



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Electric
control & PLC system

电气控制与 PLC 系统

© 任胜杰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电气控制与 PLC 系统

任胜杰 主编



机械工业出版社

本书从常用低压电器的工作原理及使用方法开始,系统地介绍了电气控制电路的基本控制原则和基本控制环节,分析了典型生产机械的常规电气控制电路,详细介绍了三菱公司 FX_{2N} 系列 PLC 的结构原理、系统配置、指令系统、特殊功能模块及其应用编程方法,以具体实例简单介绍了近年来出现的组态软件和触摸屏技术的应用方法,结合实际工程项目讲解了电气控制系统的设计方法和设计步骤。

本书遵循专业技术课程应切合实际工程应用的教学原则,层次清晰地构建了电气控制技术的系统体系,注重理论联系实际。书中设有丰富的例题及习题,便于读者参考和学习。本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、机械工程及其自动化等相关专业的本、专科教材,对工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制与 PLC 系统/任胜杰主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 1
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-40716-4

I. ①电… II. ①任… III. ①电气控制-高等学校-教材②plc 技术-高等学校-教材 IV. ①TM571. 2②TM571. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 293330 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 王寅生 版式设计:霍永明

责任校对:申春香 封面设计:张 静 责任印制:张 楠

涿州市京南印刷厂印刷

2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·462 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-40716-4

定价:35.00 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

社服 务 中 心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江	梁景凯	张元	袁德成	焦斌
吕进	胡国文	刘启中	汤天浩	黄家善
钱平	王保家			

委员（按姓氏笔画排序）：

丁元明	马修水	王再英	王军	叶树江
孙晓云	朱一纶	张立臣	李先允	李秀娟
李海富	杨宁	陈志新	周渊深	尚丽萍
罗文广	罗印升	罗兵	范立南	娄国焕
赵巧娥	项新建	徐建英	郭伟	高亮
韩成浩	蔡子亮	樊立萍	穆向阳	

前 言

电气控制与 PLC（可编程序控制器）技术是机电类、电气类专业中应用性较强的专业课，是综合了计算机技术、自动控制技术和通信技术的一门新兴技术，是实现工业生产、科学研究以及其他各个领域自动化的重要手段之一，应用十分广泛。

由于电气控制与 PLC 起源于同一体系，只是发展的阶段不同，在理论和应用上是一脉相承的，因此本书将电气控制技术和 PLC 应用技术的内容编写在一起，希望能更好地体现出它们之间的内在联系，使本书的结构和理论基础更系统化，更具有科学性和先进性。本书在编写过程中力求以实际应用和便于教学为目标，注重精选内容，结合实际，突出应用。在编排上循序渐进，由浅入深，在内容阐述上，力求简明扼要，图文并茂，通俗易懂，便于教学和自学。

本书共 11 章，内容包括电气控制技术中常用的低压电器，典型控制电路，典型电气控制系统分析和设计方法，日本三菱公司 FX_{2N} 系列 PLC 结构原理、指令系统及其应用，常见的西门子 S7-200、台达 DVP-ES 系列 PLC 简介，并以工程实例介绍和讲解了电气控制系统的分析和设计方法。每章均有一定数量的设计示例、思考题与习题，有利于学生加强训练、巩固概念、掌握工程设计方法。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、机械工程及其自动化等相关专业的本、专科教材，也可作为高职高专、电大、职大相关专业的教学用书，对广大工程技术人员也有一定的参考价值。

本书由河南工业大学任胜杰副教授主编，王莉副教授、李智强副教授任副主编。任胜杰编写了第 7、8、11 章，王莉编写了第 3、4、5、6 章，李智强编写了第 1、2 章，河南工程学院邓丽霞编写了第 9、10 章。

本书由广东工业大学刘守操教授主审，他对本书的章节安排及语言描述等提出了诸多宝贵意见，在此深表感谢！本书的出版得到了学校和电气工程学院的大力支持，在此深表感谢！

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

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 电磁式电器的工作原理	2
1.2 开关电器	5
1.2.1 刀开关	6
1.2.2 负荷开关	6
1.2.3 组合开关	8
1.2.4 开关电器的主要技术参数	8
1.2.5 开关电器的选用与安装	9
1.3 低压熔断器	9
1.3.1 熔断器的结构及工作原理	10
1.3.2 熔断器的分类	10
1.3.3 熔断器的电气符号及文字符号	10
1.3.4 熔断器的保护特性	10
1.3.5 熔断器的主要技术参数	11
1.3.6 熔断器的选择	12
1.4 低压断路器	13
1.4.1 低压断路器的分类和工作原理	13
1.4.2 低压断路器的主要技术参数	14
1.4.3 低压断路器的选用	15
1.5 主令电器	16
1.5.1 按钮	16
1.5.2 位置开关	17
1.5.3 万能转换开关	20
1.5.4 主令控制器	20
1.6 接触器	21
1.6.1 电磁式接触器的结构和工作原理	22
1.6.2 接触器的主要技术参数	22
1.6.3 接触器的选择	24
1.7 继电器	24
1.7.1 普通电磁式继电器	25
1.7.2 时间继电器	26
1.7.3 速度继电器	30
1.7.4 热继电器	30

