现代电气控制与PLC应用教程

XIANDAI DIANQI KONGZHI YU
PLC YINGYONG JIAOCHENG

王仁祥◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代电气控制与PLC应用教程

王仁祥　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书详细地介绍了现代电气工程中的常用低压电器、智能化电器、工业控制器的基本结构、工作原理和选用方法；固态软起动器、通用变频器、可编程逻辑控制继电器等新型低压电器的基本原理及应用；简要介绍了西门子博途（TIA Portal）集成化工程软件平台，以及基于 TIA Portal 软件平台的 PLC 编程；可通信低压电器的基本原理等。系统地介绍了电气控制系统的基本原理、基本控制环节、控制线路分析、数字化逻辑控制系统及电气控制系统的设计原理与方法、电气工艺设计的基本知识。另外，书中还介绍了现代工业自动化技术、低压电器的最新技术、新产品及其应用和发展方向。全书图文并茂，理论联系实际，侧重于实际应用，便于自学。

本书适宜作为高等学校电气工程、工业自动化、自动控制类等专业的本科生、研究生教材和教学参考书，亦可作为企业电气工程技术人员的培训教材，高等职业学校的类似专业也可选用。

图书在版编目（CIP）数据

现代电气控制与 PLC 应用教程/王仁祥编著 . —北京：机械工业出版社，2012. 4

ISBN 978-7-111-37326-1

Ⅰ. ①现… Ⅱ. ①王… Ⅲ. ①电气控制 - 教材②plc 技术 - 教材 Ⅳ. ①TM571. 2②TM571. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 016450 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：付承桂 责任编辑：付承桂
版式设计：霍永明 责任校对：张 媛
封面设计：陈 沛 责任印制：乔 宇
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 18 印张 · 441 千字
0 001—3 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-37326-1
定价：49. 80 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
社 服 务 中 心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

网络服务
门户网：http://www. cmpbook. com
教材网：http://www. cmpedu. com

封面无防伪标均为盗版

前　言

《常用低压电器原理及其控制技术》、《常用低压电器原理及其控制技术　第2版》自2001年出版以来，在指导电气控制技术的教学和应用方面起到了应有的作用，受到了广大读者的普遍欢迎，许多学校选用该书作为教材。由于教学改革的需要，许多学校将原来分属两门课程（两本书）的电气控制技术和可编程序控制器技术合二为一，授课学时大幅缩减，内容也大大缩水，这样学习者原本应汲取的专业基础知识不得不瘦身。另一方面，现代工业自动化技术迅速发展，已进入全面集成化、智能化、网络化时代，物联网技术、智能电网技术和数字信息化技术正在渗透着现代电气技术，促使其日新月异的发展。因此，决定在前书基础上编写一个教程版本。其目的仍是希望向广大读者提供一本能体现现代电气控制技术发展和技术应用的参考书，尤其是生产现场的工程技术人员。

与前书相比，全书内容有较大改动，比较重要的改动是，本书根据现代电气工程中应用广泛的各类智能化电器、装置和控制器的结构原理和特点，提出了“控制器”的概念，并给出了一个现代工业自动化控制系统的最小模型，全书以此为主线讨论现代电气控制技术，预期给读者一个现代工业自动化系统的整体概念，理顺对现代工业自动化技术概念的理解，这也许会对教学改革起到一定的作用。书中仍然包括电气工程中的常用低压电器、智能化电器、可通信低压电器的基本结构、工作原理和选用方法，固态软起动器、通用变频器、可编程序控制继电器等新型低压电器的基本原理及应用，逻辑控制系统的基本原理等，并充实了物联网、智能电网、数字信息化和全面集成化技术等方面的内容。新增加了西门子博途（TIA Portal）软件平台的内容，简要介绍了平台操作的一些基础知识，以及基于TIA Portal软件平台的可编程序控制器的编程方法。系统地介绍了电气控制系统的基本原理、基本问题、基本控制环节、控制线路分析，电气控制系统的设计原理与方法、逻辑控制系统的基本原理和分析、电气工艺设计原理与方法的基本知识。书中介绍了国内外低压电器的最新技术、新产品及其应用和发展方向。

关于逻辑控制系统，本书仍然倾向于从逻辑控制角度介绍“以软代硬”的逻辑控制原理、逻辑思维方法和设计方法，强调继电逻辑（硬逻辑）与可编程逻辑（软逻辑）两者逻辑上的统一性。事实上，从逻辑控制理论角度看，两者是一致的，只是实现的物理载体不同而已，前者用的是接触器、继电器，后者用的是存储器上的存储位，逻辑上都是“1”或“0”及其组合。现在，许多教材将原来分属两本书（两门课程）的电气控制技术和可编程序控制器技术的内容合二为一，说来这也没有什么不妥，但从书的内容上看，只是将两者简单地一前一后合并，内容还是相互孤立存在的，并且，只是介绍了可编程序控制器的最基础的内容，授课学时大幅缩减，这样的合二为一是值得商榷的。事实上，现在的可编程序控制器控制技术是一个十分复杂的系统工程，从实际应用来看，核心内容应该是网络控制技术的应用，遗憾的是，这方面的内容在教材中很难全面反映，这就难免使学习者面对实际应用时束手无策。鉴于上述思考，本书所述的逻辑控制系统的内容期望使读者能够从逻辑控制角度学习掌握电气控制技术，从逻辑控制概念上“软硬融合”，而不是简单地“以软代硬”，这

一部分内容就是为此打基础的。另外，从现代工业自动化控制技术来看，逻辑控制、过程控制和运动控制等是相互融合的，并没有严格的界限，但其核心都是计算机及其网络控制技术。网络是诸多控制方式的统一（同一）的载体，是一种数字化控制技术。从这一角度说，现代电气控制技术是一种数字化的逻辑控制技术，现代电气控制系统是一种数字化逻辑控制系统，那么，我们的思维方法应该是数字化的逻辑思维方法。本书将这些概念总结为“控制器”，概念统一，具有通用性，这就是编著本书的中心思路。

本书适宜作为高等学校电气工程、工业自动化、自动控制类等专业的教材和教学参考书，也适合从事电气工程及自动化、生产过程自动化领域工作的工程技术人员阅读，亦可作为企业电气工程技术人员的培训教材。

本书编写过程中曾参考和引用了国内外许多专家、学者发表的论文与著作，以及一些厂商的网站资料和产品说明书，由于各种因素不能一一预告、面谢，作者在此一并致谢。同时感谢青岛大学刘湘波老师、上海交通大学王小曼，在编写过程中对全部书稿进行了逐字逐句的审查，提出了详细的审稿意见，在校稿、打字、绘图等方面做了大量工作，给予了热情的帮助、支持和启迪。

由于作者水平及时间所限，书中难免存在不妥、缺点和谬误，热忱欢迎广大读者批评指正，将不胜感谢。

编著者

2011 年 8 月于青岛

目　录

前言

第 1 章　常用低压电器的基本原理 …… 1

1.1　概述 …… 1

1.1.1　常用低压电器的分类 …… 1

1.1.2　关于现代电气技术的一些新概念 …… 5

1.2　常用低压电器的基本问题 …… 8

1.2.1　电器的触头和电弧 …… 8

1.2.2　电磁机构 …… 14

1.3　低压电器的主要技术性能指标和参数 …… 17

1.3.1　主电路电器和控制电器 …… 17

1.3.2　有关低压电器的主要技术性能、参数的概念 …… 18

1.3.3　电气控制中的颜色标志 …… 26

1.4　电气制图规则 …… 28

1.4.1　电气制图标准 …… 28

1.4.2　电气工程图及技术文件 …… 30

1.4.3　电气控制技术中常用的图形、文字符号 …… 33

第 2 章　常用低压电器 …… 49

2.1　概述 …… 49

2.2　隔离器、刀开关 …… 50

2.2.1　隔离器、刀开关的产品种类 …… 50

2.2.2　开启式刀开关 …… 52

2.2.3　熔断器式刀开关 …… 53

2.2.4　负荷-隔离开关 …… 53

2.2.5　隔离器、刀开关的选用、安装与操作 …… 54

2.3　低压断路器 …… 55

2.3.1　低压断路器的分类 …… 56

2.3.2　塑料外壳式低压断路器 …… 56

2.3.3　万能式低压断路器 …… 62

2.3.4　智能型断路器 …… 64

2.3.5　模数化小型断路器 …… 73

2.3.6　剩余电流动作（漏电）保护装置 …… 74

2.3.7　低压断路器的选择与应用 …… 78

2.3.8　配电系统接地型式 …… 82

2.4　接触器 …… 87

2.4.1　接触器的结构及工作原理 …… 87

2.4.2　常用交流接触器产品简介 …… 88

2.4.3　机械联锁（可逆）交流接触器 …… 89

2.4.4　切换电容器接触器 …… 89

2.4.5　低压交流真空接触器 …… 90

2.4.6　接触器的主要特性参数与选用原则 …… 91

2.5　热继电器 …… 94

2.5.1　热继电器的工作原理 …… 94

2.5.2　常用热继电器产品简介 …… 96

2.5.3　热继电器的选用 …… 97

2.6　熔断器 …… 99

2.6.1　熔断器的结构及工作原理 …… 99

2.6.2　常用典型熔断器简介 …… 102

2.6.3　熔断器的选用 …… 105

2.7　继电器 …… 109

2.7.1　继电器的结构原理与分类 …… 109

2.7.2　时间继电器 …… 111

2.7.3　固态继电器 …… 114

2.8　主令电器 …… 116

2.8.1　控制按钮和指示灯 …… 117

2.8.2　行程开关 …… 119

2.8.3　接近开关 …… 120

2.8.4　转换开关 …… 125

第 3 章　常用工业控制器 …… 128

3.1　现代工业自动化控制技术概述 …… 128

3.1.1　现代工业自动化技术涵盖的主要内容 …… 128

3.1.2　控制器的概念 …… 132

3.2　可编程逻辑控制继电器 …… 133

3.2.1　可编程逻辑控制继电器的结构和功能 …… 133

3.2.2　“easy”控制继电器的应用 …… 137

3.3　可编程序控制器 …… 137

3.3.1 可编程序控制器的结构 …… 137
3.3.2 可编程序控制器的工作原理 …… 139
3.3.3 可编程序控制器的编程语言 …… 140
3.3.4 西门子 SIMATIC S7 PLC 简介 …… 140
3.3.5 西门子 TIA 博途（TIA Portal）软件平台 …… 145
3.4 人机界面 …… 153
3.4.1 人机界面产品的结构原理和功能 …… 153
3.4.2 西门子 SIMATIC HMI 精简系列面板 …… 154
3.5 通用变频器 …… 155
3.5.1 通用变频器的结构原理 …… 155
3.5.2 通用变频器的控制方式 …… 158
3.5.3 异步电动机变频调速时的特性 … 159
3.5.4 通用变频器的主要控制功能 …… 160
3.6 PID 控制器 …… 164
第 4 章 电气控制基本原理 …… 171
4.1 电气控制系统的一般功能原理 …… 171
4.2 逻辑控制的基本概念 …… 173
4.2.1 继电逻辑 …… 174
4.2.2 数字逻辑 …… 176
4.2.3 梯形图逻辑 …… 176
4.3 电气控制的基本控制环节 …… 178
4.3.1 三相异步电动机起停和点动控制 …… 179
4.3.2 可逆控制与互锁控制 …… 180
4.3.3 联锁控制 …… 183
4.3.4 自锁、互锁和联锁的逻辑控制关系 …… 183
4.3.5 多地点控制 …… 185
4.4 三相交流电动机的起动控制 …… 186
4.4.1 星-三角减压起动控制线路 …… 186
4.4.2 自耦变压器减压起动控制线路 … 188
4.4.3 三相绕线转子异步电动机的起动控制 …… 189
4.4.4 固态减压软起动控制 …… 191
4.5 三相异步电动机的制动控制 …… 199
4.5.1 反接制动控制 …… 199
4.5.2 能耗制动控制 …… 200
4.6 交流电动机的转速控制 …… 201
4.6.1 变极调速 …… 202
4.6.2 变转差率调速 …… 202
4.6.3 变频调速 …… 205
第 5 章 电气控制线路分析与设计 …… 206
5.1 电气控制线路分析的内容 …… 206
5.1.1 分析电气控制线路的具体内容和要求 …… 206
5.1.2 电气原理图阅读分析的方法与步骤 …… 207
5.2 电气控制线路设计方法 …… 212
5.2.1 电气控制线路设计的基本概念 … 212
5.2.2 通用变频器外部电气控制线路设计示例 …… 213
5.2.3 高层建筑消防水泵控制系统设计示例 …… 214
5.3 电气工艺设计基础 …… 217
5.3.1 电气工艺设计的主要内容 …… 217
5.3.2 电气设备总体配置设计 …… 217
5.3.3 电气柜、箱及非标准零件图的设计 …… 220
5.3.4 通用变频器与 PLC 控制柜的设计示例 …… 221
5.3.5 某企业金属表面处理生产线电气控制装置设计 …… 225
第 6 章 基于西门子 TIA Portal 软件平台的 PLC 编程 …… 238
6.1 STEP 7 的逻辑块与程序结构 …… 238
6.1.1 逻辑块类型 …… 238
6.1.2 S7 程序结构与调用层次 …… 240
6.2 块编程 …… 243
6.2.1 程序编辑窗口 …… 243
6.2.2 代码块编程的基本步骤 …… 244
6.2.3 梯形图 LAD 编程语言编程 …… 246
6.3 基本指令 …… 249
6.3.1 位逻辑指令 …… 249
6.3.2 定时器指令 …… 259
6.3.3 计数器指令 …… 263
6.3.4 比较指令 …… 265
6.3.5 移动指令 …… 267
6.3.6 程序控制指令 …… 268
6.3.7 算数指令 …… 269
第 7 章 可通信智能化低压电器与现场总线 …… 271
7.1 低压电器数据通信的概念 …… 271

7.1.1　现场总线 …… 271
7.1.2　通信规约 …… 271
7.1.3　低压电器的数据交换接口形式 … 273
7.1.4　使用通信适配器连接上层现场总线系统的规定 …… 273
7.2　网络控制的内容 …… 274
7.3　可通信低压开关电器简介 …… 274
7.4　智能化配电系统简介 …… 276
参考文献 …… 278

第 1 章　常用低压电器的基本原理

1.1　概述

低压电器包括配电电器和控制电器两大类，是组成成套电气设备的基础配套元件。本书将“低压电器”定义为：应用于额定电压在 DC1200V、AC1500V 及以下的电路中，能实现各种电气控制功能的基本电器元件。采用电磁原理构成的低压电器元件，称为电磁式低压电器；利用电子元件构成的低压电器元件，称为电子式低压电器；利用现代控制原理构成的低压电器元件或装置，称为自动化电器、智能化电器或可通信电器；根据低压电器的结构原理及用途，又有终端组合电器和模数化电器等。

本书主要介绍常用低压电器及一些新型电器的结构、工作原理、用途及其应用，不涉及元件的设计、制造。另外，介绍它们的图形符号及文字符号，为电气控制线路设计打下基础。

1.1.1　常用低压电器的分类

低压电器的种类繁多，功能和结构多样，用途广泛，其分类方法亦很多，通常按下列方法分类。

1. 按用途和功能分类

1）控制电器，主要用于开关设备中作线路控制、信号传递和联锁等。

2）配电电器，主要用于低压配电电路中，作为电源开关、保护元件等。

3）开关电器，主要用于控制一个或几个电路的通断。

4）终端电器，是配电线路末端的一种小型化、模数化的组合式开关电器，可根据需要组合成具有配电、保护、控制等功能的配电设备。

5）执行元件，执行元件又称为执行机构或执行器，主要用于完成某种控制动作。在现代电气控制系统中，控制线路或控制器的输出需要通过执行元件驱动受控对象来实现控制功能。执行器按动力源可分为电气式、液压式、气动式及其他方式。

6）智能电器，以微处理器为核心，集成多种功能，具有感知、运算、分析、判断和执行的能力，可实现多个电器产品的功能。

7）可通信电器，带有通信接口的智能电器，可与工业控制网络连接，以进行网络化控制。

上述电器按应用场合又可分为一般工业用电器、通用电器、配电电器、牵引电器、防爆电器、真空电器、矿用电器、航空电器、船舶电器、建筑电器、农用电器等。专供安装在建筑物内的开关设备和控制设备称为户内开关设备和控制设备。可供露天安装、耐风、雪、尘土、凝露、冰及浓霜的开关设备和控制设备称为户外开关设备和控制设备。

2. 按低压电器类别分类

低压电器按类别分类可分为低压断路器、接触器、刀开关、熔断器、主令电器、继电

器、执行电器、安装附件、成套电器、电工仪表、自动装置等。其中，每一类按功能、结构和工作原理又可分为若干类。表 1-1 总结了常用的低压电器的主要种类及用途。

表 1-1 常用的低压电器的主要种类及用途

序号	类 别	主 要 品 种	用 途
1	刀开关、隔离器	开启式刀开关	主要用于电源隔离和短路保护
		负荷开关	
		熔断器式刀开关	
		隔离器	
		隔离开关熔断器组	
2	熔断器	有填料熔断器	主要用于电路短路保护
		无填料熔断器	
		半封闭插入式熔断器	
		快速熔断器	
		自复熔断器	
3	断路器	万能式断路器	主要用于电路的电源开关，不频繁接通和断开的电路，并具有过载、短路、欠电压、漏电流等保护功能
		智能型（可通信）断路器	
		塑料外壳式断路器	
		模数化断路器	
		剩余电流保护断路器	
		真空断路器	
4	接触器	交流接触器	主要用于远距离频繁操作控制，以实现自动控制
		直流接触器	
		可逆接触器	
		切换电容器接触器	
		真空接触器	
		双电源自动转换开关	
5	热继电器	带断相保护热继电器	专用于对三相异步电动机过载保护
		热继电器	
6	继电器	电流继电器	用于各种控制电路中，实现逻辑控制，以及将被控量转换成标准的工业信号，实现物理量控制
		电压继电器	
		时间继电器	
		中间继电器	
		温度继电器	
		压力继电器	
		速度继电器	
		电磁继电器	

（续）

序号	类　别	主 要 品 种	用　途
7	主令电器	按钮	用于发布操作指令和信号，以及位置控制与保护、电源切换、控制回路切换、负荷通断等
		指示灯	
		限位开关、光电开关	
		微动开关	
		接近开关	
		万能转换开关	
		组合开关	
		凸轮控制器	
8	传感器	物理量传感器	检测压力、温度、流量等各种物理量
		电学量传感器	检测电流、电压等电量，并转换为标准值
		变送器	将检测的量输出为规定标准工业信号
		微机电系统（MEMS）	用于任何控制器的一体化微器件系统
8	执行器	制动电磁铁	用于逻辑执行，起重、牵引、制动等
		起重电磁铁	
		牵引电磁铁	
		执行电机	
		电阻器、电抗器	
9	成套装置	自耦减压起动器	用于电动机、电气控制线路操作，实现控制功能
		星-三角起动器	
		无功补偿装置	
		配电箱、照明箱、计量箱、插座箱	
		开关柜	
		控制柜	
		电力电子装置	
10	电气附件	接线端子、母线排、接插器、塑料护套、尼龙扎带、行线槽、母线槽、电缆桥架、电缆分支箱、绝缘端头、插头插座、连接器、缠绕管、导轨、连接导线等	用于电气装置安装
11	自动化装置	通用变频器	实现自动控制系统和网络化控制
		软起动器	
		可编程序控制器	
		伺服控制器	
		步进控制器	
		人机界面	
		直流调速器	

（续）

序号	类　别	主 要 品 种	用　途
12	保护与避雷装置	接地棒	用于线路保护，实现各种保护功能
		避雷器	
		消谐器	
		浪涌保护器	
		滤波器	

3. 传感器

传感器是能感受被测量（外界信号）并按照一定的规律转换成可用输出信号（通常是电信号）的器件或装置，通常由敏感器（敏感元件）和转换器（转换元件）组成。敏感器是传感器中能直接感受或响应被测量的部分。转换器是传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适合于传输或测量的电信号部分。典型的转换器模拟敏感器的变化并输出模拟电信号（标准工业信号），或通过数字化 A/D 转换器输出数字电信号。当输出为规定的标准工业信号时，则称为变送器。在电气控制系统中，过程控制用传感器是一种前置部件，它将工业过程中的被测物理量信号，如压力、温度、流量、位移等信号转换成标准工业控制信号，如 0～10V、4～20mA、0～20mA 等，从而得到所需的测量数据和控制信号。在物联网中，各类传感器将利用射频识别（RFID）技术和通信技术被镶嵌到任何需要联网通信的“物体”中。

传感器的类别繁多，按其感知外界信号的原理，主要有物理量传感器、热学量传感器、化学量传感器、光（学量）传感器、生物量传感器、磁（学量）传感器、电学量传感器、声（学量）传感器、结构型传感器、物性型传感器、复合传感器、模拟式传感器、数字式传感器、集成传感器、多功能传感器、智能化传感器、微传感器、微机电系统（Micro Electro Mechanical Systems，MEMS）等类别。每一类别又包括若干种类的传感器。

物理量传感器是能感受规定物理量并转换成可用输出信号的传感器，如压力传感器、流量传感器、液位传感器、湿度传感器、速度传感器、位置传感器、称重传感器等。

热学量传感器是能感受热学量并转换成可用输出信号的传感器，如带有各种感温元件的温度传感器。化学量传感器是能感受规定化学量并转换成可用输出信号的传感器，如各种气体传感器。光（学量）传感器是能感受光并转换成可用输出信号的传感器，如红外光传感器、光纤传感器等。生物量传感器是能感受规定生物量并转换成可用输出信号的传感器，如微生物传感器、生理量传感器等。

磁（学量）传感器是能感受磁学量并转换成可用输出信号的传感器，如磁场强度传感器、光纤磁场传感器等。电学量传感器是能感受电学量并转换成可用输出信号的传感器，如电流和电压传感器、光纤电流和电压传感器等。声（学量）传感器是能感受声学量并转换成可用输出信号的传感器，如噪声传感器等。

结构型传感器利用机械构件（如金属膜片等）的变形检测被测量的传感器。物性型传感器是利用材料的物理特性及其各种物理、化学效应检测被测量的传感器。复合传感器是由多种不同类型的敏感元件或传感器组合而成、具有多种功能的传感器。

模拟式传感器是输出信号为模拟量的传感器。数字式传感器是输出信号为数字量或数字

编码的传感器。集成传感器是将敏感元件连同信号处理电路集成在一起的传感器。多功能传感器是能感受两种或两种以上被测量的传感器。智能化传感器是能对传感器自身状态具有一定自诊断、自补偿、自适应及双向通信功能的传感器。

微传感器是采用微加工技术制造的传感器。微机电系统（MEMS）是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、通信接口和电源等部件组成的一体化微器件系统。它把信息获取、处理和执行集成在一起，组成多功能微型系统，集成于大尺寸系统中，从而可大幅度地提高系统的自动化、智能化和可靠性。可以说，任何控制器或传感器都可以使用这一技术，目前典型的应用有数字光处理器、电子墨水、数码纸、微型陀螺仪和没有弹簧的体重计等。MEMS 将在物联网中广泛应用。

4. 电工仪表、过程仪表

电工仪表、过程仪表在电气控制系统中应用广泛，如电流表、电压表、功率表、智能配电仪表、变送器、温度仪表、压力仪表、物位仪表、智能数字显示控制仪表等。

1.1.2　关于现代电气技术的一些新概念

现在关于什么是“现代电气技术”尚没有明确的定义，但是现代电气技术跨领域地采用了新材料、新产品、新技术及新应用的特征，是有别于传统电气技术的。它具有高性能、高可靠性、智能化、可通信、模块化、组合化和环保的时代特征。在即将来临的物联网、智能电网和智慧地球时代，“现代电气技术”将融合“智能感知与识别技术”、“智能处理技术”与“智能终端技术”，一些低压电器将成为智能电网中的智能配电终端设备和元件，“电气技术”将发生翻天覆地的变化。

1. 智能化电器

智能化电器是一种带微处理器的集控制、保护、自诊断、故障记录、显示、通信等功能于一体的电器。智能化电器以微处理器为核心，集成多种功能，具有感知、运算、分析、判断和执行的能力，可实现多个电器产品的功能。如智能化断路器的主要特征是装有智能脱扣器，可实现长延时、短延时、瞬时过电流等全电流范围多段选择性保护，以及接地故障、欠电压保护等。可显示电压、电流、频率、有功功率、无功功率、功率因数等运行参数，还可派生电量监控及电能分析等功能。

2. 可通信电器

可通信电器是一种具有双向通信功能的智能化电器，主要由智能化电器、智能控制器和通信适配器组成，带有内部总线，内置开放式通信协议，通过标准串行通信接口 RS485 或 RS232 或以太网通信接口等与适配器连接，通信规约标准化，可实现不同通信协议与 TCP/IP 协议的转换，具有智能控制、网络化控制、区域选择性保护、区域联锁和负载监控、故障预警、维护、运行管理等功能。能与多种现场总线（如 PROFIBUS-DP、DeviceNet 、Modbus 和 AS-i）通信，形成统一的监控、保护与信息网络系统。

智能配电网（Smart Distribution Grid，SDG）中的智能配电终端装置的基本特征是具有双向通信和远程测控功能，能实现自治和可观测，实现保护、测量、控制、计量、通信一体化，能实现电网安全自愈。通过光纤高速网络、电力载波和无线通信技术可实现广域测控技术，通过实时同步采集运行信息可对电网进行动态实时监控。

例如，西门子公司的 SENTRON 3WL 系列断路器通过 3WL 内部系统总线可与电子脱扣

器 ETU45B、ETU55B 和 ETU76B 连接通信，通过 COM15 通信模块可实现 PROFIBUS-DP 通信。SENTRON 3VL 系列断路器通过 COM10 通信模块或 SEMEAS PAC3200 多功能测量设备可实现 PROFIBUS-DP 通信。SIMOCODE-DP 3UF5 系列电机保护与控制设备通过配置 SIMOCODE-DP 软件可对电机进行可视化在线参数分配、操作、监控和测试、数字化保护、智能控制和网络化管理和控制，包括电动机的直接起动、可逆起动、Y/△转换起动和自耦变压器减压起动、电磁阀起动、软起动器起动、换相控制等。

3. 模数化、模块化和组合化电器

模数化使电器外形尺寸标准化，便于安装和组合，不同额定值或不同类型电器可实现部件通用化，例如以 C45 为代表的各种品牌的小型化高分断能力低压断路器，按 9mm 模数宽度使产品外形标准化，不同系列不同额定值的均可安装在统一的 35mm 安装轨上，并可与模数化的熔断器、隔离器和电源插座等组合安装在一个安装平面上。

模块化电器通过不同的功能模块积木式组合，可使电器获得不同的功能，如新型小容量接触器都设计成多功能组合模块式结构，在接触器主体的上下左右侧可按需要加装机械联锁、延时元件、辅助触头和瞬态过电压抑制元件等模块，以实现不同的功能要求。

组合化是实现电器产品多功能化的重要途径，一般有功能组合和组合功能两种方式，可使不同功能的电器组合在一起，有利于使电器结构紧凑，减少线路中所需元件品种，并使保护特性得到良好配合。功能组合是由产品结构上采用独立功能的组件进行积木式拼装结构。组合功能是把两种及以上的电器组合在一起。功能协调是组合电器和成套电器的基础。如刀开关-熔断器组合电器、熔断器-接触器组合电器、熔断器-断路器组合电器等。

4. 智能终端元件或设备

智能电网（Intelligrid；Smart Grid）是一种由电源框架和信息框架构筑的一种系统、高效、智能的电网体系框架，这个体系框架中的电源以火电、水电、核电等传统能源为骨干，以平衡方式接入新能源发电系统，并有充足的分布式存储系统；整个体系框架中遍布着各种传感器和测量设备、智能控制装置，具有先进的数据通信、计算和能源信息管理系统。中国发展智能电网的目标是以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展，形成坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的统一坚强智能电网（Strong Smart Grid），其中的重要目标之一是建立以电力为中心的能源优化利用、经济、信息综合、优质服务的智能配电网与用电系统，在低压配电系统中实行电力需求侧管理，适应分布式发电和微电网的接入，支持可再生能源的接入，使电力需求侧管理功能更加完善和提高，实现与用户交互，用户可根据需求和供电能力来调整、平衡自身消费，从而优化资源，提高电网运行效率，提升服务水平。可通信电器将成为智能电网中的重要智能终端元件或设备。

智能电网中的智能配电网以网络化断路器、接触器、继电器、电力仪表、远程 I/O 等智能元件为控制基础，实现对配电回路中的主要电参数远程实时监测、控制和维护。目前，ABB 公司的 i-bus®智能建筑控制系统采用 KNX 协议，涵盖模块化元件、各类传感器和驱动控制设备、信号监视设备、中央控制系统等。它在一个系统内集成了包括照明与百叶窗控制、暖通空调、安防与监控和能源管理等功能。在 i-bus®系统中，状态控制照明传感器在感测到室内和公共区域有一段时间无人活动后，会自动关闭照明设备，而超级光敏传感器可根据楼宇的自然光强度，对照明设备的亮度进行自动调节等。如在办公楼应用中，i-bus®系统可以通过中央控制的图形化界面对整个办公楼的灯光、遮阳、空调等进行集中监视和控

制，还可根据自然光线变化自动控制、调节公共区域和景观的照明。在家居应用中，通过 i-bus®系统可以对家中每一个功能区的灯光、空调、窗帘等各类设施进行智能控制。

5. 物联网

2009 年 11 月 3 日温家宝总理在《让科技引领中国可持续发展》的讲话中提到：全球互联网正在向下一代升级，传感网和物联网方兴未艾。“智慧地球”简单说来就是物联网与互联网的结合，就是传感网在基础设施和服务领域的广泛应用。我们要着力突破传感网、物联网的关键技术，及早部署后 IP 时代相关技术研发，使信息网络产业成为推动产业升级、迈向信息社会的“发动机”。

物联网（The Internet of Things）被认为是继计算机、互联网、移动通信网之后的新的里程碑。物联网是将镶嵌了各种信息传感设备的“物体”，按规约化通信协议联网，通过各种有线和无线网络与互联网融合，进行信息交换和通信，实时采集任何联网和监控的“物体”的信息，并进行智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种“物物相连的互联网”。其中的“物”都具有唯一的标签或标识码（ID）和物理属性，使用智能接口和虚拟网络实现与信息网络的无缝整合。各种信息传感设备包括各种智能传感器、射频识别（RFID）、红外感应器、激光扫描器、无线数据通信、全球定位系统等。由此可见，物联网是对现有网络化、智能化、自动化系统的拓展与提升，其用户端拓展到了任何“物体”与“物体”之间的信息交换和通信，具有互联网、自动识别、通信和智能化特征。

物联网上部署了海量的各种类型的传感器，每个传感器都是一个信息源，获得的数据具有实时性，并不断更新数据，在网络传输中会形成海量信息，物联网从获得的海量信息中分析、加工和处理出有意义的数据，利用云计算、模式识别等智能处理技术，使处理后的数据适应不同的需求和应用。从网络架构上看，物联网可分为感知层、网络层和应用层。感知层由各种传感器及传感器网关构成感知终端，主要功能是识别物体、采集信息。网络层由各种局域网、互联网、有线和无线通信网、网络管理系统和云计算平台等组成，负责传递和处理感知层获取的信息。除有线线缆的通信协议和网络技术外，无线通信协议和网络技术包括 RFID（Radio Frequency Identification）、GSM、WLAN、3G、LTE（Long Term Evolution）、WPAN（Wireless Personal Area Network）、WiMax（Worldwide Interoperability for Microwave Access）、Zigbee、NFC（Near Field Communication）、蓝牙等。应用层是物联网和用户（包括人、组织和其他系统）的接口，用于实现不同应用领域的应用。应用领域包括工业监控、公共安全、智能电网、智能物流、智能交通、智能城市、智能家居、智能小区、智能医疗、智能城市、智能农业、智能环保和环境监测等专业网和局域网。

随着智能电网和物联网的发展，智能配电网中的低压电器或装置将全面应用物联网技术，通过现代通信技术、计算机技术、信号检测与处理技术、自动控制技术及测量技术实现相关的信息采集和传输、智能化决策、控制和服务，成为配电网中各个应用环节中具有高度信息化、智能化的终端设备和装置。利用部署的传感器网络和配电通信网，能实现远程数据采集和视频监控，能全方位监控配电网的运行状态，提高系统安全性、可靠性、稳定性和经济性，以满足智能电网综合服务能力的需要。

6. 3C 认证与广泛采用国际标准

3C 认证（CCC 认证）是中国强制认证制度（China Compulsory Certification）的英文缩写，也是国家对强制性产品认证使用的统一标志。它主要对涉及人类健康和安全、动植物生

命和健康，以及环境保护与公共安全的产品实施强制性认证，确定统一适用的国际标准和国家标准、技术规则和实施程序，制定和发布统一的标志等。

国际标准是指国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）所制订的标准，以及国际标准化组织（ISO）公布的国际组织所制订的某些标准。还有一些先进国家的产品标准，如欧盟 CE 认证标记、美国 UL 标准、德国 VDE 标准、英国 BS 标准、法国 NF 标准、日本 JIS 标准等。采用国际标准生产是电器工业的重要技术基础，是电器工业科学技术发展的重要组成部分，是提高产品质量、参与国内外市场竞争和增强效益的重要手段，也是打破和减少技术性贸易壁垒的最基本的措施。目前许多国家直接把国际标准作为本国标准使用。近年来，我国电器工业广泛采用国际标准和国外先进标准，以及国家标准组织生产。

1.2 常用低压电器的基本问题

目前，常用低压电器多数属于电磁式电器，基本结构主要由触头系统和电磁机构组成。触头系统存在接触电阻和电弧的物理现象，对电器的安全运行影响较大；而电磁机构的电磁吸力和反力则是决定电器性能的主要因素之一。因此，触头结构、电弧、灭弧装置，以及电磁吸力和反力等是构成低压电器的基本问题，也是研究电器元件结构、应用低压电器的理论基础。低压电器的主要技术性能指标与参数就是在这些基础上制定的，深入了解低压电器的主要技术性能指标与参数，对正确设计、选用和操作低压电器元件、电气安全运行是至关重要的。

1.2.1 电器的触头和电弧

1. 电器的触头系统

（1）触头的接触电阻　触头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，电器元件的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，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，它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，仅是纯铜的十几分之一，甚至还小，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，一般常采用铜质材料。

触头之间的接触电阻包括“膜电阻”和“收缩电阻”。“膜电阻”是触头接触表面在大气中自然氧化而生成的氧化膜造成的。氧化膜的电阻要比触头本身的电阻大几十到几千倍，导电性能极差，甚至不导电，并受环境影响较大。“收缩电阻”是由于触头的接触表面不是十分光滑产生的，在接触时，实际接触面积总小于触头原有可接触面积，使有效导电截面减小，当电流流经时，就会产生电流收缩现象，从而使电阻增加及导电性能变差。如果触头之间的接触电阻较大，会在电流流过触头时造成较大的电压降落，这对弱电控制系统影响较严重。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，导致触头表面的“膜电阻”进一步增加及相邻绝缘材料的老化，严重时可使触头熔焊，造成电气事故。因

此，对各种电器的触头都规定了最高环境温度和允许温升。

除此之外，触头在运行时还存在触头磨损，触头磨损包括电磨损和机械磨损。电磨损是引起触头材料损耗的主要原因之一。电磨损是由于在通断过程中触头间的放电作用使触头材料发生物理性能和化学性能变化而引起的，电磨损的程度决定于放电时间内通过触头间隙的电荷量的多少及触头材料性质等。机械磨损是由于机械作用使触头材料发生磨损和消耗。机械磨损的程度取决于材料硬度、触头压力及触头的滑动方式等。为了使接触电阻尽可能减小，一是要选用导电性好、耐磨性好的金属材料做触头，使触头本身的电阻尽量减小；二是要使触头接触紧密一些，另外在使用过程中尽量保持触头清洁。

（2）触头的接触形式　触头的接触形式及结构形式很多，通常按其接触形式归为点接触、线接触和面接触三类，如图 1-1 所示。触头的结构形式有指式触头和桥式触头等。微型继电器中常采用分裂触头和片簧触头。

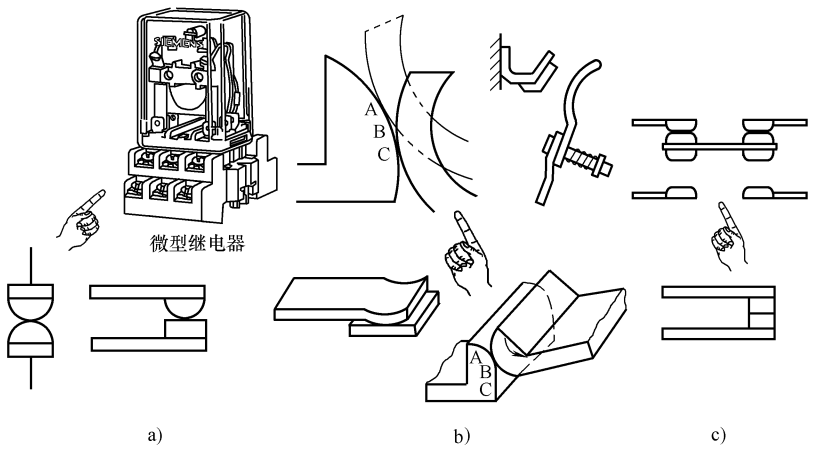


图 1-1　触头的接触形式

a）点接触　b）线接触　c）面接触

由图 1-1 可见，面接触的实际接触头要比线接触的多，而线接触的又要比点接触的多。图 1-1a 所示为点接触，它由两个半球形触头或一个半球形与一个平面形触头构成，这种结构容易提高单位面积上的压力，减小触头表面电阻。点接触常用于小电流电器中，如接触器的辅助触头和继电器触头。图 1-1b 所示为线接触，常做成指形触头结构，它的接触区是一条直线。触头通、断过程是滚动接触并产生滚动摩擦，以利于去除表面的氧化膜。开始接触时，静、动触头在 A 点接触，靠弹簧压力经 B 点滚动到 C 点，并在 C 点保持接通状态。断开时作相反运动，这样可以在通断过程中自动清除触头表面的氧化膜。同时，长时期工作的位置不是在易烧灼的 A 点而在 C 点，保证了触头的良好接触。这种滚动线接触适用于操作次数多、电流大的场合，多用于中等容量电器。图 1-1c 所示为面接触，这种触头一般在接触表面上镶有合金，以减小触头接触电阻，提高触头的抗熔焊、抗磨损能力，允许通过较大的电流。中小容量的接触器的主触头多采用这种结构。

以按钮操作为例，触头的闭合过程如图 1-2 所示。

图 1-2 是两个点接触的桥式触头，两个触头串于同一条电路中，构成一个桥路，电路的接通与断开由两个触头共同完成。桥式触头在接触时，接触电阻应尽可能小，为了使触头接触得更加紧密，以减小接触电阻，消除开始接触时产生的振动，一般在制造时，在触头上装

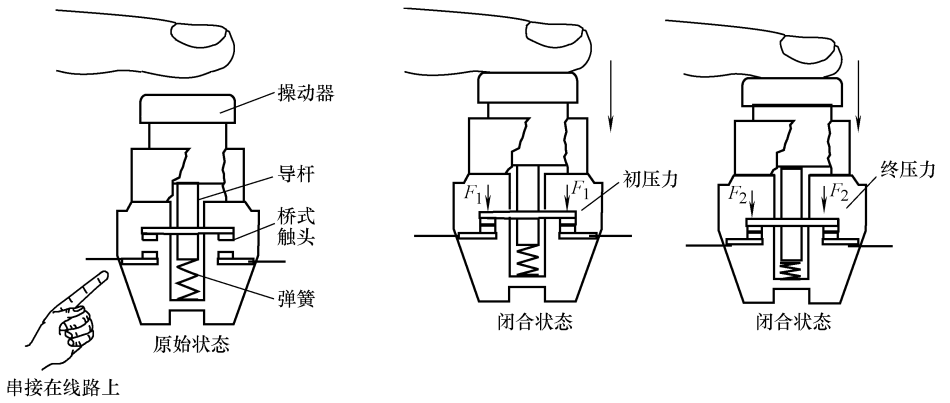


图 1-2 触头的闭合过程

有接触弹簧，使触头在刚刚接触时产生初压力，并且随着触头的闭合过程逐渐增大触头互压力，使两个触头的接触处有一定的压力，当动触头刚与静触头接触时，由于安装时弹簧预先压缩了一段（预行程），因此产生一个初压力 F_1，如图 1-2 中间图所示。触头闭合后由于弹簧在超行程内继续变形而产生一终压力 F_2。弹簧压缩的距离 L 称为触头的超行程，即从静、动触头已达闭合位置后，整个触头系统相对运动，向前再压紧的距离，也就是操动器的行程。有了超行程，在触头磨损情况下，仍具有一定压力，磨损严重时超行程将失效，如图 1-2 右图所示。

（3）触头的状态 触头按其原始状态可分为常开触头和常闭触头。原始状态时（即线圈未通电）断开，线圈通电后闭合的触头叫常开触头。原始状态闭合，线圈通电后断开的触头叫常闭触头。线圈断电后所有触头复原。按触头控制的电路可分为主触头和辅助触头。主触头用于接通或断开主电路，允许通过较大的电流，辅助触头用于接通或断开控制电路，只能通过较小的电流。

2. 电弧的产生及灭弧方法

（1）电弧的产生及其物理过程 在自然环境中开断电路时，如果被开断电路的电流（电压）超过某一数值时（根据触头材料的不同其值约在 0.25～1A、12～20V 之间），则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。所谓气体放电，就是触头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，于是绝缘的气体就变成了导体。电流通过这个游离区时所消耗的电能转换为热能和光能，发出光和热的效应，产生高温并发出强光，使触头烧损，并使电路的切断时间延长，甚至不能断开，造成严重事故。电弧对电器的影响主要有以下几个方面：① 触头虽已打开，但由于电弧的存在，使要断开的电路实际上并没有断开。② 由于电弧的温度很高，严重时可使触头熔化。③ 电弧向四周喷射，会使电器及其周围物质损坏，甚至造成短路，引起火灾。所以必须采取措施熄灭或减小电弧，为此首先要了解电弧的物理本质，即电弧产生原因。电弧产生的原因主要经历强电场放射、撞击电离、热电子发射和高温游离 4 个物理过程，如图 1-3 所示。

1）强电场放射。触头开始分离时，其间隙很小，电路电压几乎全部降落在触头间很小很小的间隙上，因此该处电场强度很高，可达几亿 V/m。此强电场将触头阴极表面（与电

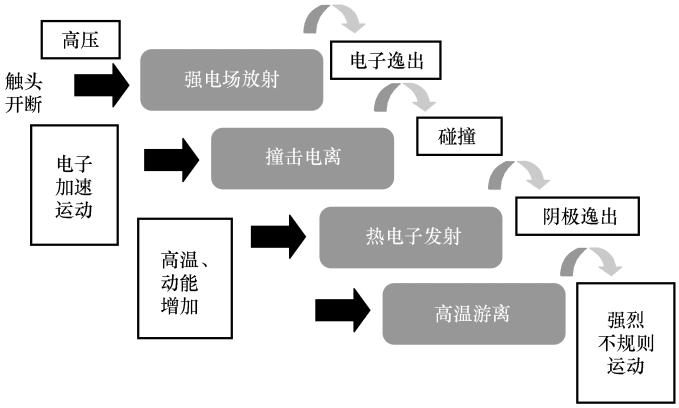


图 1-3　电弧产生的 4 个物理过程

源负极连接的触头）的自由电子拉出到气隙中，使触头间隙气体存在较多的电子，这种现象即所谓强电场放射。

2）撞击电离。触头间隙中的自由电子在电场作用下，向正极加速运动，经过一定路程后获得足够的功能，它在前进途中撞击气体原子，该原子被分裂成电子和正离子。电子在向正极运动过程中将撞击其他原子，使触头间隙中气体中的电荷越来越多，这种现象称为撞击电离。触头间隙中的电场强度越强，电子在加速过程中所走的路程越长，它所获得的能量就越大，故撞击电离的电子就越多。

3）热电子发射。撞击电离产生的正离子向阴极运动，撞击在阴极上会使阴极温度逐渐升高，使阴极金属中电子动能增加，当阴极温度达到一定程度时，一部分电子有足够动能将从阴极表面逸出，再参与撞击电离。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。当电弧间隙中气体的温度升高时，气体分子热运动速度加快。当电弧的温度达到 3000℃或更高时，气体分子将发生强烈的不规则热运动并造成相互碰撞，结果使中性分子游离成为电子和正离子。这种因高温使分子撞击所产生的游离称为高温游离。当电弧间隙中有金属蒸汽时，高温游离大大增加。

在触头分断的过程中，以上 4 个过程引起电离原因的作用是不一致的。在触头刚开始分离时，首先是强电场放射，这是产生电弧的起因。当触头完全打开时，由于触头间距离增加，电场强度减弱，维持电弧存在主要靠热电子发射、撞击电离和高温游离，而其中又以高温游离作用最大。此外，伴随着电离的进行，还存在着消电离作用。消电离是指正负带电粒子的结合成为中性粒子的同时，又减弱了电离的过程。消电离过程可分为复合和扩散两种。

当正离子和电子彼此接近时，由于异性电荷的吸力结合在一起，成为中性的气体分子。另外，电子附在中性原子上成为负离子，负离子与正离子相遇就复合为中性分子。这种复合只有在带电粒子的运动速度较低时才有可能发生。因此利用液体或气体人工冷却电弧，或将电弧挤入绝缘壁做成的窄缝里，迅速导出电弧内部的热量，降低温度，减小了离子的运动速度，可以加强复合过程。

在燃弧过程中，弧柱内的电子、正负离子要从浓度大、温度高的地方扩散到周围的冷介质中去，扩散出来的电子、离子互相结合又成为中性分子。因此降低弧柱周围的温度，或用人工方法减小电弧直径，使电弧内部电子、离子的浓度增加，就可以增加扩散作用。

电离和消电离作用是同时存在的。当电离速度快于消电离速度，电弧就发展；当电离与消电离速度相等时，电弧就稳定燃烧；当消电离速度大于电离速度时，电弧就要熄灭。因此，欲使电弧熄灭可以从两方面着手：一方面是减弱电离作用，另一方面是增强消电离作用。实际上，作为减弱电离作用的措施同时也往往是增强消电离作用的途径。为熄灭电弧，其基本方法有：① 拉长电弧，以降低电场强度。② 用电磁力使电弧在冷却介质中运动，降低弧柱周围的温度。③ 将电弧挤入绝缘壁组成的窄缝中以冷却电弧。④ 将电弧分成许多串联的短弧，增加维持电弧所需的临界电压降的要求。⑤ 将电弧密封于高气压或真空的容器中。

（2）电弧的熄灭及灭弧方法　触头在通断过程中将产生电弧，电弧会烧损触头，造成其他故障。对于通断大电流电路的电器，如接触器、低压断路器等更为突出，因此要有较完善的灭弧装置。对于小容量继电器、主令电器等，由于触头通断电流小，因此有时不设专门的灭弧装置。根据以上分析的原理，常用的灭弧装置有桥式结构双断口灭弧、栅片灭弧、磁吹灭弧以及过电压和浪涌电压抑制器等几种。

1）桥式结构双断口灭弧。图 1-4 是一种桥式结构双断口触头，流过触头两端的电流方向相反，将产生互相推斥的电动力。当触头打开时，在断口中产生电弧。电弧电流在两电弧之间产生图中以“⊗”表示的磁场，根据左手定则，电弧电流要受到一个指向外侧的电动力 F 的作用，使电弧向外运动并拉长，使它迅速穿越冷却介质而加快电弧冷却并熄灭。此外，也具有将一个电弧分为两个来削弱电弧的作用。这种灭弧方法效果较弱，故一般多用于小容量的电器中。但是，当配合栅片灭弧后，也可用于大容量的电器中。交流接触器常采用这种灭弧方法。

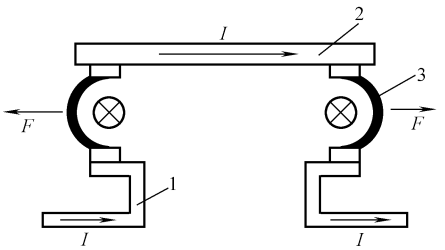


图 1-4　桥式触头灭弧原理

1—静触头　2—动触头　3—电弧

2）栅片灭弧。栅片灭弧原理如图 1-5 所示。

灭弧栅一般是由多片镀铜薄钢片（称为栅片）和石棉绝缘板组成、它们安放在电器触头上方的灭弧室内，彼此之间互相绝缘，片间距离约 2 ~ 5mm。当触头分断电路时，在触头之间产生电弧，电弧电流产生磁场，由于钢片磁阻比空气磁阻小得多，因此，电弧上方的磁通非常稀疏，而下方的磁通却非常密集，这种上疏下密的磁场将电弧拉入灭弧罩中，当电弧进入灭弧栅后，被分割成数段串联的短弧。这样每两片灭弧栅片可以看作一对电极，而每对电极间都有 150 ~ 250V 的绝缘强度，使整个灭弧栅的绝缘强度大大加强，而每个栅片间的电压不足以达到电弧燃烧电压，同时栅片吸收电弧热量，使电弧迅速冷却而很快熄灭。

当触头上所加的电压是交流时，交流电产生的交流电弧要比直流电弧容易熄灭。因为交流电每个周期有两次过零点，显然电压为零时电弧自然容易熄灭。另外，灭弧栅对交流电弧还有所谓“阴极效应”，更有利于电弧熄灭。所谓“阴极效应”，是当电弧电流过零后，间隙中的电子和正离子的运动方向要随触头电极极性的改变而改变。由于正离子比电子质量大得多，因此在触头电极极性改变后（即原阳极变为新阴极，原阴极变为新阳极），原阳极附近的电子能很快地回头向相反的方向运动（走向新阳极），而正离子几乎还停留在原来的地方。这样使得新阴极附近缺少电子而造成断流区，从而使电弧熄灭。若要使电压过零后，电弧重新燃烧，两栅片间必须要有 150 ~ 250V 电压。显然灭弧栅总的重燃电压所需值将大于

电源电压，则电弧自然熄灭后就很难重燃。因此，灭弧栅装置常用作交流灭弧。

3）磁吹灭弧。磁吹灭弧方法是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隙中运动，产生强烈的消电离作用，从而将电弧熄灭。其原理如图 1-6 所示。

图 1-6 中，导磁体（软钢）2 固定于薄钢板 a 和 b 之间，在它上面绕有线圈（磁吹线圈）1，线圈可做成与触头电路串联，当主电流 I 通过线圈 1 产生磁通 Φ，根据右手螺旋定则可知，该磁通从导磁体 2 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。图中，“×”符号表示 Φ 方向为进入纸面。当触头打开时，

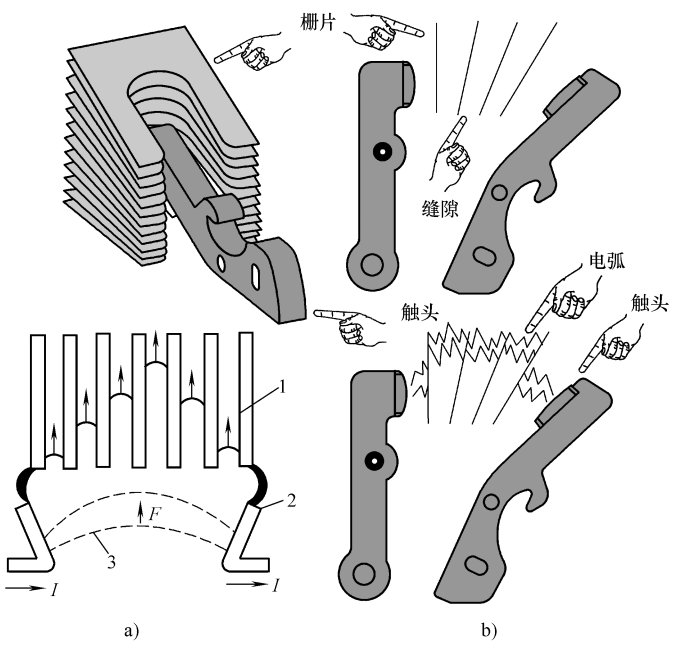


图 1-5　栅片灭弧示意图

a）电弧进入栅片被分割　b）灭弧栅片和触头的结构

1—灭弧栅片　2—动触头　3—电弧

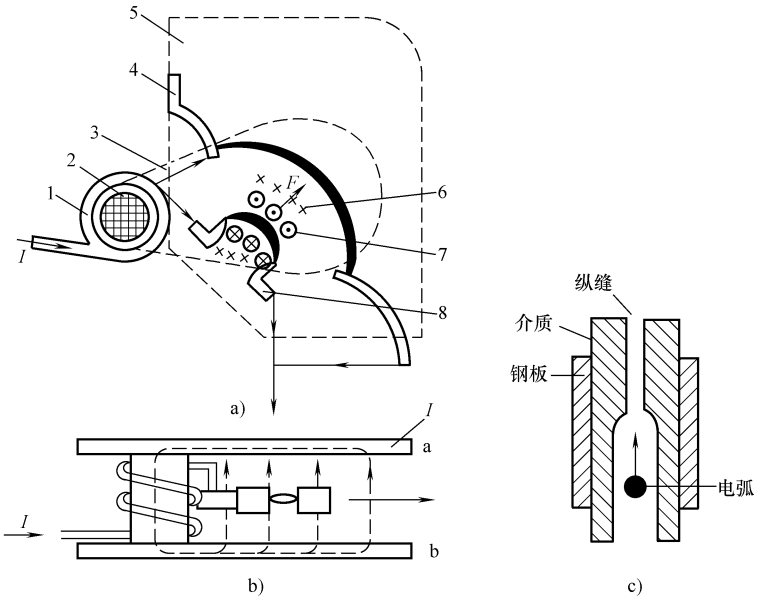


图 1-6　磁吹灭弧原理

a）磁吹线圈对电弧产生推力　b）磁吹线圈的俯视图　c）窄缝灭弧示意图

1—磁吹线圈　2—导磁体（铁心）　3—导磁夹板　4—引弧角

5—灭弧罩　6—磁吹线圈磁场　7—电弧电流磁场　8—动触头

在触头间隙中产生电弧，电弧自身也产生一个磁场，该磁场在电弧上侧，方向为从纸面出来，用“⊙”符号表示，它与线圈产生的磁场方向相反。而在电弧下侧，电弧磁场方向进入纸面，用“⊗”符号表示，它与线圈的磁场方向相同。这样，两侧的合成磁通就不相等，下侧大于上侧，因此，产生强烈的电磁力将电弧向上侧推动，并使电弧急速进入灭弧罩，电弧被拉长并受到冷却而很快熄灭。灭弧罩多用陶瓷或石棉做成。这种灭弧方法的优点是，当触头中电流方向改变时，由于外磁场的方向也跟着改变，而电弧受力的方向不变，灭弧吹力的大小在设计时可以控制，可使吹力最大，灭弧效果好。此外，由于这种灭弧装置是利用电弧电流本身灭弧，因而电弧电流越大，吹弧能力也越强，广泛应用于直流灭弧装置中（如直流接触器中）。但对于线圈与触头串联的形式，其吹力与电流的二次方成正比，当电流减小时，吹力成二次方减小，会使灭弧效果减弱。对于并联线圈的磁吹装置，可以做到由外加固定电源供电而使线圈的磁通稳定不变，因而吹力大小只受触头电流大小的影响。但要注意线圈的极性和触头的极性，如果将两者的极性接反，则使电弧吹向内侧，反而会烧坏电器。

4）过电压和浪涌电压抑制器。控制电器的触头在切断具有电感负载的电路时，由于电流由某一稳定值突然降为零，电流的变化率 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 很大，就会在触头间隙产生较高的过电压，此电压超过 270～300V 时，就会在触头间隙产生火花放电现象。火花放电与电弧不同之处是，火花放电的电压高，电流小，而且是在局部范围产生不稳定的火花放电。火花放电将使触头产生电灼伤以致缩短它的寿命。另外火花放电造成的高频干扰信号将影响和干扰无线电通信及弱电控制系统的正常工作，为此需要消除由于过电压引起的火花放电现象。常用的熄火花电路有以下两种。

① 半导体二极管与线圈并联整流式抑制器，如图 1-7 所示，在触头 K 闭合时，线圈电感 L 中流有稳定的电流。当触头突然断开时，由于二极管 VD 的存在，使电流不是从某一稳定值突然降为零，而是由电感 L 和二极管 VD 组成放电回路使电流逐渐降为零，即减小了电流的变化率 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$，从而减小了电感 L 产生的过电压。这样使触头 K 的间隙不会产生火花放电，另外也使电感 L 的绝缘不会因过电压而击穿。

② 与触头并联阻容电路 RC 抑制器，如图 1-8 所示，在触头 K 突然断开时，线圈电感 L 的磁场能量就转为电容的电场能量，此时表现为对电容器的充电。因此，触头突然断开时，线圈电感 L 的电流也是不立刻降为零，而是随着电容器逐渐充满电荷而降为零，线圈就不会产生过电压。

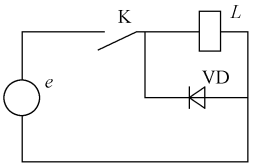


图 1-7 与电感线圈并联二极管

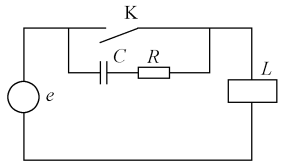


图 1-8 与触头并联阻容电路

1.2.2 电磁机构

电磁机构是电磁式继电器和接触器等的主要组成部件之一，其工作原理是将电磁能转换成为机械能，从而带动触头动作。

1. 电磁机构的结构形式

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、铁轭、衔铁和空气隙。吸引线圈通以一定的电压或电流产生激励磁场及吸力，并通过气隙转换为机械能，从而带动衔铁运动使触头动作，以完成触头的断开和闭合。图 1-9 是几种常用的电磁机构结构型式示意图。

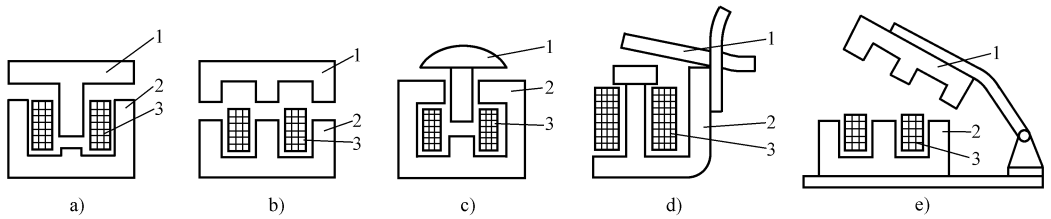


图 1-9　常用电磁机构的结构型式

1—衔铁　2—铁心　3—线圈

图 1-9a、b 和 c 所示的衔铁是作直线运动的直动式铁心，衔铁在磁力作用下直线运动，这种结构主要用于中小容量交流接触器和继电器中。

图 1-9d 所示的衔铁是沿棱角转动的拍合式铁心，其衔铁绕铁轭的棱角转动，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。

图 1-9e 所示的衔铁沿轴转动的拍合式铁心，其衔铁绕轴转动，铁心一般用硅钢片叠成，常用于较大容量的交流接触器。

吸引线圈按其通电种类可分为交流电磁线圈和直流电磁线圈。对于交流电磁线圈，当通交流电时，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成。对于直流电磁线圈，铁心和衔铁用整块电工软钢做成。当线圈做成并联于电源工作的线圈时，称为电压线圈，它的特点是匝数多，线径较细。当线圈做成串联于电路工作的线圈时，称为电流线圈，它的特点是匝数少，线径较粗。

2. 电磁机构的工作原理

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表示。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，如图 1-10 曲线 1 和曲线 2 所示。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如图 1-10 曲线 3 所示。电磁机构使衔铁释放的力一般有两种：一是利用弹簧的反力；二是利用衔铁的自身重力。电磁机构的吸力特性反映了电磁吸力与气隙的关系，而励磁电流的种类不同，其吸力特性也不一样，即交、直流电磁机构的电磁吸力特性是不同的。电磁机构欲使衔铁吸合，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。反映在特性图上，就是要保证吸力特性在反力特性的上方。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 δ 的增大而减小。所以，当切断电磁机构的励磁电流以释放衔铁时，其反力特性必须大于剩磁吸力，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特性之间，如图 1-10 所示。

在实际使用中，无论是直流还是交流操作，只要线圈两端电压大于释放电压，闭合状态的电磁机构都会产生大于反力弹簧反力的吸力，直流电磁机构尤为突出，但对于交流电磁铁来说，铁心中的磁通量及吸力是一个周期函数，吸力在零与最大值 F_m 之间脉动，并包括两

个分量，即直流分量和频率为 2 倍（2ω）电网频率的正弦分量，而吸力总是正的，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，见图 1-15 中的波形图，此时弹簧反力大于电磁吸力，电磁机构释放，而在 $\pi/2 \sim T$ 之间，吸力又大于反力，动铁心使电磁机构重新吸合。这样，在 $f=50\text{Hz}$ 时，每周期内衔铁吸力要两次过零，电磁机构就出现了频率为 100Hz 的持续抖动与撞击，产生相当大的噪声，严重时将使铁心损坏，显然这是不允许存在的。为了避免衔铁振动，通常在铁心端面上装一个用铜制成的分磁环或称短路环，如图 1-11 所示。

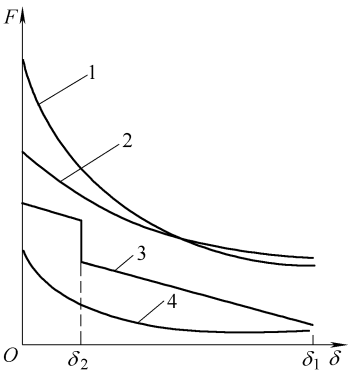


图 1-10　吸力特性和反力特性

1—直流吸力特性　2—交流吸力吸性

3—反力特性　4—剩磁特性

短路环就像是一匝两端接在一起的线圈。短路环把端面 S 分成环内部分 S_1 与环外部分 S_2（$S=S_1+S_2$）两部分。短路环仅包围了主磁通 $\boldsymbol{\Phi}$ 的一部分。这样，铁心中有两个不同相位的磁通 $\boldsymbol{\Phi}_1$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_2$，电磁机构的总吸力将是 F_1 和 F_2 之和，只要合力始终大于反力，衔铁的振动现象就会消除。

继电逻辑特性　继电器（接触器）等的电磁机构的输入-输出关系，以及其触头状态的转换称为继电特性，如图 1-12 所示。

设电磁机构线圈的电压（或电流）为输入量 x，衔铁位置为输出量 y，则衔铁吸合位置为 y_1，释放位置为 y_0。衔铁吸合的最小输入量为 x_1，称为电磁机构的最小动作值；衔铁释放的最大输入量为 x_0，称为电磁机构的最大返回值。当输入量 $x<x_1$ 时衔铁不动作，其输出量 $y=0$；当 $x=x_1$ 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 $x>x_1$，则输出量仍为 $y=1$。当输入量 x 从 x_1 减小的时候，在 $x>x_0$ 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，所以衔铁不会释放，输出量 $y=1$。当 $x=x_0$ 时，因吸力小于反力，衔铁才释放，输出量（触头状态转换）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阶跃曲线。电磁机构的继电逻辑特性决定了电气控制线路的继电逻辑功能，继电逻辑特性也称为逻辑变量，从控制角度说，也就实现了“0”或“1”的转换，即“开”或“关”的转换。因此，继电逻辑控制线路的状态逻辑函数总是等于“1”，否则就是错误的，或在未带电状态。

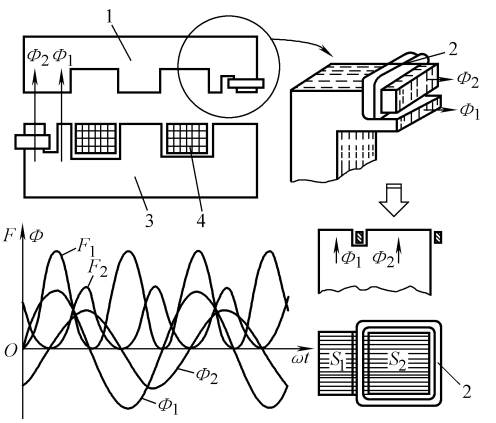


图 1-11　装短路环后的磁通及电磁力分布示意图

1—动铁心　2—短路环　3—静铁心　4—线圈

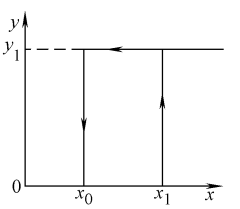


图 1-12　继电逻辑特性

继电器（接触器）的释放值与吸合值之比称为继电器的返回系数 K_f，它是继电器（接触器）重要参数之一。欲使继电器（接触器）吸合，输入量必须等于或大于吸合值；欲使继电器（接触器）释放，输入量必须等于或小于释放值。继电器（接触器）的另一个重要

参数是吸合时间和释放时间。吸合时间是指从线圈接受电信号到衔铁完全吸合所需的时间；释放时间是指从线圈失电到衔铁完全释放所需的时间。一般继电器（接触器）的吸合时间与释放时间为 0.05 ~ 0.15s，快速继电器为 0.005 ~ 0.05s，它的大小影响继电器（接触器）的操作频率。

1.3　低压电器的主要技术性能指标和参数

本节从低压电器的使用和选用角度阐述有关低压电器的主要技术性能指标和参数，了解这些内容对正确选用和使用电器元件及正确地进行设计工作是十分重要和必需的。

1.3.1　主电路电器和控制电器

电气控制电路的特性包括电流种类、交流电路的额定频率、额定控制电路电压 U_e（性质和频率）、额定控制电源电压 U_s（性质和频率）。U_e 是在控制电路中控制开关的接通触头上所出现的电压。U_s 是加在控制电路的输入端上的电压，由于接入了电源变压器、整流器或电阻器等，控制电源电压可能与控制电路电压不同。U_e 和额定频率是决定控制电路绝缘性能的参数。U_s 和额定频率是决定控制电路操作和温升特性的参数。正确的操作条件是当控制电路通过最大电流时，控制电源电压值既不应小于 85% U_s，亦不应大于 110% U_s。开路时，控制电源电压应不超过额定控制电源电压 U_s 的 120%。

低压电器根据其在线路中的作用和用途通常分为两大类：主电路开关电器和辅助电路控制电器。

主电路开关电器系指用于电气控制中配电线路或系统主电路中的开关电器及其组合，主要包括刀开关（或刀形转换开关）、隔离器（隔离开关）、熔断器及其与其他开关电器的组合、断路器（包括与其组合或联用的各种脱扣器和保护继电器）、接触器和主要由接触器与保护继电器组成的起动器等。这些开关电器在不同电路中有不同的用途和不同的配合关系，其特征和主要参数也各不相同。选用主电路开关电器，首先是要保证满足电路功能要求，即负载要求，同时也要做到所选开关电器在技术、经济指标等各方面合理，在能满足所担负的配电、控制和保护任务的前提下，能充分发挥本身所具备的各种功能和作用。为此，在选用时需了解各种开关电器的用途、分类、性能和主要参数，以及各种电器的选用原则，同时还要分析具体的使用条件和负载要求，如电源数据、短路特性、负载特点和要求等，以便提出合理的选用要求。

辅助电路控制电器指在电路中起发布命令、控制、转换、信号和联络作用的逻辑电器，包括各种主令控制电器、控制继电器、传感器触头和具有不同功能的其他控制触头等。主电路开关电器上的辅助触头及控制用附件也包括在辅助电路控制电器的范围之内。辅助电路控制电器种类繁多，其动作原理和在电路中所起的作用也各不相同。

选用辅助电路控制电器，除应满足电路对辅助电路控制电器的电气要求外，还应满足一系列其他要求，如生产过程工艺要求等，这些要求随电气控制系统的动作原理、防护等级、功能执行元件类型和具体设计的不同而异。此外，还要求这些电器具备安装方便、端子标记清楚、接线简便迅速等。

1.3.2 有关低压电器的主要技术性能、参数的概念

1. 关于开关电器的通断工作类型

（1）隔离　隔离指开关电器把电气设备和电源“隔开”的功能，用在对电气设备的带电部分进行维修时确保人员和设备的安全。隔离不仅要求各电流通路之间、电流通路和邻近的接地零部件之间应保持规定的电气间隙，电器的动、静触头之间也应保持规定的电气间隙。能满足隔离功能的开关电器是隔离器。如果在维修期间需要确保电气设备一直处于无电状态，应选用操作机构能在分断位置上锁的隔离器。

（2）无载（空载）通断　无载通断指接通或分断电路时不分断电流，分开的两触头间不会出现明显电压的情况。选用无载通断的开关电器时，必须有其他措施可保证不会出现有载通断的可能性，否则有造成事故、损坏设备，甚至危及人身安全的危险。无载通断的开关电器仅在某些专门场所使用，如隔离器。

（3）有载通断　有载通断是相对于无载通断而言，其开关电器需接通和分断一定的负载电流，具体负载电流的数据随负载类型而异。如有的隔离器产品也能在非故障条件下接通和分断电路，其通断能力应大致和其需要通断的额定电流相同。产品样本中隔离器和熔断器式隔离器的通断能力常按额定电流的倍数给出，因此有些隔离器也能分断各种工作过电流，如电动机的起动电流。

（4）控制电动机通断　控制电动机通断通常指电动机开关，电动机开关是指用来接通和分断电动机的开关电器或电路，其通断能力应能满足控制按不同工作制（如点动和反接）工作的各种型号电动机的要求。电动机开关有控制开关、电动机用负荷开关、接触器和电动机用断路器及其组合控制电路等。

（5）在短路条件下通断　在短路条件下通断负载应选用有短路保护功能的开关电器。断路器就是一种不仅可接通和分断正常负载电流、电动机工作电流和过载电流，而且可接通和分断短路电流的开关电器。

（6）通电持续率　电器的有载时间与工作时间之比，常用百分数表示。

（7）通断能力　开关电器在规定的条件下，能在给定的电压下接通和分断的预期电流值。

（8）分断能力　开关电器在规定的条件下，能在给定的电压下分断的预期分断电流值。

（9）接通能力　开关电器在规定的条件下，能在给定的电压下接通的预期接通电流值。

（10）I^2t 特性　在规定的条件下的 I^2t 值为预期电流或电压的函数。

2. 有关的电网参数

实际工作中，当选用开关电器时，必须考虑额定电压、额定频率和过电流（短路、过载）等数据。当按额定绝缘电压 U_i 和额定工作电压 U_e 选用开关电器时，电网电压和电网频率是决定性因素。额定绝缘电压 U_i 是标准电压，指在规定条件下，用来度量电器及其部件的不同电位部分的绝缘强度、电气间隙和爬电距离的名义电压值。除非另有规定，此值为电器的最大额定工作电压。各种开关电器及其附件的绝缘等级都根据这个电压确定。某一开关电器的额定工作电压 U_e 指在规定条件下，保证电器正常工作的电压值，它又和其他一些因素有关，如断路器的工作电压就和其通断特性有关，电动机起动器则和工作制及使用类别有关。在交流三相系统中，线电压或相电压是基础数据。开关电器可根据其特性参数（如通

断能力和使用寿命）规定不同的额定工作电压值。但开关电器的最高额定工作电压不得超过其额定绝缘电压。各种开关电器的额定绝缘电压 U_i 和额定工作电压 U_e 都在相应的产品样本和说明书中列出。在按短路强度和额定通断能力选用开关电器时，短路点处的短路电流值是一个决定性因素，常用以下指标来衡量。

（1）峰值耐受（短路）电流 I_p（动稳定短路强度）　I_p 是电路中允许出现的最大瞬时短路电流值，其电动力效应也最大。指在规定的使用和性能条件下，开关电器在闭合位置上所能承受的电流峰值。

（2）额定短时耐受电流 I_s（热稳定短路强度）　I_s 是电路中允许出现的短时电流。指在规定的使用和性能条件下，开关电器在指定的短时间（1s 电流）内，于闭合位置上所能承载的电流。开关电器必须能承受这个电流持续 1s 而不会受到破坏。

（3）额定短路分断能力　是指在规定的条件下，包括开关电器出线端短路在内的分断能力。如断路器在额定频率和给定功率因数、额定工作电压提高 10% 的条件下能够分断的短路电流。它用短路电流周期分量的有效值表示。

（4）额定短路通断能力　是指在规定的条件下，能在给定的电压下接通和分断的预期电流值。对有短路保护功能的开关电器的额定短路通断能力是指其在额定工作电压提高 10% 、频率和功率因数均为额定值的条件下能够接通和分断的额定电流。额定短路接通能力以电器安装处预期短路电流的峰值为最大值，额定短路分断能力则以短路电流周期分量的有效值表示。在选用时应保证开关电器的额定短路通断能力高于电路中预期短路电流的相应数据。

（5）约定脱扣电流　在约定时间内能使继电器或脱扣器动作的规定电流值。

（6）约定熔断电流　在约定时间内能使熔断体熔断的规定电流值。

对一般的开关电器的分断能力、接通能力和通断能力是指在给定的电压下分断、接通和通断的相对应的预期电流值。在选用时应保证开关电器的额定通断能力高于电路中预期电流的相应数据。

3. 有关电流的参数

当按额定电流选用开关电器时，开关电器的额定工作类型（如连续工作、断续工作或短时工作等）是主要决定因素。按照开关电器的发热特性，开关电器的下列额定电流概念是不同的。

（1）额定持续电流 I_u　I_u 是在规定条件下，电器在长期工作制下，各部件的温升不超过规定极限值时所承载的电流值。开关电器在正常工作条件和环境条件下能够连续地、长期承受而无需调整并不会产生过热的电流。对于可调式电器，如热继电器，其连续工作电流即该电器能调整到的最高电流值。

（2）额定工作电流 I_e　I_e 是根据开关电器的具体正常使用条件确定的电流值。指在规定条件下，保证电器正常工作的电压值。它和额定电压、电网频率、额定工作制、使用类别、触头寿命及防护等级等诸因素有关。一个开关电器可以有不同的工作电流值。

（3）额定发热电流 I_r　I_r 是在规定条件下试验时，电器在八小时工作制下，各部件的温升不超过规定极限值时所能承载的最大电流值。

（4）发热电流 I_c　I_c 是在约定时间内，各部件的温升不超过规定极限值时所能承载的最大电流值。

（5）分断电流 I_b　I_b 是在分断操作时，在电弧开始瞬间流过电器一个极的电流值。

（6）预期分断电流 I_{pb}　I_{pb} 对应于分断过程开始瞬间所确定的预期电流。

（7）预期接通电流 I_{pm}　I_{pm} 是在规定条件下，电器接通时所产生的预期电流。

根据国家标准和 IEC 标准，电动机开关电器和其他负载开关电器的使用情况和负载条件可按其使用类别进行分类。这种分类涉及额定工作电流或电动机的额定功率和额定电压。正常使用条件指电器在正常条件下的分断和接通，这是确定触头寿命的基本指标，也是设计灭弧室的重要依据。非正常使用条件定义为在偶然发生的事故状态下分断和接通，这是确定电器额定接通能力和额定分断能力的决定因素。

4. 有关开关电器动作时间的参数

（1）断开时间　开关电器从断开操作开始瞬间起到所有极的弧触头都分开瞬间为止的时间间隔。

（2）燃弧时间　电器分断电路过程中，从（弧）触头断开（或熔断体熔断）出现电弧的瞬间开始，至电弧完全熄灭为止的时间间隔。

（3）分断时间　从开关电器的断开时间开始起到燃弧时间结束为止的时间间隔。

（4）接通时间　开关电器从闭合操作开始瞬间起到电流开始流过主电路瞬间为止的时间间隔。

（5）闭合时间　开关电器从闭合操作开始瞬间起到所有极的触头都接触瞬间为止的时间间隔。

（6）通断时间　从电流开始在开关电器一个极流过瞬间起，到所有极的电弧最终熄灭瞬间为止的时间间隔。

5. 额定工作制

额定工作制是对元件、器件或设备所承受的运行条件的分类。工作制可分为连续、短时、周期性或非周期性几种类型。周期性工作制包括一种或多种规定了持续时间的额定负载，非周期性工作制中的负载和转速通常在允许的运行范围内变化。电机的工作制分为 10 类。国家标准 GB755—2000《旋转电机　定额和性能》（等同 IEC60034—1：1996）规定了工作制分类（S1 ~ S10）。低压电器和电控设备多与电动机配套使用，故其工作制分类相互联系。我国低压电器行业选择了 S1 ~ S3 三种工作制，并补充了八小时工作制和周期工作制两种工作制，对辅助电路控制电器有八小时工作制、不间断工作制、断续周期工作制和短时工作制四种标准工作制，但对断续周期工作制的操作频率分级有所不同。八小时工作制是指电器的导电电路每次通以稳定电流时间不得超过八小时的一种长期工作制。周期工作制则指无论负载变动与否，总是有规律地反复进行的工作制。下面仅分述 S1 ~ S3 工作制。

S1 连续工作制，指在恒定负载（如额定功率）下连续运行相当长时间，可以使设备达到热平衡的工作条件。这时系统中的元件必须正确选择，使其能无限期承载恒定的负载电流而无须采取什么措施，并且不会超过元件本身所允许的温升。

S2 短时工作制，指与空载时间相比，有载时间较短的工作制。电机在恒定负载下按给定的时间运行，在该时间内不足以达到热稳定时停机。电器元件在额定工作电流 I_e 恒定的一个工作周期内不会达到其允许温升，而在两个工作周期之间的间歇时间又很长，能使元件冷却到环境温度值。因此，在 S2 工作制下，电器元件承载电流 $I_{s2} > I_e$，不会超过允许温升。S2 工作制时，有载时间 t_{s2} 也就是电器元件的升温时间，它可以长到元件在此期间能达到允

许温升的程度。负载电流 I_{s2}越大，则允许的有载时间（升温时间）越短。当环境温度升高时，允许的有载时间 t_{s2}也会相应缩短。如果短时工作制电流在有载时间 t_{s2}内不能保持恒定，则必须确定其方均根值，这是影响温升的主要因素。因此，方均根值 I_q［式（1-1）］是确定电器元件在短时工作制下温升的决定性因素。

$$I_q = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \cdots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}} \tag{1-1}$$

S3 断续周期工作制，断续周期工作制是开关电器有载时间和无载时间周期性地相互交替分断接通，有载时间和无载时间都很短，使电器元件既不能在一个有载时间内升温到额定值，也不能在一个无载时间内冷却到常温。断续周期工作制用通电持续率（负载因数）$d \cdot f$来描述，$d \cdot f = t_{s3}/t_s$。周期时间 t_s 是有载时间 t_{s3}和无载时间 t_0 的总和（$t_s = t_3 + t_0$）。实际上，断续周期工作制是由一系列有载时间和无载时间组成的，即长短不同的一些有载时间被一些长短不同的无载时间所分隔，并且其组合顺序周期性地出现。负载因数应由式（1-2）求出。

$$d \cdot f = \frac{\sum t_{s3}}{\sum t_{s3} + \sum t_0} \times 100\% \tag{1-2}$$

在无其他协议的情况下，电动机在断续周期工作制时的工作周期为 10min，实际上，这个周期长度应看作最大周期长度。

6. 使用类别

电器的使用类别用于确定电器的用途，有关产品标准规定了相应的使用类别。使用类别通常用额定工作电流的倍数、额定工作电压的倍数及其相应的功率因数或时间常数、短路性能、选择性，以及其他使用条件等来表征电器额定接通和分断能力的类别。不同类型的低压电器元件的使用类别是不同的，主电路开关电器各有其自己的使用类别，常见低压电器的使用类别具体分类见表 1-2。

表 1-2　低压开关设备和控制设备使用类别举例

电流种类	类别	典型用途	有关产品标准
交流	AC-20	无载条件下“闭合”和“断开”电路	GB14048. 3—2002
	AC-21	通断电阻负载，包括通断适中的过载	
	AC-22	通断电阻电感混合负载，包括通断适中的过载	
	AC-23	通断电动机负载或其他高电感负载	
	AC-1	无感或微感负载、电阻炉	GB14048. 4—2003
	AC-2	绕线式电动机的起动、分断	
	AC-3	笼型异步电动机的起动，运转中分断	
	AC-4	笼型异步电动机的起动、反接制动与反向运转、点动	
	AC-5a	控制放电灯的通断	
	AC-5b	白炽灯的通断	
	AC-6a	变压器通断	
	AC-6b	电容器组的通断	
	AC-8a	具有过载继电器手动复位的密封制冷压缩机中的电动机控制	
	AC-8b	具有过载继电器自动复位的密封制冷压缩机中的电动机控制	

（续）

电流种类	类别	典型用途	有关产品标准
交流	AC-12 AC-13 AC-14 AC-15	控制电阻性负载和光电耦合器隔离的固态负载 控制变压器隔离的固态负载 控制小容量电磁铁负载 控制交流电磁铁负载	GB14048.5—2001
	AC-52a AC-52b AC-53a AC-53b AC-58a AC-58b	绕线式电动机起动器控制：八小时工作制，带载起动、加速、运转 绕线式电动机起动器控制：断续工作制 笼型异步电动机控制：八小时工作制，带载起动、加速、运转 笼型异步电动机控制：断续工作制 具有过载继电器自动复位的密封制冷压缩机中的电动机控制：八小时工作制，带载起动、加速、运转 具有过载继电器自动复位的密封制冷压缩机中的电动机控制：断续工作制	GB14048.6—1998
	AC-40 AC-41 AC-42 AC-43 AC-44 AC-45a AC-45b	配电线路包含有感应磁阻的阻性和电抗性负载 无感或微感负载、电阻炉 绕线式电动机的起动、分断 笼型异步电动机的起动，运转中分断 笼型异步电动机的起动、反接制动与反向运转①、点动② 控制放电灯的通断 白炽灯的通断	GB14048.9—1998
	AC-140 AC-31 AC-33 AC-35 AC-36	控制维持（封闭）电流≤0.2A 小型电机负载，如接触器式继电器 无感或微感负载 电动机负载或包括电机、阻性负载和达到 30% 白炽灯的混合负载 控制放电灯负载 白炽灯负载	GB/T14048.10—1999
	AC-7a AC-7b	家用及类似用途的微感负载 家用电动机负载	GB17885
	AC-51 AC-55a AC-55b AC-56a AC-56b	无感或微感负载、电阻炉 控制放电灯的通断 白炽灯的通断 变压器通断 电容器组的通断	IEC60947-4-3
交流和直流	A B	无额定短时耐受电流要求的电路保护 具有额定短时耐受电流要求的电路保护	GB14048.2—2001
直流	DC-20 DC-21 DC-22 DC-23	无载条件下“闭合”和“断开”电路 通断电阻负载，包括通断适中的过载 通断电阻电感混合负载，包括通断适中的过载（例如并励电动机） 通断高电感负载（例如串励电动机）	GB14048.3—2002

（续）

电流种类	类别	典型用途	有关产品标准
直流	DC-1 DC-3 DC-5 DC-6	无感或微感负载、电阻炉 并励电动机的起动、反接制动与反向运转①、点动②、电动机的动态分断 串励电动机的起动、反接制动与反向运转①、点动②、电动机的动态分断 白炽灯的通断	GB 14048. 4—2003
	DC-12 DC-13 DC-14	控制电阻性负载和光电耦合器隔离的固态负载 控制电磁铁负载 控制电路中有经济电阻的直流电磁铁负载	GB14048. 5—2001 GB/T14048. 10 —1999
	DC-40 DC-41 DC-43 DC-45 DC-46	配电线路包含有感应磁阻的阻性和电抗性负载 无感或微感负载、电阻炉 并励电动机的起动、反接制动与反向运转①、点动②、电动机的动态分断 串励电动机的起动、反接制动与反向运转①、点动②、电动机的动态分断 白炽灯的通断	GB14048. 9—1998
	DC-31 DC-33 DC-36	阻性负载 电动机负载或混合负载（包括电动机） 白炽灯负载	GB14048. 11—2002

① 反接制动与反向运转意指当电动机正在运转时通过反接电动机原来的联结方式，使电动机迅速停止或反转。

② 点动意指在短时间内激励电动机一次或重复多次，以此使被驱动机械获得小的移动。

7. 开关电器的操作频率和使用寿命

开关电器的操作频率与其工作制有关，同时还取决于实际使用情况。如连续运转的成套设备仅在大修或定期维修时才与电网断开，而一组机床随班次变化就可能每天或每周分断一次，有的机床是按每小时一次或更高的频率接通和分断的，还有些自动控制机床每小时可以通断几千次以上。在选用和安装开关电器时，应当充分考虑实际工作时的操作频率和所要求的使用寿命，合理确定开关电器的操作频率和使用寿命指标。

（1）开关电器的允许操作频率　允许操作频率是规定开关电器在每小时内可能实现的最高操作循环次数。按每小时多少次给出，这涉及一台开关电器每小时可能开关的次数，其机械寿命也受操作频率的影响。在实际应用中，了解开关电器在额定工作条件下的允许操作频率是很重要的。额定工作条件用不同的使用类别给出。和双金属保护电器一起安装使用的断路器和接触器，其允许操作频率按双金属片的能力确定。

（2）开关电器的机械寿命　开关电器的机械寿命是指开关电器在需要修理或更换零件前所能承受的无载操作循环次数。按操作次数给出。机械寿命是由运动零部件的闭合动作决定的，动作时所需作用力越大，传动机构的结构力就越大，材料所受应力也越大。如隔离器和大电流断路器的触头压力都很大，零件重量也大，其机械寿命也就相应降低；如欲提高机械寿命参数，选用触头压力较小的专用开关电器，如接触器。

（3）开关电器的电寿命　开关电器的电寿命是在规定的正常工作条件下，开关电器不需修理或更换零件的负载操作循环次数。取决于触头在不受严重损坏（仍能保持正常功能）的前提下可以承受的通断次数。在接通或分断负载电流时，触头会受到应力作用。接通过程中，动触头可能发生颤动，会受到电弧烧损。在触头烧损方面，分断电弧电流是一个重要因素。由此引起的触头烧损程度，取决于具体的通断工作条件，因而和电压、电流及时间诸因素有关。

8. 低压电器的污染等级（摘自 GB14048. 1—2006）

低压电器的污染等级是根据导电或吸湿的尘埃、游离气体或盐类和相对湿度的大小，以及由于吸湿或凝露导致表面介电强度和/或电阻率下降事件发生的频度，而对环境条件作出的分级。污染等级与电器使用所处的环境条件有关。污染等级（摘自 GB14048. 1—2006）如下：

污染等级 1，无污染或仅有干燥的非导电性的污染。

污染等级 2，一般情况下仅有非导电性污染，但必须考虑到偶然由于凝露造成短暂的导电性。

污染等级 3，有导电性污染，或由于预期的凝露使干燥的非导电性污染变成导电性的。

污染等级 4，造成持久性的导电性污染，例如由于导电尘埃或雨雪所造成的污染。

除非其他有关产品标准另有规定外，工业用电器一般适用于污染等级 3 的环境。但是，对于特殊用途和微观环境可考虑采用其他的污染等级。家用及类似用途的电器一般用于污染等级 2 的环境。

9. 低压电器外壳防护等级（摘自 GB4942. 2—1993）

低压电器外壳防护等级是指电器外壳能防止外界固体异物进入壳内触及带电部分或运动部件以及防止水进入壳内的防护程度。表示防护等级的标志符号由表征字母“IP（International Protection）”和附加在后的两个表征数字及补充字母所组成。

不同的 IP 等级对设备防护外界固体和液体进入的能力作出了具体规定。国家标准 GB 4942 规定了低压电器外壳的各个等级的含义、标志方法和实验考核要求：

第一种防护：防止人体触及带电零部件和防止外界固体异物进入。

第二种防护：防止外界液体进入而引起的有害影响。

第一位数字及数后补充字母表示第一种防护的各个等级，第二位数字则表示第二种防护的各个等级。

第一位表征数字及数后补充字母表示电器具有对人体和壳内部件的防护，防止人体触及或接近壳体内带电部分或触及壳体内如扇叶类的转动部件，以及防止固体异物进入电器的等级，共分为 9 个等级，从低级到高级排列依次为 0、1、2L、3L、4L、3、4、5、6，凡符合某一防护等级的外壳，亦符合所有低于该防护等级的各级。第二位表征数字表示由于外壳进水而引起有害影响的防护，防止水进入电器的等级，共分为 9 个等级，见表 1-3、表 1-4。

如不要求防护时，被省略的数字应用字母“X”代替，如 IPX5、IP2X 或 IPXX；当防护的内容有所增加，用补充字母来表示，如 IP55R，R 表示在特殊环境下使用。W 表示在特定气候条件下使用的补充字母。N 表示在特定尘埃环境条件下使用的补充字母。L 表示在规定固体异物条件下使用的补充字母。

表 1-3　第一位表征数字及数后补充字母表示的防护等级

第一位表征数字及数后补充字母	表征符号	防护等级	
		简述	含义
0	IP0X	无防护	无专门防护
1	IP1X	防止大于 50mm 的固体异物	能防止人体的某一大面积（如手）偶然或意外地触及壳内带电部分或运动部件，但不能防止有意识地接近这些部分 能防止直径大于 50mm 的固体异物进入壳内
2L	IP2LX	防止大于 12.5mm 的固体异物	能防止直径大于 12.5mm 的固体异物进入壳内和防止手指或长度不大于 80mm 的类似物体触及壳内带电部分或运动部件
3	IP3X	防止大于 2.5mm 的固体异物	能防止直径（或厚度）大于 2.5mm 的工具，金属线等进入壳内
3L	IP3LX	防止大于 12.5mm 的固体异物进入和防止 2.5mm 的探针触及	能防止直径大于 12.5mm 的固体异物进入壳内和防止长度不大于 100mm 直径为 2.5mm 的试验探针触及壳内带电部分和运动部件
4	IP4X	防止大于 1mm 的固体异物	能防止直径（或厚度）大于 1mm 的固体异物进入壳内
4L	IP4LX	防止大于 12.5mm 的固体异物进入和防止 1mm 的探针触及	能防止直径大于 12.5mm 固体异物进入壳内和防止长度不大于 100mm 直径为 1mm 的试验探针触及壳内带电部分和运动部件
5	IP5X	防尘	不能完全防止尘埃进入壳内，但进尘量不足以影响电器的正常运行
6	IP6X	尘密	无尘埃进入

表 1-4　第二位表征数字表示的防护等级

第二位表征数字	表征符号	防护等级	
		简述	含义
0	IPX0	无防护	无专门防护
1	IPX1	防滴	垂直滴水应无有害影响
2	IPX2	15°防滴	当电器从正常位置的任何方向倾斜至 15°以内任一角度时，垂直滴水应无有害影响
3	IPX3	防淋水	与垂直线成 60°范围以内的淋水应无有害影响
4	IPX4	防溅水	承受任何方向的溅水应无有害影响
5	IPX5	防喷水	承受任何方向由喷嘴喷出的水应无有害影响
6	IPX6	防海浪	承受猛烈的海浪冲击或强烈喷水时，电器的进水量应不致达到有害的影响
7	IPX7	防浸水影响	当电器浸入规定压力的水中经规定时间后，电器的进水量应不致达到有害的影响
8	IPX8	防潜水影响	电器在规定的压力下长时间潜入水时，水应不进入壳内

1.3.3 电气控制中的颜色标志

在电气技术领域中，为了使人们对周围存在的不安全因素环境、设备引起注意，保证正确操作，防止事故，易于识别在接线、配线、敷线和各个电器元件和装备之间的相对安装位置，以及它们间的电连接关系，对各种绝缘导线的连接标记、导线的颜色、指示灯的颜色及接线端子的标记等采用安全色作出统一规定。统一使用安全色，能使人们借助所熟悉的安全色含义，正确地对设备操作和维护，并识别危险部位，有助于防止发生事故，及时排除故障，确保人身和设备的安全。电气技术中常用的安全色有红色、黄色、蓝色、绿色、黄色与绿色相间条纹等。目前，有关电气技术领域电线标记和颜色的国家标准主要有：GB4884—1985《绝缘导线的标记》、GB/T 4026—2010《人机界面标志标识的基本方法和安全规则 设备端子和导体终端的标识》、GB7947—2010《人机界面标志标识的基本和安全规则 导体的颜色或字母数字标识》、GB/T 13534—2009《颜色标志的代码》等。

1. 指示灯和按钮用色的统一规定

指示灯和按钮常用的安全色有红色、绿色、黄色、蓝色等。红色表示禁止、停止和危险的意思。凡是禁止、停止和有危险的器件、设备或环境，应以红色标记，如停止按钮和停车、仪表刻度盘上的极限位置刻度等。绿色表示通行、安全和提供信息的意思。凡是在可以通行或安全情况下，应涂以绿色标记，如起动按钮、安全信号指示等。黄色表示注意、警告的意思。凡是警告人们注意的器件、设备或环境，应涂以黄色标记，如警示按钮、警告信号等。蓝色表示必须遵守的意思，如命令标志。表 1-5 列出了指示灯的颜色及其含义，表 1-6 列出了按钮颜色及其含义。指示灯和按钮选色原则依指示灯被接通（发光、闪光）后所反映的信息来选色或按钮被操作（按压）后所引起的功能来选色。

表 1-5 指示灯的颜色及其含义

颜色	含义	解 释	典 型 应 用
红色	异常情况或警报	对可能出现危险和需要立即处理情况报警	温度超过规定（或安全）限制，设备的重要部分已被保护电器切断
黄色	警告	状态改变或变量接近其极限值	温度偏离正常值出现允许存在一定时间的过载
绿色	准备、安全	安全运行条件指示或机械准备起动	冷却系统运转
蓝色	特殊指示	上述几种颜色即红、黄、绿色未包括的任一种功能	选择开关处于指定位置
白色	一般信号	上述几种颜色即红、黄、绿、蓝色未包括的各种功能，如某种动作正常	

表 1-6 按钮颜色及其含义

颜色	含义	典 型 应 用
红色	危险情况下的操作	紧急停止
	停止或分断	全部停机。停止一台或多台电动机，停止一台机器某一部分，使电器元件失电，有停止功能的复位按钮
黄色	应急、干预	应急操作，抑制不正常情况或中断不理想的工作周期

（续）

颜色	含义	典　型　应　用
绿色	起动或接通	起动，起动一台或多台电动机，起动一台机器的一部分，使某电器元件得电
蓝色	蓝色表示必须遵守的意思	可用于上述几种颜色即红、黄、绿色未包括的任一种功能
黑色、灰色、白色	无专门指定功能	可用于“停止”和“分断”以外的任何情况

指示灯的作用是指示某个指令、某种状态、某些条件或某类演变、正在执行或已被执行，从而引起操作者的注意，或指示操作者应作的某种操作。指示灯的闪光信息则指示操作者进一步引起注意或须立即采取行动等。红色按钮用于“停止”、“断电”；绿色按钮优先用于“起动”或“通电”，但也允许选用黑、白或灰色按钮；一钮双用的“起动”与“停止”或“通电”与“断电”，交替按压后改变功能的，既不能用红色按钮，亦不能用绿色按钮。而用黑、白或灰色按钮；按压时运动，抬起时停止运动（如点动、微动），应用黑、白、灰或绿色按钮，最好是黑色按钮，而不能用红色按钮；用于单一复位功能的，用蓝、黑、白或灰色按钮；同时有“复位”、“停止”与“断电”功能的，用红色按钮。灯光按钮不得用作事故按钮。

2. 绝缘导体和裸导体的颜色标记

表 1-7 列出了依导线颜色标志电路的规定及其含义，标记导体的颜色为：黑、白、红、黄、蓝或淡蓝；绿、橙、灰、棕、青绿、紫、粉红及绿/黄间色。为安全起见，除绿/黄间色外，不能用黄或绿与其他颜色组成双色。在不引起混淆的情况下，可以使用黄和绿之外的其他颜色组成双色。为便于区别，除绿/黄间色外，优先选用下列五种颜色：淡蓝、黑、棕、白、红。颜色标志可用规定的颜色或用绝缘导体的绝缘颜色标记在导体的全部长度上，也可标记在所选择的位置上。

表 1-7　依导线颜色标志电路的规定

序号	导线颜色	所 标 志 电 路
1	黑色	装置和设备的内部布线
2	棕色	直流电路的正极
3	红色	交流三相电路的第 3 相（L3 或 W 相） 半导体晶体管的集电极 半导体晶体管、整流二极管或晶闸管的阴极
4	黄色	交流三相电路的第 1 相（L1 或 U 相） 半导体晶体管的基极 晶闸管和双向晶闸管的门极
5	绿色	交流三相电路的第 2 相（L2 或 V 相）
6	蓝色	直流电路的负极 半导体晶体管的发射极 半导体晶体管、整流二极管或晶闸管的阳极

（续）

序号	导线颜色	所 标 志 电 路
7	淡蓝色	交流三相电路的零线或中性线 直流电路的接地中间线
8	白色	双向晶闸管的主电极；无指定用色的半导体电路
9	黄和绿双色（每种色宽约 15～100mm 交替贴接）	安全用的接地线
10	红、黑色并行	用双芯导线或双根绞线连接的交流电路

绿/黄间色只能用于来标记保护导体，不能用于其他目的。用作保护导体的裸导体或母线，必须用 15～100mm、宽度相等的绿色和黄色相间的条纹，在每个导体的全部长度上或只在每个区间或每个单元或每个可接触的部位上作出标志。如果使用胶带，只能使用双色胶带。对于绝缘导体上的绿/黄间色，必须是在每 15mm 长的绝缘导体上，一种颜色覆盖的导体表面不小于 30%、不大于 70%，另一种颜色覆盖其余的表面。如果保护导体从其形状、结构或位置上（例如同芯导体）容易识别，则在导体的全部长度上不必都有颜色标志，但其端部或可接触到的部位应用绿/黄间色标志或其他形式的标志。淡蓝色只能用于中性线或中间线。电路中包括有用颜色来识别的中性线或中间线时，所用的颜色必须淡蓝色。如果用颜色来标记作为中性线或中间线的裸导体或母线时，必须用 15～100mm 宽的淡蓝色条纹，在每个区间或每个单元或每个可接触的部位作出标志，或者用淡蓝色在全部长度上作出标志。

1.4 电气制图规则

电气图是电气工程中通用的技术语言和重要的技术交流工具，是指导设计、生产和施工的重要技术文件。电气图用标准图形符号、文字和图示法绘制的表示电气系统、装置和设备各组成部分相互关系及其连接关系的电气工作原理图、施工图等技术文件，以描述电气系统或电气装置的构成和功能，并提供产品装配和使用信息的一种简图。常用电气图包括系统图或框图、逻辑图、功能表图、电路图、接线图或接线表布置图、设备元件材料表和安装图等。电气图常用的表达形式有简图和表图。简图可简称为图，如电路图、接线图等。电气图中各组件常用的表示方法有多线表示法、单线表示法、连接表示法、半连接表示法、不连接表示法和组合法等。根据图的用途，图面布置、表达内容、功能关系等，具体选用其中一种表示法也可将几种表示法结合运用。电气制图所涉及的内容非常丰富，本节简要介绍电气制图的基本知识和基本内容，为学习专业知识打下基础。

1.4.1 电气制图标准

电气技术文件作为交流电气技术信息的载体，其编制规则和电气图形符号是电气工程的语言，只有规范化才能满足国内外技术交流的需要。我国电气制图标准化技术委员会为“全国电气信息结构、文件编制和图形符号标准化技术委员会”。国际上大多数发达国家都将国际电工委员会（IEC）标准作为统一电气工程语言的依据。我国于 1983 年成立了全国

电气信息结构、文件编制和图形符号标准化技术委员会（The Chinese Standardization Technical Committee for Electrical Information Structures，Documentation and Graphical Symbols），代号为 SAC/TC27，简称标委会。国际标委会对口 IEC 的第 3 工作组 IEC/TC3。

电气技术文件所涉及的电气制图标准主要有电气技术文件的编制标准、电气简图用图形符号标准和电气设备用图形符号三大类。1964 年我国首次系统地制定了电气图形符号和文字符号等系列标准。1986 年以后，陆续采用国际标准制定新的电气技术制图标准，如参照 IEC 60617《电气简图用图形符号》、IEC61082《电气技术用文件的编制》、IEC61346《工业系统、成套装置与设备以及工业产品　结构原则和检索代号》等系列标准，颁布了我国国家标准 GB/T4728《电气简图用图形符号》系列标准，统一了电气制图规则。电气技术文件的编制的主要标准见表 1-8。表 1-8 中前 3 项是电气技术文件编制的基本标准；第 4 ~ 6 项为结构原则与检索代号；第 7、8 两项为文件和文件编制管理标准；其他是一部分电气制图规则和标准。

表 1-8　电气技术文件的编制标准

序号	标准编号	标准名称
1	GB/T 6988. 1—1997	电气技术用文件的编制　第 1 部分：一般要求
	GB/T 6988. 2—1997	电气技术用文件的编制　第 2 部分：功能性简图
	GB/T 6988. 3—1997	电气技术用文件的编制　第 3 部分：接线图和接线表
	GB/T 6988. 4—2002	电气技术用文件的编制　第 4 部分：位置文件与安装文件
	GB/T 6988. 5—2006	电气技术用文件的编制　第 5 部分：索引
	GB/T 6988. 6—1993	控制系统功能表图的绘制
	GB/T 2900. 18—1992	电工术语　低压电器
2	GB/T 18135—2000	电气工程 CAD 制图规则
3	GB/T 19045—2003	明细表的编制
4	GB/T 5094. 1—2002	工业系统、装置与设备以及工业产品　结构原则与参照代号　第 1 部分：基本规则
	GB/T 5094. 2—2003	工业系统、装置与设备以及工业产品　结构原则与参照代号　第 2 部分：项目的分类与分类码
	GB/T 5094. 3—2005	工业系统、装置与设备以及工业产品　结构原则与参照代号　第 3 部分：应用指南
	GB/T 5094. 4—2005	工业系统、装置与设备以及工业产品　结构原则与参照代号　第 4 部分：概念的说明
5	GB/T 18656—2002	工业系统、装置与设备以及工业产品　系统内端子的标识
6	GB/T 16679—1996	信号和连接线的代号
7	GB/T 19529—2004	技术信息与文件的构成
8	GB/T 19678—2005	说明书的编制　构成、内容和表示方法
9	GB7947—2010	人机界面标志标识的基本和安全规则　导体的颜色或字母数字标识
10	GB/T 4026 —2010	人机界面标志标识的基本方法和安全规则　设备端子和导体终端的标识
11	GB 4884—1985	绝缘导线的标记
12	GB/T 5489—1985	印制板制图
13	GB/T 10609. 1—1989	技术制图　标题栏
	GB/T 10609. 2—1989	技术制图　明细栏

（续）

序号	标准编号	标准名称
14	GB/T 14689—1993	技术制图　图纸幅面和格式
15	GB/T 14691—1993	技术制图　字体
16	GB/T 17564. 1—2011	电气项目的标准数据元素类型和相关分类模式　第 1 部分：定义　原则和方法
	GB/T 17564. 2—2005	电气元器件的标准数据元素类型和相关分类模式　第 2 部分：EXPRESS 字典模式
	GB/T 17564. 3—1999	电气元器件的标准数据元素类型和相关分类模式　第 3 部分：维护和确认的程序
17	QJ 3154—2002	计算机辅助设计电气制图基本规定及管理要求
18	GB/T 5465. 1—2007	电气设备用图形符号基本规则　第 1 部分：原形符号的生成
19	GB/T 5465. 2—1996	电气设备用图形符号
20	GB/T 11499—2001	半导体分立器件文字符号
21	GB/T 4728. 1—2005	电气简图用图形符号　第 1 部分：一般要求
	GB/T 4728. 2—2005	电气简图用图形符号　第 2 部分：符号要素、限定符号和其他常用符号
	GB/T 4728. 3—2005	电气简图用图形符号　第 3 部分：导体和连接件
	GB/T 4728. 4—2005	电气简图用图形符号　第 4 部分：基本无源元件
	GB/T 4728. 5—2005	电气简图用图形符号　第 5 部分：半导体管和电子管
	GB/T 4728. 6—2008	电气简图用图形符号　第 6 部分：电能的发生与转换
	GB/T 4728. 7—2008	电气简图用图形符号　第 7 部分：开关、控制和保护器件
	GB/T 4728. 8—2008	电气简图用图形符号　第 8 部分：测量仪表、灯和信号器件
	GB/T 4728. 9—2008	电气简图用图形符号　第 9 部分：电信：交换和外围设备
	GB/T 4728. 10—2008	电气简图用图形符号　第 10 部分：电信：传输
	GB/T 4728. 11—2008	电气简图用图形符号　第 11 部分：建筑安装平面布置图
	GB/T 4728. 12—2008	电气简图用图形符号　第 12 部分：二进制逻辑元件
	GB/T 4728. 13—2008	电气简图用图形符号　第 13 部分：模拟元件
22	GB/T 16902. 1—2004	图形符号表示规则　设备用图形符号　第 1 部分：原形符号
23	GB/T 20295—2006	GB/T 4728. 12 和 GB/T 4728. 13 标准的应用

1. 4. 2　电气工程图及技术文件

1. 电气工程图

电气工程图是为电气工程的系统设计、设备制造、施工和维修而绘制、编制的成套图样和文字说明等，称为电气技术文件。在绘制电气工程图时，首先要明确图的使用场合和表达对象，然后需考虑采用何种形式进行表达。电气工程图的表达形式有简图、表图、表格和文字等。简图是电气工程图的最常用表达形式，用以表达电气系统的工作原理、系统结构等，系统图、电路图、接线图等都属于简图。简图是用图形符号、带注释的围框或简化外形表示电气系统或设备的组成及其连接关系的一种图；表图是表示两个或两个以上变量之间关系的一种图。表图的表达形式主要是图而不是表。如电路波形图、数字电路的时序图、凸轮控制器手柄位置与触头闭合的示意图等；表格是把数据按纵横排列的一种表达形式，主要用于说明电气系统、设备的组成或连接关系，提供工作参数及技术数据等内容，如转换开关的接线

表、设备元件表、技术文件清单等都属于表格。文字是使用语言文字的一种信息表达方式，如各种说明书及各项说明中的语言文字。此外，在电气工程中，有时还采用按投影法绘制的图，如电控柜的箱体结构图，这类图属于电气工艺机械制图。

2. 电气技术文件

电气技术文件包括技术人员熟知的概略图、逻辑图、电路图、接线图等电气简图，也包括接线表、元件表、说明书等设计文件。电气技术文件编制中的文件，按其用途及使用特征等进行分类，主要有功能、位置、接线、项目表及说明等技术文件。电气技术文件根据实际情况可简可繁。在编制电气技术文件时，应注意技术文件的正确性、完整性和统一性。技术文件的正确性是指电气技术文件提供的图样、说明及其他资料必须正确无误，能满足设计要求达到的性能指标。另外，电气工程图中所采用的图形符号、文字说明、格式、画法等，均必须符合国家标准及有关规定。技术文件的完整性是指文件中的图样、说明及其他资料，要满足制造、施工、维修的需要，应该提供的图样等有关资料不能省略或简化。技术文件的统一性是指文件中的各种图样、文字说明要前后一致，符号、名称、数据等不能中途更改或丢失。

（1）功能性文件

1）概略图，表示系统、分系统、装置、部件、设备中各项目间的主要关系和连接的简图，通常用单线表示法。

2）框图，是采用方框符号表示的一种概略图。它概略地描述项目的基本组成和相互关系。

3）网络图，是表示系统中主要设备间的关系的一种概略图，如发电站、变电站及电力线等构成的电力网络概略图。控制系统上位机与下位机及其他设备之间构成的网络示意图等。

4）功能图，是表示原理或理论，而不涉及实现方法的一种等效功能简图。它可详细表示系统、分系统、装置、部件、设备等的功能。等效电路图中的元件符号一般都是功能性元件符号，不代表实际元件。如变压器等效电路图，将含有铁心、绕组的变压器实体变成了一个仅含有电阻和电感的电路，目的是分析和计算变压器、感应电机电磁特性和运行状态。当功能图中主要使用二进制逻辑元件符号时，则称为逻辑功能简图。

5）电路图，电路图即电气原理图，也称为电气线路图。它是采用标准图形符号按一定的逻辑关系或功能顺序排列，表示系统、分系统、装置、部件、设备等实际电路的连接关系的一种简图。它只表示其逻辑关系及功能的电气原理，而不考虑项目的实际尺寸、形状及其位置。如电动机起停控制电路就是一个典型的电路图。

6）功能表图，是用步和转换描述顺序控制系统的工艺流程、功能和状态的一种表图。

7）端子功能图，是表示功能单元的各端子和内部功能及连接关系的一种简图。它可采用简化的电路图、功能图、功能表图、顺序表图或文字来表达。

8）顺序表图，是表示系统各个单元工作次序或状态的图。它表示各单元的工作或状态按一个方向排列，类似于数字电路的时序图。若按比例绘制具有时间轴的顺序表图，即是时序图。

（2）位置文件

1）总平面图，表示电气工程中的主要设备包括建筑物的相对测定点的具体位置，包括

连接关系、断面视图、网络、道路、地表资料、进出线布置及工区总体布局的平面图。如变电站的屋外设备总平面布置图。

2）安装图，表示各项目间安装位置的图。表示各项目间连接关系的安装图即为安装简图。

3）装配图，通常按比例表示一组装配部件的空间位置和形状的图，即为装配图。经简化或补充以给出某种特定目的所需信息的装配图，即为其布置图。

（3）接线文件

1）接线图（表），接线图（表）是表示装置或设备连接关系的一种简图（表）。表示一个结构单元内连接关系的接线图（表），即单元接线图（表），如图 1-13 所示。

图 1-13 中的跨越线号 1、2 上的折线符号表示这两根导线是绞合的。表示不同结构单元间连接关系的接线图（表），称为互连接线图（表）。表示一个结构单元的端子和该端子与外部连线（或包括内部连线）的接线图（表），称为端子接线图（表），如图 1-14 所示。

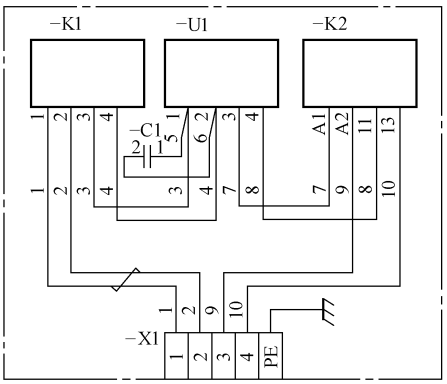


图 1-13 单元接线图（表）示意图

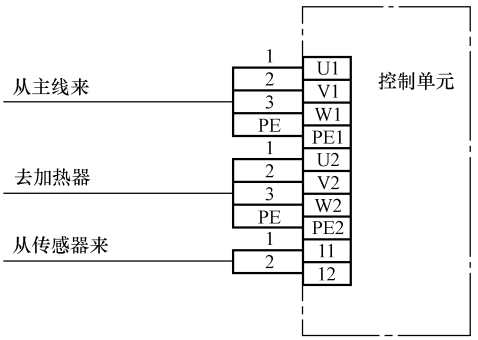


图 1-14 控制单元端子接线图示意图

2）电缆敷设图（表），电缆敷设图（表）是表示有关电缆或导线的识别标记、两端位置及特性、路径和功能等信息的一种简图（表），如图 1-15 所示。

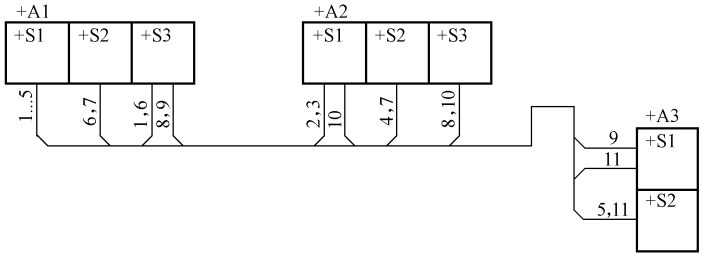


图 1-15 位于 + A1、+ A2 和 + A3 间的电缆敷设图（表）示意图

（4）项目表

1）元件、设备表，元件、设备表表示构成一个组件的项目，如零件、元件、软件、设备、电缆、导线等，以及文件的表格。元件、设备表示例见表 1-9。

2）备用元件表，备用元件表表示用于维护和维修的项目，如零件、元件、软件、散装材料等备品备件的表格。

（5）说明文件

表 1-9　元件设备表

序号	项目代号	名称	型号	规格	单位	数量
1	S2	停止按钮	LA2	250V，5A	个	1
2	S1	起动按钮	LA2	250V，5A	个	1
3	FR	热继电器	JR8	30A	个	1
4	KM	交流接触器	CJ20	380V，30A	个	1
5	FU2	管式熔断器	R1	1A	个	1
6	FU1	填料式熔断器	RT2	15A	个	3
7	M	电动机	Y	380V，7.5kW	台	1

1）安装说明文件。安装说明文件是对一个系统、装置、设备或元件的安装条件和测试等的技术说明或信息的一种文件。

2）调试说明文件。调试说明文件是对一个系统、装置、设备或元件初始起动和运行时的技术说明，如调节、测试方法、推荐的设定值，以及所需采取的有关技术措施的说明或信息的文件。

3）使用说明文件。使用说明文件是对一个系统、装置、设备或元件的正确使用所给出的说明或信息的文件。如产品说明书、用户手册等。

4）维修使用说明文件。维修使用说明文件是对一个系统、装置、设备或元件的维修程序、方法给出的说明或信息的文件。如维修或保养手册。

5）可靠性和可维修性说明文件。可靠性和可维修性说明文件是对一个系统、装置、设备或元件给出的可靠性和可维修性的说明或信息的文件。

6）其他文件必要时，提供可能需要的其他文件。如使用指南、样本、图样和文件清单等。

1.4.3　电气控制技术中常用的图形、文字符号

电气线路图是由各种电器元件的图形符号、符号要素、限定符号等组成，图形符号是电气图的主体和基本单元，是电气技术文件中的“象形文字”，是构成电气“工程语言”的“词汇”。电气图形符号包括图用图形符号、设备用图形符号、标志用图形符号和标注用图形符号等。必须严格遵照如表 1-8 所列出的及其他国家标准绘制，如 GB4728.1～GB4728.13《电气简图用图形符号》、GB/T 18135—2008《电气工程 CAD 制图规则》等。电气图中的图形和文字符号必须符合最新的国家标准。表 1-10～表 1-12 列出了摘自上述标准的常用电气图形符号和文字符号，以供参考。正确熟练地理解、绘制和识别各种电气图形符号是电气制图与读图的基本功。

1. 图形符号的组成

图形符号是用于表示电气图中电气设备、装置、元器件的一种图形和符号，是电气制图中不可缺少的要素。图形符号通常由一般符号、符号要素、限定符号和方框图等组成。

（1）一般符号。一般符号是用以表示某一类产品及其特征的一种通用符号，即某一类别的通用符号。如开关、继电器、电动机、电阻等类别符号即属于一般符号，而热敏电阻、低压断路器、接触器、隔离开关等则不是一般符号。一般符号可以单独使用，并可在一般符

号上再附加其他符号要素和限定符号以派生新的符号。

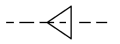
（2）符号要素。符号要素是一种具有确定意义的简单图形，用于与其他图形符号组合，而构成一个设备或概念的完整符号，不能单独使用。如不同功能、类型的主令开关是由开关的一般符号与不同功能的符号要素组成的，因此按钮开关、紧急开关和旋钮开关等的符号是不一样的，见表 1-10。

表 1-10　常用电气图形符号要素

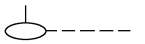
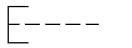
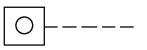
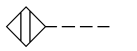
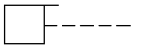
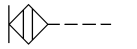
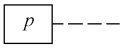
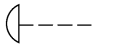
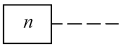
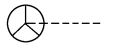
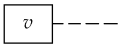
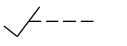
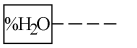
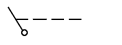
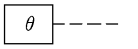
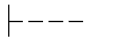
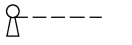
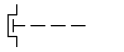
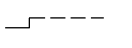
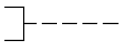
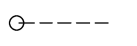
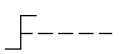
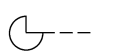
	说　明		说　明
	接触器的功能		限位开关功能 位置开关功能 注：①当不需要表示接触的操作方法时，这个限定符号可用在简单的触头符号上，以表示限制开关和位置开关 ②当在两个方向都用机械操作触头时，这个符号应加在触头符号的两边
	断路器的功能		
	隔离开关的功能		
	负荷开关的功能		弹性返回功能，自动复位功能 注：引用此符号应特别注意使用要恰当，这个符号不能和最前 4 个同时使用
	自动释放功能		无弹性返回功能 注：当引用此符号应特别注意使用要恰当，这个符号不能和最前 4 个同时使用

