

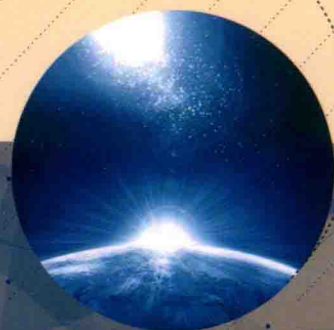
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

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）

S7-200 PLC 电气控制与组态设计

周美兰 夏云彦 张宇 编著

S7-200 PLC Electric Control
and Configuration design



“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

S7-200 PLC

电气控制与组态设计

周美兰 夏云彦 张宇 编著

机械工业出版社

本书将 PLC 电气控制系统设计与组态监控技术结合起来,讲述 PLC 现代电气控制系统的设计方法。全书共 9 章,内容包括常用低压电器和电气控制电路的典型应用;西门子 S7-200PLC 的结构和工作原理、指令系统和编程及应用;S7-200 PLC 的通信与网络、监控组态软件与 PLC 应用综合设计等。第 9 章还给出了 PLC 控制组态虚拟仿真实验的方法与步骤。书中由浅入深地介绍了大量的应用实例,以使读者更好地掌握 PLC 指令的使用方法、编程规则和编程技巧。

本书配套的电子资源包括精心制作的多媒体教学课件、全部习题详细解答、PLC 组态仿真实验教学课件及其演示课件、PLC 控制组态虚拟系统开发演示课件、PLC 组态仿真系统运行演示课件等。所提供的 PLC 控制组态虚拟仿真系统均在 S7-200 系列 PLC 样机上调试通过并进行了反复测试。本书所研制的 PLC 控制组态虚拟仿真课件已与 Force-Control 7.0 系统软件融为一体,故将力控 Force-Control 7.0 系统程序安装后即可调用本书所开发的课件,可使读者在开发 PLC 控制系统时不需被控实物,只通过显示器的组态监控界面就可检验所编程序的正确与否。

本书可作为电类和机电一体化等专业的本科教材以及高职高专教材,也可作为从事工业自动化及 PLC 应用开发的工程技术人员的培训教材或参考书。

本书配套免费电子资源,需要的教师可登录机械工业出版社教育服务网 (<http://www.cmpedu.com>) 注册、下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

S7-200 PLC 电气控制与组态设计/周美兰,夏云彦,张宇编著. —北京:机械工业出版社,2019.2

“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 978-7-111-61540-8

I. ①S… II. ①周… ②夏… ③张… III. ①PLC 技术—高等学校—教材
IV. ①TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 284519 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:王雅新 责任编辑:王雅新 王玉鑫

责任校对:潘蕊 封面设计:鞠杨

责任印制:孙炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17 印张·412 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61540-8

定价:43.00 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

“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)
编审委员会

主任委员

郑南宁 中国工程院 院士, 西安交通大学 教授, 中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会 主任委员

副主任委员

汪楯生 中国工程院 院士, 浙江大学 教授
胡敏强 东南大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 主任委员
周东华 清华大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 主任委员
赵光宙 浙江大学 教授, 中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会 主任委员
章 兢 湖南大学 教授, 中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会 副主任委员
刘进军 西安交通大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
戈宝军 哈尔滨理工大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
吴晓蓓 南京理工大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员
刘 丁 西安理工大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员
廖瑞金 重庆大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
尹项根 华中科技大学 教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
李少远 上海交通大学 教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员
林 松 机械工业出版社 编审 副社长

委员 (按姓氏笔画排序)

于海生	青岛大学 教授	王 平	重庆邮电大学 教授
王 超	天津大学 教授	王再英	西安科技大学 教授
王志华	中国电工技术学会 教授级高级工程师	王明彦	哈尔滨工业大学 教授
王美玲	北京理工大学 教授	王保家	机械工业出版社 编审
艾 欣	华北电力大学 教授	韦 钢	上海电力学院 教授
吴在军	东南大学 教授	李 炜	兰州理工大学 教授
吴美平	国防科技大学 教授	吴成东	东北大学 教授
汪贵平	长安大学 教授	谷 宇	北京科技大学 教授
张 涛	清华大学 教授	宋建成	太原理工大学 教授
张恒旭	山东大学 教授	张卫平	北方工业大学 教授
黄云志	合肥工业大学 教授	张晓华	大连理工大学 教授
穆 钢	东北电力大学 教授	蔡述庭	广东工业大学 教授
		鞠 平	河海大学 教授

序

工程教育在我国高等教育中占有重要地位，高素质工程科技人才是支撑产业转型升级、实施国家重大发展战略的重要保障。当前，世界范围内新一轮科技革命和产业变革加速进行，以新技术、新业态、新产业、新模式为特点的新经济蓬勃发展，迫切需要培养、造就一大批多样化、创新型卓越工程科技人才。目前，我国高等工程教育规模世界第一。我国工科本科在校生约占我国本科在校生总数的1/3，近年来我国每年工科本科毕业生约占世界总数的1/3以上。如何保证和提高高等工程教育质量，如何适应国家战略需求和企业需要，一直受到教育界、工程界和社会各方面的关注。多年以来，我国一直致力于提高高等教育的质量，组织并实施了多项重大工程，包括卓越工程师教育培养计划（以下简称卓越计划）、工程教育专业认证和新工科建设等。