1.7.5 固态继电器	33
思考题与习题	34
第 2 章 电气线路的基本控制环节	35
2.1 电气控制系统图的类型及有关标准	35
2.1.1 电气控制系统图中的图形符号和文字符号	35
2.1.2 电气控制系统图	35
2.2 三相笼型异步电动机全压直接起动和正反转控制	41
2.2.1 单向全压直接起动控制电路	41
2.2.2 点动控制电路	42
2.2.3 正反转控制电路	43
2.2.4 自动往返行程控制电路	44
2.3 三相笼型异步电动机的减压起动控制	44
2.3.1 定子串电阻减压起动控制	44
2.3.2 星-三角 ($\text{Y}-\Delta$) 减压起动控制	45
2.3.3 自耦变压器减压起动控制电路	46
2.4 三相绕线转子异步电动机起动控制	48
2.4.1 转子串电阻起动控制电路	48
2.4.2 转子绕组串频敏变阻器起动控制电路	49
2.5 三相异步电动机的制动控制	50
2.5.1 反接制动控制电路	51
2.5.2 能耗制动控制电路	53
2.6 三相笼型异步电动机的有级调速控制	54
2.6.1 三相笼型异步电动机的有级调速控制原理	55
2.6.2 双速电动机控制电路	55
2.7 直流电动机的控制	56
2.7.1 直流电动机的基本控制方法	56
2.7.2 他励 (并励) 直流电动机的控制电路	57
思考题与习题	59

第 3 章 典型生产机械电气控制电路

分析	61
3.1 电气控制电路的分析基础	61
3.1.1 电气控制电路分析的内容	61
3.1.2 电路图阅读分析的方法与步骤	61
3.2 C616 型卧式车床的电气控制电路	
分析	62
3.2.1 C616 型卧式车床的主要结构及运动形式	62
3.2.2 卧式车床的电力拖动及控制要求	63
3.2.3 C616 型卧式车床电气控制原理图分析	63
3.3 X62W 型卧式万能铣床的电气控制	
电路分析	65
3.3.1 X62W 型卧式万能铣床主要结构及运动形式	65
3.3.2 X62W 型卧式万能铣床的电力拖动及控制要求	66
3.3.3 X62W 型卧式万能铣床控制电路分析	66
3.4 卧式镗床的电气控制电路分析	71
3.4.1 卧式镗床的主要结构及运动情况	71
3.4.2 卧式镗床电力拖动及控制要求	72
3.4.3 T68 型卧式镗床的电气控制电路分析	72
思考题与习题	75

第 4 章 PLC

4.1 PLC 简介	76
4.1.1 PLC 的产生	76
4.1.2 PLC 的定义	77
4.1.3 PLC 的特点	77
4.1.4 PLC 的应用领域	78
4.1.5 PLC 的分类	79
4.1.6 PLC 的发展现状及发展趋势	79
4.2 PLC 的系统组成、工作方式和编程语言	81
4.2.1 PLC 的系统组成	81
4.2.2 PLC 的工作方式	84
4.2.3 PLC 的编程语言	86
思考题与习题	87

第 5 章 FX_{2N} 系列 PLC

5.1 FX _{2N} 系列 PLC 的基本性能指标及配置	88
5.1.1 FX _{2N} 系列 PLC 的性能规格指标	88
5.1.2 FX 系列 PLC 的型号命名规则	90
5.1.3 FX _{2N} 系列 PLC 系统硬件配置	91
5.2 FX _{2N} 系列 PLC 的内部软元件	94
5.2.1 输入继电器、输出继电器的编号及功能	94
5.2.2 辅助继电器、状态继电器的编号及功能	95
5.2.3 定时器的编号及功能	96
5.2.4 计数器的编号及功能	97
5.2.5 数据寄存器的编号及功能	101
5.2.6 变址寄存器的编号及功能	101
5.2.7 指针与常数的编号及功能	102
5.3 FX _{2N} 系列 PLC 的基本逻辑指令及其编程方法	102
5.3.1 逻辑取及线圈输出指令 LD、LDI、OUT	103
5.3.2 触点串联指令 AND、ANI	104
5.3.3 触点并联指令 OR、ORI	104
5.3.4 边沿检出指令 LDP、LDF、ANDP、ANDF、ORP、ORF	105
5.3.5 串联回路块并联指令 ORB	106
5.3.6 并联回路块串联指令 ANB	107
5.3.7 栈操作指令 MPS、MRD、MPP	107
5.3.8 主控指令 MC、MCR	108
5.3.9 结果取反指令 INV、空操作指令 NOP、结束指令 END	109
5.3.10 上升沿脉冲输出指令 PLS、下降沿脉冲输出指令 PLF	109
5.3.11 置位指令 SET、复位指令 RST	110
5.3.12 基本指令梯形图的编写原则与技巧	110
5.3.13 基本逻辑指令的应用举例	112
5.4 FX _{2N} 系列 PLC 的编程方式及编程软件	118
5.4.1 手持编程器	118
5.4.2 FXGP/WIN 编程软件	118
5.4.3 GX Developer 编程软件	122

