



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

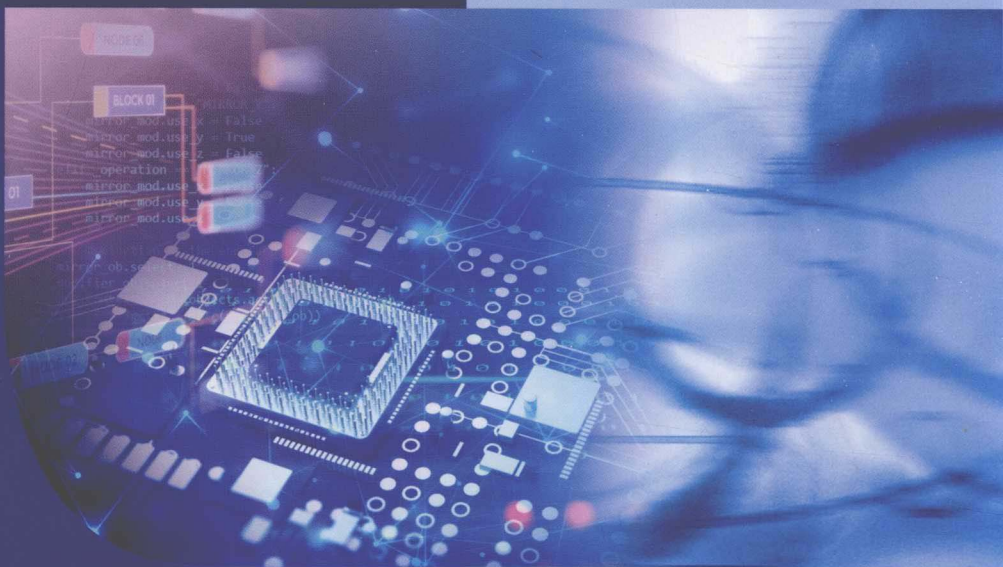


“十二五”江苏省高等学校重点教材

# 电气控制与PLC应用技术 —— 西门子S7-200 SMART PLC

第3版

◎ 主 编 黄永红  
◎ 副主编 刁小燕 项倩雯



免费电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“二五”普通高等教育本科国家级规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号：2016-1-079）

# 电气控制与 PLC 应用技术

——西门子 S7-200 SMART PLC

## 第 3 版

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



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,以及 PLC 的基本组成和工作原理;以西门子 S7-200 SMART PLC 为教学机型,重点介绍了 PLC 的系统配置、指令系统、通信与网络、运动控制指令及控制系统程序设计等内容。书中安排了许多典型应用实例,包括开关量控制、模拟量 PID 控制等。通过实例介绍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。本书各章附有习题与思考题,附录有实验指导书、课程设计任务书供参考选用。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、机械等相关专业的教学用书,也可作为控制工程、电气工程领域工程技术人员的培训教材或参考书。

本书有配套的电子课件等共享资料,欢迎扫描前言中二维码获取,或发邮件到 jinacmp@163.com 索取,也可登录 www.cmpedu.com 注册后下载。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制与 PLC 应用技术: 西门子 S7-200 SMART PLC/黄永红  
主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2018. 10  
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-61047-2

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 221682 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 陈文龙 王小东  
责任校对: 刘岚 封面设计: 张静  
责任印制: 常天培  
天津千鹤文化传播有限公司印刷  
2018 年 12 月第 3 版第 1 次印刷  
184mm×260mm·23.5 印张·635 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-61047-2

定价: 55.00 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及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实践经验和读者的建议,对原书内容进行了修订。修订中坚持结合生产实际、突出工程应用和内容通俗易懂的原则,保留了精选内容,删除了过时内容,增加了运动控制、向导应用、变频器和触摸屏应用等实用内容。本书第1版和第2版的PLC应用技术部分主要以西门子S7-200 PLC为教学机型,本版主要以西门子S7-200 SMART PLC为教学机型。

