

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

电气控制与PLC 应用技术

武丽 主编

Electrical Control and PLC
Application Technology



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)

电气控制与 PLC 应用技术

主 编 武 丽
参 编 张春峰 姜官武

机械工业出版社

本书从实际工程应用和便于学生更易理解和掌握的角度出发,分别介绍了电气控制系统和 PLC 系统。第 1~2 章介绍了电气控制系统中常用的低压电器、典型控制电路及其设计方法;第 3~8 章讲解了 PLC 的原理及工作过程,以西门子 S7-200 系列 PLC 为主,以其原理和指令为基础,给出大量的实例,便于学生对指令及基本原理的理解,并在系统设计中给出综合的工程应用案例。编写的编程软件和实验系统涉及 S7-200 系列 PLC 和松下 FPO 系列 PLC,通过两种机型的对比分析,让学生学会和掌握不同机型的学习方法,为今后的工程应用打下良好的基础。

本书的编写教师长期从事该课程的教学和实践工作,对电气控制技术与 PLC 的工程应用也开展了大量的工作,具有较好的理论基础和工程应用经验。本书可作为普通高等院校自动化类、电气类、机械类等专业的教材,也可供从事电气控制技术工作的工程技术人员参考。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载,或发邮件到 jinacmp@vip.163.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制与 PLC 应用技术/武丽主编. —北京:机械工业出版社,2018.6
“十三五”国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业
ISBN 978-7-111-59267-9

I. ①电… II. ①武… III. ①电气控制-高等学校-教材②PLC 技术-高等学校-教材 IV. ①TM571.2 ②TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 038369 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:吉玲 责任编辑:吉玲 韩静 刘丽敏

责任校对:樊钟英 封面设计:鞠杨

责任印制:李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·390 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59267-9

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书从实际工程应用和便于学生更易理解和掌握的角度出发,分别介绍了电气控制系统中常用的低压电器、典型控制电路及其设计方法;讲解了 PLC 的原理及工作过程,并以西门子 S7-200 系列 PLC 为主,给出大量的实例,便于学生对指令及基本原理的理解,并在系统设计中给出综合的工程应用案例。和其他同类教材相比,本书主要有以下特点:

1) 对传统的电气控制系统内容进行了较大幅度的删减,内容精简,适合于目前大多数高校课程多而学时少的教学需要。

2) 在常用低压控制电器的内容中,结合 PLC 控制系统的设计思路,按照输入设备和输出设备的分类方式讲解,便于学生对于两个系统之间异同的理解。

3) PLC 控制系统中的应用实例及主要素材均来源于教师多年的实践积累,实例翔实且学生易于理解。

4) 增加了实验系统部分,让学生能在掌握一种机型 PLC 的基础上,快速学习和掌握其他 PLC 机型的方法,更好地融会贯通。

5) 内容定位于理论以够用为主,加强应用技术能力的培养。在注重讲解基本概念、基本原理和分析方法的同时,通过生产实例强化实际应用能力的训练,提高分析问题与解决问题的能力。

本书可作为普通高等院校自动化类、电气类等相关专业的教材,也可作为大专院校、网教及自考的自动控制、电气控制技术、机电一体化及相关专业的“电气控制与 PLC 应用技术”或类似课程的教材,对于从事和电气控制技术专业相关工作的工程技术人员也是一本很好的参考书。

本书由武丽担任主编,张春峰和姜官武任参编。书中各章节的分工为:第 1~3 章及附录由武丽编写,第 4 章、第 5 章和第 8 章由张春峰编写,第 6 章和第 7 章由姜官武编写。在此对所有为本书进行审阅并提供宝贵意见以及在编写过程中给予帮助和支持的各位朋友一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,殷切希望使用本书的师生及其他读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第1章 常用低压控制电器

1.1 电器的基本知识	3
1.1.1 电器的定义、分类及作用	3
1.1.2 电磁式电器的工作原理与 结构特点	5
1.2 常用低压控制电器中的输入设备和 输出设备	11
1.2.1 常用低压控制电器中的 输入设备	11
1.2.2 常用低压控制电器中的 输出设备	15
1.3 其他低压控制电器	21
1.3.1 低压断路器	21
1.3.2 熔断器	22
本章小结	23
练习与思考	23

第2章 继电器-接触器控制系统的基本电路

2.1 电气控制电路的绘制	24
2.1.1 常用电气设备图形符号及 文字符号	24
2.1.2 电气控制电路的绘制原则	24
2.2 三相笼型异步电动机的基本控制 电路	26
2.2.1 全压起动控制电路	26
2.2.2 正反转控制电路	28
2.2.3 多地点控制电路	29
2.2.4 自动循环控制电路	29
2.3 三相笼型异步电动机的减压起动 控制电路	30
2.3.1 星-三角形减压起动控制电路	30
2.3.2 自耦变压器减压起动控制电路	31
2.4 三相笼型异步电动机制动控制电路	32
2.4.1 反接制动控制电路	32

2.4.2 能耗制动控制电路	33
2.5 电气控制电路的设计	34
2.5.1 电气控制电路的基本内容	34
2.5.2 电气控制电路的设计方法	35
本章小结	39
练习与思考	39