思考题与习题	126	7.4.3 乘法指令 MUL	163
第 6 章 FX_{2N} 系列 PLC 的步进指令及		7.4.4 除法指令 DIV	164
顺序功能图	128	7.4.5 加 1 指令/减 1 指令 INC/DEC	165
6.1 顺序功能图	128	7.4.6 逻辑字与/字或/字异或指令 WAND/WOR/WXOR	165
6.1.1 顺序功能图的画法	128	7.4.7 求补指令 NEG	165
6.1.2 顺序功能图的构成规则	129	7.5 循环移位与移位指令	166
6.1.3 顺序功能图的基本形式	130	7.5.1 循环左移/右移指令 ROL/ ROR	166
6.2 步进指令及步进梯形图	130	7.5.2 带进位的左/右移位指令 RCL/ RCR	167
6.2.1 步进指令	130	7.5.3 位元件左移/右移指令 SFTL/ SFTR	168
6.2.2 步进梯形图的编程方法	131	7.5.4 字元件右移/左移指令 WSFR/ WSFL	168
6.3 顺序功能图及步进指令编程举例	134	7.6 数据处理指令	169
6.3.1 十字路口交通信号灯控制	134	7.6.1 区间复位指令 ZRST	169
6.3.2 机械手抓取物块控制系统	140	7.6.2 置 1 位数总和指令 SUM	170
6.3.3 运料车运料控制系统	141	7.6.3 置 1 位判别指令 BON	170
思考题与习题	145	7.6.4 平均值指令 MEAN	170
第 7 章 FX_{2N} 系列 PLC 的功能指令	147	7.7 高速处理指令	171
7.1 功能指令的表示与执行方式	147	7.7.1 I/O 刷新指令 REF	171
7.1.1 功能指令的格式	147	7.7.2 高速计数器置位指令 HSCS	171
7.1.2 功能指令的执行形式	148	7.7.3 高速计数器复位指令 HSCR	172
7.1.3 功能指令的变址操作	149	7.7.4 脉冲输出指令 PLSY	173
7.2 程序流向控制指令	149	7.8 方便指令与外部设备 I/O 指令	173
7.2.1 条件跳转指令 CJ	149	7.8.1 读特殊功能模块指令 FROM	173
7.2.2 子程序调用指令 CALL 和返回 指令 SRET	150	7.8.2 写特殊功能模块指令 TO	174
7.2.3 中断返回指令 IRET、允许指令 EI、 禁止指令 DI	151	7.9 外部串口设备指令	174
7.2.4 主程序结束指令 FEND	154	7.9.1 串口数据传送指令 RS	174
7.2.5 监视定时器刷新指令 WDT	155	7.9.2 PID 指令 PID	177
7.2.6 循环开始指令 FOR 和循环结束 指令 NEXT	155	7.10 浮点数运算、数据处理、定位、 时钟运算、外围设备、触点比较 等指令	178
7.3 数据传送与比较指令	157	7.10.1 时钟数据读取指令 TRD	178
7.3.1 比较指令 CMP	157	7.10.2 触点比较指令 LD = ~ LD ≥	179
7.3.2 区间比较指令 ZCP	158	7.10.3 触点比较指令 AND = ~ AND ≥	179
7.3.3 传送指令 MOV	158	思考题与习题	180
7.3.4 移位传送指令 SMOV	159		
7.3.5 取反传送指令 CML	160		
7.3.6 块传送指令 BMOV	160		
7.3.7 多点传送指令 FMOV	161		
7.3.8 数据交换指令 XCH	162		
7.4 算术运算和逻辑运算指令	162		
7.4.1 加法指令 ADD	162		
7.4.2 减法指令 SUB	163		

第 8 章 FX_{2N} 系列 PLC 的特殊功能**模块及通信网络** 181

- 8.1 特殊功能模块 181
 - 8.1.1 特殊功能模块的类型及用途 181
 - 8.1.2 特殊功能模块的编号与数据读写 183
 - 8.1.3 FX_{2N}-2AD 2 路模拟量输入模块 183
 - 8.1.4 FX_{2N}-4AD 4 路模拟量输入模块 185
 - 8.1.5 FX_{2N}-2DA 模拟量输出模块 188
 - 8.1.6 FX_{2N}-1HC 高速计数模块 190
- 8.2 FX_{2N} 系列 PLC 的通信及网络技术 196
 - 8.2.1 PLC 通信的基本知识 197
 - 8.2.2 计算机链通信 200
 - 8.2.3 PLC 与 PLC 之间的 N:N 网络 203
 - 8.2.4 PLC 与 PLC 之间的 1:1 网络 206
 - 8.2.5 PLC 与其他串口设备的无协议数据传输 209
 - 8.2.6 PLC 的现场总线 CC-Link 连接通信 211

思考题与习题 212**第 9 章 其他常用 PLC 系统简介** 213

- 9.1 西门子 S7-200 系列 PLC 213
 - 9.1.1 S7-200 系列 PLC 的硬件系统 213
 - 9.1.2 S7-200 系列 PLC 的 I/O 点扩展及编址方法 215
 - 9.1.3 S7-200 系列 PLC 的内部资源及寻址方式 215
 - 9.1.4 S7-200 系列 PLC 的指令系统 217
 - 9.1.5 S7-200 系列 PLC 的编程软件 219
- 9.2 台达 DVP 系列 PLC 220
 - 9.2.1 DVP-ES2 系列 PLC 的硬件系统 220
 - 9.2.2 DVP-ES2 系列 PLC 的 I/O 点扩展及编址方法 222
 - 9.2.3 DVP-ES2 系列 PLC 的内部资源及寻址方式 223
 - 9.2.4 DVP-ES2 系列 PLC 的指令系统 223
 - 9.2.5 DVP-ES2 系列 PLC 的编程软件 224