S7-200 SMART小型PLC是西门子SIMATIC系列中的重要成员,也是S7-200系列PLC的发展方向。同时,SMART也代表了经济型自动化解决方案,其寓意在于简单(Simple)、易维护(Maintenance-friendly)、高性价比(Affordable)、可靠(Reliable)以及开发时间短(Time to market)。具体优势有以下六点:其一,S7-200 SMART PLC机型丰富,配置灵活,配备西门子专用高速处理器芯片,基本指令执行时间可达 $0.15\mu\text{s}$ ,在同级别小型PLC中遥遥领先;同时拥有I/O点数丰富的CPU模块,单体I/O点数最高可达60点,可满足大部分小型自动化设备的控制需求。其二,通信组网,经济便捷,其CPU模块本体配有以太网接口,一根普通的网线即可将程序下载到PLC中,省去了专用编程电缆;同时,通过以太网接口还可与其他CPU模块、触摸屏及计算机等进行通信,轻松组网。其三,S7-200 SMART PLC新颖的信号板设计可扩展通信端口、数字量通道、模拟量通道,在不额外占用电控柜空间的前提下,信号板扩展能更加贴合用户的实际配置,提升产品的利用率,降低用户的扩展成本。其四,三轴脉冲,运动自如,S7-200 SMART PLC的CPU模块本体集成有3路高速脉冲输出,频率高达100kHz,支持PWM输出方式以及多种运动模式,可自由设置运动包络;通过方便易用的向导设置功能,可快速实现设备调速、定位等功能。其五,S7-200 SMART PLC具有Micro SD卡插槽,使用通用Micro SD卡即可实现程序的更新和移植;S7-200 SMART PLC与SMART LINE IE触摸屏和V20、G120C等变频器组网通信,可实现高性价比的小型自动化系统解决方案,能满足用户对于人机交互、控制及驱动等全方位需求。其六,利用编程软件的向导功能可以非常方便地实现PID自整定运算和通信组网等功能。

本书包含了传统电气控制和现代PLC应用技术两部分内容。第1章主要介绍电气控制系统中常用低压电器的结构、工作原理和选用方法。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章主要介绍PLC的发展概况、基本组成及工作原理。第4~10章以西门子S7-200 SMART PLC作为教学机型,重点介绍PLC的接口模块与系统配置、基本指令及其应用实例、功能指令与应用PLC的通信及组网应用、S7-200 SMART PLC在运动控制中的应用、PLC控制系统程序设计方法以及STEP 7-Micro/WIN SMART编程软件的使用等内容。

本书基础部分用较多的小型实例引领读者入门，让读者能完成简单的工程应用。提高应用部分精选工程实例供读者模仿学习，以提高读者解决实际工程问题的能力。本书安排了一些难度适中的习题与思考题，供学生课后练习。附录 C 编写了 11 个实验，附录 D 编写了课程设计指导书，附录 E 编写了两个典型应用的课程设计任务书，供任课教师根据学校硬件条件和课程设置等情况选用。

本书由黄永红任主编并统稿，刁小燕、项倩雯任副主编。参加编写的还有沈跃、蔡晓磊、吉敬华、杨东、张新华及南京航大意航科技股份有限公司的陈强高级工程师。苏州施耐德电气有限公司的石睿高级工程师、上海良信电器股份有限公司的黄银芳高级工程师为本书提供了宝贵的建议和最新的资料，同时，本书参考了一些学者的文献资料，在此向他们表示衷心的感谢！另外，感谢杭州力控科技有限公司的工程师们，感谢他们与我们联合设计、开发了结构紧凑、功能强大的双工位实验平台。

本书相关的编程软件、系统手册和书中的部分源程序等资料可扫描下方二维码获取。由于编者水平有限，加之时间仓促，书中错误在所难免，敬请读者批评指正。



本书共享资料二维码

编 者

# 目 录

## 前 言

## 第1章 常用低压电器 ..... 1

- 1.1 低压电器的定义及分类 ..... 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 ..... 19
- 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 ..... 25
- 1.7 开关电器 ..... 26
  - 1.7.1 刀开关 ..... 26
  - 1.7.2 低压断路器 ..... 27
- 1.8 熔断器 ..... 29
  - 1.8.1 熔断器的结构和工作原理 ..... 29
  - 1.8.2 熔断器的类型 ..... 30
  - 1.8.3 熔断器的主要技术参数 ..... 31

- 1.8.4 熔断器的选择 ..... 32
- 1.9 电磁执行器件 ..... 32
  - 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 ..... 34