第3章 可编程序控制器的基础知识

3.1 可编程序控制器的产生、定义及 发展	41
3.1.1 可编程序控制器的产生和定义	41
3.1.2 可编程序控制器的发展	42
3.1.3 我国 PLC 的发展状况	46
3.2 可编程序控制器的结构和工作原理	47
3.2.1 可编程序控制器的基本结构	47
3.2.2 PLC 的工作原理	50
3.3 PLC 的编程语言	52
3.4 PLC 的性能指标及分类	54
3.4.1 PLC 的性能指标	54
3.4.2 PLC 的分类	55
本章小结	56
练习与思考	57

第4章 S7-200 系列 PLC 系统配置

4.1 S7-200 系列 PLC 概述	58
4.2 S7-200 PLC 的硬件系统	59
4.2.1 硬件系统基本构成	59
4.2.2 主机结构及性能特点	59
4.2.3 数字量输入与数字量输出	63
4.2.4 I/O 点数的扩展及功能的扩展	65
4.3 S7-200 系列 PLC 的内部资源及 寻址方式	68
4.3.1 软元件(软继电器)	68
4.3.2 寻址方式	71
4.4 S7-200 系列 PLC 的编程语言与 程序结构	76
4.4.1 编程语言	76

4.4.2 基本概念	78	6.3.1 PLC 的工作环境	169
4.4.3 程序结构	78	6.3.2 PLC 的抗干扰措施	169
本章小结	79	6.3.3 PLC 系统的故障诊断	171
练习与思考	80	6.3.4 PLC 系统的试运行与维护	172
第 5 章 S7-200 系列 PLC 的指令系统	81	本章小结	173
5.1 基本逻辑指令及编程方法	81	练习与思考	173
5.1.1 标准触点的位逻辑指令	81	第 7 章 可编程序控制器的通信与网络	174
5.1.2 触点的立即指令	85	7.1 计算机通信方式与串行通信接口	174
5.1.3 逻辑堆栈指令	87	7.1.1 数据通信基础	174
5.1.4 定时器和计数器指令及应用举例	90	7.1.2 串行通信基础	175
5.1.5 顺序控制继电器指令及应用举例	103	7.1.3 网络概述	178
5.1.6 比较指令及应用举例	105	7.2 S7-200 系列 PLC 的通信及网络	180
5.1.7 取非和空操作指令	108	7.2.1 PLC 网络类型	180
5.2 功能指令及编程方法	108	7.2.2 通信协议	181
5.2.1 数据处理指令	109	7.2.3 S7-200 PLC 的通信协议	181
5.2.2 算术逻辑运算指令	114	7.2.4 通信设备	183
5.2.3 表功能指令	120	7.2.5 S7-200 系列 PLC 组建的几种典型网络	186
5.2.4 转换指令	123	7.2.6 通信参数的设置	188
5.2.5 程序控制指令	129	7.3 S7-200 PLC 网络通信指令	190
5.2.6 字符串指令	135	7.3.1 网络读/网络写指令	190
5.2.7 时钟指令	136	7.3.2 自由口指令及应用	192
5.2.8 中断程序与中断指令	138	7.4 S7-200 系列 PLC 自由口通信实例	197
5.2.9 高速处理指令	143	本章小结	200
5.2.10 PID 回路指令	150	练习与思考	201
5.3 梯形图编程的基本规则	155	第 8 章 PLC 的编程软件及实验系统	202
本章小结	157	8.1 S7-200 PLC 编程及仿真软件的使用	202
练习与思考	157	8.1.1 STEP 7-Micro/WIN 编程软件功能	202
第 6 章 PLC 控制系统的设计与应用	160	8.1.2 窗口组件及功能	202
6.1 PLC 控制系统的设计	160	8.1.3 建立程序	209
6.1.1 PLC 控制系统设计的基本原则	160	8.1.4 调试及运行监控	211
6.1.2 PLC 控制系统设计的基本内容	160	8.1.5 S7-200 仿真软件的使用	214
6.1.3 PLC 控制系统设计的一般步骤	161	8.2 松下 FP0 PLC 的软硬件平台	217
6.2 PLC 在工业控制中的应用举例	162	8.2.1 TVT-90E 可编程序控制器训练装置	217
6.2.1 多台电动机的顺序起停控制	162	8.2.2 FPWIN GR 编程软件	218
6.2.2 电动机 Y- Δ 减压起动控制	164	8.2.3 实验操作	228
6.2.3 十字路口交通信号灯的 PLC 控制	166	8.3 实验项目	229
6.3 提高 PLC 控制系统可靠性的措施	169	8.3.1 FPWIN GR 的编程环境应用	229

8.3.2 电动机正反转和Y-Δ启动 实验	230
8.3.3 自动送料装车控制实验	230
8.3.4 多种液体自动混合控制实验	231
8.3.5 交通灯系统设计实验	231
8.3.6 电梯控制系统设计实验	232
8.3.7 智力竞赛抢答控制系统设计 实验	233
8.3.8 自动售货机系统设计实验	234
8.3.9 彩灯控制系统设计实验	234
8.3.10 自动门控制系统设计实验	235

