



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案下载

www.cmpedu.com

电气控制与PLC

王建平 朱程辉 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育电气信息类规划教材

电气控制与 PLC

主编 王建平 朱程辉
参编 黄 毅
主审 邵惠鹤



机械工业出版社

本书从教学和工程应用实际出发,结合目前国内许多高校 PLC 实验教学设备现状,较系统地介绍了常用低压电器及新型低压电器,电气控制电路的基本环节及设计方法,典型电气控制系统实例,PLC 的基本结构与工作原理,罗克韦尔自动化公司的 MicroLogix 系列和 SLC5 系列 PLC 的硬件结构、基本指令与功能指令的编程方法及应用,PLC 控制系统的设计,PLC 通信网络及应用实例,西门子公司 S7 系列 PLC 及 S7-200 指令系统,并附有适量的习题。

本书可作为普通高等教育本科自动化、电气工程及自动化、机电一体化及其相关专业的“电器与可编程序控制器”或“电气控制与可编程序控制器”及类似课程的教材,也可供从事电气工程领域工作的工程技术人员参考。

本书配套授课电子课件,需要的老师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 241151483, 电话: 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

电气控制与 PLC/王建平,朱程辉主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 1

普通高等教育电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-36202-9

I. ①电… II. ①王…②朱… III. ①电气控制—高等学校—教材
②可编程序控制器—高等学校—教材 IV. ①TM571. 2②TM571. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 218279 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:时 静 责任编辑:王 荣 版式设计:张世琴

责任校对:肖 琳 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·462 千字

0001—3500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-36202-9

定价:36.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高等学校自动化、电气工程及自动化专业、机电一体化等专业的“电器与可编程序控制器”或“电气控制与可编程序控制器”课程教学大纲的要求，并充分考虑到电气控制与 PLC 技术的实际应用和发展趋势而编写的。在内容选取上坚持理论教学与实际应用相结合，重点突出对学生工程应用能力的训练和培养，在编排上循序渐进、由浅入深，在阐述上力求简明扼要、图文并茂、通俗易懂，便于教学和自学。与此同时，编者注重电气控制领域中新理论与新技术的发展，将目前应用日益普及的新型智能电器和有代表性的工程应用案例等内容编入本书，以拓展知识结构和介绍先进的应用技术。

可编程序控制器（PLC）以其可靠性高、适用性强、功能完善、编程容易和维修方便等特点而成为现代工业自动控制系统的核心设备；电气控制电路或者独立应用，或者存在于以 PLC 为核心的控制系统中，它在各种生产机械的控制和过程控制中有着广泛的应用。PLC 源于电气控制，它们在理论和应用上既联系紧密，又相互独立。为此，本书将电气控制技术和 PLC 应用技术等内容编写在一起，使本书的结构和理论体系更加系统。

本书分为两部分。第一篇为电气控制技术，共四章，介绍了常用低压电器和新型智能低压电器的基本概念与结构、工作原理、特性、种类、参数及选型等；阐述了电气控制电路的基本环节和典型电路；介绍了典型的电气控制系统实例。第二篇为可编程序控制器应用技术，共七章，阐述了可编程序控制器的基本结构和工作原理；选择具有代表性和先进性的罗克韦尔 A-B MicroLogix 与 SCL5 系列 PLC，详细介绍了 PLC 的结构、原理、指令系统及其应用；介绍了 PLC 通信网络及应用实例；结合工程实际，介绍了 PLC 控制系统的设计原则、方法和应用实例；简要介绍了西门子 S7 系列 PLC 的结构、编程软件和 S7-200 PLC 的指令系统。每章都附有适量的习题。本书在使用过程中，可根据专业、学时进行选择讲解。

本书可作为高等学校本科自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等相关专业的教材，也可供相关工程技术人员参考。

本书由合肥工业大学电气与自动化工程学院王建平教授、朱程辉副教授主编，合肥工业大学计算机与信息学院黄毅副教授参编。王建平编写第 2、5、9、10（除 10.4 节）、11 章，朱程辉编写第 1、3、4、6 章，黄毅编写第 7、8 章和第 10 章的 10.4 节。全书由王建平统稿。

本书由上海交通大学邵惠鹤教授担任主审。在本书编写过程中，合肥工业

IV

大学陈梅副教授、葛锁良副教授、岳胜高级实验师、李鑫副教授等给予了很大的关心和帮助，并提出了许多宝贵意见与建议。研究生许文俊、徐小丽、焦其意、施昌宇、李鹏举等参加了资料搜集和整理工作。此外，本书的出版得到了合肥工业大学教务处、电气与自动化工程学院及自动化系的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一篇 电气控制技术