（3）限定符号。限定符号是用以提供附加信息的一种加在其他符号上的图形符号，通常不能单独使用。如不同功能、类型的开关电器是由开关的一般符号与不同功能的限定符号组成的，因此低压断路器、隔离开关和负荷开关等的符号是不一样的。但一般符号有时也可用作限定符号，如电动机的一般符号加到其他一些符号上即构成电动式器件符号，如加到一般阀门符号上就构成电动阀门符号等。由于限定符号的应用，从而使图形符号更具多样性。如在电阻器一般符号的基础上，分别加上不同的限定符号，则可得到可变电阻器、滑线变阻器、压敏电阻器、热敏电阻器、光敏电阻器、熔断电阻器等的符号，见表 1-11。

表 1-11　常用电气图形限定符号

图形符号	符号说明	图形符号	符号说明
	热效应		磁场效应或磁场效应消失
	电源效应		热执行器操作（如热继电器、热过电流保护）
形式1  形式2 	延时动作 注：从圆弧向圆心方向移动的延时动作		电动机保护
			电钟操作
	自动复位 注：三角为指向返回方向		过电流保护的电磁操作
	定位非自动复位 维持给定位置的电器		电磁执行器操作

（续）

图形符号	符号说明	图形符号	符号说明
	液位控制		推动控制
	计数控制		接近效应控制
	流体控制		接触效应控制
	压力控制		紧急开关（蘑菇头安全按钮）
	转速控制		手轮控制
	线性速度或速度控制		脚踏控制
	相对湿度控制		杠杆控制
	温度控制 注：θ 可用 t_0 代替		可拆卸的手柄操作
	一般情况下手动		钥匙操作
	受限制的手动控制		曲柄操作
	拉拔操作		滚轮（滚柱）操作
	旋转控制		凸轮操作 注：需要时可出示详细

（4）方框符号。方框符号是在方框内加上一般符号或限定符号所构成的一种简单符号，主要用以表示某一元件、设备或功能单元等的组合及其功能，既不给出元件、设备的细节，也不考虑所有连接的一种简单的图形符号。通常只用于使用单线表示法的系统图和框图中，也可用在示出全部输入和输出接线的图中或按单线表示法画成的电路图中。电路图中的外购件、不可修理件也可用方框符号表示。方框符号的外形轮廓一般应为正方形、长方形、圆形等。如图 1-16a 所示的整流器框形符号，它仅表示了由交流变为直流的功能，至于其内部的细节，如整流变压器、整流桥等及其连接关系则不考虑。图 1-16b 是电气系统图中的整流器图形符号，交流侧输入，三相带中性线（N），50Hz、380/220V；直流侧输出，带中间线（M）的三线制，220/110V。

电气设备用图形符号与电气图用图形符号有些是相同的，但大部分是不同的，含义也大

不相同。设备用图形符号主要用于各种电气设备或部件上，使操作人员了解其用途和操作方法。主要用途是识别（如设备或抽象概念）；限定（如变量或附属功能）；说明（如操作或使用方法）；命令（如应做或不应做的事）；警告（如危险）；指示（如方向、数量）。这些符号也可用于安装或移动电气设备的场合，以明示诸如禁止、警告、规定或限制等警示。通常，标志在设备上的图形符号，主要警示设备使用者识别电器设备或其组成部分（如控制器或显示器）；指示功能状态（如通、断、告警）；标志连接（如端子、接头）；包装信息（如内容识别、装卸说明）；电器设备操作说明（如警告、使用限制）。在电气图中，尤其是在某些电气平面图、电气系统说明书中，也可以适当地使用这些符号，以补充这些图所包含的内容。GB/T 5465《电气设备用图形符号》将设备用图形符号分为 6 个部分：通用符号；广播、电视及音响设备符号；通信、测量、定位符号；医用设备符号；电化教育符号；家用电器及其他符号。

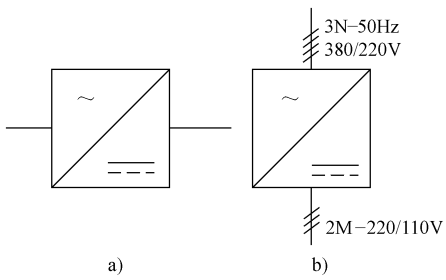


图 1-16　方框符号示意图

2. 电气工程图形符号的种类

电气工程图形符号种类繁多，GB/T4728 中将其分为 11 类。

（1）导线和连接器件，包括各种导线、接线端子、端子和导线的连接、连接器件、电缆附件等。

（2）无源元件，包括电阻器、电容器、电感器、铁氧体磁心、磁存储器矩阵、压电晶体、驻极体、延迟线等。

（3）半导体管和电子管，包括二极管、晶体管、晶闸管、电子管、辐射探测器等。

（4）电能的发生和转换，包括绕组、发电机、电动机、变压器、变流器等。

（5）开关、控制和保护装置，包括触头（触点）、开关、开关装置、控制装置、电动机起动器、继电器、熔断器、保护间隙、避雷器等。

（6）测量仪表、灯和信号器件，包括指示、积算和记录仪表、热电偶、遥测装置、电钟、传感器、灯、喇叭和电铃等。

（7）电信，交换和外围设备，包括交换系统、选择器、电话机、电报和数据处理设备、传真机、换能器、记录和播放器等。

（8）电信传输，包括通信电路、天线、无线电台及各种电信传输设备。

（9）电力、照明和电信布置，包括发电站、变电站、网络、音响和电视的电缆配电系统、开关、插座引出线、电灯引出线、安装符号等。适用于电力、照明和电信系统和平面图。

（10）二进制逻辑单元，包括组合和时序单元、运算器单元、延时单元、双稳、单稳和非稳单元、位移寄存器、计数器和存储器等。

（11）模拟单元，包括函数器、坐标转换器、电子开关等。

此外，还有一些其他符号，如机械控制、操作件和操作方法、非电量控制、接地、接机壳和等电位、理想电路元件（电流源、电压源、回转器）、电路故障、绝缘击穿等。

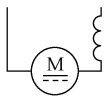
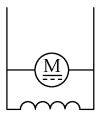
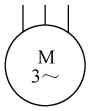
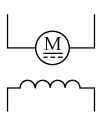
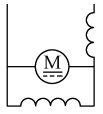
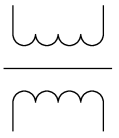
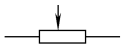
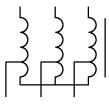
3. 电气控制技术中常用的电气图形符号

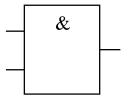
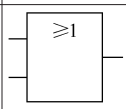
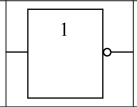
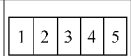
常用的电气图形符号见表 1-12。

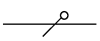
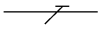
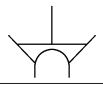
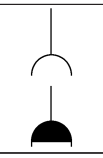
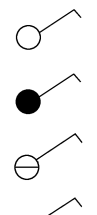
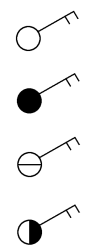
表 1-12　常用的电气图形符号和文字符号

名称		图形符号	文字符号	名称		图形符号	文字符号	名称		图形符号	文字符号
一般三极电源开关			QS	速度继电器	常开触头		BV	继电器	常闭触头		相应继电器符号
低压断路器			QF		常闭触头				常开触头		相应继电器符号
位置开关	常开触头		SQ	时间继电器	线圈		KT	熔断器			FU
	常闭触头				延时闭合常开触头			熔断器式刀开关			QS
	复合触头				延时打开常闭触头			熔断器式隔离开关			QS
转换开关			SA		延时闭合常闭触头			熔断器式负荷开关			QM
按钮	起动		SB		延时打开常开触头			桥式整流装置			VC
	停止			热继电器	热元件		FR	蜂鸣器			H
	复合				常闭触头			信号灯			HL
接触器	线圈		K、KM	继电器	中间继电器线圈		KM	电阻器			R
	主触头				欠电压继电器线圈		KV	接插器			X
	常开辅助触头				过电流继电器线圈		KA	电磁铁			YA
	常闭辅助触头				欠电流继电器线圈		KA	电磁吸盘			YH

（续）

名称	图形符号	文字符号
串励直流电动机		M
并励直流电动机		
三相笼型异步电动机		
三相绕线转子异步电动机		
他励直流电动机		
复励直流电动机		
直流发电机		G
单相变压器		T
整流变压器		
照明变压器		
控制电路电源用变压器		TC
电位器		RP
三相自耦变压器		T

名称	图形符号	文字符号
PNP 型三极管		V
NPN 型三极管		
晶闸管（阴极侧受控）		
半导体二极管		
接近敏感开关动合触头		SQ
磁铁接近时动作的接近开关的动合触头		SQ
接近开关动合触头		SQ
“与”元件		
“或”元件		
“非”元件		
阀的一般符号		Y
电磁阀		Y
电动阀		Y
屏、台、箱、柜的一般符号		
配电箱		
带线端标记的端子板		X

名称	图形符号	文字符号
导线的连接		
导线跨越而不连接		
绞合导线（示出二股）		
屏蔽导线		
中性线		
保护线		
保护和中性共用线		
先断后合的转换触头		K
中间断开的双向触头		K
带接地插孔的三相插座		X
带接地插孔的三相插座暗装		X
单相插座 暗装		X
单极开关 暗装 密闭（防水） 防爆		S
二极开关 暗装 密闭（防水） 防爆		S

在绘制电气图时应直接使用 GB4728 规定的一般符号、方框符号、示例符号及符号要素、限定符号和常用的其他符号，GB4728 中已经给出的各种符号都不允许对其进行修改或重新进行派生，但允许按功能组合图的原则派生 GB4728 中未给出的各种符号。

（1）图形符号的使用

图形符号在使用中须遵守一定的规则。GB4728 中给定的符号，有的有几种图形形式，当同种含义的符号有几种形式时，应以满足表达需要为原则，在满足表达需要的前提下，可按需要任意选择使用，但应优先选用“优选形”，在同一图中表示同一对象应采用同一种形式，并应尽量采用最简单的形式。电路图中必须使用完整形式的图形符号，如单线式变压器符号适用于画单线概略图等；多线式变压器适用于需要示出变压器绕组、端子和其他标记的多线画法的，不需完整画出。

GB4728 中给出的图形符号是按功能在未激励状态下按无电压、无外力作用的正常状态。绘制电气图时亦应按此状态绘制。符号的含义是由其形状和内容所确定的，符号大小和图线宽度一般不影响含义。在某些情况下，如为了增加输入或输出的数量，为了便于补充信息，为了强调某些方面，为了把符号作为限定符号来使用等，允许采用大小不同的符号，但比例要协调美观。

在绘制电气控制线路时，应遵循电流方向“自上而下（垂直方位画时）或自左向右（水平方位画时）”的原则绘制；对于动合触头和动断触头应遵循“左开右闭（垂直方位画时），下开上闭（水平方位画时）”的原则绘制，即静触头在上或左，动触头在下或右。对于开关电器，如果按图面布置的需要，采用的图形符号的方位与 GB4728 中示出的一致时，则直接采用；若方位不一致时，应遵循按图例“逆时针旋转 90°”的原则绘制，但文字和指示方向不得颠倒。图形符号的矩形长边和圆的直径宜设计为 $2M$ 的倍数，一般取 M = 2.5mm。对于较小的图形符号则可选用 $1.5M$、$1.0M$ 或 $0.5M$。

（2）符号的引线

图形符号所带的连接线不是图形符号的组成部分，在大多数情况下，引线位置仅用作示例。在不改变符号含义的原则下，引线可取不同的方向。但当改变引线的位置会导致影响符号本身含义时，引线位置就不能改变。信号流向要遵循从左至右或从上到下原则，如果不符合这一规定，则应标出信号流向符号。

4. 文字符号

文字符号是电气图中的电气设备、装置、元器件的种类字符代码和功能字符代码，用以区别各元器件、部件、组件等的名称、功能、状态、特征、相互关系、安装位置等。关于电气图中的文字符号，我国曾发布国家标准 GB/T 7159—1987《电气技术中的文字符号制订通则》，该标准已于 2005 年废止，在目前尚无具体替代标准发布前，人们在图样与书刊中仍习惯采用 GB/T 7159 中规定的文字符号，因此本书对该标准仍予以介绍。该标准规定，采用大写拉丁字母正体字表示，标注在相应的设备、装置、元器件右上方或近旁。文字符号分基本文字符号和辅助文字符号。基本文字符号用来表示设备、装置、元器件的名称，分单字母符号和双字母符号。绘制电气图时，应优先选用单字母符号。GB7159—1987 中的单字母符号等同采用国际标准中的种类代号，双字母符号等同采用双字母代码。单字母和双字母符号在国际上是通用的。基本文字符号中的单字母符号是按拉丁字母将各种电气设备、装置和元器件划分为 23 大类，每大类用一个专用单字母符号表示，如“K”表示“继电器、接触器”

类，“F”表示“保护器件”类等。单字母符号应优先采用。双字母符号是由一个表示种类的单字母符号与另一字母组成，其组合形式应以单字母符号在前、另一字母在后的次序列出。只有当用单字母符号不能满足要求、容易混淆需要将大类进一步划分时，才采用双字母符号，以便较详细和更具体地表述电气设备、装置和元器件。如电路中既有继电器也有接触器，这时需要用单字母“K”表示“接触器”，而用双字母“KM”表示“继电器”。再如“F”表示保护器件类，而“FU”表示熔断器，“FR”表示热继电器等。双字母符号的第一位字母只允许按 GB7159 中单字母所表示的种类使用，见表 1-13。

表 1-13　电气技术中常用基本文字符号

基本文字符号		项目种类	设备、装置、元器件举例
单字母	双字母		
A		组件部件	分离元件、放大器、激光器、调节器，本表其他地方未提及的组件、部件
	AB		电桥
	AD		晶体管放大器
	AJ		集成电路放大器
	AM		磁放大电路
	AV		电子管放大器
	AP		印制电路板
	AT		抽屉柜
	AR		支架盘
B		非电量到电量变换器或电量到非电量变换器	热电传感器、热电池、光电池、测功计、晶体换能器、送话器、拾音器、扬声器、耳机、自整角机、旋转变压器、模拟和多极数字变换器或传感器（用作测量和指示）
	BP		压力变换器
	BQ		位置变换器
	BR		旋转变换器（测速发电机）
	BT		温度变换器
	BV		速度变换器
C		电容器	电容器
D		二进制元件 延迟器件 存储器件	数字集成电路和器件、延迟线、双稳态元件、单稳态元件、磁芯存储器、寄存器、磁带记录机、盘式记录机
E		其他元、器件	本表其他地方未规定的器件
	EH		发热器件
	EL		照明电
	EV		空气调节器
F		保护器件	过电压放电器件、避雷器
	FA		具有瞬时动作的限流保护器件
	FR		具有延时动作的限流保护器件
	FS		具有延时和瞬时动作的限流保护器件
	FU		熔断器
	FV		限压保护器件

（续）

基本文字符号		项目种类	设备、装置、元器件举例
单字母	双字母		
G		发生器、发电机、电源	旋转发电机 振荡器
	GS		发生器、同步发电机
	GA		异步发电机
	GB		蓄电池
	GF		旋转式或固定式变频机
H		信号器件	
	HA		声响指示器
	HL		光指示器、指示灯
K		继电器、接触器	
	KA		瞬时接触继电器、瞬时有或无继电器、交流继电器
	KL		闭锁接触继电器（机械闭锁或永磁铁式有或无继电器、双稳态继电器）
	KM		接触器
	KP		极化继电器
	KR		簧片继电器、逆流继电器
	KT		延时有或无继电器
L		电感器、电抗器	感应线圈、线路陷波器、电抗器（串联和并联）
M		电动机	电动机
	MS		同步电动机
	MG		可做发电机或电动机用的电机
	MT		力矩电动机
N		模拟元件、集成电路	运算放大器、混合模拟/数字器件
P		测量设备、试验设备	指示器件、记录器件、积算测量器件、信号发生器
	PA		电流表
	PC		（脉冲）计数器
	PJ		电能表
	PS		记录仪表
	PT		时钟、操作时间表
	PV		电压表
Q		电力电路的开关器件	
	QF		断路器
	QM		电动机保护开关
	QS		隔离开关

（续）

基本文字符号		项目种类	设备、装置、元器件举例
单字母	双字母		
R		电阻器	电阻器、变阻器
	RP		电位器
	RS		测量分流器
	RT		热敏电阻器
	RV		压敏电阻器
S		控制、记忆、信号电路的开关器件选择器	拨号接触器、连接级、机电式有或无传感器（单级数字传感器）
	SA		控制开关、选择开关
	SB		按钮开关
	SL		液体标高传感器
	SP		压力传感器
	SQ		位置传感器（包括接近传感器）
	SR		转速传感器
	ST		温度传感器
T		变压器	
	TA		电流互感器
	TC		控制电路电源用变压器
	TM		电力变压器
	TS		磁稳压器
	TV		电压互感器
U		调制器 变换器	鉴频器、解调器、变频器、编码器、变流器、逆变器、整流器、电报译码器
V		电子管、晶体管	气体放电管、二极管、晶体管、晶闸管
	VE		电子管
	VC		控制电路电源用的整流器
W		传输通导、波导天线	导线、电缆、母线、波导、波导定向耦合器、偶极天线、抛物面天线
X		端子插头插座	连接插头和插座、接线柱、电缆封端和接头、焊接端子板
	XB		连接片
	XJ		测试插孔
	XP		插头
	XS		插座
	XT		端子板

（续）

基本文字符号		项目种类	设备、装置、元器件举例
单字母	双字母		
Y		电气操作的机械器件	气阀
	YA		电磁铁
	YB		电磁制动器
	YC		电磁离合器
	YH		电磁吸盘
	YM		电动阀
	YV		电磁阀
Z		终端设备、混合变压器、滤波器、均衡器、限幅器	电缆平衡网络、压缩扩展器、晶体滤波器、网络

辅助文字符号通常表示设备、装置、元器件以及线路的功能、状态和特征，通常也是由英文单词的前一两个字母构成，见表 1-14。如“AC”表示交流，“PE”表示保护接地，“RD”表示红色等。辅助文字符号也可放在表示种类的单字母符号后边组成双字母符号，如“P”表示压力，“SP”表示压力传感器。为简化文字符号起见，若辅助文字符号由两个以上字母组成时，允许只采用其第一位字母进行组合，如“MS”表示同步电动机，是“M”和“SYN”的组合等。辅助文字符号还可以单独使用，如“ON”表示接通，“N”表示中性线，“RST”表示复位等。

表 1-14　电气技术中常用辅助文字符号

序号	文字符号	名 称	英 文 名 称	序号	文字符号	名 称	英 文 名 称
1	A	电 流	Current	18	D	数 字	Digital
2	A	模 拟	Analog	19	D	降	Down，Lower
3	AC	交 流	Alternating Current	20	DC	直 流	Direct Current
4	A 、AUT	自 动	Automatic	21	DEC	减	Decrease
5	ACC	加 速	Accelerating	22	E	接 地	Earthing
6	ADD	附 加	Add	23	F	快 速	Fast
7	ADJ	可 调	Adjustability	24	FB	反 馈	Feedback
8	AUX	辅 助	Auxiliary	25	FW	正，向前	Forward
9	ASY	异 步	Asynchronizing	26	GN	绿	Green
10	B、BRK	制 动	Braking	27	H	高	High
11	BK	黑	Black	28	IN	输 入	Input
12	BL	蓝	Blue	29	INC	增	Increase
13	BW	向 后	Backward	30	IND	感 应	Induction
14	CW	顺时针	Clockwise	31	L	左	Left
15	CCW	逆时针	Counter Clockwise	32	L	限 制	Limiting
16	D	延时（延迟）	Delay	33	L	低	Low
17	D	差 动	Differential	34	M	主	Main

（续）

序号	文字符号	名 称	英 文 名 称	序号	文字符号	名 称	英 文 名 称
35	M	中	Medium	51	RES	备 用	Reservation
36	M	中间线	Mid-wire	52	RUN	运 转	Run
37	M、MAN	手 动	Manual	53	S	信 号	Signal
38	N	中性线	Neutral	54	ST	起 动	Start
39	OFF	断 开	Open，Off	55	S、SET	置位，定位	Setting
40	ON	闭 合	Close，On	56	STE	步 进	Stepping
41	OUT	输 出	Output	57	STP	停 止	Stop
42	P	压 力	Pressure	58	SYN	同 步	Synchronizing
43	P	保 护	Protection	59	T	温 度	Temperature
44	PE	保护接地	Protective Earthing	60	T	时 间	Time
45	PEN	保护接地与中性线共用	Protective Earthing Neutral	61	TE	无噪声（防干扰）接地	Noiseless Earthing
46	PU	不接地保护	Protective Unearthing	62	V	真 空	Vacuum
47	R	右	Right	63	V	速 度	Velocity
48	R	反	Reverse	64	V	电 压	Voltage
49	RD	红	Red	65	WH	白	White
50	R 、RST	复 位	Reset	66	YE	黄	Yellow

文字符号适用于电气技术领域中图样和技术文件的编制，也可表示在电气设备、装置和元器件上或其近旁，以标明它们的名称、功能、状态或特征；作为电气技术中项目代号中的种类字母代码和功能字母代码；作为限定符号与电气图用图形符号中一般符号组合使用，以派生各种新的图形符号等。

电气控制线路图中的支路、元件和接点等，一般都要加上标号。主电路标号由文字符号和数字组成。文字符号用以标明主电路中的元件或线路的主要特征，数字标号用以区别电路不同线段。如三相交流电源引入线端采用 L1、L2、L3 标号，电源开关之后的三相交流电源主电路和负载端分别标 U、V、W。如 U_{11} 表示电动机的第一相的第一个接点代号，U_{21} 为第一相的第二个接点代号，依此类推。控制电路由三位或三位以下的数字组成，交流控制电路的标号一般以主要压降元件（如电器元件线圈）为分界，左侧用奇数标号，右侧用偶数标号。电气控制电路中的控制电路中的元件应与主电路相应元件对应标号，控制回路应以数字标号。直流控制电路中正极按奇数标号，负极按偶数标号。

5. 项目代号

在电气图中，为了便于查找、区分和描述图形符号所表示的对象，在图形符号旁还须标注项目代号。

项目是指在电气技术文件中出现的各种实际元件或装置，这些实际元件或装置在图上通常用一个图形符号表示。项目可大可小，如低压断路器、刀开关、电动机、开关设备、某一个系统都可称为项目。

项目代号是各个项目的一种特定代码，它用以表明元件、器件、装置和设备的电器种

类、安装地点、项目的实际位置、从属关系和端子位置等信息。用于识别项目的电器种类、项目的层次关系等，在电气图中为各种图形符号提供文字标注，表达特定的内容；在绘制某些表格时，项目代号是表格的重要组成部分。通过项目代号可将不同图或其他技术文件上的项目（软件）与实际设备中的项目（硬件）一一对应和联系在一起。项目代号既能表达特定的含义，又可将电气图中的项目与实物有机地联系起来。

一个完整的项目代号包括四个代号段，即高层代号、位置代号、种类代号和端子代号。在每个代号段之前还有一个前缀符号，以作为代号段特征标记。表 1-15 是项目代号段的示例。

表 1-15　项目代号段示例

段别	名称	前缀符号	示例
第 1 段	高层代号	=	= S3
第 2 段	位置代号	+	+ 12D
第 3 段	种类代号	–	– K5
第 4 段	端子代号	:	: 6

例如，“ = S3 + 12D – K5：6”这一代号段表示装置 S3 中的在 12 号位置 D 列控制柜上的接触器 K5 的第 6 号端子。由此可以看出，项目代号是以成套装置或设备连续分解为依据的，后面的代号段从属于前面的代号段。电气图上的每一个图形符号旁边都要标注项目代号。由于项目代号很长，标注工作量大，也影响图样的布局和美观，因此，标注项目代号时应尽量简化，以必须、够用为限。如为表明项目之间的层次关系和功能关系，可由第 1 段和第 3 段组成项目代号。如果图上所有项目都属于同一层次（同一设备），则高层代号可在图样空白处或标题栏内一次性标注。如为了表示某项目的实际位置，可用第 2 段和第 3 组成项目代号。如需表示某项目的端子时，可用第 3 段和第 4 段组成项目代号。也就是说，第 3 段是项目代号的核心。在电路比较简单时，一般只用第 3 段组成项目代号。

6. 电气制图的一般规则

在电气工程中，图样的种类很多，但在绘制这些图样时，还会遇到一些共性问题，如图幅尺寸、图线、字体以及连接线的表示等。电气图的图纸幅面、标题栏、明细表和字体等，应符合 GB/T14689—1993《技术制图　图纸幅面和格式》标准。

（1）引线的画法

电气图用图线的主要有 4 种，箭头型式有 3 种，见表 1-16 和表 1-17。

表 1-16　图线的形式和应用范围

图线名称	图线形式	一般应用	图线宽度/mm
实线	———	基本线、简图主要内容（图形符号及连线）用线、可见轮廓线、可见导线	0.25、0.35、0.5、0.7、1.0、1.4、2.0
虚线	– – – – –	辅助线、屏蔽线、机械（液压、气动等）连接线、不可见导线、不可见轮廓线	
点划线	——·——	分界线（表示结构、功能分组用）、围框线、控制及信号线路（电力及照明用）	
双点划线	——··——	辅助围框线	

表 1-17 箭头形式及意义

箭头名称	箭头形式	意　义
空心箭头		用于信号线、信息线、连接线，表示信号、信息、能量的传输方向
实心箭头		用于说明非电过程中材料或介质的流向
普通箭头		用于说明运动或力的方向，也用作可变性限定符、指引线和尺寸线的一种末端

指引线用于将文字或符号引注至被注释的部位，用细实线画成，并在末端加注标记。如末端在轮廓线内，加一黑点，如末端在轮廓线上，加一实心箭头；如末端在连接线上，加一短斜线或箭头。

（2）简图的布局

简图的布局通常采用功能布局法和位置布局法。功能布局法是按功能划分，以便使绘图元件在图上的布置及功能关系易于理解。在系统图、电路图中常采用功能布局法。位置布局法是使绘图元件在图上的布置能反映实际相对位置的一种布局方法。常用在系统安装简图、接线图与平面布置图中。

简图的绘制应做到布局合理，排列均匀，使图面清晰地表示出电路中各装置、设备和系统的构成以及组成部分的相互关系，以便于看图。

布置简图时，首先要考虑如何有利识别各种逻辑关系和信息的流向，重点要突出信息流及各级逻辑间的功能关系，并按工作顺序从左到右，从上到下排列。表示导线或连接线的图线都应是交叉和折弯最少的直线。图线水平布置时，各个类似项目应纵向对齐；垂直布置时，各个类似项目应横向对齐。功能相关的项尽量靠近，以使逻辑关系表达得清晰；同等重要的并联通路，应按主电路对称布置；只有当需要对称布置时，才可采用斜交叉线。图中的引入线和引出线，应画在图边沿或图样边框附近，以便清楚地表达输入输出关系，以及各图间的衔接关系，尤其是大型图需绘制在几张图上时更为重要。

（3）连接线的表示方法

电气图中的各种设备、元器件的图形通过实线连接线连接。连接线可以是导线，也可以是表示逻辑流、功能流的图线。一张图中连接线宽度应保持一致，但为了突出和区别某些功能，也可用不同粗细的连接线突显，如在电动机控制电路中，主电路、一次电路、主信号通路等采用粗实线表示，测量和控制引线用细实线表示。无论是单根还是成组连接线，其识别标记一般标注在靠近水平连接线的上方或垂直连接线的左方。允许连接线中断，但中断两端应加注相同的标记。导线连接交叉处若易误解，则应加实心圆点，否则可不加实心圆点。

（4）围框

电气图中的围框有点画线围框和双点画线围框两种。当需要在图上显示出图的某一部分，如功能单元、结构单元、项目组（继电器等）时，可用点划线围框表示。为了图面的清晰，围框的形状可以是不规则的。在表示一个单元的围框内，对于在电路功能上属于本单元而结构上不属于本单元的项目，可用双点画线围框围起来，并在框内加注释说明。

（5）电器元件的表示方法

同一电气设备、元件在不同类型的电气图中往往采用不同的图形符号表示。如具有机械的、磁的和光的功能联系的元件；在驱动部分和被驱动部分之间具有机械连接关系的器件和

元件等，在电气图中可将各相关部分用集中表示法、半集中表示法和分离表示法，见表 1-18。

表 1-18　器件和元件集中、半集中、分离表示方法的比较

方法	表示方法	特点
集中表示法	元件的各组成部分在图中靠近集中绘制。如继电器线圈和其触点	易于寻找项目的各个部分，适用于较简单的图
半集中表示法	元件的某些部分在图上分开绘制，并用虚线表示相互关系，虚线连接线可以弯折、交叉和分支。如复合按钮和其触点	可以减少连线往返和交叉，图面清晰，但会出现穿越图面的连接线
分离表示法	元件的各组成部分在图上分开绘制，不用连接线而用项目代号表示相互关系，并表示出在图上的位置	可减少连线往返和交叉，连接线不穿越图面，但是为了寻找被分开的各部分，需要采用插图或表格

（6）元器件技术数据的表示方法

元器件技术数据，如元器件型号、规格、额定值等，可直接标在图形符号近旁，必要时可放在项目代号的下方。技术数据也可标在仪表、集成块等的方框符号或简化外形符号内。技术数据也常用表格形式给出。

7. 电气图的绘制

由于电气图的种类很多，以下介绍电气系统图、电气原理图的绘制的基本方法与原则。

（1）系统图与框图

系统图通常用于控制系统或成套装置，框图则用于分系统或设备。系统图和框图以方框符号为主或带有注释的框表示元器件、设备等的组成及其功能，有些也采用代表元器件的图形符号，但不表示具体的元器件，只是使这一单元的功能特征更为形象。方框符号的功能由限定符号来表示，每个方框符号本身已代表了实际单元的功能。系统图和框图对布图有很高的要求，强调布局清晰，以利于识别逻辑功能和信息流向。基本流向应从左向右或自上而下的顺序排列，对于流向相反的信号应在线条上绘制箭头表示清楚。各部分间以连接线连接，可反映其相互间的功能关系。连接线有的表示电的关系，有的表示机械的连接，也有表示流程的。与系统图和框图中点划线框相连的连接线，必须接到框内的图形符号上；当采用带注释的实线框时，则连接线接到框的轮廓线上。在系统图和框图上，各个框一般应标注项目代号。

图 1-17 是工厂供电系统方案图。图中示出了用高层代号表示的 6 个项目以及它们之间的功能关系。高压侧为 3 相交流 10kV 进线，经变电装置将电压降至 0.4kV 供各车间用电。这个图由 5 个方框组成：=PL1 是 3 相交流 10kV 配电装置；=PB1 是 10kV 汇流排；=T1 与 =T2 是 10kV 变电设备；=PB2 是 0.4kV 汇流排，每个部分的具体结构、形状、安装位置、连接方法等另图详细说明。

（2）电气原理图

电气原理图是电气技术中使用最广泛的一种图。电气原理图的重要特征以图形符号形式在图上表示元件和器件及其功能及逻辑关系。因此应采用国家标准 GB/T 4728 所规定的图形符号来绘制。对于标准中没出现的新元件，可根据标准所给出的规则，使用一般符号及限制

符号来组合新的符号绘制。元器件的图形符号在图中必须画出所有的连接。

电气原理图应按其工作原理的顺序从左向右、自上而下排列。图中元器件图形符号的布局或单元电路的绘制，可灵活地应用前面所介绍的各种画法。电路中的电源在图中的布置应使所有电源线集中绘制在电路的左侧或上部；多相电源电路还要按相序从上到下或自左至右排列；中性线画在相线的下方或右边。电源可用相应的图形符号或用线条表示。如用交流符号“～”表示交流电源，在用多线条表达时，三相交流电源符号“L1”、“L2”、“L3”和中性线符号“N”等表示。

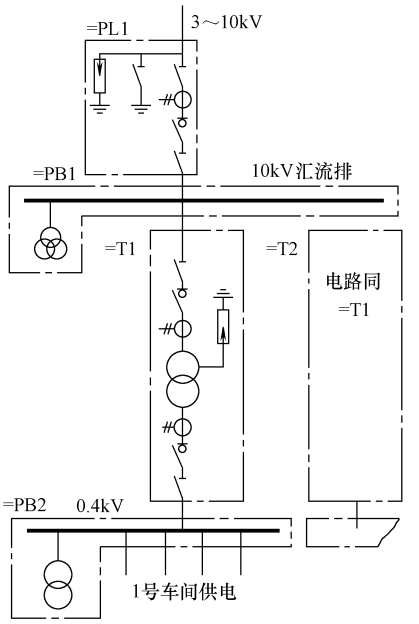


图 1-17　工厂供电系统方案图

在电气原理图中，为了使图面更简洁，使识图与绘图简单、方便，在一些特定条件下，可将图中的某个单元或某个分支电路进行简化，其功能不变。多个相同的支路并联时，可用标有公共连接符号的一个支路来表示。符号的折弯方向应与支路的连接情况相符。因被简化而未画出的各项目的代号，则需在对应的图形符号旁全部标注出来，公共连接符号边加注并联支路的总数。相同的电路重复出现时，可详细地画出其中的一个，并加画围框表示其范围。与之相同的其他电路分别画出空白围框，加注必要的文字注释，如可注上“本电路与××相同”字样。具有某种确定功能的单元电路可以根据图的种类和表达需要而定，一般以方框符号或带注释的框来表示。在电气原理图中，除使用图形符号外，应加注项目代号和元器件的主要参数。

电气 CAD 制图可采用 AutoCAD、Visio、Protel 或专业电气绘图软件等软件绘制。

第 2 章　常用低压电器

掌握常用低压电器的工作原理及其应用，是学习、使用、操作和设计电气控制系统的基础。本章主要介绍常用低压电器的基本结构、工作原理、用途及其应用等有关知识，并介绍它们的选用方法，为正确选择和合理使用这些电器元件打下基础。

2.1　概述

常用低压电器广泛应用于各类电气控制系统中，其中，最主要的控制对象（目标）是各类电动机。我们首先通过一个实例认识一下常用低压电器元件的基本工作原理及其应用，建立一个感性认识。图 2-1 是一个配置比较全面的三相笼型异步电动机单向全电压起、停控制线路，也是最常见、应用最广泛的、最基本的异步电动机控制线路之一，大多数继电逻辑控制系统中的主电路，以及控制系统的电源回路就是由这样的基本线路派生、组合而成的。如果将图 2-1 主电路中的接触器 K、热继电器 FR 和电动机 M 去掉，就是一个典型的配电电源回路，许多设备和控制系统的电源回路就是这样一种结构。

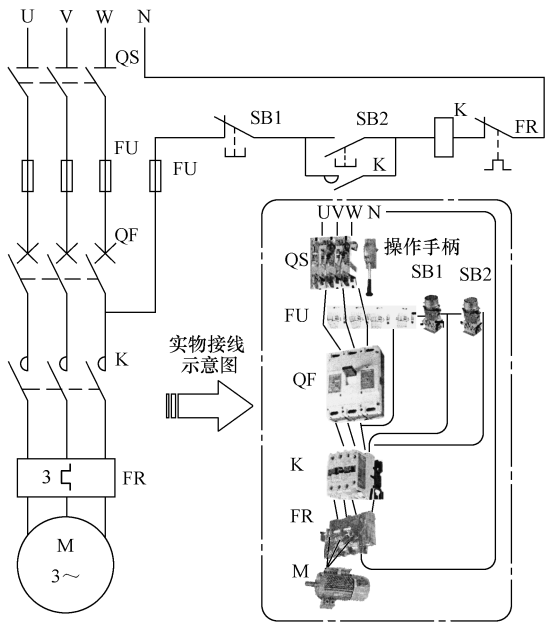


图 2-1　三相笼型异步电动机单向全压起、停控制线路

由图 2-1 可见，三相笼型异步电动机单向全电压起、停控制线路由刀开关 QS、熔断器 FU、低压断路器 QF、接触器 K、热继电器 FR 与电动机 M 构成主电路；起动按钮 SB2、停止按钮 SB1、接触器 K 的线圈及其常开辅助触头 K、热继电器 FR 的常闭触头等构成控制回路（亦称为辅助回路、控制电路）。起动时，先合上 QS，再合上 QF，引入三相电源，然后按下起动按钮 SB2，交流接触器 K 的线圈通电，接触器主触头闭合，电动机接通电源而起动旋转。同时与起动按钮 SB2 并联的常开辅助触头 K 闭合，并自锁，这样，松开起动按钮 SB2，SB2 自动复位，接触器 K 的线圈仍可通过其常开辅助触头 K 使接触器线圈继续通电，从而保持电动机的连续运行。要使电动机 M 停止运转，只要按下停止按钮 SB1，将控制电路电源断开即可。这时接触器 K 断电释放，K 的常开主触头将电动机的三相电源断开，电动机停止旋转。另外，由图 2-1 可见，电路具有以下保护环节：

（1）刀开关 QS 起电源隔离作用，它不允许带负荷通断；熔断器 FU 作为电路后备短路保护，但起不到电动机过电流保护的目的。低压断路器 QF 的用途是作为电路的电源开关，

最基本的保护功能是作为电路的短路和过电流主保护。

（2）热继电器 FR 是专用于对三相异步电动机的过载保护元件，与电动机的反时限特性相匹配。

（3）接触器 K 本身具有欠电压保护与失电压保护，是由其电磁机构实现的。当电源电压由于某种原因而偏离额定值或失压时，接触器的衔铁自行释放，电动机因失电而停止旋转。当电源电压恢复正常时，接触器线圈也不能自动通电，只有再次按下起动按钮 SB2 后电动机才会起动，起到安全保护作用。

2.2 隔离器、刀开关

隔离器、刀开关属于一类无载电源操作设备，用于电源隔离。电源隔离作用不仅要求各极动、静触头之间处于分断状态时，保持规定的电气间隙（距离），而且各电流通路之间、电流通路和邻近接地零部件之间也应保持规定的电气间隙要求，以保证电气设备检修人员和设备的安全。隔离器、刀开关的产品品种繁多，适应于各种不同的应用场合，如隔离器、刀型转换开关、刀型转换隔离开关、刀型隔离器、刀型转换隔离器、隔离开关、自动转换开关、双投开关、隔离开关熔断器组、熔断器式隔离器、熔断器式刀开关、负荷开关（铁壳开关、开启式负荷开关）等。隔离器、刀开关和负荷开关的图形、文字符号如图 2-2 所示。

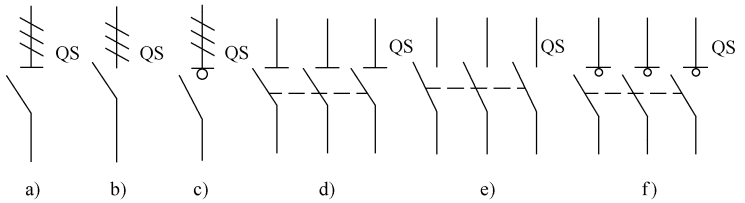


图 2-2 隔离器、刀开关和负荷开关的图形、文字符号

图 2-2 a、b、c 分别是隔离器、刀开关和负荷开关的单线三极表示法，图 2-2d、e、f 分别是隔离器、刀开关和负荷开关的三线三极表示法，由此可派生出单线两极和两线两极表示法等，即分别去掉一线或一极即可。本章提到的其他各元件的图形符号表示方法如此相同不再重复，电器元件的图形符号无特殊说明请参见表 1-9 ~ 表 1-13。

2.2.1 隔离器、刀开关的产品种类

根据工作条件和用途的不同，隔离器、刀开关的产品有不同的结构形式。按极数可分为单极、二极、三极和四极刀开关；按刀片转换方向不同，分为单投刀开关和双投刀开关两种，以及有、无灭弧罩方式；按操纵方式又可分为中央手柄式和带杠杆传动操纵式等。图 2-3是几种典型的隔离器、刀开关产品实物图。

图 2-3a 是 HRTO 系列石板闸刀，主要用于额定工作电压 380V、额定工作电流至 600 A 及以下的低压线路中作为照明及配电线路的保护及隔离。图 2-3b 是 NHRT40 系列条形熔断器式隔离开关，适用于交流额定电压 660V 及以下，额定工作电流为 630A 的工业配电系统中，用于有高短路电流的配电电路和电动机电路中，供不频繁手动接通和分断电路及隔离电

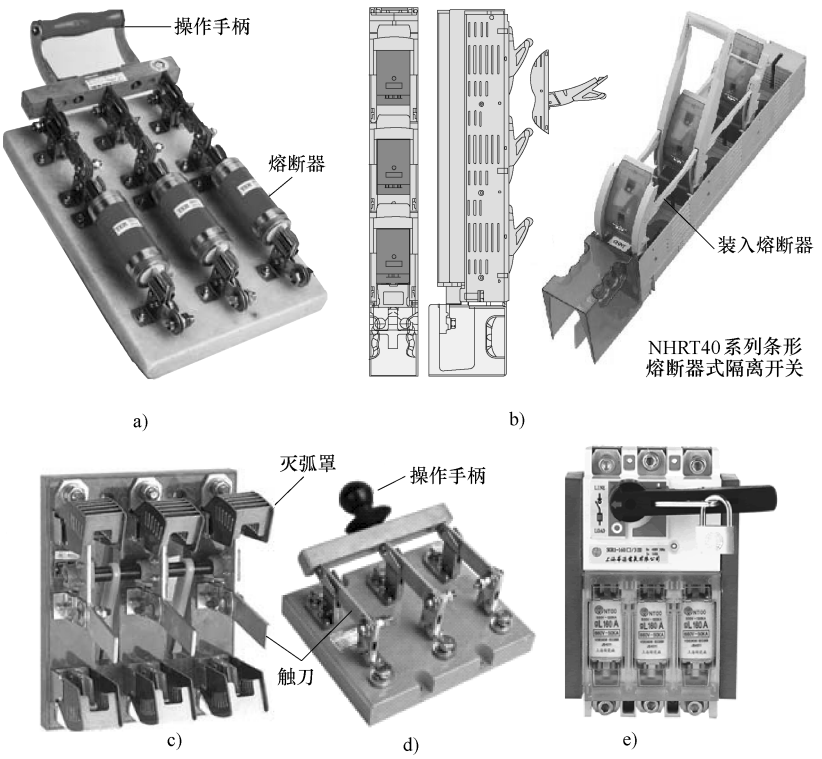


图 2-3　典型的隔离器、刀开关产品实物图

源用，并能对交流电路短路保护。图 2-3c 是 HS 系列双投刀开关，带灭弧罩，也有单投系列产品。图 2-4d 是 HD11 系列单投刀开关，不带灭弧罩，也有双投系列产品；图 2-3e 是 SGR1 系列隔离开关熔断器组，适用于交流配电或电动机网络中分配电能，在正常条件下不频繁接通，分断电路及线路和设备的短路保护和隔离之用。

1. 隔离器

在断开位置能符合规定的隔离要求及隔离距离，能起隔离电源作用的开关电器称为隔离器。隔离器属于无载通断电器，只能接通或分断“可忽略的电流”（指连接线和电缆、套管、母线等的寄生容性电流、电压互感器或分压器的电流等），但有一定的载流能力，在工业配电设备中作为电源隔离之用。一些带灭弧室（罩）的隔离器产品有一定的带载通断能力，能在非故障条件下接通和分断电气设备或成套设备中的某一部分，这时其通断能力应和其所需通断电流相适应。

2. 隔离器（刀开关）式熔断器组

隔离器和熔断器串联组合成一个单元或一种组合电器，动触头由熔断体或带熔断体的载熔件组成时，即为隔离器式熔断器组或称为熔断器式隔离器。含有熔断器的刀开关组合电器统称为熔断器刀开关组合电器，一般能进行有载通断，并有一定的短路保护功能。刀开关和熔断器串联组合成一个单元，称为刀开关熔断器组；刀开关的动刀（动触头）由带熔断器的载熔件组成时，称为熔断器式刀开关，适用于交流配电系统中作为短路保护和电缆、导线的过载保护之用。

3. 刀开关

刀开关（刀形转换开关）又称为闸刀开关。用于隔离电源的刀开关称为隔离开关。刀开关主要用于无载通断电路、隔离电源用，即在不分断负载电流或分断电路时，各极两触头间不会出现明显极间电压的条件下接通或分断电路之用。用作隔离开关的刀开关必须满足隔离功能，即开关断口明显，并且断口应能保持有效的电气隔离距离。普通的刀开关严禁带负荷操作，一经操作即带电（负荷）。带灭弧室（罩）的产品也可用来通断较小工作电流、作为照明设备和小型电动机作不频繁操作的电源开关用，可以切断不大于额定电流的负载。当刀开关有灭弧罩、熔断器，并用杠杆操作时，也可接通或分断额定电流。

2.2.2 开启式刀开关

开启式刀开关一般用做额定电压 AC 380V、DC 440V，额定电流至 1500A 配电设备中做电源隔离用。带有各种杠杆操作机构及灭弧室（罩）的开关，可按其分断能力不频繁地切断负荷电路。常用的开启式刀开关的结构如图 2-4 所示，其中，图 2-4a 是中央手柄式，分单投、双投两种，有板前接线和板后接线之分；图 2-4b 是侧方正面杠杆操作机构式，分单投、双投两种；图 2-4c 是中央正面杠杆操作机构式，分单投、双投两种；图 2-4d 是侧方正面杠杆操作机构式，分单投、双投两种。

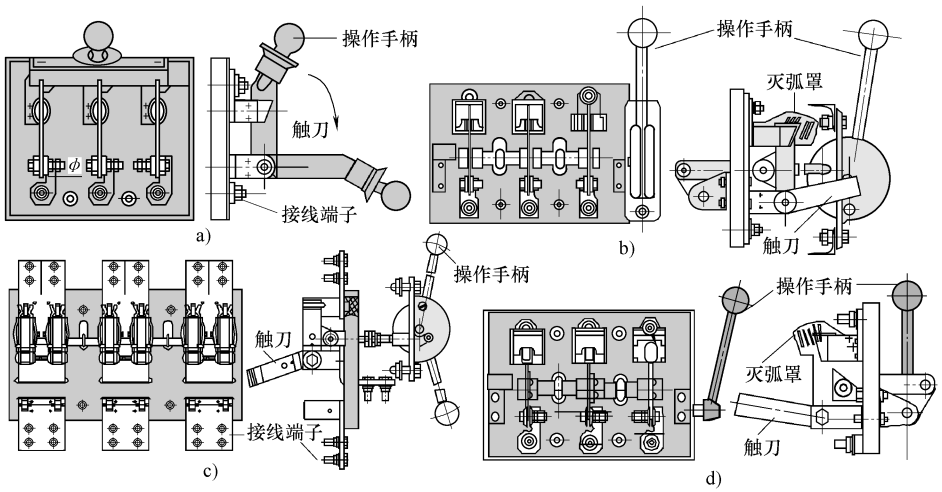


图 2-4 HD、HS 系列刀开关结构示意图

a）HD11 中央手柄式 b）HD12 侧方正面杠杆操作 c）HS13 中央正面杠杆操作 d）HD14 侧方正面杠杆操作

HD11 中央手柄式的单投和双投刀开关主要用于动力柜，不切断带有电流的电路，作为隔离开关之用。HD12 侧面操作手柄式刀开关，主要用于动力箱中。HD13 中央正面杠杆操作机构刀开关主要用于正面操作、后面维修的开关柜中，操作机构装在正前方。HD14 侧方正面杠杆操作机构式刀开关主要用于正面操作、前面维修的开关柜中，操作机构可在柜的两侧安装。HD15 装有灭弧室的刀开关可以切断电流，其他系列刀开关只作隔离开关使用。带杠杆操作机构的单投或双投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柜或动力箱等。中央手柄式的单投或双投刀开关不能分断电流，只能用作隔离电源。

2.2.3　熔断器式刀开关

熔断器式刀开关一般由 RTO 填料式熔断器和刀开关组合而成。这种组合电器具有 RTO 填料式熔断器和刀开关的基本性能，在正常馈电情况下接通和切断电源，在断开状态下做隔离开关用。在电路正常供电的情况下，接通和切断电源由刀开关来担任。当线路或用电设备过载或短路时，熔断器的熔体烧断，及时切断故障电流。适用于工业企业配电网络中作为电缆导线及用电设备的过载和短路保护。熔断器式刀开关主要有 HR3、HR5 和 HR11 系列等。图 2-5 所示是常用的 HR3/34 型熔断器式刀开关结构示意图。

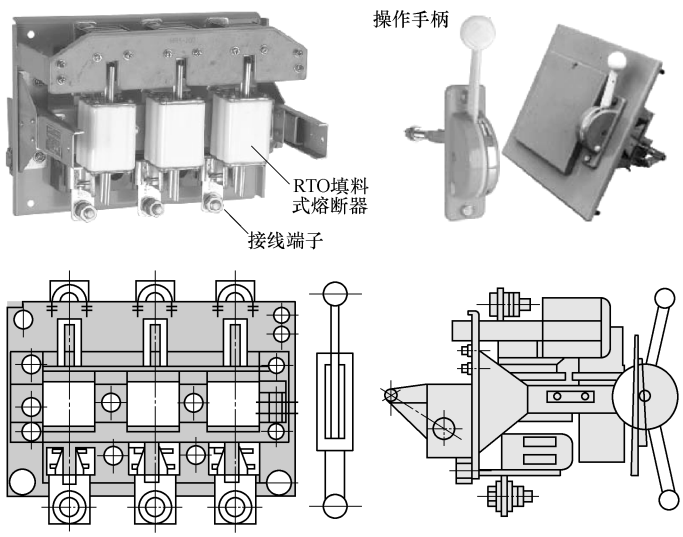


图 2-5　HR3/34 型熔断器式刀开关结构示意图

HR3 系列熔断器式刀开关由 RTO 系列熔断器和刀开关组成，带操作机构，最大额定电流 1000A。额定电流 600A 及以下的带有安全挡板，并装有灭弧室。灭弧室是酚醛布板和钢板冲制件铆合而成的。开关的熔断器固定在带弹簧、锁板的绝缘横梁上，在正常运行时，保证熔断器不脱扣，而当熔断体因线路故障而熔断后，只需按下锁板即可方便地更换熔断器。HR3 系列熔断器式刀开关有前操作前维修、前操作后维修和侧操作前维修等几种结构形式。前操作前检修的开关，中央有一供检修和更换熔断器的门，主要供 BDL 配电屏上安装。前操作后检修的开关主要供 BSL 配电屏上安装。侧操作前检修的开关可以制成封闭的动力配电箱，用来代替各种低压配电装置中刀开关和熔断器的组合电器。

2.2.4　负荷-隔离开关

负荷-隔离开关是一种新型低压隔离开关，模块化设计，广泛应用于开关柜或与终端电器配套的电器装置中，用于不频繁接通与分断电路及电气隔离。在正常供电的情况下接通和切断电源。图 2-6 所示是 GGL（GL）系列负荷-隔离开关结构示意图。

GGL（GL）系列负荷-隔离开关适用于交流 50Hz，额定电压至 660V，直流额定电压至 440V，额定电流至 1600A，三极、四极（三极 + 可通断中性极），用于不频繁接通与分断电路以及分断时的电气隔离，1000A 以上只做电气隔离。有直接操作和柜外操作两种形式。开

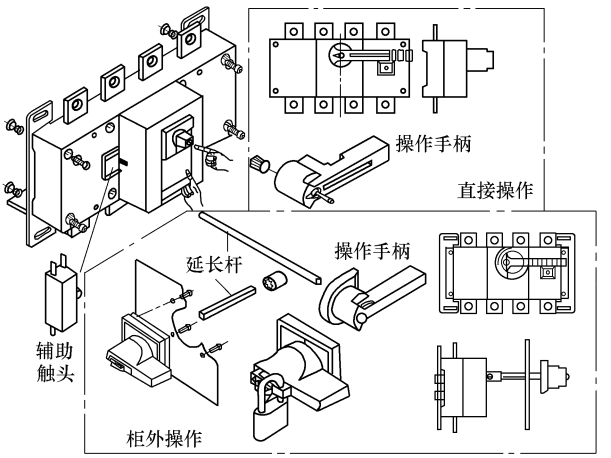


图 2-6 GGL（GL）系列负荷-隔离开关结构示意图

关正面设有标记窗口，以指示触头通断状态，根据需要可选用后面观察窗口，直接观察触头通断状态。可配装两组辅助触头。

2.2.5 隔离器、刀开关的选用、安装与操作

隔离器、刀开关的主要参数有额定绝缘电压、额定工作电压、额定工作电流、额定通断能力、额定短时耐受电流、额定（限制）短路电流、额定工作制、使用类别、熔断器规格、安装尺寸和操作性能，根据不同使用类别，在额定工作电流条件下的操作循环次数等。目前，隔离器、刀开关（含刀型转换开关）产品的额定绝缘电压大多数为交流 600V，额定工作电压 380V。电路的计算电流不应超过其额定工作电流。刀开关的极数和操纵方式可根据实际需要选定。熔断器式刀开关的极限分断能力可达 50kA，适用于短路电流较大的场合，主要用于配电柜及动力箱。一般用途负荷开关的通断能力为 4 倍额定电流，只用作工矿企业的单台电动机控制。配电柜内的隔离器、刀开关应具备以下功能：能接通和分断电路正常负荷电流；能可靠分断短路电流；能明显指示出电路的分断状态或闭合状态。除此之外，应按下列原则选择和使用。

1. 隔离器、刀开关的选择与应用

（1）隔离器、刀开关的主要功能是隔离电源。在满足隔离功能要求的前提下，选用的主要原则是保证其额定绝缘电压和额定工作电压不低于线路的相应数据，额定工作电流不小于线路的计算电流。一般应等于或大于所分断电路中的总负载的额定电流。刀开关所在线路的三相短路电流不应超过规定的动、热稳定值。对熔断器式刀开关，熔断器的选择应与被保护电器相匹配，且三相熔断器的额定电流也应一致。

（2）隔离器、刀开关的结构形式选择。根据在开关柜或电源箱内的安装形式来选择隔离器、刀开关的操作形式，确定是正面操作、背面操作或侧面操作等形式，是直接操作还是杠杆传动，是板前接线还是板后接线的结构形式。当要求有通断负荷能力时，应选用具备相应额定通断能力、带灭弧装置的隔离器、刀开关；选择的隔离开关应有明显的断口，并选用合适的熔断器规格。熔断器组合电器的选用，需在上述隔离器、刀开关的选用要求之外，再考虑熔断器的特点（参见熔断器的选用原则）。

（3）隔离器、刀开关在按上述原则选择后，均需进行短路性能校验，以保证其具体安装位置上的预期短路电流不超过电器的额定短时耐受电流（当电路中有短路保护电器时可为额定极限短路电流）。

2. 隔离器、刀开关的安装与操作

（1）隔离器、刀开关的安装。在低压配电系统中，隔离器、刀开关一般与低压断路器、接触器、熔断器等配合使用。刀闸开关只能垂直安装，不能水平安装，更不允许倒装。安装时用螺栓将刀闸开关的底板固定在配电柜（箱）的安装板上，一般安装在配电柜（箱）的上部，靠近母线或上进线端处，一般是低压断路器的上方。开关底板上的固定螺钉应埋入底板内，不得外露，并用绝缘漆胶封。必要时，还可在底板与固定支架之间衬绝缘垫后安装固定。操作手柄中心距地面应在 1.2 ~ 1.5m 之间，以方便操作。侧面操作的手柄距建筑物或其他设备的距离不宜小于 200mm。安装杠杆刀开关时，应适当调节延长拉杆长度，使合闸时动触刀到位，分闸时动触刀与静触刀之间的距离应符合安全规定要求。对装有灭弧罩的刀开关或熔断器式刀开关，安装时，灭弧罩应齐全、完好无损，并不影响开关分合闸。

（2）隔离器、刀开关的接线。接线时，应将电源进线端接在静触头上（上接线端子），负荷侧导线应接在动触头上（下接线端子），不允许反接，若与硬母线相连，应保证触刀不受应力作用。这样，拉开刀闸后，刀开关与电源隔离，便于检修。

（3）隔离器、刀开关的安全检查。安装前，应检查隔离器、刀开关的相间和底板的绝缘情况，合格后再安装。安装后要保证动触刀插入静触刀的深度到位。用连杆操作的隔离器、刀开关，应调节连杆长度，使之合闸时能到位，并应留有一定的备用行程，以缓冲合闸的冲击。操作手柄位置应与开关状态一致，合闸时，三相刀片应能顺利地同步进入静触刀。静触刀不仅要能夹住动触刀，而且应对动触刀有足够的压力。对带有灭弧触头的刀开关，应检查主触头与灭弧触头的动作先后顺序，符合规定的安装调整要求。

（4）隔离器、刀开关操作注意事项。无灭弧罩和防护措施的隔离器、刀开关严禁带负荷操作。装有灭弧罩或带熔断器动触刀的开关，可以通断不大于额定电流的负载。操作隔离器、刀开关前，应先检查其回路中的低压断路器是否在断开状态，在低压断路器断开状态下进行操作；停电操作时，确认低压断路器断开后，先拉负载侧隔离器、刀开关，后拉电源侧隔离器、刀开关，送电时顺序相反。一旦发生带负荷断开或闭合隔离器、刀开关时，如已拉开，则严禁重合。一经错合，无论是否造成事故，均不许再拉开，并采取相应措施。

（5）隔离器、刀开关的日常检查。隔离器、刀开关正常运行时，应巡视检查负荷电流是否超过隔离器、刀开关的额定值；检查导电部分有无接触不良、发热、触刀烧损、爬电、粉尘及导线（体）连接等情况，遇有以上情况时，应及时维修；检查绝缘连杆、底座等绝缘部件有无烧伤和放电现象；检查操作机构各部件是否完好、动作灵活，断开、合闸时三相是否同步、准确到位。对于负荷开关，除上述外，还应检查操作机构的部件是否完好，闭锁装置是否完好；检查外壳内、底座有无金属物及粉尘，并及时清扫，以免降低绝缘性能；金属外壳应有可靠的保护接地，防止发生触电事故。

2.3　低压断路器

低压断路器俗称自动空气开关，属于一类有载电源操作设备，是低压配电网中应用十分

广泛的主要电器开关之一。低压断路器的基本用途是在不频繁操作的低压配电柜（箱）中作为配电电源开关，并有过电流、短路、断相、漏电或欠电压等保护功能，能对线路、电器设备及电动机等进行保护。它不仅可以接通和分断正常负载电流和过载电流，而且可以接通和分断短路电流。低压断路器的图形、文字符号如图 2-7 所示。

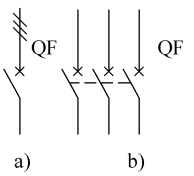


图 2-7 低压断路器的图形、文字符号
a）单线表示法
b）3 线表示法

2.3.1 低压断路器的分类

低压断路器的种类和型号繁多，根据断路器在电路中的不同用途，分为配电用断路器、电动机保护用断路器、家用和类似家用场所用断路器和剩余电流（漏电）保护用断路器等；按性能分有一般式、多功能式、高性能、智能型和可通信智能型等类型；按灭弧介质分，有空气式和真空式；根据采用的灭弧技术，有无飞弧式断路器和限流式断路器；按操作方式分，有人力操作、电动操作及储能操作；按极数可分为单极、二极、三极和四极式；按安装方式又可分为固定式、插入式和抽屉式等；按保护类别分，有选择型和非选择型，带或不带单相接地保护，带或不带欠电压延时。

国际上通称大容量低压断路器为 ACB（Air Circuit Breaker），如万能式（框架式）低压断路器；称装置式（塑料外壳式）低压断路器为 MCCB（Moulded Case Circuit Breaker），小型模数化低压断路器 MCB（Miniature Circuit Brakers）；漏电断路器为 ELCB（Earth Leakage Circuit Breaker）；电动机控制中心为 MCC（Motor Control Center）等。关于低压断路器的型号，目前有以行业代号命名和以企业特征代号命名两大类。如，NA15（DW15HH）-［1］/［2］，其中，N 是企业特征代号，A 是企业命名的万能式断路器代号，15 表示设计序号，DW15HH 是行业代号，表示智能型万能式断路器。后缀［1］/［2］的项数，各企业表示方法略有不同，一般标注断路器壳架等级额定电流/极数等。低压断路器的国标代号为 DZ（装置式）和 DW（万能框架式）两大类。

2.3.2 塑料外壳式低压断路器

塑料外壳式低压断路器具有的多种功能是以脱扣器和附件的形式实现的，根据用途不同，可选用不同的脱扣器和附件组成不同功能的低压断路器。

1. 塑料外壳式低压断路器的结构

塑料外壳式低压断路器是广泛应用于低压配电开关柜（箱）中的一种开关元件，可作为配电线路、电动机、照明电路及电热器等设备的电源控制及保护开关。塑料外壳式低压断路器的结构如图 2-8 所示。

塑料外壳式低压断路器的主要特征是由触头和灭弧系统、操作机构、各种脱扣器、附件等 4 个基本部分组成，所有部件都装在由聚酯绝缘材料模压而成的封闭外壳中。

（1）触头和灭弧系统。触头用于在断路器中实现电路接通或分断。主触头（静触头和动触头）和灭弧系统是执行电路通断的主要部件。主触头是由操作机构和自由脱扣器操纵其通断的，可用操作手柄操作，也可通过分励脱扣器远距离操作。在正常情况下，主触头可接通、分断工作电流，当出现故障时，能快速及时地切断高达数十倍额定电流的故障电流，从而保护电路及电器设备。有些断路器具有辅助触头或辅助触头附件，用于对断路器相关的控制回路和信号回路作自动控制之用，见表 2-1。

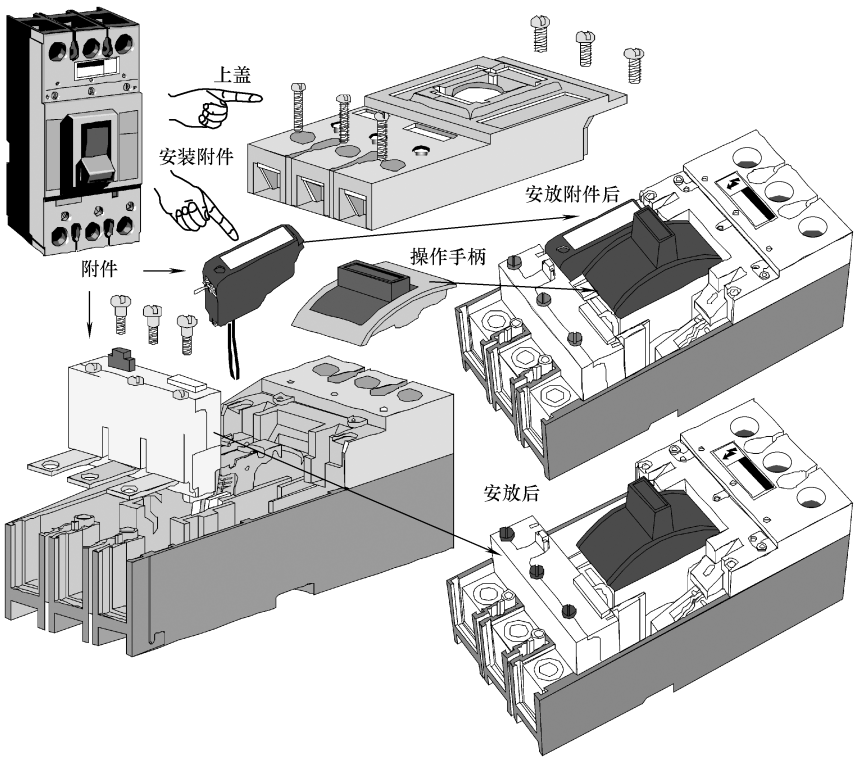


图 2-8　塑料外壳式低压断路器的结构

（2）脱扣器。从低压断路器的基本功能来看，它是由各种脱扣器组成，其基本功能也是由各种脱扣器的动作来实现的。各种脱扣器的执行机构称为自由脱扣器。自由脱扣机构是一套连杆机构，当主触头闭合后，自由脱扣机构将主触头锁在合闸位置上。如果电路中发生故障，自由脱扣机构就在相关脱扣器的操动下动作，使脱钩脱开，从而实现各种保护功能。表 2-1 是塑料外壳式低压断路器的脱扣方式及附件代号。

表 2-1　塑料外壳式低压断路器的脱扣方式及附件代号

附件名称 / 附件代号 / 脱扣方式	不带附件	报警触头	分励脱扣器	辅助触头	欠压电脱扣	分励脱扣器+辅助触头	分励脱扣器+欠压电脱扣	两组辅助触头	辅助触头+欠压脱扣器+电脱扣	分励脱扣器+警触头	辅助触头+报触头+警触头	欠压电脱扣器+报触头+警触头	分励脱扣器+辅助触头+报触头+警触头	分励脱扣器+欠压电脱扣器+报触头+警触头	两组辅助触头+报触头+警触头	辅助触头+欠压电脱扣器+报触头+警触头
瞬时脱扣器	200	208	210	220	230	240	250	260	270	218	228	238	248	258	268	278
复式脱扣器	300	308	310	320	330	340	350	360	370	318	328	338	348	358	368	378
电子脱扣器	400	408	410	420	430	440	450	460	470	418	428	430	448	458	468	478

举例，DZ20-250/300，表示 DZ20 系列塑料外壳式断路器，额定电流 250A，3 极，复式脱扣器，不带附件；而 DZ20-250/330 则是复式脱扣器，带分励脱扣器附件。附件分为内部附件和机外附件两类，选用时需注意。内部附件是断路器内部的附属装置，包括各种脱扣器、辅助触头等，以模块式安装，使用端子防护罩确保断路器使用时的安全性和可靠性。内部附件须开盖安装。机外附件是安装在断路器外部的附属装置，包括转动手柄操作机构、电

动操作机构、闭锁装置、板后接线装置、插入式安装台和辅助触头等。

（3）操作机构。断路器操作机构包括传动机构和脱扣器两大部分。传动机构按断路器操作方式不同可分为手动传动、杠杆传动、电磁铁传动、电动机传动；按闭合方式可分为储能闭合和非储能闭合；自由脱扣器的功能实现各种脱扣器、传动机构和触头系统之间的联系。手动操作机构采用传统的四连杆结构方式，具有弹簧储能，以使触头快速合闸和分断，其“合”、“分”、“再扣”和“自由脱扣”位置以手柄位置来区分。新型塑料外壳式低压断路器面板上设有一个小门，各种附件可通过这个小门安装于操作机构两侧空余的间隙内，以缩小整个断路器的体积。旋转操作手柄用作在开关柜门外操作断路器及断路器处于闭合状态时与柜门机械联锁之用。旋转操作手柄有旋钮型和枪型旋转操作手柄等多种形式，并有手柄闭锁装置。旋钮型手柄直接安装在断路器上，其手柄露在配电柜面板或抽屉外；枪型手柄的操作机构安装在断路器上，手柄的面板安装在配电柜门上，手柄轴长度可调。旋转操作手柄能按同一方向指示断路的分合状态。手柄闭锁装置是一种能使断路器操作手柄可靠地处于打开或闭合位置（即分闸或合闸锁定），而在机械上并不影响断路器自由脱扣的保护装置。当断路器负载侧电路需要维修或不允许通电时，可用手柄闭锁装置将断路器锁定在分闸状态，以防被人误将断路器合闸，从而保证维修人员安全或用电设备的可靠使用。当断路器合闸通电时，利用合闸锁定也可防止误操作，而引起停电事故。有的旋转操作手柄可外加挂锁锁定，以防误操作。图 2-9 是旋转手柄操作机构的外形及安装示意图。

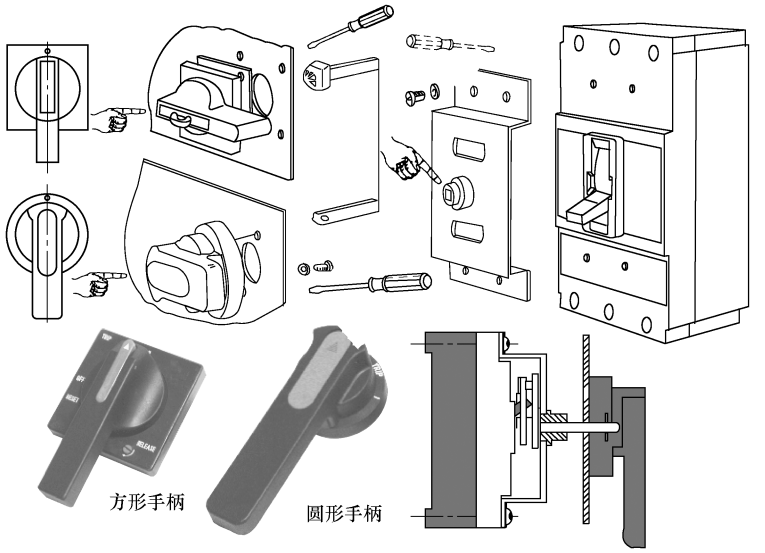


图 2-9　旋转手柄操作机构的外形及安装示意图

电动操作机构用作断路器的自动控制和远距离的闭合和断开之用。当断路器因故障而自由脱扣时，应先进行一次分闸操作使断路器再扣，然后便可进行合闸操作。如采用断路器的报警开关或辅助开关的动合触头，在断路器脱扣时，由报警开关或辅助开关立即将电动操作机构的分闸操作电路接通，电动操作机构就会立即进行分闸操作，使断路器实现再扣，以确保远距离对断路器进行“合”、“分”闸操作。电动操作机构有电动操作和电磁操作两种。电动操作由电动机驱动，一般适用于 400A 及以上大容量断路器的操作；电磁操作由电磁铁驱动，适用于 100A、225A 等小容量断路器。

2. 塑料外壳式低压断路器的工作原理

塑料外壳式低压断路器是由各种脱扣器组成，其基本功能是由各种脱扣器的动作来实现的。塑料外壳式低压断路器的工作原理如图 2-10 所示。

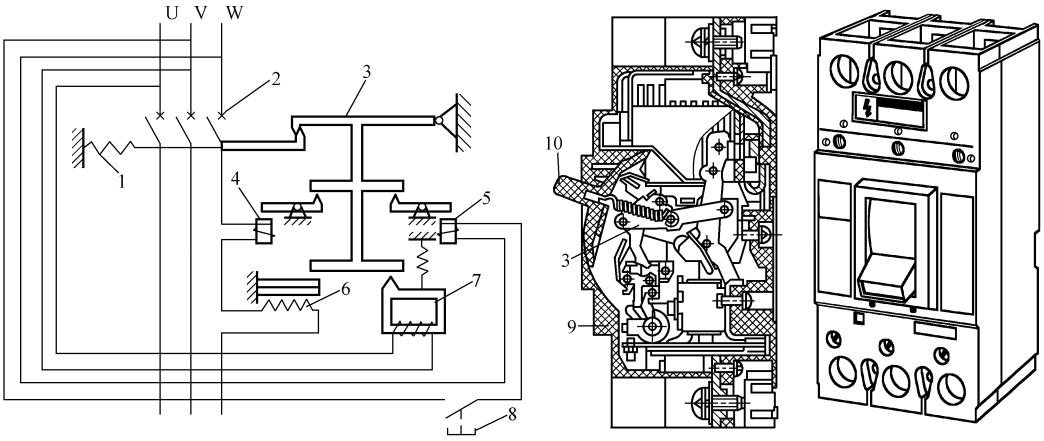


图 2-10　塑料外壳式低压断路器的工作原理示意图

a）原理图　b）剖面图　c）外貌图

1—弹簧　2—主触头　3—自由脱扣机构　4—过电流脱扣器　5—分励脱扣器　6—热脱扣器

7—欠电压脱扣器　8—分励按钮　9—外壳　10—操作手柄

由图 2-10 可见，当主触头 2 闭合后，自由脱扣机构 3 将主触头锁在合闸位置上。如果电路中发生故障，自由脱扣机构就在相关脱扣器的操动下动作，使脱钩脱开。自由脱扣器也可以看作是实现各种脱扣器功能的中间传递部件。

（1）电磁脱扣器。电磁脱扣器（过电流脱扣器）4 的线圈和热脱扣器 6 的热元件与主电路串联。电磁脱扣器可以是固定式的，也可以是可调式的。电子式脱扣器都是可调的。当电路发生短路或严重过载时，电磁脱扣器的衔铁吸合，使自由脱扣机构动作，从而带动主触头断开主电路，动作特性具有瞬动特性或定时限特性。一般用途低压断路器的过电流脱扣器是复式脱扣器，即瞬时脱扣器和热脱扣器的组合。在短路条件下，电磁脱扣器动作分断断路器，锁定机构也动作使断路器的动作机构保持在分断位置，在未将断路器手柄扳到分断位置使工作机构复位以前，断路器拒绝复位合闸。

（2）热脱扣器。当电路过载时，热脱扣器（过载脱扣器）的热元件发热使双金属片向上弯曲，推动自由脱扣机构动作，动作特性具有反时限特性。热脱扣器在给定电流范围内是可调的，调节方式一般为旋钮式或螺杆式。热脱扣器的动作特性和整定电流对应，一般用整定电流的倍数来表示。当为长延时电子式过载脱扣器时，其动作时间也可按 6 倍整定电流确定。当低压断路器由于过载而断开后，一般应等待 2 ~3min 才能重新合闸，以使热脱扣器恢复原位，这也是低压断路器不能连续频繁地进行通断操作的原因之一。

（3）欠电压脱扣器。欠电压脱扣器 7 用作线路及电源设备的欠电压保护，可进行远距离分断。欠电压脱扣器的线圈和电源并联。当电源电压下降到欠电压脱扣器额定电压 U_N 的 70% ~35% 时，欠电压脱扣器的衔铁释放，使自由脱扣机构动作，使主触头断开。

（4）分励脱扣器。分励脱扣器用作远距离控制断路器断开之用。通常分励脱扣器用于

应急状态下对断路器进行远距离分闸操作和作为漏电继电器等保护电器的执行元件。目前较多使用在配电柜开门断电保护电路中。分励脱扣器 5 在正常工作时，其线圈是断电的，当需要远距离控制时，按下起动按钮，使线圈通电，衔铁带动自由脱扣机构动作，使主触头断开。分励脱扣器的工作电压范围为(70% ~110%)U_N，有些产品可达(50% ~110%)U_N。还有一种作电网保护用的特殊分励脱扣器，其工作电压范围为(10% ~110%)U_N，它由一个普通脱扣器和一个电容器延时单元组成。电容器容量保证延时单元能储备足够的能量，使这种脱扣器能在电源出现故障后仍能动作。电容器充足电以后，在无电源条件下约可维持 4 ~5min。大功率低压断路器可配电动操作机构对断路器进行远距离操作分、合闸。

3. 塑料外壳式断路器产品简介

（1）塑料外壳式断路器产品类型和用途

塑料外壳式低压断路器有体积小、分断能力强、飞弧短（部分规格零飞弧）、抗振动等特点，广泛应用于配电馈线控制和保护、小型配电变压器的低压侧出线总开关、动力配电终端控制和保护、住宅配电终端控制和保护，以及各种生产机械的电源开关。塑料外壳式低压断路器的生产厂商、品牌种类繁多，据不完全统计，已超过 2000 多个品种，国产典型型号为 DZ20，另外还有许多以企业特征代号命名的派生产品，如常熟开关厂 CM1 等系列、西屋电气 WCM1 等系列、天正 TGM1 等系列、人民电器 RDM1 等系列、德力西 CDM1 等系列、正泰 NM1 等系列、三菱 WS 和 NF 等系列、西门子 3VL 等系列、金钟-默勒 NZM 等系列、梅兰日兰 NS 和 S 等系列、士林 ZAM1（BM）等系列。

塑料外壳式低压断路器产品按不同用途，分为配电用断路器、电动机保护用断路器、漏电保护用断路器和照明用断路器等；按其额定极限短路分断能力的高低可分为低分断型、标准型、较高分断型、高分断型等 4 类；按其产品特性主要有一般型、限流式、带剩余电流保护型、智能型和智能型可通信塑料外壳式低压断路器等 5 大类；按其过电流脱扣器型式可分为复式脱扣、瞬时脱扣、电子式脱扣和智能脱扣等 4 种；按其接线方式分为板前接线、板后接线、抽出式、插入式等类型。部分产品可垂直安装（即竖装），亦可水平安装（即横装）；按其产品的极数可分为二极、三极与四极。四极塑料外壳式断路器主要用于三相五线制配电系统中，它能保证将中性线电流不为零的电源完全断开，确保安全。四极塑料外壳式断路器中的中性极（N 极）位于最右侧，在分合过程中，中性极规定为闭合时较其他三极先接触，分闸时较其他三极后断开。其型式又分 N 极不安装或安装过电流脱扣器，N 极始终接通，或与其他三极一起合分等类型。

配电用断路器在配电网络中用于总电源或线路分支的电源开关，并具有过载、短路和欠电压保护功能。电动机保护用断路器用作笼型电动机的起动和分断，并具有电动机过载、短路和欠电压保护功能。漏电保护用断路器除具有上述断路器功能外，还可在用电器发生漏电时自动跳闸，从而起到防触电作用。照明用断路器除作为电源开关用外，主要用于线路过载和短路保护，具有高分断能力。带辅助触头的断路器一般每组辅助触头为一常开、一常闭，有些型号的断路器辅助触头每组由两常开、两常闭触头组成。

（2）DZ20 系列塑料外壳式断路器

DZ20 系列塑料外壳式断路器的灭弧系统是由灭弧室和其周围绝缘封板、绝缘夹板所组成。绝缘外壳由绝缘底座、绝缘盖、进出线端的绝缘封板所组成。绝缘底座和盖是断路器提高通断能力、缩小体积、增加额定容量的重要部件。触头系统由动触头、静触头组成。

630A 及以下的断路器，其触头为单点式。1250A 断路器的动触头由主触头及弧触头组成。电流脱扣器分过载（长延时）脱扣器、短路（瞬时）脱扣器两种。过载脱扣器为双金属片式。短路脱扣器为电磁式脱扣器。操作方式有手动直接操作、转动手柄操作和电动操作三种。安装方式有板前接线方式和板后接线方式。断路器的电气特性通常用保护特性曲线表示。制造厂商的产品样本中会根据具体产品型号给出多种保护特性曲线供选择。图 2-11 所示是 DZ20 系列塑料外壳式断路器的一种保护特性曲线。

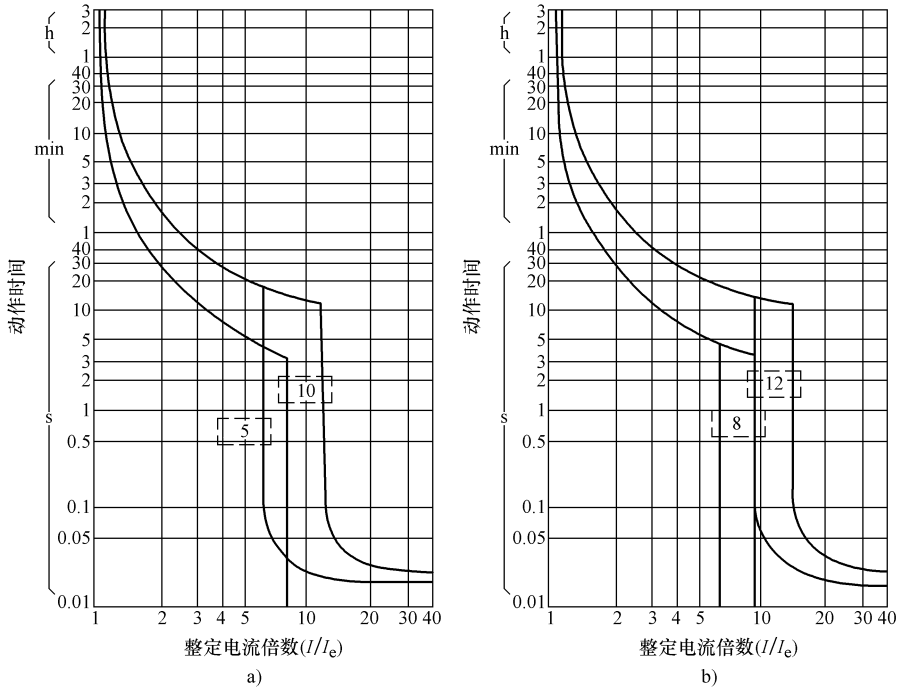


图 2-11　DZ20 系列断路器动作特性曲线示例

a）DZ20J$^{Y}_{G}$-200 型（配电用）　b）DZ20J$^{Y}_{G}$-200 型（保护电动机用）

由图 2-11 可见，保护特性曲线是在对数坐标系下通过测试建立的，包括过载反时限动作、短路定时限动作和短路瞬时动作三段曲线。从横坐标 1.05 ~ 10 倍区段是过载反时限动作曲线段，从横坐标 5 ~ 10 倍区段内的垂直曲线是短路定时限动作曲线，短路瞬时动作曲线则是近似水平靠近横坐标轴的那段直线。图中虚线框中的数字是脱扣电流范围，图 2-11a 表示脱扣电流范围为（5 ~ 10）I_n，适用于保护配电线路及具有较高接通电流的照明线路和电动机回路。图 2-11b 表示脱扣电流范围为（8 ~ 12）I_n，适用于保护电动机回路设备，有较高的抗冲击电流能力。保护特性见表 2-2 ~ 表 2-4。

表 2-2　DZ20 系列配电用断路器反时限特性

试验电流名称	整定电流倍数	约定时间 T		起始状态
		$I_n \leqslant 63A$	$63A < I_n$	
约定不脱扣电流	1.05	≤1h	≤2h	冷态
约定脱扣电流	1.30	<1h	<2h	热态

注：I_n 断路器或脱扣器的额定电流；热态是指通以约定不脱扣电流到规定的约定时间的状态。

表 2-3 DZ20 系列电动机保护用断路器反时限特性

试验电流名称	整定电流倍数	约定时间 T		起始状态
		$I_n \leqslant 100A$	$100A < I_n \leqslant 400A$	
约定不脱扣电流	1.0	≤2h		冷态
约定脱扣电流	1.2	<2h		热态
	1.5	≤2min	4min	热态
	7.2	$2s < T \leqslant 10s$	$4s < T \leqslant 10s$	冷态

表 2-4 DZ20 系列断路器三极过载脱扣器仅二极通电时的断开特性

试验电流名称	整定电流倍数	约定时间 T	起始状态
约定不脱扣电流	三极通电 1.0	≤2	冷态
约定脱扣电流	二极通电 1.25	<2	热态

2.3.3 万能式低压断路器

万能式低压断路器也称框架式低压断路器，是一种大容量低压断路器，具有较高的短路分断能力和较高的动稳定性，适用于交流 50Hz、额定电压 380V 的配电网络中作为配电干线的主保护。主要用于变压器 380V 侧出线总开关、母线联络开关或大容量馈线开关和大型电动机控制开关。容量较小的一般用途万能式低压断路器多用电磁机构传动，容量较大的万能式低压断路器则多用电动执行机构传动，无论采用何种传动机构，都装有手动操作手柄，以备检修或传动机构故障时用。极限通断能力较高的万能式断路器采用储能操作机构，以提高通断速度。其壳架等级额定电流一般为 200～6300A，短路分断能力为 40～50kA，有的产品采用了半导体式过电流脱扣器，具有过载长延时、短路短延时、短路瞬时动作多段式保护特性。高性能万能式断路器带有 4 段式保护特性，并具有选择性保护功能。

万能式（或框架式）低压断路器的工作原理与上述塑料外壳式低压断路器的工作原理相同。万能式低压断路器的结构主要由触头系统、操作机构、过电流脱扣器、分励脱扣器及欠压脱扣器、附件及框架、二次接线回路等部分组成，全部组件进行绝缘后装于绝缘衬垫的钢制框架底座中。不同的脱扣器和附件的组合可形成不同的保护特性，组成具有选择性或非选择性或具有反时限动作特性的电动机保护特性的断路器。通过辅助触头可实现远方控制。

万能式低压断路器的产品类型和型号很多，品牌很多，性能各异。常用国产主要系列型号有 DW15 系列、DW16 系列、DW17 系列、DW15HH 系列（多功能、高性能型）、NA 系列等，另外还有很多国外品牌产品。图 2-12a 所示是 DW15、DW16、DW17 型一般万能式断路器的产品实物图。以 DW16 型一般万能式断路器为例，其操作机构外形结构图如图 2-12b 所示。其他型号的万能式断路器的同类操作机构与此类似。

1. DW15 系列万能式断路器

DW15 系列万能式断路器适用于在交流配电网络中分配电能和供电线路及电源设备的短路、过载和欠电压保护。壳架等级额定电流 630A 的断路器也能在交流 380V 网络中供作电动机的过载、欠电压和短路保护。在正常条件下也可作为电动机的不频繁起动之用。限流型断路器特别适用于可能出现大短路电流的网络。

DW15 系列万能式断路器为立体布置形式，触头系统、快速电磁铁、左右侧板均安装在

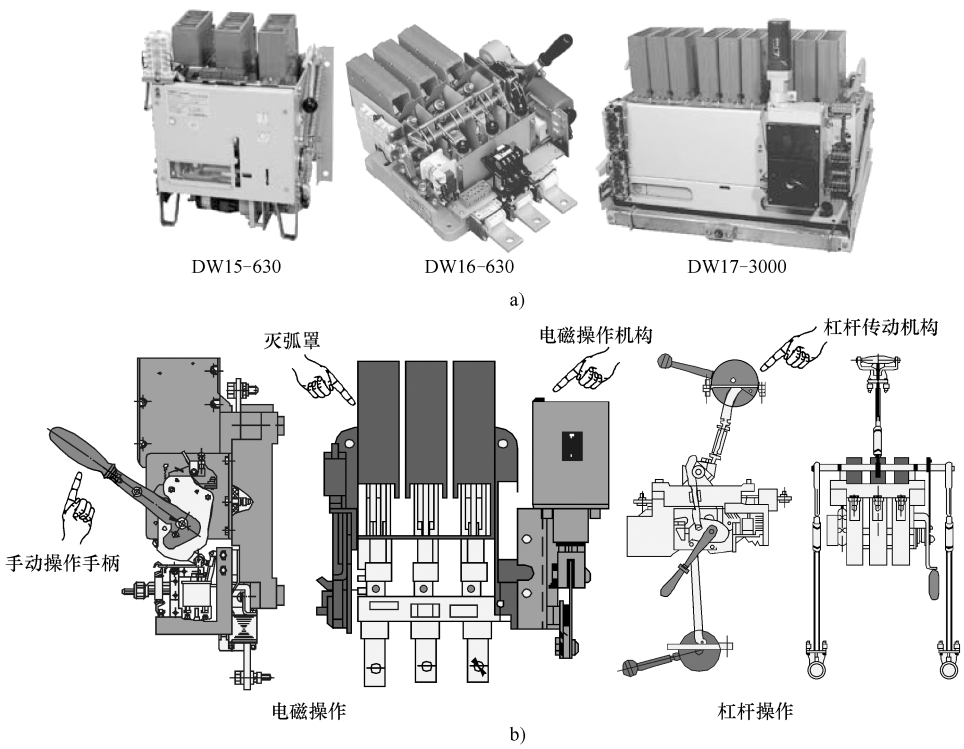


图 2-12　DW16 型万能式低压断路器的操作机构外形结构图

a）外貌图　b）结构示意图

一块绝缘板上。上部装有灭弧系统，操作机构装在正前方或右侧面。有“分”、“合”指示及手动断开按钮。其左上方装有分励脱扣器，背部装有与脱扣半轴相连的欠电压脱扣器。电流电压变换器套在下母线上。欠电压延时装置、热继电器或半导体脱扣器均分别装在下方。触头系统、操作机构均安装在铁制框架上，上部装有灭弧系统，右面装有操作机构。有“通”、“断”指示及手动“合”“分”按钮。左侧面装有分励脱扣器、欠电压脱扣器。抽屉式 DW15 系列断路器（DW15C、DWX15C-630 限流抽屉式断路器）由断路器本体和抽屉座组成，断路器本体上装有隔离触刀、二次回路动触头、接地触头、支承导轨等。抽屉座由左右侧板、铝支架、隔离触座、二次回路静触头、滑架等组成。正下方由操作摇手柄、螺杆等组成推拉操作机构。

2. DW16 系列万能式低压断路器

DW16 系列万能式断路器的用途和性能与 DW15 系列类似。在正常条件下，可作为线路的不频繁转换之用。额定电流 100 ~ 630A 的可用来保护电动机短路、过载和欠电压，并可作为变压器中性点直接接地的 TN 配电系统中单相金属性对地短路保护。

DW16 系列万能式断路器的触头系统、过电流脱扣器均装在断路器的底板上，触头系统上面装有灭弧系统，右侧装有自由脱扣机构。自由脱扣机构通过主轴与触头系统相连，左侧装有辅助开关。触头材料采用陶冶合金，有良好的抗熔焊性和低接触电阻。灭弧室栅片为平行布置，灭弧壁采用耐弧塑料制成，并配置隔弧板，从而提高断路器短路分断能力。断路器还可根据需要安装电动机操作机构、杠杆操作机构、电磁铁操作机构（只适用于 630A 以下

壳架等级电流）等。

3. DW17 系列万能式低压断路器

DW17 系列万能式低压断路器适用于在额定工作电压交流 380V、660V，电流至 4000A 的交流配电网络中用来分配电能和保护线路及电源设备的过载、欠电压、短路等保护，并具有分级选择保护功能。能直接起动电动机、发电机和整流装置等。1250A 以下的断路器在交流 380V 网络中可用作电动机的过载和短路保护。在正常条件下，还可作为电动机的不频繁起动之用。

DW17 系列万能式低压断路器采用立体式的积木结构，总体结构分固定连接式和抽屉式两种，抽屉式附有加长导轨以利于用户的维修。分为四个框架电流等级，即 630 ~ 1605A、2000 ~ 2505A、3200 ~ 3205A 和 4000A ~ 4005A 等级。四个框架以 630 ~ 1605 框架为基础，其他框架则根据不同的额定电流采用积木式结构拼装而成。接线方式有垂直进出线、水平进出线，操作方式有手动操作、直接电动操作和预储能操作。断路器的过电流脱扣器由瞬时脱扣器、长延时脱扣器和短延时脱扣器组成。可根据使用要求进行组合，实现二段或三段保护。二段式保护由瞬时或短延时与长延时组成。三段保护由瞬时、短延时与长延时组成。其中瞬时和短延时特性适于短路保护，而长延时特性适于过负荷保护。

2.3.4 智能型断路器

智能型断路器的主要特征是内置智能控制器（智能脱扣器），应用场合与普通低压断路器相同。也有单独的智能控制器产品，可直接安装在断路器框架上构成智能型断路器。智能型断路器有智能型万能式断路器和智能型塑料外壳式低压断路器两大类。

1. 智能型万能式断路器

目前，智能型万能式断路器应用较广泛的产品有西门子公司 3WN 系列、ABB 公司 F 系列及国产 DW45、DW48、CW2 等系列。智能控制器具有 L 型（经济型）、M 型（标准型）和 H 型（可通信型）三种类型，从而可构成三种不同功能的智能型万能式断路器。可通信智能型断路器除带有智能控制器外，还带有网络通信接口，可实现联网和工业网络通信。

（1）智能型万能式断路器的结构。智能型万能式断路器按机械结构可分为框架、触头及灭弧系统、手动操作机构、电动操作机构、智能控制器、抽屉座和附件（二次插接件、欠电压、分励脱扣器等）等 8 个完整独立的部件，总装时只需用螺钉固定即可。框架有固定式和抽屉式两类，把固定式断路器本体装入专用的抽屉座就成为抽屉式断路器。断路器外壳、框架采用塑料压制而成，触头、灭弧系统都放在绝缘小室中，防止相间短路，确保电弧向上喷出，保证下进线可靠分断。触头由主触头和弧触头组成；每个极均设有一个灭弧室，灭弧室全部置于断路器的绝缘底座内。操作机构和手动、电动传动机构位于断路器正面。操作机构采用五连杆储能自由脱扣机构，在使用过程中，总是处于预储能位置，只要断路器一接到合闸命令，断路器就能立即瞬时闭合。预储能的释放可用手动释能按钮或合闸电磁铁来完成。电动传动机构自成一体，储能轴与主轴之间通过凹凸形楔口活动连接，装拆方便。抽屉座由带有导轨的左右侧板、底座和横梁等组成，底座上设有推进结构，并装有位置指示，抽屉座的上方装有辅助电路静隔离触头。桥式主回路触头前方设置安全隔板。抽屉式断路器有三个工作位置：“连接”位置、“分离”位置、“试验”位置。位置变更通过手柄的旋进或旋出来实现。三个位置的指示通过抽屉底横梁上的指针显示。当处于“连接”位置时，主

回路和二次回路均接通；当处于“试验”位置时，主回路断开，并有绝缘板隔开，仅二次回路接通；当处于“分离”位置时，主回路与二次回路全部断开。此时即可拉出断路器本体部分。断路器只有在连接位置或试验位置才能闭合，而在连接与试验的中间位置，断路器不能闭合。

（2）智能脱扣器的工作原理

智能脱扣器的核心是一种采用 SoC 系统级芯片作为微控制器的电子脱扣器，典型的电子脱扣器是 Teridian 公司的 71M6403 电子脱扣器，广泛应用于 ACB 和 MCCB 断路器和其他类型的智能开关。典型的智能脱扣器原理框图如图 2-13 所示。

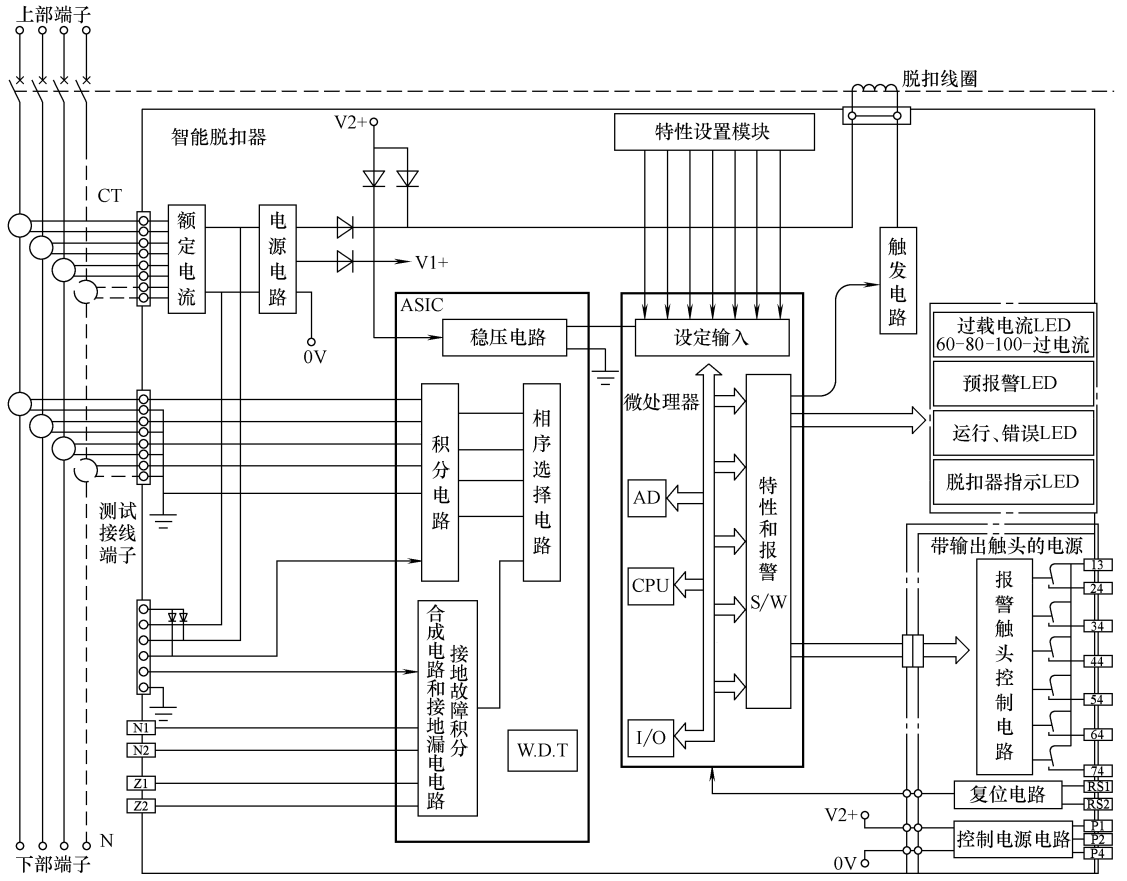


图 2-13　智能脱扣器原理框图

智能脱扣器由控制器、执行机构和互感器组成。控制器的主要作用是通过微处理器（MCU）实时采集断路器的电流信号、电压信号和各种辅助信号，当控制器采集到主回路电流符合设定的断路器保护条件时，选择性发出脱扣信号，控制断路器分断故障回路。控制部分主要由电源回路、信号回路、显示和键盘、CPU 等功能单元组成。实现信号的输入、输出和计算，并显示相应的状态和数据，输出脱扣指令。

执行机构主要由磁通变换器、复位指示按钮和联锁机构组成。磁通变换器是一种永磁操动执行器。正常工作时，永久磁铁保持在吸合状态，当故障电流达到控制器脱扣值时，磁通变换器收到励磁信号，在反向磁场的作用下触发，动作于跳闸。当电路出现故障，磁通变换

器动作，复位指示按钮弹出，断路器断开。排除故障后，只有在人工按下复位指示按钮后，断路器才能重新合闸。联锁机构用来保证当复位指示按钮压下时，断路器才能合闸，否则，无法合闸。

互感器（CT）由辅助工作电源线圈、信号输出线圈（空心线圈）组成，有安装在断路器主回路上的内置互感器和外接互感器两种。辅助工作电源绕组用于为控制器提供辅助工作电源，并通过过载电流按比例显示。信号输出绕组为 MCU 提供采样信号。辅助工作电源绕组和信号输出绕组封装在同一个互感器的外壳中，断路器的每极配有一个互感器。当大电流流过互感器时，辅助工作电源线圈将产生激励磁场和感应电动势，即可为控制器提供辅助工作电源。当互感器流过电流时，将在信号输出绕组副边产生一幅值比较小的信号，此信号经控制器处理后，作为 MCU 的采样信号。信号输出绕组（空心绕组）把断路器主回路上的大电流转换为毫伏级信号，然后先经模拟量处理，再经八选一电子选择开关进入 MCU，电流信号在 MCU 内进行 A/D 转换为数字量，并与用户整定的保护参数进行比较。如果电流信号的数字量达到保护值，MCU 根据保护特性实施保护的延时过程，延时时间到，MCU 发出脱扣指令，磁通变换器使脱扣机构动作，断路器分闸，完成主保护动作过程。另外，模拟量与相应保护值的双限比较器进行模拟量比较，如果电流信号的模拟量达到保护值，双限比较器发出脱扣指令，磁通变换器使脱扣机构动作，断路器分闸，完成后备保护动作过程（MCR 功能）。

图 2-13 中，电源电路通过电流互感器（CT）为智能脱扣器供电。专用集成电路 ASIC（Application Specific Intergrated Circuits）将电流互感器检测到的信号放大，并通过矢量合成检测接地故障电流。微处理器根据智能脱扣器所检测的或放大的信号执行脱扣操作。特殊设置模块用于设置智能脱扣器特性的电路。由图可见，智能脱扣器不再是简单的脱扣保护，而是将保护功能与各种显示、控制功能一体化，形成智能控制器。智能控制器的一般功能包括：

1）保护特性：具有过载长延时反时限、短路短延时反时限及定时限、短路瞬时保护，不对称接地（接零）、缺相、三相不平衡故障保护等四段保护特性。

2）整定功能：采用数码显示、编码开关或按键整定方式，可根据需要整定各保护参数，组成所需的保护特性。

3）显示功能：用负载电流光柱显示断路器的工作电流；显示整定电流、整定时间；显示各种保护状态。

4）自检功能：环境温度过热自诊断；微控制器内部的 CPU、ROM、RAM 及 I^2C 通信自检。

5）记忆功能：记忆过载和短路引起线路或设备的发热程度。记忆线路故障引起脱扣时的故障电流、延时动作时间、故障类别。

6）试验功能：模拟现场的故障状况进行断路器的脱扣或不脱扣试验。

7）可增选功能：短路短延时定时限保护、不对称接地（接零）故障保护、电压表功能、负载监控功能、报警信号输出功能。

8）通信功能：通过通信接口对断路器实现远距离的“四遥”功能。即遥控、遥信、遥调、遥测。可通过上位机可集中监控。遥控是通过主站计算机对系统中每一从站断路器进行储能、闭合、分断等操作控制；遥调是通过主站计算机对系统中的从站进行保护整定值的设

定和更改；遥测是主站计算机对系统中从站采样的电网运行参数进行监测；遥信是在主站计算机上即可完整的查看从站的各种运行参数、故障参数、整定参数和型号、生产商、生产日期、控制器编号等参数。支持 Modbus-RTU、PROFIBUS-DP、DeviceNet、CAN 等通信协议。

9）通信接口：RS-485。通信线路为双绞屏蔽线。

10）波特率：19200bit/s，支持 1200bit/s、2400bit/s、4800bit/s、9600bit/s、38400bit/s。

11）帧格式与通信数据：1 位起始位，8 位数据位，2 位停止位，偶校验，支持无校验、奇校验。通信数据包括实时电流、电压、基波电流、基波电压、功率、功率因数、电能、频率、谐波电流和电压含量、谐波电流和电压的总谐波畸变率，以及报警、故障、欠电压、合闸准备就绪、分合闸位置等断路器状态数据。通信数据还包括断路器整定值的读取和修改、历史故障记录数据，断路器产品编号、型号等概要数据。

（3）DW45 智能型可通信低压断路器

DW45 系列智能型可通信低压断路器具有高短路分断能力、智能化、模块化、体积小、操作可靠等特点。主要保护功能包括长延时反时限保护、短延时定时限和反时限保护、短路瞬时保护、不对称接地或漏电定时限和反时限保护、N 相保护、电流不平衡保护、负载监控等。辅助功能包括测量和运行监视功能、数据查询功能、参数整定功能、模拟试验功能、系统自诊断功能、负载监控功能、系统时钟功能、区域联锁、后备保护 MCR 功能、状态选择功能、过载报警与记忆、历史故障查询、故障时的电流、电压录波功能、三相电流光柱显示和液晶显示、编程接口功能、通信连网功能等。可选过载预报警信号输出、自诊断报警信号输出、故障跳闸报警信号输出、接地不脱扣只报警信号输出等功能。可通过 Modbus-RTU、PROFIBUS-DP、DeviceNet、CAN 协议等现场总线方式联网，实现“四遥”功能。连网情况下，可在控制中心进行保护特性参数整定。

1）DW45 系列智能型可通信低压断路器的结构。图 2-14 是 DW45 系列智能型可通信低压断路器的模块化结构图。

由图 2-14 可见，断路器由本体和抽屉座组成，抽屉座两侧有导轨，导轨上有活动的导板（抽出手柄），断路器本体架落在左右导板上。整体为立体分隔式布置，触头系统封闭在绝缘基座与底板之间，每组触头都被相间隔板分割在小室内，其上方是灭弧室。动触头通过连杆与绝缘基座外的主轴连接，从而完成闭合、分断的任务。每相触头系统为了降低电动斥力及提高接触可靠性，采用多档触头并联形式，多档触头安装在一个触头支持上。触头接触片的一端用软联结与母排连接。断路器在闭合时，主轴带动连杆使触头支持绕支点逆时针转动，当动触头与静触头接触后绕支点顺时针转动并压缩弹簧，从而产生一定的触头压力，确保断路器可靠闭合。智能脱扣器、操作机构、电动储能机构依次排在其前面形成各自独立的单元，可以分别拆装。断路器是通过本体上的母线插入抽屉座上的桥式触头连接主回路。摇动抽屉座下部横梁上的手柄，可实现断路器的“连接”、“试验”和“分离”三个工作位置（手柄旁有位置指示）：在“连接”位置，主回路和二次回路均接通；在“试验”位置主回路断开，并由绝缘隔板隔开，仅二次回路接通，可进行必要的动作试验；在“分离”位置，主回路与二次回路全部断开。抽屉座与断路器间有机械联锁装置，只有在连接位置和试验位置断路器才能闭合。断路器有手动和电动两种操作方式，并具有自由脱扣功能。

欠电压脱扣器有瞬动脱扣和延时脱扣两种工作状态。当电源电压降至（35% ~ 70%）U_e时，瞬时脱扣，断开断路器；当电源电压降至（35% ~70%）U_e 时，延时脱扣，

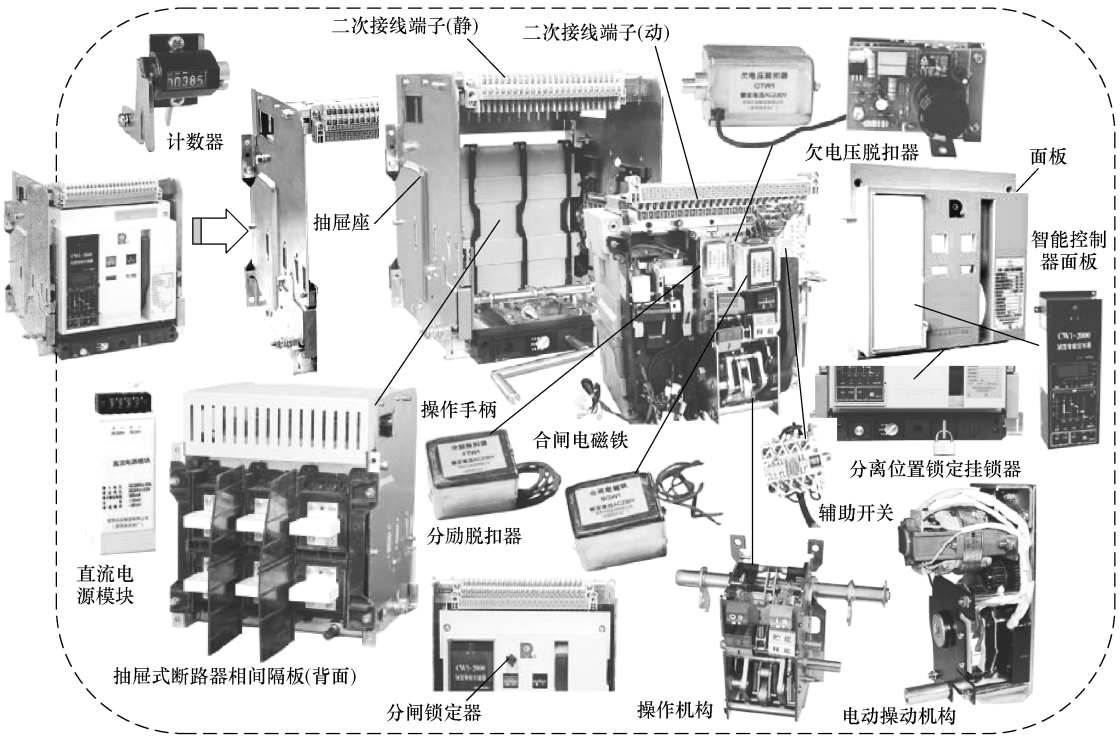


图 2-14 DW45 系列智能型可通信低压断路器的模块化结构图

断开断路器，延时时间为 1s、3s、5s；分励脱扣器可远距离操作断路器断开，其可靠闭合电压范围为（70% ~110%）U_e；电动操作机构是电动机储能和自动再储能装置，其可靠动作的电压范围为（85% ~110%）U_e；闭合电磁铁可使断路器在弹簧储能状态下的合闸机构动作，使断路器闭合，其可靠动作的电压范围为（85% ~110%）U_e。辅助开关触头的约定发热电流为6A，一般为4 常开4 常闭桥式触头。DW45 智能型万能式断路器的机械附件有联锁装置和面板等。联锁装置有多种形式，用于多路电源供电的系统，可将两个或三个抽屉式或固定式断路器垂直机械联锁或将两个抽屉式或固定式断路器水平机械联锁。面板固定在开关柜门上，起密封作用。控制器的附件包括外置互感器、编程器、通信线、集线器和通信协议转换器等。外置互感器用于测量 N 极电流（3P + N 型）或漏电电流；编程器用于整定的一些特定参数；通信协议转换器可实现 Modbus-RTU 协议向 PROFIBUS-DP 或 DeviceNet 协议转换等。

2）智能脱扣器的结构和功能。智能脱扣器由上体、基座、互感器和附件等组成，上体和基座是完成保护功能的关键部件。上体完成信号处理、实现辅助功能、产生脱扣指令。基座承担实现脱扣动作和辅助供电。上体主要由控制器的电子组件板、机械复位按钮及外壳等构件组成；电子组件板由微处理器 MCU 板、电源及 I/O 板和人机界面板组成。MCU 板主要进行电流和电压信号的模拟量处理、模/数转换、数字量运算和逻辑处理、产生脱扣指令、实现各种功能；电源及 I/O 板负责电源供给、电流及电压信号的输入、断路器机构动作信号输入、脱扣信号输出、信号触头功能输出等；人机界面板主要有按键和显示部分组成。通过面板上的按键可输入指令，整定保护参数，进行模拟试验，完成数据查询等，显示部分可显示相关信息。可根据需要选择集成信号触头输出组件及内含的通信组件等。

基座由联锁机构、磁通变换器、机械复位机构、辅助开关和电源模块等组成。

联锁机构用于控制器脱扣推杆位置的锁定，并带动一组辅助开关的开、闭触头，用来指示断路器主触头的分、合状态。磁通变换器是控制器的执行元件，其内部有永久电磁铁，在正常情况下依靠永久磁铁吸合铁心而处于闭合状态；当通电时，在内部产生一个与永久磁铁极性相反的磁场，使其动铁心在反力弹簧作用下弹出，驱动脱扣推杆，使断路器分闸。当 MCU 发出脱扣指令时，电流通过线圈产生脱扣磁通，反力弹簧弹出铁心，使磁通变换器打开而动作，从而推动断路器脱扣半轴而分断断路器，分断后脱扣推杆被锁定在脱扣位置，同时断路器的主触头被锁定在分闸位置。

磁通变换器与欠电压脱扣器和分励脱扣器完全独立；机械复位机构用于控制器脱扣推杆的复位；辅助开关含有若干组触头，用于指示断路器主触头的分、合状态和断路器的工作状态，反馈分合闸机构的动作情况；控制器电源采用直流辅助电源和速饱和互感器共同供电，直流辅助电源模块就装在辅助电源变压器的位置上，不用外挂直流模块，但当智能控制器外接二次回路电源为直流 220V 时，须通过直流电源模块转换成直流 24V 电源提供给控制器。U、V、W 三相内置互感器由速饱和互感器和空心互感器组成，装在一个圆形盒内。速饱和互感器用于为上体提供工作电源；空心互感器感应的毫伏电压信号为控制器提供主回路电流的测量信号，其他互感器只输出测量信号。

3）区域联锁功能。区域联锁功能可进行断路器上下级短路短延时和接地故障保护选择性动作保护，以减少故障波及范围，并缩短断路器的分断时间。这样，短路短延时或接地故障被隔离，并由离故障点最近的上级断路器分断，系统内其他区域的设备保持合闸持续供电，避免了因下级断路器短路故障而造成大范围停电事故。最低级断路器短延时和接地故障跳闸时间必须设为“0” ms，当检测到短延时或接地故障电流超过设定阈值时，则发瞬动脱扣命令，同时向上一级联锁断路器发出下级断路器已分断信息，则上一级断路器按既定延时执行。若某一级断路器分断后，故障已排除，则上一级断路器退出故障状态而正常运行。若本级和上级两个断路器均检测到短延时或接地故障电流超过设定阈值，下级因检测部件故障而不跳闸，上级断路器在 40ms 内没有接收到下级断路器送来的约束信号，且短路继续存在，则上级断路器不按预定设定时间而瞬时分断，并将约束信号向更上一级传递。通过控制线可联锁多个配有区域联锁功能的智能型控制器的断路器。图 2-15 所示有 3 级智能断路器联锁，一般最多可联锁 5 级。

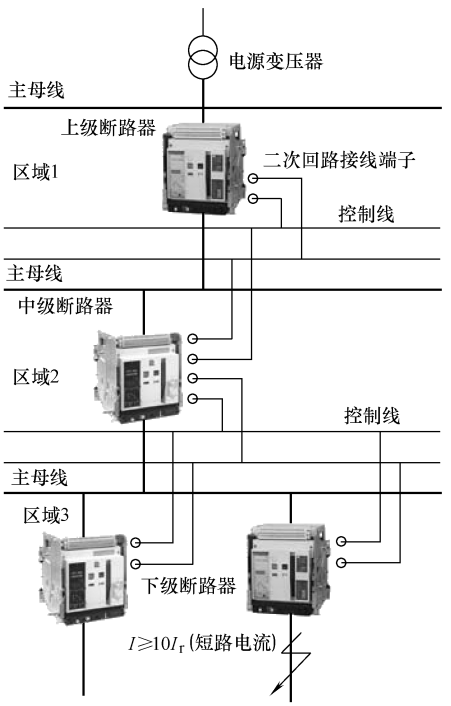


图 2-15　区域联锁功能示意图

图 2-15 中，当下级断路器出口处发生大于 $10I_r$ 短路时，3 级智能控制器均检测到有大于 $10I_r$ 短路电流故障，下级断路器的短延时动作时间整定值 $t_{sd}=0s$，在 10ms 内即发出脱扣分断命令，并立即向中级断路器传递，中级断路器在 40ms 内如收到下级断路器送来的级联

约束信号，则不分断中级断路器，并向上级断路器传递故障解除级联约束信号，保证了中级和上级断路器的正常供电；反之若下级断路器因本身部件故障未能瞬动脱扣，中级断路器在40ms 内未收到下级断路器送来的级联约束信号，则发出瞬动脱扣命令，并立即向上级断路器发送级联约束信号，上级断路器在 70ms 内如能收到中级断路器发来的约束信号，则不分断上级断路器，否则发出分断上级断路器脱扣命令。各级参数整定值见表 2-5。

表 2-5　区域联锁各级参数参考整定值

参数	短延时整定电流阈值 I_{sd}	短延时动作时间整定值 t_{sd}	接地故障整定电流阈值 I_g	接地故障动作时间整定值 t_g
上级	$10I_r$	0.4s	$1.0I_n$	0.4s
中级	$8I_r$	0.2s	$0.8I_n$	0.2s
下级	$6I_r$	0s	$0.6I_n$	0s

注：I_r：长延时整定电流阈值；I_n：智能控制器额定电流

2. 智能型塑料外壳式低压断路器

智能型塑料外壳式低压断路器除具有普通塑料外壳式低压断路器的功能外，基本特征是具有智能脱扣器和通信功能，模块化结构。产品普遍采用新型灭弧技术和限流原理的封闭式触头系统。可实现网络化控制，还可派生区域联锁、电量监控及电能分析等辅助功能。除智能脱扣器外，其结构原理和功能与上述塑料外壳式低压断路器类似。外形尺寸与同系列、同规格的普通塑料外壳式断路器相同，具备互换性。目前，智能型塑料外壳式断路器主要有智能型可调塑料外壳式断路器和可通信智能型塑料外壳式断路器两种产品形式。典型产品有三菱公司的 WS-G4 系列，国产 $CM1_E$ 系列、NM8 系列等。

（1）智能型可调塑料外壳式断路器。智能型可调塑料外壳式断路器采用单片机控制的电子可调脱扣器，使断路器具有三段保护（过载长延时反时限、短路短延时反时限、短路瞬时定时限），动作电流、动作时间可调；可根据负载电流对脱扣器进行设置调整；可与连接在同一电路中的其他断路器和短路保护装置选择性配合。电子可调脱扣器由断路器自身提供能量，电流信号及脱扣器工作电源来自安装于断路器内的电流互感器；具有手持式专用测试器，以对断路器的参数进行检测。可调塑料外壳式断路器具有“预报警”指示、过载指示、大电流瞬时脱扣功能等。图 2-16 是 $CM1_E$ 智能型可调塑料外壳式断路器的结构示意图。