本章小结	235
------------	-----

附录	236
----------	-----

附录 A 电气控制电路中常用图形符号和 文字符号	236
-----------------------------------	-----

附录 B 西门子 S7-200 CPU 的存储器 范围和特性汇总	242
---	-----

附录 C 西门子 S7-200 PLC 指令表	243
-------------------------------	-----

附录 D 错误代码信息及其含义	248
-----------------------	-----

参考文献	250
------------	-----

绪 论

1. 电气控制技术的发展

电气控制技术在现代社会生活中扮演着越来越重要的角色，它对工业技术的发展和應用都有着十分重要的作用。在控制方法上主要是从手动控制发展到自动控制；在控制功能上是从简单控制发展到智能化控制；在操作上是从小型发展到信息化处理；在控制原理上，是从单一的有触头硬接线继电器逻辑控制系统发展到以微处理器或微计算机为中心的网络化自动控制系统。现在的电气控制技术不仅仅是一些电控设备的集合，更是集电气技术、控制技术、信息技术、电力电子技术、计算机应用技术等于一体的综合性学科。随着科学技术的不断发展、生产工艺的不断改进，特别是计算机技术的应用，将不断推动电气控制技术的继续发展。

作为生产机械动力的电机拖动，最早是采用成组拖动，即用一台电动机，通过传送带和传动机构，拖动多台生产机械设备，电气控制电路比较简单，称为集中拖动。随着生产机械功能增多和自动化程度的提高，其机械传动系统也就更加复杂。为了简化传动机构而出现分散拖动形式，即将生产机械的不同运动部件分别由不同电机拖动的多电动机拖动方式，与集中拖动相比，传动效率有所提高，机械设备的结构也简化了，生产安全性也有提高，但使电气控制电路复杂了。随着在生产过程中对各种参数（如温度、压力、流量和液位等）需求的提高，要求其能自动调整和控制，以适应生产过程的需要，促使电气自动控制技术迅速发展，从而出现了继电器-接触器控制系统。这种由继电器、接触器、按钮和行程开关等按照一定的控制逻辑组合而成的系统，由于其控制方式是断续的，所以又称为断续控制系统。由于这种系统具有结构简单、价格低廉、维护容易、抗干扰能力强等优点，至今仍是机床和其他许多机械设备广泛采用的基本电气控制形式。这种控制系统的缺点是采用固定接线方式，灵活性差，工作效率低，触头易损坏，可靠性差。20世纪70年代出现了以软件手段实现各种控制功能、以微处理器为核心的可编程序控制器（简称PLC），由于能适应恶劣的工业环境，兼备计算机和继电器-接触器控制系统的优点，目前PLC已成为世界各国标准化通用控制设备，广泛用于各种工业控制领域。

科学技术的发展和工艺技术不断的改进和创新，使得电气控制技术也在不断发展，不仅实现了自动控制、智能化控制，也实现了信息化处理、计算机网络化自动处理。同时也综合应用了多种技术，在一定程度上促进了与电气技术相关企业的发展。

2. 本课程的性质、内容和任务

本课程是一门实用性很强的专业课。其主要内容是以电动机或其他执行电器为被控对象，介绍和讲解继电器-接触器控制系统和PLC控制系统的工作原理、设计方法和实际应用。其中可编程序控制器的飞速发展和其强大的功能使它已成为实现工业自动化的主要手段之一。所以本课程的重点是可编程序控制器，但这并不意味着继电器-接触器控制系统就不重要了。这是因为：首先，继电器和接触器在小型电气系统中还普遍使用，而且它是组成电

气控制系统的基础；其次，尽管 PLC 系统取代了继电器-接触器控制系统，但它所取代的主要是逻辑控制部分，而电气控制系统中的信号采集和驱动输出部分仍然要由电器元件及控制电路来完成。所以对继电器-接触器控制系统的学习是非常必要的。该课程的目标是让学生掌握一门非常实用的工业控制技术，以及培养和提高学生的实际应用和动手能力。

电气控制与 PLC 应用技术是电类专业学生所必须掌握的最基础的实践类课程，具体要求是：

- 1) 熟悉常用控制电器的工作原理和用途，达到正确使用和选用的目的，同时要了解一些新型元器件的用途。
- 2) 熟练掌握电气控制电路的基本环节，并具备阅读和分析电气控制电路的能力，使之能设计简单的电气控制电路，较好地掌握电气控制电路的简单设计法。
- 3) 熟悉可编程序控制器的基本概况，深刻领会可编程序控制器的工作原理。
- 4) 熟练掌握可编程序控制器的基本指令系统和典型电路的编程，掌握可编程序控制器的程序设计方法；掌握和熟悉可编程序控制器功能指令的使用。
- 5) 掌握和了解可编程序控制器的网络和通信原理，会编制简单的通信程序。
- 6) 了解可编程序控制器的实际应用程序的设计步骤和方法。

