



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

电气与PLC 控制技术及应用

张静 席可军 王宗刚 张晓峰 主编
张翔 参编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

013064648



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

TM571.2
48

电气与PLC 控制技术及应用

Dianqi yu PLC Kongzhi Jishu ji Yingyong

张静 席可军 王宗刚 张晓峰 主编
张翔 参编



北航 C1672310



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

TM571.2
48

013084848

教育部推荐教材 第十一版 全国高等院校



内容提要

本书内容分为两部分，第一部分为继电器控制，作为 PLC 控制的基础；第二部分为 PLC 控制，以比较典型、实用的西门子 S7-200 系列 PLC 为例，介绍了 PLC 的基本原理、组成结构、指令系统、程序设计方法及应用。

本书内容编排循序渐进，由易到难，由浅到深，既有广度又有深度；注重精选内容，结合实际，简明扼要，图文并茂，便于自学；内容精练，衔接自然，理论联系实际，有很强的实用性和针对性。

本书可作为高等院校自动化、电气工程、机械电子及相关专业的应用型本科教材，亦可作为广大工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气与 PLC 控制技术及应用 / 张晓峰主编. —北京: 高等教育出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-04-037735-4

I. ①电… II. ①张… 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(2013)第 164800 号

策划编辑 王勇莉 责任编辑 王勇莉 封面设计 赵阳 版式设计 范晓红
插图绘制 尹莉 责任校对 刘莉 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印刷 北京玥实印刷有限公司
开本 787mm × 1092mm 1/16
印张 24.5
字数 590 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 37735-00

前 言

可编程控制器（简称 PLC）是以微处理器为核心，将自动控制技术、计算机技术和通信技术融为一体而发展起来的崭新的工业自动控制装置。目前 PLC 已基本替代了传统的继电器控制而广泛应用于工业控制的各个领域。

PLC 的生产厂家和产品型号很多，本书以比较典型、实用的西门子 S7-200 系列 PLC 为例，介绍电气与 PLC 控制的基本原理、组成结构、指令系统和程序设计方法。

本书共分 10 章。第 1、2 章分别介绍了常用低压电器和电气控制的基本电路；第 3、4、5、6、7 章分别介绍了 PLC 基础、S7-200 系列 PLC 的结构、基本指令、功能指令、网络与通信；第 8、9、10 章分别介绍了 S7-200 系列 PLC 的编程软件、PLC 控制系统的设计以及应用；附录 A 为低压电器型号编制方法，附录 B 为常用电器分类及图形符号与文字符号，附录 C 为逻辑运算法则表，附录 D 为 S7-200 的 SIMATIC 指令集，可供读者查阅。

本书内容编排循序渐进，由易到难，由浅到深，既有广度又有深度；注重精选内容，结合实际，简明扼要，图文并茂，便于自学；内容精练，衔接自然，理论联系实际，有很强的实用性和针对性。

本书由张晓峰任主编，张静、王宗刚、张翔参与了部分内容的编写。在本书的编写过程中，得到了张嘉、朱婷等人的帮助，在此表示由衷的感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者邮箱：zhangxf189@yeah.net。

编 者

2013 年 2 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 常用低压电器	1
1.1 低压电器的基本知识	1
1.1.1 低压电器的分类	1
1.1.2 电磁式低压电器基本结构	1
1.2 电磁式接触器	9
1.2.1 接触器的结构及工作原理	9
1.2.2 接触器的主要技术参数	11
1.2.3 常用典型接触器	12
1.2.4 接触器的选用	13
1.3 电磁式继电器	13
1.3.1 电磁式继电器的基本结构及分类	14
1.3.2 电磁式继电器的特性及主要参数	15
1.3.3 电磁式电压继电器与电流继电器	15
1.4 时间继电器	19
1.4.1 直流电磁式时间继电器	20
1.4.2 空气阻尼式时间继电器	20
1.4.3 晶体管时间继电器	23
1.4.4 时间继电器的选用	25
1.5 热继电器	25
1.5.1 电气控制对热继电器性能的要求	25
1.5.2 双金属片热继电器的结构及工作原理	26
1.5.3 具有断相保护的热继电器	26
1.5.4 热继电器典型产品及主要技术参数	28
1.5.5 热继电器的选用	29
1.6 熔断器	29
1.6.1 熔断器结构及工作原理	29
1.6.2 熔断器的保护特性	30
1.6.3 熔断器的主要技术参数及典型产品	30
1.6.4 熔断器的选择	32
1.7 低压断路器	33
1.7.1 低压断路器的结构和工作原理	34
1.7.2 低压断路器的主要技术数据和保护特性	35
1.7.3 塑壳式低压断路器典型产品	36
1.7.4 塑壳式低压断路器的选用	37
1.8 主令电器	37
1.8.1 控制按钮	38
1.8.2 行程开关	39
1.8.3 接近开关	41
1.8.4 万能转换开关	43
1.8.5 主令控制器	44
1.9 速度继电器与干簧继电器	46
1.9.1 速度继电器	46
1.9.2 干簧继电器	47
1.10 低压电器产品型号	48
习题一	49
第 2 章 常用电气控制电路分析与设计	50
2.1 电气控制系统图	50
2.1.1 电气图常用的图形与文字符号	50
2.1.2 电气原理图	51
2.1.3 电器布置图	53
2.1.4 安装接线图	54
2.2 电气控制电路基本控制规律	54
2.2.1 自锁与互锁的控制	55
2.2.2 点动与连续运转的控制	56

