



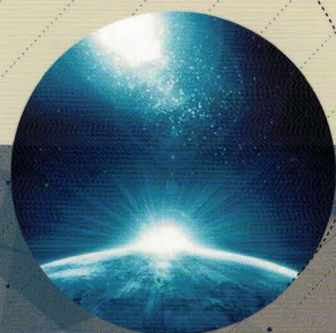
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十三五”电气信息类规划教材


电气控制与PLC 应用技术

第2版

黄永红 主编

Electrical Control and PLC
Application Technology



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本教材配有电子课件及部分习题答案



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十三五”电气信息类规划教材

电气控制与 PLC 应用技术

第 2 版

主 编 黄永红
副主编 张新华 吉敬华
参 编 项倩雯 杨 东 刁小燕 蔡晓磊



机械工业出版社

本书从实际工程应用和教学需要出发,介绍了常用低压电器和电气控制电路的基本知识;介绍了 PLC 的基本组成和工作原理;以西门子 S7-200 PLC 为教学机型,详细介绍了 PLC 的系统配置、指令系统、程序设计方法及通信与网络等内容。书中安排了大量的应用实例,包括开关量控制、模拟量信号检测与控制、网络与通信等具体应用程序。本书实例涵盖了常用逻辑指令和功能指令的使用方法和技巧,实例程序均经过调试运行。本书前 8 章附有习题与思考题,附录有实验指导书、课程设计指导书和课程设计任务书供教学选用。

本书可作为高等学校自动化类、电气类及机械类等相关专业的教学用书,也可作为电气工程、控制工程领域技术人员的培训教材和参考书。

本书有配套电子课件及部分习题答案,欢迎选用本书作教材的教师发邮件到 jinaemp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制与 PLC 应用技术/黄永红主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2018. 4

普通高等教育“十三五”电气信息类规划教材“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-59331-7

I. ①电… II. ①黄… III. ①电气控制-高等学校-教材
②PLC 技术-高等学校-教材 IV. ①TM571.2②TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 042861 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 王小东

责任校对: 陈越 封面设计: 鞠杨

责任印制: 张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.75 印张 · 543 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59331-7

定价: 47.00 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

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

本书自第1版出版以来，得到了多所高校教师和广大读者的关心和支持。为适应电气控制新技术的发展，特别是PLC应用技术快速发展的需要，编者结合二十多年的教学经验和读者的建议，对第1版进行修订。第2版对第1版的内容进行了一定修改、充实和更新，主要修改了PLC的发展趋势和特点等内容，增加了PID指令的向导编程和参数自整定方法的内容，更新了低压电器产品型号等内容。同时删除了一些内容，如节日彩灯的PLC控制及实验、台达触摸屏应用等相关内容。修订时保留了精选内容，力求结合生产实际、突出工程应用和通俗易懂的特点。

本书包含了电气控制和PLC应用技术两部分内容。第1章主要介绍电气控制系统中广泛使用的低压电器的结构、工作原理和选用方法等内容；第2章主要介绍三相笼型异步电动机的起动、调速、制动等基本电气控制电路，并介绍电气控制电路的分析、设计方法及其典型应用，为学习PLC知识奠定必要的基础；第3章介绍PLC的发展概况、基本组成及工作原理；第4章~第9章是本书的重点内容，以西门子S7-200 PLC作为教学机型，重点介绍PLC的系统配置与接口模块、基本指令及其应用实例、PLC控制系统设计方法和步骤、PLC的通信与组网知识以及STEP7-Micro/WIN编程软件的使用等内容。

本书在内容组织上安排了大量典型应用实例程序，在工程应用中可参考使用。如第5、6章的基本逻辑指令和功能指令（如定时器、计数器、移位寄存器指令、SCR指令、PID指令等）的应用实例。实例介绍由浅入深、由易到难、循序渐进，以便学生更好地理解和应用。附录E编写了9个实验内容，附录G提供了两个综合性、实用性较强的课程设计任务书，供任课教师根据学校硬件条件和课程设置选择开设。另外，本书前8章均安排了数量、难度适中的习题和思考题，供学生课后练习。

在实际教学过程中，任课教师可根据专业需要、课时安排等实际情况，对教学内容进行取舍。有些内容和应用实例可留给学生自学或供学生在实验、课程设计、毕业设计时参考。

本书由黄永红任主编并统稿，张新华、吉敬华任副主编，参加编写的还有项倩雯、杨东、刁小燕和蔡晓磊。

感谢苏州西门子电器有限公司的王永文先生和上海良信电器股份有限公司的黄银芳工程师！感谢他们为本书的编写提供了大量的资料，并给予了大力支持和帮助。本书在编写过程中参考了大量的已出版文献，在此对这些参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。编者邮箱：hyh218@126.com。

编 者

目 录

前 言

第1章 常用低压电器 1

1.1 低压电器的定义、分类	1
1.2 电磁式电器的组成与工作原理	2
1.2.1 电磁机构	2
1.2.2 触点系统	5
1.2.3 灭弧系统	6
1.3 接触器	8
1.3.1 接触器的组成及工作原理	8
1.3.2 接触器的分类	8
1.3.3 接触器的主要技术参数	10
1.3.4 接触器的选择与使用	10
1.3.5 接触器的图形符号与文字符号	11
1.4 继电器	11
1.4.1 继电器的分类和特性	11
1.4.2 电磁式继电器	12
1.4.3 时间继电器	13
1.4.4 热继电器	15
1.4.5 速度继电器	19
1.4.6 固态继电器	20
1.5 主令电器	21
1.5.1 控制按钮	21
1.5.2 行程开关	22
1.5.3 接近开关	23
1.5.4 万能转换开关	24
1.6 信号电器	26
1.7 开关电器	26
1.7.1 刀开关	26
1.7.2 低压断路器	28
1.8 熔断器	30
1.8.1 熔断器的结构和工作原理	30
1.8.2 熔断器的类型	30
1.8.3 熔断器的主要技术参数	32