思考题与习题 225**第 10 章 触摸屏及组态软件** 226

- 10.1 触摸屏简介 226
 - 10.1.1 触摸屏的工作原理 226
 - 10.1.2 触摸屏的分类 226
- 10.2 台达 DOP-B 系列 DOP-B07S201 触摸屏 228
 - 10.2.1 台达 DOP-B07S201 系列触摸屏的简介 228
 - 10.2.2 台达 DOP-B07S201 触摸屏的编程 230
- 10.3 组态软件 234
 - 10.3.1 国内外组态软件介绍 235
 - 10.3.2 组态软件的功能特点及发展方向 237
- 10.4 组态王的应用举例 238
 - 10.4.1 使用组态王建立应用工程的一般过程 239
 - 10.4.2 使用组态王建立应用工程的过程实例 239

思考题与习题 250**第 11 章 电气控制系统设计** 251

- 11.1 电气控制系统设计的一般原则及设计步骤 251
 - 11.1.1 电气控制系统设计的一般原则 251
 - 11.1.2 电气控制系统设计的主要内容 251
 - 11.1.3 电气控制系统设计的步骤 252
- 11.2 电气控制电路的参数计算与元器件选择 253
 - 11.2.1 电气控制系统通用元器件的计算与选择 253
 - 11.2.2 传统继电器控制系统主要元器件的计算与选择 255
 - 11.2.3 PLC 控制系统主要元器件的计算与选择 255
- 11.3 PLC 控制系统的软件设计方法 257
 - 11.3.1 经验设计法 257
 - 11.3.2 继电器-接触器控制电路转换设计法 257
 - 11.3.3 逻辑设计方法 257
 - 11.3.4 状态转移图设计法 258

11.4 电气控制系统设计实例	259	控制系统中的应用	275
11.4.1 B100 型棒材探伤传动装置控制 系统设计	259	思考题与习题	280
11.4.2 FX ₂ 系列 PLC 控制的五层模拟 电梯控制系统设计	262	附录	281
11.4.3 PLC 控制的恒压供水系统及组态 软件的应用	271	附录 A FX _{2N} 的特殊软元件功能简表	281
11.4.4 触摸屏在半自动内圆磨床 PLC		附录 B FX _{2N} 的功能指令一览表	286
		参考文献	289

第1章 常用低压电器

1.1 低压电器的基本知识

电器是指对电能的生产、输送、分配和使用起控制、调节、检测、转换及保护作用的电气设备。在工业、农业、交通、国防以及人们日常生活等一切用电部门中，大多数采用低压供电。低压供电的输送、分配和保护是依靠刀开关、断路器以及熔断器等低压电器来实现的。而低压电器的使用则是将电能转换为其他能量，其过程的控制、调节和保护都是依靠各类接触器和继电器等低压电器来完成的，即无论是低压供电系统还是控制生产过程的电力拖动控制系统均是由用途不同的各类低压电器组成的。

我国现行标准将工作在交流 50Hz、额定电压 1200V 以下和直流额定电压 1500V 以下电路中的电器称为低压电器。低压电器种类繁多，它作为基本元器件已广泛用于发电厂、变电所、工矿企业、交通运输和国防工业等电力输配电系统和电力拖动控制系统中。

1.1.1 低压电器的分类

低压电器的品种、规格很多，作用、构造及工作原理各不相同，因而有多种分类方法。

1. 按用途分类

低压电器按在电路中所处的地位和作用可分为低压控制电器和低压配电电器两大类。低压控制电器是指电动机完成生产机械要求的起动、调速、反转和停止所用的电器。如继电器、接触器、按钮、行程开关、变阻器、主令开关、热继电器、起动器、电磁铁等；低压配电电器是指正常或事故状态下接通和断开用电设备和供电电网所用的电器。如低压隔离器（刀开关）、熔断器、断路器等。

2. 按动作方式分类

低压电器按动作方式可分为手动电器和自动电器。前者主要是用手直接操作来进行切换，如按钮、刀开关等；后者是依靠本身参数的变化或外来信号的作用，自动完成接通或分断等动作，如接触器、继电器等。

3. 按执行机理分类

低压电器按有无触点可分为有触点电器和无触点电器两大类。目前有触点的电器仍占多数，有触点电器有动触点和静触点之分，利用触点的合与分来实现电路的通与断。无触点电器没有触点，主要利用晶体管的开关效应，即导通或截止来实现电路的通断。

4. 按工作原理分类

低压电器按工作原理分为电磁式电器和非电量控制电器。电磁式电器是依据电磁感应原理来工作的电器。例如，交直流接触器、各种电磁式继电器等；非电量控制电器是当电器工作时靠外力或某种非电物理量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、温度继电器等。