2.2.3	多地连锁控制	57	习题二	92
2.2.4	顺序控制	57	第3章 可编程控制器基础	95
2.2.5	自动往复循环控制	59	3.1 可编程控制器概述	95
2.3	三相异步电动机的起动控制	60	3.1.1 可编程控制器的产生与定义	95
2.3.1	星形-三角形减压起动控制	61	3.1.2 可编程控制器的特点与应用	96
2.3.2	自耦变压器减压起动控制	62	3.1.3 可编程控制器的发展状况与展望	98
2.3.3	三相绕线型异步电动机的起动控制	63	3.1.4 可编程控制器的分类与性能指标	99
2.4	三相异步电动机的制动控制	64	3.2 可编程控制器的硬件基础	100
2.4.1	电动机单向反接制动控制	65	3.2.1 中央处理器	101
2.4.2	电动机可逆运行反接制动控制	66	3.2.2 存储器	101
2.4.3	电动机单向运行能耗制动控制	67	3.2.3 输入、输出接口	102
2.4.4	电动机可逆运行能耗制动控制	68	3.2.4 电源	105
2.4.5	无变压器单管能耗制动控制	68	3.2.5 各种接口	105
2.5	三相异步电动机的调速控制	69	3.2.6 编程工具	106
2.5.1	三相笼型异步电动机变极调速控制	69	3.2.7 智能单元	106
2.5.2	三相绕线型异步电动机转子串电阻调速控制	70	3.2.8 其他部件	106
2.5.3	三相异步电动机的变频调速控制	72	3.3 可编程控制器的软件基础	106
2.6	电气控制系统常用的保护环节	74	3.3.1 可编程控制器的软件组成	106
2.6.1	短路保护	74	3.3.2 可编程控制器的编程语言	108
2.6.2	过电流保护	74	3.3.3 可编程控制器的程序结构	110
2.6.3	过载保护	75	3.4 可编程控制器的工作原理	110
2.6.4	失电压保护	75	3.4.1 可编程控制器的等效电路	111
2.6.5	欠电压保护	75	3.4.2 可编程控制器的工作过程	112
2.6.6	过电压保护	76	3.5 可编程控制系统与微机及继电器控制系统的区别	113
2.6.7	直流电动机的弱磁保护	76	3.5.1 可编程控制系统与微机控制系统的区别	113
2.6.8	其他保护	76	3.5.2 可编程控制系统与继电器控制系统的区别	113
2.7	电气控制电路分析	76	习题三	114
2.7.1	电气控制电路分析概述	76	第4章 S7-200系列PLC的系统配置与编程基础	115
2.7.2	X62W型卧式铣床电气控制电路分析	78	4.1 S7-200系列PLC的系统配置	115
2.8	电气控制线路的设计方法	85	4.1.1 S7-200系列PLC的基本组成	115
2.8.1	电气原理图设计的基本内容	85	4.1.2 CPU模块的输出结构及性能	119
2.8.2	经验设计法	86	4.2 S7-200系列PLC的功能模块	120
2.8.3	逻辑设计法	90		