第1章 常用低压控制电器



低压电器是构成电气控制系统的基本元件，在电力输配电系统和电力拖动自动控制系统中应用极为广泛。低压电器的种类很多，本章主要通过介绍电气控制领域中常用低压电器的工作原理、用途、型号、规格及符号等知识，为正确选用和合理维护电器打下一定的基础。

学习要点：

- 1) 掌握各种常用低压电器的工作原理、图形、文字符号及使用方法。
- 2) 理解各种常用低压电器的组成和结构特点。
- 3) 能够区分常用低压电器中的输入设备和输出设备。

1.1 电器的基本知识

1.1.1 电器的定义、分类及作用

1. 电器的定义

根据外界特定的信号和要求，自动或手动接通和断开电路，断续或连续地改变电路参数，实现对电路或非电对象的切换、控制、保护、检查、变换和调节的电器元件，统称为电器。常用低压电器的主要种类及用途见表1-1。

表1-1 常用低压电器的主要种类及用途

序号	类别	主要品种	用途
1	断路器	塑料外壳式断路器	主要用于电路的过负荷保护、短路、欠电压、漏电压保护，也可用于不频繁接通和断开的电路
		框架式断路器	
		限流式断路器	
		漏电保护式断路器	
		直流快速断路器	
2	刀开关	开关板用刀开关	主要用于电路的隔离，有时也能分断负荷
		负荷开关	
		熔断器式刀开关	
3	转换开关	组合开关	主要用于电源切换，也可用于负荷通断或电路的切换
		换向开关	

(续)

序号	类别	主要品种	用途
4	主令电器	按钮	主要用于发布命令或程序控制
		限位开关 (行程开关)	
		微动开关	
		接近开关	
5	接触器	交流接触器	主要用于远距离频繁控制负荷, 切断带负荷电路
		直流接触器	
6	起动器	磁力起动器	主要用于电动机的起动
		星-三角起动器	
		自耦减压起动器	
7	控制器	凸轮控制器	主要用于控制电路的切换
		平面控制器	
8	继电器	电流继电器	主要用于控制电路中, 将被控量转换成控制电路所需电量或开关信号
		电压继电器	
		时间继电器	
		中间继电器	
		速度继电器	
		热继电器	
9	熔断器	有填料熔断器	主要用于电路的短路保护, 也用于电路的过载保护
		无填料熔断器	
		半封闭插入式熔断器	
		快速熔断器	
		自复熔断器	
10	电磁铁	制动电磁铁	主要用于起重、牵引、制动等
		起重电磁铁	
		牵引电磁铁	