第1章 常用低压电器 1	原理..... 42
1.1 低压电器概述..... 1	2.2.2 E3 Plus 智能过载继电器..... 45
1.1.1 低压电器的分类..... 1	2.3 智能接触器..... 48
1.1.2 电气控制系统常用低压电器..... 2	2.3.1 智能化电磁系统..... 48
1.1.3 国内低压电器的发展概况..... 2	2.3.2 双向通信与控制接口..... 49
1.2 接触器..... 4	2.4 智能断路器..... 49
1.2.1 结构与工作原理..... 4	2.4.1 智能断路器的结构..... 50
1.2.2 交流接触器..... 9	2.4.2 智能断路器的通信与控制接口..... 51
1.2.3 直流接触器..... 9	2.5 软起动器..... 52
1.2.4 主要技术参数与选用原则..... 10	2.5.1 软起动器的工作原理..... 52
1.3 控制继电器..... 13	2.5.2 软起动器的控制功能..... 53
1.3.1 概述..... 13	2.5.3 软起动器的选用..... 54
1.3.2 电磁式电流、电压及中间继电器..... 14	2.6 变频器..... 56
1.3.3 干簧继电器..... 15	2.6.1 变频器的工作原理..... 57
1.3.4 时间继电器..... 16	2.6.2 变频器的控制方式..... 59
1.3.5 热继电器..... 20	2.6.3 变频器的分类与选型注意事项..... 60
1.3.6 速度继电器..... 23	习题..... 61
1.4 其他常用低压电器..... 24	第3章 电气控制电路的基本环节和典型电路 62
1.4.1 熔断器..... 24	3.1 电气控制电路的绘制原则、图形及文字符号..... 62
1.4.2 低压断路器与低压开关..... 27	3.1.1 常用电气图形符号和文字符号..... 62
1.4.3 主令电器..... 33	3.1.2 电气电路图及其绘制原则..... 63
习题..... 38	3.1.3 电气控制电路图的阅读和分析方法..... 63
第2章 新型智能低压电器 40	3.2 电气控制电路的基本规律..... 68
2.1 固态继电器..... 40	3.2.1 自锁控制..... 68
2.1.1 固态电器的分类与工作原理..... 40	
2.1.2 固态继电器使用的注意事项..... 41	
2.2 智能继电器..... 41	
2.2.1 智能继电器的结构与工作	

3.2.2 互锁控制	68	情况	93
3.2.3 多地点控制	69	4.2.2 Z3040 摇臂钻床的电气控制	94
3.2.4 顺序工作的联锁控制	69	4.3 平面磨床电气控制	96
3.2.5 自动循环控制	69	4.3.1 M7130 平面磨床的主要工作 情况	96
3.3 常用典型控制电路	70	4.3.2 M7130 平面磨床的电气控制	97
3.3.1 三相异步电动机的起动控制	71	4.4 铣床电气控制	99
3.3.2 三相异步电动机的正、反转 控制	76	4.4.1 X62W 铣床的主要工作情况	99
3.3.3 三相异步电动机的调速控制	77	4.4.2 X62W 铣床的电气控制	99
3.3.4 三相异步电动机的制动控制	80	4.5 电源切换控制	103
3.4 电气控制电路的设计方法	83	4.5.1 主辅电源切换控制	103
3.4.1 概述	83	4.5.2 双电源自动切换控制	105
3.4.2 经验设计法	83	4.6 异步电动机软起动控制	107
3.4.3 逻辑设计法	86	4.6.1 单台电动机软起动控制	107
习题	90	4.6.2 多台电动机软起动控制	110
第4章 电气控制系统实例	91	4.7 异步电动机变频调速控制	111
4.1 卧式车床电气控制	91	4.7.1 风机变频调速控制系统	112
4.1.1 C650 卧式车床的主要工作 情况	91	4.7.2 恒压供水系统变频调速控制	113
4.1.2 C650 卧式车床的电气控制	92	4.7.3 印染机械多电动机同步变频 调速控制	115
4.2 摇臂钻床电气控制	93	习题	117
4.2.1 Z3040 摇臂钻床的主要工作			

第二篇 可编程序控制器的应用技术

第5章 可编程序控制器的基本结构

及工作原理

5.1 概述	118
5.1.1 PLC 的产生与发展	118
5.1.2 PLC 的定义	119
5.2 PLC 的基本结构与工作原理	120
5.2.1 PLC 的基本结构	120
5.2.2 PLC 的基本工作原理	124
5.3 PLC 的性能指标及分类	125
5.3.1 PLC 的性能指标	125
5.3.2 PLC 的分类	126
5.4 PLC 与其他工业控制系统的区别	127
5.4.1 PLC 与继电接触控制系统的 区别	127

5.4.2 PLC 与微型计算机控制系统的 区别	127
5.4.3 PLC 与集散控制系统的区别	128
习题	128

第6章 罗克韦尔 ML/SLC5 系列

PLC

6.1 MicroLogix 系列 PLC	129
6.1.1 MicroLogix1000 型 PLC	129
6.1.2 MicroLogix1200 型 PLC	130
6.1.3 MicroLogix1500 型 PLC	132
6.1.4 MicroLogix1100 型 PLC	134
6.1.5 MicroLogix 系列 PLC 的性能 比较	135
6.2 SLC5 系列 PLC	137

