



普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

Electrical Control and PLC

电气控制与PLC

第2版

◎ 主 编 熊幸明

◎ 副主编 刘湘澧 陈艳 张丹



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

电气控制与 PLC

第 2 版

主 编 熊幸明
副主编 刘湘澧 陈 艳 张 丹
参 编 张文希 黄建科 石成钢
高岳民 唐 进 谢明华

本书配有电子课件及习题答案



机械工业出版社

本书从工程实际应用和便于教学的角度出发,主要介绍了电气控制技术及应用、日本三菱 FX_{2N} 系列超小型可编程序控制器(PLC)的原理及应用、FX_{3U} 系列可编程序控制器新增功能。全书分为 10 章,包括常用低压电器、电气控制基本环节和典型线路分析、电气控制系统设计、可编程序控制器的组成与工作原理、可编程序控制器的基本指令、可编程序控制器的功能指令、可编程序控制器的特殊功能模块、可编程序控制器控制系统的设计与应用、可编程序控制器的联网与通信、FX_{3U} 系列可编程序控制器介绍,章后均附有适量的思考题和习题。

本书可作为高等工科院校电气类、自动化类、机械工程等相近专业的教材,也可供电气控制领域的工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@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/熊幸明主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2017.6 (2018.6 重印)

普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-56681-6

I. ①电… II. ①熊… 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(2017)第 086813 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 刘丽敏

责任校对:刘岚 封面设计:张静

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 6 月第 2 版第 2 次印刷

184mm×260mm·22.5 印张·562 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56681-6

定价:49.00 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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书第1版出版后，承蒙各兄弟院校的支持和厚爱，已重印多次。根据电气控制技术的进步和PLC的发展要求，本次修订在内容上做了较大更新。例如，在电气控制部分，精简了“三相异步电动机的起动控制”，删除了不常用的“绕线转子电动机串接频敏变阻器起动”和相对比较复杂的逻辑设计法应用举例等内容，增加了“新型智能断路器”和“智能交流接触器”的介绍，以反映电气控制技术的进步和科研成果；在PLC部分，仍以现在普遍使用的FX_{2N}系列为基础，但删除了一些不常使用的功能指令介绍和应用实例，专门增加了第10章，介绍FX_{3U}系列PLC，重点放在FX_{3U}相对FX_{2N}系列扩展的功能和指令上，以适应PLC技术的发展和当前各高校实验设备升级过渡的需要。

本书在内容处理上，既注意反映电气控制领域的最新技术，又注意应用型本科学生的知识结构，强调理论联系实际，注重学生分析和解决实际问题的能力、工程设计能力和创新能力的培养，具有很强的实用性。本书具有保证基础、体现先进、加强应用的特点。

全书分为两部分。第一部分为电气控制技术，共三章，主要介绍常用低压电器的结构、原理和用途，电气控制线路的基本环节及典型生产机械电气控制线路分析，电气控制系统设计的一般原则与方法以及元器件的选择；第二部分为PLC应用技术，共七章，以当今最具特色、极有代表性的日本三菱FX_{2N}系列、FX_{3U}系列为目标机型，介绍了PLC的组成及工作原理、基本指令和功能指令、特殊功能模块、可编程序控制系统的设计及应用实例、可编程序控制器的联网及其通信方法，以培养学生应用PLC设计电气控制系统的能力。

本书在教学使用过程中，可根据专业特点和课时安排选取教学内容。每章末尾附有适量的思考题和习题，供学生课后训练。

本书由熊幸明担任主编，刘湘澧、陈艳、张丹担任副主编。其中，前言、绪论、第1章由熊幸明编写；第2章由张丹编写；第3章由唐进、黄建科编写；第4章由张文希编写；第5、6章由陈艳编写；第7章由刘湘澧、高岳民编写；第8章由谢明华编写；第9、10章由刘湘澧编写；附录由石成钢编写。在本书编写过程中得到了长沙学院（原长沙大学）的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
1. 电气控制技术的发展概况	1
2. 本课程的性质和任务	2
第1章 常用低压电器	3
1.1 电器基本知识	3
1.1.1 低压电器分类	3
1.1.2 电磁式电器的结构及工作原理	4
1.1.3 电器的触头系统与电弧	7
1.2 电磁式接触器	11
1.2.1 接触器的结构及工作原理	11
1.2.2 常用典型交流接触器介绍	12
1.2.3 接触器主要技术参数	13
1.2.4 直流接触器	14
1.3 继电器	14
1.3.1 继电器的结构原理	15
1.3.2 电压继电器	15
1.3.3 电流继电器	16
1.3.4 中间继电器	17
1.3.5 时间继电器	18
1.3.6 热继电器	21
1.3.7 信号继电器	23
1.4 熔断器	25
1.4.1 熔断器的保护特性	25
1.4.2 插入式熔断器	25
1.4.3 螺旋式熔断器	26
1.4.4 半导体器件保护熔断器	26
1.5 主令电器	27
1.5.1 控制按钮	27
1.5.2 行程开关	28
1.5.3 凸轮控制器与主令控制器	29
1.6 低压开关类电器	30
1.6.1 刀开关	30
1.6.2 组合开关	31
1.6.3 低压断路器	32
*1.7 智能电器介绍	33
1.7.1 智能断路器	33
1.7.2 智能接触器	36
1.7.3 可编程序通用逻辑控制继电器	38
思考题	39
习题	40
第2章 电气控制基本环节和典型线路分析	41
2.1 电气控制系统图	41
2.1.1 常用电气图形符号和文字符号	41
2.1.2 电气原理图	44
2.1.3 电器元件布置图	44
2.1.4 电气安装接线图	45
2.2 三相异步电动机的起动控制	45
2.2.1 直接起动	45
2.2.2 减压起动	46
2.2.3 三相绕线转子电动机的起动	49
2.3 三相异步电动机的正反转控制	50
2.3.1 电动机的正反转控制	50
2.3.2 正反转自动循环控制	51
2.4 三相异步电动机的制动控制	52
2.4.1 反接制动	52
2.4.2 能耗制动	54
2.4.3 电磁抱闸制动	57
2.5 三相异步电动机的调速控制	58
2.5.1 变极调速	58
2.5.2 变更转子外串电阻调速	59
2.5.3 电磁调速控制	61
2.6 其他基本环节	62
2.6.1 点动控制	62
2.6.2 多点控制	63
2.6.3 顺序起、停控制	63
2.6.4 电气控制系统常用保护措施	64