2. 电器的分类

电器的用途广泛, 功能多样, 种类繁多, 结构各异。下面是几种常用的电器分类。

(1) 按工作电压等级分类

① 高压电器: 用于交流电压 1200V、直流电压 1500V 及以上电路中的电器。例如高压断路器、高压隔离开关、高压熔断器等。

② 低压电器: 用于交流 50Hz (或 60Hz) 额定电压为 1200V 以下、直流额定电压 1500V 及以下的电路中的电器。例如接触器、继电器等。

(2) 按动作原理分类

① 手动电器: 用手或依靠机械力进行操作的电器, 如手动开关、控制按钮、行程开关等主令电器。

② 自动电器：借助于电磁力或某个物理量的变化自动进行操作的电器，如接触器、各种类型的继电器和电磁阀等。

(3) 按用途分类

① 控制电器：用于各种控制电路和控制系统的电器，例如接触器、继电器、电动机起动器等。

② 主令电器：用于自动控制系统中发送动作指令的电器，例如按钮、行程开关、万能转换开关等。

③ 保护电器：用于保护电路及用电设备的电器，如熔断器、热继电器、各种保护继电器、避雷器等。

④ 执行电器：指用于完成某种动作或传动功能的电器，如电磁铁、电磁离合器等。

⑤ 配电电器：用于电能的输送和分配的电器，例如高压断路器、隔离开关、刀开关、低压断路器（旧称自动空气开关）等。

(4) 按工作原理分类

① 电磁式电器：依据电磁感应原理来工作，如接触器、各种类型的电磁式继电器等。

② 非电量控制电器：依靠外力或某种非电物理量的变化而动作的电器，如刀开关、行程开关、按钮、速度继电器、温度继电器等。

3. 电器的作用

低压电器能够依据操作信号或外界现场信号的要求，自动或手动改变电路的状态和参数，实现对电路或被控对象的控制、保护、测量、指示、调节。低压电器的作用有：

1) 控制作用：如电梯的上下移动、快慢速自动切换与自动停层等。

2) 保护作用：能根据设备的特点，对设备、环境以及人身实行自动保护，如电机的过热保护、电网的短路保护、漏电保护等。

3) 测量作用：利用仪表及与之相适应的电器，对设备、电网或其他非电参数进行测量，如电流、电压、功率、转速、温度、湿度等。

4) 调节作用：低压电器可对一些电量和非电量进行调整，以满足用户的要求，如柴油机油门的调整、房间温湿度的调节、照度的自动调节等。

5) 指示作用：利用低压电器的控制、保护等功能，检测出设备运行状况与电气电路工作情况，如绝缘的监测。

6) 转换作用：在用电设备之间转换或对低压电器、控制电路分时投入运行，以实现功能切换，如励磁装置手动与自动的转换、供电的市电与自备电的切换等。

当然，低压电器的作用远不止这些，随着科学技术的发展，新功能、新设备会不断出现，低压电器的作用也在不断更新中。

1.1.2 电磁式电器的工作原理与结构特点

电磁式低压电器，就结构而言，主要由两个部分组成，即检测部分（电磁机构）和执行部分（触头系统），其次还有灭弧系统和其他缓冲机构等。电磁机构的电磁吸力和反力特性是决定电器性能的主要因素之一。触头部分存在接触电阻和电弧现象，对电器的安全运行影响较大。因此，电磁吸力和反力、触头结构及灭弧装置等是构成电磁式低压电器的基本问题，也是研究电器元件结构和工作原理的基础。

1. 电磁机构

电磁机构是将电磁能转换成机械能并带动触头的闭合或断开，从而完成通断电路的控制作用（即通过产生的电磁吸力带动触头动作）。电磁机构是电磁式继电器和接触器等电器的主要组成部件之一。

电磁机构由电磁线圈、铁心（亦称静铁心或磁轭）和衔铁（亦称动铁心）三部分组成。

(1) 电磁机构的结构形式及分类

电磁机构的结构形式按衔铁的运动方式可分为直动式和拍合式，常用的结构形式有下列三种，如图 1-1 所示。

① 衔铁绕棱角转动的拍合式铁心，如图 1-1a 所示，这种结构广泛应用于直流电器中。

② 衔铁绕轴转动的拍合式铁心，如图 1-1b 所示，其铁心形状有 E 形和 U 形两种，此结构多用于触头容量较大的交流电器中。

③ 衔铁做直线运动的双 E 形直动式铁心，如图 1-1c 所示，多用于交流接触器、继电器以及其他交流电磁机构的电磁系统。

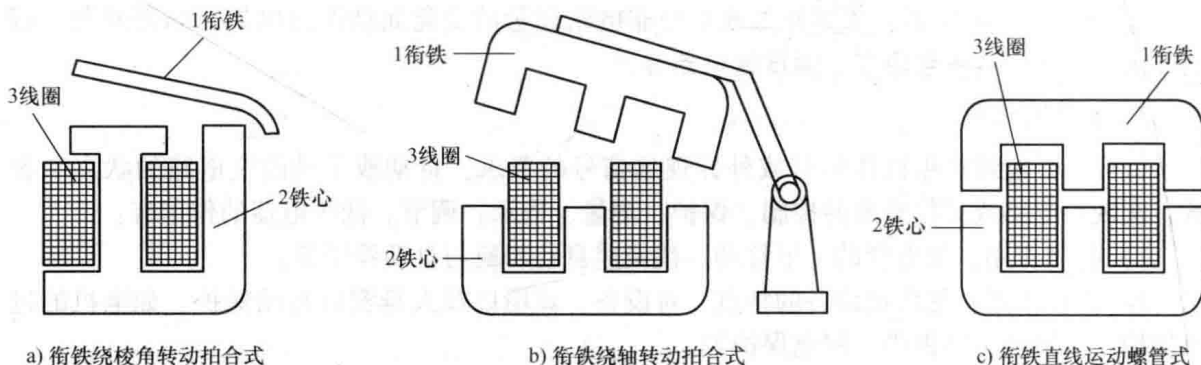


图 1-1 电磁机构的结构形式

(2) 吸引线圈

电磁线圈的作用是将电能转换为磁能，即产生磁通，衔铁在电磁吸力作用下产生机械位移使铁心与之吸合。凡通以直流电的线圈都称之为直流线圈，通入交流电的线圈称为交流线圈。对于直流线圈，通常其衔铁和铁心均由软钢或工程纯铁制成。铁心不发热，只有线圈发热，所以直流电磁线圈做成高而薄的瘦高型，且不设线圈骨架，使线圈与铁心直接接触，易于散热。对于交流线圈，由于其铁心中存在磁滞和涡流损耗，这样线圈和铁心都要发热，所以交流电磁线圈设有骨架，使铁心与线圈隔离，并将线圈制成短而厚的矮胖型，有利于线圈和铁心的散热。通常其铁心由电工钢片叠压而成，以减少铁耗。

另外，根据电磁线圈在电路中的连接方式可分为串联线圈（又称电流线圈）和并联线圈（又称电压线圈）。串联（电流）线圈串接于电路中，流过的电流较大。为减少对电路的影响，所用的线圈导线粗、匝数少，线圈的阻抗较小；而并联（电压）线圈并联在电路上，为减小分流作用，降低对原电路的影响，需较大的阻抗，所以线圈导线细而匝数多。

2. 电磁吸力与吸力特性

电磁式电器采用交直流电磁铁的基本原理，电磁吸力是影响其可靠工作的一个重要参数。电磁铁的吸力可按式(1-1)求得：

$$F_{at} = \frac{10^7}{8\pi} B^2 S \quad (1-1)$$

式中 F_{at} ——电磁吸力, 单位为 N;

