



工业和信息化部职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材
全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

省精品教材

工厂电气控制设备

(第2版)

张晓娟 主 编
王 峰 李文森 副主编
陆 涛 于秀娜
霍 平 主 审

理实
一体
的职
教
模
式

品牌
教材
品牌
教材



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

- 《可编程控制器原理及应用（三菱机型）》（第2版）
- 《自动检测与转换技术》（第2版）
- 《液压与气动技术》（第2版）
- 《西门子S7-300PLC 应用技术》
- 《工厂电气控制设备》（第2版）
- 《工业变频器原理及应用》（第2版）
- 《工控组态软件》
- 《PLC控制与组态技术应用》
- 《过程控制仪表及装置》（第2版）
- 《集散控制系统原理及应用》
- 《现场总线与工业以太网技术》
- 《过程检测仪表》
- 《过程控制系统》（第2版）
- 《生产过程自动化仪表识图与安装》（第2版）
- 《智能仪器基础》（第2版）
- 《自动化生产设备原理及应用》
- 《过程控制工程实施》
- 《自动化控制工程设计》

策划编辑：王昭松

责任编辑：王昭松

封面设计：一克米工作室



ISBN 978-7-121-17043-0



9 787121 170430 >

定价：32.00元

工业和信息产业职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材
全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

工厂电气控制设备

(第2版)

张晓娟 主编
王 峰 李文森 陆 涛 于秀娜 副主编
霍 平 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书紧密结合各类工厂的实际情况,介绍工厂目前广泛应用的低压电器、电气控制线路,以及电气控制系统的设计、安装和调试方法。

全书分为7章。内容主要包括常用低压电器、基本电气控制线路、常用机床的电气控制、起重设备的电气控制、继电—接触器控制系统的设计与调试、电气控制系统故障分析与检查及电气控制设备实训。

本书注重实用技能的操作与训练,每一章的知识都结合工厂实例进行叙述。例如,在介绍常用机床电气控制的基础上,还对数控机床的电气控制线路进行分析,并在最后列出了12个工厂电气控制设备的实训项目,促使学员强化前面所学的知识,提高动手能力。

本书既可作为高职高专和成人教育自动化类专业、机电一体化专业、自动控制专业等相关课程的教材,也可作为企业培训人员、电控设备安装与维修人员,以及工厂技术人员的学习用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

工厂电气控制设备/张晓娟主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2012.6

工业和信息化职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材. 全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

ISBN 978-7-121-17043-0

I. ①工… II. ①张… III. ①工厂—电气控制装置—高等职业教育—教材 IV. ①TM571.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第099047号

策划编辑:王昭松

责任编辑:王昭松

电 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:428.8千字

印 次:2012年6月第1次印刷

印 数:4000册 定价:32.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

党的十六大提出,走我国新型工业化发展的道路,必须坚持“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”,而且要“积极探索科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子”,这表明我国要基本实现工业化,不仅要采用机械化和电气化,而且要充分利用自动化和信息化的新技术。因此,以自动化技术为代表的先进生产技术,将在我国产业结构调整、推动传统产业现代化、实现经济及社会持续协调发展的过程中,发挥极其重要的作用。

目前,作为我国高等教育一翼的高等职业教育,已经在招生规模方面取得了巨大的突破,但在教学改革方面与西方发达的职业教育相比,还相对落后。高等职业教育的培养目标是培养企业真正需要的具有实践动手能力的技术工人,这是当前高等职业教育改革的重点,也是一线教师所真正关心的话题。而工业生产自动化技术是高等职业教育中的一个重要领域,承担着为工业生产领域培养一线技术工人的重要作用,而且,无论是社会用人需求还是就业前景,这一领域目前都被广泛看好。

与此相适应,电子工业出版社在进行广泛调查研究的基础上,组织全国数十所高等职业院校的一线教师和企业技术专家,在上海召开了“全国高等职业教育工业生产自动化技术规划教材研讨会”,就相关的课程教学和高等职业教育的培养目标进行了深入探讨,确定了相关的主干教材18种。与会代表多是所在学校的领导和业务骨干,具有丰富的教学经验、实践经验和编写教材的经验。