4.2.1	数字量模块	120	6.3	顺序控制指令及其应用	224
4.2.2	模拟量模块	122	6.3.1	功能流程图	224
4.2.3	智能模块	127	6.3.2	顺序控制指令	225
4.3	S7-200 系列 PLC 编程基础	128	6.3.3	多流程顺序控制	228
4.3.1	寻址方式	128	6.4	特殊功能指令及其应用	233
4.3.2	操作数	130	6.4.1	高速计数器指令	233
4.3.3	状态字	134	6.4.2	高速脉冲输出指令	240
4.3.4	用户程序结构	134	6.4.3	PID 回路指令	245
4.3.5	编程的一般规则	135	6.4.4	时钟功能指令	254
习题四		136	习题六		256
第 5 章	S7-200 系列 PLC 的基本指令	137	第 7 章	S7-200 系列 PLC 的通信与网络	258
5.1	常用指令及其应用	137	7.1	通信及网络基础	258
5.1.1	常用指令	137	7.1.1	数据通信方式	258
5.1.2	常用指令的应用	148	7.1.2	网络概述	261
5.2	定时器与计数器指令及其应用	152	7.2	S7-200 系列 PLC 的通信部件	264
5.2.1	定时器指令	152	7.2.1	通信端口	264
5.2.2	计数器指令	156	7.2.2	网络连接器	265
5.2.3	定时器与计数器指令的应用	159	7.2.3	通信电缆	266
5.3	数据运算指令及其应用	162	7.2.4	网络中继器	268
5.3.1	算术运算指令	162	7.2.5	调制解调器	268
5.3.2	逻辑运算指令	169	7.2.6	PROFIBUS-DP 通信模块	269
5.3.3	数据运算指令应用	173	7.2.7	工业以太网通信处理器	269
习题五		175	7.3	S7-200 系列 PLC 的通信网络	270
第 6 章	S7-200 系列 PLC 的功能指令	178	7.3.1	单主站 PPI 网络	270
6.1	数据处理指令及其应用	178	7.3.2	多主站 PPI 网络	271
6.1.1	指令简介	178	7.3.3	复杂的 PPI 网络	272
6.1.2	传送指令	179	7.4	S7-200 系列 PLC 通信协议	272
6.1.3	表功能指令	184	7.4.1	利用 PPI 协议进行网络通信	272
6.1.4	转换指令	189	7.4.2	利用 MPI 协议进行网络通信	273
6.1.5	比较指令	199	7.4.3	利用 PROFIBUS 协议进行网络通信	274
6.1.6	移位和循环移位指令	201	7.4.4	利用其他协议进行网络通信	275
6.1.7	应用举例	206	7.5	S7-200 系列 PLC 网络及其应用	275
6.2	程序控制指令及其应用	207	7.5.1	通信参数的设置	275
6.2.1	基本控制指令	207	7.5.2	S7-200 系列 PLC 的参数设置	277
6.2.2	跳转及循环指令	209	7.5.3	网络指令及应用	278
6.2.3	子程序指令	213	习题七		281
6.2.4	中断程序控制指令	217			
6.2.5	应用举例	222			

第 8 章 S7-200 系列 PLC 的编程与仿真软件	282	8.6.3 导入程序	302
8.1 STEP 7-Micro/WIN V4.0 SP9 的安装	282	8.6.4 程序仿真	302
8.1.1 STEP 7-Micro/WIN V4.0 软件安装	282	习题八	304
8.1.2 STEP 7-Micro/WIN V4.0 软件功能	283	第 9 章 S7-200 系列 PLC 控制系统的设计	306
8.2 STEP 7-Micro/WIN V4.0 编程软件的组态	286	9.1 可编程控制器系统设计的一般方法	306
8.2.1 STEP 7-Micro/WIN V4.0 系统组态的方法	286	9.1.1 设计内容	306
8.2.2 设置数字量输入、输出滤波	287	9.1.2 设计步骤	306
8.2.3 设置脉冲截取与数字输出表	288	9.2 可编程控制器系统的硬件设计	308
8.2.4 设置存储器保持范围与 CPU 密码	289	9.2.1 总体方案的确定	309
8.3 STEP 7-Micro/WIN V4.0 编程概念	291	9.2.2 PLC 机型的选择	310
8.3.1 程序编辑器显示地址	291	9.2.3 智能 I/O 模块的选择	311
8.3.2 全局范围与局部范围	291	9.2.4 其他控制硬件的选择	312
8.3.3 控制程序的基本构成元素	291	9.2.5 绘制硬件系统接线图	312
8.3.4 LAD、FBD、STL 编辑器比较	292	9.2.6 在线和离线编程的选择	312
8.3.5 SIMATIC、IEC 编程模式比较	292	9.3 可编程控制器系统的软件设计	312
8.4 STEP 7-Micro/WIN V4.0 编程软件的基本操作	293	9.3.1 设计基本原则	312
8.4.1 建立项目文件	293	9.3.2 设计步骤	313
8.4.2 编辑程序文件	294	9.3.3 设计方法	313
8.4.3 显示梯形图中的输入错误	297	9.4 可编程控制器系统的可靠性设计	327
8.5 S7-200 系列 PLC 程序的状态监控调试	298	9.4.1 漏电流和冲击电流的处理	328
8.5.1 程序的运行	298	9.4.2 电磁兼容性设计	328
8.5.2 选择扫描次数	298	9.4.3 接地设计	331
8.5.3 用状态图监控程序	298	9.4.4 软件抗干扰设计	332
8.5.4 运行模式下编辑程序	299	9.4.5 安装及环境条件设计	333
8.5.5 程序监控	299	9.4.6 冗余设计	334
8.6 S7-200 系列 PLC 仿真软件	300	9.4.7 供电设计	335
8.6.1 软件界面	300	9.4.8 静电预防	336
8.6.2 常用菜单命令	301	习题九	337
		第 10 章 S7-200 系列 PLC 的应用	338
		10.1 多台电动机顺序起停控制	338
		10.1.1 概述	338
		10.1.2 利用顺序控制继电器指令设计	338
		10.1.3 利用移位寄存器指令设计	342
		10.2 运料小车控制	343

