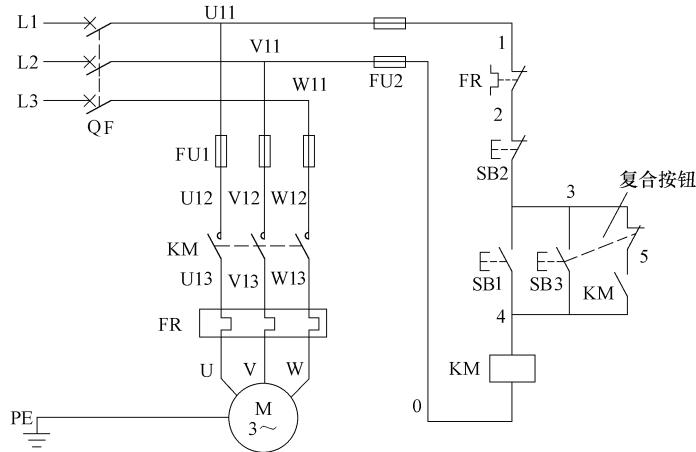


图 2-41 点动加自锁控制电路

2. 安装接线图 (见图 2-42)

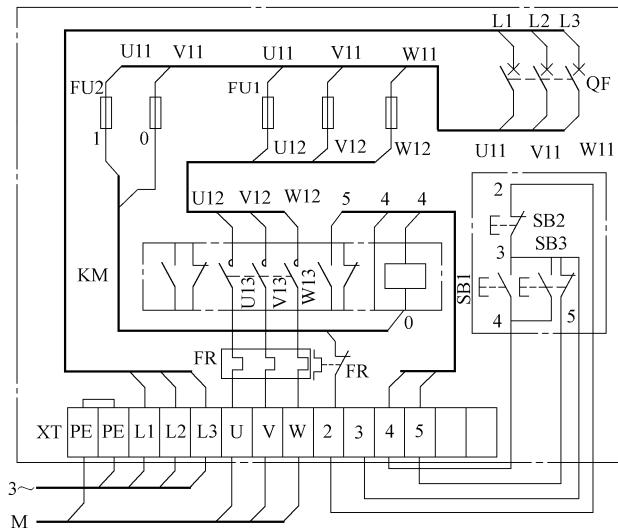


图 2-42 点动加自锁控制电路安装接线图

本电路所使用的元件列表

序号	元 件	数 量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	一台

(续)

序号	元器件	数量
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	三个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台

3. 工作原理分析

(1) 点动运行分析。

起动：按下 SB3→KM 线圈得电→电动机起动

停止：松开 SB3→KM 线圈断电→电动机停止

(2) 连续运行分析。

起动：

按下按钮 SB1→KM 线圈得电→KM 主触点闭合→电动机 M 通电起动→运转。
 ↓
 →KM 辅助常开触点闭合自锁

停止：

按下按钮 SB2→KM 线圈失电→KM 主触点分断→电动机 M 失电→停止。
 ↓
 →KM 辅助自锁触点断开

4. 接线时的注意事项

除了遵循上述电路的注意事项之外，还要注意以下几点：

- (1) 图中的虚线部分表示两者为同一个按钮，在接线时，虚线是不能接线的。
- (2) SB1 是运行按钮，SB3 是点动按钮，SB2 是停止按钮，一定要用红色的。

5. 思考与讨论

- (1) 试分析什么叫点动，什么叫自锁，并比较各电路的结构和功能上有什么区别？
- (2) 图中各个电器，如 QS、FU1、FU2、KM1、FR、SB1、SB2、SB3 各起什么作用？已经使用了熔断器为何还要使用热继电器？已经有了开关 QS 为何还要使用接触器 KM1？
- (3) 图中电路能否对电动机实现过电流、短路、欠电压和失电压保护？
- (4) 分析电路动作过程。
- (5) 你在实际操作时的接线是按照什么顺序进行的？为什么？

2.7 三相异步电动机的正反转电路

在生产中，有许多的生产设备都要求生产机械能够改变运动方向，如主轴的伸缩、工作台的左右移动、行车的上下左右行走等，要求电动机能实现正转、反转两个方向的运转。

在电动机的旋转原理分析中，我们知道只要将电动机接在三相电源中的任意两根电源线对调，即改变电源的相序，就能够实现改变旋转磁场的旋转方向，从而就可以实现电动机旋转方向的改变，根据这个要求，可以使用图 2-43 所示电路来实现。

2.7.1 接触器联锁的正反转控制电路

1. 电路原理图 (见图 2-43)

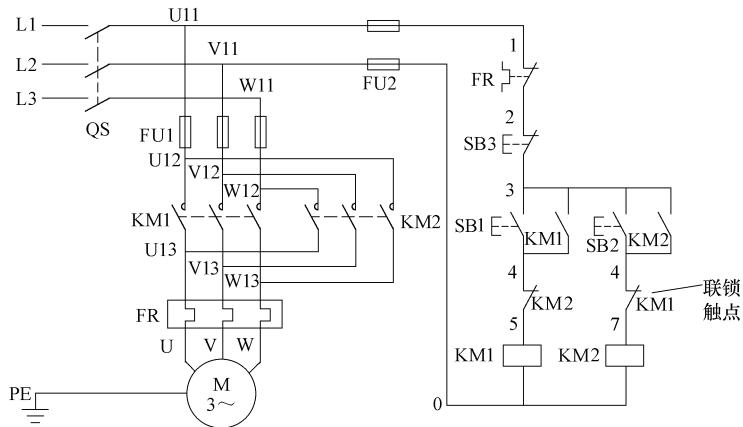


图 2-43 接触器联锁的正反转控制电路

由于线路较多，从这个电路开始不再画出安装接线图。

本电路所使用的元件列表

序号	元 件	数 量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	二台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	三个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台

2. 工作原理分析

正转起动：

按下按钮 SB1 → KM1 线圈得电 → KM1 主触点闭合 → 电动机 M 通电起动 → 运转。
 → KM1 互锁触点断开，对 KM2 联锁
 → KM1 辅助常开触点闭合自锁

反转起动：

按下按钮 SB2 → KM2 线圈得电 → KM2 主触点闭合 → 电动机 M 通电起动 → 运转。
 → KM2 互锁触点断开，对 KM1 联锁
 → KM2 辅助常开触点闭合自锁

停止：

按下按钮 SB3 → KM 线圈失电 → KM1 (KM2) 主触点分断 → 电动机 M 失电 → 停止
 → KM1 (KM2) 辅助自锁触点断开
 → 联锁复位

在这个电路中，如果主电路的两个接触器同时闭合，那么就会发生严重的短路事故，因此在任何情况下，不允许两个接触器同时闭合。为了防止发生闭合的情况，在电路中必须加有联锁措施。在这个电路中，利用了接触器的辅助常闭触点作为联锁保护，故称为接触器联锁的正反转控制。

联锁保护为保护一个电器通电时，另一个电器不能通电，若需后者通电，则前者必须先断电的一种保护。互锁又称为联锁。

2.7.2 双重联锁的正反转控制电路

1. 电路原理图（见图 2-44）

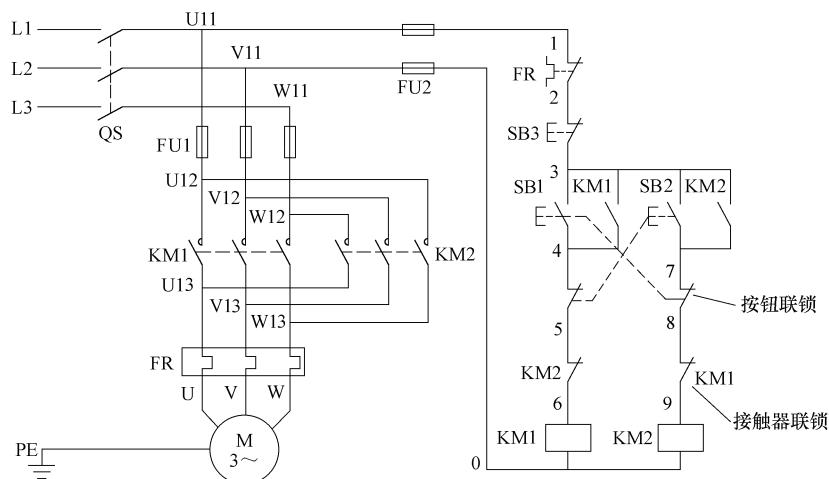


图 2-44 双重联锁的正反转控制电路

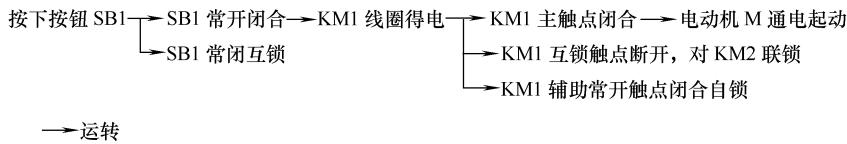
本电路所使用的元件列表

序号	元 件	数 量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	二台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	三个(其中双联按钮二个)
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台

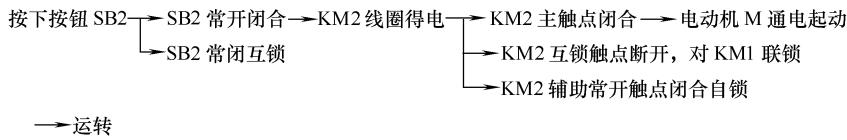
2. 工作原理分析

在这个电路中，利用了接触器的辅助常闭触点和按钮的两组常闭触点作为联锁保护，故称为接触器和按钮双重联锁的正反转控制。

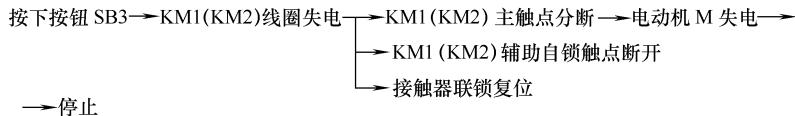
正转控制：



反转控制：



停止：



3. 注意事项

- (1) 在正反转的电路中，一定要注意保证不能使两个接触器同时闭合。
- (2) 按钮联锁中的虚线是不能接线的，它只是表示两组触点同属于一个元件。
- (3) 要注意主电路中电源相序的变化。

4. 思考与讨论

- (1) 画出双重联锁的正反转电路图。
- (2) 线路接好后，如果发现电动机只有一个转向，应该怎么调整？
- (3) 在双重联锁的正反转电路中，在正转时能否直接按下反转按钮以使其反转？在接触器联锁的电路中能否实现？

2.7.3 自动往返电路

有一些生产设备要求具有自动正反转的能力，例如平面磨床，要求工作台能够在一定范围内自动往返。其实质也就是正反转电路加上限位开关。设备外形如图 2-45 所示。

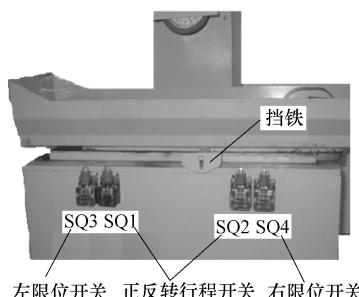


图 2-45 磨床外形

1. 电路原理图 (见图 2-46)

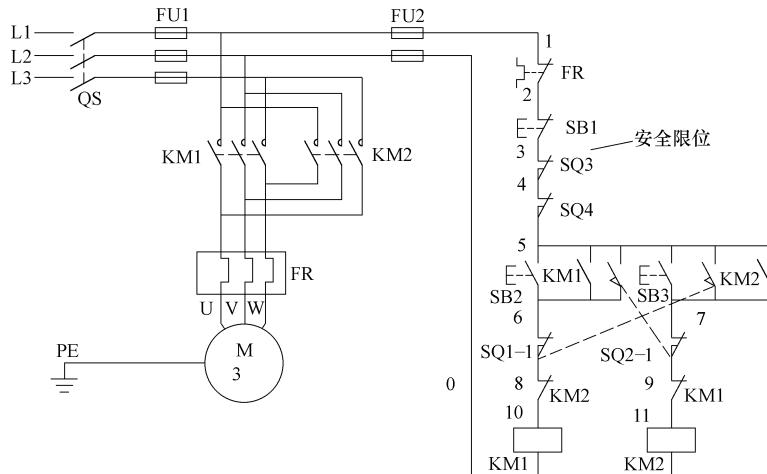


图 2-46 自动往返电路

2. 工作原理分析

运行：

按下 SB2 → KM1 线圈得电 → KM1 主触点闭合 → 电动机 M 正向运行 → 工作台左移 →
 → KM1 辅助常开触点自锁
 → KM1 辅助常闭触点对 KM2 联锁
 → 到达左位碰撞 SQ1 → SQ1 常闭触点断开 → KM1 自锁断开
 → SQ1 常开触点闭合 → KM1 主触点断开 → 电动机 M 停止 →
 → KM2 主触点闭合
 → KM2 线圈得电 → KM2 辅助常开触点自锁 → 电动机 M 反向运行 → 工作台右移 → 到达右位碰撞 SQ2 → KM1 线圈得电 → 左移 → 右移 (不断重复上述过程，周而复始)

停止：

按下 SB1，线圈断电，电动机停止。

3. 注意事项

- (1) 接线方法同正反转电路。
- (2) 注意四个限位开关的接法。
- (3) SQ3、SQ4 两个开关在正常工作时是不起作用的，只有在 SQ1、SQ2 不起作用时，它们才起到一个安全保护的作用。

2.8 三相异步电动机的顺序控制

在实际的生产过程中，对异步电动机的控制经常会提出很多要求，除自锁、互锁等环节外，顺序控制环节也是其中重要的一种。例如有时要求几台电动机配合工作或一台电动机有规律地完成多个动作，按照这些要求实现的控制叫做顺序控制。例如，在车床的主轴工作之前，必须先启动油泵电动机，使润滑系统有足够的润滑油以后，方能启动主轴电动机。主轴

电动机停止后，才允许油泵电动机停止。当油泵电动机因某种原因停车时，主轴电动机也应立即停车，以免因润滑油不足而损坏工件或设备。

2.8.1 按钮控制的顺序控制电路

1. 电路原理图（见图 2-47）

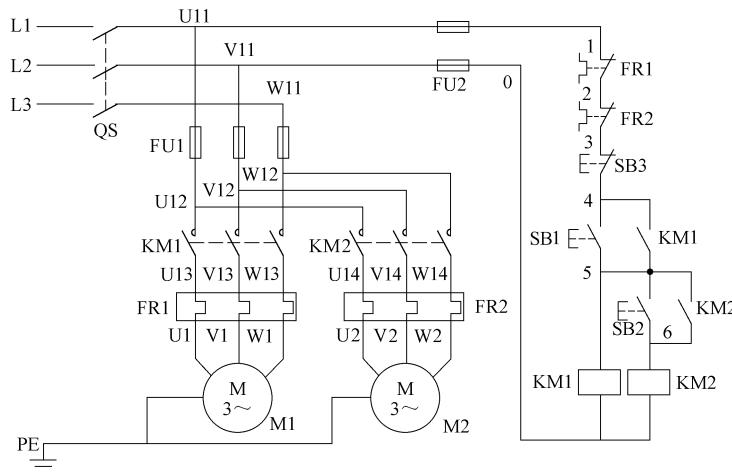


图 2-47 按钮控制的顺序控制

本电路所使用的元件列表

序号	元器件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	二台
5	三相异步电动机	二台
6	控制按钮	三个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	二台

2. 工作原理分析

起动：

按下 SB1 → KM1 通电 → KM1 主触点闭合 → M1 运行 → 按下 SB2 → KM2 通电 → KM2 主触点闭合 → 电动机 M2 运行
KM1 辅助常开触点闭合自锁

停止：

按下 SB3 → KM1、KM2 线圈均失电 → M1 和 M2 停止

在电路中有两台异步电动机，需两只交流接触器 KM1 和 KM2 控制电动机转动。当按下 SB1 按钮时，接触器 KM1 的线圈得电，其常开主触点闭合，电动机 M1 开始转动；按下

SB2，接触器 KM2 的线圈得电，其常开主触点闭合，电动机 M2 开始转动，实现两台电动机顺序延时起动。停车时，只要按下 SB1 按钮，两台电动机同时停止转动。在 M1 得电前，按下 SB2 电路无反应。

2.8.2 时间继电器控制的顺序控制电路

1. 电路原理图（见图 2-48）

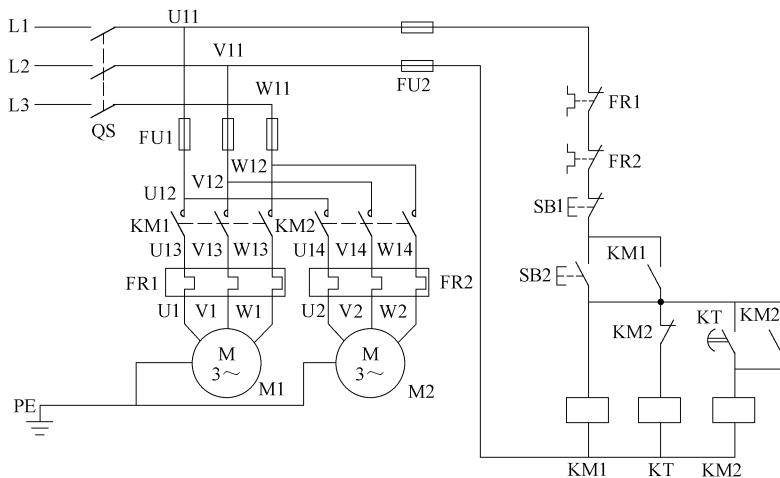
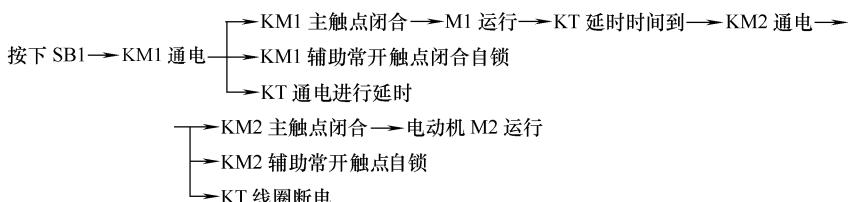


图 2-48 时间继电器控制的顺序控

本电路所使用的元件：除了和上面的电路具有相同的元件外，还需要时间继电器一台。

2. 工作原理分析

起动：



停止：

按下 SB1 → KM1、KM2 线圈均失电 → M1 和 M2 停止

在电路中有两台异步电动机，需两只交流接触器 KM1 和 KM2 控制电动机转动。当按下 SB1 按钮时，接触器 KM1 的线圈加电，其常开主触点闭合，电动机 M1 开始转动；同时时间继电器 KT 得电，延时时间到达后，接触器 KM2 的线圈得电，其常开主触点闭合，电动机 M2 开始转动，KM2 的辅助常开触点完全实现自锁，实现两台电动机顺序延时起动。KM2 得电后，其常闭辅助触点断开，KT 线圈断电。停车时，只要按下 SB1 按钮，两台电动机同时停止转动。

3. 思考与讨论

设计电路控制三条传送带运输电机，三条传送带运输机的电气要求是：

(1) 起动过程：顺序起动，M1 起动 → M2 起动 → M3 起动；

(2) 停止过程：逆序停止，M3 停止→M2 停止→M1 停止。试画出三条传送带运输机的电路图，并叙述其工作原理。

2.9 三相异步电动机的多地控制

能在两地或多地控制同一台电动机的控制方式叫做电动机的多地控制（也称为异地控制），在生产和生活当中，为了更加方便往往用到多地控制。其实多地控制很简单，总结起来就一句话：起动开关并联，停止开关串联就可以实现，下面简单介绍如下。

如图 2-49 所示，这是一幅两地控制电路，图中 SB1 和 SB3 为安装在甲地的起动按钮和停止按钮，SB2 和 SB4 为安装在乙地的起动按钮和停止按钮。当我们在甲地按下起动按钮 KM 得电，KM 动合触点得电，电机运行。这个时候你不论在甲地或乙地按停止按钮，电机都会停止运行。在乙地先起动的过程也和在甲地起动是一样的。

1. 电路原理图

本电路所使用的元件列表

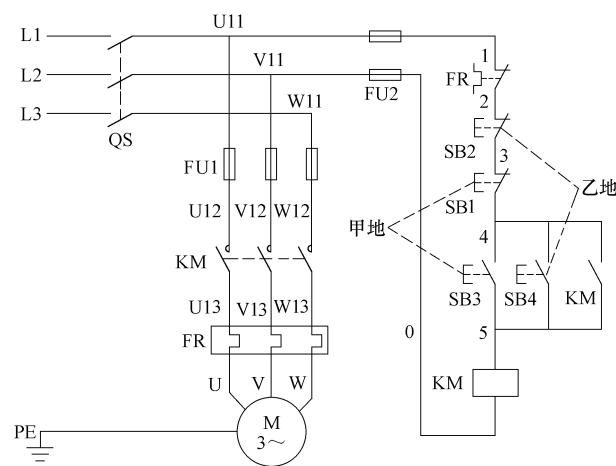


图 2-49 多地控制

序号	元器件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	一台
5	三相异步电动机	二台
6	控制按钮	四个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台

2. 工作原理分析

起动：

按下按钮 SB3(或 SB4) → KM 线圈得电 → KM 主触点闭合 → 电动机 M 通电起动 → 运转。
KM 辅助触点闭合自锁

停止：

按下按钮 SB1(或 SB2) → KM 线圈失电 → KM 主触点分断 → 电动机 M 失电
KM 辅助自锁触点断开
→ 停止

此电路的特点是：两地的起动按钮要并联在一起，停止按钮要串联在一起。而且起动按钮选用常开开关，停止按钮选用常闭开关。根据这个方法，就可以实现任意多个地点的控制。

2.10 三相异步电动机的减压起动控制

2.10.1 笼型异步电动机直接起动

直接起动是一种简单、可靠、经济的起动方法，但电动机起动电流 I_{st} 为额定电流 I_N 的 4~7 倍。过大的起动电流对电动机是很不利的，主要危害是：①使线路上压降增加，造成末端电压下降。末端电压下降会影响其他设备用电，同时影响本身起动。②使线路损耗增加，使电动机绕组铜损增加，造成电动机过热，减少电动机使用寿命。③使电动机绕组端部受的电动力增加，严重时会发生变形；使电动机接线板上的接线端子发热增加，因为起动电流大，加上接线端子接触电阻本来相对也大，所以发热就会增加，严重时会烧坏接线端子，烧坏接线板。另外，接线板的接线端子之间电动力也会因起动电流增大而增大，严重时会损坏接线端子或使接线端子变形。

因此，只有满足一定条件的电动机才可以直接起动。直接起动的条件（只需满足下述三个条件中的一条即可）：

- (1) 容量在 7.5kW 以下的三相异步电动机一般可采用直接起动。
- (2) 电动机在起动瞬间造成的电网电压降不大于电源电压正常值的 10%，对于不经常起动的电动机可放宽到 15%。
- (3) 可用经验公式粗估电动机是否可直接起动，当电动机的起动电流倍数 (I_{st}/I_N) 小于下式右边的数值时，可直接起动。

$$\frac{I_{st}}{I_N} < \frac{3}{4} + \frac{\text{变压器容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机功率(kW)}}$$

直接起动的优点是所需起动设备简单，起动时间短，起动方式简单、可靠，所需成本低。

2.10.2 笼型异步电动机的减压起动

对于不宜直接起动的笼型异步电动机，一般都采用减压起动方式来起动。

减压起动是指利用起动设备将电源电压适当降低后加到电动机的定子绕组上进行起动，经过一定时间，待电动机起动运转后，再使其电压恢复到额定值正常运转的起动方法，由于电流随电压的降低而减小，所以减压起动达到了减小起动电流的目的。但同时，由于电动机转矩与电压的二次方成正比 ($T \propto U^2$)，所以降压起动也将导致电动机的起动转矩大大降低。因此，减压起动只能在空载或轻载下起动。

常见的减压起动的方法有定子绕组串接电阻（或电抗）减压起动、星形—三角形减压起动、自耦变压器减压起动和使用软起动器等。对于绕线转子异步电动机还可以使用电枢绕组串接电阻的方法减压起动。

1. 定子绕组串接电阻减压起动控制

(1) 定子绕组串接电阻减压起动是指电动机在起动时，把合适的电阻串联接在电动机定子绕组与电源之间，通过电阻的分压作用，来降低定子绕组上的起动电压，待起动后，再将电阻短接，使电动机在额定电压下正常运行。这种减压起动的方法由于电阻上有热能损耗，如果用电抗器则体积、成本又较大，因此该方法很少用。这种减压起动控制电路有手动控制、接触器控制、时间继电器控制等。

(2) 定子绕组串接电阻减压起动的时间继电器控制控制电路（见图 2-50）

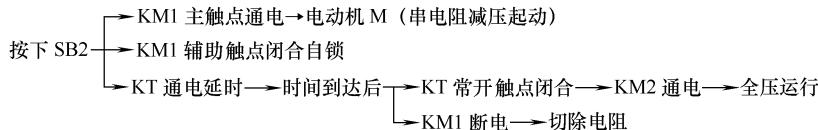
电动机起动电阻的短接时间由时间继电器自动控制。

本电路所使用的元件列表

序号	元件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	二台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	二个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台
9	起动电阻	三只
10	时间继电器	一台

电路工作原理分析如下：

起动：



停止：

按下 SB1 → KM2 断电 → 电动机停止

图 2-50 所示电路中，通电后，按下起动按钮 SB2，接触器 KM1 通电并自锁，电动机定子绕组串入电阻 R 进行减压起动。经一定时间延时后，时间继电器 KT 的常开延时触点闭合，接触器 KM2 通电，三对主触点将主电路中的起动电阻 R 短接，电动机进入全电压运行。KT 延时时间的长短根据电动机起动过程时间的长短来调整。本电路起动完成后，在全压下正常运行时，只有 KM2 工作，KM1、KT 均断电，可以达到减少回路损耗的目的。停止时，按下 SB1，控制电路失电，电动机 M 失电停转。

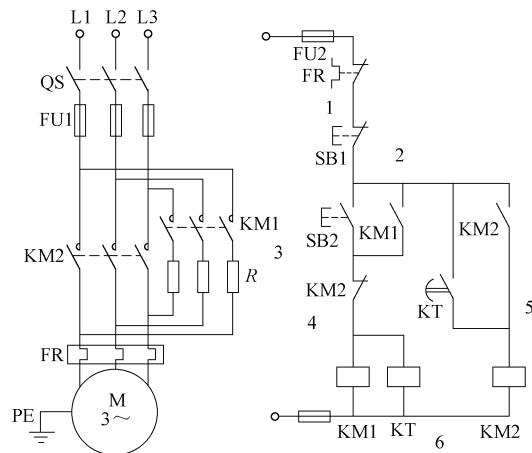


图 2-50 定子绕组串接电阻减压起动

2. 定子串自耦变压器减压起动控制

(1) 自耦变压器减压起动是指电动机起动时利用自耦变压器来降低加在电动机定子绕组上的起动电压。待电动机起动后，再使电动机与自耦变压器分离，从而在全压下正常运转。这种减压起动一般分为手动控制和自动控制两种。自耦变压器如图 2-51 所示。



图 2-51 自耦变压器

接线方法：自耦变压器的高压侧投入电源，低压侧接至电动机，根据负载的起动需要有几个不同电压比的分接头供选择。

特点：自耦变压器的电压比为 K ，一次侧电压为 U_1 ，二次侧电压 $U_2 = U_1/K$ ，二次侧电流 I_2 （即通过电动机定子绕组的线电流）也按正比减小。又因为变压器一、二次侧的电流关系 $I_1 = I_2/K$ ，可见一次侧电流（即电源供给电动机的起动电流）比直接流过电动机定子绕组的要小，即此时电源供给电动机的起动电流为直接起动时 $1/K^2$ 倍。由于电压降低为 $1/K$ 倍，所以电动机的转矩也降为 $1/K^2$ 倍。

自耦变压器二次侧一般有 2~3 组抽头，如二次电压分别为一次电压的 80%、60%。

自耦变压器减压起动的优点是可以按允许的起动电流和所需的起动转矩来选择自耦变压器的不同抽头以实现减压起动，而且不论电动机的定子绕组采用 Y 或 Δ 接法都可以使用。缺点是设备体积大，投资较贵。

(2) 自耦变压器减压起动控制电路如图 2-52 所示。

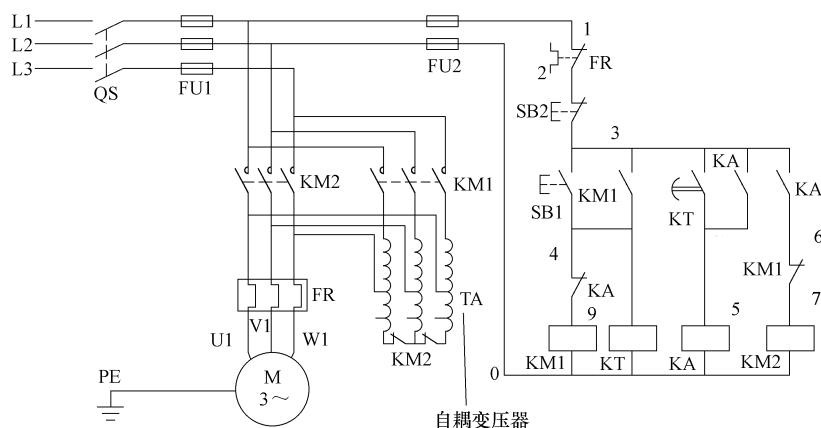


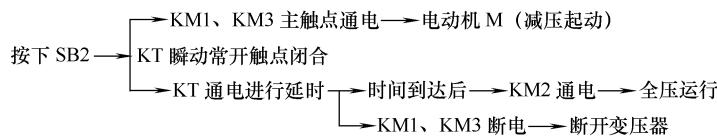
图 2-52 自耦变压器减压起动控制电路

本电路所使用的元件列表

序号	元件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	三台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	二个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台
9	自耦变压器	一只
10	时间继电器	一台

电路工作原理分析如下：

启动：



停止：

按下 SB2→KM2 断电→电动机停止

3. 星形—三角形 (Y-△) 减压起动控制

星形—三角形减压起动是指电动机起动时，把定子绕组接成星形（Y），以降低起动电压，限制起动电流；待电动机起动后，再把定子绕组改接成三角形（△），使电动机全压运行。只有正常运行时定子绕组作三角形（△）联结的异步电动机才可采用这种减压起动方法。电动机起动时，接成星形，加在每相定子绕组上的起动电压只有三角形联结直接起动时的 $1/\sqrt{3}$ ，起动电流为直接采用三角形联结时的 $1/3$ ，起动转矩也只有三角形联结直接起动时的 $1/3$ 。所以这种减压起动方法，只适用于轻载或空载下起动。星形—三角形减压起动的最大优点是设备简单，价格低，因而获得较广泛的应用。缺点是只用于正常运行时为△联结的电动机，降压比固定，有时不能满足起动要求。

(1) 星形—三角形(Y-△)减压起动控制电路原理图(见图2-53)。

本电路所使用的元件列表

序号	元件	数量
1	三相交流电源	一套
2	三相刀开关	一个
3	熔断器	五个
4	交流接触器	三台
5	三相异步电动机	一台
6	控制按钮	二个
7	电工工具及导线	若干
8	热继电器	一台
9	时间继电器	一台

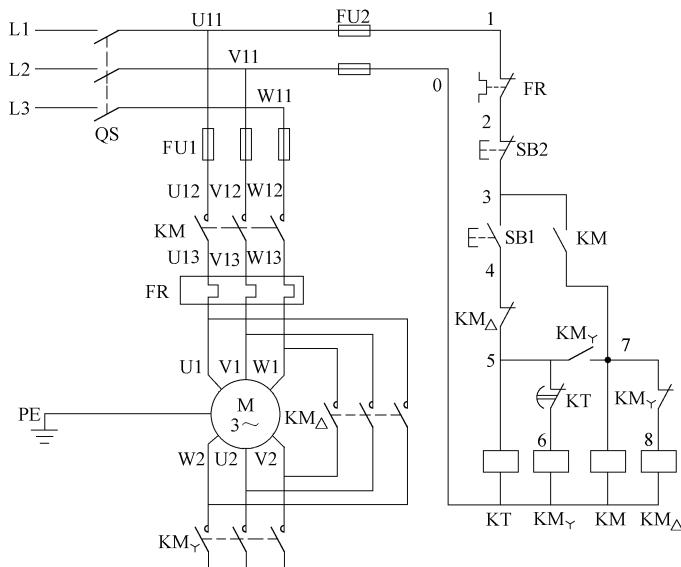


图 2-53 三相异步电动机的Y-△减压起动控制电路

(2) 工作原理分析如下：

起动：



停止：按下 SB2，就可以断开接触器的线圈电源，电动机停止。

时间继电器 KT 的作用为控制Y-△变换起动的起动过程时间（电动机起动时间），即电动机从起动开始到额定转速及运行正常后所需的时间，可以调整。

表 2-2 常用起动方法比较

起动方法	U_{st}/U_N	I'_{st}/I_{st}	T'_{st}/T_{st}	特 点
直接起动	1	1	1	起动设备最简单，起动电流大，只适用于小容量电动机
定子串电阻减压起动	$1/k$	$1/k$	$1/k^2$	起动电流较小，起动转矩较小，适用于轻载起动，电能损耗大；
Y-△减压起动	$1/\sqrt{3}$	$1/3$	$1/3$	起动电流较小，起动转矩较小，适用于轻载起动，只适用于△联结的电动机
自耦变压器减压起动	$1/k$	$1/k^2$	$1/k^2$	起动设备较复杂，有几种电压比可供选择，起动转矩较大

2.11 三相异步电动机的调速控制

电力能源是工业生产的主要动力，电力拖动的耗电量占了工业生产总耗电量的一半。而电力拖动又离不开调速，机械设备经常需要有多种速度输出的要求，例如车床在车削时根据加工量的大小选择不同的主轴转速，选用先进的调速技术能够节省电能，是节能降耗并提高劳动生产率的重要措施。

调速是指在负载不变的情况下，人为地改变电动机的转速，以满足生产机械的各种需求。常用的调速方法有机械调速和电气调速，机械调速主要是利用变速箱等机械设备来改变速度，电气调速可大大简化机械变速机构，并能获得较好的调速效果。

$$n = (1 - s) n_1 = (1 - s) 60 f_1 / p$$

从上式可见，要调节异步电动机的转速有以下三种方法：

- (1) 改变定子绕组的磁极对数 p ，称为变极调速。
- (2) 改变供电电网的频率 f_1 ，称为变频调速。
- (3) 改变电动机的转差率 s 。

2.11.1 变极调速

变极调速就是通过改变电动机定子绕组的接线，来改变电动机的磁极对数，从而达到调速的目的。因变极前后定转子的极数要对应，所以变极调速的电动机均为笼型异步电动机。

变极调速的电动机往往被称为多速电动机（双速、三速、四速等），不能实现无级调速：磁极对数 p 只能成倍变化，在机床中常用减速齿轮箱（机械调速）来扩大调速范围，经济简单。其定子绕组的接线方式一般有：三角形联结/双星形联结，即 Δ/YY （常用）；星形联结/双星形联结，即 Y/YY 。

其中 Δ/YY 联结的双速电动机，电动机变极调速前后的输出功率基本不变，故适用于近恒功率情况下的调速，多用于拖动金属切削机床上。 Y/YY 联结的双速电动机，变极调速前后的输出转矩基本不变，故适用于负载转矩基本恒定的恒转矩调速，例如起重机等机械。

1. 变极原理

将一套绕组中的部分线圈按一定规律反接以改变电流的方向来改变极对数，如图 2-54 所示，将两个原来串联的绕组进行并联，由右手定则可知，构成新绕组的磁极对数 p 就为原来绕组磁极对数的一半，因此，转速就提高一倍。变极调速有倍极比调速和非倍极比调速两种，不论是哪一种，其调速都是有级的，不能实现无级调速。

2. Δ/YY 联结的双速电动机分析 (见图 2-55)

Δ 联结：电动机的六个接线端子分

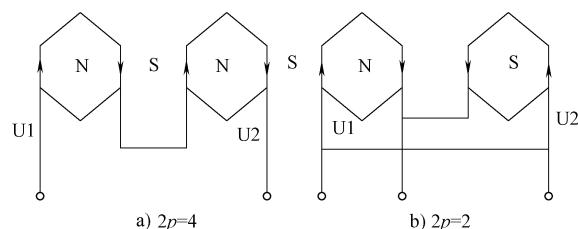
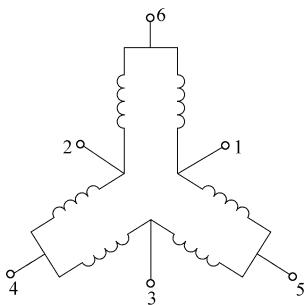


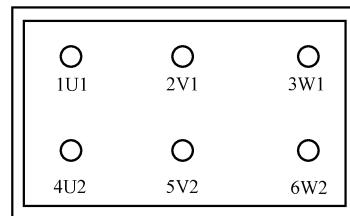
图 2-54 变极调速原理

别编号为 1~6，其中 1、2、3 外接三相交流电源，而 4、5、6 断开，此时极对数为 $2p$ ，转速为低速 n 。

YY 联结：4、5、6 外接三相交流电源，而 1、2、3 连接在一起，此时极对数为 p ，转速为高速 $2n$ ，从而实现调速。



绕组内部原理图



电动机接线端子排列

图 2-55 双速电动机端子

各个端子的接线如图 2-56 所示。

双速电动机的控制电路原理图如图 2-57 所示。

其中，KM1 控制电动机的低速（△联结）运行，KM2 和 KM3 控制高速运行（YY 联结）。

工作过程分析如下。

低速：

按下 SB1 → KM1 通电 → KM1 主触点闭合 → 电动机△联结低速运行
→ KM1 辅助常开触点闭合自锁

高速：

按下 SB2 → 低速 KM1 断开 → KM2、KM3 通电 → 电动机 YY 联结高速运行
→ KM2 辅助常开触点闭合自锁

停止：按下 SB，电动机不论运行在高、低速，均停止。

一般倍极比变极调速，变极后绕组的相序发生变化，为了使电动机的转向不发生变化，在绕组改接时，应对接到电动机端子上的电源相序作相应改变。

变极调速的特点如下：

- (1) 具有较硬的机械特性，稳定性良好；
- (2) 无转差损耗，效率高；
- (3) 接线简单、控制方便、价格低；
- (4) 有级调速，级差较大，不能获得平滑调速。

在机床中常用减速齿轮箱来扩大调速范围，经济简单。

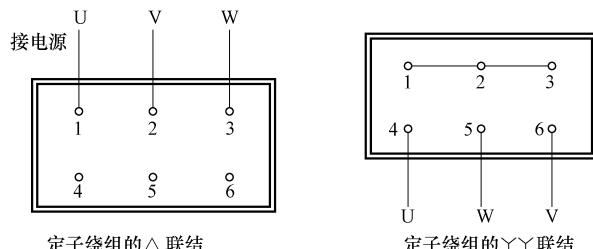


图 2-56 △/YY 联结

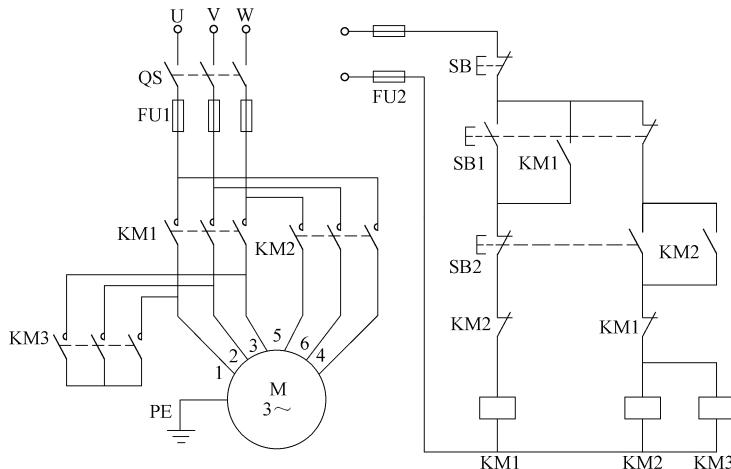


图 2-57 双速电动机的控制电路

2.11.2 变频调速

变频调速是指改变电动机定子电源频率，从而改变其同步转速的调速方法。变频调速系统的主要设备是提供变频电源的变频器，变频器可分为交流-直流-交流变频器和交流-交流变频器两大类，目前大都使用交-直-交变频器。采用通用变频器对笼型异步电动机进行调速控制，由于使用方便，可靠性高并且经济效益显著，所以得到了广泛应用。通用变频器的特点是通用性强，可以直接应用于普通异步电动机的调速控制。其工作原理有如图 2-58 所示的几种方法。

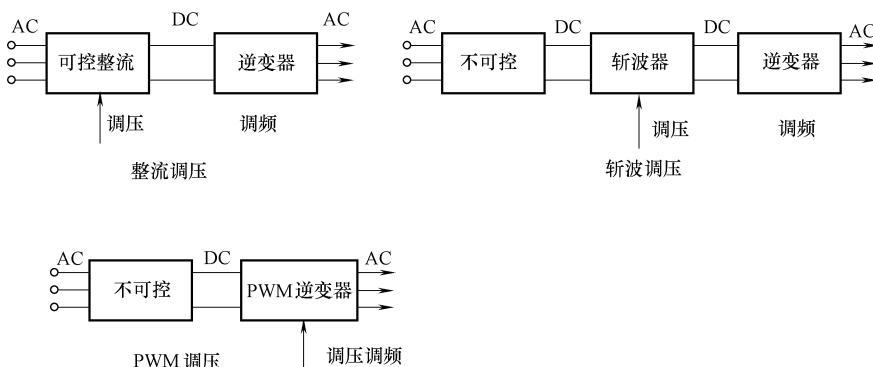


图 2-58 变频调速工作原理

三相异步电动机定子每相电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi$$

式中 E_1 ——定子每相由气隙磁通感应的电动势 (V)；

f_1 ——定子频率 (Hz)；

N_1 ——定子相绕组有效匝数；

Φ ——每极磁通量 (Wb)；

如果不计定子阻抗压降，则 $U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 N_1 \Phi$

若端电压 U_1 不变，则随着 f_1 的升高，气隙磁通 Φ 将减小，又由转矩公式

$$T = C_M \Phi I_2 \cos \varphi_2$$

可以看出， Φ 的减小势必导致电动机允许输出转矩 T 下降，降低电动机的出力。同时，电动机的最大转矩也将降低，严重时会使电动机堵转，若维持端电压 U_1 不变，而减小 f_1 ，则气隙磁通 Φ 将增加。这就会使磁路过饱和，励磁电流上升，进而导致铁损急剧增加，这也是不允许的。因此要求在调频的

同时改变定子电压 U_1 ，以维持 Φ 接近不变。下面分两种情况进行说明（见图 2-59）。

1. 基频以下的恒磁通变频调速

为了保持电动机的拖动负载能力，应保持气隙主磁通 Φ 不变，这就要求降低供电频率的同时降低感应电动势，保持 E_1/f_1 为常数，即保持电动势与频率之比为常数，这种控制又称为恒磁通变频调速，属于恒转矩调速方式。可以近似地保持定子电压 U_1 和频率 f_1 的比值为常数，即认为 $E_1 \approx U_1$ ，保持 U_1/f_1 为常数。这就是恒压频比控制方式，是近似的恒磁通控制。

2. 基频以上的弱磁变频调速

频率由额定值向上增大时，电压 U_1 由于受额定电压 U_{1N} 的限制而不能再继续升高，只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变，这样必然会使主磁通随着 f_1 的上升而减小，相当于直流电动机弱磁调速的情况，即近似地看做恒功率调速方式。

此时，电动机最大电磁转矩 T_m 及其临界转差率 s_m 与频率 f_1 的关系，可近似表示为

$$T_m \propto \frac{1}{f_1^2}, s_m \propto \frac{1}{f_1}$$

变频调速器的作用就是把工频电源（50Hz）变换成各种频率的交流电源，以实现电动机的变速运行的设备，其中整流电路将交流电转换成电压可调的直流电，中间电路对整流电路的输出进行平滑滤波，逆变电路将直流电再逆变成频率可调的交流电。图 2-60 为交-直-交变频器的主电路原理图。

应用实例：

一般的挂式空调器或分体式空调器，采用 ON/OFF 控制方式，这种控制方式在室内温度和湿度会发生较大波动，影响人的舒适感且耗能大。压缩机在起动时有很大的冲击电流，需要配置比连续运行时更大的电源容量。

为了克服以上缺点，近几年出现了变频空调器，这种空调器中的控制器根据传感器测量得到的房间内的温度值与预先给定的温度设定值比较，根据两者的偏差去控制变频器的输出频率，从而改变压缩机的转速，达到调节被控房间温度的目的。使用变频空调可以达到以下效果：

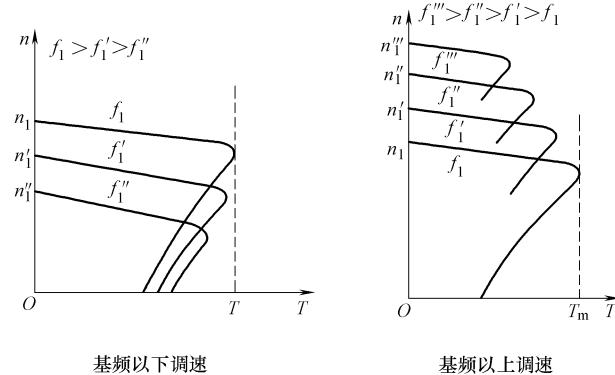


图 2-59 变频调速

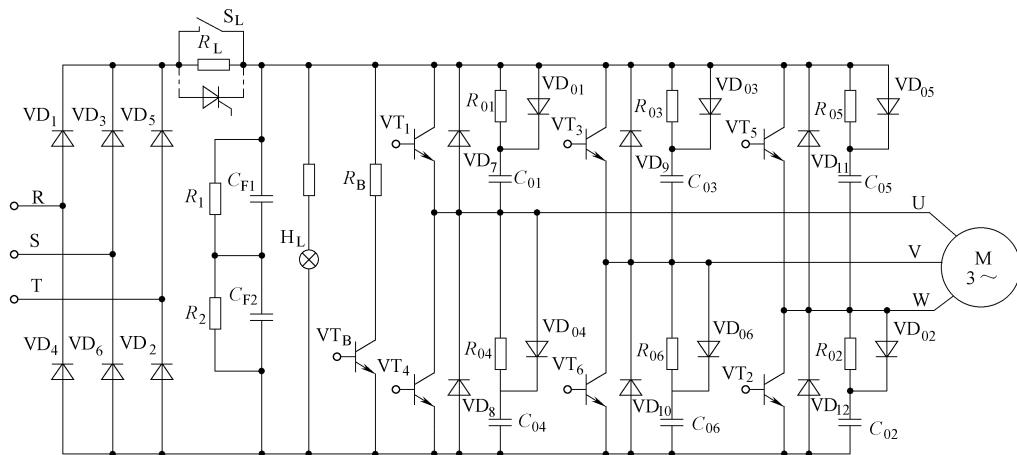


图 2-60 交-直-交变频器的主电路

- (1) 在室内外温度差异不大时，压缩机在较低频率下工作，可以节能；温度差异大时，使压缩机在较高频率下运行，以达到快速制冷的效果。
- (2) 使用了变频技术，压缩机的开停次数减少，制冷系统的压力变化损耗减少。
- (3) 减少了电动机的起动电流，可以降低对压缩机的冲击。
- (4) 室内温度波动小，仅在设定值上的一个极小范围内变化。人的舒适度得到了改善。

变频调速的特点：能够实现无级调速、调速范围宽、平滑性佳、机械特性硬度不变、效率高节能效果明显，电路接线简单。最大的缺点是需要有一套专用的变频电源，投资设备高。

对象：既适用于笼型电动机，也适用于绕线式电动机。可方便实现恒转矩、恒功率调速。如：冶金和造纸行业、运输机械、电梯等。

2.11.3 改变电动机的转差率调速

改变转差率调速方法有改变电源电压、改变转子回路电阻、电磁转差离合器调速等方式。

1. 改变电源电压调速

当改变外加电压时，由于电磁转矩 $T \propto U_1^2$ ，所以转矩随外加电压而改变，对应的不同机械特性如图 2-61 所示。当负载转矩 T_L 不变，电压由 U_1 下降至 U'_1 时，转速将由 n_a 降为 n_b ($a \rightarrow b$)。所以通过改变电压 U_1 可实现调速。

2. 改变转子回路电阻调速

改变绕线转子异步电动机转子电路的阻值（在转子电路中接入一变阻器），就会改变机械特性。电阻越大，曲线越偏向下方。在一定的负

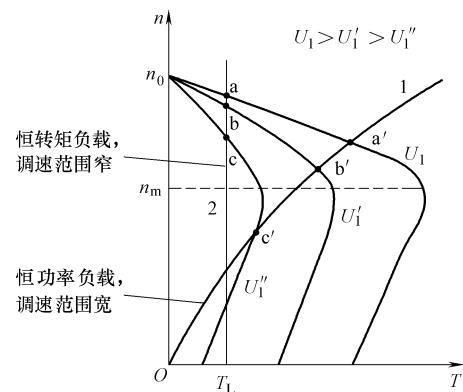


图 2-61 改变电源电压

载转矩 T_L 下, 电阻在一定范围内越大时, 转速越低。这种调速方法损耗较大, 调整范围有限, 主要应用于小型电动机调速中(例如起重机的提升设备)。

在起动前先将起动电阻器调至最大值的位置, 接通定子上的电源开关, 转子就开始慢慢转动起来, 随后把变阻器的电阻值逐渐减小到零位, 使转子绕组直接连接, 电动机就进入工作状态。电动机切断电源停止运行后, 还要注意将变阻器调回至起动位置, 为下一次起动做准备。

从机械特性曲线图 2-62 中可以看出, 转子回路串入电阻后, 可以增加起动转矩, 如果串入的电阻恰当的话, 就可以使起动转矩等于最大转矩, 以获得较好的起动性能。这样, 不仅增大了起动转矩, 同时又减小了起动时的转子电流, 可谓一举两得。

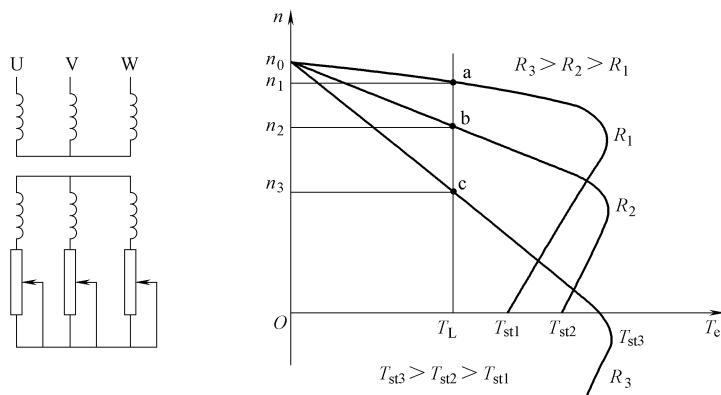


图 2-62 改变转子回路电阻调速

尽管绕线转子异步电动机的起动性能较好, 但笼型异步电动机由于具有结构简单、价格便宜、工作可靠等突出优点, 所以在不需要大的起动转矩的生产机械上一般采用笼型异步电动机而不使用绕线转子电动机。

3. 电磁转差离合器调速 (见图 2-63)

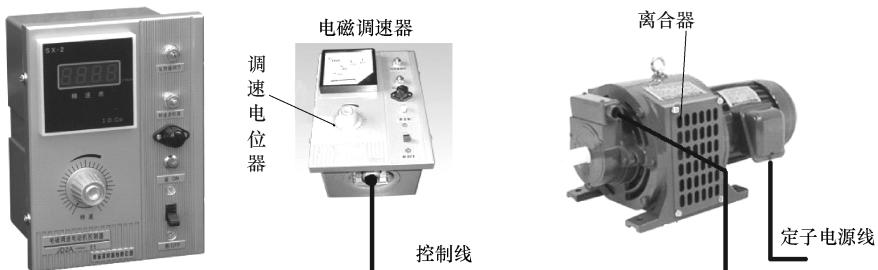


图 2-63 电磁调速器外形及接线示意图

电磁转差离合器调速系统, 实际上就是在笼型异步机轴上装一个电磁转差离合器, 通过晶闸管控制装置控制离合器绕组的电流(直流电), 改变这一电流, 就可以调节输出转速。

电磁转差离合器的基本工作原理是电磁感应原理。如图 2-64 所示为一个电磁离合器的工作示意图。

由图可见, 离合器主要是由主动和控制两部分组成。主动部分由异步电动机带动,

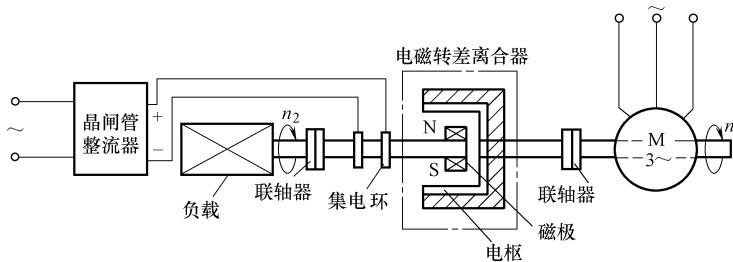


图 2-64 电磁离合器的示意图

以额定转速旋转。通过联轴器带动的笼型转子，是一个由铁磁材料制成的圆筒，习惯上称为电枢。控制部分一般称为磁极，在磁极上装有励磁绕组，绕组与磁极的组合称为感应子。被传动的生产机械连接在感应子的轴上。绕组的引线接于集电环上，通过电刷与直流电源接通，绕组内流过的励磁电流由直流电源提供，当励磁绕组通以直流电时，绕组就成为了磁极。由于电动机拖动电枢以恒定方向和转速旋转，因此电枢与磁极间有相对运动，电枢切割磁场，从而在电枢中产生感生电动势，进而产生转矩。电磁转矩将使磁极跟随电枢同向运动，这样磁极就带着生产机械一同旋转。晶闸管整流电源通常采用单相全波或桥式整流电路，通过改变晶闸管的控制角（也就是导通角）就可以很方便地改变直流输出电压的大小。负载的转速则由磁极磁场的强弱而定，也就是说，由提供给电磁离合器的电流大小而定。因此，只要改变励磁电流的大小就可以改变磁极的转速，也就可以改变负载的转速。

由此可见，当转矩等于零时，磁极是不会转动的，这就相当于工作机械和电动机分离，只有电动机旋转，而生产机械却不转动。一旦加上励磁电流，磁极就转动起来，这就相当于工作机械被合上，故称为离合器。离合器和异步电动机一起构成的调速系统也称为转差电动机。

2.12 三相异步电动机的制动控制

在电气控制中，电动机切断电源后，电动机将自由停车，但电动机自由停车的时间随惯性大小而不同，一般需要较长的时间才能停止。而某些生产机械则要求迅速、准确地停车，如镗床、车床的主电动机；数控机床的进给驱动；起重机为使重物停位准确及安全要求，也必须采用快速、可靠的停车方式。因此，对有此需求的电动机必须采取合适的停车方式，也就是电动机的制动。

所谓制动，就是在电动机切断电源后，给它一个与转动方向相反的转矩使它迅速停转；或在电动机的运行中加入反向转矩，以限制其转速。制动的常用方法一般有机械制动和电气制动两类。

2.12.1 机械制动

机械制动就是利用机械装置使电动机迅速停转，常用的方式有电磁抱闸、液压制动器等机械装置。

1. 电磁抱闸

电磁抱闸机构由制动电磁铁和闸瓦制动部分组成，分为通电制动和断电制动两种，如图

2-65 所示。

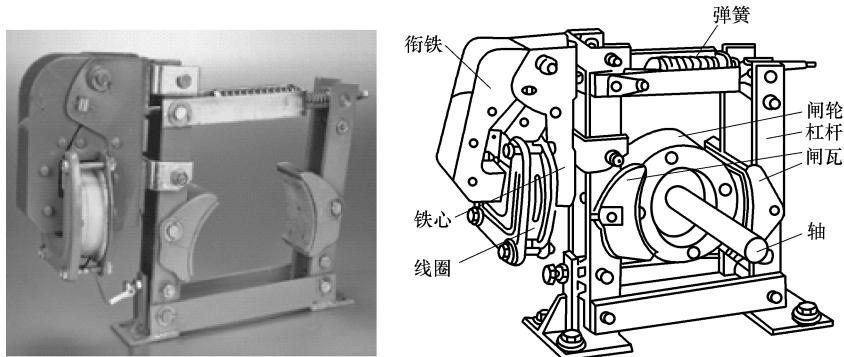


图 2-65 电磁抱闸机构

制动时将制动电磁铁的线圈通电或断电，通过机械抱闸使电动机制动。制动电磁铁由铁心、衔铁和线圈几个部分组成。制动机械部分包括闸轮、闸瓦、杠杆和弹簧等，闸轮与电动机同轴连接，闸瓦上面装有耐磨橡胶，通过闸瓦与闸轮之间的分离与接触实现制动。断电制动型工作原理是：当线圈通电时，闸瓦与闸轮脱离，对生产机械无制动作用；当线圈失电时，闸瓦紧紧抱住闸轮以实现制动。通电制动型的工作原理正好相反：当线圈通电时，闸瓦紧紧抱住闸轮进行制动；当线圈失电时，闸瓦与闸轮脱离，不起制动作用，机械设备正常运行。图 2-65 所示为断电制动型。