卓越计划的主要任务是探索建立高校与行业企业联合培养人才的新机制，创新工程教育人才培养模式，建设高水平工程教育教师队伍，扩大工程教育的对外开放。计划启动实施以来，各相关部门建立了协同育人机制。卓越计划要求试点专业要大力改革课程体系和教学形式，依据卓越计划培养标准，遵循工程的集成与创新特征，以强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力为核心，重构课程体系和教学内容；加强跨专业、跨学科的复合型人才培养；着力推动基于问题的学习、基于项目的学习、基于案例的学习等多种研究性学习方法，加强学生创新能力训练，“真刀真枪”做毕业设计。卓越计划实施以来，培养了一批获得行业认可、具备很好的国际视野和创新能力、适应经济社会发展需要的各类型高质量人才，教育培养模式改革创新取得突破，教师队伍建设初见成效，为卓越计划的后续实施和最终目标的达成奠定了坚实基础。各高校以卓越计划为突破口，逐渐形成各具特色的人才培养模式。

2016年6月2日，我国正式成为工程教育“华盛顿协议”第18个成员国，标志着我国工程教育真正融入世界工程教育，人才培养质量开始与其他成员国达到了实质等效，同时，也为以后我国参加国际工程师认证奠定了基础，为我国工程师走向世界创造了条件。专业认证把以学生为中心、以产出为导向和持续改进作为三大基本理念，与传统的内容驱动、重视投入的教育形成了鲜明对比，是一种教育范式的革新。通过专业认证，把先进的教育理念引入了我国工程教育，有力地推动了我国工程教育专业教学改革，逐步引导我国高等工程教育实现从课程导向向产出导向转变、从以教师为中心向以学生为中心转变、从质量监控向持续改进转变。

在实施卓越计划和开展工程教育专业认证过程中，许多高校的电气工程及其自动化、自动化专业结合自身的办学特色，引入先进的教育理念，在专业建设、人才培养模式、教学内容、教学方法、课程建设等方面积极开展教学改革，取得了较好的效果，建设了一大批优质课程。为了将这些优秀的教学改革经验和教学内容推广给广大高校，中国工程教育认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会、教育部高等学校电气类专业教学指导委员会、教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会、中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会、中

国机械工业教育协会电气工程及其自动化学科教学委员会联合组织规划了“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）”。本套教材通过国家新闻出版广电总局的评审，入选了“十三五”国家重点图书。本套教材密切联系行业 and 市场需求，以学生工程能力培养为主线，以教育培养优秀工程师为目标，突出学生工程理念、工程思维和工程能力的培养。本套教材在广泛吸纳相关学校在“卓越工程师教育培养计划”实施和工程教育专业认证过程中的经验和成果的基础上，针对目前同类教材存在的内容滞后、与工程脱节等问题，紧密结合工程应用和行业企业需求，突出实际工程案例，强化学生工程能力的教育培养，积极进行教材内容、结构、体系和展现形式的改革。

经过全体教材编审委员会委员和编者的努力，本套教材陆续跟读者见面了。由于时间紧迫，各校相关专业教学改革推进的程度不同，本套教材还存在许多问题。希望各位老师对本套教材多提宝贵意见，以使教材内容不断完善提高。也希望通过本套教材在高校的推广使用，促进我国高等工程教育教学质量的提高，为实现高等教育的内涵式发展贡献一份力量。

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)
编审委员会

前 言

可编程控制器 (PLC) 是自动控制技术、计算机技术和通信技术三者结合的高科技产品, 作为一种通用的工业自动化装置, 在工业控制各个领域已得到了广泛的应用。组态软件具有远程监控、数据采集、数据分析、过程控制等强大功能, 日益渗透到自动化系统的每个角落, 占据越来越多的份额, 逐渐成为工业自动化系统的核心和灵魂。本书把 PLC 与组态软件有机结合, 讲述现代自动控制系统的设计方法。

针对 PLC 教学中实验设备成本高、维护难和配备难的问题, 本书用组态软件全真模拟了 PLC 的控制对象。将组态软件用于 PLC 的实验教学中, 能够用虚拟仿真的样机代替实物, 通过显示器的组态监控界面直接检验 PLC 控制结果的正确与否, 从而在一定程度上解决了 PLC 实验课开设难或无法开设的问题。书中提供的虚拟仿真方法还可在科技人员的工程项目开发中发挥巨大的作用。

本书配套的电子资源包括多媒体教学课件、PLC 控制组态仿真综合设计实例、PLC 组态仿真实验教学课件及其多个演示课件 (带解说)、PLC 控制组态虚拟系统开发演示课件 (带解说)、PLC 组态仿真系统运行演示课件 (带解说)。这些带解说的演示课件将对学生掌握开发 PLC 控制组态虚拟仿真系统及其运行方法提供很大帮助。本书所开发的 PLC 控制组态虚拟仿真系统均采用 S7-200 系列 PLC 样机调试通过并进行了反复测试。