10.2.1	概述	343	10.4.2	控制要求	355
10.2.2	工作过程	344	10.4.3	硬件设计	355
10.2.3	PLC 设计	345	10.4.4	软件设计	360
10.3	X62W 万能铣床电气控制部分		10.4.5	系统调试	363
	PLC 改造设计	349	习题十		363
10.3.1	改造方法	349	附录 A	低压电器型号编制方法	364
10.3.2	硬件设计	350	附录 B	常用电器元件图形符号及文字	
10.3.3	软件设计	351		符号一览表	366
10.4	多路信息检测与显示控制		附录 C	逻辑运算及定律表	371
	系统	354	附录 D	S7-200 系列 PLC 指令集	373
10.4.1	控制系统原理	354	参考文献		378

第1章 常用低压电器

低压电器是指工作在直流 1200 V、交流 1500 V 及以下的电路中，以实现电路或非电对象的控制、检测、保护、变换、调节等作用的电器。采用电磁原理构成的低压电器，称为电磁式低压电器；利用集成电路或电子元件构成的低压电器，称为电子式低压电器；利用现代控制原理构成的低压电器，称为自动化电器、智能化电器或可通信电器等。

1.1 低压电器的基本知识

1.1.1 低压电器的分类

低压电器种类繁多、功能多样、用途广泛、结构各异，工作原理也不尽相同，按用途可分为以下类型：

- (1) 低压配电电器。用于供、配电系统中进行电能输送和分配的电器。如：刀开关、低压断路器、熔断器等。该类电器要求分断能力强，限流效果好，动稳定及热稳定性好。
- (2) 低压控制电器。用于各种控制电路和控制系统的电器。如：接触器、控制继电器、主令电器、电阻器、电磁铁等。该类电器要求有一定的通断能力，操作频率高，电气及机械寿命长。
- (3) 低压主令电器。用于发送控制指令的电器。如按钮、主令开关、行程开关、主令控制器、转换开关等。该类电器要求操作频率高，电气及机械寿命长，抗冲击性能好。
- (4) 低压保护电器。用于对电路及用电设备进行保护的电器。如熔断器、热继电器、电压继电器、电流继电器等。该类电器要求可靠性高，反应灵敏，具有一定的通断能力。
- (5) 低压执行电器。用于完成某种动作或传送某种功能的电器。如电磁铁、电磁离合器等。

上述电器还可按使用场合分为一般工业用电器、特殊工矿用电器、航空用电器、船舶用电器、建筑用电器、农用电器等；按操作方式分为手动电器和自动电器；按工作原理分为电磁式电器、非电量控制电器等，其中电磁式低压电器是传统低压电器中应用最广泛、结构最典型的一种。

低压电器产品型号类组代号见附录 A 低压电器产品的型号编制方法。

1.1.2 电磁式低压电器基本结构

电器一般由两个基本部分组成，即感受部分与执行部分。感受部分接受外界输入的

信号，并通过转换、放大与判断做出有规律的反应，使执行部分动作，输出相应的指令，实现控制的目的。对于有触点的电磁式电器，感受部分是电磁机构，执行部分是触点系统。

1. 电磁机构

(1) 电磁机构的结构。电磁机构由吸引线圈、铁心和衔铁组成。吸引线圈通以一定的电压和电流产生磁场及吸力，并通过气隙转换成机械能，从而带动衔铁运动使触点动作，完成触点的断开和闭合，实现电路的分断和接通。图 1.1 是几种常用电磁结构的形式，根据衔铁相对铁心的运动方式，电磁机构有直动式与拍合式。拍合式又有衔铁沿棱角转动和沿轴转动两种。

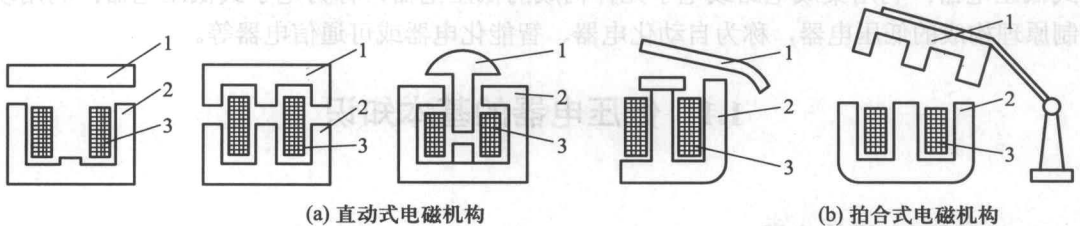


图 1.1 电磁机构

1—衔铁 2—铁心 3—线圈

吸引线圈用以将电能转换为磁能，按吸引线圈通入电流的性质不同，电磁机构分为直流电磁机构和交流电磁机构，其线圈称为直流电磁线圈和交流电磁线圈。直流电磁线圈一般做成无骨架、高而薄的瘦高型，线圈与铁心直接接触，易于线圈散热；交流电磁线圈由于铁心存在磁滞和涡流损耗，造成铁心发热，为此线圈与铁心用硅钢片叠制而成，且为改善线圈和铁心的散热，线圈设有骨架，使铁心和线圈隔开，并将线圈做成短而厚的矮胖型。另外，根据线圈在电路中的连接方式，又有串联和并联线圈。串联线圈采用粗导线、匝数少，其又称电流线圈；并联线圈匝数多，线径细，又称电压线圈。