## 第2章 基本电气控制电路 ..... 36

- 2.1 电气控制电路的绘制原则及标准 ..... 36
  - 2.1.1 电气图中的图形符号及文字符号 ..... 36
  - 2.1.2 电气原理图的绘制原则 ..... 37
  - 2.1.3 电气安装接线图 ..... 39
  - 2.1.4 电气元器件布置图 ..... 40
- 2.2 交流电动机的基本控制电路 ..... 40
  - 2.2.1 三相笼型异步电动机直接起动控制电路 ..... 40
  - 2.2.2 三相笼型异步电动机减压起动控制电路 ..... 47
  - 2.2.3 三相绕线转子异步电动机起动控制电路 ..... 49
  - 2.2.4 三相笼型异步电动机制动控制电路 ..... 50
  - 2.2.5 三相笼型异步电动机调速控制电路 ..... 53
  - 2.2.6 组成电气控制电路的基本规律 ..... 55
  - 2.2.7 电气控制电路中的保护环节 ..... 55
- 2.3 典型生产机械电气控制电路的分析 ..... 57
  - 2.3.1 电气控制电路分析的基础 ..... 57
  - 2.3.2 电气原理图阅读分析的方法与步骤 ..... 57
  - 2.3.3 C650型卧式车床电气控制电路的分析 ..... 58
- 2.4 电气控制电路的一般设计法 ..... 61

|  |           |                            |     |
|--|-----------|----------------------------|-----|
| 2.4.1 一般设计法的主要原则                       | 61        | 5.1 PLC 的编程语言              | 99  |
| 2.4.2 一般设计法中应注意的问题                     | 62        | 5.2 数据类型与存储区域              | 100 |
| 2.4.3 一般设计法控制电路举例                      | 62        | 5.2.1 数制                   | 100 |
| 习题与思考题                                 | 63        | 5.2.2 数据类型与范围              | 101 |
| <b>第3章 可编程序控制器概述</b>                   | <b>65</b> | 5.2.3 存储器与存储区              | 102 |
| 3.1 PLC 的产生及定义                         | 65        | 5.3 S7-200 SMART PLC 的编程元件 | 103 |
| 3.1.1 PLC 的产生                          | 65        | 5.3.1 编程元件的分类              | 104 |
| 3.1.2 PLC 的定义                          | 66        | 5.3.2 编程元件的地址范围            | 108 |
| 3.2 PLC 的发展与应用                         | 66        | 5.4 寻址方式                   | 109 |
| 3.2.1 PLC 的发展历程                        | 66        | 5.5 程序结构与编程规约              | 111 |
| 3.2.2 PLC 的发展趋势                        | 67        | 5.5.1 程序结构                 | 111 |
| 3.2.3 PLC 的应用领域                        | 69        | 5.5.2 编程的一般规约              | 111 |
| 3.3 PLC 的特点                            | 71        | 5.6 S7-200 SMART PLC 的基本指令 | 113 |
| 3.4 PLC 的分类                            | 72        | 5.6.1 位逻辑指令                | 113 |
| 3.4.1 按结构形式分类                          | 72        | 5.6.2 立即 I/O 指令            | 115 |
| 3.4.2 按功能分类                            | 74        | 5.6.3 逻辑堆栈指令               | 116 |
| 3.4.3 按 I/O 点数分类                       | 75        | 5.6.4 取反指令与空操作指令           | 119 |
| 3.4.4 按生产厂家分类                          | 75        | 5.6.5 正/负跳变指令              | 119 |
| 3.5 PLC 的硬件结构和各部分的作用                   | 75        | 5.6.6 定时器指令                | 120 |
| 3.6 PLC 的工作原理                          | 78        | 5.6.7 计数器指令                | 124 |
| 3.6.1 PLC 控制系统的组成                      | 78        | 5.6.8 比较指令                 | 126 |
| 3.6.2 PLC 循环扫描的工作过程                    | 79        | 5.6.9 移位寄存器指令              | 127 |
| 3.6.3 PLC 用户程序的工作过程                    | 80        | 5.6.10 顺序控制继电器指令           | 129 |
| 3.6.4 PLC 工作过程举例说明                     | 81        | 5.7 典型控制环节的 PLC 程序设计       | 131 |
| 3.6.5 输入、输出延迟响应                        | 81        | 5.7.1 单向运转电动机起、停控制程序       | 132 |
| 3.6.6 PLC 对输入、输出的处理规则                  | 83        | 5.7.2 单按钮起、停控制程序           | 132 |
| 习题与思考题                                 | 84        | 5.7.3 具有点动调整功能的电动机起、停控制程序  | 133 |
| <b>第4章 S7-200 SMART PLC 的接口模块与系统配置</b> | <b>85</b> | 5.7.4 电动机的正、反转控制程序         | 133 |
| 4.1 S7-200 SMART PLC 控制系统的基本构成         | 85        | 5.7.5 大功率电动机的星-三角减压启动控制程序  | 134 |
| 4.2 S7-200 SMART PLC 的扩展模块             | 89        | 5.7.6 闪烁控制程序               | 136 |
| 4.2.1 数字量扩展模块                          | 89        | 5.7.7 瞬时接通/延时断开程序          | 136 |
| 4.2.2 模拟量扩展模块                          | 92        | 5.7.8 定时器、计数器的扩展程序         | 137 |
| 4.2.3 信号板                              | 94        | 5.7.9 高精度时钟程序              | 137 |
| 4.3 S7-200 SMART PLC 的系统配置             | 95        | 5.7.10 多台电动机顺序起、停控制程序      | 138 |
| 4.3.1 最大 I/O 配置的限制条件                   | 95        | 5.7.11 故障报警程序              | 141 |
| 4.3.2 扩展模块的编址                          | 96        | 5.8 梯形图编写规则                | 142 |
| 4.3.3 内部电源的负载能力                        | 97        | 习题与思考题                     | 144 |
| 习题与思考题                                 | 98        |                            |     |
| <b>第5章 S7-200 SMART PLC 的基本指令及应用</b>   | <b>99</b> |                            |     |