B ——气隙中磁感应强度, 单位为 T;

S ——磁极截面积, 单位为 m^2 。

在固定铁心与衔铁之间的气隙值 δ 及外加电压值一定时, 对于直流电磁铁, 电磁吸力是一个恒定值, 但对于交流电磁铁, 由于外加正弦交流电压, 其气隙磁感应强度亦按正弦规律变化, 见式(1-2), 即

$$B = B_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

将式(1-2)代入式(1-1)得:

$$F_{at} = \frac{F_{atm}}{2} - \frac{F_{atm}}{2} \cos 2\omega t = F_0 - F_0 \cos 2\omega t \quad (1-3)$$

式中 F_{atm} ——电磁吸力最大值, $F_{atm} = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S$;

$F_0 = \frac{F_{atm}}{2}$ ——电磁吸力平均值。

因此, 交流电磁铁的电磁吸力是随时间变化而变化的。交流电磁铁在工作过程中, 决定其能否将衔铁吸住的是平均吸力 F_0 的大小。所以人们通常说的交流电磁铁的吸力, 就是指它的平均吸力。

电磁式电器在衔铁吸合或释放过程中, 气隙 δ 是变化的, 电磁吸力也将随着 δ 的变化而变化。

所谓吸力特性, 是指电磁吸力 F_{at} 随衔铁与铁心间气隙 δ 变化的关系曲线。不同的电磁机构有不同的吸力特性, 图 1-2 表示一般电磁铁的吸力特性。

对于直流电磁铁, 其励磁电流的大小与气隙无关, 动作过程中为恒磁动势工作, 其吸力随气隙的减小而增加, 所以吸力特性曲线比较陡峭。而交流电磁铁的励磁电流与气隙成正比, 在动作过程中为恒磁通工作, 但考虑到漏磁通的影响, 其吸力随气隙的减小略有增加, 所以吸力特性比较平坦。

3. 反力特性和返回系数

所谓反力特性是指反作用力 F_r 与气隙 δ 的关系曲线, 如图 1-2 中的曲线 3 所示。

为了使电磁机构能正常工作, 其吸力特性与反力特性配合必须得当。在衔铁吸合过程中, 其吸力特性必须始终处于反力特性上方, 即吸力要大于反力; 反之衔铁释放时, 吸力特性必须位于反力特性下方, 即反力要大于吸力。

返回系数是指释放电压 U_{re} (或电流 I_{re}) 与吸合电压 U_{at} (或电流 I_{at}) 的比值, 用 β 表示。

具有电压线圈的电磁机构的返回系数见式(1-4), 即

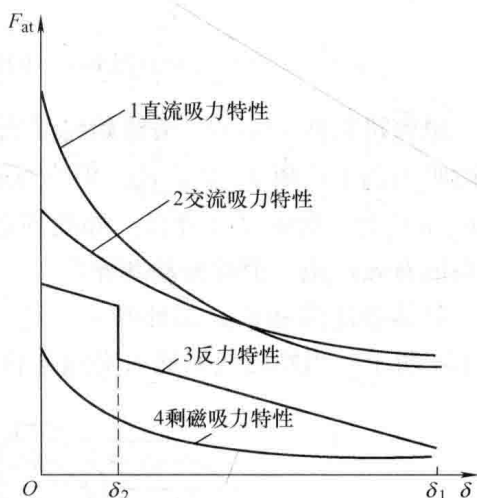


图 1-2 一般电磁铁的吸力特性

$$\beta_Y = \frac{U_{re}}{U_{at}} \quad (1-4)$$

具有电流线圈的电磁机构的返回系数见式(1-5)，即

$$\beta_1 = \frac{I_{re}}{I_{at}} \quad (1-5)$$

返回系数是反映电磁电器灵敏度的一个参数， β 值越大，电器灵敏度高，反之，则灵敏度低。

4. 交流电磁机构上短路环的作用

根据式(1-3) 交流电磁吸力公式可知，单相交流电磁机构的电磁吸力 F_{AT} 是一个两倍电源频率的周期性变量。它有两个分量：一个是恒定分量 F_0 ，其值为最大吸力值的一半；另一个是交变分量 F_{\sim} ， $F_{\sim} = F_0 \cos 2\omega t$ ，其幅值为最大吸力值的一半，并以两倍电源频率变化，总的电磁吸力 F_{at} 在从 0 到 F_{atm} 的范围内变化，其吸力曲线如图 1-3 所示。