1.1.2 电磁式电器的工作原理

电磁式电器在电气控制电路中使用量最大，其类型也很多。各类电磁式电器在工作原理和构造上基本相同。其结构主要由电磁机构和触头系统两部分组成。

1. 电磁机构

电磁机构是电磁式电器的感测部分。它的主要作用是将电磁能量转换成机械能量，带动触头动作，从而完成接通或分断电路。

(1) 电磁机构的结构

电磁机构通常采用电磁铁的形式，由吸引线圈、铁心和衔铁三部分组成。磁路包括铁心、铁扼、衔铁和气隙。图 1-1 为几种常用电磁机构结构示意图。按磁系统形状分类，电磁机构可分为 U 形（见图 1-1a、b、c）和 E 形（见图 1-1d、e）两种。铁心按衔铁的运动方式分为如下几类：

① 衔铁沿棱角转动的拍合式铁心，如图 1-1a、b、c 所示。其衔铁绕铁扼的棱角转动磨损较小，铁心一般用电工软铁制成，适用于直流继电器和接触器。

② 衔铁沿轴转动的拍合式铁心，如图 1-1d 所示。其衔铁绕轴而转动，铁心一般用硅钢片叠成，常用于较大容量交流接触器。

③ 衔铁做直线运动的直动式铁心，如图 1-1e 所示。衔铁做直线运动，较多用于中小容量交流接触器和继电器中。

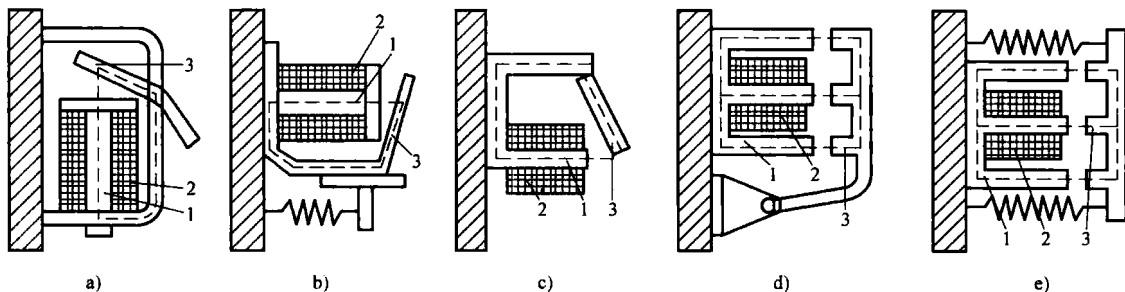


图 1-1 常用电磁机构的结构示意图

1—铁心 2—线圈 3—衔铁

(2) 吸引线圈

吸引线圈的作用是将电能转换成磁场能量。吸引线圈按其通过电流的性质可分为交流电磁线圈和直流电磁线圈。

对于交流电磁线圈，为了减小因涡流造成的能量损失和温升，铁心和衔铁用硅钢片叠铆而成。由于其铁心存在磁滞和涡流损耗，线圈和铁心都发热。因此交流电磁机构的吸引线圈设有骨架，使铁心与线圈隔离，并将线圈制成短而厚的“矮胖”形，这样做有利于铁心和线圈的散热。

对于直流电磁线圈，铁心和衔铁可以用整块电工软钢制成。因其铁心不发热，只有线圈发热，所以，直流电磁机构的吸引线圈做成高而薄的“瘦高”形，且不设线圈骨架，使线圈与铁心直接接触，易于散热。

当线圈并联于电源工作的线圈，称为电压线圈，它的特点是匝数多，线径较细；当线圈

串联于电路工作的线圈，称为电流线圈，它的特点是匝数少，线径较粗。

(3) 电磁机构的吸力特性和反力特性

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表达。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。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) 吸力特性。电磁机构的吸力与很多因素有关，当铁心与衔铁断面互相平行，电磁线圈通电后，铁心吸引衔铁的力，称为电磁吸力。电磁吸力的计算公式为

$$F = \frac{10^7 \Phi^2}{8\pi S} \quad (1-1)$$

式中， Φ 为气隙中的磁通，可近似看做与铁心的磁通相等，单位是韦伯（Wb）； S 为空气隙的有效面积，单位是平方米（ m^2 ）； F 为电磁吸力，单位是牛顿（N）。

直流电磁机构的励磁电流是恒定不变的直流，当电压不变时，电流 $I = U/R$ 不变，其磁动势 $F = IN$ 也是恒定不变的。但随着衔铁的吸合，气隙变得越来越小，最后消失。在吸合过程中，磁路的磁阻显著减小，因而磁通 Φ 要增大。所以，吸合后的电磁力要比吸合前大得多。

交流电磁机构的励磁电流是交变的，它所产生的磁场也是交变的，因此电磁力的大小也是交变的。设空气隙处的磁通为 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，将其代入式（1-1）中，可得交流电磁机构的电磁吸力为

$$F = \frac{1}{2} F_m - \frac{1}{2} F_m \cos 2\omega t \quad (1-2)$$

式中， F_m 为电磁吸力的最大值， $F_m = \frac{10^7 \Phi_m^2}{8\pi S}$ 。从式（1-2）可见，交流电磁机构的电磁吸力是脉动的。图 1-2 为交流电磁机构的吸力变化曲线，其电磁吸力平均