6.2.1 SLC5 系列 PLC 概述·····	137	8.2.1 数据传送指令·····	197
6.2.2 I/O 模块·····	139	8.2.2 堆栈指令·····	199
6.2.3 特殊功能模块·····	142	8.3 移位/顺序控制指令·····	201
6.2.4 通信模块·····	143	8.3.1 移位指令·····	201
6.2.5 I/O 框架与电源模块·····	144	8.3.2 顺序控制指令·····	204
6.2.6 独立 I/O 模块·····	145	8.4 过程控制指令·····	208
习题·····	146	8.4.1 PID 过程控制概述·····	208
第 7 章 ML/SLC 系列 PLC 的基本		8.4.2 PID 指令及其应用·····	208
指令及应用·····	147	8.5 功能指令应用实例·····	211
7.1 PLC 的常用编程语言·····	147	8.5.1 运料小车控制·····	211
7.1.1 梯形图编程·····	147	8.5.2 电动机顺序启动和停止控制·····	212
7.1.2 助记符编程·····	148	习题·····	215
7.1.3 顺序功能图编程·····	148	第 9 章 PLC 通信网络及应用实例···	216
7.2 ML/SLC 系列 PLC 的存储器结构·····	150	9.1 开放式工业控制网络 NetLinx·····	216
7.2.1 程序文件·····	150	9.1.1 NetLinx 网络结构·····	216
7.2.2 数据文件·····	151	9.1.2 信息层·····	216
7.2.3 寻址方式·····	155	9.1.3 控制层·····	217
7.3 基本逻辑控制指令·····	157	9.1.4 设备层·····	219
7.3.1 位逻辑指令·····	157	9.2 DH-485 网络·····	221
7.3.2 计时器指令·····	159	9.2.1 DH-485 网络结构·····	221
7.3.3 计数器指令·····	162	9.2.2 DH-485 网络协议·····	222
7.3.4 复位指令·····	163	9.2.3 DH-485 产品·····	223
7.3.5 高速计数指令·····	164	9.3 串行通信网络·····	223
7.4 基本指令应用实例·····	169	9.3.1 DF1 全双工通信·····	224
7.4.1 电动机正、反转控制·····	169	9.3.2 DF1 半双工通信·····	225
7.4.2 单按钮起/停控制·····	170	9.4 DH+ 网络·····	227
7.4.3 信号分频控制·····	173	9.4.1 DH+ 网络的数据传送方式·····	227
7.4.4 多电动机协调工作控制·····	173	9.4.2 DH+ 网络的应用方法·····	228
7.4.5 多谐振荡电路·····	174	9.4.3 DH+ 网络产品·····	228
习题·····	175	9.5 PLC 网络控制系统实例·····	229
第 8 章 ML/SLC 系列 PLC 的功能		9.5.1 自来水生产与调度自动控制	
指令及应用·····	177	系统·····	229
8.1 运算指令·····	177	9.5.2 钢铁生产自动控制系统·····	232
8.1.1 数据比较指令·····	177	习题·····	234
8.1.2 算术运算指令·····	180	第 10 章 PLC 控制系统设计及	
8.1.3 逻辑运算指令·····	184	应用实例·····	235
8.1.4 数据转换指令·····	185	10.1 PLC 控制系统设计概述·····	235
8.1.5 高级运算指令·····	189	10.1.1 控制系统需求分析·····	235
8.2 数据处理指令·····	196	10.1.2 设计的基本原则·····	235

10.1.3 设计的一般步骤	235	11.2 STEP 7 编程软件简介	261
10.1.4 PLC 的选择	237	11.2.1 STEP 7 概述	261
10.2 硬件与软件设计的一般方法	239	11.2.2 使用 STEP 7 的基本步骤	262
10.2.1 硬件设计的一般方法	239	11.2.3 设计程序结构的基本原理	263
10.2.2 软件设计的一般方法	239	11.2.4 建立和编辑项目	264
10.2.3 梯形图语言的编程规则	240	11.3 S7-200 PLC 部分指令系统	266
10.3 安装与调试的一般方法	242	11.3.1 S7-200 系列部分 CPU 性能	266
10.3.1 PLC 系统的安装注意事项	242	11.3.2 基本逻辑指令	267
10.3.2 PLC 系统的调试运行	243	11.3.3 程序控制指令	270
10.4 PLC 控制应用实例	243	11.3.4 定时器/计数器指令	271
10.4.1 教室电铃控制	243	11.3.5 算术运算指令	272
10.4.2 机械手控制应用	246	11.3.6 逻辑运算指令	275
10.4.3 交通信号灯控制应用	252	11.3.7 数据传输指令	277
习题	256	11.3.8 移位与循环移位指令	278
第 11 章 西门子 S7 系列 PLC	258	11.3.9 数据转换指令	280
11.1 西门子 S7 系列 PLC 简介	259	11.3.10 S7-200 PLC 指令应用实例	282
11.1.1 西门子 S7-200 PLC	259	习题	289
11.1.2 西门子 S7-300 PLC	259	参考文献	290
11.1.3 西门子 S7-400 PLC	260		

第一篇 电气控制技术

第 1 章 常用低压电器

1.1 低压电器概述

电器对电能的生产、输送、分配与应用起着控制、调节、检测和保护的作用。在电力输配电系统和电力拖动自动控制系统中，电器的应用极为广泛。随着电子技术、自动控制技术和计算机应用技术的迅猛发展，一些电器可能被电子电路所取代。但是由于电器本身也朝着新的领域扩展，例如：电器性能的提高，新型电器的产生，机、电、仪一体化电器的实现，电器应用范围的扩展等，而且有些电器元件有其特殊性，因此电器元件是不可能完全被取代的，以继电器、接触器等工业电器为基础的电气控制技术仍占有相当重要的地位。