本套教材体现了高等职业教育改革的方向,以培养岗位技术人员综合能力为中心,淡化理论,强化应用,突出职业教育的教学特色,并且根据教育部制定的“高职高专教育课程教学基本要求”,将传统课程重新组合,缩短教学课时,力求突出应用性、针对性、岗位性和专业性等特点。

本套教材在内容编排上以能力为单位模块,强调实用原则;书中实例完整,注重原理和方法的应用,以提高对高等职业院校学生操作技能的培养。本套教材将学历课程与资格应试相结合,满足目前大多数高等职业院校学生毕业时对毕业证与资格证或上岗证的要求。本套教材力求内容新颖,紧跟国内外工业生产自动化技术的最新进展,同时兼顾国内高职院校相关专业的最新教学内容与方法。本套教材均配有电子教学参考资料,为高等职业院校师生的教与学提供方便和帮助。

本套教材的出版对于高等职业教育的改革和高等职业技能人才的培养将起到积极的推动作用。对于教材中所存在的一些不足之处,将通过今后的教学实践不断修订、完善和充实,以便我们更好地服务于高等职业教育。

电子工业出版社
职业教育分社
2012年1月

前 言

《工厂电气控制设备》由于内容实用、语言简练、习题丰富并配有电子教学参考资料(包括教学指南、电子教案和部分习题答案)、便于教和学,深受读者喜爱。随着高等职业教育教学改革的深入,为突出教材的实用性、先进性和技能性,在第2版的修订过程中,根据职业教育的特点,突出能力培养,对全书进行了一些必要的增减和完善。

通过教学实践反馈,删除应用不广的A系列龙门刨床电气控制部分;对重点内容进行了更加详尽的介绍,增加了电气控制线路故障分析与检查部分,并单独作为第6章,突出技能的培养;引入一些新器件与新技术,如增加了电磁离合器部分;对文字的编辑做到了精益求精,更正了第1版中的一些文字错误;引入项目教学法,以实际电气线路为例,增加了工程设计内容,符合“教、学、做”一体化的要求。

本书按照学生的学习心理规律来编写。在每章内容之前,先列出本章的知识目标和技能目标,使学生带着明确的目标来学习。每章都有章首,介绍本章的主要内容,使在学习新知识前,既明确学习内容,又明确学习目标。

全书共分为7章。内容主要包括常用低压电器、基本电气控制线路、常用机床的电气控制、起重设备的电气控制、继电—接触器控制系统的设计与调试、电气控制系统故障分析与检查,以及电气控制设备实训。其中画“*”的部分可根据教学实际需要进行选学。

本书内容新颖、结构合理、通俗易懂,既可作为高职高专院校自动化类专业、机电一体化专业、自动控制专业等相关课程的教材,也可作为企业培训人员、电控设备安装与维修人员,以及工厂技术人员的学习用书。

本书由吉林电子信息职业技术学院张晓娟教授担任主编,兰州工业高等专科学校王峰副教授、山东工业职业技术学院李文森副教授、北华大学陆涛工程师、吉林电子信息职业技术学院于秀娜担任副主编。全书由张晓娟统稿,由成都电子机械高等专科学校霍平老师主审。

本书配有电子教学参考资料(包括教学指南、电子教案和部分习题答案),有此需要的教师 and 学员可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费下载。

在本书的编写过程中,作者参考了多位同行专家的著作和文献;并对在第1版中作出贡献的郭念田老师、李颖老师、孙志老师表示感谢;主审以高度负责的态度审阅全书,并提出了许多宝贵意见,在此也向霍平老师表示真诚的谢意。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在缺点和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2012年5月

目 录

基础理论篇

第 1 章 常用低压电器	1
1.1 低压电器的作用与分类	1
1.2 电磁式低压电器的基础知识	2
1.2.1 电磁机构	3
1.2.2 触点系统	7
1.2.3 电弧的产生和灭弧方法	9
1.2.4 低压电器的主要技术参数	10
1.3 低压开关	11
1.3.1 刀开关	11
1.3.2 组合开关	14
1.4 接触器	15
1.4.1 交流接触器	15
1.4.2 直流接触器	17
1.4.3 接触器的主要技术参数	17
1.4.4 接触器的常用型号及电气符号	18
1.4.5 接触器的选用	19
1.5 熔断器	20
1.5.1 熔断器的结构及保护特性	21
1.5.2 熔断器的主要技术参数	21
1.5.3 常用的熔断器	22
1.5.4 熔断器的型号含义及电气符号	24
1.5.5 熔断器的选择与维护	24
1.6 继电器	25
1.6.1 电磁式继电器	26
1.6.2 时间继电器	30
1.6.3 热继电器	33
1.6.4 速度继电器	36
1.6.5 干簧继电器	37
1.6.6 固态继电器	38
1.7 低压断路器	40
1.7.1 低压断路器的结构和工作原理	40