1.8.4 熔断器的选择与使用	32
-----------------------	----

1.9 电磁执行器件	33
------------------	----

1.9.1 电磁铁	33
-----------------	----

1.9.2 电磁阀	33
-----------------	----

1.9.3 电磁制动器	34
-------------------	----

习题与思考题	35
--------------	----

第2章 基本电气控制电路 37

2.1 电气控制电路的绘制原则及标准	37
--------------------------	----

2.1.1 电气图中的图形符号及文字符号	37
----------------------------	----

2.1.2 电气原理图的绘制原则	38
------------------------	----

2.1.3 电气安装接线图	40
---------------------	----

2.1.4 电气元件布置图	41
---------------------	----

2.2 交流电动机的基本控制电路	41
------------------------	----

2.2.1 三相笼型异步电动机直接起动控制电路	41
-------------------------------	----

2.2.2 三相笼型异步电动机减压起动控制电路	48
-------------------------------	----

2.2.3 三相绕线转子异步电动机起动控制电路	50
-------------------------------	----

2.2.4 三相笼型异步电动机制动控制电路	51
-----------------------------	----

2.2.5 三相笼型异步电动机调速控制电路	54
-----------------------------	----

2.2.6 组成电气控制电路的基本规律	56
---------------------------	----

2.2.7 电气控制电路中的保护环节	56
--------------------------	----

2.3 典型生产机械电气控制电路的分析	58
---------------------------	----

2.3.1 电气控制电路分析的基础	58
-------------------------	----

2.3.2 电气原理图阅读分析的方法与步骤	58
-----------------------------	----

2.3.3 C650型卧式车床电气控制电路的分析	59
--------------------------------	----

2.4 电气控制电路的一般设计法	62
------------------------	----

2.4.1 一般设计法的主要原则	62	第5章 S7-200 PLC的基本指令及	
2.4.2 一般设计法中应注意的问题	63	程序设计	103
2.4.3 一般设计法控制电路举例	63	5.1 S7-200 PLC的编程语言	103
习题与思考题	64	5.2 S7-200 PLC的数据类型与存储区域	104
第3章 可编程序控制器概述	66	5.2.1 位、字节、字、双字和常数	104
3.1 PLC的产生及定义	66	5.2.2 数据类型及范围	105
3.1.1 PLC的产生	66	5.2.3 数据的存储区	105
3.1.2 PLC的定义	67	5.3 S7-200 PLC的编程元件	107
3.2 PLC的发展与应用	67	5.3.1 编程元件	107
3.2.1 PLC的发展历程	67	5.3.2 编程元件及操作数的寻址范围	112
3.2.2 PLC的发展趋势	68	5.4 寻址方式	113
3.2.3 PLC的应用领域	70	5.5 程序结构和编程规约	115
3.3 PLC的特点	72	5.5.1 程序结构	115
3.4 PLC的分类	73	5.5.2 编程的一般规约	115
3.4.1 按结构形式分类	73	5.6 S7-200 PLC的基本指令	117
3.4.2 按功能分类	75	5.6.1 位逻辑指令	117
3.4.3 按I/O点数分类	76	5.6.2 立即I/O指令	119
3.4.4 按生产厂家分类	76	5.6.3 逻辑堆栈指令	120
3.5 PLC的硬件结构和各部分的作用	76	5.6.4 取反指令和空操作指令	122
3.6 PLC的工作原理	79	5.6.5 正/负跳变触点指令	123
3.6.1 PLC控制系统的组成	79	5.6.6 定时器指令	123
3.6.2 PLC循环扫描的工作过程	79	5.6.7 计数器指令	127
3.6.3 PLC用户程序的工作过程	80	5.6.8 比较指令	130
3.6.4 PLC工作过程举例说明	82	5.6.9 移位寄存器指令	131
3.6.5 输入、输出延迟响应	82	5.6.10 顺序控制继电器指令	132
3.6.6 PLC对输入、输出的处理规则	84	5.7 典型控制环节的PLC程序设计	135
习题与思考题	85	5.7.1 单向运转电动机起、停止控制	135
第4章 S7-200 PLC的系统配置与		程序	135
接口模块	86	5.7.2 单按钮起、停止控制程序	136
4.1 S7-200 PLC控制系统的基本构成	86	5.7.3 具有点动调整功能的电动机起、	136
4.2 S7-200 PLC的输入/输出接口模块	89	停止控制程序	136
4.2.1 数字量模块	90	5.7.4 电动机的正、反转控制程序	136
4.2.2 模拟量模块	93	5.7.5 大功率电动机的星-三角减压起	138
4.2.3 S7-200 PLC的智能模块	97	动控制程序	138
4.3 S7-200 PLC的系统配置	97	5.7.6 闪烁控制程序	139
4.3.1 主机加扩展模块的最大I/O	97	5.7.7 瞬时接通/延时断开程序	139
配置	97	5.7.8 定时器、计数器的扩展	140
4.3.2 I/O点数的扩展与编址	98	5.7.9 高精度时钟程序	140
4.3.3 内部电源的负载能力	99	5.7.10 多台电动机顺序起、停止控制	141
4.3.4 PLC外部接线与电源要求	99	程序	141
习题与思考题	101	5.7.11 故障报警程序	144

