

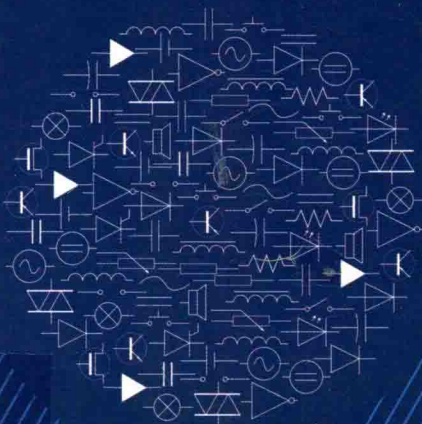


高等院校电气信息类规划教材
国家新闻出版改革发展项目库入库项目

电器与可编程控制技术

Electrical Appliances and Programmable Control Technology

主 编 付艳清 刘 旭 司夏岩
薛 丹 高 凯
副主编 沙 莎 许淑伟
主 审 黄艳秋



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



高等院校电气信息类规划教材
国家新闻出版改革发展项目库入库项目

电器与可编程控制技术

主 编 付艳清 刘 旭 司夏岩
薛 丹 高 凯
副主编 沙 莎 许淑伟
主 审 黄艳秋



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书全面论述了常用低压电器与可编程控制器的结构及原理、三菱和西门子 PLC 的编程语言及指令系统、联机通信以及相关实践应用及设计实例。本书共 12 章。第 1 章介绍了常用低压电器的结构、原理及用途；第 2 章到第 6 章介绍了三菱 FX_{2N} 系列机型、FX_{3U} 系列机型 PLC，重点介绍了硬件、编程语言及指令系统、实例应用设计；第 7 章到第 12 章介绍了西门子 S7-1200 系列 PLC，重点放在 S7-1200 硬件、编程语言及指令系统、实例应用设计上，以适应 PLC 技术的发展和当前各行业企业需求及各高校实验设备多样化的需要。本书每章末尾附有适量的习题，供学生课后训练。

本书可作为普通高校应用型本科电气工程及其自动化专业、自动化专业、轨道信号与控制专业、机电专业、过程控制专业、自动化仪表及相关专业的教材，同时可供有关工程人员、科技人员、研究生等参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电器与可编程控制技术 / 付艳清等主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2023. 6

ISBN 978-7-5635-6918-2

I. ①电… II. ①付… III. ①低压电路②可编程序控制器 IV. ①TM52②TM571.61

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 099710 号

策划编辑: 刘纳新 姚 顺 责任编辑: 刘 颖 责任校对: 张会良 封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 保定市画美凯印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 25.5

字 数: 637 千字

版 次: 2023 年 6 月第 1 版

印 次: 2023 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6918-2

定价: 68.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

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,是实现工业生产自动化的重要技术手段。

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,电动机直接取代了蒸汽机。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。

继电器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器接触器

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。

在自动化领域,可编程控制器与 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。可编程控制器及有关外部设备,均按既易于与工业控制系统连成一个整体,又易于扩充其功能的原则设计。可编程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。

“电气控制与 PLC”是电气工程、自动化、机电一体化等专业的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。

- 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。
- 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。
- 具有对不太复杂的电气控制系统进行改造和设计的能力。
- 熟悉可编程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。
- 掌握可编程控制器基本指令及其使用方法。
- 熟悉可编程控制器功能指令及其使用方法。
- 了解可编程控制器的网络和通信方法。
- 掌握可编程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。

为了贯彻国家“十四五”普通高等教育教材建设的相关要求,结合长春电子科技学院相关专业发展及建设的实际情况,积极开展新工科背景下的课程建设,切实提高高等教育教学的质量,收获良好教学效果,适应高校学科专业发展,适应并服务于区域经济建设,特组织相