2. 电磁抱闸制动的特点

优点：安装简单可靠，制动力强，广泛应用在起重设备。

缺点：体积较大，制动橡胶易磨损，易产生振动。

2.12.2 电气制动

电气制动：在电动机停车时产生一个与转子原来转动方向相反的电磁转矩，迫使电动机迅速停车。

常用的电气制动方法有能耗制动、反接制动、回馈制动等方法。

1. 能耗制动

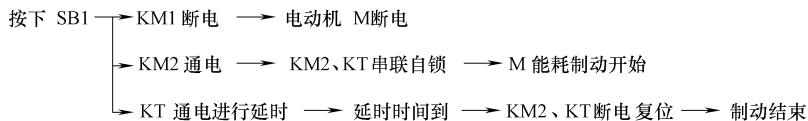
(1) 能耗制动的原理：三相异步电动机在断开电动机三相电源后，转子由于惯性仍继续沿原方向以转速 n 旋转，同时接通直流电源，此时直流电流流入定子的两相绕组，产生静止的恒定磁场，转子导体切割定子磁场产生感应电动势和电流，从而受到电磁力的作用，其方向与电动机转动方向相反，我们称之为制动转矩，它迫使转子转速下降。制动转矩随转子转速下降而减小，当转速降至零时，转子不再切割磁场，无转矩产生，电动机停转，制动结束。此法是利用转子转动的能量切割磁力线而产生制动转矩的，实质是将转子的动能消耗在转子回路的电阻上，故称为能耗制动。

制动转矩的大小与通入转子绕组中的直流电流的大小有关，通入的直流电流越大，静止磁场越强，制动力就越大。直流电流的大小，一般控制为电动机空载电流的 3~5 倍较为适宜。因为绕组的电阻值较小，制动时的电流就会较大，容易损坏电动机，故必须在直流电源回路中串入制动电阻 R_P ，制动时间的长短就由制动电阻 R_P 的大小来决定。

选择 R_p 时要注意以下两点：①电阻值越小，制动转矩越大，流过制动单元的电流越大；②不可以使制动单元的工作电流大于其允许最大电流，否则会损坏器件。

(2) 电路原理图 (见图 2-66)。

制动工作过程分析：



(3) 能耗制动制动力强、制动平稳、无大的冲击，电路简单，价格较低；但能耗制动在制动过程中，随着电动机转速的下降，拖动系统动能也在减少，于是电动机的再生能力和制动转矩也在减少，所以在惯性较大的拖动系统中，常会出现在低速时停不住，而产生“爬行”现象，从而影响停车时间的延长或停位的准确性；仅适用于一般负载的停车，多用于矿井提升和起重机运输等生产机械。

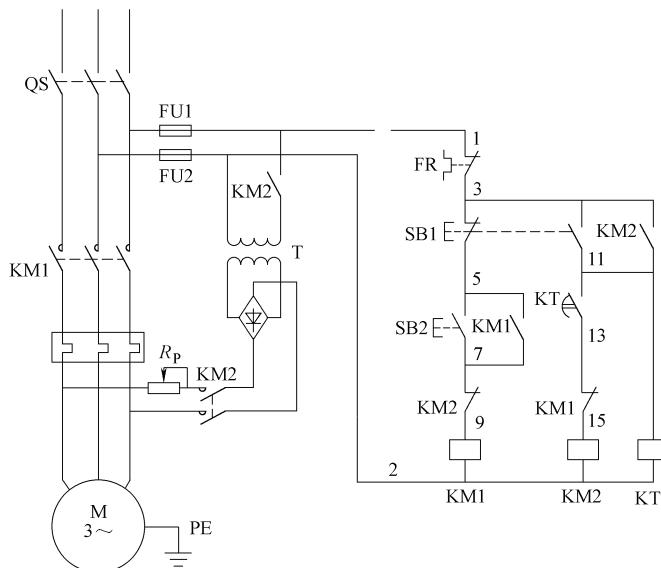


图 2-66 能耗制动电路

2. 反接制动 (可分为电源反接制动、倒拉反接制动)

(1) 电源反接制动

1) 电源反接制动原理：在正常运转的电动机断开电源的同时，改变加到电动机定子绕组上任意两相电源的相序，使之产生反向转矩而制动。

电源反接制动的实质其实就是使电动机欲反转而在未反转之前停车，因此当电动机的转速接近零时，应立即切断反接制动电源，否则电动机会反转。实际控制中一般采用速度继电器来自动切除制动电源。

电源反接制动控制电路如图 2-67 所示。其主电路和正反转电路完全相同。由于反接制动时转子与旋转磁场的相对转速较高，约为起动时的 2 倍，因此会致使定子、转子绕组中的电流很大，大约是额定值的 10 倍。为了防止大电流产生的危害，因此在反接制动电路中增

加了限流电阻 R 。KM1 为运行接触器，KM2 为制动接触器，SR 为速度继电器，其与电动机联轴，当电动机的转速下降到约为 $90\text{r}/\text{min}$ 的动作值时，SR 闭合的常开触点断开，切断 KM2 的电源，完成制动。

2) 反接制动分析：停车时按下停止按钮 SB2 → 复合按钮 SB2 的常闭触点先断开 → KM1 线圈断电 → KM1 主、辅触点恢复无电状态，结束正常运行并为反接制动做好准备 → 接通 KM2 线圈 (SR 常开触点在正常运转时已经闭合) → KM2 主触点闭合 → 电动机改变相序进入反接制动状态 → 辅助触点闭合自锁持续制动 → 当电动机的转速下降到设定的释放值时，SR 触点释放 → 切断 KM2 线圈 → 反接制动结束。

一般将速度继电器的释放值调整到 $90\text{r}/\text{min}$ 左右，如释放值调整得太大，反接制动不充分；调整得太小，又不能及时断开电源从而造成短时反转现象。

反接制动的优点是制动力强、停转迅速、控制电路简单、无需直流电源，设备投资少；缺点是制动过程冲击大、易损坏传动部件、制动准确性差、电能消耗多，有时会出现反转，所以得与机械抱闸配合。

因此适用于 10kW 以下小容量的电动机制动，要求迅速、系统惯性大，不经常起动与制动的设备，如铣床、镗床、中型车床等主轴的制动控制。

(2) 倒拉反接制动

主要出现在起重拖动中，在负载位能性负载，如图 2-68 所示，在负载位能性负载下，将电动机倒接旋转，使转子转向与旋转磁场旋转方向相反。

电动机原先提升位能性负载，如图 2-68 所示，运行在固有特性曲线 1 的 A 点，这时将转子回路串入较大的电阻 R_b ，由于惯性的作用，转速 n 来不及变化，但机械特性改变，平移到曲线 2 的 B 点，此时由于电磁转矩 T_c 小于负载转矩 T_{L2} ，转速下降。当转速降到零时 (C 点)，在负载拖动作用下，将电动机倒拉反转，直到 D 点，电磁转矩与负载转矩达到新的平衡，以稳定速度下放重物。倒拉反接制动时电动机的转差率为

$$s = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} \times 100\% = \frac{n_1 + n}{n_1} > 1$$

该制动方法能量消耗大，但能获得任意低的转速

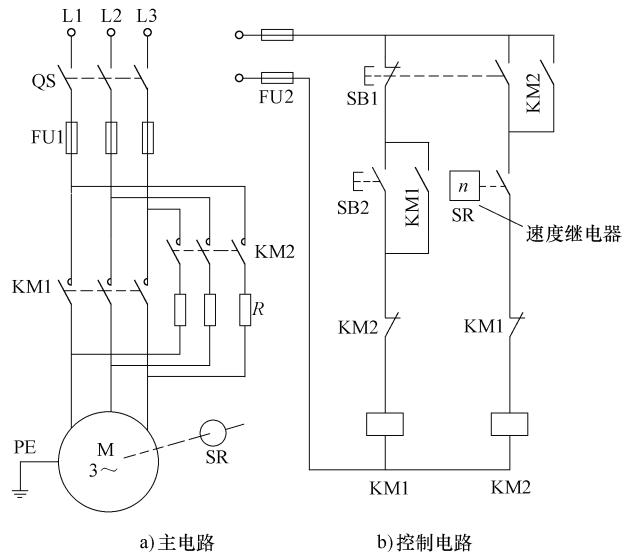


图 2-67 电源反接制动电路

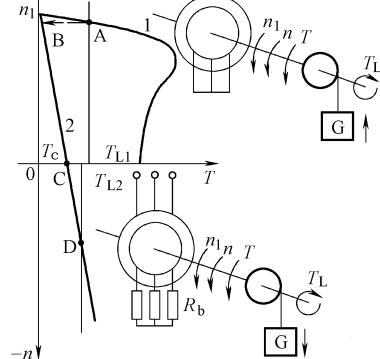


图 2-68 倒拉反接制动

来下放重物，安全性好。

3. 回馈制动

回馈制动主要发生在以下两种情况。

(1) 拖动位能性负载高速下放重物

电动机正转拖动起重机提升重物，下放重物时，定子电源相序反接，电动机反转，重物下放。由于重力的作用，使转子转速 n 超过旋转磁场转速 n_1 ，转子所受的力矩与转子的转向相反，迫使转子转速下降，起到制动作用，使重物匀速下降。电动机进入发电机状态，向电网反馈能量，故称为回馈制动，又可称为再生发电制动，如图 2-69 所示。

若电动机在提升过程中，运行于机械特性的 A 点，当下放时，电源反接，机械特性运行于图 2-69a 中第三象限，为反向电动状态。当 $T=0$ 时，由于重力的作用使转速继续增加并超过 n_1 进入第四象限（图 2-69b），此时 $n > n_1$ ，电磁转矩成为制动转矩，当到达 D 点时达到平衡，重物匀速下放，处于发电回馈制动状态。

若在转子回路中串入电阻，电磁转矩变小，制动力减小，制动力的大小和串入的电阻大小有关系。即转子回路串入电阻越大，特性曲线越软，而下放重物转速越高，故一般回馈制动时不串接转子电阻，以避免转速过高。

(2) 变极或变频调速过程

当变速多极电动机从高速档调到低速档或变频使转速从高变低时，旋转磁场转速突然减小，而转子具有惯性，转速尚未下降时，会出现回馈制动。如图 2-70 所示，电动机运行于曲线 1 的 A 点，当变频可变极调为曲线 2 时，运行过程为 A→B→C→D，其中 A→B 为惯性平移过程，B→C 为正向回馈过程，C→D 为电动减速过程。

回馈制动的特点：经济性好，可将负载的机械能转换为电能反送回电网，但应用范围不广，只有在 $n > n_1$ 时才能实现回馈制动。

2.13 单相异步电动机

单相异步电动机是靠 220V 单相交流电源供电的一类电动机，它广泛应用于只有单相电源的小型工业设备和家用电器中，如电风扇、洗衣机、电冰箱、手电钻及医疗设备等。单相异步电动机按起动方式的不同又分为单相电阻起动异步电动机、单相电容起动异步电动机、单相电容运转异步电动机和罩极式单相异步电动机。

1. 结构

单相异步电动机和三相异步电动机一样，其结构都由固定部分——定子、转动部分——转子两大部分组成，如图 2-71 所示。

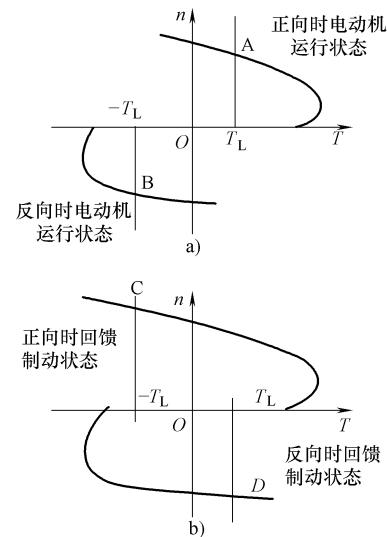


图 2-69 回馈制动

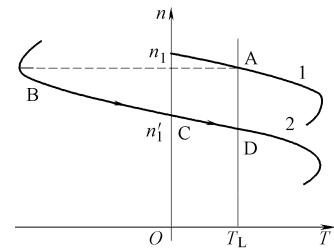


图 2-70 变频调速特性

(1) 铁心包括定子铁心和转子铁心，作用与三相异步电动机一样，是用来构成电动机的磁路，其由导磁性能良好的硅钢片叠压而成，其目的是防止发热，减小损耗。

(2) 单相异步电动机定子有两套绕组，分别是主绕组（又称为工作绕组）和副绕组（又称为起动绕组），两套绕组在空间上相差 90° 。主绕组用来建立主磁场，副绕组用来帮助电动机起动。两绕组的中轴线错开一定的电角度，目的是为了改善起动性能和运行性能。定子绕组多采用高强度聚酯漆包线绕制。

转子绕组一般采用笼型绕组，常用铝压铸而成。

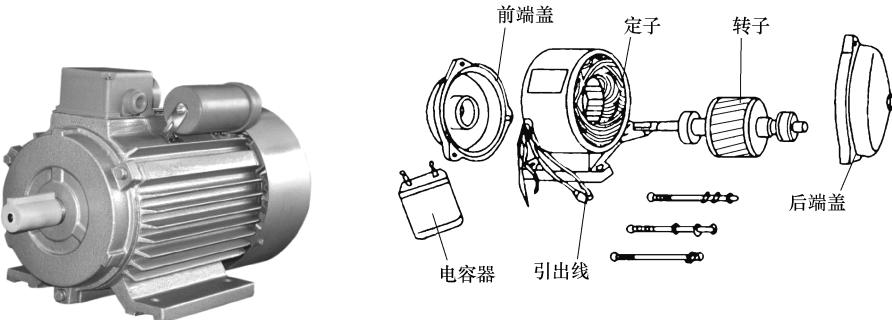


图 2-71 单相异步电动机的结构

(3) 离心开关、起动继电器或 PTC 起动器。

1) 离心开关。在单相异步电动机中，除了电容运转电动机外，在起动过程中，当转子转速达到同步转速的 70% 左右时，常借助于离心开关，切除单相电阻起动异步电动机和电容起动异步电动机的副绕组，或切除电容起动及运转异步电动机的起动电容器。离心开关一般安装在轴伸端盖的内侧。

2) 起动继电器。有些专用电动机，如电冰箱电动机，由于它与压缩机组装在一起，并放在密封的罐子里，不便于安装离心开关，就用起动继电器代替，继电器的吸铁线圈串联在主绕组回路中。起动时，主绕组电流很大，衔铁动作，使串联在副绕组回路中的动合触点闭合。于是副绕组接通，电动机处于两相绕组运行状态。随着转子转速上升，主绕组电流不断下降，吸引线圈的吸力下降。当到达一定的转速时，电磁铁的吸力小于触点的反作用弹簧的拉力，触点被打开，副绕组就脱离电源。

3) PTC 起动器。PTC 热敏电阻是一种新型的半导体元件。使用时，将 PTC 元件与副绕组串联。在起动时，因 PTC 热敏电阻尚未发热，阻值很低，副绕组处于通路状态，电动机开始起动。随着时间的推移，电动机的转速不断增加，PTC 元件的温度因电流的热效应而上升，当超过居里点 T_c （即电阻急剧增加的温度转折点）时，电阻剧增，副绕组电路相当于断开，但还有一个很小的维持电流，并有 $2 \sim 3\text{W}$ 的损耗，使 PTC 元件的温度维持在居里点 T_c 值以上。当电机停止运行后，PTC 元件温度不断下降，约 $2 \sim 3\text{min}$ 其电阻值降到 T_c 点以下，这时又可以重新起动。

2. 单相异步电动机的特点

(1) 转子静止时，产生的磁场为脉动磁场。单相异步电动机的主绕组中通过交流电流时，产生了脉动磁场，如图 2-72 所示。该磁场的大小、方向随时间按正弦规律变化，磁动

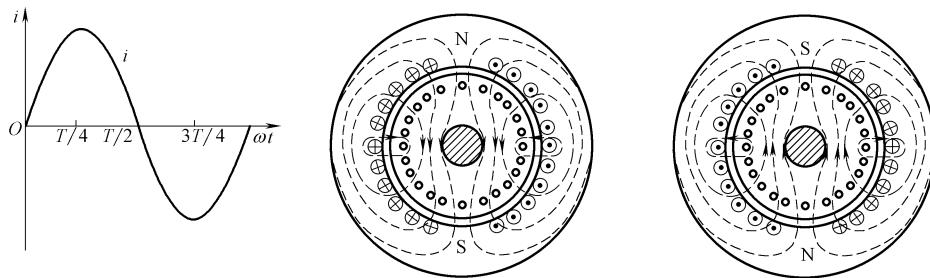


图 2-72 脉动磁场

势可分解为两个幅值相等、转速相反的旋转磁动势，这两个旋转磁场切割转子导体，并分别在转子导体中产生感应电动势和感应电流，该电流与磁场相互作用产生正、反电磁转矩。正向电磁转矩企图使转子正转；反向电磁转矩企图使转子反转。这两个转矩叠加起来就是推动电动机转动的合成转矩，其合成转矩为零，故不能自行起动。

(2) 旋转方向不确定，具体的转向由外力矩确定。当施加某一方向的外力时，其合成转矩不再为零，当合成转矩大于负载转矩时，电动机即使撤掉外力，仍然可以自行加速并在某一稳定转速下运行。

(3) 由于反向转矩的作用，使合成转矩减小，故单相异步电动机的过载能力较差，其效率及功率因数较低。

3. 单相异步电动机的工作原理

要使电动机旋转，其关键是要产生旋转磁场。在空间上相差 90° 的两个绕组中通入相位上相差 90° 的正弦交流电，那么就能产生一个像三相异步电动机那样的旋转磁场，实现自行起动。

(1) 分相式单相异步电动机。根据分相方式的不同，分相式电动机可分为电容分相式和电阻分相式，如图 2-73 所示。

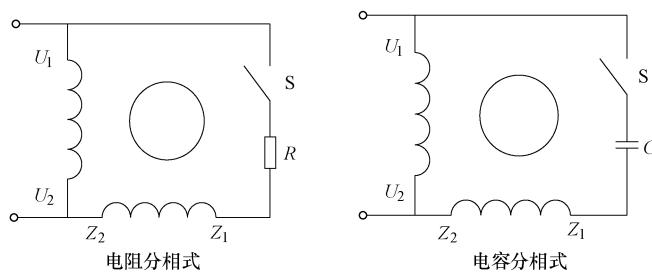


图 2-73 分相式单相异步电动机

电阻分相式电动机中，起动绕组用较细、电阻率较高的导线绕成，并串联接入适当的电阻 R ，以增大电阻，工作绕组的电阻值较小些，两者由同一交流电源供电。由于两个绕组的阻抗不一样，流过两绕组的电流 I_1 和 I_2 就相差一定的电角度，从而产生旋转磁场，产生电磁转矩。电动机静止或转速较低时，装在电动机后端盖上的离心开关 S 处于闭合状态；转速达一定值时（一般为 70%）， S 自动断开。切除起动绕组，由工作绕组提供磁场。该种电动机由于相位差小于 90° ，故起动转矩较小。主要应用对象为小型鼓风机、研磨搅拌机、小型

钻床、医疗器械等。

电容分相式电动机中，起动绕组中串联一个适当容量的电容，使两个绕组中的相位差接近 90° ，从而增大了起动转矩。主要应用对象为小型水泵、冷冻机、压缩机、电冰箱、洗衣机等。

(2) 罩极式单相异步电动机

罩极式电动机是单相交流电动机中最简单的一种，如图 2-74 所示，通常采用笼型斜槽铸铝转子。根据定子外形结构的不同，又分为凸极式罩极电动机和隐极式罩极电动机。凸极式罩极电动机的定子铁心磁极凸出，每个磁极上均有一个起辅助作用的短路铜环，即罩极绕组（相当于起动绕组），凸极磁极上的集中绕组作为主绕组。定子通入电流以后，部分磁通穿过短路环，并在其中产生感应电流。短路环中的电流阻碍磁通的变化，致使有短路环部分和没有短路环部分产生的磁通有了相位差，从而形成旋转磁场，使转子转起来。

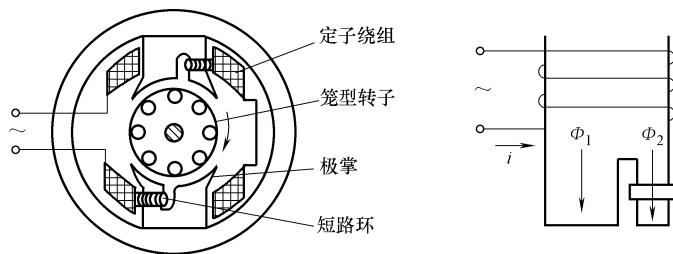


图 2-74 罩极式单相异步电动机

隐极式罩极电动机的定子铁心与普通单相电动机的铁心相同，其定子绕组采用分布绕组，主绕组分布于定子槽内，罩极绕组不用短路铜环，而是用较粗的漆包线绕成分布绕组（串联后自行短路）嵌装在定子槽中（约为总槽数的 $2/3$ ），起辅助组的作用。主绕组与罩极绕组在空间相距一定的角度。

罩极电动机具有起动转矩小，且不能实现正、反转的特点。主要应用对象为小型风扇、电吹风、电动模型等。

单相异步电动机结构特点及应用见表 2-3。

表 2-3 单相异步电动机结构特点及应用

电动机名称	结构特点	应用范围	备注
电阻分相单相异步电动机	定子绕组由起动绕组、工作绕组两部分组成； 起动绕组电路中的电阻较大 起动结束后，起动绕组被自动切断	小型鼓风机、研磨搅拌机、小型钻床、医疗器械、电冰箱等	改变转向时只要将工作绕组或起动绕组的两个接线端子对调，即可实现
电容起动单相异步电动机	定子绕组由起动绕组、工作绕组两部分组成； 起动绕组中串入起动电容器 C 起动结束后，起动绕组被自动切断	小型水泵、冷冻机、压缩机、电冰箱、洗衣机等	
罩极式电动机	定子由一组绕组组成，定子铁心的一部分套有罩极铜环	鼓风机、电唱机、仪器仪表电动机、电动模型等	不能改变转向

4. 单相异步电动机的反转

单相异步电动机的转向由起动绕组和工作绕组的接法所决定。

对于分相式异步电动机，只要将电源切断，把工作绕组和起动绕组这两个绕组中任一绕组的两个端子对调，就改变了两绕组中电流之间的相序，即电流反相 180° ，也就改变了旋转磁场的方向，使电动机的旋转方向得到改变。但对于罩极式电动机，其转向无法改变。

2.14 几种常用的电气控制电路举例

生产机械的种类多种多样，对于不同的生产机械，其电气控制方式各不相同，但万变不离其宗，不管多么复杂的电路，都是由一些基本电路组成的。机床电气控制系统是机床的重要组成部分，它是设备正常工作的重要保证，保证设备的各部件能够准确、协调的工作，以达到生产工艺的要求。本部分内容通过对几种典型的机床电气控制电路的分析，进一步掌握电气电路在具体的控制系统中的应用。

2.14.1 L-3 车床

1. 车床工作情况

车床是一种应用广泛的金属切削机床。主要用于车削外圆、内圆、端面、螺纹和成形表面，也可用于钻、铰等加工。其外观及主要部件如图 2-75 所示。

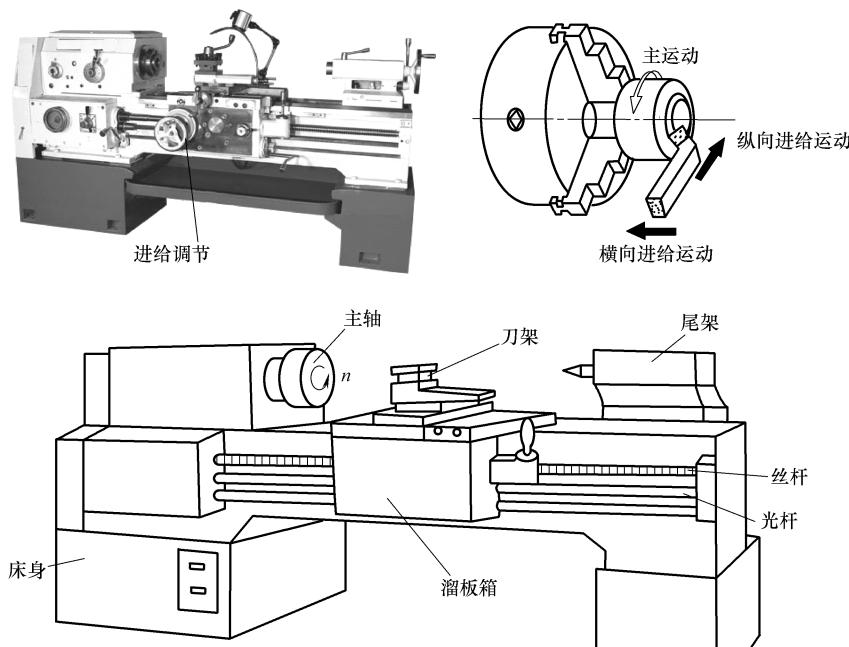


图 2-75 L-3 车床构造

车床的切削运动包括主运动、进给运动和辅助运动。主运动为工件的旋转运动，由主轴带动工件旋转。刀具安装在刀架上，随溜板箱沿主轴线方向实现进给运动，由进给箱调节加工时的横向和纵向进给量。辅助运动是指刀架的移动及工件的夹紧、放松等。

根据切削加工工艺，对电气控制的要求如下：主轴能够实现正反转，调速采用齿轮变速箱实现，控制电路有必要的保护及局部照明措施。长时间车削加工时，刀具与工件的温度较高，需设一冷却泵电动机对刀具与工件进行喷淋，实现刀具与工件的冷却。

2. 车床电路组成部分

车床电路由主电路、控制电路和照明电路几部分组成，如图 2-76 所示。

(1) 主电路分析。

L-3 型普通车床由两台电动机拖动。主轴电动机 M1 拖动主轴（卡盘）旋转，采用直接起动的方式起动，可正反两个方向旋转，正反转控制分别由接触器 KM1 和 KM2 控制，电动机 M2 拖动冷却泵。车削加工时，刀具与工件的温度较高，M2 实现对刀具与工件的冷却。冷却泵电动机 M2 单向旋转，采用直接起动方式，且与主轴电动机有必要的联锁保护。即必须要在主轴电动机起动后，冷却泵电动机才能运转。接触器 KM1 或 KM2 失电，主轴电动机停转，冷却泵电动机也同时停转。M1 和 M2 由热继电器 FR1 和 FR2 实现过载保护。

(2) 控制电路分析。

控制电路由 FU3 提供 380V 工作电压，FU4 提供变压器二次侧的短路保护。主轴电动机 M1 由交流接触器 KM1 和 KM2 实现正反转控制，为保证安全可靠，正反转控制中设置接触器联锁和按钮联锁。冷却泵电动机 M2，只有在 KM1 或 KM2 线圈得电，主轴电动机 M1 起动后，按下操作开关 SA1 方可起动。但当 M1 停车时，M2 随之停车。

(3) 照明电路分析。

控制变压器 T 提供 36V 安全电压供车床照明 (HL) 和电源指示 (EL)。

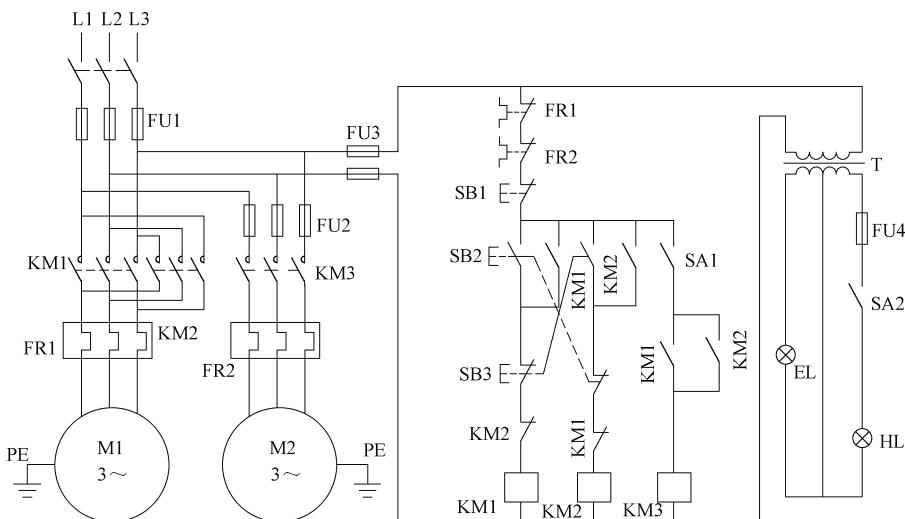


图 2-76 车床电路组成

2.14.2 电动葫芦

1. 电动葫芦工作情况

电动葫芦是一种用来吊起或放下重物并能使重物在短距离范围内水平及垂直移动的一种起重设备，广泛应用于工矿企业、仓库等场所，以完成各种搬运工作，提高劳动生产率，是

现代化生产中不可缺少的一种设备。常见的电动葫芦如图 2-77 所示。

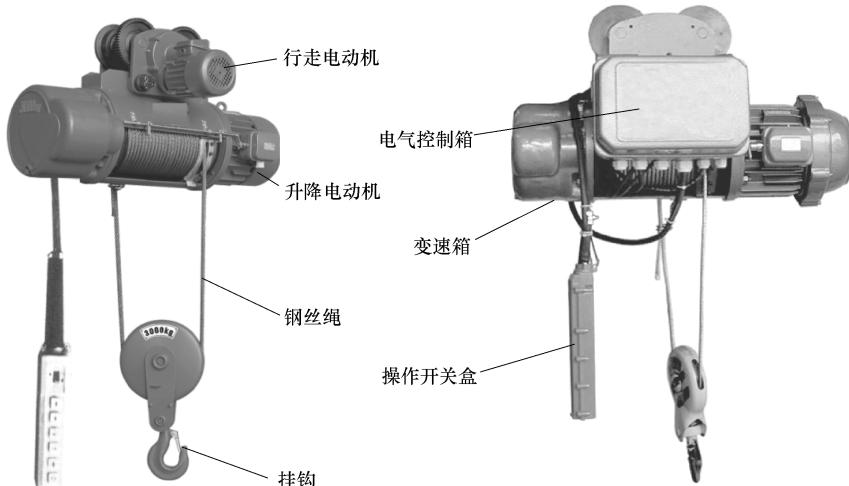


图 2-77 电动葫芦

2. 电路图（见图 2-78）及电路分析

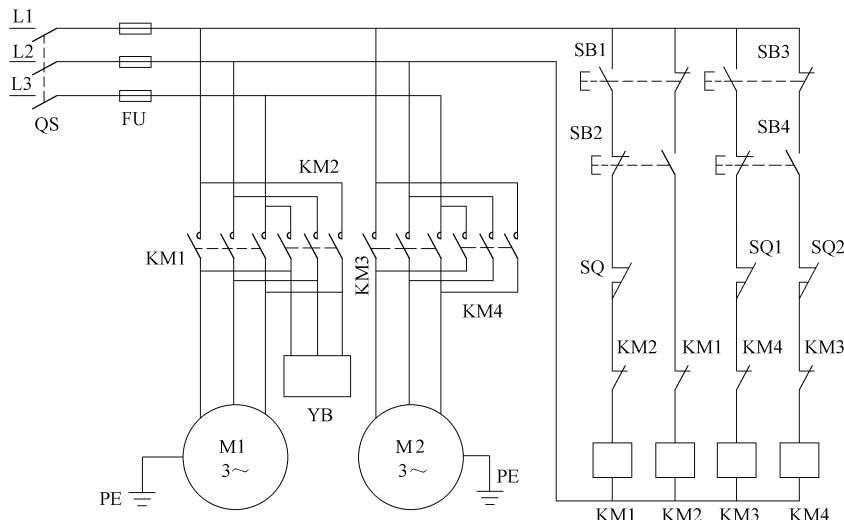


图 2-78 电动葫芦电路图

电动葫芦的机械工作原理：电动葫芦安装在工字钢横梁上，先起动升降电动机，把重物提升到适当的高度，再起动行走电动机把重物运到指定的位置，运行小车在单工字钢梁的下缘行走。行走时采用一个电动机驱动运行小车两边的车轮。由于行走速度比较小，因此运行小车一般不设制动机构。运行小车在行走时，为防止重物下降，在起升机构上设置了一个电磁制动器。制动器依靠弹簧的压力把内、外盘压紧，原理与摩擦离合器相似，松开时利用电磁铁通电以后吸住外盘而使内、外盘松开。电磁制动器的电路与起升电机的电路并联，因此只要起升电动机一起动，电磁制动器松开，重物便可上、下升降自如；当电动机关闭时，则电磁制动器也断电，电磁吸引力消失，在弹簧的压力作用下，内外盘紧紧压住，起到制动的作用。

电动葫芦由两个结构上相互有联系的升降机构和行走移动装置构成。升降电动机 M1 由上升、下降接触器 KM1、KM2 控制。按下 SB1 时，KM1 线圈得电，电动机运转，挂钩上升，提升重物。按下 SB2，KM1 线圈失电，KM2 线圈得电，重物下放。

行走电动机 M2 由向前向后接触器 KM3、KM4 控制。按下 SB3，横梁前移；按下 SB4，横梁后退。电动葫芦的工作时间较短，工作距离短，故电路采用点动控制。升降、行走电动机的控制电路均接有按钮联锁和接触器联锁。它们都是由电动葫芦悬挂组合按钮站上的四个复合式按钮来进行点动操作的。在起吊物品时为防止超出上升极限位置而造成事故，一般在卷筒的下部装设上升限位器。当重物上升至极限位置时，压板与限位开关接触，关闭电源，重物停止继续上升。限位器是为防止吊钩上升超过极限位置时而用的，因此不能经常使用。图中 SQ 就是提升机构的提升限位开关。SQ1、SQ2 为移动装置行走限位开关。YB 为下降速度控制电磁制动器。

电动葫芦检查、维护方法。

(1) 新安装或经拆检后安装的电动葫芦，首先应进行空车试运转数次。但在未安装完毕前，切忌通电试转。

(2) 在正常使用前应进行以额定负荷的 125%，提升离地面约 100mm，10min 的静负荷试验，并检查是否正常。

(3) 动负荷试验是以额定负荷重量，作反复升降与左右移动试验，试验后检查其机械传动部分、电器部分和连接部分是否正常可靠。

(4) 在使用中，绝对禁止在不允许的环境下，及超过额定负荷和每小时额定合闸次数(120 次)的情况下使用。

(5) 安装调试和维护时，必须严格检查限位装置是否灵活可靠。当吊钩降至下极限位置时，应保证卷筒上钢丝绳安全圈，有效安全圈必须在 2 圈以上。

(6) 不允许同时按下两个使电动葫芦相反方向运动的按钮。

(7) 工作完毕后必须把电源的总闸拉开，切断电源。

(8) 电动葫芦应由专人操纵，操纵者应充分掌握安全操作规程，严禁歪拉斜吊。

(9) 电动葫芦不工作时，不允许把重物悬于空中，防止零件产生永久变形。

(10) 钢丝绳是电动葫芦提升机构的重要组成部分，它直接影响葫芦的安全使用，钢丝绳常因磨损、断裂而报废，因此必须始终处于良好的润滑状态，并定期检查其末端的固定情况。

2.14.3 Z3040 型摇臂钻床电气控制

1. 钻床工作情况

钻床是一种孔加工机床，用于在大、中型零件上进行钻孔、扩孔等加工。因此，一般要求钻床的主轴运动和进给运动有较宽的调速范围。钻床种类很多，有台式、立式、卧式钻床以及摇臂钻床、深孔钻床、多轴钻床等。摇臂钻床具有操作方便、灵活、适用范围广等特点，特别适用于多孔大中型零件的孔加工，是机械加工中常用的机床，如图 2-79 所示。这里介绍 Z3040 型摇臂钻床，摇臂钻床主要由底座、内立柱、外立柱、摇臂、主轴箱及工作台等部分组成。

2. 摆臂钻床电气拖动特点及控制要求

Z3040 型摇臂钻床在加工前，通过摇臂的回转和升降、主轴箱的移动来调整位置。加工

时，主轴箱由夹紧装置紧固在摇臂导轨上，摇臂紧固在外立柱上，外立柱又紧固在内立柱上。主轴带动刀具旋转并向下垂直进给，实现钻孔、攻螺纹等加工。

Z3040型摇臂钻床的主运动是主轴的旋转运动，进给运动是主轴的上下移动。两者都由主轴电动机拖动，加工螺纹要求的主轴正反转、主轴的上下进给以及主轴和进给的变速都通过机械方法实现，因此主轴电动机只要求单向转动，不需要调速。

Z3040型摇臂钻床的辅助运动包括：摇臂沿外立柱的垂直移动，主轴箱沿摇臂的径向移动以及摇臂与外立柱一起相对于内立柱的回转运动。前者采用摇臂电动机拖动，通过螺旋传动来实现，要求电动机能正反转；后两者为手动。但是，所有上述辅助运动都必须在夹紧装置松开的情况下进行。夹紧装置的控制通过液压泵电动机拖动液压泵驱动夹紧机构来实现，因此要求液压泵电动机能正反转，点动控制。

此外，冷却泵电动机带动冷却泵提供冷却液，只要求单向旋转。考虑到各电动机的功率和各转动部分转动惯量都不大，因此全部电动机都可采用全压起动，也无需制动。

Z3040型摇臂钻床还具有联锁与保护环节以及安全照明、信号指示电路。

图2-80为Z3040型摇臂钻床的电气控制原理图。本电路较复杂，所使用的元件如列表所示。

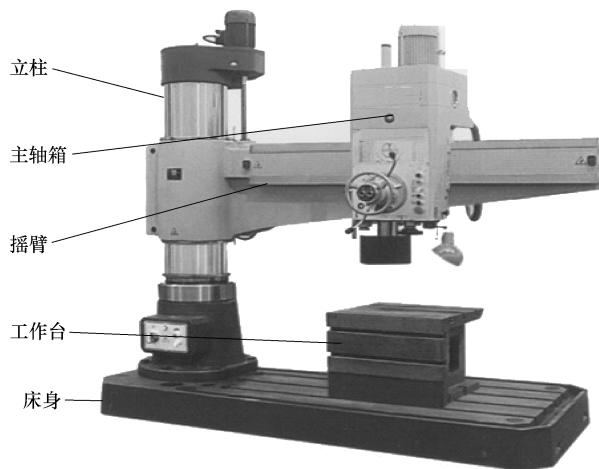


图2-79 摆臂钻床

序号	符号	功 能 说 明	序号	符号	功 能 说 明
1	M1	主轴电动机(旋转)	16	QS	电源开关
2	M2	摇臂升降电动机	17	SA2	照明灯开关
3	M3	液压泵电动机	18	KT	摇臂升降延时
4	M4	冷却泵	19	YV	电磁阀
5	KM1	主轴运转接触器	20	SB1	主轴停止按钮
6	KM2	摇臂上升	21	SB2	主轴起动按钮
7	KM3	摇臂下降	22	SB3	升降电机正转按钮
8	KM4	液压泵电动机正转	23	SB4	升降电机反转按钮
9	KM5	液压泵电动机反转	24	SB5	立柱松开按钮
10	SA1	冷却泵电机开关	25	SB6	立柱夹紧按钮
11	SQ1	上升限位保护	26	HL	指示灯
12	SQ2	摇臂松开	27	FR1	M1 过载保护
13	SQ3	夹紧	28	FR2	M2 过载保护
14	SQ4	夹紧/松开指示	29	FU	短路保护
15	SQ5	下降限位保护			

(1) 主电路分析。电源由总开关 QS 引入，主轴电动机 M1 由 KM1 控制单向旋转，主轴的正反转由液压系统配合离合器来完成。摇臂升降电动机 M2 由接触器 KM2、KM3 来控制其正反转。液压泵电动机 M3 拖动液压泵以实现摇臂的松开/夹紧，并由接触器 KM4、KM5 控制正反转。冷却泵电动机由 SA1 控制。

(2) 控制电路分析。主轴电动机 M1 的起动：按下起动按钮 SB2→接触器 KM1 线圈得电→M1 转动。

M1 的停止：按下停止按钮 SB1→接触器 KM1 线圈失电→M1 停止。这就是一个简单的自锁电路。

摇臂升降（发出摇臂移动信号→发出松开信号→摇臂移动，摇臂移动到所需位置→夹紧信号→摇臂夹紧）、主轴箱与立柱的夹紧和放松、冷却泵电动机 M4 控制、完善的联锁与保护、照明与信号指示电路分析、HL1 为主轴箱与立柱松开指示灯（可以手动使主轴箱水平移动或推动摇臂连同外立柱绕内立柱回转）、HL2 为主轴箱与立柱夹紧指示灯（可以进行钻削加工）、HL3 为主轴电动机起动旋转指示灯（可以对主轴控制）、EL 为机床局部照明灯。

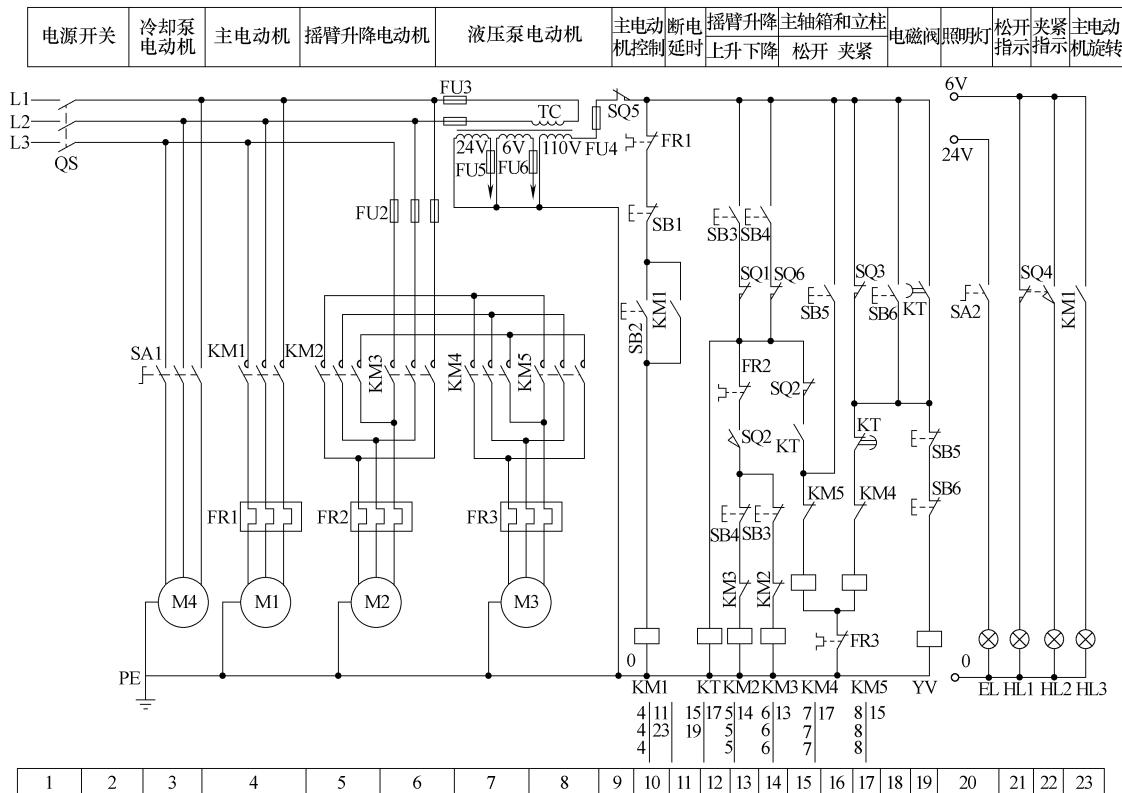


图 2-80 Z3040 型摇臂钻床的控制原理图

2.14.4 M7120 型平面磨床概述

1. 平面磨床工作情况

磨床是一种精密加工机床，有平面磨床、外圆磨床、内圆磨床及一些专用磨床等。平面

磨床是用砂轮周边进行磨削加工各种零件表面的精密机床，可加工硬质材料，其特点是加工精度高，光洁度高。

M7120型平面磨床的工作台上固定有电磁吸盘来固定工件，工作台可在床身导轨上来回运动，砂轮可在横向导轨上做横向运动，砂轮箱可在立柱导轨上做垂直方向的运动。磨床的运动主要有以下几种：砂轮的旋转运动（主运动）、工作台左右往返运动、砂轮在床身导轨上的前后运动、砂轮在主柱导轨上的上下运动。工作台每做完一次往返运动，砂轮自动做一次前进运动，加工完一次平面后，砂轮由手动做垂直进给，进给量由手动控制。M7120型平面磨床如图2-81所示。

2. 平面磨床电气拖动特点及控制要求

它的运动形式有以下几种。

（1）主运动：砂轮的旋转运动，线速度为 $30\sim50\text{m/s}$ 。

（2）进给运动：工作台在床身导轨上的直线往复运动；磨头（砂轮箱）在滑座立柱上做横向和垂直直线运动；采用液压驱动，可平滑调速。

（3）拖动方式：主轴电动机拖动砂轮旋转，液压泵电动机拖动工作台进给，冷却泵电动机拖动冷却泵电机。

它的控制要求如下：

- （1）各电动机均为单向运转，电动机的容量不大，采用全压起动。
- （2）起动顺序：先起动冷却泵、后起动主轴或同时通电起动。
- （3）保护：电磁吸盘欠电压保护、短路、过载、零压保护。只有当电磁吸盘的吸力足够大时，才能允许起动M1、M2，防止吸力较小使工件在磨削过程中发生高速飞出的事故。
- （4）移除工件时去磁。

图2-82所示为M7120型平面磨床的电气控制原理图。

使用的元件如列表所示。

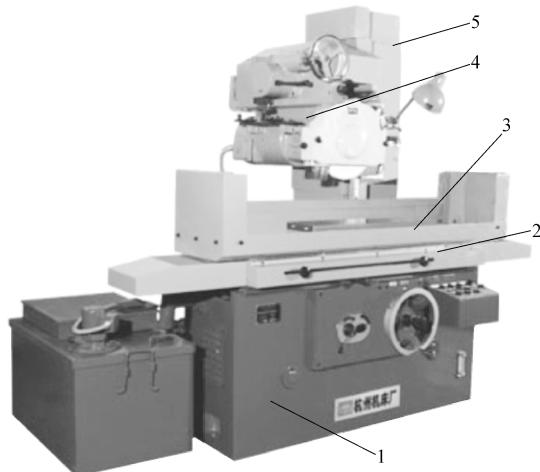


图2-81 平面磨床

1—床身 2—工作台 3—电磁吸盘 4—砂轮箱 5—立柱

序号	符号	功能说明	序号	符号	功能说明
1	M1	液压泵电动机	9	KM5	充磁
2	M2	砂轮电动机	10	KM6	去磁
3	M3	冷却泵电动机	11	FR	过载保护
4	M4	砂轮箱升降电动机	12	QS1	电源总开关
5	KM1	控制液压泵接触器	13	QS2	照明灯开关
6	KM2	控制砂轮旋转电动机	14	SB1	停止
7	KM3	控制砂轮升降电动机	15	SB2	M1 起动
8	KM4	控制砂轮升降电动机	16	SB3	M2、M3 停止

(续)

序号	符 号	功 能 说 明	序号	符 号	功 能 说 明
17	SB4	M2、M3 起动	22	SB9	去磁
18	SB5	砂轮上升起动	23	VC	整流电路
19	SB6	砂轮下降起动	24	R	电阻放电保护
20	SB7	停止充磁	25	C	电容放电保护
21	SB8	开始充磁	26	KUV	欠电压保护

电源开关及保护	液压泵电动机	砂轮电动机	冷却泵电动机	砂轮升降电动机	控制电源及保护	液压泵控制	砂轮冷却	砂轮 上升	砂轮 下降	电磁吸盘 充磁	电磁吸盘 去磁	整流电路	失电压 保护	电磁吸盘 充磁去磁	信号灯	电源	液压	砂轮	砂轮 升降	电磁吸 盘工作	照 明 灯
	QS	FU1	FU2	V1	V2	V3	V4	FU4	FU5	FU6	FU7	FU8	KV	VC	QS2	HL1	HL2	HL3	HL4	HL5	EL

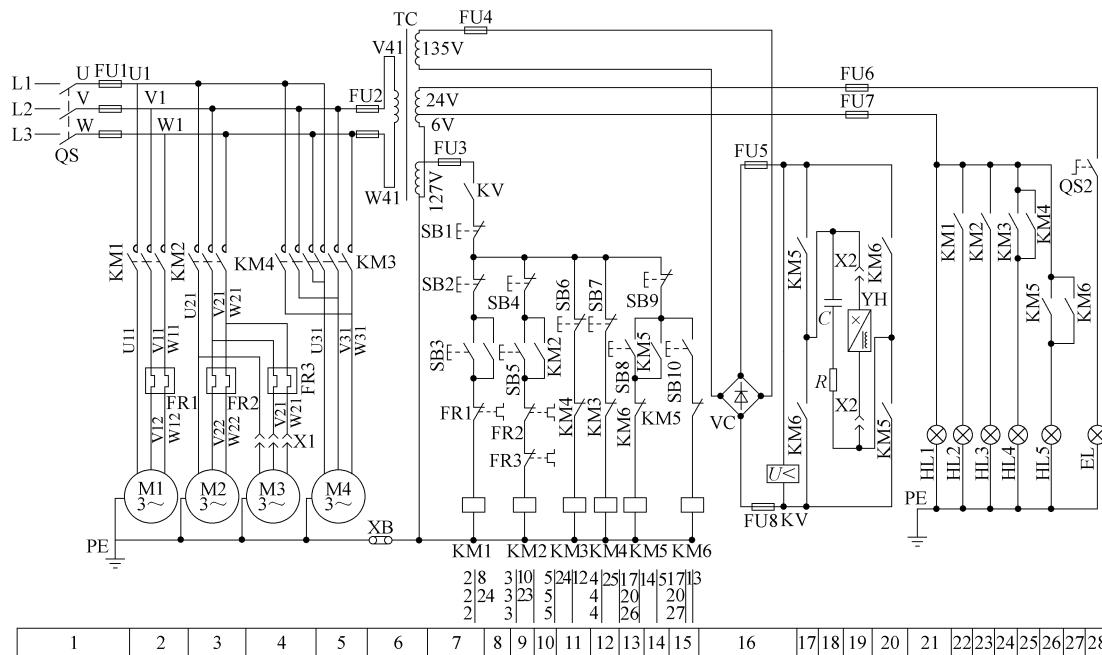


图 2-82 M7120 型平面磨床电气控制原理图

由图可知，在主电路中 M1 是液压泵电动机，M2 是砂轮电动机，M3 是冷却泵电动机，M4 是砂轮升降电动机。电磁吸盘电路由整流装置、控制装置及保护装置等组成。

整流部分由整流变压器 T 和桥式整流器 VC 组成，输出 110V 直流电压。电磁吸盘在电压低于 110V 时，KV 不吸合，故 KM1 也不吸合，所有电动机均不能启动。SB8 按钮控制 KM5 吸合，电磁吸盘起动充磁，SB9 电磁吸盘充磁停止，SB10 按钮控制 KM6 吸合，吸盘退磁。如图 2-83 所示。

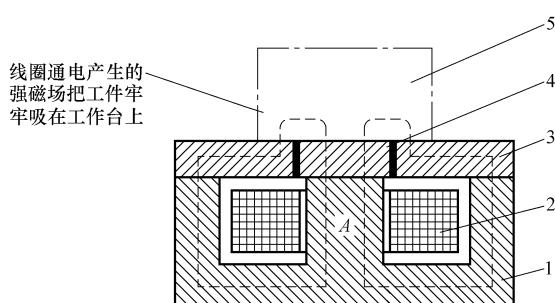


图 2-83 电磁吸盘

1—钢制吸盘体 2—线圈 3—钢制盖板
4—隔磁层 5—工件

本 章 小 结

电气控制系统的分析是一个电气工程技术人员所必须具备的基本能力。

本部分主要介绍了交流电动机的基本结构、工作原理和常用低压电器以及基本电气控制电路的分析、安装的方法等内容。主要如下：

(1) 三相异步电动机主要由定子和转子构成，其中按转子结构的不同又分为笼型转子和绕线转子，两种结构各有特点。

(2) 三相交流电通入按一定规则排列的三相异步电动机的定子绕组中，产生旋转磁场，处在旋转磁场中的转子导体切割磁场产生感应电动势，从而在转子导体中产生感应电流，此电流与旋转磁场相互作用，产生电磁转矩，使转子同方向旋转。由于转子与旋转磁场之间的转速存在差异，即转子转速比磁场转速略低，故称为异步电动机。三相电源中，任意改变两相的相序，就改变了旋转磁场的转向，电动机就可以实现反向旋转。

(3) 低压电器是电力拖动系统中的基本组成部分。大多数低压电器是通过吸引线圈的通断电来实现触点的通断的，在使用时，要注意各种电器的参数，如额定电压、额定电流，并能正确认识各种电器符号等。不同的电器具有不同的功能，如熔断器是用来实现短路保护的，而热继电器是用来实现过载保护的，根据保护及控制的要求正确选用，并进行必要的调整。

(4) 电气控制的对象是电动机，不同的电路有不同的控制要求。对于不同的电动机也有各自的具体要求。直接起动时电动机的起动转矩大，但起动电流大，是正常工作时电动机额定电流的4~7倍，多用于7.5kW以下的小型电动机。对于不允许直接起动的电动机，要根据负载不同的转矩要求采用不同的减压起动方法。例如电动机的正反转、电动机的多地点控制、星-三角起动控制等，要会正确分析各种电路的控制功能，并能熟练接线。

(5) 绕线转子异步电动机与笼型异步电动机的区别，绕线转子异步电动机的基本结构，以及其起动方法的介绍。对于采用转子串电阻减压起动的方法时，可以提高起动转矩。

(6) 为适应生产机械的不同要求，电动机具有不同的调速方法，常用的调速方法有降压调速、变极调速、改变转差率调速。

(7) 对于要求快速停止的机械要采取制动措施。常用的电气制动方法有反接制动、能耗制动、回馈制动。其中反接制动有电源反接制动和倒拉反接制动。

(8) 单相异步电动机在通入单相交流电时产生脉动磁场，为了让电动机起动运行，在起动绕组上采用了不同的起动方法，一般有分相式和罩极式单相异步电动机，罩极式单相异步电动机不能实现转向的改变。

(9) 电气电路常见故障分析，针对故障现象，认真分析查找，以便正确处理。

习 题

一、简答题

- 试述笼型三相异步电动机的工作原理，并说明“异步”的含义。三相异步电动机旋转磁场的转速由什么决定？对于工频下的2、4、6、8、10极的三相异步电动机的同步转速为多少？一台三相8极异步电动机，额定转差率为 $s_N = 0.043$ ，问该电动机的同步转速是多少？若该电动机运行转速为700r/min，转差率是多少？电动机起动时，转差率是多少？

2. 胶木闸刀开关安装时要注意些什么问题?
3. 试画出控制按钮的符号, 并说明在接电路时应按照什么原则选用按钮?
4. 叙述交流接触器的工作原理及主要组成部分, 铁心上嵌有短路环的作用是什么?
5. 交流接触器在电路中具有什么作用? 熔断器在电路中的作用是什么? 它有哪些主要参数?
6. 有一台电磁线圈工作电压为 220V 的交流接触器, 若接在电源电压为 380V 的控制电路中, 此接触器将会怎么样?
7. 交流接触器在使用中, 可能发生的主要故障有哪些?
8. 热继电器中的工作原理是怎么样的? 它主要用来起什么保护作用? 电动机的起动电流很大, 当电动机起动时, 热继电器会不会动作? 为什么?
9. 在电路中已有熔断器, 为什么还要有热继电器? 熔断器与热继电器用于保护交流三相异步电动机时, 能不能互相取代? 为什么?
10. 甲乙两个接触器, 欲实现互锁控制, 则应怎么办?
11. 常用的减压起动方式有哪些?
12. 如何实现三相异步电动机的反转?
13. 为了观察接触器主触点的电弧情况, 有人将灭弧罩取下后起动电动机, 这样做法是否可以? 为什么?
14. 行程开关的作用与按钮有什么不同? 空气式时间继电器主要有哪些部分组成? 试述其延时原理。
15. 什么是低压电器? 机床继电器-接触器控制线路中一般应设哪些保护? 各有什么作用? 短路保护和过载保护有何区别? 零电压保护的目的是什么?
16. 电动机可逆运转电路中, 已采用了按钮的机械互锁, 为什么还要采用电气互锁? 当出现接触器互锁触点接错, 电路将发生什么现象?
17. 如图 2-84 所示为几位同学在做实操时出现的几个电路, 请你说说他们做的对否? 为什么? 应如何正确接线?