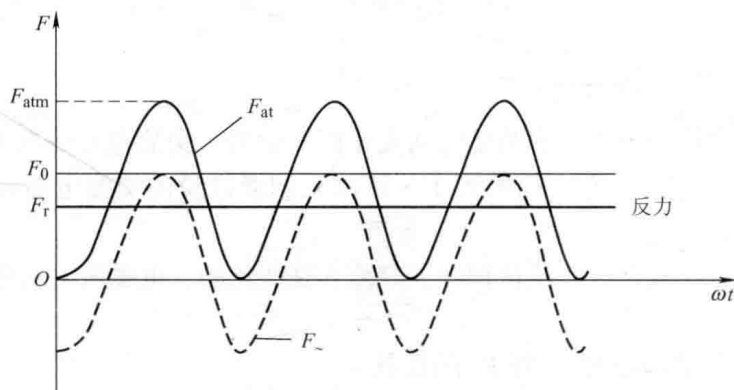


图 1-3 单相交流电磁机构实际吸力曲线

电磁机构在工作中，衔铁始终受到反作用弹簧、触头弹簧等反作用力 F_r 的作用。尽管电磁吸力的平均值 F_0 大于 F_r ，但在某些时候 F_{at} 将小于 F_r 。当 $F_{at} < F_r$ 时，衔铁开始释放，当 $F_{at} > F_r$ 时，衔铁又被吸合，如此周而复始，从而使衔铁产生振动，发出噪声。为此，必须采取有效措施，消除振动和噪声。

具体办法是在铁心端部开一个槽，槽内嵌入称为短路环（或称分磁环）的铜环，如图 1-4 所示。当励磁线圈通入交流电后，在短路环中就有感应电流产生，该感应电流又会产

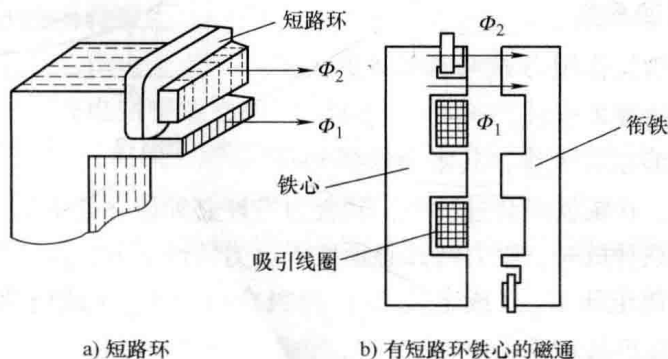


图 1-4 交流电磁铁的短路环

生一个磁通。短路环把铁心中的磁通分为两部分，即不穿过短路环的 Φ_1 和穿过短路环的 Φ_2 。由于短路环的作用，使 Φ_1 与 Φ_2 产生相移，即不同时为零，使合成吸力始终大于反作用力，从而消除了振动和噪声。加短路环后的磁通和吸力特性曲线如图 1-5 所示。

短路环通常包围 2/3 的铁心截面，它一般用铜、康铜或镍铬合金等材料制成。

5. 电器的触头系统和电弧

(1) 电器的触头系统

触头是电器的执行部分，起接通和分断电路的作用。因此，要求触头导电、导热性能良好，通常用铜制成。但铜的表面容易氧化而生成一层氧化铜，将增大触头的接触电阻，使触头的损耗增大，温度上升。所以有些电器，如继电器和小容量的电器，其触头常采用银质材料，这不仅在于其导电和导热性能均优于钢质触头，更主要的是其氧化膜的电阻率与纯银相似（氧化铜则不然，其电阻率可达纯铜的十余倍以上），而且要在较高的温度下才会形成，同时又容易粉化。因此，银质触头具有较低和稳定的接触电阻。对于大中容量的低压电器，在结构设计上，触头采用滚动接触，可将氧化膜去掉，这种结构的触头也常采用铜质材料。

触头主要有以下几种结构形式：

① 桥式触头：图 1-6a 是桥式触头，有点接触型和面接触型两种。图中的两个触头串于同一条电路中，电路的接通与断开由两个触头共同完成。点接触型适用于电流不大，且触头压力小的场合；面接触型适用于大电流的场合。其接触形式如图 1-7a 和图 1-7c 所示。

② 指形触头：图 1-6b 是指形触头，其接触区为一直线，触头接通或分断时产生滚动摩擦，以利于去掉氧化膜。其接触形式如图 1-7b 所示。此种形式适用于通电次数多、电流大的场合。