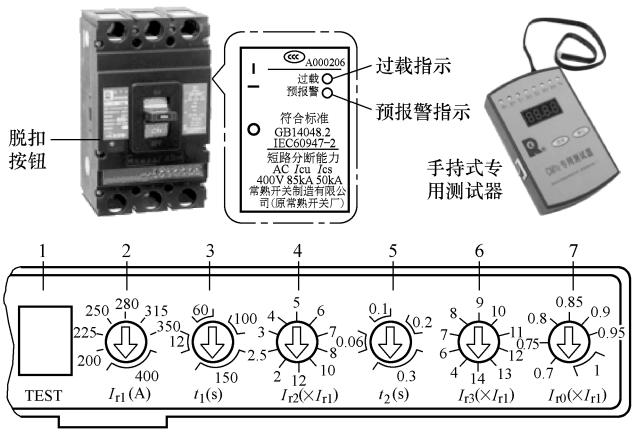


图 2-16　$CM1_E$ 智能型可调塑料外壳式断路器的结构示意图

图 2-16 中，测试端 1，用于检测电子脱扣器当前整定值；过载长延时动作电流 I_{r1} 调整钮 2，根据断路器不同的额定电流，可从 4 档到 10 档进行调整；长延时动作时间 t_1 调整钮 3，可进行 4 档调整；短路短延时动作电流 I_{r2} 调整钮 4，可进行 10 档调整；短延时动作时间 t_2 调整钮 5，可进行 4 档调整；短路瞬时动作电流 I_{r3} 调整钮 6，可进行 8 档、9 档或 10 档调整；预报警动作电流 I_{r0} 调整钮 7，可进行 7 档调整。当断路器正常工作时，断路器面盖上的发光二极管指示为绿色；当流过断路器的实际运行电流达到或超过预报警动作电流时，断路器面盖上的“预报警”发光二极管指示为黄色；当负载电流超出过载长延时动作电流时，断路器面盖上的发光二极管指示为红色；当断路器闭合时或在运行时，遇短路大电流（$\geq 20I_{nm}$），断路器由电磁脱扣机构直接脱扣。所有功能参数采用拨码开关整定，可根据需要自行设定，组成特定的选择性保护线路。断路器按其额定极限短路分断能力（I_{cu}）的高低，分为 M 型（较高分断型）、H 型（高分断型）两类。断路器可垂直安装，亦可水平安装，具有体积小、分断电流高、飞弧短、带隔离、抗震动等特点。

（2）智能型可通信塑料外壳式断路器。智能型可通信塑料外壳式断路器也是采用电子可调脱扣器和微处理器控制，但具备了通信功能，可实现网络化控制、区域联锁、电量监控及电能分析等辅助功能，构成智能型控制器，通过穿心互感器采集信号，然后通过微处理器分析、处理和控制，并通过 RS-485 接口实现计算机通信功能。智能化脱扣器不仅增加了额定电流的选择范围，具有三段式保护，并且过载长延时及短路短延时动作时间可以由用户自行设定。

以下以三菱 WS-G4 系列智能型可通信塑料外壳式断路器为例，简单介绍智能型可通信塑料外壳式断路器的结构原理。图 2-17 是三菱 WS 系列可通信智能型塑料外壳式断路器的结构示意图。图 2-18 是三菱 WS 系列智能型可通信塑料外壳式断路器的热磁脱扣器和电子脱扣器面板示意图。图 2-19 是三菱 WS 系列智能型可通信塑料外壳式断路器联网示意图。

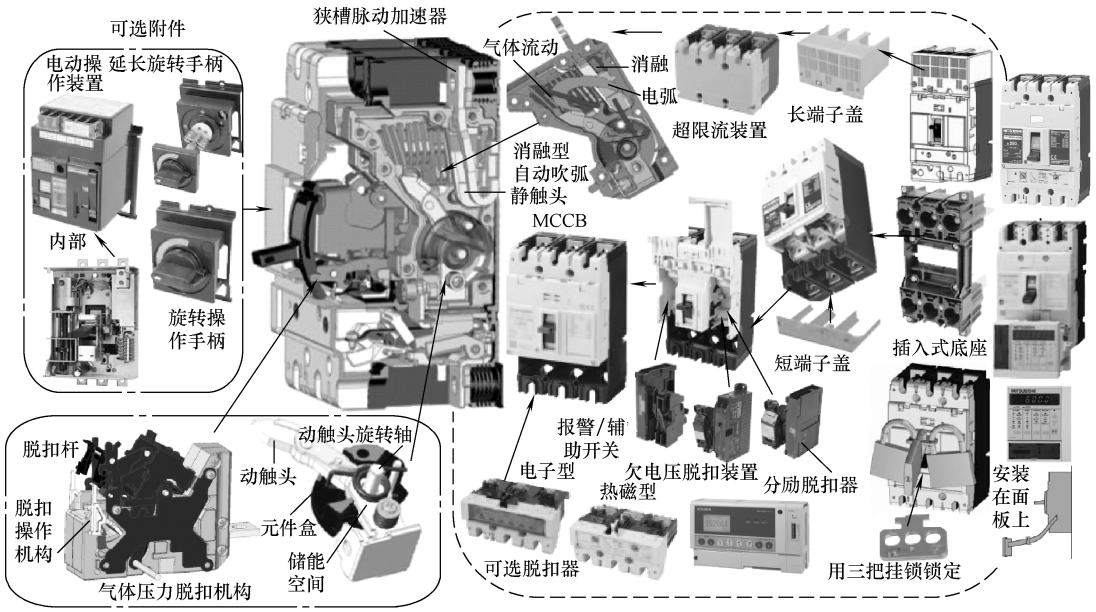


图 2-17　三菱 WS 系列智能型可通信塑料外壳式断路器的结构示意图

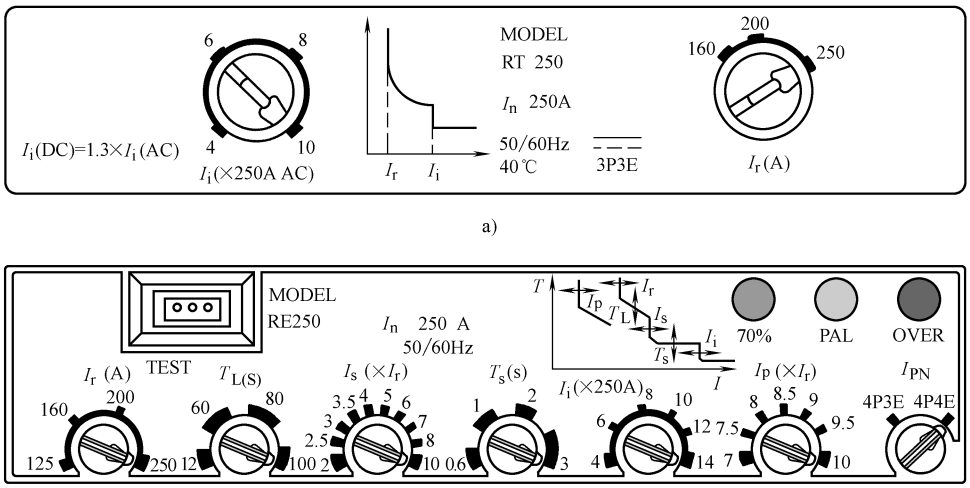


图 2-18 热磁脱扣器和电子脱扣器面板示意图

a）热磁脱扣器面板 b）电子脱扣器面板

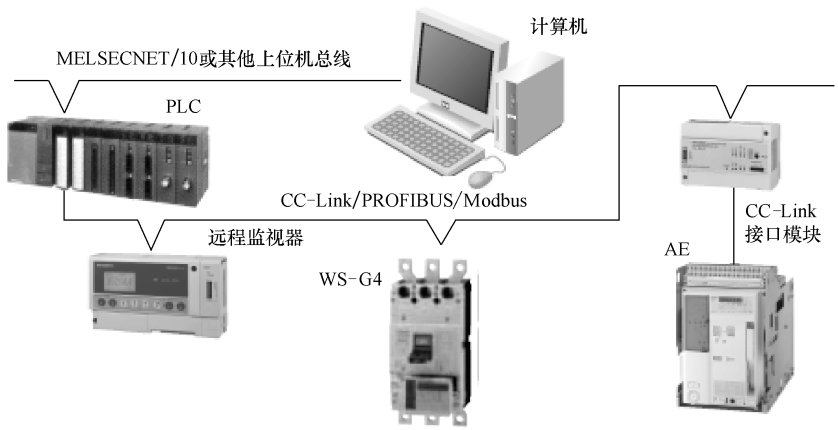


图 2-19 三菱 WS 系列智能型可通信塑料外壳式断路器联网示意图

WS 系列智能型可通信塑料外壳式断路器配备可调的热磁脱扣器和电子脱扣器，具有报警开关（AL）、辅助开关（AX）、分励脱扣器（SHT）、欠电压脱扣装置（UVT）等盒式附件。除此之外，还应用聚合物消融型自动吹弧气体压力脱扣机构、狭槽脉动加速器 ISTAC（Impulsive Slot-Type Accelerator）技术和无可扰导体通电技术等提高断路器分断性能。聚合物消融型自动吹弧是一种采用直角方式将气体吹到电弧上以提高分断性能的技术。产生于高聚合体物质中的气体聚集于储能空间之内，气体被吹到电弧上予以灭弧，从而改善了高压分断性能；气体压力脱扣机构通过元件盒孔的喷射气体，直接作用于脱扣机构，它与电磁型脱扣器相比，动作速度更快，而且有助于改善限流特性和分断可靠性。狭槽脉动加速器 ISTAC 分断技术，是利用排斥力、吸引力及气体压力这三种力加速动触头的分离速度，通过优化电流通路和添加磁心，电磁驱动力得到了增强。通过高速开断和电弧推动，提高了电弧电压的上升速率，降低了峰值电流 I_p。可选的测量显示器（MDU）可测量和显示负载电流、线电压、功率、电能、谐波电流（第 3、5、7 次谐波和总谐波）和功率因数，实现电能管理。当安装电能积累设置单元时，带脉冲输出任选功能的 MDU 可输出脉冲。带 CC-Link 总线任

选功能的 MDU 可将测量数据传输到 CC-Link 网络。当断路器脱扣时，故障原因和故障电流将存储于 EEPROM 中，以便检查故障原因。最高可显示最大额定电流的 16 倍。负载电流的最大需求值、线电压总谐波电流、功率和电能（小时值）均存储于 EEPROM 中。带 CC-Link 的 MDU 可存储这些数据值的发生时间，以方便寻找功耗的峰值时间。

2.3.5　模数化小型断路器

模数化小型断路器也称小型断路器或微型断路器，具有产品系列化、模数化、模块化、体积小、分断能力强、功能多样、用途广泛等特点，是组成终端组合电器的主要部件之一，广泛应用于工业、商业、建筑物和类似场所及民用等各个领域，装于配电线路末端的模数化终端配电箱和其他成套电器箱内，对配电线路、电动机、照明电路及电热器和用电设备进行配电、控制和短路、过载保护及线路的不频繁转换等。

1. 模数化小型断路器的类型

根据模数化小型断路器在电路中的不同用途，分为配电用、电动机保护用和照明用小型断路器、小型直流断路器、模数化小型漏电断路器、模数化小型隔离开关、模数化插座及各系列产品附件等。漏电脱扣器有电磁式、电子式、电子式带过电压保护功能等类型。按产品性能又有标准型、紧凑型、高分断型、超高分断型、重载型等。具有单极 + 中性极（1P + N 型）、单极（1P）、二极（2P）、三极（3P）和四极（4P）等类型。其中，1P + N 型为相线带过电流及短路保护，中性线无保护，通过机械结构保证中性线极（N 极）先合后分。不同产品具有各种附件可供选择。有的产品有插拔式底座，可以实现插拔式安装，其他各类产品是固定式 35mm 标准导轨安装。

模数化小型断路器生产厂商、品牌种类繁多，几乎所有的低压电器生产厂商均生产模数化断路器。典型型号有 DZ47、C45、C65、NC100H、C32、DZ47、S、DZ187、XA、MC、BH 等系列。另外还有许多以企业特征代号命名的派生产品。

2. 模数化小型断路器的结构原理

模数化小型断路器的特征是在结构上具有外形尺寸模数化（9mm 的倍数）和安装导轨化，单极（1P）断路器的模数宽度为 18mm（27mm），凸颈高度为 45mm，安装在标准的 35mm × 15mm 安装轨上，利用断路器后面的安装槽及带弹簧的夹紧卡子定位，拆卸方便。

模数化小型断路器由操作机构、热脱扣器、电磁脱扣器、触头系统、灭弧室等部件组成，所有部件都置于一绝缘外壳中。图 2-20 是模数化断路器的内部结构、外观、外形尺寸和安装尺寸示意图。

模数化小型断路器的短路保护由电磁脱扣器完成，过载保护由双金属片式热脱扣器完成，额定电流在 5A 以下的产品采用复式加热方式，额定电流在 5A 以上的产品采用直接加热方式。

3. 模数化终端配电箱

模数化终端配电箱是一种安装于终端的电器装置，内装元件主要安装宽度为 9mm 模数的模数化电器，安装于 35mm 标准导轨上，可根据需要任意组合模数电器、插座、漏电开关、隔离开关、塑料外壳式断路器等，组成具有防漏电、触电、短路、过载等多种保护的配电装置。主要结构部件有上盖（有的有透明罩）、箱体、安装导轨、汇流排、接线座、双线罩和模数化电器元件等。箱体为金属喷塑或阻燃 ABS 材料结构。箱体上下、左右及背后均

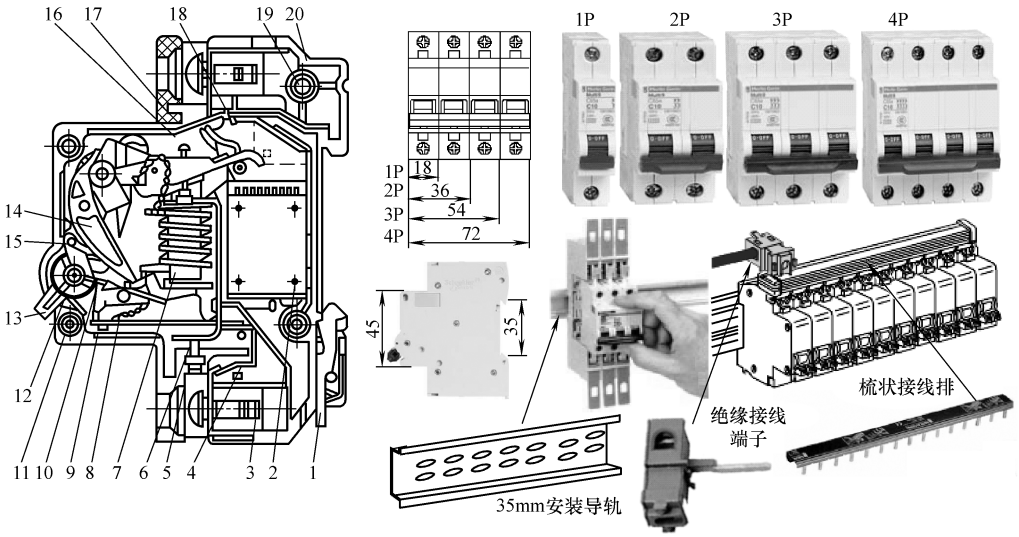


图 2-20 模数化断路器的内部结构及外形示意图

1—安装卡子 2—灭弧罩 3—接线端子 4—连接排 5—热脱扣调节螺栓 6—嵌入螺母
7—电磁脱扣器 8—热脱扣器 9—锁扣 10（11）—复位弹簧 12—手柄轴 13—手柄
14—U 形连杆 15—脱钩 16—盖 17—防护罩 18—触头 19—铆钉 20—底座

设置一定数量的进出线孔（敲落孔），箱内设有零、地线。便于安装接线。开关元件手柄外露，带电及其他部分遮盖于上盖内部，打开门可方便地进行操作，使用安全可靠。

模数化终端配电箱分暗装和明装两种，按照可安装回路数一般分为 6、10、12、15、18、20、24、30、36、45、60 等多种回路组合。适用于 50Hz，电压 220V 或 380V，总电流 125A 及以下的终端电路中。图 2-21 是模数化终端配电箱的内部结构、外观和安装示意图。

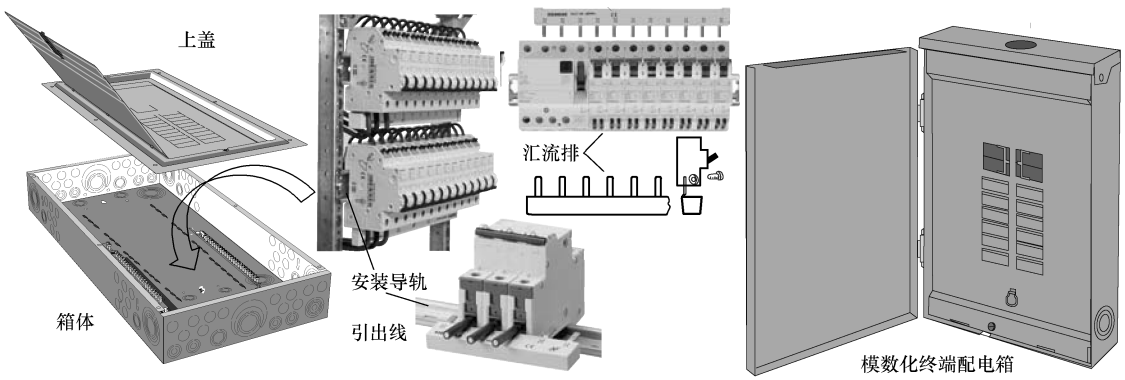


图 2-21 模数化终端配电箱的内部结构、外观和安装示意图

2.3.6 剩余电流动作（漏电）保护装置

剩余电流俗称为漏电电流，是流过剩余电流动作保护装置主回路电流瞬时值的矢量和（用有效值表示）。剩余动作电流是使剩余电流动作保护装置在规定条件下动作的剩余电流值。剩余电流动作保护装置（简称 RCD），俗称漏电保护器或漏电保护断路器，是指电路中带电导线对地故障所产生的剩余电流超过规定值时，能够自动切断电源或报警的保护装置，

包括各类带剩余电流保护功能的断路器、移动式剩余电流保护装置和剩余电流动作电气火灾监控系统、剩余电流继电器及其组合电器等。剩余电流动作保护装置用于按 TN、TT、IT 要求接地系统中，当电网对地泄漏电流过大、用电设备发生漏电故障及人体触电的情况下，防止事故进一步扩展。

在低压配电电网中，安装剩余电流动作保护装置是防止人身触电、电气火灾及电气设备损坏的一种防护措施。在低压配电系统中使用剩余电流保护装置，对于防止人身电击伤亡事故、避免因接地故障引起的电气火灾事故、减少剩余电流造成的电能损耗，具有明显的效果。但安装剩余电流动作保护装置后，仍应以预防为主，并应同时采取其他各项防止电击事故和电气设备损坏事故的技术措施。

通常，剩余电流动作保护装置与低压断路器组合功能，构成漏电断路器。漏电断路器在正常情况下的功能、作用与低压断路器相同，作为不频繁操作的电源开关电器。当电路泄漏电流超过规定值时或有人触电时，它能在安全时间内自动切断电源，以保护电器、保障人身安全和防止设备因发生泄漏电流造成火灾等事故。

国家标准 GB13955—2005《剩余电流动作保护装置安装和运行》中，规定了剩余电流动作保护装置（漏电保护器）的一般要求，包括特性、正常工作条件、结构和性能要求、特性和性能的验证及标志的要求；规定了正确选择、安装、使用剩余电流动作保护装置及其运行管理的有关要求。

1. 剩余电流动作保护装置的分类

剩余电流动作保护装置按脱扣方式不同分为电子式与电磁式两类。电磁脱扣型剩余电流动作保护装置以电磁脱扣器作为中间机构，当发生漏电电流时，零序电流互感器的二次回路输出电压不经任何放大，直接激励剩余电流脱扣器使机构脱扣断开电源，其动作功能与线路电压无关。其优点是电磁元件抗干扰性强和抗冲击（过电流和过电压的冲击）能力强，不需要辅助电源，零电压和断相后的漏电特性不变。电子式剩余电流动作保护装置以晶体管放大器作为中间机构，零序电流互感器的二次回路和脱扣器之间接入一个电子放大线路，当发生漏电时，互感器二次回路的输出电压经过电子线路放大后再激励剩余电流脱扣器，由继电器控制开关使其断开电源，其动作功能与线路电压有关。其优点是灵敏度高（约 5mA）、整定误差小、制作工艺简单、成本低。缺点是抗环境干扰差；需要辅助工作电源，使漏电特性受工作电压波动的影响；当主回路缺相时，保护器会失去保护功能。

2. 剩余电流动作保护装置安装的场合与要求

（1）对电气火灾的防护

为防止电气设备或线路因绝缘损坏形成接地故障引起的电气火灾，应装设当接地故障电流超过预定值时，能发出报警信号或自动切断电源的剩余电流动作保护装置。为防止电气火灾发生而安装剩余电流动作电气火灾监控系统时，应对建筑物内防火区域做出合理的分布设计，确定适当的控制保护范围。其剩余动作电流的预定值和预定动作时间，应满足分级保护的动作特性相配合的要求。

（2）分级保护

低压供用电系统中为了缩小发生人身电击事故和接地故障切断电源时引起的停电范围，剩余电流保护装置应采用分级保护。应根据用电负荷和线路具体情况的需要选择分级保护方式，一般可分为两级或三级保护。各级剩余电流保护装置的动作电流值与动作时间应协调配

合，实现具有动作选择性的分级保护。分级保护应以末端保护为基础。住宅和末端用电设备必须安装剩余电流保护装置。末端保护上一级保护的保护范围应根据负载分布的具体情况确定其保护范围。

为防止配电线路发生接地故障导致人身电击事故，可根据线路的具体情况，采用分级保护。电源端的剩余电流动作保护装置的动作特性应与线路末端保护协调配合。企事业单位的建筑物和住宅应采用分级保护，电源端的剩余电流动作保护装置应满足防接地故障引起电气火灾的要求。

低压配电线路根据具体情况采用两级或三级保护时，在总电源端、分支线首端或线路末端安装剩余电流保护装置。

（3）必须安装剩余电流保护装置的设备和场所

1）属于Ⅰ类移动式电气设备及手持式电动工具；

2）生产用的电气设备；

3）施工工地的电气机械设备；

4）安装在户外的电气装置；

5）临时用电的电气设备；

6）机关、学校、宾馆、饭店、企事业单位和住宅等除壁挂式空调电源插座外的其他电源插座或插座回路；

7）游泳池、喷水池、浴池的电气设备；

8）安装在水中的供电线路和设备；

9）医院中可能直接接触人体的电气医用设备；

10）其他需要安装剩余电流保护装置的场所。

3. 剩余电流动作保护装置的工作原理

一般地，人体触电表现为一个突变量，电网对地泄漏电流表现为一个缓变量。通常采用零序电流互感器检测剩余电流，将其一次侧漏电电流变换为其二次侧的交流电压，这一电压表现为一个突变量或缓变量，由电子电路将这一突变量或缓变量进行检波、放大等，再由执行电路控制执行电器（断路器或交流接触器），接通或分断供电线路，完成漏电保护器的基本功能，检测部分有电磁式和电子式两种，其检测原理如图 2-22 所示。

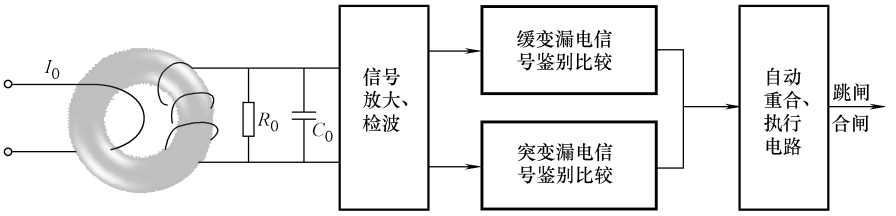


图 2-22　剩余电流动作保护器检测原理

零序电流互感器通常用软磁材料坡莫合金制作，具有很好的伏安特性，能正确反映突变漏电信号和缓变漏电信号，动作值范围在 10～500mA 之间，线性度较好，可不失真地进行变换。

漏电断路器的核心部件就是依上述原理构成的漏电脱扣器，其次就是低压断路器功能部

件，是一种典型的组合功能电器。漏电断路器由操作机构、电磁（电子）脱扣器、触头系统、灭弧室、零序电流互感器、试验部件等组成，所有部件都置于一绝缘外壳中；模数化小型断路器的漏电保护功能，是以漏电附件的结构形式提供的，需要时可与断路器组合而成。漏电脱扣器分电磁式和电子式两种，它们之间的区别是前者的漏电电流能直接通过脱扣器操作主开关，后者的漏电电流要经过电子放大线路放大后才能使脱扣器动作以操作主开关，漏电断路器的动作保护原理如图 2-23 所示。

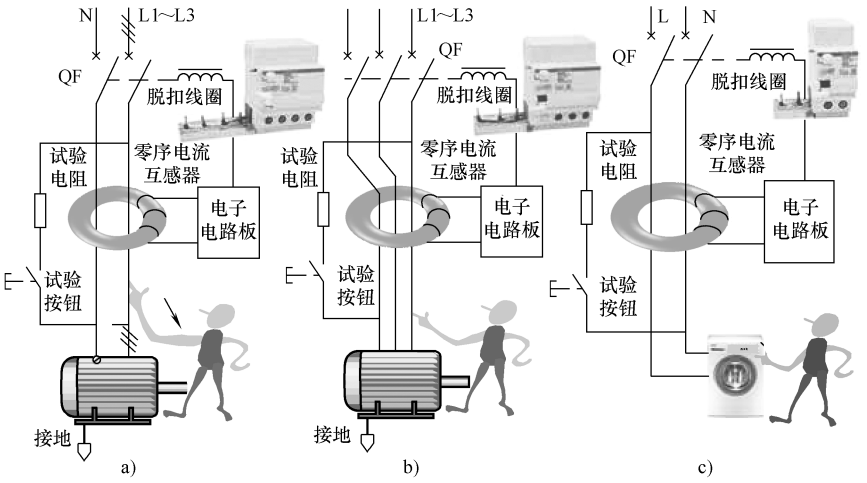


图 2-23　漏电断路器的动作保护原理

a）四极　b）三极　c）二极

二极、三极和四极漏电断路器的工作原理基本相同。以三相电路为例，当电网正常运行时，不论三相负载是否平衡，通过零序电流互感器主电路的三相电流的相量和等于零，故其二次绕组中无感应电动势产生，漏电断路器亦工作于闭合状态。一旦电网中发生漏电或触电事故，上述三相电流的相量和便不再等于零，而是等于漏电或触电电流 I_e。因为有 I_e 通过人体和大地而返回变压器中性点，于是，零序电流互感器二次绕组中便产生一个对应于 I_e 的感应电压 U_2，加到漏电脱扣器上。当 I_e 达到额定漏电动作电流时，零序电流互感器的二次绕组就输出一个信号，并通过漏电脱扣器使断路器动作，从而切断电源，起到漏电和触电保护的作用。当被保护电路或电动机发生过载或短路故障时，断路器的过流脱扣器动作，切断电源。晶体管三相漏电保护器的组成及工作原理如图 2-24 所示。

晶体管三相漏电保护器由零序电流互感器、输入电路、放大电路、执行电路、整流电源等构成。当人体触电或线路漏电时，零序电流互感器一次侧中有零序电流流过，在其二次侧产生感应电动势，加在输入电路上，放大晶体管 V_1 得到输入电压后，进入动态放大工作区，V_1 的集电极电流在 R_6 上产压降，使执行晶体管 V_2 的基极电流下降，V_2 输入端正偏而导通，继电器 KA 流过电流动作，其常开触头闭合，使脱扣器脱扣，切断电源。

对于终端组合电器的额定剩余动作电流一般规定为 10mA、15mA 和 30mA，是根据人体触电安全界限确定的。其他地点安装的漏电断路器有 50mA、75mA、100mA、300mA、500mA 等几种供分级配置选择性保护时选用，主要是根据防止引起火灾的最小点燃电流范围考虑。当线路漏电电流超过一定值时，可能引起电气火灾时，漏电断路器应能自动切断电路。在实际应用中，一般选用 100 ~ 500mA 等级的漏电断路器。为了避免不必要的动作，较

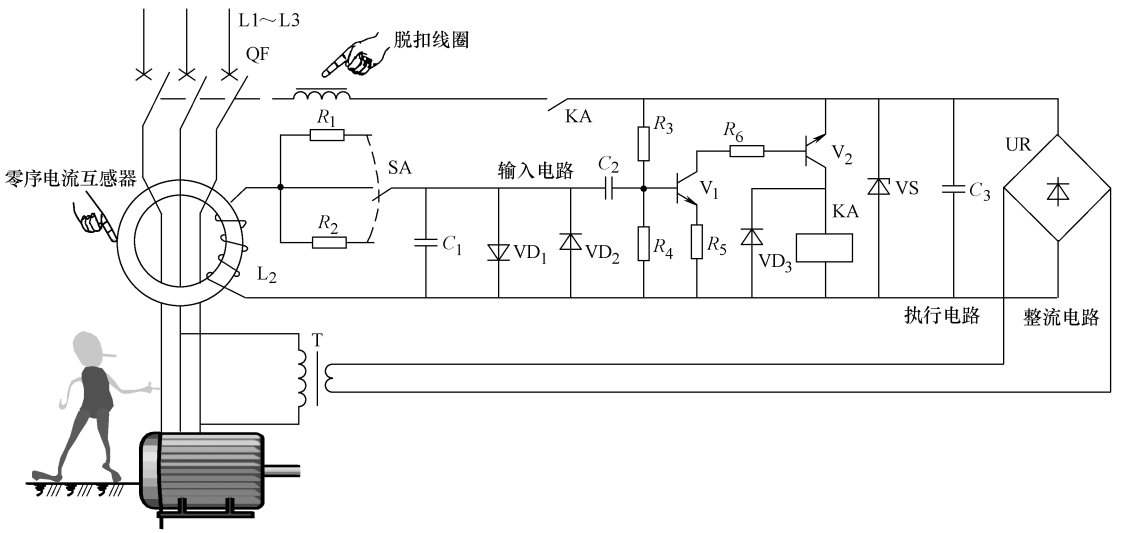


图 2-24 晶体管三相漏电保护器的组成及工作原理

少采用 100mA 等级以下的品种。对于通风不良，容易起火的建筑以及放有易燃品的地方，漏电断路器的动作电流要选得小些，如 100mA 等级。

几乎所有生产低压断路器的生产厂商均生产漏电断路器和漏电保护附件。常用主要类型有剩余电流动作开关（附件），不带过载、短路保护，是一种漏电保护器（附件），俗称漏电开关；剩余电流动作断路器即通常称的漏电断路器，带过载保护、短路保护和漏电保护等，是由低压断路器和漏电保护器组合而成的；剩余电流动作继电器，无过载、短路保护功能，也不直接分断线路，仅有漏电报警作用或借助于其他电器而动作的保护器，俗称漏电继电器。常见漏电断路器的型号有 DZ15LE、DZL16、DZL18、DZ20L、DZL25、CL1-10、BLC、LBX、LBC、CL1-10、QLK、ATL、WLT-1 及 THD10 等系列，以及各种模数化漏电断路器及其漏电保护附件等。

2.3.7 低压断路器的选择与应用

选用低压断路器应根据具体使用条件，选择使用类别、额定工作电压、额定电流、脱扣器整定电流，以及分励脱扣器和欠电压脱扣器的电压、电流、漏电电流及保护范围、选择性配合等参数，参照产品样本提供的保护特性曲线选用保护特性，并需对短路特性和灵敏系数进行校验。当与另外的断路器或其他保护电器之间有配合要求时，应选用选择型断路器。

1. 低压断路器的主要特性

（1）额定极限短路分断能力 I_{cu}

低压断路器的分断能力指标有额定极限短路分断能力 I_{cu} 和额定运行短路分断能力 I_{cs}。I_{cs} 是一种分断指标，即分断几次短路故障后，还能保证其正常工作。低压断路器应有足够的 I_{cu}，能够分断短路电流使开关跳闸。目前，大多数断路器的 I_{cs} 在（50% ~75%）I_{cu} 之间。

（2）限流分断能力

限流分断能力是低压断路器短路跳闸时限制故障电流的能力。断路器发生短路时，触头快速打开产生电弧，相当于在线路中串入一个迅速增加的电弧电阻，从而限制了故障电流的

增加。低压断路器断开时间越短，I_{cs}就越接近 I_{cu}，限流效果就越好，从而可大幅降低短路电流引起的电磁效应、电动效应和热效应对断路器和用电设备的不良影响，延长断路器的使用寿命。

（3）短路保护

短路保护就是短路瞬时脱扣跳闸。

（4）过载延时保护

过载延时保护是负载电流超过设备的限定范围时，保护装置能在一定时间内切断电源。过载有个热量积累的过程，对于短时过电流，保护不应该动作。

（5）隔离功能

隔离功能是低压断路器断开后的泄漏电流不致对人身和设备产生危害。多次短路跳闸后开关性能下降，泄漏电流会增大。对人体而言，30mA 以下为安全漏电电流，而超过 300mA，泄漏电流并持续 2 小时以上，就可能使绝缘损坏，发生相地短路而引发火灾。

（6）标准与认证

低压断路器应符合 IEC 标准和相对应的中国国家标准 GB。质量体系认证有 ISO 国际质量体系认证、船级社 ISO 质量体系认证。船级社认证对电器产品可靠性、防潮、抗振动等有极其严格的要求，只有通过该认证的产品才可以船用。安全认证是按区域划分的，有美国 UL 认证、长城 CCEE 认证、欧洲联盟 CE 认证。凡是在中国境内销售的产品必须通过长城认证。

2. 低压断路器的一般选用原则

（1）低压断路器的额定工作电压≥线路额定电压；低压断路器的额定电流≥线路负载电流。低压断路器的额定工作电压 U_e 和额定电流 I_e 应分别不低于线路、设备的正常额定工作电压和工作电流或计算电流。低压断路器的额定工作电压与通断能力及使用类别有关，同一台产品可以有几个额定工作电压和相对应的通断能力及使用类别。

（2）低压断路器的额定短路通断能力≥线路中可能出现的按有效值计算的最大短路电流。所选低压断路器的额定短路分断能力和额定短路接通能力应不低于其安装位置上的预期短路电流。当动作时间大于 0.02s 时，可不考虑短路电流的非周期分量，即把短路电流周期分量有效值作为最大短路电流；当动作时间小于 0.02s 时，应考虑非周期分量，即把短路电流第一周期内的全电流作为最大短路电流。线路末端单相对地短路电流≥1.25 倍断路器瞬时脱扣器整定电流。所选低压断路器的瞬时或短延时脱扣器整定电流 I_{r2} 应大于线路尖峰电流。配电断路器可按不低于尖峰电流 1.35 倍的原则确定；电动机保护电路当动作时间大于 0.02s 时，可按不低于 1.35 倍起动电流原则确定，如果动作时间小于 0.02s，则应增加为不低于起动电流的（1.7～2）倍。这些系数是考虑到整定误差和电动机起动电流可能变化等因素而加的。

（3）所选低压断路器的长延时脱扣器整定电流 I_{r1} 应大于或等于线路的计算负载电流，可按计算负载电流的（1～1.1）倍确定；同时应不大于线路导体长期允许电流的（0.8～1）倍。

（4）所选定的低压断路器还应按短路电流进行灵敏系数校验。灵敏系数即线路中最小短路电流（一般取电动机接线端或配电线路末端的两相或单相短路电流）和断路器瞬时或延时脱扣器整定电流之比。两相短路时的灵敏系数应不小于 2，单相短路时的灵敏系数一般

可取 1.5～2。如果经校验灵敏系数达不到上述要求，除调整整定电流外，也可利用延时脱扣器作为后备保护。

（5）分励和欠电压脱扣器的额定电压应等于线路额定电压，电源类别（交、直流）应按控制线路情况确定。国标规定的额定控制电源电压系列为直流（24V）、（48V）、110V、125V、220V、250V；交流（24V）、（36V）、（48V）、110V、127V、220V，括号中的数据不推荐采用。

（6）配电用低压断路器的长延动作过载电流整定值≤导线容许载流量。对于采用电线电缆的情况，可取电线电缆容许载流量的 80%。3 倍长延时动作过载电流整定值的可返回时间≥线路中最大起动电流的电动机的起动时间。瞬时电流整定值≥1.1（$I_{js}+k_1kI_m$），其中，I_{js}线路计算负载电流；k_1 电动机起动电流的冲击系数，一般取 $k_1=1.7\sim2$；k 为电动机起动电流倍数；I_m 最大一台电动机的额定电流。

（7）电动机保护用低压断路器的长延时过载电流整定值 = 电动机额定电流；对于保护笼型异步电动机保护用断路器，瞬时整定电流 =（8～15）倍电动机额定电流；对于保护绕线转子电动机的低压断路器，瞬时整定电流 =（3～6）倍电动机额定电流。6 倍长延时过载电流整定值的可返回时间≥电动机实际起动时间，按起动时负载的轻重，可选用的可返回时间为（1～15）s 中某一档。

（8）低压断路器与熔断器的配合原则，如果在安装点的预期短路电流小于断路器的额定分断能力，可采用熔断器作后备保护。线路短路时，熔断器的分断时间比低压断路器短，可确保断路器的安全。可选择熔断器的分断能力在断路器的额定短路分断能力的 80% 处。熔断器应装在低压断路器的电源侧，以保证使用安全。

（9）模数化小型断路器的瞬时脱扣器整定电流≤0.8 倍线路末端单相对地短路电流。用于导线保护的模数化小型断路器的长延时整定值≤线路负载电流；瞬时动作整定值≤（6～20）倍线路计算负载电流。用于电动机保护的模数化小型断路器的长延时电流整定值 = 电动机额定电流；当保护笼型三相异步电动机时，瞬时动作整定值 =（8～15）倍电动机额定电流；当保护绕线型三相异步电动机时，瞬时动作整定值 =（3～6）倍电动机额定电流。

（10）模数化小型断路器的过载保护特性通常由采样元件（电磁）和感应元件（热双金属片）来完成，热双金属片受热弯曲而超过某一限度时，脱扣器跳扣、小型断路器断开而切除故障电流。在模数化小型断路器标准中，规定了脱扣特性和基准温度。不同的标准规定的基准温度是不相同的。因此，应考虑实际工作的环境温度不同于校验的基准温度，故应对其额定电流作修正。此外，标准中规定的校验条件是孤立的一个断路器，而实际使用时，若干台断路器紧靠着安装，彼此发热并相互影响，且安装于防护外壳内，该外壳内的环境要比校验时的温度高，为此对产品的额定值也要作必要的修正。GB10963.1—2005 和 IEC898—1995 规定基准温度为 30℃。一般情况下，随着环境温度的升降，实际可使用电流会有所降低或升高，并与产品本身参数有关，选择适应予以注意。

3. 漏电断路器的选用

漏电断路器具有两个功能，一是具有断路器的功能，二是具有漏电保护的功能。断路器功能与一般低压断路器相同，漏电保护部分通过零序互感器检测的是剩余电流，即通过检测被保护回路内相线和中性线的电流瞬时值，判断对地泄漏电流的变化。因此，断路器功能部分的选择与一般低压断路器相同，如额定电压应大于或等于线路的额定电压；过电流脱扣器

额定电流必须和线路或实际负载的电流和特性相适应；按线路负载电流选用额定电流；漏电断路器的极限通断能力应大于或等于线路最大短路电流等。漏电保护功能部分（下称漏电保护器）的选择应考虑两个基本条件，一是漏电保护器的漏电动作电流必须躲过电网正常泄漏电流，二是漏电保护器的漏电动作电流必须小于引起火灾的最小点燃电流或人体安全电流，按选用漏电保护器的主要目的确定。一般按以下原则选择。

（1）选择漏电保护器的额定动作电流　应按国家标准 GB13955—2005《漏电保护器安装和运行》的规定，选择漏电保护器的额定动作电流应根据电气线路的正常泄漏电流确定，并应充分考虑到被保护线路和设备可能发生的正常泄漏电流值，必要时可通过实际测量取得被保护线路和设备的泄漏电流值。

（2）选择漏电保护器的额定漏电不动作电流　应按国家标准 GB13955—2005《漏电保护器安装和运行》的规定，漏电保护器的额定漏电不动作电流应不小于电气线路和设备的正常泄漏电流的最大值的 2 倍。

（3）电气线路和设备泄漏电流值与分级安装的漏电保护特性的配合　用于单台用电设备时，漏电保护器动作电流应不小于正常运行实测泄漏电流的 4 倍，以防止因漏电引起触电事故和火灾；配电线路的漏电保护器动作电流应不小于正常运行实测泄漏电流的 2. 5 倍，同时还应满足其中泄漏电流最大的一台用电设备正常运行泄漏电流的 4 倍，以防止因漏电引起火灾；用于全网保护时，动作电流应不小于实测泄漏电流的 2 倍，为全网增设全面的漏电保护，防止因漏电引起火灾。一般地，不同额定剩余动作电流的漏电保护器可按以下原则选用。

用于对直接接触及 TT 系统的保护及不直接接触、IT 中性线不接地系统和完全暴露条件（如建筑工地、游泳池、娱乐场所等）的保护，选择额定剩余动作电流为 30mA。额定剩余动作电流为 50mA 及以上的漏电保护器，用于对非直接接触及 TT 系统及防止火灾的保护选择额定剩余动作电流为 50mA。配置选择性保护时应保证除对非直接接触及 TT 系统可保护外，还能对下级装有 30mA 的漏电保护系统作选择性保护。仅隔离事故电路，其他电路仍应保证继续供电。额定剩余动作电流、分断时间可按表 2-6 配合。

表 2-6　额定剩余动作电流、分断时间表

三 级 保 护	总保护	中级保护	末级保护
额定剩余动作电流/mA	200 ~ 300	60 ~ 100	≤30
最大分断时间/s	0. 5	0. 3	≤0. 1

（4）漏电断路器分电动机保护用与配电保护用两种。以电动机为负载的电路应选电动机保护用的漏电断路器。根据电动机负载的种类，确定其形式和规格，确定工作电流，选取额定电压、额定电流和极数与此相适应的漏电断路器。根据电动机和导线的泄漏状况，确定漏电动作电流的大小。选择时应注意电动机起动电流、热特性和漏电断路器之间的协调，必须使其过电流保护特性适应电动机的起动特性。例如，额定电压为 380V/4. 5kW 的三相异步电动机，应选用额定电压为 380V、额定电流为 10A 的三极漏电断路器。如果是单相电动机，则应选用额定的电流为 25A 的二极漏电断路器。以照明电器为负载的电路，应选用配电保护用漏电断路器。由于分支电路范围较小，因而触电（漏电）保护、接地保护等都可予以考虑，漏电动作电流的灵敏度可要求高一些。分支电路用的漏电断路器的额定漏电动作电流

可在 30～200mA 间选择。终端电路用的漏电断路器一般选取额定漏电动作电流≤30mA 的漏电断路器。

（5）漏电断路器对同时接触被保护电路两线引起的触电危险不能进行有效安全保护。电子式漏电断路器的电源侧和负载侧面反接，会造成漏电动作后电子元器件持续通电，以致烧毁。电磁式漏电断路器的试验按钮回路的工作电压不可接错，否则，试验按钮回路有可能失效，或试验电阻有可能烧毁。另外，漏电断路器不宜并联连接使用；零线不得接地或与设备的保护接地线相连；安装漏电断路器后，电器设备仍应安装保护接地线。

2.3.8 配电系统接地型式

配电系统的接地型式主要有 TN 系统、TT 系统和 TI 系统三种，如图 2-25 所示。其中，接地型式的第一个字母表示电源系统接地状况及对地的关系。三相供电电源系统可接地点通常是发电机或变压器的中性点。T 表示直接接地，I 表示不接地（所有带电部分与地隔离）或通过阻抗（电阻器或电抗器），或通过等效线路接地。第二个字母表示电气装置外壳（外露可导电部分）接地状况及对地的关系。T 表示独立于电源系统可接地点，直接接地，且与电源的接地点无关。N 表示直接与电源系统可接地点进行连接。第一、二个字母后面的字母，S 表示中性线（N）和保护导线（PE）分别接地，C 表示中性线和保护导线共同接地（PEN 导线），如 TN-S 系统、TN-S-C 系统、TN-C 系统。

1. 接地型式

（1）TN 系统

TN 系统的电源系统有一点直接接地，电气装置的外露可导电部分通过保护导体接到此接地点上，包括 TN-S 系统、TN-S-C 系统和 TN-C 系统三种，分别如图 2-25a～2-25c 所示。

TN-S 系统是在整个系统中中性线和接地线相互独立，在整个 TN-S 系统内，PE 线和 N 线被分为两根平行不相交的导线。正常运行时，PE 线不通过电流，也不带电位。只有在发生接地故障时，会有故障电流通过，因此电气装置的外露可接近导体，在正常运行时不带电位。该系统安全可靠性高，但需在回路全长多敷设一根导线。

TN-C 系统在整个系统中中性线和接地线合并在一根 PEN 导线中，TN-C 系统内的 PEN 线兼作 PE 线和 N 线的作用，可节省一根导线，比较经济，但存在一定的不安全因素。

TN-S-C 系统的一部分中性线和接地线结合在单根的 PEN 导线中，自电源到用户电气装置之间节省了一根专用的 PE 线。这一段 PEN 线上的电压降使整个电气装置对地升高 ΔU_{PEN}，但在电源进线点后的 PE 线和 N 线分开，而 PE 线并不产生电压降，整个电气装置对地电位都是 ΔU_{PEN}，而在装置内不会出现电位差，因此不会发生 TN-C 系统存在的不安全因素，也不会对电子设备引起干扰。

（2）TT 系统

电源系统可接地点与电气装置的外露可导电部分分别直接接地。TT 系统的电气装置各有其自己的接地极，正常时装置内的外露可接近导电部分为地电位。但发生接地故障时，因故障回路内包含两个接地电阻，故障回路阻抗较大，故障电流较小，一般不能用过电流保护兼作接地故障保护，必须装用剩余电流动作保护装置来切断电源。在 GB 13955—2005 中明确规定，在 TT 系统，必须装设剩余电流保护装置。

（3）IT 系统

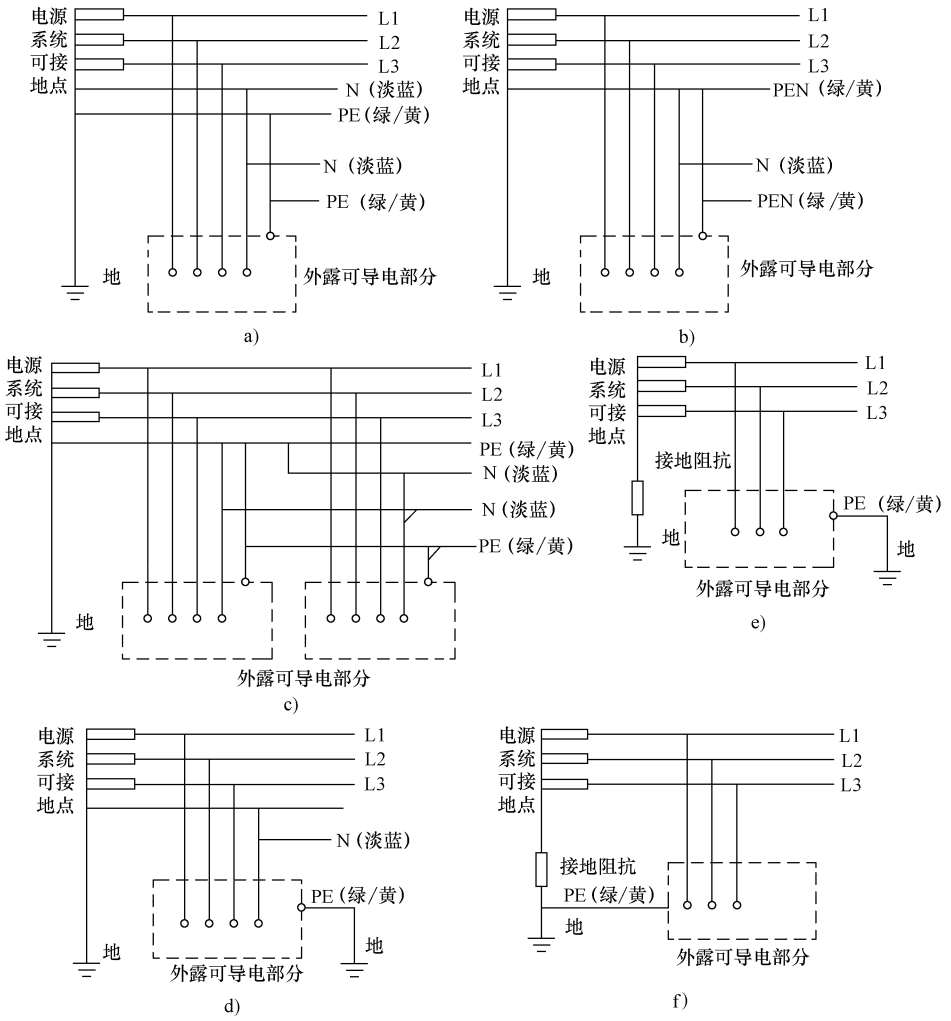


图 2-25　配电系统接地型式示意图

a）TN-S 系统　b）TN-C 系统　c）TN-S-C 系统　d）TT 系统

e）具有独立接地极的 IT 系统　f）具有公共接地极的 IT 系统

电源系统可接地点不接地或通过阻抗接地，电气装置的外露可导电部分单独直接接地或通过保护导体接到电源系统的接地极上。IT 系统在发生接地故障时由于不具备故障电流返回电源的通路，其故障电流仅为非故障相的对地电容电流，其值甚小，因此对地故障电压很低，不致引发事故。所以发生接地故障时，不需切断电源，但它一般不引出中性线，不能提供照明、控制等需用的 220 V 电源，其应用范围受到限制。

2. 保护接地和保护接零

为了防止人身触电事故，通常采用的技术防护措施有电气设备的接地和接零、安装漏电保护器等方式。在电气设备使用中，若设备绝缘损坏或击穿而造成外壳带电，人体触及外壳时有触电的可能。为此，电气设备必须与大地进行可靠的电气连接，即接地保护，使人体免受触电的危害。电气设备接地可分为工作接地和保护接地。工作接地是指电气设备为保证其正常工作而进行的接地，如变压器中性点接地；保护接地是为保证人身安全，防止人体接触

设备外露部分（金属外壳或金属构架）触电的一种接地形式。在中性点不接地系统中，设备外露部分必须与大地进行可靠电气连接，即保护接地。接地装置由接地体和接地线组成，埋入地下直接与大地接触的金属导体，称为接地体；连接接地体和电气设备接地螺栓的金属导体称为接地线。接地体的对地电阻和接地线电阻的总和，称为接地装置的接地电阻。在中性点不接地系统中，设备外壳不接地且意外带电，外壳与大地间存在电压，人体触及外壳，将有电容电流流过人体，这样，人体就遭受触电危害。如果将外壳接地，人体与接地体相当于电阻并联，流过每一通路的电流值将与其电阻的大小成反比。人体电阻比接地体电阻大得多，人体电阻通常为 600 ~ 1000Ω，接地电阻通常小于 4Ω，流过人体的电流很小，这样就完全能保证人体的安全。

保护接地适用于中性点不接地的低压电网。在不接地电网中，由于单相对地电流较小，利用保护接地可使人体避免发生触电事故。在中性点接地电网中，由于单相对地电流较大，保护接地就不能完全避免人体触电的危险，而要采用保护接零。

保护接零是在电源中性点接地的系统中，将设备需要接地的外露部分与电源中性线直接连接，相当于设备外露部分与大地进行了电气连接。当设备正常工作时，外露部分不带电，人体触及外壳相当于触及零线，无危险。采用保护接零时，应注意不宜将保护接地和保护接零混用，而且中性点工作接地必须可靠。在电源中性线做了工作接地的系统中，为保证保护接零可靠，还需相隔一定距离将中性线或接地线重新接地，称为重复接地。如图 2-26 所示。从图 2-26a 可以看出，一旦中性线断线，设备外露部分带电，人体触及同样会有触电的可能。而在重复接地的系统中，如图 2-26b 所示，即使出现中性线断线，但外露部分因重复接地而使其对地电压大大下降，对人体的危害也大大下降。不过应尽量避免中性线或接地线出现断线的现象。

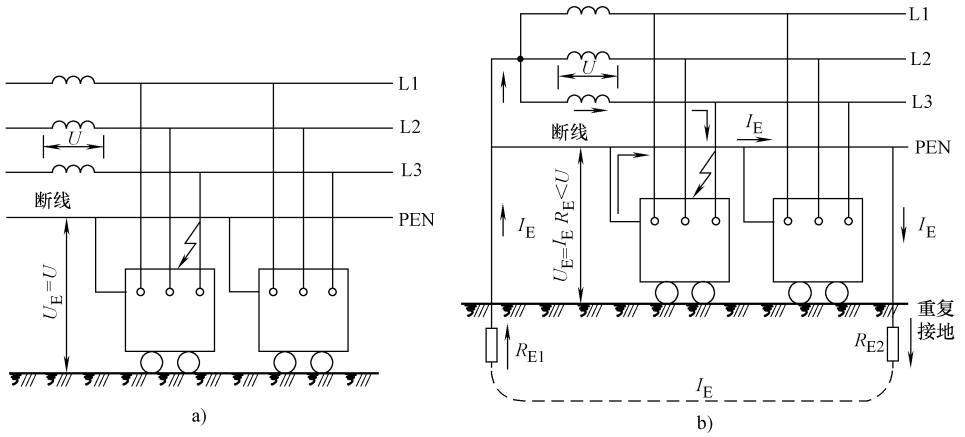


图 2-26　保护接零和重复接地

a）保护接零原理图　b）重复接地作用

3. 安全用电

当人体触及带电体承受过高电压而导致死亡或局部受伤的现象称为触电。触电伤害程度可分为电击和电伤两种。电击是电流通过人体而使内部器官受到损害，这是最危险的触电事故。当电流通过人体时，轻者使人体肌肉痉挛，产生麻电感觉，重者会造成呼吸困难，心脏麻痹，甚至导致死亡。电伤是由于电流的热效应、化学效应、机械效应及在电流作用下使熔

化或蒸发的金属微粒等侵入人体皮肤，使皮肤局部发红、起泡、烧焦或组织破坏，严重时也可危及人命。

当人体触电时，流过人体的电流与人体电阻有关，人体电阻并非恒定值，当人体皮肤干燥、洁净且无损伤时，电阻可达 40 ~ 100kΩ，如果皮肤潮湿，如出汗时、受到损伤或者沾有导电粉尘，人体电阻会迅速下降到 1kΩ 左右，甚至更低些。在同一电压下，流过人体的电流值在很大程度是决定于皮肤状态。通常，流过人体的电流达 1mA 时，人已能察觉，但只要不超过 10mA，人尚能自主，若电流达到 20mA，人就难以摆脱。一旦电流大到 50mA 及以上时，则会发生肌肉收缩、脉搏和呼吸中枢神经失调乃至心室纤维性颤动等现象，严重威胁人的生命。但是，人触电时的危害程度不完全取决于电流值，还与流经人体的途径、作用时间、电源频率以及人的健康状况有关。当电流系从人的一手到另一手或由手至脚时，触电电流会流过心脏，情况最为严重。反之，若电流系自一脚到另一脚或自同一手（或脚）的一指（趾）到另一指（趾），一般无致命危险。从电源频率来看，以 50 ~ 60Hz 为最严重，低或高于此频率，伤害程度将轻一些。

由于绝大多数触电伤亡事故为心室纤维性颤动所致，而这种颤动的发生又与流经心脏的电流值有关，目前国内外大都是从防止心脏发生上述颤动出发而规定一个安全电流范围，再考虑安全电流作用时间，取两者之积为衡量安全与否的尺度。即人体触电伤害程度主要取决于流过人体电流的大小和电击时间长短等因素。因此，将人体触电后最大的摆脱电流，称为安全电流。我国规定安全电流为 30mA/s，即触电时间在 1s 内，通过人体的最大允许电流为 30mA。人体触电时，如果接触电压在 36V 以下，通过人体的电流就不致超过 30mA，故安全电压通常规定为 36V，但在潮湿地面和能导电的厂房，安全电压则规定为 24V 或 12V。

触电事故总是突然发生的，触电者一般不会立即死亡，往往是“假死”，现场人员应该当机立断，迅速使触电者脱离电源，立即运用正确的救护方法加以抢救。

人体触电主要分为单相触电、两相触电和跨步电压触电三种。

（1）单相触电

单相触电是指人在地面或其他接地体上，人体的某一部位触及到三相电源线中的任意一根裸露导线，电流从带电导线经过人体流入大地而造成的触电。单相触电又可分为中性线接地和中性线不接地两种情况。在中性点接地的低压动力和照明线路中，发生单相触电的情形如图 2-27a 所示。这时，人体所触及的电压是相电压 220V。电流经相线、人体、大地和中性点接地装置而形成通路，触电的后果往往很严重。在中性点不接地的电网中，发生单相触电的情形如图 2-27b 所示。当站立在地面的人手触及某相裸露导线时，由于相线与大地间存在电容，所以，有对地电容电流从另外两相流入大地，并全部经人体流入到人手触及的相线。一般说来，导线越长，对地的电容电流越大，其危险性越大。

（2）两相触电

两相触电（相间触电）是人体两处同时触及两相带电裸露相线，或者同时触及到电气设备的两个不同相的带电部位时的触电。触电时，电流由一根相线经过人体到另一根相线，形成闭合回路，此时加在人体上的是线电压。因为，两相触电比单相触电更危险。如图 2-28 所示。

（3）跨步电压与接触电压

跨步电压触电是指人进入接地电流的散流场时的触电。由于散流场内地面上的电位分布不均匀，人的两脚间电位不同，这两个电位差称为跨步电压。跨步电压的大小与人和接地体

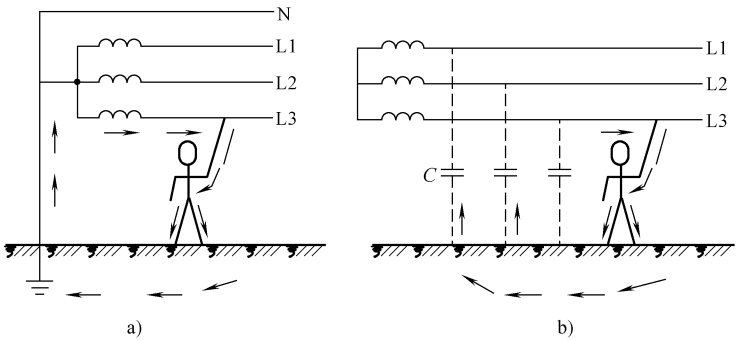


图 2-27 单相触电示意图

a）中性点接地系统的单相触电 b）中性点不接地系统的单相触电

的距离有关。当人的一只脚跨在接地体上时，跨步电压最大，人离接地体愈远，跨步电压愈小，与接地体的距离超过 20m 时，跨步电压接近于零。

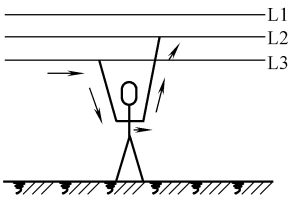


图 2-28 两相触电示意图

当电气设备绝缘损坏或线路的一相断线落地时，电流就会从落地点（或绝缘损坏处）流入地中。离落地点越远，电位越低。导线断线接地后，如果接地装置布置不合理，接地设备发生碰壳时会造成电位分布不均匀而形成一个电位分布区域。在此区域内，人体与带电设备外壳相接触时，便会发生接触电压触电。接触电压等于相电压减去人体站立地面点的电压。人体站立离接地点越近，接触电压越小，反之就越大。当站立点距离接地点 20 m 以外时，地面电压趋近于零，接触电压为最大，约为电气设备的对地电压。

如果有人走近导线落地点附近，由于人的两脚间电位不同，则在两脚间出现电位差，这个电位差叫作跨步电压。离电流入地点越近，跨步电压越大；离电流入地点越远，跨步电压越小；一般在离导线落地点 20m 以外的地方，地面的电位近似等于零。跨步电压触电情况如图 2-29a 所示。当发现跨步电压威胁时，应赶快把双脚并在一起，或赶快用一条腿离开危

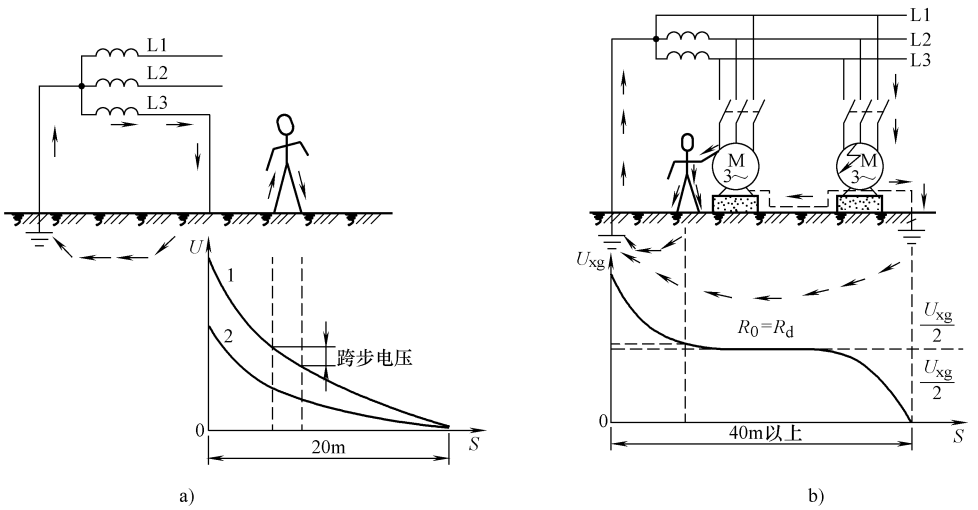


图 2-29 跨步电压和接触电压触电示意图

a）跨步电压触电 b）接触电压触电

险区，否则，因触电时间长，也会导致触电伤亡。导线接地后，不但会产生跨步电压触电，还会产生接触电压触电，如图 2-29b 所示。

2.4　接触器

接触器是一种自动控制电器，适用于在低压配电系统中远距离控制、频繁操作交直流主回路及大容量控制电路，自动控制交、直流电动机，电热设备，电容器组等设备，应用十分广泛。接触器具有强大的执行机构，大容量主触头和多组辅助触头，具有迅速熄灭电弧的能力和低压释放功能。与保护电器组合可构成各种电磁起动器，用于电动机的控制及保护。

接触器按灭弧介质分，有空气电磁式接触器、油浸式接触器和真空接触器等；按主触头控制的电流种类分，有交流接触器、直流接触器、机械联锁（可逆）接触器、切换电容接触器等。其中应用最广泛的是空气电磁式交流接触器和直流接触器，习惯上简称为交流接触器和直流接触器。接触器的图形、文字符号如图 2-30 所示。

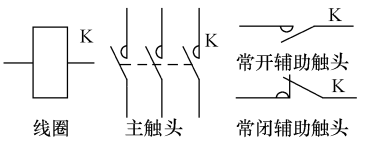


图 2-30　接触器的图形、文字符号

2.4.1　接触器的结构及工作原理

接触器由电磁系统、触头系统、灭弧系统、释放弹簧机构、接线端子、绝缘外壳及基座等几部分组成，新型接触器还有各种可选附件。

电磁系统包括线圈、动铁心和静铁心，铁心和衔铁用硅钢片叠成；触头系统包括主触头和辅助触头，它和动铁心一起联动。中小容量的交、直流接触器的电磁机构一般都采用直动式电磁系统，主、辅触头一般都采用直动式双断点桥式结构设计；大容量的采用绕棱角转动的拍合式电磁铁结构，主触头采用转动式单断点指式触头。交流接触器采用多纵缝灭弧装置灭弧；直流接触器采用磁吹式灭弧装置灭弧。图 2-31 是交流接触器电磁系统和触头系统的结构原理图。

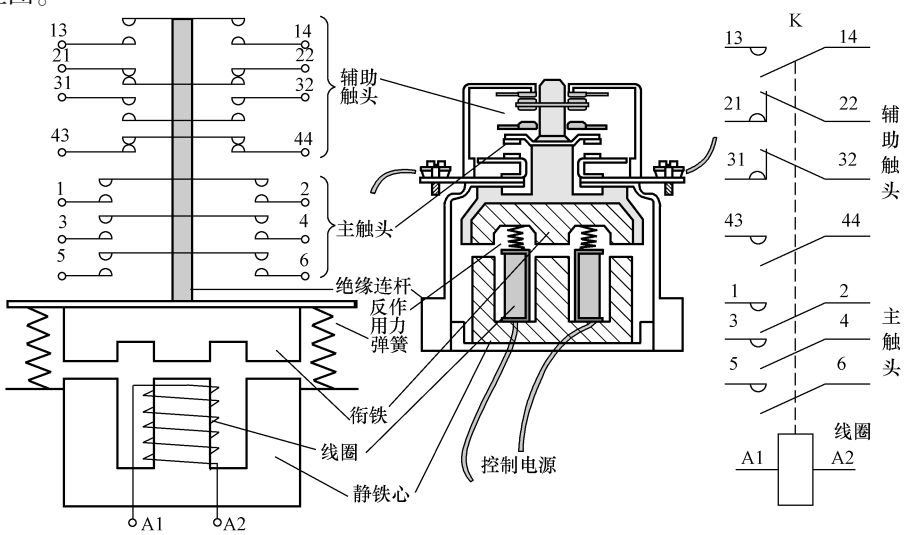


图 2-31　交流接触器电磁系统和触头系统的结构原理图

在图 2-31 中，A1 和 A2 是产品外壳上标注的线圈接线端子标记号，同样，在触头附近标注的数字是触头接线端子标记号。单数字 1、3、5 等是主触头标记，双数字 13、21、31 等是辅助触头标记号。

交流接触器的基本工作原理如图 2-32 所示。它利用电磁原理通过控制电路的控制，使衔铁运动，从而带动触头进行状态转换。当接触器线圈不通电时，弹簧的反作用力和衔铁的自重使主触头保持断开位置。当线圈施加控制电压时，电磁力克服弹簧的反作用力将衔铁吸向静铁心，带动主触头闭合，接通主电路，同时辅助触头也随之动作。

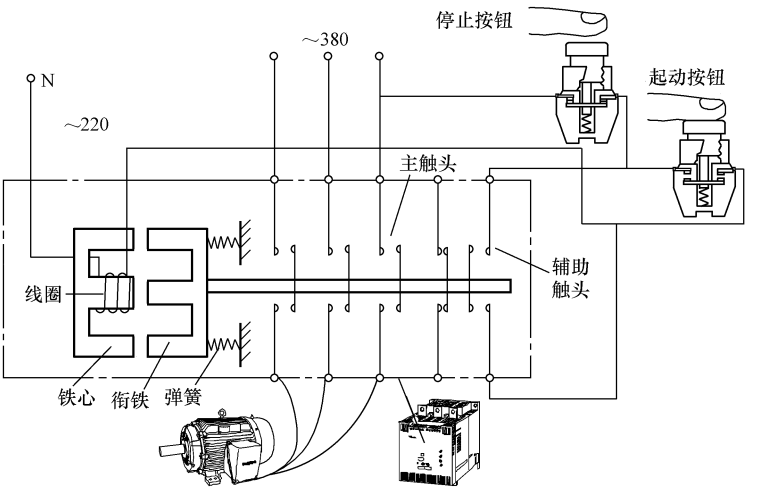


图 2-32　交流接触器的基本工作原理

2.4.2　常用交流接触器产品简介

典型的交流接触器产品有 CJ20 、CJ21、CJ26、CJ29、CJ35、CJ40、CJX1、S-V、B、LC1-D、3TB 和 3TF 系列交流接触器等，以及 CJ12、CJ15、CJ24 等系列大功率重任务交流接触器。

CJ20 系列交流接触器是国内统一设计的产品，采用正装直动式双断点桥式触头结构、立体布置，E 型铁心位于下部，触头在其上面。静铁心及静触头分别固定在用绝缘材料制成的底座与壳体上，衔铁和动触头作为可动部件能在壳体中直线运动，结构紧凑。40A 以上接触器采用多纵缝陶土灭弧罩，灭弧罩在上，电磁系统在下两层主体布置。40A 级以下为 E 型铁心，63A 及以上为 U 型铁心。63A 以上的产品由铝合金基座、塑料底板和灭弧罩组成三段式立体结构。40A 以上产品辅助触头由独立组件布置在主触头两侧。25A 及以下产品采用辅助触头布置在主触头上方，辅助触头、主触头及灭弧系统和电磁系统布置成三层，壳体、底座分为两段的立体布置结构，加装 U 形片灭弧装置。25A 及以下产品可在标准安装轨上安装。10A 以下产品有派生的接触器式中间继电器产品品种。

CJ40 系列交流接触器是在 CJ20 系列的基础上改进的新产品，9A ~ 50A 系列产品为正装直动式双断点结构，整体布置与 CJ20 类似。但是，附加辅助触头为独立组件，可安装在接触器的顶部或两侧。整个接触器可采用标准的 35mm 导轨安装，也可采用螺钉进行固定安装。63 ~ 1000A 系列产品为开启式正装直动式双断点结构，辅助触头作为独立组件安装在主

触头的两侧，在电气上为分开的。铁心为 U 形结构永久性气隙。160A 及以上系列产品的底座为铝合金压铸，螺钉安装。而 63 ~ 125A 系列产品的底座为不饱和聚玻璃纤维增强模塑料，可以螺钉安装，也可以用 35mm 导轨安装。

CJ24 系列重任务交流接触器主要用于交流 50Hz，额定工作电压至 660V，额定工作电流由 100 ~ 630A 的冶金、轧钢及起重机等较大控制功率的电气设备中，供远距离频繁地接通、分断电路和电动机起动、停止、反向及反接制动等。有二极、三极、四极和五极类型产品。

2.4.3　机械联锁（可逆）交流接触器

机械联锁（可逆）接触器实际上是由两个相同规格的交流接触器再加上机械联锁机构和电气联锁机构所组成，它的机械联锁机构，保证了两台可逆接触器触头转换的可靠工作，可以保证在任何情况下（如机械振动或错误操作而发出的指令）都不能使两台交流接触器同时吸合，而只能是当一台接触器断开后，另一台接触器才能闭合，能有效地防止电动机正、反转换向时出现相间短路的可能性。比单在电气控制回路中加接电气联锁电路的应用更安全可靠。

机械联锁接触器主要用于电动机的可逆控制、双路电源的自动切换，也可用于需要频繁地进行可逆换接的电气设备上。生产厂通常将机械联锁机构和电气联锁机构以附件的形式提供。常用的机械联锁（可逆）接触器有 LC2-D 系列（国内型号 CJX4-N）、6C 系列、3TD 系列、B 系列、NC1-N 系列等。3TD 系列可逆交流接触器主要适用于额定电流至 63A 的交流电动机的起动、停止及正、反转控制。图 2-33 是机械联锁交流接触器的典型结构示意图。

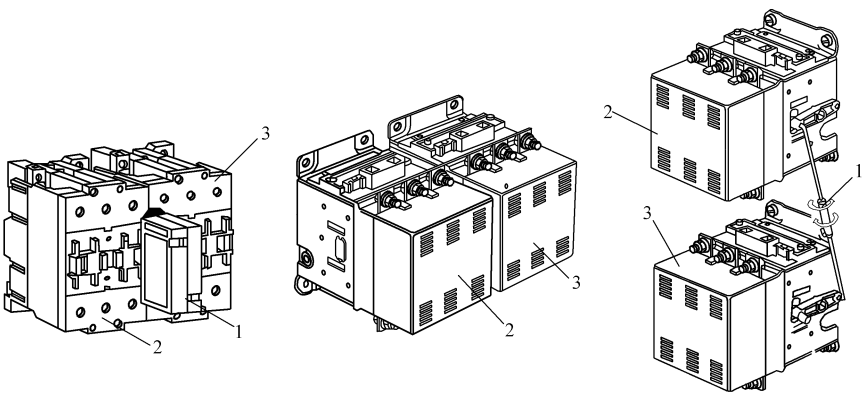


图 2-33　机械联锁交流接触器的典型结构示意图

a）水平连接　b）垂直连接

1—机械联锁装置　2—K1　3—K2

2.4.4　切换电容器接触器

切换电容器接触器是专用于低压无功补偿设备中投入或切除并联电容器组，以调整用电系统的功率因数。切换电容器接触器带有抑制浪涌装置，能有效地抑制接通电容器组时出现的合闸涌流对电容的冲击和开断时的过电压。其结构设计为正装式，灭弧系统采用封闭式自然灭弧。切换电容器接触器的接线和结构示意如图 2-34 所示。

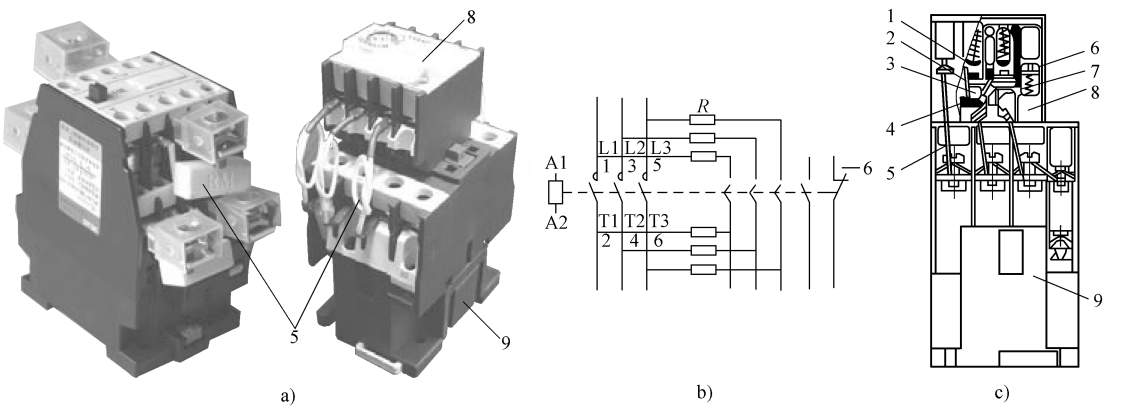


图 2-34 切换电容器接触器的接线和结构示意图

a）接触器外貌 b）接触器接线原理图 c）接触器的结构示意图

1—转换触头 2—转换触头支架 3—永磁铁心 4—衔铁 5—电阻线 6—辅助触头

7—辅助触头支架 8—辅助触头组件 9—接触器本体

切换电容器接触器由接触器本体、转换触头组和六根电阻线组成。主触头分上下两层，上触头有三相转换主触头，每对主触头两侧分别串入一根限流电阻线或电阻器，然后与下转换触头对应并联。三相主触头组的触头支架靠永磁铁心和转换触头组支架吸合连接，转换触头组支架再和接触器本体相连，随接触器铁心的吸引而动作。当接触器通过线圈工作电压 U_s 后，接触器铁心吸合，带动转换触头组支架及三对转换主触头。由于转换主触头开距小于接触器主触头，转换主触头先于接触器主触头闭合，接通电阻，抑制涌流数毫秒后主触头接通，接触器开始正常工作。在转换主触头支架向下运动到位时，永磁铁心与衔铁分开，转换主触头随之分断，返回到原始位置。当接触器线圈断电，由接触器主触头分断电容器，且转换触头组支架返回，永磁铁心和衔铁恢复吸合状态，在接触器下次吸合工作时再次带动三对转换主触头，起抑制合闸涌流作用。总之，切换电容器接触器是利用小开距的转换主触头先接通电阻线，以抑制合闸涌流；用接触器的大开距主触头来分断电容电流并限制分闸电弧重燃过电压的产生，从而实现电容器组的正常可靠切换。

常用切换电容器接触器产品有 CJ16、CJ19、CJ36、B25C ~ B75C、CJX4、CJX2A、LC1-D、6C 系列等。

2.4.5 低压交流真空接触器

低压交流真空接触器主要由真空开关管、电磁系统、杠杆传动系统、辅助触头、整流装置、绝缘框架、底座等组成。触头被封闭在与外界隔绝的真空灭弧室中，开距小，超程短，电弧不外喷（即喷弧距离为零），分断能力强、电寿命长，不会因外部污染而影响其工作。控制电路由直流磁系统与整流装置组成。与一般空气式接触器相比，主要差别是以真空为灭弧介质，触头密封在真空灭弧室（真空开关管）中。真空开关管是真空接触器的核心元件，其主要技术参数决定真空接触器的主要性能。真空开关管以真空作为绝缘和灭弧介质，位于真空中的触头一旦分离，触头间将产生由金属蒸汽和其他带电粒子组成的真空电弧。真空电弧依靠触头上蒸发出来的金属蒸汽来维持，因真空介质具有很高的绝缘强度且介质恢复速度很快，真空电弧的等离子体很快向四周扩散，在第一次过零时真空电弧就能熄灭，分断电

流，燃弧时间一般小于 10ms。由于熄弧过程是在密封的真空容器中完成的，电弧和炽热的气体不会向外界喷溅，所以开断性能稳定可靠，不会污染环境。

低压交流真空接触器适用于交流 50～60Hz、额定工作电压至 1140V 的电力系统中，远距离接通与分断电路及频繁地起动和控制交流电动机。可与热继电器等各种保护装置组成电磁起动器，特别适用于条件恶劣的危险环境中，有易燃易爆物质存在的煤矿井下等危险场所，在矿山、冶金、建材、石油化工及重工业部门等重任务场合使用广泛。但是，一般不适宜直接用于可逆运行、星－三角形起动及电动机欠电压保护等场所。

常用的低压交流真空接触器有 CKJ 和 EVS 等系列，有单极型、二极型和三极型。CKJ 系列低压交流真空接触器是国内生产厂商开发的新产品，CKJ5 低压交流真空接触器采用陶瓷外壳真空管和不锈钢波纹管。直动式交、直流电磁系统。采用双线圈结构以降低保持功率，电磁系统控制电源允许在整流桥交流侧操作，利用交流特性产生起始吸力，而利用直流特性实现保持。EVS 系列重任务真空接触器采用以单极为基础单元的多级多驱动结构，可根据需要组装成 1、2…、n 极接触器，以便与相关设备很好地配合。

2.4.6　接触器的主要特性参数与选用原则

1. 接触器主要特性参数

接触器主要有如下特性参数。

（1）接触器的型式　包括极数、电流种类、使用频率、灭弧介质和操动方式等。

（2）额定值和极限值　包括额定工作电压、额定绝缘电压、约定发热电流、约定封闭发热电流（有外壳时的）、额定工作电流或额定功率、额定工作制、额定接通能力、额定分断能力和耐受过载电流能力、辅助触头的约定发热电流。其中，额定工作电压指主触头所在电路的电源电压，一般为 380V、500V、660V 和 1140V 等；耐受过载电流能力是指接触器承受电动机的起动电流和操作过负载引起的过载电流所造成的热效应的能力。使用类别为 AC-2、AC-3 和 AC-4 的交流接触器应能耐受相当于 AC-3 类最大额定工作电流 8 倍的过电流。使用类别为 DC-3 和 DC-5 的直流接触器应能耐受相当于 DC-3 类最大额定工作电流 7 倍的过电流。630A 及以下等级的接触器的承载时间为 10s，超过 630A 的各等级接触器承载时间略有缩短。

（3）工作制　接触器有四种标准工作制，即八小时工作制、不间断工作制、断续周期工作制和短时工作制。八小时工作制是接触器的基本工作制，约定发热电流参数就是按八小时工作制确定的。不间断工作制较八小时工作制严酷，因为触头氧化和尘埃积累会导致触头发热恶性循环，当为不间断工作制时，接触器须降容使用或特殊设计。断续周期工作制时的负载因数标准值为 15%，25%，40% 和 60%。短时工作制的触头通电时间标准值为 10min、30min、60min 和 90min 四种。

（4）使用类别　接触器有四种标准使用类别，主触头使用类别为：交流 AC-1～AC-4，直流 DC-1、DC-3、DC-5；辅助触头使用类别为：交流 AC-11、AC-14、AC-15，直流 DC-11、DC-13、DC-14。

（5）控制回路　常用的接触器操作控制回路是电气控制回路。电气控制回路有电流种类、额定频率、额定控制电路电压 U_c 和额定控制电源电压 U_s 等几项参数。当需要在控制电路中接入变压器、整流器和电阻器等时，接触器控制电路的输入电压（即控制电源电压 U_s）

和其线圈电路电压（即控制电路电压 U_c）可以不同。但在多数情况下，这两个电压是一致的。当控制电路电压与主电路额定工作电压不同时，应采用如下标准数据。

直流：24V、48V、110V、125V、220V、250V；

交流：24V、36V、48V、110V、127V、220V。

具体产品在额定控制电源电压下的控制电路电流由制造厂提供。

（6）辅助电路　包括辅助电路种类、触头种类及触头数量、附加功能附件等，如欠电压保护、过电压保护、断相保护、空气延时附件等。一般以附件形式提供。

（7）机械寿命和电寿命　接触器的机械寿命用其在需要正常维修或更换机械零件前，包括更换触头，所能承受的无载操作循环次数来表示。国产接触器的寿命指标一般以 90% 以上产品能达到或超过的无载循环次数（百万次）为准。如果产品未规定机械寿命数据，则认为该接触器的机械寿命为在断续周期工作制下按其相应的最高操作频率操作 8000h 的循环次数。操作频率即每小时内可完成的操作循环数（次/h）。接触器的电寿命用不同使用条件下无需修理或更换零件的负载操作次数来表示。在无其他规定的条件下，接触器 AC-3 使用类别的电寿命次数应不少于相应机械寿命次数的 1/20。

2. 接触器的选用原则

接触器的选用主要是选择型式、主电路参数、控制电路参数和辅助电路参数，以及按电寿命、使用类别和工作制，另外需要考虑负载条件的影响，分述如下：

（1）型式的确定　型式的确定主要是确定极数和电流种类，电流种类由系统主电流种类确定。三相交流系统中，一般选用三极接触器，当需要同时控制中性线时，则选用四极交流接触器；单相交流和直流系统中，则常有两极或三极并联的情况。一般场合下，选用空气电磁式接触器；易燃易爆场合应选用防爆型及真空接触器等。

（2）主电路参数的确定　主电路参数的确定主要是额定工作电压、额定工作电流（或额定控制功率）、额定通断能力和耐受过载电流能力。

额定工作电流和选定的负载电流、电压等级有关。接触器可以在不同的额定工作电压和额定工作电流下工作。但在任何情况下，所选定的额定工作电压都不得高于接触器的额定绝缘电压，所选定的额定工作电流（或额定控制功率）也不得高于接触器在相应工作条件下规定的额定工作电流（或额定控制功率）。

额定通断能力应高于通断时电路中实际可能出现的电流值。耐受过载电流能力也应高于电路中可能出现的工作过载电流值。电路的这些数据都可通过不同的使用类别及工作制来反映，当按使用类别和工作制选用接触器时，实际上已考虑了这些因素。生产中广泛使用的中、小容量笼型异步电动机，其中大部分电动机的负载是一般任务，它相当于 AC-3 使用类别。对于控制机床电动机的接触器，其负载比较复杂，如果负载明显地属于重任务类，则应选用 AC-4 类别；如果负载为一般任务与重任务混合的情况，则可根据实际情况选用 AC-3 或 AC-4 类接触器，如确定选用 AC-3 类时，也要降级使用。适用于 AC-2 类的接触器一般也不宜用于控制 AC-3 及 AC-4 类的负载，因为它的接通能力较低，在频繁接通这类负载时容易发生触头熔焊现象。

（3）控制电路参数和辅助电路参数的确定　接触器的线圈电压应按选定的控制电路电压确定。控制电路电流种类分交流和直流两种，一般情况下多用交流 220V，当操作频繁时则常选用直流。

接触器的辅助触头种类和数量，一般应根据系统控制要求确定所需的辅助触头种类（常开或常闭）、数量和组合型式，同时应注意辅助触头的通断能力和其他额定参数。当接触器的辅助触头数量和其他额定参数不能满足系统要求时，可增加接触器式继电器以扩大功能。

（4）电寿命和使用类别的选用　接触器的电寿命参数由制造厂给出。电寿命指标和使用类别有关。接触器制造厂均以不同形式（表格或曲线）给出有关产品电寿命指标的资料，可以根据需要选用。

（5）电动机用接触器的选用　电动机用接触器根据电动机使用情况及电动机类别可分别选用 AC-2 ~ AC-4，如，对于异步电动机拖动的风机、水泵类负载可选用 AC-3，可采用查表法及选用曲线法，根据样本及手册选用，不用计算。当电动机常需要点动、反向运转及制动时，接通电流为 $6I_e$，使用类别为 AC-4，可根据使用类别 AC-4 计算电动机的功率。根据电动机保护配合的要求，堵转电流应该由控制电器接通和分断。大多数 Y 系列电动机的堵转电流 $\leqslant 8I_e$，因此，选择接触器时要考虑，电动机运行在 AC-3 下，接触器额定电流不大于 630A 时，接触器应当能承受 8 倍额定电流至少 10s。对于一般设备用电动机，工作电流小于额定电流，起动电流虽然达到额定电流的 4 ~ 6 倍，但时间短，对接触器的触头损伤不大，一般选用触头容量大于电动机额定容量的 1. 25 倍即可。对于在特殊情况下工作的电动机要根据实际工况考虑。如电动葫芦属于冲击性负载，重载起停频繁，反接制动等，计算工作电流时要乘以相应倍数。

绕线式电动机接通电流及分断电流都是 2. 5 倍额定电流，一般起动时在转子中串入电阻以限制起动电流，增加起动转矩，使用类别 AC-2，可选用转动式接触器。

（6）切换电容器接触器的选用　当电容器被接入电路时，电容器回路会产生瞬态充电现象，出现很大的合闸涌流，涌流大小与电网电压、电容器的容量和电路中的阻抗有关，因此，触头闭合过程中烧蚀严重，应当按计算出的电容器电路中最大稳态电流和实际电力系统中接通时可能产生的最大涌流峰值进行选择，并应选用带强制泄放电阻的切换电容器接触器，如 CJ 系列切换电容器接触器。选用时要参见样本说明，并考虑无功补偿装置标准中的规定。电容器投入瞬间产生的涌流峰值应限制在电容器组额定电流的 20 倍以下（JB7113—1993《低压并联电容器装置规定》），还应考虑最大稳态电流下电容器运行，电容器组运行时的谐波电压加上额定工作时的工频过电压，会产生较大的电流。电容器组电路中的设备器件应能在额定频率、额定电压所产生的方均根值不超过 1. 3 倍额定电流下连续运行，由于实际电容器的电容值可能达到额定电容值 1. 1 倍，故此电流可达 1. 43 倍额定电流，因此，选择的额定发热电流应不小于最大稳态电流。

（7）控制电热设备的交流接触器的选用　常用的电热设备有电阻炉、调温设备等，此类负载的电流波动范围小，属于 AC-1 使用类别，操作也不频繁，选用接触器时只要按照接触器的额定工作电流等于或大于电热设备的工作电流 1. 2 倍即可。

（8）接触器和低压断路器的配合　接触器的约定发热电流应小于低压断路器的过载电流，接触器的接通、断开电流应小于低压断路器的短路保护电流，并以此确定低压断路器的过载脱扣和电磁脱扣系数，这样断路器才能保护接触器。实际中，接触器在一个电压等级下约定发热电流和额定工作电流比值在 1 ~ 1. 38 之间，而低压断路器样本中给出多种反时限过载系数，需要实际核算后进行选择。

2.5　热继电器

热继电器是一种利用电流热效应原理工作的电器，具有与三相笼型异步电动机容许过载特性相近的反时限动作特性，专门用于三相笼型异步电动机的过载和断相保护，使用时要与相匹配的接触器配合使用。热继电器的图形、文字符号如图 2-35 所示。

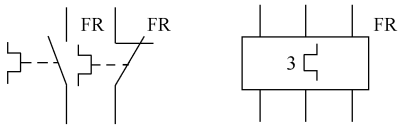


图 2-35　热继电器的图形、文字符号

2.5.1　热继电器的工作原理

三相异步电动机在实际运行中，常会因电气或机械等原因引起过载和断相，因此，应在异步电动机回路中设置保护装置。常用的保护装置是双金属片式热继电器。目前，双金属片式热继电器均是三相式，并有带断相保护和不带断相保护两种。另外还有电子式热继电器，它内装微处理器，可实现智能化控制。

1. 双金属片式热继电器的结构原理

图 2-36 所示是双金属片式热继电器的结构原理示意图。

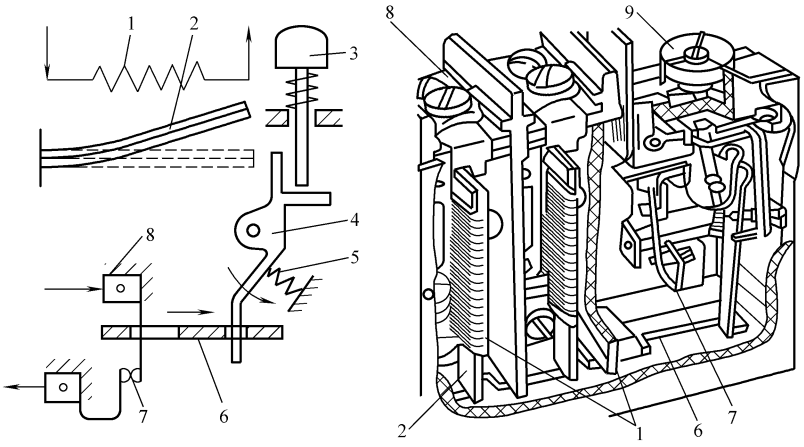


图 2-36　热继电器的工作原理

1—热元件　2—双金属片　3—复位按钮　4—导杆　5—拉簧　6—连杆　7—辅助触头
8—接线端子　9—电流调节旋钮

由图 2-36 可见，热继电器由热元件 1、双金属片 2、复位按钮 3、导杆 4、拉簧 5、连杆 6、触头 7 和接线端子 8 等组成，另外还有外壳、电流整定机构和温度补偿双金属片等部件。

热元件是一种具有均匀米电阻值的铜镍合金、镍铬铁合金或铁铬铝合金电阻材料，其形状有圆丝、扁丝、片状和带材几种，中小容量的热继电器大多采用圆丝和扁丝复绕在条状双金属片上，大容量热继电器一般采用片状或带材将其制成各种条形并紧贴在条形双金属片上。

双金属片是一种将两种线膨胀系数不同的金属用机械辗压方法使之形成一体的金属片。膨胀系数大的（如铁镍铬合金、铜合金或高锰合金等）称为主动层，膨胀系数小的（如铁镍类合金）称为被动层。由于两种线膨胀系数不同的金属紧密地贴合在一起，因此，当产生热效应时，使得双金属片向膨胀系数小的一侧弯曲，由弯曲产生的位移带动

触头动作。

热元件 1 串接于电动机的定子电路中，通过热元件的电流就是电动机的工作电流（大容量的热继电器装有速饱和互感器，热元件串接在其二次回路中）。当电动机正常运行时，其工作电流通过热元件产生的热量不足以使双金属片 2 因受热而产生变形，热继电器不会动作。当电动机发生过电流且超过整定值时，双金属片获得了超过整定值的热量而发生弯曲，使其自由端上翘。经过一定时间后，双金属片的自由端脱离导杆 4 的顶端（称为脱扣）。导杆在拉簧 5 的作用下偏转，带动连杆 6 使常闭触头 7 打开（常闭触头通常串接在电动机控制电路中的相应接触器线圈回路中），并断开接触器的线圈电源，从而切断电动机的工作电源。同时，热元件也因失电而逐渐降温，热量减少，经过一段时间的冷却，双金属片恢复到原来状态。若经自动或手动复位，双金属片的自由端返回到原来状态，为下次动作做好了准备。

使用时，热继电器动作电流的调节是借助旋转热继电器面板上的旋钮于不同位置来实现的。热继电器复位方式有自动复位和手动复位两挡，在手动位置时，热继电器动作后，经过一段时间才能按动手动复位按钮复位，在自动复位位置时，热继电器可自行复位。一般在 2min 内能可靠地用手动复位，在 5min 内能可靠地自动复位。

三相式热继电器在三相主电路中均串接热元件和双金属片。如果被控制的三相异步电动机发生过电流、断相、三相电源严重不平衡等故障，使电动机某一相或三相的电流升高，热继电器均能起保护作用。

2. 热继电器的应用

在使用热继电器时，应使三相笼型异步电动机容许的过载反时限特性与热继电器的过载反时限动作特性相匹配，否则，就不能很好地发挥热继电器的保护作用。热继电器只能和相匹配的接触器配套使用。每一系列的热继电器一般只能和相适应系列的接触器配套使用，如 JR20 系列热继电器与 CJ20 系列接触器配套使用，3UA 系列热继电器与 3TB、3TF、3TW 等系列接触器配套使用，T 系列热继电器与 B 系列接触器配套使用等，但也有例外，如 JRS1 系列热继电器不但可与 CJX 系列接触器配套使用，还可与 3TB、3TH 及 LC1-D 系列等接触器配套使用等。三相笼型异步电动机容许的过载反时限特性和热继电器的过载反时限动作特性如图 2-37 所示。图 2-38 是热继电器与接触器配套使用示意图。

使用热继电器时，将热元件与电动机的定子绕组串联连接在控制电动机主回路中，并将热继电器的常闭触头串接在辅助电路中的交流接触器电磁线圈的后面，并调节整定电流调节旋钮，使当电动机正常工作时，通过热元件的电流即为电动机的正常工作电流，热元件发热，双金属片受热后弯曲，但

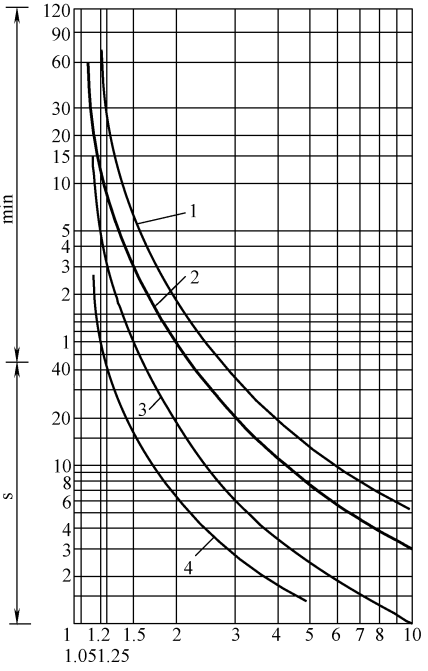


图 2-37　热继电器的过载反时限动作特性

1—三相笼型异步电动机容许的过载反时限特性

2—热继电器的冷态过载反时限动作特性

3—热继电器的热态过载反时限动作特性

4—热继电器的断相保护特性曲线

不能推动摆动杠杆动作。常闭触头处于闭合状态，交流接触器保持吸合，电动机正常运行。若电动机出现过载，绕组中电流增大，通过热元件中的电流增大，使双金属片温度升高，弯曲程度加大，从而推动摆动杠杆，并致使常闭触头断开，交流接触器线圈断电，主触头释放，切断电动机的电源，电动机停机而得到保护。也就是说，热继电器是通过其常闭触头断开接触器的控制回路，从而断开电动机主回路，实现对电动机进行保护的。图 2-39 是热继电器与接触器配套使用时的接线示意图。

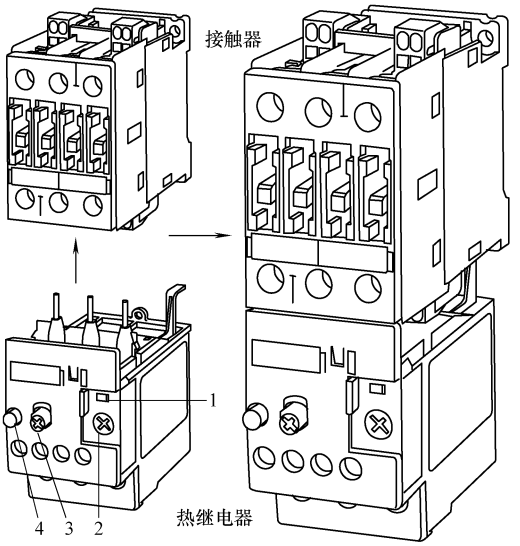


图 2-38　热继电器与接触器配套使用示意图
1—位置指示和试验按钮　2—电流调节旋钮
3—复位旋钮　4—停止按钮

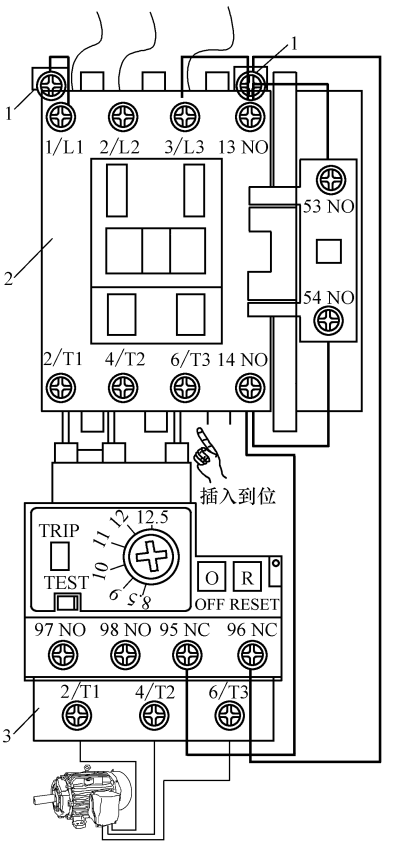


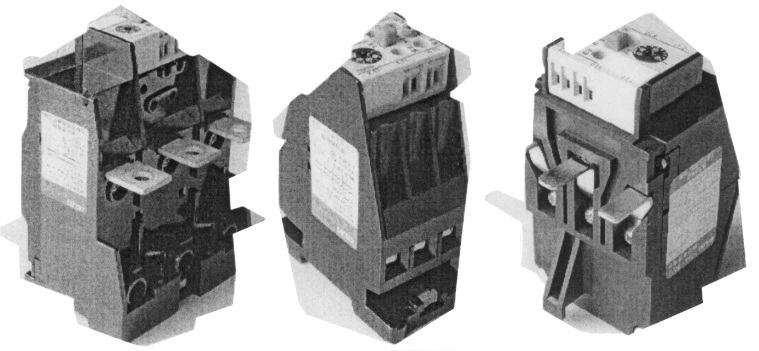
图 2-39　热继电器与接触器配套使用时的接线示意图
1—接触器线圈端子　2—接触器
3—热继电器

控制端子接线：95NC→14NO；96NC→接触器线圈端子；14NO→54NO；53NO→13NO；13NO→3/L3；接触器线圈端子→1/L1。热继电器操作面板上有动作脱扣指示，可以显示热继电器已经动作；有一个多挡位整定电流旋钮，整定电流范围是由不同的热元件号确定的，可根据需要选择整定电流范围和动作值；有手动/自动复位按钮和一对辅助触头接线端子（NO——常开和 NC——常闭）等。

2.5.2　常用热继电器产品简介

常用的热继电器有 JR20、JR21、JR36、JRS、CDR、T、3UA 和 LR1-D 等系列。其中，

JR20、JRS、JR36 系列是我国自行设计的新产品，JR21 系列是引进德国西屋-芬纳尔公司技术生产，T 系列是引进德国 ABB 公司技术生产，3UA 系列是引进德国西门子公司技术生产，LR1-D 系列是引进法国 TE 公司技术生产。各系列热继电器各有特点，共同特点是均有独立安装式（通过螺钉固定）、导轨安装式（在标准安装轨上安装）和接插安装式（直接挂接在与其配套的接触器上）三种安装方式。导轨安装式和接插安装式可通过安装座附件组装成独立安装式，如图 2-40 所示。



a)　　b)　　c)

图 2-40　热继电器的外形结构示意图

a）独立安装式　b）导轨安装式　c）接插安装式

JR20 系列热继电器采用立体布置结构，拉簧式跳跃动作机构，可获得良好的瞬间跳跃动作特性，除具有过载保护、断相保护、温度补偿及手动和自动复位功能外，还具有动作脱扣灵活性检查、动作脱扣指示及断开检验按钮等功能。当主电路中电动机过载或断相时，热继电器动作，同时动作脱扣指示件弹出，显示热继电器已动作。热继电器可手动复位，也可自动复位，复位后，热继电器即可再次投入工作。

2.5.3　热继电器的选用

选用热继电器时应根据使用条件、工作环境、电动机的型式及其运行条件和要求，以及电动机的起动情况和负载情况等几个方面综合加以考虑，必要时应进行合理计算。

1）热继电器型式的选择。选择热继电器型式前应首先确定接触器的类型和形式，一般选用与接触器相同品牌及其配套系列的热继电器，然后按实际安装情况选择安装形式。

2）原则上热继电器的额定电流应按电动机的额定电流选择。但对于过载能力较差的电动机，其配用的热继电器的额定电流应适当小些。通常选取热继电器的额定电流（实际上是选取热元件的额定电流）为电动机额定电流的 60% ~80%，并应校验动作特性。选择的热元件额定电流一般应略大于电动机的额定电流，取 1.1 ~1.25 倍，对于反复短时工作、操作频率高的电动机取上限。如果热继电器与电动机的使用环境温度不一致时，应对其额定电流作相应调整。当热继电器使用的环境温度高于被保护电动机的环境温度 15℃以上时，应选择大一号的热元件；当热继电器使用的环境温度低于被保护电动机的环境温度 15℃以上时，应选择小一号的热元件。

在不频繁起动的场合，要保证热继电器在电动机的起动过程中不产生误动作。通常当电动机起动电流为其额定电流的 6 倍及以下、起动时间不超过 5s 时，若很少连续起动，就可

按电动机的额定电流选用热继电器。当电动机起动时间较长，就不宜采用热继电器，而采用过电流继电器作为保护。

3）热继电器的主要参数是热元件的整定电流范围，该参数选择的好坏，直接影响热继电器的保护性能和动作的可靠性。通常选择的整定电流范围的中间值应等于或稍大于电动机的额定电流，每一种额定工作电流等级的热继电器有若干不同额定电流的热元件可供选择。热继电器投入使用前必须对热元件进行整定，以保证电动机能得到有效的保护。一般情况下，整定电流可调整为电动机的额定电流；当电动机起动时间较长，整定电流调整为电动机额定电流的 1.1 ~ 1.15 倍；当电动机的过载能力较弱时，整定电流调整为电动机额定电流的 60% ~ 80%；对于反复短时工作的电动机，整定电流的调整必须通过现场试验。先将整定电流调整到比电动机的额定电流略小，如果发现热继电器经常动作，就逐渐调大其整定值，直到满足运行要求为止。如，一台 10kW、380V 三相异步电动机，额定电流 19.9A，选用 JR20-25 型热继电器，发热元件整定电流为 17 ~ 21 ~ 25A，先按一般情况整定在 21A，若发现有误动作，可将整定电流改至 25A 继续观察；若在 21A 时，电动机温升高，而热继电器滞后动作，则可改在 17A 观察，以得到最佳的配合。

4）由于热继电器有热惯性，不能作短路保护，应考虑与短路保护配合问题。当发生短路故障后，要检查热元件和双金属片是否变形，如有不正常情况，应及时调整。

5）当电动机工作于重复短时工作制时，要注意确定热继电器的允许操作频率。因为热继电器的操作频率是很有限的，操作频率较高时，热继电器的动作特性会变差，甚至不能正常工作。对于可逆运行和频繁通断的电动机，不宜采用热继电器作保护，必要时可选用装入电动机内部的温度保护。

6）热继电器的安装环境温度应和电动机周围的环境温度相同，否则会影响热继电器的动作准确性。如，当电动机安装在高温处、而热继电器安装在温度较低处时，热继电器的动作会滞后或动作电流大；反之，动作会提前或动作电流小。

7）热继电器一般有手动复位和自动复位两种复位形式。当采用按钮控制的起停电路，热继电器可设置为自动复位形式；对于重要设备，热继电器动作后，需检查电动机与拖动设备，宜采用手动复位形式。

8）安装时热继电器应布置在整个开关柜（箱）的下部，如图 2-41 所示。热继电器安装接线时应注意连线的导线截面和长度在允许范围内，应采用说明书规定的导线类型和截面积。一般根据热元件的额定电流来选择连接导线的截面积。

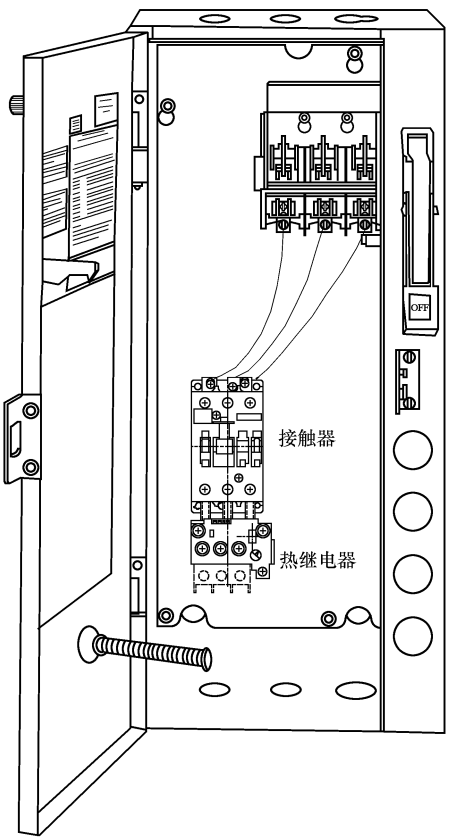


图 2-41　热继电器的安装位置示意图

2.6　熔断器

熔断器是一种利用热效应原理工作的短路保护电器。熔断器串于被保护电路中，当电路中发生短路或严重过电流时，电流超过规定值一定时间后，以它本身产生的热量使熔体熔化而快速分断电路，从而起到保护电路作用。熔断器互相配合或与其他开关电器的保护特性配合，在一定短路电流范围内可满足选择性保护要求。熔断器与其他开关电器组合可构成各种熔断器组合电器，如熔断器式隔离器、熔断器式刀开关、隔离器熔断器组和负荷开关等。熔断器的图形、文字符号如图 2-42 所示。

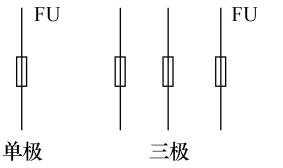


图 2-42　熔断器的图形、文字符号

2.6.1　熔断器的结构及工作原理

1. 熔断器的结构原理

熔断器由熔断体和熔断器支持件组成。熔断体一般由熔断管（或座）、熔体、填料及导电部件等部分组成。熔断器支持件由熔断器底座和载熔件组合而成，有螺钉安装和安装轨安装等形式。底座是熔断器的固定部分，由与熔断体相配合的电接触部件和接线端子等组成。熔断器底座有两种结构：一种是将螺栓连接式熔断体先固定在载熔件上，再插入支持件/底座的静触头上形成一个完整的熔断器；另一种不带载熔件，将螺栓连接式熔断体直接用螺栓紧固在底座的静触头上。载熔件是用来装卸和载运熔断体的熔断器的可动部件。以无填料圆筒帽形/圆管刀形触头熔断体为例，如图 2-43 所示。

熔断体的熔体两端焊接在圆筒形端帽上，接近熔体的最热部位，配置适量熔点合金以使熔体具有较低的动作温度和功耗。熔体是熔断器的心脏部件。它应具备的基本性能是功耗小、限流能力强和分断能力高。填料也是熔断器中的关键材料，目前广泛应用的填料是石英砂，主要有两个作用，作为灭弧介质和帮助熔体散热，从而有助于提高熔断器的限流能力和分断能力。熔断管（或座）一般由硬质纤维或电工陶瓷材料制成封闭或半封闭式管状外壳，熔断体装于其内，并有利于熔断体熔断时熄灭电弧。熔断体是由金属材料制成不同的丝状、带状、片状或笼状，除丝状外，其他通常制成变截面结构（见图 2-43），目的是改善熔断体材料性能及控制不同故障情况下的熔化时间，可显著改变熔断器的熔断特性。

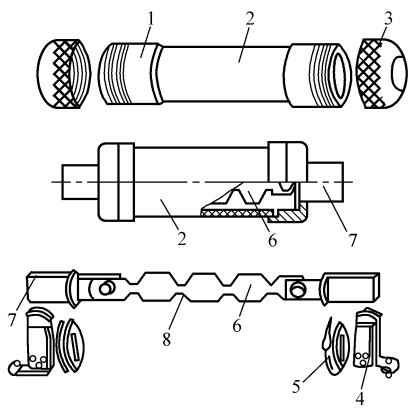


图 2-43　无填料密封管式熔断器

1—铜圈　2—熔断管　3—管帽　4—触刀座　5—垫圈　6—熔体　7—触刀　8—变截面结构

熔体的材料、尺寸和形状决定了熔断特性。熔断体材料分为低熔点材料和高熔点材料两大类。常用的低熔点材料有铅、锑铅合金、锡铅合金、锌等，其熔点低，易熔断，电阻率较大，制成的熔体截面尺寸较大，熔断时产生的金属蒸汽较多，只适用于低分断能力的熔断器。高熔点材料有铜、银和铝等，其熔点高，不易熔断，但其电阻率较低，制成的熔体截面

尺寸较小，熔断时产生的金属蒸汽少。铝比银的熔点低，而比铅、锌的熔点高。铝的电阻率较银、铜为大。铜的熔点最高为 1083℃，而锡的熔点最低为 232℃。高熔点材料适用于高分断能力的熔断器，通常用铜作主体材料，而用锡及其合金作辅助材料，以提高熔断器的分断能力。

高分断熔断器是根据“冶金效应”原理制成的，它是在高熔点材料的局部区段引入低熔点材料，使高熔点材料在某种合金状态下呈现易熔特性，这就融合了高熔点材料和低熔点材料各自的性能，为熔断体找到了另一种理想材料。具体是在铜（或银）质高熔点材料熔体的中部区段焊上一定大小的由锡或锡镉合金做成的锡珠或锡桥，锡珠或锡桥能够在较低的温度下先达到熔点，包在铜的外层，成为铜质熔断体的“熔剂”，使熔断体局部区段处在外部为液态、内部为固态的合金状态。这种合金状态的熔点较之铜的熔点要低得多，一般在 200℃左右，比单纯铜质熔断体熔断时的温度低得多，同时电阻率又比较大，功耗降低，从而熔化系数就大大减小。由于熔断体本身仍是高熔点材料，锡珠或锡桥的体积又很小，因而高熔点材料固有的高分断能力仍然得以保持。因此，同时具备了功耗低、熔化系数小和分断能力高的高性能。另外，锡珠或锡桥是焊接在熔断体变截面的窄颈处，在短路时所有的窄颈处同时熔断形成多个串联的短弧，利用电弧的近阴极效应可快速将电弧熄灭，从而达到限流和减小 I^2t 特性（I^2t 特性是预期电流的函数）的目的，起到限制短路电流可能产生的电动力及热效应对电气设备的不利影响的作用。

2. 熔断器的主要技术参数

熔断器的主要技术参数有时间-电流特性、限流能力和分断能力。这三个参数都体现了在保护方面对熔断器提出的要求。

（1）熔断器的额定电压。熔断器的额定电压是熔断器长期工作时和分断后能够耐受的电压，一般等于或大于电气设备的额定电压，否则在熔断器熔断时将会出现持续飞弧和被电压击穿而危害电路的现象。熔断器的额定绝缘电压是熔断器支持件的绝缘电压等级，熔体的额定电压是熔断器允许的工作电压等级。

（2）熔断器的额定电流。熔断器能长期通过的电流，它决定于熔断器各部分长期工作时的容许温升。熔断器的额定电流实质上就是熔断体的额定电流。

（3）熔断体的额定电流。熔体允许长期通过而不致发生熔断的最大电流。熔体的额定电流取决于其最小熔化电流，并且可根据需要分成更细的等级。通常，一个额定电流等级的熔断体可以配用若干个额定电流等级的熔体，但熔体的额定电流不得超过与之配合的熔断体的额定电流。

（4）熔断体的极限分断能力。分断能力表征熔断器的短路保护能力。熔断器在故障条件下能可靠地分断最大短路电流，它是熔断器的主要技术指标之一。

（5）熔断体的限流能力。限流能力是表征熔断器限制高倍短路电流的能力。填充石英砂的熔断器即有限流作用。但是应注意，熔断器分断电感电路时，会出现超过线路额定电压数倍的自感电势，它既会影响熄弧过程，也可能损坏线路和电气设备的绝缘。对于具有限流作用的熔断器，断开过电压相当高。

（6）I^2t 特性。I^2t 特性是预期电流的函数。通常，熔断器的保护性能在熔断时间小于 0.1s 时，是以 I^2t 特性表征；在熔断时间大于 0.1s 时，则用弧前电流-时间特性表征。

（7）额定功耗。熔断体的功耗应尽可能小，升温发热才能小。熔断器功耗与分断能力

与额定功率之间存在某种矛盾关系，要达到尽可能小的电阻值，熔体尺寸越宽厚越有利，而高分断能力，要求熔体应尽可能窄薄一些，有利于电弧熄灭。使熔断器既有高分断能力又有低功耗，熔断器的发热量低的，经济性好一些。

（8）弧前时间-电流特性。时间-电流特性表征熔断器的过电流保护特性。

3. 熔断器的分类和使用类别

熔断器根据使用电压可分为高压熔断器和低压熔断器。根据保护对象可分为变压器、电压互感器、电力电容器、半导体元件、电动机、一般电气设备和家用电器等保护用熔断器。按应用场合，熔断器分为工业用和民用两大类。前者按用途可分为一般工业用熔断器、半导体器件保护用熔断器和自复式熔断器等。半导体器件保护用熔断器具有快速分断性能，主要用作电力半导体变流装置内部短路保护。自复熔断器是一种新型限流元件（限流器），本身不能分断电路，常与低压断路器串联使用，可提高断路器的分断能力。这种熔断器在故障电流切除后即自动恢复到初始状态，可继续使用，故名自复熔断器。一般工业用熔断器多采取开启式结构，如触刀式熔断器、螺栓连接熔断器和圆筒帽熔断器等，一般需要专职人员操作。

根据结构，熔断器可分为敞开式、半封闭式、管式和喷射式熔断器。半封闭式熔断器的熔体装在瓷座上，插入两端的金属触刀座中。管式熔断器的熔体装在熔断体内。熔断体是两端套有金属帽或带有触刀的完全密封的绝缘管。这种熔断器的绝缘管内若填充石英砂，可提高分断能力，具有限流作用，故称高分断能力熔断器。若管内抽真空，则称真空熔断器；若管内充以 SF_6 气体，则称 SF_6 熔断器，其目的是改善灭弧性能。喷射式熔断器是将熔体装在产气材料制成的绝缘管内。产气材料采用电工反白纸板或有机玻璃材料等制成。当短路电流通过熔体时，熔体随熔断产生电弧，高温电弧使产气材料迅速分解，并产生大量高压气体，从而通过电离气体将电弧从管子两端喷出，并在交流电流过零时熄灭，从而分断电流。绝缘管通常是装在一个绝缘支架上，组成熔断器整体。有的绝缘管上端可活动，在分断电流后随即脱开而跌落，这种喷射式熔断器俗称跌落熔断器。一般适用于电压高于 10kV 户外场合。

熔断器是根据其保护功能来划分工作等级的，第 1 个字母表示功能等级，第 2 个字母表示被保护的对象。第 1 字母 a 表示 a 类局部范围保护类（后备保护熔断器），g 表示 g 类全范围保护类（一般用途熔断器）；第 2 字母 G 表示配电系统电缆导线保护类（一般应用），M 开关电器保护类（电动机回路的保护）、L 表示电缆和导线保护类，R 表示半导体保护类（用作整流器保护）。

g 类为全范围分断熔断器，是从最小熔化电流起，至额定分断电流止，均能分断的熔断器。它既能安全可靠地断开过载电流，也能安全地断开短路电流，其连续承载电流不低于其额定电流，并可在规定条件下分断最小熔化电流至其额定分断电流之间的各种电流。

a 类为局部范围分断熔断器，是在规定的最小分断电流（或最大分断时间）至额定分断电流之间都分断的熔断器。只能用作短路保护，其连续承载电流不低于其额定电流，但在规定条件下只能分断 4 ~ 7 倍额定电流至其额定分断电流之间的各种电流。如半导体器件保护用的熔断器就是其中的一种。

G 类为一般用途熔断器，分断电流范围从过电流大于额定电流 1. 6 ~ 2 倍，起到最大分断电流的范围，可用于保护包括电缆在内的各类负载。

M 类为电动机回路保护用熔断器。

对于具体的熔断器，组合为 gG/gL 类表示用于全范围的电缆和导线保护，aM 类表示用于局部范围的电动机后备保护，gTr 类表示用于全范围变压器保护，gR 类表示用于全范围的半导体快速保护，aR 类表示用于局部范围的半导体快速保护等。

此外，熔断器上还标识“慢动作”与“快动作”，“快动作”特性是指熔断器在短路条件下的断开速度要快于工作等级 gL/gG。

按熔断器的产品种类，常用产品系列有螺旋式熔断器、插入式熔断器、玻璃管式熔断器、有填料密封管式熔断器、无填料密封管式熔断器、高分断能力熔断器、快速熔断器和特殊熔断器，如具有断相自动显示熔断器、自复式熔断器等等。

2.6.2 常用典型熔断器简介

熔断器的产品系列、种类很多，常用产品系列有 RL 系列螺旋式熔断器，R 系列玻璃管式熔断器，RT 系列有填料密封管式熔断器，RM 系列无填料密封管式熔断器，NT（RT）系列高分断能力熔断器，RLS、RST、RS 系列半导体器件保护用快速熔断器，HG 系列熔断器式隔离器等。所有产品都是由相应系列的熔断体和熔断器支持件组合而成。