5.8 梯形图编写规则	145	7.3.2 顺序控制设计法与顺序功能图 ..	217
习题与思考题	147	7.4 顺序控制梯形图的设计方法	221
第6章 S7-200 PLC 的功能指令及使用	149	7.4.1 置位、复位指令编程	221
6.1 S7-200 PLC 的基本功能指令	149	7.4.2 顺序控制继电器指令编程	223
6.1.1 数据传送指令	149	7.4.3 具有多种工作方式的顺序控制梯形图设计方法	227
6.1.2 数学运算指令	152	7.5 PLC 在工业控制系统中的典型应用实例	232
6.1.3 数据处理指令	160	7.5.1 恒温控制	232
6.2 程序控制指令	175	7.5.2 基于增量式旋转编码器和 PLC 高速计数器的转速测量	236
6.2.1 有条件结束指令	175	习题与思考题	238
6.2.2 暂停指令	175	第8章 PLC 的通信及网络	240
6.2.3 监视定时器复位指令	175	8.1 SIEMENS 工业自动化控制网络	240
6.2.4 跳转与标号指令	176	8.1.1 SIEMENS PLC 网络的层次结构 ..	240
6.2.5 循环指令	176	8.1.2 网络通信设备	241
6.2.6 诊断 LED 指令	177	8.1.3 通信协议	244
6.3 局部变量表与子程序	177	8.2 S7-200 串行通信网络及应用	245
6.3.1 局部变量表	177	8.2.1 S7 系列 PLC 产品组建的几种典型网络	245
6.3.2 子程序	178	8.2.2 在编程软件中设置通信参数	247
6.4 中断程序与中断指令	180	8.3 通信指令及应用	250
6.4.1 中断程序	180	8.3.1 网络读、写指令及应用	250
6.4.2 中断指令	180	8.3.2 自由口通信指令及应用	252
6.5 PID 指令及应用	184	习题与思考题	264
6.5.1 PID 算法	184	第9章 STEP7-Micro/WIN 编程软件功能与使用	265
6.5.2 PID 回路指令	185	9.1 软件安装及硬件连接	265
6.5.3 PID 指令向导编程	190	9.1.1 软件安装	265
6.5.4 PID 参数自整定	192	9.1.2 硬件连接	265
6.6 高速处理类指令	197	9.1.3 通信参数的设置和修改	266
6.6.1 高速计数器指令	197	9.2 编程软件的主要功能	267
6.6.2 高速脉冲输出指令	203	9.2.1 基本功能	267
习题与思考题	209	9.2.2 主界面各部分功能	267
第7章 PLC 控制系统设计与应用实例	211	9.2.3 系统组态	270
7.1 PLC 控制系统设计的内容和步骤	211	9.3 编程软件的使用	272
7.1.1 PLC 控制系统设计的内容	211	9.3.1 项目生成	272
7.1.2 PLC 控制系统设计的步骤	211	9.3.2 程序的编辑和传送	273
7.2 PLC 控制系统的硬件配置	213	9.3.3 程序的预览与打印输出	276
7.2.1 PLC 机型的选择	213	9.4 程序的监控和调试	276
7.2.2 开关量 I/O 模块的选择	215	9.4.1 用状态表监控程序	277
7.2.3 模拟量 I/O 模块的选择	216	9.4.2 在 RUN 方式下编辑程序	278
7.2.4 智能模块的选择	216		
7.3 PLC 控制系统梯形图程序的设计	216		
7.3.1 经验设计法	217		

9.4.3 梯形图程序的状态监视	279	附录 C 错误代码	285
9.4.4 选择扫描次数	279	附录 D S7-200 可编程序控制器指令集	288
9.4.5 S7-200 的出错处理	279	附录 E 实验指导书	291
附录	281	附录 F 课程设计指导书	303
附录 A 常用电器的图形符号及文字符号 ..	281	附录 G 课程设计任务书	304
附录 B 特殊继电器 (SM) 含义	282	参考文献	308

第 1 章

常用低压电器

本章主要介绍电气控制系统中常用的低压电器，如接触器、继电器、行程开关、熔断器等，介绍它们的作用、分类、结构、工作原理、技术参数、选用原则等内容。要求掌握电磁式电器的基本结构和工作原理；掌握接触器、热继电器、时间继电器、固态继电器、低压断路器、熔断器、行程开关等常用低压电器的功能、用途、工作原理及选用方法等内容，并能用图形符号和文字符号表示它们。理解接触器与继电器的区别、低压断路器和熔断器的区别，为后续学习继电器-接触器控制系统和 PLC 控制系统打下基础。

1.1 低压电器的定义、分类

电器是一种根据外界的信号（机械力、电动力和其他物理量），自动或手动接通和断开电路，从而断续或连续地改变电路参数或状态，实现对电路或非电对象的切换、控制、保护、检测和调节用的电气元件或设备。

低压电器通常指工作在额定电压为交流 1200V、直流 1500V 以下电路中的电器。常用的低压电器主要有接触器、继电器、开关电器、主令电器、熔断器、执行电器、信号电器等，如图 1-1 所示。