北京三维力控科技有限公司的软件开发人员专门为本书定制了软件, 即书中所开发的项目已与力控 Force-Control7.0 系统程序融为一体, 故将 Force-Control7.0 系统程序安装完毕后, 运行“力控 ForceControl 7.0”, 进入“工程管理器”程序, 在打开的窗口中将看到本书所开发的组态仿真课件图标, 选定某个课件图标即可进入相应的组态监控界面以检验所编写的 PLC 控制程序的正确与否, 这给学习者带来很大方便。

全书共 9 章。主要内容包括: 常用低压电器、电气控制电路的基本环节和典型应用、可编程序控制器基础、S7-200 PLC 的组成原理及编程软件、S7-200 PLC 的指令系统、S7-200 PLC 的编程及应用、S7-200 PLC 的通信与网络、监控组态软件与 PLC 应用综合设计、PLC 控制组态虚拟仿真实验及附录。本书可满足 PLC 课程 40~80 学时的教学要求。

本书的第 3、9 章由周美兰编写, 第 1、2、5 章由夏云彦编写, 第 4、7 章和附录由张宇编写, 第 6 章由夏云彦和周美兰共同编写, 第 8 章由周美兰和张宇共同编写。全书由周美兰统稿、定稿。

哈尔滨理工大学的温嘉斌教授审阅了全书, 提出了许多宝贵意见, 在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中, 王文宝、宋雨轩在材料的收集与整理、程序的编写与调试上做了一定的工作; 研究生杨明亮、陈麒龙和刘洋在教学演示课件的录制、PLC 控制组态虚拟仿真系统的开发与调试过程中做了大量的工作, 在此深表谢意。

在本书 8.1 节的编写和组态项目的开发、调试及软件的定制过程中, 北京三维力控科技有限公司的韩杨给予了大力的帮助和支持, 在此一并致谢。

在编写过程中编者参考了很多优秀教材和著作，在此向收录于参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。

在本书的编写过程中，虽然编者已做了很多努力，但由于水平有限，书中一定会有不少疏漏之处，恳切希望读者提出宝贵意见，以便进一步修正。联系信箱：zhoumeilan001@163.com。

编者

目 录

序

前 言

第1章 常用低压电器	1	2.3.1 起动控制电路	32
1.1 概述	1	2.3.2 制动电路	36
1.2 低压电器的电磁机构及执行机构	1	2.3.3 双速三相感应电动机调速控制 电路	41
1.2.1 电磁机构	2	2.3.4 位置控制电路	43
1.2.2 执行机构	4	2.4 电气控制电路的逻辑代数分析 方法	44
1.3 接触器	6	习题	45
1.3.1 接触器的主要技术参数	7	第3章 可编程序控制器基础	47
1.3.2 交流接触器	8	3.1 可编程序控制器的产生	47
1.3.3 直流接触器	9	3.2 PLC的主要特点及分类	48
1.4 继电器	9	3.2.1 PLC的主要特点	48
1.4.1 继电器的特性及参数	10	3.2.2 PLC的分类	49
1.4.2 电磁式继电器	10	3.3 PLC的应用场合和发展趋势	51
1.4.3 时间继电器	12	3.3.1 PLC的应用场合	51
1.4.4 速度继电器	14	3.3.2 PLC的发展趋势	52
1.4.5 热继电器	15	3.4 PLC的基本结构	52
1.5 其他常用电器	16	3.4.1 PLC的系统结构	52
1.5.1 低压熔断器	16	3.4.2 PLC各部分的作用	53
1.5.2 低压断路器	18	3.5 PLC的工作原理及技术性能	55
1.5.3 主令电器	20	3.5.1 PLC的基本工作原理	55
习题	23	3.5.2 PLC的主要技术指标	57
第2章 电气控制电路的基本环节和 典型应用	24	3.5.3 PLC的内存分配	58
2.1 电气控制电路的绘制	24	3.6 PLC的几种编程语言和硬件配置	58
2.1.1 常用电气图形及文字符号	24	3.6.1 梯形图	59
2.1.2 电气控制原理图的绘制原则	26	3.6.2 语句表	59
2.2 基本电气控制方法	27	3.6.3 功能块图	59
2.2.1 三相感应电动机简单的起、停、保护 电气控制电路	27	3.6.4 顺序功能图	60
2.2.2 多地点控制	29	3.6.5 结构化文本	60
2.2.3 长动(连续工作)与点动控制	29	3.6.6 PLC系统硬件配置	60
2.2.4 三相感应电动机的正、反向运行 控制电路	30	习题	61
2.2.5 多台电动机的顺序控制电路	31	第4章 S7-200 PLC的组成原理及 编程软件	62
2.3 三相感应电动机的基本电气控制 电路	32	4.1 硬件组成	62
		4.1.1 基本单元	62