1.7.2 低压断路器的主要技术参数和典型产品	41
1.7.3 低压断路器的选用	43
1.8 主令电器	44
1.8.1 控制按钮	44
1.8.2 行程开关	46
1.8.3 接近开关	47
1.8.4 万能转换开关	48
1.8.5 凸轮控制器与主令控制器	49
1.9 其他低压电器	51
1.9.1 启动器	51
1.9.2 牵引电磁铁	52
1.9.3 频敏变阻器	52
1.9.4 电磁离合器	54
思考与练习 1	54
第2章 基本电气控制线路	57
2.1 电气控制线路的绘制原则及标准	57
2.1.1 电气图的一般特点	58
2.1.2 电气图的图形符号和文字符号	58
2.1.3 电气原理图	59
2.1.4 电气元件布置图	62
2.1.5 电气安装接线图	63
2.2 电气控制线路的基本组成规律	64
2.2.1 自锁控制	64
2.2.2 点动控制	66
2.2.3 联锁控制	67
2.2.4 顺序控制	69
2.2.5 多地控制线路	70
2.3 三相异步电动机降压启动控制线路	71
2.3.1 笼形异步电动机的降压启动控制线路	71
2.3.2 三相绕线式异步电动机启动控制线路	77
2.3.3 异步电动机软启动控制装置	80
2.4 三相异步电动机制动控制线路	83
2.4.1 笼形异步电动机反接制动控制线路	83
2.4.2 异步电动机能耗制动控制线路	85
2.5 三相异步电动机调速控制线路	87
2.5.1 三相笼形异步电动机的变极调速控制线路	87
2.5.2 电磁调速异步电动机控制线路	89

2.5.3 绕线式异步电动机转子串电阻的调速控制线路	92
2.5.4 变频调速控制线路	93
2.6 行程控制线路	98
2.6.1 可逆行程控制线路	98
2.6.2 行程控制应用举例	99
2.7 直流电动机的控制线路	101
2.7.1 直流电动机启动、制动及正、反转控制线路	101
2.7.2 直流电动机启动、制动控制线路	102
2.8* 步进电动机的控制	105
2.8.1 步进电动机的控制原理及特点	105
2.8.2 步进电动机的分类及性能指标	107
2.8.3 步进电动机控制系统	107
思考与练习 2	110

应 用 篇

第3章 常用机床的电气控制	113
3.1 机床电气原理图的识读	114
3.2 普通车床的电气控制	115
3.2.1 卧式车床的结构及工作要求	115
3.2.2 对电力拖动与控制的要求	115
3.2.3 卧式车床电气控制系统分析	116
3.3 磨床的电气控制	118
3.3.1 磨床的结构及工作要求	118
3.3.2 对电力拖动与控制的要求	119
3.3.3 平面磨床电气控制系统分析	120
3.4 铣床的电气控制	122
3.4.1 铣床的结构及工作要求	122
3.4.2 对电力拖动和控制的要求	123
3.4.3 卧式万能铣床的电气控制系统分析	123
3.4.4 卧式万能铣床控制线路的故障与处理	128
3.5 钻床的电气控制	129
3.5.1 摇臂钻床的结构及工作要求	129
3.5.2 摇臂钻床的电力拖动和控制要求	130
3.5.3 摇臂钻床电气控制系统分析	131
3.6 镗床的电气控制	132
3.6.1 卧式镗床的结构及工作要求	133
3.6.2 卧式镗床的电力拖动和控制要求	133