关教师进行教材编写。

本书为普通高等教育“十四五”规划及新工科建设背景下,应用型本科适用教材。

本书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。

本书编写者有多年应用型本科教学经验,本着结合学科专业特点及兼顾“低压电器”“三菱 FX_{2N}、FX_{3U}”和“西门子 S7-1200”等机型进行编写。内容由浅入深,循序渐进,层次清楚,通俗易懂,深入浅出,力求简单,便于学习和掌握,能够使学生在短时间内学习和掌握 PLC 的主要应用,具备解决工程实际问题的能力。

本书是长春电子科技学院立项的重点规划教材编写项目,编写人员进行了广泛的调研及科学合理规划,对教材内容及体系结构进行了细致认真的审定和推敲,在确定编写大纲的基础上,由付艳清教授、刘旭副教授、司夏岩副教授、薛丹讲师、高凯讲师主编。参加本书编写的还有沙莎讲师、许淑伟讲师。全书由付艳清教授统稿,黄艳秋教授主审。

本书参考了大量相关文献和著作,在此对相关作者致以诚挚的谢意,对关怀和支持本书编写的领导和同事表示感谢。教材的编定和出版得到了北京邮电大学出版社的鼎力支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,本书在内容的选择、文字表述等方面难免存在不妥及错误之处,敬请读者和专家批评赐教。

《电器与可编程控制技术》编写组

目 录

第 1 章 常用低压电器	1
1.1 电器基本知识	1
1.1.1 低压电器分类	1
1.1.2 电磁式电器的结构及工作原理	2
1.1.3 电器的触头系统与电弧	6
1.2 电磁式接触器	9
1.2.1 接触器的结构及工作原理	10
1.2.2 常用典型交流接触器介绍	11
1.2.3 接触器主要技术参数	11
1.3 继电器	13
1.3.1 继电器的结构原理	13
1.3.2 电压继电器	14
1.3.3 电流继电器	15
1.3.4 中间继电器	16
1.3.5 时间继电器	17
1.3.6 热继电器	20
1.3.7 信号继电器	23
1.4 熔断器	26
1.4.1 熔断器的保护特性	26
1.4.2 插入式熔断器	26
1.4.3 螺旋式熔断器	27
1.4.4 半导体器件保护熔断器	28
1.5 主令电器	28
1.5.1 控制按钮	28
1.5.2 行程开关	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
习题	33
第2章 可编程控制器的组成与工作原理	34
2.1 概述	34
2.1.1 PLC的特点	35
2.1.2 PLC的发展趋势	36
2.2 可编程控制器的组成	37
2.2.1 PLC的组成	37
2.2.2 PLC的主要性能指标	44
2.3 可编程控制器的工作原理	45
2.3.1 扫描的概念	45
2.3.2 PLC的工作过程	45
2.3.3 PLC的元件	46
2.4 可编程控制器的编程语言	55
2.4.1 梯形图语言	56
2.4.2 指令表语言	57
2.4.3 状态转移图语言	57
习题	58
第3章 可编程控制器的基本指令	59
3.1 基本逻辑指令	59
3.1.1 逻辑取指令及输出指令 LD、LDI、OUT	59
3.1.2 触点串联指令 AND、ANI	60
3.1.3 触点并联指令 OR、ORI	61
3.1.4 串联电路块并联指令 ORB	61
3.1.5 并联电路块串联指令 ANB	62
3.1.6 多重输出指令 MPS、MRD、MPP	63
3.1.7 主控触点指令 MC、MCR	64
3.1.8 自保持与解除指令 SET、RST	66
3.1.9 脉冲式触点指令 LDP、LDF、ANDP、ANDF、ORP、ORF	67
3.1.10 脉冲输出指令 PLS、PLF	69
3.1.11 取反指令 INV	70
3.1.12 空操作指令 NOP,程序结束指令 END	70
3.1.13 编程规则及注意事项	71
3.1.14 典型控制程序	72
3.2 步进顺控指令	74
3.2.1 状态转移图	75
3.2.2 编程方法	78