1. 熔断体

熔断体是组成熔断器的核心部件。常用的熔断体有 RO、RS 系列圆筒帽形熔断体；RO20、FRS-R、OT200、OT100 系列圆管刀形触头熔断体；RL1、RO、RS 系列螺旋式熔断体；NH、RS、RO、RT、NTA、RTO 系列方管刀形触头熔断体；RW、RF 系列无填料圆筒帽形/圆管刀形触头熔断体和 RG、RGS 系列螺栓连接式熔断体等。图 2-44 是部分熔断体产品的外形图。



图 2-44 部分熔断体产品的外形图

2. 熔断器支持件/底座

熔断器支持件一般由塑料压制的外壳或瓷质材料模压而成，装上触头、载熔件及其他附件后，经铆接或焊接而成，均可组成多相结构。有敞开式和半封闭式结构。在同一外形尺寸的底座上，可选择配置不同尺码的熔断体。图 2-45 是部分熔断器支持件/底座产品的外形

图。

3. 螺旋式熔断器

螺旋式熔断器广泛应用于工矿企业低压配电设备、机械设备的电气控制系统中作短路和过电流保护。常用产品系列有 RL1 系列、RL5 系列、RL6 系列、FB 系列螺旋式熔断器，其结构如图 2-46所示。

螺旋式熔断器的熔断体是一个瓷质熔管，内装有石英砂和熔丝，熔丝的两端焊在熔体两端的导电金属端盖上，其上端盖中有一个染有不同颜色色点的熔断指示器 4，不同的色点表示不同的熔体电流。当熔体熔断时，电弧喷向石英砂及其缝隙，熔断指示器弹出脱落，示意熔体已熔断，透过瓷帽上的玻璃孔可以看见。熔断器熔断后，只要更换熔体即可。

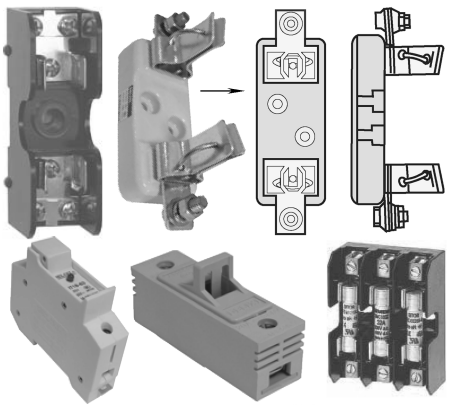


图 2-45　部分熔断器支持件/底座产品的外形图

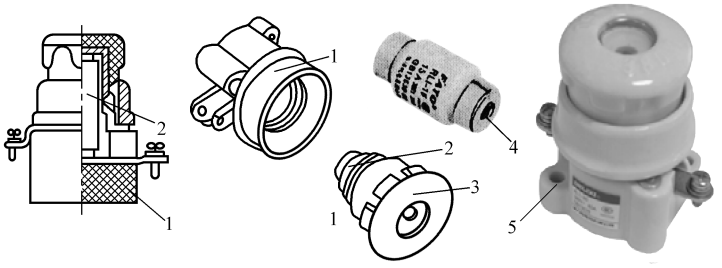


图 2-46　螺旋式熔断器结构示意图

1—瓷座　2—熔断体　3—瓷帽　4—熔断指示器　5—产品外形图

4. 有填料高分断能力熔断器

有填料高分断能力熔断器广泛应用于各种低压电气线路和设备中作为短路和过电流保护。其结构一般为封闭管式，产品种类很多，典型产品有 NT（RT16、RT17）系列和 RT20 系列高分断能力熔断器。NT 系列是引进德国 AEG 公司技术生产的产品，RT16 系列、RT17 系列是国内型号，RT20 系列是我国自行设计生产的新产品，其性能指标与 NT 系列基本一致。其外形结构如图 2-47 所示。

有填料管式熔断器是一种快速动作型、有限流作用的熔断器。填料管式熔断体均装在底座上，通过手动机构操作。熔断器底座采用整体瓷板结构或采用两块瓷块安装于钢板制成的底板组合结构。熔断体由瓷质管体、熔体、石英砂和触刀等部分组成，有的带有熔断指示器和熔断体盖板。熔体采用纯铜箔冲制的网状多根并联形式的熔片，中间部位有锡桥，装配时将熔片围成笼状，以充分发挥填料与熔体接触的作用，这样既可均匀分布电弧能量而提高分断能力，又可使熔断管体受热比较均匀而不易使其断裂。有的产品的熔体为银质窄截面或网状形式。熔断指示器是个机械信号装置，指示器上焊有一根很细的康铜丝，它与熔体并联，在正常情况下，由于康铜丝电阻很大，电流基本上从熔体流过，只有在熔体熔断之后，电流才转到康铜丝上，使它立即熔断，而指示器便在弹簧作用下立即向外弹出，显出醒目的红色

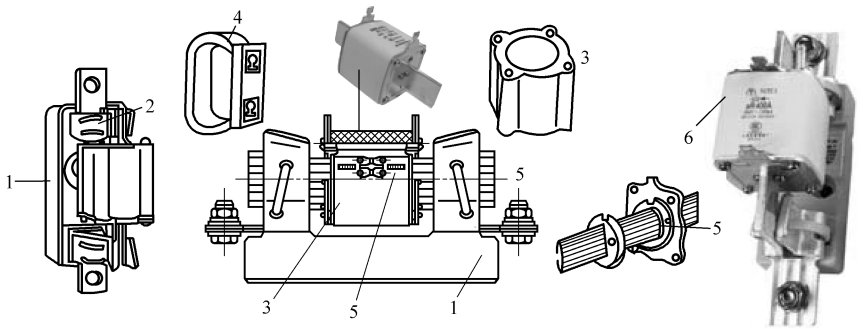


图 2-47 有填料封闭管式熔断器

1—瓷底座 2—弹簧片 3—熔断体 4—绝缘手柄 5—熔体 6—产品外形图

信号。RT20 系列的部分规格还设计有 3 极并列的整体结构，并备有触头罩和极间隔板等附件，以便于在三相中使用。绝缘手柄（载熔件）是用来装卸熔断体的可动部件。

5. 半导体器件保护熔断器

半导体器件保护熔断器是一种快速熔断器。通常，半导体器件的过电流能力极低，它们在过电流时只能在极短时间（数毫秒至数十毫秒）内承受过电流。如果其工作于过电流或短路条件下时，则 PN 结的温度将急剧上升，硅元件将迅速被烧坏。一般熔断器的熔断时间是以秒计的，所以不能用来保护半导体器件，为此，必须采用能迅速动作的快速熔断器。半导体器件保护熔断器的结构和有填料封闭式熔断器基本相同，但熔体材料和形状不同，一般是以银片冲制的有 V 形深槽的变截面熔体。

目前，常用的快速熔断器有 RS 系列、RST 系列、RSG 系列、RSF 系列和 NGT 系列等。RS0 系列快速熔断器用于大容量硅整流元件的过电流和短路保护，而 RS3 系列快速熔断器用于晶闸管的过电流和短路保护，RS77 常用于装置中作半导体器件保护。此外，还有 RLS1 和 RLS2 系列的螺旋式快速熔断器，其熔体为银丝，它们适用于小容量的硅整流元件和晶闸管的短路或过电流保护。NGT 系列熔断器的结构也是有填料封闭管式，在管体两端装有连接板，用螺栓与母线排相接。该系列熔断器功率损耗小，特性稳定，分断能力高，可达 100kA，可带熔断指示器，其中有微动开关。快速熔断器的安装形式主要有 P 型（平板型），M 型（母线型），ZM 型（直母线型）。P 型安装方式分为单体、双体、三体；M 型安装方式分为单体、双体。单体可根据安装需要，要求触刀不弯曲，触刀接线端按要求方向伸出。部分快速熔断器的产品外形如图 2-48 所示。

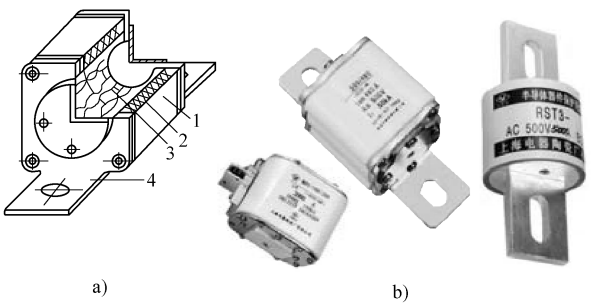


图 2-48 半导体器件保护熔断器

a）结构示意图 b）RS 系列和 NGT 系列产品外形图

1—熔管 2—石英砂填料 3—熔体 4—连接板

另外，还有一种熔断信号器，它并联于熔断器，本身对线路不起保护作用，一旦熔体熔断，信号器随之立即动作，指示器以足够的力推动与之相连的微动开关，接通信号源报警或作用于其他开关电器，使三极开关分断，防止线路的断相运行。

2.6.3　熔断器的选用

熔断器的主要参数有额定电压、额定电流、额定分断电流等。选择熔断器类型时，主要依据负载的保护待性、短路电流大小和使用场合选择。选用时，首先应根据实际使用条件确定熔断器的类型，包括选定合适的使用类别和分断范围，在保证使熔断器的最大分断电流大于线路中可能出现的峰值短路电流有效值的前提下，选定熔断体的额定电流。同时应使熔断器的额定电压不应低于线路额定电压。但当熔断器用于直流电路时，应注意制造厂提供的直流电路数据或与制造厂协商，否则应降低电压使用。

1. 选用的一般原则

（1）一般工业用熔断器的选用按电网电压选用相应电压等级的熔断器；按配电系统中可能出现的最大短路电流，选择有相应分断能力的熔断器；根据被保护负载的性质和容量，选择熔体的额定电流。

（2）当有上下级熔断器选择性配合要求时，应考虑过电流选择比。过电流选择比是指上下级熔断器之间满足选择性要求的额定电流最小比值，它和熔断体的极限分断电流、I^2t 值和时间-电流特性有密切关系。一般需根据制造厂提供的数据或性能曲线进行较详细的计算和整定来确定。

g 类熔断体的过电流选择比有 1.6∶1 和 2∶1 两种。专职人员使用的刀型触头熔断器的过电流选择比规定为 1.6∶1，螺栓连接熔断器和圆筒帽熔断器的过电流选择比都规定为 2∶1。非熟练人员使用的螺旋式熔断器的选择比规定为 1.6∶1。例如，设上级熔断器的熔断体电流为 160A，则当过电流选择比规定为 1.6∶1 时，下级熔断器的熔断体电流不得大于 100A，并应用 I^2t 值进行校验，保证上级熔断器的 I^2t 值大于下级熔断器。

（3）g 类熔断器兼有过电流保护功能，主要用作配电主干线路及电缆、母线等的短路保护和过电流保护；而 a 类熔断器主要用于照明线路和电动机回路等设备的短路保护。由于低倍过电流不能使这种熔断器动作，故在使用这种熔断器时应另外配用热继电器等过电流保护元件。

（4）选择熔断器的类型时，主要依据负载的保护特性和预期短路电流的大小。如，用于保护照明和小容量电动机的熔断器，一般是考虑它们的过电流保护，这时，希望熔体的熔化系数适当小些，宜采用熔体为铅锡合金的熔丝或 RC1A 系列熔断器；而大容量的照明线路和电动机，主要考虑短路保护及短路时的分断能力，除此以外还应考虑加装过电流保护，若预期短路电流较小时，可采用熔体为锌质的 RM10 系列无填料密封管式熔断器；当短路电流较大时，宜采用具有高分断能力的 RL 系列螺旋式熔断器；当短路电流相当大时，宜采用有限流作用的 RT（NT）系列高分断能力熔断器。当回路中装有低压断路器时，尚应考虑两者动作特性的配合问题。

（5）根据负载性质合理地选择熔断体额定电流。大多数电气设备都具有一定的过载能力，允许在一定条件下小倍数过载运行，而当负载超过允许值时，就要求保护动作。某些设备起动电流很大，但起动时间很短，要求熔断器的保护特性要适应这种设备运行的需要，在电机起动时不熔断，在短路电流作用下和超过允许过载电流时能可靠熔断。因此，为保证设备正常运行，必须根据负载性质合理地选择熔体额定电流。

2. 熔断体额定电流的确定

（1）一般用途熔断器的选用

一般地，对于负载电流比较平稳的照明或电热设备，以及一般控制电路的熔断器，熔体额定电流应≥线路计算电流，即被保护电路上所有电器工作电流之和。

配电变压器低压侧的熔断器额定电流 =（1.0～1.5）×变压器低压侧额定电流。

并联电容器组回路中的熔断器额定电流 =（1.3～1.8）×电容器组额定电流。

电焊机回路中的熔断器额定电流 =（1.5～2.5）×负荷电流。

（2）用于保护电动机的熔断器，对于电动机回路，应按电动机的起动电流倍数考虑躲过电动机起动电流的影响，单台全压直接起动的三相笼型异步电动机回路中的熔断器，一般选额定电流 =（1.5～3.5）×电动机额定电流，不经常起动或起动时间不长的电动机，选较小倍数，频繁起动的电动机选较大倍数；多台全压直接起动的三相笼型异步电动机回路中的总保护熔断器，一般选额定电流 =（1.5～2.5）×各台电动机电流之和；对于给多台电动机供电的主干线母线处的熔断器的额定电流可按下式计算。

$$I_{Fe} \geqslant (2.0 \sim 2.5) I_{Memax} + \sum I_{Me} \tag{2-1}$$

式中 I_{Memax}为多台电动机中容量最大的一台电动机的额定电流；$\sum I_{Me}$为其余电动机额定电流之和。

为防止发生越级熔断，上、下级（即供电干，支线）熔断器间应有良好的协调配合，宜进行较详细的整定计算和校验。

降压起动三相笼型异步电动机回路中的熔断器额定电流 =（1.5～2）×电动机额定电流；绕线式异步电动机回路中的熔断器额定电流 =（1.2～1.5）×电动机额定电流。

（3）熔断器与其他开关电器配合使用时的选用

如图 2-1 所示的电动机控制电路，由熔断器-断路器-接触器-热继电器-电缆（导线）-电动机所组成。其中的断路器作为电路的电源开关，接触器用于远距离控制电动机，热继电器用于保护电动机、电动机馈电电缆和接触器不受过电流破坏，而接触器、热继电器、电动机馈电电缆和电动机本身的短路保护由断路器负责。如果回路中某处的短路电流超过所设断路器的额定分断能力，则需在断路器的电源侧增设一只后备保护熔断器。后备保护熔断器必须在短路电流达到断路器的额定分断能力以前分断。这种组合设备中的每一个电器元件都有预先规定的专门保护范围。电动机低倍数过电流保护段由热继电器负责，高倍数过电流保护段及低于断路器额定分断能力的短路电流由断路器的瞬动脱扣器分断，这样可以发挥断路器本身的优越性。只有在出现更大的短路电流的情况下熔断器才动作。这时，断路器也被瞬时脱扣器分断，以保证电路各极均被切断。因此选用熔断器、断路器、接触器和热继电器的组合时，需要对各电器元件的有效保护范围和工作特性进行仔细配置，图 2-49 就是熔断器与各级保护元件特性的配合示例。由图 2-49 分析：

1）各元件的保护特性均应在电动机反时限特性曲线的下方，而在电动机起动特性曲线的上方。在过电流段内，熔断器的时间-电流特性比热脱扣器的动作特性要陡些。这对于电缆和导体的过电流保护是较为理想的，而电动机的过电流保护则需要一个延时特性。在短路电流段内，当电流刚刚超过瞬动脱扣器的动作电流时，断路器的响应比熔断器快，但当电流进一步增加时，熔断器的熔断速度又比断路器的动作速度快了。当电流非常大时，熔断器还有限制预期短路电流的作用，如图 2-49a 所示。

2）热继电器与熔断器的时间-电流特性必须能满足电动机从零速起动到全速运行的延时特性。

3）熔断器还必须保护热继电器不受可能超过其额定电流的 8 倍及以上的大电流破坏。

4）熔断器还必须在短路情况下保护接触器，能分断接触器不能分断的大电流，使得接触器的触头在任何情况下不发生熔焊，或仅出现轻微熔焊现象。接触器分断能力，一般为 10 倍额定电流值。

5）熔断器与断路器的配合时，熔断器主要分断大短路电流，即熔断器的分断范围是在交点以外的短路电流，而交点以内的熔断器特性曲线位于断路器特性曲线的上方，由断路器分断在交点以内的过电流和小倍数短路电流，如图 2-49b 所示。需要说明的是，如果熔断器不与断路器配合，而与其他电器配合，只要使熔断器的特性曲线位于断路器的特性曲线下方即可，两者没有交叉点。

由此可见，当满足上述条件时，电动机保护电器的选用是比较合理的。

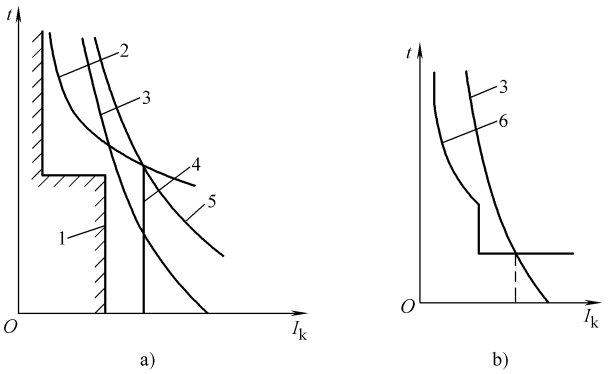


图 2-49　三相异步电动机控制电器的保护特性配合

a）电动机控制电器间的配合　b）熔断器与断路器的配合

1—电动机起动特性　2—热继电器特性　3—熔断器特性

4—接触器分断能力　5—电缆承载能力特性

6—断路器脱扣特性

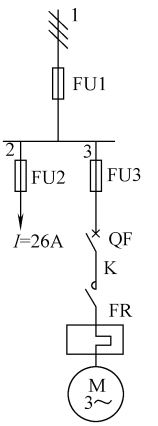


图 2-50　某配电回路电气原理图

3. 熔断器应用举例

如图 2-50 所示供电回路，设 3 号支路三相交流电动机的额定功率为 30kW，功率因数为 0.85，额定工作电压为 380V，额定工作电流为 54A；2 号支路电缆载流能力为 26A，试选用各元件的型号及规格，见表 2-7，计算过程（略）。

表 2-7　电器元件选择示例

保护元件	选　用　原　则	型　　号	规　　格/A
熔断器 FU1	1. 选择性 2. 对电缆保护	RT20-00-125	125A，I^2t 值为（27～86）$\times 10^3 A^2 \cdot s$
熔断器 FU2	对电缆短路保护	RT20-000-40	40A，I^2t 值为（1.8～5）$\times 10^3 A^2 \cdot s$

（续）

保护元件	选　用　原　则	型　　号	规　　格/A
熔断器 FU3	1. 满足起动特性	RT20-000-80	80A，I^2t 值为(16～46)×10^3 A^2·s
断路器 QF	2. 电动机故障	DZ20Y-100	80A
接触器 K	3. 热继电器对接触器	CJ20-63	63A
热继电器 FR	保护	JR20-63-6U	整定电流 55～63～71A

4. 快速熔断器的选择

快速熔断器的选择与其接入电路的方式有关，以三相硅整流或三相晶闸管电路为例，快速熔断器接入电路的方式常见的有接入交流侧和接入整流桥臂（即与硅元件相串联）两种，如图 2-51 所示。

（1）熔体的额定电流选择

选择熔体的额定电流时应当注意，快速熔断器熔体的额定电流是以有效值表示的，而硅整流元件和晶闸管的额定电流却是用平均值表示的。当快速熔断器接入交流侧时熔体的额定电流为

$$I_{re} \geqslant k_1 I_{zmax} \tag{2-2}$$

式中，I_{zmax}为可能使用的最大整流电流；k_1 为与整流电路的形式及导电情况有关的系数，若用于保护硅整流元件时，k_1 值见表 2-8；若用于保护晶闸管时，k_1 值见表 2-9。

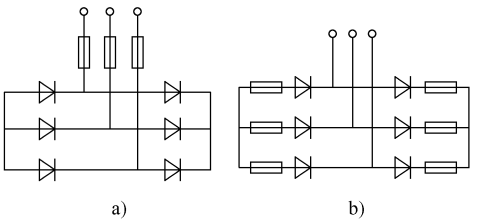


图 2-51　快速熔断器接入整流电路方式

a）接入交流侧　b）接入整流桥臂

当快速熔断器接入整流桥臂时，熔体的额定电流为

$$I_{re} \geqslant 1.5 I_{ge} \tag{2-3}$$

式中，I_{ge}为硅整流元件或晶闸管的额定电流（平均值）。

表 2-8　不同整流电路时的 k_1 值

整流电路的形式	单相半波	单相全波	单相桥式	三相半波	三相桥式	双星形六相
k_1	1.57	0.785	1.11	0.575	0.816	0.29

表 2-9　不同整流电路及不同导通角时的 k_1 值

导通角 / k_1 电路形式	180°	150°	120°	90°	60°	30°
单相半波	1.57	1.66	1.83	2.2	2.78	3.99
单相桥式	1.11	1.17	1.33	1.57	1.97	2.82
三相桥式	0.816	0.828	0.865	1.03	1.29	1.88

（2）快速熔断器额定电压的选择

快速熔断器分断电流的瞬间，最高电弧电压可达电源电压的（1.5～2）倍。因此，硅整流元件或晶闸管的反向峰值电压必须大于此电压值才能安全工作，即

$$U_F \geqslant k_2 \sqrt{2} U_{RE} \tag{2-4}$$

式中，U_F 为硅整流元件或晶闸管的反向峰值电压；U_{RE}为快速熔断器额定电压；k_2 为安全系数，其值一般为 1.5～2。

最后还应指出，采用快速熔断器保护虽然具有结构简单、价格低廉、维修方便等特点，但也有局限性，主要是更换比较麻烦，故适用于负载波动不大、事故不多的场合。在负载波动大且事故较多的场合，宜采用快速断路器代替快速熔断器。

2.7　继电器

继电器是一种逻辑转换和自动控制元件。在电气控制领域或产品中，凡是需要逻辑控制的场合，几乎都需要使用继电器。继电器的种类繁多，要对其进行严格的分类和说明是十分困难的，本节根据常用继电器技术条件及其应用领域大体归类，对其进行的说明也是最基本的。

2.7.1　继电器的结构原理与分类

继电器是一种利用各种输入电量或非电量（物理量）的变化，使输出状态转换，从而通过其触头实现逻辑转换的一种自动控制元件。根据转化的物理量的不同，可以构成各种不同功能的继电器。如图 1-12 所示，继电器特性表现为继电逻辑特性，从自动控制角度看，由继电器控制的电路的“通”、“断”表现为逻辑“0”和“1”的状态转换，即逻辑转换。继电器的状态发生转换而动作时，其触头吸合或释放，从而实现由逻辑“0”到“1”，或由逻辑“1”到逻辑“0”的反转换。继电器的一般图形、文字符号如图 2-52 所示。继电器常用触头组合形式见表 2-10。注意，图 2-52 所示的图形、文字符号主要用于中间继电器，其他类型继电器的图形、文字符号视具体类型有不同的图形、文字符号。

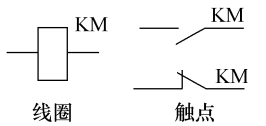


图 2-52　继电器的图形、文字符号

表 2-10　继电器常用触头组合形式

名　　称	符号	字母代号	
		国内	国外
动合（常开）触头（国外，SPST NO）		H	A
动断（常闭）触头（国外，SPST NC）		D	B
先断后合转换触头（国外，SPDT　B-M）		Z	C
先合后断转换触头（国外，SPDT　M-B）	或	B	D
常开动合触头（国外，SPDT　NO）		E	K

（续）

名　　称	符号	字母代号	
		国内	国外
双动合触头（国外，SPST　NO DM）		SH	X
双动断触头（国外，SPST　NO DB）		SD	Y

转换型（Z 型，触头组，国外产品标注 C）触头组共有三个触头，中间是动触头，上下各一个静触头。线圈不通电时，动触头和其中一个静触头断开和另一个闭合，线圈通电后，动触头转换状态。其他类型触头组的结构与此类似。另外请注意，各种类型继电器的图形、文字符号是不同的，需要时请参见参考国家标准 GB4728 及表 1-10 ~ 表 1-12。

1. 继电器的分类

继电器的种类和分类方法很多，一般按信号种类、产品用途、结构原理、触头功率等分类。如按信号分类有交流继电器、直流继电器、电压继电器、中间继电器、电流继电器、时间继电器、速度继电器、温度继电器、压力继电器、脉冲继电器等。按产品类型分类有接触器式继电器、信号用继电器（微型、超小型、小型、舌簧）、静态继电器、固体继电器等。按触头功率分类有通用、灵敏和高灵敏继电器等；按输出触头容量分有大、中、小、弱功率、微功率继电器和节能功率继电器之分等。其中以电磁式继电器种类最多，应用最广泛。

2. 电磁式继电器

电磁式继电器的控制信号是电信号，有交、直流之分，种类很多，如电压继电器、中间继电器、电流继电器、电磁式时间继电器、接触器式继电器等都属于这一类，接触器式继电器是一种作为控制开关电器使用的接触器，在电路中的作用主要是扩展控制触头数量或转换触头容量。

电磁式继电器的基本结构原理与接触器的结构原理相同，动作原理也相同，所不同的是，继电器的触头电流容量较小，触头数量较多，没有专门的灭弧装置，所以体积小，动作灵敏，只能用于控制电路中实现逻辑转换，是一种自动控制元件。

通用电磁继电器主要用于工业电气控制系统中的中间、电压、电流、时间等继电器用。通用电磁继电器有单线圈单稳态继电器、双线圈单稳态继电器、双线圈双稳态继电器、单线圈双稳态继电器、灵敏型单线圈单稳态继电器、灵敏型单线圈双稳态继电器等产品形式。一般分别以英文字母 A、B、C、D、E、F 加以表示和区别，有的使用数字表示。如 DZ-619/0500（10S）-220-2H2D-6，其中，DZ-619 表示型号；0500 表示启动线圈额定值，额定电流为 500mA；（10S）表示动作时间（ms），S—双线圈，SS—三线圈，SQ—双启动线圈，220 表示保持线圈额定值；2H2D 表示触头形式；6 表示安装方式：1—印制线路板式，3—焊接式，4—插座焊接式，5—螺栓焊接式，6—板前接线插座式。再如 JHX-3F/A-024-1H1D，其中，JHX-3F/A 表示单线圈单稳态产品，024 是启动线圈规格代号，触头形式是 1H1D。

小型电磁继电器广泛应用于工业自动化控制电路中，主要用于中间控制信号的转换和小功率输出。小型电磁继电器的控制电源为 AC 或 DC 220V 及以下，触头最大控制电流 20A 以

下，安装方式多为插座式（插座可以安装在 35mm 标准导轨上）和印制板式，品种种类繁多。一般地，小型电磁式继电器外形尺寸外形长边分别为 31mm、34.5mm、36.7mm、43.5mm、48mm 等，安装在印制线路板上的高度分别为 19.5mm、23.5mm、24.4mm、30mm、35mm、40mm 等。小型电磁继电器的产品型号很多，如 JTX、MK、HH、JQX、LY、MY2、WJQX、JZX、JZC 系列等。图 2-53 所示是一种典型小型电磁继电器的外形结构。

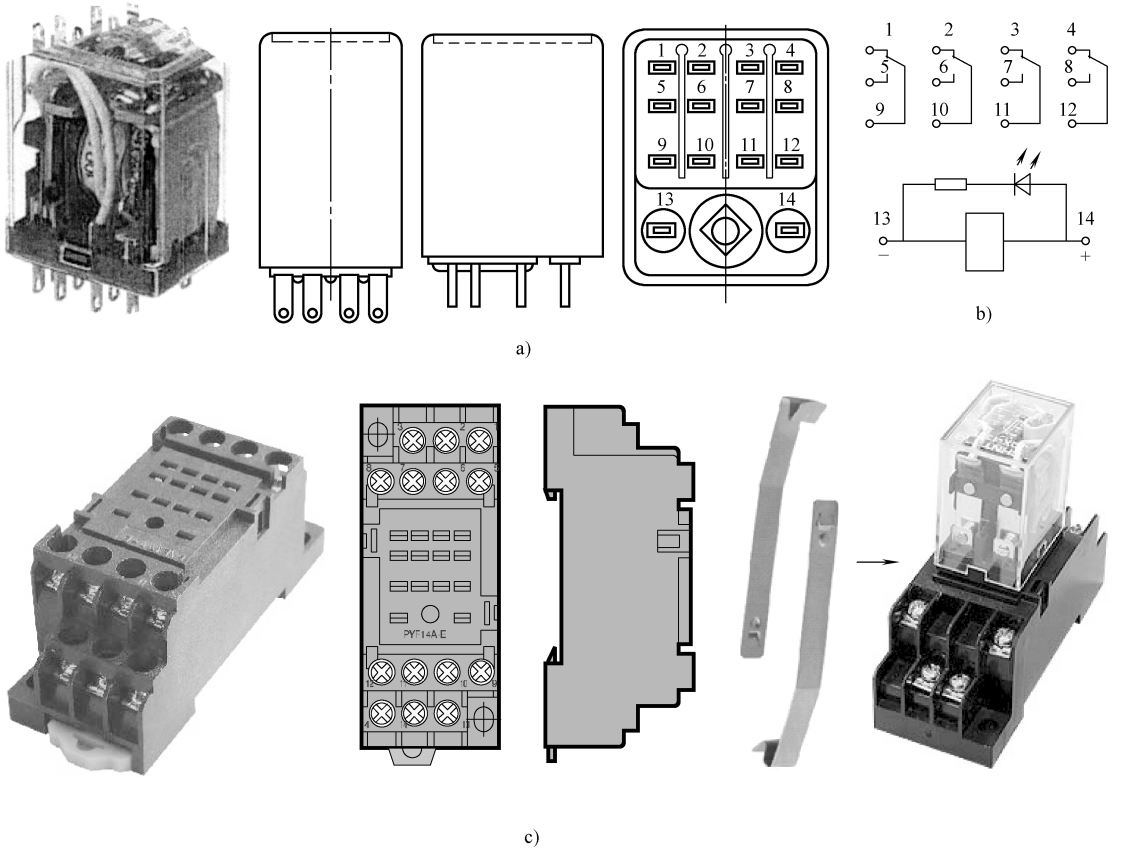


图 2-53　典型的小型电磁式继电器产品示意图
a）JQX-13F 外貌示意图　b）接线图　c）安装插座

2.7.2　时间继电器

时间继电器也称定时器，主要用于各种自动控制电路中作为延时元件，按所预置时间接通或分断电路，在保护装置中用以实现各级保护的选择性配合等，应用十分广泛。时间继电器的图形、文字符号如图 2-54 所示。

1. 时间继电器的结构原理与分类

时间继电器主要由信号感测、延时机构和触头三部分组成。时间继电器产品按其延时原理有电磁式、机械式、空气阻尼式、电动机式、静态型（电子式、可编程式和数字式）等。电磁式时间继电器的延时机构是一个螺管线圈，当线圈加上信号后，通过减缓电磁铁的磁场变化而延时动作的。机械式时间继电器的原理与机械式钟表原理相同，延时机构是发条和齿轮，通过发条和齿轮进行延时动作。空气阻尼式时间继电器延时机构是一个气囊，利用空气

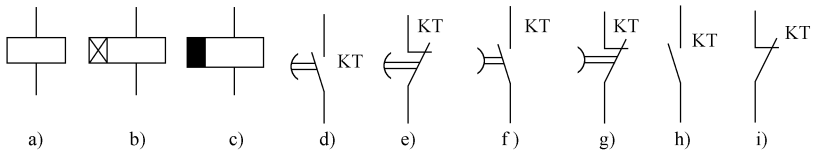


图 2-54 时间继电器的图形符号

a）线圈一般符号 b）通电延时线圈 c）断电延时线圈 d）延时闭合常开触头 e）延时断开常闭触头 f）延时断开常开触头 g）延时闭合常闭触头 h）瞬动常开触头 i）瞬动常闭触头

通过小孔节流的原理来获得延时动作的。电动式时间继电器是由内部电动机带动减速齿轮转动而获得延时动作的。电子式时间继电器是由分立电子元件或定时集成电路组成的电子延时线路进行延时动作的。也有混合式时间继电器，它是由电子元件或定时集成电路组成的电子延时线路和电磁继电器组合而成的。目前，时间继电器已逐步向静态型发展，在很多应用领域逐步替代其他类型时间继电器。最常用的是由大规模集成电路构成的时间继电器，它利用阻容原理来实现延时动作。在交流型采用变压器降压，集成电路作为核心器件，其输出采用小型电磁继电器，产品性能及可靠性、定时精度及可控性很高。目前已有采用单片机控制的高精度时间继电器。

静态时间继电器的逻辑电路由 CMOS 集成电路和电子元件、专用延时集成芯片等构成，使用振荡器、晶振分频和脉冲计数器组成延时机构，由石英晶体振荡器产生标准时基信号，通过一组或两组 BCD 码拨盘开关整定延时值，可编程减法计数达到延时。当所计脉冲数达到延时整定值时，触发器翻转，驱动出口继电器动作，实现所需延时，由于采用了晶体振荡器并增加时间补偿预置电路，定时范围宽，可实现极短时间的延时，精度极高。高精度静态时间继电器还在专用芯片的基础上采用芯片掩膜技术，将继电器的核心部分掩膜在印制电路板上，将 LED 数码显示改为 LCD 液晶显示，再加上普遍采用 SMD 贴片电子元器件，使产品外观体积更趋小型化，产品性能更加稳定，使用时可通过面板外设的拨码开关或功能按键进行时间或控制方式的预置。产品具有多延时功能（通电延时、接通延时、断电延时、断开延时、往复延时、间隔定时等）、多设定方式（电位器设定、数字拨码开关、按键等）、多时基选择（如 0.01s、0.1s、1s、1m、1h 等）、多工作模式、LED 或 LCD 显示等。静态时间继电器具有延时范围广、精度高、显示直观、体积小、耐冲击和耐振动、调节方便及寿命长等优点，应用广泛，产品型号繁多，在工业自动控制领域已基本取代传统的时间继电器。

2. 静态时间继电器简介

以 DHC6A/DHC7A 智能时间继电器为例，说明静态时间继电器的结构原理。DHC6A/DHC7A 智能时间继电器是一种多制式单片机控制时间继电器，有多种工作模式、工作次数计数功能，并带预置控制输出和 LCD 背光源显示，具有 9 种工作制式，正计时、倒计时任意设定，8 或 10 种延时时段、延时范围从 0.001s～9999h 任意设定、键盘设定，设定完成之后可以锁定按键，防止误操作。可使根据需要选择最合适的制式，以最简便方法达到以往需要较复杂接线才能达到的控制功能，这样既节省了中间控制环节，又大大提高了电气控制的可靠性。图 2-55 是 DHC6A/DHC7A 智能时间继电器产品外貌，DHC6A 产品外貌与此类似。原理框图如图 2-56 所示。

图 2-56 中，DHC80910 集成电路是一个单片机最小系统，由 CPU、片内 ROM、片内 RAM、可编程 I/O、计数器/定时器、LCD 驱动电路、LCD 基准电压电路和振荡电路构成。



图 2-55　DHC7A 智能时间继电器

a）面板图　b）产品外貌图　c）接线图

1—电源、控制、复位、暂停、键保护、继电器吸合、延时指示　2—计时值　3—功能指示

4—面板复位键　5—系统复位　6—设定值　7—设定键　8—显示键

9—模式键　10—工作次数设置键

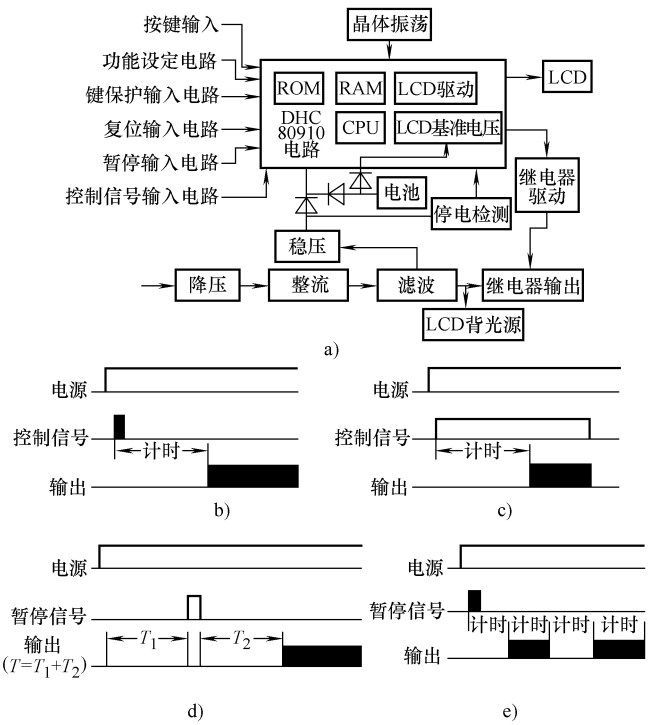


图 2-56　DHC6A/DHC7A 智能时间继电器原理图

a）原理框图　b）A 模式　c）A1 模式　d）A2 模式　e）B 模式

该电路由两路电源供电，当外部有电源时，由外部电源供电；当外部停电时，停电检测电路立即发出停电信号使该电路的功耗减到最小，此时单片机由内部电池供电，保持 RAM 中的数据（数据保持时间可达 10 年），并且设定按钮能够在停电时设定数据。当设定好数据后，键保护输入能按不同的要求分别锁定功能设定键、复位键和时间设定键，使这些键的操作无效，这样可以防止工人的误操作，也使操作者只能改变设计者允许改变的数据。DHC6 时间继电器设计有 A、A1、A2、B、E4、A3、B1、D、F 等多种工作模式。如 A 模式（见图 2-56b），上电后，时间继电器处于等待状态，输入控制信号上升沿延时开始，延时到达后，

继电器吸合（或吸合时间 0.1 ~ 99.9s 后释放），等待下一次控制信号。A2 模式（见图 2-56d），上电后，时间继电器立即开始延时，输入控制信号延时暂停，延时到达后，继电器吸合（或吸合时间 t 后释放），等待下一次上电或复位信号。B 模式（见图 2-56e），上电后，时间继电器处于等待状态，输入控制信号上升沿延时开始，延时到达后，继电器吸合，继续延时，延时到达后，继电器释放，一直不停地循环工作。DHC6A 有 8 种延时时段（见表 2-11的 2 ~ 9 挡），DHC7A 有 10 种延时时段，见表 2-11。

表 2-11　DHC6A/DHC7A 的延时范围

1 挡	0.001 ~ 9.999s
2 挡	0.01 ~ 99.99s
3 挡	0.1 ~ 999.9s
4 挡	1 ~ 9999s
5 挡	1 ~ 99min59s
6 挡	0.1 ~ 999.9min
7 挡	1 ~ 9999min
8 挡	1in ~ 99h59min
9 挡	0.1 ~ 999.9h
10 挡	1 ~ 9999h

2.7.3　固态继电器

固态继电器（Solid State Relays，SSR）是由电力电子功率器件、集成电路和分立电子器件组成的四端有源、无触头继电器。

固态继电器的结构原理如图 2-57 所示。

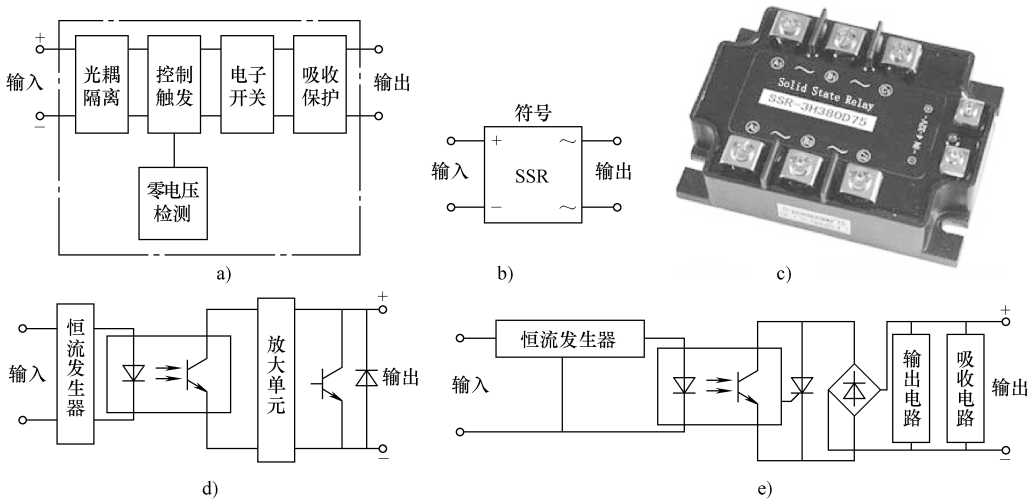


图 2-57　固态继电器的结构原理

a）固态继电器原理框图　b）固态继电器的电路符号　c）三相交流固态继电器产品外貌

d）直流固态继电器原理框图　e）交流固态继电器原理框图

由图 2-57 可见，固态继电器输入控制端是一个触发信号源回路，由恒流发生器及光电

耦合器组成。输入电路多为直流输入，也有交流输入。直流输入电路又分为阻性输入和恒流输入。阻性输入电路的输入控制电流随输入电压呈线性正向变化。恒流输入电路在输入电压达到一定值时，电流不再随电压的升高而明显增大，可适应较宽的输入电压范围。输出受控端包括开关器件和吸收电路。输出电路是在触发信号的控制下，实现电路通断，主要由输出器件（芯片）和起瞬态抑制作用的吸收回路组成，有的产品还包括反馈电路。目前，各种固体继电器使用的输出器件主要有大功率晶体管、单向晶闸管、双向晶闸管、MOS 场效应管、绝缘栅型双极晶体管等。中间采用光电耦合或变压器耦合、膜电阻网络和芯片使输入输出之间电气隔离。吸收电路是为防止从电源中传来的尖峰和浪涌对开关器件冲击和干扰而设计的，一般用 RC 串联吸收电路或非线性电阻（压敏电阻器）。交流固态继电器的内部驱动电路是一种晶闸管触发电路，包括零压监测电路，以控制晶闸管的开关状态，实现无触头、无火花地通断被控大电流负载。当在输入端加上直流或脉冲信号后，输出端就能从关断状态转变成导通状态，无信号时主回路呈阻断状态。固态继电器的驱动电路包括隔离耦合电路、功能电路和触发电路三部分。隔离耦合电路多采用光电耦合器或高频变压器。常用的光电耦合器有光-晶体管、光-双向晶闸管、光-二极管阵列（光-伏）等。高频变压器耦合在一定的输入电压下形成约 10MHz 的自激振荡，通过变压器磁心将高频信号传递到变压器二次侧。功能电路包括检波整流、过零、加速、保护、显示等功能电路。触发电路的作用是给输出器件提供触发信号。整个器件无可动部件及触头，可实现电磁式继电器相同的逻辑功能。

由于固态继电器具有结构紧凑、开关速度快、能与微电子逻辑电路兼容等特点，广泛应用于各种工业自动化装置、数控机械、交通灯、仪器仪表、医疗器械、橡塑机械、自动洗衣机等，在化工、煤矿等需防爆、防湿、防腐蚀场合中都大量使用。

固态继电器按产品类型分为直流固态继电器、交流固态继电器、双向固态继电器、光 MOS 固态继电器、智能化固态继电器等。直流固态继电器内部的开关元件是功率晶体管；交流固态继电器的开关元件是晶闸管，有单、三相之分；按触发形式可分为过零型（Z）、非过零型（P）、随机型、峰值型和相位型；按输入电压的不同类别，输入电路可分为直流输入、交流输入和交直流输入三种；固态继电器的输出电路也可分为直流输出、交流输出和交直流输出等形式。交流输出时，通常使用两个晶闸管或一个双向晶闸管，直流输出时，使用双极性器件或功率场效应管；有些输入控制电路还具有与 TTL/CMOS 兼容，正负逻辑控制和反相等功能。固态继电器产品封装有塑封型和金属壳全密封型。

过零型固态继电器加入控制信号后，交流电压过零时，SSR 即为通态；而当断开控制信号后，SSR 要等待交流电的正半周与负半周的交界点（零电位）时，SSR 才为断态。这能防止高次谐波的干扰和对电网的污染。过零型 SSR 内部包括过零检测电路，在施加输入信号时，只有当负载电源电压达到过零区域时才能导通，并有可能造成电源半个周期的延时。需要说明的是，“过零”并非必须是在电源电压波形过零处触发，而是在保证接通电压 +（10 ~25V）到 -（10 ~25 V）区域内触发。

光 MOS 固态继电器（Optical MOS Relays）又称微电子继电器 MER（Microeletronic Relays），也称为光伏固态继电器。它是以发光二极管（LED）、光伏二极管阵列 PVDA（Photovoltaic Diode Array）作为隔离耦合器件、功率场效应管（MOSFET）作为输出器件，是一种具有高速开关切换功能的双列直插式微型固态继电器。其中，光伏二极管阵列芯片 PVDA 是

由多个光敏二极管和功能电路组成的硅单片集成电路。光 MOS 固态继电器具有较低导通电阻，输出特性好，动作速度高，可控制微小的模拟信号；低漏电电流；无噪声、高灵敏度，低电流消耗，引线间电容很小；体积小，并可实现多路和多触头结构；绝缘、隔离性好等优点。

图 2-58 是采用 EMCRT48D75 型电动机控制用固态继电器的应用实例。

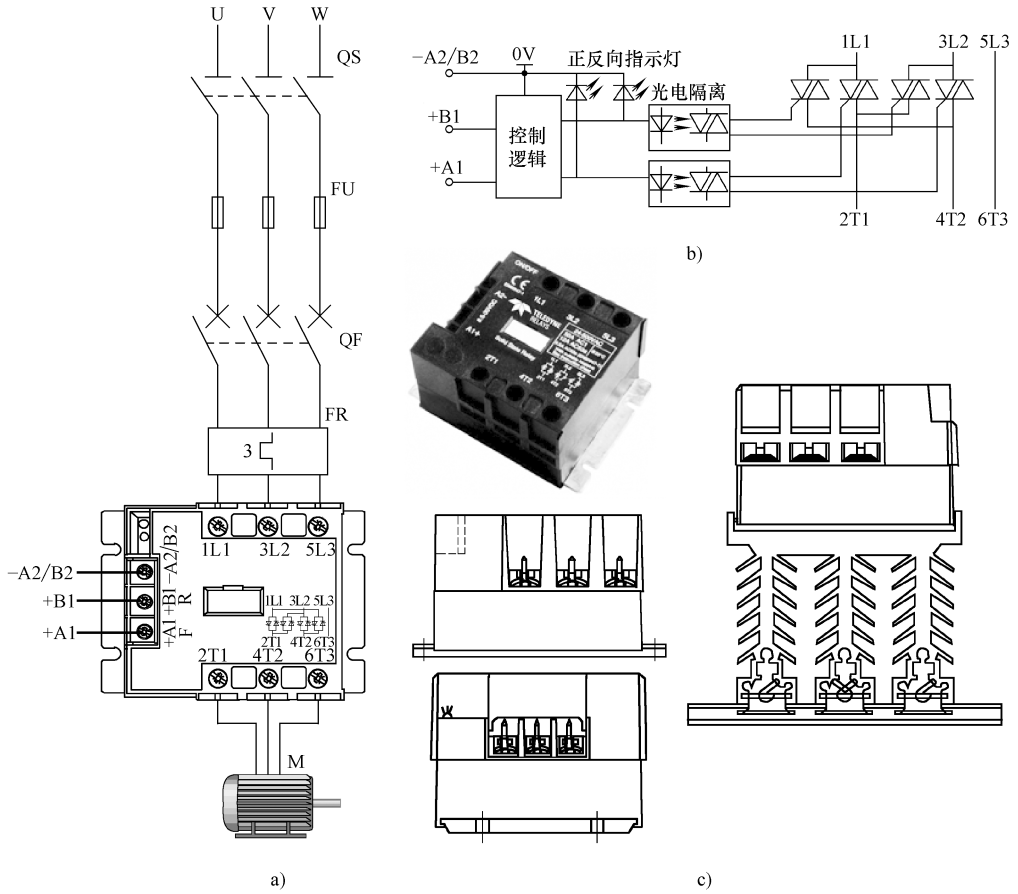


图 2-58 采用 EMCRT48D75 型固态继电器控制三相电动机应用实例

a）原理图 b）EMCRT48D75 内部主电路原理图 c）产品外貌图

EMCRT48D75 型固态继电器的额定输入电压为交流 50Hz、480V，输入电压范围为交流 24～550V，额定电流 16A，可控制电动机功率 7.5 kW，控制电压范围为 DC 12～32V。外形尺寸 100mm×76mm×56.5mm。重量 130g。可导轨安装或附带螺钉安装。可以用于控制三相异步电动机，也可以控制单相电动机。主要应用于传送带、电梯、自动扶梯、水泵、风机、压缩机、吊车等领域的电动机正反向控制。图 2-58a 是用于三相异步电动机的正反向控制电路，图中 FU 是快速熔断器，其他按技术规范常规配置。

2.8 主令电器

主令电器是电气控制系统中用于发送或转换控制指令的辅助控制电器。主令电器种类繁

多，按其作用，包括控制按钮、指示灯、行程开关、限位开关、接近开关、万能转换开关（组合开关）、主令控制器及其他主令电器，如脚踏开关、倒顺开关、紧停开关、钮子开关等。本节仅介绍几种常用的主令电器。

2.8.1　控制按钮和指示灯

1. 控制按钮

控制按钮是一种应用十分广泛的主令电器。在电气控制电路中，用于手动发出控制信号，以控制电路自动工作。按钮开关的图形及文字符号如图 2-59 所示。

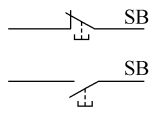


图 2-59　按钮开关的图形及文字符号

控制按钮的种类很多，如平头式、齐平式、揿按式、蘑菇头式、自锁式、钥匙式、自复位式、旋钮式、旋柄式、带指示灯式、带灯符号式、集合式及形象符号式等。有单钮、双钮、三钮及不同组合形式。产品一般采用积木复合式结构，由按钮头、复位弹簧、桥式触头和外壳等组成，有一对常闭触头和常开触头，在电气上是绝缘的，接线处有防隔板、组合螺钉压线。为了标明各个按钮的作用，避免误操作，将按钮帽或标贴做成不同颜色以示区别，其颜色有红、绿、黄、白、黑、蓝等。如，红色表示停止按钮，绿色表示起动按钮等，见表 1-6。有的产品可通过多个触头元件组合以增加触头对数，最多可增至 8 对。还有一种自持式按钮，按下后即可自动保持闭合位置，断电后才能打开。国产按钮开关产品有 LAY、LA、NP 等系列，常用 ϕ16mm、ϕ22mm、ϕ30mm 规格。国外进口及引进产品品种亦很多，几乎所有国外低压电器厂商都有按钮开关产品。新型产品和国外品牌产品多是模块组合式，选购时需要根据需要分别选用不同形式的按钮头、基座和触头模块等部件组装而成。按钮的基本结构及安装示意图如图 2-60 所示。

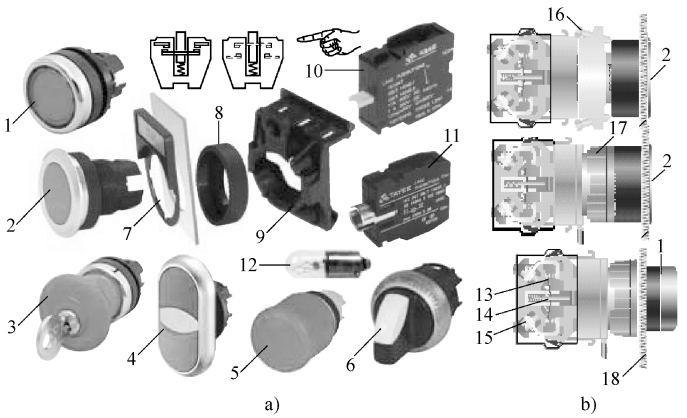


图 2-60　按钮开关的基本结构及安装示意图

a）结构原理图　b）安装示意图

1—平头式　2—齐平式　3—钥匙式蘑菇头紧停按钮头　4—双位式　5—拍拉式紧停按钮头　6—揿按式　7—标志牌架　8—固定帽　9—基座　10—触头模块　11—带灯模块　12—电珠　13—触头　14—拉簧　15—接线端子　16—紧定螺钉式安装　17—固定帽式安装　18—控制柜面板

图 2-60b 是齐平式和齐平式按钮开关的安装示意图。安装方式有紧定螺钉式和固定帽式两种安装方式。板前安装按钮头，板后安装基座和触头模块。安装时，从控制柜面板前部插

入按钮头，从后部安装基座，紧固基座上的螺钉，把触头块或灯座直接卡在基座上。有些圆形系列按钮开关的安装基座可以双面使用，一面适合厚度为 1～4mm 的面板，另一面适合厚度为 3～6mm 的面板。常规配置的按钮可以安装两个触头模块。当需要三个触头模块或者一个灯座＋两个触头模块时，需在按钮头后部插入一个 3 位支架。对于旋钮开关、钥匙开关和双按钮单元，需要插入一个带中心触头驱动片的 3 位支架。按钮开关的主要参数有型式及安装孔尺寸、触头数量及触头的电流容量，在产品说明书中都有详细说明。



图 2-61　按钮开关的形象化符号

新型按钮开关除了外形结构采用了人体工学技术和新材料，具有外形美观，品种多，可适应于各种应用场合外，最主要的特点是接触系统采用杠杆式超临界翻动机构，动作迅速，能可靠接触或断开，通过拉簧的作用保证必要的触头压力，并有自洁功能，灭弧性能良好。通断时，由于金属簧片的跳动，能发出清脆的响声，以提示操作者执行与否。为了标明各个按钮的作用，产品还有内嵌式形象化符号可供选用，如图 2-61 所示。图 2-62 是带有启动（I）和停止（O）形象化符号的两种按钮开关的外貌图。

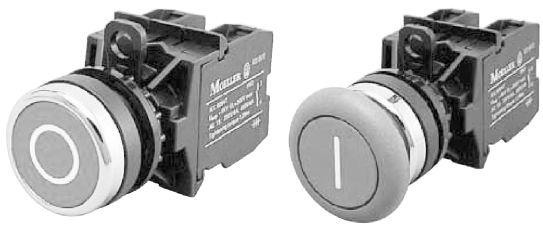


图 2-62　带有形象化符号的按钮开关外貌图

2. 指示灯

指示灯在各类电气设备及电气线路中做电源和各种信号的指示。另外还有用于塑料机械、包装机械、切割机械等需要工作状态信号指示的塔灯。指示灯的图形及文字符号如图 2-63所示。

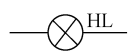


图 2-63　指示灯的图形及文字符号

指示灯主要由壳体、发光体、灯罩等组成。发光体主要有白炽灯、氖灯和半导体型三种。同按钮开关一样，指示灯也有各种外形形式，产品有积木式结构和模块组合式结构。安装方式与按钮开关相同。发光颜色有黄、绿、红、白、橙五种，使用时应按国标规定的相应用途选用，见表 1-5。指示灯的主要参数有型式及安装孔尺寸、工作电压及颜色。国产产品系列有 AD、ND30、XDJ 等系列，常用 ϕ16mm、ϕ22mm、ϕ30mm 规格。另外，国外进口和合资生产的品种很多，比较著名的品牌有和泉、富士、金钟-默勒、西门子、施耐德等。几种典型产品的外形外貌如图 2-64 所示。

塔灯灯罩采用透光散热性能良好的聚碳酸树脂制造，抗静电圆盘底座，内置减震缓冲结构，杆式减震缓冲结构，圆盘抗静电安装底座，避免来自机器内部的振动对灯体的破坏。一般塔灯为红、黄、绿、蓝等的组合色，有单体警示灯、组合式警示灯。声源类型有蜂鸣、喇



图 2-64　典型指示灯产品的外形外貌示意图

叭、音乐和语言 4 种，以适用于各种场合应用。组合式警示灯的外观外貌示例如图 2-65 所示。

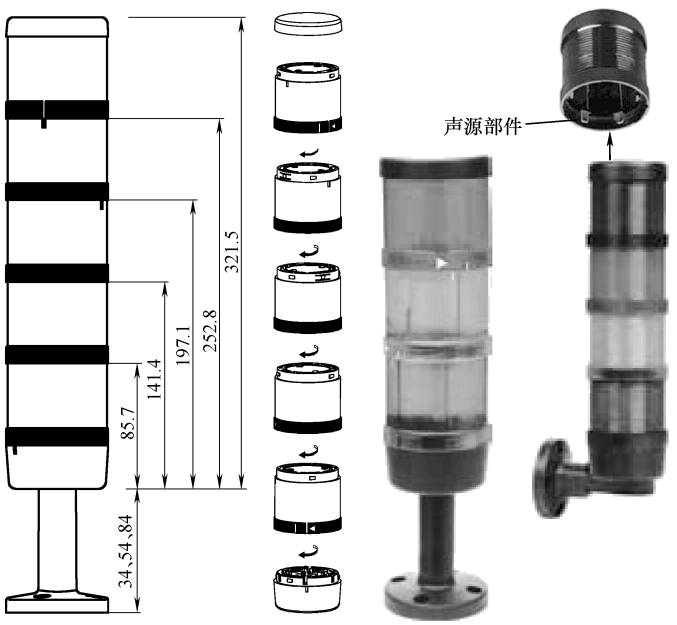


图 2-65　组合式警示灯的外观外貌示例图

2.8.2　行程开关

行程开关又称限位开关或位置开关，是一种利用生产机械运动部件的碰撞来发出控制指令的主令电器。用于控制机械设备的运动方向、行程或位置的一种自动控制器件。行程开关的图形及文字符号如图 2-66 所示。

行程开关的产品类型很多，品种繁多，结构形式多种多样，但其基本结构主要由滚轮和撞杆（操作机构）、触头系统（微动开关）、接线端子、传动部分和壳体等几个部分组成。以 LS 系列行程开关为例，其基本结构如图 2-67 所示。

直动式行程开关由推杆、弹簧、动断触头和动合触头等组成，其动作原理与按钮开关相

同，但其触头的分合速度取决于生产机械的运行速度。对于滚轮式行程开关，当被控机械上的撞块撞击带有滚轮的撞杆时，撞杆转向，带动凸轮转动，顶下推杆，同时带动微动开关中的触头动作。当运动机械返回时，在微动开关中的复位弹簧的作用下，各部分动作部件复位。滚轮式行程开关又分为自动复位和非自动复位式，双滚轮行程开关具有两个稳态位置，有“记忆”作用，在某些情况下可以简化线路。

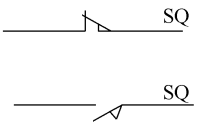


图 2-66　行程开关的图形及文字符号

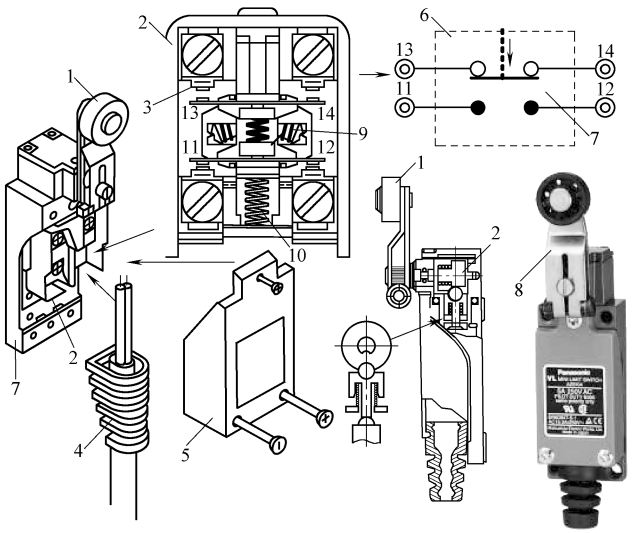


图 2-67　LS 系列行程开关的结构示意图

1—滚轮和撞（摆）杆　2—触头系统　3—触头　4—引线　5—上盖　6—接线原理图

7—壳体　8—LS 系列行程开关产品外貌　9—吸合弹簧　10—恢复弹簧

行程开关产品的摆杆形式主要有直动式、杠杆式、滚轮式、微动式、组合式和万向式等，每种撞杆形式又分多种不同形式，如直动柱塞式、滚轮柱塞式、滚轮转臂式、可调滚轮转臂式、弹性撞杆式等。直动柱塞式又分金属直动式、钢滚直动式和热塑滚轮直动式等。滚轮又有单轮、双轮、叉式轮等形式。触头类型有一常开一常闭、一常开二常闭、二常开一常闭、二常开二常闭等形式。根据微动开关触头接通和断开的机械机理，动作方式可分为瞬动、蠕动、交叉从动式等。瞬动式的接通和断开转换时间与微动开关和被操动的速度有关，只要滚轮和撞杆操动部件被操动到一定位置，微动开关触头的状态即发生转换，此过程时间极短，一般为弹簧弹跳所需的时间，为一常数。蠕动式的接通和断开动作切换时间与滚轮和撞杆操动部件被操动的速度有关，操动速度越快，开关的切换也越快。图 2-68 是 LS 系列行程开关产品的几种摆杆形式及组装示意图。

目前，国内生产的行程开关有 LS、LX 、LXK、LXW、WL、JLXK 等系列。另外还有大量的国外及我国香港、台湾地区的产品。

2.8.3　接近开关

接近开关又称无触头行程开关，是一种非接触式位置开关（传感器），它不仅能代替有触头行程开关，还可用于高频计数、测速、液面控制、零件尺寸检测、加工程序的自动衔接等的非接触式控制。接近开关的图形及文字符号与图 2-64 相同。

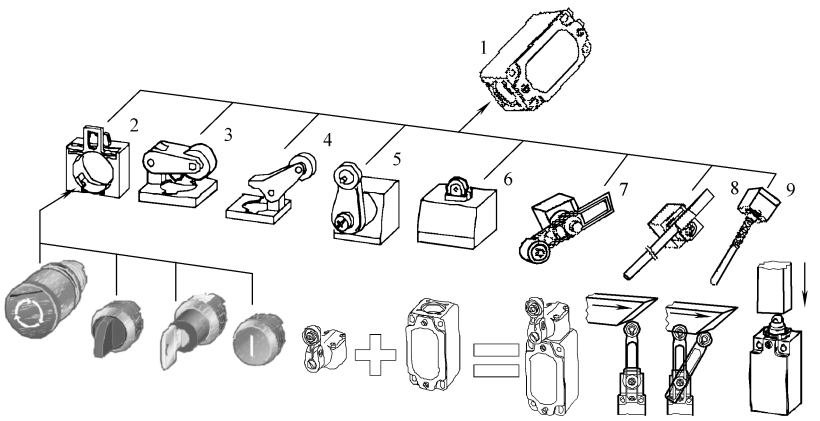


图 2-68　LS 系列行程开关产品的几种摆杆形式及组装示意图

1—本体　2—配装按钮所需的适配器　3—水平方向滚轮直动杆　4—垂直方向滚轮直动杆
5—滚轮摆动杆　6—滚珠直动头　7—可调滚轮摆动杆　8—长杆摇臂　9—弹簧摆动杆

接近开关由感应头、振荡器、放大器和外壳组成。当运动部件与接近开关的感应头接近时，就会输出检测信号。按其工作原理，有电感式、电容式、霍尔式、超声波式、红外光电式、非磁性金属感应智能型等。工作电源种类有交流和直流两种；输出形式有两线制、三线制和四线制三种，输出类型有 NPN 型、互补 PNP 型晶体管输出和继电器输出等。外形有方型、槽型、螺纹型、圆柱型、平扁型、矮圆柱型、组合型、特殊型、贯穿型、多边型、环型等多种。感应面类型有对端感应、左侧感应、右侧感应、上侧感应、分离式等。

1. 电感式接近开关

电感式接近开关有模拟量输出电感式、本安型、永磁式等类型。

模拟量输出电感式接近开关又称线性位移传感器，与普通电感式接近开关工作原理相同，但没有固定的开关点，而是当金属检测物接近检测面时，输出一个与目标物的距离（与目标物材质有关）成比例的电流或电压线性输出信号，经线性处理后，被内部信号放大器放大后输出。输出信号可以是 4 ~ 20mA/0 ~ 10mA 或 0 ~ 10V/2 ~ 10V，同时具备短路、过载、反向等保护。典型应用如测量厚度、间隙或距离测量、轮偏心和轮宽测量、滚轮厚度测量、定位控制、绝对位置或角偏差控制等，并将测量值转化为相应的工业控制信号。

本安型接近开关又称 NAMUR 开关或安全开关，由电感振荡器和解调器组成，它能将金属检测物与传感器的位移转化成电流信号的变化，安装在有爆炸危险的环境中，通常与相应的开关放大器一起使用。

永磁式接近开关又称舌簧传感器或磁性开关，它是利用永久磁铁的吸力驱动舌簧开关而输出信号的。适用于气动、液压、气缸和活塞泵的位置测定及限位开关。当磁性目标接近时，舌簧闭合，经放大输出开关信号，能安装在金属中，可紧密安装，可穿过金属进行检测。其检测距离随检测体磁场的强弱变化而变化。

电感式接近开关主要由高频振荡器、集成电路或晶体管放大器和输出器三部分组成，电感式接近开关的感应头一般是一个具有铁氧体磁心的电感线圈，只能用于检测金属物体。其基本工作原理是，振荡器的线圈在感应头表面产生一个交变磁场，当被检金属物体接近感应头时，金属物体内部产生的涡流将吸取振荡器的能量，致使振荡器停振。因而产生振荡和停振两种信号，经整形放大器转换成二进制开关信号，从而起到“开”、“关”控制作用。图

2-69 是电感式接近开关的工作原理和输出类型示意图。

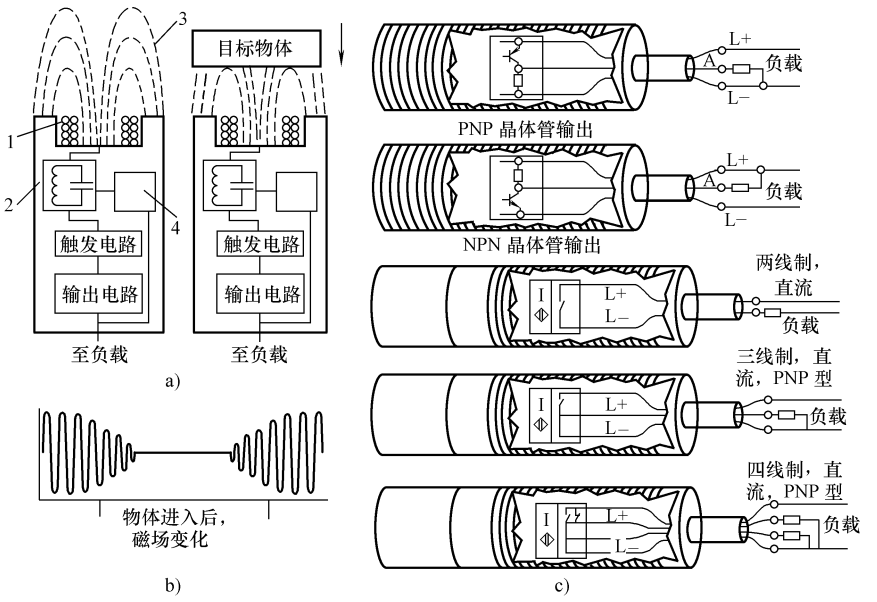


图 2-69　电感式接近开关的工作原理和输出类型示意图

a）结构原理图　b）磁场变化示意图　c）输出类型示意图

1—电磁线圈　2—振荡器　3—感应头表面的磁场　4—电压比较器

电感式接近开关的产品种类十分丰富，常用的国产接近开关有 LJ、LM、PL、CJ、SJ、AB 和 LXJ 等系列，另外，国外及引进产品亦在国内应用广泛。图 2-70 是一些产品的外形外貌示意图。

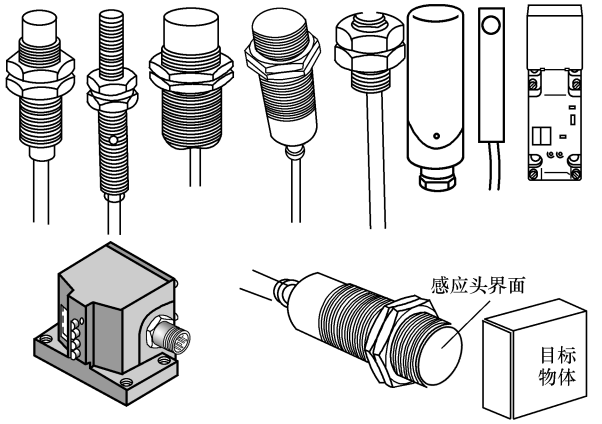


图 2-70　一些电感式接近开关产品的外形外貌示意图

2. 电容式接近开关

电容式接近开关主要是由电容式高频振荡器和放大器组成，感应界面是一个圆形平板电极，与振荡电路的地线形成传感界面分布电容，另一个极板是物体本身。如果没有物体接近感应界面时，带浮动电极的高频振荡器不振荡，当有金属导体或其他介质物体（固体、液体或粉状物体）接近传感界面时，使浮动电极产生的电场变化，物体和接近开关的介电常

数发生变化，从而改变其耦合电容值，高频振荡器产生振荡，从而使输出信号发生跃变，经放大器输出电信号。振荡器的振荡和停振信号由放大器转换成二进制开关信号，从而起到“开”，“关”的控制作用。电容式接近开关广泛应用于机械、制药、钢铁、玻璃、化工、造纸、物流、包装、采矿等领域。图 2-71 是电容式接近开关的结构原理图。

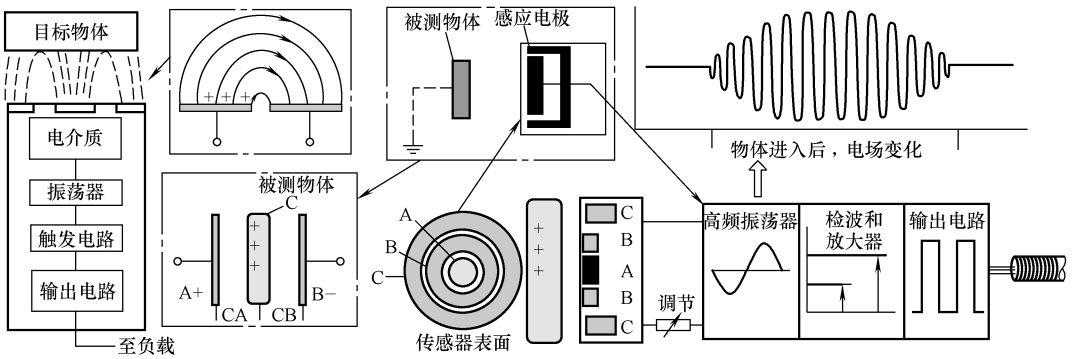


图 2-71　电容式接近开关的结构原理图

由图 2-71 可见，电容式接近开关的感应面由两同轴金属电极构成，主电极 A、B 连接在高频振荡器的反馈回路中，当目标物体（被测物体）接近传感器表面时，它就进入由等效电容的两个电极间的电场，引起主电极 A、B 之间的耦合电容增加，高频振荡器开始振荡，振荡的振幅由检波和放大电路后形成开关信号。

电容式接近开关既能检测金属物目标，也能检测非金属物目标，如果目标物体是金属物，则金属物在主电极 A、B 之间形成一个负电极，连同主电极 A、B 构成串联电容的辅助电极 C，使串联电容（CA 和 CB）的电容量大于目标物体没有进入时，由主电极 A、B 所构成的电容量。因为金属物具有高传导性，所以目标物体是金属物时，感应距离最大。在使用电容式传感器时不必像使用电感式传感器那样，对不同金属采用不同的校正因数。如果目标物体是非金属物（绝缘体），其电容量的增加取决于目标物体材料的介电常数。一般而言，材料的介电常数越大，可获得的感应距离就越大。

3. 光电式接近开关

光电式接近开关简称光电开关，它是利用光电效应原理将光强度的变化转换成电信号的变化，利用投光器发出的光束，被检测物对光束的遮挡或反射，由同步回路选通电路，从而检测物体有无的。所有能反射光线的物体均可被检测。

光电开关是由发射器、接收器和检测电路三部分组成。将输入电流在发射器上转换为光信号，对准目标发射光束，发射的光束一般来源于半导体光源，发光二极管（LED）、激光二极管及红外发射二极管。接收器再根据接收到的光线的强弱或有无对目标物体进行探测。接收器由光电二极管或光电晶体管、光电池组成。在接收器的前面，装有光学元件如透镜和光圈等。在其后面的是检测电路，它能滤出有效信号和应用该信号。此外，光电开关的结构元件中还有发射板和光导纤维。三角反射板是结构牢固的发射装置。它由很小的三角锥体反射材料组成，能够使光束准确地从反射板中返回，它可以在与光轴 0 ~ 25° 的范围改变发射角，使光束几乎是从一根发射线，经过反射后，还是从这根反射线返回。除光纤式光电开关

外，多数光电开关是波长接近可见光的红外线光波型。

根据光电开关在检测物体时投光器所发出的光线被折回到受光器的途径的不同，光电开关可分为遮断型和反射型两类。反射式光电开关又分为反射镜反射型及被测物漫反射型。具体产品有漫反射式、镜反射式、对射式、槽式和光纤式等。

漫反射式光电开关集投光器和受光器于一体，当有被检测物体经过时，物体将投光器发射的光线漫反射到受光器，并产生开关信号。发出的光线需要经检测物表面才能反射回受光器，所以检测距离和被检测物体的表面反射率将决定受光器接收到光线的强度。粗糙的表面反射回的光线强度必将小于光滑表面反射回的强度，而且被检测物体的表面必须垂直于光电开关的发射光线。漫反射型产品所采用的标准检测体为平面的白色画纸。当被检测物体的表面光亮或其反光率极高时，一般选用漫反射式的光电开关检测模式。

镜反射式光电开关也是集投光器与受光器于一体，从发射器发出的光束在对面的反射镜反射回受光器，当光束被中断时会产生一个开关信号的变化。当检测物体为不透明时，一般选用镜反射式光电开关检测。

对射式光电开关由投光器和受光器组成，结构上两者相互分离，投光器发出的光线直接进入受光器，当被检测物体经过投光器和受光器之间，光束被阻断时，会产生一个开关信号。对射式光电开关最小可检测宽度为该种光电开关透镜宽度的 80%。当检测物体为不透明时，一般选用对射式光电开关检测。

槽式光电开关通常采用 U 字形结构，其投光器和受光器分别位于 U 形槽的两边，并形成一束光轴，当被检测物体经过 U 形槽且阻断光轴时，即产生开关信号。槽式光电开关比较适合检测高速运动的物体，并且能分辨透明与半透明物体。

光纤式光电开关采用塑料或玻璃光纤传感器来引导光线，可对距离远的被检测物体进行检测。通常光纤式光电开关分为对射式和漫反射式。

光电开关应用广泛，如用于对材料的定位剪切控制；控制液位的上下限值，当液面位高于或低于上下极限液面位时，光电开关控制电路可使阀门打开或关闭，使液面位的高度保持在上下限之间；利用物体对光的遮挡作用，检测流水生产线上物体的通过个数，或物体是否存在；利用光的直线传播性，检验产品是否等高排列，另外在行程控制、直径限制、转速检测、气流量控制等方面也广泛应用。图 2-72 是光电开关的应用示例。

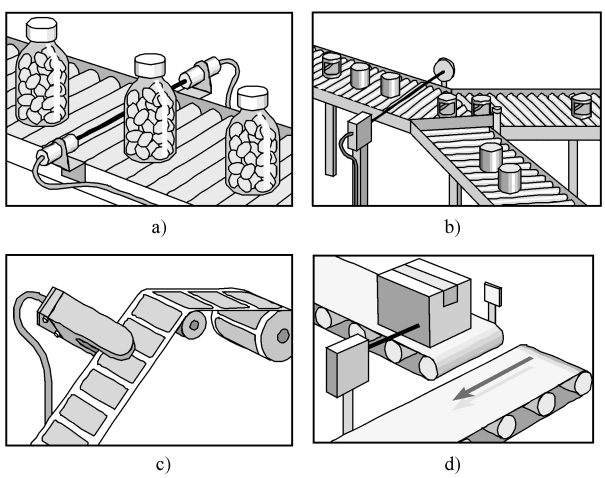


图 2-72　光电开关的应用示例

a）检测瓶子清洁度，对射型　b）检测罐头有无标签，扩散反射型
c）标签检测，槽式　d）检测传送带上有无物体，镜反射型

4. 霍尔接近开关

霍尔接近开关是一种有源磁电转换器件，是在霍尔效应原理的基础上，利用集成封装工艺制作而成，它把磁感应强度 B 输入信号转换成数字电压（电流）信号，具有记忆保持功

能。能直接和晶体管及 TTL MOS 等逻辑电路接口。霍尔接近开关由电压调整、霍尔电压发生器、差分放大器、施密特触发器和集电极开路的输出级组成。当输入端磁感应强度 B 值达到一定的程度时，霍尔开关内部的触发器翻转，霍尔开关的输出电平状态也随之翻转。输出端一般采用晶体管输出，有 NPN、PNP、常开型、常闭型、锁存型（双极性）、双信号输出之分。内部的磁敏感器件仅对垂直于传感器端面磁场敏感，当磁极 S 正对接近开关时，输出产生正跳变，为高电平，若磁极 N 正对接近开关时，输出为低电平。

5. 超声波接近开关

超声波接近开关主要由压电陶瓷传感器、发射超声波和接收反射波用的电子装置及调节检测范围用的程控桥式开关等几个部分组成。当超声波接近开关发出超声波脉冲时，通过接收反射波计算出检测距离，并转换为输出信号，继电器和模拟量输出。它在 6cm ~ 10m 范围可精确测量至毫米，具有很好的重复精确性，对于恶劣的工业环境中，其性能不受声、电、光、灰尘和污物的影响。对于液体的探测精度与固体颗粒或粉末相同，因此，超声波接近开关适用范围很广，特别适用于检测不能或不可触及的目标，检测目标可以是不同材料、外形、颜色或密度的固体、液体或粉末状态的物体，甚至是透明物体，只要能反射超声波即可。检测与表面的性质无关，表面可以粗糙或平滑、清洁或脏污、潮湿或干燥。常用于检测液面、定位、限位或堆垛探测控制、高度测量、距离测量、装瓶计数等。

2.8.4　转换开关

转换开关是一种多挡多段、控制多回路的主令电器，当操作手柄转动时，带动开关内部的凸轮转动，从而使触头按规定顺序闭合或断开。目前，常用转换开关类型主要有万能转换开关和组合开关两大类。两者的结构和工作原理基本相似，一般地，组合开关是一种专用于某种场合下的专用开关，万能转换开关是一种通用型开关，在某些应用场合下两者可相互替代。万能转换开关按结构类型分为普通型、开启组合型和防护组合型等。按用途又分为主令控制用和控制电动机用两种。按手柄的操作方式可分为自复式和自定位式两种及其组合方式。组合开关按用途分电源开关、电动机起动开关、两种电压转换开关、电动机可逆转换开关、星-三角起动开关、多速电机变速开关等。

1. 转换开关的结构原理

转换开关由接触系统、定位机构、手柄、多层绝缘壳体等部件组成。接触系统由装嵌在绝缘壳体内的多个静触头座和动触头构成。动触头是双断点对接式的触桥并装在可动支架中，在手柄转轴旋至不同位置时，相应的电路接通或断开。定位机构采用棘轮棘爪式结构，不同的棘轮和凸轮可组成不同的定位模式，从而得到不同的输出开关状态，即手柄操作位置是以角度表示的，触头的分合状态与操作手柄的位置有关，如 0°、30°、45°、60°、90°、120°等多种定位角度，手柄在不同的转换角度时，触头的状态是不同的，可按要求组成不同接法的开关，以适应不同电路的要求。转换开关的图形、文字符号见表 1-12。转换开关的触头状态和操动器位置之间的对应关系用操作图来表示，两者需同时标出，除在电路图中画出触头图形符号外，还应画出操作手柄与触头分合状态的关系，即操作图。表 2-12 是定位型转换开关手柄转换角度位置，表 2-13 是 LW39（LW12）系列万能转换开关操作图示例。

表 2-12 定位型转换开关手柄转换角度位置

手柄操作位置											
					0°	45°					
				45°		45°					
				45°	0°	45°					
				90°	0°	90°					
				45°	0°	45°	90°				
			90°	45°	0°	45°	90°				
			90°	45°	0°	45°	90°	135°			
		135°	90°	45°	0°	45°	90°	135°			
		135°	90°	45°	0°	45°	90°	135°	180°		
	120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°		
	120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	
150°	120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	
150°	120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°

如 45°—0°—45°万能转换开关，当扳向左 45°时，触头 1—2、3—4、5—6 闭合，触头 7—8打开；扳向 0°时，只有触头 5—6 闭合；扳向右 45°时，触头 7—8 闭合，其余打开。

表 2-13 LW39（LW12）系列万能转换开关操作图举例

位置 触头号	位置Ⅰ	位置Ⅱ	位置Ⅲ	位置Ⅳ	位置Ⅴ	位置Ⅵ
	←	↑	↗	↑	←	↙
	90°	0°←	45°	0°	90°←	135°
1—2		×		×		
3—4	×				×	
5—6			×			
7—8						×
9—10		×		×		
11—12			×			
13—14	×				×	×
15—16		×		×		
17—18			×			
19—20	×				×	×
21—22		×			×	
23—24	×					×
25—26			×	×		
27—28			×	×		
29—30		×			×	
31—32	×					×

图 2-73a 为 LW39（LW12）系列万能转换开关中的某一层结构原理，图 2-73b 是 LW39

面板带钥匙一般型外貌图。图 2-73c 所示是手柄型式，有方型、枪型、圆型、钥匙型和鱼尾型等。

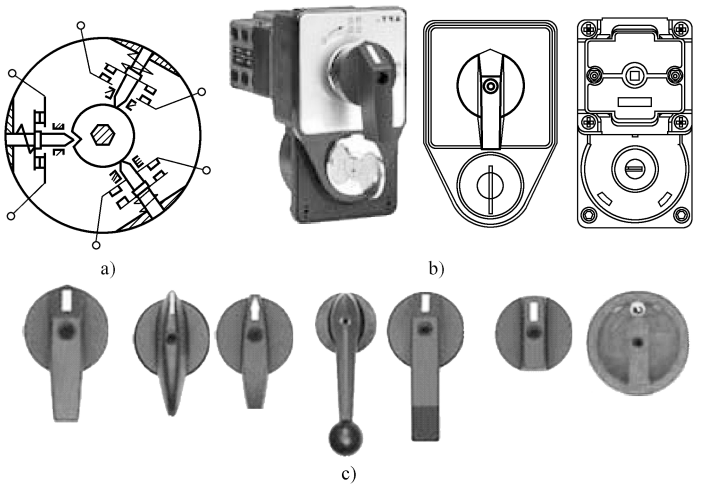


图 2-73　LW39 面板带钥匙一般型结构与外貌图

a）一层的结构示意图　b）外貌图　c）LW39 系列可选的手柄型式

2. 转换开关的应用

图 2-74 是采用转换开关控制三相异步电动机起停的示例。

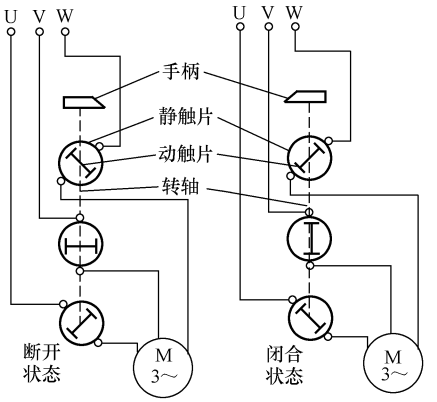


图 2-74　采用转换开关控制三相异步电动机起停示例

转动转换开关的手柄，转轴就带动三个动触片将三对彼此相差一定角度的静触片同时接通或断开，从而控制三相异步电动机的起动或停止。

第 3 章　常用工业控制器

现代工业自动化系统广泛采用工业计算机（PC）、人机界面（HMI）、可编程序控制器（PLC）、通用变频器及各类智能控制器、现场总线技术实现生产过程自动化，已将传统上相互独立的继电逻辑控制系统、过程控制系统和运动控制系统融为一体，形成以网络通信为基础的全集成体系架构的自动化控制系统。本章将这些知识和概念融合，阐述现代工业自动化控制技术的基本内容和概念，并简介几种控制器。

3.1　现代工业自动化控制技术概述

3.1.1　现代工业自动化技术涵盖的主要内容

工业自动化技术是以提高产品质量、提高生产效率、增加产量、降低消耗、安全可靠地连续生产为目的，对设备和生产过程实施自动检测、监视、控制、管理和决策的综合自动化技术，也是一门关于机电一体化集成控制系统的技术和理论。

1. 现代工业自动化系统

工业自动化系统是包括工业生产过程及其机电设备、工艺装备、自动测量仪表、控制装置等的自动化技术的总称。传统的工业自动化系统主要是针对设备和生产过程的控制，包括机械本体、动力、驱动、传感、控制及信号处理和执行机构等组成部分。从控制角度看，主要分为继电逻辑控制、过程控制和运动控制三大类，分别对应于传统上的电气控制、电动调节仪表和电气传动三类控制装置，即“三电”（电控、电仪、电传）。

近十年来，工业自动化控制领域发展十分迅速，经历着一场前所未有的变革。现在，工业自动化系统已是以网络化、可视化、信息化为特征的“三电”一体化集成系统，其核心是以微控制器为基础的信号操作控制器（Signal Operation Controller，SOC）。SOC 是一种基于系统级芯片（System on Chip，SoC）技术的一种高度集成化、固件化工业自动化技术产品，它融合了大量工业现场使用的成熟技术，并对其进行集成、封装、接口而形成的新型一体化控制器，以前需要一个或多个集成商来完成的工作，现在只由一个控制器就可以完成。由于控制器的广泛应用，使得工业自动化系统已形成以网络通信为基础的全集成体系架构的现代自动化控制系统。自动化软件也由单一功能发展为技术集成平台，如西门子全集成自动化软件“TIA 博途”（TIA Portal），它是一种集成了 SIMATIC STEP7、SIMATIC WinCC 和 SINAMICS StartDrive 软件，采用统一工程组态和项目软件环境的图形化工程设计软件平台。

从行业应用来看，从工业现场最底层的传感器、测量设备、各种执行机构等，到自动回路调节器、自动控制单元、控制系统，再到企业综合管理信息系统等，都已成为网络节点和设备，信息交互已覆盖现场设备、控制、管理各个层次，传统上相互独立的继电逻辑控制系统、过程控制系统和运动控制系统已融为一体，很难仔细区分，只可将其大体分类为自动化设备、仪器仪表与测量设备、传动设备、DCS、计算机终端、通信网络等。因此，本书构造

了一个现代工业自动化控制系统的最小模型，以说明现代工业自动化系统涵盖的主要内容，如图 3-1 所示。

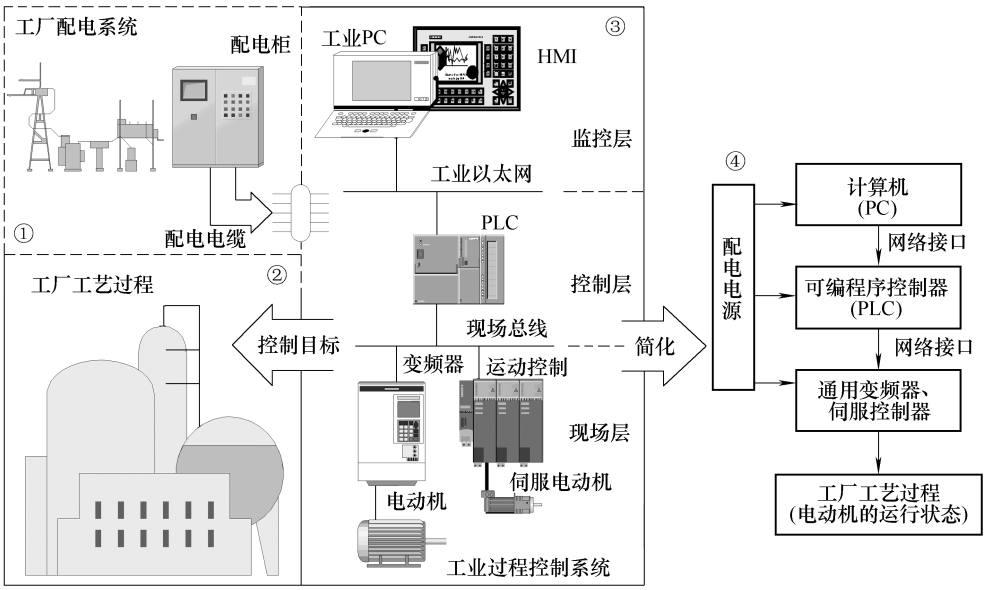


图 3-1　现代工业自动化控制系统最小系统模型示意图

图 3-1 中，①是工厂配电系统，通过配电电缆为现代工业自动化控制系统提供工作电源。②是工厂生产设备，通过生产工艺过程完成产品生产。③是工业过程控制系统，即实现生产工艺过程的控制系统。④是③部分的简图，为了便于理解，对③部分可以理解为是一个由“计算机-PLC-变频器-电动机”组成的简单系统。PLC 是这个系统的控制中心，计算机（或 HMI）是这个系统的可视化监控中心。通用变频器（运动控制器）是执行机构，它控制着电动机的运行状态，通过电动机的运行状态实现工厂工艺过程。工厂工艺过程是在计算机和 PLC 的控制和监视下进行的。系统中的各部分电源是通过工厂配电系统的多路配电电缆提供的。从控制角度看，整个系统包含继电逻辑控制、PLC 控制、计算机可视化控制、通用变频器控制、运动控制、通信与网络化控制等，其中包含各类低压电器、PLC、计算机、通用变频器、运动控制器、通信与网络化控制部件等“元件”。

2. PLC、PC 和 HMI 的应用

可编程序控制器（Programmable Logic Controller，PLC）是一种专门用于工业环境下的一种工业控制计算机，其硬件结构与个人计算机（工业计算机）基本相同，也具有与图 3-2 所示的基本结构。它内部具有可编程存储器和面向用户程序的指令系统，具有数字逻辑运算，数学运算、定时器、计数器、数据比较、数据移动、数据转换与运算、程序跳转、程序控制、通信、中断、PID 控制、运动控制等指令功能，以及数字或模拟式 I/O 控制接口，是现代工业自动化控制系统的核心部件。在工业控制应用方面，可编程序控制器主要用于对现场工业设备的控制，以及实现工业设备的网络化控制；个人计算机（工业计算机）主要用于对可编程序控制器、人机界面（HMI）、通用变频器（运动控制器）等的编程和调试，以及实现工业现场的可视化远程控制。可编程序控制器与个人计算机（工业计算机）的最大区别是运行方式不同。可编程序控制器采用循环扫描方式，而个人计算机（工业计算机）则

是中断运行方式。人机界面（Human Machine Interface，HMI）即“人机接口”，也称用户界面或使用者界面，是系统和用户之间进行交互和信息交换的媒介，它实现信息的内部形式与操作者可以接受形式之间的转换，由硬件和软件两部分组成。HMI 产品通常连接可编程序控制器（PLC）、通用变频器等工业控制设备，利用显示屏显示，通过触摸屏写入工作参数或输入操作命令，实现人与机器信息交互。一般而言，HMI 具有如下基本功能：实时数据趋势显示，可把撷取的数据立即显示在屏幕上；自动数据记录，自动将数据储存至数据库中；历史数据趋势显示，把数据库中的数据作可视化的呈现；报表，能把资料转换成报表的格式，以便打印；图形接口控制，操作者能够透过图形接口直接控制机器设备；警报与记录，使用者可以定义一些警报产生的条件，如温度或压力的上下限临界值，以便产生警报，通知操作员处理。

3. 通用变频器和运动控制器的应用

通用变频器是指可用于普通异步电动机的变频器。变频器（Variable-Frequency Drive，VFD 或 Variable Voltage Variable Frequency Inverter，VVVF）是应用电力电子变换技术与微电子技术，通过改变交流电动机工作电源频率的方式控制其转速的电力传动元件。变频器运行过程中，加到交流电动机上的电源频率与电压成比例地改变，即改变频率的同时控制变频器输出电压，从而控制电动机的输出转矩。变频器在结构上通常分为整流单元、大容量电容器、逆变器和控制器 4 部分。在现代工业自动化控制系统中，通过通用变频器对异步电动机进行变频调速，是节约电能、改善生产工艺流程、提高产品质量，以及改善运行环境的一种主要手段。目前在工厂自动化系统中，几乎所有需要调速的异步电动机均使用通用变频器进行控制。

运动控制是自动化控制系统的一个分支。运动控制就是通过伺服电动机（机构）对机械运动部件的位置、转矩、速度和加速度等进行实时控制，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动，因此，运动控制也称为伺服控制。运动控制器用于控制伺服电动机的运行方式，如速度控制方式、转矩控制方式和位置控制方式，从而控制机器的位置或速度。伺服电动机又称执行电动机，它在自动控制系统中，作为执行元件，将控制电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出，以达到控制的目的。伺服机构包括气缸、液压泵、线性执行机构和伺服电动机。伺服电动机分为直流和交流两大类，其主要特点是，当信号电压为零时无自转现象，转速随着转矩的增加而匀速下降。

现代运动控制系统是一个“计算机（PC）+运动控制器+伺服电动机”的开放式结构，其中，上位计算机（PC）的主要功能是根据具体装置的运动控制类型，通过相应的软件对整个控制系统的输入信息进行逻辑与算术运算，根据运算结果向其他功能模块传输数据、发出控制命令、响应用户的操作指令等。伺服电动机是主要执行部件，具体完成运动控制。运动控制器就是根据上位计算机给出的指令，结合具体的伺服系统类型，将其指令转化为伺服电动机的运动。一般地，运动控制系统中还包括反馈传感器和机械部件。反馈传感器通常是光电编码器、旋转变压器等，用以反馈执行器的位置和速度，以实现闭环控制。机械部件包括齿轮箱、轴、滚珠丝杠、齿形带和联轴器等，用以将执行电动机的运动形式转换为目标运动形式。运动控制技术广泛应用于数控、机器人和工厂自动化技术中，如工业机器人、数控机床、包装机械、印刷机械、纺织机械和装配机械等装置中。

4. 工业数据通信与控制网络的应用

现代工业自动化控制系统中广泛应用工业数据通信与控制网络技术，包括工业数据通信系统、现场总线网络控制系统和分布式网络集成控制系统。工业数据通信与控制网络广泛应用于几乎所有连续、离散工业领域的各行各业，如过程自动化、制造加工自动化，以及电力、化工、钢铁、交通等行业的控制系统。新型低压电器实现了可通信、网络化，能与多种现场总线连接进行双向通信，实现开关电器的“4 遥”（遥控、遥信、遥测、遥调）功能。不仅能对配电质量进行监控，减少损耗，而且能实现区域联锁，进一步提高配电系统的可靠性。常用的现场总线有 PROFIBUS、Modbus、DeviceNet 等。

工业数据通信是以数字编码形式在两个及以上通信伙伴之间进行数据传递和交换的一种串行通信方式。通信伙伴可以是测量、控制设备的各功能单元之间、设备与设备之间、以及这些设备与计算机之间等。通信内容包括生产设备的运行参数及测量值、控制量与实时数据、阀门位置、开关状态、报警状态、设备维护信息、系统组态、参数修改等。数字信号的串行通信，无需在每对通信节点间建立直通线路，而采用网络连接形式构建数据通道，即工业数据通信网络。工业数据通信是控制网络技术的重要基础和组成部分。

控制网络由多个分散在生产现场、具有数字通信能力的测量控制仪表作为网络节点而构成。它采用公开、规范的通信协议，以现场总线作为通信连接的纽带，把现场控制设备连接成可以相互沟通信息，共同完成自动化控制任务的网络系统与控制系统。控制网络的核心是现场总线技术。现场总线是一种应用于生产现场，在现场设备之间、现场设备与控制装置之间实行双向、串行、多节点数字通信的技术。也是用于生产过程自动化和制造自动化的现场设备或现场仪表互连的现场通信网络。常用的现场总线有 PROFIBUS、Modbus、DeviceNet 等。

现场总线控制是工业自动化控制系统中的一种计算机局域网络。在这个局域网络中的具有检测、控制、通信能力的数字化仪表、测量、控制设备在现场实现分布式控制，并将这些现场分布的数字化仪表、测量、控制设备作为网络节点，将这些节点以总线形式连接起来，从而形成一个现场总线控制系统，即网络最底层的、网络集成式分布控制系统。现场总线控制系统一般由测量系统、控制系统、设备管理系统三部分组成。网络计算机服务模式是客户机/服务器模式。软件是系统的重要组成部分，控制系统的软件有组态软件、维护软件、仿真软件、设备软件和监控软件等；应用软件有数据库、通信协议、网络管理协议等。网络系统硬件有系统管理主机、服务器、网关、协议变换器、集线器，用户计算机等及底层节点（总线上可以编址的设备）。连接于总线上的产品分为有源和无源两大类。有源产品可以产生通信信号、响应信号、调整信号等。有源产品包括节点（Node）、总线模块（Bus Module）、网关（Gateway）、中继器（Repeater）、网桥（Bridge）、路由器（Router）、有源多端口分接器（Active Hub）、接口卡或接口模块（Interface Card &Interface Module 等。无源总线产品包括总线电缆（Busline）、T 型分支（Tee）、无源多端口分接器（Passive Hub）、终端电阻（Terminating Resistor）等。

5. 智能电器的应用

智能电器是构成智能低压配电网的基础件，包括智能化继电器、接触器、保护器和断路器等。可通信智能电器由以微控制器为核心的智能控制器（电子脱扣器），以及测量、状态指示和通信部件组成。功能包括保护功能、控制功能、实时测量、参数显示、故障记录、自诊断、双向实时通信和网络化功能，可与多种现场总线连接，正从集中式控制向分布式控制

方向发展。现场总线技术的应用使可通信智能电器进一步实现现场级信息化，其技术核心是实现 TCP/IP 协议。把 TCP/IP 协议嵌入到智能电器 ROM 中，使信号收发都以 TCP/IP 方式进行，并可对现场智能电器进行远程编程、组态和控制等。中国浙江的一位电器制造商这样描述他们生产的一种智能电器，“这台装置就像上网电脑一样，随时可向后台服务器发送电网运行的状态信息，可进行远程控制。即便是在人迹罕至的山区，不用到达现场，可直接通过远程控制解决电网运行中出现的问题。”再如，德国金钟-默勒公司的“easy”控制继电器，西门子公司的“LOGO!”通用逻辑模块等可编程序继电器，它除了继电逻辑功能外，还具有延时、计数和脉冲继电器等功能，可以将继电逻辑控制系统的触点信号转换成二进制数字信号，通过串行接口进行通信，还可通过 AS-i、PROFIBUS、CANopen、DeviceNet 等现场总线将其集成到更高级的自动化系统中。许多电气设备将这种可编程序继电器作为控制器镶嵌其中，以便使其控制功能智能化。如 GEC 系列微机同步电机励磁装置采用“LOGO!”作为逻辑切换单元，使其性能大幅提高。还有一些品牌的同步电机励磁装置采用西门子公司 S7-200PLC 作为主控制器，大大缩短了研制周期，并使系统控制功能丰富。

3.1.2 控制器的概念

现代工业自动化系统的核心是各类控制器。本书定义的控制器（SOC）是一种广义、通用的控制器，它以 SoC 高度集成化、固件化的系统集成技术为核心，把整个控制目标的应用系统集成在一个芯片中，能根据过程输入（被控变量与给定值），按一定的控制规律进行操作，并产生过程输出控制信号至执行器，从而实现自动化控制的装置，如图 3-2 所示。

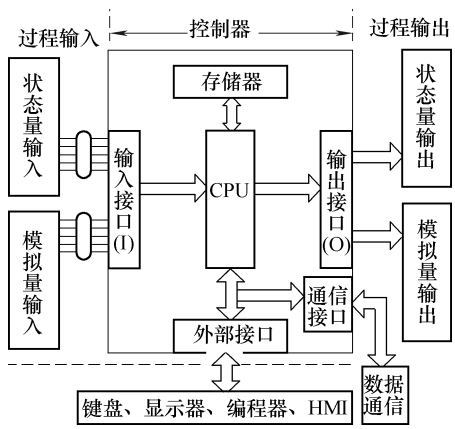


图 3-2 控制器的基本结构

由图 3-2 可见，控制器的硬件结构由 CPU、存储器、I/O 接口、外部接口和通信接口等部分组成，是控制器的核心。CPU 是控制器的心脏，通常是微控制器或单片机。存储器包括系统程序存储器和用户程序存储器。存放系统软件的存储器称为系统程序存储器。存放应用软件的存储器称为用户程序存储器。I/O 接口是过程输入/输出通道，包括模拟量输入/输出和状态量（开关量、数字量）输入/输出，前者用于接收/输出标准工业信号，后者用于接收/输出控制量和被控制量的状态信号，可以是开关量或数字量信号；一台控制器通常都可以接收/输出若干个标准工业信号和状态量信号。外部接口用于连接外部设备，对于整体式控制器，用于连接本体操作面板的操作按键和显示器件。通信接口（RS232、RS485 等）用于控制器与其他控制设备之间进行数据通信或联网。

现在广泛应用的可编程序继电器、可编程序控制器、通用变频器、伺服控制器、直接数字控制器（DDC）、智能控制器等，以及各类物理量控制器，如温度控制器、压力控制器、PID 控制器等，都属于本书定义的控制器，这些控制器在各类控制系统中起控制中枢或核心处理模块的作用，并都具有如图 3-2 所示的基本结构。

控制器的功能主要由其采用的微控制器芯片及所具有的软件功能所决定。软件一般包括系统程序和用户程序两部分。系统程序通常由监控程序和功能程序两部分组成，监控程序主

要监视和管理硬件部分的工作并实现规定的功能；功能程序是控制器所能提供的各种功能指令。用户程序是用户根据控制系统需要，通过控制器的编程软件进行编制。对于整体式控制器，用户程序是用户通过控制器的操作面板，在系统程序菜单中选择所需要的功能指令，并按一定的规则连接起来而构成的。用户程序的编制过程，也称为程序的组态过程。有些控制器的用户程序是通过编程器（专用编程器或计算机）进行编制的，有“在线”和“离线”两种方式。“在线”编程方式是编程器与控制器通过通信接口连接后进行；“离线”编程方式也称为仿真方式，编程的过程与控制器无关。如西门子 S7 系列可编程序控制器的用户程序的编制，是通过专门的编程软件（如 STEP7 V5.5）在计算机上完成的，用户程序的调试可以“在线”或“离线”。

控制器是整个控制系统或控制单元的核心，也是系统实现控制功能的关键部件。它的工作过程是控制器通过模拟量输入通道和状态量输入通道采集实时数据，实时数据可能是各类接点信号、传感器信号或其他控制器传送来的输入信号，并将其转换为 CPU 可接受的数字信号，然后按照用户程序设定的控制规律进行运算，最后发出控制信号，并将数字信号转换为模拟量信号或状态信号，并通过模拟量输出和状态量输出通道控制设备的运行，从而实现自动化控制。

需要说明的是，上述是广义控制器的一般概念，通过这些基本概念可以大体了解各类控制器的基本结构和工作原理，掌握控制器的基础知识，具体到某一种控制器，尚需根据其用途、功能和应用场合具体分析。

3.2　可编程逻辑控制继电器

可编程逻辑控制继电器是一种“可编程序”、“通用”、“智能化”控制继电器，不同厂商的产品有不同的名称，如，德国金钟-默勒公司的“easy”控制继电器；西门子公司的“LOGO!”通用逻辑模块；德国图尔克的“BoxX”智能控制继电器；施耐德公司的“Zelio Logic”逻辑控制器；日本和泉电气公司的“FL1D”智能型应用控制器；日本 OMRON 公司的“ZEN”可编程序继电器；三菱公司的“ALPHA”程控器等。本节以德国金钟-默勒公司的“easy”控制继电器为例，介绍可编程逻辑控制继电器的结构、功能和应用。

3.2.1　可编程逻辑控制继电器的结构和功能

可编程逻辑控制继电器将一些典型的继电逻辑控制程序预先存储在内部存储器中，通过用户程序组合、调用可实现逻辑控制和顺序控制功能，可进行算术运算、逻辑运算、模拟量运算、高速运算、高速计数、定时、加/减计数、频率测量和模拟量输出等功能，还有显示参数、仿真运行等功能。可通过本地和远程的输入/输出扩展功能。还可以通过通信接口，AS-i、PROFIBUS、CANopen、DeviceNet 等网络模块，将可编程逻辑控制继电器集成到更高级的自动化系统中。用户程序使用梯形图语言，仅用 4 个编程键即可编辑和输入用户程序，并可通过显示屏观察输入状态。施耐德公司的“Zelio Logic”逻辑控制器的用户程序使用的梯形图语言与“easy”控制继电器类似，而西门子公司的“LOGO!”用功能图语言（功能块）输入程序。还可以通过编程软件在计算机上进行配置、编程和调试。

1.“easy”控制继电器的结构

“easy”控制继电器可采用 EASY-SOFT 软件进行编程和组态，图表编辑器可直接显示需要的电路图图像。通过菜单和“拖放”功能可简单地进行硬件组态和连接。用户程序通过面板采用梯形图或功能图语言编程，要改变控制功能只需改变程序即可，形象直观，简单易懂。在继电逻辑控制系统中，使用“easy”控制继电器可以“以软代硬”替代时间继电器、中间继电器、计数器和接触器等，以简化线路设计，并能完成较复杂的逻辑控制，甚至可以完成传统继电逻辑控制方式无法实现的功能。

“easy”控制继电器的基本型宽度为 72mm，相当于 8 个模数的尺寸，加长型和总线型的宽度相当于 14 个模数宽，可卡装在 35mm 导轨上，不同品牌的基本型产品外形基本相似。“easy”控制继电器基本型的外貌及面板功能布置如图 3-3 所示。

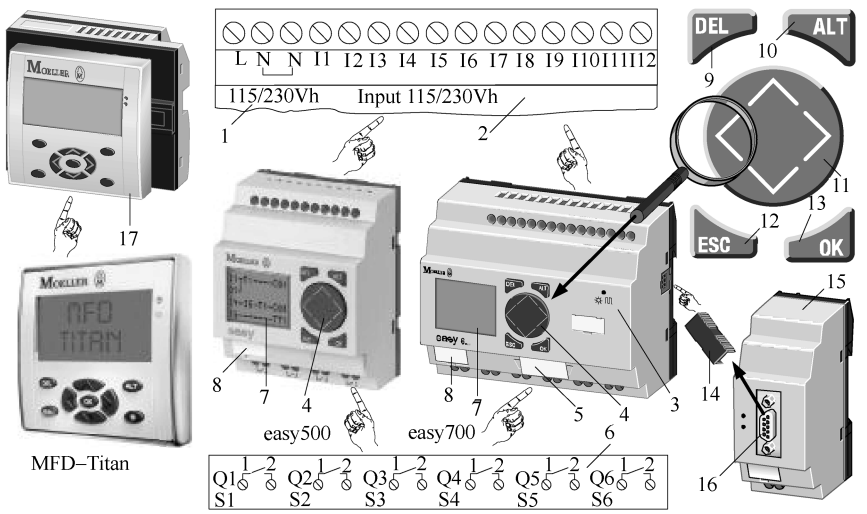


图 3-3　easy 基本型的产品外貌示意图

1—电源输入端子　2—输入端子　3—运行状态指示灯　4—功能按键　5—存储卡和通信接口　6—输出端子　7—LCD 显示屏　8—标签　9—DEL 键，删除电路图上的对象　10—ALT 键，电路图特殊功能　11—光标键，↑、↓、←、→，移动光标、选择菜单条目　12—ESC 键，返回、取消上一个操作　13—OK 键，下一级菜单条目，存储输入　14—easy-Link 连接器　15—PROFIBUS-DP 模块　16—MFD-Titan 电源/CPU + 显示器　17—MFD-Titan 显示器

图 3-3 中，左图为 easy500、右图为 easy700 的产品外貌。easy500/700/800 系列和 MFD-Titan 多功能显示器具有数学运算、逻辑控制、定时和计数、定时开关、PID 控制、操作员和显示、高速计数、频率测量和高速增量式编码器处理、数据存储、通信联网等功能。easy500/700/800 系列和 MFD-Titan 多功能显示器的电源为 AC115/240V 或 DC12/24V。基本型的 DI 通常为 DC12/24V、AC115/240V 输入，DO 通常为 DC12/24V、AC115/240V 晶体管或继电器输出，继电器输出最大电流可达 10A。模拟量输入/输出类型为 0 ~ 10V。高速输入端和可选模拟量输入端仅适应于直流电源型，交流型没有。

easy500 控制继电器有 8 个数字量输入端、4 个继电器输出端，或选择 4 个晶体管输出端，最多可编制 128 行程序，一行最多可排列 3 个触点和 1 个线圈，有 16 个操作和信息文本，可选 2 个模拟量输入端（10 位），2 个 1kHz 高速输入端，最多可处理 12 个 I/O 信号。

easy700 控制继电器有 12 个数字量输入端、6 个继电器输出端，或选择 8 个晶体管输出端，最多可编制 128 行程序，一行最多可排列 3 个触点和 1 个线圈，有 16 个操作和信息文本，可选 4 个模拟量输入端（10 位），2 个 1kHz 高速输入端，1 个 I/O 扩展模块或总线模块，最多可处理 40 个 I/O 信号。

easy800 控制继电器有 12 个数字量输入端、6 个继电器输出端，或选择 8 个晶体管输出端，1 个模拟量输出端，最多可编制 256 行程序，一行最多可排列 4 个触点和 1 个线圈，有 32 个操作和信息文本，可选 4 个模拟量输入端（10 位），4 个 3/5kHz 高速输入端，1 个 I/O 扩展模块或总线模块（以太网、PROFIBUS-DP、AS-i、CANopen 或 DeviceNet 等），利用内置的网络接口 easy-Net 可在设备之间连网，最多 8 个站点，最大通信距离 1000 m，并且，所有站点都可以经 easy-Link 连接器进行本地扩展，最多可处理 320 个 I/O 信号。

MFD（Multi-Function Display）多功能显示器是 HMI 和 easy 控制继电器的组合，由显示/操作模块、电源/CPU 模块和可选的 I/O 模块组成。除具有 easy800 控制继电器相同的功能外，主要是具有全图、背光显示功能，可作为具有显示、操作、编程和参数设置的紧凑型 HMI 控制设备使用。另外，MFD-Titan 还可以经串行通信接口与一台 easy800 或另一台 MFD-Titan 进行点对点通信。MFD-Titan 多功能显示器具有 12 个数字量输入端，4 个继电器输出端，或选择 4 个晶体管输出端，1 个模拟量输出端，最多可编制 256 行程序，一行最多可排列 4 个触点和 1 个线圈，64 × 132 像素全图、背光显示，一帧需 24 KB 内存。可选 4 个模拟量输入端（10 位），4 个 3/5kHz 高速输入端，1 个 I/O 扩展模块或总线模块（以太网、PROFIBUS-DP、AS-i、CANopen 或 DeviceNet 等），设备之间可连网，最多 8 个站点，最大通信距离 1000m。MFD-Titan 多功能显示器适用于较大型控制项目。

2. “easy”控制继电器的功能

以 easy500 控制继电器为例，可编程逻辑控制继电器内部主要有如下可编程器件（软元件），16 个模拟量比较继电器 A1 ~ A16，可以比较 0 ~ 10V 的电压信号，设定值从 0.0 ~ 10.0；通过外接一个 500Ω 电阻，可以连接 4 ~ 20mA（0 ~ 20mA）电流信号；32 个中间继电器 M1 ~ M16、N1 ~ N16，除具有普通继电器功能外，还具有自保持功能、脉冲转换功能和带复位端的锁定继电器功能；16 个时间继电器 T1 ~ T16，可设定为通电延时或断电延时，除具有常规的时间继电器功能外，还具有脉冲闪烁功能。另外有 12 个定时开关，可以设置星期一 ~ 星期日之间的任意时间的开机时间和停机时间，以及年内任意时间；中间继电器和时间继电器的触点可以多次重复使用；16 个计数器 C1 ~ C16，可设定为向上计数或向下计数方式，另外还有 4 个操作小时计数器 O1 ~ O4；8 个输出继电器 Q1 ~ Q8，输出容量 10A（电阻性负载）或 3A（感性负载），可扩展 4 个输出继电器。16 个文本继电器 D1 ~ D16，用于显示线圈和触电的状态等。上述编程器件都有对应的显示符号和触点符号，多数器件都有常开触点和常闭触点符号，符号以数码管字体显示逻辑符号，如输入常开触点显示“I1 ... I8”，输入常闭触点符号显示“Ī”，通常是对应于 easy 控制继电器输入端的按钮开关的常开或常闭触点的输入，也可用于其他开关量的输入；输出触点正逻辑显示“Q”，而反逻辑显示“Q̄”，通常对应于 easy 控制继电器输出端的常开触点，用于连接外部被控制设备，如电灯泡、接触器线圈、阀门等；定时器触点正逻辑显示“T”，而反逻辑显示“T̄”；模拟量比较继电器、计数器、文本继电器和定时开关分别显示A1 ... A16、C1 ... C16、

D1…D16和B1…B4，其他符号显示与此类似。符号“[”和“]”是具有继电器、接触器功能的线圈电路符号的显示符号，输入程序时用于继电器 Q、M、C 或 T 等的前面，如“[M”，表示中间继电器 M 的线圈，其作用中间继电器相同。符号“⌐”是具有脉冲沿转换功能的继电器（带复位端的闩锁继电器）线圈符号，如“⌐Q1”，表示只要输入端“I”输入一个脉冲信号，输出端就可接通并保持，若要输出端断开，只要在输入端再输入一个脉冲即可，其功能相当于自锁功能，由图 3-4 的波形图可见，置位、复位线圈“S，R”的功能与此类似。线圈符号及特性如图 3-4 所示。

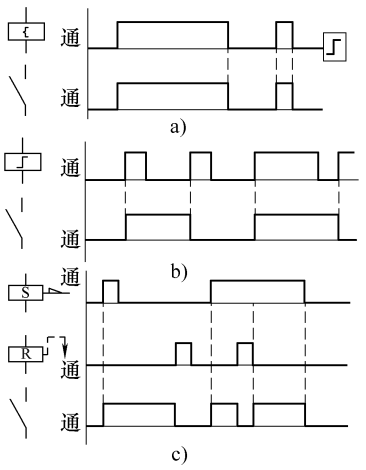


图 3-4　easy 编程元件的线圈符号及特性

a）具有继电器、接触器功能的线圈符号及特性

b）脉冲沿转换继电器的线圈符号及特性

c）带复位端的闩锁继电器的线圈符号及特性

表 3-1 列出了可编程逻辑控制继电器部分常用逻辑功能块图供参考，各品牌产品的逻辑功能块图的符号基本相同，有的略有差别。

表 3-1　控制继电器常用逻辑功能块图

基本逻辑功能	线路功能示意图	编程逻辑符号	基本逻辑功能	线路功能示意图	编程逻辑符号
与，AND		1 2 3 4 & Q	断开延时定时器		Trg R T Q
或，OR		1 2 3 4 ≥1 Q	脉冲继电器		Trg R T Q
与非，NAND		1 2 3 4 ≥1 Q	定时开关		No1 No2 No3 Q
或非，NOR		1 2 3 4 & Q	自保持继电器	S R Q	S R RS Q
反相器，NOR		1 1 Q	随机脉冲输出	Trg Q T T_H T_L	En T Q
异或，XOR		1 2 =1 Q	自保持接通延时定时器	Trg R Q T T	Trg R T Q
接通延时定时器		Trg T R Q	可逆计数器	R Cnt Dir Par Q	R Cnt Dir Par Q

3.2.2　“easy”控制继电器的应用

近年来，“LOGO!”、“easy”等可编程序控制继电器作为控制器在小型自动化控制系统、小型机械和装置、智能建筑、低压配电装置等领域广泛应用。

应用“easy”控制继电器时，只需将所设计的继电逻辑控制图，根据 easy 控制继电器用户手册中规定的适当符号将其变换为相应的梯形图，通过面板上的编程按键输入到 easy 中即可，输入完成后可离线仿真运行，通过显示器可显示出电流的流动状态及工作状态。图 3-5 是一个简单的电动机控制线路的实例，为说明问题只取了其中的一部分。