3.6.3 卧式镗床的电气控制系统分析	134
3.7 组合机床的电气控制	136
3.7.1 组合机床的结构及运动形式	137
3.7.2 组合机床的电气控制系统分析	137
3.8* 数控车床的电气控制	140
3.8.1 数控机床的结构	141
3.8.2 数控车床的主要工作情况	141
3.8.3 数控车床电气控制线路	141
3.9* 数控铣床的电气控制	151
3.9.1 数控铣床系统概述	151
3.9.2 数控铣床的电气控制线路	154
思考与练习 3	157
第 4 章 起重设备的电气控制	159
4.1 电动葫芦的电气控制	159
4.1.1 TV 型电动葫芦	160
4.1.2 CD 型电动葫芦	161
4.1.3 电动葫芦的电气控制	161
4.2 桥式起重机概述	162
4.2.1 桥式起重机的结构及运动情况	162
4.2.2 桥式起重机的主要技术参数	165
4.2.3 桥式起重机对电力拖动的要求	166
4.2.4 桥式起重机电动机的工作状态	167
4.3 桥式起重机的控制电路	168
4.3.1 凸轮控制器控制的小车移行机构控制电路	168
4.3.2 凸轮控制器控制的大车移行机构和副钩控制电路	171
4.3.3 主钩升降机构的控制电路	172
4.3.4 起重机的保护	176
4.3.5 起重机的供电	179
4.3.6 总体控制电路	179
思考与练习 4	182
第 5 章 继电—接触器控制系统的设计与调试	183
5.1 继电—接触器控制系统的设计	183
5.1.1 继电—接触器控制系统设计的基本内容	183
5.1.2 继电—接触器控制系统设计的一般流程	185
5.1.3 继电—接触器控制系统设计的一般原则	185
5.1.4 继电—接触器控制系统设计中应注意的问题	185
5.2 电力拖动方案的确定和电动机的选择	189

5.2.1 电力拖动方案的确定	189
5.2.2 电动机的选择	189
5.3 电气原理图设计的步骤和方法	190
5.3.1 经验设计法	190
5.3.2 逻辑设计法	193
5.4 电气元件布置图及电气安装接线图的设计	195
5.4.1 电气元件布置图的设计	195
5.4.2 电气安装接线图的设计	196
5.5 继电—接触器控制系统的安装与调试	198
5.5.1 电气控制柜的安裝配线	198
5.5.2 电气控制柜的调试	198
5.6 电气控制系统设计举例	199
思考与练习 5	203
第 6 章 电气控制系统故障分析与检查	205
6.1 概述	205
6.1.1 电气控制系统的正常工作条件	205
6.1.2 电气控制系统故障的常见原因	206
6.2 电源部分的故障分析	208
6.2.1 电源故障的一般特点	208
6.2.2 电源故障的一般现象	209
6.2.3 电源故障的一般原因	209
6.3 电气控制线路故障分析与检查	210
6.3.1 线路故障的种类和原因	210
6.3.2 观察法	211
6.3.3 通电检查法	211
6.3.4 断电检查法	213
6.3.5 电压检查法	214
6.3.6 电阻检查法	216
6.3.7 短接检查法	218
6.4 元件故障的查找及分析	218
6.4.1 元件故障的种类	218
6.4.2 元件故障的查找	219
思考与练习 6	222

技能训练篇

第 7 章 电气控制设备实训	224
实训项目一 常用低压电器的识别及测试	224

实训项目二	电压继电器动作电压的整定·····	226
实训项目三	三相异步电动机点动控制线路·····	228
实训项目四	三相异步电动机单向控制线路·····	232
实训项目五	三相异步电动机接触器联锁正反转控制线路·····	234
实训项目六	三相异步电动机双重联锁正反转控制线路·····	236
实训项目七	两台电动机顺序启动、逆序停止控制线路·····	239
实训项目八	三相异步电动机星形—三角形降压启动控制线路·····	240
实训项目九	三相异步电动机的反接制动控制线路·····	243
实训项目十	三相异步电动机的能耗制动控制线路·····	245
实训项目十一	三相电动机自动往复循环运动控制电路·····	248
实训项目十二	平面磨床电气控制线路故障判断·····	250
附录 A	常用的电气图形与文字符号·····	254

基础理论篇

第1章

常用低压电器

知识目标

- (1) 掌握常用低压电器的结构、基本工作原理和作用。
- (2) 掌握常用低压电器的主要技术参数和典型产品。
- (3) 熟悉常用低压电器的应用场合。
- (4) 学会常用低压电器的型号含义和符号。
- (5) 了解常用低压电器的型号。