4.1.2 扩展单元	64	第6章 S7-200 PLC 的编程及 应用	134
4.1.3 电源模块	67	6.1 PLC 梯形图的编程特点和原则	134
4.2 外部接线	68	6.1.1 PLC 梯形图的编程特点	134
4.2.1 端子排	68	6.1.2 PLC 的编程原则	136
4.2.2 漏型输入和源型输入	69	6.2 基本编程电路	138
4.2.3 漏型输出和源型输出	69	6.2.1 AND 电路	138
4.2.4 模块外部接线实例	69	6.2.2 OR 电路	138
4.3 内部组成	70	6.2.3 自锁(自保持)电路	138
4.3.1 元件功能及地址分配	70	6.2.4 互锁电路	139
4.3.2 数据储存类型	72	6.2.5 分频电路	139
4.3.3 编址方式	74	6.2.6 时间控制电路	140
4.3.4 寻址方式	75	6.2.7 计数控制电路	142
4.4 本机 I/O 与扩展 I/O 的地址分配	77	6.2.8 脉冲控制电路	143
4.5 S7-200 PLC 编程软件	78	6.2.9 其他电路	144
4.5.1 STEP7 - Micro/WIN 编程软件		6.3 应用编程实例	145
概述	78	6.3.1 电动机正反转控制	145
4.5.2 程序编制及运行	80	6.3.2 展厅人数控制	148
4.5.3 符号表操作	86	6.3.3 多台电动机顺序启动与逆序停止 控制	148
4.5.4 程序的下载和上载	87	6.3.4 房间灯的控制	148
4.5.5 程序的调试与监控	87	6.3.5 流水灯控制	150
习题	90	6.3.6 小车自动往返控制	151
第5章 S7-200 PLC 的指令系统	91	6.3.7 多地点控制	153
5.1 概述	91	6.3.8 燃烧机启动与停止控制	154
5.1.1 PLC 基本编程语言	91	6.3.9 彩灯控制	156
5.1.2 继电器系统与 PLC 指令系统	92	6.3.10 门铃及警铃控制	158
5.2 基本指令系统	92	习题	158
5.2.1 基本逻辑指令	92	第7章 S7-200 PLC 的通信与 网络	161
5.2.2 定时器与计数器指令	101	7.1 S7-200 PLC 基本通信与网络简介	161
5.3 基本功能指令	106	7.1.1 通信方式	161
5.3.1 比较指令	107	7.1.2 串行通信的接口标准	162
5.3.2 数据传送指令	107	7.1.3 S7-200 PLC 的通信协议	164
5.3.3 数据转换指令	109	7.1.4 西门子的通信网络	165
5.3.4 移位与循环移位指令	112	7.2 S7-200 PLC 的 PPI 通信应用	165
5.3.5 数据运算指令	115	7.2.1 PPI 网络的硬件接口与网络 配置	166
5.3.6 程序控制指令	117	7.2.2 网络读/写指令	167
5.4 特殊功能指令	123	7.2.3 PPI 通信实例	168
5.4.1 中断事件与中断指令	123		
5.4.2 高速计数器与高速脉冲输出 指令	126		
5.4.3 实时时钟指令	131		
习题	131		

7.3 S7-200 PLC 的自由口通信应用	
基础	171
7.3.1 自由口通信简介	171
7.3.2 自由口通信特殊字节与指令	171
7.3.3 自由口通信实现步骤	173
7.3.4 自由口通信应用实例	174
7.4 S7-200 PLC 的 Modbus 通信应用及	
实例	178
7.4.1 Modbus RTU 通信协议	178
7.4.2 使用 Modbus 协议的要求	179
7.4.3 Modbus RTU 主站协议的	
通信	179
7.4.4 从站指令	183
7.5 USS 通信指令	184
习题	184
第 8 章 监控组态软件与 PLC 应用综合	
设计	185
8.1 监控组态软件简介和实例入门	185
8.1.1 监控组态软件简介	185
8.1.2 力控监控组态软件简介	186
8.1.3 力控组态软件实例入门	188
8.2 安装力控软件和 PLC 控制组态仿真	
实验系统的说明	194
8.3 自动售货机 PLC 控制与监控组态	
设计	195
8.3.1 自动售货机功能分析	196
8.3.2 设计任务的确定	197
8.3.3 PLC 程序设计部分	198
8.3.4 售货机仿真界面的设计	207
8.3.5 售货机仿真界面中各变量的	
含义	208
8.3.6 数据连接	212
8.4 五层楼电梯 PLC 控制与监控组态	
设计	215
8.4.1 电梯的基本功能	215
8.4.2 电梯实际运行中的情况分析	217
8.4.3 电梯控制 PLC 编程	218
8.4.4 电梯声音播放说明	228
习题	229
第 9 章 PLC 控制组态虚拟仿真	
实验	231
实验一 运货小车 PLC 控制组态虚拟	
仿真实验	232
实验二 十字路口交通指挥灯 PLC 控制	
组态虚拟仿真实验	235
实验三 红酒装箱自动生产线 PLC 控制	
组态虚拟仿真实验	239
实验四 霓虹灯 PLC 控制组态虚拟	
仿真实验	242
实验五 溶液混合 PLC 控制组态虚拟	
仿真实验	247
附录 A S7-200 PLC 常用的特殊	
存储器 (SM) 标志位	250
附录 B S7-200 PLC 指令集简表	253
参考文献	262