图 3-5a 是继电逻辑控制线路，图 3-5b 是输入到 easy 中的梯形图，图 3-5c 是接线原理图。梯形图利用了带复位端的锁定继电器功能来实现的，SM1 为中间继电器 M1 自锁线圈，RM1 为其复位线圈，I1、I2 是按钮的输入信号，I3 是限位开关，按钮和限位开关分别接在 easy 的输入控制端子上，接触器与指示灯分别接在 easy 的输出端子上。当按下按钮 SB1（I1），SM1 自锁，若此时限位开关（I3）闭合，输出接点 Q1 得电，则接通接触器的线圈电源，电动机运转；输出接点 Q2 也得电，指示灯亮；停止时，按下按钮 SB2（I2），M1 复原，电动机停转。由图 3-5 可见，其逻辑关系十分明确，简单易懂。需要说明的是，编制的梯形图不是唯一的，亦可利用其他编程元件编制出相同功能的梯形图。一个详细的应用实例见图 5-7 和图 5-8。限于篇幅不再多述，需要时请读者参考产品用户手册。

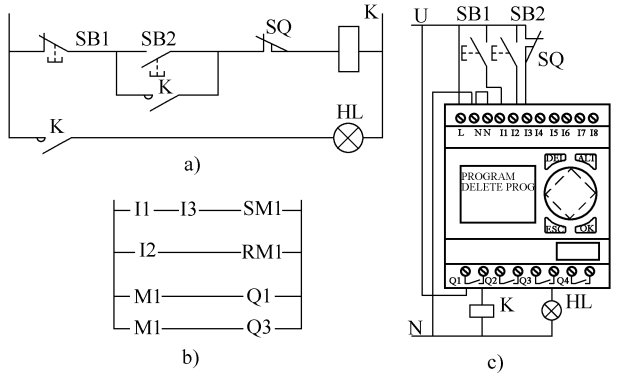


图 3-5　用 easy 控制电动机的示意图

a）三相异步电动机起停电路　b）easy 程序　c）easy 接线图

3.3　可编程序控制器

可编程序控制器简称 PLC，是一种通过专用工程软件进行编程和功能组态，并改变控制策略的一种控制器，也是一种专用于工业环境下的工业计算机。现代 PLC 产品可实现的功能十分强大，如逻辑控制、过程控制、运动控制、数据处理、网络通信等功能。PLC 及 PLC 网络已成为现代工业自动化控制系统中的主要工业控制装置之一，广泛应用于各种工业领域。目前中国市场上的 PLC 品牌很多，有西门子、三菱、欧姆龙、施耐德和 AB 等。本书主要以西门子 S7 系列 PLC 为例，介绍可编程序控制器的基本原理，对于其他品牌也有参考作用。

3.3.1　可编程序控制器的结构

可编程序控制器产品按结构形式可分为装置式和模块化两类：装置式是电源、CPU、存储器、I/O 接口、通信接口、外部接口等都集成在一个机壳内的一体化结构；模块化是电源

模块、CPU 模块、存储器、I/O 模块、通信模块等在结构上相互独立的模块化结构，通过硬件组态可构成 PLC 控制系统。可根据系统规模和设计要求进行配置，模块与模块之间通过外部总线连接。CPU 模块所在的机架通常称为中央机架，其他机架统称为扩展机架。根据安装位置的不同，扩展方式又分为本地扩展和远程扩展。前者要求所有机架都集中安装在一起，一般是通过接口模块实现机架间的连接，机架与机架间的连接距离通常在数米之内；后者一般通过通信电缆实现机架间的连接，连接距离可达几百米到数公里，通过中继器还可以进一步延伸。因此，远程扩展机架也称为分布式 I/O 站点。可编程序控制器的硬件结构大体有如下部分组成。

（1）电源。PLC 的电源用于为各模块提供工作电源。电源输入类型有：交流电源（AC220V 或 AC110V），直流电源（DC24V），同时，还为输入电路提供一个直流 24V 输出工作电源。

（2）CPU。CPU 是 PLC 的控制中枢，通常 CPU 模块上集成了存储器和通信接口，有的还有装载存储器（用户程序存储器）插槽。存储器的容量随 PLC 型号的不同有较大的差别，选型时需要选择存储器容量及其可扩展能力。

（3）I/O 模块。I/O 模块也称信号模块，用于将控制器与现场设备连接。PLC 的 I/O 模块大体可分为数字量模块、模拟量模块、通信模块和功能模块等 4 大类。数字量输入（DI）、数字量输出（DO）、模拟量输入（AI）和模拟量输出（AO）是 PLC 最常用的 I/O 模块。通信模块种类很多，如以太网通信模块、串行通信模块（RS232、RS485）、现场总线模块（PROFIBUS-DP 等）。功能模块有时也称为工艺模块、智能模块等，包括高速计数模块、运动控制模块、定位控制、PID 控制模块等。功能模块通常是一个独立系统，具有 CPU、存储器、I/O 接口、通信接口等。功能模块一般不参与 PLC 的循环扫描过程，而是在 CPU 模块的协调管理下，按照自身的应用程序独立地参与系统工作，完成一些特殊功能。一个 PLC 控制系统的模块数量取决于系统的实际控制规模，由用户根据需要进行组态。图 3-6 是西门子 SIMATIC S7-200/300/1200 系列 PLC 在一个机架上可组态模块的数量示意图。

由图 3-6 可见，SIMATIC S7-200 系列 PLC 的所有模块均安装在 CPU 的右侧，最多可扩展 7 个模块；SIMATIC S7-1200 系列 PLC 的通信模块需要安装在 CPU 的左侧，信号模块则安装在右侧，总共可扩展 11 个模块。而 SIMATIC S7-300 系列 PLC 需要在 CPU 左侧配置一个电源模块，所有信号模块和通信模块均安装在 CPU 的右侧，主机架最多可扩展 8 个模块。另外，最多可再扩展 3 个机架，每个机架最多可扩展 8 个模块。

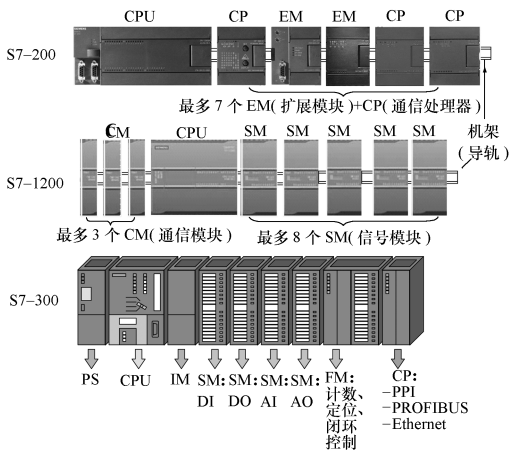


图 3-6 S7-200/300/1200 系列 PLC 可组态模块示意图

（4）通信接口。PLC 的集成通信接口一般是 RS232 或 RS485，有些品牌的 PLC 集成不同协议的通信接口，如西门子公司的 S7 系列 PLC 集成 MPI 多点通信接口、现场总线 PROFIBUS-DP 接口和工业以太网 PROFINET 接口。通过这些接口可实现各种网络拓扑，

与各种设备连接及网络通信。并可与第三方设备进行通信。使得编程过程、调试过程、可编程序控制器和人机界面的操作和运行均可在同一网络下进行。

（5）编程工具。编程工具的作用是进行硬件组态、编制和调试 PLC 的用户程序、设置 PLC 系统的运行环境、在线监视或修改运行状态和参数。目前一些品牌的微小型 PLC 一般配有手持型编程器，但多数是采用计算机（运行专用编程软件）作为编程器。

3.3.2　可编程序控制器的工作原理

当 PLC 投入运行后，其工作过程可分为输入采样刷新、用户程序执行和输出刷新三个阶段。在 PLC 的整个运行期间，CPU 以一定的扫描速度循环执行这三个阶段。完成这三个阶段的过程称作一个扫描周期。因此，PLC 的运行方式为循环扫描运行方式。这是 PLC 与个人计算机的重要区别之一，计算机是中断运行方式。

当 PLC 上电后，CPU 先进行自检和初始化，然后 CPU 按照 PLC 系统程序赋予的功能接收并存储用户程序和数据。PLC 运行时，以循环扫描方式接收现场各输入装置的状态和数据，并分别寄存到输入映像区，然后从装载存储器中逐条读取用户程序，经过指令解释后，按指令功能执行逻辑或运算，并将结果送入输出映像区或数据寄存器内。在用户程序的一个循环扫描周期执行完毕后，将输出映像区或数据寄存器内的各输出状态或数据传送到相应的输出通道上，如此循环运行，直到停止运行。为了进一步提高 PLC 的可靠性，大型 PLC 系统还采用双 CPU 构成冗余系统，或采用三 CPU 的表决式系统。这样，即使某个 CPU 出现故障，整个系统仍能正常运行。CPU 的运行速度、存储器容量和用户程序的规模是 PLC 的重要参数，它们决定着 PLC 的工作速度，选型时应注意。PLC 的循环扫描工作过程如图 3-7 所示。

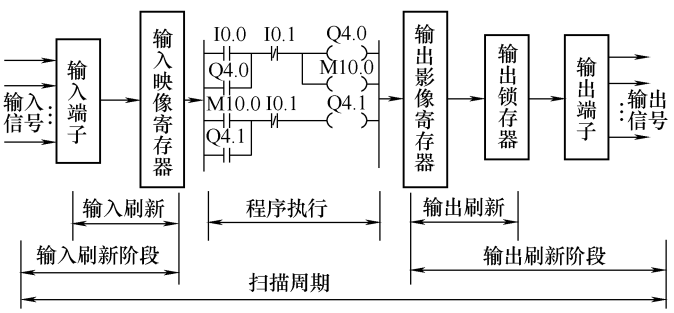


图 3-7　PLC 的循环扫描工作过程

图 3-7 中，输入/输出接线端是 PLC 与外部的开关和传感器触点信号、输出触点等连接的端口。端口的驱动电源可由 PLC 的电源组件提供（如直流 24V），也可用外接电源（如交流 220V）供给。输入继电器（I），图中的 I0.0，是一个外部开关状态的映像。同样，输出继电器（Q），图中的 Q4.0，是一个输出状态的映像。用户程序中的一个输入继电器（I）和输出继电器（Q）等，实际上是对应于 PLC 的输入/输出端的一个输入触点/输出线圈及其对应的逻辑状态，它以“逻辑位”状态形式实现常开触点、常闭触点和线圈的状态转换，供 PLC 内部实现逻辑运算时使用。用户程序实际上是 PLC 内部实现逻辑运算的逻辑控制图。用户程序是用户根据控制要求编制的控制程序或逻辑控制图。在用户程序执行的周期中，CPU 对各个过程输入信号进行采样、运算和处理。在这个执行周期中，一些输入变量可能

有变化，而有些可能没有发生变化。相应地，有些输出变量有变化，有些没有变化，通过循环扫描的方式，可不断地对输入和输出变量进行采样和输出，使得在变量满足程序条件时能及时处理，并有相应的输出状态变化，前面执行的任务结果，马上就可被后面将要执行的任务所用，并通过设定的监视定时器 WDT（WatchDog Timer）监视每个扫描周期的时间是否超过规定值，避免某个任务进入死循环而引起的故障。这就是可编程序控制器循环扫描方式的特点，其优越性在于简化了程序结构，提高了程序执行的可靠性。

3.3.3 可编程序控制器的编程语言

可编程序控制器的基本编程语言均采用符合 IEC61131-3 国际标准的编程语言，其中描述了可编程序控制器的 3 种图形化编程语言和 2 种文本编程语言。图形化编程语言包括梯形图（Ladder Diagram，LD）、顺序功能图表（Sequential Function Chart，SFC）和功能块图（Function Block Diagram，FBD）；文本编程语言包括指令表（Instruction List，IL）和结构文本（Structured Text，ST），如图 3-8 所示。

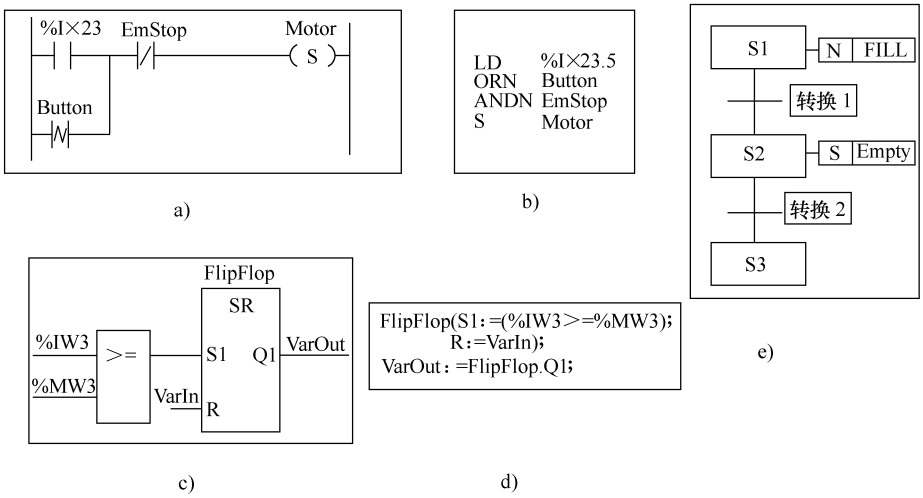


图 3-8 种编程语言的示意图

a）LD b）IL c）FBD d）ST e）SFC

梯形图（LD）语言和指令表（IL）语言是各品牌 PLC 的第一编程语言，也是基本的编程语言。梯形图（LD）语言的指令语法类似于继电逻辑控制线路，允许在能流流过各种触点、指令盒和输出线圈时，跟踪母线之间的能流量。指令表（IL）语言也称为语句表（STL）语言，指令结构与汇编语言的助记符语言相似。功能块图（FBD）语言的指令语法使用图形化方式实现逻辑功能，类似于数字电子技术中的逻辑图，图形符号也非常相似，功能块用布尔逻辑框（指令盒）形式表示。结构化文本（ST）语言用结构化语句描述程序，在语法上类似于 PASCAL 语言，适用于公式计算、复杂的优化算法或管理大量的数据等，一般用于具有复杂计算的大型复杂控制场合。

3.3.4 西门子 SIMATIC S7 PLC 简介

目前，西门子公司的可编程序控制器系列型谱依次为 SIMATIC S7-400、SIMATIC S7-300、SIMATIC S7-1200、SIMATIC S7-200，以及逻辑模块 LOGO!，如图 3-9 所示。

从应用角度看，SIMATIC S7-1200 系列 PLC 和 SIMATIC S7-200 系列 PLC 同属小型自动化系统应用领域范畴，从性能特点看，SIMATIC S7-1200 系列 PLC 吸纳了 SIMATIC S7-300 系列 PLC 和 SIMATIC S7-200 系列 PLC 的一些特点，并融合了 SIMATIC HMI 精简系列面板技术，使 SIMATIC S7-1200 系列 PLC、人机界面和工程组态软件无缝整合和协调，以满足小型独立离散自动化系统对结构紧凑、能处理复杂自动化任务的需求。



图 3-9　西门子可编程序控制器系列型谱

1. SIMATIC S7-200PLC

SIMATIC S7-200 具有 6 种型号的 CPU，可用于不同的场合。CPU 226 和 226XM 是功能最强，可满足一些小型复杂控制系统的要求。S7-200PLC 的最小配置为 8DI/6DO，可扩展 2 ~7 个模块，最大 I/O 点数为 64 DI/DO、12 AI/4 AO。每种型号的 CPU 均带有 RS485 通信接口，支持 PPI、MPI 通信协议和自由口通信方式。通过 EM277 PROFIBUS-DP 扩展模块，可将 S7-200CPU 连接到 PROFIBUS-DP 网络。SIMATIC S7-200 采用 STEP 7-Micro/ Win 软件包进行编程和组态，最新版本 STEP7 Micro/WINV4. 0SP8 的安装运行环境为 Windows 2000 SP3 以上、Windows XP Home 和 Windows XP Professional。SIMATIC S7-200 系列 PLC 的最小应用系统如图 3-10 所示。

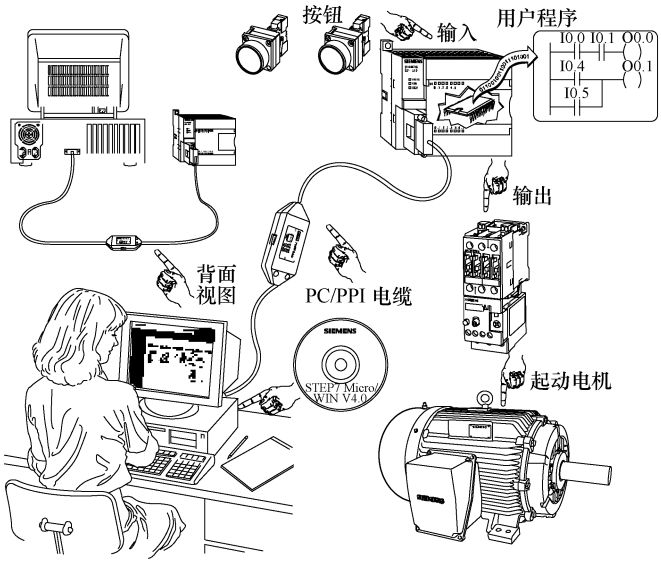


图 3-10　SIMATIC S7-200 系列 PLC 的最小应用系统示意图

图 3-10 所示的系统通过 PC/PPI 电缆将计算机与 S7-200 系列 PLC 连接，S7-200 系列 PLC 内部集成的 PPI 接口的物理特性为 RS485 串行接口，插口为 9 针 D 型。在进行调试时，将 S7-200 与接入网络时，该端口一般作为端口 1 出现。通过 PC/PPI 电缆上的 DIP 开关选择波特率。PPI 通信协议是 S7-200 系列 PLC 的专用通信协议，可通过普通的两芯屏蔽双绞电

缆进行连网，波特率为 9.6kbit/s、19.2kbit/s 和 187.5kbit/s。在运行 WindowsXP 操作系统的个人计算机（PC）上安装编程软件后，PC 作为通信中的主站运行。S7-200 的语句表手持编程设备是 PG702。

2. SIMATIC S71200PLC

SIMATIC S7-1200 PLC 是继 SIMATIC S7-200PLC 的后续新产品，于 2009 年 6 月发布使用。SIMATIC S7-1200PLC 主要由 CPU 模块、通信模块（CM）、信号模块（SM）和信号板（SB）及各种附件组成。可根据具体需要选用带有 8、16 和 32 个 I/O 通道的模块。模块安装在 DIN 标准导轨上，通过总线连接器与相邻的 CPU 和其他模块连接。如果只需要少数输入/输出的情况下，可以使用信号板（SB）。通过信号板可以对 S7-1200 CPU 进行扩展，而不增加所需安装空间。通过 S7-1200CPU 集成的 PROFINET 接口可直接与编程器 PG、精简系列面板或其他第三方设备相连。还可使用 RS485 或 RS232 通信模块进行点对点通信。SIMATIC S7-1200 系列 PLC 系统的基本结构如图 3-11 所示。

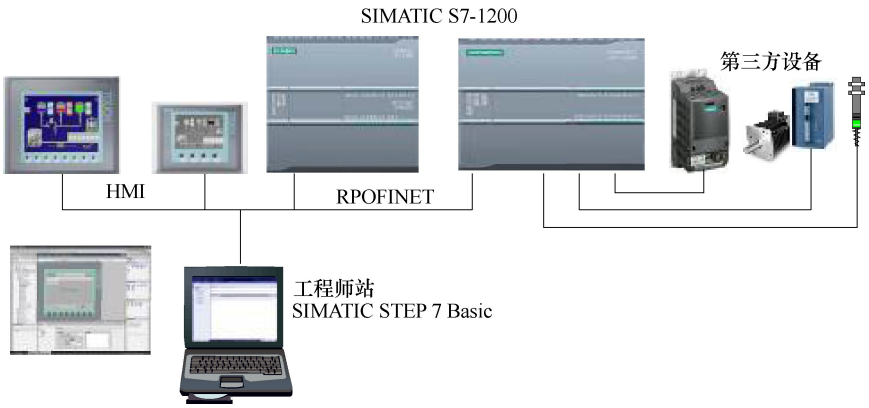


图 3-11　SIMATIC S7-1200 系列 PLC 系统结构示意图

SIMATIC S7-1200 PLC 系统采用 SIMATIC STEP 7 Basic Totally Integrated Automation Portal V10.5（简称 SIMATIC STEP 7 Basic V10.5 或 TIA Portal V10.5）工程组态软件进行组态和编程。SIMATIC STEP 7 Basic V10.5 中包含了可视化视窗中心 SIMATIC WinCC Basic V10.5，从而可实现过程可视化，即可以使用 TIA Portal 在同一个工程组态系统中组态 SIMATIC S7-1200 PLC 和 SIMATIC HMI 精简系列面板，统一编程、统一配置硬件和网络、统一管理项目数据，以及对已组态系统测试、试运行和维护等，并且所有项目数据均存储在一个公共的项目文件中，修改后的应用程序数据（如变量）会在整个项目内（甚至跨越多台设备）自动更新。STEP 7 Basic V10.5 和 WinCC Basic V10.5 的组件不是相互独立的，而是可以相互统一访问公共数据库，可以使用一个公共用户界面来访问所有的编程和可视化功能。

SIMATIC S7-1200 系列 PLC 通过集成 PROFINET 接口与 SIMATIC HMI 精简系列面板无缝集成，两者间通过 PROFINET 接口直接进行物理连接，集中定义。在同一个项目中组态和编程，人机界面可以直接使用 S7-1200 系列 PLC 的变量。从应用方面看，SIMATIC HMI 精简系列面板处于现场操作和控制的核心位置，根据需要可完成控制系统上层的现场操作和管理，并可上传控制数据。如果在不同 PLC 的多个块中及 HMI 画面中使用了过程变量，则可以在程序中的任意位置创建或修改该变量。项目中的变量可以在 PLC 变量表中定义，也可以在 HMI 编辑器中定义，还可以通过 PLC 输入和输出的链接来定义。所有已定义的 PLC 变量都

列在 PLC 变量表中，并可在表中进行编辑。

SIMATIC S7-1200 系列 PLC 的程序块类型与 SIMATIC S7-300 系列 PLC 相同，程序编辑方法也相同。

3. SIMATIC S7-300PLC

SIMATIC S7-300 是一种模块化 PLC 系统，根据需要可将各种功能模块组合和扩展，以构成不同要求的系统和控制网络，指令运算速度可达到 0.6 ~ 0.1μs；采用浮点数运算实现更为复杂的算术运算；在 S7-300 操作系统内集成了人机界面（HMI）服务功能，具备强大的通信功能，可通过工程工具 STEP 7 的用户界面的通信组态功能进行组态，并可通过多种通信处理器连接 PROFIBUS-DP、AS-i 现场总线和工业以太网；多点接口（MPI）集成在 CPU 中，用于同时连接编程器、PC、人机界面及其他 SIMATIC S7/M7/C7 等自动化控制系统。

SIMATIC S7-300PLC 系统由中央处理单元 CPU、用于数字量和模拟量输入/输出的信号模块 SM、用于执行特殊功能，如计数、定位、闭环控制等的功能模块 FM、用于连接网络和点对点连接的通信处理器 CP、用于将 SIMATIC S7-300 连接到 120/230V AC 电源的电源模块 PS、用于多机架配置时连接主机架 CR 和扩展机架 ER 的接口模块 IM 和占位模块 DM、导轨 Rack 等组成。接口模块 IM 可用来进行多层组态，把总线从一层传到另一层；占位模块 DM 是为没有设置参数的信号模块保留一个插槽或为以后安装接口模块保留的插槽。S7-300 可通过 MPI 接口直接与编程器 PG、操作员面板 OP 和其他 S7 PLC 相连。S7-300PLC 的结构自左到右分别是 0、1、2、3、4、…槽位。槽 1 ~ 槽 3 固定分配，其中，槽 1 插入 PS（电源），槽 2 插入 CPU，槽 3 插入 IM，槽 4 ~ 槽 11 自由分配，SM、FM、CP 可以插入这 8 个槽中的任何一个。S7-300 采用背块总线的方式将各模块从物理上和电气上连接起来，只需简单地将模块钩在 DIN 标准的安装导轨上，转动到位，然后用螺栓锁紧。导轨是 S7-300PLC 的机架。如果系统任务需要多于 8 个信号模块或通信处理器模块时，可以多机架扩展，除了电源模块、CPU 模块和接口模块外，一个机架上最多可再安装 8 个信号模块或功能模块。每个机架上都有它自己的接口模块。它总是插在 CPU 旁边的槽内，负责与其他扩展机架自动地进行通信。S7-300 系列 PLC 基于槽位的编址是由安装机架号和模块槽位组成，机架（Rack）号 0 ~ 3；槽位（Slot）4 ~ 11。所有模块可采用默认地址，也可自行分配地址，通过 STEP7 软件进行用户自定义地址分配。

SIMATIC S7-300 的中央处理单元 CPU 模块有标准型、紧凑型（C）、技术型（T）和故障安全型（F），以及用于恶劣环境条件下（SIPLUS CPU）的标准型、紧凑型（C）故障安全型（F）等多种型号。用于恶劣环境条件下的 CPU 允许安装于环境温度范围 -25℃ ~ +70℃,运行于有害的气体环境。如果按照 CPU 的装载存储器来分类，分为标准型 S7-300 CPU、新型 S7-300 CPU 和带内置 FEPROM 的 S7300 CPU。标准型 S7-300 CPU 指的是不使用微型存储卡 MMC（Micro Memory Card）的 S7-300 PLC，也称为老式的 S7- 300 CPU。MMC 卡是一种 FEPROM 卡，用于新型 S7-300CPU，包括紧凑型 CPU 和由标准型更新的新型 CPU。除了 CPU318- 2DP 外，其他产品已被淘汰。标准型 S7-300 含有内置的 RAM 装载存储器，并可以使用 FEPROM 卡来扩充装载存储器。只有 CPU 318-2DP 可以使用 RAM 卡来扩充装载存储器。CPU 与 MMC 卡是分开订货的。

各种新型 S7-CPU 的性能各不同，但共同的特点是集成接口，CPU 运行时需要微存储器

卡 MMC。信号模块（SM）也称输入/输出 I/O 模块，是 CPU 模块与现场 I/O 元件和设备连接的桥梁，可根据现场 I/O 设备选择各种用途的 I/O 模块。S7-300 的 I/O 模块外部连线接在插入式的前连接器的端子上，前连接器插在前盖后面的凹槽内。不需断开前连接器上的外部连线，就可更换模块。信号模块面块上的 LED 用来显示各数字量输入/输出点的信号状态，模块安装在 DIN 标准导轨上，通过总线连接器与相邻的模块连接。信号模块和接口模块的尺寸为 40mm（宽）×125mm（高）×120mm（深）。有少量模块的宽度为 80mm。信号模块 SM3xx/SIPLUS SM3xx/SM3xxF 用于数字量和模拟量输入/输出，通过数字量输入/输出模块，可将数字传感器和执行元件与 S7-300 相连。通过模拟量输入/输出模块可将模拟传感器和执行元件与 S7-300 相连。

SIMATIC S7-300 的硬件组态参数设置、通信定义和编程等需要使用 SIMATIC STEP 7 标准软件包，其中包含具有不同用途的多种版本，如 STEP 7 Professional V5. x SP3 等。编程工具除采用计算机配以 STEP 7 软件包，并加 MPI 卡或 MPI 编程电缆构成，也可以采用专用编程器，如 PG720、PG740、PG760 等。PG720 是工业级的编程设备；PG740 是一种便携式编程设备；PG760 是多功能桌面编程设备，可以用于在办公室进行组态和编程。

SIMATIC S7-300 通信网络包括工业以太网、PROFINET、PROFIBUS 和 AS-i，使用 STEP7 软件进行通信组态。

4. SIMATIC S7-400PLC

SIMATIC S7-400 PLC 是一种大型 PLC 系统。包括标准 S7-400 系统、S7-400H 硬件冗余系统和 S7-400F/FH 故障安全型系统。具有很高的电磁兼容性和抗冲击、耐振动性能，模块能带电插拔，能最大限度的满足各种工业标准，适用于中、高档性能范围的可编程序控制器。

S7-400PLC 采用模块化设计，无风扇的设计，可以选用多种级别的 CPU，并可配多种通用功能的模块，根据需要组合成不同的专用系统。S7-400PLC 的 CPU 分为各种不同的功能分级，各级标准 CPU 之间的唯一区别是性能范围，如 RAM 容量、地址范围、可以连接的模块数量以及指令处理时间。几个 CPU 可以组合在一起运行，形成多 CPU 的结构，控制、计算或通信可分离并分配给不同的 CPU，每个 CPU 可赋予其本地 I/O。除了专用的 S7-400 模块外，S7-400 还可通过集成的 PROFIBUS-DP 接口对 PROFIBUS 网络进行访问。

S7-400/400H/400F/FH 系统由中央处理单元 CPU、信号模块 SM、功能模块 FM、通信处理器 CP、负载电源模块 PS、接口模块 IM、SIMATIC S5 模块和占位模块 DM 等组成。中央控制器最多可连接 21 个扩展单元（EU），可以通过接口模块连接、集中式扩展、用 EU 进行分布式扩展和用 ET200 进行远程扩展方式，以实现分布式控制系统。S7-400 允许将 IT 技术集成到自动化系统内。使用插入式 CP443-1/T®通信处理器可用 HTML 工具建立用户自己的 Web 网页，用于 S7-400 的过程变量可以方便地分配给 HTML 对象，使用浏览器可监控 S7-400；通过功能调用从 S7-400 的用户程序发送电子邮件；可使用 TCP/IP 的 WAN 属性，通过电话线网络远距离进行编程。SIMATIC S7-400 通信网络包括工业以太网、MPI、PROFIBUS、AS-i 和 EIB 等。SIMATIC S7-400 总计可以连接 125 个 MPI 站，传输速率可达 12Mbit/s，以便在各个控制器之间交换过程数据，或实现 HMI 功能，而无须任何编程。

S7-400/400H/400F/FH 系统有多种型式的机架，可使用 18 或 9 槽的机架，通过接口模块最多可连接 21 个扩展单元。每个扩展单元具有用于插入 S7-400 模块的 18 个槽位或 9 个

槽位。S7-400 系统既可以通过 PROFIBUS DP 扩展，也可以将更多的扩展机架连接到中央机架上。最大的扩展距离达 600m。如通过通用框架 UR1 或中央机架 CR2 可连接 18 个模块，扩展机架 ER1 可以扩展 18 个模块，背块总线也在模块内集成，各种单独的模块之间可任意组合，信号模块和通信处理模块可以不受限制地插到任何一个槽上，系统自行组态。S7-400 采用背块总线的方式将各模块从物理上和电气上连接起来，全部模块统一使用 48 针前连接器连接，前连接器机械自锁定连接，模块无插槽规则限制。

3.3.5　西门子 TIA 博途（TIA Portal）软件平台

西门子公司 2010 年 11 月 23 日发布了全集成自动化软件“TIA 博途”（TIA Portal），它是一种集成了 SIMATIC STEP7、SIMATIC WinCC 和 SINAMICS StartDrive 等软件，采用统一工程组态和项目软件环境的一种图形化工程设计软件平台。2011 年 4 月西门子公司宣布基于 TIA Portal 平台的 SIMATIC STEP 7 V11 工程组态软件和 SIMATIC WinCC V11 软件产品开始供货。

1. TIA 博途的概念

TIA 博途的概念是先前“全集成自动化”接口（Totally Integrated Automation Portal）概念的延伸和发展。“全集成自动化”接口的含义是在一个应用软件中集成了各种 SIMATIC 产品，是一个统一的工程组态系统，具有公共数据管理、处理程序、组态数据和可视化数据、拖放操作和编辑、数据加载、可视化组态和诊断等特点，利用它创建自动化工程项目可大幅度提高效率。

TIA 博途将所有 SIMATIC 自动化软件工具集成在一个统一软件框架和开发环境中，从而在同一开发环境中可统一组态、编辑和调试所有的 PLC、人机界面和驱动装置，并具有“全集成自动化”接口的所有特性。

2. TIA 博途的功能和特点

TIA 博途的功能包括 PLC 编程、工艺编程、驱动器编程、人机界面编程、网络配置、在线和诊断等。无论是硬件组态、用户程序编辑、还是人机界面设计，其编辑器应用环境是相同的，所有的功能、属性和库均可根据所需的操作直观显示。由于 TIA 博途中的所有工程组态流程都是面向对象的，所以项目中的所有程序块和相应的信号模块均可在结构化库内进行管理。

基于 TIA 博途平台的 SIMATIC STEP 7 V11 工程组态软件，支持 SIMATIC S7-1200/S7-300/S7-400 系列 PLC、基于 PC 的 SIMATIC WinAC 自动化系统。具有很强的“可扩展性”及向上兼容性，支持集成功能和开放功能，如果需要产品升级，已有项目可方便地传送和集成至新产品的下一级别。

基于 TIA 博途平台的 SIMATIC WinCC V11 可视化组态软件，支持所有设备级人机界面操作面板，包括精简系列面板、SIMATIC 面板、SIMATIC 精制面板、SIMATIC 多功能面板和移动式面板，也支持基于 PC 的 SCADA（数据采集与监视）过程可视化系统。

3. TIA 博途软件平台的产品结构

TIA 博途（TIA Portal）软件平台产品包括 SIMATIC STEP 7 V11 和 SIMATIC WinCC V11 两大类软件产品。SIMATIC STEP 7 V11 工程组态软件有 STEP 7 Basic V11 和 STEP 7 Professional V11 两种版本，具体使用哪个版本取决于可组态的可编程序控制器系列。STEP 7 Basic

V11 用于组态 S7-1200PLC，其中包括 WinCC Basic V11。STEP 7 Professional V11 用于组态 S7-1200、S7-300/400 和 WinAC，其中包括 WinCC Basic V11。对于对安全性有较高要求的应用场合，可以使用 STEP 7 安全选件对 STEP 7 Professional V11 进行扩展，以便为 F-CPU 组态故障安全 PLC 组态。

SIMATIC WinCC V11 是使用 WinCC Runtime Advanced 或 WinCC Runtime Professional 可视化组态软件的工程组态软件，其中包括可组态 SIMATIC 面板、SIMATIC 工业 PC 及标准 PC 的组态软件。

SIMATIC WinCC V11 有 4 种版本，具体使用哪个版本取决于可组态的操作员控制系统。STEP 7 Basic V11 包含在 STEP 7 Basic 和 STEP 7 Professional 中，用于组态精简系列面板。SIMATIC WinCC Comfort V11 用于组态所有面板。SIMATIC WinCC Advanced V11 用于通过 WinCC Runtime Advanced 可视化软件组态所有面板和 PC。WinCC Runtime Advanced V11 是用于基于 PC 单站系统的可视化软件，可以购买带有 128、512、2K、4K 及 8K 个外部变量（带有过程接口的变量）许可的 WinCC Runtime Advanced。SIMATIC WinCC Professional V11 用于使用 WinCC Runtime Advanced 或 WinCC Runtime Professional 组态面板和 PC。WinCC Runtime Professional V11 是一种用于构建组态范围从单站系统到多站系统（包括标准客户端或 Web 客户端）的数据采集与监视（SCADA）系统。可以购买带有 128、512、2K、4K、8K、64K、100K、150K 及 256K 个外部变量（带有过程接口的变量）许可的 WinCC Runtime Professional。

通过 SIMATIC WinCC V11 还可以使用 WinCC Runtime Advanced 或 WinCC Runtime Professional 组态 SINUMERIK PC，以及使用 SINUMERIK HMI Pro sl RT 或 SINUMERIK Operate WinCC RT Basic 组态 HMI 设备。

TIA 博途软件平台产品的类型如图 3-12 所示。

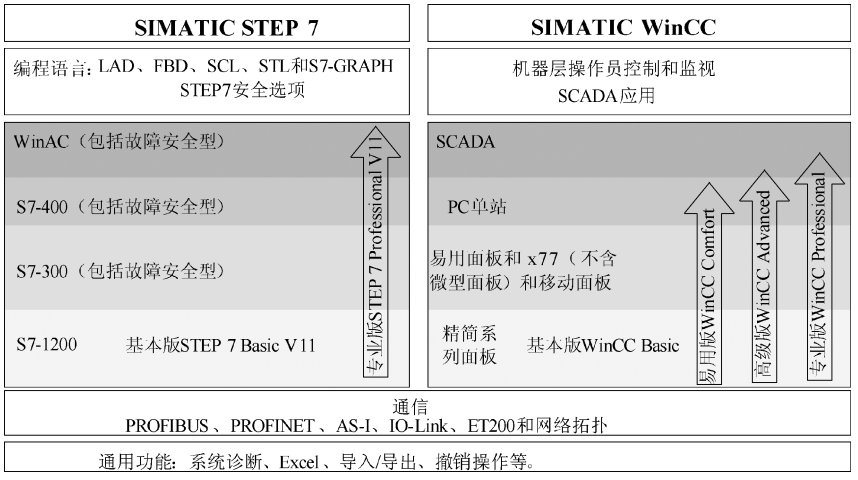


图 3-12　TIA 博途软件平台产品的类型

4. SIMATIC STEP 7 V11 和 SIMATIC WinCC V11 的操作视图

SIMATIC STEP 7 V11 和 SIMATIC WinCC V11 有两个面向任务的工具视图，Portal 视图和项目视图。通过这两个视图可以快速确定要执行什么操作并为当前任务调用工具。在这两个视图下，有硬件组态、用户程序编辑、网络组态和可视化设计和编辑 4 个主要窗口，每个窗

口下有不同的选项，如硬件组态有 PLC 组态、PC 站组态和 HMI 面板组态三个选项，通过这些选项的操作，就可逐步完成工程项目的设计、组态、编程和可视化任务。以下是对这些视图、窗口和选项的简单介绍，也是入门级的简单操作步骤。

（1）Portal 视图

Portal 视图用于选择不同任务的登录选项和所选登录选项对应的操作，Portal 视图和项目视图界面会针对所选任务自动切换。图 3-13 是 Portal 视图的结构。



图 3-13　Portal 视图

图 3-13 中，登录选项①为各个任务区提供基本功能。在 Portal 视图中提供的登录选项取决于所安装的产品。所选登录选项对应的操作②提供在所选登录选项中可使用的操作。可以使用“项目视图”链接④切换到项目视图。当前打开的项目的显示区域⑤显示当前打开的是哪个项目。所选操作的选择面板③的内容取决于您当前的选择。图中所示是选择了“新手上路”选项，这时面板显示设备组态、创建 PLC 程序和组态 HMI 画面三种项目任务的基本操作。

如果选择“设备组态”，并进一步选择“添加新设备”的 Portal 视图如图 3-14 所示。

在图 3-14“添加新设备”的 Portal 视图中可以选择 PLC、HMI 和 PC 系统选项进一步进行项目硬件组态。如选择“PLC”组态，如图 3-15 所示。

（2）项目视图与硬件组态窗口

项目视图是项目所有组件的结构化视图。图 3-16 是项目视图的结构。点击图 3-15 所示“PLC”组态 Portal 视图的右下角“添加”按钮，则进入“设备组态”的项目视图，如图 3-16 所示。

标题栏、菜单栏、工具栏的含义与操作与 Windows 窗口相同。使用项目树②的功能可以



图 3-14 “添加新设备”的 Portal 视图



图 3-15 “PLC”组态 Portal 视图例

访问所有组件和项目数据。可在项目树中执行添加新组件、编辑现有组件、扫描和修改现有



图 3-16　“PLC”组态项目视图

组件的属性等任务。工作区③的上半部分是硬件和网络编辑器，是一个集成开发环境，用于对设备和模块进行组态、连网和参数分配，显示为进行编辑而打开的对象。这些对象包括编辑器和视图、表格等（在工作区下部）。可以打开若干个对象。但通常每次在工作区中只能看到其中一个对象。在硬件和网络编辑器栏中，所有其他对象均显示为选项卡。如果在执行某些任务时要同时查看两个对象，则可以水平或垂直方式平铺工作区，或浮动停靠工作区的元素。如果没有打开任何对象，则工作区是空的。图 3-16 是打开所组态的 PLC_1 时的组态视图示例。使用“硬件目录”⑥可以根据需要选择所需模块进行硬件组态。在详细视图④中将显示总览窗口或项目树中所选对象的特定内容，其中可以包含文本列表或变量，但不显示文件夹的内容。要显示文件夹的内容，可使用项目树或巡视窗口⑤。有关所选对象或所执行操作的附加信息均显示在巡视窗口中。总览窗口是对项目树的补充，其中将显示项目树中当前所选文件夹的内容。此外，可以在总览窗口中打开对象、在巡视窗口中显示和编辑对象的属性、重命名对象、从快捷菜单中调用对象特定的操作、并排比较对象、执行各种对象操作，如通过拖放操作从库中插入对象，以及移动、复制、粘贴和删除对象等操作。

在组态自动化系统时需要对各硬件组件进行组态、分配参数和互连。在设备和网络视图中执行这些操作。“组态”是指在设备或网络视图中对设备和模块进行布置、设置和联网。机架用符号表示，这和“实际的”机架一样，可以在其上插入规定数量的模块，如 S7-

300PLC 最多可在一个机架上插入 11 个模块，插入模块后将自动给各模块分配一个地址，这些地址可以随后进行修改。“分配参数”是指设置所用组件的属性，包括具有可选参数模块的属性和组件间数据交换的设置。这些参数将加载到 CPU 并在 CPU 启动期间传送给相应的模块。因为设置的参数在启动期间自动加载到新的模块。在很多情况下，模块的属性是预设的，一般无须再次对其进行参数化。但想要更改模块的默认参数设置、使用特殊功能、组态通信连接时需要进行参数分配。

工作区③的上半部分包含设备视图、网络视图和拓扑视图三种不同的视图。可以根据需要在这三个视图间切换操作。在设备视图中可执行硬件组态和设备参数分配、组态和分配模块参数任务操作；在网络视图中可执行设备间组网、网络组态和设备参数分配任务操作；在拓扑视图中可显示以太网拓扑、组态以太网拓扑等。图 3-17 是网络组态视图示例。

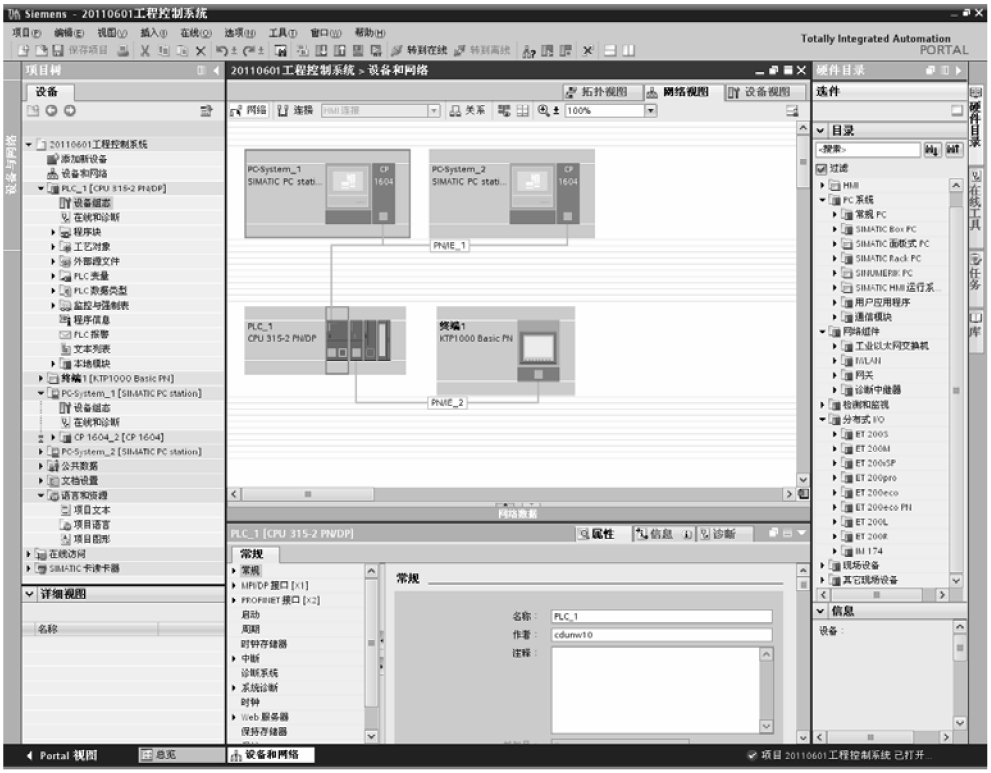


图 3-17　网络组态视图示例

（3）程序编辑窗口

如果在图 3-13 中选择“创建 PLC 程序”选项，则进入“添加新块”的 Portal 视图，如图 3-18 所示。

从图 3-18 可见，新块选项包括组织块（OB）、函数块（FB）、函数（FC）和数据块（DB），函数块（FB）和函数（FC）也称为功能块（FB）、功能（FC），这些块就是用户程序中的块，也就是说，用户程序是由各种程序块组成的。根据用户程序结构可选择添加若干个程序块，然后进入程序编辑器窗口对每一个块进行编程。在设备组态后，系统会自动为每个设备生成一个程序循环组织块 OB1（主程序），并将其插入到“程序块”文件夹中。如，选择函数块（FB）选项，然后点击图 3-18 右下角的“创建”按钮，则进入如图 3-19 所示的



图 3-18　“添加新块”的 Portal 视图

项目视图的程序编辑窗口，然后编辑所需的程序段。

从图 3-19 可见，程序编辑窗口是程序编辑器的工作区。中间上半部是块接口，块接口包含只能在块中使用的局部变量的声明，显示的内容取决于块类型。中央部分是程序段编辑区，用于输入程序代码。中下部是巡视窗口，用于显示所选对象或所执行操作的附加信息。右边部分是指令目录，包括基本指令、扩展指令、工艺指令和通信指令 4 大类。程序段编辑时所需要的程序代码从这里选择并点击输入。有关程序代码的使用详见第 6 章。

（4）可视化编辑窗口

如果在图 3-13 中选择“组态 HMI 画面”选项，并根据需要点击选择的 HMI 设备，则进入“HMI 设备向导”窗口，在这个窗口中进行 PLC 连接、画面布局、报警、画面、系统画面和按钮等的设置，如图 3-20 所示。

在完成上述设置后，点击“完成”即可进入“面板”编辑器窗口等，“面板”编辑器包含多个编辑器，分别位于工作区域和组态区域的“画面”和“变量”窗口。在“画面”编辑器的右边部分是工具箱、动画、布局、脚本和库等任务卡。工具箱显示对象和操作对象，包括基本对象、元素、控件和图形等选项。动画任务卡包含可以将选项板中的画面对象进行动态化的功能。可以通过拖放或双击将动画从“移动”、“显示”和“变量绑定”选项板粘贴到画面对象。布局任务卡包含缩放、层、网格和超出范围的对象的选项操作。库用于管理项目库和全局库，项目库与项目一起存储。全局库存储在组态 PC 上指定路径的单独文件中。“面板”编辑器窗口示例如图 3-21 所示。

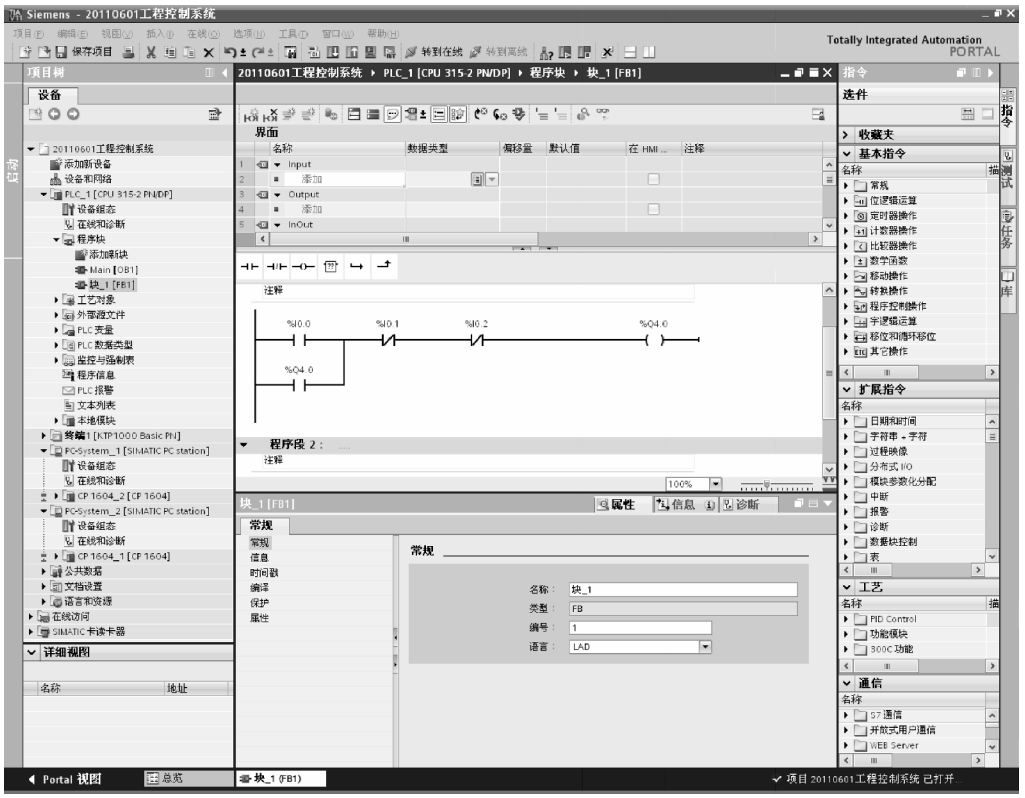


图 3-19 程序编辑窗口示例



图 3-20 “HMI 设备向导”窗口

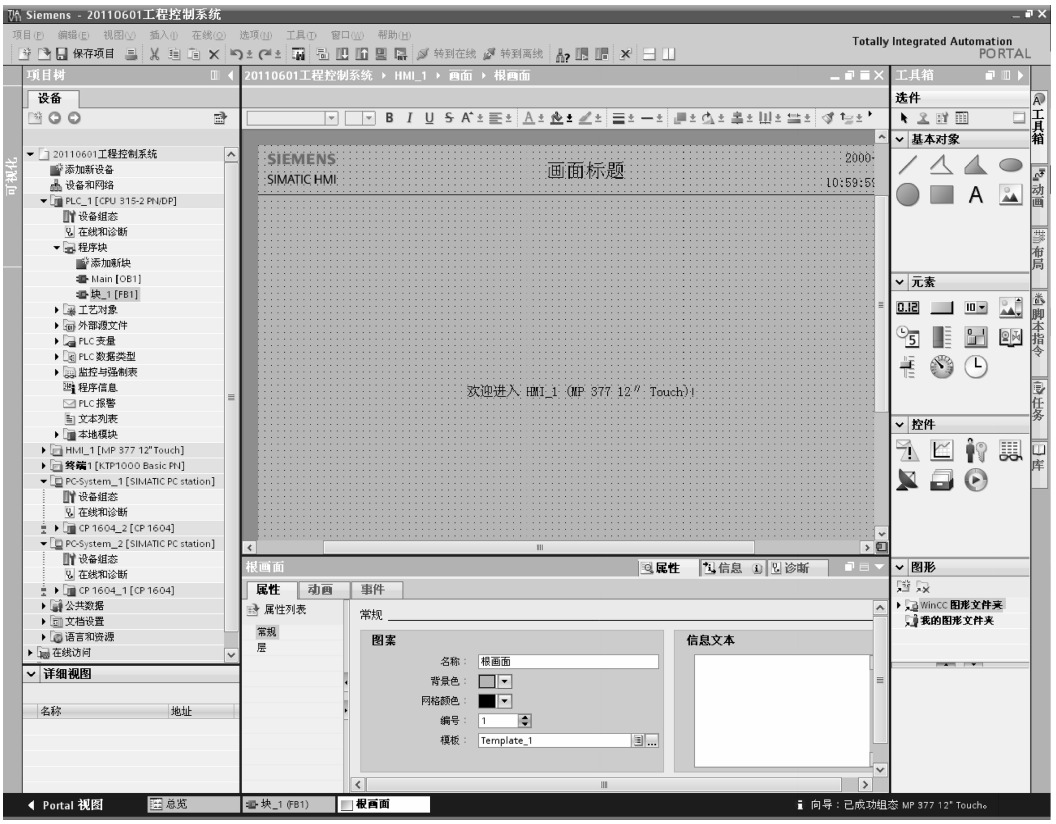


图 3-21　“面板”编辑器窗口示例

3.4　人机界面

人机界面（Human Machine Interface，HMI）通常是指自动化系统与用户之间进行可视化信息交互的媒介。在工业自动化系统中，HMI 通常与可编程序控制器、通用变频器、智能设备和装置等工业控制器连接，以实现人与机器间的可视化信息交互和操作。习惯上，人们常把具有触摸输入功能的人机界面产品称为面板或触摸屏。

3.4.1　人机界面产品的结构原理和功能

人机界面产品由硬件和软件两部分组成，硬件部分包括微处理器、存储器、输入和显示单元、通信接口等，请读者注意与图 3-2 比较一下，看其异同与差异。其中，微处理器是 HMI 的核心，其性能决定了 HMI 产品的性能高低。一般地，薄膜键输入的小型 HM，显示尺寸较小，属初级产品；触摸屏输入的 HMI，显示屏可选尺寸范围为 5.7′~12.1′，属中级产品；基于平板 PC 的高性能 HMI，显示尺寸一般大于 10.4′，属高端产品。根据 HMI 产品的等级不同，一般采用 8 位、16 位、32 位不同的微处理器。显示屏尺寸、类型及色彩、分辨率、画面存储容量及微处理器的处理速度是 HMI 产品的主要技术指标。运行软件分为运行于 HMI 硬件中的系统软件和运行于 PC Windows 操作系统下的组态软件两类，有的产品两者是兼容的，既可运行于 HMI 硬件中，也可运行于 PC 中。如西门子公司的 SIMATIC WinCC

flexible 2008 等组态软件。一般地，不同厂商的 HMI 产品使用各自的组态软件，支持的主要设备是 PLC。通常说的通用组态软件是运行于 PC、Windows 操作系统下的组态工具软件，功能强大，将其安装并运行于 PC 或工业计算机中就可组成一种 HMI 产品。通用组态软件，如 WinCC、组态王、力控等，支持的设备种类非常多，如 PLC、变频器、PC 板卡、仪表、模块等，而且由于 PC 性能强大，通用组态软件的功能也很多，特别适用于大型自动化监控系统。使用 HMI 时，必须先使用 HMI 组态软件编制“工程文件”，再通过 PC 和 HMI 产品的通信接口把“工程文件”下载到 HMI 的存储器中运行。通过输入单元（如触摸屏、键盘）写入工作参数或操作命令，利用显示屏显示，就可实现人机信息交互。

人机界面产品的基本功能包括设备工作状态实时和历史资料趋势显示（如文字、图形、曲线等）；数据、文字输入操作，报表和警报的产生与记录，打印输出；生产配方存储，自动记录设备生产数据；逻辑和数值运算；可连接工业控制网络，操作者能够透过图形接口直接控制机器和装置。

3.4.2 西门子 SIMATIC HMI 精简系列面板

在工业自动化控制系统中，HMI 系统是人（操作员）与过程（机器/设备）之间的接口，PLC 是控制过程的实际单元。HMI 系统可实现过程可视化、操作员对过程的控制、显示报警、归档过程值和报警、对过程值和报警记录、对过程和设备的参数管理等。过程可视化是将过程显示在 HMI 设备上。HMI 设备上的画面可根据过程变化动态更新。操作员可以通过 GUI（图形用户界面）来控制过程。如操作员可以预置控件的参考数值或者起动电动机等。过程的临界状态会自动触发报警，如当超出设定值时报警。HMI 系统可以记录报警和过程值。可以记录过程值序列，并检索以前的生产数据。HMI 系统可以输出报警和过程值报表。如可以在某一轮班结束时打印输出生产数据。HMI 系统可以将过程和设备的参数存储在配方中。如可以一次性将这些参数从 HMI 设备下载到 PLC，以便改变产品工序进行生产。

SIMATIC HMI 精简系列面板是具有 HMI 设备基本功能的新型 SIMATIC HMI 面板，具有标准软件功能，如画面系统、报警系统、配方管理、趋势功能及语言切换等。S7-1200PLC 兼容的 SIMATIC HMI 精简系列面板的编程软件采用 SIMATIC STEP 7 Basic V10.5 软件包中的可视化视窗中心 WinCC Basic V10.5 或 WinCC flexible 2008。S7-1200PLC 兼容的 SIMATIC HMI 精简系列面板外形如图 3-22 所示。

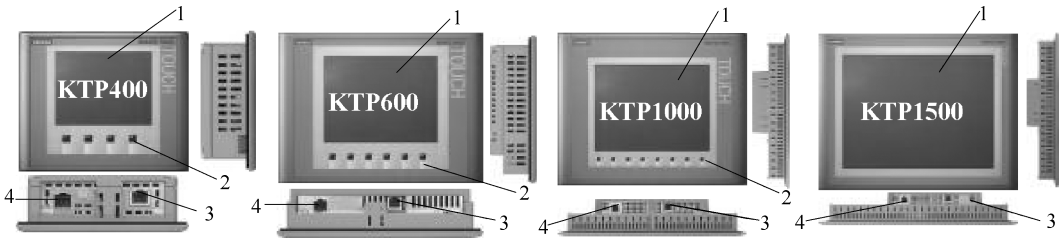


图 3-22 SIMATIC HMI 精简系列面板的外形

1—显示屏/触摸屏 2—功能键 3—PROFINET 接口 4—电源接口

SIMATIC HMI 精简系列面板均带 1 个 PROFINET 以太网接口（RJ45 10/100 Mbit/s），可与任何配有 PROFINET 接口的 SIMATIC S7 连接，通过 PROFINET/LAN 实现通信。图 3-23 是

SIMATIC HMI 精简系列面板连接组态计算机和 S7-1200PLC 的示意图。

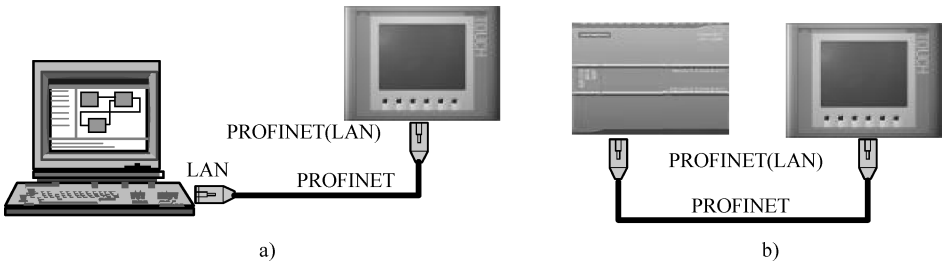


图 3-23　HMI 与计算机和 S7-1200PLC 连接的示意图

a）与组态计算机连接　b）与 S7-1200PLC 连接

3.5　通用变频器

通用变频器（Variable Voltage Variable Frequency，VVVF）是利用绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等电力电子器件按照一定的规律将工频电源变换为 *U/f*（电压和频率比）可变的电源输出，对通用三相异步电动机进行速度控制的控制器。当通用三相异步电动机被通用变频器拖动时，将按设定的斜坡函数运行曲线同时改变其定子电压和频率，以控制电动机的转速和转矩，达到变频调速的目的，这也是通用变频器的基本原理。

通用变频器有单相和三相两类。单相变频器是单相输入三相输出，而不是单相输出，选择时应注意。除此之外，还有专用变频器、高频变频器、高压变频器等。另外，根据控制方式，通用变频器有 *U/f* 控制方式、矢量控制方式和直接转矩控制方式三类。*U/f* 控制方式通用变频器也称为风机、水泵专用变频器，用于二次方降转矩负载；矢量控制方式和直接转矩控制方式通用变频器也称为高性能通用变频器，主要特点是动态性能高、机械特性硬，低速过载能力大，可实现挖土机特性，主要用于恒转矩负载。高性能通用变频器一般也具有 *U/f* 控制方式，使用时根据需要通过菜单选择。

目前，通用变频器的品牌繁多，几乎世界上所有大的电气公司、厂商都有自己的通用变频器品牌，并在中国市场上销售。我国自行设计、生产变频器的公司、厂商也达上百家。

3.5.1　通用变频器的结构原理

1. 通用变频器的外形结构

图 3-24 是罗克韦尔 PF700 通用变频器的外形结构示意图。

图 3-24 中，右上角图是 LCD 显示数字操作面板，可以通过连接电缆远离通用变频器本体连接而远距离操作通用变频器。在通用变频器的上后部有冷却风扇，当开机时，与通用变频器同步工作，以冷却功率模块。控制端子与控制板（左上图）安装在一起，用于连接 I/O 信号；主回路端子（见中下两图）与主电路的功率模块连接，主回路端子用于连接输入电源和电动机。右下角是通信接口模块。

2. 通用变频器的内部结构

从通用变频器的控制原理上看，其基本结构由主电路，包括整流器、中间直流环节、逆变器，主控制板、通信和外部接口及显示操作面板组成，如图 3-25 所示。



图 3-24 通用变频器的外形结构示意图

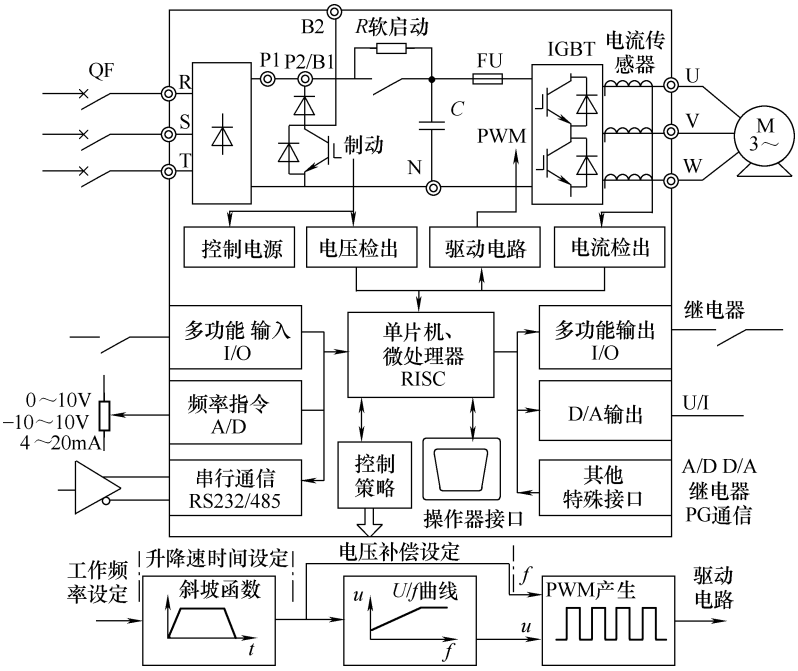


图 3-25 通用变频器的内部结构原理图

主电路接线端子中，R、S、T（或标注 L1、L2、L3）是电源输入端子，接电网三相交流电；U、V、W 是交流输出端子，接电动机。

整流器有可控整流桥和不可控整流桥两种，大多数通用变频器采用不可控整流桥，具有能量回馈功能的通用变频器采用可控整流桥。整流桥的作用是把三相交流变换为直流，作为逆变器的恒定电源。逆变器是将直流转换成交流的换流器，它是由 6 个 IGBT 组成的三相逆变桥，采用脉宽调制（Pulse Width Modulation，PWM）技术，从而获得大功率、高效率的交流输出。中间直流环节是一个（组）大容量电解电容器起稳定直流电压、滤波和存储回馈

能量作用。由于逆变器的负载为异步电动机，属于感性负载，无论电动机处于电动或发电制动状态，其功率因数总不会为 1。因此，在中间直流环节和电动机之间总会有无功功率的交换，这种无功能量要靠中间直流环节的储能元件（电容器或电抗器）来缓冲，所以常称中间直流环节为中间直流储能环节。

控制电路是通用变频器的心脏，包括 CPU、控制策略算法电路、信号检测电路、驱动和保护电路、外部接口、数字操作面板插口等构成。控制策略算法电路即与通用变频器控制方式对应的数学模型及运行曲线（斜坡函数）。高性能的通用变频器目前已经采用微处理器进行全数字控制，硬件电路简单，主要靠软件实现各种控制和保护功能。可以通过数字操作面板来设定各种参数和选择所需要的功能。新型通用变频器还可以通过编程和调试软件在计算机上进行参数设置和监控。

通用变频器的数字操作面板是一个具有 LED 或 LCD 显示和操作键的微型界面，利用它可以进行各种参数编程、监视和运行操作，监视通用变频器的运行状态，显示频率指令值和实际输出频率、输出电压指令值和实际输出电压及输出电流等。当通用变频器保护功能动作后，可以通过操作面板显示故障内容、查看故障原因等。运行操作包括运行/停止、正转/反转、点动、输出频率设定等内容，可以根据外部给定信号进行设定。

外部接口电路通常包括多功能输入输出 I/O 接线端子、频率指令输入输出 I/O 接线端子、串行通信接口和特殊输入输出端子等。多功能 I/O 接线端子是可编程的，可以通过编程定义端子的功能。频率指令 I/O 接线端子是模拟量输入端子，用于通过电位器或标准工业信号进行速度控制。串行通信接口通常是 RS-232 或 RS-485，不同品牌的通用变频器遵循不同的通信协议，用于连网通信。如西门子通用变频器的串行通信接口 RS-485，通信协议是 USS 协议。特殊输入输出端子主要是模拟量输出信号和数字量输出信号等，通过相应的接口可进行频率、速度等的输出显示、故障报警等。

3. 通用变频器的外部接线端口

各种品牌通用变频器的外部接线端口大同小异，典型的通用变频器外部接线端口如图 3-26 所示。

由图 3-26 可见，外部信号接口主要有：

（1）主电路接线端子。L1、L2、L3 是电源输入端子，接三相交流电源；U、V、W 是交流输出端子，接异步电动机；B（+）、B（-）之间连接内部制动电阻；DC（+）、DC（-）之间用来连接外部制动单元。

（2）模拟量输入/输出端子。两路模拟量输入用于从外部输入模拟量（0 ~ 10V、4 ~ 20mA 等）以设定速度给定值。可以通过参数分别设置每个通道的属性，如“带监控”或“不带监控”，“带监控”

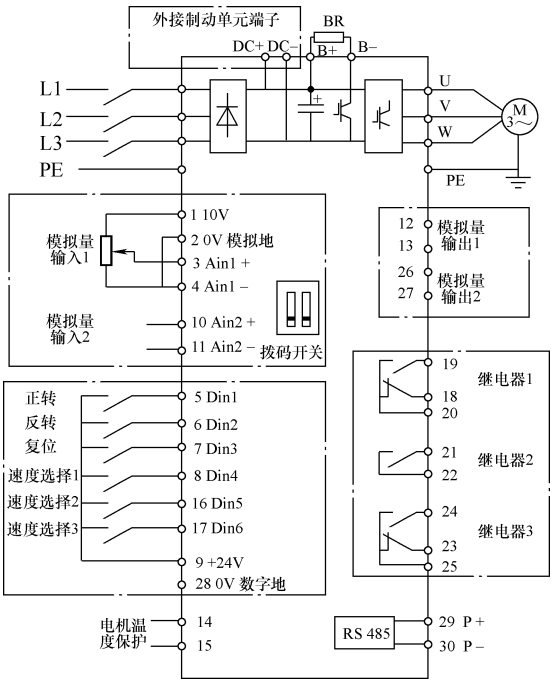


图 3-26　通用变频器的外部接口示意图

是指模拟通道具有监控功能，当断线或信号超限，将故障报警。频率设定电位器用于就地手动调节速度给定值。模拟输出信号与所设置的物理量呈线性关系，两路模拟量输出的物理量可以通过参数设置，出厂值为 0 ~ 20mA 输出，可以标定为 4 ~ 20mA 输出，如果需要电压信号可以在相应端子并联一支 500Ω 电阻。

（3）数字量控制输入/输出端子。Din1 ~ Din6 六个数字量输入端子的每个端子都有一个对应的参数用来设定该端子的功能，通过编程以二进制编码方式定义其功能。可以将变频器当前的状态以开关量的形式用继电器 1 ~ 继电器 3 输出端子输出，通过输出继电器的状态来监控变频器的内部状态量。而且每个输出逻辑是可以进行取反操作。

（4）通信接口。通用变频器具有 RS-232 或 RS-485 的通信接口，可与计算机、PLC 及其他可通信设备进行通信，并按照计算机或 PLC 的指令完成所需的动作。西门子 MM440 通用变频器具有基于 USS 协议的 RS-485 通信端口，通过 USS 协议，可与西门子 S7 系列 PLC 连接，以网络化方式控制变频器运行，也可以根据 USS 协议自行编制程序，变频器无需增加任何硬件即可构成一个控制系统。可以通过 PROFIBUS 模块、DeviceNet 模块、CANopen 模块连接到相应的控制系统中。MM440 通用变频器还可通过计算机的 RS-232 接口连接，通过随机软件 STARTER 调试变频器，实现参数的上传、下载以及参数备份。

3.5.2 通用变频器的控制方式

通用变频器的控制方式是根据异步电动机的数学模型采用的不同控制策略。根据负载特性的不同，通用变频器通常有 *U/f* 控制方式、矢量转矩控制方式和直接转矩控制方式 3 种，并对应 3 种不同的产品类型。其中，矢量控制方式又分为无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器矢量控制方式等。*U/f* 控制方式又有线性 *U/f* 控制方式、带磁通电流控制（FCC）的线性 *U/f* 控制方式、抛物线型 *U/f* 控制方式、多点 *U/f* 控制方式、平方 *U/f* 控制方式等。*U/f* 控制方式通用变频器专用于风机、水泵类流体机械，矢量控制方式和直接转矩控制方式通用变频器用于恒转矩负载。高性能矢量控制和直接转矩控制型通用变频器通常兼有 *U/f* 控制方式，以适应不同负载的需要。从应用角度看，矢量转矩控制方式通用变频器和直接转矩控制方式通用变频器在性能上没有本质上的区别。只有 ABB 公司生产直接转矩控制方式通用变频器。

1. *U/f* 控制方式

U/f 控制方式也称为恒压频比控制方式。*U/f* 控制方式是指在变频调速过程中为了保持主磁通的恒定，而使 *U/f* = 常数（恒定）的控制方式，这是通用变频器的基本控制方式，通用变频器采用人工设定的 *U/f* 曲线运行。在 *U/f* 控制方式下，通用变频器利用提高输出电压方式来提高异步电动机的转矩，这种方式称为转矩补偿或转矩提升，其作用是当输出频率较低时，输出电压会下降，从而使定子绕组电流减小，致使异步电动机转矩不足，此时提高通用变频器的输出电压即可起到转矩补偿作用。高性能 *U/f* 控制方式通用变频器在控制方法上采用磁通补偿、转差补偿和电流限制等控制策略，以实现转矩控制功能。*U/f* 控制方式通用变频器不能根据负载转矩的变化实时调整电动机转矩。特别是在低速时，由于定子阻抗压降随负载转矩变化，当负载较重时可能补偿不足，当负载较轻时又可能产生过补偿，造成磁路过饱和。这两种情况均可能引起变频器过电流跳闸。

2. 矢量控制方式

通用变频器的矢量控制方式是通过测量和控制异步电动机定子电流矢量，根据磁场定向原理和派克变换，将异步电动机的定子电流矢量分解为产生磁场的电流分量（励磁电流）和产生转矩的电流分量（转矩电流）分别加以控制，并同时控制两个分量间的幅值和相位，即控制定子电流矢量。也即，矢量控制就是将磁链与转矩解耦，并分别设计调节器，这样就可以将一台三相异步电动机等效为直流电动机来控制，因而获得与直流调速系统同样的静、动态性能，以提高交流电动机的调速性能。矢量控制方式又有基于转差频率控制的矢量控制方式、无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器的矢量控制方式等。目前，从应用上看，主要是无速度传感器矢量控制方式。

矢量控制方式通用变频器不仅可在调速范围上与直流电动机相匹配，而且可以动态控制异步电动机转矩。由于矢量控制方式所依据的是准确的被控异步电动机的参数，使用时需要准确地输入异步电动机的铭牌参数，否则难以达到理想的控制效果。目前，新型矢量控制通用变频器中已经具备异步电动机参数自动检测、自动辨识、自适应功能，带有这种功能的通用变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前可以自动地对异步电动机的参数进行辨识，并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数，从而对普通的异步电动机进行有效的矢量控制。

3. 直接转矩控制方式

直接转矩控制方式通用变频器是利用空间矢量、定子磁场定向分析方法，直接在定子坐标系下分析异步电动机的数学模型，计算与控制异步电动机的磁链和转矩，采用离散的两点式调节器（Band—Band 控制），把转矩检测值与转矩给定值作比较，使转矩波动限制在一定的容差范围内，容差的大小由频率调节器来控制，并产生 PWM 脉宽调制信号，直接对逆变器的开关状态进行控制，以获得高动态性能的转矩输出。与矢量控制不同，直接转矩控制摒弃了解耦的思想，取消了旋转坐标变换，通过检测电机定子电压和电流，借助瞬时空间矢量理论计算电机的磁链和转矩，并根据与给定值比较所得差值，实现磁链和转矩的直接控制。

与矢量控制方式比较，直接转矩控制磁场定向所用的是定子磁链，它采用离散的电压状态和六边形磁链轨迹或近似圆形磁链轨迹的概念，只要知道定子电阻就可以把它观测出来。而矢量控制磁场定向所用的是转子磁链，观测转子磁链需要知道电动机转子电阻和电感。因此直接转矩控制大大减少了矢量控制中控制性能易受参数变化影响的问题。在直接转矩控制中，定子磁通和转矩作为主要控制变量，在电动机参数自动辨识程序运行中建立精确的电动机模型，因此，可以在不使用速度传感器情况下，从零速开始就可以实现电动机速度和转矩的精确控制。

3.5.3　异步电动机变频调速时的特性

1. 负载的转矩特性

交流异步电动机的功率与负载转矩和转速的积成比例，即

$$P = Tn/9550 \tag{3-1}$$

式中，P 为功率（kW）；T 为转矩（N·m）；N 为转速（r/min）。

由式可见，负载种类不同其转矩 T 与转速 n 的关系亦不同，选用通用变频器时应根据负载性质正确选择，否则不但不能充分发挥通用变频器的性能，有时还会发生损坏通用变频器和电动机的故障。

生产机械的负载转矩 T_L 的大小和许多因素有关，通常把生产机械的负载转矩 T_L 与转速

n 的关系称为生产机械的负载转速-转矩特性，简称为负载特性。生产机械虽然种类繁多、性能及工艺要求各异，但从其转速-转矩的特性来看，可将其分为恒转矩负载、平方降转矩负载（也称其为通风机负载）、恒功率负载三大类。

（1）恒转矩负载

任何转速下负载转矩 T_L 总保持恒定或基本恒定，而与转速无关的负载称为恒转矩负载。这类负载多数是呈反抗性的，即负载转矩 T 的极性随转速方向的改变而改变。还有一种位势性转矩负载，负载转矩 T_L 的极性不随转速方向的改变而改变。

（2）二次方降转矩负载

对于风扇、通风机、鼓风机、水泵、油泵等流体机械（风机水力机械），随叶轮的转动，其工作介质如空气、水、油等对叶片的阻力在一定转速范围内大致与转速 n 的二次方成比例变化。在低速时由于流体的流速低、阻力矩小，所以负载只需很小的起动转矩，而随着异步电动机转速的增加流速加快，所需转矩越来越大，其转矩大小以转速的二次方的比例增减，它们的特点是负载转矩与转速的二次方成正比，即 $T = kn^2$，较小的速度变化将使机械出力有较大变化。这样的负载称为二次方降转矩负载或称风机、泵类负载特性。

（3）恒功率负载

当负载功率恒定，与转速无关，或负载功率 P_2 为一定值时，负载转矩 T 则与转速 n 成反比的负载特性称为恒功率负载。如机床的主轴驱动、造纸机、卷纸机、塑料胶片生产机械的中央传动部分、卷扬机等属恒功率负载。负载的恒功率性质是就一定的速度变化范围而言的，当速度很低时，受机械强度限制，负载转矩 T_L 不可能无限增大，在低速区呈恒转矩性质。

负载的恒功率和恒转矩区对通用变频器的选择有很大影响，根据异步电动机原理，异步电动机在恒磁通调速时最大输出转矩不变，属于恒转矩调速，而在弱磁调速时，最大输出转矩与转速成反比属于恒功率调速。典型的恒功率负载如机床的主轴驱动、造纸机、卷纸机、塑料胶片生产机械的中央传动部分、卷扬机等属恒功率负载。

2. 异步电动机变频调速特性

异步电动机变频调速时，为了保持负载能力，应保持气隙主磁通 Φ 不变，这就要求降低供电频率的同时降低感应电动势，保持 E_1/f_1 = 常数，即保持电动势与频率之比为常数进行控制，这种控制又称为恒磁通变频调速，属于恒转矩调速方式。但是，E_1 难于直接检测和直接控制。当 E_1 和 f_1 的值较高时，定子的漏阻抗压降相对比较小，如忽略不计，则可以近似地保持定子电压 U_1 和频率 f_1 的比值为常数，即认为 $E_1 \approx U_1$，保持 U_1/f_1 = 常数。这就是恒压频比控制方式，是近似的恒磁通控制。当频率由额定值向上增大时，电压 U_1 由于受额定电压 U_{1N} 的限制不能再升高，只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变，这样必然会使主磁通随着 f_1 的上升而减小，相当于直流电动机弱磁调速的情况，即近似的恒功率调速方式。上述情况可用异步电动机变频调速特性曲线表示，如图 3-27 所示。

3.5.4 通用变频器的主要控制功能

通用变频器的控制功能主要是频率（速度）控制、转矩控制和保护功能。虽然通用变频器因品牌不同其内部参数的定义各不相同，但一般来说，可以分为与运行环境和功能有关的参数和与通用变频器工作方式有关的参数两大类。这些参数包括，S 形加减速曲线、U/f

模式、加减速时间设定、过转矩检测、防失速功能、PWM 载频频率、转矩提升等功能的数值设定，以及其他控制参数的设定等。这些参数通常用功能代码或参数号进行分类和表示。设定通用变频器的控制功能(也称编程)，就是根据具体的控制系统选择适合的功能代码或参数号，并进行参数设定的过程。不同品牌通用变频器的功能代码或参数号表示方式是不同的，但多数常用功能的参数含义是相同的。

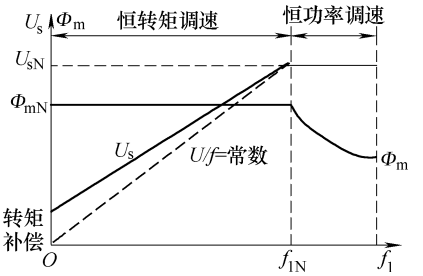


图 3-27　异步电动机变频调速时的特性

1. 斜坡函数

要实现通用变频器的控制功能主要是通过操作面板上的功能键及功能菜单预置操作，并由外部端子输入信号控制频率，控制信号包括模拟量和数字量。就地操作可以通过电位器进行速度调节。预置操作主要是通过功能代码构造一个斜坡函数，使电动机按照确定的斜坡函数运行。与斜坡函数相关的主要参数有最高输出频率 f_{HH}、基本频率 f_1、上限频率 f_H 和下限频率 f_L、起动频率 f_s、加速时间和减速时间、加速曲线和减速曲线等。这也是应用变频器的最基本的控制参数。设定时，通过功能键调取参数的功能代码及设定范围，设定一个确定值即可。设定最基本控制参数的过程也是构造一个电动机运行斜坡函数的过程，如图 3-28 所示。

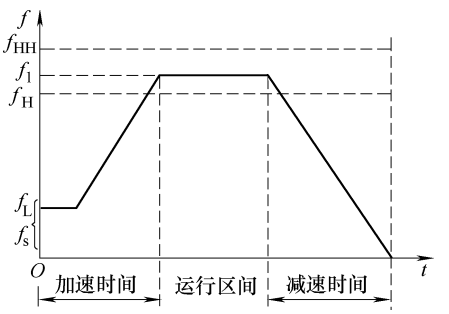


图 3-28　设定最基本控制参数

最高输出频率 f_{HH} 是与电动机允许的最高转速对应，超过此值将损坏电动机。基本频率 f_1 对应于电动机的额定频率和转速。上限频率 f_H 和下限频率 f_L 是设定的电动机正常运行速度区间。起动频率 f_s 是变频器运行时的最低起动频率，设定是需要考虑负载大小和工艺要求。变频器输出频率从 0 上升到上限频率 f_H 所需要的时间，称为加速时间；变频器输出频率从上限频率 f_H 下降至 0 所需要的时间，称为减速时间。加速曲线和减速曲线功能的作用是当被驱动负载较重，需要缓慢起停运行时，选择该功能可使变频器按照 S 形曲线缓慢改变输出频率从而使电动机比较平滑地运行，以减少机械系统的冲击振动。

例：最高输出频率 f_{HH} 设定为 50Hz，基本频率 f_1 设定为 50Hz，上限频率 f_H 设定为 45Hz，下限频率 f_L 设定为 15Hz，起动频率 f_s 设定为 0.5Hz，加速时间设定为 20s，减速时间设定为 30s，加速曲线和减速曲线设定为线性，跳跃频率设定为 0Hz。操作时，在 LCD 画面将显示功能代码和名称。

2. 功能代码

通用变频器的控制功能是用功能代码或参数号进行分类和表示的。设定通用变频器的控制功能（也称编程），就是根据具体的控制系统选择适合的功能代码或参数号，并进行参数设定的过程。不同品牌通用变频器的功能代码或参数号表示方式是不同的，但多数常用功能的参数含义是相同的。作为示例，表 3-2 列出了西门子 MM440 系列通用变频器的参数分组和主要参数范围，表 3-3 列出了西门子 MM440 系列通用变频器的一些基本参数，通过这些基本参数的设定，可设定变频器的基本控制功能，并快速调试变频器。

表 3-2 西门子 MM440 系列通用变频器的参数分组和主要参数范围

组 别	P0004 设定	描 述	参数范围
所有参数	0	所有参数	0000 ~ 3900
变频器	2	与变频器相关的参数	0200 ~ 0299
电机	3	电机参数	0300 ~ 0399、0600 ~ 0699
编码器	4	编码器参数	0400 ~ 0499
技术应用	5	技术应用参数	0500 ~ 0599
命令	7	控制命令，数字 I/O	0700 ~ 0749、0800 ~ 0899
模拟量	8	模拟输入与输出	0750 ~ 0799
频率设定	10	设定通道与斜坡函数发生器	1000 ~ 1199
功能	12	变频器功能	1200 ~ 1299
控制	13	开闭环控制	1300 ~ 1799
通信	20	通信	2000 ~ 2099
报警	21	故障，监控，报警	2100 ~ 2199
控制器	22	PID 控制，自由功能块	2200 ~ 2399、2800 ~ 2890

表 3-3 西门子 MM440 系列通用变频器快速调试参数表

参数号	参数描述	推荐设置
P0003	设置参数访问等级 =1 标准级（只需设置最基本参数）；=2 扩展级；=3 专家级	3
P0010	=1 开始快速调试。注意： 1. 只有在 P0010 =1 的情况下，才能修改电机的主要参数，如 P0304，P0305 等 2. 只有在 P0010 =0 的情况下，变频器才能运行	1
P0100	选择电机的功率单位和电网频率 =0 单位 kW，频率 50Hz =1 单位 HP，频率 60Hz =2 单位 kW，频率 60Hz	0
P0205	变频器应用对象： =0 恒转矩（压缩机，传送带等） =1 变转矩（风机，泵类等）	0
P0300［0］	选择电机类型： =1 异步电机 =2 同步电机	1
P0304［0］	电机额定电压	根据电机铭牌
P0305［0］	电机额定电流。如果驱动多台电机，P0305 的值要大于电流总和	根据电机铭牌
P0307［0］	电机额定功率。如果 P0100 =0 或 2，单位 kW；如果 P0100 =1，单位 HP	根据电机铭牌
P0308［0］	电机功率因数	根据电机铭牌
P0309［0］	电机的额定效率。如果 P0309 设置为 0，则变频器自动计算电机效率。如果 P0100 设置为 0，看不到此参数	根据电机铭牌

（续）

参数号	参数描述	推荐设置
P0310［0］	电机额定频率。通常为 50/60Hz。非标准电机，可以根据电机铭牌修改	根据电机铭牌
P0311［0］	电机的额定速度矢量控制方式下，必须准确设置此参数	根据电机铭牌
P0320［0］	电机的磁化电流通常取默认值	0
P0335［0］	电机冷却方式： =0 利用电机轴上风扇自冷却 =1 利用独立风扇进行强制冷却	0
P0640［0］	电机过载因子以电机额定电流的百分比来限制电机的过载电流	150
P0700［0］	选择命令给定源（启动/停止）： =1 BOP（操作面板） =2 I/O 端子控制 =4 经过 BOP 链路（RS232）的 USS 控制 =5 通过 COM 链路（端子 29，30） =6 PROFIBUS（CB 通信板） 注意：改变 P0700 设置，将复位所有的数字输入输出至出厂设定	2
P1000［0］	设置频率给定源。 =1 BOP 电动电位计给定（面板） =2 模拟输入 1 通道（端子 3，4） =3 固定频率 =4 BOP 链路的 USS 协议控制 =5 COM 链路的 USS 协议（端子 29，30） =6 PROFIBUS（CB 通信板） =7 模拟输入 2 通道（端子 10，11）	2
P1080［0］	限制电机运行的最小频率	0
P1082［0］	限制电机运行的最大频率	50
P1120［0］	电机从静止状态加速到最大频率所需时间	10
P1121［0］	电机从最大频率降速到静止状态所需时间	10
P1300［0］	控制方式选择 =0 线性 *U/f*，要求电机的压频比准确 =2 平方曲线的 *U/f* 控制 =20 无传感器矢量控制 =21 带传感器的矢量控制	0
P3900	结束快速调试 =1 电机数据计算，并将除快速调试以外的参数恢复到工厂设定 =2 电机数据计算，并将 I/O 设定恢复到工厂设定 =3 电机数据计算，其他参数不进行工厂复位	3
P1910	=1 使能电机识别，出现 A0541 报警，马上启动变频器	1

在完成快速调试后，变频器就可以正常驱动电动机了。可以进一步根据需要设置变频器控制和工艺参数。如采用 MM440 系列通用变频器组成恒压供水控制系统，如图 3-29 所示。

在快速调试基础上进一步设定如下参数。如果由基本操作板 BOP 作为压力给定，由模拟量通道 2 输入压力反馈信号，具体参数如下：

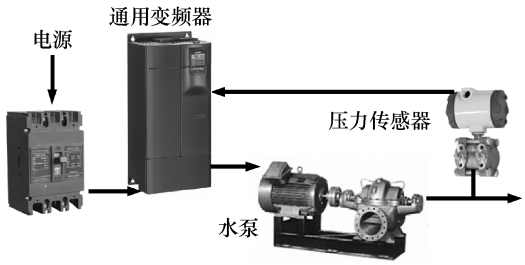


图 3-29 MM440 系列通用变频器恒压供水控制系统示意图

P0700 = 2，控制命令源于端子
P0701 = 1，5#端子作为启动信号
P0756. 1 = 2，反馈信号为电流信号
P1000 = 1，用 BOP 面板给定频率信号
P2200 = 1，使能 PID 控制功能
P2253 = 2250，用 BOP 面板给定 PID 目标源
P2240 = X，用户压力设定值的百分比
P2264 = 755. 1，由模拟通道 2 输入 PID 反馈信号
P2265 = 5，PID 反馈滤波时间常数
P2280 = 0. 5，比例增益设置
P2285 = 15，积分时间设置
P2274 = 0，微分时间设置（通常关闭）
对于比例积分参数需要现场调试。

3.6 PID 控制器

在工业过程控制中，生产工艺流程中的温度、压力、流量、液位等变量需要维持在一定数值范围内，或按一定的规律变化，以满足生产工艺的要求。为此，PID 控制［比例(P) - 积分(I) - 微分 (D)］是最常用的控制策略之一。PID 控制器则是根据 PID 控制原理由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成的一种过程控制器，通过适当调整比例放大系数 K_P、积分时间 T_I 和微分时间 T_D 三个参数，能对整个被控系统进行偏差调节，从而使工艺流程中的被控变量的实际值与预设值一致，得到良好的控制性能。实际应用中，可根据被控对象的特性和控制性能要求，采用不同的控制组合，构成 P 控制器、PI 控制器或 PID 控制器。现在，可编程序控制器、通用变频器等控制器都有内置 PID 控制功能。

在实际工业生产过程中的参量，多是非线性、时变不确定性、难以建立精确的数学模型，应用常规 PID 控制器难以达到理想的控制效果。随着现代控制理论和计算机控制技术的发展，智能控制、自适应模糊控制、神经网络、预测控制、非线性算法、遗传算法和自整定等控制理论得到实际应用，智能 PID 控制器得到广泛应用，对于复杂对象，其控制效果远远超过常规 PID 控制。

智能 PID 控制器

智能控制与常规 PID 控制相结合即为智能 PID 控制，已得到广泛应用，它具有不依赖系统精确数学模型和控制器参数自整定的特点，对系统的参数变化具有较好的鲁棒性，具备自学习、自适应、自组织的能力，能够自动辨识被控过程参数和适应被控过程参数的变化。智能 PID 控制器具有自整定、自综合和监控三种运行状态。自整定是指控制器根据对象特性变化自动整定 PID 参数；自综合用来保证控制系统的鲁棒性；监控运行状态用来保证控制系统

安全可靠运行。

随着微处理器和人工智能技术的发展，出现了多种形式的智能 PID 控制器，如专家智能自整定 PID 控制器、模糊控制 PID 控制器、基于神经网络的 PID 控制器和可编程数字自整定 PID 控制器等。

1. 专家智能自整定 PID 控制

专家系统（Expert System）是一个具有智能特点的计算机程序，它的智能化主要表现为能够在特定的领域内模仿人类专家思维来求解复杂问题。因此，专家系统必须包含领域专家的大量知识，拥有类似人类专家思维的推理能力，并能用这些知识来解决实际问题。专家 PID 控制采用规则 PID 控制形式，通过对系统误差和系统输出的识别，以了解被控对象动态特性的变化，在线调整 PID 三个参数，直到过程的响应曲线为某种最佳响应曲线。它是一种基于启发式规则推理的自适应技术，其目的是解决过程中出现的不确定性问题。专家智能自整定 PID 控制的原理框图如图 3-30 所示。

可将专家系统视为一个广义调节器，它包括专家知识库、数据库和逻辑推理机三部分。专家知识库是一种 PID 参数选择手册，其中记载了各种工况下被控对象特性所对应的 P、I、D 参数。数据库根据被控对象的输入与输出信号及给定信号提供给知识库和推理机。推理机能进行启发式推理，决定控制策略。专家系统可对已有知识和规则进行学习和修正，这样对被控过程对象的知识了解可大大降低，仅根据用户的输入、输出信息，就能实现智能自整定控制。

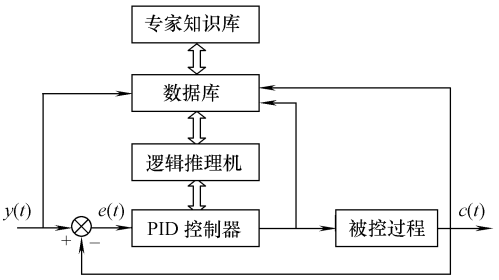


图 3-30　专家智能自整定 PID 控制器原理框图

工程上专家系统应用的例子也很多，如循环流化床锅炉（Circulating Fluidized Bed Boiler，CFBB）燃烧系统的专家模糊控制系统。CFBB 是一种高效节能、低污染、清洁能源装置，具有燃料适应性广、负载调节性能好等优点。在 CFBB 燃烧专家控制系统中，负载与床温解耦，采用压力与温度的误差为两个输入变量，进行专家控制；一、二次风配比建立相应专家控制库，完成对一、二次风的调节，同时还建立相应事故库来调节和控制设备；其他简单调节控制回路采用自整定 PI 调节和超弛切换控制来实现，同时这些回路与上述调节控制回路组成CFBB 燃烧系统的协调控制系统，以使 CFBB 满足安全、稳定、经济的燃烧。

2. 模糊控制 PID 控制

模糊控制是一种基于模糊数学理论的新型控制方法。模糊控制中的模糊量描述的是以模糊集合为基础的。但是，既不是指被控过程是模糊的，也不意味着控制器是不确定的，它表示知识、概念上的模糊性，是一种基于语言规则和模糊推理的控制方法。

模糊逻辑在控制领域中的应用称为模糊控制，核心是模糊控制器，它的基本特征是能将操作者或专家的控制经验和知识表示成语言变量描述的控制规则，然后用这些规则去控制系统。模糊控制要经过模糊化、模糊推理和形成精确控制量 3 个过程。再加上 PID 控制器就构成了模糊控制 PID 控制器。模糊化是将输入的精确量（一般是系统的误差及误差变化率）

经模糊语言规则映射成模糊输入变量，并用模糊规则对模糊输入变量推理和判决，从而得到模糊控制变量，再用模糊规则将推理的结果从模糊控制变量转化成可以用于实际控制的精确量，输出 PID 控制器的比例、积分、微分系数。模糊控制原理框图如图 3-31 所示。

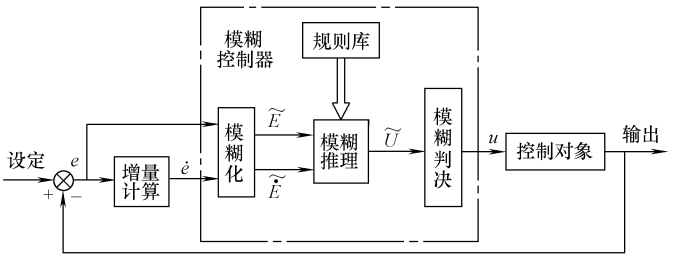


图 3-31 模糊控制原理框图

从理论上讲，模糊控制器的维数越高，控制越精细。但维数越高，控制规则越复杂，控制算法实现起来越困难。一般地，采用模糊控制器的输入量为误差量（E）和误差的变化量（EC）构成二维模糊控制器，输出量为控制量的变化（U）。E、EC 和 U 的论域被划分为多个等级。如划分为 15 个等级时，描述输入和输出变量的词集（模糊变量）表示为｛负大，负中，负小，零，正小，正中，正大｝或用符号表示为｛NB，NM，NS，O，PS，PM，PB｝；误差变量的词集表示为｛负大，负中，负小，负零，正零，正小，正中，正大｝或用符号表示为｛NB，NM，NS，NO，PO，PS，PM，PB｝。E 和 EC 的论域（赋值）：如，｛−6，−5，−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4，5，6｝；控制量 U 的论域：如，｛−7，−6，−5，−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4，5，6，7｝。或者，$E=EC=U=$｛NB，NM，NS，ZE，PS，PM，PB｝；论域（赋值）：如，$E=EC=U=$｛−7，−6，−5，−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4，5，6，7｝。

与一般数字逻辑的“0”和“1”不同，模糊逻辑并不是非 0 即 1，它表示了程度的概念，描述某个确定量隶属于某个模糊语言变量的程度。如，全自动洗衣机通过传感器判别衣物的重量、衣物质地以及污染的程度，以此来自动确定水位的高低、用水量的多少、洗涤剂的用量、洗涤时间和遍数，并确定最佳洗涤程序。当然，这是根据经验事先确定的模糊集的范围而确定的。

在工业生产过程中，许多被控对象随着负载变化或干扰因素影响，其对象特性参数或结构会发生改变，如果采用传统的 PID 算法，PID 参数的整定方法很多，并且大多数以对象特征为基础，这就很难做到精确控制。另外，由于操作者经验不易精确描述，控制过程中各种信号量及评价指标也不易定量表示，如果运用模糊数学，把规则的条件、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则及有关信息（如评价指标、初始 PID 参数等）作为知识存入控制器知识库中，然后根据控制系统的实际响应情况，即专家系统的输入条件，运用模糊推理，即可自动实现对 PID 参数的最佳调整，这就是模糊自适应 PID 控制。模糊自适应 PID 控制器目前有多种结构形式，但其工作原理基本一致。自适应模糊 PID 控制器以误差量（E）和误差的变化量（EC）作为输入，可以满足不同时刻的误差量（E）和误差的变化量（EC）对 PID 参数自整定的要求。利用模糊控制规则，在线对 PID 参数进行修改，便构成了自适应模糊 PID 控制器。

自适应模糊 PID 控制器在实际工程上的例子也很多，如锅炉控制、通用变频器控制的恒压供水系统、中央空调系统、起重机控制以及一些温度控制系统等。在这些领域的实际控制中存在着时变性、非线性与模型不确定性，PID 不能很好地控制；而模糊控制是依赖于人和专家的经验进行控制，无需建立被控对象的数学模型，对时滞、非线性和时变的系统有良好

的控制能力，但不具有积分环节，在变量分级不够多的情况下，在平衡点附近常会出现振荡现象和稳态余差。因此，常在控制中把模糊控制和 PID 控制结合起来，不仅具有较快的响应速度和抗参数变化的鲁棒性，而且可以对系统实现高精度控制。其主要设计思想是，当偏差较小时，采用 PID 控制，以提高控制精度；当温度偏差较大时采用模糊控制，以加快响应速度，两者的转换由事先确定的程序给定的偏差范围自动实现。

例如，自来水厂的通用变频器控制的恒压供水系统，由于供水系统管网长，流量变化缓慢，水压的调节有较大的滞后性，难以建立一个精确的数学模型，用传统的 PID 调节器难以获得满意的效果。如果采用模糊 PID 控制，是不需要受控对象的精确数学模型，可以获得比较满意的控制效果，在控制过程的前期阶段采用 PID 控制，具有动态响应快，而在控制过程的后期阶段采用模糊控制，又具有静态误差小的特点。

再如，中央空调系统采用智能模糊 PID 控制不仅可对中央空调冷冻水系统、冷却水系统、冷却塔风机等各个环节进行全面控制，而且可将各个控制系统在逻辑上和功能上互连在一起，实现信息综合、资源共享，实现集中控制和统一管理，从而使中央空调系统整体协调运行和综合性能优化。当环境温度、空调末端负载发生变化时，各路冷冻水供回水温度、温差、压差和流量亦随之变化，可以将流量计、压差传感器和温度传感器检测到的这些参数送至模糊 PID 控制器，模糊 PID 控制器依据所采集的实时数据及系统的历史运行数据，可实时计算出末端空调负载所需的制冷量，以及各路冷冻水供回水温度、温差、压差和流量的最佳值，并以此调节各变频器的输出频率，控制冷冻水泵的转速，改变其流量，使冷冻水系统的供回水温度、温差、压差和流量运行在模糊 PID 控制器给出的最优值。由于输出能量的动态控制，可实现空调主机冷媒流量跟随末端负载的需求供应，使空调系统在各种负载情况下，都能既保证末端用户的舒适性，又最大限度地节省了系统的能量消耗。

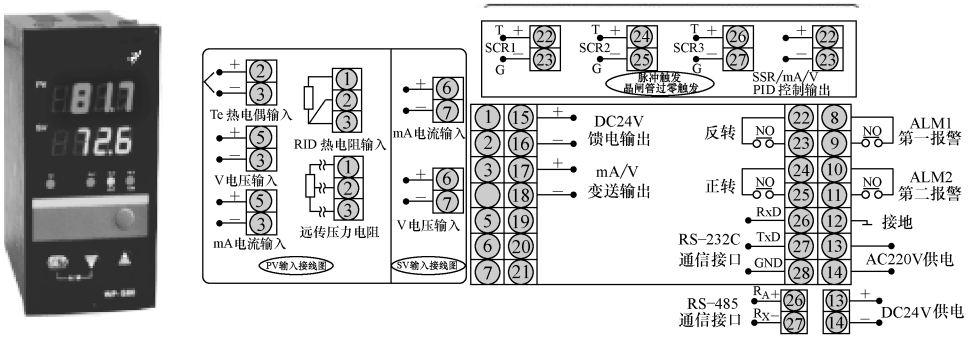
神经网络系统亦称为人工神经网络，就是将人工神经元按某种方式联结组成的网络，用于模拟人脑神经元活动的过程，实现对信息的加工、处理、存储等。神经网络有前向网络（前馈网络）、反馈网络等网络结构形式。与模糊 PID 控制和专家 PID 控制不同，基于神经网络的 PID 控制不是用神经网络来整定 PID 的参数，而是用神经网络直接作为控制器，通过训练神经网络的权系数间接地调整 PID 参数。

3. WP 系列 PID 自整定控制器

WP 系列智能自整定 PID 控制器集数字仪表与模拟仪表于一体，适用于需要进行高精度测量控制的系统。它可根据被控对象自动计算出最佳的 PID 控制参数，可随意改变仪表的输入信号类型，可分别带一路 PID 控制输出及一路变送输出，可显示测量值及控制目标值，并同时显示相对模拟量值，为双 LED 数码显示。控制器带 RS485/RS232C 串行通信接口，可进行双向通信组成网络控制系统。图 3-32 所示是 WP 系列智能自整定 PID 控制器产品外形结构图。

WP 系列智能自整定 PID 控制器的工作过程分 PID 自整定工作状态、阀位控制状态和外给定控制状态三种。每种状态又分自动控制状态和手动操作状态两种。

PID 自整定工作状态时，当仪表上电后，自动处于跟踪状态，并采样 PVin 输入信号，并将 PVin 输入值显示于 PV 显示器上，控制目标值（或输出量的百分比）显示于 SV 显示器上。当需要进行手动操作控制时，在 PV 显示输入值状态下，同时按压 SET 键和 ▼ 键，仪表将跟随当前输出量，自动转入手动控制输出量状态，仪表自动/手动（A/M）指示灯亮，即



a)　　b)

图 3-32　WP 系列智能自整定 PID 控制器外形结构图

a）外形示意图　b）端子接线图

可实现自动/手动无扰动切换。此时，SV 显示输出量（0～100%），输出值大小可按压▲键（增加输出量）或▼键（减少输出量）来调节。同时按压SET键和▼键，仪表即返回自动控制输出量状态，此时仪表将跟随当前输出量，根据控制器设定参数中的积分时间，按控制逼近方法，自动跟随 PV 变化，转回自动控制状态。

阀位控制状态时，仪表可接受双路模拟输入信号，并送往仪表的 PVin 和 SVin 接线端，PVin 输入信号显示测量值，由 PV 显示器显示；SVin 输入信号显示阀位反馈值，由 SV 显示器显示。根据具体要求，仪表可输出模拟量（如 0～10mA、4～20mA、0～5V、1～5V 等）或其他控制信号（如阀位控制的正反转等）。仪表在自动控制输出时，当控制输出量百分比小于 SV 阀位反馈值时，仪表输出反转，直至控制输出量等于 SV 阀位反馈值。当控制输出量百分比大于 SV 阀位反馈值时，仪表输出正转，直至控制输出量等于 SV 阀位反馈值。在仪表自动跟踪状态下，同时按压SET键和▼键，仪表将跟随当前输出量，转入手动控制输出量状态，仪表自动/手动（A/M）指示灯亮，即可实现自动/手动无扰动切换。SV 显示百分比输出值（0～100%）。

外给定控制状态时，仪表可接受双路模拟输入信号，并送往仪表的 PVin 和 SVin 接线端，PVin 输入信号显示测量值，由 PV 显示器显示；SVin 输入信号显示外给定值，由 SV 显示器显示。仪表的控制目标值由 SVin 输入信号给定，根据具体要求，仪表可输出模拟量（如 0～10mA、4～20mA、0～5V、1～5V 等）。自动控制状态（模拟量输出）下，仪表采样 PVin 输入信号，根据 PID 控制算法控制模拟量的输出，并将测量值显示在 PV 显示器上，输出量或控制目标显示在 SV 显示器上。当需要进行手动操作控制时，在 PV 显示测量值状态下，同时按压SET键和▼键，仪表将跟随当前输出量，自动转入手动控制输出量状态，仪表自动/手动（A/M）指示灯亮，即可实现自动/手动无扰动切换。此时，SV 显示输出量（0～100%），输出值大小可按压▲键（增加输出量）或▼键（减少输出量）来调节。同时按压SET键和▼键，仪表即返回自动控状态。

WP 系列智能自整定 PID 控制器的主要技术指标如下，供参考。

（1）输入信号

电阻——Pt100、Cu100、Cu50 等或远传压力电阻 30～350Ω

电偶——B、S、K、E、T、J、WRe 等

电压——0 ~ 5V、1 ~ 5V 或 mV 等（输出阻抗≥250KΩ）

电流——0 ~ 10mA、4 ~ 20mA 或 0 ~ 20mA 等（输出阻抗≤250Ω）。

（2）测量范围　-1999 ~ 9999 字

（3）测量精度　0.2% FS ± 1 字或 0.5% FS ± 1 字

（4）分辨率　　± 1 字

（5）温度补偿　0 ~ 50℃

（6）显示方式　-1999 ~ 9999 测量值显示、设定值显示和外给定值显示

0 ~ 100.0% 阀位反馈值显示

0 ~ 100% 输出量显示

发光二极管工作状态显示

双高亮度 LED 数字显示，双光柱显示

（7）控制输出　PID 电流/电压控制输出

0 ~ 10mA（负载电阻≤750Ω）

4 ~ 20mA（负载电阻≤500Ω）

0 ~ 5 V（输出电阻≤250Ω）

1 ~ 5 V（输出电阻≤250Ω）

PID 正转/反转阀位控制输出

继电器控制输出（AC220V/3A，DC24V/5A，阻性负载）

单相晶闸管控制输出—SCR（晶闸管过零触发脉冲）输出，可触发晶闸管：AC 400V/0.5A

双相晶闸管控制输出—SOT 双相晶闸管软触点输出，光电隔离，AC 400V/7A。

固态继电器控制输出—SSR（固态继电器控制电压信号）输出，DC 6 ~ 24V/30mA

（8）馈电输出　DC 24V ± 1V，负载电流≤30mA

（9）通信输出　标准串行双向通信接口：二线制、三线制或四线制；波特率 1200 ~ 9600bit/s 可由仪表内部参数自由设定；采用标准 MODBUS RTU 通信协议。接口和主机采用光电隔离。RS485 通信距离可达 1000m，上位机可采集各种信号与数据构成能源管理和控制系统。配用工控组态平台软件，可实现多台仪表与一台或多台计算机进行连机通信，系统采用主/从通信方式。整个控制回路只需一根 2（3）芯电缆即可实现与上位机通信，上位机可呼叫用户设定的设备号，随时调用各台仪表的现场数据，并可进行仪表内部参数设定。

（10）报警方式　可选择继电器上限、下限报警输出，继电器偏差内报警输出，继电器偏差外报警输出和继电器 LBA 报警输出，LED 指示

（11）报警精度　± 1 字

（12）设定方式　面板轻触式按键数字设定；参数设定值密码锁定；设定值断电永久保存

（13）保护方式　输入回路断线报警（继电器输出，LED 指示）

超/欠量程报警指示（继电器输出，LED 指示）

欠压自动复位
工作异常自动复位（Watch dog）

（14）供电电源　AC 220V ％（50Hz ±2Hz，线性电源）
AC 90 ~ 265V——开关电源
DC 24V ±2V——开关电源

4. PID 控制器的应用

图 3-33 是应用 PID 控制器的通用变频器恒压供水系统或风机控制系统的示意图。

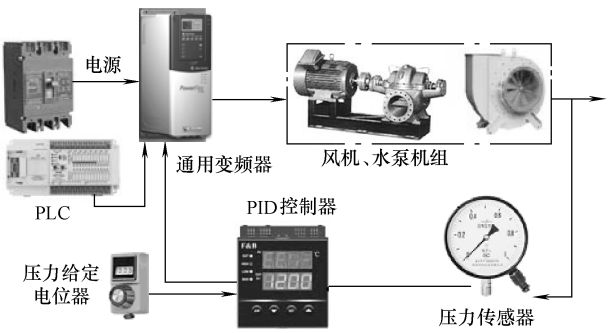


图 3-33　通用变频器恒压供水系统或风机控制系统示意图

PID 控制器的通用变频器恒压供水系统或风机控制系统是一个闭环压力调节系统，压力给定值由 PID 控制器的面板设定，也可以外设电位器给定，或由 PLC 输出给定。压力传感器将实际的压力变换为 4 ~ 20mA 的压力反馈信号，并送入 PID 控制器的输入端。PID 控制器将输入的电流信号经数字滤波、A/D 转换后变为数字信号，一方面作为实际压力值显示在控制器的面板上，另一方面与给定值作差值运算，偏差值经 PID 控制器运算后输出一个结果，其结果经 D/A 转换后，在 PID 控制器的输出端输出 4 ~ 20mA 的电流信号（或 0 ~ 10V 电压信号）送入通用变频器，用于调节通用变频器的频率，通用变频器再驱动水泵电动机（或风机），使压力变化。当给定值大于实际压力值时，PID 控制器输出值朝向最大值 20mA（或 10V）变化，压力上升，当给定值刚小于实际压力值时，PID 控制器输出朝向下限值变化，输出值减小，压力下降。压力超调后也逐渐下降，最后压力稳定在设定值附近，通用变频器输出频率也稳定在某个频率附近，风机、水泵电机的转速也相应稳定在某一数值下。这种 PID 控制方式的主要优点是操作简单、响应快、动态调节性能好，同时控制器还具有传感器断线和故障自动检测功能。缺点是 PID 调节有时会过于频繁，影响稳态性能。调试时，P 参数值不宜太大，一般为 0. 5 ~ 1，I 参数和 D 参数的比值大约为 4，I 参数的值一般为 5 ~ 20s，由于 PID 控制器的响应快，为了防止调整过程中压力波动过大，通用变频器的上升和下降时间应调大些，一般为 30 ~ 60s。

一般地，对控制规律的选择原则是 P 控制器适应于负载变化不大，工艺要求不高的场合，如，要求不高的压力、液位控制。如果负载变化不大，但控制精度要求高，可采用 PI 控制器。如果负载变化较大，控制要求高，可采用 PD 控制器，如温度控制。如果控制对象为高阶又有滞后特性时，控制要求高，则采用 PID 控制。

第 4 章　电气控制基本原理

由常用低压电器元件按一定的逻辑规律构成的控制线路传统上称为继电器-接触器逻辑控制线路，简称为继电逻辑线路，即电气控制线路，是一种逻辑控制系统，其主要的控制目标是由各类电动机控制的生产机械或自动控制装置。不同的生产机械或自动控制装置的控制要求是不同的，控制线路多种多样，但是，任何简单的、复杂的电气控制线路都是按一定的逻辑规律，由基本控制环节组合而成的，熟悉这些基本控制环节和典型控制电路是掌握电气控制的基础。在长期实践中，人们已将这些控制环节和电路总结成最基本的单元电路，只要能深入地掌握这些基本单元电路及其逻辑关系和特点，再结合具体的生产工艺要求，就不难掌握控制线路的基本分析方法和设计方法。但并没有一种固定的可遵循模式，因此，目前电气控制的设计方法主要采用经验分析法。本书主要介绍电气控制系统的基本原理及方法，旨在阐述逻辑控制的基本概念和方法。

4.1　电气控制系统的一般功能原理

在现代化工业生产中，已实现生产工艺过程自动化，对生产过程的自动控制，主要是根据一些物理量的变化，进行跟踪、调节和控制，从而达到工艺要求的控制目标。这些变化的物理量通常是行程、速度、温度、压力、时间、位置及一些电量的变化，对这些量的控制通常是逻辑控制和模拟量控制或两者的组合控制。从电气控制系统来看，可分为开环控制和闭环控制。早期的电气控制主要是开关量控制和开环控制，而现代电气控制系统由于生产过程越来越复杂、要求自动化程度越来越高，往往是逻辑控制和模拟量控制两者的协调控制，甚至是闭环控制。因此，各种智能化、网络化控制方式等被引入到电气控制系统中，使得现代电气控制系统具有智能化、可通信、网络化控制的基本特征，同时传统的电动机控制的概念被引申到运动控制范畴，并成为运动控制的主要组成部分之一，即电气运动控制。图 4-1 是现代电气控制系统的主要内容示意图，表示了现代电气控制系统所包含和涉及的主要技术内容及概况。图 4-2 是电气控制系统的一般功能原理框图。

图 4-2 表示了一个完整的电气控制系统，包含 a ~ i 等 9 个基本的功能单元。基本控制环节前进通道有 3 个单元：指令源单元 a、控制单元 c 和执行单元 d。指令信号源有多种形式，可能是由人工、PLC、计算机、运动控制器和传感器等发出的开关或数字指令，也可能是由其他系统引申过来的控制信号；输入参量的接收和转换，也可能是由人工操作的开关或调节器的输出量，向 h 单元送入相应的控制信息；还有各种传感器送来的运动参数、过程参数实测值的反馈信息。控制单元 c 利用这些信息，以模拟或数字方式进行逻辑运算、判断、变换、比较等，向 d 单元输出控制指令；执行单元 d，则按被驱动电机和工作模式不同，选择不同的电路结构进行控制。主要执行元件如图 4-3 所示。

液压式执行元件主要包括往复运动油缸、回转油缸、液压马达等。在同等输出功率的情况下，液压元件具有重量轻、快速性好等特点。气压式执行元件除了用压缩空气作工作介质

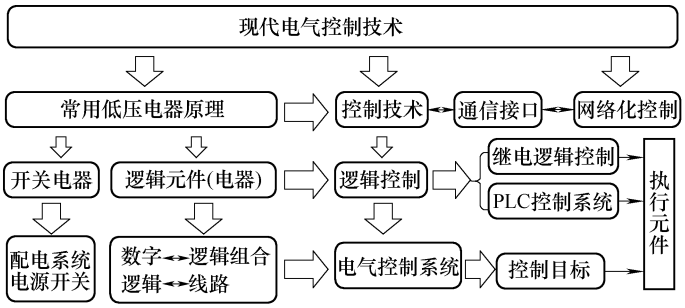


图 4-1 现代电气控制系统的主要内容示意图

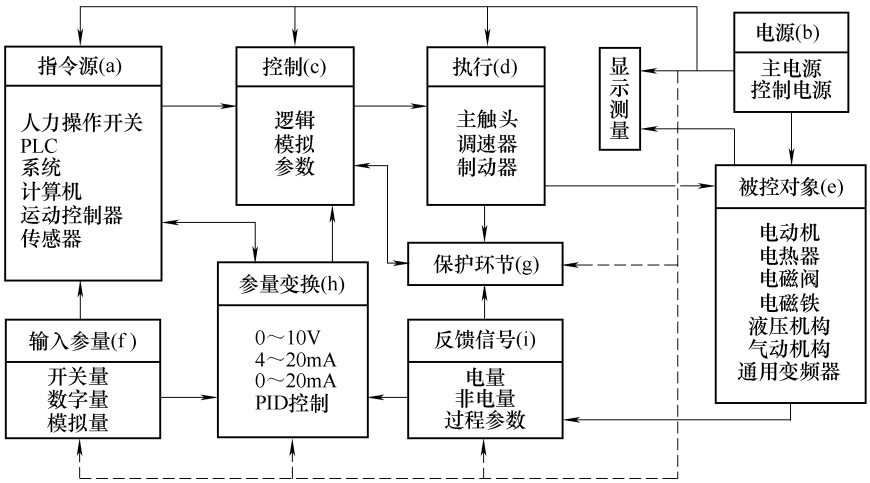


图 4-2 电气控制系统一般功能原理框图

外，与液压式执行元件没有区别。气压驱动虽可得到较大的驱动力、行程和速度，但由于空气粘性差，具有可压缩性，故不能在定位精度要求较高的场合使用。各种形式的液压式和气动式执行元件也都需要电动机作为动力元件。在这里连同电磁式执行元件统称为电气执行元件。电气执行元件除了要求运转平稳以外，一般还要求动态性能好，便于维修等。

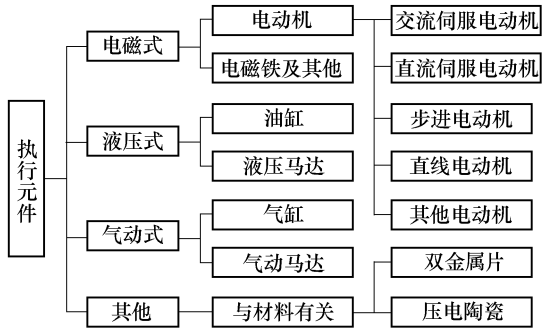


图 4-3 主要执行元件的分类

反馈信号通道包括生产过程控制参量以及反映运行状态的参量，它们实际是指电流、电压、速度、温度、压力、流量、位移等电量或非电量的反馈，通过变换或直接输入到控制环节进行控制，以达到控

制、改善、保护系统运行性能要求。而 h 单元是专为对生产现场过程参量进行模拟量控制设置的传感器或控制器的信息通道，它向控制单元 c 提供实时逻辑控制信号，产生正确的控制逻辑顺序，控制执行单元和被控对象。在输入参量单元中也为模拟量的设置提供了一个通道。最后一个 g 单元是自保护单元，它是双向的，对电机等被控对象的温度、电流、电压等参量进行检测和监视，对故障进行判断，或产生报警信号或直接关断执行单元。这 9 个功能单元的电气控制系统是根据具体的控制要求有取舍的，但一个电气控制系统或电路至少应包括 a、c、d、g 四个单元中的基本部分，即 a 单元的人力操作开关、c 单元的逻辑、d 单元的主触点及基本的保护环节。这一部分就是根据控制单元进行逻辑组合而成。如果需要对生产现场过程参量进行模拟量控制，一般有两种方式，一是对极限值进行控制，另一种是进行 PID 控制，它是在模拟控制系统中最常用的控制规律，如图 4-18 所示。