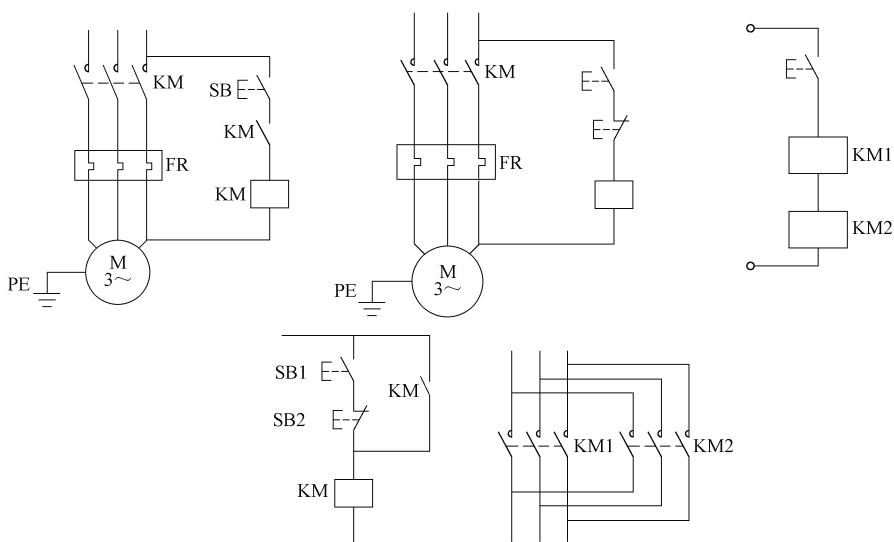


图 2-84

18. 什么是异步电动机的能耗制动？什么是异步电动机的反接制动？各有什么特点？什么是异步电动机的固有机械特性？什么是异步电动机的人为机械特性？

19. 有人在检查一台运行中的砂轮机时，发现一相熔断器松动，但并未熔断，此人认为为了安全防止熔断器掉落，故将其拔下。请你说说此人的做法有无道理，为什么？

20. 对于罩极式单相电动机，若调换磁极上工作绕组的两个接线头，能否改变电动机的转向？

二、读图分析

如图 2-85 所示电气原理图，请写出：

(1) 线路类型及特点。

(2) 起动过程的动作过程分析。

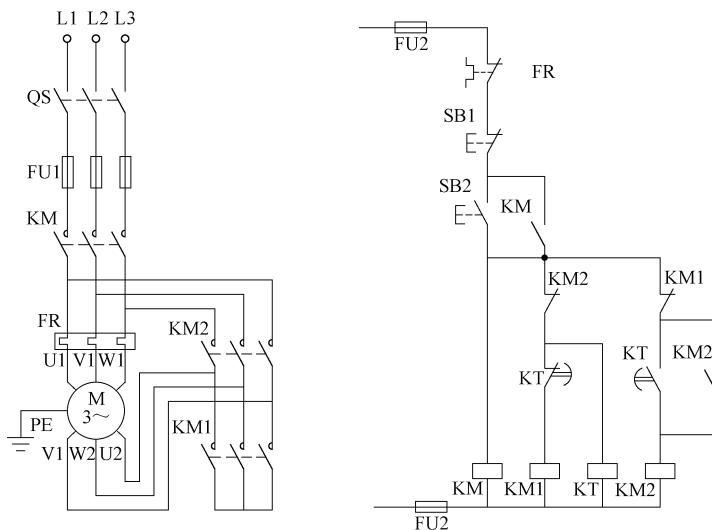


图 2-85

三、画图与设计题

1. 设计一个控制线路，要求第一台电动机起动 2s 左右后，第二台电动机自行起动，运行 5s 左右后，第一台电动机停止并同时使第三台电动机自行起动，再运行 15s 左右后，电动机全部停止。

2. 设计一小车运行的控制线路，小车由异步电动机拖动。其动作过程如下：

- (1) 小车由原位开始前进，到终点后自动停止；
- (2) 在终点停留 10min 左右，然后自动返回原位停止；
- (3) 要求能在前进或后退途中任意位置都能停止或起动。

3. 现有一双速电动机，试按下述要求设计控制电路。

- (1) 分别用两只按钮操作电动机的高速起动与低速起动，用一个总停按钮操作停止；
- (2) 起动高速时，应先接成低速，然后经延时再转换到高速；

- (3) 有短路、过载、失压及欠电压保护。
4. 试画出三相笼型异步电动机Y-△减压起动的控制线路（可以手动控制，也可以自动控制）。
5. 试画出某液压机床的电路图，对液压泵电动机M1和主电机M2的运行情况，有如下的要求：
- (1) 必须先起动M1，然后才能起动M2；
 - (2) M2 可以单独停转；
 - (3) M1 停转时，M2 也应自动停转。
6. 设计一个实现自动往复循环控制的控制电路，画出主电路和控制电路，并说明工作原理。具体要求如下：
- (1) 电动机能够正转或者反转；
 - (2) 工作台在撞块1、2之间自动往复循环运动；
 - (3) 有必要的短路、过载保护；
 - (4) 控制电源为127V。



第3章 变压器基础知识

学习目标

1. 掌握变压器的结构。
2. 掌握变压器的工作原理。
3. 掌握三相变压器的结构及联结组标号。
4. 能判断变压器故障，对一般故障能进行修理与试验。

变压器是用来改变交流电压大小的静止的电气设备。它的工作原理是根据电磁感应，把某一等级的交流电压变化成频率相同的另一等级的交流电压，以满足不同负载的需要。还可用来改变电流、变换阻抗以及产生脉冲等。主要用于输配电系统，而且还广泛应用于电气控制领域、电子技术领域，测试技术领域以及焊接技术领域等。

3.1 变压器的用途和分类

现代化的工业企业广泛采用电力作为能源，而发电厂发出的电力往往需经远距离传输才能到达用电地区。在传输的功率恒定时，传输电压越高，则所需的电流越小。因为电压降 $U = IR$ ，正比于电流。线损由公式 $P = I^2 R$ 知正比于电流的二次方，所以用较高的输电电压可以获得较低的线路压降和线路损耗。要制造电压等级很高的发电机，由于绝缘材料的限制，目前技术很困难也不现实，所以要用专门的设备将发电机端的电压升高以后再输送出去，这种专门的设备就是变压器。另一方面，在受电端又必须用降压变压器将高压降低到配电系统的电压，故要经过一系列配电变压器将高压降低到合适的值以供使用。送电原理如图 3-1 所示。

由以上可知，变压器是一种通过改变电压而传输交流电能的静止的感应电器。在电力系统中，变压器的地位十分重要，不仅所需数量多，而且性能好，运行安全可靠。我国目前应用较多的线路电压等级有 35kV、110kV、220kV、330kV、500kV 等。

变压器除了应用在电力系统中，还应用在需要特种电源的工矿企业中。例如：冶炼用的电炉变压器，电解或化工用的整流变压器，焊接用的电焊变压器，试验用的试验变压器，以及补偿用的电抗器，保护用的消弧线圈，测量用的互感器等。

变压器按用途分有电力变压器，除此之外的其他用途的变压器统称为特种变压器（在特殊场合使用的变压器，如作为焊接电源的电焊变压器；专供大功率电炉使用的电炉变压器；将交流电整流成直流电时使用的整流变压器等），图 3-2 为几种常见的特种变压器。按结构型式分有单相变压器、三相变压器。按冷却介质分有干式变压器、液（油）浸变压器及充气变压器等。按冷却方式分有自然冷式、风冷式、水冷式、强迫油循环风（水）冷方式、及水内冷式等。按线圈数量分有自耦变压器、双绕组及三绕组变压器等。按铁心形式分

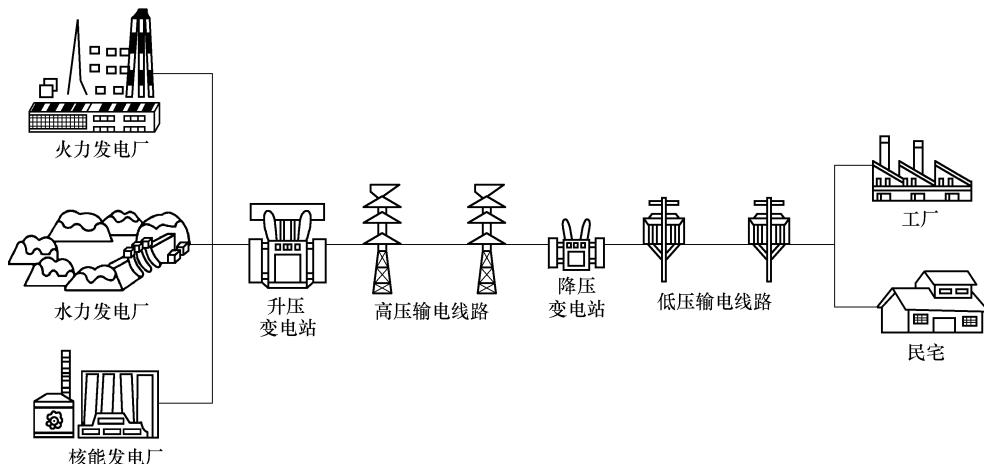


图 3-1 供电网络

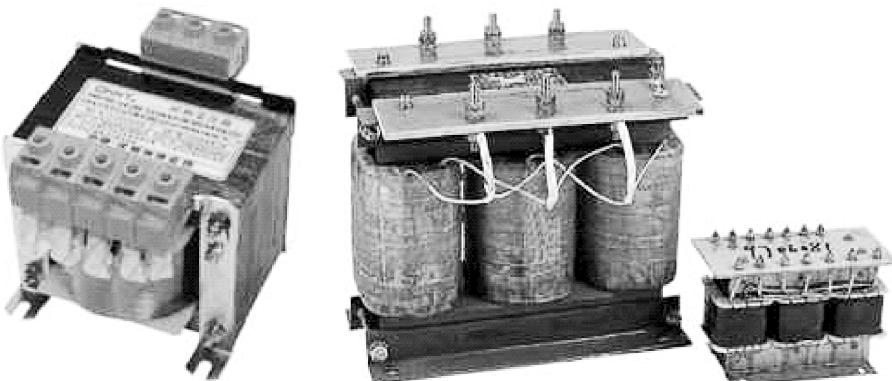


图 3-2 常见的特种变压器

有心式变压器、壳式变压器及辐射式变压器等。

在电力网中，把水力、火力及其他形式电厂中发电机组能产生的交流电压升高后向电力网输出电能的变压器称为升压变压器，火力发电厂还要安装厂用电变压器，供起动机组之用，用于降低电压的变压器称为降压变压器，用于联络两种不同电压网络的变压器称为联络变压器。将电压降低到电气设备工作电压的变压器称为配电变压器。配电前用的各级变压器称为输电变压器。

3.2 变压器的原理

变压器的基本部件是铁心和绕组，图 3-3 是变压器的基本工作原理图，在图中和电源相连接的绕组称为一次绕组，与负载相连的绕组称为二次绕组。

当一次绕组加上交流电源电压时，一次绕组中有交变电流，而建立磁势，在磁势的作用下铁心中便产生交变主磁通，主磁通在铁心中同时穿过，交链一、二次绕组而闭合，由于电磁感应作用分别在一、二次绕组产生感应电动势。

描述理想变压器的电动势平衡方程式为

$$e_1(t) = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi \cos \omega t$$

$$e_2(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_2 \Phi \cos \omega t$$

1. 变换电压

各电动势有效值分别是

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44fN_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44fN_2 \Phi_m$$

式中 ω ——角频率；

Φ_m ——磁通最大值。

当变压器空载运行时，忽略一次侧绕组的阻抗，有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1 \Phi_m, U_2 \approx E_2 = 4.44fN_2 \Phi_m$$

则有

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

通常称 K 为变压器的电压比。

至于为什么它可以升压和降压呢，从上面的公式中可以很容易看出。若 $N_1 > N_2$ ，即 $K > 1$ ，经过变压器后，电压降低，这种变压器称为降压变压器。反之，若 $N_1 < N_2$ ，则称为升压变压器。

2. 变换电流

由能量守恒可知，当变压器在负载运行，并忽略损耗时，有 $P_1 = P_2$ ，即

$$I_1 U_1 = I_2 U_2 \Rightarrow I_1 N_1 = I_2 N_2$$

则有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

从以上分析可知，变压器不仅具有变换电压的作用，还可以变换电流。

3. 变换阻抗

在电子线路中，变压器常用来变换交流阻抗。在电子装置中，我们总希望负载获得最大功率，而负载获得最大功率的条件是负载阻抗等于信号源的内阻抗，也就是常说的阻抗匹配。但是实际中，负载阻抗与信号源内阻往往是不相等的，为此，就要利用变压器进行阻抗变换，使负载获得最大功率，如图 3-4 所示。

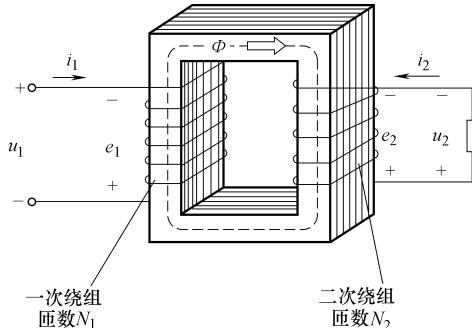


图 3-3 变压器的基本工作原理

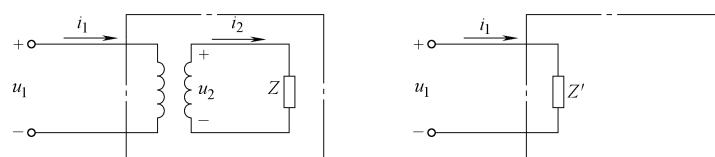


图 3-4 变压器的变阻抗

若把带有负载 Z 的变压器（图中所框部分）看成是一个新的负载 Z' ，直接接在信号源 U_1 上，则有 $I_1^2 Z' = I_2^2 Z$ ，将电流变换公式代入，得

$$Z' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 Z$$

这说明，变压器各线圈的阻抗，与线圈匝数的二次方成正比。利用这一特点，可以用变压器不同匝数的线圈来变换阻抗。

最简单的应用就是电视机天线，用扁馈线时阻抗是 300Ω ，接电视机的天线输入端是 75Ω ，必须用一个阻抗变换插座，其中就是一个铁氧体磁心的变压器，将 300Ω 与 75Ω 进行阻抗匹配。

例 1 一台降压变压器的一次绕组接在 $380V$ 的电压上，二次电压为 $36V$ 。若一次绕组有 1140 匝，请问二次绕组有多少匝？

解：已知 $U_1 = 380V$, $U_2 = 36V$, $N_1 = 1140$ 匝，

根据公式 $K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ ，可得

$$N_2 = \frac{U_2 N_1}{U_1} = \frac{36 \times 1140}{380} \text{ 匝} = 108 \text{ 匝}$$

例 2 有一台电力变压器，一次电压 $U_1 = 3000V$ ，二次电压 $U_2 = 220V$ ，若二次电流为 $114A$ ，求变压器一次电流有多大？

解：已知 $U_1 = 3000V$, $U_2 = 220V$, $I_2 = 114A$,

根据公式 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$ ，有

$$I_1 = \frac{I_2 U_2}{U_1} = \frac{220 \times 114}{3000} = 8.36A$$

例 3 一台输出变压器二次侧接有 8Ω 的喇叭，一次侧输入信号源内阻是 512Ω ，当输出最大功率时，求变压器的匝数比。

解：我们知道，输出功率最大的条件是内阻等于外阻，根据

$$Z' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z$$

$$K = \sqrt{\frac{Z'}{Z}} = \sqrt{\frac{512}{8}} = 8$$

3.3 电力变压器的基本结构

根据用途不同，变压器的结构也有所不同，大功率电力变压器的结构比较复杂，而且多数电力变压器是油浸式的。油浸式变压器由绕组和铁心组成，为了解决散热、绝缘、密封、安全等问题，还需要油箱、绝缘套管、储油柜、冷却装置、防爆膜、安全气道、湿度计、气体继电器等附件，如图 3-5 所示。

1. 油浸变压器的结构

铁心是变压器的磁路部分，它既是磁通闭合的路径，又是绕组的支撑支架。变压器使用

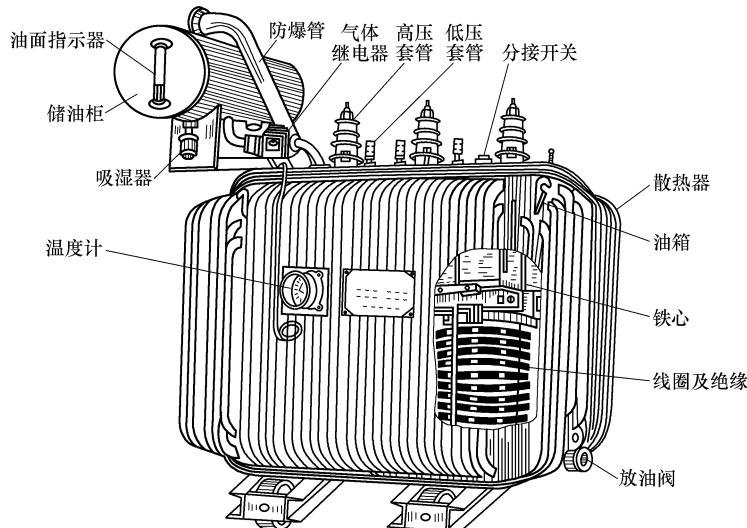


图 3-5 电力变压器结构

的铁心材料主要有铁片、低硅片、高硅片，在钢片中加入硅能降低钢片的导电性，增加电阻率，它可减少涡流，使其损耗减少。我们通常称加了硅的钢片为硅钢片，变压器的质量与所用的硅钢片的质量有很大关系，硅钢片的质量通常用磁通密度 B 来表示，一般黑铁片的 B 值为 6000~8000、低硅片为 9000~11000，高硅片为 12000~16000。变压器的铁心一般使用表面经过绝缘处理的 0.35mm 厚度的硅钢片叠压而成。

铁心的结构主要有心式和壳式两种，如图 3-6 所示。

绕组是变压器中的电路部分，通过电磁感应实现交流电能的传递。小型变压器一般由绝缘的漆包圆铜线绕制而成，对容量稍大的变压器则用扁铜线或扁铝线绕制。

根据高、低压绕组在铁心柱上放置方式的不同，绕组可以分为同心式和交叠式两种，如图 3-7 所示。

(1) 同心式：高、低压绕组同心地安装在同一个铁心柱上，一次绕组、二次绕组相互绝缘。为了绝缘的方便，一般低压绕组绕在里层，高压在外层。同心式绕组结构简单，制造方便，国产电力变压器多采用这种形式。

(2) 交叠式：高、低压绕组做成扁饼状，在纵向上交叠排列。为了绝缘的方便，一般低压绕组绕在最上层和最下层，高压绕组在中间。

油浸式变压器除了有绕组和铁心外，还需要有油箱、绝缘套管、储油柜、冷却装置、安全保护装置等附件。

油箱用于盛放变压器油且作为变压器的外壳。变压器油起绝缘和散热的作用，油箱由钢板焊接而成。

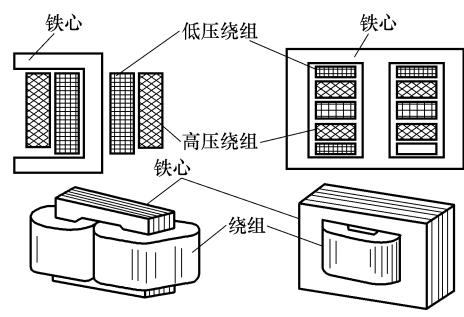


图 3-6 变压器铁心和绕组结构

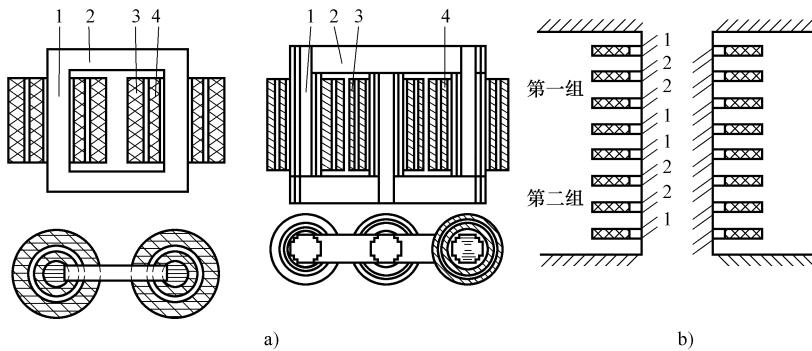


图 3-7 同心式绕组和交叠式绕组

a) 同心式绕组 (1—铁心柱 2—铁轭 3—高压绕组 4—低压绕组)

b) 交叠式绕组 (1—低压绕组 2—高压绕组)

为了保证二次端电压在允许范围内，通常在变压器的高压侧设置抽头，并装设分接开关（见图 3-8），用来调节变压器高压绕组的工作匝数，从而调节变压器的二次电压。

中、小型电力变压器一般有三个分接头，记作 $U_N \pm 5\%$ 。大型电力变压器采用五个或多个分接头，例 $U_N \pm 2 \times 2.5\%$ 或 $U_N \pm 8 \times 1.5\%$ 。

分接开关有两种形式，一种只能在断电情况下进行调节，称为无载分接开关——这种调压方式称为无励磁调压；另一种可以在带负荷的情况下进行调节，称为有载分接开关——这种调压方式称为有载调压。

绝缘套管是变压器的输入输出装置，安装在变压器的油箱顶部，实现油箱与引线之间的绝缘。

变压器在运行时，为了保证其安全运行，变压器还装设有安全保护装置，主要有防爆膜、安全气道、湿度计、气体继电器等。

2. 变压器允许的过负荷能力

变压器的过负荷能力，是指在较短时间内所能输出的最大容量，即在不损坏变压器线圈的绝缘，不降低变压器使用寿命的条件下，它可能大于变压器的额定容量。变压器的过负荷能力分正常过负荷能力和事故过负荷能力两种。

变压器的正常过负荷指的是不影响其寿命，在正常运行时允许的过负荷。这是因为变压器在一昼夜内的负荷，有时是高峰，有时是低谷，在低谷时，变压器在较低的温度下运行，而且，在一年内，季节性的温度也在变化，因此在变压器的绝缘和寿命不受影响的前提下，变压器可以在高峰负荷及冬季时过负荷运行。

当发生事故时，为保证重要设备的连续供电，变压器允许短时间过负荷的能力，称为事故过负荷能力。事故过负荷会引起变压器绕组绝缘温度超过允许值，使绝缘老化速度比正常条件下快得多，因而会缩短变压器的使用年限。但考虑到事故发生的机会少，而且变压器平时往往欠负荷运行，因此短时间的过负荷不会引起绝缘的显著损坏。

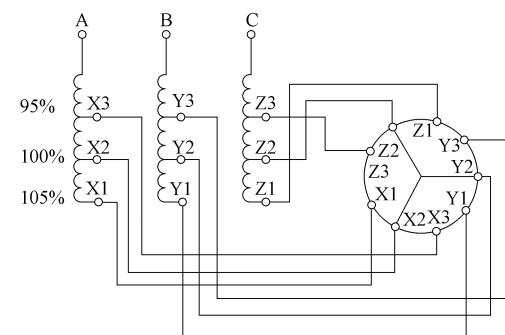


图 3-8 分接开关

3. 变压器铭牌的意义

每台变压器具有一系列标准数据，某些数据在铭牌上标出，某些数据不标出。变压器的型号通常由表示相数、冷却方式、调压方式、绕组线芯等材料的符号，以及变压器容量、额定电压、绕组联结方式组成，见表 3-1。变压器的型号第一部分是汉语拼音的代表符号，表示产品分类、结构特征等；型号第二部分是数据，分子代表额定容量，分母代表高压绕组电压等级。

如：SJL-1000/10，为三相油浸自冷式铝线、双线圈电力变压器，额定容量为 $1000\text{kV}\cdot\text{A}$ 、高压侧额定电压为 10kV 。

电力变压器的型号表示方法：基本型号 + 设计序号 - 额定容量 ($\text{kV}\cdot\text{A}$) / 高压侧电压。

表 3-1 变压器的型号和符号含义

型号中符号排列顺序	表示含义		代表符号
	内容	类别	
1	线圈耦合方式	自耦降压(或自耦升压)	0
2	相数	单相	D
		三相	S
3	冷却方式	油浸自冷	J
		干式空气自冷	G
		干式浇注绝缘	C
		油浸风冷	F
		油浸水冷	S
		强迫油循环风冷	FP
		强迫油循环水冷	SP
4	线圈数	双线圈	—
		三线圈	S
5	线圈导线材质	铜	—
		铝	L
6	调压方式	无励磁调压	—
		有载调压	Z
7	特殊要求	加强干式	Q
		干式防火	H
		移动式	D
		成套	T

注：电力变压器后面的数字部分：斜线左边表示额定容量 ($\text{kV}\cdot\text{A}$)；斜线右边表示一次侧额定电压 (kV)。

4. 变压器的并联运行

变压器的并联运行是指多台变压器一、二次绕组分别接于公共母线上，共同向负载供电的一种运行方式。在发电厂和变电所中，几乎都采用若干台变压器并联运行的方式，如图 3-9 所示。

(1) 变压器并联运行有以下优点：

1) 提高供电的可靠性。如有某台变压器发生故障时，可把它从电网切除，进行维修，电网仍可继续供电。

2) 提高运行效率。可根据负载的大小，调整参与运行变压器的台数。

3) 提高供电经济性。可随用电量的增加，分批安装新的变压器，减少储备容量。

(2) 变压器的并联运行需要满足以下条件：

1) 接线组别相同；

2) 电压比相同（允许有 $\pm 0.5\%$ 的差值）；

3) 短路电压相等（允许有 $\pm 10\%$ 的差值）。

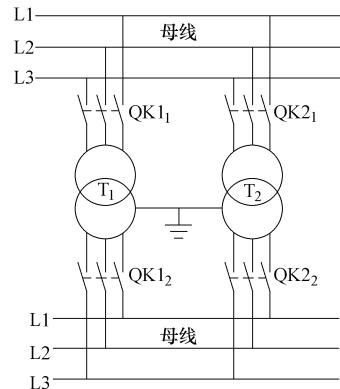


图 3-9 变压器的并联运行

3.4 变压器的同名端和联结组标号

3.4.1 同名端的含义

同名端是指在某一瞬间，变压器一、二次绕组中感应电动势极性相同的端子，一般用“*”或“·”表示。由于一、二次绕组的感应电动势是呈正弦规律变化的，无固定极性，故此处所指极性是指某一瞬间的相对极性。

设单相变压器一、二次绕组的感应电动势 \dot{E}_A 和 \dot{E}_a 正方向如图 3-10 所示，图 a: 绕向和线端标志相同；图 b: 绕向相同，线端标志相反；图 c: 绕向相反，线端标志相同。从图中可以看出，当一、二次绕组的绕向和线端标志发生变化时，同名端的标志也发生变化，不论如何变化，只有两种情况，要么是同极性，要么是异极性。

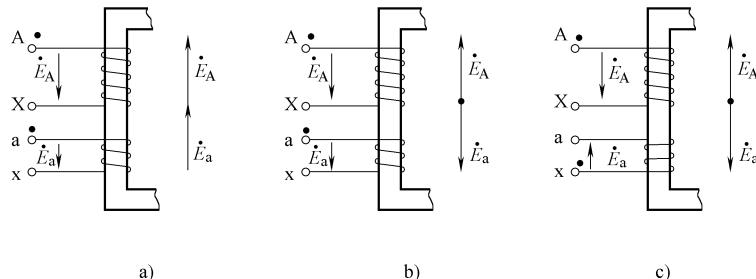


图 3-10 单相变压器绕组的极性

对于一台没有标志的变压器，可以通过实验的方法找出同名端。常用的方法有直流法和交流法。

(1) 直流法。按图 3-11a 接线，变压器的高压侧接一个直流电源 E 和一个开关 S ，低压侧接一个万用表，将表的档位旋至毫伏或毫安档，在开关 S 闭合的瞬间，看万用表的指针偏转情况。若指针正偏，说明万用表红表笔所接线端 (a) 与电源正极所接线端 (A) 为同名端；若指针反偏，则说明万用表红表笔所接线端与电源正极所接线端为异名端。

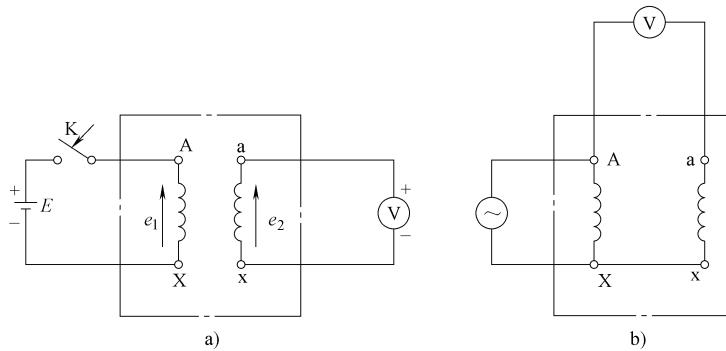


图 3-11 单相变压器同名端的判别

(2) 交流法。由变压器的原理可知, 当变压器空载时, 在忽略一次绕组的漏电感和内电阻电压降的条件下, 可得 $U_1 = -E_1$, $U_2 = E_2$ 。

根据同名端(又称对应端)的定义, 若把图 3-11b 中的单相变压器一、二次绕组的“同名端”X、x 用导线短接, 则

$$U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax} = -E_1 + E_2$$

数值上 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$, 呈现减极性状态。若把 X 和 a 导线短接, 即异名端相连时, 则

$$U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax} = -(E_1 + E_2)$$

数值上 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$, 呈现加极性状态。

上述结论表明, 异名端相接时, 输出为加极性, 同名端相接时, 为减极性。这就为我们判别单相变压器一、二次绕组的同名端提供了一个很好的交流方法。

即在图中, 若数值上 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$, 则说明 U_{AX} 与 U_{ax} 同相, 也就是说 A 与 a 或 X 与 x 为同名端。

若数值上 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$, 则说明 U_{AX} 与 U_{ax} 反相, 也就是说 A 与 x 或 a 与 X 为异名端。

3.4.2 三相变压器的联结组别号

我国电力系统均采用三相制, 所以三相变压器得到了广泛的应用。一般情况下, 三相变压器有两种形式: 一种是三心式变压器(见图 3-12), 一种是由三台同容量的单相变压器连接组成。

三相变压器的一、二次绕组一般采用星形或三角形两种联结方式。联结法和线端标志规定见表 3-2。

无论是变压器的并联运行, 还是对三相负载的供电, 联结组别对其都有重要的影响。三相变压器的联结组别号是表示高、低压绕组联结方式以及高、低压绕组中对应感应线电动势相位关系的符号。常采用“时钟表示法”来表示(见图 3-13), 即以高压绕组的电动势相量作为时钟的长针, 使其固定指向时钟表面上“12”

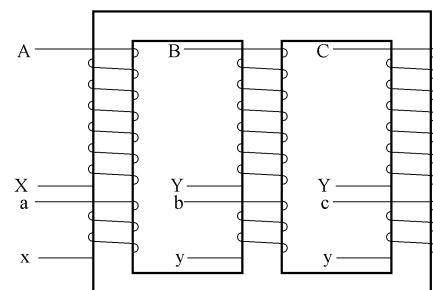


图 3-12 三相变压器

表 3-2 三相变压器绕组联结标志

绕组名称	首端	尾端	三角形联结	星形联结	中线
一次绕组	U1 V1 W1	U2 V2 W2	D	Y	N
二次绕组	u1 v1 w1	u2 v2 w2	d	y	n

的位置，低压侧对应的线电动势相量作为时钟的短针，它所指的钟点数字即为联结组别号。如 Y, d₂, 表示高压侧接成星形，低压侧接成三角形，数字 2 表示高压侧和低压侧对应线电动势相位差为 60°，钟表上时间的确定是由分针和时针在顺时针方向的夹角确定的。不论采取什么连接方式，其对应线电动势的相位差总是 30° 的倍数。

1. 单相变压器联结组别

单相变压器的高、低压绕组在同一个铁心柱上，被同一个主磁通所交链，因此，高、低压绕组的对应线电动势的相位关系只有两种情况，如图 3-14 所示。

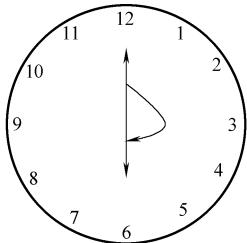


图 3-13 时钟表示法

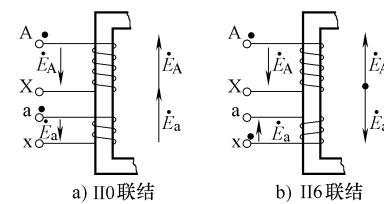


图 3-14 单相变压器联结组别

II0 (II12)：同相，即高、低压绕组对应电动势相量方向相同，长、短针都指在 12 的位置。

II6：反相，即高、低压绕组对应电动势相量方向相反。

2. 三相变压器联结组别号

(1) 三相绕组联结方法。

三相变压器的星形联结是把变压器三相绕组的首端 (U1、V1、W1) 或尾端 (U2、V2、W2) 连接在一起，把另外一端分别接三相电源。如图 3-15 所示。

三相变压器的三角形联结是把一相绕组的首端和另外一相绕组的尾端连接在一起，按顺序连接成一个闭合的回路，再从三个首端 (或尾端) 引出三条线接三相电源。

为了适应方便制造和并联运行等方面的要求，国家规定电力变压器的标准联结组别号为 Yyn0、Yd11、Ynd11、Yny0、Yy0 等五种，其中前面三种应用较多，对于高压绕组来说，星形联结最为有利，因为此时的相电压只有线电压的 $1/\sqrt{3}$ ，绕组对地的绝缘要求

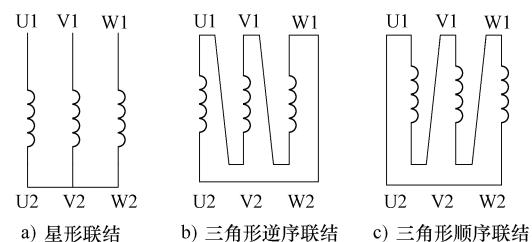


图 3-15 三相绕组联结方法

降低了。大电流的低压绕组采用三角形联结时相电流为线电流的 $1/\sqrt{3}$ ，可以使导线截面积比星形联结时小，便于绕制和节约材料，所以大容量的变压器通常采用 Yd、Ynd 联结。对于需要中性线的变压器，则采用 Yyn 联结，以获得动力和照明用电源。

(2) 相序的判定。

对于星形联结，U、V、W 为顺向序，做相量图时按照顺时针方向画图，如图 3-16 所示。对于星形联结为逆相序时，做相量图时按照逆时针方向画图，如图 3-17 所示。

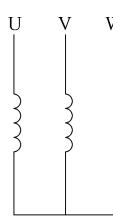


图 3-16 星形顺相序

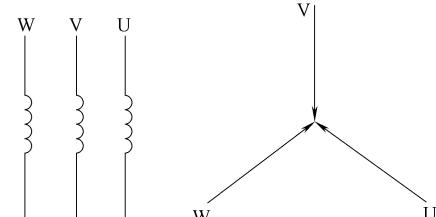
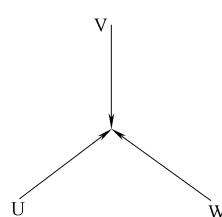


图 3-17 星形逆相序

对于三角形联结，U、V、W 为顺相序，做相量图时按照顺时针方向画图，如图 3-18 所示。对于三角形联结为逆相序时，做相量图时按照逆时针方向画图，如图 3-19 所示。

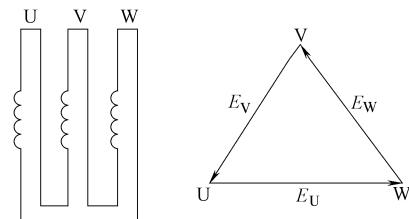
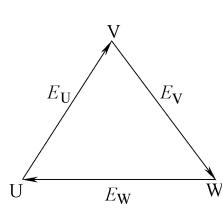
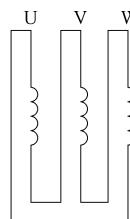


图 3-18 三角形顺相序

图 3-19 三角形逆相序

(3) 根据上述相序画图方法可知，组别号为 Y、y0（见图 3-20）。

组别号为 Y、d11（见图 3-21）。

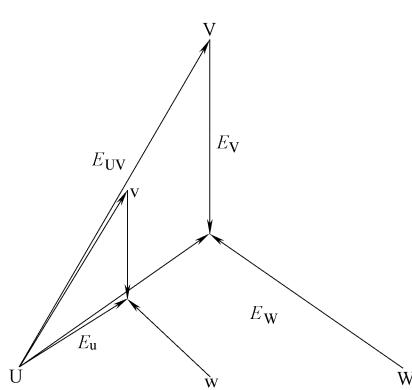
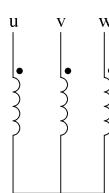
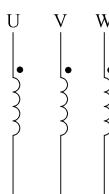


图 3-20 Y、y0 组别

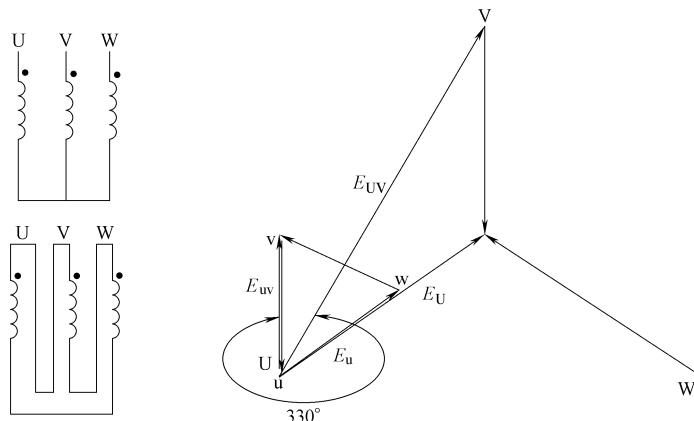


图 3-21 Y、d11 组别

3.5 变压器的工作特性

变压器负载运行时，一、二次绕组的内阻抗压降随负载变化而变化。负载电流增大时，内阻抗压降增大，二次绕组端电压变化也增大。要正确合理地使用变压器，就要了解其运行时的工作特性和性能指标。

变压器运行特性主要有外特性和效率特性。外特性反映变压器二次侧端电压随负载电流而变动的规律。效率特性表示变压器效率随负载而变化的关系。

3.5.1 电压调整率和外特性

变压器负载运行时，一方面电流增大，致使二次侧输出电压降低；另一方面绕组铜耗增大，效率降低。所以变压器的运行特性的主要指标有两个：一是二次侧端电压的变化，二是效率。

1. 变压器的外特性

由于变压器一、二次绕组有电阻和漏抗，负载运行时必然会产生内部电压降，其二次侧端电压则随负载的变化而变化，这种变化用外特性来表示。在描述其外特性时，还需规定负载功率因数。在保持 U_1 、 $\cos\phi_2$ 一定时，二次侧端电压 U_2 随负载电流 I_2 变化的关系曲线，称为变压器的外特性，即 $U_2 = f(I_2)$ ，如图 3-22 所示（横坐标用 $I_2^* = I_2/I_{2N}$ 表示，纵坐标用 $U_2^* = U_2/U_{2N}$ 表示），使得坐标轴上的数值在 0~1 之间或略大于 1，这样做是为了不同容量和不同电压的变压器之间相互比较）。变压器在纯电阻和感性负载时，外特性是下降的，这是因为滞后的无功电流对变压器磁路中的

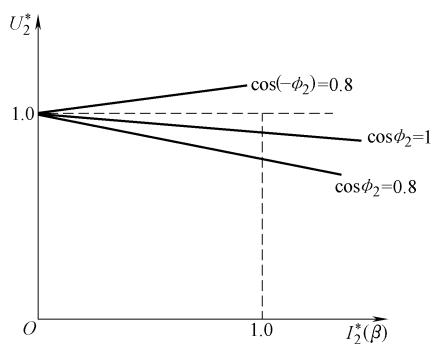


图 3-22 变压器的外特性

主磁通的去磁作用更为显著，而使 E_1 和 E_2 有所下降的缘故；但在容性负载时，超前的无功电流有助磁作用，主磁通会有所增加， E_1 和 E_2 也会相应增大，使得 U_2 会随着 I_2 的增大而增大，随着负载感性或容性程度增加，端电压变化会增大。以上表明，负载的功率因数对变压器外特性的影响是很大的。

2. 电压变化率（电压调整率）

变压器的负载大多为电感性负载，因此当负载增大时，其二次绕组的电压总是下降的。为了衡量二次电压随负载变化的程度，可用电压变化率 $\Delta U\%$ 来表示。当变压器的原绕组的额定电压、负载功率因数一定时，变压器空载与负载时端电压之差 $U_{2N} - U_2$ 与额定电压 U_{2N} 的比值称之为电压变化率 $\Delta U\%$ ，即

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

变压器的变化率表征了电网电压的稳定性，是反映变压器的重要指标之一。一般情况下，当负载为额定值 ($\cos\phi = 0.8$ 感性) 时，其 ΔU 等于 $4\% \sim 8\%$ 。

3.5.2 变压器的效率特性

变压器在能量传递过程中不可避免地会产生能量损耗，变压器的效率特性是指变压器的输出有功功率 P_2 与输入的有功功率 P_1 之比，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

变压器负载运行时，存在铁损耗 P_{Fe} （不变损耗）和铜损耗 P_{Cu} （可变损耗）。

铁损耗包括基本铁损耗和附加铁损耗。基本铁损耗分为磁滞损耗和涡流损耗。附加铁损耗包括由铁心叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗、主磁通在结构部件中引起的涡流损耗等。铁损耗与外加电压大小有关，而与负载大小基本无关，故也称为不变损耗。

铜损耗分为基本铜损耗和附加铜损耗。基本铜损耗是指电流在一、二次绕组直流电阻上的损耗；附加铜损耗包括因趋肤效应引起的损耗以及漏磁场在结构部件中引起的涡流损耗等。铜损耗大小与负载电流二次方成正比，故也称为可变损耗。

据能量守恒定律上式可写成

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \times 100\%$$

效率大小反映了变压器运行的经济性能的好坏，是表征变压器运行性能的重要指标之一。

效率特性：在功率因数一定时，变压器的效率与负载电流之间的关系 $\eta = f(I_2)$ ，称为变压器的效率特性，如图 3-23 所示。 $\beta = I_2/I_{2N}$ 称为负载系数。

特性分析：

- (1) 空载时输出功率为零，所以 $\eta = 0$ 。
- (2) 负载较小时，损耗相对较大，效率 η 较低。
- (3) 负载增加，效率 η 亦随之增加。超过某一负载时，因铜损耗与负载电流的平方成正比增大，效率 η 反

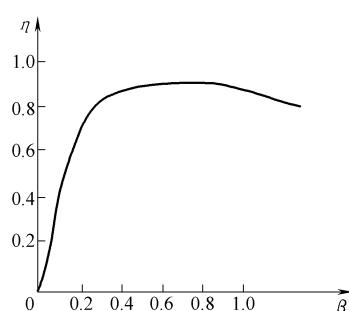


图 3-23 变压器的效率特性

而降低，最大效率 η 不一定出现在额定负载处，最高效率 η_{\max} 出现在变压器的不变损耗等于可变损耗时。在一般电力变压器中，当负载为额定负载的 50% ~ 70% ($\beta = 0.5 \sim 0.7$) 时，效率达到最大值。由于变压器不像电动机那样有机械损耗，也没有旋转的部件，功率损耗很小，所以效率很高，通常在 90% 以上。

3.6 其他常用变压器

在电力系统中，除了前面叙述的双绕组变压器外，还有各种各样的特殊变压器，其种类繁多，涉及各行各业，本文仅介绍较常用的仪用互感器（电压互感器和电流互感器）、自耦变压器、电焊变压器。

3.6.1 电压互感器

电压互感器是仪用互感器的一种，用于供电系统监测高压电网中的电压变化情况，将其变成标准等级的低压以供测量、控制、调节和保护装置使用。

1. 电压互感器的分类

(1) 按用途分为测量用电压互感器和保护用电压互感器，这两种电压互感器，又可分为单相电压互感器和三相电压互感器。

(2) 按安装地点分为户内型电压互感器和户外型电压互感器。

2. 电压互感器的主要参数

(1) 绕组的额定电压。额定一次电压是指可以长期加在一次绕组上的电压，其值应与我国电力系统规定的额定电压系列相一致。额定二次电压，通常是电压互感器二次绕组的额定电压，为 100V。

(2) 额定电压变比为额定一次电压与额定二次电压之比，一般用不约分的分数形式表示，如 6000V/100V, 10000V/100V 等。

(3) 准确度等级。在规定的一次电压和二次负荷变化范围内，负荷功率因数为额定值时，电压误差的最大误差。

国产电压互感器的准确度等级有 0.1、0.2、0.5、1.0、3.0、5.0 等。表 3-3 中 S_{2N} 是指在额定二次电流 I_{2N} 和额定二次阻抗 Z_{2N} 下运行时，二次绕组输出的容量， $S_{2N} = I_{2N}^2 Z_{2N}$ 。

用户电能计量装置通常采用 0.2 级和 0.5 级电压互感器。

表 3-3 电压互感器准确度等级

准确度等级	误差限值		一次电压变化范围	频率、功率因数及二次 负荷变化范围
	电压误差(%)	相位差(°)		
0.2	±0.2	±10		(0.25 ~ 1) S_{2N}
0.5	±0.5	±20		$\cos\phi_2 = 0.8$
1	±1.0	±40		
3	±3.0	不规定		$f = f_N$

(4) 极性标志。为了保证测量及校验工作的接线正确，电压互感器一次及二次绕组的端子应标明极性标志。电压互感器一次绕组接线端子用大写字母 A、B、C、N 表示，二次绕组接线端子用小写字母 a、b、c、n 表示。

3. 工作原理

电压互感器的工作原理、结构和接线方式与普通变压器相似，同样是由相互绝缘的一次、二次绕组绕在公共的闭合铁心上组成，如图 3-24 所示。

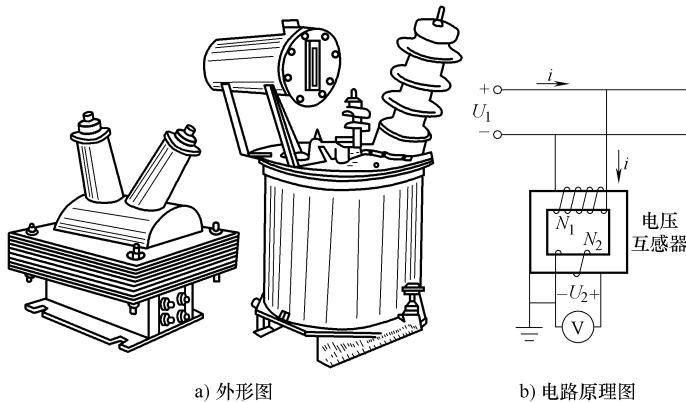


图 3-24 电压互感器

电压互感器是将高电压变为低电压供电给仪表，是一台降压变压器，所以它的一次绕组线径细且匝数 N_1 多，二次绕组粗而匝数 N_2 少。

一次绕组与被测电压并联，二次绕组与各种测量仪表或继电器的电压线圈相并联。电压互感器在电气图中文字符号 TV 表示。

使用电压互感器应注意的问题如下。（电压互感器的一次侧和二次侧通常应加装熔断器保护）

- (1) 按要求的相序进行接线。
- (2) 电压互感器二次侧应可靠接地。
- (3) 二次侧并接的仪表不宜过多，否则准确度会下降。
- (4) 电压互感器二次侧严禁短路。

3.6.2 电流互感器

电流互感器是仪用互感器的一种，主要用来将大电流变成小电流，以便于仪表的测量或作为信号供继电保护、自动装置和控制回路使用。

1. 电流互感器分类

- (1) 电流互感器按用途可分为测量电流、功率和电能用的测量用互感器以及继电保护和自动控制用的保护控制用互感器。
- (2) 根据一次绕组匝数可分为单匝式和多匝式
- (3) 根据安装地点可分为户内式和户外式
- (4) 根据绝缘方式可分为干式、浇注式、油浸式等。
- (5) 根据电流互感器工作原理可分为电磁式、光电式、电子式等电流互感器。

2. 电流互感器的主要参数

- (1) 额定电流比是指一次额定电流与二次额定电流之比，额定电流比一般用不约分的分数形式表示。二次电流表量程一般为 5A，实际中已换算成一次电流，其标度尺即按一次

电流分度，这样可以直接读数，不必再进行换算，如 $100A/5A$, $500A/5A$ 。

额定电流，就是在这个电流下，互感器可以长期运行而不会因发热损坏。当负载电流超过额定电流时，叫做过负载。

(2) 准确度等级是根据测量时误差的大小而划分的，是指在规定的二次负载范围内，一次电流为额定值时的最大误差，见表 3-4。

表 3-4 电流互感器的准确度等级

准确度等级	一次电流为额定电流 的百分数(%)	误差限值		二次负荷 变化范围
		电流误差(%)	相位差(‘)	
0.2	10	± 0.5	± 20	$(0.25 \sim 1) S_{2N}$
	20	± 0.35	± 15	
	100 ~ 120	± 0.2	± 10	
0.5	10	± 1	± 60	$(0.25 \sim 1) S_{2N}$
	20	± 0.75	± 45	
	100 ~ 120	± 0.5	± 30	
1	10	± 0.2	± 120	$(0.5 \sim 1) S_{2N}$
	20	± 1.5	± 90	
	100 ~ 120	± 1	± 60	
3	50 ~ 120	± 3	不规定	$(0.5 \sim 1) S_{2N}$

国产电流互感器的准确度等级有 0.2、0.5、1.0、3.0、5.0 等等级。

(3) 电流互感器的额定容量，就是额定二次电流 I_{2N} 通过二次额定负载 Z_{2N} 时所消耗的视在功率 S_{2N} 。

(4) 额定电压是指一次绕组长期能够承受的最大电压（有效值），它只是说明电流互感器的绝缘强度，而和电流互感器额定容量没有任何关系。

(5) 极性标志。

1) 一次绕组首端标为 L1，末端标为 L2。当一次绕组带有抽头时，首端标为 L1，自第一个抽头起依次标为 L2，L3……

2) 二次绕组首端标为 K1，末端标为 K2。当二次绕组带有中间抽头时，首端标为 K1，自第一个抽头起以下依次标志为 K2，K3……

电流互感器在电气图中文字符号用 TA 表示。

电流互感器的基本工作原理、结构形式与普通变压器相似，如图 3-25 所示。钳形电流表测量电流的大小就是电流互感器的实际应用。

3. 使用电流互感器应注意的问题

(1) 电流互感器工作时，二次侧不允许断路。这是因为电流互感器的一次侧电流是由被测试的电路决定的，在正常运行时，电流互感器的二次侧相当于短路，二次侧电流有强烈的去

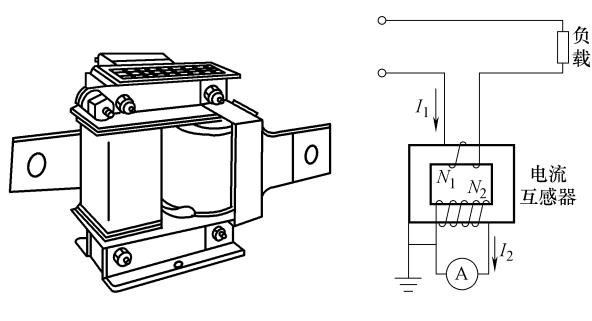


图 3-25 电流互感器

磁作用，即二次侧的磁动势近似与一次侧的磁动势大小相等、方向相反。因而产生铁心中的磁通所需的合成磁动势和相应的励磁电流很小，若二次侧开路，则一次侧电流全部成为励磁电流，使铁心中的磁通增大，铁心过分饱和，铁损耗急剧增大，引起互感器发热。同时因二次绕组匝数很多，将会感应出危险的高电压，危及操作人员和测量设备的安全。电流互感器的二次侧，不允许加装熔断器。

(2) 二次侧绕组回路串入的阻抗值不得超过有关技术标准的规定，否则将影响电流互感器的精确度。

(3) 二次侧绕组的一端和铁心应牢固接地，防止绝缘损伤时一次高压进入二次侧发生危险。

例 用电压比为 10000/100V 的电压互感器，电流比为 100/5A 的电流互感器扩大量程，其电流表读数为 3.5A，电压表读数为 96V，试求被测电路的电流、电压各为多少？

解：因为电流互感器负载电流等于电流表读数乘上电流互感器电流比，即

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = K_I I_2 = \frac{100}{5} \times 3.5 A = 70 A$$

电压互感器所测高电压等于电压表读数乘上电压比，即

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} U_2 = K_U U_2 = \frac{10000}{100} \times 96 V = 9600 V$$

被测电路的电流为 70A，电压为 9600V。

3.6.3 自耦变压器

普通的双绕组变压器的一、二次绕组之间没有直接电的联系，两者只有磁的联系。自耦变压器仅有一个绕组，或者说是一次绕组的一部分兼作二次绕组用，或者说是二次绕组的一部分兼作一次绕组用，如图 3-26 所示。自耦变压器一次、二次绕组之间既有磁的耦合，又有电的联系。

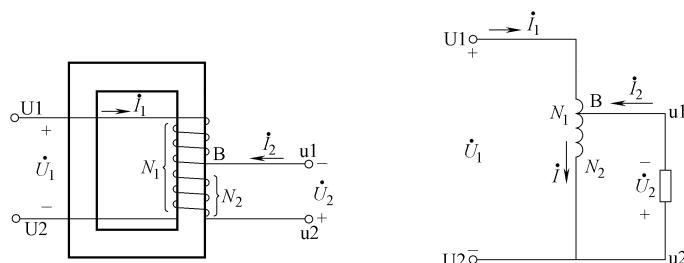


图 3-26 自耦变压器的绕组

自耦变压器的电压比为

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_u = K$$

负载时的磁势平衡方程式

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_0$$

忽略空载磁通势，则 $N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$ ， $i_1 = -\frac{N_2}{N_1} i_2 = -\frac{i_2}{K}$

即自耦变压器一、二次绕组中的电流大小与匝数成反比，在相位上互差 180°。

流经公共绕组中的电流 I 的大小为 $I = I_2 - I_1$

故当电流或电压比 K 接近于 1 时, I 很小, 这部分绕组可用截面积较小的导线绕制, 以节约用铜量, 并减小自耦变压器的体积与重量。

自耦变压器输出的视在功率为 $S_2 = U_2 I_2 = U_2 I + U_2 I_1$

由上式可以看出, 自耦变压器的视在功率由两部分构成, $U_2 I$ 称为电磁功率, 是通过电磁感应传递给负载的, $U_2 I_1$ 称为传导功率, 是通过电传递的形式直接传导给负载的。

自耦变压器有三相和单相两种, 三相变压器一般采用星形联结。实验室常用单相变压器, 其中间抽头做成滑动触点, 输出电压可调, 可稍高于一次绕组电压, 其结构及原理如图 3-27 所示。

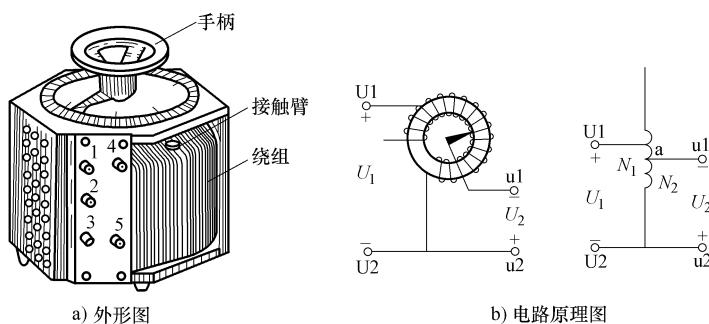


图 3-27 自耦变压器外形及电路原理图

自耦变压器的优点: 由于自耦变压器的绕组容量小于额定容量, 当额定容量相同时, 自耦变压器与双绕组变压器相比, 其单位容量所消耗的材料少、变压器的体积小、造价低, 而且铜损耗和铁损耗也小, 因而效率高。

缺点: 由于自耦变压器一、二次绕组之间有直接电的联系, 为了防止因高压边单相接地故障而引起低压边的过电压, 用在电力系统中的三相自耦变压器中性点必须可靠接地。同样, 由于一、二次绕组之间有直接电的联系, 当高压边遭受过电压时, 会引起低压边严重过电压。

例: 某单相自耦变压器 $U_1 = 220V$, $U_2 = 180V$, $\cos\phi_2 = 1$, $I_2 = 400A$ 。求 (1) 流过自耦变压器一、二次绕组及公共部分的电流各为多少? (2) 借助于电磁感应传递到二次绕组的视在功率是多少?