第 1 章

常用低压电器

本章知识要点：

- (1) 低压电器的电磁机构及执行机构
- (2) 接触器及各类继电器的结构、工作原理及符号表示
- (3) 熔断器、断路器及主令开关的结构、工作原理及符号表示

1.1 概述

继电器-接触器控制系统价格低廉、控制方式简单、直观，在当今的电气控制系统中应用十分广泛。同时，它也是掌握现代先进电气控制技术的基础，可编程逻辑控制器（PLC）正是在此基础上发展而来的。

继电器-接触器控制系统主要靠各类低压电器来实现。在工业意义上，电器是指能根据外界特定的信号和要求，自动或手动地接通电路，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、检测、变换和调节作用的电气设备。低压电器是指工作在交流额定电压 1200V 以下或直流额定电压 1500V 以下的电路中，起通断、控制、保护和调节作用的电气设备。

低压电器性能的优劣以及维修是否方便直接影响控制系统能否可靠工作。随着电力电子技术、自动控制技术和计算机技术的发展，低压电器的种类越来越多，性能也越来越好。电气控制技术在工业控制系统中依然占有十分重要的地位，因此低压电器的使用也相当普遍。

低压电器种类繁多、功能多样、性能各异，结构和工作原理也各不相同。低压电器分类方法多样，通常按用途可将其分为低压配电电器、低压控制电器、低压保护电器、低压执行电器和低压主令电器等。本章主要介绍电力控制系统中常用的低压电器，如接触器、继电器、主令电器等的基本结构和工作原理。

1.2 低压电器的电磁机构及执行机构

电磁式低压电器是电气控制电路中最典型、使用最广泛的一种电器。各类电磁式低压电器的结构和工作原理基本相同，其感测部分大多是电磁机构，用以接收外界的输入信号，并通过转换、放大、判断，做出有规律的反应，使执行部分进行相应动作，实现控制目的，而执行部分主要是触点。

1.2.1 电磁机构

1. 结构与工作原理

电磁机构由吸引线圈和磁路两部分组成。它的主要作用是将电磁能转换为机械能，带动触点使之断开或闭合。

(1) 吸引线圈。吸引线圈完成电能到磁场能的转换。按线圈的连接方式可分为并联（电压线圈）和串联（电流线圈）两种。并联线圈并接在电路中，通常导线较细、匝数多。串联线圈串接在电路中，其导线较粗、匝数少，可用于电流检测。

按通入电流的种类可分为直流线圈和交流线圈两种。直流线圈的铁心不发热，只有线圈发热，一般线圈与铁心直接接触，以利于线圈散热，铁心通常由铸钢、铸铁或软钢制成。采用交流线圈时，铁心中的涡流和磁滞损耗使得铁心也会发热，铁心通常由硅钢片迭压而成，以减小交变磁场在铁心中产生的损耗。

(2) 磁路。磁路包括铁心、衔铁、铁轭和空气隙。衔铁在电磁力的作用下与铁心吸合，电磁力消失后衔铁复位。电磁机构按衔铁相对于铁心的动作形式可分为衔铁绕棱角转动、衔铁绕轴转动和衔铁直线运动三种。衔铁绕棱角转动如图 1-1a 所示，这种结构衔铁磨损较小，铁心用软铁，多用于直流接触器、继电器。衔铁绕轴转动如图 1-1b 所示，铁心用硅钢片叠成，铁心形状有 E 形和 U 形两种，多用于交流接触器。衔铁直线运动如图 1-1c 所示，多用于交流接触器和交流继电器。

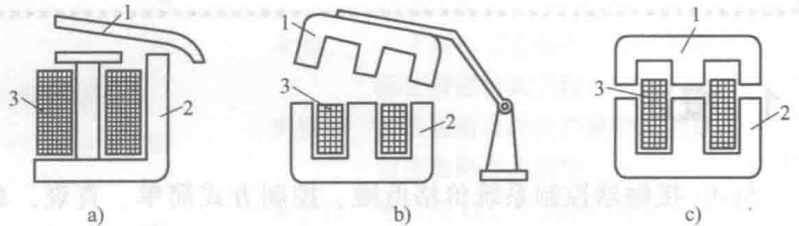


图 1-1 常用电磁机构的形式

1—衔铁 2—铁心 3—吸引线圈

2. 吸力特性与反力特性

2. 吸力特性与反力特性

电磁机构的工作情况通常用吸力特性与反力特性来表征。电磁机构的电磁吸力与气隙长度的关系曲线称为吸力特性。它随励磁电流的种类（直流或交流）和线圈连接方式（串联或并联）的不同而有所差异。衔铁受到的反作用力（包括电磁机构转动部分的阻力）与气隙长度之间的关系曲线称为反力特性。

(1) 吸力特性。电磁机构的电磁吸力 F 的近似计算公式为

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

式中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ； B 为气隙磁通密度（T）； S 为吸力处的铁心截面积（ m^2 ）。

当 S 为常数时， $F \propto B^2 \propto \Phi^2$ 。

对于具有电压线圈的直流电磁机构，当外加电压和线路电阻恒定时，流过线圈的电流为常数，与磁路的气隙大小无关。根据磁路定律

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN\mu_0 S}{\delta} \quad (1-2)$$