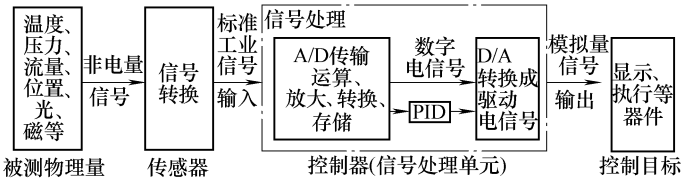


图 4-4　物理量检测环节的结构原理示意图

图 4-4 中，常用的标准工业信号即模拟量控制信号有 0 ~ 10V、0 ~ 20mA、4 ~ 20mA、0 ~ 5V、±10V 等。控制器的含义，可以是专用控制器，如温度控制器，也可以是 PLC、计算机、通用变频器等设备中的信号处理单元。

4.2　逻辑控制的基本概念

分析和设计电气控制线路的基本思路是一种逻辑思维和逻辑控制方法，只要符合逻辑控制规律、能保证电气安全、满足生产工艺的要求，就可认为是一种好的设计。如果选用比较先进的电器元件实现设计功能，就具备一定的先进性。当然，再进一步就应考虑其经济性和实用性等。

在现代电气控制技术中，电气控制线路或逻辑控制系统的实现，可以采用继电逻辑方法，也可以采用数字逻辑方法实现，而继电逻辑控制方法是基本的方法，是各种控制方法的基础。数字逻辑方法通常采用可编程序控制器或计算机来实现，但其执行电路还是需要继电逻辑线路来完成。从控制逻辑角度说，继电逻辑和数字逻辑描述的被控系统的状态是一致的，均可用开关逻辑“1”或开关逻辑“0”及其组合来表达。单一的开关逻辑“1”或开关逻辑“0”称为开关量控制。多个开关逻辑的组合即数字逻辑控制。

逻辑控制电路的控制环节就是讨论各电器之间如何实现互相联系、互相制约的逻辑规律，即逻辑关系。它是“与”（AND）、“或”（OR）、“非”（NOT）三种基本逻辑变量的组合。“与”、“或”、“非”逻辑运算及其组合是基本的逻辑控制环节。可以用逻辑关系式来描述电气元件在电路中的状态和连接方法。实际工程中的逻辑控制问题往往比基本的逻辑关系复杂得多，但其逻辑关系都是以它们为基础组合而成的，即复杂问题用组合后的逻辑函数表

示，组合后的逻辑函数式通常需要经过化简，才能实现最简逻辑控制电路。

4.2.1 继电逻辑

继电逻辑控制系统和装置是由各种开关电器组合而成，并通过物理接线方式实现逻辑控制功能，它的主要优点是逻辑清晰，缺点是需要有大量的固定硬接线，通用性和灵活性较差，一旦做成就不易改变。尽管如此，继电逻辑控制仍然是各类设备和装置最基本的电气控制形式之一。

1. 逻辑状态约定

继电逻辑控制线路中的元件状态是以线圈通电或断电来判定的。线圈通电时，与其关联的常开触点（动合触点）闭合、常闭触点（动断触点）断开。通常规定正逻辑为线圈通电为“1”状态，断电为“0”状态；元件的常开触点，规定闭合状态为“1”状态，断开状态为“0”状态，线圈没通电时的触点状态称为原始状态。负逻辑则相反。同一逻辑电路，既可用正逻辑表示，也可用负逻辑表示。在本书中，除特别声明外，均采用正逻辑。按照这些约定，开关电器的线圈和其触点的状态用同一字符来表示，例如符号 K（接触器）既表示接触器的线圈，也表示接触器的触点，但其常闭触点的状态在逻辑函数式中用符号 K 的“非”来表示，即$\overline{K}$。若元件的状态为“1”，则表示其线圈“通电”，常开触点闭合、常闭触点断开。“通电”、“闭合”都是“1”状态；断开则为“0”状态。若元件的状态为“0”，则与上述相反。逻辑值“1”或“0”称为真值或状态。

作了这些规定之后，对于某一确定的逻辑控制电路的函数表达式的数学意义和物理意义是：电路中的所有变量在符合逻辑取值条件下，经逻辑运算后，函数均取“1”值；一个逻辑函数取“1”值，说明这个函数对应的逻辑控制电路中被控电器元件通电，同时发生状态转换。而符合逻辑的各种变量取值状态则是函数取“1”值的条件。如果变量在任何取值条件下函数都不能取“1”值，即不存在状态转换的条件，就相当于被控电器永远不能通电，不会发生状态转换；若变量在任何取值条件下函数均取“1”值，即不具备状态转换的条件，就相当于被控电器元件恒被接通。这两种情况都使逻辑控制电路失去了控制作用。只有当变量的取值状态符合逻辑条件时，函数才能取“1”值，不符合逻辑取值条件时，函数则取“0”值，这样的逻辑函数才能有意义，相应的逻辑控制电路才有正确的控制作用。

2. 逻辑控制概念

由以上讨论可以得出这样的结论，电气控制线路实质上是一种逻辑组合，是由“与”、“或”、“非”三种基本逻辑变量组合而成的，逻辑值“1”或“0”表达了逻辑组合的状态变化。如果逻辑变量或逻辑值只取“1”或“0”，则称为开关量控制。如果逻辑变量或逻辑值取“1”或“0”的组合，也就是两个及以上的“1”或“0”的组合，即称为数字控制。在电气控制系统中，数字量通常用 BCD 编码表示。开关量控制是数字量控制的最简形式。这样，我们就可以说，电气控制问题实质上就是一个数字逻辑控制问题，逻辑思维方法是电气控制技术的基本方法。显然，对于一个逻辑控制问题的计算模型而言，可以用函数表达，也可以用逻辑关系式来表达。这就是电气控制线路设计的基础。

3. 时序逻辑与顺序控制

逻辑控制电路分为组合逻辑控制电路与时序逻辑控制电路。组合逻辑控制电路的特点是输出逻辑状态仅由当前的输入状态决定，而与原先的状态无关，这是最简单的开关量控制。

当逻辑控制电路的工作状态值不仅取决于当前各输入信号而且还与原先的工作状态有关时，称为时序逻辑控制电路，在电气控制技术中称为顺序控制。顺序控制电路的输出不仅与输入有关，而且与过去接受输入信号的顺序有关。

传统意义上的顺序控制系统就是一种典型的时序逻辑控制系统，其中包含了信号、动作和步序三个要素。信号通常是一些主令信号或转换信号，如继电器触点、传感器触点等的状态转换信号；动作即状态转换的结果，即逻辑转换；一个步序（工步）或动作或转换信号是最小逻辑单元；最小逻辑单元间的连接就是动作间的转换。步序（工步）即上一个状态转换后到下一个状态转换前的一个工艺过程，在电路图上表现为一段线路或一个元件或设备的运行或停止，从程序角度说，它是一段子程序或梯形图程序的一个或多个梯级。对生产机械而言，受控设备（控制目标）的任一个工步的动作是否执行，取决于前一个工步是否已完成，并输出转换信号。若前一工步的动作未完成，则后一工步的动作无法执行。工步与动作间在逻辑上互锁和联锁，即便转换信号元件失灵或出现误操作，亦不会导致动作顺序紊乱。这是实现逻辑控制系统的基础，也是顺序控制系统的主要特点。

典型的顺序控制系统实例是多段传送带按照时间原则顺序运行。从顺序控制概念上说，顺序控制就是一个设备起动后另一个设备才能按一定的条件或判据起动运行的一种控制方法。常用于主辅机之间、多台设备之间、多段生产线或传送带之间的控制等。例如，有一条由 3 段传送带组成的生产线，每段传送带由 1 台异步电动机拖动，工艺要求第 1 段传送带起动 1min 后，第 2 段传送带自动起动；第 2 段传送带运行 30s 后，第 3 段传送带自动起动，3 段传送带运行 5min 后全部停止，或发出状态信号，该状态信号可用于控制其他的装置或系统。这个系统很容易采用继电逻辑控制方法或采用可编程序控制器实现控制。以继电逻辑控制方法为例，根据控制要求，采用时间继电器定时，并用其延时闭合触点控制 3 个接触器 K1、K2 和 K3 的方法实现这 3 段传送带（3 台异步电动机）控制。因为顺序起动时间间隔分别为 1min、30s 和 5min，完成一次循环需要用 3 个延时定时器 T1 ~ T3 来完成。具体的控制线路可以设计为：接触器 K1 与时间继电器 T1 同时起动，时间继电器 T1 的延时闭合触点控制接触器 K2 起动，接触器 K2 的辅助触点控制时间继电器 T2 起动，时间继电器 T2 的延时闭合触点控制接触器 K3 起动，接触器 K3 的辅助触点控制时间继电器 T3 起动，时间继电器 T3 的延时闭合触点控制 3 个接触器 K1、K2 和 K3 同时断电，其中，使 3 个接触器 K1、K2 和 K3 互锁，以保证 3 台异步电动机中的任何一台发生故障，整个系统全部停机或不起动。这是一个典型的顺序控制线路或顺序控制的思路。

在工程上，顺序控制的方法应用十分普遍，有相对简单、规范一些的，也有一些十分复杂的，但是，无论简单的还是复杂的顺序控制系统，其基本的控制规律与上述类似，都是按步序组合，根据不同的判据实现的，只是实现的方式、采用的装置不同而已。但是，一个顺序控制系统的设计和应用效果，在很大程度上取决于设计者对被控对象工艺流程的了解和掌握程度、掌握和理解经典控制线路的程度和对控制设备、新型器件和装置的了解程度。能得到成功应用的一个重要原因，就是其线路或应用程序设计得要周密而合理，如什么工况下要转换运行，转换到哪个步骤既安全又经济，一个判据对设备起停全过程有哪些影响，它的有效区有多少步序或动作，等等，这些都需要对工艺流程有深入了解，才能设计出完善的控制方案。再如，注塑机电气控制系统就是典型的顺序控制系统。由工艺分析可得到注塑机的动作流程是：关门→合模→喷嘴前进→注射→保压→预塑→松退→喷嘴后退→冷却→开模→顶

出→退针→开门。这就是电气控制系统的设计依据。根据每个流程的信号、动作和步序三个要素，就可以设计出相应的单元电路，然后进行组合，完成设计。

从现代自动化技术角度看，在顺序控制系统中，简单控制只是局部的、或单一的单元控制，整体上已是一种全数字化逻辑控制系统，实现了以可编程序控制器和计算机控制为核心的数字化、网络化控制。

4.2.2 数字逻辑

在逻辑代数或布尔代数中，逻辑函数是由逻辑变量和常量通过运算符连接起来的表达式，可以用表格和图形等形式表示。逻辑变量可以用字母、符号、数字及其组合来表示。每个变量状态只可能取“0”值或取“1”值，不可能有中间值，这类似于信号的有或无、电平的高或低、开关元件的接通和断开、半导体管的饱和导通或截止等。显然，这种二值函数值可以通过继电器及其电路来实现，构成继电逻辑控制电路，或称开关逻辑电路。能够表达多个二值函数的电路称为数字逻辑电路，普遍意义上的数字逻辑电路应该是具有多个输入输出变量的电路。开关逻辑电路是典型的、最简形式的数字逻辑电路，是根据输入输出变量的逻辑关系进行逻辑运算和控制的。逻辑运算就是表示变量与变量、变量与常量之间的运算关系，“与”、“或”、“非”是三种基本的逻辑运算。在电气控制技术中，应用数字逻辑的目的是分析、简化和设计逻辑控制线路或系统，从而对继电逻辑控制线路或系统进行数字化（计算机）控制。在第 3 章中讨论的控制器就是数字化控制器，在现代电气控制系统中广泛应用。

根据“与”、“或”、“非”的基本逻辑关系，可组合成串联、并联及其复合逻辑结构，可以用物理接点实现，称为硬逻辑。也可以用数字“1”和“0”及其组合实现，组合的数字“1”和“0”的控制，即数字控制，也称为软逻辑控制，“1”和“0”称为“软元件”的最小元素。软逻辑是存储器中的一个存储“位”、“字节”或“字”。单一的数字“1”和“0”是软逻辑控制中的一个“位”，是数字逻辑中的一个最小单位。二进制码“0”或“1”表示信号状态，是构成二进制逻辑（BOOL 逻辑）的基础。“0”或“1”亦称为二进制数或位。可以用任何具有两个稳定状态的元件表示，对于触点和线圈而言，“1”表示已闭合、通电，“0”表示断开、断电。

4.2.3 梯形图逻辑

数字逻辑与继电逻辑可以用梯形图逻辑表示。梯形图逻辑用梯形图（Ladder Diagram）程序设计语言描述。梯形图是可编程序控制器常用的一种编程语言，它采用软逻辑符号，亦称编程软元件，以梯级（行）为单位，用图形化方式表示控制逻辑关系和控制程序。

梯形图程序由若干个梯级组成，每个梯级表示一个数字逻辑关系，根据变量间的逻辑状态来描述事件发生的条件和结果。梯形图的执行通过梯级的执行完成。梯级由一系列用触点指令表示的条件及在梯级终端表示逻辑运算结果的线圈组成。在梯级中，描述事件发生的条件表示在左面，事件发生的结果表示在右边。梯形图的图形符号就是用于表示事件状态和逻辑运算的符号。图形符号集包括各类触点、线圈、功能块和连线等。符号包括继电器类、定时器和计数器类、算术运算类、数据比较类、数据传送、浮点运算、数制转换和程序控制类等，以及功能块及自定义功能块。

梯形图程序中的左、右两侧的两条垂直线称为控制母线，左控制母线为梯形图中的能流（Power Flow）始端，能流从左向右沿着水平梯级通过各个触点、功能块和线圈等，终止于右控制母线。这里的能流不是实际意义的电流，线圈也不是物理意义上的线圈，每一个线圈只代表一个实际设备的状态或逻辑运算结果，每个触点代表一个布尔变量的状态。梯形图程序中的输入继电器、输出继电器、内部继电器、时间继电器及功能指令，是对应于存储区中的一个存储“位”、“字节”或“字”，而不是物理意义上的器件。

梯形图绘制的一般原则是，触点要画在水平线上，不能画在垂直线上，梯级终止于线圈。一个梯形图程序由多个梯级组成，每个输出线圈组成一个梯级。只有一个梯级绘制完毕才能继续下一个梯级的绘制。按照顺序自上而下、从左控制母线到右控制母线依次排列；串联触点多的电路安排在上面；并联触点多的电路安排在靠近左控制母线，输出线圈安排在最右面，右控制母线可以省略不画。图 4-1 是基本的继电逻辑图符号和梯形图符号的对照。

由图 4-5 可见，最基本的梯形图符号有常开触点“┤ ├”、常闭触点“┤/├”、线圈“（ ）”等。这些梯形图图形符号就是可编程序控制器的编程软元件，每种编程元件与 I/O 接口或逻辑信号对应。在可编程序控制器的输出映像寄存器中的输出数据（状态），统一被认为是“线圈”状态。另外，梯形图程序与继电逻辑控制线路图很相似，基本设计思想也是一致的，只是在使用符号和表达方式上有一定区别，具有逻辑性强、直观易懂等特点。几种常见的梯形图图形符号如下：

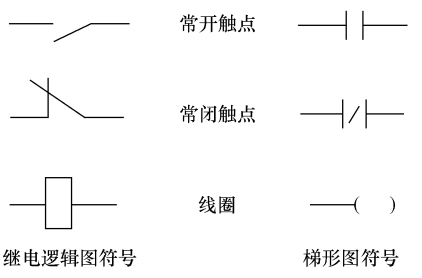


图 4-5　继电逻辑图符号和梯形图符号的对照

常开触点　┤ ├

常闭触点　┤/├

上升沿触点　|P|

下降沿触点　|N|

普通线圈　—（ ）　将当前值直接输出到线圈

取反线圈　—(/)　将当前值取反后输出到线圈

置位线圈　—(S)　若当前值为 1 就置线圈位为 1，为 0 则保持

复位线圈　—(R)　若当前值为 1 就置线圈值为 0，为 0 则保持

保持线圈　—(M)　具有掉电保护的普通线圈

保持置位线圈　—(SM)　具有掉电保护的置位线圈

保持复位线圈　—(RM)　具有掉电保护的复位线圈

上升沿触发线圈　—(P)　检测到上升沿时线圈置为 1

下降沿触发线圈　—(N)　检测到下降沿时线圈置为 1

其他　〔 〕　运算处理功能框

不同品牌可编程序控制器采用的梯形图符号略有不同，只要熟悉了一种，其他的也很容易辨认。如有用圆形或椭圆形的图形符号表示线圈和功能框的；常闭触点用“-|/|-”符号表示等。

图 4-6 是用梯形图符号表达的“与”、“或”、“非”逻辑关系。

通常，梯形图语言与指令表语言配合使用。指令表语言是用助记符来表示操作功能、描

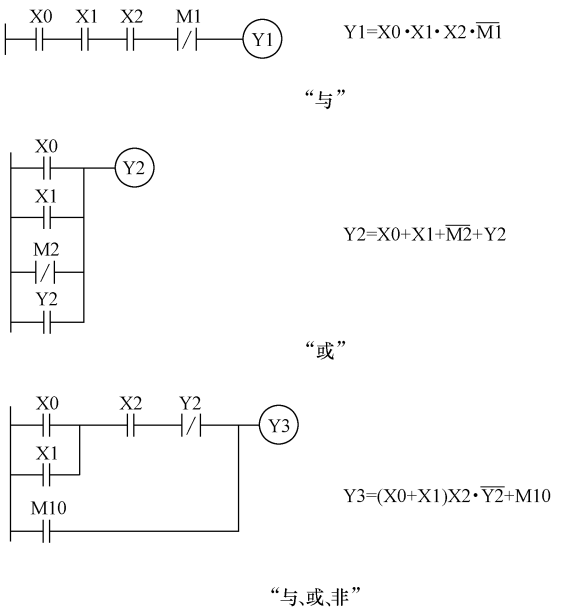


图 4-6 梯形图“与”、“或”、“非”逻辑关系

述程序的一种程序设计语言，也称为助记符语言或语句表语言。指令表语言类似于汇编语言，可以用来描述函数、功能块和程序，还可以在顺序功能表图中描述动作和转换的状态。

指令表语言的基本元素是指令，指令由操作码和操作数组成，操作数是已声明的变量和常量，也称为地址。有些操作符可带若干个操作数，这时各个操作数用逗号隔开。操作码用助记符表示，如 LD、AND、OR、NOT 等。每条指令都有它特定的功能，不同品牌可编程序控制器的指令助记符表示方式是不同的，如有的用助记符 LD 表示常开触点与左母线的连接指令，表示连接在梯级左母线的第一个元件。而有的则用助记符 STR（START）表示，它在英语中表示开始。一般地，助记符多用英语单词字头或缩写表示，所以很容易辨认。指令表的每条指令占一行，与梯形图语言的一个梯级类似，每条指令的格式如下，

指令：指令码（助记符） 操作数 （注释）

一条指令即一个操作指令。操作数表示该操作的地址。操作数与可编程序控制器的 I/O 模块有关，操作数的参数主要是 I/O 模块所在机架号、槽号及该信号在模板上的位（置）号。

采用助记符语言编程具有容易记忆、便于操作的特点，多数助记符与梯形图有一一对应关系，但对较复杂的控制系统，描述不够清晰。

4.3 电气控制的基本控制环节

在继电逻辑控制系统中，三相异步电动机的起动控制有直接起动、减压起动和软起动等方式。直接起动方式又称为全电压起动方式，即起动时电源电压全部施加在电动机定子绕组上。减压起动方式即起动时将电源电压降低一定的数值后再施加到电动机定子绕组上，待电动机的转速接近同步速后，再使电动机在电源电压下运行。软起动方式即使施加到电动机定子绕组上的电压从零按预设的函数关系逐渐上升，直至起动过程结束，再使电动机在全电压

下运行。无论哪种控制方式，都包含起停、自锁、互锁、联锁、顺序、可逆和点动这些基本控制环节的一种或多种及其组合。或者说，无论多么复杂的控制线路，都是由这些基本控制环节组合而成的，其最小单元就是这些基本控制环节。这些基本控制环节可以用电器元件的开关状态实现，也可以用数字逻辑实现。请读者注意，以下讨论的重点是逻辑和逻辑关系形成的概念，而不是某一电路本身。

4.3.1　三相异步电动机起停和点动控制

图 4-7 是两种三相异步电动机起停、自锁控制电路。

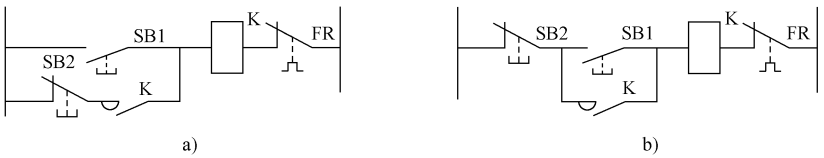


图 4-7　三相异步电动机起停、自锁电路

a）开启从优形式　b）关断从优形式

在图 4-7 中，按下 SB1，交流接触器 K 的线圈通电，其主触头闭合，电动机接通电源直接起动运转。同时，与 SB1 并联的常开辅助触头 K 闭合，使接触器线圈经两条路通电。这样，当手松开，SB2 自动复位时，接触器线圈仍可通过辅助触头 K 继续通电，从而保持电动机的连续运行。因为这个辅助触头起着自保持或自锁作用，称为自锁触头，这种电路则称为“自锁”环节。“自锁”环节是由命令它通电的主令电器（如本例的 SB1）的常开触头与本身的常开触头相并联组成，具有对命令的“记忆”功能。自锁环节不仅常用于电动机起停控制中，而且，凡是需要“记忆”的控制，也需要运用自锁环节。

图 4-7 中，接触器的常开触头的状态以正逻辑表示、常闭触头以反逻辑（逻辑“非”）表示，逻辑函数式为

$$K = \overline{SB2}\ (SB1 + K) \qquad (4\text{-}1)$$

图 4-8 是常用的三相笼型异步电动机全电压起停、点动控制线路。

某些生产机械在安装或维修后常常需要试车或调整，此时就需要“点动”控制，图 4-8 所示就是实现点动的几种控制线路。由图可见，“点动”控制就是当按下某一控制按钮时，其常开触头接通电动机起动控制回路，电动机转动，松开按钮后，由于按钮自动复位，其常开触头断开，电动机停转。点动起停的时间长短由操作者手动控制。

图 4-8a 中，如在自锁回路中设置一个拨动开关 SA，就可构成一个最基本的点动控制线路。当需要点动时，打开拨动

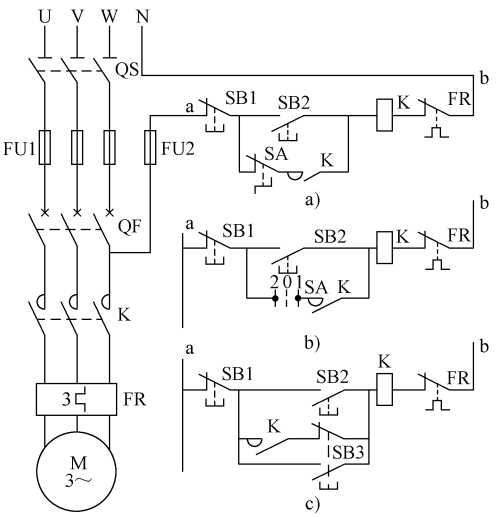


图 4-8　三相异步电动机全电压起停、点动控制线路

a）方案 1　b）方案 2　c）方案 3

开关 SA，使自锁回路断开，当按下按钮 SB2 时，接触器 K 通电吸合，主触头闭合，电动机接通电源起动。当手松开按钮时，接触器 K 断电释放，主触头断开，电动机被切断而停止。从而实现了点动控制。

图 4-8b 是用旋转开关 SA 控制点动的方案。当需要点动时将旋转开关 SA 转到断开位置，操作 SB2 即可实现点动控制。当需要连续工作时将旋转开关 SA 转到闭合位置，即可实现连续控制。这种方案比较实用，适用于不经常点动控制操作的场合。

图 4-8c 中是采用一个复合按钮 SB3 控制点动的方案，点动控制时，按下点动按钮 SB3，其常闭触头先断开自锁电路，常开触头后闭合，接通起动控制电路，接触器 K 线圈通电，主触头闭合，电动机起动旋转。当松开 SB3 时，接触器 K 线圈断电，主触头断开，电动机停止转动。若需要电动机连续运转，则按起动按钮 SB2 即可，停机时按下停止按钮 SB1 即可。这种方案的特点是单独设置一个点动按钮，适用于需经常点动控制操作的场合。

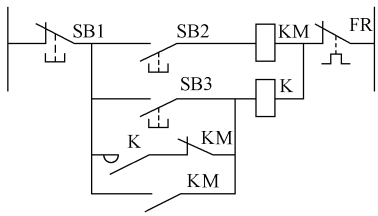


图 4-9　利用中间继电器实现点动控制

图 4-9 是利用中间继电器实现点动的控制线路。利用点动按钮 SB2 控制中间继电器 KM，KM 的常开触头并联在 SB3 两端，控制接触器 K，再控制电动机实现点动。当需要连续运转时，按下 SB3 按钮即可，当需要停转时按下 SB1 按钮。这种方案的特点是在线路中单独设置一个点动回路，适用于电动机功率较大并需经常点动控制操作的场合。

4.3.2　可逆控制与互锁控制

工厂中的各种生产机械通常具有上下、左右、前后、往返等具有方向的运动控制，这是通过控制电动机的正转或反转实现的，称为“可逆”控制。如电梯的上下运行、起重机和行车吊钩的上升与下降、机床工作台的前进与后退及主轴的正转与反转等运动的控制，就是通过“可逆”控制实现的。同一机械的上下、左右、前后、往返等的两个运动方向是唯一的、互斥的、互为反逻辑，即任意时刻只可能有一个方向的运动。由交流电动机工作原理可知，若将接至三相异步电动机的三相电源中的任意两相对调，即可实现三相异步电动机反向旋转。所以，我们可用两个异步电动机的起停电路组合而成，即用两个方向相反的单向控制线路组合而成可逆控制线路，如图 4-10 所示。

由图 4-10 可见，主电路中 K1、K2 所控制的电源相序相反，因而可实现电动机反向运行。由控制电路可明显地看到，它只是在每个起停电路中分别串入了常闭辅助触头 K2 和 K1。如果不考虑串入的常闭辅助触头 K1、K2，其原理不言而喻。但是，假设不串入常闭辅助触头 K1、K2，而 SB2 和 SB3 又被同时按下，就会造成短路事故，这是绝对不允许的。现在再来分析串入的常闭辅助触头 K1、K2 的作用，K1、K2 分别是两个接触器 K1 和 K2 的常闭辅助触头，当一个接触器通电时，如 K1，其常闭辅助触头 K1 断开接触器 K2 的线圈电路，相反，当接触器 K2 通电时，其常闭辅助触头 K2 断开接触器 K1 的线圈电路，所以接触器不会同时带电闭合，我们称这种利用两个接触器（或继电器）的辅助触头互相约束的控制方法为“互锁”控制环节，而起互锁作用的触头叫做互锁触头。由此可见，互锁环节是可逆控制线路中防止电源短路的保证。由图 4-10 可写出可逆控制与互锁控制线路的逻辑函数式为

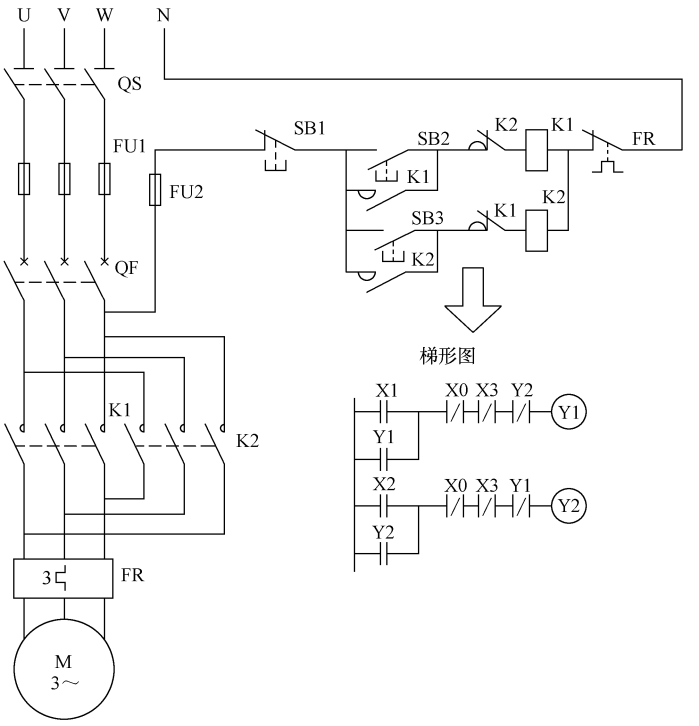


图 4-10　三相异步电动机可逆控制线路

$$K1=\overline{SB1}\ (SB2+K1)\ \overline{K2}\cdot\overline{FR};\ K2=\overline{SB1}\ (SB3+K2)\ \overline{K1}\cdot\overline{FR}$$

对应于梯形图的逻辑函数式：

$$Y1=(X1+Y1)\ \overline{X0}\cdot\overline{X3}\cdot\overline{Y2};\ Y2=(X2+Y2)\ \overline{X0}\cdot\overline{X3}\cdot\overline{Y1}$$

梯形图逻辑由编程软元件线圈 Y1 和 Y2 及其常开/常闭触头 Y1 和 Y2、常开触点 X1、X2 和常闭触头 X0 组成。线圈 Y1 和 Y2 的状态由与其相连的梯形图决定，常闭触头 X0 是常开触头 X1 和 X2 的约束条件；常闭触头 Y1 和 Y2 是互锁条件，它使 K1、K2 在任何时刻均不能同时得电。图 4-10 的逻辑关系可推广到对 2 台电动机的控制，这 2 台电动机在任何时刻均不能同时起停，只能有一台在工作。

图 4-11 是一个 2 选 1 控制电路，KM1 和 KM2 两个输入中，先选者优先，同时另一个会被禁止。

图 4-11 中，K3 和 K4 两个接触器分别由接触器 K4 的常闭辅助触头 K4 和接触器 K3 的常闭辅助触头 K3 互锁，同时常闭辅助触头 K4 和 K3 又是接触器 K1 和 K2 的常开辅助触头 K1 和 K2 的约束条件，由此可写出逻辑函数式如下，

$$K3=K1\cdot\overline{K4}$$

$$K4=K2\cdot\overline{K3}$$

既相互联系又互相制约，并能起到顺序控制作用的“互锁”控制称为顺序联锁控制。其控制原则是，要求甲接触器动作时，乙接触器不能动作，则需将甲接触器的常闭触头串在乙接触器的线圈电路中；要求甲接触器动作后乙接触器方能动作，则需将甲接触器的常开触头串在乙接触器的线圈电路中，以此类推，可推广到 n 个需相互顺序联锁控制的对象。

对于较复杂的时序逻辑电路，为了区分各个动作程序的状态，以达到顺序动作的目的，

设计时往往需要设置中间记忆元件，记忆输入信号的变化，如图 4-11 中的 K1 和 K2 即是中间记忆元件，中间记忆元件一般采用中间继电器。

图 4-12 是一种利用互锁控制的自动往返循环控制线路，电路的原理可适用于各种控制进给运动到预定点后自动停止的限位控制保护等，其应用相当广泛。

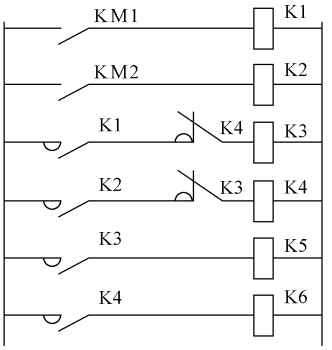


图 4-11　2 选 1 控制电路

图 4-12 所示的控制线路是采用行程开关来实现的，当装于生产机械运动部件上的撞块压合行程开关时，行程开关的触头动作，从而实现电路的切换，以达到自动往复控制的目的，也可以采用非接触式接近开关代替行程开关。限位开关 SQ1 放在左端需要反向的位置，而 SQ2 放在右端需要反向的位置，机械挡铁装在运动部件上。利用正向或反向起动按钮启动，如按正转按钮 SB2，接触器 K1 通电吸合并自锁，电动机作正向旋转带动机械运动部件左移，当运动部件移至左端并碰到 SQ1 时，将 SQ1 压下，其常闭触头断开，切断接触器 K1 线圈电路，同时其常开触头闭合，接通反转接触器 K2 线圈电路，此时电动机由正向旋转变为反向旋转，带动运动部件向右移动，直到压下 SQ2 限位开关电动机由反转又变成正转，这样，驱动运动部件的运动是往复循环运动。运动部件每经过一个自动往复循环，电动机要进行两次反接制动过程，将出现较大的反接制动电流和机械冲击。因此，这种线路只适用于电动机容量较小、循环周期较长、电动机转轴具有足够刚性的拖动系统中。另外，在选择接触器容量时，应比一般情况下选择的容量大一些。

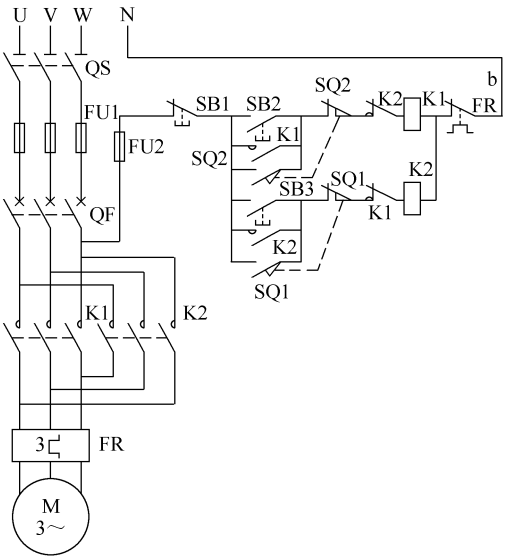


图 4-12　自动往复循环控制线路

一些生产机械的运动部件的行程、超程及相对位置，往往要求限制在一定范围内，如直线运动切削机床、升降机械等需要有限位控制，有些生产机械工作台的自动往复运动需要有行程限位等。如起重设备的左、右，上、下，前、后运动行程都必须有适当的位置保护，否则就可能损坏生产机械并造成人身事故，这类保护称为位置保护。位置保护、限位控制和行程限位在控制原理上是一致的，可以采用限位开关、干簧继电器、接近开关等电器元件构成控制电路，当运动部件到达设定位置时，开关动作，其常闭触头通常串联在接触器控制电路中，因常闭触头打开而使接触器释放，于是运动部件停止运行。因此，可根据图 4-12 所示的控制原理举一反三，设计出许多控制方案。

4.3.3　联锁控制

生产机械或自动生产线都由许多运动的部件组成，不同的运动部件之间互相有联系又互相制约。例如，电梯及升降机械的上下运行不能同时，需要互锁控制；而机械加工机床的主轴必须在油泵电机起动，使其充分润滑后才能起动；又如，龙门刨床的工作台运动时不允许刀架移动等。这种互相联系而又互相制约的控制称为联锁控制。相互制约的联锁控制，实际上也称为“互锁”控制，但这里的互锁是为顺序控制做准备的，或是起到顺序控制的作用，从而使互相制约的各方又互相紧密联系，这种控制称为顺序联锁控制。其控制原则是，要求甲接触器动作时，乙接触器不能动作，则需将甲接触器的常闭触头串在乙接触器的线圈电路中；要求甲接触器动作后乙接触器方能动作，则需将甲接触器的常开触头串在乙接触器的线圈电路中，以此类推，可推广到 n 个需相互顺序联锁控制的对象。

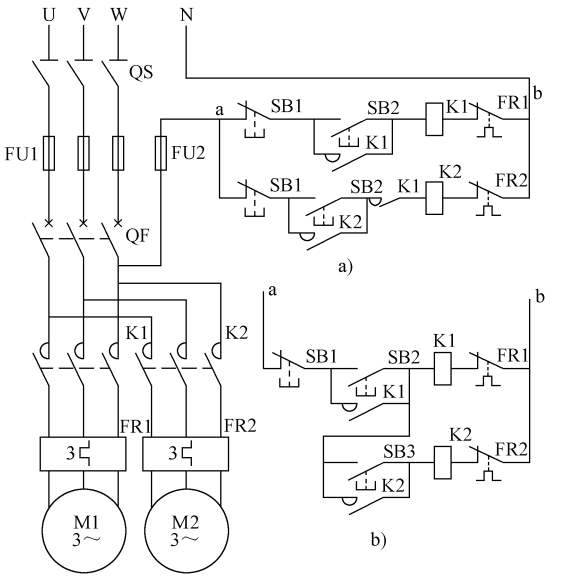


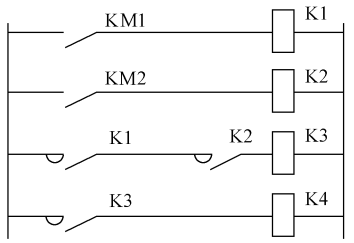
图 4-13　三相异步电动机联锁控制线路

a）方案 1　b）方案 2

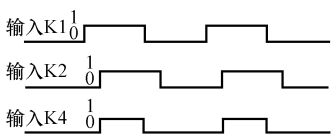
图 4-13 所示是将油泵电动机接触器 K1 的常开接触头串入主拖动电动机接触器 K2 的线圈电路中来实现的，只有当 K1 先起动，K2 才能起动。图 4-13b 的接法可以省去 K1 的常开触头，使线路得到简化。类似的工艺过程在许多其他生产设备上同样存在，因此这是一个典型的联锁控制线路。

4.3.4　自锁、互锁和联锁的逻辑控制关系

自锁是实现控制线路长期运行的必要环节，互锁是可逆运行控制中防止短路事故的约束条件，而联锁则是实现顺序控制的链接条件。这些实质上就是逻辑上的“与”、“或”、“非”关系。例如当接触器 K1 动作后才允许接触器 K2 动作，做法是将接触器 K1 的常开触头串联于接触器 K2 的线圈回路中，从而构成逻辑“与”联锁控制关系，如图 4-14 所示。



a)



b)

输入		输出
K1	K2	K4
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

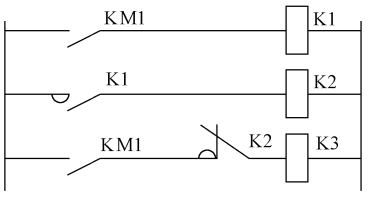
c)

图 4-14　逻辑“与”联锁控制原理图

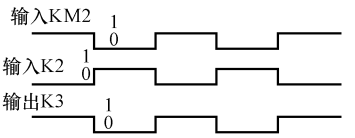
a）电路图　b）时序图　c）真值表

图 4-14 中，KM1 和 KM2 是 K1 和 K2 的动作信号，触头 K1 和 K2 是 K3 动作的约束条件，输出逻辑表达式为 K4 = K1 · K2。

再如，当接触器 K2 动作后不允许接触器 K3 动作，做法是将接触器 K2 的常闭触头串联于接触器 K3 的线圈回路中，构成逻辑“非”互锁控制关系，如图 4-15 所示。



a)



b)

输入		输出
KM1	K2	K3
0	0	0
1	0	1
1	1	0
0	1	0

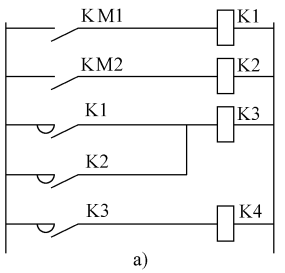
c)

图 4-15　逻辑“非”互锁控制原理图

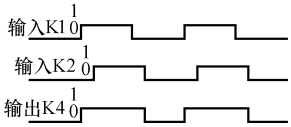
a）电路图　b）时序图　c）真值表

图 4-15 中，KM1 是 K1 的动作信号，触头 K1 是 K2 动作的条件，KM2 是 K3 的动作信号，常闭触头 K2 是 K3 动作的约束条件，输出逻辑表达式为 $K3 = KM2 \cdot \overline{K2}$。

如果将两个及以上常开触头并联，只要其中一个常开触头闭合就使输出电器的线圈通电，这就构成“或”自锁控制关系，如图 4-16 所示。



a)



b)

输入		输出
K1	K2	K4
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

c)

图 4-16　逻辑“或”自锁控制原理图

a）电路图　b）时序图　c）真值表

图 4-16 中，KM1 和 KM2 是 K1 和 K2 的动作信号，触头 K1 或 K2 是 K3 动作的条件，K3 是中间记忆元件，输出逻辑表达式为 K3 = K1 + K2，K4 = K3。

电气控制系统中的自锁环节是实现设备长期运行的措施，互锁环节是电动机可逆控制中防止两个电器同时通电避免产生事故的保证。而联锁环节则是实现几种运动体之间的互相联系又互相制约的桥梁。这些关系实质上是逻辑上“与”、“或”、“非”的逻辑关系。例如联锁控制中，当接触器 K1 动作后才允许 K2 动作，即将 K1 的常开触头串联于 K2 的线圈电路中，这就是“与”逻辑关系。互锁及联锁控制中，当 K1 动作后不允许 K2 动作，即将 K1 的常闭触头串联于 K2 的线圈电路中，这就是“非”逻辑关系，也称互为反逻辑。自锁及多地点控制中，将两个及以上常开触头并联，只要其中一个常开触头闭合就使线圈通电，这就是“或”逻辑关系等。在工程上，这三种逻辑关系通常是组合在一起的，分析线路时应注意区分，区分的最简捷的办法是将复杂的控制线路拆分成最小单元，然后一步一步地进行逻辑组合，这样可以获得清晰的逻辑控制关系和明确的线路工作原理。

4.3.5　多地点控制

实际生活和生产现场中，通常需要在两地或两地以上的地点进行控制操作，如自动电梯就需要多地点控制，人在任意层的楼道上都能够得到控制，当人在梯厢里在里面控制，人未上梯厢前在楼道上控制等。由前述可想到，用一组按钮可以在一处进行控制，可以推想，要在多地进行控制，就应该有多组按钮，而且，这多组按钮的连接原则必须是各地点起动按钮的常开触头要并联，构成“或”逻辑；各停车按钮的常闭触头应串联，构成“与”逻辑。图 4-17 是实现三地控制的线路。根据这一原则可推广于 n 个地点的控制。

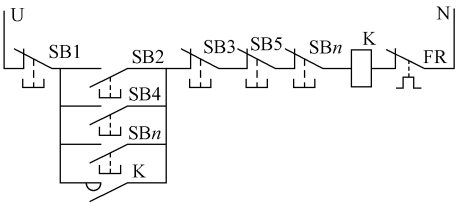


图 4-17　多地点控制线路

图 4-18 是一种自动增压给水设备的电气控制系统，系统由蓄水箱、增压气压罐和水泵机组组成，分别安装在不同地点。增压气压罐的作用是增加水的压力，以满足给水水压的要求。系统的运行要求如下：

（1）保证水泵机组只在蓄水箱中有充足水的状态下工作，防止水泵电机空转，造成机械损坏。因此，应设置蓄水箱水位控制，水位控制器应自动控制在水位上限位置停止水泵电机工作、下限位置起动水泵电机工作，水泵机组只工作在上、下限之间范围。

（2）自动增压（气压）给水设备是补偿补气式，在运行过程中需要及时补气，因此，增压气压罐体的压力也需要自动控制，其压力不能超过上、下限值运行。为此，应设置压力控制。

（3）水泵机组在一定的限定压力值范围内不断地自动循环运行，向用户供水。

图 4-18 中，SR1、SR2 分别是蓄水箱的下限（L）和上限（H）水位监测干簧管，当蓄水箱的水位高于下限水位时，SR1 闭合。KM3、KM4 用于信号指示、补气罐的控制及蓄水箱进水控制，本图有删节，未画出，读者可以想象出这一部分的电路原理。KP 是电接点压力表。系统工作时，合上刀开关 QS、低压断路器 QF、旋转开关 SA，电源指示灯 HL1 发亮，指示系统开始工作。当蓄水池水位正常时，SR2 闭合，中间继电器 KM 经干簧管 SR1 动作并自锁，KM 的常开触头闭合，指示灯 HL2 发亮，指示蓄水箱水位正常。当增压气压罐压力下降时，电接点压力表 KP 下限（L）触头闭合，中间继电器 KM1 动作，其常闭触头断开，常开触头同时闭合，接触器 K 得电动作，水泵电机起动运转，其常开辅助触头 K 闭合，并由 KM1 自锁，当增压气压罐压力上升到上限值时，电接点压力表 KP 断开，但不切断电路，增压气压罐压力继续

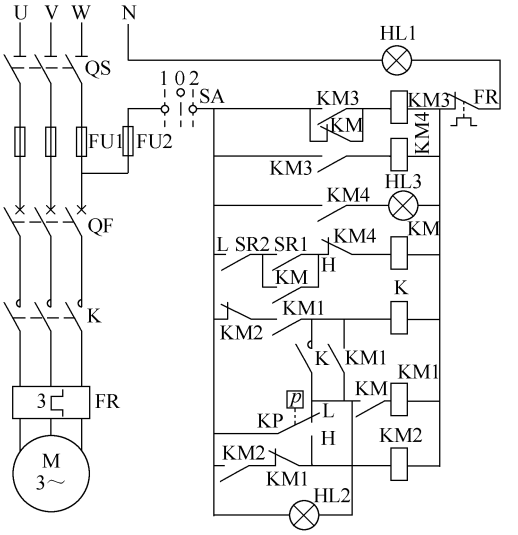


图 4-18　自动增压给水设备电气控制原理图

上升，KP 上限（H）触头闭合，中间继电器 KM2 得电，其常闭触头断开、常开触头闭合，并由 KM2 自锁，切断 K、KM1，水泵电机断电而停止运转。随着用户不断地用水，增压气压罐压力下降，当压力下降到电接点压力表 KP 的下限值时，KP 下限触头闭合，自动进入下一个循环，以此类推。如要停止系统运行，可断开 S 或 QS 即可。检修时应断开 QS 隔离电源。

由上可见，系统中采用了位置控制及压力控制的原理。其功能是保证给水的连续性并保持一定的给水压力。此外，还有保护作用，水位（置）控制除了控制蓄水箱的进水量以保证有足够的水量外，还起到避免水泵机组在无水状态下空转而损坏的可能性。压力控制除了控制水压能满足用水的要求外，还起到避免压力过高而引起增压气压罐损坏等事故。这种控制原理在电气控制系统中是常见的，只要能掌握一些基本的单元控制电路及逻辑组合的方法，举一反三，就能设计出理想的控制电路或系统。

另外对于风机、水泵等流量机械往往需要对管网压力进行控制，其恒压控制部分往往需要对模拟量进行 PID 控制，而其上下极限控制部分的控制原理与上述相似。可参见图 3-33。

为实现以上各种控制与保护，需要采用各种专用的温度、压力、流量、速度传感器或继电器，它们的基本原理都是在控制回路中串联一些受这些参数控制的常开触头或常闭触头，通过逻辑组合、联锁控制等实现的。有些继电器的动作值能在一定范围内调节，以满足不同场合的保护需要。

4.4 三相交流电动机的起动控制

通常对小容量的三相异步电动机均采用额定电压下全电压直接起动方式。对于大、中容量三相异步电动机，当其容量超过供电变压器的 5% ~25% 时应采用减压起动方式，以防止过大的起动电流引起电源电压的波动，影响其他设备的正常运行。三相笼型异步电动机广泛采用软起动、星-三角（Y-△）减压起动和串自耦变压器减压起动方式。绕线式三相异步电动机主要采用定子串电阻减压起动方式。随着通用变频器和高压变频器的发展和普及应用，Y-△减压起动、自耦变压器减压起动、定子串电阻减压起动等设备已逐渐被淘汰，取而代之的是变频器和软起动器控制。但从电气控制角度看，Y-△减压起动、自耦变压器减压起动和定子串电阻减压起动等传统控制线路的逻辑控制方法和思维方式还是十分重要的，仍然是现代电气控制方法和设计方法的基础。因此，本节讨论的各种控制线路的目的并不是某个线路结构本身，而是通过它进一步介绍电气控制线路的设计方法和思路，从而建立逻辑控制思维方法的基础。

4.4.1 星-三角减压起动控制线路

Y-△减压起动方法是，起动时将三相笼型异步电动机的定子绕组接成Y，这时加在电动机每相绕组上的电压为电源电压额定值的 $1/\sqrt{3}$，起动电流降为△联结直接起动电流的 1/3，这时起动转矩也降为△联结直接起动转矩的 1/3，减小了起动电流对电网的影响。待电动机起动后，按预先设定的时间将定子绕组换成△联结，使电动机在额定电压下正常运转。这种起动方法适用于容量较小的电动机及轻载状态下起动。额定功率在 4kW 及以上的三相笼型异步电动机的定子绕组均为△联结，故都可以采用Y-△减压起动方法。Y-△起动的转

换控制电路可视电动机的容量大小、应用场合等的不同，有不同的接线方式。图 4-19 是一种接线形式。

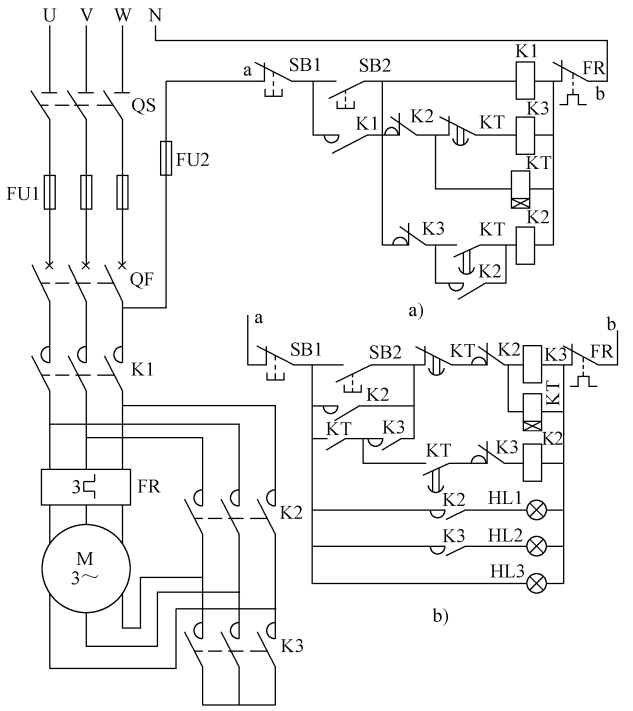


图 4-19　丫-△减压起动控制线路

a）方案 1　b）方案 2，方案 2 是没有主接触器的丫-△减压起动控制线路

图 4-19a 方案 1 中，当三相笼型异步电动机起动时，合上低压断路器 QF，按下起动按钮 SB2，主接触器 K1 与丫联结的接触器 K3 及时间继电器 KT 的线圈同时得电，接触器 K3 的主触头将电动机接成丫，并经 K1 的主触头接至电源上，电动机减压起动。当 KT 的延时设定值到达时，K3 线圈失电，△联结的接触器 K2 的线圈得电，电动机的主电路被换接成△，电动机正常运转。时间继电器 KT 仅在起动过程中通电，丫-△切换后，KT 处于断电状态。丫联结的接触器 K3 与△联结的接触器 K2 之间形成互锁，以保证两者不能同时带电运行。时间继电器 K 的延时设定值取决于电动机的起动时间。电动机的起动时间与其容量和所带负载大小有关。

图 4-19b 方案 2 是省去主接触器的一种方法，当三相笼型异步电动机起动时，合上低压断路器 QF，三相电源电压直接进入电动机定子绕组，但此时 K3 线圈和 K2 线圈均不得电，电动机也不会运转。只有按下起动按钮 SB2 后，电动机才能够运转。线路的原理与图 4-19a 相似，其中，K3 和 K2 的常闭触头互锁，KT 的瞬时触头与 K3 串联构成接触器 K3 的自锁回路，HL3 是电源指示灯，HL1 和 HL2 分别是丫-△换接指示。其他请读者自行分析。

由图 4-19 的控制线路可以推广应用于 3 台电机控制。假设 K1、K2 和 K3 分别控制一台电动机，按下起动按钮 SB2 后，电动机 1 和电动机 3 同时运行，当时间继电器 KT 的延时设定值到达时，电动机 3 停止运行，电动机 1 和电动机 2 同时运行，请读者自行画出主电路并分析。

4.4.2 自耦变压器减压起动控制线路

自耦变压器减压起动是先通过自耦变压器降压，再起动三相笼型异步电动机的减压起动方法，适用于不频繁起动 10kW 及以上的三相笼型异步电动机，起动转矩可以通过改变抽头的连接位置改变。自耦变压器通常有 65%（60%）和 80% 两组起动电压抽头，可根据起动转矩选择不同抽头，得到不同的起动电压和起动转矩。若需要起动转矩较小时，可选用 65%（60%）抽头；需要起动转矩较大时，可选用 80% 抽头。三相笼型异步电动机起动时，其定子绕组得到的电压是自耦变压器的二次电压，一旦起动完毕，自耦变压器便被短接。电源的额定电压即自耦变压器的一次电压直接加到电动机的定子绕组上，电动机进入全电压正常工作状态。图 4-20 是一种自耦变压器减压起动控制线路。

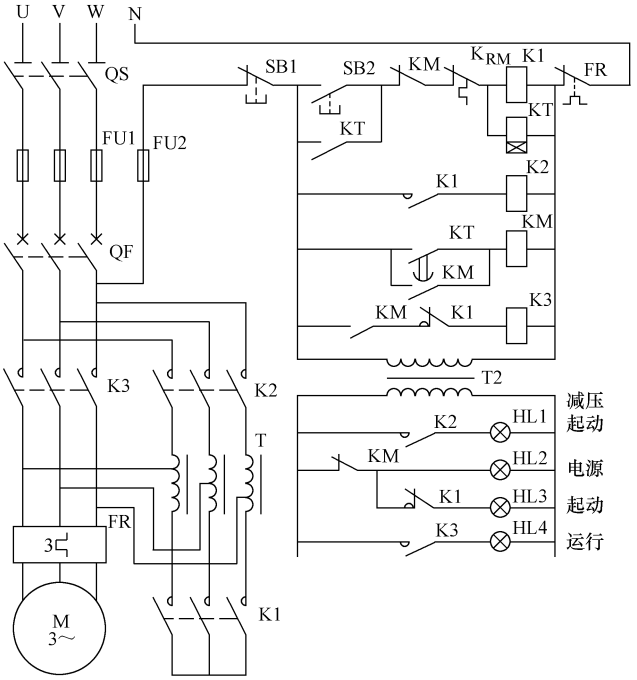


图 4-20 自耦变压器减压起动控制线路

起动时，合上刀开关 QS、低压断路器 QF，按下起动按钮 SB2，接触器 K1 的线圈和时间继电器 KT 的线圈同时得电，接触器 K1 的主触头闭合，将自耦变压器的三相绕组接成星形，KT 的瞬时常开触头闭合构成自锁，接触器 K1 的一个常开辅助触头接通接触器 K2 的线圈电源，从而将电动机定子绕组经自耦变压器抽头接至电源，电动机开始减压起动。时间继电器 KT 经过一定延时后，其延时常开触头闭合，使中间继电器 KM 线圈得电，其常闭触头打开，使接触器 K1 线圈断电复位，同时 KM 的常开触头闭合构成自锁，中间继电器 KM 的另一个常开触头接通接触器 K3 的线圈电源，同时，在 K3 支路中的接触器 K1 的常闭触头复位，接触器 K1 和 K2 主触头断开，从而将自耦变压器从电网上切除。接触器 K3 的主触头闭合，将电动机直接接到电网电源上运行，完成了整个起动过程。整个起动过程的状态通过控制变压器二次侧的各指示灯显示。

有一些自耦降压变压器线圈内部增加了热敏温度保护开关（动断）。在使用时，其热敏

动断常闭触头串入控制回路（见图 4-20 中的 K_{RM}），当电动机起动时间超过自耦降压变压器允许温度限值或电动机起动过于频繁，造成自耦降压变压器过热，热敏温度保护开关就会动作，断开控制回路，使电动机停止工作，此时不能再次起动电动机。只有当自耦减压变压器线圈的温度下降到一定值时，热敏温度保护开关自动复位后，才能重新起动电动机。同样，自耦变压器减压起动方法的转换控制电路可视电动机的容量大小、应用场合等的不同，有不同的接线方式。

图 4-20 的控制线路可以推广应用于 3 台电动机顺序起动控制。假设 K1、K2 和 K3 分别控制一台电动机，按下起动按钮 SB2 后，电动机 1 和电动机 2 顺序起动运行，当时间继电器 KT 的延时设定值到达时，电动机 1 和电动机 2 停止运行，电动机 3 起动运行，请读者自行画出主电路并分析。

4.4.3　三相绕线转子异步电动机的起动控制

三相绕线转子异步电动机转子回路串电阻减压起动方法是在起动时，在三相转子电路中串接起动电阻，使加到转子绕组的起动电压降低，起动结束后再将电阻短接，使电动机在全电压下运行。显然，这种方法会消耗大量的电能，且装置成本较高，一般仅在一些特殊应用场合下使用，如起重机械、抓斗机等。图 4-21（方案 1）是一种转子回路串接电阻的起动控制线路，它是通过欠电流继电器的释放值设定进行控制的，利用电动机起动过程中，转子电流大小的变化来控制电阻的分段切除的方法。

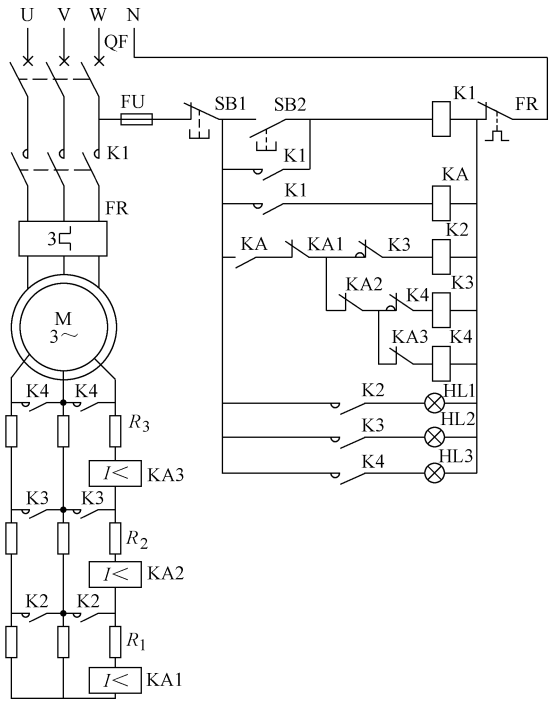


图 4-21　转子电路串电阻减压起动控制线路（方案 1）

图 4-21 中，在起动前，起动电阻全部接入电路，在起动过程中，起动电阻被逐段地短接。电阻的短接是采用三只欠电流继电器 KA1、KA2、KA3 和三只接触器 K2、K3、K4 的相互配合来完成的。正常运行时，线路中只有接触器 K1、K4 长期运行，欠电流继电器 KA1、KA2、KA3 的线圈被接触器 K4 短接，接触器 K2、K3 的线圈分别被接触器 K3、K4 的常闭触头断开。这样一方面可减少耗电，另一方面可延长使用寿命。

欠电流继电器 KA1、KA2、KA3 的线圈分别串接在电动机转子回路中。这三个欠电流继电器的吸合电流都一样，但释放电流不一样。其中，KA1 的释放电流最大，KA2 次之，KA3 最小。电动机刚起动时，起动电流很大，KA1、KA2、KA3 都吸合，它们的常闭触头断开，接触器 K2、K3、K4 不动作，全部电阻被接入电动机转子回路中。当电动机转速升高后，电流减小，KA1 首先释放，它的常闭触头 KA1 复位闭合，使接触器 K2 线圈得电，主触头短接第一段转子电阻 R1，这时电动机转子电流增加，随着转速升高，电流逐渐下降，使 KA2 释

放，它的常闭触头 KA2 复位闭合，接触器 K3 线圈得电，主触头短接第二段起动电阻 R2。同时利用其常闭辅助触头 K3 将接触器 K2 线圈断电退出运行，这时电动机转子电流又增加，随着转速继续升高，电流进一步逐渐下降，使 KA3 释放，它的常闭触头 KA3 复位闭合，接触器 K4 线圈得电，转子串联电阻全部被短接，同时利用其常闭辅助触头 K4 将接触器 K3 线圈断电退出运行，电动机起动完毕。

起动电阻的分段数量是根据不同要求确定的，可以是 n 段，短接起动过程如上述一样。而短接的方式有三相电阻不平衡短接法和三相电阻平衡短接法两种，所谓不平衡短接是每相的起动电阻轮流被短接，而平衡短接是三相的起动电阻同时被短接。但无论采用不平衡或平衡短接法，其作用基本相同。不平衡短接方法通常采用凸轮控制器，由于凸轮控制器中各对触头闭合顺序按不平衡短接法设计，这样使得控制电路相对简单。平衡短接法就是采用接触器短接的方法。

如果在起动过程中，采用三只时间继电器 KT1、KT2、KT3 和三只接触器 K2、K3、K4 的相互配合来完成起动电阻的短接，只要根据需要设定三只时间继电器的定时时间满足 $t_1 < t_2 < t_3$ 即可。线路的动作规律与方案 1 相同。同样，正常运行时，线路中只有 K1、K4 长期通电，KT1、KT2、KT3、KM2、KM3 在完成控制任务后相继退出运行。如图 4-22（方案 2）所示。

图 4-22 中，在起动前，起动电阻全部接入电路，在起动过程中，按照 3 个时间继电器的定时值逐段将起动电阻短接切除。接触器 K2、K3、K4 的常闭触头控制时间继电器 KT1 的线圈，KT1 的延时闭合触头控制接触器 K2 的线圈，接触器 K2 的常开触头控制时间继电器 KT2 的线圈，KT2 的延时闭合触头控制接触器 K3 的线圈，接触器 K3 的常开触头控制时间继电器 KT3 的线圈，KT3 的延时闭合触头控制接触器 K4 的线圈。

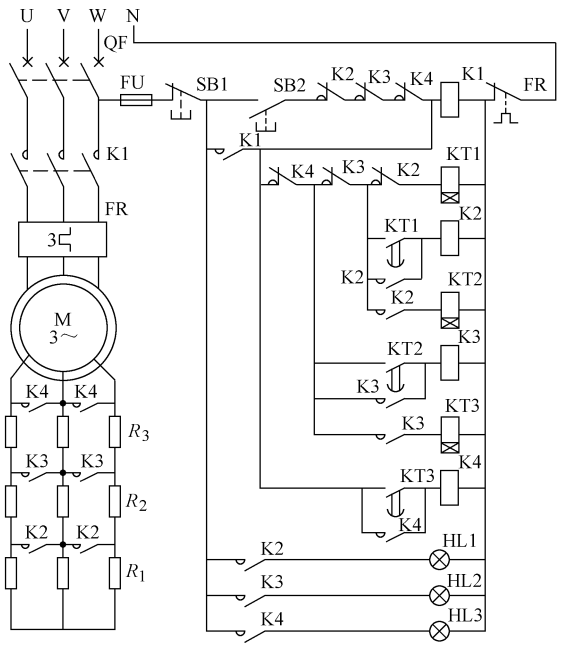


图 4-22　转子电路串电阻减压起动控制线路（方案 2）

减压起动时，按下起动按钮 SB2，如果接触器 K2、K3、K4 处于原始状态，则起动，接触器 K1 的常开触头自锁，主触头闭合，电动机开始降压运行，同时，控制回路中的接触器 K2、K3、K4 常闭触头串联回路使 KT1 得电，当电动机转速升高后，KT1 定时到，KT1 的延时闭合触头控制接触器 K2 的线圈得电吸合，K2 的主触头将第一段转子电阻 R_1 短接，同时，接触器 K2 的一个常闭触头断开时间继电器 KT1 的线圈电源使其退出运行，并使时间继电器 KT2 的线圈得电。当 KT2 定时到，KT2 的延时闭合触头控制接触器 K3 的线圈得电吸合，K3 的主触头将第二段转子电阻 R_2 短接，同时，接触器 K3 的一个常闭触头断开时间继电器 KT2 的线圈电源使其退出运行，并使时间继电器 KT3 的线圈得电。当 KT3 定时到，KT3 的延时闭合触头控制接触器 K4 的线圈得电吸合，K4

的主触头将第三段转子电阻 R_3 短接，此时转子串联电阻全部被短接，同时，接触器 K4 的一个常闭触头断开时间继电器 KT3 的线圈电源使其退出运行，并自锁时间继电器 KT3 的延时闭合触头，电动机起动完毕，投入正常运行。

图 4-21、图 4-22 所示的控制线路的控制方法和思路可以推广应用到多电机顺序控制场合，两图实质上是一种顺序控制方法和思路，图 4-21 是按照电流大小顺序控制，而图 4-22 是按延时长短顺序控制。因此，我们可以假设将 3 段电阻视为 3 台电动机，则图 4-21、图 4-22 的控制部分可构成 4 台电动机的顺序控制电路。请读者自行画出主电路并分析。

4.4.4　固态减压软起动控制

固态减压软起动器，国外称为 Solid State Soft Starter（固态软起动器），有一种小容量的称 Solid State Contactor（固态接触器），是一种固态减压软起动控制装置，它实质上是一种利用晶闸管调压方式的减压起动方法，是一种集软起动、软停车、制动、轻载节能和多种保护功能于一体的三相异步电动机减压起动装置。图 4-23 是三相笼型异步电动机直接全电压起动、丫-△减压起动和软起动器起动特性的比较。

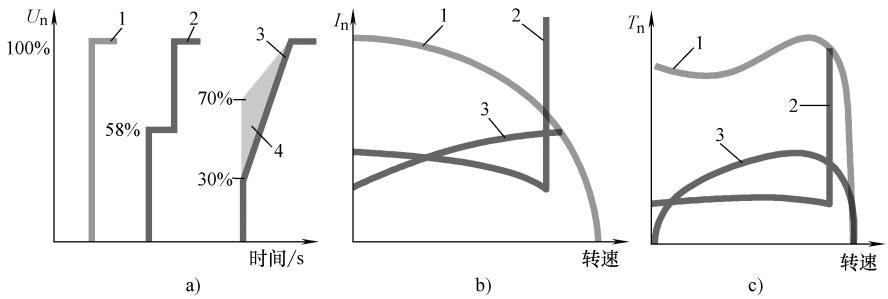


图 4-23　三种起动方法的比较

a）电动机的起动电压　b）电动机的起动电流　c）电动机的起动转矩

1—直接全电压起动　2—丫-△减压起动　3—软起动器起动　4—斜坡调节

由图 4-23 可见，软起动器起动具有明显的优点，起动电压可调，起动电流大幅降低，起动转矩平滑。因此，软起动器在工业企业得到广泛普及应用，以取代丫-△减压起动和自耦变压器减压起动。

近年来，国内外软起动器技术发展很快，从最初的单一软起动、软停机、故障保护、轻载节能等功能，发展为全数字、智能化异步电动机起动控制装置。新型的软起动器控制功能多样化，多种软起动曲线、软停机方式，故障检测和保护功能智能化，具有通信连网功能，体积小型化，规格多，适应范围广。

1. 固态减压软起动控制的原理

目前市场上的产品分为固态减压软起动柜和软起动器两种。固态减压软起动柜由电动机的起停控制装置和软起动器组成，其核心部件是软起动器，产品一般做成控制柜形式，只要接通电源及相应连线即可工作。软起动器是由晶闸管模块和以单片机为核心的控制电路组成的，产品一般做成装置型，外形类似于通用变频器，使用时需要另外配置电动机起停和旁路控制线路。

软起动器的主要结构是一组串接于三相电源与被控电动机之间的三组（有的是两组）

反并联晶闸管或双向晶闸管及其控制电路，利用晶闸管移相控制原理，控制三相反并联晶闸管的导通角，从而控制输出电压，使被控电动机的输入电压和电流按照预先设定的起动曲线平滑改变，从而实现平滑起动和控制，即软起动。这样，可基本消除电流的跃变，减小起动电流对电网、电机本身及相连设备的电气及机械冲击。起动时，使晶闸管的导通角从 0°开始，逐渐前移，电动机的端电压从零开始，按预设函数关系逐渐上升，直至达到满足起动转矩而使电动机顺利起动为止。在整个起动过程中，软起动器的输出是一个平滑升压过程（具有限流功能），直到晶闸管全导通，电动机在额定电压下工作，或通过旁路装置使电动机挂接到电网上全电压运行；停止时，则相反。这就是软起动控制器的工作原理。

软起动器一般都具有软起动、软停止、限流起动、脉冲突跳起动、斜坡起动、泵控制、预置低速运行、制动、节能运行等控制和故障诊断等功能。新型的全数字软起动器或称智能化软起动器还采用双 CPU，控制电路板采用 SMT 表面贴片工艺，可靠性高。具有多种起动方式和控制方式，一台软起动器可拖动多台电动机；具有过电流、过载、断相、晶闸管过热等保护功能，以及智能风机控制功能；具有可编程输入输出触头、模拟量输入输出触头、转速反馈控制、电动机热敏电阻输入触头，以及 LCD 液晶数字显示、键盘操作、标准 RS-232/RS-485 通信接口，支持 MODBUS、PROFIBUS-DP、AS-i、DeviceNet 等现场总线通信协议。固态接触器式软起动器的外形结构与普通交流接触器的外形几乎相同，可以安装在标准的 35mm 导轨上。用法也与普通交流接触器类似。图 4-24 是新型的、比较先进的全数字软起动器原理框图，图 4-24a 是其内部结构图，图 4-24b 是控制板原理框图。图 4-25 是接线原理图。

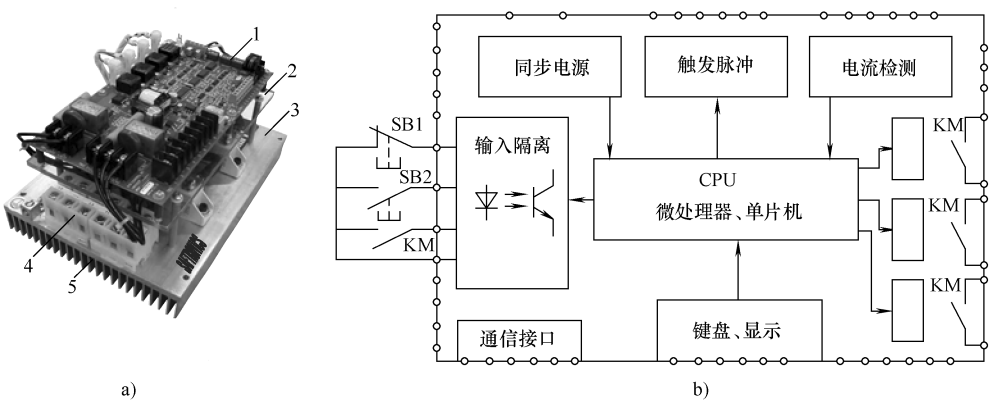


图 4-24　全数字软起动器原理框图

a）内部结构示意图　b）控制板原理框图

1—控制板　2—主电路板　3—底板　4—主接线端子　5—散热器

从图 4-24 和图 4-25 可见，主回路是一个晶闸管调压回路，由 3 对反并联晶闸管组成，另外，利用 3 个霍尔传感器检测三相定子电流。在起动过程中，6 个晶闸管的触发延迟角由 CPU 控制，使加在电动机三相定子绕组上的电压由零逐渐平滑地升至全电压。同时，电流检测单元将检测的三相定子电流送到 CPU 进行运算和判断，并控制输出电压。另外，由电动机理论可知，当电动机的输入电源频率不变时，电动机的输出转矩与输入电压的二次方成正比。因此，软起动器不仅使电动机定子电压连续平滑地变化，实现升压限流起动，而且避免了电动机起动转矩的冲击现象。图 4-26 是几种软起动器产品的外貌图。

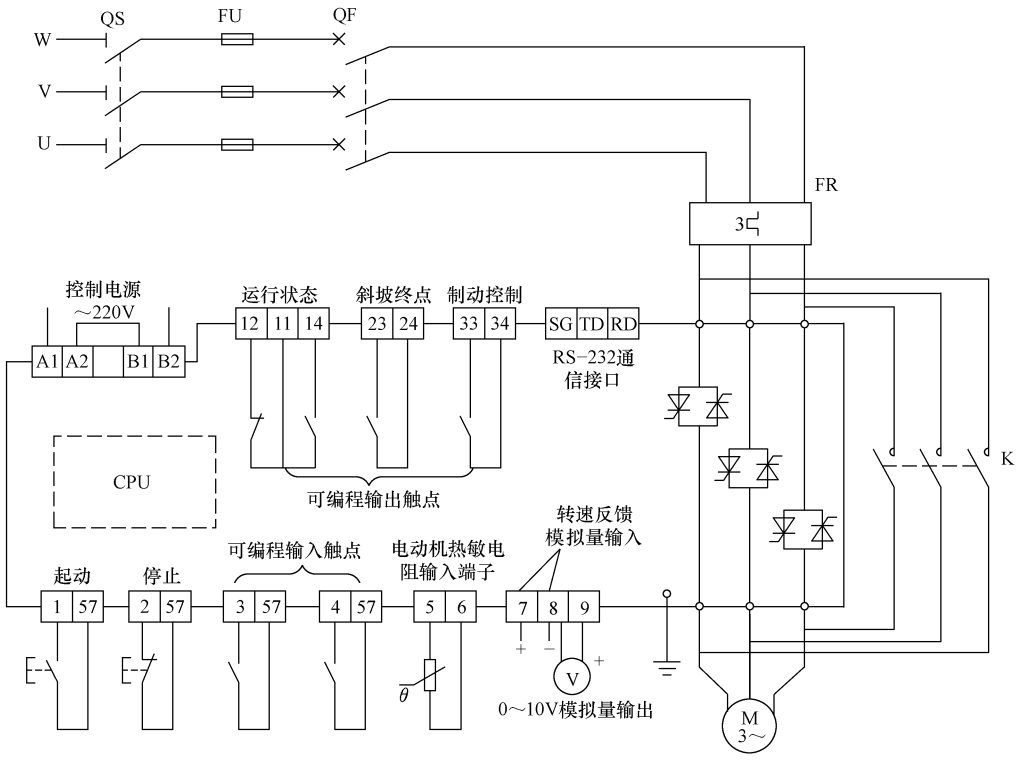


图 4-25　全数字软起动器接线原理图

图 4-26a 是 ABB 公司的 PSS 系列软起动器，有紧凑型和通用型两种。紧凑型 PSS 03 ~ 25 型的容量范围为 0. 75 ~ 15kW，用 35mm DIN 导轨安装；通用型 PSS18/30 ~ 300/515 型的容量范围为 7. 5 ~ 160kW。额定工作电压 208 ~ 690V。适合于大多数的应用场合。它可以在内部通过双列直插式开关排将 Y 联结电动机连接为△联结，因此可替代 Y-△减压起动，与标准的 Y-△减压起动相比，可减少 42% 的起动电流。PSS 系列软起动器的起动升压时间的设定范围为 1 ~ 30s；停止降压时间的设定范围为 0 ~ 30s；起动时初始电压设定范围为（40% ~ 70%）U_e；电流极限值（限流）设定范围为电动机额定电流的 1. 5 ~ 4 倍。通过拨码旋转开关设置。工作状态通过 LED 信号指示。无旁路接触器时，也可连续运行。具有一台软起动器拖动多台电动机的功能；具有过电流、过载、断相、晶闸管过热等保护功能、智能风机控制功能。具有标准通信接口，MODBUS-RTU 通信协议，可选 PROFIBUS 总线桥。

图 4-26b 是 ABB 公司的 PST/PSTB 系列软起动器，内置微处理器，具有 LCD 显示操作板，使用仅有 4 个按键的键盘操作和运行。它有多种语言可供选择，使用文字显示信息，可显示汉语菜单。除一般软起动器具有的功能外，它具有转矩控制、转矩极限、模拟量输出等功能；具有 3 个可编程信号继电器。出厂默认值设定起动时为电压斜坡方式，可以根据需要设定转矩控制和转矩极限。集成了电子过载继电器、相序监测继电器、大电流和 PTC 保护以及晶闸管保护。内置的通信接口支持 PROFIBUS、AS-i、DeviceNet、MODBUS-RTU 等现场总线通信协议。

图 4-26d 是 OMRON 公司 G3J-S 系列固态接触器，外形尺寸仅 80mm（宽）×100mm（高）×100mm（深），约 730g。容量范围为 0. 75 ~ 2. 2kW，用 35mm DIN 导轨安装，也可

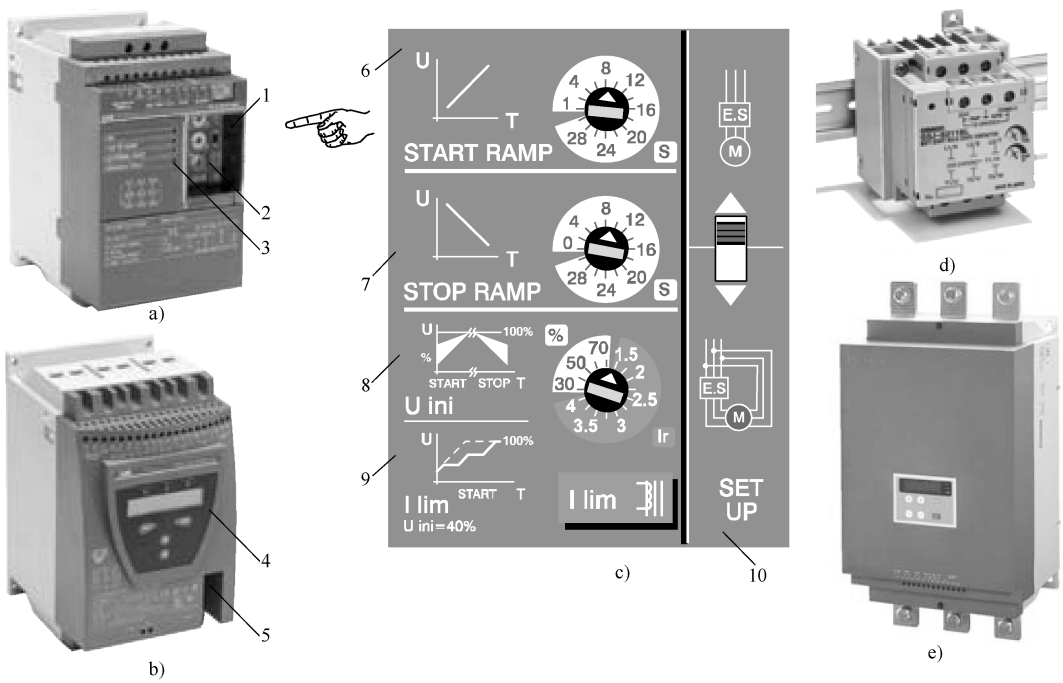


图 4-26 几种软起动器产品的外貌图

a）PSS 系列 b）PST/PSTB 系列 c）PSS 系列拨码开关设置窗口放大

d）G3J-S 系列 e）JJR1 系列

1—透明盖 2—拨码开关 3—LED 指示灯 4—LCD 显示操作板 5—通信接口

6—起动升压时间设置 7—停止时间设置 8—初始电压设置 9—电流极限

值设置 10—双列直插式开关排（内部△联结）

螺钉安装。具有一般软起动器所具备的功能。初始转矩设定（电位器设定）范围（200% ~ 450%）I_n，直接输入电动机起动时的初始转矩设为 600% I_n；起动升压时间的设定范围为 1 ~25s；停止降压时间的设定范围为 0 ~25s。可以像接触器那样使用。

图 4-26e 中所示的雷诺尔公司 JJR1 系列软起动器的容量范围为 5.5 ~660kW。具有可选的限流型和电压斜坡型两种起动方式，键盘设定。停车方式可以是自由停车、软停车和制动停车。所有输出输入触头为可编程触头，内置各种负载智能化程序，内置 RS-485 通信接口、LED 显示和操作键盘。具备键盘控制和远方控制切换功能。

2. 软起动器的工作特性

（1）起动转矩可调，对电网的冲击电流小。异步电动机在软起动过程中，软起动器是通过控制加到电动机上的平均电压来控制电动机的起动电流和起动转矩的，能使电动机的起动电流以恒定的斜率平稳上升，使起动转矩逐渐增加，转速也逐渐增加。软起动器可以通过设定得到不同的起动特性曲线，以满足不同负载的起动特性要求。软起动器的起动转矩可调，从而对电网的冲击电流小，不会造成大的电压降落，也满足了不同负载对起动转矩的不同要求。

（2）恒流起动。软起动过程中，不受电网电压波动的影响。在晶闸管的移相电路中，通过电动机电流反馈，使电动机在起动过程中保持恒流，由于起动电流可整定，当电网电压上下波动时，可自动地通过控制电路跟随增大或减小晶闸管导通角，从而维持原设定值，保

持起动电流恒定。

（3）软起动，软停机。使用软起动器时，可根据负载的不同，选择起动方式、整定和控制起动和停止时间的长短，以实现软起动，软停机。软停机功能可消除自由停车方式可能产生的惯性冲击。另外可以制动停机，可实现零速停机，准确定位，在一些应用场合可满足准确停机的需要。软停机控制是当电动机需要停机时，不是立即切断电动机的电源，而是通过调节晶闸管的导通角，从全导通状态逐渐地减小，从而使电动机的端电压逐渐降低而切断电源的，这一过程时间可整定。传统的制动控制是通过瞬间停电完成的。但有许多应用场合，不允许电动机瞬间关机。如水泵系统，如果瞬间停机，会产生巨大的“水锤”效应，使管道甚至水泵遭到损坏。为减少和防止“水锤”效应，需要电动机逐渐停机，在泵站中，应用软停机可避免泵站设备损坏，减少维修费用和维修工作量。再如工业上的皮带机、升降机也不希望突然停车。采用软停车方式，在发出停机信号时，电动机端电压逐渐减小，实现软停机目的。

（4）完善的保护、监控功能。新型的软起动器具有比较完善的保护、监控功能，以中文菜单形式显示设备的运行和故障诊断信息。主要保护功能有限流、过载、缺相、晶闸管短路、转子堵塞、CPU 故障等。运行中出现故障，系统能快速封锁触发脉冲，使晶闸管关断，并发出报警信号，如起动时间过长、过载等。

（5）轻载节能功能。有些产品具有轻载节能功能，可设置节能运行方式。可以根据电动机功率因数的高低，自动判断电动机的负载率，当电动机处于空载或负载率很低时，通过相位控制使晶闸管的导通角发生变化，从而改变输入电动机的功率，提高电动机的功率因数，以达到节能的目的。

3. 软起动器的起动和停机方式和功能

软起动器产品一般有如下几种起动和停机方式。典型的特性曲线示意图如图 4-27 所示。

（1）限流起动

限流起动是限制电动机的起动电流，主要用在轻载起动时降低起动电压。限流起动可使电动机在起动时的最大电流不超过预先设定的限流值 I_m，I_m 可根据电网容量及电动机负载情况而定。设定范围一般规定在电动机额定电流 I_e 的 1.5 ~ 5.0 倍之间选择。在保证起动压降下发挥电动机的最大起动转矩缩短起动时间，是较优的轻载软起动方式。

（2）电压（电流）斜坡起动

电压（电流）斜坡起动方式是在晶闸管的移相电路中引入电动机电流反馈实现的，通过设定电动机输入电压（电流）的上升速率来完成电动机的起动过程，电压（电流）由小到大斜坡线性上升，从而将电动机的起动转矩由小到大线性上升。也就是将传统的降压起动从有级变成了无级降压起动。它的优点是起动平滑，柔性好，同时降低电动机起动时对电网的冲击，主要用于重载起动。由于电压（电流）从初始值到额定值是线性变化（初始值可保证电动机的最大起动力矩），所以整个起动过程可保证电动机平稳的起动。

这种起动方式在电动机起动的初始阶段起动电流逐渐增加，当电流达到预先所设定的限流值后保持恒定，直至起动完毕。起动过程中，电流上升变化的速率是可以根据电动机负载调整设定。斜坡陡，电流上升速率大，起动转矩大，起动时间短。当负载较轻或空载起动时，所需起动转矩较低，应使斜坡缓和一些，当电流达到预先所设定的限流点值后，再迅速增加转矩，完成起动。这种软起动方式是应用最多的起动方法，尤其适用于风机、泵类负载

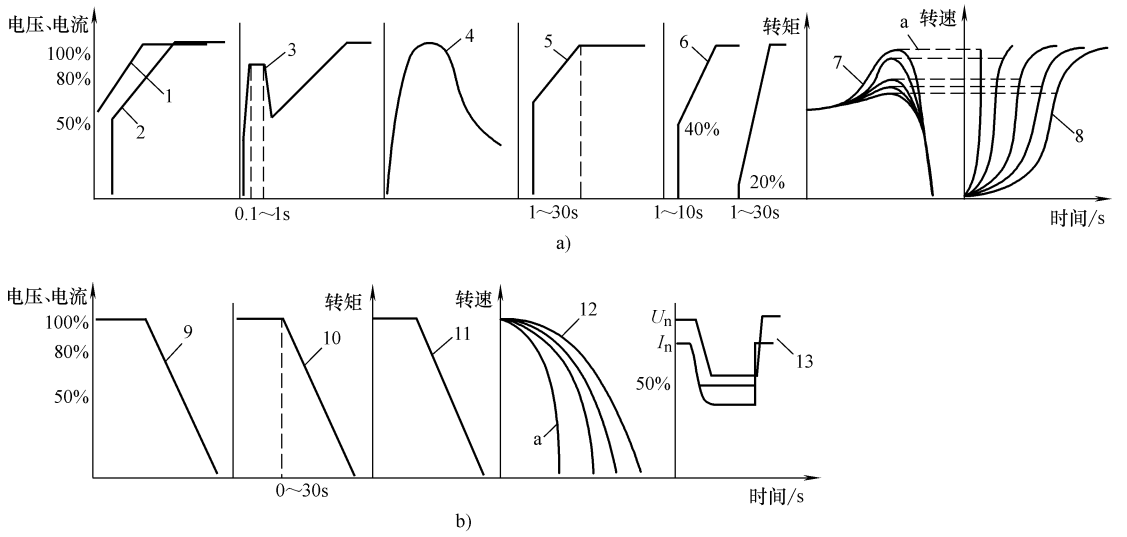


图 4-27 软起动器的典型特性曲线示意图

a）软起动特性曲线 b）软停机特性曲线

1—起动极限电压 2—起动斜坡 3—脉冲阶跃 4—电流极限 5—加速时间

6—双斜坡 7—起动转矩 8—起动转速 9—停机斜坡 10—停机时间

11—制动转矩 12—停机速度 13—节电模式

注：一般情况下是在 a 曲线所示的转矩和转速方式下运行，其他几种曲线可通过设定值实现。

的起动。

有的产品具有双斜坡起动方式，即同时设定电压和电流的初始斜坡起动值。

（3）转矩控制起动

通过控制起动转矩，从而改善电动机的起动特性，抑制浪涌转矩并且降低冲击电流。转矩控制起动主要用于重载起动。转矩加脉冲阶跃控制是在起动的瞬间用脉冲阶跃转矩克服电动机的静转矩，然后转矩平滑上升，缩短起动时间，但是，脉冲阶跃转矩会产生尖脉冲，影响电网安全运行，要特别引起注意。

（4）脉冲阶跃起动

脉冲阶跃起动特性曲线在起动开始阶段，晶闸管在极短时间内以较大电流导通，经过一段时间后回落，再按原设定值线性上升，进入恒流起动状态。该起动方法适用于重载并需克服较大静摩擦的起动场合。

（5）停机方式

软起动器的停车可以靠负载惯性自由停机。在有些场合，并不希望电动机突然停止，可以采用斜坡降速方式软停机。采用软停机方式，在发出停机信号时，电动机端电压逐渐减小，实现软停机目的。对于惯性力矩大的负载或需要快速停机的场合，可以选择快速制动。软起动器是采用向电动机输入直流电，以实现快速制动的。

在这种软停机方式下，如果有旁路接触器，则需要切换到软起动器，使软起动器的输出电压由全压逐渐减小，使电动机转速平稳降低，以避免机械震荡，直到电动机停止运行。

在自由停机方式下，软起动器接到停止命令后，立即断开旁路接触器，并禁止软起动器晶闸管的电压输出，电动机依负载惯性逐渐停车。

4. 软起动器的应用

在使用软起动器时，需要附加一些起停控制电路及旁路电路，将软起动器、旁路电路、断路器和控制电路等组装为软起动柜，以实现电动机的软起动、软停车、故障保护、报警、自动控制等功能。有些场合还需要具有运行和故障状态监视、通信功能、图形显示操作等。这样就需要选用全数字（智能）软起动器，以便与可编程序控制器等连网通信。当然也可以选购成套固态减压软起动控制柜或电动机控制中心（MCC）。

对于一般用途的泵类、风机类负载往往只需要软起动、软停车，电动机全速运行；另外，可能需要用一台软起动器起动多台电动机机组，以节约资金投入，这时就需要采用旁路接触器。但是，最好一台软起动器控制一台电动机机组，这样，控制既方便，又能充分发挥软起动器的故障检测、故障保护和节电等功能。

（1）单台软起动器控制起动多台电动机

图 4-28 所示是用一台软起动器对 2 台水泵机组进行软起动的示例，一台软起动器对 2 台以上机组进行软起动的原理类似。但不能同时起动或停机，只能一台一台按顺序起动和停机。

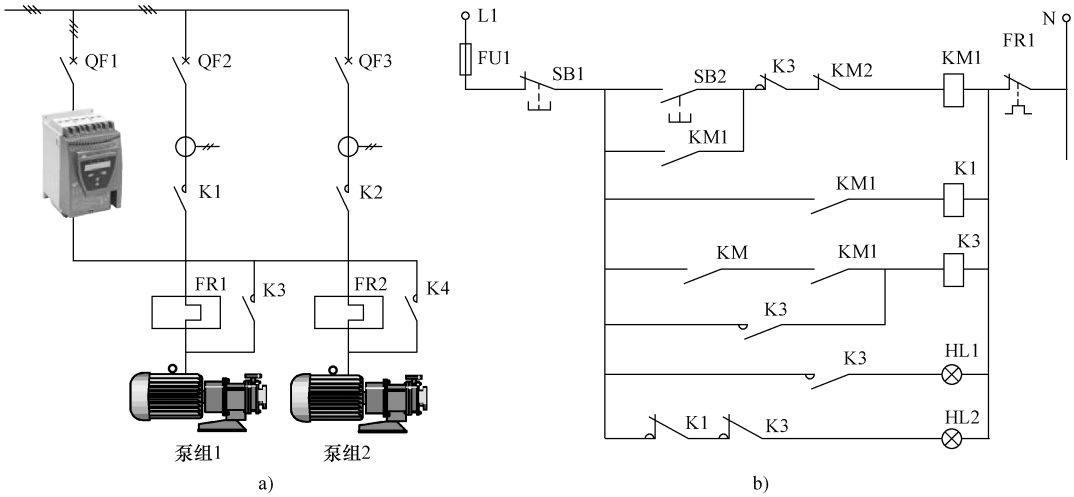


图 4-28　用一台软起动器对 2 台水泵机组软起动示例

a）主电路　b）泵组 1 的控制电路

图 4-28a 中，接触器 K1 和 K2 分别是泵组 1 和泵组 2 的旁路接触器。当泵组 1 软起动时，接触器 K1 处于断开位置，合上接触器 K3，电动机软起动；起动结束后，将接触器 K3 断开，合上接触器 K1，泵组 1 被切换到电网运行。若需要电动机软停机，一旦发出停车信号，先将接触器 K1 分断，再合上接触器 K3，由软起动器对电动机进行软停车。软起动器仅在起动、停机时工作，可以避免长期运行使晶闸管发热，延长使用寿命。图 4-28b 是泵组 1 的控制电路，泵组 2 的控制电路与

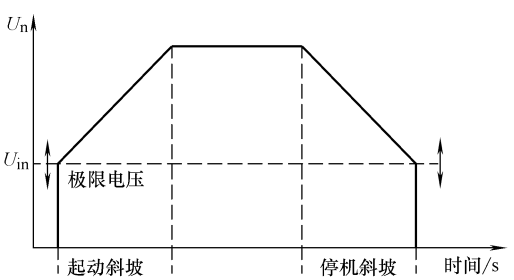


图 4-29　电动机工作曲线的设置

此图一样，只是元件编号不一样，另外，泵组 1 的控制电路和泵组 2 的控制电路互锁，如图 4-28b 中的 KM2。KM 是软起动器的控制输出转接触头。该电路也可用于泵组的一用一备控制，一用一备控制方式下，机组起动后，可使软起动器运行在节电方式。

（2）软起动器参数的设置

软起动器参数的设置就是设定电动机起动、停机时的工作曲线，如图 4-29 所示。软起动器用于典型负载时的基本参数设置（仅供参考）见表 4-1。

表 4-1 软起动器用于典型负载的参数设置（仅供参考）

负载种类	初始电压 U_{in}（%）	起动斜坡时间/s	停止斜坡时间/s	电流极限 I_{lim}（I_e 倍数）
离心风机	15	20	0	4.5
离心泵	20	6	6	3
活塞式压缩机	20	15	0	3
螺旋压缩机	20	15	0	4.5
提升机械	30	15	6	4.5
搅拌机	40	15	0	4.5
破碎机	30	15	6	4.5
轻载电动机	20	10	0	2.5
皮带传送带	20	15	10	4.5
自动扶梯	20	10	0	3
热泵	20	15	6	3
气泵	20	10	0	2.5

（3）软起动柜一次回路配线规格

组装软起动柜的一次回路配线规格（仅供参考）见表 4-2。

表 4-2 组装软起动柜的一次回路配线规格（仅供参考）

软起动器标称功率/kW	适配电动机/kW	额定电流/A	断路器额定电流/A	旁路接触器额定电流/A	截面积/mm^2	电流互感器电流比
7.5	7.5	18	20	25	6	50/5
11	11	24	25	32	10	50/5
15	15	30	32	32	16	100/5
18.5	18.5	39	40	40	16	100/5
22	22	45	50	50	16	100/5
30	30	60	63	63	25	100/5
37	37	76	80	80	25	200/5
45	45	90	100	100	35	200/5
55	55	110	125	115	50	300/5
75	75	150	160	150	70	300/5
90	90	180	180	185	20×3	400/5
110	110	218	225	225	20×3	500/5
132	132	260	315	265	25×3	500/5

（续）

软起动器标称功率/kW	适配电动机/kW	额定电流/A	断路器额定电流/A	旁路接触器额定电流/A	截面积/mm^2	电流互感器电流比
160	160	320	350	330	30×3	600/5
185	185	370	400	400	30×4	600/5
220	220	440	500	500	30×4	800/5
250	250	500	630	500	40×4	1000/5
280	280	560	630	630	40×4	1000/5
315	315	630	700	630	40×5	1500/5
400	400	780	800	800	50×5	1500/5
470	470	920	1000	1000	50×5	1500/5
530	530	1000	1250	1000	50×6	1500/5

4.5　三相异步电动机的制动控制

三相异步电动机从切断电源到完全停止旋转，由于惯性的关系，总要经过一段时间，这往往不能适应某些生产机械工艺的要求。如卷扬机、机床设备等，无论是从提高生产效率，还是从安全及工艺要求等方面考虑，都要求能对电动机进行制动控制，能迅速使电动机停机、定位。三相异步电动机的制动方法一般有两大类；机械制动和电气制动。机械制动是用机械装置来强迫电动机迅速停机；电气制动是在异步电动机接到停机命令时，同时产生一个与原来旋转方向相反的制动转矩，迫使电动机转速迅速下降。电气制动控制线路包括反接制动和能耗制动。目前，由于三相异步电动机普遍采用软起动器或变频器控制，能耗制动和反接制动装置现场已很少见了，但软起动器或变频器控制电动机制动的概念是一样的。同样，从电气控制角度看，传统的反接制动和能耗制动控制线路的逻辑控制方法和思维方式还是十分重要的，仍然是学习电气控制方法和设计方法的基础。因此，本节讨论传统的反接制动和能耗制动控制线路的目的并不在于线路结构本身，旨在讨论逻辑控制的思维方法。

4.5.1　反接制动控制

反接制动是通过改变加到异步电动机上的电源相序，使定子绕组产生反向旋转磁场，从而产生制动转矩的一种制动方法。由于反接制动时，转子与旋转磁场的相对速度接近于两倍同步转速，所以，定子绕组中流过的反接制动电流相当于全电压直接起动时的电流的两倍。因此，反接制动虽然制动迅速，但冲击电流效应较大，通常仅适用于 10kW 及以下的小容量异步电动机。为了减小冲击电流，通常要求在异步电动机主电路中串接一定的电阻以限制反接制动电流，这个电阻称为反接制动电阻。反接制动的另一要求是在异步电动机转速接近于零时，及时切断反相序电源，以防止反向再起动。图 4-30 是一种异步电动机单向反接制动控制线路。

在图 4-30 中，三相异步电动机起动时，按下起动按钮 SB2，接触器 K1 通电并自锁，异步电动机 M 通电旋转。在电动机正常运转时，感应式速度继电器 KS 的常开触头闭合，为反

接制动做好了准备。停机时，按下停止按钮 SB1，其常闭触头断开，常开触头闭合，接触器 K1 线圈断电，常闭触头复位，异步电动机 M 脱离电源，由于此时异步电动机的惯性很高，KS 的常开触头依然处于闭合状态，所以，SB1 常开触头闭合时，反接制动接触器 K2 线圈通电并自锁，其主触头闭合，使异步电动机定子绕组得到与正常运转相序相反的三相交流电源，异步电动机进入反接制动状态，使电动机转速迅速下降，当异步电动机转速接近于零时，速度继电器常开触头复位，接触器 K2 线圈电路被切断，反接制动结束。

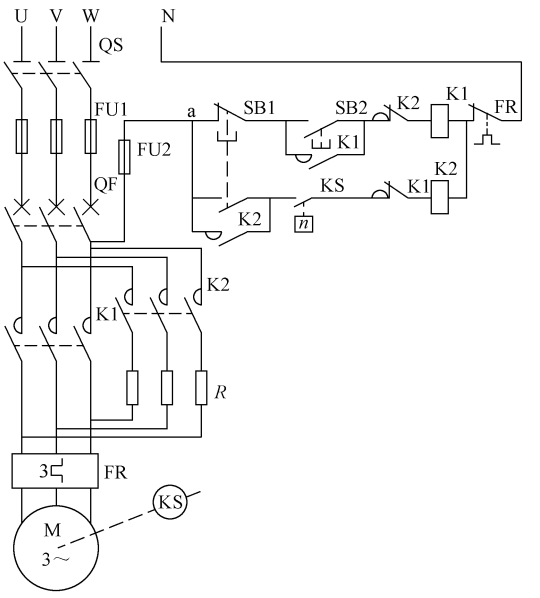


图 4-30 三相异步电动机单向反接制动控制线路

感应式速度继电器 KS 是根据电磁感应原理实现触头动作的。从结构上看，感应式速度继电器与交流电动机相似，其转轴与三相异步电动机同轴连接。转子固定在轴上，定子与轴同心。当三相异步电动机转动时，速度继电器的转子随之转动，在离心力下使感应式速度继电器定子向轴的转动方向偏摆，通过定子柄（摆杆）拨动触头，使常闭触头断开、常开触头闭合。当三相异步电动机转速下降到接近零时，转矩减小，定子柄在弹簧力的作用下恢复位，触头也复位。

4.5.2 能耗制动控制

所谓能耗制动，就是在异步电动机脱离三相交流电源之后，在异步电动机定子绕组上立即施加直流电压，产生空间静止磁场，利用转子感应电流与空间静止磁场的相互作用达到制动的目的。图 4-31 所示是三相异步电动机单向能耗制动控制线路。

图 4-31a（方案 1）是手动控制能耗制动方式，只要按下停止按钮 SB1，电动机就能实现能耗制动，时间继电器 KT 的瞬时常开触头的作用是保证直流电源只在制动时接入定子绕组。

异步电动机停机制动时，按下停止按钮 SB1，接触器 K1 断电释放，异步电动机脱离三相交流电源，同时，接触器 K2 线圈通电，时间继电器 KT 线圈与接触器 K2 线圈同时通电并自锁，直流电源经接触器 K2 的主触头而加入定子绕组，异步电动机进入能耗制动状态。当其转子的惯性速度接近于零时，时间继电器延时打开的常闭触头断开接触器 K2 线圈电路。由于 K2 常开辅助触头复位，时间继电器 KT 线圈的电源也被断开，异步电动机能耗制动结束。

图 4-31b（方案 2）是用速度继电器控制的单向能耗制动控制线路。线路原理与图 4-31a 基本相同，只是在控制电路中取消了时间继电器 KT，而在异步电动机轴端上安装了速度继电器 KS，并且用 KS 的常开触头取代了 KT 延时打开的常闭触头。这样，异步电动机在刚刚脱离三相交流电源时，由于异步电动机转子的惯性很高，速度继电器 KS 的常开触头仍然处于闭合状态，所以接触器 K2 线圈能够通过按下停机按钮 SB1 通电自锁。于是，两相定子绕

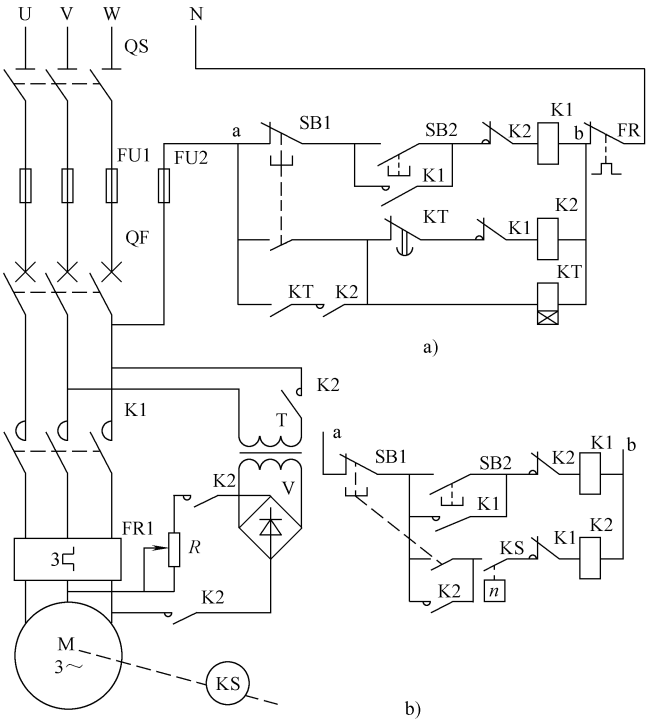


图 4-31　三相异步电动机单向能耗制动控制线路

a）方案 1　b）方案 2

组获得直流电源，异步电动机进入能耗制动。当异步电动机转子的惯性速度接近零时，KS 常开触头复位，接触器 K2 线圈断电而释放，能耗制动结束。

由以上分析可知，能耗制动比反接制动消耗的能量少，其制动电流也比反接制动电流小得多，但是，能耗制动的制动效果不及反接制动明显，同时需要一个直流电源，控制线路相对比较复杂。

推广应用提示，在图 4-30 和图 4-31 中，接触器 K1 与接触器 K2 互锁，SB1、接触器 K1 与接触器 K2 的辅助触头、时间继电器触头和速度继电器 KS 的常开触头等构成不同的联锁关系。设想，如果接触器 K1 与接触器 K2 分别控制一台电动机，那么这两台电动机的运行状态是：任何情况下都不能同时运行。根据这个思路，对电路稍加改造，就可以设计出很多实用的控制线路，如可逆控制、X-Y 轴控制等。

4.6　交流电动机的转速控制

根据电机原理可知，交流电动机转速公式如下：

$$n = (60f_1/p)(1 - s) \tag{4-2}$$

式中　p 为电动机极对数；f_1 为供电电源频率；s 为转差率。

由式（4-2）分析，通过改变定子电压频率 f_1、极对数 p 以及转差率 s 都可以实现交流异步电动机的速度调节，具体可以归纳为变极调速、变转差率调速和变频调速三大类，而变

转差率调速又包括转子串电阻调速、串极调速（转差电压）、电磁耦合器调速等，这些都属于转差功率消耗型的调速方法。目前最普遍应用的是通用变频器变频调速方法。

4.6.1 变极调速

通过变换电动机绕组极数从而改变同步转速进行调速的方式称为变极调速。变极调速方法仅适用于三相笼型异步电动机不需要无级调速的生产机械，如金属切削机床、升降机等。

三相笼型异步电动机通常采用两种方法变更绕组的极对数，一是改变定子绕组的接线，二是在定子绕组上设置具有不同极对数的两套互相独立的绕组，有时同一台电动机为了获得更多的速度等级，如需要得到四个以上的速度等级，上述两种方法往往同时采用。图 4-32 是 4/2 极双速异步电动机定子绕组接线示意图，图 4-32a 将电动机定子绕组的 U1、V1、W1 三个接线端接三相交流电源，而将 U2、V2、W2 三个接线端悬空，三相定子绕组接成三角形。此时每相绕组中的①、②线圈串联，电流方向如图 4-32a 中虚线箭头所示，电动机以四极低速运行。若将电动机定子绕组的 U2、V2、W2 三个接线端子接三相交流电源，而将另外三个接线端子 U1、V1、W1 连在一起，则原来三相定子绕组的三角形联结变为双星形联结，此时每相绕组中的①、②线圈相互并联，电流方向如图中虚线箭头所示，于是电动机便以两极高速运行。如，T68 卧式镗床的主轴电动机就是采用这种原理的双速电动机驱动主轴旋转运动和进给运动。

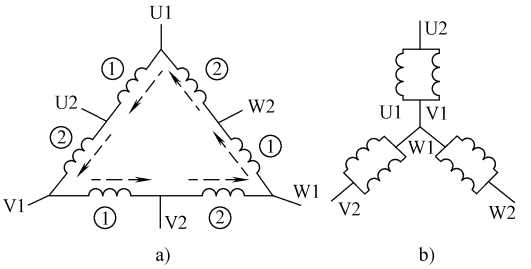


图 4-32 4/2 极双速电动机
三相定子绕组接线示意图
a）三角形联结 b）双星形联结

双速电动机起动一般采用手柄操作的双速开关（不能带负载起动），另一种是用交流接触器连接出线端以改变电动机转速，其控制线路如图 4-33 所示。

图 4-33a 中 SB2 和 SB3 为低速和高速的起动按钮，当按下 SB2 时，接触器 K1 通电，将电动机定子绕组接成三角形，电动机以低速运转。若按下 SB3，则接触器 K1 断电释放，并接通接触器 K2 将电动机定子绕组接成双星形，电动机以高速运转。在有些场合需要电动机以三角形起动，然后自动地将转速加快到双星形运转，从起动到运转这段时间可以用延时继电器来调节，其控制线路如图 4-33b 所示。该线路中的时间继电器 KT 是用来调节电动机起动到运转的时间的。当按下 SB2 时，时间继电器 KT 通电，KT 的瞬时闭合常开触头立即闭合，使接触器 K1 通电，将电动机定子绕组接成三角形起动，并通过中间继电器 KM 使时间继电器 KT 断电，经过一定时间后，KT 的常开触头断开，接触器 K1 断电，而使接触器 K2 通电，电动机便自动地从三角形变成双星形运转，完成了自动加速的过程。

4.6.2 变转差率调速

传统上，对于三相笼型异步电动机，在与负载之间串接电磁转差离合器，通过调节电磁转差离合器的励磁，改变转差率进行调速的方法，称为电磁调速。对于绕线转子异步电动机，由于转子绕组能通过集电环与外部电气设备相连接，所以，除了可在其定子侧控制电压、频率等以实现对电动机的转速调节外，还可在其转子侧引入控制变量，如附加电动势进

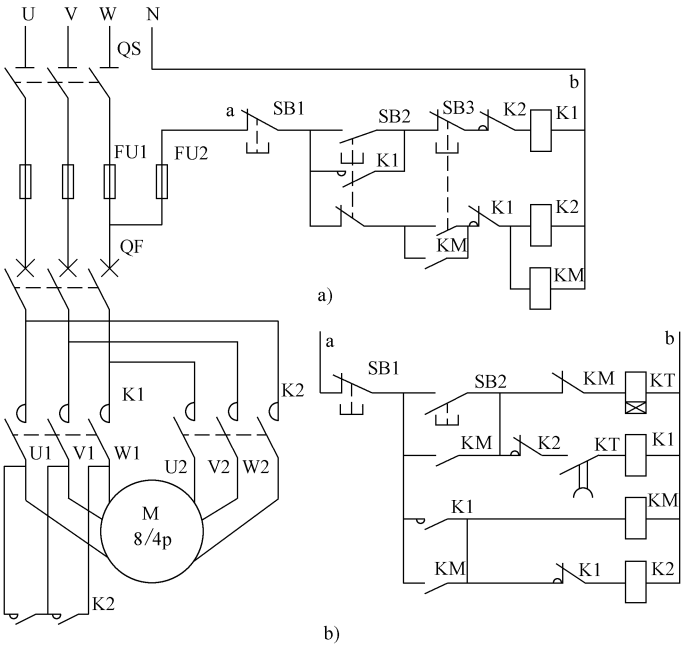


图 4-33　双速电动机的控制线路

行调速。方法一是在转子外电路上串入附加可变电阻，通过对可变电阻的调节，使电动机的转差率加大，改变电动机的机械特性斜率，使电动机在较低的转速下运行，从而实现调速，称为转子串电阻调速。目前，这种方法极少采用。如果在绕线转子异步电动机转子回路中串入可调节的附加电动势来改变电动机的转差率，其中的大部分转差功率被串入的附加电动势所吸收，再利用附加装置，把吸收的转差功率回馈电网或转换能量加以利用，这种方法称为串级调速。根据转差功率吸收利用的方式不同，串级调速可分为机械串级调速、电气串级调速（晶闸管串级调速）两种形式。附加电动势原理如图 4-34 所示。

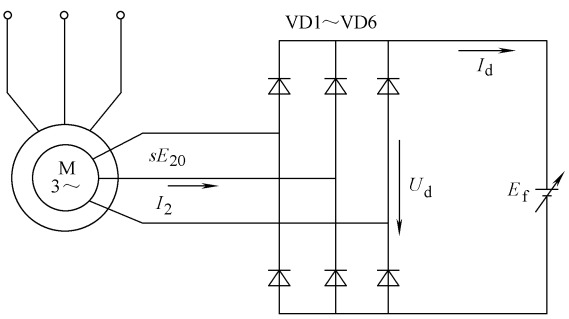


图 4-34　附加电动势原理

机械串级调速系统也称谢尔比斯系统或克莱玛系统，其基本原理是绕线转子异步电动机与一台直流电动机同轴，共同带动负载。转差功率经整流器变换后传输给直流电动机，直流电动机再将这部分电功率转变为机械功率传送给负载。这样就相当于在负载轴上增加了一个拖动转矩，从而很好地利用了转差功率。其中，直流电动机的电动势作为附加电动势，通过调节直流电动机的励磁电流就可以改变直流电动机的电动势，从而调节异步电动机的转速。增大直流电动机的励磁电流可以减速，反之则加速。

晶闸管串级调速的基本原理是在绕线转子异步电动机转子侧通过晶闸管整流桥，将转差频率交流电变为直流电，再经可控逆变器获得可调的直流电压作为调速所需的附加直流电动势，将转差功率变换为机械能加以利用或使其反馈回电源而进行调速的一种方式，其电气原

理见图 4-35。

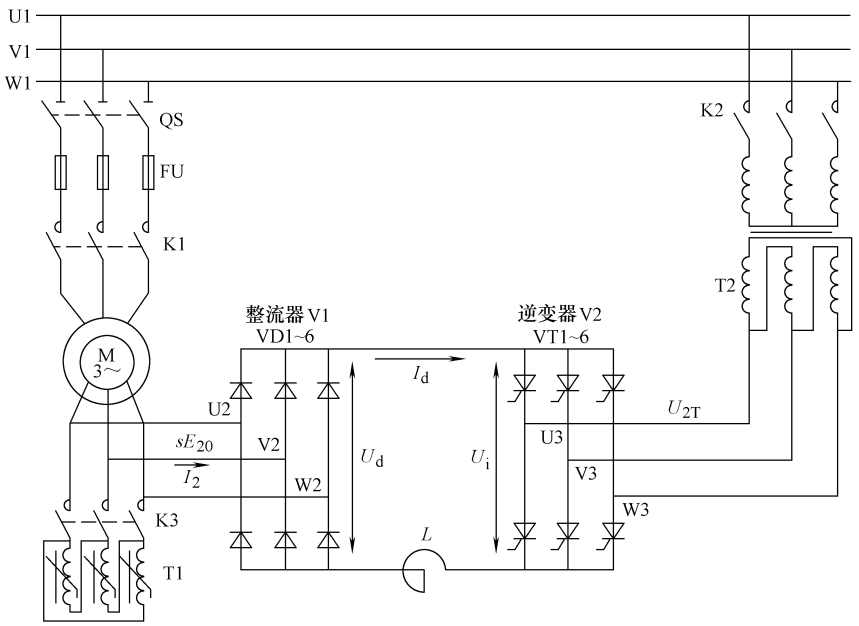


图 4-35　晶闸管串级调速系统原理图

在绕线转子异步电动机转子回路中引入可控交流附加电动势，可以改变电动机的转速，但由于电动机转子电动势的频率是其转速的函数，所以附加电动势的频率必须能随电动机转速而变化，且在调速的动态过程中保持一致。这就需要在转子侧加入可变频率、可变电压幅值的量，这在工程上是不易做到的。所以人们想到将电动机转子电动势先整流成直流电压，然后引入一个直流附加电动势，并控制其幅值，就可以调节异步电动机的转速。这样，就把交流变压变频的问题，转化为与频率无关的直流变压问题。具体是采用工作在有源逆变状态的晶闸管可控整流器吸收从电动机转子侧传送过来的转差功率并产生附加直流电动势的电源。

图 4-35 中，除电动机 M 外，其余装置均为静止型的元器件，所以也称为静止型电气串级调速系统。从这个装置的连接可以看出，它们构成了一个交-直-交变频器，由于逆变器 V2 通过变压器与交流电网相连，它输出的频率即电网频率，所以 V2 是个有源逆变器。从变频角度看，串级调速系统也可以看作是在定子恒压恒频供电下的转子变频调速系统。

图 4-35 中，三相绕线转子异步电动机 M 的转子相电动势 sE_{20} 经三相不可控整流器 V1 整流，输出直流电压 U_d。工作在逆变状态的三相可控整流装置 V2，除提供可调的直流电压 U_i 作为调速所需的附加直流电动势外，还可将经 V1 整流后输出的异步电动机转差功率逆变成交流，并回馈到交流电网。T1 为逆变变压器，L 为平波电抗器。两个整流装置电压 U_d 与 U_i 的极性以及直流回路电流 I_d 的方向如图 3-45 中所示。由此可以写出整流后的转子直流回路电压平衡方程式：

$$U_d = U_i + I_d R$$

或

$$K_1 sE_{20} = K_2 U_{2T}\cos\beta + I_d R \tag{4-3}$$

式中，K_1、K_2 为电压整流系数，三相桥式电路，$K_1 = K_2 = 2.34$；U_i 为逆变器直流侧电压

(即直流附加电动势)；U_{2T}为逆变变压器的二次相电压；β 为工作在逆变状态的可控整流装置 V2 的逆变角；R 为转子直流回路总电阻。

从式（4-3）可以看出，U_d 中包含了电动机的转差功率，I_d 与电动机转子交流电流 I_2 间有固定的比例关系，近似地反映了电动机电磁转矩的大小，而 β 角是控制变量。所以，式（4-3）可看作是在这种接线形式下电动机机械特性的间接表达式 $s=f(I_d, \beta)$。下面分析系统的工作过程。

设电动机带动恒转矩负载在某一转速下稳定运行，现在要改变其转速，可以控制逆变角 β，当 β 角增大时，逆变电压 U_i 相应减小，但受机械惯性作用，电动机转速不会立即变化，所以 U_d 仍维持原值。这样，转子直流回路电流 I_d 就要增大，转子电流和电磁转矩都会相应增大，而负载转矩未变，电动机就加速。在加速过程中，转子整流电压 U_d 随之减小，又使电流 I_d 减小，直到 U_d、U_i 与 I_d 间取得新的平衡为止。最后，电动机进入新的稳定运行状态，并以比原转速更高的转速运行。同理，减小 β 角时，电动机将降低转速运行。这就是以电力电子器件组成的绕线转子异步电动机电气串级调速系统的工作原理。