电器是一种根据外界的信号和要求，手动或自动地接通或断开电路，断续或连续地改变电路参数，以实现电路或非电对象的切换、控制、保护、检测、变换和调节的电气设备。低压电器通常指工作在交流电压 1200V、直流电压 1500V 以下的电路中的电气设备。

本章主要介绍电气控制系统中常用的各种低压电器的结构、工作原理和技术规格，不涉及元器件的设计，而着重于应用。

1.1.1 低压电器的分类

电器的品种、规格繁多，功能及用途也很广泛，为了系统地掌握，必须对其分类。

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，如高压断路器、高压隔离开关和高压熔断器等。

2) 低压电器。用于交流 50Hz（或 60Hz）、额定电压 1200V 以下，直流额定电压 1500V 以下的电路内，起通断、保护、控制或调节作用的电器，如接触器、继电器等。

2. 按动作原理分类

1) 手动电器。通过人的操作发出动作指令的电器，如刀开关、按钮等。

2) 自动电器。产生电磁吸力而自动完成动作指令的电器，如接触器、继电器、电磁阀等。

3. 按用途分类

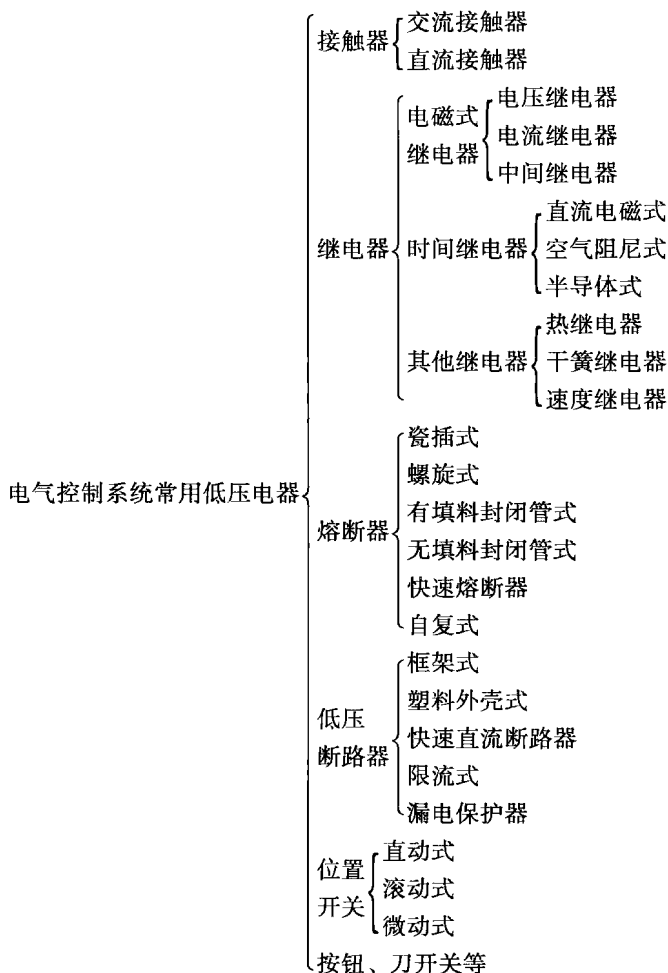
1) 控制电器。用于各种控制电路和控制系统的电器，如接触器、继电器、电动机启动

器等。

- 2) 配电电器。用于电能的输送和分配的电器，如高压断路器、低压断路器等。
- 3) 主令电器。用于自动控制系统中发送动作指令的电器，如按钮、转换开关等。
- 4) 保护电器。用于保护电路及用电设备的电器，如熔断器、热继电器等。
- 5) 执行电器。用于完成某种动作或传送功能的电器，如电磁铁、电磁离合器等。

1.1.2 电气控制系统常用低压电器

电气控制系统常用低压电器概括如下：



1.1.3 国内低压电器的发展概况

1. 国内低压电器的发展概况

低压电器是组成电气成套设备的基础配套元件，其使用量大面广，可分为低压配电电器和低压控制电器。

我国在 1953 ~ 1957 年试制成功低压断路器、接触器等 12 大类、共几百种低压电器产品，20 世纪 60 年代，大功率半导体器件与有触点电器相互结合，协调发展。

目前国内低压电器生产企业已达一千五百多家，产品已近千余系列，市场上的低压电器产品可谓“三代同堂”。第一代产品出现于20世纪60年代至70年代初，仅有17个系列，由国内企业自行开发，填补了我国低压电器工业的空白，市场占有率约15%；第二代产品出现于20世纪70年代末至80年代初，产品进入更新换代的时期，开发新产品的技术指标明显提高，保护特性较完善，体积缩小，适应成套装置要求，市场占有率约45%；第三代产品出现在20世纪90年代，国内企业抓住主要产品系列，跟踪国外先进技术，开发生产高性能、小型化、电子化、智能化、组合化、模块化和多功能化产品，市场占有率约40%。