|  |            |   |            |
|--|------------|---|------------|
| <b>第6章 S7-200 SMART PLC 的功能指令与应用</b> .....         | <b>146</b> | 7.3.3 自由口通信应用实例 .....                       | 218        |
| 6.1 S7-200 SMART PLC 的基本功能指令 .....                 | 146        | 7.4 Modbus RTU 通信及应用 .....                  | 225        |
| 6.1.1 数据传送指令 .....                                 | 146        | 7.4.1 Modbus RTU 通信概述 .....                 | 225        |
| 6.1.2 数学运算指令 .....                                 | 149        | 7.4.2 Modbus RTU 主站指令与从站指令 .....            | 226        |
| 6.1.3 数据处理指令 .....                                 | 157        | 7.4.3 Modbus RTU 通信应用实例一 .....              | 230        |
| 6.2 程序控制指令 .....                                   | 172        | 7.4.4 Modbus RTU 通信应用实例二 .....              | 233        |
| 6.2.1 有条件结束指令 .....                                | 172        | 7.5 USS 通信及应用 .....                         | 236        |
| 6.2.2 暂停指令 .....                                   | 172        | 7.5.1 USS 通信概述 .....                        | 236        |
| 6.2.3 监视定时器复位指令 .....                              | 172        | 7.5.2 USS 指令介绍 .....                        | 237        |
| 6.2.4 跳转与标号指令 .....                                | 173        | 习题与思考题 .....                                | 241        |
| 6.2.5 循环指令 .....                                   | 173        | <b>第8章 S7-200 SMART PLC 在运动控制中的应用</b> ..... | <b>242</b> |
| 6.3 局部变量表与子程序 .....                                | 174        | 8.1 高速 I/O 指令 .....                         | 242        |
| 6.3.1 局部变量表 .....                                  | 174        | 8.1.1 高速计数器指令 .....                         | 242        |
| 6.3.2 子程序 .....                                    | 175        | 8.1.2 高速脉冲输出指令 .....                        | 249        |
| 6.4 中断程序与中断指令 .....                                | 177        | 8.2 S7-200 SMART PLC 在开环运动控制中的应用 .....      | 254        |
| 6.4.1 中断程序 .....                                   | 177        | 8.2.1 运动控制 .....                            | 255        |
| 6.4.2 中断指令 .....                                   | 177        | 8.2.2 运动控制指令 .....                          | 260        |
| 6.5 PID 指令及应用 .....                                | 181        | 8.2.3 S7-200 SMART PLC 运动控制应用实例 .....       | 262        |
| 6.5.1 PID 回路指令及应用 .....                            | 181        | 8.3 S7-200 SMART PLC 在变频调速系统中的应用 .....      | 264        |
| 6.5.2 PID 向导 .....                                 | 186        | 8.3.1 变频器多段调速控制 .....                       | 265        |
| 6.5.3 PID 参数自整定 .....                              | 189        | 8.3.2 变频器模拟量调速 .....                        | 266        |
| 6.5.4 S7-200 SMART PLC 结合智能仪表实现 PID 控制 .....       | 192        | 8.3.3 USS 协议与变频器的通信调速 .....                 | 268        |
| 习题与思考题 .....                                       | 195        | 习题与思考题 .....                                | 271        |
| <b>第7章 S7-200 SMART PLC 的通信及网络</b> .....           | <b>197</b> | <b>第9章 PLC 控制系统设计与应用实例</b> .....            | <b>272</b> |
| 7.1 SIEMENS 工业自动化网络 .....                          | 197        | 9.1 PLC 控制系统设计的内容与步骤 .....                  | 272        |
| 7.1.1 SIEMENS PLC 网络的层次结构 .....                    | 197        | 9.1.1 PLC 控制系统设计的内容 .....                   | 272        |
| 7.1.2 网络通信设备 .....                                 | 198        | 9.1.2 PLC 控制系统设计的步骤 .....                   | 272        |
| 7.1.3 网络通信协议 .....                                 | 200        | 9.2 PLC 控制系统的硬件配置 .....                     | 274        |
| 7.1.4 通信连接 .....                                   | 202        | 9.2.1 PLC 机型的选择 .....                       | 274        |
| 7.2 以太网通信及应用 .....                                 | 203        | 9.2.2 开关量 I/O 模块的选择 .....                   | 276        |
| 7.2.1 以太网通信概述 .....                                | 203        | 9.2.3 模拟量 I/O 模块的选择 .....                   | 277        |
| 7.2.2 S7-200 SMART CPU 之间的通信 .....                 | 203        | 9.3 PLC 控制系统梯形图程序的设计 .....                  | 277        |
| 7.2.3 S7-200 SMART CPU 与 SMART LINE 触摸屏之间的通信 ..... | 207        | 9.3.1 经验设计法 .....                           | 277        |
| 7.3 自由口通信及应用 .....                                 | 213        | 9.3.2 顺序控制设计法与顺序功能图 .....                   | 279        |
| 7.3.1 自由口通信概述 .....                                | 213        | 9.4 顺序控制梯形图的设计方法 .....                      | 282        |
| 7.3.2 自由口通信指令 .....                                | 213        | 9.4.1 置位/复位指令编程 .....                       | 282        |