(2) 电磁机构工作原理。当吸引线圈通入电流后，产生磁场，磁通经铁心、衔铁和工作气隙形成闭合回路，产生电磁吸力，将衔铁吸向铁心。与此同时，衔铁还受到反作用弹簧的拉力，只有当电磁吸力大于弹簧反力时，衔铁才可靠地被铁心吸住。而当吸引线圈断电时，电磁吸力消失，在弹簧作用下，衔铁与铁心脱离，即衔铁释放。电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表述。

当电磁机构吸引线圈通电后，铁心吸引衔铁吸合的力与气隙的关系曲线称为吸力特性。电磁机构使衔铁释放（复位）的力与气隙的关系曲线称为反力特性。

① 反力特性。电磁机构使衔铁释放的力大多是利用弹簧的反力，由于弹簧的反力与其机械变形的位移量 x 成正比，其反力特性可写成

$$F = Kx \quad (1.1)$$

电磁机构的反力特性如图 1.2 (a) 所示。

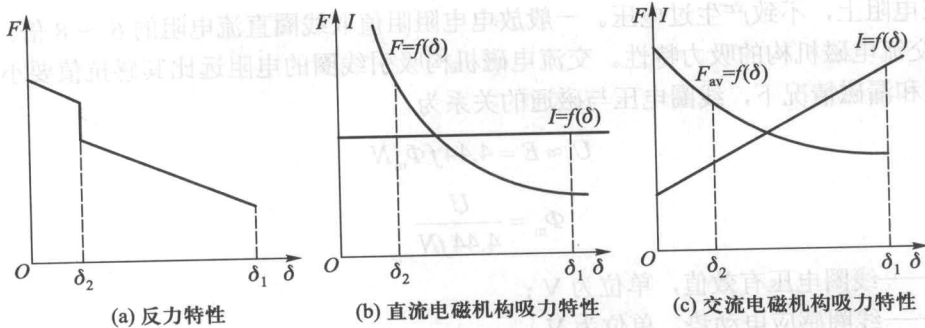


图 1.2 电磁机构反力特性

图中, δ_1 ——电磁机构气隙的初始值, 单位为 mm ;

δ_2 ——动静触点开始接触时的气隙长度, 单位为 mm。

考虑到动合触点闭合时超行程机构的弹力作用, 反力特性在 δ_2 处有一突变。

② 直流电磁机构的吸力特性。电磁机构的吸力与很多因素有关, 当铁心与衔铁端面互相平行, 且气隙较小时, 吸力特性可按下式求得

$$F = 4B^2 S \times 10^5 \quad (1.2)$$

式中, F ——电磁机构衔铁所受的吸力, 单位为 N ;

B ——气隙的磁感应强度, 单位为 T ;

S ——吸力处端面积, 单位为 m^2 。

当端面积 S 为常数时, 吸力 F 与 B^2 成正比, 亦可以认为 F 与磁通 Φ^2 成正比, 与端面积 S 成反比, 即

$$F \propto \frac{\Phi^2}{S} \quad (1.3)$$

电磁机构的吸力特性是指电磁吸力与气隙的相互关系。

直流电磁机构当直流励磁电流稳定时, 直流磁路对直流电路无影响, 所以励磁电流不受磁路气隙的影响, 即其磁动势 IN 不受磁路气隙的影响, 根据磁路欧姆定律

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN}{\delta} = \frac{IN\mu_0 S}{\mu_0 S \delta} \quad (1.4)$$

而电磁吸力 $F \propto \frac{\Phi^2}{S}$, 则

$$F \propto \frac{\Phi^2}{S} \propto \left(\frac{1}{\delta}\right)^2 \quad (1.5)$$

即直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的平方成反比, 其吸力特性如图 1.2 (b) 所示。由此看出, 衔铁吸合前后吸力变化很大, 气隙越小, 吸力越大。但衔铁吸合前后吸引线圈励磁电流不变, 故直流电磁机构适用于动作频繁的场所, 且衔铁吸合后电磁吸力大, 工作可靠。但当直流电磁机构吸引线圈断电时, 由于电磁感应, 将会在吸引线圈中产生很大的反电动势, 其值可达线圈额定电压的十多倍, 使线圈因过电压而损坏, 为此, 常在吸引线圈两端并联一个放电回路, 该回路由放电电阻与一个硅二极管组成, 正常励磁时, 因二极管处于截止状态, 放电回路不起作用, 而当吸引线圈断电时, 放电回路导通, 将原先储存在线圈中的磁场能量释放出