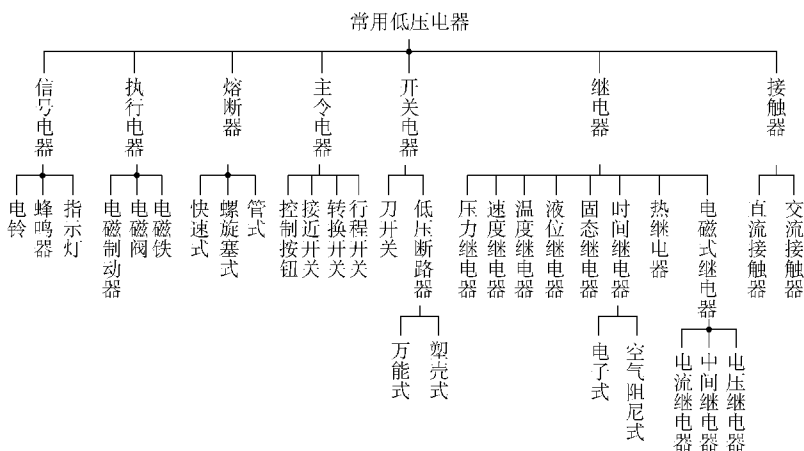


图 1-1 常用低压电器的分类

低压电器种类繁多，用途广泛，功能多样，构造各异。其分类方法很多，主要有以下几类：

1. 按用途和控制对象分

(1) 低压配电电器

低压配电电器主要用于低压配电系统中，实现电能的输送和分配。例如，刀开关、转换开

关、低压断路器、熔断器等。

(2) 低压控制电器

低压控制电器主要用于电气控制系统中，要求寿命长、体积小、重量轻，且动作迅速、准确、可靠。例如，接触器、各种控制继电器、主令电器、电磁铁等。

2. 按动作方式分

(1) 自动电器

自动电器依靠外来信号或其自身参数的变化，通过电磁或压缩空气来完成接通、分断、启动、反向和停止等动作。例如，交/直流接触器、继电器、电磁阀等。

(2) 手动电器

手动电器主要是通过外力（用手或经杠杆）操作手柄来完成指令任务的电器。例如，刀开关、控制按钮、转换开关等。

3. 按工作原理分

(1) 电磁式电器

电磁式电器即利用电磁感应原理来工作的电器。例如，交/直流接触器、各种电磁式继电器、电磁铁等。

(2) 非电量控制电器

非电量控制电器是依靠外力或非电量信号（如温度、压力、速度等）的变化而动作的电器。例如，转换开关、刀开关、行程开关、温度继电器、压力继电器、速度继电器等。

1.2 电磁式电器的组成与工作原理

电磁式电器在电气控制系统中使用量最大，其类型也很多。各类电磁式电器在工作原理和构造上基本相同，就其结构而言，主要由两部分组成，即电磁机构和触点系统，其次还有灭弧系统和其他缓冲机构等。

1.2.1 电磁机构

1. 电磁机构的结构形式及工作原理

电磁机构是电磁式电器的信号检测部分，其主要作用是将电磁能转换为机械能，带动触点动作，实现电路的接通或分断。

电磁机构由电磁线圈、铁心和衔铁三部分组成。其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 1-2 所示）：

1) 衔铁沿棱角转动的拍合式，如图 1-2a 所示。这种结构适用于直流接触器。

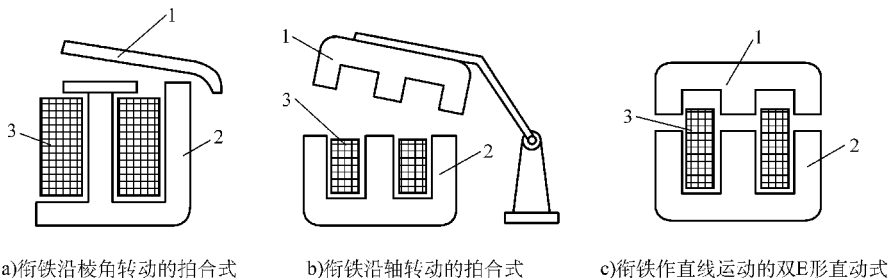


图 1-2 常用的电磁机构结构形式

1—衔铁 2—铁心 3—电磁线圈

2) 衔铁沿轴转动的拍合式, 如图 1-2b 所示。其铁心形状有 E 形和 U 形两种, 此结构适用于触点容量较大的交流接触器。

3) 衔铁作直线运动的双 E 形直动式, 如图 1-2c 所示。这种结构适用于交流接触器、继电器等。

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。凡通入直流电的电磁线圈都称为直流线圈, 通入交流电的电磁线圈称为交流线圈。由直流线圈组成的电磁机构称为直流电磁机构, 由交流线圈组成的电磁机构称为交流电磁机构。对于直流电磁机构, 由于电流的大小和方向不变, 只有线圈发热, 铁心不发热, 通常其衔铁和铁心均由软钢或工程纯铁制成, 所以直流线圈做成高而薄的瘦高形, 且不设线圈骨架, 使线圈与铁心直接接触, 易于散热。对于交流电磁机构, 由于其铁心中存在磁滞和涡流损耗, 线圈和铁心都要发热, 所以交流线圈设有骨架, 使铁心与线圈隔离, 并将线圈制成短而厚的矮胖形, 有利于线圈和铁心的散热, 通常其铁心用硅钢片叠铆而成, 以减少铁损。

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, 需要较小的阻抗, 所以线圈导线粗且匝数少; 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, 所以线圈导线细且匝数多。