值为 $F_{AV} = \frac{1}{2} F_m = \frac{10^7 \Phi_m^2}{16\pi S}$ 。

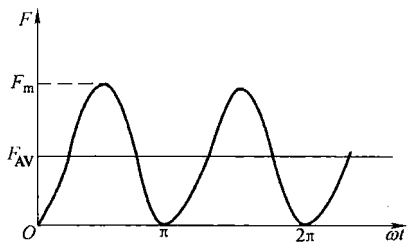


图 1-2 交流电磁机构的吸力变化曲线

在交流铁心线圈、变压器及交流电动机中，有一个共同的外加电压公式 $U \approx E = 4.44fN\Phi_m$ ，由该式可知 $\Phi_m \approx \frac{U}{4.44Nf}$ ，即在外加电压不变的条件下，交流磁路主磁通的最大值基本不变。因此，交流电磁铁在吸合衔铁的过程中，电磁吸力的平均值不变，但由于铁磁物质磁通的饱和作用，随着气隙的增大，磁通还是微微变小的。又由于主磁通等于磁动势与磁阻之比，而吸合过程中磁路的磁阻显著减小，可知随着气隙的减小，磁动势 IN 必然减小，所以交流电磁机构吸合前的励磁电流要比吸合后的励磁电流大得多。因此，交流电磁铁在工作时衔铁和铁心之间一定要吸合好，否则，线圈中会因长期通过较大的电流而过热烧毁。

图 1-3 为电磁机构的吸力特性与反力特性曲线。其中，曲线 1 为直流电磁机构吸力特性；曲线 2 为交流电磁机构吸力特性；曲线 3 为弹簧的反力特性；曲线 4 为剩磁的吸力特性。无论交流或直流电磁机构，当吸力大于反力时，电磁机构吸合，否则释放。

2) 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，如图 1-3 中曲线 3 所示。弹簧的反力与其变形量 x 成正比，其反力特性可写为 $F_N = kx$ ，图 1-3 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。

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失电后仍有一定的磁性吸力存在, 剩磁的吸力随气隙的增大而减小。剩磁的吸力特性如图 1-3 中曲线 4 所示。

电磁机构在整个吸合过程中, 吸力都必须大于反力; 但也不能过大, 否则会影响电器的机械寿命。反映在特性曲线图上, 就是要保证吸力特性在反力特性的上方。当切断电磁机构的励磁电流以释放衔铁时, 其反力必须大于剩磁吸力, 才能保证衔铁可靠释放。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。

电磁机构灵敏度的衡量参数是返回系数 β , 被定义为释放电压 (电流) 与吸合电压 (电流) 的比值。返回系数越大, 灵敏度越高。

另外, 在使用单相交流电源的电磁机构中, 由于电磁吸力的瞬时值是脉动的, 根据交流电磁吸力公式可知, 交流电磁机构的电磁吸力是一个两倍电源频率的周期性变量。它有一个是恒定分量, 另一个是交变分量。总的电磁吸力在 $0 \sim F_{\max}$ 之间变化, 其吸力曲线如图 1-4a 所示。

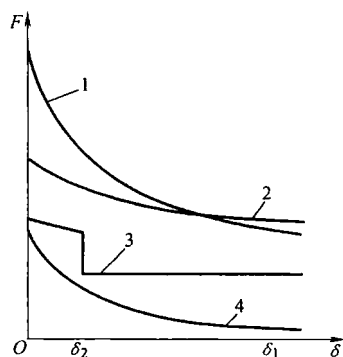


图 1-3 电磁机构的吸力特性与反力特性曲线

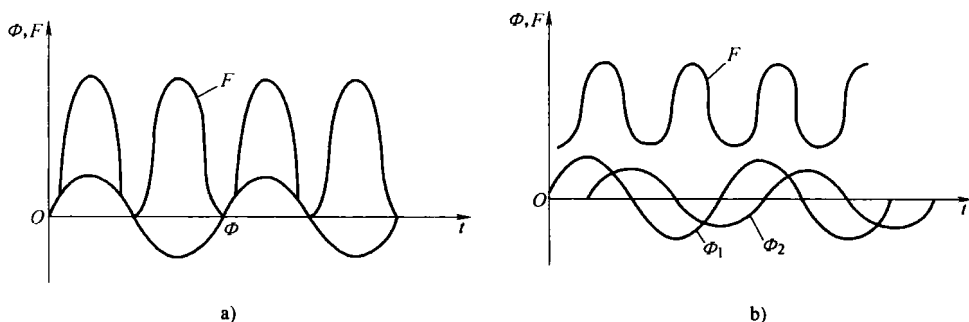


图 1-4 交流电磁铁的磁通与吸力特性

a) 未加短路环的磁通与吸力特性 b) 加短路环后的磁通与吸力特性

电磁机构在工作时, 衔铁始终受到反作用弹簧、触头弹力等反作用力的作用。尽管电磁吸力的平均值大于反力, 但因吸力特性有过零点, 在某些时段, 电磁吸力仍小于反力, 衔铁开始释放, 当电磁吸力大于反力时, 衔铁又被吸合。如此周而复始, 从而使衔铁振动, 产生噪声。为此, 必须采取有效措施, 消除振动和噪声。具体办法是在铁心端部开一个槽, 槽内嵌入一个铜环, 称为短路环 (或称为磁环) 如图 1-5 所示。当励磁线圈通入交流电时, 在短路环中就有感应电流产生, 该感应电流又会产生一个磁通。因短路环的作用