2.7 C650 型卧式车床电气控制电路	65	第 5 章 可编程序控制器的基本指令	123
2.7.1 机床结构及控制特点	66	5.1 基本逻辑指令	125
2.7.2 电路工作原理	67	5.1.1 逻辑取及输出指令 LD、LDI、OUT	125
2.8 Z3040 型摇臂钻床电气控制电路	69	5.1.2 触点串联指令 AND、ANI	126
2.8.1 机床结构及控制特点	69	5.1.3 触点并联指令 OR、ORI	127
2.8.2 电路工作原理	72	5.1.4 串联电路块并联指令 ORB	127
思考题	73	5.1.5 并联电路块串联指令 ANB	128
习题	74	5.1.6 多重输出指令 MPS、MRD、MPP	129
第 3 章 电气控制系统设计	76	5.1.7 主控触点指令 MC、MCR	130
3.1 电气控制系统设计的内容	76	5.1.8 自保持与解除指令 SET、RST	132
3.1.1 原理设计内容	76	5.1.9 脉冲式触点指令 LDP、LDF、ANDP、ANDF、ORP、ORF	133
3.1.2 工艺设计内容	76	5.1.10 脉冲输出指令 PLS、PLF	135
3.2 电气控制线路的设计	77	5.1.11 取反指令 INV	135
3.2.1 电气控制线路设计的原则	77	5.1.12 空操作指令 NOP、程序结束指令 END	136
3.2.2 电气控制线路设计的规律	81	5.1.13 编程规则及注意事项	136
3.2.3 电气控制线路设计的方法和步骤	83	5.1.14 典型控制程序	137
3.3 常用电器元件的选择	91	5.2 步进顺控指令	140
3.3.1 按钮、开关类电器的选择	92	5.2.1 状态转移图	140
3.3.2 熔断器的选择	93	5.2.2 编程方法	143
3.3.3 交流接触器的选择	94	思考题	153
3.3.4 继电器的选择	96	习题	154
3.3.5 控制变压器的选择	96	第 6 章 可编程序控制器的功能指令	158
3.3.6 笼型异步电动机有关电阻的计算	97	6.1 功能指令简介	158
思考题	97	6.2 程序流控制指令 (FNC00~FNC09)	159
习题	98	6.3 比较、传送指令 (FNC10~FNC19)	166
第 4 章 可编程序控制器的组成与工作原理	100	6.4 四则运算及逻辑运算指令 (FNC20~FNC29)	173
4.1 概述	100	6.5 循环移位、移位指令 (FNC30~FNC39)	178
4.1.1 PLC 的特点	101	6.6 数据处理指令 (FNC40~FNC49)	183
4.1.2 PLC 的发展趋势	101	6.7 外部 I/O 设备指令 (FNC70~FNC79)	189
4.2 可编程序控制器的组成	102	6.8 其他指令	196
4.2.1 PLC 的组成	102	6.9 功能指令简表	199
4.2.2 PLC 的主要性能指标	109	思考题	202
4.3 可编程序控制器的工作原理	110	习题	202
4.3.1 扫描的概念	110	第 7 章 可编程序控制器的特殊功能模块	204
4.3.2 PLC 的工作过程	111	7.1 特殊功能模块和功能扩展板与 PLC 的连接	204
4.3.3 PLC 的元件	112		
4.4 可编程序控制器的编程语言	120		
4.4.1 梯形图语言	120		
4.4.2 指令表语言	121		
4.4.3 状态转移图语言	121		
思考题	122		
习题	122		