|               |   |            |             |                                |            |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------------|------------|
| 9.4.2         | 顺序控制继电器指令编程                                 | 284        | 10.3.5      | 扫描次数的选择                        | 336        |
| 9.4.3         | 具有多种工作方式的顺序控制<br>梯形图设计方法                    | 287        | 10.3.6      | S7-200 SMART 的出错处理             | 336        |
| 9.5           | PLC 在工业控制系统中的典型应用<br>实例                     | 292        | <b>附录</b>   |                                | <b>338</b> |
| 9.5.1         | 节日彩灯的 PLC 控制                                | 292        | 附录 A        | 常用低压电器的图形符号及文字<br>符号           | 338        |
| 9.5.2         | 恒温控制  | 294        | 附录 B        | 部分特殊存储器 (SM) 的含义               | 339        |
| 9.5.3         | 基于增量式旋转编码器和 PLC<br>高速计数器的转速测量               | 299        | 附录 C        | 实验指导书                          | 341        |
| 9.5.4         | 室内游泳池水处理系统 PLC<br>控制                        | 301        | 实验 1        | 异步电动机的正、反转控制<br>(含两地控制)        | 341        |
| 习题与思考题        |   | 315        | 实验 2        | 运料小车自动往返继电器-接触器<br>控制          | 342        |
| <b>第 10 章</b> | <b>STEP 7-Micro/WIN SMART<br/>编程软件功能与使用</b> | <b>316</b> | 实验 3        | S7-200 SMART PLC 初识            | 345        |
| 10.1          | 软件安装及硬件连接                                   | 316        | 实验 4        | 运料小车自动往返程序控制                   | 347        |
| 10.1.1        | 软件安装  | 316        | 实验 5        | 三级带式输送机的程序控制                   | 349        |
| 10.1.2        | 基本功能  | 316        | 实验 6        | 深孔钻及三工位运料小车程序<br>控制            | 351        |
| 10.1.3        | 主界面功能介绍                                     | 317        | 实验 7        | 彩灯的程序控制                        | 352        |
| 10.2          | 编程软件的使用                                     | 319        | 实验 8        | 交通信号灯的程序控制                     | 353        |
| 10.2.1        | 创建项目  | 319        | 实验 9        | PID 恒温控制                       | 353        |
| 10.2.2        | 系统组态  | 320        | 实验 10       | PLC 控制电动机变频调速<br>系统            | 356        |
| 10.2.3        | 通信连接  | 324        | 实验 11       | PLC 的通信与网络实验                   | 360        |
| 10.2.4        | 程序的编辑与下载                                    | 325        | 附录 D        | 课程设计指导书                        | 361        |
| 10.2.5        | 程序的预览与打印输出                                  | 329        | 附录 E        | 课程设计任务书                        | 362        |
| 10.3          | 程序的监控与调试                                    | 330        | 题 1         | 交通高低峰分段运行、数显倒计时<br>交通信号灯控制程序设计 | 362        |
| 10.3.1        | 程序状态监控                                      | 330        | 题 2         | PLC 控制变频调速系统程序设计               | 364        |
| 10.3.2        | 用状态表监控程序                                    | 332        | <b>参考文献</b> |                                | <b>367</b> |
| 10.3.3        | 在 RUN 模式下编辑程序                               | 334        |             |                                |            |
| 10.3.4        | 写入与强制操作                                     | 334        |             |                                |            |