习题	90
第 4 章 可编程控制器的功能指令	91
4.1 功能指令简介	91
4.2 程序流控制指令	93
4.3 比较、传送指令	101
4.4 四则运算及逻辑运算指令	110
4.5 循环移位、移位指令	115
4.6 数据处理指令	120
4.7 外部 I/O 设备指令	127
4.8 其他指令	134
习题	138
第 5 章 可编程控制器的特殊功能模块	139
5.1 特殊功能模块和功能扩展板与 PLC 的连接	139
5.1.1 特殊功能模块与 PLC 的连接	139
5.1.2 功能扩展板与 PLC 的连接	140
5.2 模拟量输入/输出模块	140
5.2.1 模拟量输入模块	141
5.2.2 模拟量输出模块	151
5.2.3 温度模块	160
5.3 高速计数器模块	168
5.3.1 输入/输出端子的接线	168
5.3.2 输入/输出特性与主要性能参数	169
5.3.3 缓冲存储器的功能及分配	170
5.3.4 程序实例	175
5.4 通信接口模块与功能扩展板	176
5.4.1 RS-232C 通信接口设备	176
5.4.2 RS-485 通信接口设备	181
5.4.3 RS-422 通信接口设备	184
5.4.4 CC-Link 网络连接设备	184
5.5 人机界面 GOT	186
5.5.1 GOT 的连接配置	186
5.5.2 GOT 的基本功能	187
5.5.3 GOT 编程软件	190
习题	191
第 6 章 可编程控制系统的设计与应用	193
6.1 电气原理图	193

6.2	可编程控制器应用系统设计	194
6.2.1	PLC 应用系统设计的内容和步骤	194
6.2.2	PLC 应用系统的硬件设计	196
6.2.3	PLC 应用系统的软件设计	199
6.3	可编程控制器应用实例	200
6.3.1	常用电气线路的 PLC 控制	200
6.3.2	两级传送带的 PLC 控制	207
6.3.3	机械手运动的 PLC 控制	208
6.3.4	两工位组合机床的 PLC 控制	215
	习题	220
第 7 章	S7-1200 的硬件与硬件组态	221
7.1	S7-1200 的硬件	221
7.1.1	CPU 模块	222
7.1.2	信号板与信号模块	225
7.1.3	集成的通信接口与通信模块	227
7.2	TIA 博途与仿真软件的安装	228
7.3	TIA 博途使用入门与硬件组态	230
7.3.1	项目视图的结构	230
7.3.2	创建项目与硬件组态	233
7.3.3	信号模块与信号板的参数设置	236
7.3.4	CPU 模块的参数设置	239
	习题	242
第 8 章	S7-1200 程序设计基础	244
8.1	S7-1200 的编程语言	244
8.2	PLC 的工作原理与用户程序结构简介	245
8.2.1	逻辑运算	245
8.2.2	用户程序结构简介	247
8.2.3	PLC 的工作过程	248
8.3	数据类型与系统存储区	251
8.3.1	物理存储器	251
8.3.2	数制与编码	252
8.3.3	数据类型	254
8.3.4	全局数据块与其他数据类型	257
8.3.5	系统存储区	260
8.4	编写用户程序与使用变量表	262
8.4.1	编写用户程序	262
8.4.2	使用变量表与帮助功能	266

8.5 用户程序的下载与仿真	269
8.5.1 下载与上传用户程序	269
8.5.2 用户程序的仿真调试	273
8.6 用 STEP7 调试程序	276
8.6.1 用程序状态功能调试程序	276
8.6.2 用监控表监控与强制变量	277
习题	281
第 9 章 S7-1200 的指令	282
9.1 位逻辑指令	282
9.2 定时器指令与计数器指令	287
9.2.1 定时器指令	287
9.2.2 计数器指令	292
9.3 数据处理指令	294
9.3.1 比较操作指令	294
9.3.2 使能输入与使能输出	295
9.3.3 转换操作指令	296
9.3.4 移动操作指令	298
9.3.5 移位指令与循环移位指令	300
9.4 数学运算指令	301
9.4.1 数学函数指令	301
9.4.2 字逻辑运算指令	305
9.5 其他指令	307
9.5.1 程序控制操作指令	307
9.5.2 日期和时间指令	308
9.5.3 字符串与字符指令	310
9.6 高速计数器与高速脉冲输出	312
9.6.1 高速计数器	312
9.6.2 高速脉冲输出	314
习题	316
第 10 章 S7-1200 的用户程序结构	318
10.1 函数与函数块	318
10.1.1 生成与调用函数	318
10.1.2 生成与调用函数块	321
10.1.3 多重背景	325
10.2 数据类型与间接寻址	326
10.2.1 数据类型	326
10.2.2 间接寻址	328