7.1.1	特殊功能模块与 PLC 的连接	204	通信	279	
7.1.2	功能扩展板与 PLC 的连接	205	9.1.4	PLC 的典型网络	280
7.2	模拟量输入/输出模块	205	9.2	三菱公司的可编程序控制器网络	282
7.2.1	模拟量输入模块	205	9.2.1	网络结构	282
7.2.2	模拟量输出模块	213	9.2.2	网络种类及特点	282
7.2.3	温度模块	221	9.3	FX 系列可编程序控制器网络的应用	287
7.3	高速计数器模块	228	9.3.1	PLC 与 PLC 之间的通信	287
7.3.1	输入/输出端子的接线	228	9.3.2	计算机与 PLC 之间的通信	300
7.3.2	输入/输出特性与主要性能 参数	228	思考题	323	
7.3.3	缓冲存储器 (BFM) 的功能及 分配	229	习题	324	
7.3.4	程序实例	234	第 10 章 FX_{3U} 系列可编程序控制器 介绍	325	
7.4	通信接口模块与功能扩展板	235	10.1	FX _{3U} 系列可编程序控制器的性能、 规格与系统构成	325
7.4.1	RS-232C 通信接口设备	235	10.1.1	FX _{3U} 系列可编程序控制器的 性能、规格	325
7.4.2	RS-485 通信接口设备	239	10.1.2	FX _{3U} 系列可编程序控制器的 系统构成	325
7.4.3	RS-422 通信接口设备	241	10.2	FX _{3U} 系列可编程序控制器新增软 元件	331
7.4.4	CC-Link 网络连接设备	242	10.2.1	输入、输出继电器 X、Y	331
7.5	人机界面 GOT	244	10.2.2	辅助继电器 M	331
7.5.1	GOT 的连接配置	244	10.2.3	状态继电器 S	334
7.5.2	GOT 的基本功能	245	10.2.4	定时器 T	334
7.5.3	GOT 编程软件	247	10.2.5	数据寄存器、文件寄存器 D	335
思考题		248	10.2.6	扩展寄存器 R、扩展文件 寄存器 ER	338
习题		249	10.2.7	指针 P	338
第 8 章 可编程序控制器控制系统的 设计与应用		250	10.2.8	实数 E、字符串 “ ”	338
8.1	可编程序控制器应用系统设计	250	10.3	FX _{3U} 系列可编程序控制器新增应用 指令	339
8.1.1	PLC 应用系统设计的内容和 步骤	250	10.4	FX _{3U} 系列可编程序控制器的功能与 应用	341
8.1.2	PLC 应用系统的硬件设计	251	10.4.1	模拟量控制	341
8.1.3	PLC 应用系统的软件设计	254	10.4.2	高速计数、脉冲输出及定位	341
8.2	可编程序控制器应用实例	255	10.4.3	数据链接、通信功能	342
8.2.1	常用电气线路的 PLC 控制	255	思考题	342	
8.2.2	两级传送带的 PLC 控制	261	习题	342	
8.2.3	机械手运动的 PLC 控制	262	附录	343	
8.2.4	两工位组合机床的 PLC 控制	267	附录 A	Y 系列三相异步电动机的型号及 技术数据表	343
思考题		272	附录 B	FX _{2N} 系列可编程序控制器的特殊 软元件	345
习题		272	参考文献	351	
第 9 章 可编程序控制器的联网与 通信		274			
9.1	可编程序控制器的网络基础	274			
9.1.1	PLC 网络的拓扑结构及各级子 网通信协议配置原则	274			
9.1.2	PLC 网络的通信方法	276			
9.1.3	计算机与 PLC 网络的联网				

绪 论

1. 电气控制技术的发展概况

电气控制技术是以各类电动机为动力的传动装置与系统为研究对象，以实现生产过程自动化为目标的控制技术。电气控制系统是其中的主干部分，在国民经济各行业中的许多部门得到广泛应用，是实现工业自动化化的重要技术手段。

随着科学技术的不断发展、生产工艺的不断改进，特别是计算机技术的应用，新型控制策略的出现，不断改变着电气控制技术的面貌。在控制方法上，从手动控制发展到自动控制；在控制功能上，从简单控制发展到智能化控制；在操作上，从笨重的手工操作发展到信息化处理；在控制原理上，从单一的有触头硬接线继电器逻辑控制系统发展到以微处理器或微型计算机为中心的网络化自动控制系统。现代电气控制技术综合应用了计算机技术、微电子技术、检测技术、自动控制技术、智能技术、通信技术、网络技术等先进的科学技术成果。

作为生产机械动力源的电动机，经历了漫长的发展过程。20 世纪初，电动机直接取代蒸汽机。开始是成组拖动，用一台电动机通过中间机构（天轴）实现能量分配与传递，拖动多台生产机械，这种拖动方式的电气控制线路简单，但机构复杂，能量损耗大，生产灵活性差，不适应现代化生产的需要。20 世纪 20 年代，出现了单电机拖动，即由一台电动机拖动一台生产机械，相对成组拖动，机械设备的结构简化，传动效率提高，灵活性增大。这种拖动方式在一些机床中至今仍在使用。随着生产发展及自动化程度的提高，又出现了多台电动机分别拖动各运动机构的多电机拖动方式，进一步简化了机械结构，提高了传动效率，而且使机械的各运动部分能够选择最合理的运动速度，缩短了工时，也便于分别控制。

继电-接触器控制系统至今仍是许多生产机械设备广泛采用的基本电气控制形式，也是学习各种先进电气控制的基础。它主要由继电器、接触器、按钮、行程开关等组成，由于其控制方式是断续的，故称为断续控制系统。它具有控制简单、方便实用、价格低廉、易于维护、抗干扰能力强等优点。但由于其接线方式固定、灵活性差，难以适应复杂和程序可变的控制对象的需要，且工作频率低、触点易损坏、可靠性差。

以软件手段实现各种控制功能、以微处理器为核心的可编程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC），是 20 世纪 60 年代诞生并开始发展起来的一种新型工业控制装置。它具有通用性强、可靠性高、能适应恶劣的工业环境、指令系统简单、编程简单易学、易于掌握、体积小、维修工作少、现场连接安装方便等一系列优点，正逐步取代传统的继电-接

触器控制系统,广泛应用于冶金、采矿、建材、机械制造、石油、化工、汽车、电力、造纸、纺织、装卸、环保等各个行业中。

在自动化领域,可编程序控制器与CAD/CAM、工业机器人并称为加工业自动化的三大支柱,其应用日益广泛。可编程序控制器技术是以硬接线的继电-接触器控制为基础,逐步发展为既有逻辑控制、定时、计数,又有运算、数据处理、模拟量调节、联网通信等功能的控制装置。它可通过数字量或者模拟量的输入、输出满足各种类型机械控制的需要。可编程序控制器及有关外部设备,均按既易于与工业控制系统联成一个整体,又易于扩充其功能的原则设计。可编程序控制器已成为生产机械设备中开关量控制的主要电气控制装置。