国内低压电器经过50多年的发展，如今已经形比较完善的体系，品种、规格、性能、产量上基本满足我国国民经济的发展需要。同时，先进技术的引进加快了新产品问世，从德国的西门子公司、AEG公司（通用电气公司），法国的施耐德公司和美国的西屋公司引进的系列化低压断路器、交流接触器、热继电器和熔断器等产品制造技术，基本上实现了国产化，有的产品还返销到国外。我国开发生产的大容量智能化的“万能式断路器”DW45系列分别有智能型、多功能型和一般型。还有CJ45系列交流接触器，电流等级分别有9~800A、12~14个规格，采用积木式模块化结构，模块包括辅助触点、延时、机械联锁、过电压保护、节能、通信接口等。还有带通信接口的智能型电子式继电器，能与第三代交流接触器组合成智能型起动机。

2. 低压控制电器的发展趋势

低压控制电器的发展趋势有以下几个方面：

（1）电力电子技术与微电子技术在低压电器中的应用范围越来越广

电力电子技术与微电子技术在低压电器中的应用有较长的历史，近年来该类产品经过不断更新，从晶体管式发展到集成电路式，特别是电力电子器件GTO、IGBT质量与可靠性的不断提高，其应用范围越来越广，如固态断路器、混合式接触器、接近开关和固态继电器等。尤其是电子式过载保护器的产生体现了当今世界过载保护继电器的一种发展趋势，它与传统双金属型过载保护继电器相比，具有安装方便、脱扣动作迅速、准确、误差小、参数调节方便和消耗功率小等优点。

（2）应用电子技术改造传统电器

随着高科技的日益发展，在传统电器的基础上进一步提高性能，扩大功能，实现智能化已成为当前的一项重要课题。智能化低压电器通常具有以下特点：

1）对电器本身和控制系统具有监测与显示能力。智能化低压电器能准确地监测和显示系统的运行情况，并能准确地切除过载、短路等各种故障，完成预期的操作程序，实现对电器自身的监测、故障自诊断以及故障状况显示等。

2）采用新的控制方式，如模糊控制、神经网络控制等已从家用电器延伸到低压电器的智能化控制方面。

3）现场总线控制和通信功能等新技术在智能化低压电器中的应用日益推广，从而实现电器产品的“四遥”（遥信、遥测、遥控、遥调）功能。

（3）低压电器的小型化、多功能化和组合化

目前低压电器产品几乎都希望用较少品种满足多种要求，即功能多样化，因此在产品结构上采用独立组件进行装配，即采用模块化的积木拼装式结构。

(4) 研究限流新技术, 提高分断能力和限流能力

新一代低压断路器几乎都采用限流分断新技术。

1) 采用上进线静触点导电电路: 大幅度提高电动斥力和吹弧磁场, 从而达到限流和提高分断电路的能力的目的。

2) 采用双断点分断技术: 在较小结构尺寸条件下可获得较大分断能力。

3) 绝缘器壁产气和压力喷流技术: 新型断路器几乎都采用带出气口的半封闭灭弧小室, 绝缘器壁在电弧侵蚀下产气, 通过出气口在室内形成压差驱动电弧, 并形成喷流熄弧。这种压力喷流技术是灭弧的一种新观点。

4) 采用 PTC 的限流电阻元件: 已在微型断路器中得到应用, 大大提高了短路分断能力。

(5) 低压电器测试技术的数字化和电磁兼容技术的研究

衡量低压电器测试技术水平主要从测试装置的能力(或规模)和自动化水平两方面综合考虑。低压电器测试技术由过去的继电器—接触器转向 PLC 控制并进一步向计算机控制发展, 特别是试验参数的采集和处理技术逐趋现代化, 即采用瞬态记录仪, 将被测信号经 A/D 转换采集后变成数字信号, 再经计算机处理后, 直接显示各实验数据。由于采用数字技术, 使测试精度、深度和广度向前迈进了一步。

1.2 接触器

接触器是电力拖动和自动控制系统中使用量大面广的一种低压控制电器, 用来频繁地接通和断开交直流主电路和大容量控制电路, 主要控制对象是电动机, 能实现远距离控制, 并具有欠(零)电压保护。

1.2.1 结构与工作原理

1. 接触器的结构

接触器主要由电磁机构、触点系统和灭弧装置组成, 其结构如图 1-1 所示。

(1) 电磁机构

电磁机构是接触器的主要组成部分之一, 它将电磁能转换成机械能, 带动触点使之闭合或断开。电磁机构包括动铁心(衔铁)、静铁心和电磁线圈三部分。电磁机构分类如下:

1) 按衔铁的运动方式分类, 可分为:

① 衔铁绕棱角转动, 如图 1-2a 所示。衔铁绕磁轭的棱角而转动, 磨损较小, 铁心用软铁, 适用于直流接触器。

② 衔铁绕轴转动, 如图 1-2b 所示。衔铁绕轴转动, 铁心用硅钢片叠成, 用于交流接触器。

③ 衔铁直线运动, 如图 1-2c 所示。衔铁在

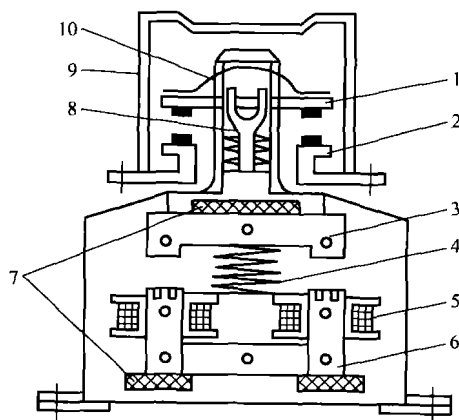


图 1-1 接触器结构示意图

1—动触点 2—静触点 3—动铁心 4—反力弹簧
5—线圈 6—静铁心 7—垫毡 8—接触弹簧
9—灭弧罩 10—触点压力簧片

线圈内作直线运动，多用于交流接触器中。

2) 按铁心形状分类，可分为U形（见图1-2a）和E形（见图1-2b、图1-2c）。

3) 按线圈的连接方式分类，可分为并联（电压线圈）和串联（电流线圈）两种。

4) 按吸引线圈的种类分类，可分为直流线圈和交流线圈两种。

电磁机构的工作情况常用吸力特性与反力特性来表征。

1) 吸力特性

电磁机构的吸力与气隙的关系曲线称为吸力特性。吸力特性随励磁电流种类（交流或直流）、线圈连接方式（串联或并联）的不同而有所差异。电磁机构的吸力可近似地按式（1-1）求得：

$$F = 4 \times 10^5 B^2 S \quad (1-1)$$

式中， F 为电磁吸力（N）； B 为气隙磁感应强度（T）； S 为铁心截面积（ m^2 ）。

当铁心截面积 S 为常数时，电磁吸力 F 与 B^2 成正比，也可认为 F 与气隙磁通 Φ^2 成正比，即 $F \propto \Phi^2$ 。由于励磁电流的种类对吸力特性有很大影响，所以下面分别对交、直流电磁机构的吸力特性进行讨论。

① 交流电磁机构的吸力特性。设线圈外加电压 U 不变，交流电磁线圈的阻抗主要决定于线圈的电抗，电阻忽略不计，则

$$U \approx E = 4.44 f \Phi N \quad (1-2)$$

$$\Phi = \frac{U}{4.44 f N} \quad (1-3)$$

式中， U 为线圈外加电压（V）； E 为线圈感应电动势（V）； f 为电压频率（Hz）； Φ 为气隙磁通（Wb）； N 为电磁线圈的匝数。

当电压频率 f 、电磁线圈的匝数 N 和线圈外加电压 U 为常数时，气隙磁通 Φ 也为常数，则电磁吸力也为常数，即 F 与气隙 δ 的大小无关。实际上，考虑到漏磁通的影响，电磁吸力 F 随气隙 δ 的减小略有增加。交流电磁机构的吸力特性如图1-3所示。由于交流电磁机构的气隙磁通 Φ 不变， IN 随气隙磁阻（也即随气隙 δ ）的变化成正比，所以交流电磁线圈的电流 I 与气隙成正比变化。

② 直流电磁机构的吸力特性。由于线圈外加电压 U 和线圈电阻不变，所以流过线圈的电流 I 也为常数，即不受气隙 δ 变化的影响，根据磁路定律有

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} \propto \frac{1}{R_m} \quad (1-4)$$

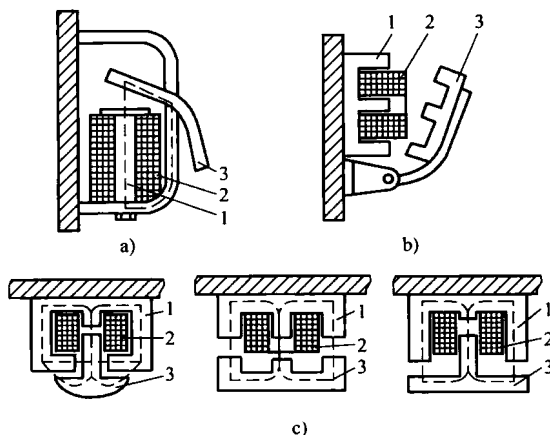


图1-2 常用电磁机构的形式

1—铁心 2—线圈 3—衔铁

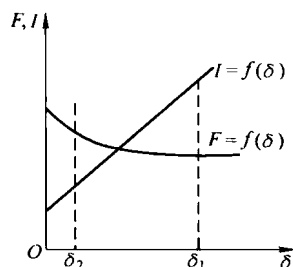


图1-3 交流电磁机构的吸力特性

式中, R_m 为气隙磁阻 (H^{-1}), 则

$$F \propto \Phi^2 \propto \frac{1}{R_m} \propto \frac{1}{\delta^2} \quad (1-5)$$

即电磁吸力 F 与气隙 δ 的二次方成反比。直流电磁机构的吸力特性如图 1-4 所示。

由于一般 U 形交流电磁机构, 在线圈通电而衔铁尚未吸合瞬间, 电流将达到吸合后额定电流的 5 ~ 6 倍, E 形电磁机构将达到 10 ~ 15 倍。如果衔铁卡住不能吸合, 或者频繁动作, 线圈可能烧毁。这就是可靠性高或频繁动作的控制系统一般采用直流电磁机构, 而不采用交流电磁机构的原因。