10.3	中断事件与中断指令	331
10.3.1	事件与组织块	331
10.3.2	初始化组织块与循环中断组织块	332
10.3.3	时间中断组织块	335
10.3.4	硬件中断组织块	336
10.3.5	中断连接指令与中断分离指令	338
10.3.6	延时中断组织块	339
10.4	交叉引用表与程序信息	341
10.4.1	交叉引用表	341
10.4.2	分配列表	343
10.4.3	调用结构、从属性结构与资源	344
	习题	346
第 11 章	数字量控制系统梯形图程序设计方法	348
11.1	梯形图的经验设计法	348
11.2	顺序控制设计法与顺序功能图	352
11.2.1	顺序功能图的基本元件	353
11.2.2	顺序功能图的基本结构	356
11.2.3	顺序功能图中转换实现的基本规则	358
11.3	使用置位/复位指令的顺序控制梯形图设计方法	359
11.3.1	单序列的编程方法	359
11.3.2	选择序列与并行序列的编程方法	362
11.3.3	应用举例	364
11.3.4	专用钻床的顺序控制程序设计	369
	习题	372
第 12 章	S7-1200 的通信	375
12.1	网络通信基础	375
12.1.1	串行通信的基本概念	375
12.1.2	SIMATIC 通信网络	376
12.2	PROFINET IO 系统组态	378
12.2.1	S7-1200 作 IO 控制器	378
12.2.2	S7-1200 作智能 IO 设备	380
12.3	基于以太网的开放式用户通信	382
12.4	S7 协议通信	387
12.5	Modbus RTU 协议通信	390
12.5.1	Modbus RTU 主站的编程	390
12.5.2	Modbus RTU 从站的编程与实验	393
12.5.3	S7-1200 其他通信简介	394
	参考文献	396

第1章 常用低压电器



第1章 PPT

低压电器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、起动机、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了简要介绍。

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。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,动稳定及热稳定性能好。
- 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、特殊工况用电器、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。

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 AC1200V、DC1500V 及以下电路中的电器。

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、判断做出有规律的反应,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[如图 1-1(a)~(c)所示]和拍合式两种,拍合式又有衔铁沿棱角转动[如图 1-1(d)所示]和衔铁沿轴转动[如图 1-1(e)所示]两种。

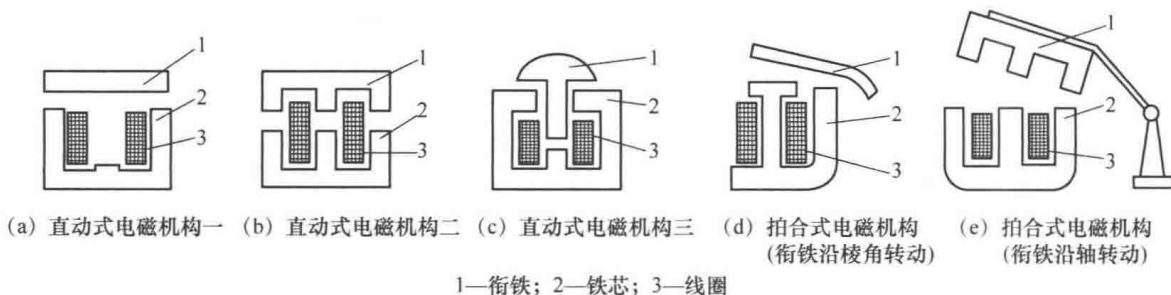


图 1-1 常用电磁机构的结构形式

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:

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

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 1-2(a) 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。