数控技术在电气自动控制中占有十分重要的地位,它综合了计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等多方面的最新技术成就。随着微电子技术和机、电、光、仪一体化等交叉学科的发展,数控技术也得到了飞速的发展。在机械制造、电气控制及自动控制领域相继出现了具有自动更换刀具功能的数控加工中心机床(MC)、由计算机控制与管理多台数控机床和数控加工中心完成多品种多工序产品加工的直接数字控制(DDC)系统、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(SIMS),综合运用计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、集散控制系统(DCS)、智能机器人和智能制造等高新技术,形成了从产品设计与制造的智能化生产的完整体系,将自动控制和自动制造技术推进到更高的水平。

2. 本课程的性质和任务

“电气控制与PLC”是电气工程及其自动化、电气技术、自动化、机电一体化等专业一门实用性很强的专业课。由于电气控制技术的应用领域很广,本课程主要介绍机械制造过程中所用生产设备的电气控制原理、线路、设计方法和可编程序控制器的工作原理、指令、编程方法、系统设计、联网通信以及在生产机械中的应用等有关知识。现在PLC控制系统应用十分普遍,已成为实现工业自动化的重要手段,所以本课程的教学重点是可编程序控制器控制系统。但这并不意味着继电-接触器控制系统就不重要了,它仍然是机械设备最常用的电气控制方式,而且控制系统所用的低压电器正在向小型化、智能化发展,出现了功能多样的电子式、智能化电器,使继电-接触器控制系统性能不断提高,因此,它在今后的电气控制技术中仍占有相当重要的地位,也是学习和掌握PLC应用技术所必需的基础。

通过本门课程的学习,学生应达到下列基本要求:

- 1) 熟悉常用控制电器的结构、工作原理、用途,了解其型号规格并能正确选用。
- 2) 熟悉电气控制线路的基本环节,具备阅读和分析电气控制线路的能力。
- 3) 具有对不太复杂的电气控制系统进行改造和设计的能力。
- 4) 熟悉可编程序控制器的基本工作原理,能根据生产工艺过程和控制要求正确选型。
- 5) 掌握可编程序控制器基本指令及其使用方法。
- 6) 熟悉可编程序控制器功能指令及其使用方法。
- 7) 了解可编程序控制器的网络和通信方法。
- 8) 掌握可编程序控制器实际应用程序的设计方法和步骤,初步具备一定的工程设计能力。

第 1 章

常用低压电器

低压电器^①分为配电电器和控制电器两大类，其用途是对供电、用电系统进行开关、变换、检测、控制和保护。配电电器主要用于低压配电系统和动力回路，常用的有刀开关、转换开关、熔断器、断路器等；控制电器主要用于电力传输系统和电气自动控制系统中，常用的有主令电器、接触器、继电器、起动器、控制器、电阻器、变阻器、电磁铁等。本章主要介绍常用接触器、继电器、熔断器、主令电器、低压开关类电器等的结构、原理、用途及应用，对近年发展迅速的智能化电器也做简要介绍。

1.1 电器基本知识

1.1.1 低压电器分类

低压电器的种类很多，其功能多样，用途广泛，结构各异。分类方法也有多种，按用途可分为以下几种。

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、熔断器、低压断路器等。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。如按钮、接触器、继电器、热继电器、转换开关、熔断器、电磁阀等。要求有一定的通断能力、操作频率高、电气和机械寿命长。

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。要求操作频率高、电气和机械寿命长、抗冲击等。

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。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功能的电器。如电磁铁、电磁离合器等。

6) 可通信电器：带有计算机接口和通信接口，可与计算机网络连接的电器。如智能化断路器、智能化接触器及电动机控制器等。

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、自动电器；按工作原理分为电

^① 关于低压电器的工作电压划分在文献中有多个版本，本书采用中国标准出版社 2007 年编写并出版的《低压电器标准汇编》一书的说法，即工作在 AC 1200V、DC 1500V 及以下电路中的电器。

磁式电器、非电量控制电器等，其中电磁式电器是低压电器中应用最广泛、结构最典型的一种。

1.1.2 电磁式电器的结构及工作原理

电器一般都具有感受、执行两个基本组成部分。感受部分接收外界输入信号，通过转换、放大、判断作出有规律的反应，使执行部分动作，实现控制目的。对于有触头的电磁式电器，感受部分是电磁机构，执行部分是触头系统。

1. 电磁机构

电磁机构由吸引线圈（励磁线圈）和磁路两个部分组成。磁路包括铁心、衔铁和空气隙。吸引线圈通以一定的电压或电流，产生磁场及吸力，通过空气隙转换成机械能，从而带动衔铁运动使触头动作，实现电路的分断和接通。图 1-1 是几种常用的电磁机构结构示意图。由图可见，衔铁可以直动，也可以绕某一支点转动。根据衔铁相对铁心的运动方式，电磁机构有直动式（见图 1-1a、b、c）和拍合式两种，拍合式又有衔铁沿棱角转动（见图 1-1d）和衔铁沿轴转动（见图 1-1e）两种。