解: (1) 负载电流

$$I_2 = 400A$$

电压比

$$K = U_1 / U_2 = 220 / 180 = 1.22$$

流过一次绕组的电流

$$I_1 = I_2 / K = 327.27A$$

因为 $I_2 = I_1 + I$, 所以

公共部分的电流

$$I = I_2 - I_1 = 72.73A$$

(2) 电磁视在功率

$$S = U_2 I = 180 \times 72.73 = 13kW$$

3.6.4 电焊变压器

交流电焊机在生产实际中具有广泛的应用, 电焊变压器是交流电焊机的主要组成部分, 它实质上是一台特殊的降压变压器。

在焊接中，为了保证焊接质量和电弧的稳定燃烧，要求电焊变压器具有以下特点：

(1) 电焊变压器应具有 $60\sim75V$ 的空载电压，以保证容易起弧，为了操作者的安全，电压一般不超过 $85V$ 。

(2) 电焊变压器应具有迅速下降的外特性，以适应电弧特性的要求，如图3-28所示。

(3) 为了适应不同的焊件和不同的焊条，还要求能够调节焊接电流的大小，一般最大焊接电流是最小焊接电流的 $4\sim5$ 倍。

(4) 短路电流不应过大，一般不超过额定电流的两倍，在工作中电流要比较稳定，以免损坏电焊机。

常用电焊变压器有串联电抗器式和磁分路式两种。

1. 串联电抗器式

串联器式电焊变压器由一台降压变压器的二次侧输出端再串接一台可调电抗器组合而成，如图3-29所示。为了调节二次侧空载电压 U_{02} ，在一次侧绕组中备有分接头。电焊变压器输出电流的调节主要通过改变电抗器的气隙大小来实现，如气隙减小时，电抗增大，电焊机输出外特性下降陡度就增大，电流就减小。

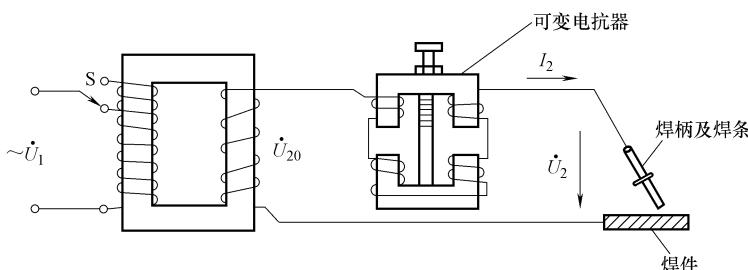


图3-29 串联器式电焊变压器

2. 磁分路式

这种电焊变压器的二次绕组有两部分，一部分与一次绕组套在同一个铁心柱上，另一部分套在另一个铁心柱上并且设有中间抽头。改变这两部分二次绕组之间的联结方法，一方面可以调节二次绕组中感应电动势的大小，以得到不同的空载起弧电压；另一方面，可以调节电抗的数值，以实现焊接电流的粗调，如图3-30所示。

这种电焊变压器有一个可以移动的铁心柱，它可以使铁心中的磁通路径分岔，称为磁分路，平滑地移动这个铁心柱，可以连续地改变磁分路中气隙的大小，从而连续地改变电焊变压器的电抗值，以实现焊接电流的细调。

3.6.5 整流变压器

整流变压器是用来单独给整流电路供电的电源变压器，如图3-31所示。

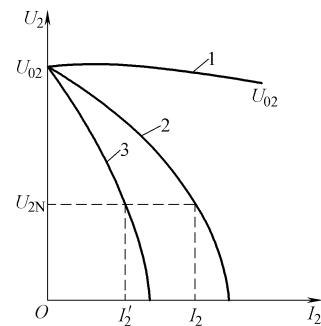


图3-28 电焊变压器外特性
1—空载曲线 2—电抗小（大电流）
时的外特性 3—电抗大（小电流）
时的外特性

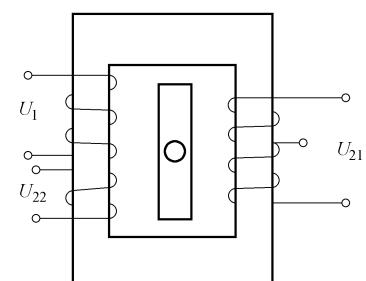


图3-30 磁分路式电焊变压器

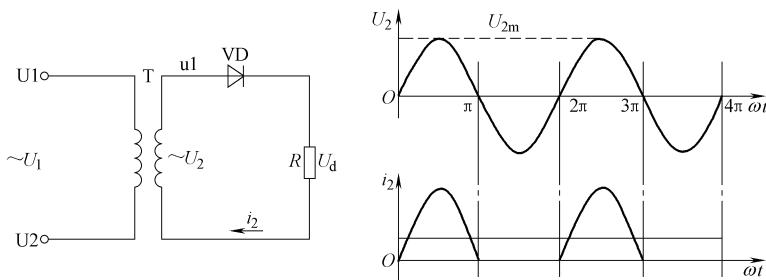


图 3-31 整流变压器

1. 整流变压器的作用

- (1) 把电网电压转换成整流电路需求的电压。
- (2) 在大容量整流电路中，为了得到平稳的直流电压，往往采用多相整流电路，这就需要用到三相整流变压器，其二次侧接成六相或十二相。
- (3) 为了尽可能减少电网与整流装置之间的相互干扰，要求把整流后的直流电路与电网交流电路彼此隔离，这种情况下也要用到整流变压器。

2. 整流变压器的结构与工作特点

- (1) 整流变压器的二次绕组所接整流器件只在一个周期内的部分时间内轮流导通，所以二次绕组中流过的电流是非正弦电流，含直流分量，将使涡流损耗增大。由于副绕组的导电时间只占一个周期的一部分，故整流变压器利用率降低。与普通变压器相比，在相同条件下，整流变压器的体积和重量都较大。
- (2) 输出直流电压外特性较软，其外形结构较为矮胖，机械强度要求好。
- (3) 由于整流变压器二次绕组中可能产生过电压而损坏绝缘层，因此需要加强绝缘处理。

3.7 电力变压器常规检修与维护

电力变压器在正常的生产生活中有着十分重要的作用，然而，由于其结构、工艺以及运行维护等多方面的原因，变压器故障频繁发生，大大影响了正常生产。因此，加强变压器的常规维护，采取切实有效的措施防止变压器故障的发生，对确保变压器的安全稳定运行有着重要的意义。

1. 变压器常见的故障现象

- (1) 变压器本身出厂时就存在的问题。如端头松动、垫块松动、焊接不良、铁心绝缘不良、抗短路强度不足等。
- (2) 由于使用不当造成的变压器绝缘老化的速度加快。
- (3) 遭受雷击造成过电压。
- (4) 过负荷。过负荷是指变压器长期处于超过铭牌功率的工作状态。过负荷经常会在持续缓慢提升负荷的情况下，冷却装置运行不正常，变压器内部故障等，最终造成变压器超负荷运行。由此产生过高的温度则会导致绝缘的过早老化，进而发生故障。
- (5) 受潮。如有管道泄漏、顶盖渗漏、水分沿套管或配件侵入油箱以及绝缘油中存在

水分等。

(6) 没有进行正确的维护。

2. 变压器运行中的常见故障

(1) 绕组的主绝缘和匝间绝缘故障。变压器绕组的主绝缘和匝间绝缘是容易发生故障的部位。主要原因是：由于长期过负荷运行，或散热条件差、使用年限长，使变压器绕组绝缘老化脆裂，抗电强度大大降低，一旦遇有电压波动就有可能将绝缘击穿；变压器油中进水使绝缘强度大大降低而不能承受允许的电压，造成绝缘击穿；在高压绕组加强段处或低压绕组部位，由于绝缘膨胀，使油道阻塞，影响了散热，使绕组绝缘由于过热而老化，发生击穿短路；由于防雷设施不完善，在大气过电压作用下，发生绝缘击穿。

(2) 变压器套管故障。主要是套管闪络和爆炸，变压器高压侧一般使用电容套管，由于套管瓷质不良或者有沙眼和裂纹、套管密封不严、有漏油现象、套管积垢太多等都有可能造成闪络和爆炸。

(3) 铁心绝缘故障。变压器铁心由硅钢片叠装而成，硅钢片之间有绝缘漆膜。由于硅钢片紧固不好，会使漆膜破坏产生涡流而发生局部过热。同理，夹紧铁心的穿心螺钉、压铁等部件，若绝缘损坏也会发生过热现象。此外，若变压器内残留有铁屑或焊渣，使铁心两点或多点接地，都会造成铁心故障。

(4) 分接开关故障。变压器分接开关是变压器常出现故障的部位之一。由于开关长时间靠压力接触，会造成弹簧压力不足，使开关联结部分的有效接触面积减小，以及接触部分镀银层磨损脱落，引起分接开关在运行中发热损坏。分接开关接触不良，经受不住短路电流的冲击而造成分接开关烧坏而发生故障；在有载调压的变压器，分接开关的油箱与变压器油箱一般是互不相通的，若分接开关油箱发生严重缺油，则分接开关在切换中会发生短路故障，使分接开关烧坏。

(5) 瓦斯保护故障。瓦斯保护是变压器的主保护，轻瓦斯作用于信号，重瓦斯作用于跳闸。下面分析瓦斯保护动作的原因及处理办法。第一，轻瓦斯保护动作后发出信号。其原因可能是变压器内部有轻微故障、变压器内部存在空气、二次回路故障等。运行人员应立即检查，如未发现异常现象，应进行气体取样分析。第二，瓦斯保护动作跳闸时，可能是变压器内部产生严重故障，引起油分解出大量气体，也可能是二次回路故障等。

(6) 变压器着火也是一种危险事故。由于变压器套管的破损或闪络，使油在储油柜油压的作用下流出，并在变压器顶盖上燃烧；变压器内部发生故障，使油燃烧并使外壳破裂等。因变压器内有许多可燃物质，不及时处理可能引起爆炸或使火灾扩大。发生这类事故时，变压器保护应动作使断路器断开。若因故断路器未断开，应立即手动断开断路器，拉开可能通向变压器电源的隔离开关。

3. 变压器正常运行的常规巡视

为了了解变压器的运行状态，应定期检查变压器的运行情况，以便在变压器有异常情况发生时能及早发现、及时处理。变压器的巡视检查项目有：

(1) 检查变压器声音是否正常。

(2) 检查储油柜和充油套管的油位、油色是否正常，各部位有无渗漏油现象。

(3) 变压器的上层油温是否正常。变压器冷却方式不同，其上层油温也不同，但上层油温不应超过规定值。运行人员巡视检查时，除应注意上层油温不超过规定值以外，还应根

据当时的负荷情况、环境温度及冷却装置投入情况，与以往数据进行比较，以判明温度升高的原因。

(4) 检查变压器套管是否清洁，有无破损、裂纹和放电痕迹。保持磁套管及绝缘子的清洁，防止发生闪络。

(5) 检查引线接头接触是否良好。各引线接头应无变色、无过热、发红等现象。接头接触处的示温片应无熔化现象。用红外线测温仪测试，接触处温度不得超过70℃。

(6) 检查呼吸器是否正常完好，硅胶是否有变色现象，如果硅胶失效应及时更换。

(7) 防爆隔膜应完好无破裂。

(8) 变压器的冷却器应正常运行。检查投入的冷却器数目是否正确，油泵和风扇运行是否正常，有无异音，油流指示器是否指示在“流动位置”。

(9) 检查气体继电器。

(10) 检查变压器铁心接地线和外壳接地线，接地应良好，无断线。

(11) 检查调压分接头位置是否正确。

(12) 天气有变化时，应重点进行特殊检查。大风时，检查引线有无剧烈摆动，变压器顶盖、套管引线处应无杂物；大雪天，各部触点在落雪后，不应立即融化或有放电现象；大雾天，各部有无火花放电现象等。

3.8 小型变压器线圈的绕制

1. 绕线前的准备工作

(1) 导线、绝缘材料的选择。根据小型变压器计算结果选择相应的漆包线。绝缘材料应从两个方面考虑，一方面是绝缘强度，另一方面是允许厚度。对于层间绝缘应用厚度为0.08mm的牛皮纸，线包外层绝缘使用厚度为0.25mm的青壳纸。

(2) 木芯与线圈骨架的制作，如图3-32所示。

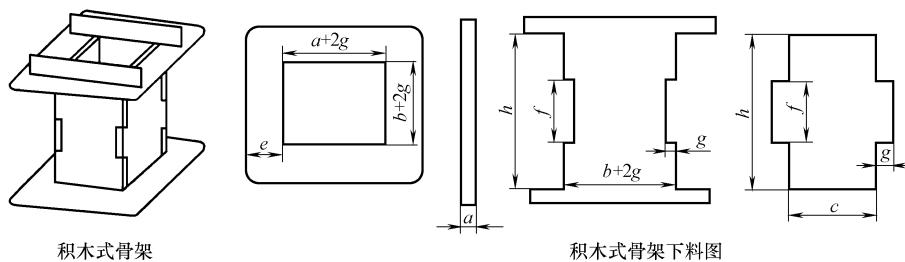


图3-32 木芯与线圈骨架的制作

1) 木芯的制作。在绕制变压器线圈时，将漆包线绕在预先做好的线圈骨架上，但骨架本身不能直接套在绕线机轴上绕线，它需要一个塞在骨架内腔中的木质芯子，木芯的正中心要钻有供绕线机轴穿过的10mm的孔，孔不能偏斜，否则会由于偏心造成绕组不平稳而影响线圈的质量。

2) 黏材料下好后，打光切口的飞边，在要黏合的边缘，特别是榫头上涂好黏合剂进行组合，待黏合剂固化后，再用硅钢片在内腔中插试，如尺寸合适，即可使用。

2. 绕制

(1) 裁剪好各种绝缘纸。绝缘纸的宽度应稍长于骨架的宽度，而长度应稍大于骨架周长。还应考虑到绕制后所需的余量。

(2) 起绕。

1) 起绕时，在导线引线头上压入一条用青壳纸或牛皮纸做成的长绝缘折条，待绕几匝后抽紧起始头，如图 3-33 所示。

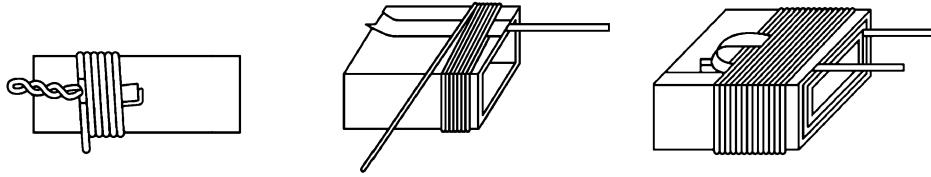


图 3-33 制作引出线

2) 绕线时，通常按照一次侧绕组→静电屏蔽→二次侧高压绕组→二次侧低压绕组的顺序，依次叠绕。当二次侧绕组的组数较多时，每绕制一组用万用表检查测量一次。

(3) 绕制方法。

1) 对导线和绝缘材料的选用。导线选用缩醛或聚酯漆包圆铜线。绝缘材料的选用受耐压要求和允许厚度的限制，层间绝缘按两倍层间电压的绝缘强度选用，常采用电话纸、电缆纸、电容器纸等，在要求较高处可采用聚酯薄膜、聚四氟乙烯或玻璃漆布；铁心绝缘及绕组间绝缘按对地电压的两倍选用，一般采用绝缘纸板、玻璃漆布等，要求较高的则采用层压板或云母制品。

2) 制作引出线。变压器每组线圈都有两个或两个以上的引出线，一般用多股软线、较粗的铜线或用铜皮剪成的焊片制成，将其焊在线圈端头，用绝缘材料包扎好后，从骨架端面预先打好的孔中伸出，以备连接外电路。

对于绕组线径在 0.35mm 以上的都可用本线直接引出，方法如图 3-33 所示；线径在 0.35mm 以下的，要用多股软线制作引出线，也可用薄铜皮做成的焊片作为引出线头。

(4) 线尾的固定。对无框骨架的，导线起绕点不可紧靠骨架边缘；对有边框的，导线一定要紧靠边框板。绕线时，绕线机的转速应与掌握导线的那只手左右摆动的速度相配合，并将导线稍微拉向绕组前进的相反方向约 5°，以便将导线排紧。

(5) 层间绝缘的安放。每绕完一层导线，应安放一层绝缘材料（绝缘纸或黄蜡绸等）。注意绝缘纸必须从骨架所对应的铁心舌宽面开始安放。若绕组所绕层次很多，还应在两个舌宽面分别均匀安放，这样可以控制线包厚度，少占铁心窗口位置。绝缘纸必须放平、放正和拉紧，两边正好与骨架端面内侧对齐，围绕线包一周，允许起始处有少量重叠。

3. 铁心的装配（见图 3-34）

(1) 铁心装配的要求。

1) 铁心要装得紧，不仅可防止铁心从骨架中脱出，还能保证有足够的有效截面和避免绕组通电后因铁心松动而产生杂音。

2) 装配铁心时不得划破或胀破骨架，误伤导线，造成绕组的断路或短路。

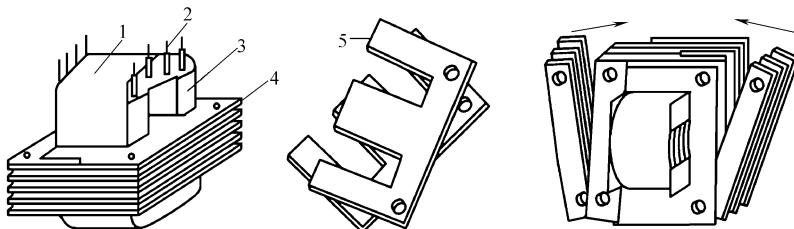


图 3-34 铁心的装配

1—线包 2—引出线 3—绝缘衬 4、5—E形硅钢片

3) 铁心磁路中不应有气隙，各片开口处要衔接紧密，以减小铁心磁阻。

4) 要注意装配平整、美观。

注意：装配铁心前，应先进行硅钢片的检查和选择。

(2) 硅钢片的检查及挑选。

(3) 抢片与错位现象。

1) 抢片现象。抢片是指在双面插片时一层的硅钢片插入另一层中间，如图 3-35 所示。如出现抢片未及时发现，继续敲打，势必将硅钢片敲坏。因此，一旦发生抢片，应立即停止敲打，将抢片的硅钢片取出，整理平直后重新插片。否则这一侧硅钢片敲不进去，另一侧的横条也插不进来。

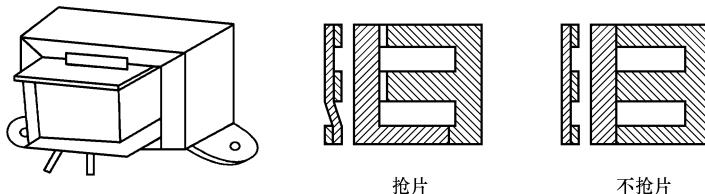


图 3-35 硅钢片的装配

2) 错位现象。硅钢片错位的产生原因是在安放铁心时，硅钢片的舌片未与线圈骨架空腔对准。这时舌片抵在骨架上，敲打时往往给制作者一个铁心已插紧的错觉，这时如果强行将这块硅钢片敲进去，必然会损坏骨架和割断导线。

4. 调整测试

由于小型单相变压器比较简单，制成之后一般只进行外表调整和空载测试。

(1) 调整。

1) 在不通电的情况下，观察外表，查看铁心是否紧密、整齐，有无松动等，绕组和绝缘层有无异常。发现问题及时进行调整处理。

2) 空载通电后，有无异常噪声，对铁心不紧、铁片不够所造成的噪声要进行夹紧整理。

(2) 测试。

1) 测量绝缘电阻。用绝缘电阻表测量各绕组对地电阻，各绕组间的绝缘电阻应不低于 50MW。

2) 测量额定电压。在一次侧加额定电压，测量二次侧各个绕组的开路电压，该开路电

压就是二次侧的额定电压，再与设计值相比，看是否在允许范围内。二次侧高压绕组允许误差 $\Delta U \leq \pm 5\%$ ，二次侧低压绕组允许误差 $\Delta U \leq \pm 5\%$ ；中心抽头电压允许误差 $\Delta U \leq \pm 2\%$ 。

本 章 小 结

本章主要分析了变压器的结构、原理及工作特性，以及其他常用特殊变压器等。主要内容有：

(1) 变压器是一种静止的传送交流电能的设备，变压器是利用基本的电磁关系，将一次电能，通过中间的磁场耦合，转变成二次侧电能输出。

(2) 变压器利用不同的电压比，可以实现变压、变流、变阻抗的功能。一、二次电压比与电压比成正比；一、二次电流比与电压比成反比；一、二次阻抗比正比于电压比的二次方。

(3) 变压器主要由两个部分构成，一是铁心，二是绕组。铁心是变压器的磁路部分，绕组是变压器的电路部分。

(4) 变压器的参数是变压器安全稳定运行的主要依据，其主要参数有额定容量、额定电压、额定电流、绕组联结方式等。

(5) 三相变压器具有对称的三相磁路和三相电路。主要用于电力系统，其磁路多采用心式结构。电路联结常采用 Y/Y 、 Y/Δ 、 Δ/Y 等多种方式，三相变压器的联结组别号是保证其安全运行的重要参数，组别的标定采用“时钟标定法”，组别的确定主要是通过相量分析法来找到一、二次线电势相位差，从而确定组别。

(6) 常用的特殊变压器有电压互感器、电流互感器、自耦变压器等，它们用于不同的场所，有着不同的结构特点，尤其要了解其适用范围及使用注意事项。

习 题

1. 变压器的主要部件有哪些？它们的作用是什么？变压器是根据何种原理工作的？变压器的一次绕组一定是高压侧吗？

2. 变压器的铁心为什么要用硅钢片叠成？用铸铁做铁心行不行？不用铁心行不行？变压器能否变换直流电压？一台降压变压器，为了节约材料，能否在保持电压比不变的情况下，将二次绕组绕成一匝？

3. 某单相变压器的额定电压为 $380V/220V$ ，额定频率为 $50Hz$ 。试问：如果误将低压绕组接到 $380V$ 电源上，变压器会发生什么情况，为什么？

4. 有一台降压变压器，一次绕组电压为 $220V$ ，二次绕组电压为 $110V$ ，一次绕组为 2200 匝，若二次绕组接入阻抗为 8Ω 的阻抗，问变压器的电压比，二次绕组匝数，一次和二次绕组中电流各为多少？

5. 为什么输电线上有电能损失？如何减少电能损失？

6. 一合理想变压器，一次绕组 2200 匝，二次绕组 440 匝，并联一个 100Ω 的负载电阻。若把一次绕组接在 $220V$ 交流电源上，则二次电压表示数为多少，二次电流表示数为多少，若上面接的是 $44V$ 直流电源呢？

7. 有一台单相电力变压器， $S_N = 50kV \cdot A$ ， $U_{IN}/U_{2N} = 10kV/0.23kV$ ，试求一、二次侧的额定电流。

8. 变压器的效率与哪些因素有关？在什么情况下效率最高？为什么变压器的铜损耗又称为可变损耗，铁损耗又称为不变损耗？
9. 变压器一、二次绕组之间并没有电的直接联系，为什么二次绕组电流增加时，一次绕组电流也要增加？变压器二次侧加感性负载和容性负载时，其电压变化率有何不同？
10. 三相变压器绕组的连接方法有哪些？如何判定三相变压器绕组的联结组别号？常用的有哪些联结组别号？它们分别适用于那种场合？何谓变压器并联运行？并联运行有什么优点？
11. 自耦变压器和普通双绕组变压器有何区别？它的主要特点是什么？
12. 为什么电流互感器的二次侧不允许开路？而电压互感器的二次侧不允许短路？
13. 电弧焊对焊接变压器有何要求？如何满足这些要求？
14. 如何加强变压器运行时的常规巡视？



第4章 直流电动机及电气控制

学习目标

1. 掌握直流电机的基本工作原理及结构。
2. 掌握直流电动机的工作特性与机械特性。
3. 掌握直流电动机的起动、调速、反转与制动。
4. 会应用所学知识解决实际问题。

直流电机是电机的主要类型之一，它是直流发电机和直流电动机的总称。直流电机是可逆的，即一台直流电机既可以作为发电机使用，也可作为电动机使用，用作直流发电机时是将机械能转变为电能，当用作电动机时是将电能转换为机械能。直流电动机和直流发电机两者在结构上没有根本的区别，这种原理在电机理论中称为可逆原理。当原动机驱动电枢绕组在主磁极 N、S 之间旋转时，电枢绕组上感生出电动势，经电刷、换向器装置整流为直流后，引向外部负载（或电网），对外供电，此时电机作直流发电机运行。如用外部直流电源，经电刷换向器装置将直流电流引向电枢绕组，则此电流与主磁极 N、S 产生的磁场互相作用，产生转矩，驱动转子与连接于其上的机械负载工作，此时电机作直流电动机运行。

与异步电动机相比，直流电动机的结构复杂，使用和维护不如异步机方便，而且要使用直流电源。

直流电动机的优点：

- (1) 调速性能好，调速范围广，易于平滑调节。
- (2) 起动、制动转矩大，易于快速起动、停车。
- (3) 易于控制。

应用：

- (1) 轧钢机、电力机车、中大型龙门刨床、矿井卷扬机、纺织机械等调速范围大的大型设备。
- (2) 用蓄电池做电源的地方，如汽车、拖拉机等。

4.1 直流电动机的结构

直流电动机的结构由定子和转子两大部分组成，如图 4-1 所示。直流电动机运行时静止不动的部分称为定子，定子的主要作用是产生磁场，由机座、主磁极、换向极、端盖和电刷装置等组成。运行时转动的部分称为转子，其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电动机进行能量转换的枢纽，所以通常又称为电枢，由转轴、电枢铁心、电枢绕组、换向器和风扇等组成。定子和转子之间的间隙称为气隙。

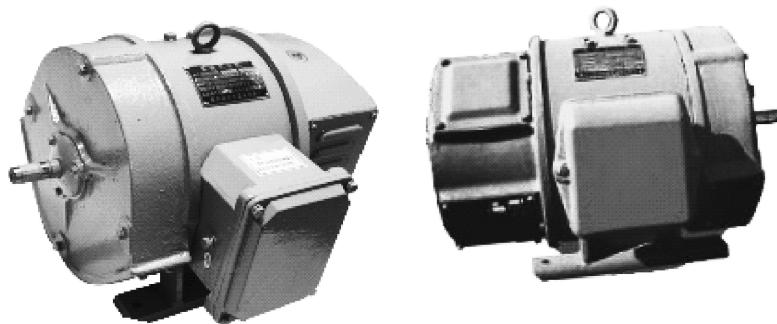
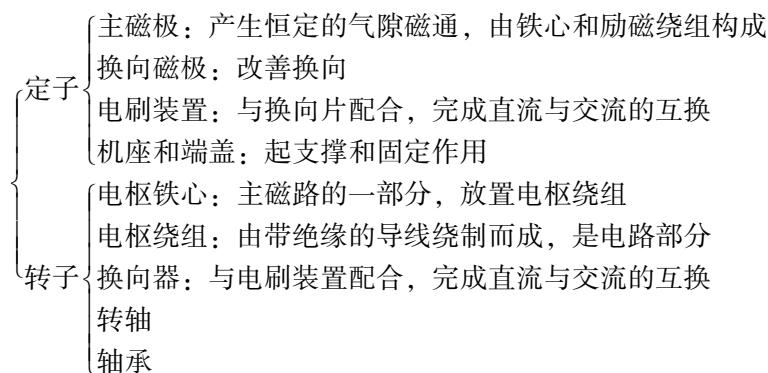


图 4-1 直流电动机

直流电动机的构成。



直流电动机的分解图如图 4-2 所示，剖视图如图 4-3 所示。

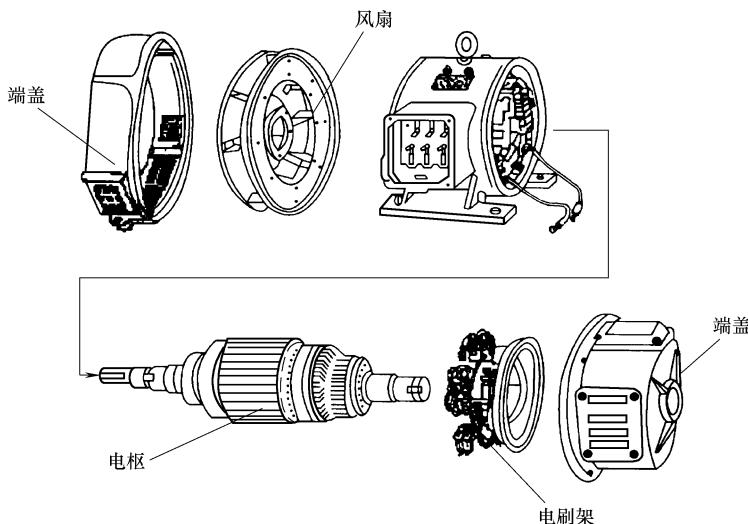


图 4-2 直流电动机分解图

1. 定子

定子的主要作用是产生主磁场并作为结构支撑。

(1) 主磁极(见图4-4)的作用是产生气隙磁场。主磁极由主磁极铁心和励磁绕组两部分组成。铁心一般用0.5~1.5mm厚的硅钢板冲片叠压铆紧而成，分为极身和极靴两部分，上面套励磁绕组的部分称为极身，下面扩宽的部分称为极靴，极靴宽于极身，既可以调整气隙中磁场的分布，又便于固定励磁绕组。励磁绕组用绝缘铜线绕制而成，套在主磁极铁心上。整个主磁极用螺钉固定在机座上。

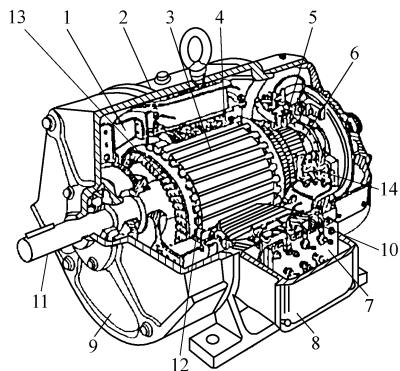


图4-3 剖视图

- 1—风扇 2—机座 3—电枢 4—主磁极 5—电刷架
6—换向器 7—接线板 8—出线盒 9—端盖
10—换向磁极 11—转轴 12—电枢铁心
13—电枢绕组 14—电刷

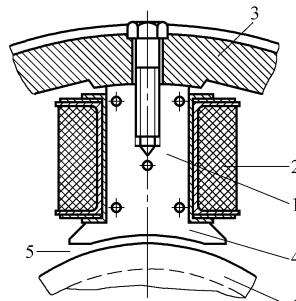


图4-4 主磁极

- 1—极身 2—绕组 3—机座
4—极靴 5—气隙 6—电枢

(2) 换向极(见图4-5)的作用是产生附加磁极，以改善换向，减小电动机运行时电刷与换向器之间可能产生的换向火花，一般装在两个相邻主磁极之间，由换向极铁心和换向极绕组组成。换向极绕组用绝缘导线绕制而成，套在换向极铁心上，换向极的数目一般与主磁极相等。

(3) 电动机定子的外壳称为机座。其作用为：

- 1) 作为磁轭传导磁通，是磁路的一部分；
- 2) 固定主磁极、换向磁极和端盖等部件；
- 3) 借用机座的底脚把电动机固定在基础上。

机座必须具有足够的机械强度和良好的导磁性能。为保证机座具有足够的机械强度和良好的导磁性能，一般为铸钢件或由钢板焊接而成。

(4) 电刷装置是用来引入或引出直流电压和直流电流的，如图4-6所示。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等组成。电刷放在刷握内，用弹簧压紧，使电刷与换向器之间有良好的滑动接触，刷握固定在刷杆上，刷杆装在圆环形的刷杆座上，相互之间必须绝缘。刷杆座装在端盖或轴承内盖上，圆周位置可以调整，调好以后加以固定。

2. 转子(又称为电枢，见图4-7)

(1) 电枢铁心是主磁路的主要部分，同时用以嵌放电枢绕组。一般电枢铁心采用由0.5mm厚的硅钢板冲制而成的冲片叠压而成，以降低电动机运行时电枢铁心中产生的涡流损耗和磁滞损耗。叠成的铁心固定在转轴或转子支架上，铁心的外圆开有电枢槽，槽内嵌放

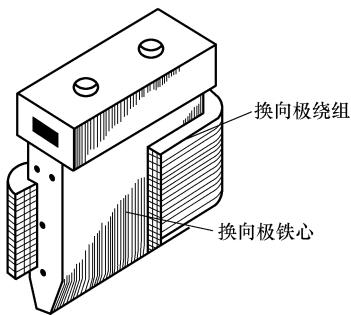


图 4-5 换向极

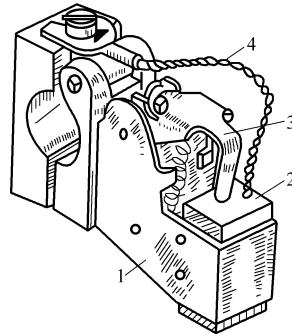


图 4-6 电刷装置

1—刷握 2—电刷 3—压紧弹簧 4—刷辫

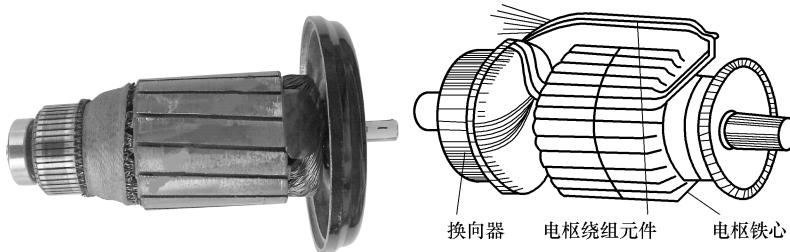


图 4-7 电枢

电枢绕组。

(2) 电枢绕组的作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电动机进行能量变换的关键部件，所以叫电枢。它是由许多线圈元件按一定规律连接而成，线圈采用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜线绕成，不同线圈的线圈边分上、下两层嵌放在电枢槽中，线圈与铁心之间以及上、下两层线圈边之间都必须妥善绝缘。为防止离心力将线圈边甩出槽外，槽口用槽楔固定。线圈伸出槽外的端接部分用热固性无纬玻璃带进行绑扎。

(3) 换向器是直流电动机的重要部件，在直流电动机中，它的作用是将电刷两端的直流电转换为绕组内的交流电；在直流发电机中，它的作用是将绕组内的交变电动势转换为电刷两端的直流电压。换向器由多个相互间用云母绝缘的换向片组成，结构如图 4-8 所示。

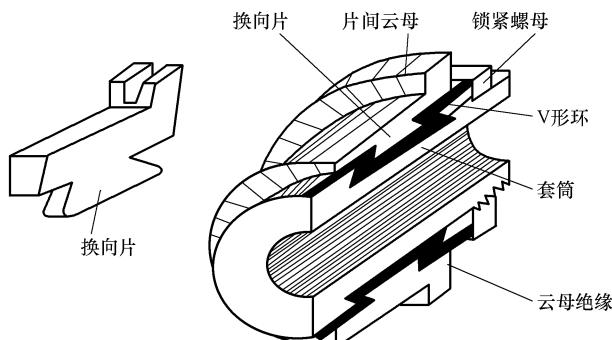


图 4-8 换向器结构

(4) 转轴起电枢旋转的支撑作用，需有一定的机械强度和刚度，以保证负载时气隙均匀且转轴本身不至于变形，一般用圆钢加工而成。

(5) 气隙是电机主磁极与电枢之间的间隙，小型电机气隙为1~3mm，大型电机气隙约为10~12mm。气隙虽小，但因空气磁阻较大，在电机磁路系统中有重要作用，其大小、形状对电机性能有很大的影响。

4.2 直流电机的工作原理

4.2.1 直流发电机的工作原理

直流发电机是将机械能转变成电能的旋转机械。工作原理就是把电枢线圈中感应的交变电动势，靠换向器配合电刷的换向作用，使之从电刷端引出时变为直流电动势的原理。

下图为直流发电机的物理模型，N、S为定子磁极，abcd是固定在可旋转导磁圆柱体上的线圈，线圈连同导磁圆柱体称为电机的转子或电枢。线圈的首末端a、d连接到两个相互绝缘并可随线圈一同旋转的换向片上。转子线圈与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷进行的。

当原动机驱动电机转子逆时针旋转时，线圈abcd将产生感应电动势，感应电动势的方向按右手定则确定（磁感线指向手心，大拇指指向导体运动方向，其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向）。如图4-9a所示，导体ab在N极下，a点高电位，b点低电位；导体cd在S极下，c点高电位，d点低电位；电刷A极性为正，电刷B极性为负。

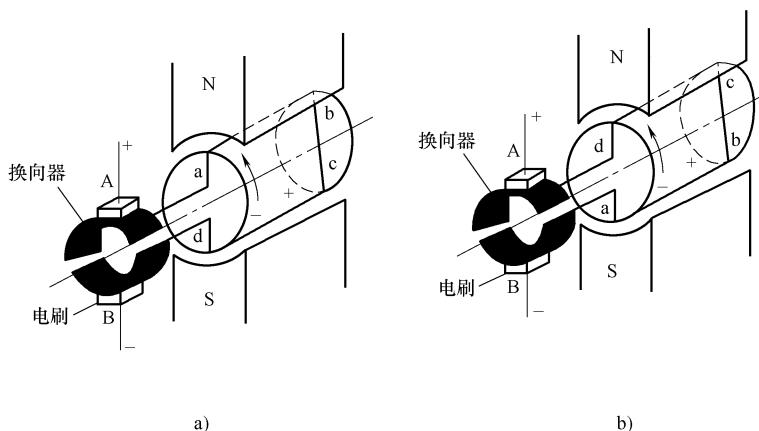


图4-9 直流发电机工作原理

当原动机驱动电机转子逆时针旋转180°后，如图4-9b。导体ab在S极下，a点低电位，b点高电位；导体cd在N极下，c点低电位，d点高电位；电刷A极性仍为正，电刷B极性仍为负。

从图中可以看出，和电刷A接触的导体永远位于N极下，同样，和电刷B接触的导体永远位于S极下。因此，电刷A始终有正极性，电刷B始终有负极性，所以电刷端能引出方向不变但大小变化的脉振电动势。如果电枢上线圈数增多，并按照一定的规律把它们连接

起来，可使脉振程度减小，就可获得直流电动势。这就是直流发电机的工作原理。

实际直流发电机的电枢根据实际需要有多个线圈。线圈分布在电枢铁心表面的不同位置，按照一定的规律连接起来，构成电机的电枢绕组。

4.2.2 直流电动机工作原理

直流电动机是将电能转变成机械能的旋转机械，如图 4-10 所示。

把电刷 A、B 接到直流电源上，电刷 A 接正极，电刷 B 接负极。此时电枢线圈中将有电流流过。

导体的受力方向用左手定则确定。这一对电磁力形成了作用于电枢的力矩，这个力矩在旋转电动机里称为电磁转矩，转矩为逆时针方向，企图使电枢逆时针方向转动。如果此电磁转矩能够克服电枢上的阻转矩（例如由摩擦引起的阻转矩以及其他负载转矩），电枢就能按逆时针方向旋转起来。当电枢转了 180° 后，导体 cd 转到 N 极下，导体 ab 转到 S 极下时，由于直流电源供给的电流方向不变，仍从电刷 A 流入，经导体 cd、ab 后，从电刷 B 流出。这时导体 cd 受力方向变为从右向左，导体 ab 受力方向为从左向右，产生的电磁转矩的方向仍为逆时针方向。

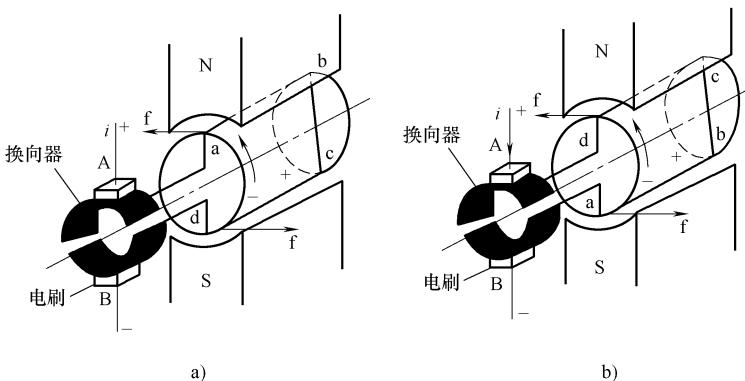


图 4-10 直流电动机的工作原理

因此，电枢一经转动，由于换向器配合电刷对电流的换向作用，直流电流便会交替地由导体 ab 和 cd 流入，使线圈边只要处于 N 极下，其中通过电流的方向总是由电刷 A 流入的方向，而在 S 极下时，总是从电刷 B 流出的方向。这就保证了每个极下线圈边中的电流始终是一个方向，从而形成一种方向不变的转矩，使电动机能连续地旋转。这就是直流电动机的工作原理。

与直流发电机相同，实际的直流电动机的电枢并非单一线圈，磁极也并非一对。

4.3 直流电机的铭牌及励磁方式

4.3.1 直流电机的铭牌

为了保证电动机安全有效地运行，电机制造厂都对它所生产的电机工作条件加以限制，

电机按制造厂家规定条件工作的情况称为额定工作情况。表征电机额定工作情况的各种数据叫做额定值。电机运行时，所有物理量与额定值相同——电机运行于额定状态；电机的运行电流小于额定电流——欠载运行；运行电流大于额定电流——过载运行。长期欠载运行将造成电机浪费，而长期过载运行会缩短电机的使用寿命。电机最好运行于额定状态或额定状态附近，此时电机的运行效率、工作性能等比较好。直流电动机的铭牌见表 4-1。

表 4-1 直流电动机的铭牌

型号	Z3-91	励磁方式	他励
额定功率	30kW	励磁电压	220V
额定电压	220V	绝缘等级	B
额定电流	160.5A	工作方式	连续
额定转速	750r/min	温升	75℃
出厂编号—××××××		出厂日期	×年 ×月
中国 ×××电机厂			

一般用途的中小型直流电机—— 表示机座(1~9,号数越大,电机直径越大)

 第二次改型设计 ————— 表示铁心长度顺序号(1为短铁心,2为长铁心)

(1) 额定容量(功率) P_N (kW)。指额定条件下电机所能提供的功率。

对电动机来讲是指轴上输出的机械功率, $P_N = \eta_N U_N I_N$, η_N 为额定效率。对发电机来讲是指电刷间输出的额定电功率, 即 $P_N = U_N I_N$ 。

(2) 额定电压 U_N (V)。指额定运行状态下, 直流发电机的电压或直流电动机的输入电压。

(3) 额定电流 I_N (A)。指在额定电压下, 运行于额定功率时对应的电流。

(4) 额定转速 n_N (r/min)。指在额定电压、额定电流下, 运行于额定功率时对应的转速。

(5) 励磁方式和额定励磁电流 I_{fN} (A)。

有些物理量虽然不标在电机铭牌上, 但它也是额定值。例如在额定运行状态下的转矩、效率分别为额定转矩和额定效率等, 这些额定数据也叫铭牌数据。

例 一台直流发电机额定数据如下, $P_N = 200\text{kW}$, $U_N = 230\text{V}$, $n_N = 1450\text{r/min}$, $\eta_N = 90\%$, 请算出该发电机的额定电流和输入功率是多少?

解:

$$P_N = U_N I_N$$

$$I_N = P_N / U_N = 200 \times 1000 / 230 = 869.6\text{A}$$

$$P_1 = P_N / \eta_N = 200 / 0.9 = 222.2\text{kW}$$

4.3.2 直流电机的励磁方式

电机主磁极上的线圈通以直流电产生的磁场, 称为主磁场, 主磁极绕组称为励磁绕组。励磁绕组的供电方式称为励磁方式。根据励磁绕组与电枢绕组的连接方式不同, 直流电机分

为自励和他励两种，如图 4-11 所示。他励直流电机的励磁绕组与电枢绕组间没有电的联系，由独立的电源对励磁绕组供电。自励电机的励磁电流由自身供给，又可以分为并励、串励、复励三种。

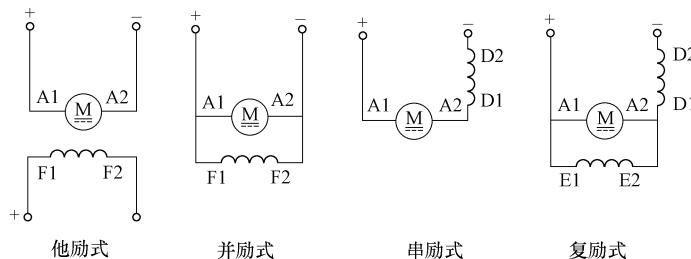


图 4-11 直流电机的励磁方式

他励电动机：励磁线圈与转子电枢的电源分开。

并励电动机：励磁线圈与转子电枢并联到同一电源上。

串励电动机：励磁线圈与转子电枢串联到同一电源上。

复励电动机：励磁线圈与转子电枢的连接有串有并，接在同一电源上。

励磁绕组消耗的功率仅占直流电机额定功率的 1% ~ 3%，但直流电机的性能随着励磁方式的不同将产生很大的区别。其中他励直流电动机的机械特性最硬，改变电枢电压进行调速控制时不影响磁场，使其具有良好的控制特性，用途最广。在后面的内容中均以该类电机为例。

直流电动机的主要种类、性能特点及典型应用见表 4-2。

表 4-2 直流电动机的主要种类、性能特点及典型应用

电动机种类		主要性能特点	典型生产机械举例
直流电动机	他励、并励	机械特性硬、起动转矩大、调速范围宽、平滑性好	调速性能要求高的生产机械，如大型机床（车、铣、刨、磨、镗）、高精度车床、可逆轧钢机、造纸机、印刷机等
	串励	机械特性软、起动转矩大、过载能力强、调速方便	要求起动转矩大、机械特性软的机械，如电车、电气机车、起重机、吊车、卷扬机、电梯等
	复励	机械特性硬度适中、起动转矩大、调速方便	

国产直流电动机出线端标记见表 4-3。

表 4-3 国产电动机出线端标记

绕组名称	出线端标记		绕组名称	出线端标记	
	始端	末端		始端	末端
电枢绕组	A1 或 S1	A2 或 S2	并励绕组	E1 或 B1	E2 或 B2
换向极绕组	B1 或 H1	B2 或 H2	他励绕组	F1 或 T1	F2 或 T2
串励绕组	D1 或 C1	D2 或 C2			

1. 电枢电动势

根据电磁定律可知，无论是直流发电机还是直流电动机，当其运行时，电枢绕组切割磁场就要产生感应电动势。直流电机的转子绕组是由许多导体按一定规律连接的，每个并联支路所有导体的电动势都是叠加的。每根导体的感应电动势为 $e = BLv$ ，导体运动的线速度与转子的转速 n 成正比。根据转子的结构和电磁感应的有关知识可以得到转子电动势为

$$E_a = C_e \Phi n$$

式中 $C_e = \frac{pN}{60A}$ —— 电机的结构常数（电枢电动势常数）；

E_a —— 电枢电动势；

p —— 电机极对数；

N —— 电枢绕组总导体数；

A —— 电枢绕组并联支路对数；

Φ —— 气隙磁通，(Wb)；

n —— 电机转速，(r/min)。

上式表明直流电机的感应电动势与电机结构、气隙磁通和电机转速有关。当电机制造好以后，与电机结构有关的常数 C_e 不再变化，因此电枢电动势仅与气隙磁通和转速有关，改变转速和磁通均可改变电枢电动势的大小。电枢绕组电动势的方向可由右手螺旋定则判定。

对于直流电动机，转子电动势的方向与电枢电流方向相反——反电势，它总是阻碍转子电流的变化；对发电机来说，其为电源电势（与电枢电流同方向）。

2. 电磁转矩

由于电枢绕组中有电流通过时，在主磁场的作用下使转子绕组的导体受到电磁力 F ($F = BIL$) 的作用，该力与电枢铁心半径之积称为电磁转矩，用 T 表示。

$$T_e = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \cdot I_a = C_T \Phi \cdot I_a$$

式中 T_e —— 电磁转矩；

C_T —— 电磁转矩常数；

I_a —— 电枢电流；

Φ —— 气隙磁通。

对于发电机来讲，电磁转矩的方向与转速方向相反，是制动性质；对于电动机来讲，二者方向一致，是驱动转轴旋转。

对于同一台电动机，电动势系数 C_e 和电磁转矩系数 C_T 之间有如下关系：

$$C_T = 9.55 C_e$$

直流电动机的额定电磁转矩 T_N 的计算公式为

由 $P = T\omega$, $\omega = 2\pi n/60$, 得 $T = P/\omega = 60P/2\pi n = 9.55P/n$

即 $T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$

式中 T_N ——额定转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)；
 P_N ——额定功率 (W)；
 n_N ——额定转速 (r/min)。

4.4 直流电动机的基本方程式及机械特性

4.4.1 基本平衡方程式

在列写基本方程之前，先规定他励直流电动机的参考方向，如图 4-12 所规定各物理量的参考方向。

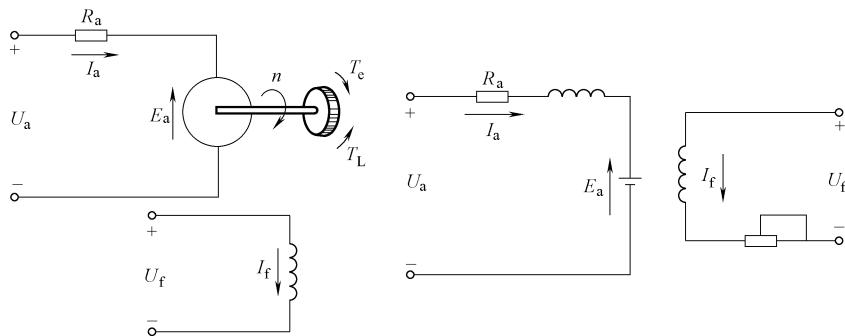


图 4-12 他励直流电动机模型

由图 4-12 可写出直流电动机稳态运行时的电动势平衡方程式和转矩平衡方程式，根据电工基础中基尔零夫定律可知电动势平衡方程式

$$U = E_a + I_a R_a$$

$$T_e = T_L + T_0$$

式中 U ——直流电动机电枢两端的电压；

E_a ——转子绕组感应电动势， $E_a = C_e \Phi n$ ，其方向与电源电压 U 相反，大小与转速成正比，且有 $U > E_a$ ；

I_a ——转子电流；

R_a ——包括电枢绕组和电刷压降的等效电阻；

T_e ——电磁转矩；

T_L ——电动机轴上的负载转矩；

T_0 ——电动机的空载转矩。

由公式 $P = T\omega$ ，将 $T_e = T_L + T_0$ 两边同时乘以角速度 ω ，得

$$T_e \omega = T_L \omega + T_0 \omega$$

即 $P_m = P_2 + P_0$ ，功率关系如图 4-13 所示。

式中 P_m ——电磁功率；

P_2 ——电动机的输出功率；

P_0 ——空载损耗功率。

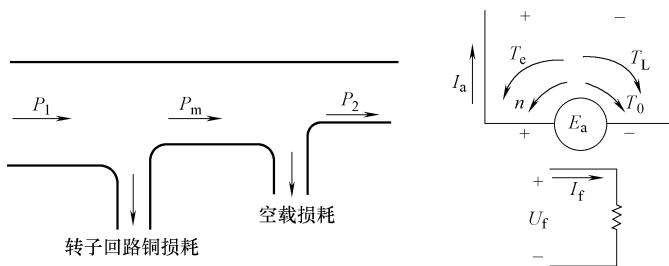


图 4-13 直流电动机功率流程及转矩示意图

4.4.2 直流电动机的机械特性

1. 机械特性

直流电动机的机械特性是指在电动机的电枢电压、励磁电流、电枢回路电阻为恒值的条件下，即电动机处于稳态运行时，电动机的转速 n 与电磁转矩 T_e 之间的关系 $n = f(T_e)$ 。由于转速和转矩都是机械量，因而把它称为机械特性。利用机械特性和负载特性可以确定系统的稳态转速，在一定条件下还可以利用机械特性和运动方程式分析电力拖动系统的动态运行情况，如转速、转矩及电流随时间的变化规律。可见，电动机的机械特性对分析电力拖动系统的运行是非常重要的。

由前面的公式可求出直流电动机的转速公式：

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

由公式 $T_e = C_T \Phi I_a$ ，得 $I_a = \frac{T_e}{C_T \Phi}$ ，代入上式，有机械特性方程为

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_e$$

可写为 $n = n_0 - \beta T_e$ ，其中 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$, $\beta = \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$

式中 n ——电动机转速 (r/min)；

U ——电动机端电压 (V)；

I_a ——电枢电流 (A)；

R_a ——电枢回路电阻 (Ω)；

n_0 ——电动机的理想空载转速；

β ——机械特性的斜率，当改变转子回路的电阻或磁通时就改变了特性曲线图的斜率。

转速降 Δn 是理想空载转速与实际转速之差，转矩一定时，它与机械特性的斜率 β 成正比。 β 越大，机械特性曲线越陡， Δn 越大； β 越小，特性曲线越平， Δn 越小。通常称 β 大的机械特性为软特性， β 小的特性为硬特性。

直流电动机在使用时一定要保证 U_f 不能为零，即励磁回路要可靠连接，不能断开。若励磁电流为零，则电动机的主磁通将下降到很小数值（仅剩磁），若此时电动机为轻载，由上述转速公式可以看出，电动机的转速将飞速上升，造成飞车事故；若电动机为重载，则电磁转矩将小于负载转矩，引起电枢电流增大，电枢绕组可能会因过热而烧坏。

2. 固有机械特性曲线

直流电动机在电枢电压、励磁电流均为额定值，即 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$ ，电枢外接电阻 $R_{ad} = 0$ 的情况下，所对应的机械特性称为固有机械特性。

$$\text{此时, } n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U_N - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_e = n_0 - \beta T_e$$

因为电枢电阻 R_a 很小，特性斜率 β 很小，通常额定转速降 Δn 只有额定转速的百分之几到百分之十几，所以他励直流电动机的固有机械特性是硬特性，如图 4-14 所示。

3. 人为机械特性

由公式 $n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_e$ 可知，当改变电动机的电枢电压 U 、励磁电流 I_f (Φ)、电枢外接电阻 R_{ad} 时，可以改变电动机的机械特性，这种人为改变参数形成的机械特性称为人为机械特性。

(1) 改变电枢电压。他励直流电动机的励磁电流为额定值，即保持主磁通 Φ 额定且不变时，电枢回路无外接电阻，只改变电动机的电枢电压 U ，可以得到一条人为机械特性曲线。多次改变电枢电压 U ，可以得到一组相互平行的曲线，如图 4-15 所示。

这组特性曲线的斜率相同，即硬度相同，仅理想空载转速不同。

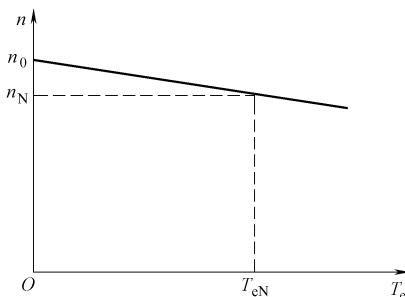


图 4-14 他励直流电动机的固有机械特性

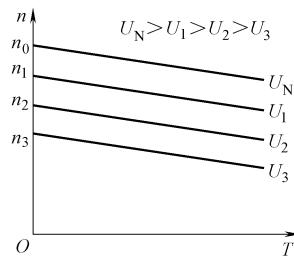


图 4-15 改变电枢电压的人为机械特性

(2) 改变气隙磁通。一般电动机在额定励磁电压下运行时，磁路实际上已接近饱和，再增加励磁电流会使电动机的磁路过饱和，而磁通也不会明显增加，电动机的铁损耗增加，导致电动机发热，受励磁绕组发热条件的限制，励磁电流也不允许再大幅度地增加。因此，改变磁通实际上是通过减弱磁通来实现的。由公式可知

$$n_0 \propto \frac{1}{\Phi}, \quad \beta \propto \frac{1}{\Phi^2}$$

当磁通减小时，理想空载转速 n_0 升高，而斜率 β 增大，使特性曲线倾斜度增加，电动机的转速有所提高，人为曲线在固有特性曲线上方。磁通越小，理想空载转速 n_0 越高，特

性越软，如图 4-16 所示。

(3) 电枢回路串电阻。在保持电枢电压及磁通不变的情况下，转子回路串入电阻 R_{ad} ，即 $R = R_a + R_{ad}$ ，此时由转速公式可知，人为特性和固有特性具有相同的理想空载转速 n_0 ，但是 β 增大，且随着 R_{ad} 的增大，斜率增大，即特性曲线硬度降低，如图 4-17 所示。