技能目标

- (1) 能正确选择和使用常用低压电器。
- (2) 能进行常用低压电器的维护。
- (3) 能简单维修常用低压电器。
- (4) 能识别常用低压电器。

低压电器是电力拖动与自动控制系统的基本组成元件，控制系统的优劣与所用低压电器的性能有直接的关系。作为电气工程技术人員，必須掌握常用低压电器的结构与工作原理，掌握其使用与维护等方面的知识和技能。

1.1 低压电器的作用与分类

电器就是广义的电气设备。它可以很大、很复杂，如一套自动化装置；它也可以很小、很简单，如一个开关。在工业应用中，电器是一种能够根据外界信号的要求，自动或手动地

接通或断开电路,断续或连续地改变电路参数,实现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。简而言之,电器就是一种能控制电的工具。

电器按其工作电压的等级可分为高压电器和低压电器。低压电器通常是指工作在交流额定电压 1 200V 以下、直流额定电压 1 500V 及以下的电路中起通断、保护、控制或调节作用的电器产品。常用的低压电器主要有刀开关、接触器、继电器、控制按钮、行程开关、断路器等。

低压电器的种类繁多,构造各异,通常有如下分类。

1. 按动作方式分类

(1) 手动电器。由人工直接操作才能完成任务的电器称为手动电器。例如,刀开关、按钮和转换开关等。

(2) 自动电器。不需要人工直接操作,按照电的或非电的信号自动完成接通、分断电路任务的电器称为自动电器。例如,低压断路器、接触器和继电器等。

2. 按用途或控制对象分类

(1) 低压配电电器。主要用于低压配电系统,要求系统发生故障时准确动作、可靠工作,在规定条件下具有相应的动稳定性与热稳定性,使电器不会被损坏。例如,刀开关、低压断路器、转换开关和熔断器等。

(2) 低压控制电器。主要用于电力拖动控制系统,要求寿命长、体积小、重量轻、动作迅速且准确、性能可靠。例如,接触器、继电器、启动器、主令控制器和万能转换开关等。

3. 按工作原理分类

(1) 电磁式电器。根据电磁感应原理来工作的电器。例如,交直流接触器、各种电磁式继电器和电磁铁等。

(2) 非电量控制电器。依靠外力或其他非电的信号(如速度、压力、温度等)的变化而动作的电器。例如,刀开关、行程开关、按钮、速度继电器、压力继电器和温度继电器等。

4. 按执行功能分类

(1) 有触点电器。有可分离的动触点、静触点,并利用触点的接通和分断来切换电路。例如,接触器、刀开关、按钮等。

(2) 无触点电器。没有可分离的触点,主要利用电子元件的开关效应,即导通和截止来实现电路的通、断控制。例如,接近开关、电子式时间继电器等。

1.2 电磁式低压电器的基础知识

电磁式电器在电气控制线路中的使用量较大,其类型也很多,但各类电磁式电器在工作原理和结构上基本相同。从结构上看,电器一般都由两个基本组成部分构成,即感测部分和执行部分。感测部分接收外界输入的信号,并通过转换、放大、判断,做出有规律的反应;而执行部分则根据指令信号,输出相应的指令,执行电路的通、断控制,实现控制目的。对



于电磁式电器，感测部分由电磁机构构成，而执行部分则由触点系统构成。

1.2.1 电磁机构

电磁机构是电磁式电器的重要组成部分之一，其作用是将电磁能转换成机械能，带动触点闭合或断开，实现对电路的接通与分断控制。

1. 电磁机构的结构及工作原理

电磁机构由吸引线圈、铁芯（静铁芯）、衔铁（动铁芯）、铁轭和空气隙等部分组成。其中吸引线圈、铁芯是静止不动的，只有衔铁是可动的。其作用原理是：当线圈中有电流通过时，产生电磁吸力，电磁吸力克服弹簧的反作用力，使衔铁与铁芯闭合，衔铁带动连接机构运动，从而带动相应的触点动作，完成对接通与分断电路的控制。常用的电磁机构的结构如图 1.1 所示。