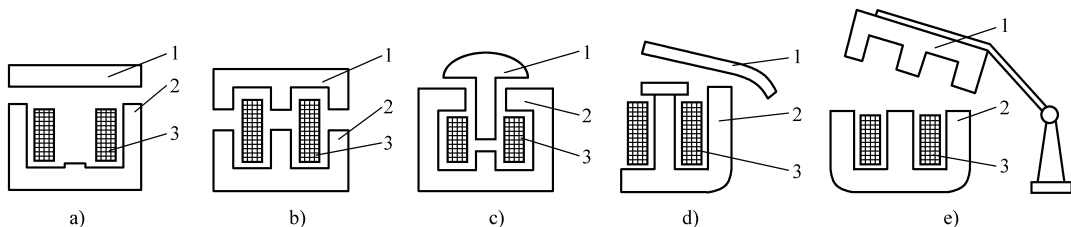


图 1-1 常用电磁机构的结构形式

a)、b)、c) 直动式电磁机构 d)、e) 拍合式电磁机构

1—衔铁 2—铁心 3—线圈

吸引线圈用以将电能转换为磁能，按通入电流种类不同分为交流电磁线圈和直流电磁线圈。对于交流电磁线圈，为了减小因磁滞和涡流损耗造成的能量损失和温升，铁心和衔铁用硅钢片叠成，且线圈做成有骨架、短而厚的矮胖型。对于直流电磁线圈，铁心和衔铁可用整块电工软钢做成，线圈一般做成无骨架、高而薄的瘦高型，且与铁心接触，以利散热。

根据线圈在电路中的连接方式，又有串联线圈和并联线圈之分。串联线圈又称电流线圈，特点是导线粗、匝数少、阻抗小。并联线圈又称电压线圈，特点是导线细、匝数多、阻抗较大。

2. 电磁机构的工作原理

电磁机构的工作特性常用反力特性和吸力特性来表达。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；电磁机构使衔铁吸合的力与气隙的关系曲线称为吸力特性。

(1) 反力特性

电磁机构使衔铁释放的力一般是利用弹簧的反力，由于弹簧反力与其机械变形的位移量 x 成正比，其反力特性可写成

$$F_f = K_1 x \quad (1-1)$$

式中, K_1 为弹簧的倔强系数。考虑到常开触头闭合时超行程机构的弹力作用, 电磁机构的反力特性如图 1-2a 所示。其中 δ_1 为电磁机构气隙的初始值, δ_2 为动、静触头开始接触时的气隙长度。由于超行程机构的弹力作用, 反力特性在 δ_2 处有一突变。

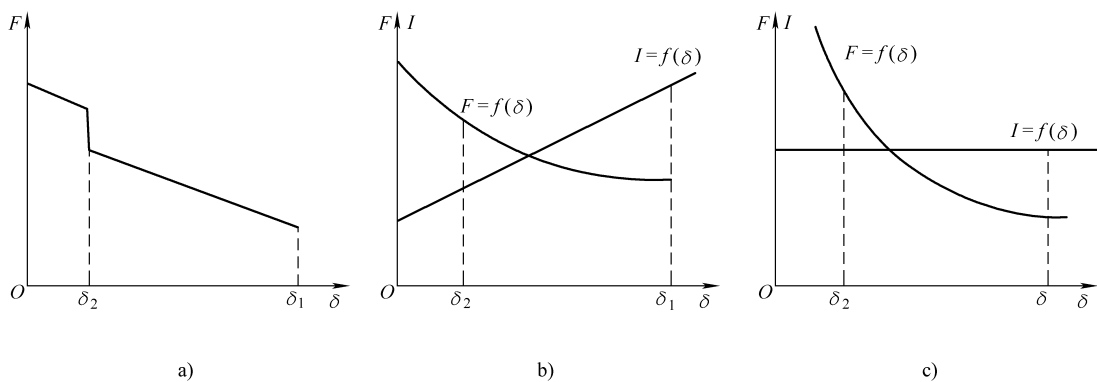


图 1-2 电磁机构的反力特性与吸力特性

a) 反力特性 b) 交流电磁机构吸力特性 c) 直流电磁机构吸力特性

(2) 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 δ 较小时, 吸力可按下式求得

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

式中 F ——电磁吸力 (N);

B ——气隙磁感应强度 (T);

S ——吸力处端面积 (m^2)。

当端面积 S 为常数时, 吸力 F 与 B^2 成正比, 也可认为 F 与磁通 Φ^2 成正比, 反比于端面积 S , 即

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

电磁机构的吸力特性反映的是其电磁吸力与气隙的关系。励磁电流种类不同, 其吸力特性也不一样, 下面分别进行讨论。

1) 交流电磁机构的吸力特性。交流电磁机构吸引线圈的电阻比其感抗值要小得多, 则

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

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

式中 U ——线圈电压 (V);

E ——线圈感应电动势 (V);

f ——线圈电压频率 (Hz);

Φ ——气隙磁通 (Wb);

N ——线圈匝数。

当外加电压 U 、频率 f 、线圈匝数 N 为常数时，气隙磁通 Φ 亦为常数，由式 (1-3) 可知，此时电磁吸力 F 平均值为常数。这是因为交流励磁时，电压、磁通均随时间按正弦规律变化，电磁吸力也做周期性变化。由于线圈外加电压 U 与气隙 δ 的变化无关，所以其吸力 F 亦与气隙 δ 的大小无关。考虑到漏磁通的影响，吸力 F 随气隙 δ 减小略有增大，其吸力特性如图 1-2b 所示。虽然交流电磁机构的气隙磁通 Φ 近似不变，但气隙磁阻随气隙长度 δ 而变化，根据磁路欧姆定律有

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN}{\frac{\delta}{\mu_0 S}} = \frac{IN\mu_0 S}{\delta} \quad (1-6)$$

式中， μ_0 为磁导率； R_m 为磁阻。

由式 (1-6) 可知，交流励磁线圈的电流 I 与气隙 δ 成正比。一般 U 形交流电磁机构的励磁电流在线圈已通电而衔铁尚未动作时，其电流可达衔铁吸合后额定电流的 5~6 倍；E 形电磁机构则高达 10~15 倍额定电流。若衔铁卡住不能吸合或者频繁动作，交流励磁线圈很可能因过电流而烧坏。因此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。