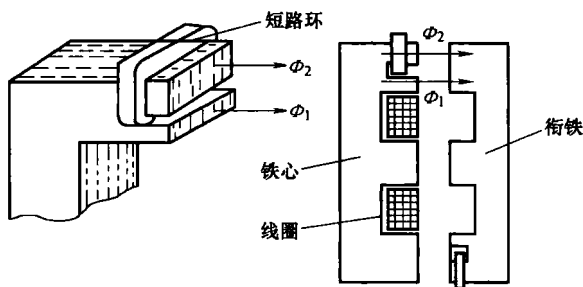


图 1-5 变流电磁铁的短路环

把铁心中的磁通分为两部分,即不穿过短路环的磁通 Φ_1 与穿过短路环的磁通 Φ_2 相位相差一定角度,磁通 Φ_2 滞后于磁通 Φ_1 ,使合成吸力始终大于反作用力,从而消除了振动噪声。加短路环后的磁通与吸力特性如图1-4b所示。

2. 触头系统和电弧

(1) 触头的接触电阻

触头也叫触点,是电器的主要执行部分,起接通和分断电路的作用。在有触头的电器元件中,其基本功能是靠触头来执行的。因此,要求触头导电、导热性能良好,接触电阻小,通常用铜、银、镍及其合金材料制成,有时也在铜触头表面电镀锡、银或镍。铜的表面容易氧化而生成一层氧化铜,这将增大触头的接触电阻,使触头的损耗增大,温度上升。所以,有些特殊用途的电器(如微型继电器和小容量的电器),其触头常采用银质材料,这不仅在于其导电和导热性能均优于铜质触头,更主要的是其氧化膜电阻率很低,与纯银相似(氧化铜则不然,其电阻率可达纯铜的10倍以上),而且要在较高的温度下才会形成,同时又容易粉化。因此,银质触头具有较低而稳定的接触电阻。对于大中容量的低压电器,在结构设计上,触头采用滚动接触,可将氧化膜去掉,这种结构的触头常采用铜质材料。

(2) 触头的结构形式和接触形式

每对触头均由静触头和动触头组成。动触头与电磁机构的衔铁相连,当接触器的电磁线圈通电时,衔铁带动动触头动作,使接触器的常开触头闭合,常闭触头断开。触头的结构形式有点接触(见图1-6a)、面接触(见图1-6b)、线接触(见图1-6c),接触面越大则允许通过的电流也越大。为了消除触头在接触时的振动,减小接触电阻,在触头上装有接触弹簧,该弹簧在触头刚闭合时产生较小的压力,闭合后压力增大。

(3) 电弧的产生与灭弧

当一个较大电流的电路突然断电时,如触头间的电压超过一定数值,触头间空气在强电场的作用下会产生电离放电现象,在触头间隙产生大量带电粒子,形成炽热的电子流,称为电弧。电弧伴随高温、高热和强光,可能造成电路不能正常切断、烧毁触头、引起火灾等事故,因此对切换较大电流的触头系统必须采取灭弧措施。

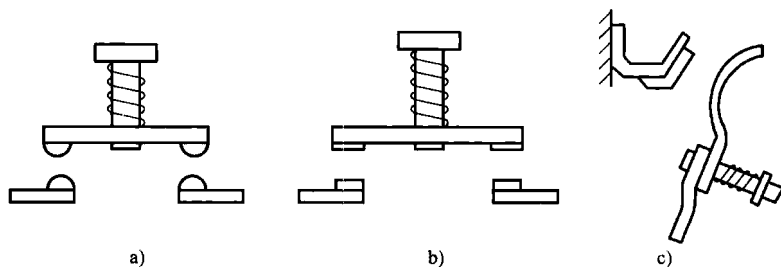


图1-6 触头形状示意图

常用的灭弧装置有灭弧罩、灭弧栅和磁吹灭弧装置,主要用于熄灭触头在分断电流的瞬间动静触头间产生的电弧,以防止电弧的高温烧坏触头或出现其他事故。

1.2 开关电器

开关电器主要有刀开关、组合开关等,主要用于电气线路中对电源的隔离,也可作为不

频繁地接通和分断空载电路或小电流电路之用。

1.2.1 刀开关

刀开关断开时,有明显的断点。按极数分,有单极、双极和三极;按结构分,有平板式和条架式;按操作方式分,有直接手柄操作、正面旋转手柄操作、杠杆操作和电动操作;按转换方式分,有单掷、双掷。

1. 刀开关的结构

刀开关是结构较为简单的手动电器,由静插座、手柄、动触刀、铰链支座和绝缘底板组成。图 1-7 所示为 HD11 型刀开关外形及基本结构示意图。静插座由导电材料和弹性材料制成,固定在绝缘材料制成的底板上。动触刀与下支座通过铰链连接,连接处依靠弹簧保证必要的接触压力,绝缘手柄直接与动触刀固定。在低压电路中,用于不频繁接通和分断电路,或用于将电路与电源隔离。能分断额定电流的刀开关装有灭弧罩,以保证分断电路时安全可靠。灭弧罩由绝缘板和钢栅片拼铆而成。