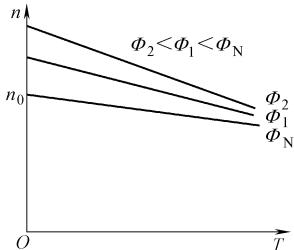


图 4-16 改变气隙磁通的人为
机械特性

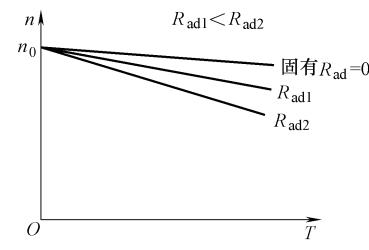


图 4-17 电枢回路串电阻的人为
机械特性

4.5 电力拖动系统稳定运行及负载的转矩特性

若有一电力拖动系统，原来处于某一稳定转速下运行，由于受到外界某种扰动，如负载的突然变化或电网电压的波动等，导致系统的转速发生变化而偏离了原来的平衡状态，如果系统能在新的条件下达到新的平衡状态，或者当外界扰动消失后能自动恢复到原来的转速下继续运行，则称这种系统是稳定的；如果当外界扰动消失后系统的转速无限制地上升，或一直下降至零，或不能稳定运行在一种转速下，则称该系统是不稳定的。

4.5.1 负载的转矩特性

电力拖动系统的运动方程式中包括了电动机的电磁转矩 T_e 、生产机械的负载转矩 T_L 及系统的转速 n 之间的关系，定量地描述了拖动系统的运动规律。但是，要对运动方程式求解，首先必须知道电动机的机械特性 $n=f(T_e)$ 及负载的机械特性 $n=f(T_L)$ 。负载的机械特性也称为负载转矩特性，简称负载特性。下面先介绍生产机械的负载特性。

虽然生产机械的类型很多，但是生产机械的负载转矩特性基本上可以分为三大类。

1. 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性，是指生产机械的负载转矩 T_L 的大小与转速 n 无关，即无论转速 n 如何变化，负载转矩 T_L 的大小都保持不变。根据负载转矩的方向是否与转向有关，恒转矩负载又分为反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种。

(1) 反抗性恒转矩负载的特点是：负载转矩的大小恒定不变，而方向总是与生产机械的运动的方向相反，即负载转矩的性质总是作反抗运动的阻转矩性质。显然，反抗性恒转矩负载特性在第一和第三象限内，如图 4-18 所示。皮带运输机、轧钢机、

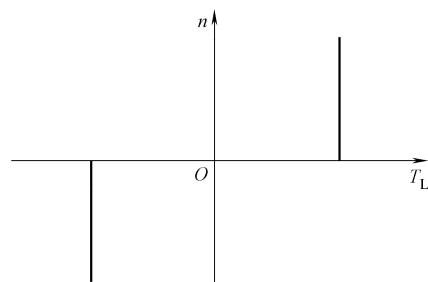


图 4-18 反抗性恒转矩负载特性

机床的刀架平移和行走机构等由摩擦力产生转矩的机械都属于反抗性恒转矩负载，如图 4-18 所示。

(2) 位能性恒转矩特性是由拖动系统中某些具有位能的部件（如起重类型负载中的重物）造成的，其特点是：不仅负载转矩的大小恒定不变，而且其方向也不变（不论生产机械的运动方向变化与否）。例如起重机，无论是提升重物还是下放重物，由物体重量所产生的负载转矩的方向是不变的。因此，位能性恒转矩负载特性位于第一与第四象限内，如图 4-19 所示。

2. 恒功率负载特性

恒功率负载的特点是负载转矩与转速的乘积为一常数，即负载功率等于常数。由于 $P = T_L \frac{2\pi n}{60}$ ，也就是负载转矩 T_L 与转速 n 成反比。恒功率负载特性是一条反比例曲线，如图 4-20 所示。

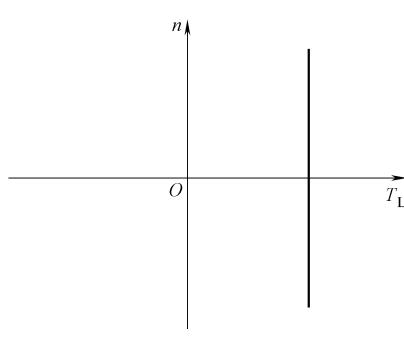


图 4-19 位能性恒转矩负载特性

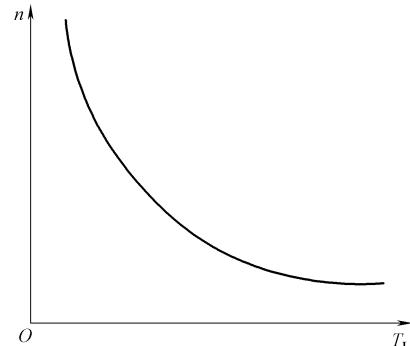


图 4-20 恒功率负载特性

某些生产工艺过程要求具有恒功率负载特性。例如车床的切削，粗加工时需要较大的吃刀量和较低的转速，精加工时需要较小的吃刀量和较高的转速；又如轧钢机轧制钢板时，小工件需要高速度低转矩，大工件需要低速度高转矩，这些工艺要求都需要利用恒功率负载特性。

3. 通风机类负载特性

水泵、油泵、通风机和螺旋桨等机械的负载转矩基本上与转速的二次方成正比，这类生产机械的负载特性是一条抛物线，如图 4-21 中的曲线 1 所示。

以上介绍的恒转矩负载特性、恒功率负载特性及泵与风机负载特性都是从实际的各种负载中概括出来的典型的负载特性。实际生产机械的负载转矩特性可能是以某种特性为主，或是以上几种典型特性的结合。例如，实际通风机除了主要有风机负载特性外，由于其轴承上还有一定的摩擦转矩 T_{L0} ，因而实际通风机的负载特性应为 $T_L = T_{L0} + kn^2$ ，属于综合性负载特性，如图 4-21 中曲线 2 所示。

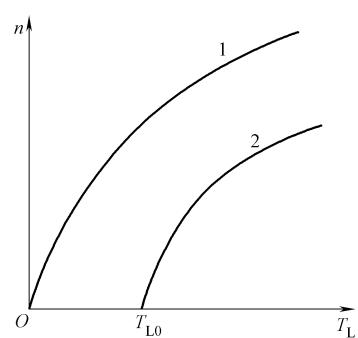


图 4-21 风机类负载特性

4.5.2 电力拖动系统稳定运行

一个电力拖动系统能否稳定运行，是由电动机机械特性和负载转矩特性的配合情况决定的。把实际系统简化后，电动机的机械特性和负载转矩特性可画在同一坐标系中，图 4-22 给出了恒转矩负载特性和电动机的两种不同机械特性的配合情况。下面以图 4-22 为例，分析电力拖动系统稳定运行的条件。

系统处于稳定恒转速运行时电磁转矩 T_e 与负载转矩 T_L 相等，因此在图 4-22 中，电动机机械特性和负载转矩特性的交点 A 或 B 是系统运行的工作点。在 A 或 B 点处均满足 $T_e = T_L$ ，且均具有恒定的转速 n_A 或 n_B 。但当出现扰动时，A 点和 B 点的运行情况是有区别的。

当系统在图 4-22a 中的 A 点运行时，若扰动使转速获得一个微小的增量，则转速由 n_A 上升到 n'_A ，此时电磁转矩小于负载转矩，因此在扰动消失后，系统将减速，直至回到 A 点运行。若扰动使转速由 n_A 下降到 n''_A ，此时电磁转矩大于负载转矩，因此在扰动消失后，系统将加速，直至回到 A 点运行。可见，A 点是系统的稳定运行点。

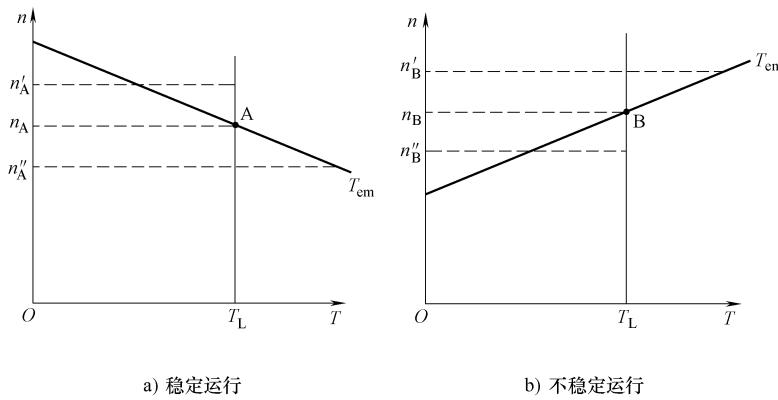


图 4-22 电力拖动系统稳定运行条件

当系统在图 4-22b 中的 B 点运行时，若扰动使转速由 n_B 上升到 n'_B ，这时电磁转矩大于负载转矩，即使扰动消失了，系统也将一直加速，不可能回到 B 点运行。若扰动使转速由 n_B 下降到 n''_B ，则电磁转矩小于负载转矩，系统将一直减速，但也不可能回到 B 点运行。因此，B 点是不稳定运行点。

通过以上分析可知，电力拖动系统的工作点在电动机机械特性与负载特性的交点上，但并非所有的交点都是稳定工作点。由于大多数负载转矩都随转速的升高而增大或者保持恒定，因此只要电动机具有下降的机械特性，就能满足稳定运行的条件。

应当指出，上述电力拖动系统的稳定运行条件无论对直流电动机还是交流电动机都是适用的，具有普遍的意义。

4.6 直流电动机的起动

电动机接上电源，从静止状态转动起来到达稳态运行，这就是电动机的起动过程。生产

机械对直流电动机的起动要求是：起动转矩 T_{st} 要尽量大，因为只有当起动转矩 T_{st} 大于负载转矩 T_L 时，电动机才能起动；起动电流尽量小，起动设备操作简单，运行可靠。

直流电动机常用的起动方法有三种：全压起动、转子回路串电阻起动、减压起动。

4.6.1 全压起动

全压起动就是电动机在额定磁通 Φ_N 的情况下，在电动机的电枢上直接加额定电压 U_N 使电动机起动的方法。在起动瞬间，电动机转速 $n = 0$ ，反电动势 $E_a = 0$ ，起动瞬间电枢电流为

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a} = \frac{U_N - C_e \Phi n}{R_a} = \frac{U_N}{R_a}$$

由于电枢电阻 R_a 非常小，故起动电流 $I_{st} = I_a$ 很大，通常可达额定电流的 10~20 倍，起动转矩 $T_{st} = C_e \Phi I_{st}$ 也很大。这样大的起动电流是不允许的，它可能使转子绕组绝缘损坏，甚至烧坏绕组；电动机换向困难，在换向片表面产生强烈的火花，甚至形成环火；对电源造成很大的冲击，影响同一电网上的其他设备。这么大的起动转矩会对电动机的机械传动部分产生很大的冲击力，造成机械损伤。因此，除小型直流电动机 R_a 较大、惯性较小可以直接起动外，一般直流电动机都不允许起动。

如何限制起动电流呢？由 $I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$ 可知，限制起动电流的措施有两个，一是增大转子回路电阻 R （电枢串电阻 R_{ad} ），二是降低电源电压（减压）。无论采用哪种起动方法，起动时都应保证电动机的磁通达到最大值。这是因为在同样的电流下， Φ 大则 T_{st} 大；而在同样的转矩 T_{st} 下， Φ 大则 I_{st} 可以小一些。

4.6.2 电枢回路串电阻起动

由公式 $I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$ 可知，在电枢回路中串入电阻 R_{ad} ，可减小起动电流，当起动转矩大于负载转矩时，电动机开始转动，此时 $E_a \neq 0$ ，则

$$I_{st} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_{ad}}$$

随着转速的升高，电动势 E_a 不断增大，起动电流继续减小，因此随着电动机转速的升高，应将起动电阻平滑地切除，最后使电动机转速达到运行值，如图 4-23 所示。

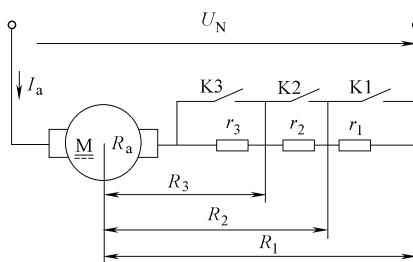


图 4-23 电枢回路串电阻起动

但是串入起动电阻后，同时起动转矩 $T_e = C_T \Phi I$ 也在减小。实际上，平滑地切除电阻是不可能的，一般是在电阻回路中串入多级（通常是 2~5 级）电阻，在起动过程中逐级加以切除。起动电阻的级数越多，起动过程就越快且越平稳，但所需要的控制设备也越多，投资也越大。这种起动方法称为电枢串电阻分级起动。

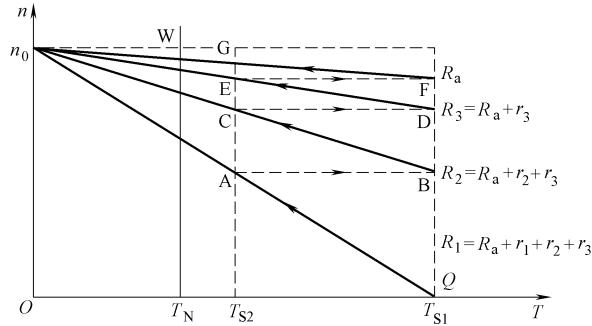


图 4-24 电枢回路串电阻起动过程

起动过程分析（见图 4-24）：

电动机起动后，运行在 A 点。切除第一级电阻 r_1 ，电枢电流增大，电磁转矩增大，在切除电阻瞬间，由于机械惯性，转速不能突变，进入第二级起动点 B，转速沿 BC 继续上升，最后稳定在 C 点，到 C 点后完成第二组起动。

切除第二级电阻 r_2 ，进入第三级起动点 D，转速上升到 E 点后，完成第三级起动。切除第三级电阻 r_3 ，进入固有机械特性曲线 F 点，最后转速沿固有曲线上升到稳定运行点 G，起动过程结束。

电枢回路串接电阻起动是为了限制起动电流，如果不能确定串接多大电阻合适，就置电枢回路的调节电阻在最大位置，这样保险一些。如果起动转矩不够就进一步调小电阻，使电枢电流增加（电磁转矩增大），直到起动完成将电阻全部切除。

4.6.3 减压起动

由 $I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$ ，我们可以看出，除了增大电阻外，还可以通过减小电枢电压来减小起动电流。当直流电源电压可调时，可采用减压方法起动。

起动时，以较低的电源电压起动电动机，起动电流便随电压的降低而正比减小。获得足够的起动转矩，起动电流通常限制在 $1.5 \sim 2I_N$ 内，此时起动电压为 $U_{st} = I_{st}R_a = (1.5 \sim 2)I_N R_a$ 。

起动时，机械特性如图 4-25 中的直线 1 所示，电磁转矩大于负载转矩，电动机开始旋转，随着电动机转速的上升，反电动势 E_a 逐渐增大，电枢电流 $I_a = (U_{st} - E_a)/R_a$ 减小，再逐渐提高电源电压，使起动电流和起动转矩保持在一定的数值上，从而保证电动机按需要的加速度升速。电动机沿 A→B→C→D…→M→W，电动机进入稳定运行状态，起动过程结束。

这种起动方法需要可调压的直流电源，过去多采用直流的发电机—电动机组，即每一台

电动机专门由一台直流发电机供电，当调节发电机的励磁电流时，便可改变发电机的输出电压，从而改变加在电动机电枢两端的电压。随着晶闸管技术和计算机技术的发展，直流发电机逐步被晶闸管整流电源所取代。

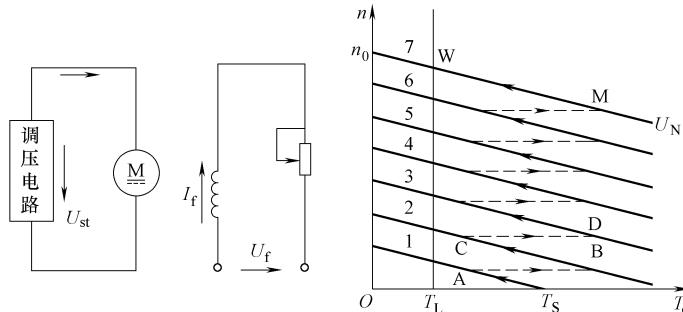


图 4-25 减压起动分析

这种起动方法的特点是在起动过程中不会有大量的能量消耗。起动电流小、起动平滑、能耗少，但需专用电源。多用于经常起动的大、中型直流电动机。

4.7 直流电动机的调速及反转

4.7.1 直流电动机的调速

所谓调速，就是在所拖动的负载不变的前提下，人为改变运行的转速。电力拖动系统的调速可以采用机械调速、电气调速或两者配合起来调速。通过改变传动机构速比进行调速的方法称为机械调速；通过改变电动机参数进行调速的方法称为电气调速。本节只介绍他励直流电动机的电气调速。

改变电动机的参数就是人为地改变电动机的机械特性，从而使负载工作点发生变化，转速随之变化。可见，在调速前后，电动机必然运行在不同的机械特性上，此时所得到的机械特性曲线称为人为机械特性。如果机械特性不变，因负载变化而引起电动机转速的改变不能称为调速。

由 $n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e$ 可知，当电枢电流 I_a 不变时（即在一定的负载下），改变串入电枢回路的电阻 R_{ad} ，电枢供电电压 U 或主磁通 Φ ，都可以得到不同的人为机械特性，从而在负载不变时可以改变电动机的转速，以达到速度调节的要求，故直流电动机调速的方法有以下三种，分别为电枢回路串电阻调速、降低电源电压调速和减弱磁通调速。下面就这 3 种调速方法做一下介绍。

1. 调速指标

(1) 调速范围是指电动机在额定负载下可能运行的最高转速 n_{\max} 与最低转速 n_{\min} 之比，通常用 D 表示，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

不同的生产机械对电动机的调速范围有不同的要求。要扩大调速范围，必须尽可能地提高电动机的最高转速并降低电动机的最低转速。电动机的最高转速受到电动机的机械强度、换向条件、电压等级等多方面条件的限制，而最低转速则受到低速运行时转速的相对稳定性的限制。

(2) 静差率(相对稳定性)。转速的相对稳定性是指负载变化时，转速的变化程度，转速变化小，其相对稳定性好。转速的相对稳定性用静差率 $\delta\%$ 表示。当电动机在某一机械特性上运行时，由理想空载增加到额定负载，电动机的转速降落与理想空载转速 n_0 之比，就称为静差率，用百分数表示。

$$\delta\% = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$$

显然，电动机的机械特性越硬，其静差率越小，转速的相对稳定性就越高。但是静差率的大小不仅由机械特性的硬度决定，还与理想空载转速的大小有关。例如，图4-26中的两条相互平行的机械特性曲线2、3，它们的硬度相同，额定转速降也相等，即 $\Delta n_2 = \Delta n_3$ ，但由于它们的理想空载转速不等， $n_{02} > n_{03}$ ，所以它们的静差率不等， $\delta_2\% < \delta_3\%$ 。可见，硬度相同的两条机械特性，理想空载转速越低，其静差率越大。

静差率与调速范围这两个指标是相互制约的，若图4-26中曲线1和曲线4为电动机最高转速和最低转速时的机械特性，则电动机的调速范围 D 与最低转速时的静差率 δ 关系如下：

$$\begin{aligned} D &= \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{0\min} - \Delta n_N} \\ &= \frac{n_{\max}}{\frac{\Delta n_N}{\delta} - \Delta n_N} = \frac{n_{\max}\delta}{\Delta n_N(1 - \delta)} \end{aligned}$$

式中 Δn ——最低转速机械特性上的转速降；

δ ——最低转速时的静差率，即系统的最大静差率。

由上式可知，若对静差率这一指标要求过高，即 δ 值越小，则调速范围 D 就越小；反之，若要求调速范围 D 越大，则静差率 δ 也越大，转速的相对稳定性越差。

不同的生产机械，对静差率的要求不同，普通车床要求 $\delta \leq 30\%$ ，而高精度的造纸机则要求 $\delta \leq 0.1\%$ 。在保证一定静差率指标的前提下，要扩大调速范围，就必须减小转速降落，就是说，必须提高机械特性的硬度。

(3) 调速的平滑性。在一定的调速范围内，调速的级数越多，调速越平滑，电动机运行越平稳。相邻两级转速之比称为平滑系数，表示为

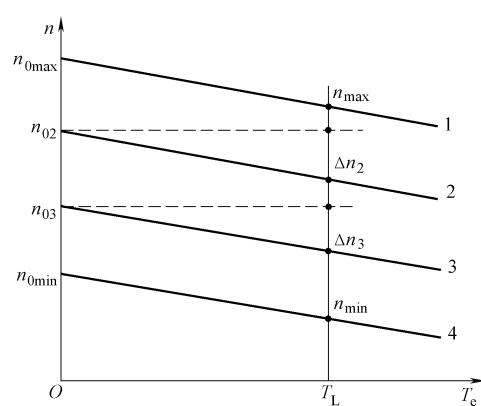


图4-26 机械特性与静差率

$$\varphi = \frac{n_i}{n_{i-1}} - 1$$

φ 值越接近 1，则平滑性越好，当 $\varphi = 1$ 时，称为无级调速，即转速可以连续调节。调速不连续时，级数有限，称为有级调速，此时电动机的转速具有不连续性。

(4) 调速的经济性。经济性包含两方面的内容：一是指调速设备的投资和调速过程中的能量损耗、运行效率及维修费用等；另一方面是指电动机在调速时能否得到充分利用，即调速方法是否与负载类型相配合。

2. 调速方法

(1) 电枢回路串电阻调速的原理及调速过程可用图 4-27 说明。

1) 电枢回路串电阻调速的前提条件： $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, $T_L = C$, $R = R_a + R_{ad}$

调速过程：设电动机拖动恒转矩负载 T_L 在固有特性 A 点上运行，其转速为 n_N 。若电枢回路串入电阻 R_s ，由于转速不能突变，由 A 点转换至 A' 后沿人为特性曲线，达到新的稳态后，工作点变为 B 点，转速下降到 n_1 。从图中可以看出，串入的电阻值越大，稳态转速就越低。

现以转速由 n_N 降至 n_1 为例，说明其调速过程。电动机原来在 A 点稳定运行时， $T_e = T_L$, $n = n_N$ ，当串入 R_s 后，电动机的机械特性变为直线 2，因串入电阻瞬间转速由于惯性不能突变，故 E_a 不突变，于是 I_a 及 T_e 突然减小，工作点平移到 A' 点。在 A' 点， $T_e < T_L$ ，所以电动机开始减速，随着 n 的减小， E_a 减小， I_a 及 T_e 增大，即工作点沿 A' → B 方向移动，当到达 B 点时， $T_e = T_L$ ，达到了新的平衡，电动机便在 n_1 转速下稳定运行。

2) 电枢串电阻调速具有以下几个特点。

- ① 增大电阻，转速下降，机械特性曲线变软。
- ② 串入的电阻一般是分段串入，调速为有级调速，平滑性差。
- ③ 效率降低，只能实现基速以下调速，调速范围较小，一般 $D \leq 2$ 。
- ④ 电枢电流大，消耗能量多，不经济。
- ⑤ 低速时机械特性变软，静差率增大，相对稳定性变差。
- ⑥ 调速方法简单，易于实现。

正因为缺点不少，目前已很少采用这种方式调速，仅在有些起重机、卷扬机等低速运转时间不长的传动系统中采用。

(2) 调压调速。直流电动机拖动负载运行时，保持励磁电压（磁通）额定，电枢回路不串电阻，改变电枢两端的电压，可以得到不同的转速。由于受电动机绝缘耐压的限制，电动机的工作电压不允许超过额定电压 U_N ，因此改变电枢电压只能在额定电压以下进行调节，故调压调速也是一种在基速以下调节转速的方法。降低电源电压调速的原理及调速过程可用图 4-28 说明。

1) 改变电枢调速的前提条件： $\Phi = \Phi_N$, $R =$

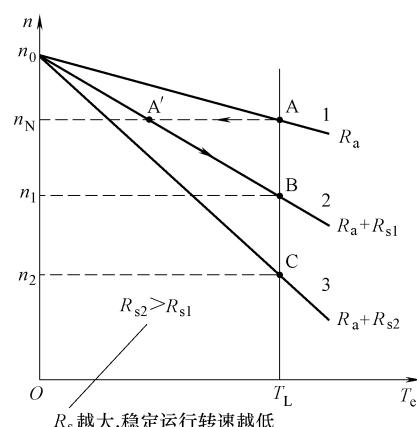


图 4-27 电枢回路串电阻

$$R_a, T_L = C$$

2) 调速过程: 设电动机拖动恒转矩负载 T_L 在固有特性的 A 点上运行, 其转速为 n_N 。若电源电压由 U_N 下降至 U_1 , 则达到新的稳态后, 工作点将移到对应人为特性曲线上的 B 点, 其转速下降为 n_1 。从图中可以看出, 电压越低, 稳态转速也越低。

电动机原来在 A 点稳定运行时, $T_e = T_L$, $n = n_N$ 。当电压降至 U_1 后, 电动机的机械特性变为直线 2。在降压瞬间, 转速 n 由于惯性不能突变, E_a 不能突变, 所以 I_a 和 T_e 突然减小, 工作点平移到 A' 点。在 A' 点, $T_e < T_L$, 电动机开始减速, 随着 n 减小, E_a 减小, I_a 和 T_e 增大, 工作点沿 A'B 方向移动, 到达 B 点时, 达到了新的平衡, $T_e = T_L$, 此时电动机便在较低转速 n_1 下稳定运行。

3) 降压调速的特点。

① 电源电压能够连续平滑调节, 可以实现无级调速。

② 调速特性与固有特性互相平行, 机械特性硬度不变, 调速的稳定性较高。

③ 调速范围较大, 一般可达 10 ~ 20。

④ 电能损耗较小。

⑤ 降压调速的缺点是需要一套电压可连续调节的直流电源, 早期常采用发电机—电动机系统 (简称 G-M 系统), 可以改变发电机 G 发出的电压, 从而实现对直流电动机的调压调速。这种系统的性能较为优越, 但投资大。目前, G-M 系统已被晶闸管—电动机系统 (简称 SCR-M 系统) 所取代。调压调速多用在对调速性能要求较高的生产机械上, 如机床、轧钢机、造纸机等。

(3) 改变磁通调速。直流电动机拖动负载运行时, 保持电枢电压额定, 电枢回路不串电阻, 改变励磁电流 (磁通), 可以得到不同的转速。电动机在额定运行时, 其磁路已基本饱和, 即使励磁电流增加很多, 磁通增加得也很少。另外, 从电动机的性能考虑也不允许磁路过饱和, 因此, 改变磁通调速只能从额定值往下调, 所以叫弱磁调速。

小容量系统在励磁回路中串入可调电阻以实现调速, 大容量系统须用专用可调电源供励磁绕组调节电流, 如图 4-29 所示。

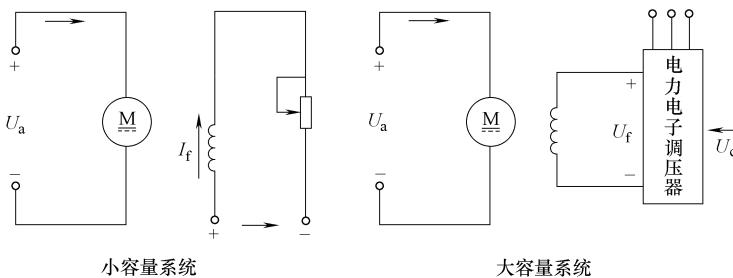


图 4-29 改变磁场调速

设电动机拖动恒转矩负载 T_L 在固有机械特性曲线的 A 点上运行, 如图 4-30 所示, 其转

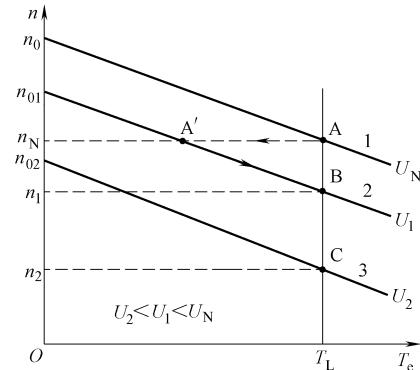


图 4-28 调压调速

速为 n_N 。若磁通由 Φ_N 减小至 Φ_1 ，则达到新的稳态后，工作点将移到对应人为机械特性曲线上的 B 点，其转速上升为 n_1 。从图中可见，磁通越少，稳态转速将越高。

调速过程如下：电动机原来在 A 点稳定运行时， $T_e = T_L$, $n = n_N$ 。当磁通减弱到 Φ_1 时，电动机的机械特性变为直线 2。在磁通减弱的瞬间，转速 n 由于惯性不能突变，电动势 E_a 随 Φ 而减小，于是电枢电流 I_a 增大。尽管 Φ 减小，但 I_a 增大很多，所以电磁转矩 T_e 还是增大的，因此工作点移到 A' 点。在 A' 点， $T_e > T_L$ ，电动机开始加速，随着 n 上升， E_a 增大， I_a 和 T_{em} 减小，工作点沿 A'B 方向移动。到达 B 点时， $T_e = T_L$ ，出现了新的平衡，此时电动机便在较高的转速 n_1 下稳定运行。

弱磁调速的特点。

- 1) 由于励磁电流 $I_f < I_a$ ，因而控制方便，能量损耗小。
- 2) 可以连续调节励磁电流，实现无级调速。
- 3) 在基速以上调速，由于受电动机机械强度和换向器火花的限制，转速不能太高，一般为 $(1.5 \sim 2.5) n_N$ ，因而调速范围窄。

为了扩大调速范围，常常把降压和弱磁两种调速方法结合起来。在额定转速以下采用降压调速，在额定转速以上采用弱磁调速。

例 1 一台他励直流电动机的额定数据为 $U_N = 220$ V, $I_N = 41.1$ A, $n_N = 1500$ r/min, $R_a = 0.4$ Ω，保持额定负载转矩不变，求：

- (1) 电枢回路串入 1.65 Ω 电阻后的稳态转速；
- (2) 电源电压降为 110 V 时的稳态转速；
- (3) 磁通减弱为 $90\% \Phi_N$ 时的稳态转速。

解

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 41.1 \times 0.4}{1500} = 0.136$$

(1) 因为负载转矩不变，磁通不变，所以 I_a 不变。

$$n = \frac{U_N - (R_a + R_s) I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{220 - (0.4 + 1.65) \times 41.1}{0.136} = 998 \text{ r/min}$$

(2) 因为负载转矩不变，磁通不变，所以 I_a 不变

$$n = \frac{U - R_a I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{110 - 0.4 \times 41.1}{0.136} = 688 \text{ r/min}$$

(3) 因为 $T_e = C_T \Phi_N I_a = C_T \Phi' I'$, I' = 常数，所以

$$I'_a = \frac{\Phi_N}{\Phi'} I_a = \frac{1}{0.9} \times 41.1 = 45.7 \text{ A} > I_N$$

即弱磁调速时，若负载转矩不变且等于额定转矩，则弱磁调速后电枢电流将超过额定电流，电动机过载。此时转速为

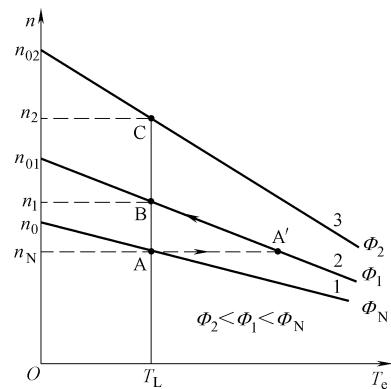


图 4-30 弱磁调速

$$n = \frac{U_N - R_a I'_a}{C_e \Phi'} = \frac{220 - 0.4 \times 45.7}{0.9 \times 0.136} = 1648 \text{ r/min}$$

例2 某台他励直流电动机，额定功率 $P_N = 22 \text{ kW}$ ，额定电压 $U_N = 220 \text{ V}$ ，额定电流 $I_N = 115 \text{ A}$ ，额定转速 $n_N = 1500 \text{ 转/分钟}$ ，电枢回路总电阻 $R_a = 0.1 \Omega$ ，在不计空载转矩 T_0 ，电动带额定负载的情况下，要求把转速调到 1000 r/min ，试计算：

- (1) 采用电枢串电阻调速方法需要串入多大的电阻？
- (2) 采用降压调速方法时需要把电源电压调至多少？
- (3) 求输入、输出功率是多少？
- (4) 采用弱磁调速方法能否实现？

解：(1) 电枢串入电阻值的计算方法：由 $E_a = U_N - I_N R_a = C_e \Phi n$ 知，

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139$$

理想空载转速

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.139} = 1582.7 \text{ r/min}$$

则

$$\Delta n_N = n_0 - n_N = 1582.7 - 1500 = 82.7 \text{ r/min}$$

电枢串入电阻后转速差为

$$\Delta n = n_0 - n = 1582.7 - 1000 = 582.7 \text{ r/min}$$

电枢串入的电阻为 R_{ad} ，由 $\frac{R_a + R_{ad}}{R_a} = \frac{\Delta n}{\Delta n_N}$ ，得

$$R_{ad} = \frac{\Delta n}{\Delta n_N} R_a - R_a = \frac{582.7}{82.7} \times 0.1 - 0.1 = 0.605 \Omega$$

(2) 降压后的理想空载转速

$$n_{01} = n + \Delta n_N = 1000 + 82.7 = 1082.7 \text{ r/min}$$

降压后电压为

$$U_1 = \frac{n_{01}}{n_0} U_N = \frac{1082.7}{1582.7} \times 220 = 150.5 \text{ V}$$

(3) 电动机输出转矩

$$T_2 = \frac{P_N}{n_N} = \frac{22}{1500} \times \frac{22}{1500} = 140.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

输出功率为

$$P_2 = T_2 \omega = \frac{2\pi n}{60} T_2 = \frac{2\pi}{60} \times 1000 \times 140.1 = 14.67 \text{ kW}$$

电枢串电阻调速时的输入功率

$$P_1 = U_N I_N = 220 \times 115 = 25.3 \text{ kW}$$

降低电源电压调速时的输入功率

$$P_1 = U_1 I_N = 150.5 \times 115 = 17.3 \text{ kW}$$

(4) 采用弱磁调速方法不能实现，因为弱磁调速只能在基速以上调速。

4.7.2 直流电动机的反转

直流电动机的转向是由电磁转矩的方向决定的，要使电动机反转，必须改变电磁转矩的

方向，而电磁转矩的方向是由磁通方向和电枢电流的方向决定的。因此要改变其转向，在控制时，直流电动机的反转实现方法有两种：

(1) 改变励磁电流方向。保持电枢两端电压极性不变，将励磁绕组反接，使励磁电流反向，磁通 Φ 即改变方向。

(2) 改变电枢电压极性。保持励磁绕组两端的电压极性不变，将电枢绕组反接，电枢电流即改变方向。

如果同时改变电枢电流和励磁电流的方向，则电动机的转向不会改变。

由于他励直流电动机的励磁绕组匝数多，电感大，励磁电流从正向额定值变到反向额定值的时间长，反向过程缓慢，而且在励磁绕组反接断开瞬间，绕组中将产生很大的自感电动势，可能造成绝缘击穿，所以实际应用中大多采用改变电枢电压极性的方法来实现电动机的反转。但在电动机容量很大，对反转速度变化要求不高的场合，为了减小控制电器的容量，可采用改变励磁绕组极性的方法实现电动机的反转。

4.8 直流电动机的制动

许多生产机械为了提高生产效率和产品质量，要求电动机能够迅速准确地停车或改变转向，为达到此目的，要对电动机进行制动。

生产机械的制动，可以用机械和电气两种基本方式来实现，通常将这两种方法配合使用。机械制动一般用抱闸的方法实现。电气制动方法制动转矩大，制动强度易于控制。以下重点分析直流电动机的电气制动方法、特性及使用特点。

根据电磁转矩 T_e 和转速 n 方向之间的关系，可以把电动机分为两种运行状态。当 T_e 与 n 同方向时，称为电动运行状态，简称电动状态；当 T_e 与 n 反方向时，称为制动运行状态，简称制动状态。根据运行电路和能量传递的不同特点，可分为能耗制动、反接制动和回馈制动三种方式。

4.8.1 能耗制动

能耗制动的方法是将正在运行中的电动机电枢两端从电源断开后，立即在转子两端接入一制动电阻 R_B ，进入制动运行，此时，电动机靠生产机械惯性力的拖动而发电，将生产机械储存的动能转换成电能，并消耗在电阻 $(R_a + R_B)$ 上，直到电动机停止转动为止，所以这种制动方式称为能耗制动，其原理如图 4-31 所示。

开关 S 接电源侧为电动状态运行，此时电枢电流 I_a 、电枢电动势 E_a 、转速 n 及电磁转矩 T_e 的方向如图 4-31 所示。当需要制动时，将开关 S 投向

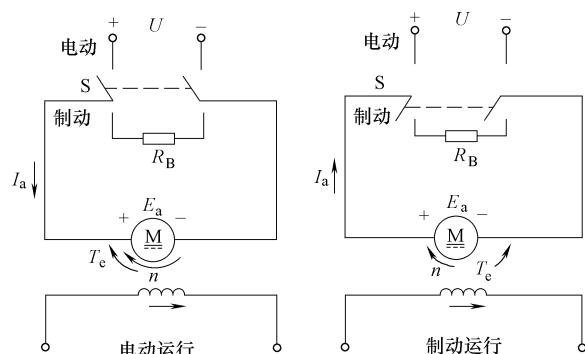


图 4-31 能耗制动原理

制动电阻 R_B 上，电动机便进入能耗制动状态。

因为磁通保持不变，初始制动时，电枢存在惯性，其转速 n 不能马上降为零，而是保持原来的方向旋转，于是 n 和 E_a 的方向均不改变。但是，由 E_a 在闭合的回路内产生的电枢电流 I_{ab} 却与电动状态时电枢电流 I_a 的方向相反，由此而产生的电磁转矩 T_{eb} 也与电动状态时 T_e 的方向相反，变为制动转矩，于是电动机处于制动运行。

能耗制动是在 $U=0$ 、 $\Phi=\Phi_N$ 、 $R=R_a+R_B$ 的前提条件下，机械特性方程为

$$n = -\frac{R_a + R_B}{C_e \Phi_n} I_a \quad \text{或}$$

$$n = -\frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi_N^2} T_e$$

能耗制动时 $U=0$ ，则 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} = 0$ ，即能耗制动的机械特性是一条过坐标原点的直线，斜率为 $\beta = \frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi^2}$ ，特性曲线如图 4-32 所示。

在特性曲线 A 点处，其 $n > 0$ ， $T_e > 0$ ， T_e 为驱动转矩。开始制动时，因 n 不能突变（能量不能突变），工作点将沿水平方向跃变到能耗制动特性曲线上的 B 点。在 B 点， $n > 0$ ， $T_e < 0$ ，电磁转矩转变为制动转矩，于是电动机开始减速，工作点沿 BO 方向移动。

若电动机拖动反抗性负载，则工作点到达 O 点时， $n=0$ ， $T_e=0$ ，电动机便停止。若电动机拖动位能性负载，则工作点到达 O 点时，虽然此时 $n=0$ ， $T_e=0$ ，但在位能负载的作用下，电动机将反向旋转并加速，工作点将沿特性曲线 OC 方向移动。此时 E_a 的方向随 n 的反向而反向，即 n 和 E_a 的方向均与电动状态时相反，而 E_a 产生的 I_a 方向却与电动状态时相同，随之 T_e 的方向也与电动状态时相同，即 $n < 0$ ， $T_e > 0$ ，电磁转矩仍为制动转矩。随着反向转速的增加，制动转矩也不断增大，当制动转矩与负载转矩平衡时，电动机便在某一转速下处于稳定的制动状态运行，即匀速下放重物，如图 4-32 中的 C 点，这时电动机处于制动运行状态。

能耗制动过程中，起始制动转矩的大小与外接制动电阻 R_B 的大小有关。外接制动电阻越大，制动转矩越小，制动过程越慢，时间越长，但电动机不易过热；反之，外接电阻越小，制动过程越快，但电动机易过热。电动机制动电阻的大小受其过载能力的限制，即应将制动瞬间的电流限制在允许范围内，一般按下式选择制动电阻：

$$R_B \geq \frac{E_a}{\lambda I_a} - R_a \geq \frac{E_a}{(2 \sim 2.5) I_N} - R_a \quad (\lambda \text{ 一般取 } 2 \sim 2.5)$$

式中 E_a ——制动瞬间的反电动势；

λ ——电动机的过载系数。

能耗制动的特点是线路操作简单、经济、安全，对于反抗性负载可实现准确停车，对于

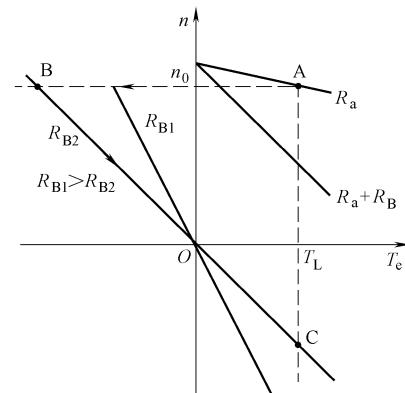


图 4-32 能耗制动机械特性

位能性负载可以稳定的速度下放重物。但随着转速的下降，电动势 E_a 减小，制动电流和制动转矩也随之减小，制动效果变差。若为了使电动机能更快地停转，可以在转速降到一定程度时切除一部分制动电阻，使制动转矩增大，从而加强制动作用。

4.8.2 反接制动

为了使生产机械快速停止或反向旋转，可以采用反接制动。有两种反接制动方法，一种是电压反接制动，一种是倒拉反接制动。

1. 电压反接制动（电枢反接制动）

电枢反接制动是通过把正在正向运行的电动机的电源电压突然反接来实现的。如图 4-33 所示。接触器 KM1 的触点闭合时，电动机电枢电流方向从左向右，处于电动运行状态。当进行反接制动时，接触器 KM2 的触点闭合，电枢电流方向从右向左，电枢电压反接，电动机处于制动状态。为限制过大的制动电流，串入限流电阻 R_z 。 R_z 的大小应使反接制动时电枢电流不超过电动机的最大允许电流 $I_{max} = (2 \sim 2.5)I_N$ ，因此应串入的制动电阻值为

$$R_z \geq \frac{U_N + E_a}{(2 \sim 2.5)I_N} - R_a$$

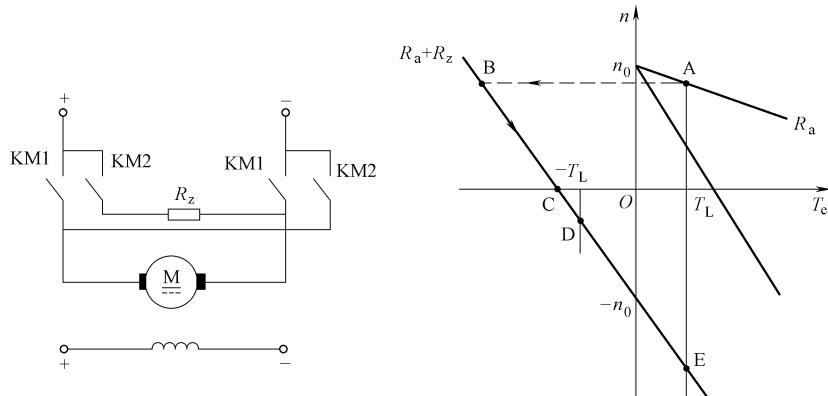


图 4-33 电压反接制动

电压反接制动时的机械特性就是在 $U = -U_N$, $\Phi = \Phi_N$, $R = R_a + R_B$ 条件下的一条人为特性，即

$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi_N^2} T_e$$

可见，其特性曲线是一条通过 $-n_0$ 点，斜率为 $\frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi_N^2} T_e$ 的直线 (BC)。

设电动机原来工作在固有特性上的 A 点，反接制动时，由于转速不能突变，工作点沿水平方向跃变到反接制动机械特性上的 B 点，之后在制动转矩作用下，转速开始下降，工作点沿 BC 方向移动，当到达 C 点时，制动过程结束。在 C 点， $n = 0$ ，但制动的电磁转矩 $T_{eB} \neq 0$ ，根据负载性质的不同，此后工作点的变化又分为两种情况。

(1) 电动机拖动反抗性负载，当 C 点处的电磁转矩大于负载转矩时，若为了制动停车，在电动机转速接近于零时必须立即断开电源，否则电动机将在反向电磁转矩的作用下反向起

动，并一直加速到D点，进入反向电动状态下稳定运行。

(2) 若电动机拖动位能性负载，则过C点以后电动机将反向加速，一直到达E点，即电动机最终进入回馈制动（后面将要介绍）状态下稳定运行。

反接制动过程中，从电源输入的电功率和从轴上输入的机械功率转变成的电功率全部消耗在电枢回路的电阻($R_a + R_z$)上，其能量损耗是很大的。

2. 倒拉反转反接制动

倒拉反转反接制动只适用于位能性恒转矩负载，现以起重机下放重物为例来说明，如图4-34所示。正向电动状态（提升重物）时，电动机工作在固有机械特性上的A点。如果在电枢回路中串入一个较大的电阻 R_B ，便可实现倒拉反转反接制动。串入 R_B 将得到一条斜率较大的人为机械特性曲线，如图中的直线 n_0D 所示。串电阻瞬间，因转速不能突变，所以工作点由固有机械特性上的A点沿水平方向跳跃到人为机械特性曲线上的B点，此时电磁转矩 T_B 小于负载转矩 T_L ，于是电动机开始减速，工作点沿人为机械特性曲线由B点向C点变化。到达C点时， $n=0$ ，电磁转矩为堵转转矩 T_k ，因 T_k 仍小于负载转矩 T_L ，所以在重物的重力作用下电动机将反向旋转，即下放重物。

因为励磁不变，所以 E_a 随n的反向而改变方向，由图中可以看出 I_a 的方向不变，故 T_e 的方向也不变。这样，电动机反转后，电磁转矩为制动转矩，电动机处于制动状态，运行在图中的CD段。随着电动机反向转速的增加， E_a 增大，电枢电流 I_a 和制动的电磁转矩 T_e 也相应增大。当到达D点时，电磁转矩与负载转矩平衡，电动机便以稳定的转速匀速下放重物。电机串入的电阻 R_B 越大，则最后稳定的转速越高，下放重物的速度也越快，对应于给定下放速度 n_D ，所串入的电阻 R_B 的大小为

$$R_B = \frac{U_N + E_{aD}}{I_L} - R_a$$

式中 E_{aD} ——电动机下放速度为 n_D 时的反电动势， $E_{aD} = C_e \Phi_N n_D$

4.8.3 回馈制动

电动状态下运行的电动机，在某些情况下（如电动车下坡时）会出现运行转速高于理想空载转速的情况，此时 $E_a > U_a$ ，电枢电流 I_a 反向，电磁转矩 T_e 方向也发生改变，由动力矩变成制动矩，电磁转矩方向与转向相反。电动机处于发电状态，将机械能回馈给电网，故称为回馈制动（再生发电制动）状态，如图4-35所示。

1. 正向回馈制动

当电动车下坡时，会在重力作用下加速运行，运行转速可能超过理想空载转速而进入第二象限运行，如图中的A点所示。这时电动机处于正向回馈制动状态下稳定运行，如降低电枢电压的调速过程中，将在转速改变的瞬态发生回馈制动。

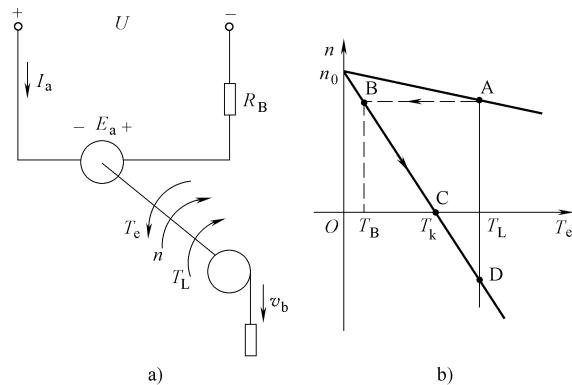


图4-34 倒拉反转反接制动机械特性

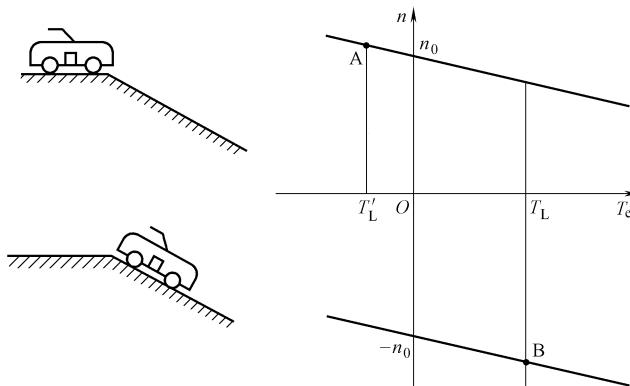


图 4-35 回馈制动的机械特性

2. 反向回馈制动

当电压反接制动时，若电动机拖动位能性负载，则电动机经过制动减速、反向电动加速，最后在重物的重力作用下，工作点将通过 $-n_0$ 点进入第四象限，出现运行转速超过理想空载转速的反向回馈制动状态。当到达E点时，制动的电磁转矩与重物作用力相平衡，电力拖动系统便在回馈制动状态下稳定运行，即重物匀速下降。若使重物下降的速度低一些，通常可在回馈制动后将电枢回路串联电阻全部切除，如图4-35中的B点所示。

回馈制动时，由于有功率回馈到电网，因而与能耗制动和反接制动相比，回馈制动是比较经济的。

4.8.4 电动机的四象限运行

从前面的分析可知，电动机的运行有电动和制动两种状态，这两种状态的机械特性曲线分布在 T_e-n 坐标平面上的四个象限内，这就是所谓的电动机的四象限运行，如图4-36所示。

在第一、三象限内， T_e 与 n_0 同方向，为电动状态。其中，在第一象限内， $n > 0$, $T_{em} > 0$ ，为正向电动状态；在第三象限内， $n < 0$, $T_e < 0$ ，为反向电动状态。

在第二、四象限内， T_e 与 n_0 反方向，为制动状态。其中，在第二象限内， $n > 0$, $T_e < 0$ ，对于能耗制动和反接制动来说，是对正向运行的电动机进行制动的减速过程；对于回馈制动来说，是正向运行的电动机处于减速过程或是处于稳定的回馈制动运行。在第四象限内， $n < 0$, $T_e > 0$ ，在下放位能负载时会出现这一情况。在第四象限内的工作点C、D、E等均是稳定制动运行工作点，此时位能性负载是匀速下降的。

例：一台他励直流电动机数据为 $P_N = 22\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 115\text{A}$, $n_N = 1500\text{r/min}$, $R_a = 0.1\Omega$ ，电枢电流最大允许值为 $2I_N$ 。若电动机运行于正向电动状态时， $T_L = 0.9T_N$ ，忽略空载转矩，求：

(1) 为使反抗性负载在额定状态下进行能耗制动，求电枢回路应串入的制动电阻值，

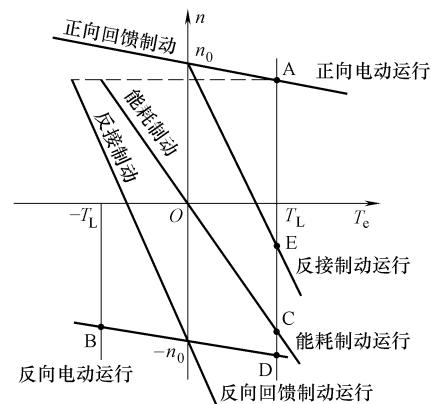


图 4-36 电动机的各种运行状态

若采用反接制动制动电阻 R_b 又应是多大？

(2) 用此电动机拖动起重机，传动机构的转矩损耗为 $\Delta T = 0.1 T_N$ ，在能耗制动下以 $-200\text{r}/\text{min}$ 的转速下放重物，求电枢回路应串入的制动电阻值 R_b 。

解：基本数据计算：

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139 \text{V}/(\text{r} \cdot \text{min})$$

电动机正向运转时的负载转矩及负载电流为

$$\begin{aligned} T_L &= 0.9 T_N \\ I_L &= 0.9 I_N = 103.5 \text{A} (\Phi = \Phi_N) \end{aligned}$$

原工作点转速

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} I_L = \frac{220}{0.139} - \frac{0.1}{0.139} \times 0.9 \times 115 = 1508.3 \text{r}/\text{min}$$

原工作点反电动势

$$E_a = C_e \Phi_N n = 0.139 \times 1508.3 = 209.7 \text{V}$$

(1) 能耗制动时串入的电阻

$$R_b = \frac{E_a}{I_{amax}} - R_a = \frac{209.7}{2 \times 115} - 0.1 = 0.812 \Omega$$

反接制动时串入的电阻

$$R_b = \frac{U_N + E_a}{I_{amax}} - R_a = \frac{220 + 209.7}{2 \times 115} - 0.1 = 1.768 \Omega$$

(2) 位能性负载时，传动机构的转矩损耗为 $\Delta T = 0.1 T_N$ ，采用能耗制动以 $-200\text{r}/\text{min}$ 的转速下放重物，下放时的负载转矩及负载电流

$$\begin{aligned} T_{L1} &= T_L - 2\Delta T = 0.9 T_N - 2 \times 0.1 T_N = 0.7 T_N \\ I_{L1} &= 0.1 I_N = 0.7 \times 115 \text{A} = 80.5 \text{A} (\Phi = \Phi_N) \end{aligned}$$

电枢回路串入的电阻

$$R_b = \frac{-E_{a1}}{I_{L1}} - R_a = \frac{-C_e \Phi_N n_1}{I_{L1}} - R_a = \frac{-0.139 \times (-200)}{80.5} - 0.1 = 0.245 \Omega$$

4.9 直流电动机的综合应用实例

综上几节所学知识，可以设计出以下一个电路（见图 4-37），在这个电路中，要求实现下述功能：

- (1) 改变电枢电压调速功能；
- (2) 弱磁调速功能；
- (3) 能耗制动功能；
- (4) 改变电枢电压方向或者改变励磁电流方向实现电动机正反转的功能。

1. 正反转控制功能

在这个电路中既可以通过改变励磁电流的方向来改变电动机的旋转方向，又可以通过改变电枢电压的方向来改变电动机的旋转方向。

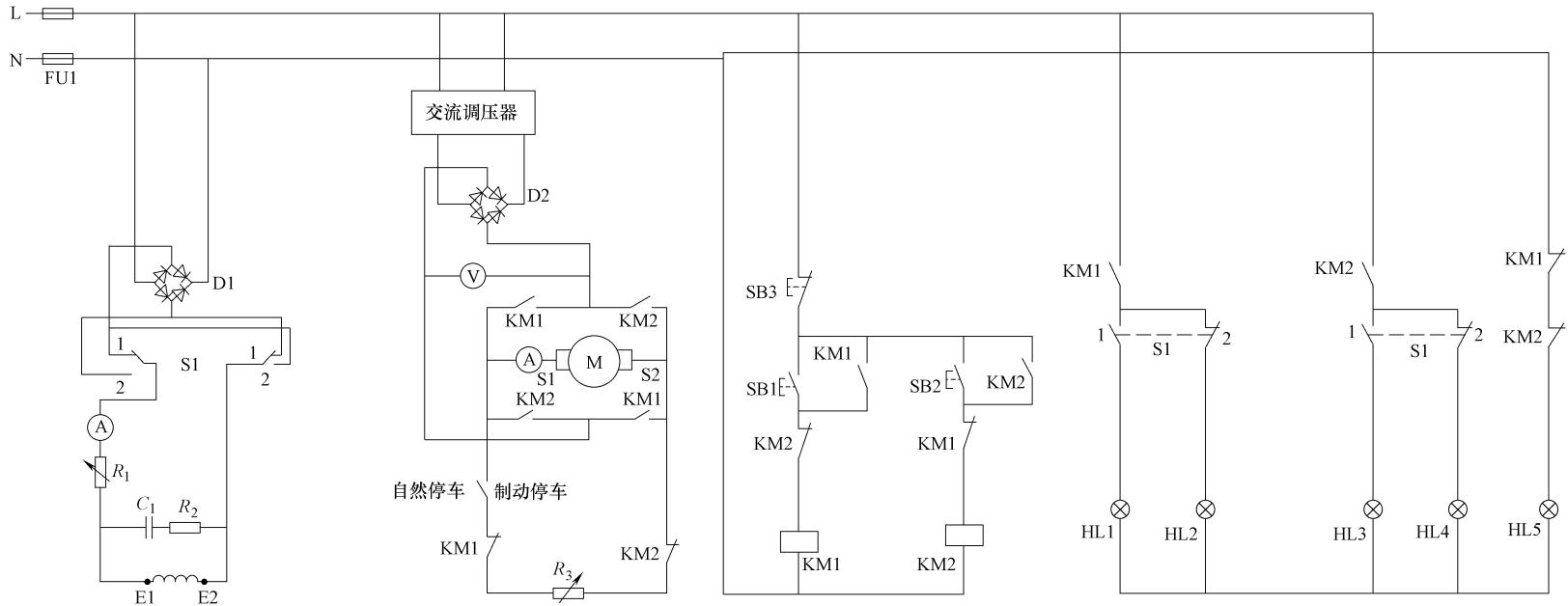


图 4-37 直流电动机实验

(1) 改变电枢电压方向来改变电动机旋转方向。

把开关 S1 扳向位置 1，此时励磁绕组电流的方向由 E1→E2，按下起动按钮 SB1（或 SB2），则接触器 KM1（或 KM2）吸合，电枢电流由 S2→S1（S1→S2），电动机正转（反转）。