2) 反力特性

电磁机构转动部分的静阻力与气隙的关系曲线称为反力特性。阻力的大小与作用弹簧、摩擦阻力以及衔铁重量有关。

3) 吸力特性与反力特性之间的配合

吸力特性与反力特性的配合如图 1-5 所示。电磁机构欲使衔铁吸合, 在整个吸合过程中, 吸力都必须大于反力; 但也不能过大, 否则会影响电器的机械寿命。反映在特性图上就是要保证吸力特性曲线在反力特性曲线上方。当切断电磁机构的励磁电流以释放衔铁时, 其反力必须大于剩磁吸力, 才能保证衔铁可靠释放。因此, 吸力特性与反力特性必须配合得当, 才有助于电器性能的改善。在实际应用中, 可调整反力弹簧或触点的初压力以改变反力特性, 使之与吸力特性有良好配合。上述配合对于继电器同样适用。

在 δ_1 下降至 δ_2 的区域内, 反力随气隙减小略有增大。到达 δ_2 的位置, 动触点开始与静触点接触, 这时触点上的初压力作用到衔铁上, 反力骤增, 曲线突变。其后在 δ_2 到 0 的区域内, 气隙越小, 触点压得越紧, 反力越大, 其曲线较 $\delta_1 \sim \delta_2$ 段陡。

对于单相交流电磁机构, 由于磁通是交变的, 当磁通过零时吸力也为零, 吸合后的衔铁在反作用弹簧的作用下将被拉开, 磁通过零后吸力增大, 当吸力大于反力时, 衔铁又吸合。由于交流电源频率的变化, 衔铁的吸力随之变化, 从而每个周波二次过零, 因而衔铁产生强烈振动与噪声, 甚至使铁心松散。为了避免衔铁振动, 在铁心端面上安装一个铜制的分磁环 (或称短路环), 其包围铁心端面约 2/3 的面积, 如图 1-6 所示。当电磁机构的交变磁通穿过短路环所包围的截面 S_2 时, 环中产生涡流。根据电磁感应定律, 此涡流产生的磁通 Φ_2 在相位上落后于截面 S_1 中的磁通 Φ_1 。这样, 铁心中有两个不同相位的磁通 Φ_1 和 Φ_2 , 电磁机构的吸力为它们产生的吸力 F_1 和 F_2 之和。只要此合力始终大于反力, 衔铁的振动现象就消失了。

(2) 触点 (触头) 系统

触点 (触头) 是接触器的执行元件, 用来接通或断开被控制的电路。

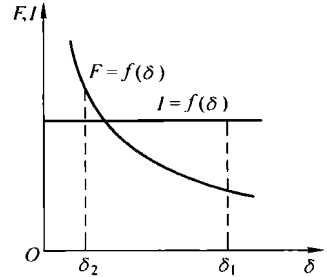


图 1-4 直流电磁机构的吸力特性

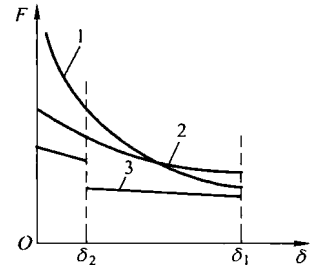


图 1-5 吸力特性和反力特性

1—直流感触器吸力特性

2—交流接触器吸力特性

3—反力特性

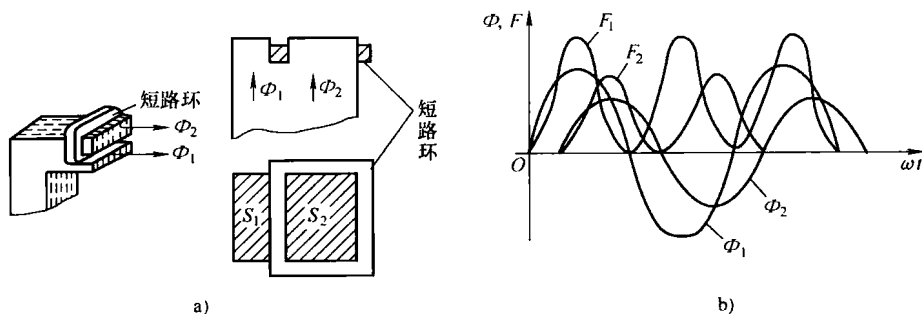


图 1-6 加短路环后的磁通和电磁吸力曲线

a) 磁通示意图 b) 电磁吸力曲线

触点的结构形式很多，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。

触点按其结构形式可分为桥式触点和指式触点。

触点按其原始状态可分为常开触点和常闭触点；原始状态时（即线圈未通电）断开，线圈通电后闭合的触点叫常开触点；原始状态时闭合，线圈通电后断开的触点叫常闭触点。

按触点的接触形式可分为三种，即点接触、线接触和面接触。点接触由两个半球形触点或一个半球形与一个平面形触点构成。它常用于小电流的电器中，如接触器的辅助触点或继电器触点。线接触指两个带弧面的矩形触点相接触，它的接触区域是一条直线。触点在通断过程中是滚动接触的，这样可以自动清除触点表面的氧化膜，同时由于长期工作的位置不是在易烧灼的接触点上，从而保证了触点的良好接触。这种滚动线接触多用于中等容量的触点，如接触器的主触点。面接触指两个平面触点相接触，它可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，以减小触点接触电阻和提高耐磨性，多用做较大容量接触器的触点。