电磁式电器的工作原理示意图如图 1-3 所示。其工作原理: 当电磁线圈通电后, 产生的磁通经过铁心、衔铁和气隙形成闭合回路, 此时衔铁被磁化产生电磁吸力, 所产生的电磁吸力克服释放弹簧与触点弹簧的反力使衔铁产生机械位移, 与铁心吸合, 并带动触点支架使动、静触点接触闭合。当电磁线圈断电或电压显著下降时, 由于电磁吸力消失或过小, 衔铁在弹簧反力作用下返回原位, 同时带动动触点脱离静触点, 将电路切断。

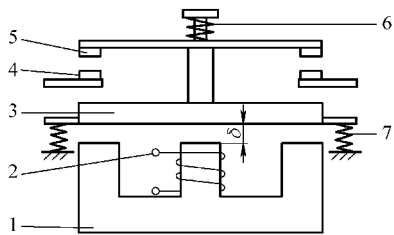


图 1-3 电磁式电器的工作原理示意图

- 1—铁心 2—电磁线圈 3—衔铁
- 4—静触点 5—动触点 6—触点弹簧
- 7—释放弹簧 δ—气隙

2. 电磁机构的吸力特性与反力特性

电磁机构工作时, 作用在衔铁上的力有两个: 电磁吸力与反力。电磁吸力由电磁机构产生, 反力则由释放弹簧和触点弹簧所产生。

根据麦克斯韦电磁力计算公式可知, 如果气隙中的磁场均匀分布, 电磁吸力 F_{at} 的大小与气隙的截面积 S 及气隙磁感应强度 B 的二次方成正比, 即

$$F_{at} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (1-1)$$

式中, 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 非磁性材料的磁导率 $\mu \approx \mu_0$, 代入式 (1-1), 得

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

式中, F_{at} 为电磁吸力, 单位为 N (牛顿); B 为气隙磁感应强度, 单位为 T (特斯拉); S 为气隙的截面积, 单位为 m^2 (平方米); Φ 为气隙中的磁通量, 单位为 Wb (韦伯)。

当气隙截面积 S 为常数时, 电磁吸力与 B^2 或 Φ^2 成正比。

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表示。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。

(1) 直流电磁机构的吸力特性

对于直线圈，当电压 U 与线圈电阻 R 不变时，流过线圈的电流 I 不变。由磁路定律 $\Phi = \frac{IN}{R_m}$ (式中， R_m 为气隙磁阻， $R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ ； N 为线圈匝数) 可知， $F_{at} \propto \Phi^2 \propto \frac{1}{R_m^2} \propto \frac{1}{\delta^2}$ ，即衔铁动作过程中为恒磁动势工作，电磁吸力 F_{at} 与气隙 δ 的二次方成反比，所以直流电磁机构的吸力特性为二次曲线形状，如图 1-4 所示。它表明衔铁闭合前后吸力变化很大，气隙越小吸力越大。

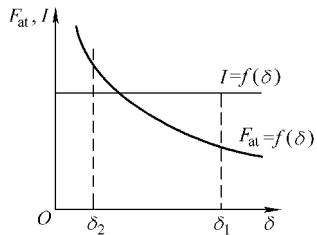


图 1-4 直流电磁机构的吸力特性

直流电磁机构在衔铁吸合过程中，电磁吸力是逐渐增加的，完全吸合时电磁吸力达到最大。对于可靠性要求很高或动作频繁的控制系統常采用直流电磁机构。

(2) 交流电磁机构的吸力特性

对于具有交流线圈的电磁机构，其吸力特性与直流电磁机构有所不同。假定交流线圈外加电压 U 不变，交流电磁线圈的阻抗主要取决于线圈的电抗，电阻可忽略，则 $U \approx E = 4.44fN\Phi$ ， $\Phi = \frac{U}{4.44fN}$ ，式中 E 为线圈感应电动势， f 为电源电压频率。当 U 、 f 、 N 为常数时， Φ 为常数，即交流电磁机构在衔铁吸合前后 Φ 是不变的（为恒磁通工作），故 F_{at} 也不变，且 F_{at} 与气隙的大小无关，但考虑到漏磁通的影响，其电磁吸力 F_{at} 随气隙 δ 的减小略有增加。交流电磁机构的吸力特性如图 1-5 所示。

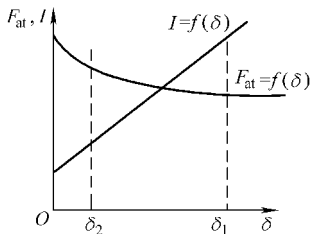


图 1-5 交流电磁机构的吸力特性

虽然交流电磁机构的气隙磁通近似不变，但气隙磁阻 R_m 要随着气隙长度 δ 的加大成正比增加，因此，交流励磁电流的大小也将随气隙长度 δ 的加大成正比增大。所以，交流电磁机构的励磁电流在线圈已通电但衔铁尚未吸合时，比额定电流大很多，若衔铁卡住不能吸合或衔铁频繁动作，交流线圈可能因过电流而烧毁，故在可靠性要求高或频繁动作的场合，一般不采用交流电磁机构。

(3) 吸力特性与反力特性的配合

反力特性是指反作用力 F_r 与气隙 δ 的关系曲线，如图 1-6 的曲线 3 所示。反作用力包括弹簧力、衔铁自身重力和摩擦阻力等。图中 δ_1 为起始位置， δ_2 为动、静触点接触时的位置。在 $\delta_1 \sim \delta_2$ 区域内，反作用力随着气隙的减小而略有增大，在 δ_2 位置，动、静触点接触，这时触点的初压力作用到衔铁上，反作用力突增。在 $\delta_2 \sim 0$ 区域内，气隙越小，触点压得越紧，反作用力越大，其特性曲线比较陡峭。