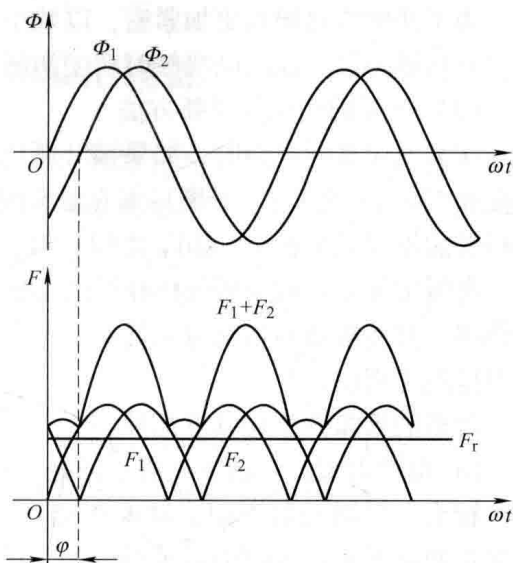


图 1-5 加短路环后的磁通和吸力特性曲线

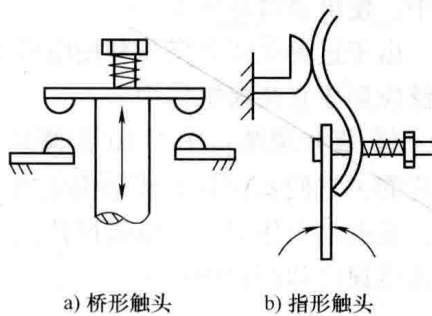


图 1-6 触头的结构形式

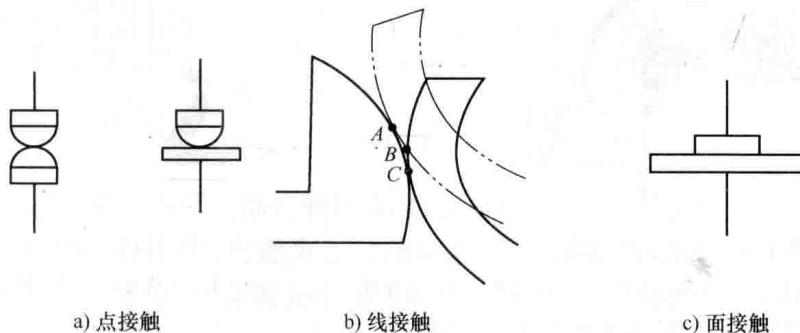


图 1-7 触头接触形式图

为了使触头接触得更加紧密，以减小接触电阻，并消除开始接触时产生的振动，在触头上装有接触弹簧，在刚刚接触时产生初压力，并且随着触头闭合增大触头压力。

(2) 电弧的产生及灭弧方法

在大气中开断电路时，如果被开断电路的电流超过某一数值（根据触头材料的不同其值在 0.25 ~ 1A 之间），开断后加在触头间隙（或称弧隙）两端电压超过某一数值（根据触头材料的不同其值在 12 ~ 20V 之间）时，则触头间隙中就会产生电弧。

电弧实际上是触头间气体在强电场作用下产生的放电现象，产生高温并发出强光，将触头烧损，并使电路的切断时间延长，严重时会引起火灾或其他事故，因此，在电器中应采取适当措施熄灭电弧。

常用的灭弧方法有以下几种：

1) 电动力灭弧：图 1-8 所示的是一种桥式结构双断口触头。当触头打开时，在断口处产生电弧，电弧电流在两电弧间产生图中所示的磁场，根据左手定则，电弧电流要产生一个指向外侧的电动力作用，使电弧向外运动并拉长，迅速穿越冷却介质而加快冷却并熄灭。这种灭弧方法一般用于小容量交流接触器等交流电器中。

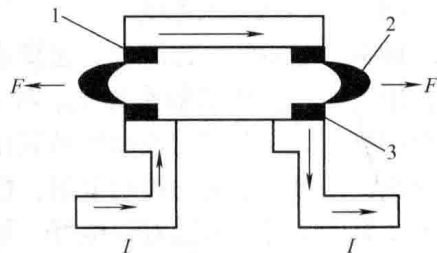


图 1-8 电动力灭弧示意图

1—动触头 2—电弧 3—静触头

2) 磁吹灭弧：其原理如图 1-9 所示。在触头电路中串入一个磁吹线圈，负载电流产生的磁场方向如图所示。当触头断开产生电弧后，根据同样的原理，在电动力作用下，电弧被拉长并吹入灭弧罩中，使电弧冷却熄灭。

由于这种灭弧装置是利用电弧电流本身灭弧，因而电弧电流越大，吹弧能力也越强。它广泛应用于直流接触器中。

3) 栅片灭弧：图 1-10 为栅片灭弧示意图。灭弧栅是由多片镀铜薄钢片（称为栅片）组成的，它们安放在电器触头上方的灭弧栅内，彼此之间互相绝缘。当触头断开产生电弧后，在电动力作用下，电弧被拉长灭弧栅而被分割成数段串联的短弧，增强消电离能力并使电弧迅速冷却而很快熄灭。

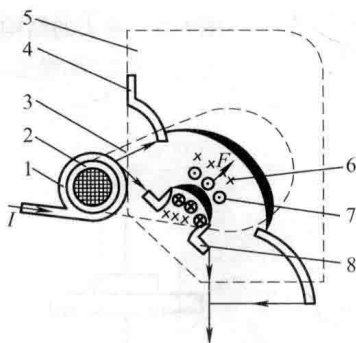


图 1-9 磁吹灭弧示意图

1—磁吹线圈 2—铁心 3—导磁夹板 4—引弧角 5—灭弧罩

6—磁吹线圈磁场 7—电弧电流磁场 8—动触头

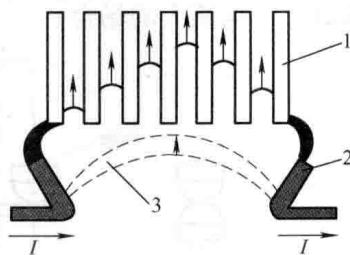


图 1-10 栅片灭弧示意图

1—灭弧栅片 2—触头 3—电弧