2) 直流电磁机构的吸力特性。直流电磁机构由直流电流励磁，稳态时，磁路对电路无影响，因此可认为励磁电流不受磁路气隙变化的影响，其磁动势 IN 不受磁路气隙变化的影响。由式 (1-3) 和式 (1-6) 知

$$F \propto \Phi^2 \propto \left(\frac{1}{\delta}\right)^2 \quad (1-7)$$

可见，直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的二次方成反比，其吸力特性如图 1-2c 所示。表明衔铁吸合前后吸力变化很大，气隙越小，吸力越大。由于衔铁吸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，且吸合后电磁吸力大，工作可靠性好。

必须注意，当直流电磁机构的励磁线圈断电时，由于电磁感应，将会在线圈中产生很大反电动势，此反电动势可达线圈额定电压的 10~20 倍，使线圈因过电压而损坏。为此，常在励磁线圈上并联一个由电阻和硅二极管组成的放电回路。正常励磁时，二极管处于截止状态，放电回路不起作用，而当励磁线圈断电时，放电回路使原先储存于磁场中的能量消耗在电阻上，不致产生过电压。放电电阻的阻值通常为线圈直流电阻的 6~8 倍。

3) 剩磁的吸力特性。由于铁磁物质有剩磁，它使电磁机构的励磁线圈断电后仍有一定的磁性吸力存在，剩磁的吸力随气隙 δ 增大而减小。剩磁的吸力特性如图 1-3 曲线 4 所示。

(3) 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，使吸力始终大于反力。但吸力也不能过大，否则会影响电器的机械寿命。反映在特性图上，就是保证吸力特性在反力特性的上方且尽可能靠近。在衔铁释放时，其反力特性必须大于剩磁吸力，以保证衔铁可靠释放。所以在特性图上，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 1-3 所示。

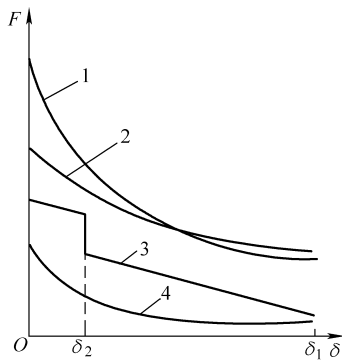


图 1-3 吸力特性与反力特性
1—直流吸力特性 2—交流吸力特性
3—反力特性 4—剩磁吸力特性

(4) 交流电磁机构短路环的作用

对于交流电磁机构，线圈通以交流电流，气隙磁感应强度 B 按正弦规律变化，由式 (1-2) 知，其电磁吸力 F 是一个周期函数，可分解成直流分量和 2ω 频率的正弦分量。虽然磁感应强度 B 是正、负交变的，但电磁吸力 F 总是正的。在磁通每次过零时，即 $t=0、\pi/2、T$ (T 为磁通的周期) 时，吸力为零。此时，弹簧反力大于电磁吸力，衔铁释放。而在 $\pi/2 \sim T$ 之间，吸力又大于反力，衔铁又被吸合。这样，在电源频率为 f 时，电磁机构出现频率为 $2f$ 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，通常在铁心端面上开一小槽，在槽内嵌入一个铜质的分磁环或称短路环，如图 1-4 所示。它将端面 S 分成两部分，即环内部分 S_1 和环外部分 S_2 ，短路环仅包围主磁通 Φ 的一部分。这样，铁心端面处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 ，电磁机构的总吸力 F 为 F_1 与 F_2 之和。只要总吸力始终大于反力，衔铁的振动现象就会消除。

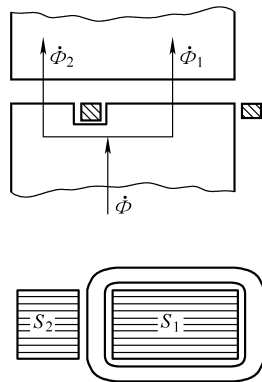


图 1-4 交流电磁机构的短路环

(5) 电磁机构的输入—输出特性

将电磁机构励磁线圈的电压（或电流）作为输入量 x ，衔铁的位置为输出量 y ，则衔铁位置（吸合与释放）与励磁线圈的电压（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 $y=0$ 。由上面分析可知，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。若使吸力特性处于反力特性上方的最小输入量用 x_0 表示，一般称其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 1-5 所示。当输入量 $x < x_0$ 时，衔铁不动作，输出量 $y=0$ ；当 $x = x_0$ 时，衔铁吸合，输出量 y 从“0”跃变为“1”；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 减小时，在 $x > x_r$ 的过程中，虽然吸力特性向下降低，但因衔铁吸合状态下的吸力仍比反力大，衔铁不会释放，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”突变为“0”；再减小输入量，输出量仍为“0”。可见，电磁机构的输入—输出特性或“继电特性”为一矩形曲线。

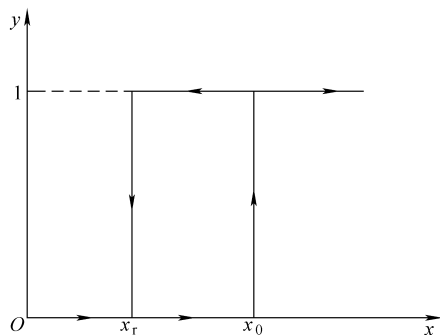


图 1-5 电磁机构的继电特性

电磁机构的继电特性是继电器的重要特性，其动作值与复归值是继电器的动作参数。

1.1.3 电器的触头系统与电弧

1. 电器的触头系统

(1) 触头的接触电阻

触头亦称触点，是电器的主要执行部分，起接通和分断电路的作用。因此，要求触头导

电导热性能良好,通常用铜、银、镍及其合金材料制成,有的是在铜触头表面上镀锡、银或镍。由于铜的表面容易氧化生成一层氧化铜,增大触头的接触电阻,使触头损耗增大,所以,有些特殊用途的电器如微型继电器和小容量电器,触头采用银质材料制成。