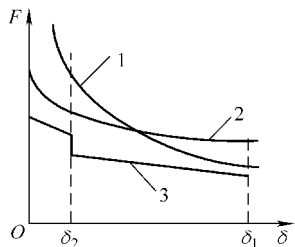


图 1-6 吸力特性与反力特性的配合
1—直流电磁机构吸力特性 2—交流电磁机构吸力特性 3—反力特性

为了使电磁机构正常工作，保证衔铁能牢牢吸合，其吸力特性与反力特性必须配合得当。在衔铁整个吸合过程中，其吸力都必须大于反力，即吸力特性必须始终位于反力特性上方，但不能过大或过小。吸力过大时，动、静触点接触及衔铁与铁心接触时的冲击力很大，会使触点和衔铁发生弹跳，从而导致触点熔焊或烧毁，影响电磁机构的机械寿命；吸力过小时，又不能保证可靠吸合，难以满足高频率操作的要求。在衔铁释放时，反力必须大于吸力（此时的吸力是由剩磁产生

的), 即吸力特性必须位于反力特性下方。实际应用中, 可通过调整反力弹簧或触点初压力来改变反力特性, 使之与吸力特性配合得当。

3. 单相交流电磁机构上短路环的作用

对于单相交流电磁机构, 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, 即

$$B = B_m \sin \omega t \tag{1-3}$$

代入式 (1-2) 可得, 电磁吸力为

$$F_{at} = \frac{10^7}{8\pi} SB_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{10^7}{8\pi} SB_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \tag{1-4}$$

可见, 单相交流电磁机构的电磁吸力是一个两倍于电源频率的周期性变量。当电磁吸力的瞬时值大于反力时, 衔铁吸合; 当电磁吸力的瞬时值小于反力时, 衔铁释放。电源电压变化一个周期, 衔铁吸合两次、释放两次, 随着电源电压的变化, 衔铁周而复始地闭合与释放, 使得衔铁产生振动和噪声, 甚至使铁心松散。为此须采取有效措施, 消除振动与噪声。

具体解决办法是在单相交流电磁机构铁心端面开一个小槽, 在槽内嵌入铜质短路环 (或称分磁环), 如图 1-7 所示。加上短路环后, 铁心中的磁通被分成两部分, 即不穿过短路环的主磁通 Φ_1 和穿过短路环的磁通 Φ_2 , Φ_1 和 Φ_2 大小接近, 而电角度相位差约为 90° , 因而两相磁通不会同时过零。由于电磁吸力与磁通的二次方成正比, 所以由两相磁通产生的合成电磁吸力始终大于反力, 使衔铁与铁心牢牢吸合, 这样就消除了振动和噪声。

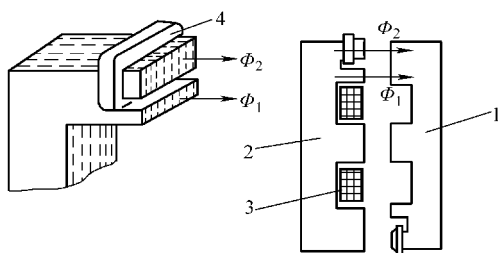


图 1-7 单相交流电磁机构的短路环
1—衔铁 2—铁心 3—线圈 4—短路环

一般短路环包围 2/3 的铁心端面, 通常用黄铜、康铜或镍铬合金等材料制成。短路环应无断点且没有焊缝。

1.2.2 触点系统

触点是一切有触点电器的执行部件, 它在衔铁的带动下起接通和分断电路的作用。因此, 要求触点导电、导热性能良好。触点通常用铜或银质材料制成。铜的表面容易氧化而生成一层氧化铜, 使触点的接触电阻增大, 损耗增大, 温度上升, 影响电器的使用寿命。所以, 对于小电流电器 (如接触器、继电器等), 其触点常采用银质材料。

1. 触点的接触形式

触点主要有两种结构形式: 桥式触点和指形触点, 如图 1-8 所示。触点的接触形式有三种, 即点接触、线接触和面接触, 如图 1-9 所示。点接触由两个半球形触点或一个半球形与一个平面构成, 点接触的桥式触点主要适用于电流不大且压力小的场合, 如接触器的辅助触点或继电器触点。桥式触点多为面接触, 它允许通过较大的电流。这种触点一般在接触表面上镶有合金, 以减小接触

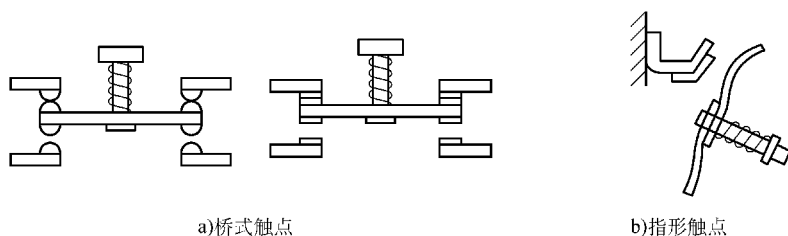


图 1-8 触点的结构形式

电阻并提高耐磨性，多用于大容量、大电流的场合（如交流接触器的主触点）。指形触点的接触形式为线接触，接触区域为一条直线，触点接通或分断时产生滚动摩擦，既可消除触点表面的氧化膜，又可缓冲触点闭合时的撞击，改善触点的电气性能。指形触点适用于接电次数多、电流大的场合。