由于触点表面的不平与氧化层的存在，两个触点的接触处有一定的电阻。为了减小此接触电阻，需在触点间加一定压力。当动触点与静触点接触时，由于安装时弹簧被预先压缩了一段，因而产生一个初压力 F_1 ，如图 1-7b 所示。触点闭合后，由于弹簧在超行程内继续变形而产生一终压力 F_2 ，如图 1-7c 所示。弹簧压缩的距离 l 称为触点的超行程，即从静触点和动触点开始接触，到触点压紧，整个触点系统向前压紧的距离。有了超行程，即使在触点受到磨损的情况下，触点之间仍具有一定压力，当触点磨损严重时应予以更换。

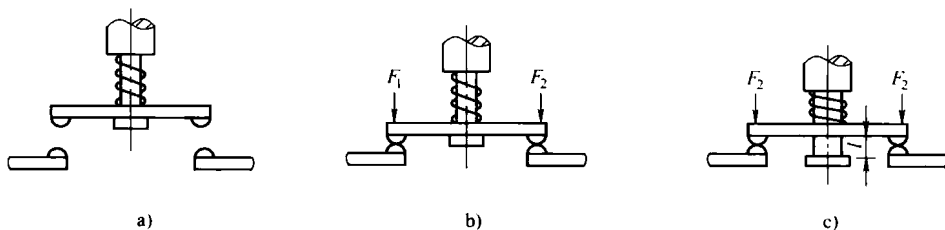


图 1-7 触点的位置示意图

a) 最终拉开位置 b) 刚刚接触位置 c) 最终闭合位置

(3) 灭弧装置

在触点断开瞬间，触点间的距离极小，电场强度极大，触点间产生大量的带电粒子，形成炽热的电子流，产生弧光放电现象，称为电弧。电弧的存在既妨碍了电路及时可靠的分断，又会使触点受到磨损。因此，必须采取适当且有效的措施，以保护触点系统，减少它的磨损，提高它的分断能力，从而保证整个电器工作安全可靠。

欲使电弧熄灭，应设法降低电弧区温度和电场强度，加强消电离作用。当电离速度低于消电离速度时，电弧逐渐熄灭。常用的灭弧方法有：

1) 磁吹式灭弧装置。其原理如图 1-8 所示。在触点电路中串入一个吹弧线圈 3，它产生的磁通通过导磁颊片 4 引向触点周围，如图中的符号“×”所示。电弧产生后，其磁通方向如图中的符号“⊗”和“⊙”所示。可见在弧柱下吹弧线圈产生的磁通与电弧产生的磁通是相加的，而在弧柱上面则彼此相消，因此就产生一个向上运动的力 F 将电弧拉长并吹入灭弧罩 5 中。熄弧角 6 和静触点相连接，其作用是引导电弧向上运动，将热量传递给罩壁，促使电弧熄灭。

由于这种灭弧装置利用电弧电流本身灭弧，因而电弧电流越大，吹弧的能力也越强，且不受电路电流方向影响。它广泛应用于直流接触器中。

2) 灭弧栅。灭弧栅的灭弧原理如图 1-9 所示。灭弧栅 3 由许多镀铜薄钢片组成，片间距离为 2~3mm，安放在触点上方的灭弧罩（图中未画出）内。一旦发生电弧，电弧周围产生磁场，导磁的钢片将电弧吸入栅片，电弧被栅片分割成许多串联的短电弧，当交流电压过零时电弧自然熄灭，两栅片间必须有 150~250V 电压，电弧才能重燃。这样，一方面电源电压不足以维持电弧，另一方面，由于栅片的散热作用，电弧自然熄灭后很难重燃。这是一种很常用的交流灭弧装置。

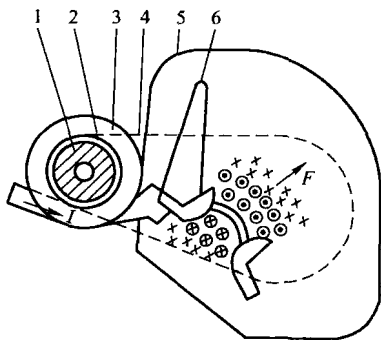


图 1-8 磁吹式灭弧装置

1—铁心 2—绝缘管 3—吹弧线圈
4—导磁颊片 5—灭弧罩 6—熄弧角

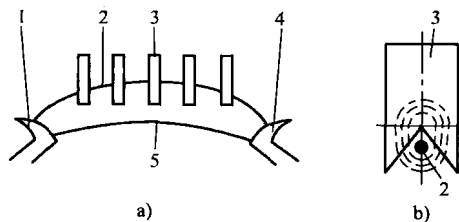


图 1-9 灭弧栅的灭弧原理

a) 栅片灭弧原理 b) 电弧进入栅片的图形
1—静触点 2—短电弧 3—灭弧栅片
4—动触点 5—长电弧

3) 灭弧罩。比灭弧栅更为简单的是采用一个用陶土和石棉水泥做的耐高温的灭弧罩，用以降温和隔弧。灭弧罩可用于交流和直流灭弧。

4) 多断点灭弧。在交流电路中也可采用桥式触点，如图 1-10 所示。有两处断开点，相当于两对电极，若有一处断点处，则要使电弧熄灭后重燃需要 150~250V，现两处断点就需要 $2 \times (150 \sim 250) \text{ V}$ ，所以有利于灭弧。若采用两极或三极接触器控制一个电路时，可灵活地将两