(2) 改变励磁电流的方向来改变电动机旋转方向。

把开关 S1 扳向位置 1，此时励磁绕组电流的方向由 E1→E2，按下起动按钮 SB1，则接触器 KM1 吸合，电枢电流由 S2→S1，电动机正转。

若在开始时把开关 S1 扳向位置 2，此时励磁绕组电流的方向由 E2→E1，按下起动按钮 SB1，则接触器 KM1 吸合，电枢电流由 S2→S1，电动机反转。

2. 能耗制动分析

在本图中，开关 S2 扳至位置 1 时，电动机实现自然停车。当需制动停车时，把 S2 扳至位置 2，此时电枢绕组切断电流后与电位器 R_3 接通。由于惯性，电枢继续按原方向运转，而励磁绕组仍接在电流上，仍产生磁通，电枢绕组切割磁力线产生感应电动势 E ， E 加在 R_3 上形成电流，此时电动机就变成了发电机，此电流方向可由右手定则判定，再由左手定则可知电枢绕组的受力方向与转向相反，起制动作用。当转速 n 为零时，电动势 E 和电枢电流为零，制动转矩消失。

在制动中，制动电阻越大，则电枢电流越小，制动转矩越小，制动过程就越缓慢，但电动机不会过热。反之，制动电阻越小，则电枢电流越大，制动转矩越大，制动过程就越快，但其制动电流要限制在电动机最大允许电流之内。制动过程的快慢可以通过调整 R_3 阻值的大小进行观察。

本 章 小 结

直流电机是一种通过磁场的耦合作用来实现直流电能与机械能相互转换的一种旋转式机械。其能量转换是可逆的，同一台电机既可以作为发电机使用，又可以作为电动机使用。直流电机由定子和转子构成，定子的作用是建立主磁场的机械支撑，转子的作用是通过转子绕组产生电磁转矩和感应电动势，实现能量转换。

直流电动机的励磁方式有他励、并励、串励、复励；起动方式有直接起动、减压起动、转子回路串电阻起动；调速方式有转子串电阻调速、调压调速、弱磁调速；制动方式有机械制动和电气制动两种，其中电气制动方法有能耗制动、反接制动、回馈制动。

直流电动机在起动时，由于其本身的电阻 R_a 很小，因而直接起动会有很大的起动电流，一般情况下不允许直接起动。

直流电动机的转向由电磁转矩 T 的方向决定，电磁转矩的方向由电枢电压的励磁电压的方向决定，只要改变两者之一，电动机的转向就会发生改变。

习 题

一、填空题

- 当电动机的转速在_____情况时，会出现回馈制动。
- 直流电机的电磁转矩与电枢电流成_____。
- 在电枢回路中串电阻调速，理想空载转速____，特性的____增大。

4. 直流电动机降压调速，理想空载转速_____，特性的_____不变。
5. 直流电动机弱磁调速，理想空载转速_____，特性的_____变软。
6. 改变直流他励电动机的转向，可采用_____和_____的方法。
7. 直流电机按主磁极励磁绕组的接法不同，可分为_____、_____、_____和_____四种。
8. 直流电动机的调速方法有改变_____调速、改变_____调速和改变电枢电压调速等三种。
9. 直流电动机常用的电气制动方法有_____制动、_____制动和_____制动。
10. 直流电机的电枢电动势公式_____，电磁转矩公式_____。

二、判断题

1. 直流电机的换向极主要是改善电机的换向。()
2. 直流电机的电枢绕组是电机进行机电能量转换的主要部件。()
3. 一台直流电机可以运行在发电机状态，也可以运行在电动机状态。()
4. 直流电动机在负载运行时，可以将励磁回路断开。()
5. 直流电动机调节励磁回路中的电阻值，电动机的转速将升高。()
6. 不论是在直流发电机还是在直流电动机中，电磁转矩的方向总是和电机的旋转方向一致。()
7. 改变励磁回路电阻调速法可自由增大或减小转速，是一种应用范围非常广的调速方法。()
8. 为了减小电动机起动时的起动电流对电动机产生的危害，必须尽量减小电动机的起动电流。()
9. 直流他励电动机利用电枢回路中串电阻起动，当改变电枢回路电阻时，电动机会从一条特性曲线跳到另外一条曲线，电动机的转速也会突变。()
10. 直流他励电动机利用电枢回路中串电阻调速属于有级调速。()
11. 直流他励电动机利用电枢回路中串电阻调速，若串入较大的电阻特性曲线的硬度会变软。()
12. 直流他励电动机进入回馈制动状态时，电动机的实际转速值高于其理想空载转速值的前提条件是必须有外部的负载转矩为其提供能量。()
13. 直流他励电动机进入回馈制动状态时，用于高速下放重物，能够将重物产生的位能变成电能回馈到电网中去。()

三、选择题

1. 一台直流发电机，额定功率22kW，额定电压230V，额定电流是()A。
A. 100 B. 95.6 C. 94.6 D. 200
2. 直流电动机直接起动时的起动电流是额定电流的()倍。
A. 4~7 B. 1~2 C. 10~20 D. 20~30
3. 他励直流电动机改变电枢电压调速时，其特点是()。
A. 理想空载转速不变，特性曲线变软
B. 理想空载转速变化，特性曲线变软
C. 理想空载转速变化，特性曲线斜率不变

- D. 理想空载转速不变，特性曲线斜率不变
4. 电动机的额定功率是指（ ）。
- A. 输出的机械功率 B. 输入的机械功率
- C. 输入的电功率 D. 输出的电功率
5. 电机拖动负载顺时针恒速运行时，负载转矩为顺时针方向，若电动机电磁转矩突然改变方向，该电机运行情况为（ ）。
- A. 原来运行于电动状态，电磁转矩改变方向后将加速
- B. 原来运行于电动状态，电磁转矩改变方向后将减速
- C. 原来运行于电动状态，电磁转矩改变方向后将恒速运行
- D. 原来运行于制动状态，电磁转矩改变方向后将加速
- E. 原来运行于制动状态，电磁转矩改变方向后将减速
6. 直流他励电动机能耗制动，在电枢回路中串入了较大的电阻，特性的倾斜程度比固有特性（ ）。
- A. 增加 C. 不变 D. 无法确定
7. 直流他励电动机能耗制动运行其特性曲线为一条（ ）的直线。
- A. 经过零点且位于第一和第三象限 B. 经过零点且位于第二和第四象限
- C. 不经过零点且位于第一和第三象限 D. 不经过零点且位于第二和第四象限
8. 直流他励电动机利用降低电源电压调速，恒转矩负载，降低电源电压电动机转速会（ ）。
- A. 升高 B. 降低 C. 不变
9. 直流他励电动机利用弱磁调速，恒转矩负载，减小磁极的磁通，电动机的特性曲线的理想空载转速会（ ）。
- A. 升高 B. 降低 C. 不变
10. 他励电动机电枢回路中的电压改变，电动机的特性曲线为（ ）。
- A. 一组平行线 B. 一组放射线 C. 一组交叉线

四、简答题

1. 为什么直流电机需要安装换向极？
2. 如何判别一台直流电动机是电动状态还是制动状态？
3. 他励直流电动机常用的调速及制动方法有哪些？

五、计算题

$U_N = 220V$, $I_N = 60A$, $R_a = 0.2\Omega$ 的他励直流电动机。

- (1) 如直接起动，起动电流 I_S 是多少？
- (2) 若要求起动电流是额定电流的 1.5 倍，采用电枢回路串电阻起动，应串多大的电阻？采用降低电源电压起动，电压应降至多少？



第5章 特种电机

学习目标

- 掌握伺服电动机、测速发电机、步进电动机、直线电机等特种电机的结构、性能和工作原理。
- 了解特种电机在生产领域中的实际应用。

前面介绍的直流电机、变压器、异步电动机统称为普通电机。在生产实际中还广泛使用着各种特殊结构和特殊用途的电机，称为特种电机。由于特种电机大都用于控制系统中，且功率较小，所以又称为控制电机。从本质上讲，特种电机的基本理论和分析方法与普通电机是一致的，但由于特种电机与常规的旋转电机用途不同，性能指标不一样，因此又有其特殊性。特种电机在雷达的扫描跟踪、船舶方位控制、飞机自动驾驶、轧钢控制、工业机器人控制、遥测遥控、自动化仪表等自动控制系统中得到广泛的应用。

本部分主要介绍目前基本理论业已成熟，同时又应用比较广泛的特种电机。特种电机可以分为驱动用特种电机和控制用特种电机两大类，前者主要用来驱动各种机构、仪表以及家用电器等；后者是在自动控制系统中传递、变换和执行控制信号的小功率电机的总称，用做执行元件或信号元件。控制用的特种电机分为测量元件类和执行元件类。

1. 测量元件类

作为自动控制系统中的敏感控制元件和校正元件。测量元件包括旋转变压器，交、直流测速发电机等；在自动控制系统中一般作为敏感控制元件和校正元件。对信号元件的要求是输出信号能够严格对应输入信号，如测速发电机把转速信号转换成电信号，它的输出电压与转速成正比对应关系。

2. 执行元件类

将电信号转换成位移、速度，带动控制对象运动。执行元件主要有交、直流伺服电动机，步进电动机等，它们的任务是将电信号转换成轴上的角位移或角速度及直线位移和线速度，并使控制对象运动。

5.1 步进电动机

普通电动机是连续运转的。步进电动机是在外加电脉冲信号的作用下一步一步地运转的，正因为它的运动形成是步进式的，故称为步进电动机。步进电动机是一种将电脉冲信号转换成相应角位移的机电元件，其控制特性如图 5-1 所示。

由于步进电动机的角位移量和输入脉冲的个数严格成正比，在时间上与输入脉冲同步，因此只要控制输入脉冲的数量、频率及电机绕组通电顺序，便可获得所需的转角、转速及转

动方向。无脉冲输入时，在绕组电源的激励下，气隙磁场使转子保持原有定位状态。步进电动机具有独特的优点，作为伺服电动机应用于控制系统时，往往可以使系统简化、工作可靠，而且能获得较高的控制精度，因而成为经济型数控系统一种主要的伺服驱动元件。

5.1.1 步进电动机的工作原理

1. 反应式步进电动机的工作原理

图 5-2 是步进电动机的工作原理图。该图是反应式步进电动机的简易模型。在电动机定子上有 A、B、C 三对磁极，磁极上绕有线圈，分别称之为 A 相、B 相和 C 相，而转子则是带齿的铁心，这种步进电动机称为三相步进电动机。步进电动机的工作原理相似于电磁铁作用原理。当某相绕组通电时，定子产生磁场，并与转子形成磁路，如果这时定子齿和转子齿没有对齐，则由于磁力线力图走磁阻最小的路线，而带动转子转动，使定子齿和转子齿对齐，从而实现转动一个角度。

在图中，若首先让 A 相通电，则转子 1、3 两齿被磁极 A 吸住，转子就停留在图 5-2a 的位置上。

然后，A 相断电，B 相通电，则磁极 A 的磁场消失，磁极 B 的磁场产生，磁极 B 的磁场把离它最近的 2、4 齿吸了过去，转子逆时针转过 30° ，停在图 5-2b 的位置上。

接着，B 相断电，C 相通电，C 相磁场吸引 1、3 齿，转子又逆时针转了 30° ，停止在图 5-2c 的位置上。

这样按 A—B—C—A—B—C 的次序通电，步进电动机就一步一步地按逆时针方向转动，每步转的角度均为 30° ，我们把步进电动机每步转过的角度称为步距角。

如果通电相序改为 A—C—B—A—C—B，步进电机将按顺时针方向旋转。

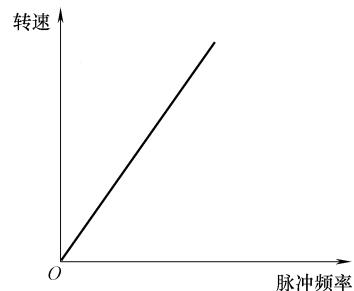


图 5-1 步进电动机的控制特性

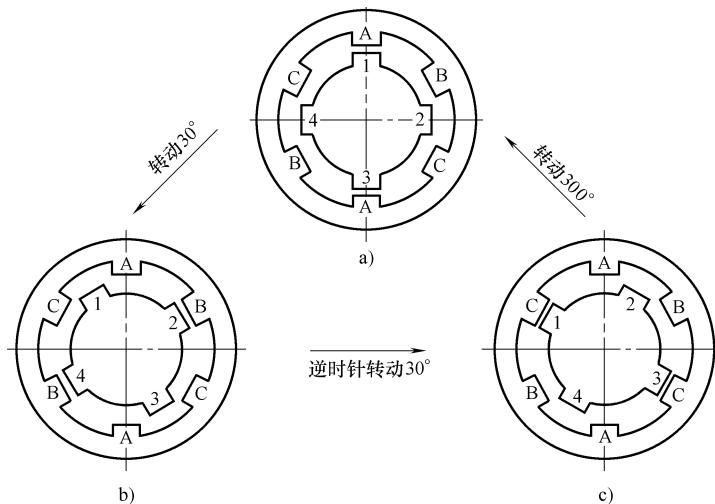


图 5-2 步进电动机工作原理图

2. 步进电动机的通电方式及步距角

步进电动机每一步所转过的角度称为步距角，用 θ_s 表示。步距角的大小与定子相数 m ，

转子齿数 z 及通电方式有关。

(1) 步进电动机有单相轮流通电、双向轮流通电、单双相轮流通电几种通电方式。以三相步进电动机为例，它的通电方式如下：

1) 三相单三拍。其通电顺序为 A—B—C—A。“三相”是指三相步进电动机，“单”是指每次只有一相绕组通电，“三拍”是指三种通电状态为一个循环。这种方式每次只有一相通电，运行不稳定，很少采用。切换瞬间，转子失去自锁能力，容易失步（即转子转动步数与拍数不相等），在平衡位置也容易产生振荡摇摆。

2) 双相双三拍。其通电顺序为 AB—BC—CA—AB

这种通电方式由于两相同时通电，转子受到的感应力矩大，静态误差小，定位精度高，而且转换时始终有一相通电，可以稳定工作，不易失步。

3) 三相六拍。其通电顺序为 A—AB—B—BC—C—CA—A

这是单、双相轮流通电的方式，它具有双一拍的特点，且由于通电状态数增加一倍，而使步距角减少一半。

(2) 步距角的计算公式

$$\theta_z = \frac{360^\circ}{Nz} = \frac{360^\circ}{mkz}$$

式中 m ——步进电动机相数；

z ——步进电动机转子齿数；

k ——通电方式， $k = N/m$ (N 为运行拍数)。

步进电动机的转速取决于脉冲频率，频率越高，转速越高。

$$n = \frac{\theta_z f}{2\pi} \times 60$$

式中 θ_z ——步距角 (rad)；

f ——脉冲频率。

5.1.2 步进电动机的分类

(1) 步进电动机按工作原理不同可分为：

1) 激磁式。电动机定子转子均有绕组，靠电磁力矩使转子转动。

2) 反应式。转子无绕组，定、转子开小齿，定子绕组励磁后产生反作用力矩，使转子转动。这是目前我国主要发展的类型，已于 20 世纪 70 年代末形成完整的系列，有较好的技术性能指标。

3) 混合式（即永磁感应子式）。它与反应式的主要区别是转子上置有磁钢。反应式电动机转子无磁钢，输出能量全靠定子励磁电流供给，静态电流比永磁式大许多。永磁感应子式具有驱动电流小、效率高、过载能力强等优点，是一种很有发展前途的步进电动机。

(2) 按输出转矩大小可分为：

1) 快速步进电动机。输出转矩一般为 $0.07 \sim 4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。可控制小型精密机床的工作台（例如线切割机床）。

2) 功率步进电动机。输出转矩一般为 $5 \sim 4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。可直接驱动机床移动部件。

(3) 按励磁相数可分为三相、四相、五相、六相等。相数越多步距角越小，但结构越复杂。

5.1.3 步进电动机的主要技术指标与型号说明

1. 主要技术指标

(1) 精度。通常指的是最大步距误差和最大累积误差，步距误差是空载运行一步，实际转角的稳定值的理论值之差的最大值。累积误差是指，从任意位置开始，经过任意步后，在此之间，角位移误差的最大值。从使用的角度看，对多数情况来说，用累积误差来衡量精度比较方便。

由于步进电动机转过一圈后，转子的运动有重复性，误差不累积，所以精度的定义，可以认为是在一圈范围内，任一步之间转子角位移误差的最大值。

(2) 最大静转矩 $M_{j\max}$ 。所谓静态是指步进电动机的通电状态不变，转子保持不动的定位状态。静转矩指步进电动机处于定位状态下的电磁转矩，它是绕组内电流和失调角的函数。失调角的概念是，在定位状态下，如果在转子轴上加上一个负载转矩使转子转过一个角度 θ 并能稳定下来，这时转子上受到的电磁转矩与负载转矩相等，该电磁转矩即静转矩，角度 θ 称为失调角。

对于某失调角时，静转矩最大，则称之为最大静转矩 $M_{j\max}$ 。一般来说 $M_{j\max}$ 大的电动机，负载转矩也大。

(3) 起动频率 f_q 。空载时，转子从静止状态不失步地起动的最大控制频率称为起动频率或突跳频率，用 f_q 表示。 f_q 的大小与驱动电路和负载大小有关，负载包含负载转矩和负载转动惯量两方面的含义。步距角越小，负载越小，则起动频率越高。

(4) 连续运行频率 f_c 。当矩频特性运行频率连续上升时，电动机不失步运行的最高频率称为连续运行频率 f_c ，它的值也与负载有关。很显然，在同样负载下，运行频率 f_c 远大于起动频率 f_q 。在连续运行状态下，步进电动机的电磁力矩将随频率的升高而急剧下降，这两者之间的关系称为矩频特性。图 5-3 是某步进电动机的矩频特性。

2. 型号说明

步进电动机的型号说明如下所示。

110	BYG	5	50	B-SA	K	R	M	T-030	1	设计代码		
										相电流	030: 3A	040:4A
										接线形式	T:端子	A:航空插头
										尺寸制式	M:公制	B:英制
										机壳形状	R:圆形	S:方形
										轴键形式	H:半圆键	S:光轴
										轴伸长度	A:标准	B:加长
										轴伸形式	S:单	B:双
										机身长度		
										转子齿数	50:50齿	200:200齿
										相数	5:五相	
										结构形式	BYG:混合式	
										机座号		

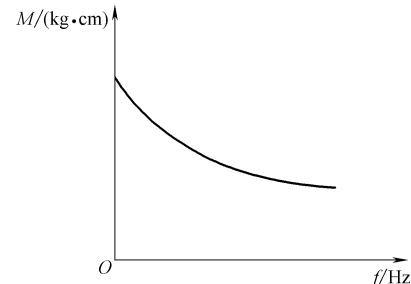


图 5-3 矩频特性

5.1.4 步进电动机的驱动电源

步进电动机绕组是按一定通电方式工作的，为实现这种轮流通电，需要专门的控制电源对其进行供电。

1. 对驱动电源的基本要求

(1) 驱动电源的相数、通电方式、电压和电流都应满足步进电动机的控制要求。

(2) 驱动电源要满足起动频率和运行频率的要求，能在较宽的频率范围内实现对步进电动机的控制。

(3) 能抑制步进电动机振荡。

(4) 工作可靠，对工业现场的各种干扰有较强的抑制作用。

2. 步进电动机控制电源的组成

一般由脉冲信号发生电路、脉冲分配电路、功率放大电路等部分组成。

脉冲信号发生电路产生基准频率信号供给脉冲分配电路，脉冲分配电路完成步进电动机控制的各相脉冲信号，功率放大电路对脉冲分配回路输出的控制信号进行放大，驱动步进电动机的各相绕组，使步进电动机转动。

脉冲分配器有多种形式，早期的有环形分配器，现在逐步被单片机取代。

功率放大电路有单电压、双电压、斩波型、调频调压型、细分型等多种形式。近年来出现将控制信号形成和功率放大电路为一体的集成控制电源。

3. SH-22206 型驱动器应用实例（外形见图 5-4）

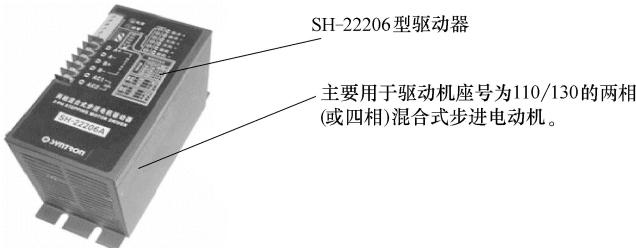


图 5-4 SH-22206 型驱动器外形

SH-22206 型驱动器与步进电动机的接线如图 5-5 所示。

SH-22206 型驱动器的电气性能指标见下表（环境温度 25℃）。

SH-22206 型驱动器的电气性能指标

供电电源	单相 80 ~ 260V AC (典型值 220V AC), 50Hz, 容量 1kV · A
输出电流	有效值最大 6A/相 (可由面板电位器调整)
驱动方式	恒相流 PWM 控制
励磁方式	整步二相四拍/半步二相八拍 (由面板开关选择)
绝缘电阻	常温常压下 > 500MΩ
绝缘强度	常温常压下 1.5kV, 1min

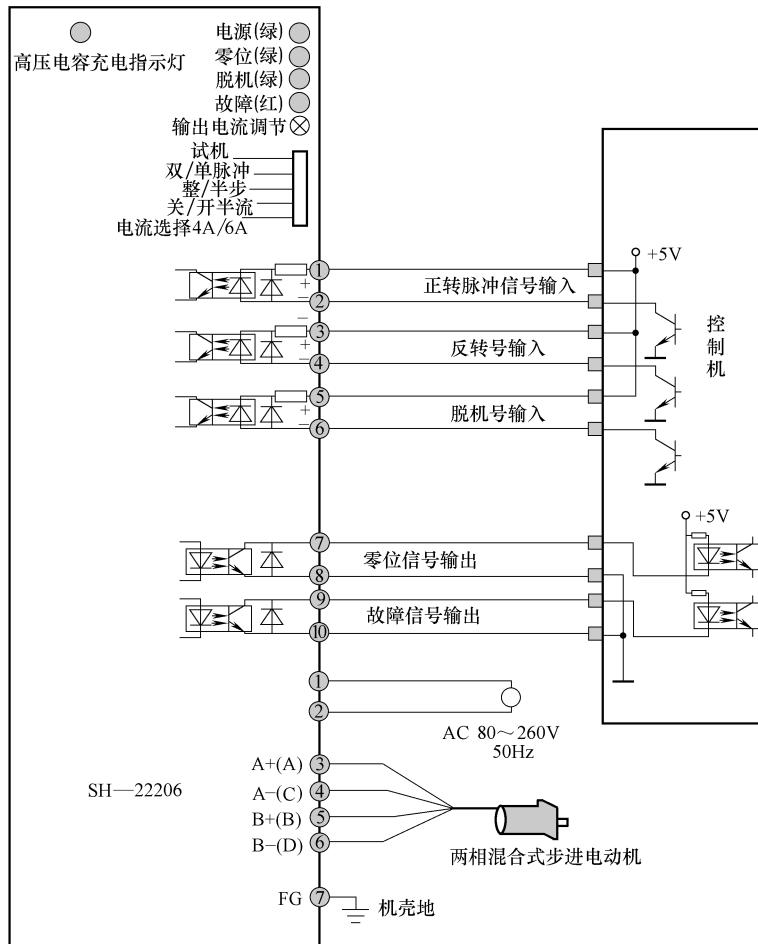


图 5-5 SH-22206 型驱动器与步进电动机的接线图

5.2 测速发电机

测速发电机是一种输出电动势与转速成比例的特种电机。测速发电机的绕组和磁路经过精确设计，其输出电动势 E 和转速 n 呈线性关系，即 $E = Kn$ ， K 是常数。改变旋转方向时输出电动势的极性即相应改变。在被测机构与测速发电机同轴连接时，只要检测出输出电动势，就能获得被测机构的转速，即能将输入的机械信号转换为电压信号输出，故又称速度传感器，输出电压与转速的关系如图 5-6 所示。

为了保证电机性能可靠，实际应用中对测速发电机主要有以下几个方面的要求：

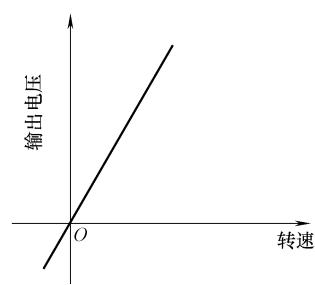


图 5-6 测速发电机的输出特性

- (1) 线性度要好，输出电压要和转速成正比，转速的测量不影响被测系统的转速。
- (2) 测速发电机的转动惯量要小，以保证测速的快速性，即响应要快。
- (3) 灵敏度要高，即输出特性的斜率要大，较小的转速变化能够引起输出电压的变化。
- (4) 正、反转两个方向的输出特性要对称。
- (5) 对温度敏感低等特点。

测速发电机广泛用于各种速度或位置控制系统。在自动控制系统中作为检测速度的元件，以调节电动机转速或通过反馈来提高系统稳定性和精度；在装置中可作为微分、积分元件，也可作加速或延迟信号用，或用来测量各种运动机械在摆动、转动以及直线运动时的速度。测速发电机根据输出信号的不同分为直流和交流两种。此外，直流测速发电机要求在一定转速下输出电压交流分量小，无线电干扰小；交流测速发电机要求在工作转速变化范围内输出电压相位变化小。

5.2.1 直流测速发电机的工作原理

直流测速发电机实际上是微型直流发电机，根据励磁方式分为永磁式和电磁式两种。常用的是永磁式测速发电机，因为它结构简单，省去励磁，便于使用，并且温度变化对励磁磁通的影响较小，但永磁材料较贵。电磁式测速发电机工作时励磁绕组发热会引起励磁绕组电阻的变化，从而引起励磁电流的变化，会造成一定的测量误差。

直流电流 I_f 在气隙中建立恒定磁场 Φ 。当被测对象以转速 n 旋转时，测速发电机的电枢也同速旋转（见图 5-7），电枢绕组切割气隙中的 Φ ，产生感应电动势 E_a 。

输出电压与转速之间的关系为

$$U_0 = \frac{E_a}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = \frac{C_e \Phi}{1 + \frac{R_a}{R_L}} n = Cn$$

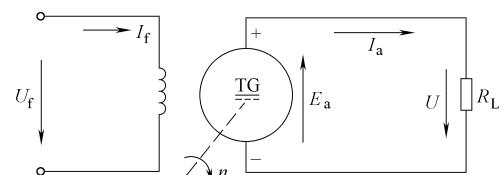


图 5-7 直流测速发电机原理图

直流测速发电机的工作特性，即输出电压与转速之间的关系称为输出特性，如图 5-8 所示， R_L 为负载电阻，测速发电机的输出特性斜率为 C 。

实际测速发电机的输出电压与转速间并不是严格的正比关系，会产生一些误差。

产生误差的原因有以下几点

(1) 电枢反应。由于电枢反应，使得主磁通随负载的电流变化，特性曲线下弯，如图 5-8 中所示的 R_1 、 R_2 曲线。

解决办法除了在结构上采取措施外，应尽量增加负载电阻，减小负载电流对电枢反应的影响，还可以提高测速发电机的灵敏度，即增大斜率。

(2) 电刷接触电阻。电刷和换向器之间存在接触电阻，将会分得一部分电压，从而使输出电压处出现死区，并且接触电阻的变化与转速的变化呈现非线性关系。

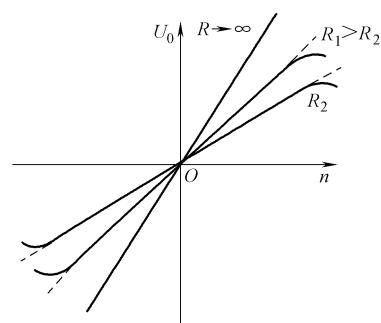


图 5-8 直流测速发电机的工作特性

(3) 纹波影响。由于换向片的数量有限，实际输出电压是一个脉动的电流，对高精度系统影响很大。

为消除影响可采用滤波电路。

5.2.2 交流测速发电机的工作原理

交流测速发电机分为同步和异步两类。同步测速发电机就是永磁转子的单向同步发电机，由于输出电压的频率随转速变化，不适用于自动控制系统，故应用很少。应用最广泛的是异步测速发电机。

1. 结构

交流测速发电机的基本结构和普通异步电动机相似。定子上嵌有两相绕组，一相是励磁绕组 (N_1)，另一相是输出绕组 (N_2)，它们在空间上互差 90° 电角度。定子有内、外定子之分。小容量测速发电机的励磁绕组和输出绕组都装在外定子槽中，而容量较大的测速发电机则分装在内、外定子中。内定子由硅钢片叠成，目的是减小磁路的磁阻。

转子有笼形和空心杯形两种。笼形转子的惯性大，特性较差，对精度要求高的控制系统多采用空心杯形转子。空心杯形转子异步测速发电机的转子是空心杯形，其用电阻率较大、厚为 $0.2 \sim 0.3\text{ mm}$ 的铝或铜制成，属非磁性材料。内、外定子间的气隙中为空心杯转子，其结构如图 5-9 所示。

2. 原理

异步测速发电机的空心杯形转子可以看成由很多导体并联而成。给定子励磁绕组加大小不变的交流励磁电压 U_f 后，励磁电流在励磁绕组的轴线方向上产生了随时间按正弦规律变化的直轴 (d 轴) 脉振磁场，脉振频率为 f_1 。

当转子静止不动 ($n=0$) 时，异步测速发电机类似于一台变压器，励磁绕组相当于变压器的一次侧绕组，转子导体相当于变压器的二次绕组。由于磁通的方向与输出绕组的轴线垂直，不会在输出绕组中产生感应电动势，当转子不动时，输出绕组的输出电压 U_2 等于零 (见图 5-10a)。

当转子旋转 ($n \neq 0$) 时，杯形转子中除了有变压器的感应电动势外，同时因转子切割磁通，则在转子中产生一旋转感应电动势，方向由右手定则判定。其有效值为 $E_{rq} = C_q \Phi_d n$ (C_q 为比例常数)，在旋转电动势 E_{rq} 的作用下，转子绕组中产生交流电流 I_{rq} (见图 5-10b)。杯形转子的电阻远大于电抗 (转子由高电阻率材料做成)，则 E_{rq} 与 I_{rq} 基本上处于同相位，由 I_{rq} 产生的磁通 Φ_q 也是交变的，且 $\Phi_q = KE_{rq}$ (K 为比例常数)， Φ_q 的轴线与输出绕组的轴线 (q 轴) 重合，由 Φ_q 在输出绕组中产生的感应电动势为 E_2 ， $E_2 = 4.44f_1 N_2 K_{N2} \Phi_q$ ，由上述可知， $E_2 \propto \Phi_q \propto I_{rq} \propto E_{rq} \propto n$ ，即 $E_2 \propto n$ 。

因此，输出电压与转子的转速成正比。转子反转时，输出电压的相位也相反。只要用一个电压表就可测出速度大小及方向。

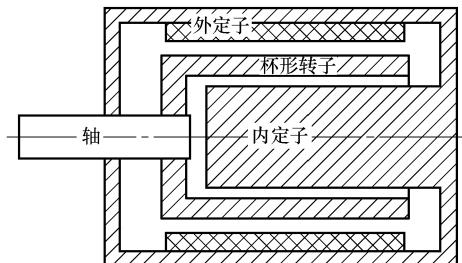


图 5-9 杯形转子

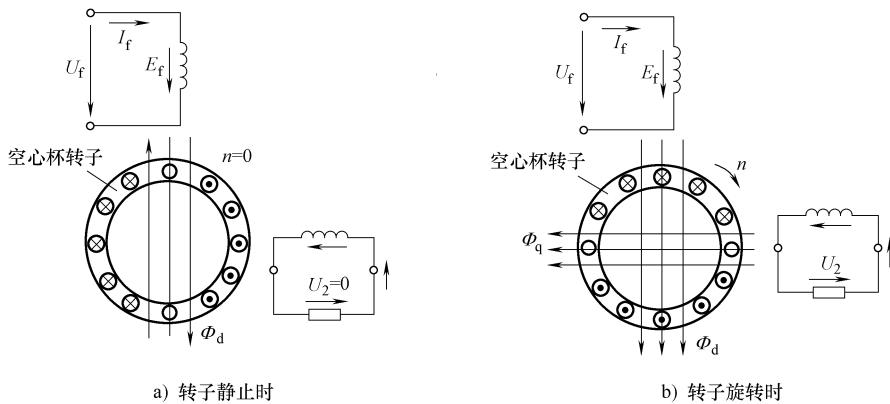


图 5-10 交流测速发电机工作原理图

5.3 伺服电动机

伺服电动机又称执行电动机，在自动控制系统中用做执行元件。它具有服从控制信号的要求而动作的职能，可以把输入的电压信号变换成为电动机轴上的角位移、角速度等机械信号输出。改变控制信号的极性和大小，便可改变伺服电动机的转向和转速。

自动控制系统对伺服电动机的性能要求如下：

- (1) 可控性好，即无电压控制信号时转子不自转，控制信号一旦出现，电动机马上转动，而控制信号一旦消失，电动机立刻停转。
- (2) 空载启动电压低。
- (3) 机械特性和调节特性的线性度好。
- (4) 适应性强，快速响应性好，灵敏度高。

根据伺服电动机的控制电压的不同，伺服电动机可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。

5.3.1 直流伺服电动机

直流伺服电动机有两种，一种是电励磁式直流伺服电动机，另一种是永磁式直流伺服电动机，其基本结构和工作原理与普通直流电动机相同。电励磁式直流伺服电动机按励磁方式的不同又可以分为他励、并励、串励、复励四种。为提高控制精度和响应速度，伺服电动机的电枢铁心长度与直径之比比普通电动机大，气隙也小。

直流伺服电动机主要有两种控制方式，一种是电枢控制，即通过改变电枢电压来实现对转子转速的控制；另一种是磁场控制，即通过改变励磁电压来实现对转子转速的控制（对电磁式直流伺服电动机而言）。

电枢控制的优点是电动机的机械特性和调节特性的线性度好，调速范围广，系统响应迅速，所以下面以电枢控制电磁式直流伺服电动机为例，介绍相应的机械特性和调节特性。

电枢控制时，励磁绕组通常接到电压为额定电压的电源上进行励磁。电枢绕组就是控制绕组，如图 5-11 所示。电枢控制的直流电动机的机械特性和他励直流电动机的机械特性一

样，其方程为

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e = n_0 - \beta T_e$$

电枢电压 $U_a = U_c = \alpha U_e$, $\alpha = \frac{U_c}{U_e}$ 称为信号系数，因此上式可表示为

$$n = \frac{\alpha U_e}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e = \alpha n_0 - \beta T_e$$

机械特性指控制电压恒定时，电动机的转速与电磁转矩之间的关系，即当 U_e 为常数时，转速 n 与电磁转矩 T_e 之间的关系 $n = f(T_e)$ ，当控制信号 U_e 不同时，机械特性是一组平行的直线，其机械特性如图 5-12a 所示。

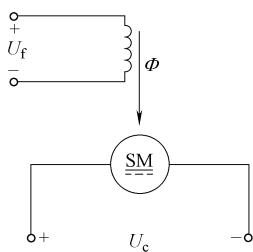


图 5-11 电枢控制直流伺服电动机原理

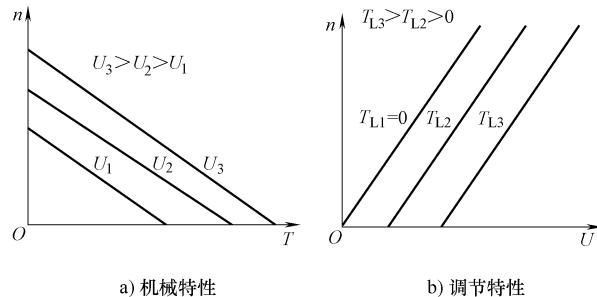


图 5-12 直流伺服电动机的特性

调节特性指电磁转矩恒定时，电机转速与电枢电压的关系，即 $T_e = \text{常数}$ 时，

由 $n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e$ 可得出调节特性，它们也是一组平行的直线，如图 5-12b 所示。

由上述分析可以看出，直流电动机的机械特性和调节特性都是线性的，并且其线性关系与电枢电阻无关，这是直流伺服电动机突出的优点，交流伺服电动机无法与之相比。而磁场控制时，调节特性是非线性的，这是磁场控制时最严重的缺陷，所以直流伺服电动机多采用电枢控制方式。缺点是电刷和换向器易磨损，需经常维护。换向器换向时会产生火花，使直流伺服电动机的最高速度受到限制，同时也使应用环境受到限制。

5.3.2 交流伺服电动机

交流伺服电动机的结构主要可分为两部分，即定子部分和转子部分。在定子铁心中安放着空间互成 90° 电角度的两相绕组。其中一组为励磁绕组，另一组为控制绕组，交流伺服电动机在结构上是一种两相的交流电动机。由定子和转子构成，转子有两种结构形式。

(1) 笼型转子。与三相异步电动机的笼型转子相似，其笼型转子的导条采用高电阻率的导电材料制造；且电动机做成细长型，以减小转子的转动惯量。

(2) 空心杯转子。空心杯转子位于内外绕组之间，通常用非磁性材料（如铜、铝或铝合金）制成。

空心杯转子电动机定子除了有和一般感应电动机一样的定子外，还有一个内定子，通常内定子上无绕组，只是代替笼型转子铁心作为磁路的一部分，作用是减少主磁通磁路的磁

阻。在内外定子之间有一个细长的空心杯转子，转子壁很薄，只有 $0.2 \sim 0.8\text{mm}$ ，因而具有较大的电阻和很小的转动惯量，如图 5-13 所示。

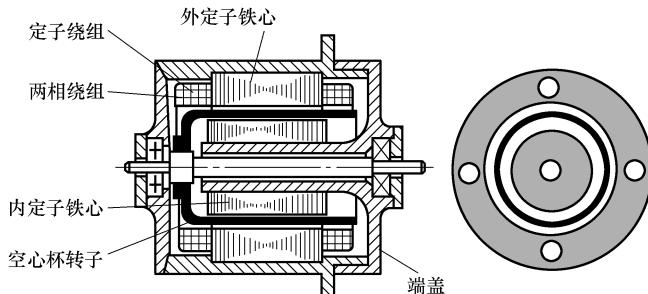


图 5-13 杯形转子结构图

1. 工作原理

交流伺服电动机使用时，励磁绕组两端施加恒定的励磁电压 U_f ，控制绕组两端施加控制电压 U_c ，因控制绕组和励磁绕组的电流不同相（理想情况下为 90° ），则在电动机的气隙中产生旋转磁场，伺服电动机很快就会转动起来。旋转磁场的转向决定了电动机的转向，当任意一个绕组上所加的电压反相时，旋转磁场的方向就发生改变，电动机的方向也发生改变。当控制电压消失后要求电动机能立即停转，但若伺服电动机的结构和参数同一般单相异步电动机一样，就会存在自转现象。所谓“自转”现象就是当励磁电压不为零，控制电压突然失去为零时，伺服电动机相当于一台单相异步电动机，若转子电阻较小，阻转矩小于单相运行时的最大转矩，则电动机仍然旋转。自转现象造成了伺服电动机的失控。它不符合伺服电动机可控性的要求，有效克服自转现象的方法是增大转子电阻。

2. 控制方法

交流伺服电动机的控制方式有：幅值控制、相位控制、幅值-相位控制。

(1) 幅值控制。控制电压和励磁电压保持相位差 90° ，只改变控制电压幅值，实现对伺服电动机的控制，这种控制方法称为幅值控制，其接线图如图 5-14 所示。

当励磁电压为额定电压、控制电压为零时，伺服电动机的转速为零，电动机不转；当励磁电压为额定电压、控制电压也为额定电压时，转速最大，转矩也最大。所以控制电压从零到额定电压，伺服电动机的转速也从零到最大。

(2) 相位控制。控制电压和励磁电压幅值均为额定值，通过改变控制电压和励磁电压相位差，实现对伺服电动机的控制，称为相位控制。

固定励磁不变，改变控制电压的相位从 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，旋转磁场由脉动势变为椭圆磁势，最后变为圆形磁势，伺服电动机的转速也从零到最大转速，转矩也最大。

(3) 幅值-相位控制。通过改变控制电压的幅值及控制电压与励磁电压的相位差来控制伺服电动机的转速，称为幅值-相位控制。其接线图如图 5-15 所示。

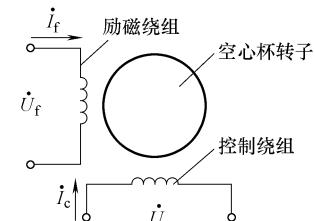


图 5-14 幅值控制原理

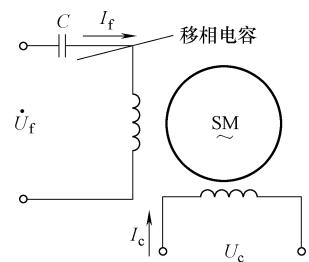


图 5-15 幅值-相位控制接线图

当控制电压的幅值变化时，电机的幅值和相位差都发生变化，从而达到改变转速的目的。

5.4 直线电动机

直线电动机是一种做直线运动的电动机，早在 18 世纪就有人提出用直线电机驱动织布机的梭子，也有人想用它作为列车的动力，但只是停留在试验论证阶段。直到 19 世纪 50 年代随着新型控制元件的出现，直线电动机的研究和应用才得到逐步发展。特别是最近 20 多年来，直线电动机广泛应用于工件传送、开关阀门、开闭窗帘及门户、平面绘图仪、笔式记录仪、磁分离器、轨道列车等方面。

与旋转电动机相比，直线电动机主要有以下优点：

- (1) 由于不需要中间传动机构，整个系统得到简化，精度提高，振动和噪声减小。
- (2) 由于不存在中间传动机构的惯量和阻力矩的影响，电动机加速和减速的时间短，可实现快速起动和正反向运行。
- (3) 普通旋转电动机由于受到离心力的作用，其圆周速度有所限制，而直线电动机运行时，其部件不受离心力的影响，因而它的直线速度可以不受限制。
- (4) 由于散热面积大，容易冷却，直线电动机可以承受较高的电磁负荷，容量定额较高。
- (5) 由于直线电动机结构简单，且它的初级铁心在嵌线后可以用环氧树脂密封成一个整体，所以可在一些特殊场合中应用，例如可在潮湿环境甚至水中使用。

5.4.1 直线异步电动机的分类和结构

直线电动机是由旋转电动机演化而来，原则上各种形式的旋转电动机，如直流电动机、异步电动机、同步电动机等均可演化成直线电动机。直线电动机也可分为直线异步电动机、直线同步电动机、直线直流电动机和其他直线电动机。其中以直线异步电动机应用最为广泛，本节主要介绍直线异步电动机。直线异步电动机主要有平板形、圆筒形和圆盘形等几种。

1. 平板形直线异步电动机

平板形直线异步电动机可以看成是从旋转电动机演变而来的。可以设想，有一极数很多的三相异步电动机，其定子半径相当大，定子内表面的某一段可以认为是直线，则这一段便是直线电动机。也可以认为把旋转电动机的定子和转子沿径向剖开，并展成平面，就得到了最简单的平板形直线异步电动机，如图 5-16 所示。

旋转电动机的定子和转子，在直线电动机中称为初级和次级。运行方式可以是固定初

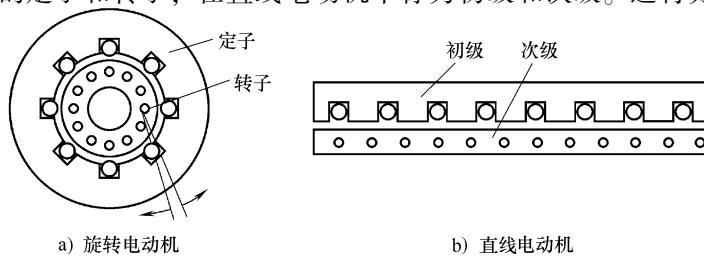


图 5-16 直线电动机的形成

级，让次级运动，此时称为动次级；相反，也可以固定次级而让初级运动，则称为动初级。

为了在运动过程中始终保持初级和次级的耦合，初级和次级的长度不应相同，可以使初级长于次级，称为短次级；也可以使次级长于初级，称为短初级，如图 5-17 所示。一般常用短初级。

平板形直线电动机仅在次级的一边具有初级，这种结构形式称为单边形（见图 5-17）。单边形除了产生切向力外，还会在初、次级间产生较大的法向力，这在某些应用中是不希望出现的。

为了更充分地利用次级和初级消除法向力，可以在次级的两侧都装上初级，这种结构形式称为双边形，如图 5-18 所示。

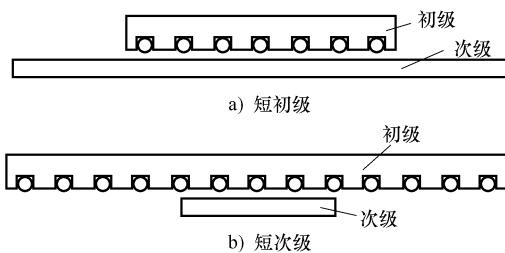


图 5-17 平板形直线电动机（单边形）

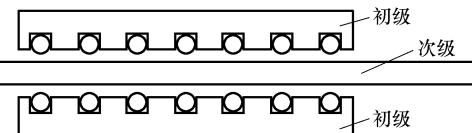


图 5-18 双边形直线电动机

平板形直线异步电动机的初级铁心由硅钢片叠成，表面开有齿槽，槽中安放着三相、两相或单相绕组。

次级形式较多，有类似笼形转子的结构，即在钢板上（或铁心叠片里）开槽，槽中放入铜条或铝条，然后用铜条或铝条在两侧端部短接。最常用的次级有 3 种：第 1 种用整块钢板制成，称为钢次级或磁性次级，这时，钢既起导磁作用，又起导电作用；第 2 种为钢板上覆盖一层铜板或铝板，称为复合次级，钢主要用于导磁，而铜或铝用于导电；第 3 种是单纯的铜板或铝板，称为铜（铝）次级或非磁性次级，这种次级一般用于双边形电动机中。

2. 圆筒形直线异步电动机

将平板形直线异步电动机沿着与移动方向相垂直的方向卷成圆筒，即形成圆筒形直线异步电动机，如图 5-19 所示。

3. 圆盘形直线异步电动机

将平板形直线异步电动机的次级制成圆盘形结构，并能绕经过圆心的轴自由转动，使初级放在圆盘的两侧，使圆盘在电磁力作用下自由转动，便成为圆盘形直线异步电动机，如图 5-20 所示。

5.4.2 直线异步电动机的工作原理

直线异步电动机是由旋转电动机演变而来的，因而当初级的多相绕组中通入多相电流后，也会产生一个气隙基波磁场，但这个磁场不是旋转的，而是沿直线移动的磁场，称为行波磁场。行波磁场在空间作正弦分布，如图 5-21 所示。

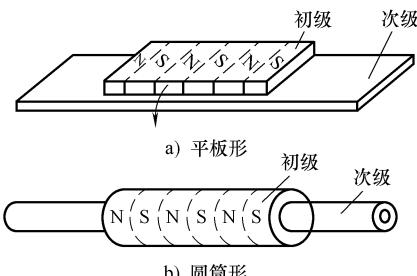


图 5-19 圆筒形直线异步电动机的形成

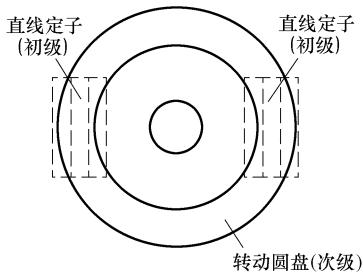


图 5-20 圆盘形直线异步电动机

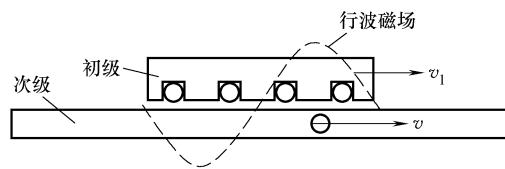


图 5-21 直线电动机的工作原理

行波磁场移动速度为

$$v_1 = 2f\tau$$

式中 τ ——极距；

f ——电流频率。

转差率为

$$s = \frac{v_1 - v}{v_1}$$

二次侧的移动速度为

$$v = (1 - s)v_1 = 2\tau f(1 - s)$$

可知，改变极距 τ 和电流频率 f ，均可改变次级的移动速度。

5.4.3 直线异步电动机的应用举例

传统的电传动内燃机车或电力机车的牵引动力来自于传统的旋转电动机，它依靠电动机的定子中产生的旋转磁场使其中的转子转动起来，再依靠传动装置将动力传递到车轮从而使列车获得牵引动力。驱动装置都在车上，车辆产生动力之后传递到车轮上，依靠车轮与钢轨的黏着力驱动车辆向前行驶。直线电动机如同将旋转电动机沿半径方向切开展平而成。图 5-22 为直线电动机轨道交通轨道及车底。



a) 轨道

b) 车底部

图 5-22 直流电动机轨道交通轨道及车底

直线电动机牵引的轮轨交通车辆将电动机的定子部分安装在车辆的转向架上，将转子沿线路铺设在轨道中间，如图 5-23 所示。

当电流通过定子电磁铁线圈时，会产生向前的磁场，通过与轨道反应板的相互作用产生

牵引力。列车靠车轮支撑在轨道上，由于反应板固定在轨道上，反作用力推动定子，带动转向架和列车向前运行。

直线电动机城轨车辆性能特点如下：

(1) 采用直线电动机牵引技术，具有优良的动力性能和爬坡能力，车轮仅起承载的作用，列车的牵引力不受轮轨之间附着条件的影响，所以能获得优良的动力性能和爬坡能力。

(2) 良好的编组灵活性和运营适应性。由于直线电动机驱动的车辆具有比传统车辆更强的加减速性能和更高的停车位置控制精度，因此更易实现小编组，高密度，自动驾驶的运行模式。它可以灵活编组2~6辆车辆，适应不同的客运量需要。

(3) 采用径向转向架，使运行性能大大改善。由于采用直线电动机系统，没有了旋转动力源和机械变速传动系统，因此有利于采用径向转向架。小而轻的车辆，使转向架的结构简单轻巧，是该系统除直线感应电动机外，另一种具有革新性的走行机械设计。

(4) 降低振动和噪声。由于直线电动机驱动的地铁车辆，没有齿轮传动机构的啮合振动和噪声；其次，车轮也不是驱动轮，没有动力轮对与钢轨蠕滑滚动产生的振动和噪声；再加上径向转向架良好的曲线通过性能，避免了过曲线时轮轨冲角带来的振动和噪声。故该型地铁车辆具有振动小，噪声低的优点，有利于环境保护。再加上取消了旋转电动机驱动所必需的滚动轴承、传动齿轮，磨耗小，从而大大提高了车辆运行的可靠性和可维护性，维修工作量较小，维护成本较低。

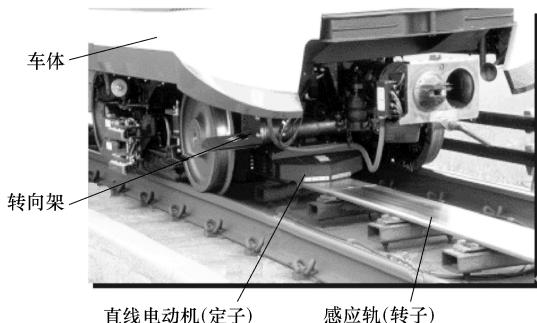


图 5-23 直线电动机轨道交通示意图

本章小结

本章主要介绍了几种常用的控制电机：步进电动机、测速发电机、伺服电动机、直线电动机。它们的基本原理和旋转电动机一样，是建立在电磁感应的原理基础之上的。

步进电动机是将电脉冲信号转变为角位移或直线位移的一种控制电机。在正常情况下，电动机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，而不受负载变化的影响，当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电动机按设定的方向转动一个固定的角度，称为步距角。它的旋转是以固定的角度一步一步运行的，可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。

测速发电机是一种输出电动势与转速成比例的微特电机。测速发电机的绕组和磁路经精确设计，其输出电动势 E 和转速 n 呈线性关系，即 $E = Kn$, K 是常数。改变旋转方向时输出电动势的极性即相应改变。在被测机构与测速发电机同轴连接时，只要检测出输出电动势，就能获得被测机构的转速，故又称速度传感器。

伺服电动机可以把输入的电压信号变换成为电动机轴上的角位移或角速度输出，在控制系统中常作为执行元件，所以伺服电动机又称执行电动机。改变输入电压的大小和方向就可以改变转轴的转速和转向。

直线电动机由旋转电动机演化而来，原则上各种形式的旋转电动机，如直流电动机、异步电动机、同步电动机等均可演化成直线电动机。直线电动机也可分为直线异步电动机、直线同步电动机、直线直流电动机和其他直线电动机。其中以直线异步电动机的应用最为广泛，本节主要介绍直线异步电动机。直线异步电动机主要有平板形、圆筒形和圆盘形。

习 题

一、填空题

1. 按照励磁方式划分，直流测速发电机有_____和_____两种形式。
2. 直流测速发电机的电压平衡方程式是_____。
3. 转差与同步速的比值称为_____。
4. 有一台四极交流伺服电动机，电源频率为50Hz，其同步速为_____r/min。
5. 交流伺服电动机的转子有两种形式，即笼型转子和_____型转子。

二、选择题

1. 直流测速发电机的输出特性 $U_a = f(n)$ 为()。

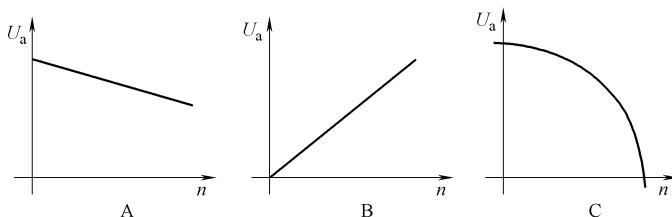


图 5-24

2. 下图中为直流伺服电动机调节特性曲线的是()。

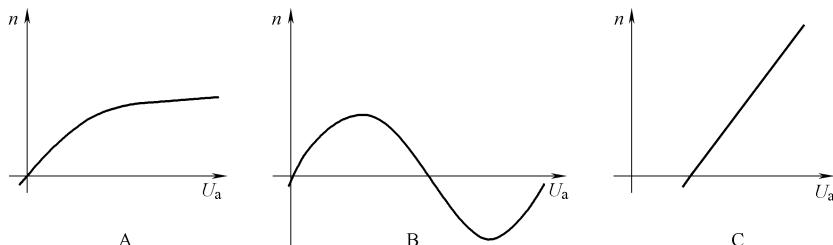


图 5-25

3. 对于某一个磁通恒定直流伺服电动机，其始动电压 U_{a0} 的大小决定于()。

 - A. 负载转矩
 - B. 起动转矩
 - C. 额定转矩
 - D. 空载转矩

三、问答题

1. 什么叫自转现象？伺服电动机如何克服自转？
2. 步进电动机的转速由哪些因素决定？
3. 直线电动机具有什么优点？
4. 测速发电机是如何工作的？
5. 直流伺服电动机调节特性死区大小与哪些因素有关？在不带负载时，其调节特性有无死区？



第6章 可编程序控制器基础知识

学习目标

1. 掌握可编程序控制器的结构。
2. 了解可编程序控制器的工作原理。
3. 掌握可编程序控制器的基本指令、步进指令及使用方法。
4. 掌握可编程序控制器的部分功能指令及使用方法。

PLC 在早期是一种开关逻辑控制装置，被称为可编程序逻辑控制器（Programmable Logic Controller，PLC）。随着计算机技术和通信技术的发展，PLC 采用微处理器作为其控制核心，它的功能已不再局限于逻辑控制的范畴。因此，1980 年美国电气制造协会（NEMA）将其命名为 Programmable Controller（PC），但为避免与个人计算机（Personal Computer）的简称 PC 混淆，习惯上仍将其称为 PLC。目前 PLC 已广泛应用于生产机械和生产过程的自动控制中，成为一种最普及、最重要、应用最广泛的一种工业控制装置，被公认为是现代工业自动化的三大支柱（PLC、CAD/CAM、机器人）之一。

6.1 可编程序控制器的基础知识

1. 可编程序控制器的定义

国际电工委员会在 1987 年为 PLC 做了如下定义：可编程序控制器是一种专门为在工业环境下使用而设计的数字运算操作的电子装置。它采用了可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作指令，并通过数字的或模拟的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。PLC 及其有关的外围设备都应按照易于与工业控制系统形成一个整体，易于扩展其功能的原则而设计。