有

$$F \propto \Phi^2 \propto \frac{1}{\delta^2} \quad (1-3)$$

吸力 F 与气隙 δ 的关系曲线即为吸力特性曲线，故由式(1-3)知吸力特性应为二次曲线形状，如图1-2所示，图中 δ_1 为电磁机构气隙的初始值， δ_2 为动、静触点开始接触时的气隙长度。可见，衔铁闭合前后吸力变化很大，气隙越小吸力越大。

对于具有电压线圈的交流电磁机构，其吸力特性有别于直流电磁机构。设外加电压固定，交流吸引线圈的阻抗主要取决于线圈的电抗（电阻相对很小可忽略），则当气隙磁感应强度按正弦规律交变时

$$U \approx E = 4.44fN\Phi \quad (1-4)$$

$$\Phi = \frac{U}{4.44fN} \quad (1-5)$$

当频率 f 、匝数 N 和电压 U 均为常量时， Φ 为常量，则由 $F \propto \Phi^2$ 可知 F 为常数，即 F 与气隙 δ 的大小无关。但实际上由于漏磁通的存在， F 随 δ 的减小略有增加。此时 F 与 δ 的变化关系如图1-3所示。根据式(1-2)知，当 Φ 、 N 均为定值时，吸引线圈的电流 I 与气隙 δ 成正比。若忽略线圈电阻，可近似地认为 I 与 δ 呈线性关系，如图1-3中所示。

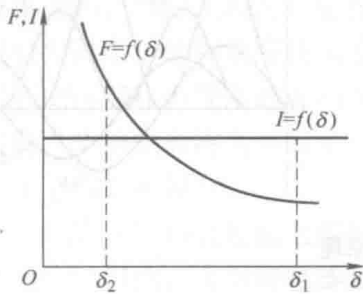


图1-2 直流电磁机构的吸力特性

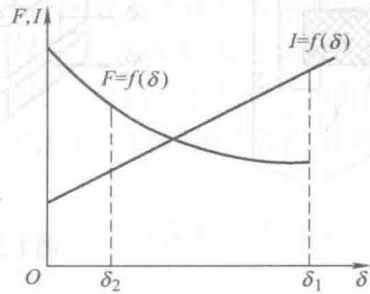


图1-3 交流电磁机构的吸力特性

对于一般的交流电磁机构，在线圈通电而衔铁尚未吸合的瞬间，电流将达到吸合后额定电流的几倍甚至几十倍。如果衔铁卡住不能可靠吸合或者衔铁频繁动作，就可能烧毁线圈。因此，对于可靠性高或频繁动作的控制系统大都采用直流电磁机构。

(2) 反力特性。反力的大小与复位弹簧、摩擦阻力及衔铁的质量有关。欲使接触器衔铁吸合，在整个吸合过程中，吸力需大于反力，这样触点才能可靠动作。反力特性曲线如图1-4中曲线3所示，直流与交流接触器的吸力特性分别如曲线1和2所示。在 $\delta_1 - \delta_2$ 的距离内，反力随气隙减小略有增大。到达 δ_2 位置时，动触点开始与静触点接触，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的距离内，气隙越小，触点压得越紧，反力越大，此段曲线较 $\delta_1 - \delta_2$ 段陡。

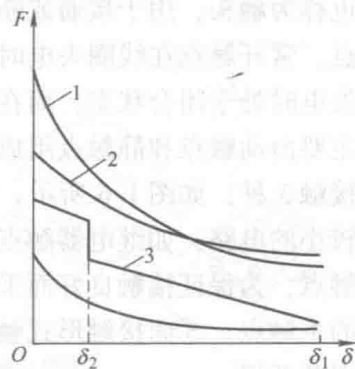


图1-4 电磁机构吸力特性与反力特性的配合

1—直流吸力特性 2—交流吸力特性
3—反力特性

为了保证吸合过程中衔铁能正常闭合，吸

力在各个位置上必须大于反力，但也不能过大，否则衔铁吸合过程产生的较大冲击力会影响电器的使用寿命。在使用中可以通过调节反力弹簧或触点的初压力来改变反力特性，使之与吸力特性良好配合。

(3) 短路环的使用。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，吸合后的衔铁在反力的作用下将被拉开。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，衔铁的吸力随之每个周波过零两次，因而衔铁产生强烈振动与噪声，甚至使铁心松散。

为解决上述问题，交流接触器铁心端面上都安装一个铜制的短路环（分磁环），如图 1-5 所示。短路环将铁心端面分成 S1 和 S2 两部分，其中 S1 部分穿过短路环。线圈中通入交流电后，短路环中会产生感应电流（涡流），进而产生磁通 Φ_m ， Φ_m 的存在使得铁心端面 S1 和 S2 分别通过两个在相位上不同的磁通 Φ_1 和 Φ_2 （ Φ_1 滞后于 Φ_2 ），相应的电磁吸力分别为 f_1 和 f_2 。作用在衔铁上的力为 $f_1 + f_2$ 。由于两个磁通不同时过零，因此合力总是大于零。只要此合力始终大于反力，衔铁的振动现象就会消除。