# 第 1 章

## 常用低压电器

本章主要介绍在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、技术参数及选用原则等内容。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 低压电器的定义及分类

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。

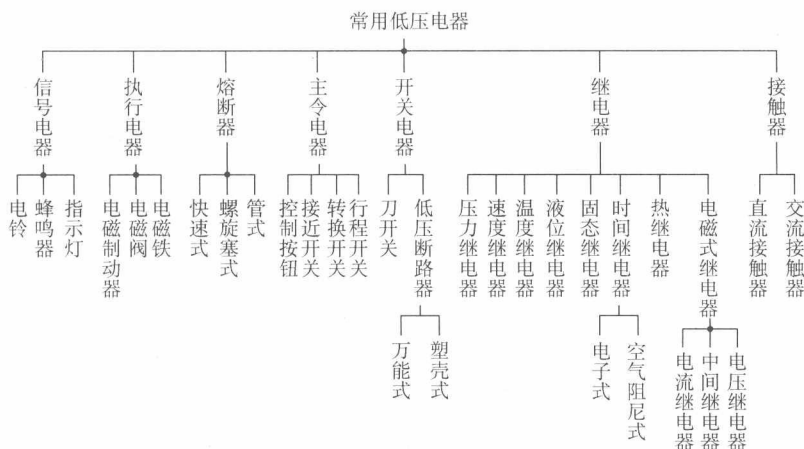


图 1-1 常用低压电器的分类

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类

##### (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. 按动作方式分类

(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. 按工作原理分类

(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，其类型也有很多。各种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. 电磁机构的结构及工作原理

电磁机构是电磁式电器的信号检测与转换部分，其主要作用是将电磁能转换为机械能，从而带动触点的触点动作，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。



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

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。

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) 衔铁做直线运动的双 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。通入直流电的电磁线圈称为直流线圈,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。其工作原理是: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。

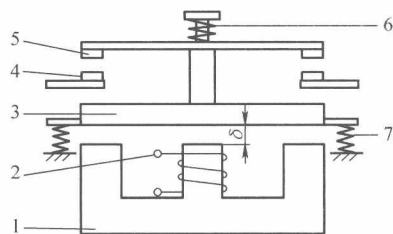


图 1-3 电磁式电器的工作原理示意图

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 8—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  $F_{at}$  的大小与磁极截面积  $S$  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,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

非磁性材料的磁导率  $\mu \approx \mu_0$ , 代入式 (1-1), 得

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

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);  $S$  为磁极截面积, 单位为  $\text{m}^2$  (平方米);  $\Phi$  为磁通量, 单位为 Wb (韦伯)。

当磁极截面积  $S$  为常数时, 电磁吸力  $F_{at}$  与  $B^2$  或  $\Phi^2$  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  $\delta$  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

具有电压线圈的直流电磁机构，由直流电流励磁，当电磁线圈外加电压  $U$  与线圈电阻  $R$  不变时，流过线圈的电流  $I$  不变，即磁势  $IN$  不受气隙变化的影响，电路在恒磁势下工作。由磁路定律  $\Phi = \frac{IN}{R_m}$ （式中， $R_m$  为气隙磁阻， $N$  为线圈匝数； $R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ ）可知， $F_{at} \propto \Phi^2 \propto \frac{1}{R_m^2} \propto \frac{1}{\delta^2}$ ，即电磁吸力  $F_{at}$  与气隙  $\delta$  的二次方成反比，