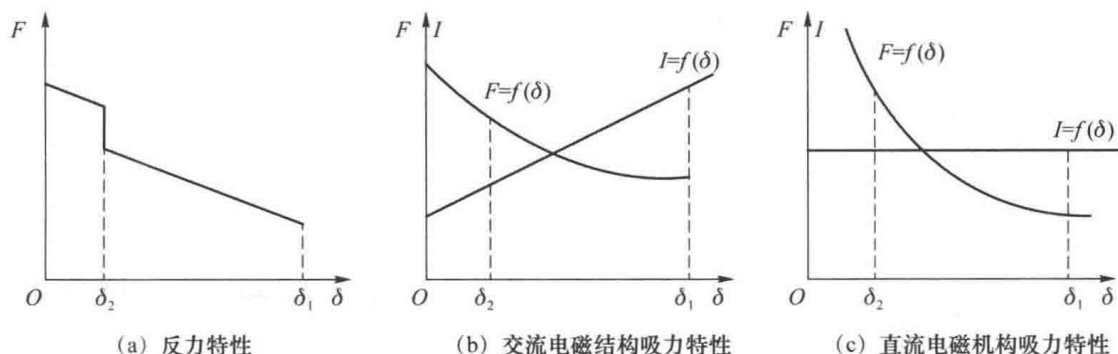


图 1-2 电磁机构的反力特性与吸力特性

(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 为电磁吸力(单位为 N); B 为气隙磁感应强度(单位为 T); S 为吸力处端面积(单位为 m^2)。

当端面积 S 为常数时, 吸力 F 与 B^2 成正比, 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。

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:

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

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

式中: U 为线圈电压(单位为 V); E 为线圈感应电动势(单位为 V); f 为线圈电压频率(单位为 Hz); Φ 为气隙磁通(单位为 Wb); N 为线圈匝数。

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 1-2(b) 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。

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：

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

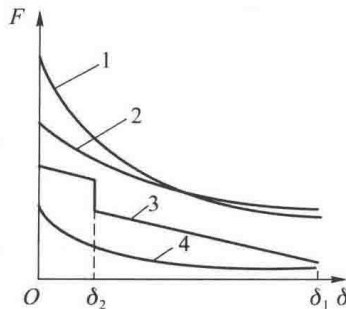
可见，直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的二次方成反比，其吸力特性如图 1-2(c)所示。表明衔铁吸合前后吸力变化很大，气隙越小，吸力越大。由于衔铁吸合前后励磁线圈的电流不变，所以直流电磁机构适用于动作频繁的场所，且吸合后电磁吸力大，工作可靠性好。

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。

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。



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 1-3 吸力特性与反力特性

(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 和 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。

(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。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。

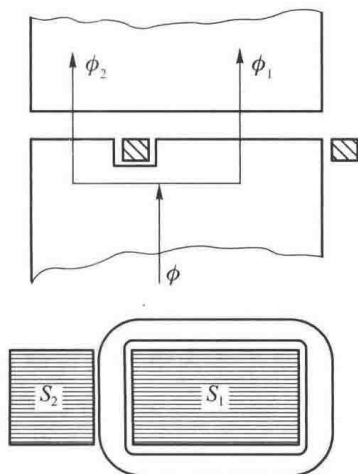


图 1-4 交流电磁机构的短路环

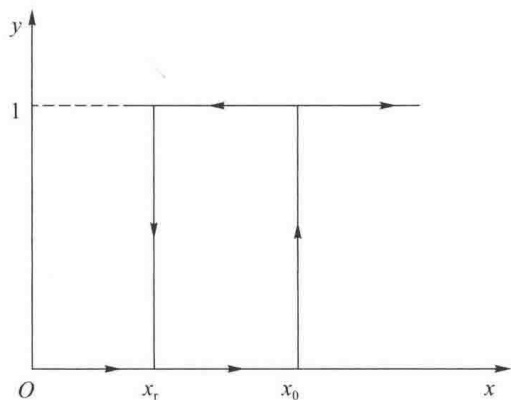


图 1-5 电磁机构的继电特性