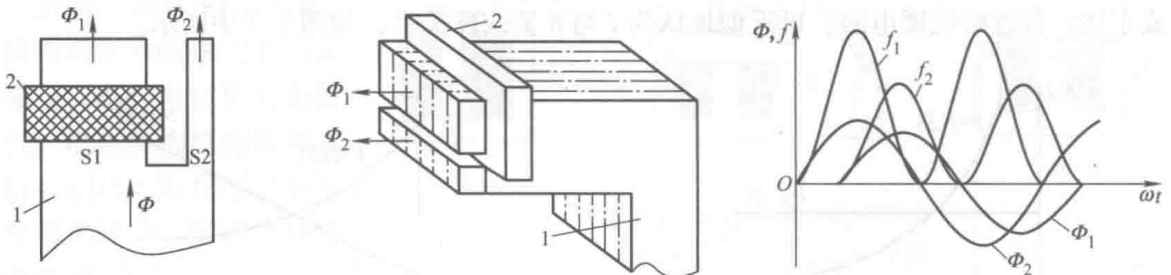


图 1-5 短路环结构及工作原理

1—铁心 2—短路环

1.2.2 执行机构

低压电器的执行机构一般由触点及其灭弧装置构成。

1. 触点

触点也称为触头，用于接通或断开被控制的电路。按照动作特点可将触点分为常开触点和常闭触点。常开触点在线圈失电时处于断开状态，而在线圈得电时处于闭合状态。常闭触点在线圈失电时处于闭合状态，而在线圈得电时处于断开状态。

触点主要由动触点和静触点组成。它的结构形式很多，按其接触形式可分为点接触、线接触和面接触 3 种，如图 1-6 所示。①点接触触点间的接触面小，触点打开时间短，常用于通断电流较小的电路，如继电器触点。②线接触触点间的接触区域为一条直线，这类触点也称为指形触点，为保证接触良好而采用滚动接触的方法，这类触点多用于中等容量电器中，如接触器的主触点。③面接触形式触点间接触面很大，允许通过较大的电流，接触面容易有变形，触点断开慢。

鉴于触点的工作特点，要求其具有良好的导电和导热性能，触点通常由铜制成。但是铜的表面易被氧化生成氧化铜，使接触电阻增大，从而增加触点的损耗，使温度上升。由于银的氧化膜电阻率与纯银接近，因此对于容量较小的电器，触点通常为银质材料。大中容量的



图 1-6 触点的接触形式

电器常采用铜质触点，并采用滚动接触以去掉氧化膜。

2. 电弧的产生及常用灭弧装置

当触点切断电路时，若被分断电路的电流和电压超过一定的数值，在拉开的两个触点之间会出现强烈的火花，通常称为“电弧”。

电弧是触点间气体在强电场作用下产生的放电现象。气体放电是指气体中有大量的带电粒子作定向运动。触点在分离瞬间，其间隙很小，在触点间形成很强的电场（ $E = U/d$ ，其中 d 为间隙），在强电场作用下，阴极中的自由电子逸出到气隙中并向阳极加速运动。逸出的自由电子在运动中会撞击气体原子，使其分裂成电子和正离子。电子在向阳极运动过程中又会撞击其他原子，这种现象称为撞击电离。撞击电离的正离子向阴极运动，撞击阴极使阴极温度逐渐升高，当温度到达一定程度时，使一部分电子从阴极逸出并参与撞击电离。由于高温使电极发射电子的现象叫热电子发射。当电弧的温度达到 3000°C 或更高时，触点间的原子以很高的速度作不规则的运动并相互剧烈撞击，结果原子也将产生电离，这种因高温使原子撞击所产生的电离称为热游离。于是，在触点间隙产生大量向阳极飞驰的炙热电子流，使气体导电，即为电弧。

电弧的危害主要是会延长电路的分断时间，烧坏触点，严重时损坏电器和周围设备，甚至造成火灾。因此，大电流电器必须采取合适的灭弧措施。

在气体分子进行电离的同时，也伴随着正、负带电粒子复合的消电离过程。由电弧的产生过程可知，为使电弧熄灭，应设法降低电弧的温度和电场强度，如增大电弧长度、加大散热面积等。常用的灭弧方法有以下几种。

(1) 磁吹式灭弧。这种灭弧的原理是使电弧处于磁场中，利用磁场力“吹”长电弧，使其进入冷却装置，加速电弧的冷却和熄灭。

磁吹灭弧的工作原理如图 1-7 所示。在触点电路中串入一个吹弧线圈 3，触点电流通过吹弧线圈时，在触点周围产生方向向内的磁场。触点分开瞬间电弧所产生的磁场方向如图 1-7 所示，因此，电弧将受到使其向上运动的力，使电弧被拉长并吹入灭弧罩中。熄弧角 6 和静触点连接，用以引导电弧向上运动，将热量传递给罩壁，促使电弧熄灭。这种装置是利用电弧电流本身灭弧的，因此电弧电流越大，灭弧能力越强。它广泛应用于直流低压电器中。