来消耗在电阻上，不致产生过电压。一般放电电阻阻值取线圈直流电阻的6~8倍。

③ 交流电磁机构的吸力特性。交流电磁机构吸引线圈的电阻远比其感抗值要小，在忽略线圈电阻和漏磁情况下，线圈电压与磁通的关系为

$$U \approx E = 4.44 f \Phi_m N \quad (1.6)$$

$$\Phi_m = \frac{U}{4.44 f N} \quad (1.7)$$

式中， U ——线圈电压有效值，单位为V；

E ——线圈感应电动势，单位为V；

f ——线圈电压的频率，单位为Hz；

N ——线圈匝数；

Φ_m ——气隙磁通最大值，单位为Wb。

当外加电源 U 、频率 f 和线圈匝数 N 为常数时，则气隙磁通 Φ_m 亦为常数，且电磁吸力 F 的平均值 F_{av} 为常数。原因是电压、磁通都随时间作正弦规律变化，电磁吸力也作周期性变化，现分析如下：

令气隙中磁感应强度按正弦规律变化

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (1.8)$$

交流电磁机构电磁吸力的瞬时值为

$$\begin{aligned} F(t) &= 4B^2(t)S \times 10^5 \\ &= 4B_m^2 S \times 10^5 \sin^2 \omega t \\ &= 2B_m^2 S \times 10^5 (1 - \cos 2\omega t) \\ &= 4B^2 S (1 - \cos 2\omega t) \times 10^5 \\ &= 4B^2 S \times 10^5 - 4B^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t \\ &= F_{av} - F_- \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中， $B = \frac{B_m}{\sqrt{2}}$ 为正弦量 $B(t)$ 的有效值。当 $t = 0$ 时， $\cos 2\omega t = 1$ ，于是 $F(t) = 0$ 为最小值；当 $t = T/4$ 时， $\cos 2\omega t = -1$ ，于是 $F(t) = 8B^2 S \times 10^5 = F_m$ 为最大值，在一个周期内的平均值为

$$F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = 4 \times 10^5 \times B^2 S \frac{1}{T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = 4B^2 S \times 10^5 \quad (1.10)$$

由上式可知，磁感应强度 $B(t)$ 虽按正弦规律变化，但其交流电磁吸力却是脉动的，且方向不变，并由两部分组成：一部分为平均吸力 F_{av} ，其值为瞬时吸力最大值的一半，即 $F_{av} = 4B^2 S \times 10^5$ ；另一部分为以两倍电源频率变化的交流分量 $F_- = 4B^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t$ 。所以交流电磁机构电磁吸力随时间变化规律如图1.3所示。其吸力在0和最大值 $F_m = 8B^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t$ 的范围内以两倍电源频率变化。

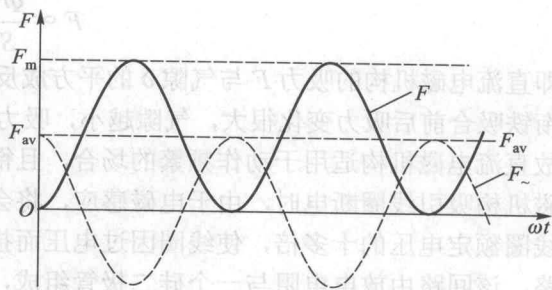


图 1.3 交流电磁机构电磁吸力随时间变化情况

由上述分析可知，交流电磁机构具有以下特点：

a. $F(t)$ 是脉动的，在 50Hz 的工频下，1s 内有 100 次过零点，因而引起衔铁的振动，产生机械噪声和机械损坏，应加以克服。

b. 因 $U \approx 4.44fN\Phi_m$ ，当 U 一定时， Φ_m 也一定。不管有无气隙， Φ_m 基本不变。所以，交流电磁机构电磁吸力平均值基本不变，即平均吸力与气隙 δ 的大小无关。实际上，考虑到漏磁通的影响，吸力 F_{av} 随气隙 δ 的减少而略有增加，其吸力特性如图 1-2 (c) 所示。

c. 交流电磁机构在衔铁未吸合时，磁路中因气隙磁阻较大，维持同样的磁通 Φ_m ，所需的励磁电流即线圈电流，比吸合后无气隙时所需的电流大得多。对于 U 形交流电磁机构，线圈已通电但衔铁尚未动作时的电流为衔铁吸合后的额定电流的 5 ~ 6 倍；对于 E 型电磁机构则高达 10 ~ 15 倍。所以，交流电磁机构的线圈通电后，衔铁因卡住而不能吸合，或交流电磁机构频繁工作，都将因线圈励磁电流过大而烧坏线圈。