另外，通过调节 β 值改变电动机转速时，由于逆变角 β 可平滑连续调节，异步电动机的转速也能被平滑连续地调节。此外，由于电动机的转差功率能通过转子整流器变换为直流功率，再通过逆变器变换为交流功率而回馈到交流电网或生产机械上，这样转差功率被利用，效率较高，是一种节能型调速方式，在大功率风机、泵类及轧钢机、矿井提升机、挤压机等传动电动机上广泛应用。晶闸管串级调速的主要缺点是功率因数偏低、谐波影响较大。

4.6.3　变频调速

在诸多调速方法中，变频调速的性能最好，它通过变频调速器来模拟交流正弦波，通过恒压频比恒定来维持磁通恒定，由负载决定转矩水平，具有调速范围大、开环控制、稳定性好、运行效率高等特点。变频调速就是利用交流电动机的轴转速随频率变化的特性，通过改变交流电动机的供电频率和电压进行调速的方法。通用变频器就是可输出可变交流电电压和频率的控制器。变频调速的基本功能就是控制能量使其通过交流电动机的轴传送到执行机构。交流电动机的轴状态通常用转矩和速度两个变量来描述。通过控制转矩和速度则可控制能量的流动。当二者中的一个被控时，称为“转矩控制”或“速度控制”。当通用变频器运行在转矩控制模式下时，速度由负载决定。同样，当通用变频器运行在速度控制模式下时，转矩大小由负载决定。与直流调速不同，通用变频器使用交流电动机的外部参数控制交流电动机的电压和频率，所以对运行环境要求较高。关于通用变频器的内容详见 3.5 节。

第 5 章　电气控制线路分析与设计

电气控制线路分析是电气控制系统设计的基础，也是掌握电气控制系统运行、维护和故障分析的基本技能。电气控制线路分析的目的是学习、探索、运用或汲取经验，以便做出问题的判断和行动策略。卓越电气工程师应具有广泛而坚实的电气技术基础知识和分析电气控制系统的能力，以及系统设计能力。创新是由摇篮走向卓越的基础，创新源于“经验”和敏锐的视角。

5.1　电气控制线路分析的内容

电气控制线路分析就是将研究对象的整体化整为零，分为各个部分和层次，并分别加以考察和认识。分析的意义在于细致的寻找能够解决问题的线索，并以此解决问题。电气控制线路分析是一种科学的逻辑思维活动，当然是在已获得的认识和经验材料的基础上进行的，是一种理性的再认识活动。具体是通过对各种技术资料的分析，掌握电气控制线路的工作原理、技术指标、使用方法、维护要求等。如，设备用户手册中的电气原理图、安装和调试步骤和工艺图，主要包括电气原理图、安装图、接线图和维护图等。

5.1.1　分析电气控制线路的具体内容和要求

分析电气控制线路的具体内容和要求主要包括以下几个方面。

1. 产品说明书

机电设备产品说明书中一般由机械（包括液压、气动部分）与电气两部分组成。在分析时，首先要阅读这两部分说明书，了解以下内容。

（1）设备的构造，主要技术指标，机械、液压、气动等部分的工作原理。

（2）电气传动方式，电机、执行电器的数目、规格型号、安装位置、用途及控制要求。

（3）了解设备的使用方法，各操作手柄、开关、旋钮、指示装置的布置以及在控制线路中的作用。

（4）清楚地了解与机械、液压、气动等部分直接关联的电器（行程开关、电磁阀、电磁离合器、传感器等）的位置、工作状态及与机械、液压、气动等部分的关系，在控制中的作用等。

（5）了解设备执行的相关技术、安全、卫生和环保标准，包括国际标准、国家标准、专业标准和企业标准。

2. 电气控制原理图

分析电气原理图是电气控制线路分析的中心内容，电气原理图一般由主电路、控制电路、保护及联锁环节及特殊控制电路等部分组成。分析时，应与其他技术资料结合起来。如，各种电动机及执行元件的控制方式、位置及作用，各种与机械有关的位置开关、主令电器的状态等，只有通过阅读说明书才能了解。在分析中还可通过所选用的电器元件的技术参

数，分析控制线路的主要参数和技术指标，估计出各部分的电流、电压值，以便在调试或检修中合理地使用各类仪表。

3. 电气设备的总接线图

通过分析总接线图可了解系统的组成分布状况，各部分的连接，主要电气部件的布置、安装要求，导线和穿线管的规格型号等。这是安装设备不可缺少的资料。分析总接线图要与分析说明书、电气原理图结合起来。

4. 电器元件布置图与接线图

电器元件布置图与接线图是制造、安装、调试和维护电气设备必需的技术资料。在调试、检修中可通过布置图和接线图方便地找到各种电器元件和测试点，进行必要的调试、检测和维修保养。

5.1.2　电气原理图阅读分析的方法与步骤

在仔细阅读了产品说明书，了解了电气控制系统的总体结构，各分部状况及控制要求等内容之后，便可以阅读分析电气原理图了。

1. 电气原理图分析方法与步骤

（1）分析主电路。从主电路入手，根据每台电动机和执行电器的控制要求去分析各电动机和执行电器的控制内容，包括已讨论过的电动机起动、正反转控制、调速、制动等基本控制环节。

（2）分析控制电路。根据主电路中各电动机和执行电器的控制要求，逐一找出控制电路中的控制环节，用已学过的基本控制环节的知识，将控制线路“化整为零”，自上而下、自左到右，按功能不同划分成若干个局部控制线路逐行来进行分析。比较有效的方法是，以一个电动机起停电路为最小单元，将其与标准的电动机起停电路相比较，寻找差异，一般差异的地方就是分析问题的始点。如果控制线路较复杂，则可先排除与控制关系不密切的辅助电路，以便集中精力进行功能分析。控制电路一定要分析透彻，方能理顺控制逻辑间的逻辑关系。辅助电路包括执行元件的状态显示、电源显示、照明和故障报警等部分，多是由控制电路中的中间逻辑元件的触点来控制的，所以要回过头来找到中间逻辑元件的位置，分析其逻辑关系。

（3）分析联锁与保护环节。生产机械对于安全性、可靠性要求很高，一般是在控制线路中设置了一些电气保护和电气联锁环节，这些环节是一个重要内容，要仔细甄别，不可遗漏。

（4）分析特殊控制环节。在电气控制线路中，有时还会设置一些与主电路、控制电路关系不密切，相对独立的特殊环节。如产品计数、自动检测、机械抱闸等装置。这些部分往往自成一个小系统，其读图分析的方法可参照上述分析过程，并灵活运用所学过的相关知识逐一分析。

（5）总体检查。经过“化整为零”，逐步分析后，还必须“集零为整”，进一步复检全图，看是否有遗漏。特别要从整体角度进一步检查和理解各控制环节间的联系，以达到清楚地理解全图中每个电器元件的作用、工作原理和动作过程，以及状态参数等。

2. 普通车床电气控制线路分析举例

（1）普通车床的主要结构和运动形式

普通车床是一种应用广泛的金属切削机床，能够车削外圆、内圆、端面、螺纹和定型表面，并可用钻头、铰刀、镗刀进行加工。普通车床主要由床身、主轴变速箱、进给箱、溜板箱、刀架、尾架、丝杆、光杠、主轴电动机、冷却泵、电器箱等部分组成，其结构如图 5-1 所示。

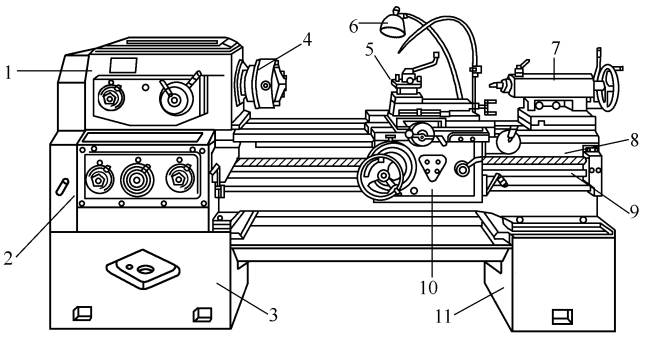


图 5-1　普通车床结构示意图

1—主轴变速箱　2—进给箱　3—电器箱　4—卡盘　5—刀架
6—照明灯　7—尾架　8—丝杠　9—光杠　10—溜板箱　11—床腿

普通车床有两种主要运动，一是主轴上的卡盘或顶尖带着工件的旋转运动，称为主运动；另一种是溜板带着刀架的直线移动，称为进给运动。为了加工螺纹等工件，主轴需要正反转，主轴的转速应随工件的材料、尺寸、工艺要求及刀具的种类不同而变化，所以要求能在相当宽的范围内进行调节刀架的进给运动由主轴电动机带动，用走刀箱调节加工时的纵向和横向进给量。

（2）电力拖动和控制的要求

车床的加工工艺对拖动控制有以下要求：

①　主轴拖动电动机是三相笼型异步电动机，直接起动，采用机械调速和机械方法实现正反转。

②　车削加工时，为防止刀具和工件的温升过高，需要用冷却液冷却，因此要装一台冷却泵。

③　主电动机和冷却泵电动机应具有必要的短路和过载保护，冷却泵因过载停止时，不允许主电动机工作，以防工件和刀具损坏。

④　应具有安全的局部照明装置。

（3）电气控制线路分析

普通车床的电气控制线路原理如图 5-2 所示。

图 5-2 的工作原理分析：

①　主电路分析。QS 为电源开关，主电路中有两台三相异步电动机，M1 为主轴电机，M2 为冷却泵电机，接触器 K 的主触头控制 M1 起动和停止。转换开关 QS1 控制 M2 起动和停止。

②　控制电路分析。控制电路采用 380V/24V/36V 交流电源供电，由指示灯 HL 指示。EL 是机床工作照明用灯，采用 24V 安全电压供电，QS2 是照明转换开关。按动起动按钮 SB2，接触器 K 的线圈得电，位于 6 区的接触器 K 的辅助常开触头闭合并自锁，位于 3 区的

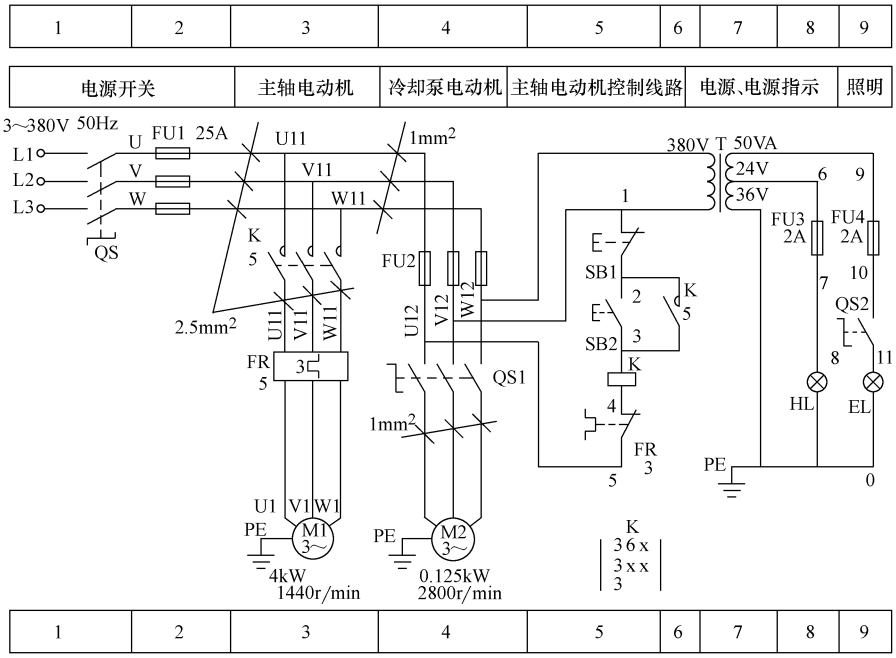


图 5-2　普通车床电气原理图

K 主触头闭合，M1 起动。操作 QS2，M2 可起动或停止。按下 SB1，M1 停止。图区 3 中，接触器主触头 K 和热继电器 FR 下面的 5 为索引代号，它指出接触器主触头 K 的线圈位置在图区 5，热继电器 FR 的辅助触头也在图区 5。图区 5 中，接触器 K 的辅助触头下面的 5 表示接触器 K 的线圈位置在图区 5。在复杂的电气原理图中，接触器和继电器的线圈与触头的从属关系用附图表示，即在原理图中相应线圈的下方，给出触头的图形符号，并在其下面注明相应触头的索引代号，未使用的触头用“x”表明。有时也可采用省去触头图形符号的表示法。如图区 5 中，接触器 K 的线圈的下方是接触器 K 相应触头的位置索引。在接触器 K 触头的位置索引中，左栏为主触头所在的图区号（有 3 个主触头在图区 3），中间栏为辅助常开触头所在的图区号（一个触头在图区 6，另一个没有使用），右边栏为辅助常闭触头所在的图区号（两个触头都没有使用）。控制电路中，元器件两端的数字表示接线端编号。如 SB1 两端的 1 和 2 表示，1 端与变压器的一次绕组的一端连接，2 端与 SB2 和接触器 K 的自锁触头的一端并接。

③　保护环节分析。熔断器 FU1 是机床电路的总短路保护。FU2 是 M2 回路的短路保护，因向车床供电的电源侧已安装熔断器，所以 M1 未用熔断器进行短路保护。热继电器 FR1 是 M1 的过载保护，其触点串联在接触器 K 线圈回路中，M1 过载时，热继电器 FR1 的常闭触头打开，接触器 K 的线圈将失电而使 M1 停止运行，即机床停止工作。

④　总体检查。分析完后，进行总体检查，看是否有遗漏。

以上分析采用的是“查线读图分析法”，即从异步电动机着手，看主电路上有哪些控制元件的触头，根据其组合规律看其控制方式。然后在控制电路中由主电路控制元件的主触头的文字符号找到有关的控制环节及各环节间的联系。接着从按起动按钮开始，查对线路，观察元件的触头信号是如何控制其他控制元件动作的，然后再查看这些被带动的控制元件的触

头是如何控制异步电动机或其他电器元件动作的，并随时注意控制元件的触头对异步电动机的运动或动作的影响，进而看异步电动机驱动被控机械部件的运动等。

“查线读图分析法”是分析电气原理图的最基本方法，应用也最广泛。此外还有“逻辑分析法”等，在此不赘述。

3. 龙门刨床电气控制线路分析举例

图 5-3 是普通龙门刨床结构示意图。

龙门刨床因有一个“龙门”式的框架结构而得名，主要用于刨削大型工件或同时加工多个工件，对中小型零件，它可以一次装夹好几个，用几把刨刀同时刨削。它的主运动是工作台的直线往复运动，进给运动是刀架带着刨刀作横向或垂直的间歇运动。工作台与床身之间靠一个山形、一个平形导轨滑动。工作台行走时龙门上刀架的刀与其形成相对移动，实现了刨削。主要用于重型工件粗、精加工平面、倾斜面、T 型槽，较大型的龙门刨床一般都附有铣头和磨头，完成铣、磨加工，变型为龙门刨铣床和龙门刨铣磨床。大型龙门刨床主动力采用直流电机驱动工作台移动，形成切削运动。大多数大型龙门刨床工作台换向是依靠直流电机正反转实现的，也有依靠正反转离合器实现正反转的。

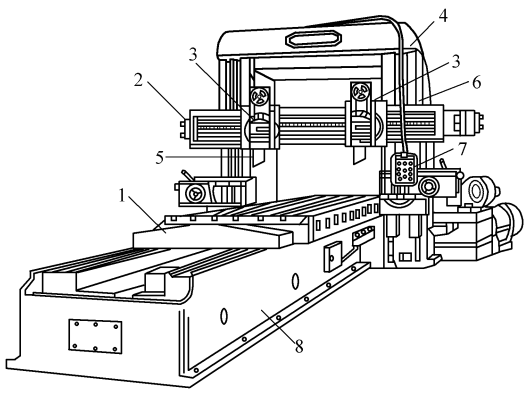


图 5-3 龙门刨床结构示意图

1—工作台 2—横梁 3—刀架 4—龙门顶 5—刨刀 6—立柱 7—侧刀架 8—底座

图 5-3 中，龙门刨床上装有横梁机构，刀架装在横梁上，随加工件大小不同横梁需要沿立柱上下移动，横梁上一般装有两个垂直刀架，刀架滑座可在垂直面内回转一个角度，并可沿横梁作横向进给运动。刨刀可在刀架上作垂直或斜向进给运动；横梁可在两立柱上作上下调整。一般在两个立柱上还安装可沿立柱上下移动的侧刀架，以扩大加工范围。工作台回程时，能机动抬刀，以免划伤工件表面。在加工过程中，横梁需要保证夹紧在立柱上不允许松动。横梁升降电机安装在龙门顶上，通过蜗轮传动，使立柱上的丝杠转动，通过螺母使横梁上下移动。横梁夹紧电机通过减速机构传动夹紧螺杆，通过杠杆作用使压块将横梁夹紧或放松。

横梁的拖动方式及控制要求是：为适应不同高度工件加工时对刀的需用，要求安装有左、右立刀架的横梁能通过丝杠传动，快速作上升下降的调整运动。丝杠的正反转由一台 13kW 三相交流异步电动机（M1）拖动，同时，为了保证零件的加工精度，当横梁移动到需要的高度后应立即通过夹紧机构将横梁夹紧在立柱上。每次移动前要先放松夹紧装置，因此设置另一台 2.8kW 三相交流异步电动机（M2）拖动夹紧放松机构，以实现横梁移动前的放松和到位后的夹紧动作。在夹紧、放松机构中设置两个行程开关 SQ1 与 SQ2，分别检测已放松与夹紧信号。横梁升降控制的要求是：

① 用短时工作的点动控制。

② 横梁上升控制动作过程。按上升按钮 SB1→横梁放松（夹紧异步电动机反转）→压下放松位置开关→停止放松→横梁自动上升（升降异步电动机正转）→到位放开上升按钮

→横梁停止上升→横梁自动夹紧（夹紧异步电动机正转）→已放松位置开关松开，已夹紧位置开关压下，达到一定夹紧紧度→上升过程结束。

③　横梁下降控制动作过程。按下降按钮 SB2→横梁放松→压下已放松位置开关→停止放松，横梁自动下降→到位放开下降按钮→横梁停止下降并自动短时回升（升/降异步电动机短时正转）→横梁自动夹紧→已放松位置开关松开，已夹紧位置开关下并夹紧至一定紧度下降过程结束。可见下降与上升控制的区别在于到位后多了一个自动的短时回升动作，其目的在于消除移动螺母上端面与丝杠之间存在的间隙。

④　横梁升降动作应设置上、下极限位置保护。

⑤　横梁夹紧与横梁移动之间及正反向运动之间具有必要的联锁。

⑥　根据拖动要求，升、降异步电动机 M1 与夹紧、放松异步电动机 M2 都要求正反转，所以采用 K1、K2 及 K3、K4 接触器主触头变换相序控制。

⑦　考虑到横梁夹紧时有一定的紧度要求，故在 M2 正转即 K3 动作时，其中一相通过电流继电器 KA（图中未画出）检测电流信号，当 M2 处于堵转状态，电流增长至动作值时，过电流继电器 KA 动作，使夹紧动作结束，以保证每次夹紧紧度相同。

图 5-4 是其横梁升降电气控制线路，可按上述方法、步骤分析其工作原理。在立式车床、摇臂钻床等设备中均采用类似的结构和控制方法。这种机械机构的电气传动控制方法具有普遍意义，可以举一反三，应用于其他方面。

对图 5-4 分析如下，如果暂不考虑横梁下降控制的短时回升，则上升与下降控制过程完全相同，当发出“上升”或“下降”指令时，首先是夹紧、放松异步电动机 M2 反转，由于平时横梁总是处于夹紧状态，行程开关 SQ1（检测已放松信号）不受压，SQ2 处于受压状态（检测已夹紧信号），将 SQ1 常开触头串在横梁升降控制回路中，常闭触头串于放松控制回路中（SQ2 常开触头串在工作台传动控制回路中，用于联锁控制），因此在发出上升或下降指令时（按 SB1 或 SB2），必须是先放松（SQ2 立即复位，夹紧解除），当放松动作完成，SQ1 受压，K4 释放，K1（或 K2）自动吸合，实现横梁自动上升（或下降）。上升（或下降）到位，放开 SB1（或 SB2）停止上升，由于此时 SQ1 受压，SQ2 不受压，所以 K3 自动吸合，夹紧动作自动发出直到 SQ2 压下，再通过 KA 常闭触头与 K3 的常开触头串联的自锁回路继续夹紧至过电流继电器动作（达到一定的夹紧紧度），控制过程自动结束。

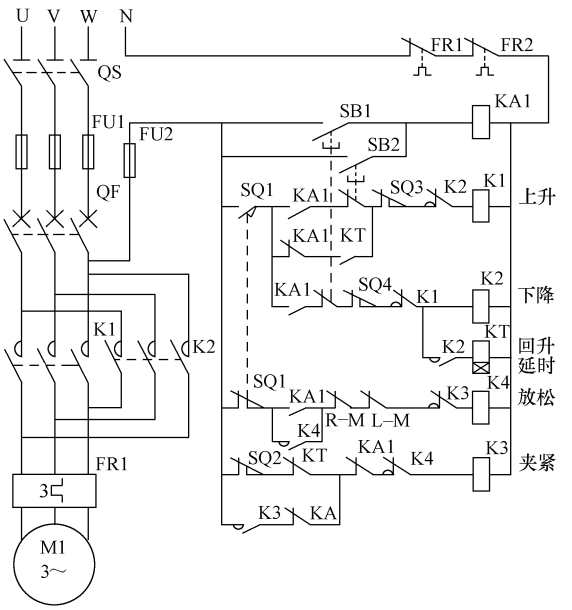


图 5-4　龙门刨床横梁控制线路

（注：夹紧、放松异步电动机 M2 的主电路同 M1，图中未画出。）

5.2 电气控制线路设计方法

电气控制线路的设计方法主要有经验设计法和逻辑设计法两种。本书主要采用经验设计方法，通过实例介绍电气控制的基本设计方法和思路。

5.2.1 电气控制线路设计的基本概念

电气控制线路的经验设计法是采用基本控制环节（单元电路）进行逻辑组合，或根据掌握和熟悉的典型控制线路和设计资料进行修改和补充，完成设计的一种方法。要求设计人员必须掌握和熟悉大量的典型控制线路和设计资料，同时具有丰富的设计经验，也就是说，它主要靠经验进行设计，因此称其为经验设计方法。

电气控制线路经验设计方法的特点是无固定的设计模式，灵活性很大，对于具有一定工作经验的电气人员来说，能较快地完成设计任务，在电气设计中被普遍采用。高水平的电气设计人员除必须具备系统的基础理论、分析问题、解决问题的能力及很强的学习和接受新知识的能力外，还必须熟悉现场，掌握生产过程工艺，了解生产机械的性能，以及实际工作能力及丰富的实践经验。用经验设计方法初步设计出来的控制线路可能有多种，需要加以比较分析，反复地修改简化，甚至要通过实验加以验证才能使控制线路符合设计要求，确定比较合理的设计方案，除非借鉴了已经经过实际运行考验，被认为是成熟的方案。另外，用经验设计方法设计的线路可能不是最简，所用的电器及触点不一定最少，所得出的方案不一定是最佳方案。

采用经验设计法设计，通常是先根据生产工艺的要求，画出功能流程图，再用一些成熟的典型线路环节来实现某些基本要求，确定适当的基本控制环节（单元电路），而后再根据生产工艺要求逐步完善其功能，并适当配置联锁和保护等环节，利用基本控制原则把它们综合地组合成一个整体，成为满足控制要求的完整线路。当找不到现成的典型环节时，可根据控制要求，将主令信号经过适当的组合与变换，在一定条件下得到执行元件所需要的工作信号，再套用典型控制电路完成设计。设计过程中，要随时增减元器件和改变触点的组合方式，以满足被拖动系统的工作条件和控制要求，经过反复修改得到理想的控制线路。

在进行具体线路设计时，首先设计主电路，然后设计控制电路、信号线路、局部特殊电路等。初步设计完成后，应当仔细检查，反复验证，看线路是否符合设计的要求，并进一步使之完善和简化，最后选择恰当的电器元件的规格型号，使其能充分实现设计功能。最好是根据已设计的控制线路写出逻辑表达式，再用逻辑分析方法进一步进行逻辑分析，以优化设计，但当设计的系统比较复杂，也难以奏效。

逻辑设计法是利用逻辑代数来分析、化简、设计线路的方法。这种设计方法较为科学，设计的线路比较简化、合理，容易达到最简逻辑组合的目的。但是，当控制系统比较复杂时，这种方法工作量也大，而且容易出错。但是，如果将一个较大的、功能较为复杂的控制系统分成若干个互相联系的控制单元，用逻辑设计方法先完成每个单元控制线路的设计，然后再用经验设计方法把这些单元电路组合起来，各取所长，也是一种简捷的设计方法。可以获得理想、经济的方案，所用元件数量少，各元件能充分发挥作用，当给定条件变化时，容易找出电路相应变化的内在规律，在设计复杂控制线路时，更能显示出它的优点。

5.2.2　通用变频器外部电气控制线路设计示例

通用变频器已在工业电气自动化控制中得到广泛应用，对提高电气传动性能、提高产品质量、节约能源等方面起到重要作用。本例通过一种通用变频器外部控制线路的设计，说明设计思路。所设计的电路具有通用性，可适用于额定电压 380V、功率不超过 200kW、连续运行的笼型三相异步电动机变频调速的多种控制场合，如工业锅炉的引风机、送风机控制等。

1. 系统设计要求

（1）采用一台通用变频器拖动单台笼型三相异步电动机。

（2）系统需连续运转，非特殊情况不允许停机。

（3）当变频器输出频率达到 45Hz 时，应将电动机切换到工频电网运行。

（4）系统应设置电动机运行状态指示。

根据设计要求，①为保证电动机连续运行，考虑双电源供电，当一个电源故障或停电时，自动或手动切换到备用电源工作。②为使当通用变频器输出频率达到 45Hz 时，将电动机自动切换到工频电网运行，设置通用变频器旁路装置，同时设置联锁环节保证切换安全。

2. 设计思路

对于第一步考虑，可以借鉴双电源切换装置的成熟电路构成。而对第二步，可以考虑用一个单机通用变频器控制电路与一个单机笼型三相异步电动机控制电路的并联，另外，再考虑切换过程中的自动切换、安全防护等；通用变频器运行和工频运行应考虑两种情况，一种情况是考虑通用变频器故障时将电动机切换到工频电源上工作，这种情况可以通过通用变频器的故障报警信号作用于自动切换，或给出灯光或音响报警信号由运行人员手动切换，另一种情况是当通用变频器输出频率达到 45Hz 时，将电动机自动切换到工频电网运行。若电动机的容量较大，尚需考虑工频起动时电动机的降压起动问题等，本例中将这一部分的实际电路省略。设计的电路如图 5-5 所示。主要电器元件清单见表 5-1。

表 5-1　图 5-5 中的主要电器元件清单

序号	电路符号	器件名称	规格型号	数量	单位	备注
1	VVVF	通用变频器	FVR-G7S-7.5 7.5kW	1	台	
2	QF1、QF2	低压断路器	DZ20Y-20 380V 32A	2	台	
3	QF3	低压断路器	DZ20Y-20 380V 20A	1	台	
4	K1 ~ K5	交流接触器	CJ20-30 380V 30A	5	台	线圈电压 220V
5	HL1、HL2	指示灯	AD11-25/220 白色	2	只	电源正常指示
6	HL3	指示灯	AD11-25/220 绿色	1	只	K1 运行
7	HL4	指示灯	AD11-25/220 绿色	1	只	K2 运行
8	HL5	指示灯	AD11-25/220 绿色	1	只	变频器运行
9	HL6	指示灯	AD11-25/220 绿色	1	只	工频运行
10	KM	中间继电器	JZ7-44 220V	1	只	
11	FU1 ~ FU3	熔断器	RL1-15/4	3	只	
12	SB1、SB3	按钮	LAY3-22 红色	2	只	停止按钮
13	SB2	按钮	LAY3-22 绿色	1	只	起动按钮
14	SA	转换开关	LW12-6	1	只	
15	FR	热继电器	JR20-16			

图 5-5 中，工作电源和备用电源通过接触器 K1（控制工作电源）、K2（控制备用电源）自动切换。两路电源状态通过指示灯 HL1、HL2 指示。当工作电源停电时，备用电源自动切换。

正常起动时，按下 SB2，中间继电器 KM 得电吸合、自锁，其常开触头分别闭合，接通接触器 K1，K1 将工作电源接入主回路，并自锁；KM 的另一个常闭触头接通接触器 K2 支路，但此时接触器 K1 的常闭触头断开，接触器 K2 不能吸合；接触器 K1 闭合后，当 SA 在 2 位时，且接触器 K5 在断开位置时，接触器 K3 得电吸合，其常开触头接通时间继电器 KT，经过设定的延时时间后，KT 的延时触头闭合，接通接触器 K4，变频器起动运行，当 QF3 在合闸位置时，电动机起动运行。

当工作电源停电时，接触器 K1 返回，其常闭触头接通接触器 K2 支路，接触器 K2 得电吸合，完成备用电源自动切换。

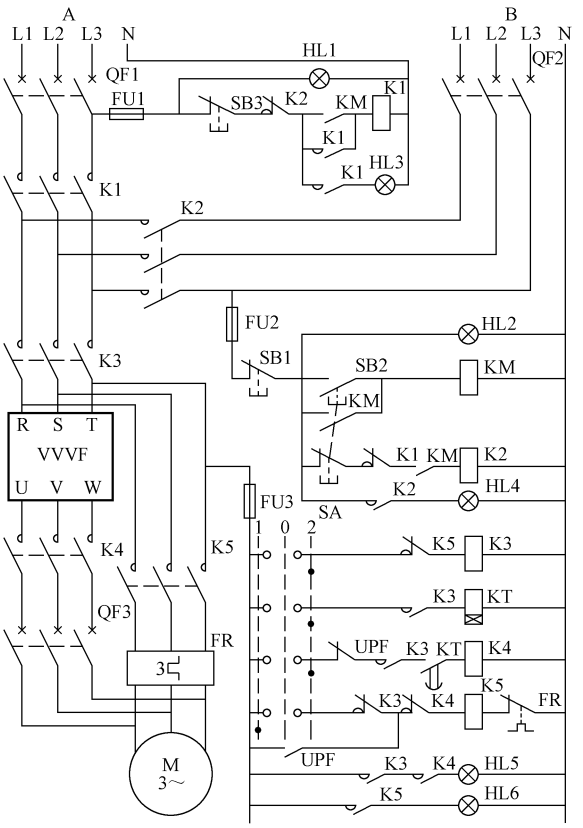


图 5-5　通用变频器外部电气控制线路

当变频器输出频率达到 45Hz 时，其频率到达信号常闭触头 UPF 断开，切断接触器 K4 电源，接触器 K4 返回，其另一个常闭触头接通变频器停机端口（图中未画处），变频器停止工作，同时频率到达信号常开触头 UPF 接通接触器 K5，K5 得电吸合，将接触器 K3 支路断开，将电动机自动切换到工频电网运行。当变频器输出频率降低到 45Hz 以下时，由传感器输出信号控制变频器重新起动，过程同上。传感器可以是压力传感器、流量传感器等，是根据测量的压力、流量等信号，按比例转换为频率信号控制变频器的。

5.2.3　高层建筑消防水泵控制系统设计示例

现代高层建筑的发展对消防系统提出了越来越高的要求，这使消防控制柜受多种信号的控制，如本柜控制、消控中心控制、消火栓起动、烟感信号的控制、水池水位控制等。另外，由于消防系统的特殊要求，一旦有危急信号必须万无一失，确保迅速安全起动运行，这就对系统提出了必须有备用机组的要求。一般情况下多数采用一用一备的模式，当一组泵故障的情况下必须起动备用机泵。而且由于消防泵一般功率比较大，须采用减压起动方式，如丫/△起动、自耦变压器减压起动、软起动或变频器起动等，这样控制线路就比较复杂，控制回路需采用多只中间继电器和时间继电器，由于采用的元件和接线较多，容易发生故障，主电路前端通常需要接自双路电源互投系统，末端是两台水泵互为备用装置以提高可靠性，

在控制系统上也必须具备相应的可靠性，才能满足要求，如图 5-6 所示。

图 5-6 中未画出主电路，实际上，双路电源互投控制系统与图 5-4 类似，电动机控制主电路可以是前述的单机控制的丫/△起动电路，或自耦变压器减压起动电路，或软起动电路，或变频器起动电路中的任何一种，本图采用的是两个如图 4-20 所示的自耦变压器减压起动电路的并联电路，每个电路控制一套水泵机组。控制电路的基本思路与图 5-4 相同。整个系统分为三个控制回路，一是双路电源互投控制系统，另外是两台水泵独立的控制系统分别与其控制电源及水泵电机，与主电源连接。这样既能满足自动控制使用要求，而且在特殊情况下还能分别手动控制每台水泵电机。

图 5-6 控制电路中，将备用水泵机组自动投入用一个中间继电器和一个时间继电器及其延时触头控制。中间继电器 KM2 的常开触头控制备用水泵电动机起动。

整个电路的自动起动和自动停机均由中间继电路 KM1 的常开触头控制，既能达到全自动的要求，又能防止万一在灭火过程中，有可能误动作而造成不应有的停机事故。

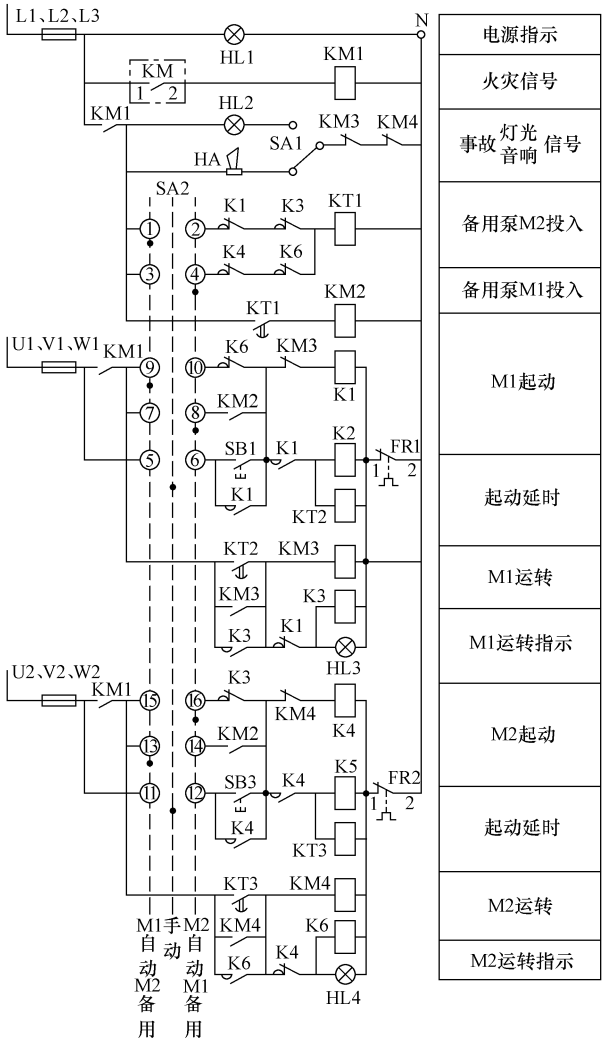


图 5-6　消防水泵继电逻辑控制系统电气原理图

手动控制时，首先扳动转换开关 SA，使其手动触头接通后方能按动按钮使电动机运转。扳动转换开关也可停机，不但可以取代停机按钮，而且当手动控制后要求恢复自动位置时，可以强制操作人员为了停机而去扳动转换开关，使其恢复到自动控制位置。

由图 5-6 可见，线路比较复杂，采用的元器件和接线较多，容易发生故障的几率高，为此采用新器件以提高其可靠性。图 5-7 和图 5-8 是采用西门子公司生产的可编程逻辑控制继电器 LOGO！230RL 改造上述复杂的控制线路。

由图 5-7 可见，改造后的线路简单、明晰，运行、维护、检修都十分方便。控制电源为 AC 230V，12 点输入、8 点输出。图 5-7 中，K1 ~ K3 是工作泵减压起动控制接触器，其中 K1 是工作（主）接触器，K1 ~ K3 分别接在逻辑控制继电器 LOGO！的输出端 Q1、Q2 端；K4 ~ K6 是备用泵减压起动控制接触器，其中，K4 是工作（主）接触器，K4 ~ K6 分别接在逻辑控制继电器 LOGO！的输出端 Q3、Q4 端。逻辑控制继电器 LOGO！的输出端 Q5 接泵运

行指示灯。HL1 是水泵故障指示灯，HL2 是工作泵起动指示灯，HL3 是工作泵运行指示灯，HL4 是备用泵起动指示灯，HL5 是备用泵运行指示灯。逻辑控制继电器 LOGO！的输入端 I1、I3、I5 分别为手动起泵、消控中心起泵及烟感信号起泵或消火栓起泵信号输入；I2、I4、I6 分别为手动停泵、消防控制中心停泵及水池水位过低而联锁停泵信号输入；I7 为工作泵接触器 K1 的输入信号，I8 为控制工作泵的断路器跳闸信号，故障信号为逻辑非。工作原理如下。

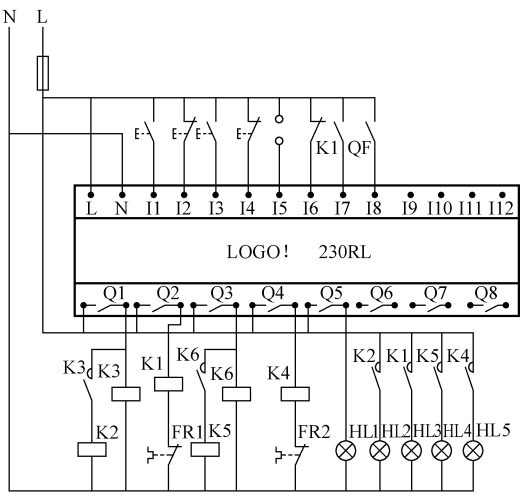


图 5-7　用 LOGO！实现消防水泵控制系统电气接线图

1）I1、I3、I5 中任何一个有输入信号时，其内部逻辑是通过一个或门与锁定继电器功能块在 Q1 点输出一个信号使 K2、K3 起动接通，工作泵减压起动。

2）Q1 输出状态同时接入功能块 6 延时（延迟 10s，是根据减压时间要求设定的时间），通过延时使功能块 3 复位，减压起动接触器 K3、K2 退出运行；同时功能块 7 置位锁定继电器使 Q2 输出，工作泵运行接触器 K1 投入，工作泵正常运行。

3）当 I7、I8 有输入信号时，它们通过与非门功能块 12 送出一个工作泵未正常运行指示信号，HL1 水泵故障指示灯亮。

4）通过功能块 2 输出的启泵信号，通过功能块 8 接通延时（延迟时间 20s 或必须大于功能块 6 设定时间），输出一个避开减压起动时间的延迟信号。该信号与工作泵未运行信号，通过与功能块 10 输出工作泵故障信号 Q5，接通故障指示灯 HL1，同时该信号通 RS 功能块 11 置位输出 Q3，起动备用泵减压起动接触器 K5 和 K6。

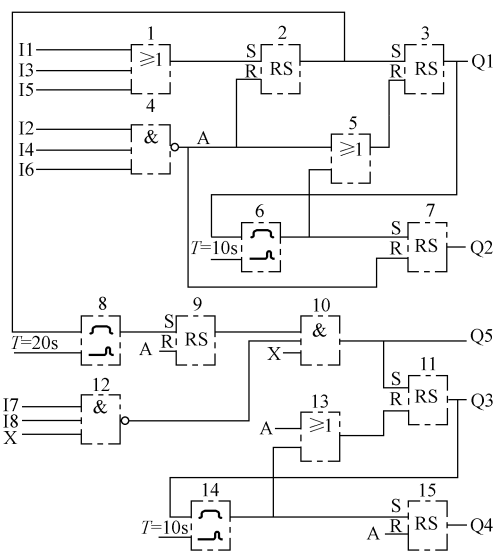


图 5-8　逻辑功能图

5）Q3 输出接入功能块 14，接通延迟，使 RS 功能块 11 复位，减压起动接触器 K5、K6 退出运行，同时送入锁定继电器功能块 15，输出 Q4 信号使备用泵运行接触器 K4 投入，实现备用泵的正常运行。

6）I2、I4、I6 中任何一个有输入信号时，它们通过与非功能块 4 送出停泵信号 A，分别送至功能块 2、7、9、15，使这时有可能正在吸合的接触器退出运行，所有的 RS 功能块复位，实现停泵。

5.3　电气工艺设计基础

电气工艺设计的目的是为满足电气控制设备的制造和使用要求。电气工艺设计的内容包括钣金工艺设计、电气配线工艺设计、电气安装工艺设计等。

近年来，随着电气自动化技术的快速发展和需求，对产品的尺寸、结构产品工业设计（包括造型、色彩、布局等）等都有相应的特殊要求，这就需要合理的结构设计、人机工学设计及制作工艺设计。虽然现在已有一些标准化箱柜产品，但很多情况下还是不能满足现场安装位置、控制方式、布线方式等方面的要求，需要专门设计非标产品，或者选用标准化箱柜进行组合。有时还需要进行配套的电缆桥架设计等。

5.3.1　电气工艺设计的主要内容

电气工艺设计是在电气原理图设计完成后进行，设计内容包括电气控制设备的结构设计，控制箱、控制柜、控制屏和控制台等的钣金工艺设计；总配置图、总接线图及各部分的电气装配图与接线图设计，包括电气配线工艺设计、电气安装工艺设计等，同时还要有各部分的元器件目录、进出线号及主要材料清单等技术资料。

1. 根据设计的电气原理图及选定的电器元件，设计、绘制电气控制系统的总装配图及总接线图。总装配图及总接线图应能反映出主回路、控制回路、控制电器、电气箱（柜）各组件、操作台布置、电源及检测元件的分布状况和各部分之间的接线关系与连接方式。本部分设计资料供制造、总装、调试及日常维护使用。

2. 按照电气原理图或划分的组件进行统一编号，列出各部分的元件目录表，并根据总图编号统计出各组件的进出线号。

3. 根据组件电路原理及选定的元件目录表，设计组件装配图（电器元件布置与安装图）、接线图，图中应反映各电器元件的安装方式与接线方式。这些资料是组件装配和生产管理的依据。

4. 根据组件装配要求，绘制电器安装板和非标准的电器安装零件图，标明技术要求。这些图纸是制造、加工所必需的技术资料。

5. 设计电气箱（柜），根据组件尺寸及安装要求确定电气箱（柜）结构与外形尺寸、安装支架、安装尺寸、面板安装方式、各组件的连接方式、通风散热以及维修操作位置、方式等。在电气箱（柜）设计中，应注意操作维护方便与造型美观。

6. 根据总原理图、总装配图及各组件原理图等资料进行汇总，分别列出外购清单、标准件清单以及主要材料消耗定额等。这些是生产管理和成本核算所必须具备的技术资料。

7. 编制调试、试验、使用、维护、技术说明书、用户使用手册等。

5.3.2　电气设备总体配置设计

电气设备总体配置是根据电气原理图的工作原理与控制要求，将控制系统划分为几个组成部分称为部件，根据电气设备的复杂程度，每一部件又可划成若干组件，如开关电器安装板组件、控制电器组件、控制面板组件、印制电路板组件、电源组件等，根据电气原理图的接线关系整理出各部分的进出线号，并调整它们之间的连接方式。总体配置设计是以电气系

统的总装配图与总接线图形式来表达的，图中应以示意形式反映出各部分主要组件的位置及各部分接线关系、走线方式及使用行线槽、管线要求等。

总装配图、接线图（根据需要可以分开，也可以并在一起）是进行分部设计和协调各部分组成一个完整系统的依据。总体设计要使整个系统集中、紧凑，同时在空间允许条件下，对发热元件、噪声振动大的电气部件，如热继电器、起动电阻箱等尽量放在离其他元件较远的地方或隔离起来；对于多工位加工的大型设备，应考虑两地操作方便，总电源开关、紧急停止控制开关应安放在方便而明显的位置。总体配置设计合理与否关系到电气系统的制造、装配质量，将影响到电气控制系统性能的实现及其工作的可靠性，以及操作、调试、维护等工作的方便及质量。

1. 组件的划分

电气设备中的各种电动机、各类电器元件根据各自的作用及操作要求，都有一定的装配位置要求，例如交流电动机与各种执行元件（电磁铁、电磁阀、电磁离合器、电磁吸盘等），一般安装在靠近机械的部位，各种检测元件（限位开关、传感器、温度、压力、速度继电器等）安装在生产机械的一些特殊部位，各种开关电器（接触器、继电器、刀开关、低压断路器等）、控制电器（熔断器、电流、电压保护继电器等）安放在电气柜（箱）内，而各种控制按钮、控制开关、指示灯、指示仪表等，则安放在电气箱、控制箱、柜（台）的面板上。由于各种电器元件安装位置不同，在构成一个完整的自动控制系统时，必须划分组件，同时要解决组件之间、电气箱之间以及电气箱与被控制装置之间的连线问题，划分组件的原则是：

（1）功能类似的元件组合在一起。例如用于操作的各类按钮、转换开关、键盘、指示灯、检测仪表、调节器等元件集中为控制面板组件；各种刀开关、低压断路器、继电器、接触器、熔断器、照明变压器等开关电器集中为开关电器板组件，热继电器则单独列为一个组件等。

（2）尽可能减少组件之间的连线数量，接线关系密切的控制电器置于同一组件中。

（3）强弱电控制器分离，以减少干扰。

（4）力求整齐美观，外形尺寸，重量相近的电器组合在一起。

（5）便于检查与调试，需经常调节、维护和易损元件组合在一起。

2. 电气控制设备各部分及组件之间的接线方式

电气控制设备各部分及组件之间的接线方式一般遵循以下原则：

（1）开关电器板、控制板的进出线一般采用接线端头或接线鼻子连接，按电流大小及进出线数选用不同规格的接线端头或接线鼻子。

（2）电气柜（箱）、控制箱、柜（台）之间以及它们与被控制设备之间，采用接线端子排或工业连接器连接。

（3）弱电控制组件、印制电路板组件之间应采用各种类型的标准接插件连接。

（4）电气柜（箱）、控制箱、柜（台）内的元件之间的连接，可以借用元件本身的接线端子直接连接，过渡连接线应采用端子排过渡连接，端头应采用相应规格的接线端子处理。

3. 电器元件布置图的设计与绘制

电器元件布置图是某些电器元件按一定原则的组合。电器元件布置图的设计依据是部件原理图、组件的划分等，应遵循以下原则。

（1）同一组件中电器元件的布置应注意将体积大和较重的电器元件应安装在电器板的下面，而发热元件应安装在电气箱（柜）的上部或后部，但热继电器宜放在其下部，因为热继电器的出线端直接与电动机相连便于出线，而其进线端与接触器直接相连接，便于接线并走线最短。

（2）强电弱电分开并注意屏蔽，防止外界干扰。

（3）需要经常维护、检修、调整的电器元件安装位置不宜过高或过低，人力操作开关及需经常监视的仪表的安装位置应符合人体工学原理。

（4）电器元件的布置应考虑安全间隙，并做到整齐、美观、对称，外形尺寸与结构类似的电器安放在一起，以利于加工、安装和配线。若采用行线槽配线方式，应适当加大各排电器间距，以利于布线和维护。

（5）各电器元件的位置确定以后，便可绘制电器布置图，布置图是根据电器元件的外形轮廓绘制的，以其轴线为准，标出各元件的间距尺寸。每个电器元件的安装尺寸及其公差范围，应按产品说明书的标准标注，以保证安装板的加工质量及各电器的顺利安装。大型电气柜中的电器元件，宜安装在两个安装横梁之间，这样，一可减轻柜体重量，节约材料，另外便于安装，设计时应计算纵向安装尺寸。

（6）在电器布置图设计中，还要根据本部件进出线的数量、采用导线规格及进出线位置等，选择进出线方式及接线端子排、连接器或接插件，按一定顺序标上进出线的接线号。

4. 电气部件接线图的绘制

电气部件接线图是根据部件电气原理及电器元件布置图绘制的，它表示成套装置的连接关系，是电气安装与维修、查线的依据。接线图应按以下原则绘制。

（1）接线图和接线表的绘制应符合 GB6988 中《电气制图　接线图和接线表》的规定。

（2）所有电气元件及其引线应标注与电气原理图中相一致的文字符号及接线号。原理图中的项目代号、端子号及导线号的编制分别应符合 GB5094《电气技术中的项目代号》、GB4026《电器接线端子的识别和用字母数字符号标志接线端子的通则》及 GB4884《绝缘导线标记》等规定。

（3）与电气原理图不同，在接线图中同一电器元件的各个部分（触点、线圈等）必须画在一起。

（4）电气接线图一律采用细线条绘制，走线方式有板前走线及板后走线两种，一般采用板前走线，对于简单电气控制部件，电器元件数量较少，接线关系不复杂，可直接画出元件间的连线。但对于复杂部件，电器元件数量多，接线较复杂的情况，一般是采用走线槽，只要在各电器元件上标出接线号，不必画出各元件间连线。

（5）接线图中应标出配线用的各种导线的型号、规格、截面积及颜色要求等。

（6）部件与外电路连接时，大截面导线进出线宜采用连接器连接，其他应经接线端子排连接。

5. 各类元器件及材料清单的汇总

在电气控制系统原理设计及工艺设计结束后，应根据各种图纸，对本设备需要的各种零件及材料进行综合统计，按类别列出外购成品件汇总清单表、标准件清单表、主要材料消耗定额表及辅助材料消耗定额表等，以便采购人员、生产管理部门按设备制造需要备料，做好生产准备工作。这些资料也是成本核算的依据。特别是对于批量生产的产品，此项工作尤为

重要。

6. 编写设计说明书

设计说明书的编写是设计工作中的主要组成部分之一，也是通过设计审查、施工、使用、维护等必不可缺少的技术资料。设计说明书一般应包括以下几部分内容。

（1）所设计的方案选择依据及本设计的主要技术要点。

（2）主要参数及计算过程。

（3）设计任务书中要求各项技术指标的核算与评价。

（4）主要设备及元器件安装的技术要求。

（5）设备调试、使用步骤、技术要点、调试方法及注意事项。

（6）使用、维护要求及注意事项等。

5.3.3 电气柜、箱及非标准零件图的设计

1. 设计内容

工程项目中的电气控制装置通常都需要制作单独的非标电气控制柜、箱，设计时需要考虑以下几方面。

（1）根据操作需要及控制面板、箱、柜内各电气部件的尺寸，确定电气箱、柜的总体尺寸及结构型式，非特殊情况下，一般应选用标准尺寸系列。

（2）根据总体尺寸及结构型式、安装尺寸，设计箱内安装支架、安装板，并标出安装孔、安装螺栓及接地螺栓尺寸，注明配作方式。柜、箱的材料一般选用钢板冷压成型或选用柜、箱用专用型材组装。

（3）根据现场安装位置、操作、维修方便等要求，设计开门方式及型式。为利于箱内电器的通风散热，在箱体适当部位设计百叶窗式通风孔或通风槽，必要时应在柜体上部设计强迫通风装置与通风孔，安装强迫通风装置。

（4）为便于电气箱、柜的运输，应设计合适的起吊勾或在箱体底部设计活动轮。

（5）根据上述，先勾画出箱体的外形草图，估算出各部分尺寸，然后确定各部分尺寸，按比例绘制外形图。再从对称、美观、使用方便等方面考虑进一步调整各尺寸比例。外形确定后，按上述要求进行各部分的结构设计，绘制箱体总装图及门、控制面板、底板、安装支架、装饰条等零件图。视需要选用适当的门锁。应根据机械零件设计要求绘制零件图，凡配合尺寸应注明公差要求，并说明加工要求，如镀锌、喷塑、漆及颜色要求等。电气箱、柜的造型结构各异，在箱体设计中应注意吸取各种型式的优点。

2. 电气柜、箱结构设计

电气柜、箱的柜体结构及柜体制造工艺是电气控制装置的组合基础，柜体既要满足各电器单元的功能组合条件，如型式统一、标准化、功能分配等，还要满足柜体坚固可靠、整齐美观、调整容易等要求。由于工程项目中的柜体结构要求不一，以及加工制造单位的加工设备和手段的差异，制造工艺不完全一致，但制造中也存在带有普遍意义的关键工艺特点，简要介绍如下。

（1）柜体结构特点

从柜体结构形式上分，柜体结构有固定式和抽屉式两大类。从柜体制造工艺上分，有焊接式、紧固式和混合结构等。从柜体构件材料上分，有板材构件和型材构件两大类。

（2）柜体制造工艺特点

1）固定式柜体

固定式柜体能满足各电器元件可靠地固定于柜体中。柜体外形一般为屏式、箱式、台式等。有单面和多面排列方式。为了保证柜体的形位尺寸，通常采取构件组合方式，即柜体各面及内部安装板分离制造，然后通过紧固件组装成柜体。组成柜体的零部件尺寸要求精度高，公差取负值，才能保证整体外形要求。对于柜体两侧面，不能有凸凹现象。另外，从安装角度考虑，底面不能有下陷现象。在排列安装中，应保证地基平整，以免造成柜体变形，影响母线联结及产生组件安装异位、应力集中，甚至影响电器寿命。紧固件组装柜体的优点是有利于零部件涂装，易美化处理，零部件可标准化设计，并可预生产库存，构架外形尺寸误差小。缺点是不如焊接坚固，要求零部件的精度高，加工成本相对高。紧固件种类主要有常规的螺钉、螺母及预紧而可微调的卡箍螺母和预紧的拉固螺母，还有自攻螺钉等，也有专用紧固螺钉。焊接固定式柜体多用板材冷折成型不同的部件后焊接成形，优点是加工方便、坚固可靠，缺点是误差大、易变形、难调整、美观性差，一般需要定做。柜体变形现象是焊接时由于焊接处受热膨胀、挤压产生的微观位移，冷却后不能复位而产生的应力所致。为了克服变形影响，必须整形。

2）抽屉式柜体

抽屉式柜体由固定的柜体和装有开关等主要电器元件的可移动装置部分组成。柜体部分加工方法基本与固定式柜体相似。可移动部分要求移动时要轻便，移入后定位要可靠，能可靠地承装元器件，并且相同类型和规格的抽屉能互换。由于互换性要求，柜体的精度高，结构部分要有足够的调整量，有较高的机械强度。

3）型材式柜体

型材式柜体采用统一的特种型钢和封板，型钢面上有标准间距的模数孔，配以通用联结件，按统一模数组合成柜体。优点是便于柜体设计、备制构件和生产准备，但加工孔量多而用的少，而且空间利用率低。这种柜体的制造工艺特点是要保证构件和联结件的通用性及其精度。

5.3.4　通用变频器与 PLC 控制柜的设计示例

1. 设计的基础资料

在通用变频器与 PLC 控制柜设计前，首先要了解系统概况，如通用变频器与 PLC 的供电质量、工作方式、应用环境、是新增加的系统还是设备改造、控制方式及其他具体要求，如手动/自动、本地/远程、是否需要通信连网。对旧设备改造，应该确切知道如下技术参数及要求：电动机的具体参数，包括额定功率、额定转速、额定电压、额定电流等；电动机的负载特性、工作制、运行方式等，最好能取得以往的运行数据；工作环境，如现场的运行环境温度、防护等级、EMC 等级、防爆等级；通用变频器与 PLC 控制柜的安装位置及与电动机间的实际距离；通用变频器与 PLC 控制柜与原有电气系统的关系；需要引入的传感器信号参数及采样地点；另外还要考虑实现符合 EMC 要求需采取的措施的可能性，如接地、电磁干扰、浪涌抑制、电磁辐射、防雷等措施。对新增加的通用变频器与 PLC 控制系统，应对传动系统负载特性有深入了解，根据负载特性、电动机容量，选用通用变频器与 PLC 的品牌、类型、容量及应具备的功能等，另外也同样要考虑如上所述的内容。

2. 通用变频器与 PLC 控制柜的设计内容

对通用变频器与 PLC 控制柜的电气设计时应按如下几个方面进行。

（1）电气系统图设计

通用变频器与 PLC 控制系统的电气系统图设计包括电气原理图设计、主电路设计、控制电路设计。控制电路设计包括继电逻辑控制电路、PLC 控制接口电路、通信连网系统图等。其中，主电路设计按如下顺序选择主回路电器元件。根据确定的负载特性和电动机参数选择通用变频器；根据技术条件和实际需要，选择低压断路器、交流接触器、制动电阻等，低压断路器及交流接触器等开关器件一般按通用变频器的额定电流的 1.2 倍选择。

（2）电气工艺设计

电气柜、箱及非标准零件图的基本设计步骤见 5.3.3 节。通用变频器与 PLC 控制系统的电气工艺设计包括变频控制柜包括钣金工艺设计、电气配线工艺设计、电气安装工艺设计等。其中，电气配线工艺设计包括电线电缆类型、线径、走向、线色、编号、进出线电缆管接头配置、接地配线、抗干扰布线措施等，除要进行必要的导线截面计算与选择外，还应进行 EMC 设计，并应按照有关外壳防护等级、颜色规定等国家标准配置导线、指示灯和按钮等。对于控制回路设计，应注意将输入/输出的弱电信号如 PLC、仪表、传感器等采取隔离措施，必要时应加装滤波器、浪涌吸收器、电抗器等；控制回路电源易采用隔离变压器进行电气隔离。控制电缆应采用屏蔽电缆，强电电缆最好也采用带屏蔽电缆，电缆及屏蔽层用金属卡固定安装在屏蔽总排上。

1）钣金工艺设计

钣金工艺设计应根据电气系统图设计，应充分考虑工作环境、温度、湿度、振动、有无爆炸、有无腐蚀性气体、柜体承载重量等，柜体上一定要考虑设置合适的通风散热通道，柜下部进风处应设置过滤网，防止灰尘和油雾等杂质进入柜内。通用变频器与 PLC 的环境湿度允许为 90% 以下，湿度过高，会使电气绝缘降低、金属部分腐蚀，如果受安装场所的限制，变频器不得不安装在湿度高的场所，变频器的柜体应采取密封措施或采用密封结构。另外，若地处沿海具有盐雾、潮湿和腐蚀气体等环境，还应有防潮防腐措施。为了防止变频器结露，需加对流加热器，在柜内设置加热器，如电热板加热、远红外电加热装置等，并能根据环境情况自动地将电加热器投入运行，去湿和干燥。另外要考虑柜体上所需要的标示牌及铭牌。为了运输安全和方便，一般要加装吊装挂钩，保证搬运安全。除上述外，应根据抗电磁干扰和屏蔽辐射的能力进行必要的设计。

2）安装底板设计

为了提高电气控制柜的抗电磁干扰和屏蔽辐射的能力，控制柜内应有变频器专用安装底板，控制柜内的所有金属部件都必须相互金属性连接在一起。其中，控制柜的盖板，例如边盖板、后盖板、上盖板、中间隔板相互连通并保持足够的间距；边盖板、后盖板、支撑托架、安装附件和上盖板必须通过柜的框架组装并进行金属性连接；在喷漆和电镀的金属件上进行螺钉连接，应采用能保证金属性连接的垫圈进行连接，也可以在安装前去掉连接部位的表面涂层后再连接，对于大面积去除涂层，为避免长期使用时出现锈蚀，必须考虑附加措施，例如涂上油脂等；各个被连接的部件，包括螺钉、带锯齿连接垫片等的电化学成分必须接近一致。

3）屏蔽设计

电气控制柜的屏蔽效果会受到诸如预开的通风窗口、观察窗口、操作单元等的影响，如果这些开窗达到干扰信号波长的一半，控制柜将失去屏蔽效果。例如当电磁干扰信号 = 500MHz，1/2 波长 = 30cm；当电磁干扰信号 = 1000MHz，1/2 波长 = 15cm 等。因此，电气控制柜内开的通风窗口的形式为，交错排列的孔状或密度高的网格状比狭缝式的好，因为狭缝会在柜中传导高频信号；操作面板安装在控制柜门板上时，必须保证其金属安装框架的四面紧密安装，紧固螺钉的扭矩适当。屏蔽电缆进线口应直接连接柜壳对地屏蔽，防止柜内的干扰磁场通过已被屏蔽的电缆泄漏出去。在屏蔽电缆进线口的位置，其外部屏蔽部分与柜内嵌板都要进行金属性连接，若柜壳有涂层，必须去除围绕渗漏干扰部位的隔离保护层，确保电缆进线口接触可靠。另外，选择适当的金属材料以保证以上接触部位不被锈蚀。电源滤波器外壳必须与柜壳有大面积的接触安装面。柜内应设置屏蔽总线，用于各个电缆的可靠屏蔽连接，横梁式接地排和等电位排都可以作为屏蔽总线使用。接地排作为保护地，而等电位排作为功能地使用。接地排还要通过另外的电缆与保护接地电极连接，只有这样才能安全的释放和旁路电磁干扰电流。

4）走线设计

安装好电气控制柜内包括通用变频器与 PLC 在内的元件即正确处理各种走线是最基本的工作，但往往由于安装不当，引起通用变频器与 PLC 及设备运行异常或损坏，设计时应注意安装工艺设计。通用变频器与 PLC 除非必要和允许，必须垂直向上安装，并留足安装空间，一般上下空间应大于 120mm，左右空间应大于 50mm，还必须可靠接地。在当安装柜内电气元件时，必须可靠地将这些部件准确无误的安装在支撑托架或导轨上，从而能使它们正常的工作，另外还要检查紧固螺钉所用的扭矩是否得到保证。不能将操作面板安装在靠电缆和带有线圈设备很近的地方，例如电源电缆、接触器、继电器、螺线管阀、变压器等，因为它们可以产生很强的磁场。功率部件（变压器、驱动部件、负载功率电源等）与控制部件（继电器控制部分、PLC 等）必须分开安装。但是，变频器和相关的滤波器的金属外壳必须与柜体进行金属性连接，理想的情况是将它们安装到导电良好的金属板上，并将金属板安装到柜体框架上，尽量避免将它们安装在喷过漆的安装板、DIN 导轨或其他支撑表面很小的安装件上，这些都不符合 EMC 要求。

5）抗干扰设计

用于通用变频器与 PLC 的抗干扰抑制器，不能用于其他产品，电源滤波器必须安装在靠近主电源供电馈入线端。电缆安装的基本原则是：

信号电缆线和电源电缆线最大可能地远离，如果不可能使电缆保持适当的距离，则必须使用屏蔽良好的屏蔽电缆和接地良好的金属电缆管道走线。所有电缆都应尽量安排在离金属外壳部件近一些的位置，如控制柜面板、安装板、横梁、金属导轨等。

信号电缆与电源电缆可以交叉，但绝对不要相互并行走线。信号电缆、数据电缆、动力电缆和电源电缆要分别排线，在柜中的最小距离为 20mm，如有必要应采用接地的隔离部件。

相同电路的未被屏蔽的电缆应采用双绞线或将发送线和接收线之间的距离安排得尽量靠近一些。信号电缆和与之相连的等电位联结导体尽量安排为最短距离。信号电缆必须远离那些能产生严重的磁场干扰信号的设备，如电动机、变压器等。只要有可能，所有的信号电缆、数据电缆都应该在同一水平高度进入柜中，如都安排在由柜底部进入。避免使用多余长

度的电缆，走线多余的部分应剪掉。信号电缆，尤其是设定值和实际值电缆，安装时不能被中断。在遇到屏蔽电缆的芯线断开时，必须确保屏蔽连接的延续性，延续屏蔽的正确方法应是通过具有良好屏蔽接触和抗高频干扰的插头（座）来保证，在有些情况下，需要中断屏蔽连接，应从电缆插头分线上中断，并在插头（接线端子）之前和之后将电缆的屏蔽层用螺钉连接的形式固定到屏蔽总线排上。

具有大电流、高电压的脉动负载线都应分别安装。必须用金属电缆支架托住电缆。各个电缆支架连接处必须保证金属性连接并接地。特殊部位应采取措施保护电缆免遭机械损伤，如利用电缆护管或护套，在实际使用中遇有拖拽电缆的情况时，一定要使用特殊电缆。如果不能将电缆直接连接到等屏蔽总接线排上，也可以通过将电缆屏蔽层与夹持型导轨连接到一起，从而实现良好的屏蔽。

对于五金件的安装，应考虑不同部位的扭力规定，不要将接线端子的连接螺钉拧得太紧，从而挤坏电缆。

6）通用变频器与 PLC 的安装方法

以下简单介绍几种通用变频器与 PLC 的安装方法，供参考。

① 壁挂式安装。目前大多数通用变频器与 PLC 都为壁挂式安装方式，只要利用通用变频器与 PLC 的固定挂孔用螺栓固定即可。这种安装方式只适用于无尘、无滴、防潮以及温度适宜的室内环境中使用。

② 挂箱式安装。将通用变频器与 PLC 安装在电气箱内或者安装在机械设备的内腔内。在箱内变频器垂直向上安装，并留足散热空间。通用变频器与 PLC 的使用环境温度与元件的使用温度有关，通常应该在 5 ~ 40℃的范围内。柜内下方要有进气通道，上方要有排气通道，进排气通道应有避免异物掉入和避免液体滴入的防护。这种安装方式适用于一般工业场合。

③ 柜内安装。将通用变频器与 PLC 安装在电气柜内。在柜内，变频器与 PLC 应垂直向上安装在柜体的中下部，柜体上部一般安装电器元件，千万不能将变频器与 PLC 设置在柜内热空气聚集的最上部。为确保通风空间，变频器与 PLC 上下部要和其他的设备、配线管等之间应维持充分的间隔距离。柜内下方要有进气通道，上方要有排气通道，并加装排气扇，使排气畅通；进排气通道要装金属丝网以避免灰尘、液体和异物进入柜内。这种安装方式适用于一般工业设备就地控制的场合。

④ 封闭性安装。将通用变频器与 PLC 安装在封闭的电气柜内，柜内通用变频器与 PLC 垂直向上安装，并留足空间。电气柜内下方要有进气通道，上方要有排气通道。电气柜内装一台空调器，让空调器的排气孔通过风道进入电气柜内的下方进气通道；电气柜内的上方排气通道通过风道进入空调器的进气孔，使空调器运行时的冷空气能进入电气柜内下方；电气柜内上方的热空气进入空调器进行热交换，使空气变冷后再进入新的循环。空调器的热交换散热器将电气柜内的热量排出柜外。电气柜内由于密封，所以具有除尘、防潮、防滴、防水、降温、散热等优点，使通用变频器与 PLC 在良好的封闭低温空间中安全运行。这种安装方式适用于纺织厂、化学工厂、皮革制造厂、食品加工厂、矿山等运行环境恶劣的场所。

⑤ 与机械设备配套安装。在有些机械成套设备中，由于结构原因不能将通用变频器与 PLC 安装在设备外部，而要求安装在设备内腔内，将操作面板或者调速旋钮与设备的操作面

板统一布置安装。通常采取三种方法。

a）目前多数通用变频器的操作面板可与主体分离，这样只需将操作面板用专用电缆和接插件与设备的操作面板统一设计连接即可。

b）从通用变频器与 PLC 的外部控制端子上引出控制按钮、调速电位器或模拟信号、显示信号和报警信号等，并将它直接设计并安装在设备操作面板上，这种方法既方便又实用。

c）目前已有生产机械设备专用的一体化变频器，变频器主体上无任何操作部件，操作部件提供给用户，通过电缆线接入变频器。

5.3.5　某企业金属表面处理生产线电气控制装置设计

本节内容可作为在校生课程设计或毕业设计的参考。在作为毕业设计课题时，可将吊篮数增加，如增加到 7 吊篮、9 吊篮等。控制方式可修改为其他品牌的通用变频器、PLC 产品和型号。

1. 生产线概况

某企业具有多条金属表面处理生产线，生产线采用直线式行车，行车架上有可升降的吊钩。行车和吊钩各由一台电动机带动。在行车的适当位置装有接近开关 SQ，行车的平移和吊钩的上下运动均由接近开关 SQ 定位。生产线的结构与动作流程如图 5-9 所示。

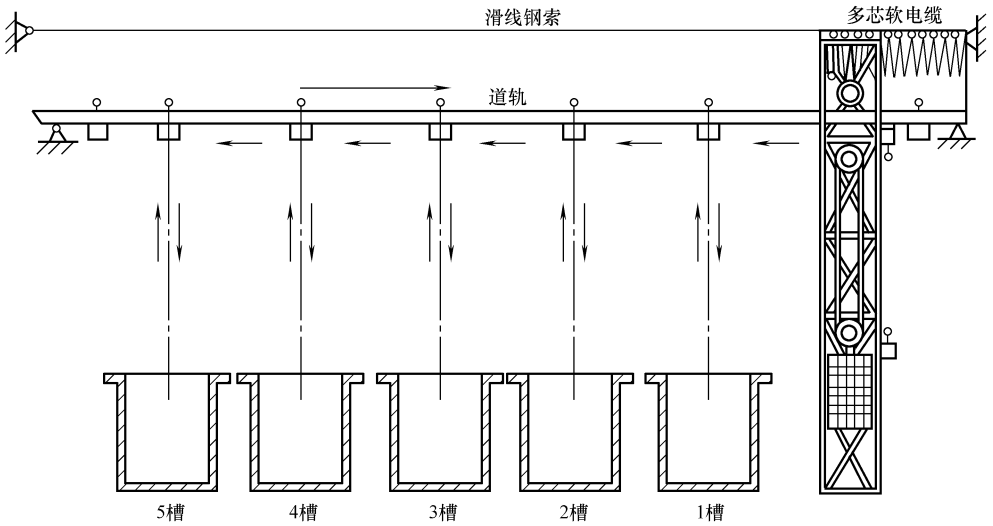


图 5-9　生产线的结构与动作流程示意图

行车中的小车、大车及升降运动由笼型三相异步电动机传动，每台电动机的额定功率 1.1kW、额定电压 380V、额定电流 1.99A、同步转速 1410r/min，并采用机械减速。行车机械结构与普通小型行车结构类似，跨度较小，但要求准确停位，以便吊篮能准确进入电镀槽内。工作时，除具有自动控制的大车前/后移动与吊物上/下运动外，还有调整吊篮位置的小车运动（左/右）。

控制装置具有程序预选功能，可按电镀工艺要求确定需要的停留工位，一旦程序选定，除上、下装卸零件，整个电镀工艺应能自动进行。行车中的小车、大车及升降运动要求准确停位。前后、升降及左右运动之间有联锁作用。采用远距离控制，整机电源及各动作需要有相应灯光指示。具有限位保护和电气保护。

（1）生产工艺流程

1）金属件镀锌工艺流程：镀件—去油—碱性清洗—去锈—酸性清洗—镀锌—清洗—钝化—清洗—烘干—成品。

2）金属件镀镍工艺流程：镀件—去油—碱性清洗—去锈—酸性清洗—预镀铜—清洗—镀镍—清洗—干燥—成品

3）金属件镀铬流程：镀件—去油—碱性清洗—去锈—酸性清洗—预镀镍—清洗—镀铜—清洗—镀亮镍—清洗—镀铬—清洗—干燥—成品

（2）生产线工作过程

生产线采用远距离控制，起吊重量在 500kg 以下，起吊物品是待进行表面处理的各种产品零件。生产线上有 5 ~9 个镀槽，30 余个工位，镀槽一字排开，工件由装有可升降吊钩的行车带动，升降吊钩在各个镀槽上将吊篮提起、放下、转移，即经过电镀、镀液回收、清洗等工序，完成工件的电镀全过程。在各个槽停留时间预先按工艺设定。如，工作时，工件放入镀槽中电镀，约 5min 后提起，再停放 30s，让镀液从工件上流回镀槽，然后放入回收液槽中浸 30s，提起后停 15s，接着放入清水槽中清洗 30s，最后提起停 15s，行车返回原位，一个工件的电镀过程结束。对于不同零件，其镀锌、镀镍、镀铬、镀镍镉及镀层要求和工艺过程是不相同的。因此，设备还要求电气控制系统能针对不同工件的工艺流程，有程序预选和修改性能。主要工位有上料工位、前处理工位、镀槽工位、后处理工位、下料工位等。上、下料工位是行车运行的始末位置。在生产线起始位置，人工将待加工零件装入吊篮，并发出信号，吊钩上升，专用行车便提升并自动逐段前进，按工艺要求在需要停留的槽位停止（由接近开关 SQ 定位），并自动下降，停留一定时间后自动提升，行车左移，直至下一步工序接近开关 SQ 检测位置时才停止，吊钩正好在该处理工位上方，吊钩下降，直至下降定位接近开关 SQ 检测位置时才停止，镀件放入处理槽内，按工艺要求定时处理镀件，定时时间到，吊钩上升提起镀件，直至上升接近开关 SQ 检测位置时才停止，继续转到下一步工序，如此循环完成电镀工艺规定的每一道工序，直至生产线的末端下料处卸下处理好的镀件，自动返回上料工位（原位），重新装料，发出信号进入下一循环电镀工作。

（3）技术改造要求

为了提高电镀生产线的自动化生产水平，实现对电镀生产的实时监控，提高生产效率，在不影响生产的情况下，拟分期分批进行技术改造，按照工艺要求，将电镀处理槽、行车、电气系统、电源设备、抽风系统、循环过滤系统、温控加热系统、空气搅拌系统、液位控制系统、阴极移动装置等改造为多功能自动控制系统。行车和吊钩电动机改造为通用变频器控制。由可编程序控制器 PLC、工控机 IPC、触摸屏组成自动化控制系统。

2. 原系统电气控制系统概况

（1）主电路

原系统行车电气控制主电路如图 5-10 所示。

1）行车的左右、前后及上下运动分别由电动机 M1、M2、M3 拖动，并通过正反转控制实现两个方向的移动。由接触器 K1、K2、K3、K4 及 K5、K6 分别控制电动机 M1、M2、M3 的正、反转。因设备调整需要，进退及升降控制也有点动控制。M2、M3 由热继电器 FR1、FR2 实现过载保护。吊篮的左右移动，由 K1、K2 控制 M1 的正、反转实现。M1 正转左移，反转右移，采用点动控制，两地操作（控制操作台、现场操作）。M1 电动机为点动短时工

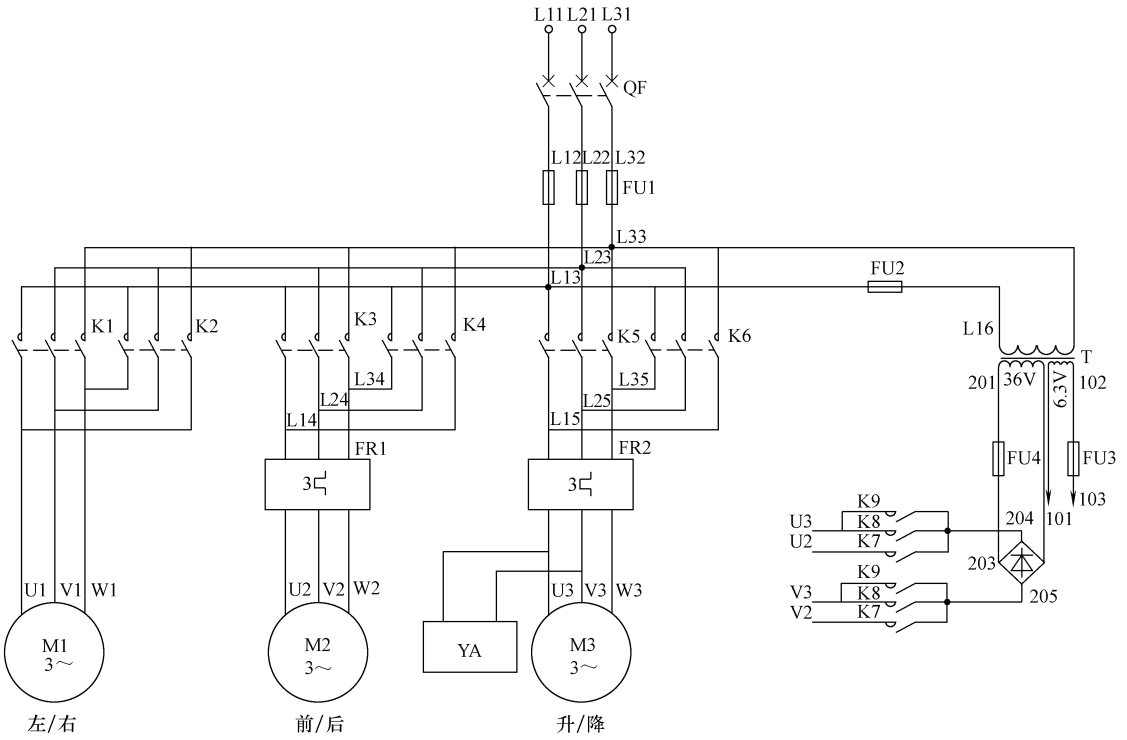


图 5-10　行车电气控制主电路

作，故不设过载保护。由 FU1 实现短路保护。低压断路器 QF 为电源开关。

2）进退与升降运动停止时，采用能耗制动定位。平移中，升降电机 M3 采用电磁抱闸制动定位。由于进退与升降运动由同一型号电动机拖动，相互联锁不会同时工作，所以，停车时采用同一个直流电源实现能耗制动。直流电源为单相桥式整流。能耗制动回路中设有单独的熔断器短路保护 FU2、FU4。电磁铁 YA 与 M3 并联，当 M3 得电时，YA 工作，松开刹车允许升降运动。M3 失电时，YA 释放，抱闸刹车，使吊篮稳定停留在空中，能安全地前后平移。

3）位置控制指令信号，由固定在轨道一侧的限位开关发出，并用调节挡铁保证吊篮与镀槽相对位置的准确性。

4）制动时间与各槽停留时间，由延时继电器控制。采用带指示灯控制按钮，以显示设备运动状态。

5）采用串入或短接位置指令信号的方法，实现程序可调。

6）M2、M3 为自动控制连续运转，采用热继电器实现过载保护，左右移动为调整运动，短时工作无过载保护。

7）主电路及控制电路采用熔断器实现短路保护。

8）由限位开关实现位置保护。

9）电气控制箱置于操作室内，落地安装。

（2）控制电路

原系统行车控制电路如图 5-11 所示。电气原理图元件明细见表 5-2。

1）根据电镀工艺要求，行车前进与升降运动为自动控制，其控制过程是：按下 SB11，

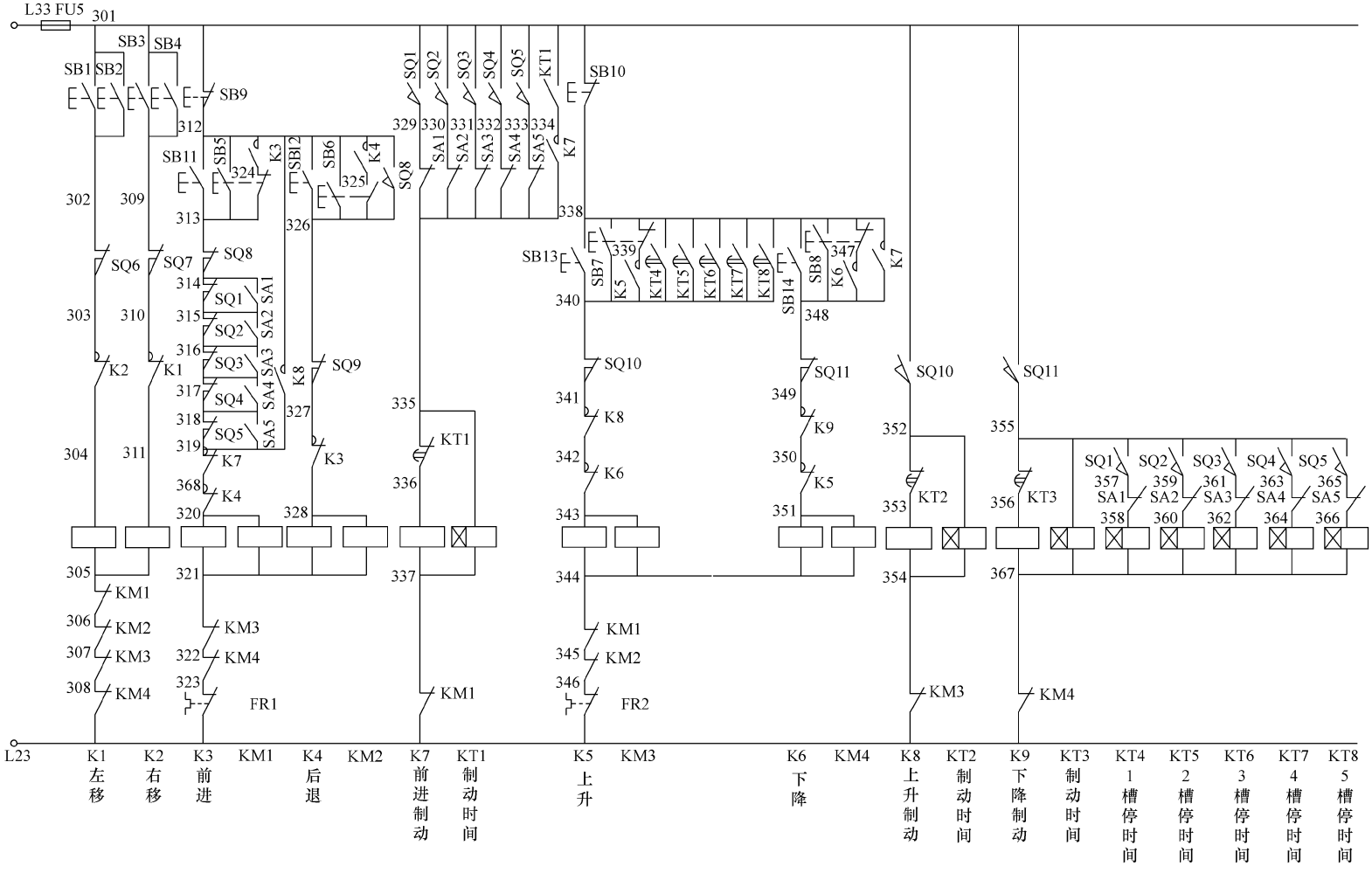

L33 FU5
301
SB1 SB2 SB3 SB4 SB9
312
SB11 SB5 K3 324
SB12 SB6 K4 325
SQ8
SQ1 SQ2 SQ3 SQ4 SQ5 KT1 SB10
329 330 331 332 333 334
SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 K7
338
302 309 313 326
SQ6 SQ7 SQ8
SB13 SB7 K5 KT4 KT5 KT6 KT7 KT8 SB14 SB8 K6 K7
339 347
340 348
303 310 314 315 316 317 318 319
SQ1 SQ2 SQ3 SQ4 SQ5 SA1 SA2 SA3 SA4 SA5
K2 K1 K8 SQ9
SQ10 SQ11
304 311 327 335 341 349 352 355
K7 K3 KT1 K8 K9 KT2 KT3
SQ1 SQ2 SQ3 SQ4 SQ5
SA1 SA2 SA3 SA4 SA5
357 359 361 363 365
358 360 362 364 366
368 K4 336 342 350 353 356
320 328 343 351
305 321 337 344 354 367
KM1 KM2 KM3 KM4
306 307 308 322 323 345 346
KM3 KM4 KM1 KM2 KM1
FR1 FR2
KM3 KM4
L23 K1 左移 K2 右移 K3 前进 KM1 K4 后退 KM2 K7 前进制动 KT1 制动时间 K5 上升 KM3 K6 下降 KM4 K8 上升制动 KT2 制动时间 K9 下降制动 KT3 制动时间 KT4 1 槽停时间 KT5 2 槽停时间 KT6 3 槽停时间 KT7 4 槽停时间 KT8 5 槽停时间

图 5-11　控制线路

K3 及 KM1 吸合，行车前进，当运行至需要停留的槽位，如第 1 个槽清洗，由运动挡铁压下固定于导轨一侧的行程开关 SQ1，SQ1 常闭触头串在 M2 控制回路中，使 K3、KM1 失电，M2 停止旋转，同时由 KM1 常闭及 SQ1 常开触头接通前进制动回路，K7 和时间继电器 KT1 得电，使 M2 制动，行车准确停在第 1 槽。制动时间由时间继电器 KT1 设定，停留时间由时间继电器 KT4 设定。若工艺要求第 1 槽无需停留，则可扳动开关 SA1，使其常开触头闭合，常闭触头打开，则行车继续前进。在 M2 制动的同时，由 K7 常开触头接通 K6 与 KM4，使 M3 正转，吊篮下降至下限位置时，限位开关 SQ11 受压，使 K6 失电。同时 SQ11 常开触头接通下降制动回路，而使其迅速停车。零件在槽内停留时间由时间继电器 KT4 自动控制，由时间继电器 KT4 延时闭合触头接通 K5、KM3，使 M3 反转，吊篮上升到上限位开关 SQ10 时，使 M3 停转。同时 SQ10 常开触头接通上升制动回路，使 K8 和 KT2 得电，在制动的同时，由 K8 常开触头接通行车前进控制回路。如此循环，直至按工艺要求完成零件的电镀过程，行车到达终点，压下 SQ8 自动停止前进，同时，由 SQ8 常开触头接通 K4、KM2 使行车自动回到原位。进退与升降之间，由 KM1、KM2 及 KM3、KM4 常闭触头串接于对方控制回路，实现联锁。电动机过载保护由 FR1、FR2 常闭触头串在 M2、M3 各自的控制回路中实现。原位是指行车在挂架上方，吊钩下降到最下方。

2）在吊篮进退与升降运动中，不允许左右移动，故串联中间继电器 KM1 ~ KM4 常闭触头实现联锁。左右限位置保护由固定于左右两端的限位开关 SQ6、SQ7 实现。

3）控制电压直接采用电网电压，由 FU5 对控制电路进行短路保护。

4）能耗制动参数计算：

制动电流 $I_D = 1.5I_N = 3A$

直流电压 $U_D = I_D R = 30V$，式中 R 为定子两相电阻约为 10Ω。

整流变压器二次侧交流电流 $I_2 = 3A/0.9 = 3.33A$；电压 $U_2 = 30V/0.9 = 33.3V$

整流变压器容量 $S = I_2 U_2 = 100VA$，BK-100 变压器 220V/36V/6.3V，与显示、照明共同。

5）灯光指示电路如图 5-12 所示。

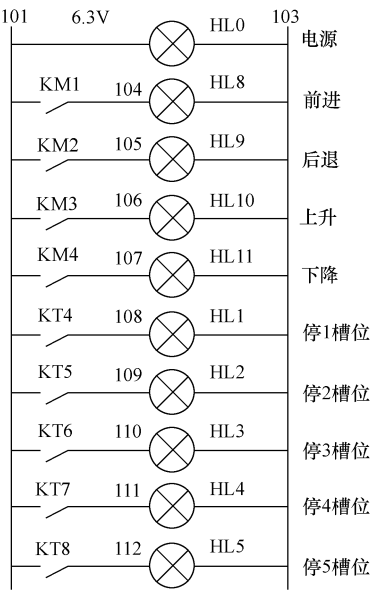


图 5-12　灯光指示电路

合上 QS、HL0 指示灯亮，表示控制系统已通电。生产过程中由灯 HL8 ~ HL11 显示行车的进退、升降运行状态。并由灯 HL1 ~ HL5 显示行车的停留位置。

表 5-2　元器件明细表

序号	元器件符号	名称	数量	规格型号	备注
1	M1 ~ M3	电动机	3	Y90S-4	1.1kW
2	FR1、FR2	热继电器	2	JR20-20/3	整定值 2A
3	YA	制动电磁铁	1	JC2，380V	配用 MLS1-15
4	FU1 ~ FU4	熔断器	6	RL1-15	FU1 为 6A，其余为 2A

（续）

序号	元器件符号	名称	数量	规格型号	备注
5	VC	整流器	1	QL5A，100V	100V，5A
6	TC	变压器	1	BK100	
7	QF	电源开关	1	DZ20-20/3	
8	SB1 ~ SB8	点动按钮	9	LA19-11	
9	SB9 ~ SB10	停止按钮	2	LA19-11D	红色指示灯 6.3V
10	SB11 ~ SB14	起动按钮	4	LA19-11D	绿色指示灯 6.3V
11	K1 ~ K9	接触器	6	CJ20-10	
12	KM1 ~ KM4	中间继电器	4	JZ7-44，380V	
13	KT1 ~ KT3	时间继电器	3	JS7-2A，380V	
14	KT4 ~ KT8	时间继电器	5	JS11-5，380V	
15	SQ1 ~ SQ5	行程开关	5	LXK2-131	
16	SQ6 ~ SQ11	限位开关	6	JLXK1-411	
17	SA1 ~ SA5	组合开关	5	HZ10-10/13 型	
18	HL0 ~ HL11	指示灯	10	XD1	6.3V，0.05A
19	FU3	熔断器	1	BHC 型	熔芯 2A

（3）原系统电气工艺

原系统电气工艺图包括电气装置总体配置图、总接线图、电器安装板、电器元件布置图、接线图、控制面板电器布置图及接线图。

1）电气箱内部电器安装板上安装的电器元件有低压断路器、熔断器、接触器、中间继电器、热继电器、变压器、整流器等。控制面板上安装的电器元件有电源开关、控制按钮、程序选择开关、指示灯等。电气箱外部，分布于生产线上的电器元件有电动机、制动电磁铁、限位开关等。

2）总接线图。电气设备的总接线图，如图 5-13 所示。图中已根据电器元件的分布与电气原理图编号，并标明各电气部分的连接线号及连接方式、安装走线方式、导线及安装要求等。

3）电器元件布置图、电器安装板、接线图如图 5-14、图 5-15、图 5-16 所示。进出线均采用接线端子排。

4）控制面板、元件布置及接线图等加工图如图 5-17、图 5-18 所示。图中已标明外形尺寸、安装孔及定位尺寸与公差、板的材料与厚度以及加工技术要求。电器安装板选用酚醛绝缘板。控制面板选用有机玻璃板，字体 2mm，按要求刻字喷漆着色。

（4）原设计说明书和使用说明书的主要内容

原设计说明书和使用说明书的主要内容包括总体方案的选择说明、电气原理线路设计说明、主要参数计算及主要电器元件选择说明、元件明细表等。附有上述电气原理图及工艺图样。设备说明书包括设备的用途、性能及特点。工作原理简单说明、安装、使用与维护注意事项等。

（5）原设计设计审查的主要内容

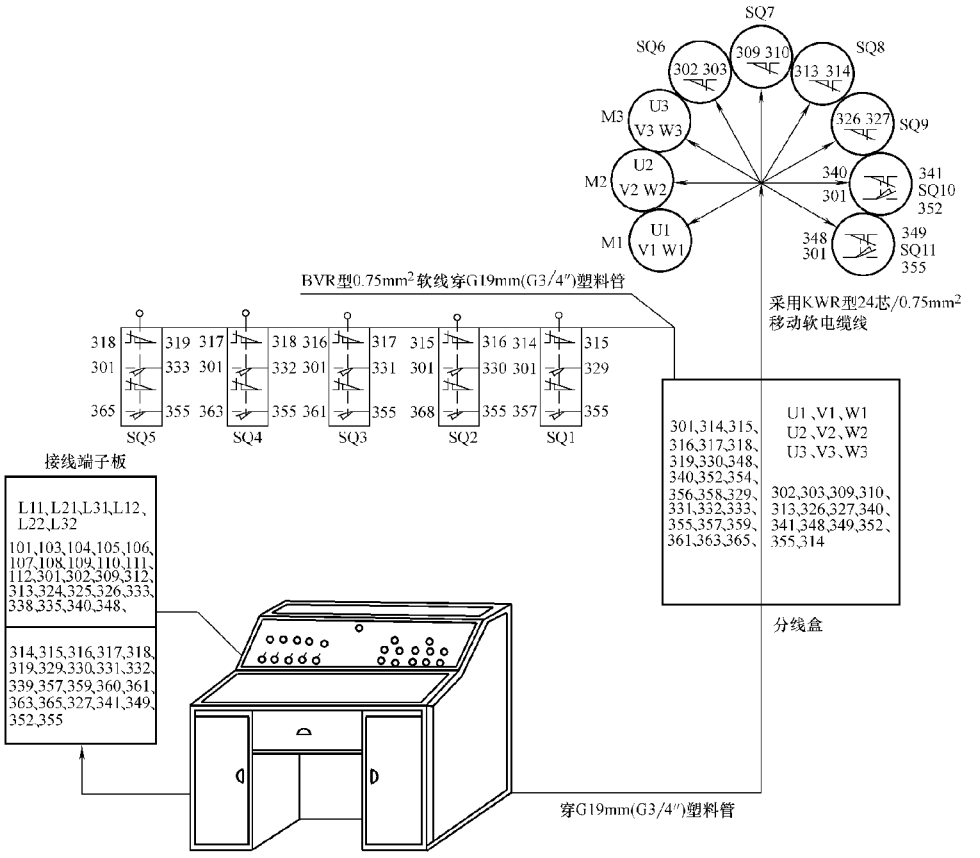


图 5-13　总接线图

原设计设计审查的主要内容包括总体方案的选择依据及正确性；控制线路满足任务书中提出的各项控制要求，可靠性程度评估；联锁、保护、显示、参数计算及元件选择的正确性；各种图样、说明书及应提供技术资料的完整性和标准化审查等。

3. 技术改造

第一批进行技术改造，拟先改造原有的一条半自动生产线，成功后再陆续改造其他生产线。按照工艺要求，行车和吊钩电动机改造为通用变频器控制，由可编程序控制器（PLC）控制，最终采用工业计算机、触摸屏组成网络化自动控制系统。

（1）改造方案

将原生产线改为直线悬臂式行车，保留原行车左右和上下运动电动机，改用通用变频器控制。使行车的行走轮沿镀槽一侧的机架上的主副导轨行走，提升臂改为沿行车架上的导轨滑行，以滚动滑动方式替代直接提

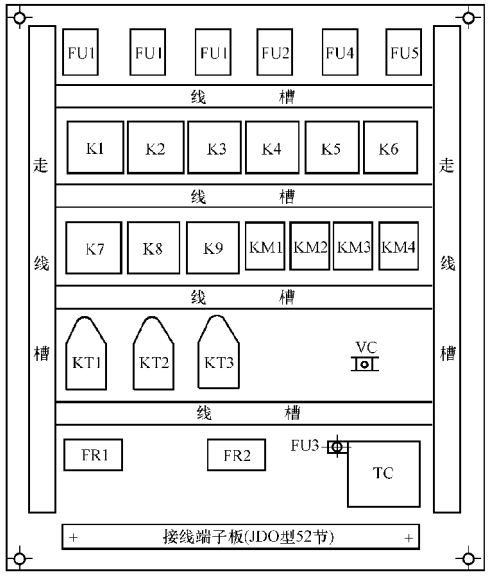


图 5-14　电器安装板元件排列图

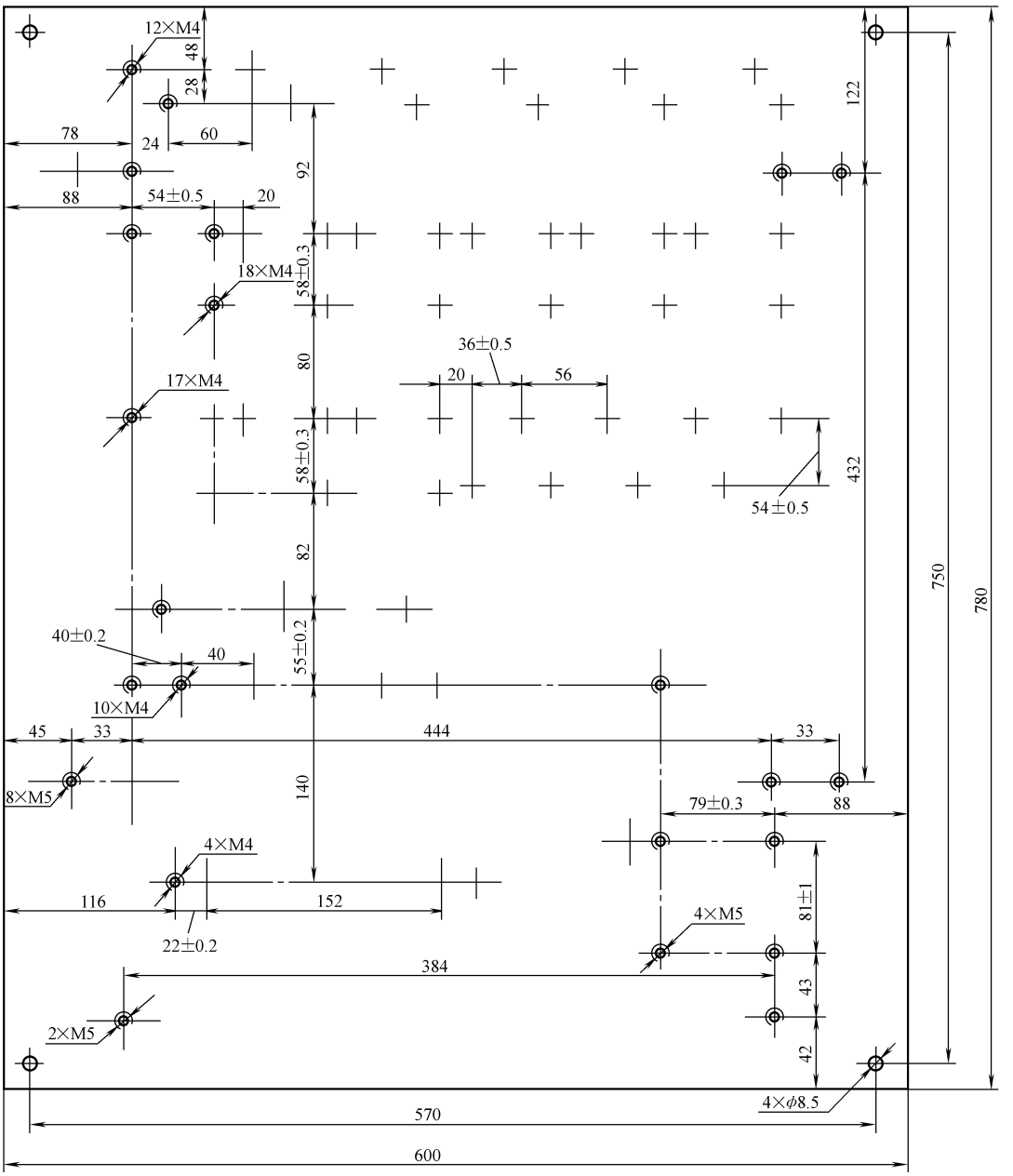


图 5-15　电器安装板加工图

升方式。将原控制柜重新设计，改为 PLC 控制。

（2）通用变频器控制

为了使小车能准确定位，需要对行车的速度进行控制。选用 2 台三菱高性能通用型变频器 A740-1.5K-CHTFR 分别控制行车的平移、升降，进行无级变频调速，拆除原来的电磁抱闸。A700 系列变频器过载能力强、控制功能多，适合大多数通用场合，具有速度、转矩、位置控制模式及各模式的切换。在 0.3Hz 的低速下最高可实现 200% 的输出转矩。转矩模式下，控制范围 1∶20；速度响应 120rad/s，速度控制范围 1∶200。闭环矢量控制下，速度控制范围 1∶1500；

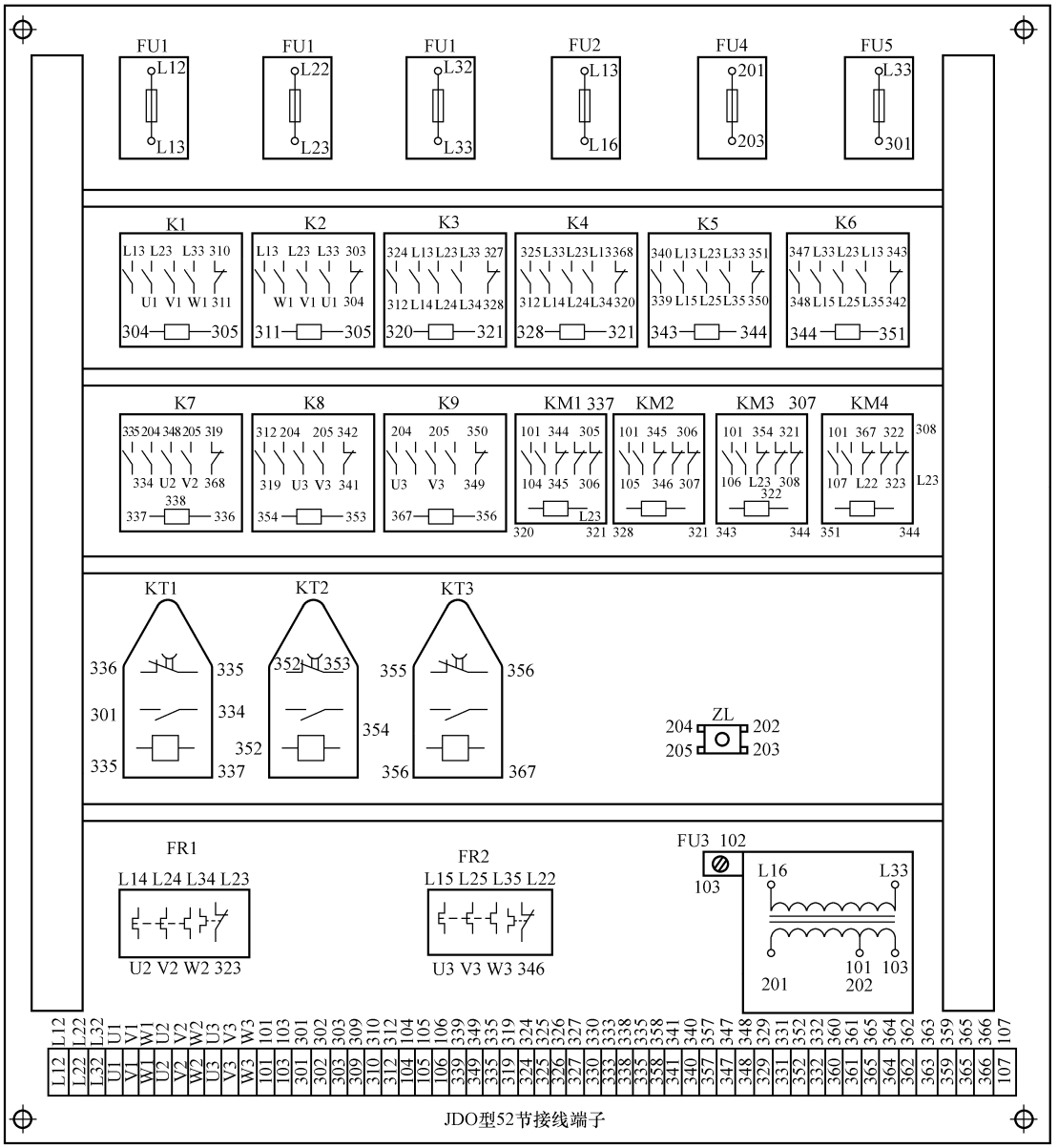


图 5-16　电器安装板接线图

速度波动率 0.01%；速度响应 300rad/s；转矩控制范围 1∶50，并具零速控制和伺服锁定功能。内置 15 段预设位置段，并且可与 PLC 构成通用伺服系统，实现定位操作。内置的 PLC 编程功能可方便地利用 GX-Developer 对变频器内的 PLC 编制程序，进行相关的电气控制，做到一机多用。内置 USB 通信接口，可方便连接 FR-Configurator 变频器设置软件。除内置的基本 485 通信方式外，通过选用总线适配器可链接 CC-Link、Profibus-DP、Device-NET、LonWorks、CANopen、EtherNET、SSCNETⅢ等现场总线，实现设备网络化控制。

通过通用变频器的设定值可控制电动机正反转，即行车左右移动、吊钩上升和下降，并且速度可调。为了防止行车运行时镀件摇晃，行车平移时，先快速，当快接近工位时，再转

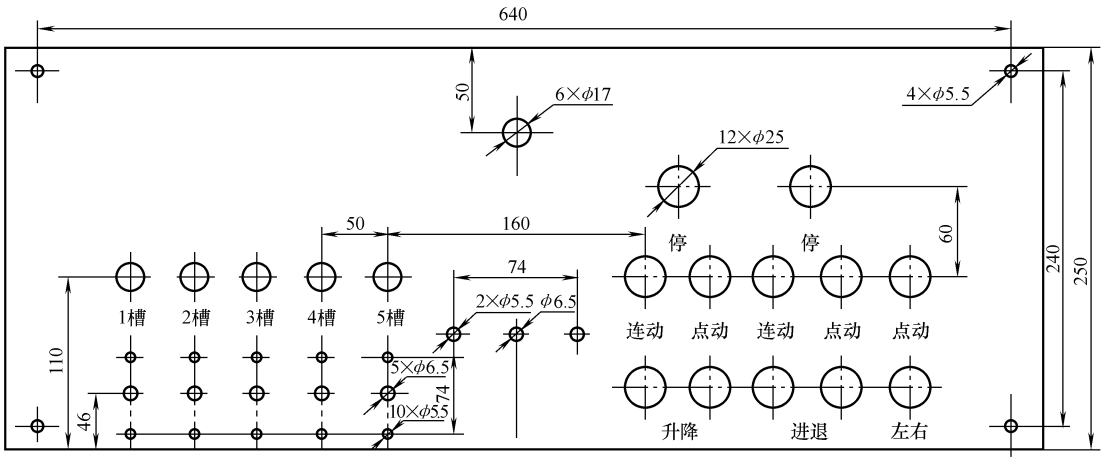


图 5-17 控制面板加工图

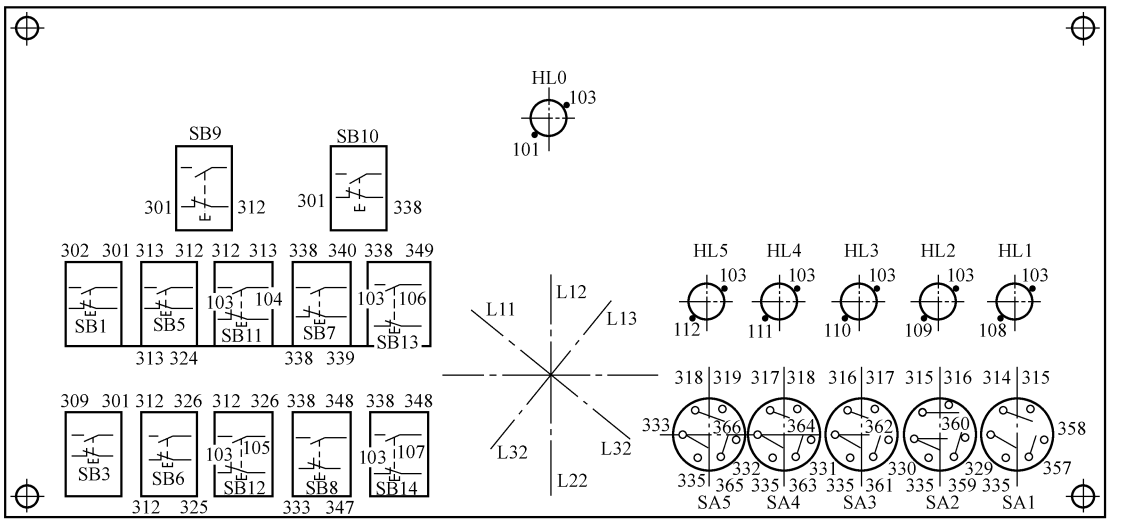


图 5-18 控制面板元件布置及接线图

为慢速，以减小制动力矩，提高定位的准确性。

（3）可编程序控制器控制

由于电镀生产线需要根据不同的工艺要求，完成不同的任务，要求能方便地修改工艺流程和运行参数，同时要求系统安全、可靠、准确、性能稳定。为此选用 OMRON CPM2A 系列 PLC 控制。图 5-19 是电镀生产线的状态流程图。根据行车的控制要求，其输入/输出及控制信号共有 22 个，其中，输入信号 18 个，输出信号 4 个，地址配置见表 5-3。图 5-20 是部分梯形图程序。

表 5-3 I/O 配置表

编　码	符　号	功　能	备　注
输入			
10000	SB1	起动	按钮
10001	SB2	停止	按钮
10002	SB3	吊钩提升	手动按钮

（续）

编　码	符　号	功　能	备　注
输入			
10003	SB4	吊钩下降	手动按钮
10004	SB5	行车前进	手动按钮
10005	SB6	行车前进	手动按钮
10006	SA1	选择开关	自动
10007	SA2	选择开关	手动
10011	SQ1	限位开关	吊钩下限位
10012	SQ2	限位开关	吊钩上限位
10013	SQ3	限位开关	行车左行限位 1
10014	SQ4	限位开关	行车左行限位 2
10015	SQ5	限位开关	行车左行限位 3
10016	SQ6	限位开关	行车左行限位 4
10017	SQ7	限位开关	行车左行限位 5
10020	SQ8	限位开关	行车左行限位 6
10021	SQ9	限位开关	行车左行限位 7
10022	SQ10	限位开关	行车右行限位
输出			
00001	K1	吊钩上升接触器	
00002	K2	吊钩下降接触器	
00003	K3	行车后退接触器	
00004	K4	行车前行接触器	

图 5-20 所示梯形图程序是从第 4 槽开始的，数据传送部分图中未示出。

图 5-20 所示梯形图程序分析如下：

1）原位，限位开关 SQ1 和 SQ2 被压下，10011 和 0022 闭合，接通移位寄存器输入通道 20000，数据存于 DM4000 通道中。

2）按起动按钮 SB1，10000 闭合，K1 工作，吊钩提起工件上升，当碰到上限位开关 SQ2 时，10012 闭合，吊钩停止上升，K3 工作，00003 闭合，行车开始向下一道工序前行。

3）当行车前行至镀锌槽限位开关 SQ6 时，10016 闭合，行车停止前行，Y00004 得电，K4 工作，吊钩刚好在镀锌槽的上方开始下降。

4）当吊钩下降至下限位开关 SQ1 时，10011 闭合，吊钩下降停止，工件浸入镀液槽中，并开始定时。

5）定时 300s 后，00003 闭合，K3 工作，电镀结束，吊钩提起工件，开始上升，当碰到上限位开关 SQ2 时停止，10012 闭合，吊钩停止上升，并在镀槽上方停留 30s，让镀液滴回槽中。

6）当行车在镀槽上方停留 30s 后，K1 工作，00001 闭合，行车继续向下一道工序前行，直到碰压回收液槽限位开关 SQ7 时，10017 闭合，K4 工作，

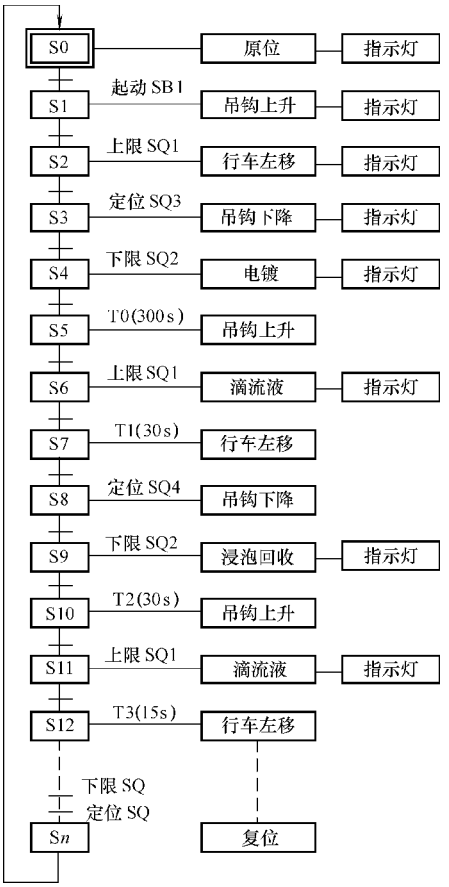


图 5-19　电镀生产线的状态流程图

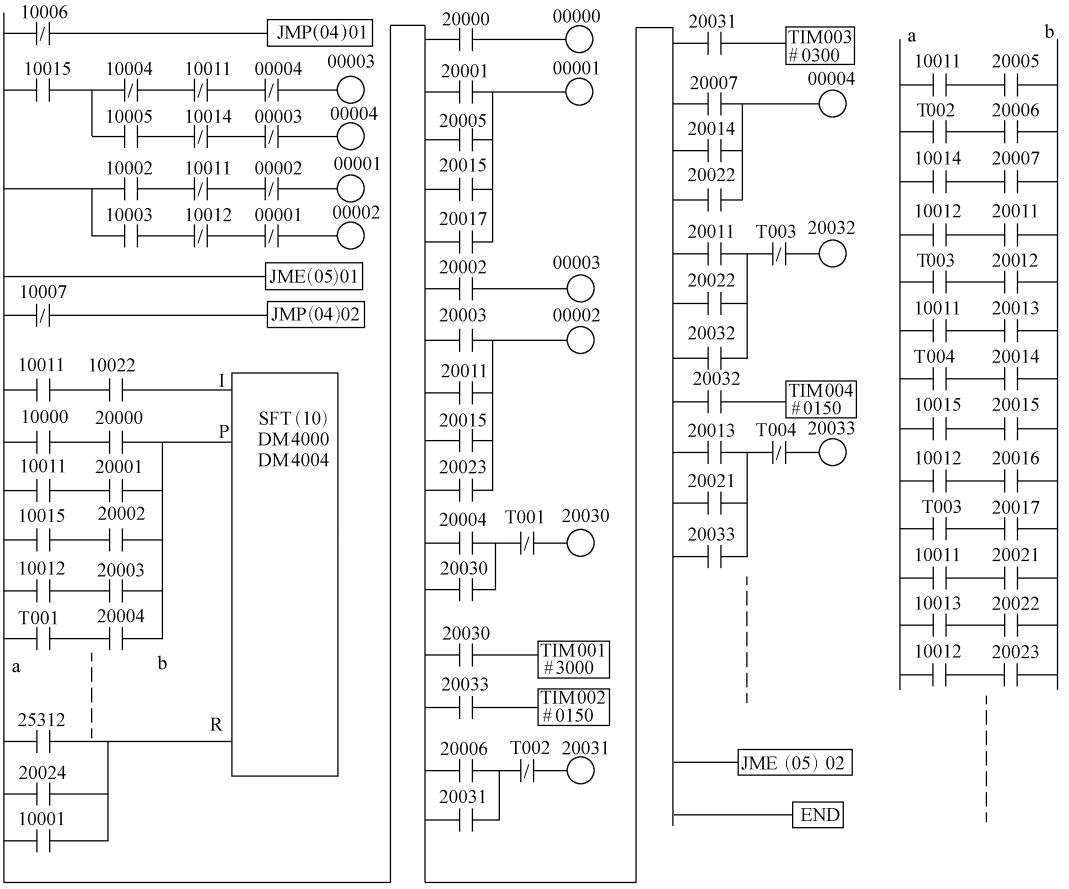


图 5-20　电镀生产线的梯形图程序

00004 闭合，行车停止前行，并且吊钩刚好在回收液槽的上方开始下降。

7）当吊钩下降至下限位开关 SQ1 时，10011 闭合，吊钩下降停止，工件被放置回收液槽中，并开始定时。

8）定时 30s 后，K3 工作，00003 闭合，吊钩又开始上升，当碰到上限位开关 SQ2 时停止，10017 接通，吊钩停止上升，并定时停留 15s。

9）当 15s 定时到后，K1 工作，00001 闭合，行车继续向下一道工序前行，直到碰压清水槽限位开关 SQ8 时，10020 闭合，行车停止前行，并且在清水槽上方停留 15s。

10）定时 15s 后，K4 工作，00004 闭合，吊钩开始下降，当吊钩下降至下限位开关 SQ1 时，10011 闭合，吊钩下降停止，工件置于清水槽中，并开始定时清洗 30s。

11）定时清洗 30s 后，K3 工作，10003 闭合，吊钩提起工件，开始上升，当碰到上限位开关 SQ2 时停止，10012 闭合，吊钩停止上升，并定时停留 15s。

12）定时 15s 后，K2 工作，10002 闭合，行车开始后退，当后退至原位限位开关 SQ10 时，10023 闭合，K2 工作，00002 闭合，行车停止后退，吊钩开始下降，当吊钩下降至下限位开关 SQ1 时，10011 闭合，吊钩下降停止，镀好的工件被取下来。

13）按下按钮 SB3 ~ SB6，能实现行车的手动控制。

至此，整个电镀生产完成一个工作循环，当再次按下起动按钮 SB1 时，则开始第二个

工作循环。

在自动模式下，行车按照工艺流程所设定的参数自动运行；手动模式下，通过行车上的手操盒人工操作控制行车运动，并可用急停按钮紧急刹车停止任何运动。这两种工作模式可以通过选择开关切换。

工艺参数可以通过上位机修改和设置。在上位机上采用组态软件组态监控画面。现场有触摸屏，可在现场进行工艺参数的修改，若有报警，触摸屏显示报警画面，并且显示报警原因。在排除故障后按下解除按钮方可显示初始画面，恢复正常状态。动作指示灯安装在现场操作台上。