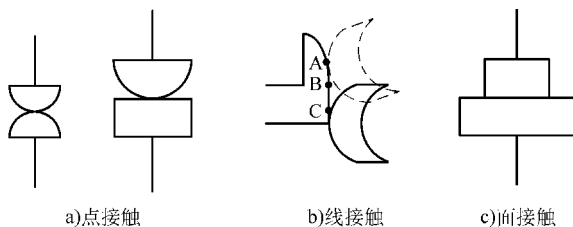


图 1-9 触点的接触形式

2. 触点的分类

触点按其所控制的电路可分为主触点和辅助触点。主触点用于接通或断开主电路，允许通过较大的电流；辅助触点用于接通或断开控制电路，只能通过较小的电流。

触点又有常开触点和常闭触点之分。在无外力作用且线圈未通电时，触点间是断开状态的称为常开触点（即动合触点），反之称为常闭触点（即动断触点）。

1.2.3 灭弧系统

1. 电弧

在通电状态下，动、静触点脱离接触时，如果被开断电路的电流超过某一数值（根据触点材料的不同其值在 0.25 ~ 1A 间），开断后加在触点间隙（或称弧隙）两端的电压超过某一数值（根据触点材料的不同其值在 12 ~ 20V 间）时，则触点间隙中就会产生电弧。电弧实际上是触点间气体在强电场下产生的放电现象，产生高温并发出强光和火花。电弧的产生为电路中电磁能的释放提供了通路，在一定程度上可以减小电路开断时的冲击电压。但电弧的产生却使电路仍然保持导通状态，使得该断开的电路未能断开，延长了电路的分断时间；同时电弧产生的高温将烧损触点金属表面，降低电器的寿命，严重时会引起火灾或其他事故，因此应采取的措施迅速熄灭电弧。

2. 常用的灭弧方法

欲使电弧熄灭，应设法拉长电弧，从而降低电场强度；或者利用电磁力使电弧在冷却介质中运动，以降低弧柱周围的温度；或者将电弧挤入由绝缘的栅片组成的窄缝中以冷却电弧；或者将电弧分成许多串联的短弧。在低压电器中，常用的灭弧方法和灭弧装置有电动力灭弧、栅片灭弧、灭弧罩、窄缝灭弧、磁吹灭弧等。

(1) 电动力灭弧

桥式触点在分断时本身就具有电动力吹弧功能，不用任何附加装置，便可使电弧迅速熄灭。图 1-10 为一种桥式结构双断口触点（所谓双断口就是在一个回路中有两个产生和断开电弧的间隙）。当触点打开时，在断口中产生电弧，电弧电流在断口中电弧周围产生图中以“⊕”表示的磁场（由右手定则确定，⊕表示磁通的方向是由纸外跑向纸面），在该磁场作用下，电弧受力为 F ，其方向指向外侧（由左手定则确定），如图 1-10 所示。在 F 的作用下，电弧向外运动并拉长、冷却而迅速熄灭。这种灭弧方法结构简单，无需专门的灭弧装置，一般多用于小功率电器中。其缺点：当电流较小时，电动力很小，灭弧效果较弱。但当配合栅片灭弧后，也可用于大功率的电器中。交流接触器常采用这种灭弧方法。

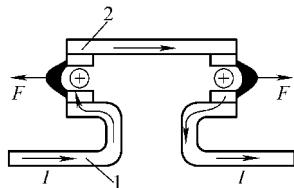


图 1-10 双断口结构的电动力灭弧示意图

1—静触点 2—动触点

(2) 栅片灭弧

栅片灭弧示意图如图 1-11 所示。当触点分开时，所产生的电弧在吹弧电动力的作用下被推向一组静止的金属片内。这组金属片称为栅片，由多片镀锌薄钢片组成，它们彼此间相互绝缘。灭弧栅片系导磁材料，它将使电弧上部的磁通通过灭弧栅片形成闭合回路。由于电弧的磁通上部稀疏、下部稠密，这种上疏下密的磁场分布将对电弧产生由下至上的电磁力，将电弧推入灭弧栅片中去。当电弧进入栅片后，被分割成一段段串联的短弧，而栅片就是这些短弧的电极，且交流电弧在电弧电流过零瞬间会使每两片灭弧栅片间出现 150 ~ 250V 的绝缘介电强度，使整个灭弧栅的绝缘强度大大加强，使得外加电压不足以维持电弧而迅速熄灭。此外，栅片还能吸收电弧热量，使电弧迅速冷却，这样当电弧进入栅片后就会很快熄灭。交流电器宜采用栅片灭弧。