为此，交流电磁机构不适用于可靠性要求高与频繁操作的场合。

④ 剩磁的吸力特性。由于铁磁物质存有剩磁，它使电磁机构的励磁线圈断电后仍有一定的剩磁吸力存在，剩磁吸力随气隙 δ 增大而减小。剩磁的吸力特性如图 1.4 中曲线 4 所示。

⑤ 吸力特性与反力特性的配合。电磁机构欲使衔铁吸合，应在整个吸合过程中，吸力都必须始终大于反力，但也不宜过大，否则会影响电器的机械寿命。这就要求吸力特性在反力特性的上方且尽可能靠近。在释放衔铁时，其反力特性必须大于剩磁吸力特性，这样才能保证衔铁的可靠释放。这就要求电磁机构的反力特性必须介于电磁吸力特性和剩磁吸力特性之间，如图 1.4 所示。

⑥ 交流电磁机构短路环的作用。由式 (1.9) 可知交流电磁机构电磁吸力是一个周期函数，该周期函数由直流分量和 2ω 频率的正弦分量组成。虽然交流电磁机构中的磁感应强度是正、负交变的，但电磁吸力总是正的，它是在最大值为 $2F_{av}$ 和最小值为零的范围内脉动变化。因此在每一个周期内，必然有某一段时刻吸力小于反力，这时衔铁释放，而当吸力大于反力时，衔铁又被吸合。这样，在 $f=50\text{Hz}$ 时，电磁机构就出现了频率为 $2f$ 的持续抖动和撞击，发出噪声，并容易损坏铁心。

为了避免衔铁振动，通常在铁心端面开一小槽，在槽内嵌入铜质短路环，如图 1.5 所示。

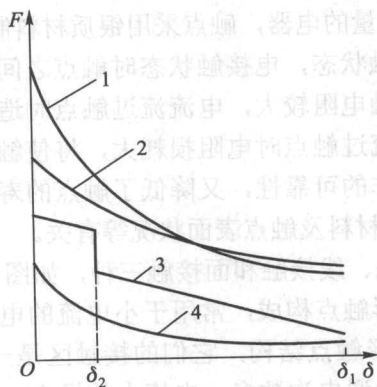


图 1.4 电磁机构吸力特性与反力特性的配合

1—直流吸力特性 2—交流吸力特性 3—反力特性 4—剩磁吸力特性

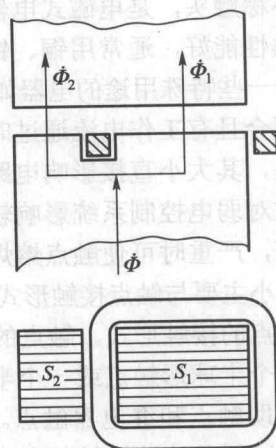


图 1.5 交流电磁机构短路环

短路环把端面 S 分成两部分，即环内部分 S_1 与环外部分 S_2 ，短路环仅包围了磁路磁通 Φ 一部分。这样，铁心端面处就有两个不同相位的磁通 Φ_1 和 Φ_2 ，它们分别产生电磁吸力 F_1 和 F_2 ，而且这两个吸力之间也存在一定的相位差。这样，虽然这两部分电磁吸力各自都有到达零值的时候，但到零值的时刻已错开，二者的合力就大于零，只要总吸力始终大于反力，衔铁便被吸牢，也就能消除衔铁的振动。

(3) 电磁机构的输入 - 输出特性。电磁机构的吸引线圈加上电压（或通入电流），产生电磁吸力，从而使衔铁吸合。因此，也可将线圈电压（或电流）作为输入量 x ，而将衔铁的位置作为输出量 y ，则电磁机构衔铁位置（吸合与释放）与吸引线圈的电压（或电流）的关系称为电磁机构的输入 - 输出特性，通常称为“继电特性”。

若将衔铁处于吸合位置记作 $y=1$ ，释放位置记作 $y=0$ 。由上述分析可知，当吸力特性处于反力特性上方时，衔铁被吸合；当吸力特性处于反力特性下方时，衔铁被释放。设使吸力特性处于反力特性上方的最小输入量用 x_0 表示，称为电磁机构的动作值；使吸力特性处于反力特性下方的最大输入量用 x_r 表示，称为电磁机构的复归值。

电磁机构的输入 - 输出特性如图 1.6 所示，当输入量 $x < x_0$ 时，衔铁不动作，其输出量 $y=0$ ；当 $x=x_0$ 时，衔铁吸合，输出量 y 从 0 跃变为 1；再进一步增大输入量使 $x > x_0$ ，输出量仍为 $y=1$ 。当输入量 x 从 x_0 减小的时候，在 $x > x_r$ 的过程中，虽然吸力减小，但因衔铁吸合状态下的吸力仍比反力大，衔铁不会释放，其输出量 $y=1$ 。当 $x=x_r$ 时，因吸力小于反力，衔铁才释放，输出量由 1 变为 0；再减小输入量，输出量仍为 0。所以，电磁机构的输入 - 输出特性或继电特性为一矩形曲线。动作值与复归值均为继电器的动作参数，电磁机构的继电特性是电磁式继电器的重要特性。