(2) 灭弧栅灭弧。灭弧栅由一组彼此间相互绝缘、安放在触点上方的镀铜薄钢片组成，

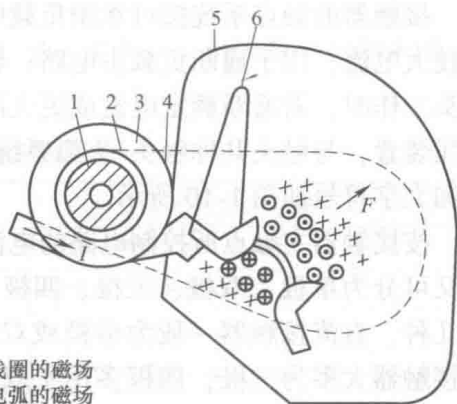


图 1-7 磁吹灭弧装置的工作原理图

1—铁心 2—绝缘管 3—吹弧线圈

4—导磁薄片 5—灭弧罩 6—熄弧角

其灭弧原理如图 1-8 所示, 片间距离一般为 2~3mm。发生电弧时, 电弧周围产生磁场, 由于栅片的高导磁率, 使栅片内部磁密较高, 因此, 在向上的力的作用下电弧被吸入栅片内。将原来一个较长的电弧分割成多个串联的短电弧, 当交流电压过零时电弧自然熄灭, 而电弧的重燃需要两栅片间必须有 150~250V 的电压, 电源电压不足以维持电弧。另外, 由于栅片具有散热作用, 电弧自然熄灭后很难重燃。这种灭弧方式常用于交流灭弧。

(3) 多断点灭弧。在交流电路中可采用桥式触点, 如图 1-9 所示。桥式触点断开时, 在一个回路中有两个产生电弧的间隙。由于相邻的两根导体通入相反方向的电流时, 两导体互相排斥, 因此触点在断开时本身就具有吹弧能力。两侧的电弧在力 F 的作用下向外运动并被拉长, 使其迅速穿越冷却介质而加快电弧熄灭。为加强灭弧效果, 可将同一电器的两个或多个触点串联起来作一个触点使用, 这便形成多断点触点。

1.3 接触器

接触器 (Contactor) 是用来频繁接通和断开电动机或其他负载主电路的一种自动切换电器。它利用电磁吸力及弹簧的反作用力配合动作, 使触点闭合或断开, 是一种非常典型的电磁式电器。具有价格低廉、结构紧凑、过载能力强、维护方便等特点, 能通断负荷电流, 但不能切断短路电流, 因此常与熔断器、热继电器等配合使用, 具有欠电压释放保护功能, 是电力拖动控制系统中重要的控制电器之一。

接触器的触点系统按可承担负载电流的大小, 可分为主触点和辅助触点, 主触点允许通过较大电流, 用于通断负载主电路; 辅助触点允许通过较小电流, 常用在控制电路中。由于触头工作时, 需通断额定电流或更大的电流, 所以常有电弧产生, 因此, 大部分接触器都有灭弧装置, 与触头共称触头-灭弧系统, 额定电流很小时可不设灭弧装置。接触器的图形符号和文字符号如图 1-10 所示。

按接触器主触点所控制电路的电流种类可分为交流接触器与直流接触器。按主触点的极数又可分为单极、双极、三极、四极和五极等几种。直流接触器一般为单极或双极; 交流接触器大多为三极, 四极多用于双回路控制, 五极多用于多速电动机控制或者自动式自耦减压起动中。

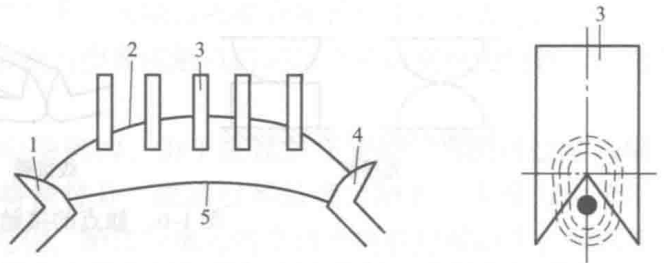


图 1-8 灭弧栅灭弧原理图

1—静触点 2—短电弧 3—灭弧栅片 4—动触点 5—长电弧

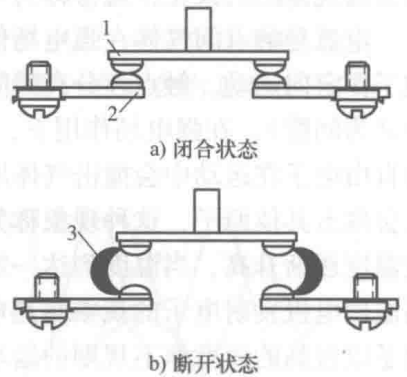


图 1-9 桥式触点示意图

1—动触点 2—静触点 3—电弧

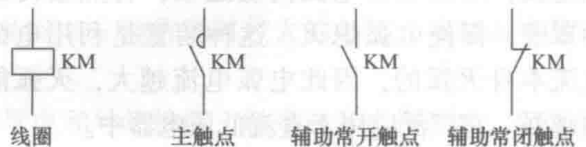


图 1-10 接触器的图形符号和文字符号