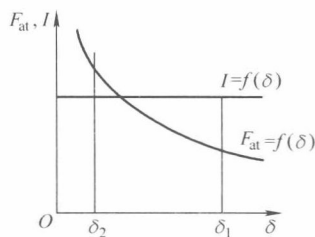


图 1-4 直流电磁机构吸力特性

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，则吸力越大。

由于衔铁闭合前后励磁线圈的电流不变，所以直流电磁机构适用于动作频繁的场所，且衔铁完全吸合后电磁吸力达到最大，工作可靠性高。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

具有电压线圈的交流电磁机构，其吸力特性与直流电磁机构有所不同。假定电磁线圈外加电压  $U$  不变，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， $f$  为电源频率）。当  $U$ 、 $f$ 、 $N$  为常数时， $\Phi$  为常数，即交流电磁机构在衔铁吸合前后  $\Phi$  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  $\delta$  的减小略有增加。交流电磁机构的吸力特性如图 1-5 所示。

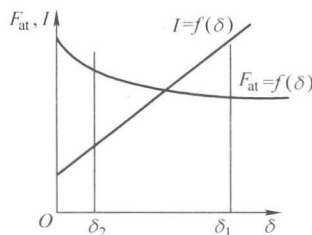


图 1-5 交流电磁机构吸力特性

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  $\delta$  的加大成正比增加，因此，励磁电流的大小也将随气隙长度  $\delta$  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，可达到吸合后额定电流的 10~15 倍。若衔铁卡住不能吸合或频繁动作，电磁线圈很可能因过电流而烧毁，故在可靠性要求高或操作频繁的场所，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  $\delta$  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  $\delta_1$  为起始位置， $\delta_2$  为动、静触点刚好接触时的位置。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  $\delta_2$  位置，动、静触点刚好接触，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。

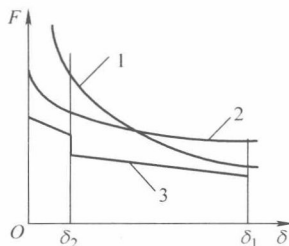


图 1-6 吸力特性与反力特性的配合

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

欲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。衔铁在整个吸合过程中，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，但也不能过大或过小。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，会使触点和衔铁产生弹跳，导致触点熔焊或磨损，影响触点和电磁机构的使用寿命；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，其气隙磁感应强度也按正弦规律变化，即

$$B = B_m \sin \omega t \quad (1-3)$$

将式(1-3)代入式(1-2)可得，电磁吸力为

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

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，衔铁周而复始地吸合与释放，使得衔铁产生振动并发出噪声，甚至使铁心松散。因此必须采取有效措施，消除振动与噪声。

具体解决办法是在铁心端面开一个槽，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  $\Phi_1$  和穿过短路环的磁通  $\Phi_2$ ， $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  大小接近，而相位差约为  $90^\circ$ ，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。

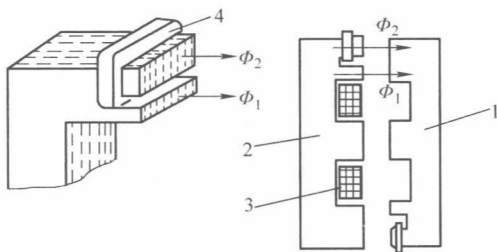


图1-7 单相交流电磁机构的短路环

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。

### 1. 触点的接触形式

触点的结构形式有两种：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触点与一个平面触点构成，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，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。