2. 可编程序控制器的产生

1968 年美国 GM（通用汽车）公司提出取代继电器控制装置的要求，并公开招标提出十项标准：

- (1) 编程方便，现场可修改程序；
- (2) 维修方便，采用模块化结构；
- (3) 可靠性高于继电器控制装置；
- (4) 体积小于继电器控制装置；
- (5) 数据可直接送入管理计算机；
- (6) 成本可与继电器控制装置竞争；
- (7) 输入可以是交流 115V；
- (8) 输出为交流 115V，2A 以上，能直接驱动电磁阀，接触器等；

- (9) 在扩展时，原系统只要很小变更；
- (10) 用户程序存储器容量至少能扩展到4KB。

1969年，美国数字公司(DEC)研制出了第一台可编程序控制器，满足了GM公司装配线的要求。这种新型的工业控制装置简单易懂、操作方便、可靠性高、通用灵活、体积小、使用寿命长，很快在美国其他工业领域推广使用。随着集成电路技术和计算机技术的发展，现在已有了第五代PLC产品。

第一代：从第一台可编程序控制器诞生到20世纪70年代初期。其特点是：CPU由中小规模集成电路组成，存储器为磁芯存储器。

第二代：20世纪70年代初期到70年代末期。其特点是：CPU采用微处理器，存储器采用EPROM。

第三代：20世纪70年代末期到80年代中期。其特点是：CPU采用8位和16位微处理器，有些还采用多微处理器结构，存储器采用EPROM、EAROM、CMOSRAM等。

第四代：20世纪80年代中期到90年代中期。PC全面使用8位、16位微处理芯片的位片式芯片，处理速度也达到 $1\mu\text{s}/\text{步}$ 。

第五代：20世纪90年代中期至今。PC使用16位和32位的微处理器芯片，有的已使用RISC芯片。

3. 可编程序控制器（PLC）的特点

(1) 可靠性高，抗干扰能力强。可靠性是电气控制设备的关键性能，可靠性高，抗干扰能力强是PLC的最重要的特点之一。PLC采用现代大规模集成电路技术和严格的生产工艺制造，内部电路采取了先进的抗干扰技术，具有很高的可靠性。例如三菱公司生产的F系列PLC平均无故障时间高达30万小时。此外，PLC带有硬件故障自我检测功能，出现故障时可及时发出警报信息。

(2) 配套齐全，功能完善，适用性强。PLC发展到今天，已经形成了大、中、小各种规模的系列产品，可以用于各种规模的工业控制场合。现代PLC不仅具有逻辑处理功能，大多还具有A-D、D-A、PID控制、数据运算等功能，可用于各种数字控制领域。近年来PLC的各种功能单元大量出现，使其可以组成满足各种要求的控制系统。

(3) 简单易学，深受工程技术人员欢迎。目前大多数PLC采用梯形图语言，梯形图语言的图形符号与表达方式和继电器电路图相当接近，只用PLC的少量开关量逻辑控制指令就可以方便地实现继电器电路的功能。为不熟悉电子电路、不懂计算机原理和汇编语言的人使用计算机从事工业控制打开了方便之门。

(4) 系统的设计、建造工作量小，维护方便，容易改造。PLC用存储逻辑代替接线逻辑，大大减少了控制设备外部的接线，使控制系统设计及建造的周期大为缩短，同时维护也变得容易起来，更重要的是使同一设备经过改变程序改变生产过程成为可能。这很适合多品种、小批量的生产场合。

(5) 体积小，重量轻，能耗低。由于PLC采用了集成电路，其结构紧凑、体积小、功耗小，很容易装入机械内部，是实现机电一体化的理想控制设备。

4. PLC的分类

PLC产品种类繁多，其规格、性能也各不相同，通常按以下方法分类。

- (1) 按I/O点数。

小型 PLC：I/O 总点数为 256 点以下，其中 I/O 点数少于 64 点的为超小型 PLC。

中型 PLC：I/O 总点数为 256 点以上，2048 点以下。

大型 PLC：I/O 总点数为 2048 点以上。

(2) 按结构类型分（见图 6-1）。

整体式（单元式）：整体式 PLC 是将电源、CPU、I/O 接口等部件都集中装在一个机箱内，具有结构紧凑、体积小、价格低的特点。小型 PLC 一般采用这种整体式结构。整体式 PLC 由不同 I/O 点数的基本单元（又称主机）和扩展单元组成。基本单元内有 CPU、I/O 接口、与 I/O 扩展单元相连的扩展口，以及与编程器或 EPROM 写入器相连的接口等。扩展单元内只有 I/O 和电源等，没有 CPU，基本单元和扩展单元之间一般用扁平电缆连接。整体式 PLC 一般还可配备特殊功能单元，如模拟量单元、位置控制单元等，使其功能得以扩展。

模块式（积木式）：模块式 PLC 是将 PLC 各组成部分，分别作成若干个单独的模块，如 CPU 模块、I/O 模块、电源模块（有的含在 CPU 模块中）以及各种功能模块。模块式 PLC 由框架或基板和各种模块组成，模块装在框架或基板的插座上。这种模块式 PLC 的特点是配置灵活，可根据需要选配不同规模的系统，而且装配方便，便于扩展和维修。大、中型 PLC 一般采用模块式结构。

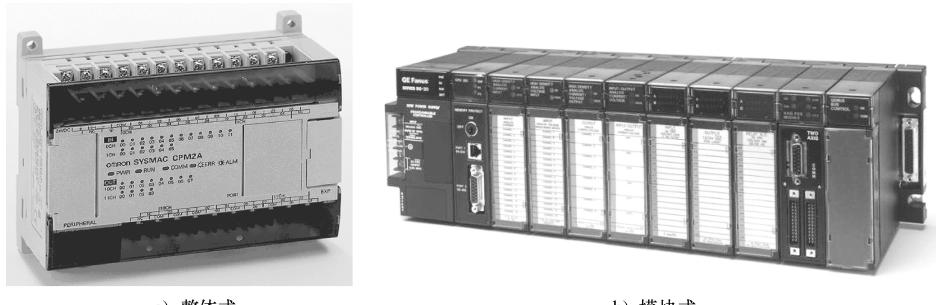


图 6-1 PLC 外形

叠装式：还有一些 PLC 将整体式和模块式的特点结合起来，构成叠装式 PLC。叠装式 PLC 中，CPU、电源、I/O 接口等也是各自独立的模块，但它们之间靠电缆进行连接，并且各模块可以一层层地叠装。这样，不但系统可以灵活配置，还可做得体积小巧。

(3) 按功能分。

根据 PLC 所具有的功能不同，可将 PLC 分为低档、中档、高档三类。

1) **低档 PLC。**具有逻辑运算、定时、计数、移位以及自诊断、监控等基本功能，还可有少量模拟量 I/O、算术运算、数据传送和比较、通信等功能。主要用于逻辑控制、顺序控制或少量模拟量控制的单机控制系统。

2) **中档 PLC。**除具有低档 PLC 的功能外，还具有较强的模拟量 I/O、算术运算、数据传送和比较、数制转换、远程 I/O、子程序、通信联网等功能。有些还可增设中断控制、PID 控制等功能，适用于复杂控制系统。

3) **高档 PLC。**除具有中档机的功能外，还增加了带符号算术运算、矩阵运算、位逻辑运算、平方根运算及其他特殊功能函数的运算、制表及表格传送功能等。高档 PLC 机具有更强的通信联网功能，可用于大规模过程控制或构成分布式网络控制系统，实现工厂自动化。

(4) 按生产厂家分。

日本欧姆龙 (OMRON) 公司的 SP/C 系列可编程序控制器；

日本三菱 (MITSUBISHI) 公司的 F、F1、F2、FX2N 系列可编程序控制器；

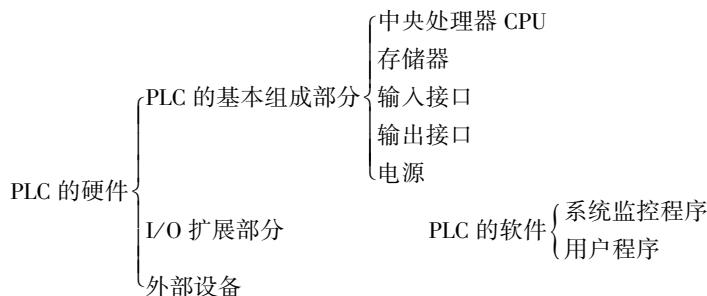
日本松下 (PANASONIC) 电工公司的 FP1 系列可编程序控制器；

美国通用电气 (GE) 公司的 GE 系列可编程序控制器；

美国艾论—布拉德利 (A-B) 公司的 PLC-5 系列可编程序控制器；

德国西门子 (SIEMENS) 公司的 S5、S7 系列可编程序控制器。

5. PLC 系统组成及各部分的功能



(1) CPU (中央处理器)。CPU 是 PLC 的控制中枢。它按照 PLC 系统程序赋予的功能接收并存储从编程器键入的用户程序和数据；检查电源、存储器、I/O 以及警戒定时器的状态，并诊断用户程序中的语法错误。当 PLC 投入运行时，首先以扫描的方式接收现场各输入装置的状态和数据，并分别存入 I/O 映象区，然后从用户程序存储器中逐条读取用户程序，经过命令解释后按指令的规定执行逻辑或算数运算的结果送入 I/O 映象区或数据寄存器内。等所有的用户程序执行完毕之后，最后将 I/O 映象区的各输出状态或输出寄存器内的数据传送到相应的输出装置，如此循环运行，直到停止运行。

(2) 存储器 (ROM/RAM)。

1) 系统程序存储器 (ROM)。用以存放系统管理程序、监控程序及系统内部数据，PLC 出厂前已将其固化在只读存储器 ROM 或 PROM 中，用户不能更改。

2) 用户程序存储器 (RAM)。包括用户程序存储区和工作数据存储区。这类存储器一般由低功耗的 CMOS-RAM 构成，其中的存储内容可读出并更改。掉电会丢失存储的内容，一般用锂电池来保持。

另外，还有工作数据存储器用来存储数值数据、用户程序中使用的 ON/OFF 状态等。

(3) I/O 接口。

PLC 通过输入单元可实现将不同输入电路的电平转换成 PLC 所需的标准电平，供 PLC 进行处理。接到 PLC 输入接口的输入器件有各种开关、按钮、传感器等。

PLC 输入电路通常有三种类型：

1) 直流 12~24V 输入。

2) 交流 100~120V 输入与交流 200~240V 输入。

3) 交直流 12~24V 输入。

各种 PLC 的输入电路大都相同，PLC 输入电路中有光耦合器隔离，并设有 RC 滤波器，用以消除输入触点的抖动和外部噪声干扰。

输出接口：采用光电隔离，实现了 PLC 的内部电路与外部电路的电气隔离，减小了电

磁干扰。

输出有三种类型：

1) 继电器输出型：为有触点输出方式，用于接通或断开开关频率较低的直流负载或交流负载回路。其电压为 AC250V 以下、DC30V 以下，每个输出点负载电流为 2A/1 点，8A/公用点。

2) 晶闸管输出型：为无触点输出方式，用于接通或断开开关频率较高的交流电源负载。

3) 晶体管输出型：为无触点输出方式，用于接通或断开开关频率较高的直流电源负载。其电压为 DC5 ~ 30V。

(4) 电源。PLC 的电源是指将外部输入的交流电处理后转换成满足 PLC 的 CPU、存储器、I/O 接口等内部电路工作需要的直流电源电路或电源模块。许多 PLC 的直流电源采用直流开关稳压电源，不仅可提供多路独立的电压供内部电路使用，而且还可为输入设备（传感器）提供标准电源。

(5) 编程器。编程器分为两种，一种是手持编程器，使用方便，实验室经常使用的就是手持编程器。另一种是通过 PLC 的 RS232 口与计算机相连，然后敲击键盘，通过软件向 PLC 内部输入程序。

6. PLC 的工作过程

PLC 采用成批 I/O 的周期扫描方式工作，按用户程序的先后次序逐条运行，一个完整的周期包含三个阶段。

(1) 输入刷新阶段。程序开始时，监控程序使机器以扫描方式逐个输入所有输入端口上的信号，并依次存入对应的输入映象寄存器。

(2) 程序处理阶段。所有的输入端口采样结束后，即开始进行逻辑运算处理，根据用户输入的控制程序，从第一条开始，逐条加以执行，并将相应的逻辑运行结果存入对应的中间元件和输出元件映象寄存器，当最后一条控制程序执行完毕后，即转入输出刷新处理。

(3) 输出刷新阶段。将输出元件映象寄存器的内容，从第一个输出端口开始，到最后一个结束，依次读入对应的输出锁存器，从而驱动输出器件形成可编程的实际输出。

6.2 FX2N 系列 PLC 编程元件

6.2.1 FX2N 系列 PLC 编程元件分类和编号

1. 输入继电器 (X)

输入继电器是 PLC 专门用来接收外界输入信号的内部虚拟继电器。它在 PLC 内部与输入端子相连，有无数的常开触点和常闭触点，可在 PLC 编程时随意使用。输入继电器不能用程序驱动，只能由输入信号驱动。FX2N 系列的输入继电器采用八进制地址编号，X0 ~ X267 最多可达 184 点。

2. 输出继电器 (Y)

输出继电器是 PLC 专门用来将程序执行的结果信号经输出接口电路及输出端子送达并控制外部负载的虚拟继电器。它在 PLC 内部直接与输出接口电路相连，有无数的常开触点

与常闭触点，可在 PLC 编程时随意使用。输出继电器只能由程序驱动。输出继电器的地址编号也是八进制，Y0 ~ Y267，最多可达 184 点。

3. 辅助继电器 (M)

PLC 内部有很多辅助继电器，和输出继电器一样，只能由程序驱动，每个辅助继电器也有无数对常开、常闭触点供编程使用。其作用相当于继电器控制电路中的中间继电器。辅助继电器的接点在 PLC 内部编程时可以任意使用，但它不能直接驱动负载，外部负载必须由输出继电器的输出接点来驱动。采用十进制编号。

辅助继电器分以下三种类型：

- (1) 通用辅助继电器。M0 ~ M499，共 500 个点。
- (2) 断电保持辅助继电器。M500 ~ M1023 及 M1024 ~ M3071，共 2572 点。
- (3) 特殊辅助继电器。

M8000 ~ M8255，共 256 个点。

M8000 为运行监控用，PLC 运行时 M8000 接通。

M8002 为仅在运行开始瞬间接通的初始脉冲特殊辅助继电器。

M8033 为 PLC 停止时输出保持特殊辅助继电器。

M8034 为禁止全部输出特殊辅助继电器。

M8039 为定时扫描特殊辅助继电器。

M8011 ~ M8014 分别是 10ms、100ms、1s 和 1min 时钟脉冲。

4. 状态元件 (S)

状态元件是构成状态转移图的重要软元件，它与后续的步进梯形指令配合使用，编号采用十进制。通常状态继电器软元件有下面五种类型。

- (1) 初始状态继电器 S0 ~ S9，共 10 点。
- (2) 回零状态继电器 S10 ~ S19，共 10 点。
- (3) 通用状态继电器 S20 ~ S499，共 480 点。
- (4) 停电保持状态器 S500 ~ S899，共 400 点。
- (5) 报警用状态继电器 S900 ~ S999，共 100 点。

5. 定时器 (T)

定时器作为时间元件相当于时间继电器，由设定值寄存器、当前值寄存器和定时器触点组成，寄存器都是 16 位（即数值范围是 1 ~ 32767），计时时间为设定值乘以定时器的计时单位（时钟脉冲周期），时钟脉冲周期有 1ms、10ms、100ms 三种规格，定时器的工作过程实际上是对时钟脉冲计数。在其当前值寄存器的值等于设定值寄存器的值时，定时器触点动作。故设定值、当前值和定时器触点是定时器的三要素。每个定时器都有一个常开和常闭接点，这些触点可以无限次引用。定时器分类见表 6-1。

表 6-1 定时器的分类

定时器名称	编号范围	点 数	计时范围
100ms 定时器	T0 ~ T199	200	0.1 ~ 3276.7s
10ms 定时器	T200 ~ T245	46	0.01 ~ 327.67s
1ms 累计定时器	T246 ~ T249	4	0.001 ~ 32.767s
100ms 累计定时器	T250 ~ T255	6	0.1 ~ 3276.7s

6. 计数器 (C)

可编程序控制器的计数器共有两种：内部信号计数器和高速计数器。内部信号计数器又分为两种：16 位递加计数器和32位增减计数器。

普通计数器 C 的使用说明：计数器的功能是对输入脉冲进行计数，计数发生在脉冲的上升沿，达到计数器设定值时，计数器触点动作。每个计数器都有一个常开和常闭触点，可以无限次引用。普通计数器在计数过程中发生断电，则前面所计的数值全部丢失，再次通电后从 0 开始计数。掉电保持计数器在计数过程中发生断电，则前面所计数值保存，再次通电后从原来数值的基础上继续计数。

计数器除了计数端外，还需要一个复位端。

(1) 16 位递加计数器。设定值为 1 ~ 32767，其中 C0 ~ C99 共 100 点是通用型，C100 ~ C199 共 100 点是断电保持型。图 6-2 表示了递加计数器的动作过程。

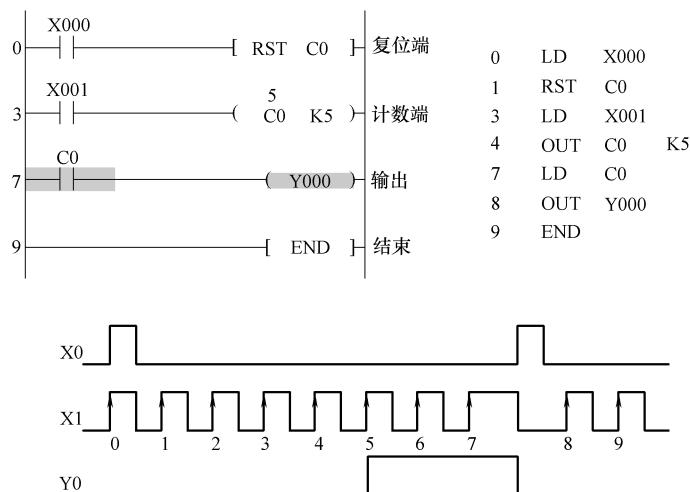


图 6-2 16 位加计数器计数原理图

(2) 32 位增减计数器。设定值为 $-2147483648 \sim +2147483647$ ，其中 C200 ~ C219 共 20 点是通用型，C220 ~ C234 共 15 点为断电保持型计数器。32 位双向计数器是递加型还是递减型计数由特殊辅助继电器 M8200 ~ M8234 设定。特殊辅助继电器接通时（置 1）时，为递减计数；特殊辅助继电器断开（置 0）时，为递加计数。可直接用常数 K 或间接用数据寄存器 D 的内容作为设定值。

用 X12 通过 M8200 控制双向计数器 C200 的计数方向，如图 6-3 所示。当 $X12 = 1$ 时， $M8200 = 1$ ，计数器 C200 处于减计数状态；当 $X12 = 0$ 时， $M8200 = 0$ ，计数器 C200 处于加计数状态。无论是加计数状态还是减计数状态，当前值大于等于设定值时，计数器输出触点动作；当前值小于设定值时，计数器输出触点复位。只要双向计数器不处于复位状态，无论当前值是否达到设定值，其当前值始终随计数信号的变化而变化。

与通用计数器一样，当复位信号到来时，双向计数器处于复位状态。此时，当前值清 0，触点复位，并且不计数。

7. 变址寄存器 (V/Z)

变址寄存器除了和普通的数据寄存器有相同的使用方法外，还常用于修改器件的地址编

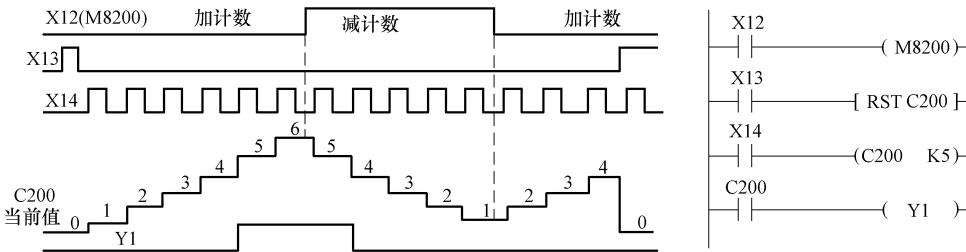


图 6-3 32 位加减计数器计数原理图

号。V、Z 都是 16 位的寄存器，可进行数据的读写。当进行 32 位操作时，将 V、Z 合并使用，指定 Z 为低位。

8. 指针 (P/I)

(1) 分支指令用 P0 ~ P62、P64 ~ P127，共 127 点。指针 P0 ~ P62、P64 ~ P127 为标号，用来指定条件跳转，子程序调用等分支指令的跳转目标。P63 为结束跳转用。

(2) 中断用指针 I0□□ ~ I8□□，共 9 点。中断指针的格式表示如下：

1) 输入中断 I△0□。

□ = 0 表示为下降沿中断；□ = 1 表示为上升沿中断。

△表示输入号，取值范围为 0 ~ 5，每个输入只能用一次。

例如，I001 为输入 X0 从 OFF 到 ON 变化时，执行由该指令作为标号后面的中断程序，并根据 IRET 指令返回。

2) 定时器中断 I△□□。

△表示定时器中断号，取值范围为 6 ~ 8，每个定时器只能用 1 次。

□表示定时时间，取值范围为 10 ~ 99ms。

例如，I710，即每隔 10ms 就执行标号为 I710 后面的中断程序，并根据 IRET 指令返回。

9. 常数 (K/H)

常数也作为器件对待，它在存储器中占有一定的空间，十进制常数用 K 表示，如 18 表示为 K18；十六进制常数用 H 表示，如 18 表示为 H12。

各编程软元件见表 6-2。

表 6-2 FX 系列 PLC 编程软元件表

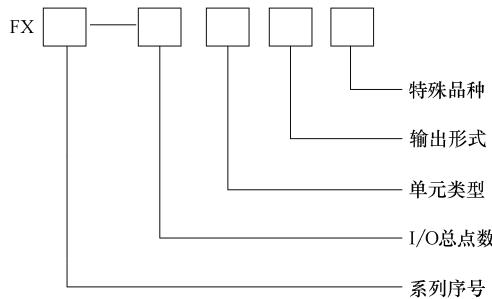
PLC 型号 编程元件种类	FXOS	FX1S	FX0N	FX1N	FX2N (FX2NC)
输入继电器 X (按八进制编号)	X0 ~ X17 (不可扩展)	X0 ~ X17 (不可扩展)	X0 ~ X43 (可扩展)	X0 ~ X43 (可扩展)	X0 ~ X77 (可扩展)
输出继电器 Y (按八进制编号)	Y0 ~ Y15 (不可扩展)	Y0 ~ Y15 (不可扩展)	Y0 ~ Y27 (可扩展)	Y0 ~ Y27 (可扩展)	Y0 ~ Y77 (可扩展)
辅助 继电器 M	普通用	M0 ~ M495	M0 ~ M383	M0 ~ M383	M0 ~ M499
	保持用	M496 ~ M511	M384 ~ M511	M384 ~ M511	M500 ~ M3071
	特殊用	M8000 ~ M8255 (具体见使用手册)			

(续)

PLC 型号 编程元件种类		FX0S	FX1S	FX0N	FX1N	FX2N (FX2NC)
状态 寄存器 S	初始状态用	S0 ~ S9	S0 ~ S9	S0 ~ S9	S0 ~ S9	S0 ~ S9
	返回原点用	—	—	—	—	S10 ~ S19
	普通用	S10 ~ S63	S10 ~ S127	S10 ~ S127	S10 ~ S999	S20 ~ S499
	保持用	—	S0 ~ S127	S0 ~ S127	S0 ~ S999	S500 ~ S899
	信号报警用	—	—	—	—	S900 ~ S999
定时器 T	100ms	T0 ~ T49	T0 ~ T62	T0 ~ T62	T0 ~ T199	T0 ~ T199
	10ms	T24 ~ T49	T32 ~ T62	T32 ~ T62	T200 ~ T245	T200 ~ T245
	1ms	—		T63	—	—
	1ms 累积	—	T63	—	T246 ~ T249	T246 ~ T249
	100ms 累积	—	—	—	T250 ~ T255	T250 ~ T255
计数器 C	16 位增计数 (普通)	C0 ~ C13	C0 ~ C15	C0 ~ C15	C0 ~ C15	C0 ~ C99
	16 位增计数 (保持)	C14 ~ C15	C16 ~ C31	C16 ~ C31	C16 ~ C199	C100 ~ C199
	32 位可逆计数 (普通)	—	—	—	C200 ~ C219	C200 ~ C219
	32 位可逆计数 (保持)	—	—	—	C220 ~ C234	C220 ~ C234
	高速计数器	C235 ~ C255(具体见使用手册)				
数据 寄存器 D	16 位普通用	D0 ~ D29	D0 ~ D127	D0 ~ D127	D0 ~ D127	D0 ~ D199
	16 位保持用	D30 ~ D31	D128 ~ D255	D128 ~ D255	D128 ~ D7999	D200 ~ D7999
	16 位特殊用	D8000 ~ D8069	D8000 ~ D8255	D8000 ~ D8255	D8000 ~ D8255	D8000 ~ D8195
指针 N,P,I	嵌套用	N0 ~ N7	N0 ~ N7	N0 ~ N7	N0 ~ N7	N0 ~ N7
	跳转用	P0 ~ P63	P0 ~ P63	P0 ~ P63	P0 ~ P127	P0 ~ P127
	输入中断用	I00 * ~ I30 *	I00 * ~ I50 *	I00 * ~ I30 *	I00 * ~ I50 *	I00 * ~ I50 *
	定时器中断	—	—	—	—	I6 * * ~ I8 * *
	计数器中断	—	—	—	—	I010 ~ I060
常数 K,H	16 位	K: -32,768 ~ 32,767			H:0000 ~ FFFFH	
	32 位	K: -2,147,483,648 ~ 2,147,483,647			H:00000000 ~ FFFFFFFF	

6.2.2 FX 系列 PLC 型号

FX 系列可编程序控制器型号命名的基本格式为



说明

系列序号: 0, 0S, 0N, 1, 2, 2C, 1S, 1N, 2N, 2NC。

I/O 总点数: 16 ~ 256。

单元类型: M——基本单元

E——输入输出混合扩展模块

EX——输入专用扩展模块

EY——输出专用扩展模块

输出形式: R——继电器输出

T——晶体管输出

S——晶闸管输出

特殊品种区别:

D——DC 电源, DC 输入

AI——AC 电源, AC 输入

H——大电流输出扩展模块 (1A/1 点)

V——立式端子排的扩展模块

C——接插口输入输出方式

F——输入滤波器 1ms 的扩展模块

L——TTL 输入型扩展模块

S——独立端子 (无公共端) 扩展模块

6.3 可编程序控制器的基本指令

FX2N 系列 PLC 共有 27 条基本指令, 其中包含了某些型号的 20 条指令, 其基本指令见表 6-3。

表 6-3 基本指令表

助记符、名称	功 能	可用软元件	程序步
LD 取	常开触点逻辑运算开始	X, Y, M, S, T, C	1
LDI 取反	常闭触点逻辑运算开始	X, Y, M, S, T, C	1
LDP 取脉冲上升沿	上升沿检出运算开始	X, Y, M, S, T, C	2
LDF 取脉冲下降沿	下降沿检出运算开始	X, Y, M, S, T, C	2
AND 与	常开触点串联连接	X, Y, M, S, T, C	1
ANI 与非	常闭触点串联连接	X, Y, M, S, T, C	1
ANDP 与脉冲上升沿	上升沿检出串联连接	X, Y, M, S, T, C	2
ANDF 与脉冲下降沿	下降沿检出串联连接	X, Y, M, S, T, C	2
OR 或	常开触点并联连接	X, Y, M, S, T, C	1
ORI 或非	常闭触点并联连接	X, Y, M, S, T, C	1
ORP 或脉冲上升沿	上升沿检出并联连接	X, Y, M, S, T, C	2

(续)

助记符、名称	功 能	可用软元件	程序步
ORF 或脉冲下降沿	下降沿检出并联连接	X,Y,M,S,T,C	2
ANB 块与	并联回路块的串联连接		1
ORB 块或	串联回路块的并联连接		1
OUT 输出	线圈驱动	Y,M,S,T,C	注 1
SET 置位	动作保持	Y,M,S	注 2
RST 复位	清除动作保持,寄存器清零	Y,M,S,T,C,D,V,Z	注 2
PLS 上升沿脉冲	上升沿输出	Y,M(特殊 M 除外)	1
PLF 下降沿脉冲	下降沿输出	Y,M(特殊 M 除外)	1
MC 主控	公共串联点的连接线圈指令	Y,M(特殊 M 除外)	3
MCR 主控复位	公共串联点的消除指令		2
MPS 压栈	运算存储		1
MRD 读栈	存储读出		1
MPP 出栈	存储读出与复位		1
INV 取反	运算结果的反转		1
NOP 空操作	无动作		1
END 结束	输入输出及返回到开始		1

注1. 软元件为 Y 和一般 M 的程序步为 1, S 和特殊辅助继电器 M 的程序步为 2, 定时器 T 的程序步为 3, 计数器 C 的程序步为 3~5。

2. 软元件为 Y 和一般 M 的程序步为 1, S 和特殊辅助继电器 M、定时器 T、计数器 C 的程序步为 2, 数据寄存器 D 以及变址寄存器 V 和 Z 的程序步为 3。

1. 取指令与输出指令 (LD/LDI/LDP/LDF/OUT)

(1) 指令说明 (见图 6-4)。

1) LD, LDI, LDP, LDF 指令用于将触点接到左母线上。另外, 与后面讲到的 ANB, ORB 指令组合, 在分支起点处也可使用。

2) LDP (取上升沿指令) 与左母线连接的常开触点的上升沿检测指令, 仅在指定位元件的上升沿 (由 OFF→ON) 时接通一个扫描周期。

3) LDF (取下降沿指令) 与左母线连接的常闭触点的下降沿检测指令, 仅在指定位元

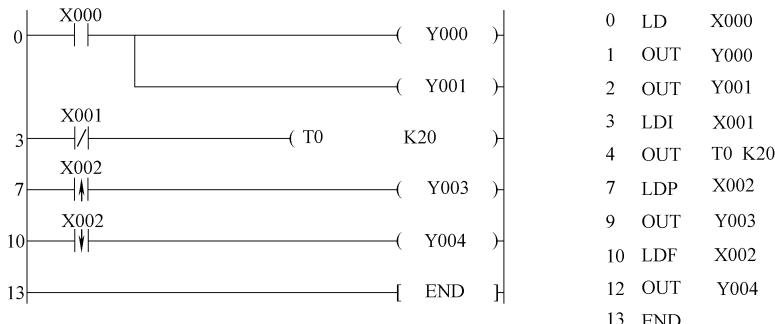


图 6-4 取指令与输出指令的使用

件的下降沿（由 ON→OFF）时接通一个扫描周期。

4) OUT (输出指令) 是对输出继电器、辅助继电器、状态继电器、定时器、计数器的线圈驱动指令，对输入继电器不能使用。

5) OUT 指令可作多次并联使用。对于定时器及计数器，应设置常数或数据寄存器。

6) 软元件为 Y 和一般 M 的程序步为 1，S 和特殊辅助继电器 M 的程序步为 2，定时器 T 的程序步为 3，计数器 C 的程序步为 3~5。

7) 每个程序结束必须要有 END 指令。

(2) 应用举例。

当 X000 接通时，Y000 和 Y001 有输出，当 X001 断开时 T0 计时，当 X002 由 OFF 到 ON 时，Y003 接通一个扫描周期，当 X002 由 ON 变化为 OFF 时，Y004 接通一个扫描周期。

2. 触点串联和并联指令 (AND/ANI/ANDP/ANDF/OR/ORL/ORP/ORF)

(1) 指令说明 (见图 6-5)

1) AND, ANI, ANDP, ANDF 指令只能串接一个触点，串联次数没有限制，两个以上的并联回路串联时使用后面的 ANB 指令。

2) 图 6-5 中，OUT Y000 指令之后通过 X003 的触点去驱动 Y001 称为连续输出。

3) OR, ORI, ORP, ORF 指令只能并接一个触点，两个以上的串联回路并联时使用后面的 ORB 指令。并联触点的左端接到 LD、LDI、LDP 或 LPF 处，右端与前一条指令对应触点的右端相连。触点并联指令连续使用的次数不限。

4) ANDP、ANDF、ORP、ORF 四条指令仅表示接通一个扫描周期。

(2) 应用举例

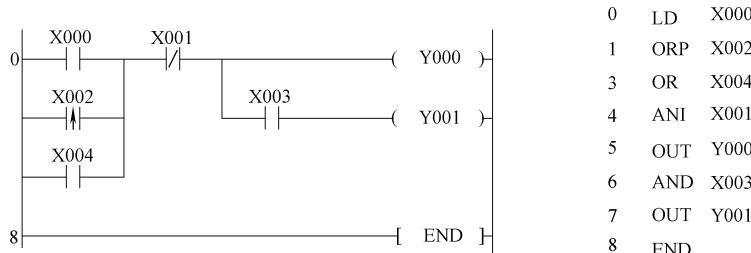


图 6-5 串联和并联指令的使用

3. 块操作指令 (ORB/ANB)

(1) 指令说明 (见图 6-6)。

1) ORB (块或指令) 用于两个或两个以上的触点串联连接的电路之间的并联，几个串联电路块并联连接时，每个串联电路块开始时应该用 LD 或 LDI 指令，ANB (块与指令) 用于两个或两个以上触点并联连接的电路之间的串联，每个并联电路块开始时应该用 LD 或 LDI 指令。

2) 有多个电路块并联回路，如对每个电路块使用 ORB 指令，则并联的电路块数量没有限制。

3) ORB 指令也可以连续使用，但这种程序写法不推荐使用，LD 或 LDI 指令的使用次数不得超过 8 次，也就是 ORB 只能连续使用 8 次以下。

4) 多个并联回路块连接按顺序和前面的回路串联时, ANB 指令的使用次数没有限制, 也可连续使用 ANB, 但与 ORB 一样, 使用次数在 8 次以下。

(2) 应用举例。

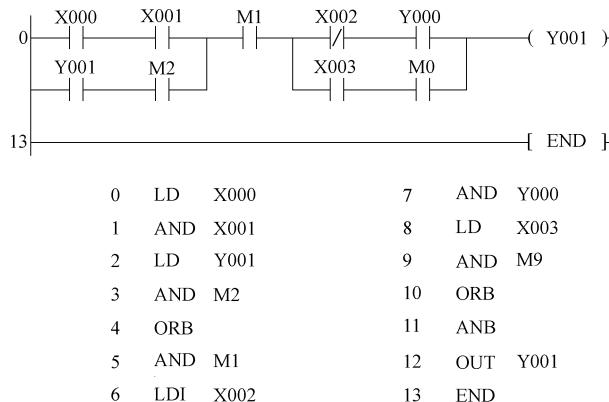


图 6-6 块操作指令使用

4. 置位与复位指令 (SET/RST)

(1) 指令说明 (见图 6-7)。

- 1) SET (置位指令) 的作用是使被操作的目标元件置位并保持。
- 2) RST (复位指令) 使被操作的目标元件复位并保持清零状态。
- 3) SET 指令的目标元件为 Y、M、S, RST 指令的目标元件为 Y、M、S、T、C、D、V、Z。
- 4) RST 指令常被用来对 D、Z、V 的内容清零, 还用来复位积算定时器和计数器。

(2) 应用举例。

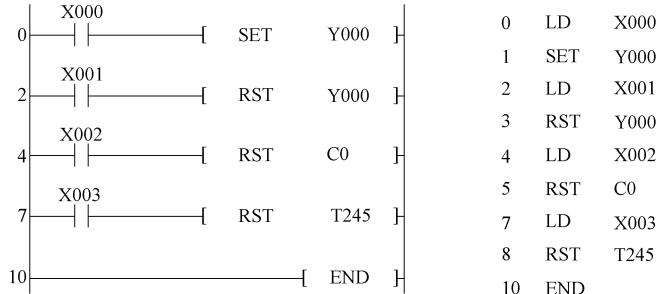


图 6-7 置位与复位指令

SET, RST 指令的使用如图 6-7 所示。当 X0 常开接通时, Y000 变为 ON 状态并一直保持该状态 (自锁), 即使 X000 断开, Y000 的 ON 状态仍维持不变; 只有当 X001 的常开闭合时, Y000 才变为 OFF 状态并保持, 即使 X001 常开断开, Y000 也仍为 OFF 状态; 当 X002 接通时, 计数器 C0 清零复位; 当 X003 接通时, 积算定时器 T245 复位。

5. 主控指令 (MC/MCR)

在编程时常会出现这样的情况，多个线圈同时受一个或一组触点控制，如果在每个线圈的控制电路中都串入同样的触点，将占用很多存储单元，使用主控指令就可以解决这一问题。

(1) 指令说明 (见图 6-8)。

1) MC (主控指令) 用于公共串联触点的连接。执行 MC 后，左母线移到 MC 触点的后面。

2) MCR (主控复位指令) 是 MC 指令的复位指令，即利用 MCR 指令恢复原左母线的位置。

3) 主控触点在梯形图中与一般触点垂直 (见如图 6-8 中的 M10)。主控触点是与左母线相连的常开触点，是控制一组电路的总开关。与主控触点相连的触点必须用 LD 或 LDI 指令。

4) MC 指令的输入触点断开时，在 MC 和 MCR 之内的积算定时器、计数器用复位/置位指令驱动的元件保持其之前的状态不变。非积算定时器和计数器，用 OUT 指令驱动的元件将复位。

5) 在一个 MC 指令区内若再使用 MC 指令称为嵌套。嵌套级数最多为 8 级，编号由 N0 按顺序增大，每级的返回用对应的 MCR 指令，从编号大的嵌套级开始复位。

(2) 应用举例。

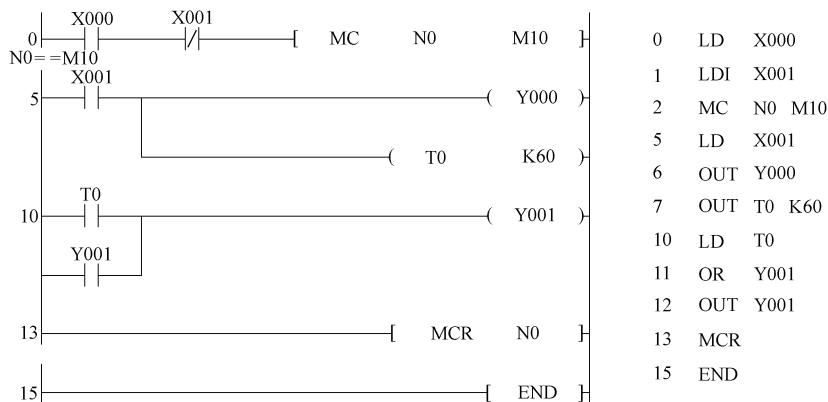


图 6-8 主控指令应用

6. 堆栈指令 (MPS/MRD/MPP)

(1) 指令说明 (见图 6-9)

堆栈指令是 FX 系列中新增的基本指令，用于多重输出电路，为编程带来便利。在 FX 系列 PLC 中有 11 个存储单元，它们专门用来存储程序运算的中间结果，被称为栈存储器。

1) MPS (进栈指令) 将运算结果送入栈存储器的第一段，同时将先前送入的数据依次移到栈的下一段。

2) MRD (读栈指令) 将栈存储器的第一段数据 (最后进栈的数据) 读出且该数据继续保存在栈存储器的第一段，栈内的数据不发生移动。

3) MPP (出栈指令) 将栈存储器的第一段数据 (最后进栈的数据) 读出且该数据从栈

中消失，同时将栈中其他数据依次上移。

4) 堆栈指令没有目标元件；MPS 和 MPP 必须配对使用；由于栈存储单元只有 11 个，所以栈的层次最多 11 层。

(2) 应用举例。

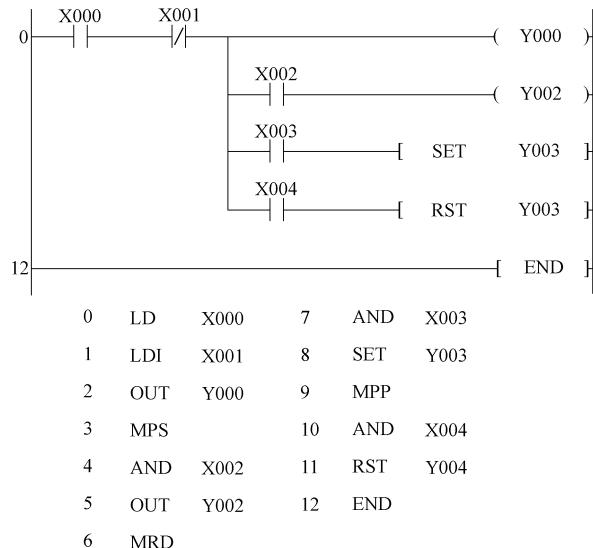


图 6-9 堆栈指令的应用

7. 逻辑反、空操作与结束指令 (INV/NOP/END)

1) INV (反指令) 的使用如图 6-10 所示，执行该指令后将原来的运算结果取反。如果 X0 断开，则 Y0 为 ON，否则 Y0 为 OFF。使用时应注意 INV 不能像指令表的 LD、LDI、LDP、LDF 那样与母线连接，也不能像指令表中的 OR、ORI、ORP、ORF 指令那样单独使用。

2) NOP (空操作指令) 不执行操作，但占一个程序步。执行 NOP 时并不做任何事，可用 NOP 指令短接某些触点或用 NOP 指令将不要的指令覆盖。当 PLC 执行了清除用户存储器操作后，用户存储器的内容全部变为空操作指令。

3) END (结束指令) 表示程序结束。若程序的最后不写 END 指令，则 PLC 不论实际用户程序多长，都从用户程序存储器的第一步执行到最后一步；若有 END 指令，当扫描到 END 时，则结束执行程序，这样可以缩短扫描周期。在程序调试时，可在程序中插入若干 END 指令，将程序划分若干段，在确定前面程序段无误后，依次删除 END 指令，直至调试结束。

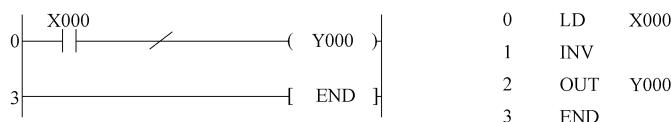


图 6-10 反指令的使用

6.4 可编程序控制器的基本指令应用

1. 编程注意事项

(1) 双线圈输出。如果在同一个程序中，同一元件的线圈使用了两次或多次，则称之为双线圈输出。对于输出继电器来说，在扫描周期结束时，真正输出的是最后一个Y0的线圈状态（见图6-11a）。一般应避免出现双线圈输出现象，例如可以将图a改为图b。

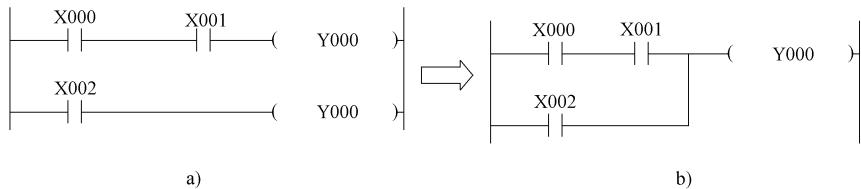


图 6-11 双线圈输出

(2) 程序的优化设计。在并联电路时，应将触点多的支路放在上面；在串联电路中，应将触点多的支路放在左边（见图6-12）。

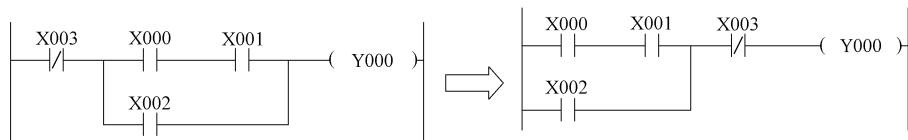


图 6-12 程序的优化

在有线圈的并联输出电路（纵接输出）中将单个线圈放在上面，将图6-13a的电路改为图6-13b的电路，可以避免使用进栈指令MPS和出栈指令MPP。

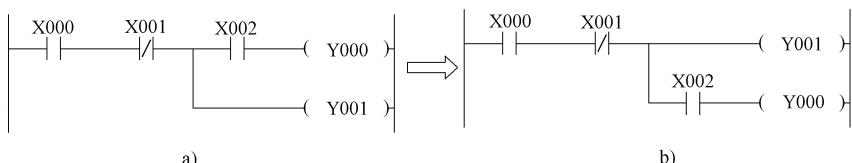


图 6-13 纵接输出优化

(3) 编程元件的位置。输出类元件（例如OUT、MC、SET、RST、PLS、PLF和大多数应用指令）应放在梯形图的最右边，它们不能直接与左侧母线相连，若前面没有触点控制，可加常通辅助继电器M8000控制。有的指令（如END和MCR指令）不能用触点驱动，必须直接与左侧母线或临时母线相连。

2. 应用举例

(1) 三相异步电动机的自锁控制。三相异步电动机的正反转控制的电气电路在第2章中已分析，其电路如图6-14所示。

在这个电路中，共有三个输入信号（SB1、SB2、SB3），两个输出信号（KM1、

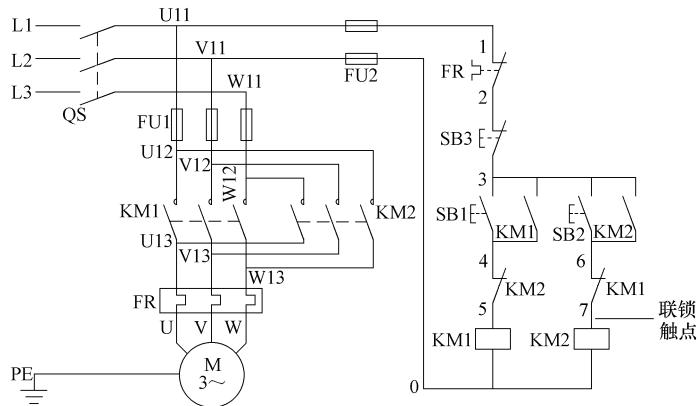


图 6-14 接触器联锁的正反转控制电路

KM2)，其与 PLC 的输入端子对应关系如图 6-15 所示。

在 I/O 分配图中，正反转电路要求在任何情况下两个接触器不能同时得电，因此，除了在程序中要有联锁措施外，在外部电路中也要接有联锁。

梯形图、指令表如图 6-16 所示。

(2) 设计一个四组抢答器。比赛规则如下：主持人台设有总指示灯和音响、开始按键及总复位按键，各选手处设有分台按键及指示灯。主持人宣布开始并按下开始按键后，抢答开始有效，任一组抢先按下按键后，封锁抢答器，使其他组按下按键无效。10s 后，若无人应答，则该题目视为作废。在有人应答的情况下，选手必须在 30s 内完成答题。正常抢答时，音响及分台指示灯输出；违反规则时，音响、分台指示灯、总指示灯均有输出；无人应答或答题超时时，音响及总台灯输出。在一个题目完成后，主持人按下复位按键后，进入第二轮答题。

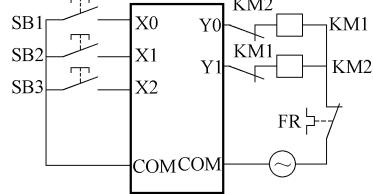


图 6-15 正反转电路 I/O 分配

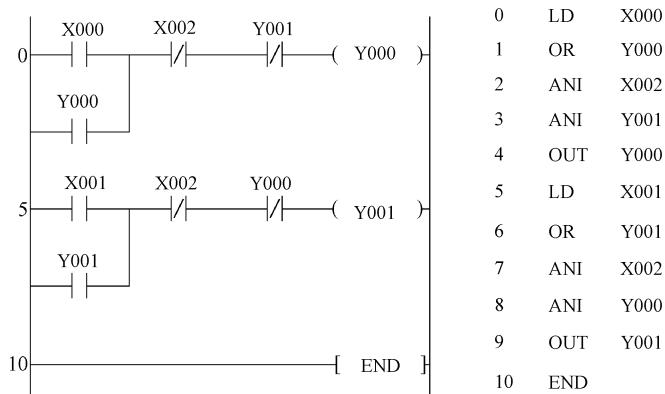


图 6-16 正反转电路梯形图及指令表

梯形图如图 6-17 所示。

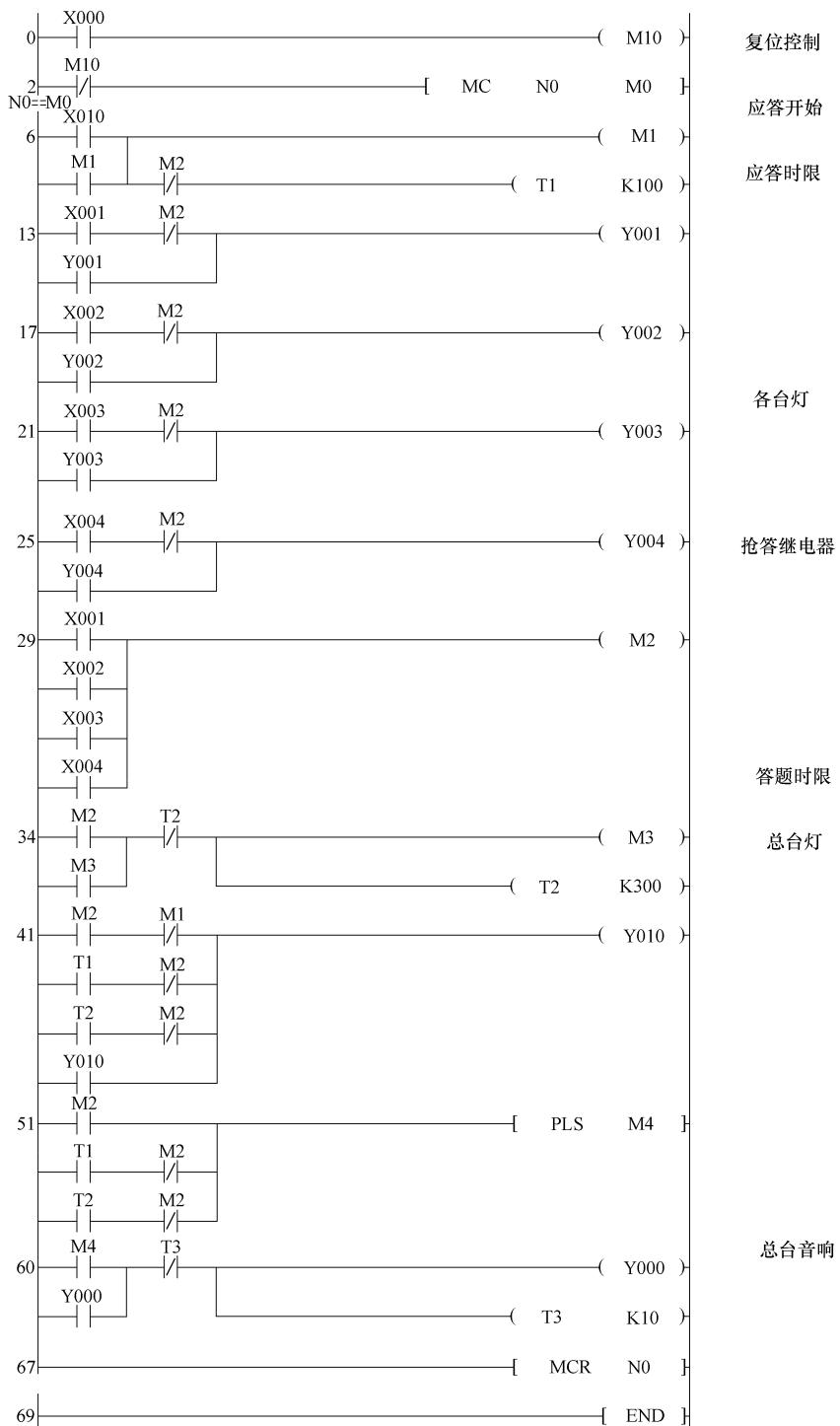


图 6-17 四路抢答器梯形图

在本例中，其输入、输出及辅助继电器安排见表 6-4。

表 6-4 器件安排表

输入器件		输出器件		辅助器件		
X0	总台复位按钮	Y0	总台音响	M0	公共控制触点继电器	T1
X1	组 1 按钮	Y1	组 1 台灯	M1	应答时间辅助继电器	T2
X2	组 2 按钮	Y2	组 2 台灯	M2	抢答辅助继电器	T3
X3	组 3 按钮	Y3	组 3 台灯	M3	答题时间辅助继电器	
X4	组 4 按钮	Y4	组 4 台灯	M4	音响启动信号继电器	
X10	总台开始按钮	Y10	总台台灯			

(3) 十字路口交通灯控制设计。十字路口南北及东西方向各设有红、绿、黄三个信号灯，其时序情况如图 6-18 所示。

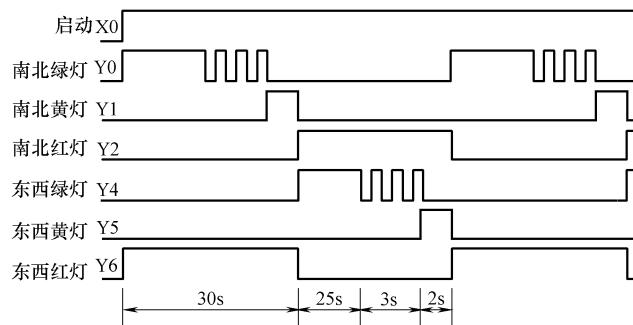


图 6-18 交通信号灯时序图

为了实现交通灯的启动、停止控制，在梯形图中加入主控环节（见图 6-19）。

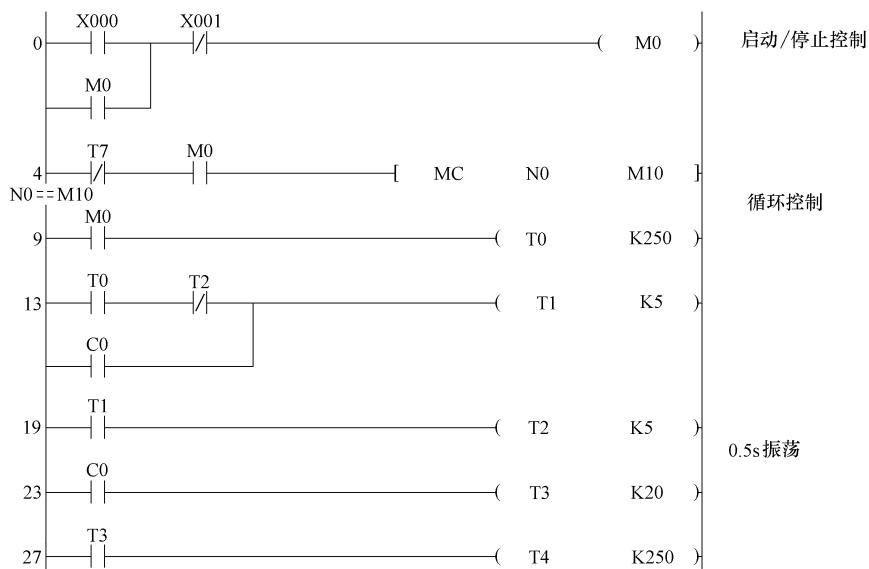


图 6-19 交通灯梯形图

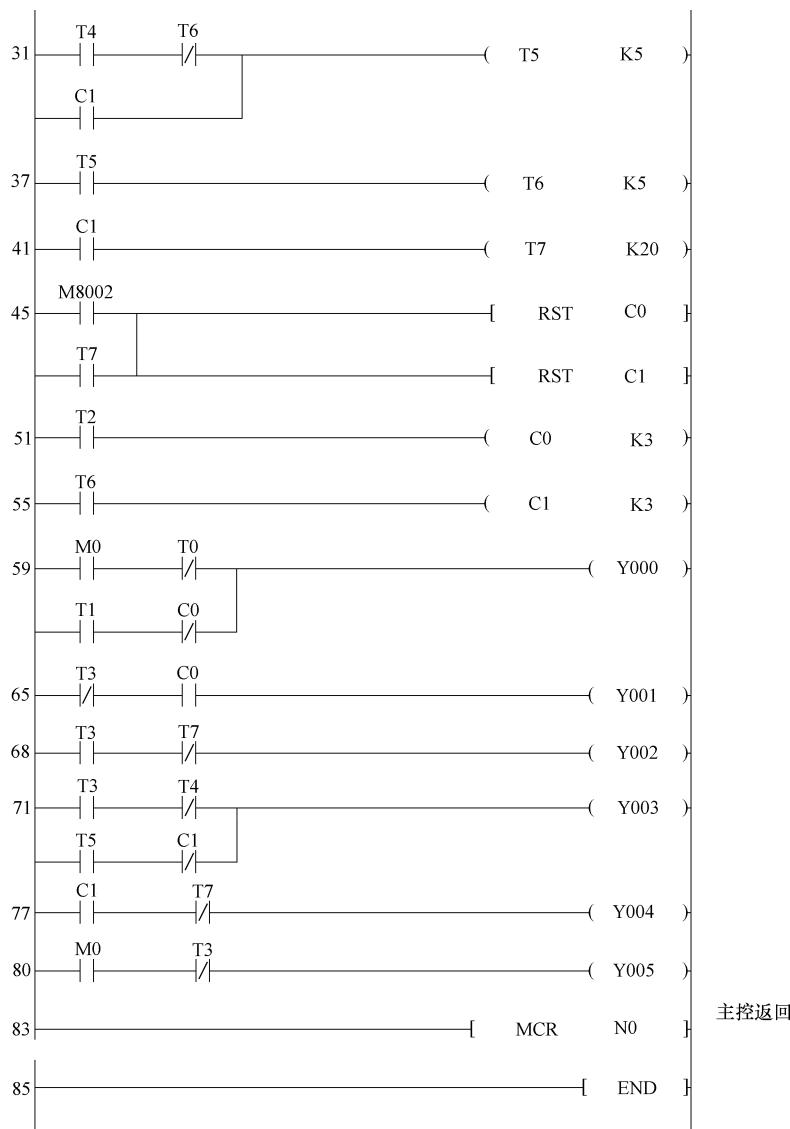


图 6-19 交通灯梯形图 (续)