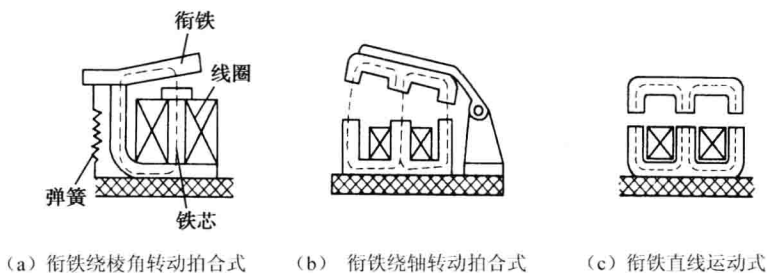


图 1.1 常用的电磁机构的结构

电磁机构一般有如下三种分类方法。

1) 按衔铁的运动方式分类

(1) 衔铁绕棱角转动拍合式，如图 1.1 (a) 所示。衔铁绕铁轭的棱角而转动，磨损较小。铁芯用软铁，适用于直流感触器和继电器。

(2) 衔铁绕轴转动拍合式，如图 1.1 (b) 所示。衔铁绕固定轴转动，铁芯用硅钢片叠成，适用于交流接触器。

(3) 衔铁直线运动式，如图 1.1 (c) 所示。衔铁在线圈内作直线运动。多用于交流接触器和继电器。

2) 按电磁系统形状分类

电磁机构按照铁芯的形状可分为 U 形和 E 形，如图 1.1 所示。

3) 按线圈的连接方式分类

电磁机构按照线圈接入电路的方式可分为串联电磁机构和并联电磁机构两种，如图 1.2 所示。

(1) 串联电磁机构。电磁机构的线圈串联于电路中，如图 1.2 (a) 所示。串联电磁机构的衔铁动作与否取决于线圈中电流的大小，而衔铁的动作不会引起线圈中电流的变化。这种接入方式的线圈又称为电流线圈，具有这种电磁机构的电器都属于电流型电器。为了不影响电路中负载的端电压和电流，要求线圈的内阻很小，因此，串联电磁机构的线圈导线截面积较大，且线圈匝数较少。

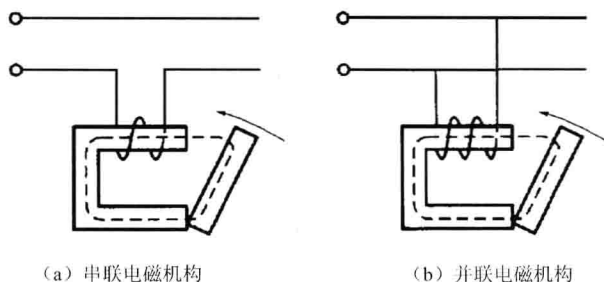


图 1.2 电磁机构线圈接入电路的方式

(2) 并联电磁机构。电磁机构的线圈并联于电路中，如图 1.2 (b) 所示。并联电磁机构的衔铁动作与否取决于线圈两端的电压大小，这种接入方式的线圈又称为电压线圈，具有这种电磁机构的电器均属于电压型电器。

电磁铁按吸引线圈通电电流的性质不同可分为直流电磁铁与交流电磁铁。直流电磁铁的铁芯由整块铸铁构成，而交流电磁铁的铁芯则用硅钢片叠成，以减小铁损（磁滞损耗及涡流损耗）。

在实际应用中，由于直流电磁铁仅有线圈发热，所以线圈匝数多、导线细，制成细长型，且不设线圈骨架，线圈与铁芯直接接触，利于线圈的散热。而交流电磁铁由于铁芯和线圈均发热，所以线圈匝数少、导线粗，制成短粗型，吸引线圈设有骨架，且铁芯与线圈隔离，利于铁芯和线圈的散热。

2. 电磁机构的工作特性

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表示，两者之间的配合关系将直接影响电磁式电器的工作可靠性。

1) 吸力特性

电磁机构的电磁吸力与工作气隙的关系称为吸力特性。电磁铁的吸力公式为：

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B^2 S \quad (1.1)$$

式中， F ——电磁吸力 (N)； B ——工作气隙中磁感应强度 (T)； S ——铁芯截面积 (m^2)。

由上式可知：当 S 一定时， $F \propto B^2$ ，也就是 $F \propto \Phi^2$ ，其中 Φ 为气隙磁通。因此，励磁电流的种类不同，吸力特性也将不同。下面就交流电磁机构和直流电磁机构的吸力特性分别进行说明。