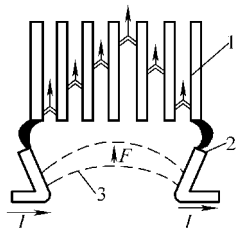


图 1-11 栅片灭弧示意图
1—灭弧栅片 2—触点 3—电弧

(3) 灭弧罩

比灭弧栅片更简单的灭弧装置是耐高温的灭弧罩，灭弧罩用石棉水泥板或陶土制成，用以降温和隔弧。它可用于交直流灭弧。

(4) 窄缝灭弧

窄缝灭弧示意图如图 1-12 所示。它是利用灭弧罩的窄缝来实现的。这种灭弧方法多用于大容量接触器。

(5) 磁吹灭弧

磁吹灭弧示意图如图 1-13 所示。在触点电路中串入一个吹弧线圈，吹弧线圈 1 由扁铜线弯成，中间装有铁心 3，它们之间由绝缘套筒 2 相隔。铁心两端装有两片导磁夹板 5，夹持在灭弧罩 6 的两边，动触点 7 和静触点 8 位于灭弧罩内，处在两片导磁夹板之间。图 1-13 表示动、静触点分断过程已经形成电弧（在图中用粗黑线表示）。由于吹弧线圈、主触点与电弧形成串联电路，因此流过触点的电流就是流过吹弧线圈的电流。当电流 I 的方向如图中箭头所示时，电弧电流在它的四周形成一个磁场，根据右手螺旋定则可以判定，电弧上方的磁场方向离开纸面，用“ \odot ”表示；电弧下方的磁场方向进入纸面，用“ \oplus ”表示。在电弧周围还有一个由吹弧线圈中的电流所产生的磁场，根据右手螺旋定则可以判定这个磁场的方向是进入纸面的，用“ \times ”表示。这两个磁通在电弧下方方向相同（叠加），在电弧上方方向相反（相减）。因此，电弧下方的磁场强于上方的磁场。在下方磁场作用下，电弧受电力 F (F 的方向如图 1-13 所示) 的作用被吹离触点，经引弧角 4 进入灭弧罩，并将热量传递给罩壁，使电弧冷却熄灭。

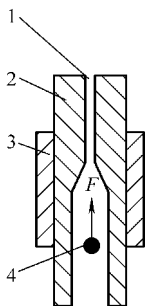


图 1-12 窄缝灭弧示意图
1—纵缝 2—介质 3—磁性夹板 4—电弧

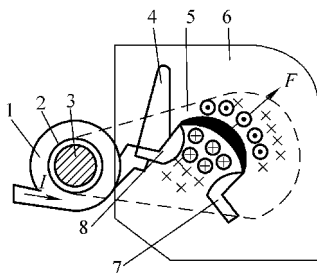


图 1-13 磁吹灭弧示意图
1—吹弧线圈 2—绝缘套筒 3—铁心 4—引弧角
5—导磁夹板 6—灭弧罩 7—动触点 8—静触点

磁吹灭弧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。磁吹力的方向与电流方向无关。磁吹灭弧广泛应用于直流接触器中。

1.3 接触器

接触器 (Contactor) 是一种用于频繁地接通或断开交直流主电路及大容量控制电路的自动切换电器。在功能上，接触器除能实现自动切换外，还具有手动开关所不能实现的远距离操作功能和失电压 (或欠电压) 保护功能。它不同于低压断路器，虽有一定的过载能力，但却不能切断短路电流，也不具备过载保护的功能。由于接触器结构紧凑、价格低廉、工作可靠、维护方便，因而用途十分广泛，是电力拖动自动控制系统中的重要元件之一。在 PLC 控制系统中，接触器常作为输出执行元件，用于控制电动机、电热设备、电焊机、电容器组等负载。

1.3.1 接触器的组成及工作原理

以电磁感应原理工作的接触器其结构组成与电磁式电器相同，一般也由电磁机构、触点系统、灭弧系统、复位弹簧机构或缓冲装置、支架与底座等几部分组成。接触器的电磁机构由电磁线圈、铁心、衔铁和复位弹簧几部分组成。

接触器的工作原理：当电磁线圈通电后，线圈电流在铁心中产生磁通，该磁通对衔铁产生克服复位弹簧反力的电磁吸力，使衔铁带动触点动作。触点动作时，常闭触点先断开，常开触点后闭合。当线圈中的电压值降低到某一数值 (无论是正常控制还是欠电压、失电压故障，一般降至 85% 线圈额定电压) 时，铁心中的磁通下降，电磁吸力减小，当减小到不足以克服复位弹簧的反力时，衔铁在复位弹簧的反力作用下复位，使主、辅触点的常开触点断开，常闭触点恢复闭合。这也是接触器的失电压保护功能。

1.3.2 接触器的分类

接触器的种类很多，按驱动方式不同可分为电磁式、永磁式、气动式和液压式，目前以电磁式应用最广泛。本书主要介绍电磁式接触器。

接触器按流过主触点电流性质的不同，可分为交流接触器和直流接触器。它们的电磁线圈电流种类既有与各自主触点电流相同的，也有不同的，如对于可靠性要求很高的交流接触器，其线圈可采用直流励磁方式。

1. 交流接触器

交流接触器用于控制额定电压至 660V 或 1140V、电流至 1000A 的交流电路，频繁地接通和分断控制交流电动机等电气设备电路，并可与热继电器或电子式保护装置组合成电动机起动器。

交流接触器采用直动式结构，触点灭弧系统位于上部，电磁系统位于下部，触点为双断点且由银合金制成。63A 及以上产品有六对辅助触点，三种组合。

(1) 电磁机构

电磁机构由电磁线圈、铁心、衔铁和复位弹簧几部分组成。铁心一般用硅钢片叠压后铆成，以减少涡流与磁滞损耗，防止过热。电磁线圈绕在骨架上做成扁而厚的形状，与铁心隔离，这样有利于铁心和线圈的散热。其铁心形状有 U 形和 E 形两种。E 形铁心的中柱较短，铁心闭合时上下中柱间形成 0.1 ~ 0.2mm 的气隙，这样可减小剩磁，避免线圈断电后铁心粘连。交流接触器在铁心柱端面嵌有短路环。

(2) 触点系统

交流接触器的触点一般由银钨合金制成，具有良好的导电性和耐高温烧蚀性。触点有主触