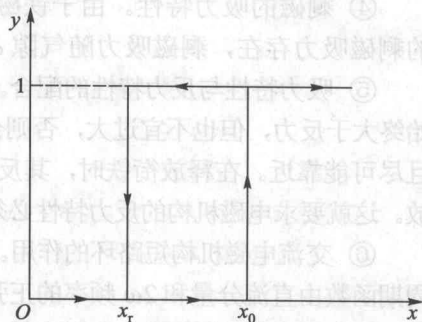


图 1.6 电磁机构的继电特性

2. 触点系统

触点亦称触头，是电磁式电器的执行部分，起接通和分断电路的作用。因此，要求触点导电、导热性能好，通常用铜、银、镍及其合金材料制成，有时也在铜触点表面电镀锡、银或镍。对于一些特殊用途的电器如微型继电器和小容量的电器，触点采用银质材料制成。

触点闭合且有工作电流通过时的状态称为电接触状态，电接触状态时触点之间的电阻称为接触电阻，其大小直接影响电路工作情况。若接触电阻较大，电流流过触点时造成较大的电压降，这对弱电控制系统影响较严重。同时电流流过触点时电阻损耗大，将使触点发热导致温度升高，严重时可使触点熔焊，这样既影响工作的可靠性，又降低了触点的寿命。触点接触电阻大小主要与触点接触形式、接触压力、触点材料及触点表面状况等有关。

(1) 触点的接触形式。触点的接触形式有点接触、线接触和面接触三种，如图 1.7 所示。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，常用于小电流的电器中，如接触器的辅助触点和继电器触点。线接触常做成指形触点结构，它们的接触区是一条直线，触点通、断过程是滚动接触并产生滚动摩擦，适用于通电次数多，电流大的场合，多用于中等容量电器。面接触触点一般在接触表面镶有合金，允许通过较大电流，中小容量的接触器的主触点多采用这种结构。



图 1.7 触点的接触形式

(2) 触点的结构形式。触点在接触时，要求其接触电阻尽可能小，为使触点接触更加紧密以减小接触电阻，同时消除开始接触时产生的振动，在触点上装有接触弹簧，使触点刚刚接触时产生初压力，随着触点闭合逐渐增大触点互压力。

触点按其原始状态可分为动合触点和动断触点。原始状态时（吸引线圈未通电时）触点断开，线圈通电后闭合的触点叫动合触点（常开触点）。原始状态闭合，线圈通电断开的触点叫动断触点（常闭触点）。线圈断电后所有触点回复到原始状态。

按触点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。

触点的结构形式主要有桥式触点和指形触点，如图 1.8 所示。

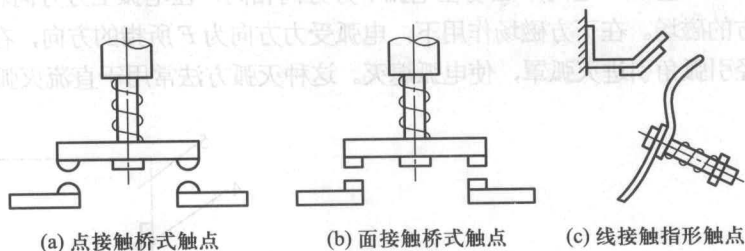


图 1.8 触点的结构形式

桥式触点在接通与断开电路时由两个触点共同完成，对灭弧有利。这类结构触点的接触形式一般是点接触和面接触。指形触点在接通或断开时产生滚动摩擦，能去掉触点表面的氧化膜，从而减小触点的接触电阻。指形触点的接触形式一般采用线接触。

(3) 减小接触电阻的方法。首先触点材料选用电阻系数小的材料，使触点本身的电阻尽量减小；其次增加触点的接触压力，一般在动触点上安装触点弹簧；再次改善触点表面状况，尽量避免或减小触点表面氧化膜形成，在使用过程中尽量保持触点清洁。

3. 电弧的产生和灭弧方法

(1) 电弧的产生。在自然环境下开断电路时，如果被断开电路的电流（电压）超过某一数值时，在触点间隙中就会产生电弧，根据触点材料的不同，其值约在 $0.25 \sim 1 \text{ A}$ （ $12 \sim 20 \text{ V}$ ）之间。电弧实际上是触点间气体在强电场作用下产生的放电现象。这时触点间隙中的气体被游离产生大量的电子和离子，在强电场作用下，大量的带电粒子作定向运动，使绝缘的气体变成了导体。电流通过这个游离区时所消耗的电能转换为热能和光能，由于光和热的效应，产生高温并发出强光，使触点烧蚀，并使电路切断时间延长，甚至不能断开，造成严