触头闭合且有工作电流通过时的状态称为电接触状态,电接触状态时触头之间的电阻称为接触电阻,其大小直接影响电路工作情况。接触电阻大,电流流过触头时会造成较大的电压降落,对弱电控制系统影响尤为严重。另外,电流流过触头时电阻损耗大,将使触头发热而致温度升高,严重时可使触头熔焊,造成电气系统事故。触头接触电阻大小主要与触头的接触形式、接触压力、触头材料及触头表面状况等有关。

(2) 触头的接触形式

触头的接触形式有点接触、线接触和面接触三种,如图1-6所示。

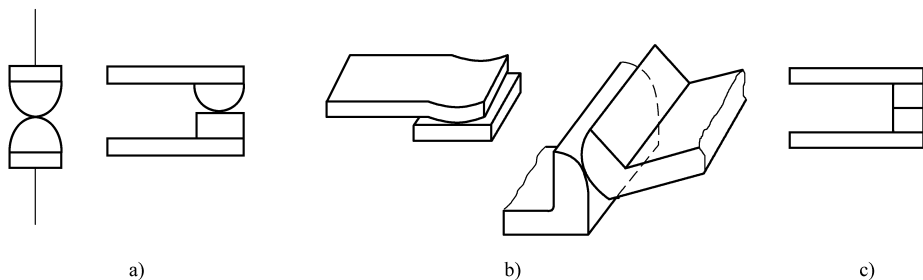


图1-6 触头的接触形式

a) 点接触 b) 线接触 c) 面接触

点接触由两个半球形触头或一个半球形与一个平面形触头构成,常用于小电流的电器中,如继电器触头、接触器的辅助触头等,如图1-6a所示。

线接触常做成指形触头结构,其接触区是一条直线,触头通断时产生滚动接触,适用于通电频繁、电流大的中等容量电器,如图1-6b所示。

面接触触头的表面一般镶有合金,以减小触头接触电阻,提高触头的抗熔焊、抗磨损能力,它允许较大电流,中小容量接触器的触头多采用这种结构,如图1-6c所示。

(3) 触头的结构形式

触头的结构形式如图1-7所示,主要有桥式触头和指形触头两种。桥式触头又分为点接触桥式和面接触桥式,图1-7a左图为两个点接触的桥式触头,适用于电流不大且压力小的场合,如辅助触头;图1-7a右图为两个面接触的桥式触头,适用于大电流的控制,如接触器的触头。图1-7b为线接触指形触头,其接触区域为一直线,在触头闭合时产生滚动接

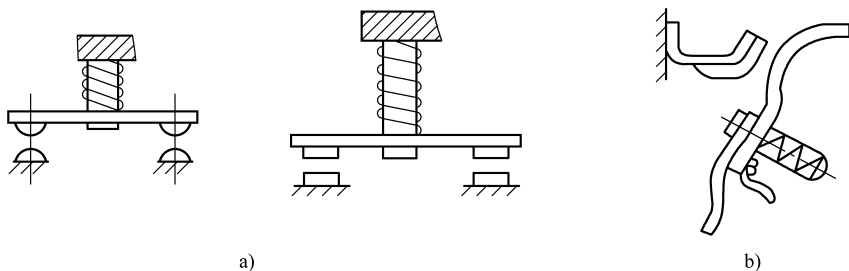


图1-7 触头的结构形式

a) 桥式触头 b) 指形触头

触,适用于动作频繁、电流大的场合,如作为接触器主触头用。

为使触头接触更紧密,减小接触电阻,消除开始接触时产生的有害振动,桥式触头或指形触头都安装有压力弹簧,随着触头的闭合加大触头间的互压力。此外,选用电阻率小的材料或改善触头表面状况,避免触头表面氧化膜形成,也可减小触头接触电阻。

按其原始状态,触头可分为常开触头和常闭触头。原始状态(线圈未通电)时断开,线圈通电后闭合的触头叫常开触头(动合触头)。原始状态闭合,线圈通电后断开的触头叫常闭触头(动断触头)。线圈断电后所有触头回复到原始状态。按所控制的电路,触头可分为主触头和辅助触头。主触头用于接通或断开主电路,允许通过较大电流;辅助触头用于接通或断开控制电路,只允许通过较小的电流。

2. 电弧的产生及灭弧方法

(1) 电弧的产生

在自然环境中开断电路时,如果被开断电路的电流(电压)超过某一数值(根据触头材料不同,其值在 $0.25\sim 1\text{A}$, $12\sim 20\text{V}$ 之间),触头间隙中就会产生电弧。电弧实际上是触头间气体在强电场作用下产生的放电现象。在动、静触头脱离接触时,强电场使触头间隙中气体游离,产生大量的电子和离子,并做定向运动,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成热能和光能,产生高温并发出强光,烧损触头金属表面,降低电器寿命,延长电路分断时间,甚至不能断开,造成严重事故。

电弧的产生主要经历以下四个物理过程:

1) 强电场放射。触头在通电状态下开始分离时,其间隙很小,电路电压全部降落在很小的间隙上,强电场将触头阴极表面的自由电子拉出到气隙中,使间隙气体中存在较多的电子,这种现象称为强电场放射。