目前常用的刀开关产品有两大类:一类是带杠杆操作机构的单掷或双掷刀开关,这种刀开关能切断额定电流值以下的负载电流,主要用于低压配电装置中的开关面板或动力箱等产品中,属于这一类的产品有 HD12、HD13 和 HD14 系列单掷刀开关,以及 HS12、HS13 系列双掷刀开关;另一类是中央手柄的单掷或双掷开关,这类刀开关不能分断电流,只能作为隔离电源用的隔离器,主要用于一般的控制屏。这类产品主要有 HD11 和 HS11 系列单掷和双掷刀开关。

2. 刀开关的图形符号及文字符号

刀开关的图形符号及文字符号如图 1-8 所示。

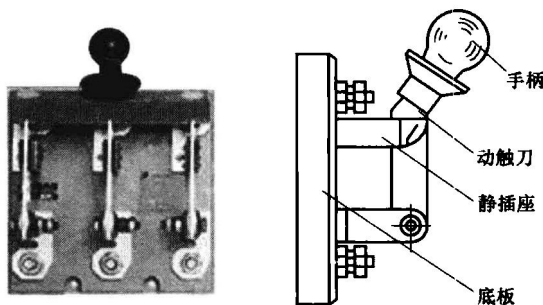


图 1-7 HD11 型刀开关外形及基本结构示意图



图 1-8 刀开关的图形符号及文字符号

1.2.2 负荷开关

负荷开关有开启式和封闭式两种,用于接通和断开电路。

1. 开启式负荷开关

开启式负荷开关是刀开关的一种,它是一种结构简单、应用最广泛的手动电器。常用于交流额定电压 380/220V、额定电流小于 100A 的照明电路,以及配电线的电源开关和小容量电动机非频繁起动的操作开关。

开启式负荷开关由操作手柄、熔丝、触刀、触头座和底座等组成,如图 1-9 所示。与刀

开关相比,开启式负荷开关增设了熔丝与防护胶壳两部分。防护胶壳的作用是防止操作时电弧飞出灼伤操作人员,并防止极间电弧造成的电源短路,因此操作前一定要将胶壳安装好。熔丝主要起短路和严重过电流保护作用。开启式负荷开关的常用产品有 HK1 (统一设计产品) 和 HK2 系列。

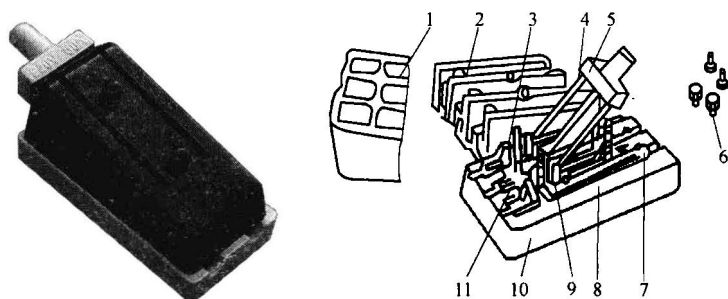


图 1-9 HK 系列开启式负荷开关的外形及结构示意图

1—上胶壳 2—下胶壳 3—触刀座 4—触刀 5—瓷柄 6—胶盖紧固螺母 7—出线端
8—熔丝 9—触刀铰链 10—瓷底座 11—进线端子

2. 封闭式负荷开关

封闭式负荷开关俗称铁壳开关,一般用于电力配电、电热器、电气照明线路的配电设备中,用于手动非频繁地接通与分断负荷电路。其中容量较小者(额定电流为 60A 及以下的),还可以作为交流异步电动机非频繁全压起动的控制开关。

封闭式负荷开关主要由触头和灭弧系统、熔体及操作机构等组成,并将其装于一防护铁壳内。其操作机构有两个特点:一是采用储能合闸方式,即利用一根弹簧以执行合闸和分闸的功能,使开关的闭合和分断速度与操作速度无关,它既有助于改善开关性能和灭弧性能,又能防止触头停滞在中间位置;二是具有联锁装置,以保证开关合闸时箱盖不能打开,而在箱盖打开时不能闭合开关。HH 系列封闭式负荷开关的外形及结构示意图如图 1-10 所示。封闭式负荷开关的常用产品有 HH3、HH4、HH10、HH11 等系列,其最大额定电流可达 400A,有双极和三极两种形式。

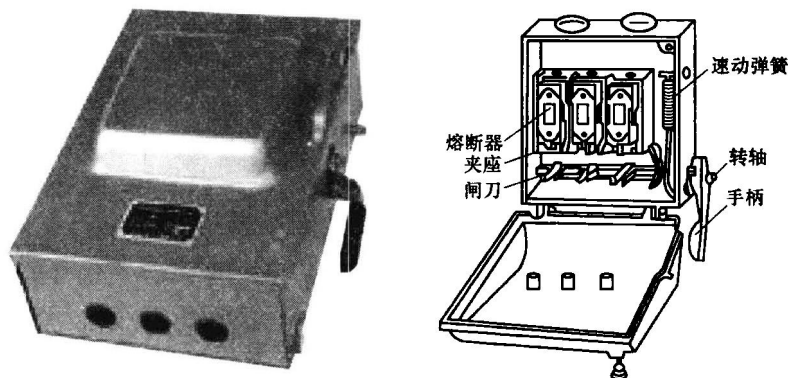


图 1-10 HH 系列封闭式负荷开关的外形及结构示意图

3. 负荷开关的电气符号

负荷开关从结构上说是由刀开关和短路保护用的熔体组成,所以电气符号是二者的组