### 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）。

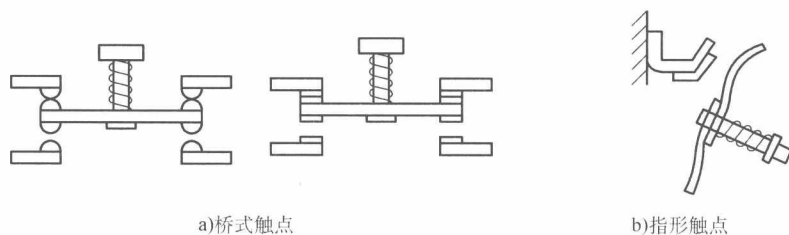


图 1-8 触点的结构形式

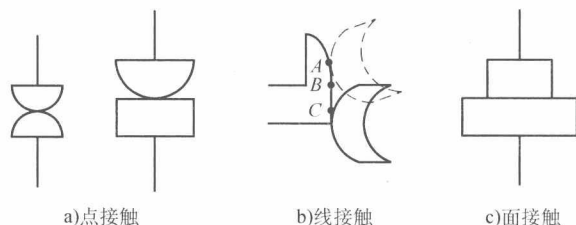


图 1-9 触点的接触形式

### 1.2.3 灭弧系统

#### 1. 电弧的产生及危害

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  $0.25 \sim 1\text{A}$  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  $12 \sim 20\text{V}$  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，降低电器寿命，严重时会引起火灾等事故，因此应采取迅速措施迅速熄灭电弧。

#### 2. 常用的灭弧方法

低压电器常用的灭弧方法有电动力灭弧、灭弧栅灭弧、灭弧罩灭弧、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灭弧功能，不用任何附加装置，便可使电弧迅速熄灭。图 1-10 所示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“ $\otimes$ ”表示的磁场（由右手定则确定， $\otimes$ 表示磁通的方向是由纸外指向纸面），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。其缺点是，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。

(2) 灭弧栅灭弧

灭弧栅灭弧示意图如图 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，由多片镀铜薄钢片组成，它们彼此间相互绝缘。片间距离为 2~3mm。灭弧栅片是导磁材料，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，将电弧吸入栅片中，电弧被栅片分割成一段段串联的短电弧。当交流电压过零时，电弧自然熄灭。电弧要重燃，两栅片必须有 150~250V 的电弧压降。这样，电弧由于外加电压不足而迅速熄灭。此外，栅片还能吸收电弧热量，使电弧过零熄灭后很难重燃。交流电器宜采用灭弧栅灭弧。

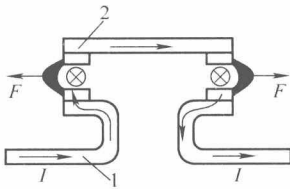


图 1-10 双断口结构的电动力灭弧示意图  
1—静触点 2—动触点

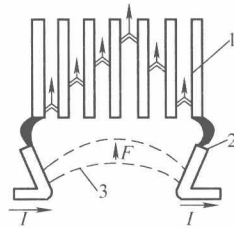


图 1-11 灭弧栅灭弧示意图  
1—灭弧栅片 2—触点 3—电弧

(3) 灭弧罩灭弧

比灭弧栅更简单的灭弧装置是耐高温的灭弧罩，它通常用耐弧陶土、石棉水泥或耐弧塑料制成，用以降温 and 隔弧。灭弧罩可用于交流和直流灭弧。灭弧栅灭弧和磁吹灭弧一般带有灭弧罩。

(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

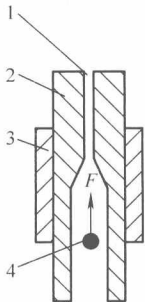


图 1-12 窄缝灭弧示意图

1—纵缝 2—介质 3—磁性夹板 4—电弧

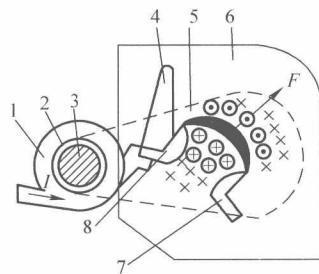


图 1-13 磁吹灭弧示意图

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



触点分断过程已经形成电弧（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“ $\otimes$ ”表示。在电弧周围还有一个由磁吹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“ $\otimes$ ”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，电弧受电动力  $F$ （ $F$  的方向见图 1-13）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。

磁吹灭弧是利用电弧电流本身灭弧，因而电弧电流越大，吹弧能力越强。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。接触器结构紧凑、价格低廉、工作可靠、维护方便、用途广泛，是电气控制系统中的重要元件之一。在 PLC 控制系统中，接触器常用作 PLC 输出执行元件，用于控制电动机、电热设备、电焊机及电容器组等负载。

### 1.3.1 接触器的组成及工作原理

接触器的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。当触点动作时，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，实现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为广泛。本书主要介绍电磁式接触器。

接触器按流过主触点电流种类的不同，分为交流接触器和直流接触器两种。它们的电磁线圈电流种类既有与各自触点电流种类相同的，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，触点系统、灭弧系统位于上部、电磁机构位于下部。