(1) 交流电磁机构的吸力特性：假设线圈电压 U 不变，则 $U \approx E = 4.44f\Phi N$ ， $\Phi = U/4.44fN$ ，式中 E 为线圈感应电动势， f 为电源频率， Φ 为气隙磁通， N 为线圈匝数。当 U 、 f 、 N 为常数时， Φ 为常数，则 F 也为常数，即 F 与气隙的大小 δ 无关。实际上，考虑到漏磁通的影响， F 随着 δ 的减小而略有增大。由于 Φ 不变，则流过线圈的电流 I 随气隙磁阻（即随气隙大小 δ ）的变化成正比例变化，其电磁机构的吸力特性如图 1.3 所示。

(2) 直流电磁机构的吸力特性：对于直流线圈，当电压 U 及线圈电阻 R 不变时，流过线圈的电流 I 不变。由磁路定律 $\Phi = IN/R_m$ 可知（式中 R_m 为气隙磁阻）， $F \propto \Phi^2 \propto 1/R_m^2 \propto 1/\delta^2$ ，即

电磁吸力 F 与气隙大小 δ 的平方成反比。直流电磁机构的吸力特性如图 1.4 所示。

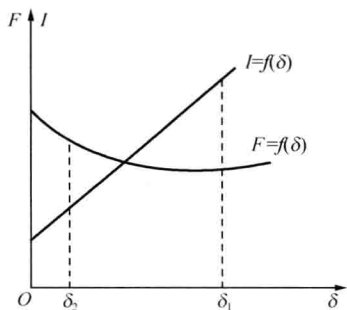


图 1.3 交流电磁机构的吸力特性

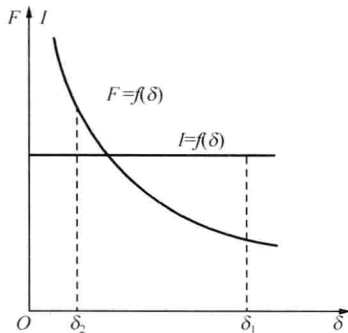
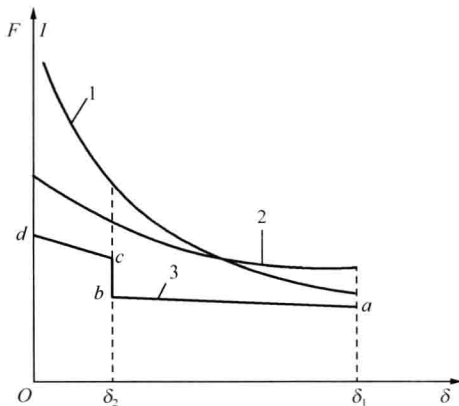


图 1.4 直流电磁机构的吸力特性

由以上分析可以看出，直流电磁机构的吸力与气隙大小的平方成反比，而交流电磁机构的吸力与气隙的大小无关。因此，直流电磁机构的吸力特性曲线比交流电磁机构的吸力特性曲线要陡。

2) 反力特性

电磁机构的反作用力与工作气隙的关系称为反力特性。反作用力包括弹簧力、衔铁自身重力、摩擦阻力等。在忽略电磁机构运动部件重力的情况下，电磁机构的反作用力主要由释放弹簧和触点弹簧的反作用力构成，用 F 表示。由于弹簧的作用力与其长度成线性关系，所以反力特性曲线都是直线段，如图 1.5 中的曲线 3 所示。 δ_1 为气隙的最大值，此时对应的动、静触点之间的距离称为触点开距，也称为触点行程。在衔铁闭合过程中，当气隙由 δ_1 开始减小时，反力逐渐增大，如曲线 3 中的 ab 段所示，这一段表现为释放弹簧的反力变化。当气隙减小到 δ_2 位置时，动、静触点刚刚接触。由于触点弹簧预先被压缩了一段，因而当动、静触点刚刚接触时触点弹簧会产生一个压力，称为初压力。此时初压力作用到衔铁上，反力突增，曲线也突变，如曲线 3 中的 bc 段所示，这一段表现为触点弹簧的初压力变化。当气隙由 δ_2 再减小时，释放弹簧与触点弹簧同时起作用，使反力变化增大。气隙越小触点压得越紧，反力越大，线段越陡，如曲线 3 中的 cd 段所示。



1—直流电磁机构的吸力特性；2—交流电磁机构的吸力特性；3—反力特性

图 1.5 吸力特性和反力特性