各软元件使用情况见表 6-5。

表 6-5 交通灯程序用各软元件表

元 件	名 称	元 件	名 称
X0	启动按钮	T4	东西绿灯定时器
X1	停止按钮	T5, T6	构成东西绿灯 1s 振荡
T0	南北绿灯定时器	T7	东西黄灯 2s 定时器
T1, T2	构成南北绿灯 1s 振荡	C0	南北绿灯闪烁计数器
T3	南北黄灯 2s 定时器	C1	东西绿灯闪烁计数器

6.5 可编程序控制器的步进指令

对于流程作业的自动化控制系统而言，一般都包含若干个状态（也就是工序），当条件满足时，系统能够从一种状态转移到另一种状态，我们把这种控制叫做顺序控制。对应的系统则称为顺序控制系统或流程控制系统。对于这种系统，编写程序时最好使用步进顺控编程法。

步进顺控编程法是 PLC 程序编制的重要方法。先将系统的工作过程分解成若干状态（步），绘制状态转移图；再依据状态转移图设计步进梯形图程序及指令表程序，使程序设计工作变得思路清晰，不容易遗漏或者冲突。其控制总是一步一步地按顺序进行。在工业领域中，尤其是机械行业，几乎无一例外地会利用顺序控制来实现程序的循环控制。

1. FX 系列 PLC 的步进指令

(1) 指令说明。

步进指令是专为顺序控制而设计的指令。在工业控制领域许多的控制过程都可用顺序控制的方式来实现，使用步进指令实现顺序控制既方便实现又便于阅读修改。

FX2N 中有两条步进指令：STL（称为步进触点指令）和 RET（称为步进返回指令）。

STL 和 RET 指令只有与状态继电器 S 配合才能具有步进功能。如 STL S20 表示状态常开触点，称为 STL 触点，它在梯形图中的符号表示为



它没有常闭触点。我们用一个状态器 S 记录一个工步，若 STL S20 有效（为 ON），则进入 S20 表示的一步（类似于本步的控制开关），开始执行本阶段该做的工作，并判断进入下一步的条件是否满足。一旦结束本步信号为 ON，则关断 S20 进入下一步，如 S21 步。RET 指令是用来复位 STL 指令的。执行 RET 后将重回母线，退出步进状态。

(2) 状态转移图。

一个顺序控制过程可分为若干个阶段，也称为步或状态，每个状态都有不同的动作。当相邻两状态之间的转换条件得到满足时，就将实现转换，即由上一个状态转换到下一个状态执行。我们常用状态转移图（也称功能表图、流程图）描述这种顺序控制过程。如图 6-20 所示，用状态元件 S 记录每个状态，X 为转换条件。如当 X1 为 ON 时，则系统由 S20 状态转为 S21 状态。

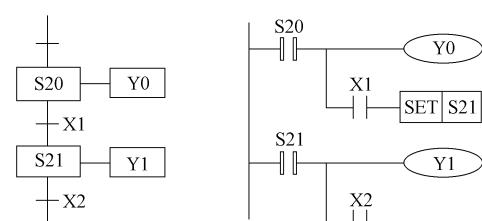


图 6-20 状态转移图与梯形图

状态转移图中的每一步包含三个内容（称为三个要素），本步驱动的内容、转移条件及指令的转换目标。如图 6-20 中，S20 步驱动 Y0，当 X1 有效（为 ON）时，则系统由 S20 状态转为 S21 状态，X1 即为转换条件，转换的目标为 S21 步，其中转移目标和转移条件是必不可少的，而驱动动作则视具体情况而定，也可能没有实际的动作，驱动与转移的关系为先进行驱动动作处理，然后进行状态转移处理，不能颠倒。

(3) 步进指令使用的注意事项。

1) 与 STL 触点相连的触点应用 LD 或 LDI 指令，只有执行完 RET 后才返回左侧母线；驱动动作用 OUT 指令，STL 触点可直接驱动或通过别的触点驱动 Y, M, S, T 等元件的线圈。当同一负载需要连续多步驱动时可使用多重输出，也可使用 SET 指令将负载置位，等到负载不需要驱动时再用 RST 指令将其复位。

- 2) 由于 PLC 只执行活动步对应的电路块，所以使用 STL 指令时允许双线圈输出。
- 3) STL 触点驱动的电路块中不能使用 MC 和 MCR 指令，但可以用 CJ 指令；在转移条件对应的电路中，不能使用 ANB, ORB, MPS, MRD, MPP 指令，可先转化成驱动某一继电器，由继电器相应触点再作为转移条件。
- 4) 步与步之间的状态转换需满足两个条件：一是前级步必须是活动步；二是对应的转换条件要成立。满足上述两个条件就可以实现步与步之间的转换。一旦后续步转换成功成为活动步，前级步就要复位成为非活动步。

5) 画流程图时要遵循：步与步之间必须有转移隔开；转移和转移之间必须有步隔开；步和转移、转移和步之间用有向线段连接，通常画顺序功能图的方向是从上到下或从左到右，按照正常顺序画图时，有向线段可以不加箭头，否则必须加箭头。先进行驱动处理，后进行转移处理，两者不能颠倒。驱动处理就是该步的输出处理，转移处理就是根据转移方向和转移条件实现下一步的状态转移。

2. 顺序功能图分类

按照流程是否有分支及分支情况，顺序功能图可分为以下几类（见图 6-21）。

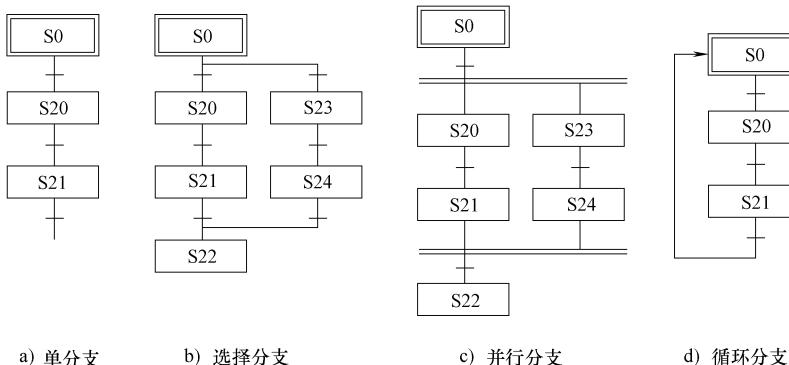


图 6-21 顺序功能图的分类

(1) 单流程（单分支）步进顺控。

有三台电动机，按下起动按钮 SB1，第一台电动机 M1 运行，延时 5s 后，第二台电动机起动，M1、M2 同时运行，再延时 15s，起动 M3，三台电动机运行。经过分析，其 I/O 分配及流程示意如图 6-22 所示。

其流程图、梯形图、指令表如图 6-23 所示。

(2) 并行性分支流程控制示例。

并行性分支的特点是当转移条件满足时，同时执行几条分支，各分支结束后，才汇合向下一状态转移。

交通信号灯一个周期(120s)的时序图如图6-24所示。南北信号灯和东西信号灯同时

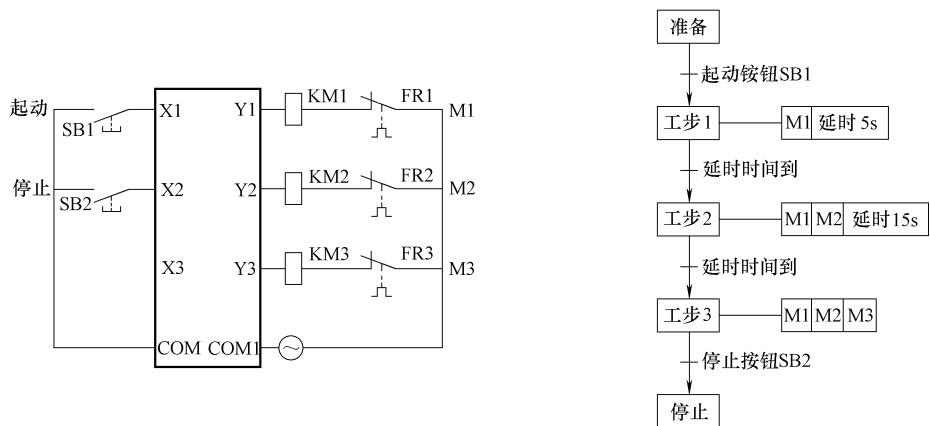


图 6-22 三台电动机顺序起动 I/O 及流程示意图

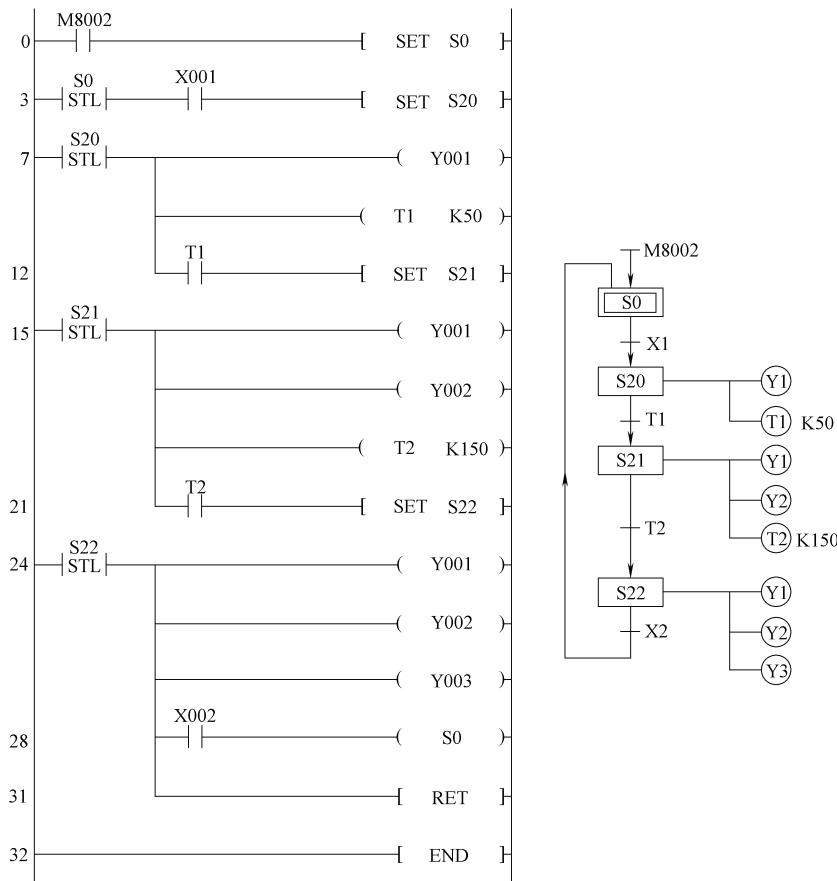


图 6-23 三台电动机顺序起动程序

工作，0 ~ 50s 期间，南北信号绿灯亮，东西信号红灯亮；50 ~ 60s 期间，南北信号黄灯亮，东西信号红灯亮；60 ~ 110s 期间，南北信号红灯亮，东西信号绿灯亮；110 ~ 120s 期间，南北信号红灯亮，东西信号黄灯亮。经过分析，交通信号灯控制电路如图 6-25 所示。

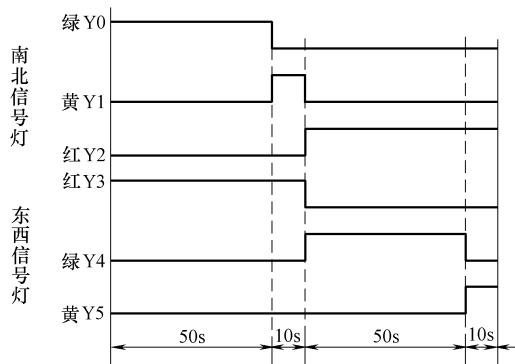


图 6-24 交通信号灯的时序图

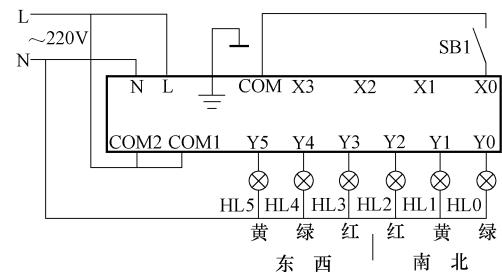


图 6-25 交通信号灯控制电路图

根据时序图，可画出流程图如图 6-26 所示，因东西、南北方向的信号灯为同时动作，故采用并行性分支绘制。

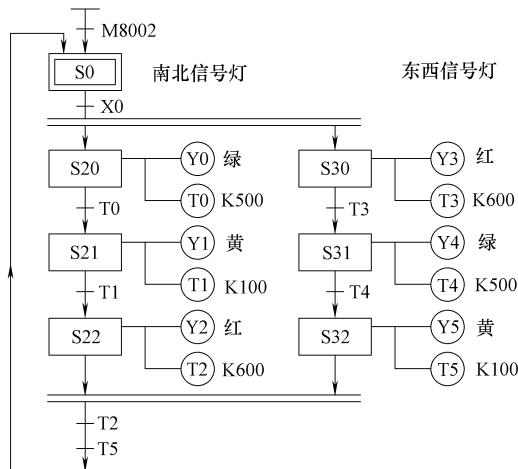


图 6-26 信号灯流程图

根据流程图，写出梯形图，如图 6-27 所示。

(3) 选择性分支示例。

各分支状态的转移由各自条件选择执行，不能同时进行多条分支，一次只能执行一条分支。

某一送料系统由一台小车送料，其控制过程如图 6-28 所示。

当按下起动按钮 SB1 (X1) 时，小车从 A 点出发前进 (Y1) 到 B 点 (SQ2)，在 B 点停留 5s，然后后退 (Y2) 回到 A 点 (SQ1) 停止；当按下起动按钮 SB2 (X2) 时，小车从 A 点出发到 C 点 (SQ3)，在 C 点后停留 5s，然后回到 A 点 (SQ1) 停止。其流程图如图 6-29 所示。

选择性分支流程图特点：分支时先分支后条件，汇合时是先条件后汇合，各分支不能同时进行。

并行性分支流程图特点：分支时先条件后分支，汇合时是先汇合后条件，各分支同时进行。

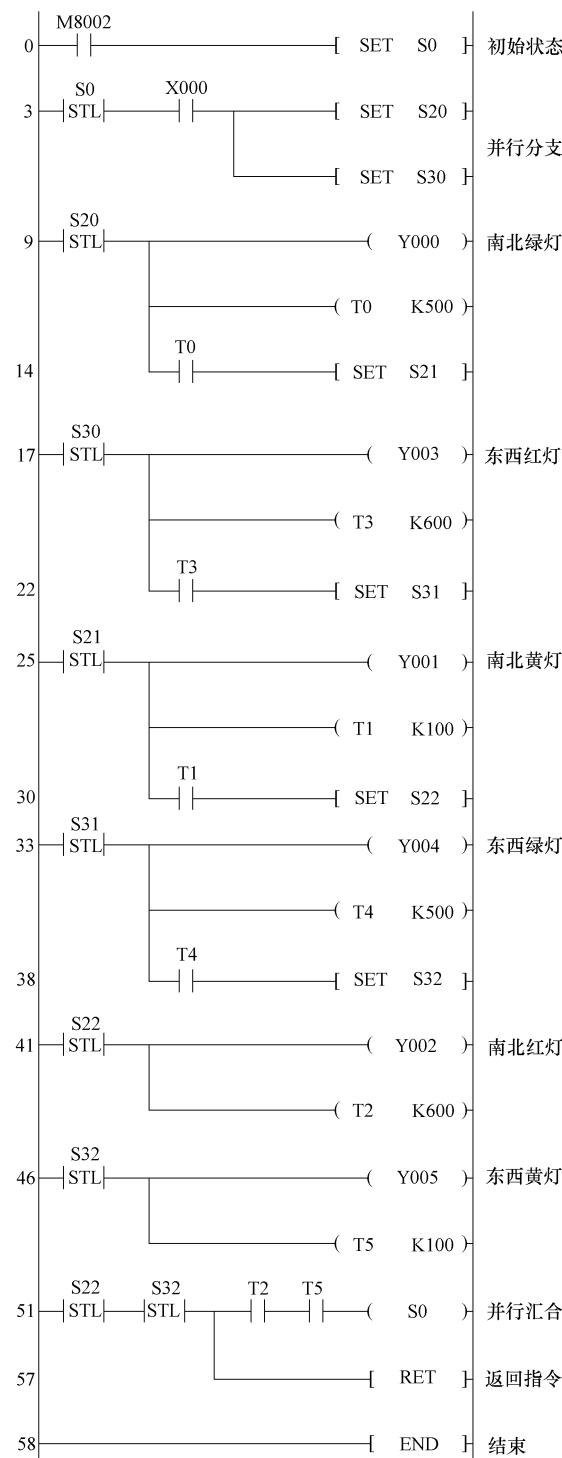


图 6-27 信号灯梯形图

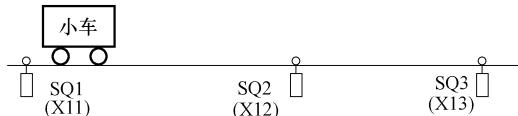


图 6-28 运料小车动作过程

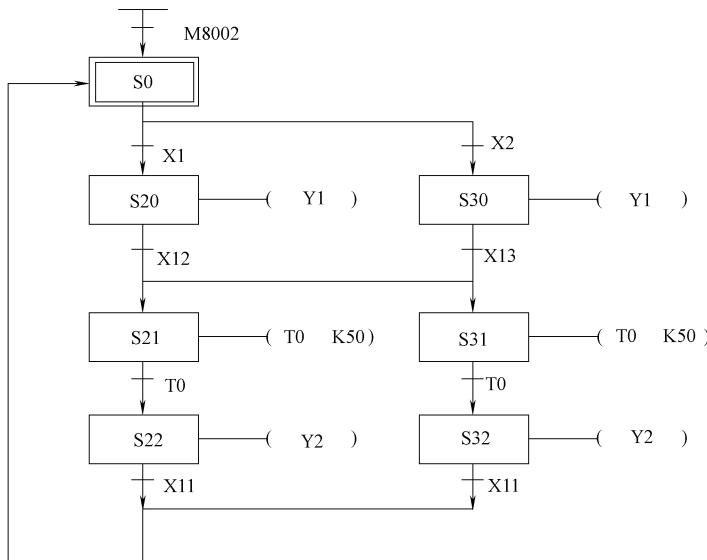


图 6-29 运料小车流程图

6.6 PLC 应用指令基本知识

PLC 的基本指令主要用于逻辑功能处理，步进顺控指令用于顺序逻辑控制系统。但在工业自动化控制领域中，许多场合需要进行数据运算和特殊处理。因此，PLC 中引入了功能指令（或称为应用指令）。功能指令主要用于数据的传送、运算、变换及程序控制等功能，其指令格式如图 6-30 所示。

功能指令的使用说明如下：

- (1) FX2N 系列 PLC 功能指令编号为 FNC0 ~ FNC246，实际有 130 个功能指令。
- (2) 功能指令分为 16 位指令和 32 位指令。功能指令默认是 16 位指令，加上前缀 D 是 32 位指令，例如 DMOV。
- (3) 功能指令默认是连续执行方式，加上后缀 P 表示为脉冲执行方式，例如 MOVP。
- (4) 多数功能指令有操作数。执行指令后其内容不变的称为源操作数，用 [S.] 表示。被刷新内容的称为目标操作数，用 [D.] 表示。

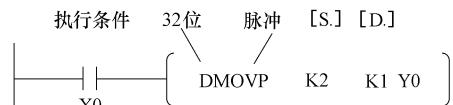


图 6-30 应用指令格式

6.6.1 部分功能指令简介

1. 位元件与字元件

只具有接通（1）或断开（0）两种状态的元件称为位元件。字元件是位元件的有序集

合。FX 系列的字元件最少 4 位，最多 32 位。常用字元件见表 6-6。

表 6-6 字元件范围

符 号	表 示 内 容
KnX	输入继电器位元件组合的字元件,也称为输入位组件
KnY	输出继电器位元件组合的字元件,也称为输出位组件
KnM	辅助继电器位元件组合的字元件,也称为辅助位组件
KnS	状态继电器位元件组合的字元件,也称为状态位组件
T	定时器 T 的当前值寄存器
C	计数器 C 的当前值寄存器
D	数据寄存器
V,Z	变址寄存器

多个位元件按一定规律的组合叫位组件，例如输出位组件 KnY0，K 表示十进制，n 表示组数，n 的取值为 1~8，每组有 4 个位元件，Y0 是输出位组件的最低位。KnY0 的全部组合及适用指令范围见表 6-7。

表 6-7 KnY0 的全部组合及适用指令范围

KnY0	包含的位元件最高位 ~ 最低位	位元件个数
K1Y0	Y3 ~ Y0	4
K2Y0	Y7 ~ Y0	8
K3Y0	Y13 ~ Y0	12
K4Y0	Y17 ~ Y0	16
K5Y0	Y23 ~ Y0	20
K6Y0	Y27 ~ Y0	24
K7Y0	Y33 ~ Y0	28
K8Y0	Y37 ~ Y0	32

2. 传送类指令 (MOV SMOV CMOV BMOV FMOV)

(1) 传送指令的功能是将源数据传送到指定的目标。如图 6-31 所示，当 X0 接通 (X0 = 1) 时，源操作数 [S.] 中的数据 D10 传送到目标操作元件 D12 中。当指令执行时，数据 D10 自动转换成二进制数。当 X0 断开时，指令不执行，数据保持不变。

使用应用 MOV 指令时应注意：

1) 源操作数可取所有数据类型，目标操作数可以是 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。

2) 16 位运算时占 5 个程序步，32 位运算时则占 9 个程序步。

(2) 取反传送指令 (CML) 将源操作数元件的数据逐位取反并传送到指定目标。如图 6-32 所示，当 X0 为 ON 时，执行 CML，将 D0 的低 4 位取反后传送到 Y3 ~ Y0 中。



图 6-31 传送指令格式



图 6-32 取反传送指令格式

使用取反传送指令 CML 时应注意：

- 1) 源操作数可取所有数据类型，目标操作数可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z，若源数据为常数 K，则该数据会自动转换为二进制数。

- 2) 16位运算占5个程序步, 32位运算占9个程序步。

(3) 块传送指令 (BMOV) 将源操作数指定元件开始的 n 个数据组成数据块传送到指定的目标。如图 6-33 所示。

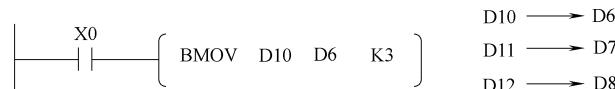


图 6-33 块传送指令格式

使用块传送指令时应注意：

- 1) 源操作数可取 KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D 和文件寄存器，目标操作数可取 KnT、KnM、KnS、T、C 和 D。

- 2) 只有 16 位操作，占 7 个程序步。

- 3) 如果元件号超出允许范围, 数据则仅传送到允许范围的元件。

(4) 多点传送指令 (FMOV) 的功能是将源操作数中的数据传送到指定目标开始的 n 个元件中，传送后 n 个元件中的数据完全相同。如图 6-34 所示，当 X0 为 ON 时，把 K0 传送到 D0 ~ D9 中。



图 6-34 多点传送指令格式

使用多点传送指令 FMOV 时应注意：

- 1) 源操作数可取所有的数据类型，目标操作数可取 KnX、KnM、KnS、T、C、和 D。
 - 2) 16 位操作占 7 的程序步，32 位操作则占 13 个程序步。
 - 3) 如果元件号超出允许范围，数据仅送到允许范围的元件中。

例.

有 8 盏指示灯，控制要求：当按键 X0 接通时，全部灯亮；当 X1 接通时，奇数灯亮；当 X2 接通时，偶数灯亮；当 X3 接通时，全部灯灭。试用数据传送指令编写程序。

根据题目要求，其输入输出对应关系见表 6-8。

表 6-8 指示灯输入输出对应关系表

梯形图如图 6-35 所示。

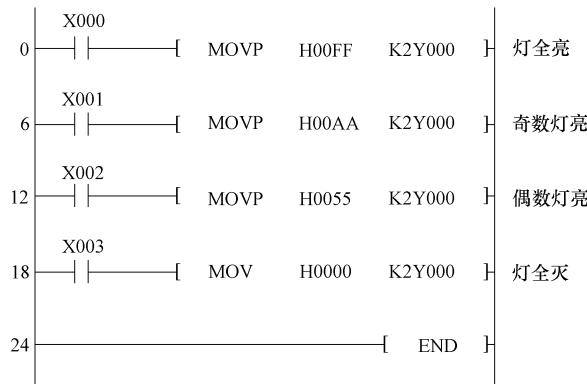


图 6-35 指示灯梯形图

3. 比较指令 (CMP)

(1) 比较指令是将源操作数 [S1.] 和 [S2.] 的数据进行比较, 然后将目标操作数 [D.] 进行相应的操作。如图 6-36 所示, X0 = 1 时, 将 K10 的数值与 D12 进行比较。若 D12 小于 K10, [D.] 指定的 M0 自动置 1 (即 Y0 接通); 若 D12 等于 K10, M1 自动置 1 (即 Y1 接通); 若 D12 大于 K10, M2 自动置 1 (即 Y2 接通)。在 X0 断开, 即不执行 CMP 指令时, M0 ~ M2 保持 X0 断开前的状态。因此若要清除比较结果需要用复位 RST 或 ZRST 指令。

(2) 区间比较指令 (ZCP) 执行时对源操作数 [S.] 与 [S1.] 和 [S2.] 的内容进行比较, 并将比较结果送到目标操作数 [D.] 中。如图 6-37 所示, 当 X0 为 ON 时, 比较 C0 当前值与 K10 和 K20, 将结果送 M0、M1、M2 中。X0 为 OFF, 则 ZCP 不执行, M0、M1、M2 不变。

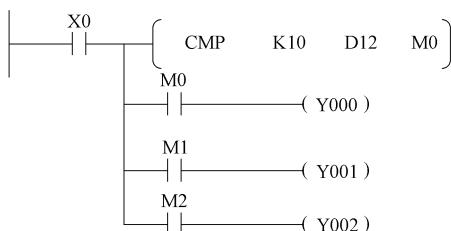


图 6-36 比较指令格式

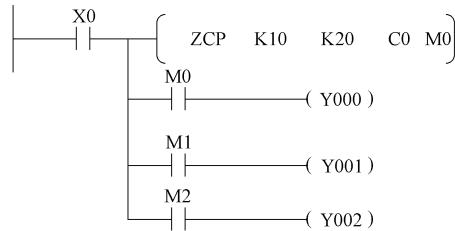


图 6-37 区间比较指令格式

使用比较指令 CMP/ZCP 时应注意:

- 1) [S1.], [S2.] 可取任意数据格式, 目标操作数 [D.] 可取 Y, M 和 S。
- 2) 使用 ZCP 时, [S2.] 的数值不能小于 [S1.]。
- 3) 所有的源数据都被看成二进制值处理。

4. 加 1 和减 1 指令

INC 和 DEC 指令分别是当条件满足时将指定元件的内容加 1 或减 1。如图 6-38 所示, 当 X0 为 ON 时, (D0) + 1 → (D0); 当 X1 为 ON 时, (D2) - 1 → (D2)。若指令是连续指令, 则每个扫描周期均作一次加 1 或减 1 运算。图 6-38 为加 1 和减 1 指令的使用。

使用加 1 和减 1 指令时应注意:

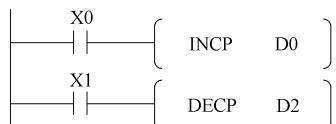


图 6-38 加 1 和减 1 指令格式

- 1) 指令的操作数可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。
- 2) 当进行 16 位操作时为 3 个程序步，32 位操作时为 5 个程序步。
- 3) 在 INC 运算时，如数据为 16 位，则由 +32767 再加 1 变为 -32768，但标志不置位；同样，32 位运算由 +2147483647 再加 1 就变为 -2147483648 时，标志也不置位。
- 4) 在 DEC 运算时，16 位运算 -32768 减 1 变为 +32767，且标志不置位；32 位运算由 -2147483648 减 1 变为 =2147483647，标志也不置位。

5. 区间复位指令

区间复位指令 [ZRST (P)] 是将指定范围内的同类元件成批复位。如图 6-39 所示，当 X0 由 OFF→ON 时，状态元件 S20～S30 成批复位。

使用区间复位指令时应注意：

- 1) [D1.] 和 [D2.] 可取 Y, M, S, T, C, D，且应为同类元件，同时 [D1.] 的元件号应小于 [D2.] 指定的元件号，若 [D1.] 的元件号大于 [D2.] 元件号，则只有 [D1.] 指定元件被复位。

- 2) ZRST 指令只有 16 位处理，占 5 个程序步，但 [D1.], [D2.] 也可以指定 32 位计数器。



图 6-39 成批复位指令格式

6.6.2 运料小车控制实例

在自动生产线上的运料小车如图 6-40 所示，其由一台三相异步电动机拖动，电动机正转时小车右行；电动机反转时小车左行。在生产线上有 5 个编码位供小车停靠，在每一个站点安装一个行程开关以检测小车是否在该站，对小车控制除了用起动、停止按钮外，在每个站点还分别设置一个呼叫按钮。

(1) 其控制要求如下：

- 1) 按下起动按钮，系统开始工作，按下停止按钮，系统停止工作；
- 2) 当小车当前所处的位置编码小于呼叫按钮的编码时，小车右行，运行到呼叫站点时停止；
- 3) 当小车当前所处的位置编码大于呼叫按钮的编码时，小车左行，运行到呼叫站点时停止；
- 4) 当小车当前所处的位置编码等于呼叫按钮的编码时，小车不动。

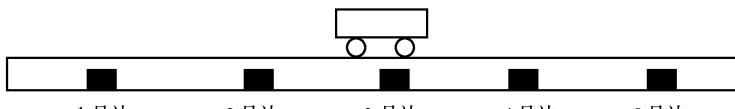


图 6-40 运料小车示意图

(2) I/O 分配表见表 6-9。

表 6-9 I/O 分配表

输入	说 明	输出及状态	说 明
X000	起动按钮	Y000	电动机反转
X001	停止按钮	Y001	电动机正转
X002	1 号站呼叫按钮	M0	小车运行停止
X003	2 号站呼叫按钮	M1	1 号站呼叫
X004	3 号站呼叫按钮	M2	2 号站呼叫
X005	4 号站呼叫按钮	M3	3 号站呼叫
X006	5 号站呼叫按钮	M4	4 号站呼叫

(续)

输入	说 明	输出及状态	说 明
X007	1号站行程开关	M5	5号站呼叫
X010	2号站行程开关	M6	小车所处站编码大于呼叫编码
X011	3号站行程开关	M7	小车所处站编码等于呼叫编码
X012	4号站行程开关	M8	小车所处站编码小于呼叫编码
X013	5号站行程开关		

(3) 程序梯形图如图 6-41 所示。

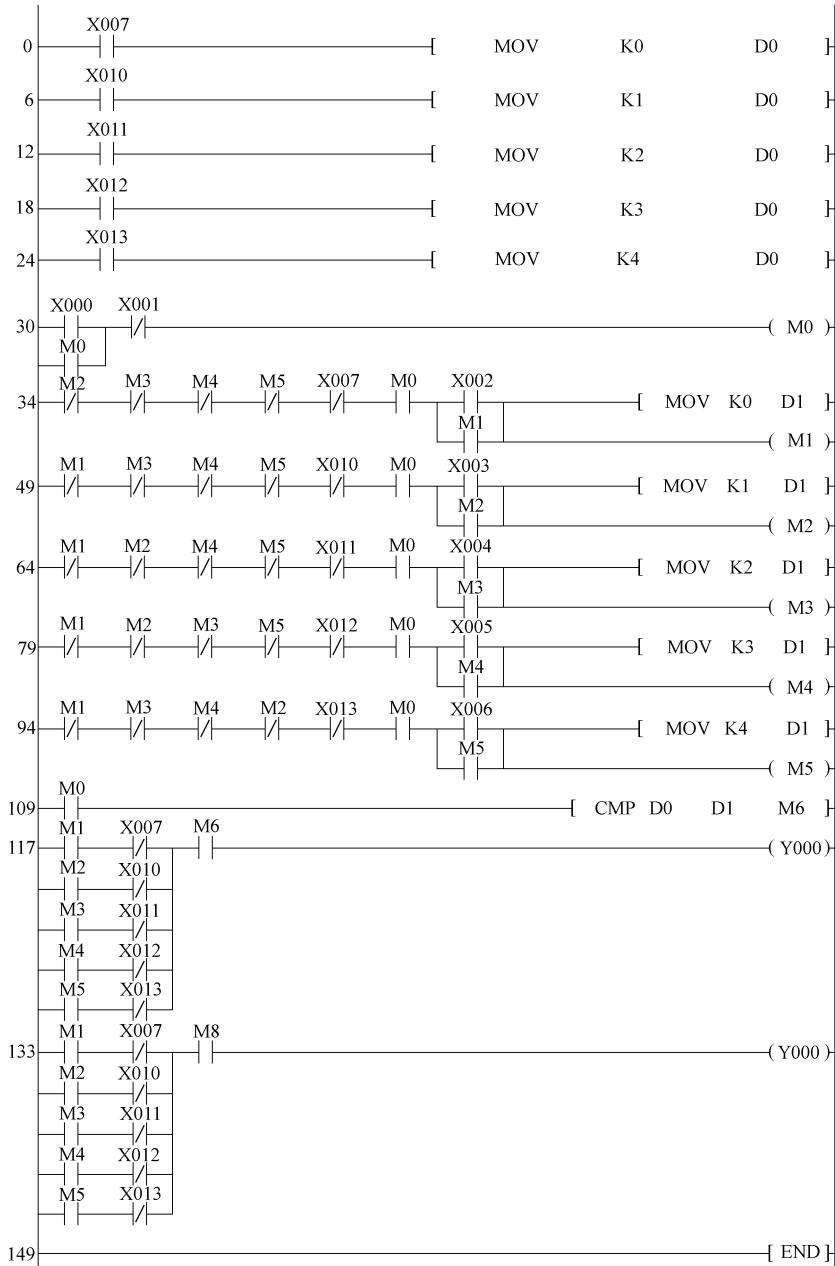


图 6-41 梯形图

程序第 0 ~ 24 行是传送当前小车站号给 D0；程序第 30 行是起动小车；程序第 34 ~ 94 是传送呼叫站号给 D1；程序第 109 行是用于比较小车当前站号与呼叫站号；程序第 117 ~ 133 行是比较输出，第 117 行表示小车从左向右运动，第 133 行表示小车从右向左运动。

6.7 FX 系列 PLC 编程软件的应用

FXGPWIN 软件是三菱公司专门为三菱 FX 系列 PLC 设计的编程设计。该编程软件的基本功能是协助用户完成创建用户程序、修改和编辑已有用户程序。

1. 运行软件

在桌面上双击 PLC 编程软件快捷方式图标 ，出现 FXGPWIN 的初始界面（见图 6-42）。

2. 输入程序

(1) 单击新建文件的图标后，出现 PLC 类型设置界面（见图 6-43）。



图 6-42 FXGPWIN 的初始界面



图 6-43 PLC 类型设置界面

(2) 选择 PLC 的机型，如 FX2N，出现编程界面（见图 6-44）。

(3) 输入一段程序后，有程序的部分变为灰色（见图 6-45）。

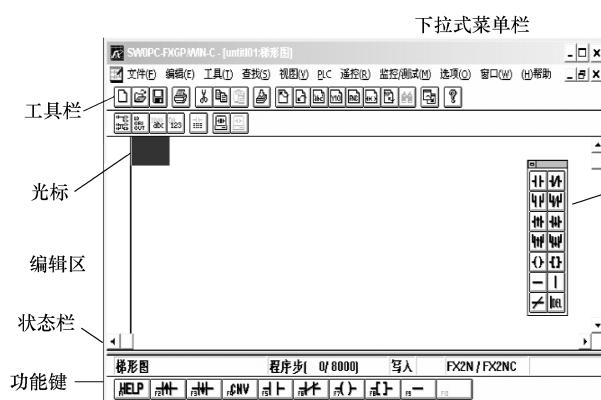


图 6-44 编程界面



图 6-45 输入程序

(4) 单击转换图标进行转换后会出现如图 6-46 所示界面。

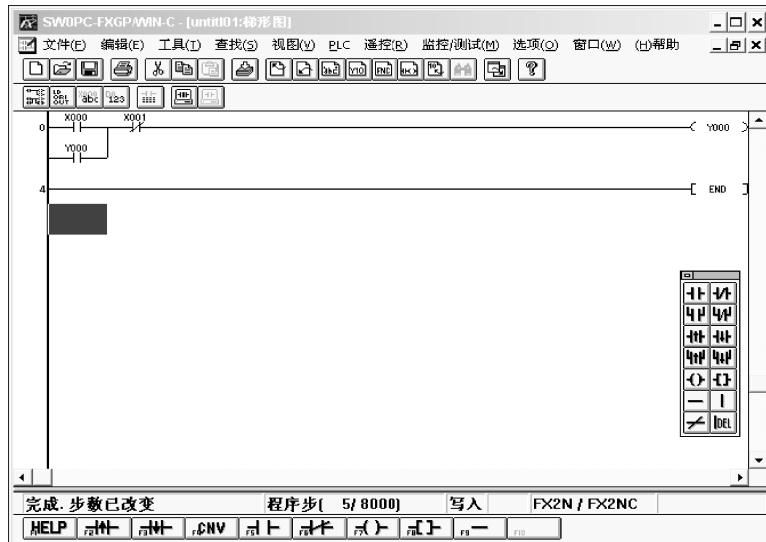


图 6-46 转换后程序界面

(5) 传送程序。程序编辑完成后，传送到 PLC 中运行，单击菜单栏中的“PLC”菜单，在下拉式菜单中再选“传送”及“写出”即可，如图 6-47 所示。



图 6-47 传送程序

(6) 设置步数。在“PLC 程序写入”对话框中，选“范围设置”，在“终止步”里输入步数，然后单击“确认”，如图 6-48 所示。

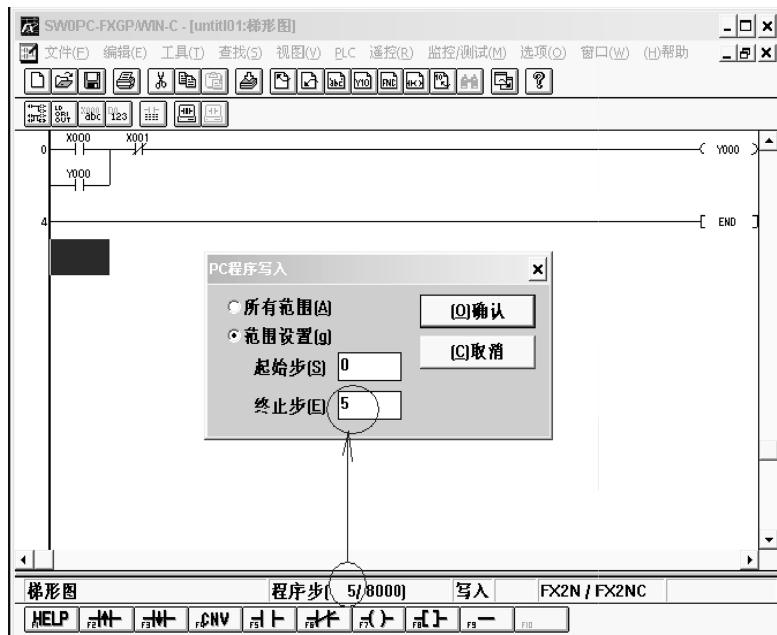


图 6-48 设置步数

程序将自动的传送到 PLC 中，程序传送结束（见图 6-49）。

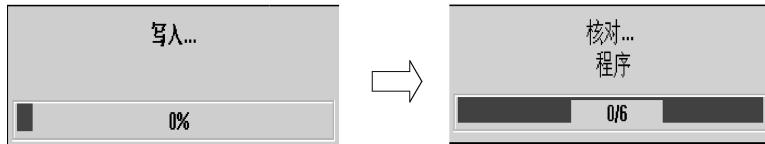


图 6-49 程序传送

本 章 小 结

本章主要包括以下内容：

可编程序控制器是一种专门为在工业环境下使用而设计的数字运算操作的电子装置。它采用了可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令，并通过数字的或模拟的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。

PLC 具有可靠性高，抗干扰能力强、功能完善、适用性强等特点。其主要由 CPU、存储器、I/O 单元、电源、I/O 接口等部分组成，基本编程软元件有输入继电器、输出继电器、状态元件、定时器、计数器、数据寄存器等，采用循环扫描工作方式。

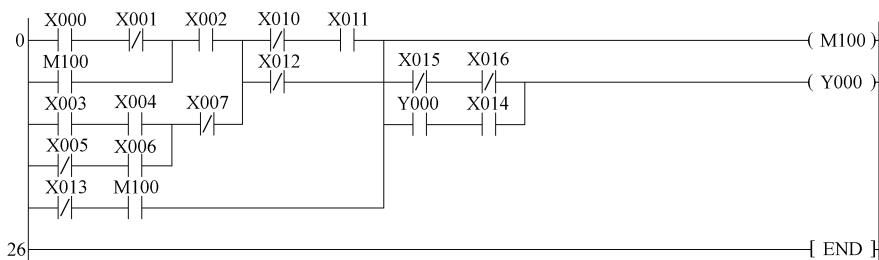
PLC 的指令有基本指令、步进指令和功能指令，各种指令在使用时有一定的规则和方法，其编程语言有指令表、梯形图等。

介绍了 PLC 编程软件的使用方法。

习 题

- PLC 主要有哪些组成部分？

2. PLC 主要有哪些软元件?
3. 写出所示梯形图对应的指令表。



4. 一段完整的程序，若结尾没有 END 指令，会产生什么样的结果？
5. 有一个指示灯，控制要求为：按下起动按钮后，亮 5s，然后熄灭 5s，重复 5 次后停止工作，试设计梯形图并写出指令表。
6. 有两台电动机 M1 和 M2，要求两台电动机可以同时起动和停止。试设计程序。
7. 设计一个三组智力竞赛抢答器：当某竞赛者按下按钮时，该台指示灯亮；指示灯亮后，主持人按下复位按钮后，指示灯熄灭；要求各组具有互锁功能。
8. 有三台电动机，其控制要求如下：
 - (1) 按下起动按钮后，M1 起动，10min 后，M2 自行起动，再 10min 后，M3 自行起动。
 - (2) 按下停止按钮后，M3 停止运行，5 分钟后，M2 自行停止工作，再过 5 分钟后，M1 自行停止工作。
 要求运用步进指令编程。
9. 有四台电动机，要求每隔 1h 依次起动一台，每台电动机运行 10h 后自行停止，运行中可通过停止按钮随时停机。试设计程序。
10. 用功能指令编写三相异步电动机的星—三角控制电路。



附录 三菱 FX 系列 PLC 功能指令一览表

分类	FNC NO.	指令助记符	功能说明	对应不同型号的 PLC				
				FX0S	FXON	FX1S	FX1N	FX2N FX2NC
程序流程	00	CJ	条件跳转	✓	✓	✓	✓	✓
	01	CALL	子程序调用	✗	✗	✓	✓	✓
	02	SRET	子程序返回	✗	✗	✓	✓	✓
	03	IRET	中断返回	✓	✓	✓	✓	✓
	04	EI	开中断	✓	✓	✓	✓	✓
	05	DI	关中断	✓	✓	✓	✓	✓
	06	FEND	主程序结束	✓	✓	✓	✓	✓
	07	WDT	监视定时器刷新	✓	✓	✓	✓	✓
	08	FOR	循环的起点与次数	✓	✓	✓	✓	✓
	09	NEXT	循环的终点	✓	✓	✓	✓	✓
传送与比较	10	CMP	比较	✓	✓	✓	✓	✓
	11	ZCP	区间比较	✓	✓	✓	✓	✓
	12	MOV	传送	✓	✓	✓	✓	✓
	13	SMOV	位传送	✗	✗	✗	✗	✓
	14	CML	取反传送	✗	✗	✗	✗	✓
	15	BMOV	成批传送	✗	✓	✓	✓	✓
	16	FMOV	多点传送	✗	✗	✗	✗	✓
	17	XCH	交换	✗	✗	✗	✗	✓
	18	BCD	二进制转换成 BCD 码	✓	✓	✓	✓	✓
	19	BIN	BCD 码转换成二进制	✓	✓	✓	✓	✓
算术与逻辑运算	20	ADD	二进制加法运算	✓	✓	✓	✓	✓
	21	SUB	二进制减法运算	✓	✓	✓	✓	✓
	22	MUL	二进制乘法运算	✓	✓	✓	✓	✓
	23	DIV	二进制除法运算	✓	✓	✓	✓	✓
	24	INC	二进制加 1 运算	✓	✓	✓	✓	✓
	25	DEC	二进制减 1 运算	✓	✓	✓	✓	✓
	26	WAND	字逻辑与	✓	✓	✓	✓	✓
	27	WOR	字逻辑或	✓	✓	✓	✓	✓
	28	WXOR	字逻辑异或	✓	✓	✓	✓	✓
	29	NEG	求二进制补码	✗	✗	✗	✗	✓

(续)

分类	FNC NO.	指令助记符	功能说明	对应不同型号的 PLC				
				FX0S	FX0N	FX1S	FX1N	FX2N FX2NC
循环与移位	30	ROR	循环右移	×	×	×	×	√
	31	ROL	循环左移	×	×	×	×	√
	32	RCR	带进位右移	×	×	×	×	√
	33	RCL	带进位左移	×	×	×	×	√
	34	SFTR	位右移	√	√	√	√	√
	35	SFTL	位左移	√	√	√	√	√
	36	WSFR	字右移	×	×	×	×	√
	37	WSFL	字左移	×	×	×	×	√
	38	SFWR	FIFO(先入先出)写入	×	×	√	√	√
	39	SFRD	FIFO(先入先出)读出	×	×	√	√	√
数据处理	40	ZRST	区间复位	√	√	√	√	√
	41	DECO	解码	√	√	√	√	√
	42	ENCO	编码	√	√	√	√	√
	43	SUM	统计 ON 位数	×	×	×	×	√
	44	BON	查询位某状态	×	×	×	×	√
	45	MEAN	求平均值	×	×	×	×	√
	46	ANS	报警器置位	×	×	×	×	√
	47	ANR	报警器复位	×	×	×	×	√
	48	SQR	求平方根	×	×	×	×	√
	49	FLT	整数与浮点数转换	×	×	×	×	√
高速处理	50	REF	输入输出刷新	√	√	√	√	√
	51	REFF	输入滤波时间调整	×	×	×	×	√
	52	MTR	矩阵输入	×	×	√	√	√
	53	HSCS	比较置位(高速计数用)	×	√	√	√	√
	54	HSCR	比较复位(高速计数用)	×	√	√	√	√
	55	HSZ	区间比较(高速计数用)	×	×	×	×	√
	56	SPD	脉冲密度	×	×	√	√	√
	57	PLSY	指定频率脉冲输出	√	√	√	√	√
	58	PWM	脉宽调制输出	√	√	√	√	√
	59	PLSR	带加减速脉冲输出	×	×	√	√	√
方便指令	60	IST	状态初始化	√	√	√	√	√
	61	SER	数据查找	×	×	×	×	√
	62	ABSD	凸轮控制(绝对式)	×	×	√	√	√

(续)

分类	FNC NO.	指令助记符	功能说明	对应不同型号的 PLC				
				FX0S	FX0N	FX1S	FX1N	FX2N FX2NC
方便指令	63	INCD	凸轮控制(增量式)	×	×	√	√	√
	64	TTMR	示教定时器	×	×			√
	65	STMR	特殊定时器	×	×	×	×	√
	66	ALT	交替输出	√	√	√	√	√
	67	RAMP	斜波信号	√	√	√	√	√
	68	ROTC	旋转工作台控制	×	×	×	×	√
	69	SORT	列表数据排序	×	×	×	×	√
外部I/O设备	70	TKY	10 键输入	×	×	×	×	√
	71	HKY	16 键输入	×	×	×	×	√
	72	DSW	BCD 数字开关输入	×	×	√	√	√
	73	SEGD	七段码译码	×	×	×	×	√
	74	SEGL	七段码分时显示	×	×	√	√	√
	75	ARWS	方向开关	×	×	×	×	√
	76	ASC	ASCII 码转换	×	×	×	×	√
	77	PR	ASCII 码打印输出	×	×	×	×	√
	78	FROM	BFM 读出	×	√	×	√	√
	79	TO	BFM 写入	×	√	×	√	√
外围设备	80	RS	串行数据传送	×	√	√	√	√
	81	PRUN	八进制位传送(#)	×	×	√	√	√
	82	ASCI	十六进制数转换成 ASCII 码	×	√	√	√	√
	83	HEX	ASCII 码转换成 16 进制数	×	√	√	√	√
	84	CCD	校验	×	√	√	√	√
	85	VRRD	电位器变量输入	×	×	√	√	√
	86	VRSC	电位器变量区间	×	×	√	√	√
	87	—	—			√	√	√
	88	PID	PID 运算	×	×	√	√	√
	89	—	—					√
浮点数运算	110	ECMP	二进制浮点数比较	×	×	×	×	√
	111	EZCP	二进制浮点数区间比较	×	×	×	×	√
	118	EBCD	二进制浮点数→十进制浮点数	×	×	×	×	√
	119	EBIN	十进制浮点数→二进制浮点数	×	×	×	×	√
	120	EADD	二进制浮点数加法	×	×	×	×	√
	121	EUSB	二进制浮点数减法	×	×	×	×	√
	122	EMUL	二进制浮点数乘法	×	×	×	×	√

(续)

分类	FNC NO.	指令助记符	功能说明	对应不同型号的 PLC				
				FX0S	FXON	FX1S	FX1N	FX2N FX2NC
浮点数运算	123	EDIV	二进制浮点数除法	×	×	×	×	√
	127	ESQR	二进制浮点数开平方	×	×	×	×	√
	129	INT	二进制浮点数→二进制整数	×	×	×	×	√
	130	SIN	二进制浮点数 sin 运算	×	×	×	×	√
	131	COS	二进制浮点数 cos 运算	×	×	×	×	√
	132	TAN	二进制浮点数 tan 运算	×	×	×	×	√
	147	SWAP	高低字节交换	×	×	×	×	√
定位	155	ABS	ABS 当前值读取	×	×	√	√	×
	156	ZRN	原点回归	×	×	√	√	×
	157	PLSY	可变速的脉冲输出	×	×	√	√	×
	158	DRV1	相对位置控制	×	×	√	√	×
	159	DRV2	绝对位置控制	×	×	√	√	×
时钟运算	160	TCMP	时钟数据比较	×	×	√	√	√
	161	TZCP	时钟数据区间比较	×	×	√	√	√
	162	TADD	时钟数据加法	×	×	√	√	√
	163	TSUB	时钟数据减法	×	×	√	√	√
	166	TRD	时钟数据读出	×	×	√	√	√
	167	TWR	时钟数据写入	×	×	√	√	√
	169	HOUR	计时仪	×	×	√	√	
外围设备	170	GRY	二进制数→格雷码	×	×	×	×	√
	171	GBIN	格雷码→二进制数	×	×	×	×	√
	176	RD3A	模拟量模块(FXON-3A)读出	×	√	×	√	×
	177	WR3A	模拟量模块(FXON-3A)写入	×	√	×	√	×
触点比较	224	LD =	(S1) = (S2) 时起始触点接通	×	×	√	√	√
	225	LD >	(S1) > (S2) 时起始触点接通	×	×	√	√	√
	226	LD <	(S1) < (S2) 时起始触点接通	×	×	√	√	√
	228	LD <>	(S1) <> (S2) 时起始触点接通	×	×	√	√	√
	229	LD ≤	(S1) ≤ (S2) 时起始触点接通	×	×	√	√	√
	230	LD ≥	(S1) ≥ (S2) 时起始触点接通	×	×	√	√	√
	232	AND =	(S1) = (S2) 时串联触点接通	×	×	√	√	√
	233	AND >	(S1) > (S2) 时串联触点接通	×	×	√	√	√
	234	AND <	(S1) < (S2) 时串联触点接通	×	×	√	√	√
	236	AND <>	(S1) <> (S2) 时串联触点接通	×	×	√	√	√
	237	AND ≤	(S1) ≤ (S2) 时串联触点接通	×	×	√	√	√

(续)

分类	FNC NO.	指令助记符	功能说明	对应不同型号的 PLC				
				FX0S	FX0N	FX1S	FX1N	FX2N FX2NC
触点比较	238	AND \geq	(S1) \geq (S2) 时串联触点接通	×	×	√	√	√
	240	OR =	(S1) = (S2) 时并联触点接通	×	×	√	√	√
	241	OR >	(S1) > (S2) 时并联触点接通	×	×	√	√	√
	242	OR <	(S1) < (S2) 时并联触点接通	×	×	√	√	√
	244	OR < >	(S1) < > (S2) 时并联触点接通	×	×	√	√	√
	245	OR \leq	(S1) \leq (S2) 时并联触点接通	×	×	√	√	√
	246	OR \geq	(S1) \geq (S2) 时并联触点接通	×	×	√	√	√

参 考 文 献

- [1] 韩雪涛. 常用仪器仪表使用与维护 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [2] 刘小春. 电机与拖动 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [3] 吴灏, 冯宁. 电机与机床电气控制 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [4] 施振金. 电机与电气控制 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [5] 汤天浩. 电机与拖动基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 周元一. 电机与电气控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 刘结成, 等. 电工实操考核技术 [M]. 广州: 广东经济出版社, 1998.
- [8] 郁建平. 机电控制技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 张伟林. 电气控制与 PLC 应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [10] 史国生. 电气控制与可编程控制器技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [11] 郭艳萍. 电气控制与 PLC 应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

机械工业出版社相关图书

序号	书名	书号	定价
1	电工实用技能手册(第2版)	32980-0	98
2	常用电工技能一本通	34515-2	29.80
3	电工技能迅速入门	27400-1	28
4	电工技能随身读	35768-1	28
5	电工技能学用速成(第2版)	35019-4	20
6	电工技能一点通	19044-8	20
7	电工入门一点通	30405-0	28
8	电工维修一本通	33191-9	29.80
9	电工安装一本通	33192-4	29.80
10	电工口诀(第3版)	29416-0	24.80
11	电工技能口诀	30894-2	19.80
12	电工数据口诀	27185-7	19.80
13	电工安全禁忌口诀	33015-8	20
14	电力施工及用电安全口诀	35043-9	19.8
15	农电安规速记口诀	26764-5	10
16	电工安全一点通	28552-6	18
17	图表速学电工技能	29739-0	29.80
18	图说电工识图入门	35631-8	29.80
19	图说电工实用技能入门	35722-4	39.80
20	图说万用表使用入门	35279-2	33
21	袖珍简明电工手册	32981-7	10
22	低压电工入门问答	36201-2	28
23	高压电工入门问答	36200-5	28
24	维修电工入门问答	36406-1	28
25	电工实用电路300例	28615-8	19
26	实用电路手册	28151-1	88
27	实用电路速学速用宝典	32744-8	99
28	中国十大行业常用电路	38351-5	28
29	从零起步轻松学电动自行车养护与修理问答	35057-6	18
30	从零起步轻松学家用电器检修方法与拆修技术问答	35125-2	18
31	从零起步轻松学太阳能热水器养护与修理问答	36365-1	19.80
32	家用太阳能热水器使用与维修200问	35330-0	20
33	漫话3G手机	29403-0	23
34	生活电子制作图说精解	32888-9	49.80
35	电子电路识图技能一点通	24872-9	25
36	电子技术一点通	26114-8	35

以上图书在全国书店均有销售,您也可在中国科技金书网(www.golden-book.com,电话:010-88379203)联系购书事宜。

一点通

DIANQI KONGZHI YIDIANTONG



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 978-7-111-40121-6



9 787111 401216 >

定价: 38.00元

上架指导 工业技术/电气工程

ISBN 978-7-111-40121-6

策划编辑◎牛新国 / 封面设计◎马精明