2) 撞击电离。触头间隙中的自由电子在电场作用下加速运动,获得动能撞击气体原子,将气体原子分裂成电子和正离子,使触头间隙中气体电荷越来越多,这种现象称为撞击电离。

3) 热电子发射。撞击电离产生的正离子向阴极运动,撞击阴极使其温度升高,并使阴极中电子动能增加,当阴极温度达到一定时,一部分电子从阴极表面逸出,再参与撞击电离。这种由于高温使电极发射电子的现象称为热电子发射。

4) 高温游离。当电弧温度达到或超过 3000°C 时,气体分子发生强烈的不规则运动造成相互碰撞,使中性分子游离成电子和正离子。这种因高温使分子撞击所产生的游离称为高温游离。

可见,在触头分断过程中,上面四个过程引起电离的原因是不同的。刚开始分断时,首先是强电场放射。触头完全打开时,维持电弧主要靠撞击电离、热电子发射和高温游离,其中以高温游离作用最大。伴随着电离的进行,也存在消电离(正负带电粒子相互结合成为中性粒子)作用。电离和消电离作用同时存在,当消电离速度大于电离速度时,电弧就会熄灭。因此,通过降低电场强度、冷却电弧,或将电弧挤入绝缘的窄缝迅速导出电弧内部热量,减小离子的运动速度,降低温度,可加强正、负带电粒子的复合过程,加速电弧的熄灭。

(2) 灭弧方法

1) 电动力灭弧。当触头断开电路时,在断口处产生电弧,电弧电流在断口处产生磁场。根据左手定则,电弧电流将受到指向外侧的电动力 F 的作用,使电弧向外运动并拉长,

电弧热量在拉长的过程中散发冷却而迅速熄灭，其原理如图 1-8 所示。

此外，桥式触头还具有将一个电弧分成两段削弱电弧的作用，这种灭弧方法常用于小容量交流接触器中。

2) 纵缝灭弧。采用一个纵缝灭弧装置来完成灭弧任务，如图 1-9 所示。灭弧罩内有一条纵缝，下宽上窄。下宽便于放置触头，上窄有利于电弧压缩，并和灭弧室壁有很好的接触。当触头分断时，电弧被外界磁场或电动力横吹进入缝内，其热量传递给室壁而迅速冷却熄灭。

3) 栅片灭弧。栅片灭弧装置的结构及原理如图 1-10 所示，主要由灭弧栅和灭弧罩组成。灭弧栅用镀铜的薄铁片制成，各栅片之间互相绝缘。灭弧罩用陶土或石棉水泥制成。当触头分断电路时，在动触头与静触头间产生电弧，电弧产生磁场。由于薄铁片的磁阻比空气小得多，因此，电弧上部的磁通容易通过灭弧栅形成闭合磁路，使得电弧上部的磁通很稀疏，而下部的磁通则很密。这种上稀下密的磁场分布对电弧产生向上运动的力，将电弧拉到灭弧栅片当中。栅片将电弧分割成若干短弧，一方面使栅片间的电弧电压低于燃弧电压，另一方面栅片将电弧的热量散发，使电弧迅速熄灭。

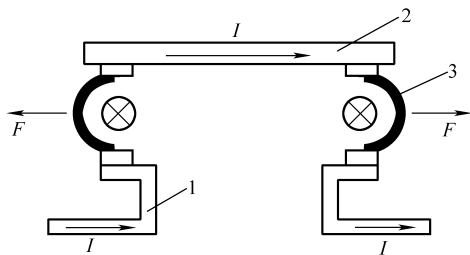


图 1-8 双断口电动力灭弧
1—静触头 2—动触头 3—电弧

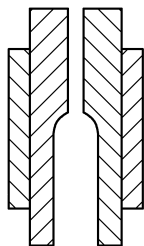


图 1-9 纵缝灭弧装置

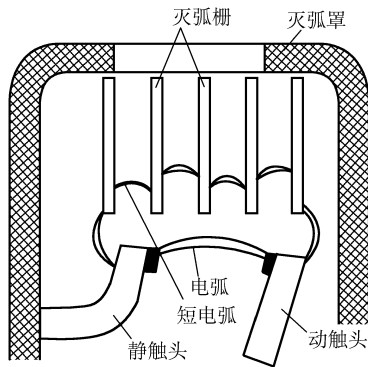


图 1-10 栅片灭弧装置

4) 磁吹灭弧。利用电弧在磁场中受力将电弧拉长，并使电弧在冷却的灭弧罩窄缝中运动，产生强烈的消电离作用，将电弧熄灭，其原理如图 1-11 所示。

图 1-11a 中，导磁体（软钢）固定于薄钢板 a 和 b 之间，在它上面绕有与触头电路串联的线圈（吹弧线圈）。电流 I 通过线圈产生磁通 Φ ，根据右手螺旋定则可知，该磁通从导磁体通过导磁夹片 b、两夹片间隙到达夹片 a，在触头间隙中形成磁场。图 1-11b 中“+”号表示 Φ 方向为进入纸面。触头间隙中的电弧也产生一个磁场，该磁场在电弧上侧的方向为从纸面出来，用“ \odot ”符号表示它与线圈产生的磁场方向相反。而在电弧下侧的磁场方向进入纸面，用“ \oplus ”符号表示，与线圈的磁场方向相同。这样，两个磁场在电弧下侧方向相同（叠加），在电弧上侧方向相反（相减）。弧柱下侧磁场强于上侧磁场，电弧受力方向为 F 所指方向。在 F 作用下，电弧吹离触头，经引弧角进入灭弧罩而很快熄灭。

这种灭弧装置利用电弧电流本身灭弧，电弧电流越大，吹弧能力也越强，广泛应用于直流灭弧装置中。