第 6 章　基于西门子 TIA Portal 软件平台的 PLC 编程

在西门子 TIA 博途（TIA Portal）SIMATIC STEP 7 V11 工程组态软件下，可编辑 SIMATIC S7 – 1200/300/400 系列 PLC 的用户程序。可任选梯形图 LAD、功能块图 FBD、助记符 STL（S7 – 300/400）、结构化文本 SCL 和顺序功能图 GRAPH（S7 – 300/400）编程语言中的一种或多种。指令系统包括基本指令、扩展指令工艺指令和通信指令 4 大类。基本指令包括位逻辑、定时器、计数器、比较、数学运算、移动、转换、跳转、逻辑运算、移位和循环等类别指令。扩展指令包括字符和字符串、日期和时间、过程映像、分布式 I/O、模块参数化分配、中断、报警、诊断、数据块控制、表和寻址等类别指令。工艺指令包括 PID 控制、功能模块和 300C 功能等类别指令。通信指令包括 S7 通信、开放式用户通信、WEB Server、通信处理器、与智能从站/智能设备通信、PROFINET/CBA、MPI 和远程服务等指令类别。由于内容繁多，限于篇幅，本章仅介绍一些关于编辑用户程序的基础知识、基本概念和基本操作方法。

6.1　STEP 7 的逻辑块与程序结构

用户程序是由用户编写，并将其装载到 CPU 中的应用程序，包含处理特定自动化任务所需的全部功能。STEP 7 的用户程序结构可分为线性化程序结构和结构化程序结构两类，以逻辑块形式管理用户程序和数据。通过在程序块内部或程序块之间的调用，实现程序运行与控制任务。

6.1.1　逻辑块类型

逻辑块是包含操作系统功能和部分用户程序的程序块，程序块是用户程序的主程序和子程序的可装载代码块，包括组织块（OB）、功能（FC）、功能块（FB）和数据块（DB）。表 6-1 是用于编制用户程序的逻辑块类型。

表 6-1　逻辑块类型

块类型	简要描述
组织块（OB）	CPU 操作系统与用户程序之间的接口。组织块定义用户程序的结构。基础块为组织块 OB1
功能（FC）	功能是“无存储器”的代码块。功能允许在用户程序中传递参数
功能块（FB）	功能块是一种代码块，它将值永久存储在背景数据块中，即使块执行完后，这些值仍可用
背景数据块	调用背景数据块来存储程序数据时，该背景数据块将分配给功能块
全局数据块	全局数据块是用于存储数据的数据区，任何块都可以使用这些数据

编制用户程序时，通过在项目树中点击“添加新块”命令创建和管理用户程序的程序块，“添加新块”的窗口如图 3-18 所示。

1. 组织块 OB

组织块由操作系统调用，可以控制自动化系统的启动特性、循环程序处理、中断驱动的程序执行、错误处理等。组织块 OB 是由事件驱动的。事件（如诊断中断或时间间隔）会使 CPU 执行组织块 OB。可以对组织块进行编程并同时确定 CPU 的特性。根据使用的 CPU，有各种不同的组织块，包括启动组织块 OB、程序循环组织块 OB、延时中断组织块 OB、循环中断组织块 OB、处理时间错误中断组织块 OB、硬件中断组织块 OB 和诊断错误中断组织块 OB 等。不同的组织块都有一个确定的编号，如程序循环组织块 OB1、诊断错误中断组织块 OB82 等，程序循环组织块 OB1 具有主程序的概念，其他可认为是子程序。将这些组织块插入用户程序中后，需要为其设置参数。有些 OB 具有预定义的行为和启动事件，但也可以创建具有自定义启动事件的组织块 OB。组织块 OB 的启动事件概貌如图 6-1 所示。

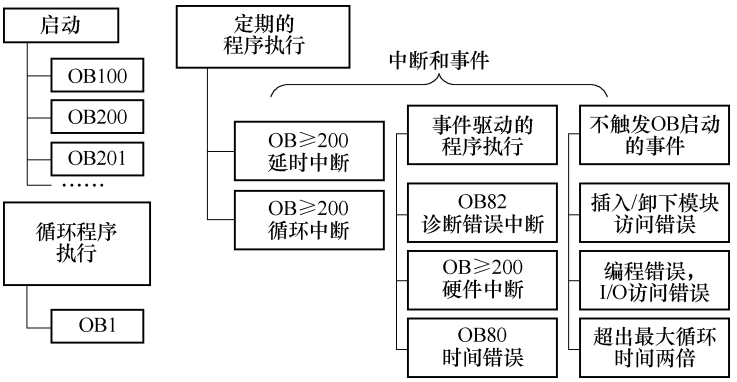


图 6-1　组织块 OB 的启动事件概貌

在图 6-1 中可见，当 CPU 上电后，或模式选择器由 STOP 切换为 RUN－P 时；编程设备中的菜单命令发出请求后，在循环程序执行之前执行启动程序组织块 OB100 或 OB200、OB201 等，然后循环程序执行组织块 OB1，根据启动事件、特定的 CPU 及其参数，将调用启动中断和事件组织块 OB。

组织块 OB1 中的用户程序从第一条语句开始，执行执行完毕后，刷新映像区，开始一个新的循环。定期的程序执行组织块 OB 可以根据设定的延时中断、循环中断执行程序。延时中断可在一个过程事件出现后，延时一段时间响应。循环中断可每隔一段预定的时间（如 100ms）执行一次。硬件中断可用于快速响应的过程事件。当事件发生后，马上打断循环程序并执行中断程序。延时中断可在一个过程事件出现后，延时一段时间响应。诊断错误组织块 OB 和时间错误组织块 OB 可以在出现错误时决定系统如何响应。

2. 功能 FC 和功能块 FB

功能 FC 和功能块 FB 包含与特定任务或参数组合相对应的程序代码，是可从组织块 OB 或其他功能 FC 或功能块 FB 调用的程序代码块，由用户自己编写，相当于用户子程序，可以定义自己的参数。每个功能 FC 或功能块 FB 都提供一组输入和输出参数，用于与调用块共享数据。功能块 FB 还使用相关联的数据块（称为背景数据块）来保存执行期间的值状态，程序中的其他块可以使用这些值状态。功能 FC 不与任何特定数据块 DB 相关联，而功能块 FB 与数据块 DB 直接相关并使用数据块 DB 来传送参数及存储中间值和结果。数据块 DB 存储程序块可以使用的数据。可以将具有相同控制过程的用户程序编写在功能 FC 和功

能块 FB 中，然后在主程序组织块 OB1 或其他程序块中调用。用户程序中包含用户数据的数据区。

3. 数据块 DB

数据块 DB 分为可由所有代码块访问的全局数据块，以及分配给特定功能块调用的背景数据块。操作系统为参数及静态变量分配的存储空间是背景数据块。这样，参数变量在背景数据块中留有运行结果备份。在调用功能块 FB 时，若没有提供实参，则功能块 FB 使用背景数据块中的数值。操作系统在 L 堆栈中给功能块 FB 的临时变量分配存储空间，在 L 堆栈中给功能 FC 的临时变量分配存储空间。由于功能 FC 是“不带存储器”，没有背景数据块的逻辑块，功能 FC 的临时变量保存在本地数据堆栈中，因而不能使用静态变量。执行功能 FC 时，数据将丢失。为永久保存数据，功能 FC 也可使用全局数据块。由于功能 FC 本身没有存储器，因此，必须始终给它指定实参，必须将形参分配给这些功能 FC，不能给功能 FC 的本地数据分配初始值。输入、输出、I/O 参数以指向实参的指针形式存储在操作系统为参数传递而保留的额外空间中。

6.1.2 S7 程序结构与调用层次

S7 程序（用户程序）由各种可用于构造程序的块组成。块是程序的独立部分，用于执行特定的功能。S7 程序结构是用户程序内块的调用层级体系、所使用块及其嵌套等级的框架。用户程序在已建立的项目中创建，并在逻辑块内以一个或多个程序块的形式生成程序的线性化、结构化组织结构，每个程序块的最小单元是程序段（Network），其中，包含指令、变量声明及数据。S7 程序结构如图 6-2 所示。

1. S7 程序的建立

在 STEP 7 中创建新的 S7 程序，必须首先在项目管理器中生成一个项目，然后，用下列方法建立 S7 程序文件夹。

（1）在项目根目录下直接插入 S7 程序的程序块（OB1、FB、FC、DB 等）文件夹，并在其中创建程序。

（2）项目必须至少包含一个 S7PLC 工作站。在 CPU 下面会自动插入 S7 程序块文件夹。

（3）S7 程序保存为用户程序块，用户程序中的块使用各自的编辑窗口进行编辑。在用户程序中使用全局符号，应当预先在变量表中分配相应的标识符和绝对地址。

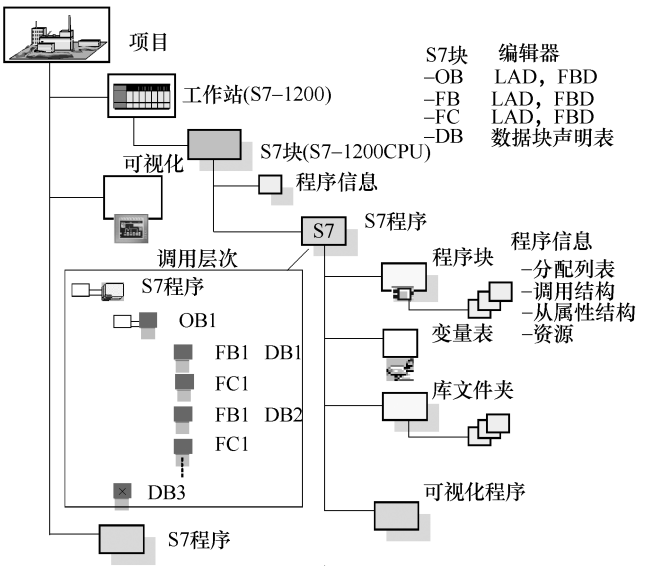


图 6-2 S7 程序结构

2. 用户程序结构

STEP 7 支持线性化程序结构和结构化程序结构。因此，用户编制程序的方法也有线性

化编程和结构化编程 2 种方法，可以根据生产过程工艺要求选择最适合的程序设计方法。线性化编程就是在 OB1 中线性设计处理小型自动化任务的程序。线性化程序按顺序逐条执行用户程序的所有指令。仅适应对简单程序的编程。结构化编程就是将复杂自动化任务分割成与过程工艺功能相对应或可重复使用的子任务，这些子任务在用户程序中以程序块（FB、FC、DB）来表示。因此，每个程序块是用户程序的独立部分。循环程序组织块 OB1 通过调用这些程序块、重复利用全局数据块来完成整个自动化控制任务。线性化程序结构和结构化程序结构如图 6-3 所示。

图 6-3a 中的程序循环组织块 OB1 包含整个用户程序。图 6-3b 中的程序循环组织块 OB1 依次调用和执行所定义的子任务。

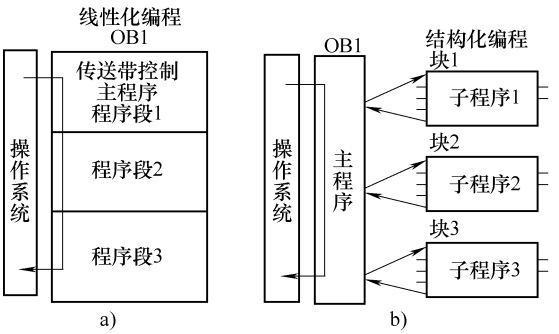


图 6-3　用户程序编制方法

a）线性化程序结构　b）结构化程序结构

3. 块调用

用户程序中的程序块是用户程序的组成部分，要执行用户程序中的块，必须通过其他块对它们进行调用。当一个块调用另一个块时，将执行被调用块的操作。只有完成被调用块的执行后，才会继续执行调用块，并继续执行块调用后的操作。块调用的顺序和嵌套称为调用层级（体系）。可嵌套的块数目（嵌套深度）可用的嵌套深度取决于 CPU 型号。如果嵌套太深（嵌套层次过多），则本地数据堆栈可能上溢。调用结构描述了 S7 程序中块的调用层级。当程序调用另一个块时，执行被调用的块的指令。一旦被调用的块执行结束其指令，参与调用的块返回，继续执行其程序指令。用户程序中块调用的顺序如图 6-4 所示。在一个执行周期内的块调用顺序和嵌套深度示例如图 6-5 所示。

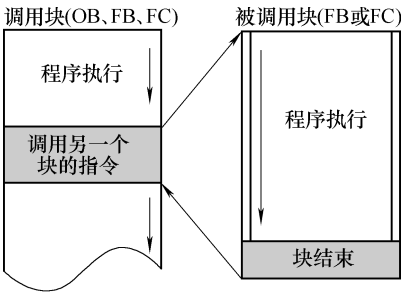


图 6-4　用户程序中块调用的顺序

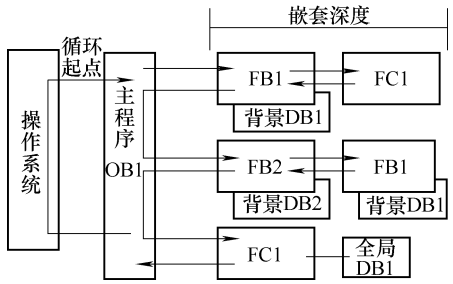


图 6-5　在一个执行周期内的块调用顺序和嵌套深度示例

编制用户程序中的块时，从块的顶行开始，从上到下编制块。在一行块内，编制调用的块的次序为从右到左，即先编制 FC1，再编制 FB1 + 背景 DB1 和 DB1；接着再编制 FB2 + 背景数据块 2，最后编制组织块 OB1。功能块允许在用户程序中传递参数。调用块时，必须给块接口中的参数赋值。通过提供输入参数，可以指定用于执行块的数据。通过输出参数，可以指定执行结果的保存位置。块调用时，从项目树中通过拖放操作插入现有功能 FC 和功能块 FB。如果从其他功能块调用功能块，则以单个背景或多重背景的方式调用这些功能块。

块调用时，必须有一个可用的程序段，并且被调用的块可用。

（1）插入功能 FC 的调用，要使用拖放操作在程序段中插入功能 FC 的调用，将功能从项目树拖到程序段中。这样，功能 FC 及其参数一同被插入，然后可以分配这些参数。

（2）插入单个背景方式的功能块 FB 调用，以单个背景的方式调用功能块 FB 的情况下，被调用的功能块（FB）将其数据存储在其本身的功能块 FB 中。要使用拖放操作在程序段中插入单个背景方式的功能块 FB 调用，将功能块 FB 从项目树拖到程序段中，将打开“调用选项”对话框，单击“单个背景”按钮，输入要分配给该功能块的数据块的名称，单击“确定”确认输入。这样，功能块 FB 及其参数一同被插入，然后可以分配这些参数。

（3）插入多重背景方式的功能块 FB 调用，以多重背景的方式调用功能块 FB 的情况下，被调用的功能块 FB 将其数据存储在调用功能块 FB 的背景数据块中。要使用拖放操作在程序段中插入多重背景方式的功能块 FB 调用，将功能块从项目树拖到程序段中，将打开“调用选项”对话框，单击“多重背景”按钮，在“接口中的名称”文本块中，输入变量的名称，通过该名称将被调用功能块作为调用块接口中的静态变量输入，单击“确定”确认输入。这样，功能块 FB 及其参数一同被插入，然后可以分配这些参数。

如果调用功能块时指定了不存在的背景数据块，则将创建该背景数据块。如果以多重背景方式调用了功能块，则会将该功能块作为接口中的静态变量输入。

4. 背景数据块

对功能块的调用进行编程时，需要将背景数据块分配给该功能块。块参数值和静态局部数据存储在所分配的背景数据块中。分配有自己的背景数据块的功能块调用称为单个背景数据块。通过分配背景数据块，可以指定要处理哪些数据。可以为每个调用分配不同的背景数据块，以此提高块的可复用性。如果被调用功能块将其数据存储在调用功能块的背景数据块中，就构成多重背景。这样便可将实例（设备，控制对象，如电机）数据集中放在一个背景数据块中，从而更有效地使用可用的背景数据块。如果以单个背景的方式调用，多个背景数据块分配给一个功能块的一个实例，如，可以使用一个功能块控制具有不同数据（如速度、加速时间、总运行时间）的多台电机，这就需要为执行电机控制的每个功能块调用分配一个不同的背景数据块。不同电机的数据保存在不同的背景数据块中，根据所分配的背景数据块控制不同的电机。使用一个功能块和 3 个不同的数据块控制 3 台电机的单个背景数据块的示例如图 6-6 所示。

图 6-6 中，组织块 OB1 三次调用同一个通用 FB1，每次调用使用一个不同的数据块。FB1 控制 3 台独立的电机，在每次调用时，为各电机分配不同的背景数据块。每个背景数据块存储 1 个电机的数据。其中 DB101 用于存储第 1 台电机的运行数据，DB102 用于存储第 2 台电机的运行数据，DB103 用于存储第 3 台电机的运行数据。由此可推论，更改背景 DB 可使通用 FB 控制一组设备的运行。

如果将 3 台电机的数据保存在一个背景数据块中，3 台电机共用一个功能块，就构成一个背景数据块分配给一个功能块的多个实例的情况，如图 6-7 所示。

图 6-7 中，功能块 FB1 调用 FB2 的三个实例（“电机 1”、“电机 2”和“电机 3”）。每个调用使用不同的实例数据。但所有实例数据都位于同一个背景数据块（DB101）中。

如果将 3 台电机的数据保存在一个背景数据块中，3 台电机用 3 个功能块实现控制，就构成了一个背景数据块分配给不同功能块的实例，如图 6-8 所示。

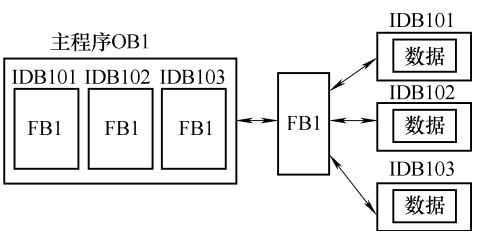


图 6-6　单个背景数据块示例

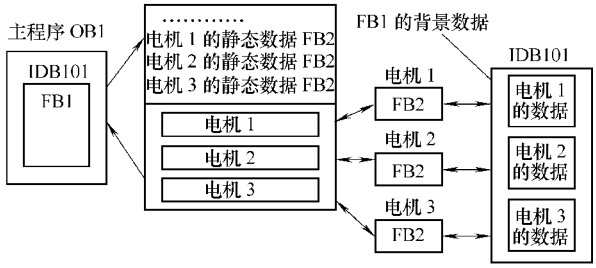


图 6-7　一个背景数据块用于一个功能块的多个实例

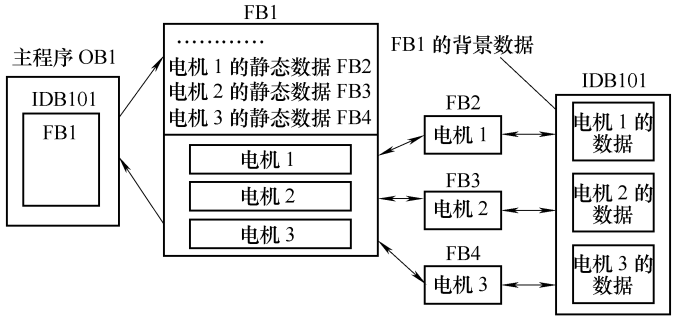


图 6-8　一个背景数据块用于不同功能块的实例

图 6-8 中，FB1 连续调用 FB 2、FB3 和 FB4。这些被调用块都将数据存储在调用块的数据块 DB101 中。

6.2　块编程

6.2.1　程序编辑窗口

SIMATIC STEP 7 V11 的程序编辑器是用户程序的编辑窗口，是逻辑块的集成开发环境。程序编辑器的外观和功能，因所用的程序语言和块类型而异。梯形图 LAD 为例的程序编辑器的窗口见图 3-20。

用户程序在块的程序段中创建。对于要编程的块，必须包含至少一个程序段，用户程序一般由多个程序段组成。程序段标题是程序段的标头，长度无限制，但只能占用一行。可以使用程序段注释描述各个程序段。如，指出程序段的功能、特性等。通过项目树可以访问项目的所有区域。因此，项目打开后会显示项目树。可以在创建程序时隐藏项目树，以获得更大的指令窗口区域。如果程序代码很多，可以隐藏或最小化应用程序和程序编辑器的项目树、任务卡、块接口、收藏夹、注释、程序段，以获得更大的程序编辑窗口区域。隐藏和显示项目树、任务卡等，在项目树等标题栏中单击“折叠”命令即可。使用工具栏可以访问程序编辑器的主要功能，如插入、删除、打开和关闭程序段，显示和隐藏绝对操作数、程序段注释、程序状态和收藏夹等。

通过块接口可以创建和管理局部变量。块接口以表格形式显示。块接口以表格形式显示在程序编辑器的上方区域（标签为“界面”），表格列数取决于块类型。块接口包含只能在

块中使用的局部变量的声明。

块参数是在程序中调用时由块读取或写入的的块接口参数，局部数据用于存储中间结果。

对于组织块 OB 接口，因为它不会被其他块所调用，没有背景数据块，也就没有静态变量，也没有输入、输出或输入/输出参数，其接口“临时”（TEMP）和“输入”（INPUT）部分可包含基本数据类型、复杂数据类型及 VARIANT 数据类型。不允许使用其他参数类型。

对于功能块 FB 接口，声明输入参数时，允许使用基本数据类型、复杂数据类型及 VARIANT 参数类型。声明输出参数时不允许使用任何参数类型。声明输入/输出参数时，只允许使用 VARIANT 参数类型。临时变量的声明只允许使用 VARIANT 参数类型。其他所有参数类型均无效。

对于功能 FC 接口，因为它没有背景数据块，也就没有静态变量，在接口输入、输出和 InOut 部分中只允许使用 VARIANT 参数类型。禁止使用其他所有参数类型。“临时”部分可包含基本数据类型、复杂数据类型及 VARIANT 参数类型。不允许使用其他参数类型。

块接口的“保持性”（Retentivity）列下拉列表中包含保持性和非保持选项。保持性选项是将变量定义为具有保持性。非保持选项是将变量定义为不具有保持性。保持性和非保持设置会被所分配的背景数据块接受，且无法在此块中更改。如果未进行任何设置，则变量被定义为不具有保持性。要设置局部变量的保持特性，在“保持性”列中，选择要为其设置保持特性的变量的单元格。单击该单元格右边框上的箭头。将打开含有“保持性”和“非保持”条目的下拉列表，从该下拉列表中选择所需的设置。

6.2.2 代码块编程的基本步骤

代码块也称为逻辑块或程序块，包括组织块（OB）、功能块（FB）、功能（FC）和数据块（DB）。编制用户程序时，通过逻辑块和数据代码按块文件夹(“块”)以程序段形式进行编制，并使用 S7 程序下的块文件夹来存储“块”。块文件夹包含需要下载给 CPU 的块。在块文件夹中将自动创建一个空的组织块 OB1（主程序，循环程序块），在执行 CPU 中的程序时将始终需要这个块。为在调试程序时对变量进行监视和修改而创建的变量表（VAT）不下载给 CPU；包含在组态硬件时创建的系统信息（系统组态、系统参数等）的对象“系统数据”（系统数据块）。在用户程序中，需要调用的系统功能（SFC）与系统功能块（SFB）不可编辑。块编程的基本步骤如图 6-9 所示。

程序代码即指令码，在程序编辑器窗口的指令目录中选择并拖入程序段中进行编辑。

1. 声明 PLC 变量

PLC 变量表包含在整个 CPU 范围有效的“变量”和“用户常量”的定义。在“变量”选项卡中声明程序中所需的全局变量。需要的常量在“用户常量”选项卡中定义。

2. 创建块

硬件组态后，系统会自动为每个设备生成一个程序循环组织块 OB1 并将其插入到“程序块”文件夹中。在项目树中找到“程序块”文件夹，根据需要可在其中可以创建和管理组织块（OB）、功能块（FB）、功能（FC）和数据块（DB）。要创建组织块（OB）、功能块（FB）、功能（FC）或数据块（DB），双击“添加新块”命令。单击需要添加的新块按钮。输入块名称。在“语言”下拉列表中，为新块选择编程语言。要创建全局数据块，选

择列表条目“全局 DB”。要创建背景数据块，从列表中选择要为其分配背景数据块的目标功能块。要为新块添加其他属性，单击该对话框下半部分中的“更多信息”旁的箭头。将显示一个具有更多输入域的区域。输入所需的所有属性。单击“确定”即可。

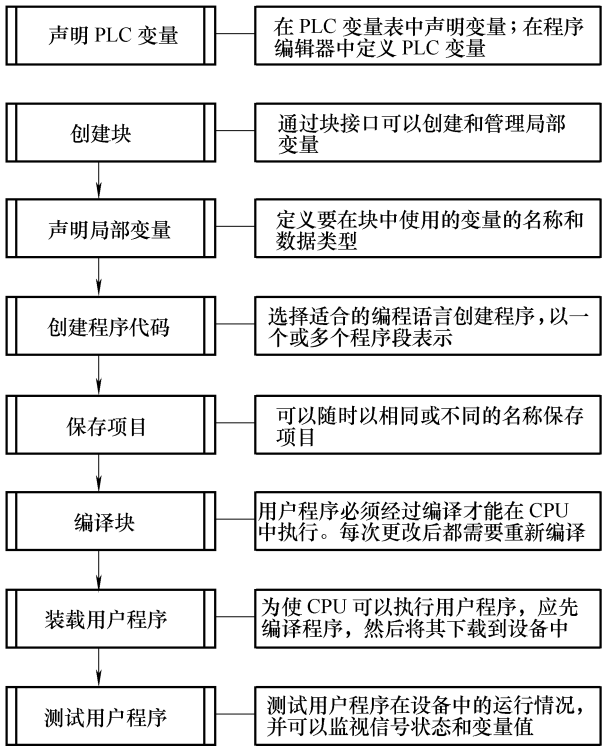


图 6-9　代码块编程的基本步骤

3. 声明局部变量

（1）在块接口中声明局部变量。通过块接口可以创建和管理局部变量。变量包括块参数和局部数据两部分。声明基本数据类型的变量时，选择块接口中的输入参数（Input）、输出参数（Output）、输入/输出参数（InOut）、静态局部数据和临时局部数据部分，在“名称”列中输入变量名称，单击“数据类型”列中的箭头键，然后选择所需的数据类型。在“默认值”（Default value）列中将会输入该数据类型的默认初始值。必要时，可更改默认值。

（2）在程序编辑器中直接将操作数声明为局部变量。如果要将操作数声明为局部变量，选择一个或多个操作数，在快捷菜单中选择“定义变量”命令，将打开“定义变量”对话框，显示一个声明表，其中已输入所选操作数的名称。

（3）声明 ARRAY 数据类型的变量，如果要声明 ARRAY 数据类型的变量，在块接口的“名称”列中输入变量名称，在“数据类型”列中，单击箭头键并选择数据类型“ARRAY［o . . hi］”，然后在同一列中输入维数，用于显示上限、下限和数据类型（如，BOOL 数据类型的 ARRAY［1. . 10］）。在右方括号和关键字“of”之间及在“of”和 ARRAY 元素的数据类型信息之间必须插入一个空格。

（4）声明 STRUCT 数据类型的变量，如果要声明 STRUCT 数据类型的变量，在“名称”列中输入变量名称，在“数据类型”列中，单击箭头键并选择“STRUCT”，在新变量后将插入两个空行，在第一个空行中插入第一个结构元素，在该元素后会再插入一个空行，选择结构元素的数据类型。结构会以输入的最后一个元素结束。也可以输入结构元素的默认值。要在结构后插入新变量，在结构结尾后留一个空行，然后在第二个空行中启动新变量。

（5）编辑变量的属性，如果要编辑一个或多个变量的属性，打开块接口，更改“名称”、“注释”和其他列中的条目。如果在程序编辑器中直接重命名一个或多个变量，在程序中选择一个或多个变量，在快捷菜单中选择“重命名变量”命令，将打开“重命名变量”对话框，此对话框会显示包含所选变量的声明表，更改“名称”列中的条目，单击“更改”按钮确认输入即可。

4. 数据块（DB）编程

对数据块 DB 编程要先创建数据块，双击“添加新块”命令，打开“添加新块”对话框，单击“数据块（DB）”按钮，输入数据块名称。要创建全局数据块，选择列表条目“全局 DB”，要创建背景数据块，从列表中选择要为其分配背景数据块的目标功能块。如果想要分配块编号，则选择“手动”选项按钮。如果选择使用手动分配，在输入域中输入块编号。要为新数据块添加其他属性，单击该对话框下半部分中的“更多信息”旁的箭头，将显示一个具有更多输入域的区域。输入所需的所有属性。单击“确定”确认。创建了新数据块后，就可以在项目树的“程序块”文件夹中找到该数据块。数据块仅包含变量声明。变量声明定义数据块的结构。在数据块声明表中声明变量。

5. 编译块

用户程序必须先经过编译生成块的代码才能在 CPU 中执行。每次进行更改后都需要重新编译程序。编译期间会检查用户程序的语法错误。检查被编译块中的所有块调用。如果对被调用块的接口进行过更改，则会更新块调用。最后，将用户程序编译成 CPU 可读取的代码。可在项目树中编译一个块、多个块或所有块。也可在程序编辑器中编译打开的块。如果在项目树中编译块，可编译单个块或同时编译“程序块”文件夹中的所有块，可选择“软件”选项，仅编译有更改的块；或选择“软件（重建所有块）”选项，编译所有块。在第一次编译时，以及在进行了重大修订后应执行此操作。如果在程序编辑器中编译块，仅用于编译单个打开的块。如果在调用结构或从属性结构中编译块，仅编译个别的块。

6. 装载用户程序

为使 CPU 可以执行用户程序，必须先编译程序，然后将其下载到设备中。可以从程序编辑器或项目树中将用户程序或块下载到可访问设备。也可以拖动块将其下载到可访问设备。可将块从可访问设备上传到项目中。所有现有块（组织块、功能块、功能、数据块）和全局变量也将被上传到项目中。如果使用存储卡代替装载存储器，必须将用户程序或各个块下载到存储卡。同样可以将块从存储卡上传回项目中。

7. 测试用户程序

通过程序状态和监视表格可以测试用户程序在设备中的运行情况、监视信号状态和变量值，并且可以根据仿真需要在程序运行期间给变量赋值。测试用户程序时，设备中必须已装载可执行程序。通过程序状态监视程序的运行情况和程序的执行，可以从程序中某一特定位置开始启用状态，显示各操作数的值的总览和程序段逻辑运算的结果（RLO），进而可以识别和解决程序中的错误。

6.2.3 梯形图 LAD 编程语言编程

1. 梯形图 LAD 编程语言中的基本符号

（1）—| |—，常开触点，存储在指定 <地址> 的位值为“1”时，处于闭合状态。触点闭合时，梯形图梯级能流流过触点，逻辑运算结果（RLO）=“1”。否则，如果指定 <地址> 的信号状态为“0”，触点将处于断开状态。触点断开时，能流不流过触点，逻辑运算结果（RLO）=“0”。串联使用时，通过“与”逻辑将—| |—与 RLO 位进行连接。并联使用时，通过“或”逻辑将其与 RLO 位进行连接。存储区 I、Q、M、L、D、T、C 中的选中位。

（2）—| / |—，常闭触点，存储在指定 < 地址 > 的位值为“0”时，处于闭合状态。触点闭合时，梯形图梯级能流流过触点，逻辑运算结果（RLO）= “1”。否则，如果指定 < 地址 > 的信号状态为“1”，将断开触点。触点断开时，能流不流过触点，逻辑运算结果（RLO）= “0”。串联使用时，通过“与”逻辑将—| / |—与 RLO 位进行连接。并联使用时，通过“或”逻辑将其与 RLO 位进行连接。存储区 I、Q、M、L、D、T、C 中的选中位。

（3）带附加功能的触点，诸如—| P |—、—| N |—、—| NOT |—等带附加功能的触点，如果满足特定条件，则执行附加功能，如—| P |—、—| N |—执行 RLO 沿检测和比较。

（4）—（ ），标准输出线圈，标准输出线圈的工作方式与继电器逻辑图中线圈的工作方式类似。如果有能流通过线圈（RLO = 1），将置位 < 地址 > 位置的位为“1”。如果没有能流通过线圈（RLO = 0），将置位 < 地址 > 位置的位为“0”。只能将输出线圈置于梯级的右端。可以有多个（最多 16 个）输出单元。使用—| NOT |—（能流取反）元素可以取反输出。存储区 I、Q、M、L、D 中的分配位。诸如—（R）、—（S）、—（P）等用于程序控制和 RLO 沿检测的带附加功能的线圈，除了判断逻辑运算的结果，还具有附加功能。对于用于程序控制的线圈，需要指定跳转目标，而不是操作数。

（5）功能框，功能框有无 EN/ENO 的功能框和无 EN/ENO 的功能框两类。除空功能框外，功能框是具有复杂功能的 LAD 编程指令。可以使用空功能框作为占位符，通过拖放操作空功能框图标??移动到程序段中的所需位置，将光标悬停在该空功能框右上角的黄色三角形上，将显示一个下拉列表，从该下拉列表中可选择所需的 LAD 指令，选择后，该空功能框就变为相应的 LAD 指令。插入了参数的占位符。无 EN/ENO（使能输入/使能输出）的功能框根据其输入的信号状态执行。无法查询处理过程中的错误状态。具有 EN/ENO 的功能框只有使能输入“EN”的信号状态为“1”时才执行功能框。如果该功能框的执行条件有效，则“ENO”使能输出的信号状态为“1”。如果处理期间出错，则复位“ENO”输出。代码块的调用在程序段中也显示为具有 EN/ENO 的功能框。

2. 输入梯形图指令的方法

（1）梯形图 LAD 的基本指令。

默认情况下，梯形图基本指令符号显示在程序段编辑区上方工具条上，如图 6-10 所示。

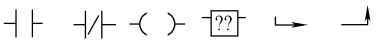


图 6-10　梯形图基本指令符号

单击工具条上的常开触点、常闭触点或输出线圈等按钮，可快速输入指令。在程序段中插入所选指令符号后，在程序段中的指令符号上方出现问号字符?? . ? 和…来代表地址和参数的代用字符，红色的字符?? . ? 代表必须连接的地址和参数。黑色的字符…代表可以连接的地址和参数，这时使用鼠标单击，将光标定位于输入框上，可输入绝对地址或符号和参数。输入后，将执行语法检查。如果语法检查正确无误，以黑色显示。如果存在语法错误，以红色显示，并会显示一条出错消息。采用空功能框图标??可以快速插入 LAD 编程元件。这样，不需要从指令窗口中选择就可以直接插入所需要的指令。在段中选择要插入元件的位置后，点击工具条中的空功能框图标??，就会出现元件列表框，从中可以进行选择所需要的指令。

（2）插入程序段和分支

可在一个程序块中插入多个程序段。为插入一个新的程序段，鼠标右键点击程序编辑窗口的空白处，或在快捷菜单中选择“插入程序段”命令，就可在当前段后面插入一个新程序段。复制的程序段可粘贴在同一个块或其他块中。如果将程序段粘贴到用不同编程语言编写的块中，该程序段的编程语言将保持不变。

符号↳ ↱为分支符号。可在一个程序段中插入多个并行分支，以创建或（OR）逻辑。操作如下：点击所需插入新分支的分支起始点，选择希望并行分支的元素，插入一个分支图标↳，闭合分支图标↱，通过拖放分支符号，将其移动到程序段中的所需位置即可。如果要将新分支直接连接到左母线，则将该分支符号拖放到左母线上。要断开闭合分支，选择将分支连接到主分支的连线，在快捷菜单中选择“删除”命令。图 6-11 是一个电动机起动程序示例。

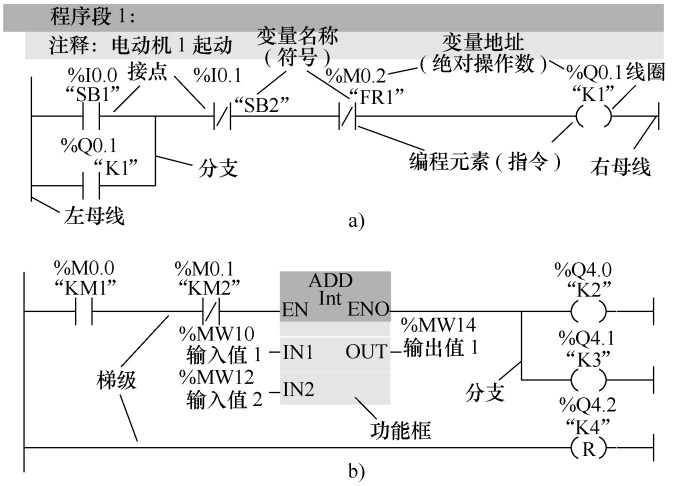


图 6-11 一个电动机的起动程序示例

a）电动机的起动程序段 b）电动机的控制程序段

3. 梯形图指令的输入规则

梯形图 LAD 程序以一个或多个程序段表示。逻辑块的代码段由一个或多个程序段组成。每个程序段内可以有多个梯级，梯级是独立分支，每个梯级以写入逻辑运算结果的线圈结束。常开触点、常闭触点、线圈和功能框等编程指令，按照一定的逻辑关系组合构成程序段。开关逻辑信号以触点的形式排列在梯级上。

（1）一个梯形图程序段可由多个分支中的许多元素组成，所有的元素和分支必须进行连接，必须使用线圈或程序框来终止梯级。一个程序段内使用多个梯级时，梯级间不允许存在连接。但是，不可使用比较框和用于上升/下降沿检测的线圈来终止程序段。线圈会自动放置在程序段的右边，用于终止分支。但用于上升/下降沿检测的线圈不能直接放置在分支的最左边和最右边。也不允许放在其他分支中。

（2）前导逻辑运算中只能使用布尔（BOOL）逻辑输入。只能将触点插入具有前导逻辑运算的并行分支中。但用于将逻辑运算结果取反的触点（—| NOT |—）例外。用于将逻辑运算结果取反的触点及线圈和功能框可用在并行分支中，前提是它们要直接来源于母线。使能输入“EN”与使能输出“ENO”可连接到功能框，但这不是必需的。

（3）跳转运算只能放在末尾，“返回”指令—（RET）可放在开头。每个程序段只允许有一个跳转指令。

（4）不能将常数分配给常开触点或常闭触点。但可使用 BOOL 数据类型的操作数。

（5）用户程序的运算结果可立即被后面的程序段使用。只有被分配外部 I/O 位地址的内部继电器可用于输出控制，其他只能用于内部工作位，存放逻辑中间状态。

（6）不能创建可能导致能流反方向流动的任何分支，如图 6-12 所示，当 I1.4 处的信号

状态为“0”时，可能导致 I6.8 处产生从右到左的电流，这是不允许的。

（7）不能创建可能导致短路的任何分支，如图 6-13 所示。

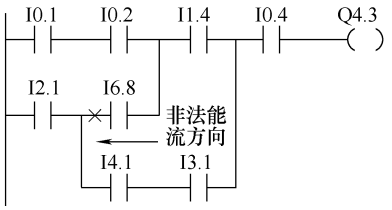


图 6-12　错误的能流方向示例

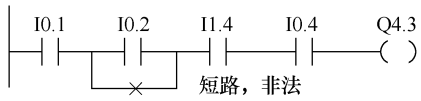


图 6-13　导致短路的分支示例

6.3　基本指令

基本指令包括位逻辑、定时器、计数器、比较、数学运算、移动、转换、跳转、逻辑运算、移位和循环等类别指令。是可编程序控制器中最基本、使用最频繁的一类逻辑指令。SIMATIC S7-1200/300/400 系列 PLC 的基本逻辑指令大体相同，仅个别指令略有区别。本节仅简单介绍一些常用基本指令的功能及用法。

6.3.1　位逻辑指令

位逻辑指令按照一定的控制要求进行逻辑组合，可构成基本的逻辑控制的“与”逻辑、“或”逻辑、“异或”逻辑及其组合逻辑。“与”逻辑、“或”逻辑、“异或”逻辑及其组合逻辑是基本的逻辑控制形式。位逻辑指令使用“0”或“1”两个布尔操作数（BOOL），对逻辑信号状态进行逻辑操作，逻辑操作的结果送入存储器状态字的逻辑操作结果（RLO）位。RLO 用以赋值、置位、复位操作数的操作。“0”或“1”称为二进制数或位，用于表示信号状态，是构成二进制逻辑的基础。对于触点和线圈而言，“1”表示已闭合、激活或已励磁，“0”表示断开、未激活或未励磁。

位逻辑指令的运算规则是“先与后或”操作，或者“先或后与”操作，用括号将需先运算的部分括起来，运算规则是“先括号内，后括号外”。这也是电路块的串并联连接规则。具有两个节点及以上的电路称为电路块。语句表 STL 表示的位逻辑基本指令见表 6-2。梯形图 LAD 表示的位逻辑基本指令见表 6-3。功能图 FBD 表示的位逻辑基本指令见表 6-4。

表 6-2　语句表 STL 表示的位逻辑基本指令

助记符	说　明
用于逻辑组合的基本指令	
A	“与”，And
AN	“与非”，And Not
O	“或”，Or
ON	“或非”，Or Not
X	“异或”，Exclusive Or
XN	“异或非”，Exclusive Or Not
O	先与运算后或运算

（续）

助记符	说　明
可使用下列指令构成嵌套表达式	
A（	“与”操作嵌套开始
AN（	“与非”操作嵌套开始
O（	“或”操作嵌套开始
ON（	“或非”操作嵌套开始
X（	“异或”操作嵌套开始
XN（	“异或非”操作嵌套开始
）	嵌套闭合
使用下列指令之一终止布尔位逻辑串	
=	赋值；输出必须赋值
R	复位
S	置位
可使用下列指令之一更改逻辑运算的结果（RLO）	
CLR	RLO 清零（=0），RLO = 0
NOT	RLO 取反
SET	置位，RLO = 1
SAVE	把 RLO 存入 BR 寄存器
对上升沿或下降沿转换做出反应的其他指令	
FN	脉冲下降沿
FP	脉冲上升沿

表 6-3　梯形图 LAD 表示的位逻辑基本指令

助记符	描　述
用于逻辑组合的基本指令	
—| |—	常开触点（地址）
—|/|—	常闭触点（地址）
—（SAVE）	将 RLO 保存到状态字的 BR 位。未复位第一个校验位/FC。因此，BR 位的状态将包含在下一程序段的 AND 逻辑运算中
—（ ）	输出线圈
—（#）—	中间输出
—| NOT |—	取反能流
XOR	逻辑“异或”
RLO 为 1 时将触发下列指令	
—（R）	复位线圈
RS	复位优先型 SR 双稳态触发器
—（S）	置位线圈
SR	置位优先型 SR 双稳态触发器

（续）

助记符	描　　述
上升沿或下降沿触发功能	
NEG	地址下降沿检测，比较 < 地址 1 > 的信号状态与前一次扫描的信号状态（存储在 < 地址 22 > 中
—（N）—	RLO 负跳沿检测，边沿存储位，存储 RLO 的上一信号状态
—（P）—	RLO 正跳沿检测，边沿存储位，存储 RLO 的上一信号状态
POS	地址上升沿检测，比较 < 地址 1 > 的信号状态与前一次扫描的信号状态（存储在 < 地址 2 > 中

表 6-4　功能图 FBD 表示的位逻辑基本指令

助记符	描　　述
用于逻辑组合的基本指令	
&	“与”逻辑操作
> = 1	“或”逻辑操作
XOR	“异或”逻辑操作
=	赋值
#	中间输出
—|	插入数字输入
—o|	数字输入取反
SAVE	将 RLO 存入 BR 存储区
RET	返回
上升沿或下降沿触发功能	
N	RLO 负跳沿检测，检测指定地址从 1 到 0 的下降沿变化，并在执行指令后以 RLO = 1 表示
NEG	地址负跳沿检测，比较 < 地址 1 > 的信号状态与存储在 M_ BIT 中的前一次检查的信号状态
P	RLO 正跳沿检测，检测指定地址从 1 到 0 的上升沿变化，并在执行指令后以 RLO = 1 表示
POS	地址正跳沿检测，比较 < 地址 1 > 的信号状态与存储在 M_ BIT 中的前一次检查的信号状态
RLO 为 1 时将触发下列指令	
R	复位输出
RET	返回
RS	复位置位触发器
S	置位输出
SR	置位复位触发器

1. 逻辑“与”、“或”操作

逻辑“与”在梯形图里是用串联的触点回路表示的，被扫描的操作数则表示为触点符号，操作数标在触点上方。如果接点是常开触点（动合触点），则对“1”扫描相应操作数。在 PLC 中，若操作数是“1”，则常开触点“动作”，即认为是“闭合”的；若操作数是“0”，则常开触点“不动作”，即触点仍然打开。如果触点是常闭触点（动断触点），则对“0”扫描相应操作数；若操作数是“1”，则常闭触点“动作”，即触点“断开”；若操作数是“0”，则常闭触点“不动作”，即触点仍保持闭合。如果串联回路里的所有触点皆闭合，则该回路能流流通，构成回路。即，逻辑“与”，当所有的输入信号都为“1”，则输出为

“1”；只要输入信号有一个不为“1”，则输出为“0”。逻辑“或”，只要有一个输入信号为“1”，则输出为“1”；所有输入信号都为“0”，输出才为“0”。

逻辑“或”在梯形图里是用并联的触点回路表示的，被扫描的操作数标在触点上方。在触点并联的情况下，若有一个或一个以上的触点闭合，则该回路能流流通，构成回路。典型的逻辑“与”、“或”操作是一台电动机的自动控制电路，如图 6-14 所示。

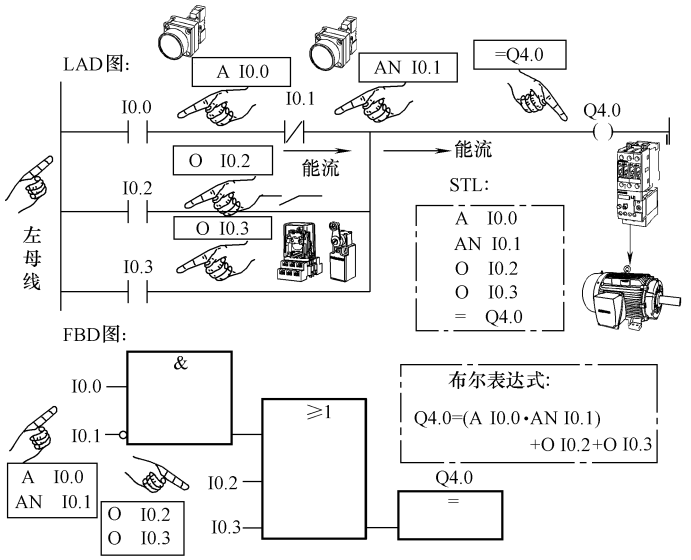


图 6-14 逻辑“与”、“或”操作示例

语句表（STL）如下：

```
A     I 0.0
AN    I 0.1
O     I 0.2
O     I 0.3
=     Q 4.0
```

逻辑表达式：

Q 4.0 = （A I 0.0 · AN I 0.1） + O I 0.2 + O I 0.3

只要 I0.1 = 1 则当输入信号 I0.0 为“1”，输出就为“1”；或只要输入信号 I0.2 和 I0.3 中有一个为“1”，则输出为“1”；所有输入信号都为“0”，输出也为“0”。在图 6-14 中，现场的起动按钮 SB1 对应于 I0.0，停止按钮 SB2 对应于 I0.1，I0.3 对应于有其他控制传递过来的继电器触点、行程开关等传感器信号。当操作 SB1 时，图 6-14 中梯形图的状态如图 6-15 所示。

在图 6-15 中，当操作启动按钮 SB1（I0.0）时，第一行为逻辑“与”，助记符用“A 和 AN”标识，信号状态为“1”，逻辑操作结果（RLO）位的状态也为“1”，则输出信号 Q4.0 状态就为“1”。第二、三行为逻辑“或”，助记符用“O”标识，当操作数（I0.2 或 I0.3）的信号状态是“1”时，逻辑操作结果（RLO）位的状态就为“1”，则输出信号 Q4.0 状态也为“1”。

常开触点（常闭触点）的状态取决于相关操作数的信号状态。如果操作数的信号状态

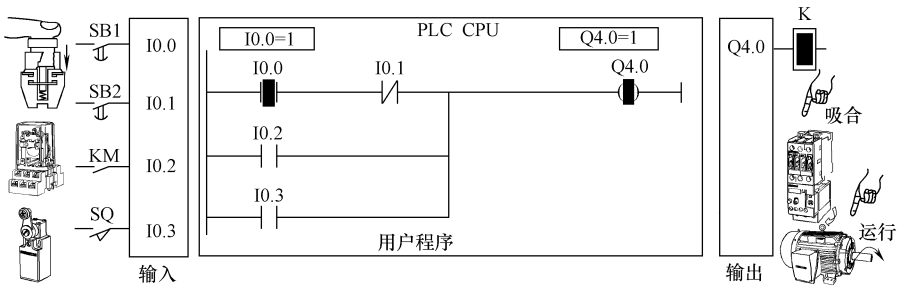


图 6-15　当操作 SB1 时，图 6-14 中梯形图的状态

为“1”，常开触点将闭合。能流从左母线通过该常开触点流到右母线，并且该运算的输出信号状态变为“1”。如果操作数的信号状态为“0”，则常开触点不会被激活。到右母线的能流中断，并且该运算的输出的信号状态为“0”。常闭触点的操作数的信号状态为“1”时，触点“断开”并且到右母源线的能流中断，运算的输出的信号状态为“0”。如果操作数的信号状态为“0”，常闭触点将“闭合”。能流通过该常闭触点流到右母线，并且该运算的输出的信号状态设置为“1”。两个或多个常开触点（常闭触点）串联时，构成“与”逻辑，所有触点都闭合后才产生能流。常开触点（常闭触点）并联时，构成“或”逻辑，有一个触点闭合就会产生能流。由此可见，能流是使“输出线圈”指令被置位为“1”的约束条件。可以使用“输出线圈”指令运算置位指定操作数的位。线圈输入端的逻辑运算结果（RLO）为“1”时，指定操作数的信号状态将被置位为“1”。线圈输入端的信号状态为“0”时，指定操作数的位为“0”。该运算不会影响 RLO。线圈输入端的 RLO 会立即发送到输出。

逻辑“与”、“或”嵌套示例：

```
A       (
A       I0. 0
AN      I0. 1
O       I0. 2
)
A       I0. 3
ON      C5
=       L20. 0
A       L 20. 0
BLD     102
=       Q4. 3
A       L20. 0
BLD     102
=       Q4. 4
A       L20. 0
AN      I3. 4
=       Q4. 6
```

对应的 LAD 和 FBD 图如图 6-16 所示。

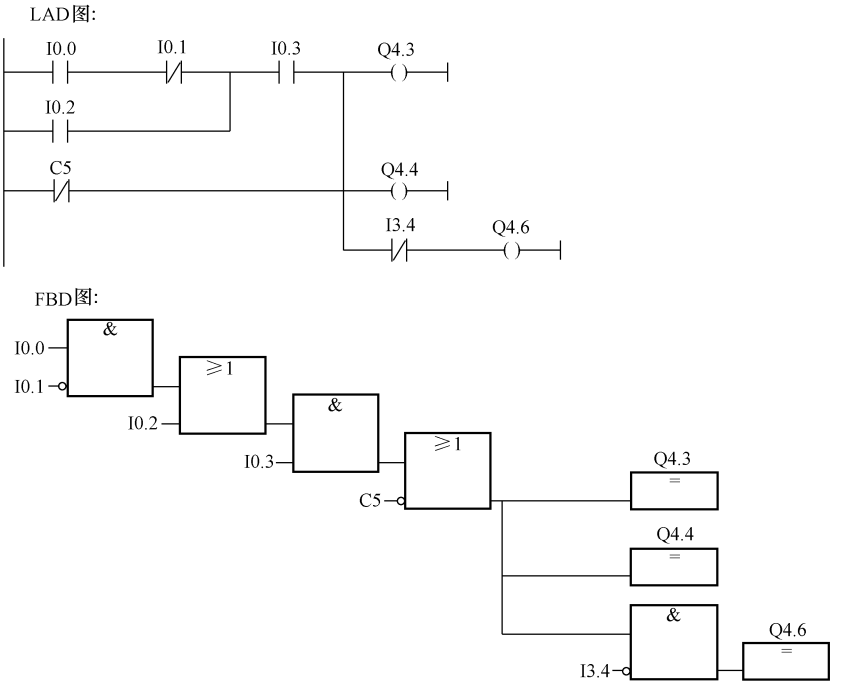


图 6-16 逻辑“与”、“或”嵌套示例

2. 中间输出和取反操作

—（#）—，中间输出，中间输出用于存储 RLO 的中间值，该值是中间输出指令前的位逻辑操作结果。它将 RLO 位状态（能流状态）保存到指定 < 地址 > 。中间输出单元保存前面分支单元的逻辑结果。以串联方式与其他触点连接时，可以像插入触点那样插入—（#）—。不能将—（#）—单元连接到左母线或将它直接连接在分支连接的后面或分支的尾部。中间输出指令不能用于直接输出，即中间输出指令不能放在逻辑串的结尾处。存储区 I、Q、M、L、D 中的分配位。

使用功能图（FBD）符号：—o | ；梯形图（LAD）符号：— | NOT | —；语句表（STL）符号：NOT，能流取反元素，可以取反操作—（#）—操作。逻辑取反操作是对逻辑运算结果 RLO 取反。如图 6-17 所示。

图 6-17 的逻辑关系是，M 0.0 的缓存器中存放着 I 1.1 和 I 1.2 相与的结果；M 1.1 的缓存器中存放着 I 1.1、I 1.2、I 2.2 和 I 1.3 四个输入信号相与后取反的结果；M 1.2 的缓存器中存放着整个逻辑运算的结果。

3. 置位/复位指令

置位/复位指令根据 RLO 的值决定被寻址位的信号状态是否需要改变。在梯形图中，只有在能流通过线圈（RLO 为“1”）时，才会执行置位线圈—（S）或执行复位线圈—（R）。置位线圈将把单元的指定 < 地址 > 置位为“1”。复位线圈将把单元的指定 < 地址 > 复位为“0”。RLO = 0（没有能流通过线圈）将不起作用，单元的指定地址的当前状态将保持不变。

复位优先型 SR 双稳态触发器指令 SR 和置位优先型 RS 双稳态触发器指令 RS（置位/复

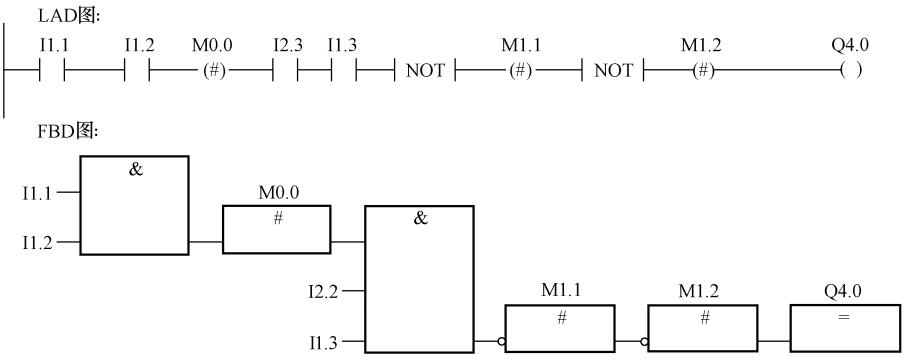


图 6-17　中间输出和取反操作示例

位触发器指令）仅在 RLO 为“1”时执行“置位”（S）或“复位”（R）指令。RLO 为“0”时对这些指令没有影响，在指令中指定的地址保持不变。在输入端 S 的信号状态为“1”，而输入端 R 的信号状态为“0”时，置位复位触发器被置位。如果输入端 S 为“0”，而输入端 R 为 1，则触发器被复位。如果两个输入的 RLO 均为“1”，则该触发器被复位。置位/复位线圈指令示例如图 6-18 所示。

图 6-17 中，当 I10.0 和 I10.1 输入都为“1”或者 I10.2 输入为“0”时，Q6.0 被置位，即输出为“1”，否则，Q6.0 的输出状态不变。当 I10.0 和 I10.1 输入都为“1”或者 I10.2 输入为“0”时，Q6.0 被复位，即输出为“0”；不满足上述条件时，Q6.0 的输出状态不变。

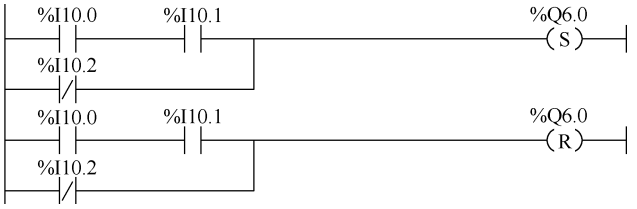


图 6-18　置位/复位线圈指令示例

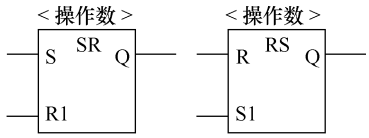


图 6-19　置位/复位双稳态触发器的指令符号

4. 置位/复位双稳态触发器指令

置位/复位双稳态触发器的指令符号如图 6-19 所示。

图 6-19 中，

< 操作数 >，地址指定将要置位或复位的位。

SR，复位优先型 SR 双稳态触发器。

RS，置位优先型 RS 双稳态触发器。

S、S1，复位使能。

R、R1，置位使能。

Q，< 地址 > 指定操作数的信号状态。

复位优先型 RS 触发器的 S 端在 R1 端之上，先在指定 < 地址 > 执行置位指令，当两个输入端 S 和 R1 都为“1”时，置位使能输入最终有效。既复位输入优先，触发器或被置位或保持置位不变。置位优先型 RS 触发器的 R 端在 S1 端之上，先在指定 < 地址 > 执行复位

指令，当两个输入端 R 和 S1 都为“1”时，置位使能输入最终有效。既置位输入优先，触发器或被复位或保持复位不变。在梯形图中，置位/复位双稳态触发器指令方块可被看做一个特殊常开触点，其特性是，若方块的 Q 为“1”，则触点闭合；若 Q 为“0”，则触点断开。

可以使用“置位/复位触发器”或“复位置位触发器”指令操作基于输入 S 和 R1 或 R 和 S1 的信号状态置位或复位指定操作数的位。如果输入 S 的信号状态为“1”且输入 R1 的信号状态为“0”，指定的操作数将置位为“1”。如果输入 S 的信号状态为“0”且输入 R1 的信号状态为“1”，指定的操作数将复位为“0”。输入 R1 优先于输入 S。如果两个输入 S 和 R1 的信号状态均为“1”，指定操作数的信号状态将复位为“0”。如果两个输入 R1 和 S 的信号状态为“0”，则不执行该运算。操作数的信号状态因此保持不变。如果输入 R 的信号状态为“1”且输入 S1 的信号状态为“0”，指定的操作数将复位为“0”。如果输入 R 的信号状态为“0”且输入 S1 的信号状态为“1”，指定的操作数将置位为“1”。输入 S1 优先于输入 R。如果两个输入 R 和 S1 的信号状态均为“1”，指定操作数的信号状态将置位为“1”。如果两个输入 R 和 S1 的信号状态为“0”，则不执行该运算。操作数的信号状态因此保持不变。

置位/复位双稳态触发器指令应用示例如图 6-20 所示。

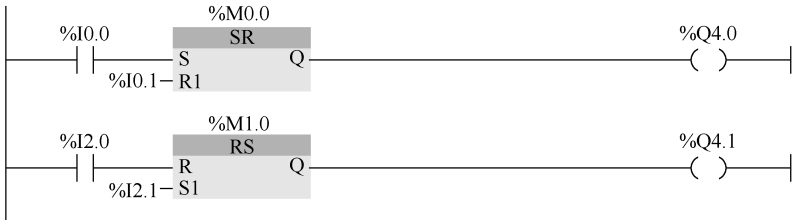


图 6-20 SR 触发器和 RS 触发器指令应用示例

如果输入端 I0.0 的信号状态为“1”，I0.1 的信号状态为“0”，则置位存储器位 M0.0，输出 Q4.0 将是“1”。否则，如果输入端 I0.0 的信号状态为“0”，I0.1 的信号状态为“1”，则复位存储器位 M0.0，输出 Q4.0 将是“0”。如果两个信号状态均为“0”，则不会发生任何变化。如果两个信号状态均为“1”，将因顺序关系执行复位指令；复位 M0.0，Q4.0 将是“0”。

如果输入端 I2.0 的信号状态为“1”，I2.1 的信号状态为“0”，则复位存储器位 M1.0，输出 Q4.1 将是“0”。否则，如果输入端 I2.0 的信号状态为“0”，I2.1 的信号状态为“1”，则复位存储器位 M1.0，输出 Q4.1 将是“1”。如果两个信号状态均为“0”，则不会发生任何变化。如果两个信号状态均为“1”，将因顺序关系执行置位指令；置位 M0.0，Q4.0 将是“1”。

5. 边沿识别指令

边沿状态识别包括扫描操作数、置位操作数和信号置位三类。当边沿状态信号变化时就会产生跳变沿，当从“0”变到“1”时，产生一个上升沿（正跳沿）；若从“1”变到“0”，则产生一个下降沿（负跳沿）。在每个扫描周期中把信号状态和它在前一个扫描周期

的状态进行比较，若不同则表明有一个跳变沿。因此，前一个周期里的信号状态必须被存储，以便能和新的信号状态相比较。如图 6-21 所示。



图 6-21　跳变沿检测原理

当边沿检测指令检测到输入有一个下降沿，将使输出线圈在一个扫描周期内通电。对输入扫描的 RLO 值存放在沿存储器位中。在 OB1 扫描周期中，CPU 扫描并形成 RLO 值，若该 RLO 值是“0”，且上次 RLO 值是“1”，这说明边沿检测指令检测到一个 RLO 的下降沿，则边沿检测指令将 RLO 位置“1”。当边沿检测指令检测到输入有一个上升沿，将使输出线圈在一个扫描周期内通电。对输入扫描的 RLO 值存放在沿存储器位中。在 OB1 的扫描周期中，CPU 扫描并形成 RLO 值，若该 RLO 值是 1，且上次 RLO 值是 0，这说明边沿检测指令检测到一个 RLO 的上升沿，则指令将 RLO 位置 1。如果 RLO 在相邻的两个扫描周期中相同（全为“1”或“0”），指令将 RLO 位清 0。需要注意的是，在编程时必须考虑到，边沿检测指令检测到的一般是在 RLO 中表现出的变化，而不是触点的状态变化。因为，一般情况下，RLO 可能由一个逻辑串形成，并不单独与某触点状态直接相关。若需要在逻辑串中单独检测某触点的跳变沿，可使用对触点跳变沿直接检测边沿信号识别指令。

（1）扫描操作数—| P |—指令。“扫描操作数的信号上升沿”—| P |—指令有两个操作数，可用于确定指定 < 操作数 1 > 的信号状态是否从“0”变为“1”。比较 < 操作数 1 > 的当前信号状态与保存在 < 操作数 2 > 中的上一次查询的信号状态。如果检测到逻辑运算结果从“0”变为“1”，则说明出现了上升沿。如果检测到上升沿，操作的输出的信号状态将为“1”。在任何其他情况下，操作的输出的信号状态为“0”。—| P |—指令可以放置在程序段中的任何位置。

（2）扫描操作数—| N |—指令。“扫描操作数的信号下降沿”—| N |—指令有两个操作数，用于查询指定 < 操作数 1 > 的信号状态是否从“1”变为了“0”。比较 < 操作数 1 > 的当前信号状态与保存在 < 操作数 2 > 中的上一次查询的信号状态。如果检测到逻辑运算结果从“1”变为“0”，则说明存在下降沿。如果检测到下降沿，操作的输出的信号状态将为“1”。如果没有下降沿，到右侧电源线的信号状态将复位为“0”。—| N |—指令可以放置在程序段中的任何位置。

（3）置位操作数—（P）—指令。“在信号上升沿置位操作数”—（P）—指令有两个操作数，用于操作在能流从“0”变为“1”时置位指定操作数。将当前逻辑运算结果（RLO）与保存在沿位存储器中的上次查询的运算结果进行比较。如果检测到能流从“0”变为“1”，则说明出现了上升沿。如果出现了上升沿，< 操作数 1 > 的信号状态将置位为“1”一个程序周期。在任何其他情况下，操作数的信号状态为“0”。—（P）—指令可以放置在程序段的中间或者右端。通过使用分支，多个线圈可以相互嵌套放置。

（4）置位操作数—（N）—指令。“在信号下降沿置位操作数”—（N）—指令有两个操作数，用于操作在能流从“1”变为“0”时置位指定操作数。将当前逻辑运算结果（RLO）与保存在沿位存储器中的上次查询的运算结果进行比较。如果该操作检测到能流从“1”变为“0”，则说明出现了下降沿。检测到下降沿时，< 操作数 1 > 的信号状态将置位为“1”一个程序周期。在任何其他情况下，操作数的信号状态为“0”。—（N）—指令可以放置在程序段的中间或者右端。通过使用分支，多个线圈可以相互嵌套放置。

上述指令沿存储器位的地址在程序中最多只能使用一次，否则，该存储器位会被覆盖，并且结果会变得不明确。操作不会影响 RLO。线圈输入端的 RLO 将立即发送到线圈输出端。

（5）信号置位输出 P_ TRIG 指令。P_TRIG 指令图形符号如图 6-22 所示。“在信号上升沿置位输出” P_TRIG 指令用于操作查询逻辑运算结果的信号状态是否从“0”变为了“1”。比较逻辑运算结果（RLO）的当前信号状态（CLK 端）与保存在沿位存储器中的上一次查询的信号状态。如果检测到 RLO 从“0”变为“1”，则说明出现了上升沿。如果检测到上升沿，操作的输出的信号状态将为“1”。在任何其他情况下，操作的输出的信号状态为“0”。P_ TRIG 指令可以放置在程序段的中间。

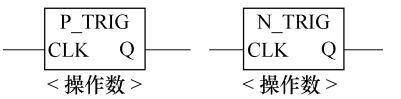


图 6-22 P_TRIG 和 N_TRIG 指令的图形符号

（6）信号置位输出 N_TRIG 指令。N_TRIG 指令图形符号如图 6-22 所示。“在信号下降沿置位输出” N_TRIG 指令用于操作检测逻辑运算结果（RLO）的信号状态是否从“1”变为了“0”。比较逻辑运算结果的当前信号状态（CLK 端）与保存在沿存储器位中的上一次查询的信号状态。如果该操作检测到 RLO 从“1”变为“0”，则说明存在下降沿。如果检测到下降沿，操作的输出的信号状态将为“1”。在任何其他情况下，操作的输出的信号状态为“0”。N_TRIG 指令可以放置在程序段的中间。

在梯形图中，边沿信号检测指令方块可被看做一个特殊常开触点，其特性是，若方块的 Q 为“1”，则触点闭合；若 Q 为“0”，则触点断开。边沿检测指令应用示例如图 6-23 所示。

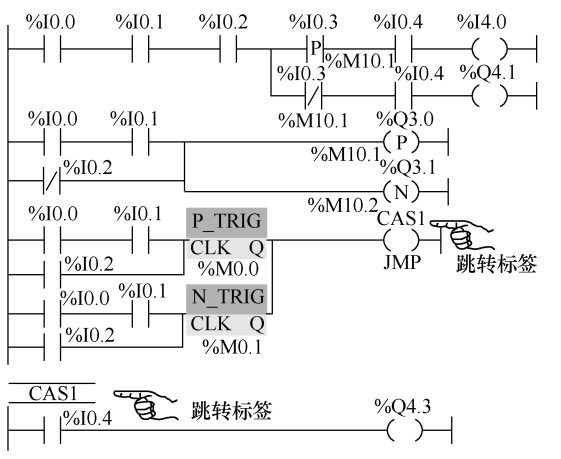


图 6-23 边沿检测指令应用示例

在图 6-23 中，如果输入 I0.0 、I0.1 和 I0.2 的信号状态为“1”，输入 I0.3 有上升沿，输入 I0.4 的信号状态为“1”，输出 Q4.0 将置位。如果输入 I0.0、I0.1 及 I0.2 的信号状态为“1”，输入 I 0.3 有下降沿，输入 I 0.4 的信号状态为“1”，输出 Q4.1 将置位。如果置位操作数—（P）—指令输入端的信号状态从“0”切换到“1”时（上升沿），输出 Q3.0 将置位一个程序周期。在任何其他情况下，输出 Q3.0 的信号状态为“0”。而当置位操作数—（N）—指令输入端的信号状态从“1”切换到“0”时（下降沿），输出 Q3.1 将置位一个程序周期。在任何其他情况下，输出 Q3.1 的信号状态为“0”。

P_TRIG 指令的全部输入位逻辑运算的 RLO 均保存在沿位存储器 M0.0 中。如果 RLO 的信号状态从“0”变为“1”，则程序将跳转到跳转标签 CAS1。N_TRIG 指令全部输入位逻辑运算的 RLO 保存在沿存储器位 M0.1 中。如果检测到 RLO 的信号状态从“1”变为“0”，程序将跳转到跳转标签 CAS1。

6.3.2　定时器指令

1. 定时器指令的种类

S7-300/400 PLC 的定时器指令包括 S5 型定时器指令和线圈型定时器指令各 5 种。S5 型定时器可以输出当前值，线圈型定时器指令则不能，这是两者的主要区别。

S5 型定时器包括脉冲定时器 S_PULSE、扩展脉冲定时器 S_PEXT、接通延时定时器 S_ODT、保持接通延时定时器 S_ODTS 和断开延时定时器 S_OFFDT。

线圈型定时器包括脉冲定时器线圈—（SP）、扩展脉冲定时器线圈—（SE）、接通延时定时器线圈—（SD）、保持接通延时定时器线圈—（SS）和断开延时定时器线圈—（SF）。

S7-1200 PLC 的定时器指令有脉冲定时器 TP、接通延时定时器 TON、断开延时定时器 TOF 和保持型接通延迟定时器 TONR 共 4 种类型。还有一个—［ RT ］—指令，RT 指令可重置指定定时器的定时器数据。通过清除存储在指定定时器背景数据块中的时间数据来重置定时器。可创建自己的“定时器名称”来命名定时器数据块，还可以描述该定时器在过程中的用途。

S5 型定时器指令的工作时序状态如图 6-24 所示。

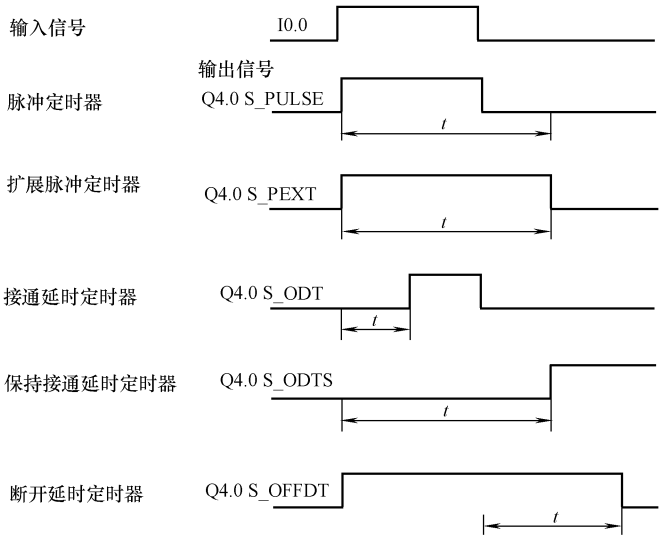


图 6-24　定时器的种类与工作时序状态

①　S_PULSE 脉冲定时器，输出信号保持为 1 的最大时间与设定的时间值 t 相同。如果输入信号变为 0，则输出信号在较短的时间内保持为 1。

②　S_PEXT 扩展脉冲定时器，输出信号在设定的时间长度内保持为 1，无论输入信号保持 1 多长时间。

③　S_ODT 接通延时定时器，只有在设定的时间已过且输入信号仍为 1 时，输出信号才变为 1。

④　S_ODTS 保持接通延时定时器，只有在设定的时间已过时，输出信号才从 0 变为 1，无论输入信号保持 1 多长时间。

⑤　S_OFFDT 断开延时定时器，输入信号变为 1 或定时器运行时，输出信号变为 1。输

入信号从 1 变为 0 时，时间起动。

S7-1200PLC 与 S7-300/400PLC 定时器的工作时序状态相同的种类，尽管符号不同，但用法相同。

2. 定时器的时间值和时间基准

定时器的定时时间由时基和定时值两部分组成，定时时间等于时间基准与定时值的乘积。当定时器运行时，定时值不断减 1，直至减到 0，减到 0 表示定时时间到。定时时间到后会引起定时器触点动作。

① 时间值，时间值指定单位数。可以用二进制、十六进制或以二进制编码的十进制（BCD）格式预设时间值。S7-300/400 PLC 定时器可以使用以下任意一种格式预设时间值：

W#16#wxyz，其中，w—时间基准（即时间间隔或分辨率）；xyz—以二进制编码的十进制格式表示的时间值。*t*—时间基准，取值 0、1、2、3 分别表示时基为 10ms、100ms、1s、10s。xyz—定时值，取值范围为 1～999。

S5T#aH_bM_cS_dMS，其中，H—小时，M—分钟，S—秒，MS—毫秒；a、b、c、d 由用户定义。时间基准是自动选择的，原则是根据定时时间选择能满足定时范围要求的最小时基。数值会根据时间基准四舍五入到下一个较低数。可以输入的最大时间值是 9 990 秒或 2 小时_46 分钟_30 秒。

如，S5TIME#4S＝4 秒；S5T#2h_15m ＝ 2 小时 15 分钟；S5T#1H_12M_18S＝1 小时 12 分钟 18 秒。

S7-1200 PLC 定时器使用“T#××ms”或“T#×s_ ××ms”格式输入预设时间值。

② 时间基准，定时器字的 12 和 13 位包含二进制编码的时间基准。时间基准定义将时间值递减一个单位所用的时间间隔。最小的时间基准是 10 毫秒；最大的时间基准是 10 秒。时间基准的二进制编码、分辨率和定时范围见表 6-5。分辨率超出范围限制的值将被舍入到有效的分辨率。

表 6-5 时间基准、分辨率和定时范围

时间基准	二进制编码	分辨率	用于 S5TIME 格式的定时范围
10s	00	0.01s	10ms～9s_990ms
100ms	01	0.1s	100ms～1m_39s_900ms
1s	10	1s	1s～16m_39s
10s	11	10s	10s～2h_46m_30s

当定时器起动时，累加器 1 低位字的内容被当做定时时间装入定时器字中。这一过程是由操作系统控制自动完成的，只需给累加器 1 装入不同的数值，即可设置需要的定时时间。

③ 时间单元中的位组态，定时器的第 0～11 位存放 BCD 码格式的定时值，三位 BCD 码表示的范围是 0～999。第 12、13 位存放二进制格式时间基准。定时器起动时，定时器单元的内容用作时间值，如图 6-25 所示。

④ 读取时间和时间基准，每个定时器逻辑框提供两种输出：BI 和 BCD，从中可指示一个字位置。BI 输出提供二进制格式的时间值。BCD 输出提供二进制编码的十进制（BCD）格式的时间基准和时间值。

3. S5 型定时器指令的应用

以接通延时定时器 S_ODT 为例，介绍 S5 型定时器指令的应用，其他 S5 型定时器的操

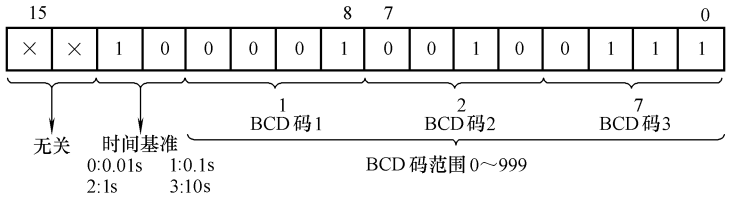


图 6-25　定时器字的数据格式

作与此相同。接通延时定时器指令参数见表 6-6。

表 6-6　接通延时定时器 S_ODT 的参数

LAD 方块	参数	数据类型	存储区	说　明
Tno. S_ODT S　Q TV　BI R　BCD	no.	TIMER	T	定时器标识号，范围与 CPU 有关
	S	BOOL	I、Q、M、D、L	起动输入端
	TV	S5TIME	I、Q、M、D、L	预置时间值（范围：0～999）
	R	BOOL	I、Q、M、D、L	复位输入端
	Q	BOOL	I、Q、M、D、L	定时器状态
	BI	WORD	I、Q、M、D、L	当前运行时间值（整数格式）
	BCD	WORD	I、Q、M、D、L	当前运行时间值（BCD 格式）

如果在起动（S）输入端有一个上升沿脉冲状态转换，S_ ODT 起动。只要输入端 S 的信号状态为正，定时器就以在输入端 TV 设定的时间运行。定时器达到设定时间而没有出错，并且 S 输入端的信号状态仍为“1”时，输出端 Q 的信号状态为“1”。如果定时器运行期间输入端 S 的信号状态从“1”变为“0”，定时器将停止。这种情况下，输出端 Q 的信号状态为“0”。如果在定时器运行期间复位（R）输入从“0”变为“1”，则定时器复位。当前时间和时间基准被设置为零。然后，输出端 Q 的信号状态变为“0”。如果在定时器没有运行时 R 输入端有一个逻辑“1”，并且输入端 S 的 RLO 为“1”，则定时器也复位。定时器当前值在输出端 BI 以 BI 编码格式输出，在输出端 BCD 以 BCD 格式输出。接通延时定时器时序如图 6-26 所示。

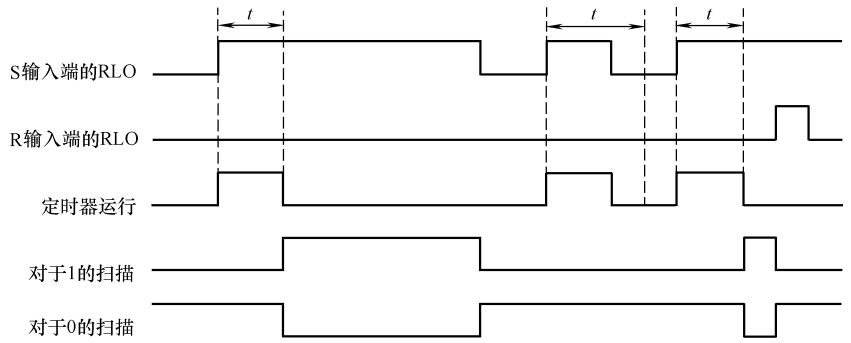


图 6-26　接通延时定时器 S_ODT 的时序图

接通延时定时器 S_ODT 的应用示例，STL 语句表程序如下：

```
A       I0.7
L       S5T#35S          \\ 装入定时时间到 ACCU1
```

```
SD      T4          \\ 起动接通延时定时器 T4
A       I0.5
R       T4          \\ 定时器 T4 复位
L       T4
T       MW0
LC      T4
T       QW6
A       T4
=       Q4.5
```

对应的 LAD 和 FBD 图程序如图 6-27 所示。

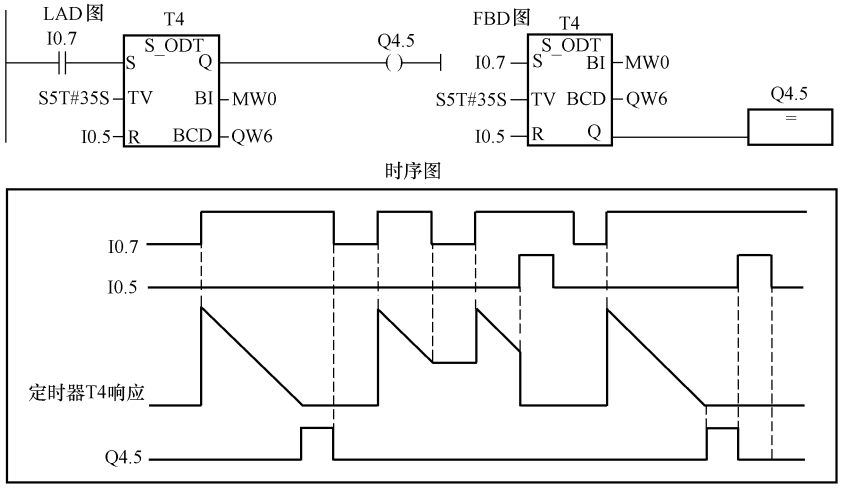


图 6-27 接通延时定时器 LAD 图和 FBD 图示例

如果 I0.7 的信号状态从“0”变为“1”（RLO 中的上升沿），则定时器 T4 将起动。如果指定的 35s 时间结束并且输入端 I0.7 的信号状态仍为“1”，则输出端 Q4.5 将为“1”。如果 I0.7 的信号状态从“1”变为“0”，则定时器停止，并且 Q4.5 将为“0”。如果 I0.5 的信号状态从“0”变为“1”，则无论定时器是否运行，时间都复位。

接通延时定时器线圈—（SD）的应用示例如图 6-28 所示。

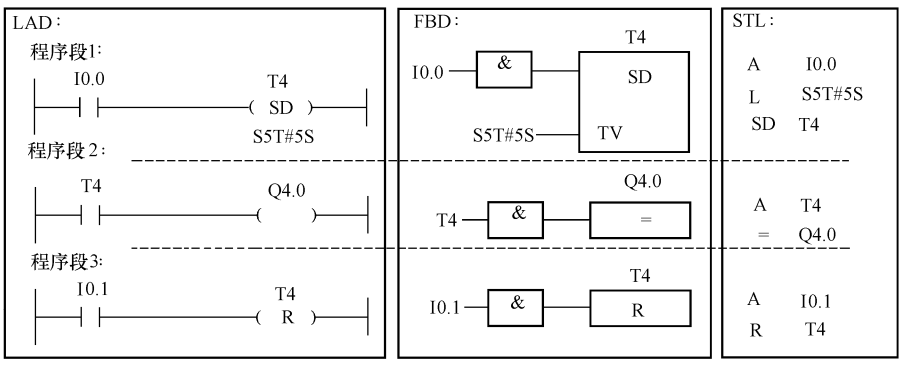


图 6-28 接通延时定时器线圈—（SD）的应用示例

6.3.3　计数器指令

1. 计数器指令的种类

S7-300/400 PLC 的计数器指令包括 3 种方块指令，加计数器 S_CU、减计数器 S_CD 和可逆计数器 S_CUD，以及 3 种线圈指令，设置计数器线圈—（SC）、加计数器线圈—（CU）和减计数器线圈—（CD）。

S7-1200 PLC 的计数器指令有 3 种方块指令，加计数器 CTU、减计数器 CTD 和可逆计数器 CTUD。

S7-300/400 PLC 和 S7-1200 PLC 的计数器方块指令仅符号不同，操作方法相同。方块型计数器指令可以输出当前值，线圈型计数器指令则不能，这是两者的主要区别。

表 6-7 是 S7-300/400 PLC 的计数器方块指令。表 6-8 是 S7-300/400 PLC 的计数器线圈指令。时序图如图 6-29 所示。

表 6-7　S7-300/400 PLC 计数器方块指令

可逆计数器	加计数器	减计数器
Cno. S_CUD CU　Q CD S　CV PV R　CV_BCD	Cno. S_CU CU　Q S PV　CV R　CV_BCD	Cno. S_CD CD　Q S PV　CV R　CV_BCD

参数	数据类型	存储区	说　明
no.	COUNTER	C	计数器标识号，范围与 CPU 有关
CU	BOOL	I、Q、M、D、L	加计数输入
CD	BOOL	I、Q、M、D、L	减计数输入
S	BOOL	I、Q、M、D、L	计数器预置输入
PV	WORD	I、Q、M、D、L	计数初始值输入（BCD 码，范围：0～999）
R	BOOL	I、Q、M、D、L	复位输入端
Q	BOOL	I、Q、M、D、L	计数器状态输出
CV	WORD	I、Q、M、D、L	当前计数值输出（整数格式）
VC_BCD	WORD	I、Q、M、D、L	当前计数值输出（BCD 格式）

表 6-8　S7-300/400 PLC 的计数器线圈指令

LAD 指令	STL 指令	功　能	说　明
C no. —（SC） < 预置值 >	S Cno.	计数器置初始值	指令为计数器设置初始值，Cno. 为计数器号，数据类型为 COUNTER；< 预置值 > 的数据类型为 WORD，可在存储区 I、Q、M、D、L 中，也可为常数。STL 指令的初始值在累加器 1 中
C no. —（CU）	CU Cno.	加记数	执行指令时，RLO 每有一个正跳沿计数值加 1，若达上限 999，则停止累加计数
C no. —（CD）	CD Cno.	减记数	执行指令时，RLO 每有一个正跳沿计数值减 1，若达下限 0，则停止减计数
	FR Cno.	允许计数器再起动	类似于定时器再起动指令 FR < timer >，计数器再起动指令用于重新装载计数初值，计数器以新装入的计数值运行。若 RLO 为 1，则初始值再次装入，它不是计数器正常运行的必要条件

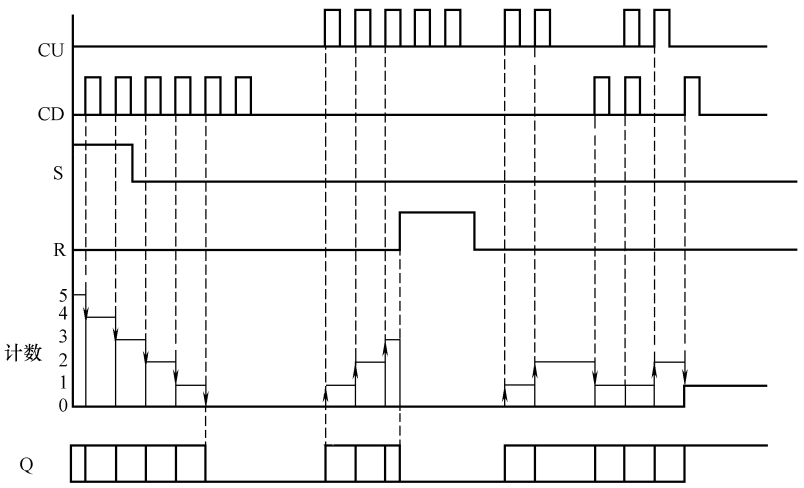


图 6-29 计数器的时序图

2. 计数值的表示方法

计数器计数值的范围为 0 ~ 999。以 C#xyz 格式输入，C#代表 BCD 格式，xyz—记数值，设定范围 1 ~ 999。如 C#120。

3. 减计数、加计数和可逆计数器方块指令示例

1）加计数语句表程序：

```
A     I0.0          //在 I0.0 的上升沿
CU    C10           //加计数器 C10 的当前值加 1
BLD   101
A     I0.2          //在 I0.2 的上升沿
L     C#14          //计数器的预置值 14 被装入累加器的低位字
S     C10           //将预置值装入计数器 C10
A     I0.3          //如果 I0.3 为 1
R     C10           //复位 C10
L     C10           //将 C10 的二进制计数当前值装入累加器 1
T     MW4           //将累加器 1 的内容传送到 MW4
LC    C10           //将 C10 的 BCD 计数当前值装入累加器 1
T     MW6           //将累加器 1 的内容传送到 MW6
A     C10           //如果 C10 的当前值非 0
=     Q4.0          //Q4.0 为 1 状态
```

2）减计数语句表程序：

```
A     I0.0
CD    C10           //当 RL0 根据输入 I0.0 的状态从“0”跳转至“1”时，将计数器
                      C10 减 1
BLD   101
A     I0.2          //在 I0.2 的上升沿
L     C#14          //计数器的预置值 14 被装入累加器的低位字
```

```
S     C10        //将预置值装入计数器 C10
A     I0.3       //如果 I0.3 为 1
R     C10        //复位 C10
L     C10        //将 C10 的二进制计数当前值装入累加器 1
T     MW4        //将累加器 1 的内容传送到 MW4
LC    C10        //将 C10 的 BCD 计数当前值装入累加器 1
T     MW6        //将累加器 1 的内容传送到 MW6
A     C10        //如果 C10 的当前值非 0
=     Q4.0       //Q 4.0 为 1 状态
```

3）可逆计数语句表程序：

```
A     I0.0
CU    C10        //加计数器 C10 的当前值加 1
A     I0.1       //在 I0.1 的上升沿
CD    C10        //当 RL0 根据输入 I 0.0 的状态从“0”跳转至“1”时，将计数器
                   C10 减 1。
A     I0.2       //在 I0.2 的上升沿
L     C#14       //计数器的预置值 14 被装入累加器的低位字
S     C10        //将预置值装入计数器 C10
A     I0.3       //如果 I0.3 为 1
R     C10        //复位 C10
L     C10        //将 C10 的二进制计数当前值装入累加器 1
T     MW4        //将累加器 1 的内容传送到 MW4
LC    C10        //将 C10 的 BCD 计数当前值装入累加器 1
T     MW6        //将累加器 1 的内容传送到 MW6
A     C10        //如果 C10 的当前值非 0
=     Q4.0       //Q4.0 为 1 状态
```

减计数、加计数和可逆计数器方块指令对应的 LAD 和 FBD 图程序如图 6-30 所示。

6.3.4　比较指令

常用的比较指令 CMP 指令用于比较两个参数（操作数 1、操作数 2）中的数据大小。RANGE 指令用于比较某一个值是否在指定的值范围内。如果比较指令的比较结果为“真”，则 RLO 为“1”，否则为 0。常用的比较指令见表 6-9。

比较指令 CMP 的符号和操作如图 6-31 所示。

表 6-9　比较指令

符　　号	描　　述
CMP = =	等于
CMP < >	不等于
CMP > =	大于或等于
CMP < =	小于或等于

（续）

符　　号	描　　述
CMP >	大于
CMP <	小于
IN_RANGE	值在范围内
OUT_RANGE	值超出范围

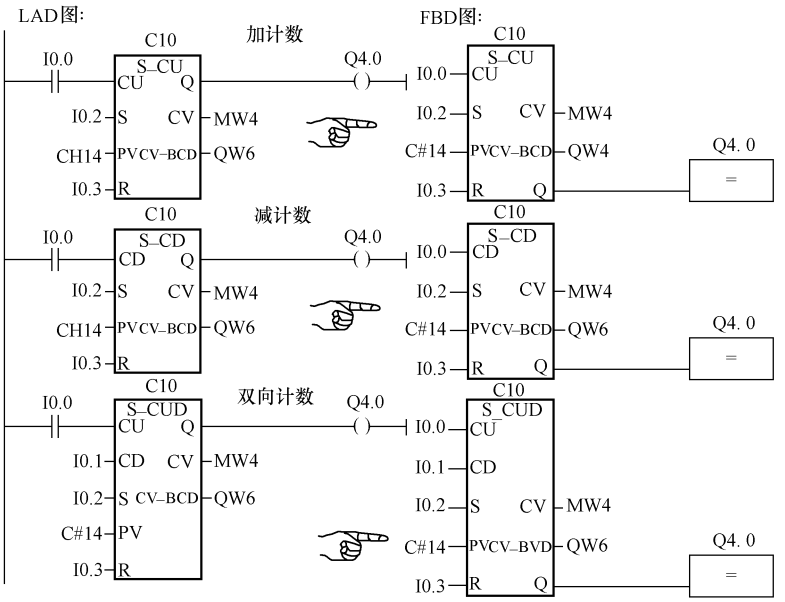


图 6-30　减计数、加计数和可逆计数 LAD 和 FBD 图程序示例

在程序段插入比较指令 CMP 的符号后，点击中间部位，就会出现两个黄色箭头，点击右上角黄色箭头，并下拉列表，选择需要的 CMP 指令符；点击右下角黄色箭头，并下拉列表，选择需要的数据类型。然后分别点击红色“???”输入操作数 1 和操作数 2。CMP 指令应用例如图 6-32 所示。

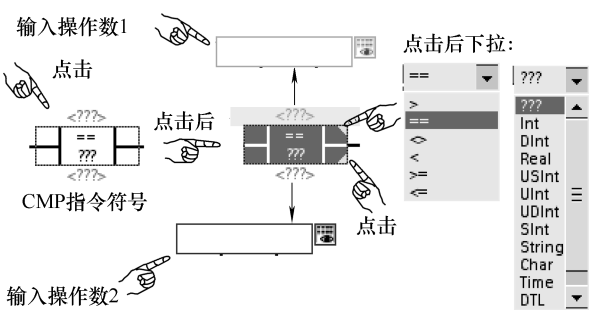


图 6-31　比较指令 CMP 的符号和操作

如果输入 I3.0 的信号状态为“1”，当 MW400 中的内容等于 30 时，置位 Q10.0 为“1”，如果 MW400 的内容不等于 30，则 Q10.0 的状态为“0”。当 MW400 > 30，则置位 Q10.1 为“1”，否则为“0”。MW400 < 30，则置位 Q10.2 为“1”，否则为“0”。

再如，某生产系统需要检测 3 个工段工作任务情况。如果工段 1 完成了 60 件则发灯光显示；如果工段 2 完成了 90 件则发灯光显示；如果工段 3 完成了 100 件则发灯光显示。控制程序如图 6-33 所示。

IN_RANGE 是“值在范围内”的比较指令。如果输入 VAL 的值满足 MIN ≤ VAL ≤ MAX，则功能框输出的信号状态为“1”。如果该比较的结果不为真，则功能框输出的信号状态为“0”。如果功能框输入的信号状态为“0”，则不执行“值在范围内”操作。只有要

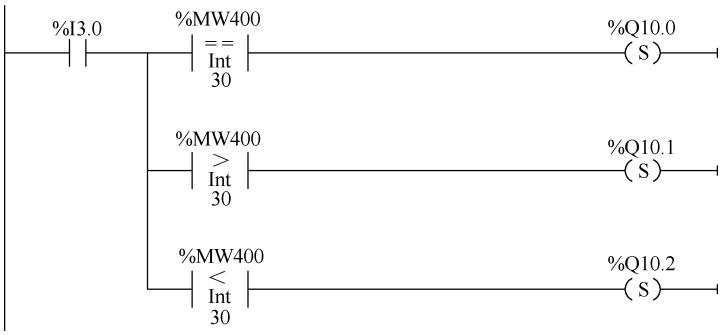


图 6-32　CMP 指令应用示例

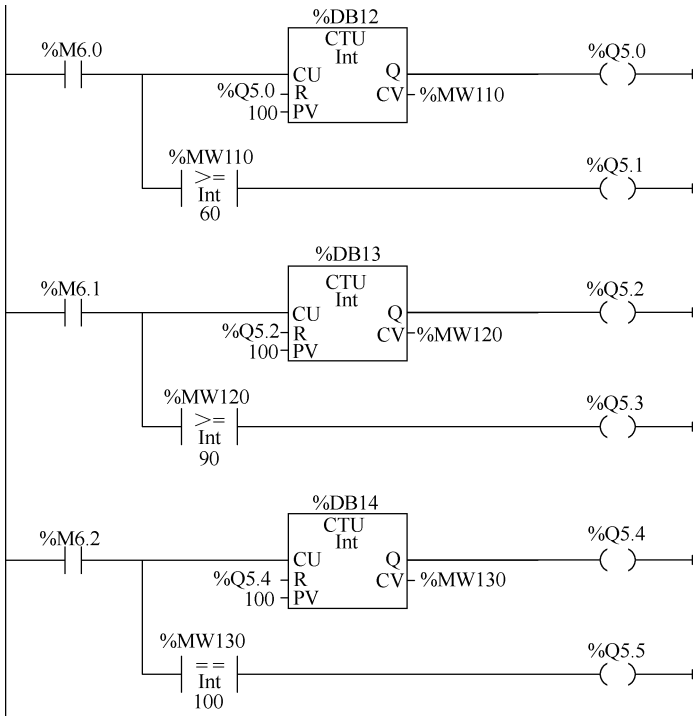


图 6-33　工段工作任务检测示例

比较的值具有相同的数据类型且互连了功能框输出时，才能执行该比较功能。

OUT_RANGE 是“值超出范围”的比较指令。如果输入 VAL 的值满足 MIN > VAL 或 VAL > MAX，则功能框输出的信号状态为“1”。如果该比较的结果不为真，则功能框输出的信号状态为“0”。如果功能框输入端的信号状态为“0”，则不执行“值超出范围”操作。只有要比较的值具有相同的数据类型且互连了功能框输出时，才能执行该比较功能。

6.3.5　移动指令

移动（MOVE）指令的符号、参数和数据类型等见表 6-10。

移动值（MOVE）操作将输入源值 IN 的数据传送到输出目标地址 OUT1。始终沿地址升序方向进行传送。MOVE 指令可插入附加输出。在这种情况下，输入 IN 的操作数的数据将传送到所有可用的输出。只有使能输入 EN 的信号状态为“1”时，才执行该操作。在这种

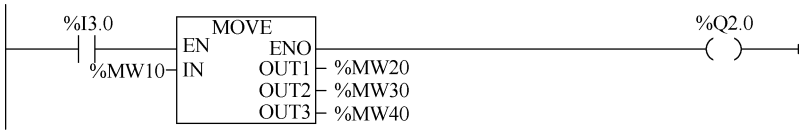
情况下，输出 ENO 的信号状态也为“1”。如果输入 EN 的信号状态为“0”，则使能输出 ENO 将复位为“0”。

表 6-10　移动（MOVE）指令的符号、参数和数据类型

符号	参数	数据类型	存储区	描述
MOVE EN　ENO IN　OUT1	EN	BOOL	I、Q、M、D、L	使能输入
	ENO	BOOL	I、Q、M、D、L	使能输出
	IN	所有基本数据类型、DTL、STRUCT、ARRAY	I、Q、M、D、L 或常数	源值
	OUT1	所有基本数据类型、DTL、STRUCT、ARRAY	I、Q、M、D、L	目标地址

如果启用 IEC 测试，则输入 IN 和输出 OUT1 的变量必须具有相同的数据类型。如果未启用 IEC 测试，则该操作的输入 IN 和输出 OUT1 的操作数宽度必须相同。只有当输入 IN 和输出 OUT1 的变量的数组元素具有相同数据类型时，才能复制整个数组。

移动（MOVE）的应用示例如图 6-34 所示。



IN	MW10=0000 0001 0010 0101
OUT1	MW20=0000 0001 0010 0101
OUT2	MW30=0000 0001 0010 0101
OUT3	MW40=0000 0001 0010 0101

图 6-34　移动值（MOVE）的应用示例

6.3.6　程序控制指令

程序控制指令也称为跳转指令类型，见表 6-11。

表 6-11　程序控制指令类型

符　号	描　述
—（JMP）	为 1 时块中跳转（有条件）
—（JMPN）	为 0 时块中跳转（有条件）
LABEL	跳转标签
—（RET）	返回

程序控制指令用于控制中断原有程序的执行，而跳转到另一处执行目标程序段（子程序）。可在所有逻辑块中使用程序控制指令。

跳转标签（LABEL）指定跳转的目标程序段，需要在跳转标签上方指定跳转标签的名称。跳转标签的名称可以包含字母、数字或下划线。跳转标签及指定了该跳转标签的操作必须位于同一个块中。跳转标签的名称在块中只能分配一次。每个跳转标签可以跳转到多个位置。使用“返回”—（RET）操作停止目标程序段（块）的执行。只有其输入端的信号状态为“1”时，才会执行“返回”操作，将在当前目标程序段（块）程序终止执行，并在跳

转目标程序段后继续执行。目标程序段（块）的状态由“返回”操作的以下参数决定。

TRUE：输出 ENO 置位为“1”。FALSE：输出 ENO 复位为“0”。< 操作数 >：输出 ENO 由指定操作数的信号状态决定。如果组织块被“返回”操作终止，则 CPU 继续执行系统程序。如果“返回”操作输入端的信号状态为“0”，则不执行该操作。在这种情况下，程序继续在被调用块的下一个程序段中执行。

如果—（JMP）操作的输入端的逻辑运算结果（RLO）为“1”，则跳转到跳转标签所标识的程序段。跳转方向可以朝向更大或更小的程序段编号，如果输入的逻辑运算结果为“0”，则程序继续在下一个程序段中执行。相反，如果—（JMPN）操作的输入端的逻辑运算结果为“0”时，则跳转到跳转标签所标识的程序段。如果输入端的逻辑运算结果为“1”，则程序在下一个程序段中继续执行。其他与—（JMP）指令相同。

程序控制指令的应用示例如图 6-35 所示。

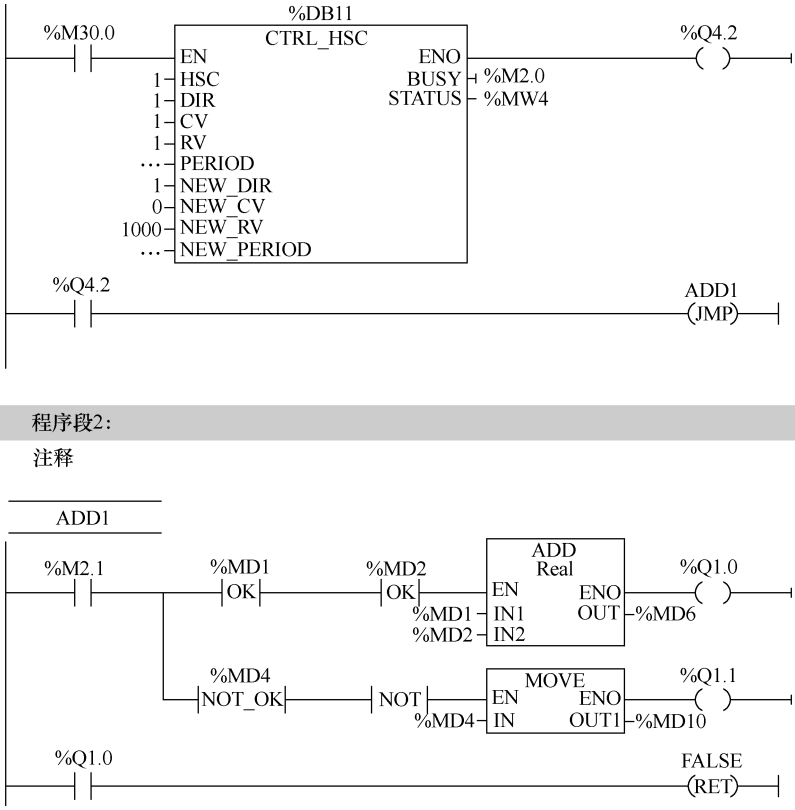


图 6-35　程序控制指令的应用示例

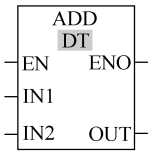
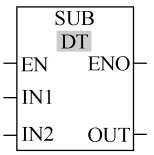
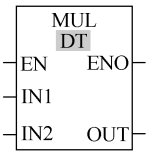
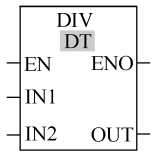
图 6-35 中，如果输入 Q4.2 的信号状态为“1”，则执行—（JMP）操作，跳转标签 ADD1 标识的“程序段 2”中继续执行。如果输入 Q1.0 的信号状态为“1”，则执行“返回”操作。“程序段 2”的程序执行被终止，并继续在“程序段 1”中执行。输出 ENO 置位为“1”。

6.3.7　算数指令

加（ADD）、减（SUB）、乘（MUL）、除（DIV）指令的符号、参数和数据类型等见表

6-12。

表 6-12 ADD、SUB、MUL、DIV 指令的符号、参数和数据类型

加（ADD）	减（SUB）	乘（MUL）	除（DIV）
			

参数	数据类型	存储区	描述
EN	BOOL	I、Q、M、L、D	使能输入
ENO	BOOL	I、Q、M、L、D	使能输出
IN1	SINT、INT、DINT、USINT、UINT、UDINT、REAL	I、Q、M、L、D 或常数	被加数
IN2	SINT、INT、DINT、USINT、UINT、UDINT、REAL	I、Q、M、L、D 或常数	加数
OUT	SINT、INT、DINT、USINT、UINT、UDINT、REAL	I、Q、M、L、D	相加的结果

可以从“DT”下拉列表中选择用于该操作的数据类型。

加（ADD）、减（SUB）、乘（MUL）、除（DIV）指令操作可以分别将输入 IN1 的值与输入 IN2 的值相加、相减、相乘、相除，并通过输出 OUT 查询计算结果（如 OUT = IN1 + IN2、OUT = IN1 – IN2 等）。

只有使能输入 EN 的信号状态为“1”时，才执行加（ADD）、减（SUB）、乘（MUL）、除（DIV）指令操作操作。如果运算执行过程中未发生错误，则输出 ENO 的信号状态为“1”。如果输入 EN 的信号状态为“0”，或者操作结果超出输出 OUT 指定的数据类型的允许范围，或者输入变量为 REAL 数据类型且无效，使能输出 ENO 将返回信号状态“0”。以减（SUB）指令为例，应用示例如图 6-36 所示。

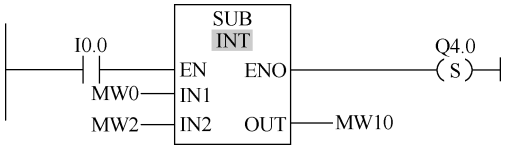


图 6-36 减（SUB）指令应用示例

如果输入 I 0.0 的信号状态为“1”，则执行减（SUB）指令，从输入 MW0 的值中减去输入 MW2 的值，MW0 – MW2 相减的结果输出到 MW10 中。如果运算执行过程中未发生错误，则输出 ENO 的信号状态将为“1”并置位输出 Q 4.0。加（ADD）、乘（MUL）、除（DIV）指令应用操作与此类似。

第 7 章　可通信智能化低压电器与现场总线

可通信智能化电器以电子脱扣器为核心，具有双向通信功能，能与多种开放式现场总线连接，通过现场总线可实现低压配电系统与中压配电系统连网，实现低压配电系统和中压配电系统区域联锁，进而实现配电自动化。区域联锁的目标是扩大选择性保护范围，直至实现全范围选择性保护，减少配电系统动、热稳定要求。

7.1　低压电器数据通信的概念

7.1.1　现场总线

现场总线是安装在制造或过程区域的现场装置与控制室内的自动装置之间的一种数字式、串行、多点通信的数据总线。Modbus 是一种现场总线的工业自动化网络规范，物理层使用 RS-485 的主从型现场总线。DeviceNet 是一种位于设备层的现场总线，物理层使用 CAN 总线的主从型及生产者/使用者模式的现场总线。PROFIBUS 现场总线有 FMS、PA、DP 三种不同的类型，其中，PA 用于过程控制，DP 用于工业现场控制。两者的物理层不同，Profibus-DP 是一种现场总线的工业自动化网络规范，物理层使用 RS-485 的主从型及多主从令牌系统现场总线。主从型通信是一种面向子站设备的现场总线通信模式，由 1 个主站进行通信控制，一般以周期性轮询方式进行通信。发生事件的子站只有在被轮询到时才能向主站报告事件，面向事件的响应可能因轮询周期有较大时间延迟。生产者/使用者通信是一种面向事件的现场总线通信模式，当事件突发时，系统可以对产生事件的子站快速响应。

7.1.2　通信规约

通信规约是对低压电器在通信中的方式、传送信息的格式、参数类型、数据编码等要素的一种约定。低压电器的数据通信参数包括参数项、数据类型、单位、访问规则、地址、属性、支持该参数的设备代号等，如，断路器通用数据通信参数表、电动机保护器数据通信参数表、ATSE 数据通信参数表、电量监控仪数据通信参数表等。

可通信电器能否完成与其他网络的连接通信，是评价产品开放性的指标。要想达到网络互连，不同厂家生产的控制设备，在网络上传输信息的格式、方式应遵循同一规约。国际标准化组织 ISO（International Standard Organination）制定了开放系统互连 OSI（Open Systems Interconnection）参考模型，为协调研制系统互连的各类标准提供了共同的基础和规约，为研究、设计、实现和改造信息处理系统提供了功能上和概念上的框架，为开放系统提供一个概念上和功能性的主体结构，而不是开放系统互连的具体实现规范，相反地，给予开放系统互连标准的具体实现以充分的灵活性。ISO/OSI 提出了七层参考模型，即物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层、应用层，具体应用时可采用其中的几层。

国家标准 JB/T 10542—2006《低压电器通信规约》规定了低压电器通信规约，用于现

场总线系统的通信。采用 JB/T 10542—2006 标准的低压电器可直接或通过通信适配器与 Modbus、DeviceNet、PROFIBUS-DP 等现场总线系统通信。标准中规定了低压电器的数据通信参数表、相关的说明及检测的要求。规定了低压电器数据传输格式、数据编码及传输规则，参数类型和相应的参数代码和通信的格式。

通信适配器是一种通信设备，对符合某一通信规约的设备进行协议转换后与其他现场总线系统通信。它具有两个通信接口，分别符合相应的通信规约，使得设备可与不同的现场总线系统进行连接。当采用不同通信适配器与不同总线连接时，低压电器与通信适配器之间的通信规约需要采用统一的数据通信规约。统一的低压电器数据通信规约可使得控制系统可以容纳各种各样的智能电器，只要它们具有使用统一规约的数据通信接口就可以相互通信，从而使控制系统的设计和应用具有可互操作性。

国家标准 JB/T10542—2006《低压电器通信规约》规定了低压电器通信规约，用于现场总线系统的通信。标准中包括术语、定义和代号；通信规约；关于使用通信适配器来连接上层现场总线系统的规定；检测的要求；试验；相关的工业规范和版本号的规定；断路器通用数据通信参数表；电动机保护器数据通信参数表等几个部分。规定了低压电器的数据通信参数表、相关的说明及检测的要求、低压电器数据传输格式、数据编码及传输规则、参数类型和相应的参数代码及通信格式。主要内容如下：

1. 低压电器元件工作状态参数

（1）工作状态：通、断；

（2）待命状态：准备好、未准备好；

（3）报警；

（4）故障：已动作，未动作；

（5）故障类型；

（6）故障相代号。

2. 低压电器元件及其工作支路的电参数

（1）电流（分相参数）；

（2）故障参数（故障值）。

3. 控制网络工作参数

（1）遥调相关参数；

（2）遥控信号。

4. 通信的格式

通信格式规定了数据传输格式、传输规则、数据链路符号、字节格式、帧格式、功能编码、波特率、差错处理等。

采用 JB/T 10542—2006 标准的低压电器可直接或通过通信适配器与 Modbus、DeviceNet、PROFIBUS-DP 等现场总线系统通信。但是，有时尽管设备使用了统一规约，当在同一现场总线控制系统中通信时，各种设备还有可能因互相影响而导致可重复的通信失败或导致某设备失效。为保证通信成功，设备除了需要采用统一的通信规约外，还需要具有可互操作性，也就是各种设备在通信时不会互相影响，若无影响，则相关设备称为具有可互操作性，可以在同一系统中工作。

7.1.3　低压电器的数据交换接口形式

低压电器电子控制器对外通信接口有多种，如 CAN 接口、USART 串行接口、双端口 RAM、IC 芯片总线和双机并口通信方式等，与各种现场总线连接可采用不同的接口。

CAN 通信接口是芯片或微处理器上直接带片上 CAN 接口，主要用于基于 CAN 接口规范的现场总线，如 DeviceNet 现场总线。USART 串口方式需加驱动电路，如 Modbus。双端口 RAM 用于控制器的微处理器与专用协议芯片之间的数据交换，如 PROFIBUS-DP 推荐的方式。IC 芯片总线包括 I^2C 和 SPI 方式，与驱动电路配合可用于某些系统的数据交换。双机并口通信方式是两个微处理器或 CPU 之间通过并口进行的通信。

7.1.4　使用通信适配器连接上层现场总线系统的规定

低压电器采用 Modbus 或 DeviceNet 或 PROFIBUS-DP（简称 3S-NET）通信适配器的网络拓扑结构，如图 7-1 所示。

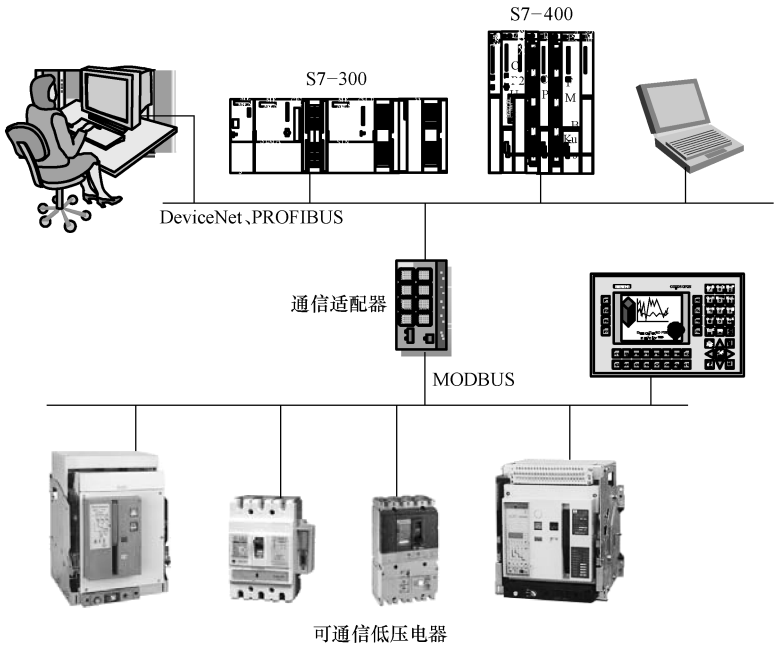


图 7-1　使用通信适配器的网络拓扑结构

1. 以 Modbus 转换 DeviceNet 模式的通信适配器相关要求

与两层现场总线连接的规范，Modbus 与 DeviceNet 现场总线连接的规范应符合 GB/T 18858.3—2002《低压开关设备和控制设备　控制器—设备接口（CDI）　第 3 部分：DeviceNet》的规定。推荐使用波特率 500kbit/s。

与 Modbus 现场总线连接的规范应符合 GB/Z19582—2004《基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范》的规定。推荐使用波特率 19200bit/s。

2. 以 Modbus 转换 PROFIBUS-DP 模式的通信适配器相关要求

与两层现场总线连接的规范，与 PROFIBUS-DP 现场总线连接的规范应符合 IEC61158-3 现场总线技术标准中的 PROFIBUS-DP 部分。使用与 PROFIBUS-DP 现场总线连接的波特率。

应该注意，3S-NET 现场总线组态软件适用 PROFIBUS-DF 的 DV2 及以下版本。

与 Modbus 现场总线连接的规范应符合 Modbus 通信规约。推荐使用波特率 19200bit/s。

对于低压电器的数据通信来说，主要涉及三方面的内容，即与电力网络控制有关的信息，以及这些信息如何编码（数据代码）；通信规约，如数据传输格式和传输规则等；数据通信网络的网络层次等。

7.2 网络控制的内容

从网络控制的角度来看，低压电器通信内容的特点在于有较强的有效性，特别是在配电支路发生故障的情况下，系统响应的时间应该是毫秒级的。有区域闭锁功能的控制系统，对响应时间的要求就更高。低压电器数据通信的主要内容是网络控制的对象参数。

1. 低压电器元件自身工作状态参数，如工作状态是通断还是待命状态、已准备好还是未准备好、报警、故障状态等。

2. 低压电器元件所在工作支路的电参数，如电流、故障参数以及相关参数。

3. 控制网络工作参数，如遥测、遥调、遥控、遥测等。

4. 通信方式，包括数据传输格式、传输规则、数据链路符号、字节格式、帧格式、功能编码、波特率、差错处理、广播应答方式等。数据通信网络的结构，如主从结构，生产者/使用者等。数据传送模式，如半双工、全双工等。同一网络遵循统一的通信规约，规约规定了低压电器与低压电器之间，低压电器与上位计算机，以及中央控制系统之间的数据传输格式、数据编码及传输规则。规约应适用于点对点、一点对多点等数据通信网络。

5. 通信接口，机构接口：如 37 芯连接器、网络接口等；物理接口：如 RS-232、RS-422、RS-485 等；与智能电器的中央处理器（CPU）或微处理器（MCU）的通信接口连接等。

6. 通信媒介，光纤、屏蔽线、双绞线等。

7. 软件环境，上位机监控软件、数据采集软件、通信接口的软件环境、通信软件模块化等。

8. 通信功能

（1）遥信，通信子站向上位机报送电器现时的各项保护参数，

（2）遥测，通信子站向上位机报送工作参数、故障参数，达到上位机对电力电网系统遥测的目的。

（3）遥调，通信子站接收上位机的遥调参数来改变电器中智能脱扣器的保护特性参数，以达到改变电力电网干路参数设定值的目的。

（4）遥控，通信子站接收上位机的控制信号来实现电力网计算机控制系统的遥控功能。

（5）与其他设备通信

7.3 可通信低压开关电器简介

近年来，现场总线技术飞速发展，从控制网络上看，它覆盖的领域已包括了上层计算机管理系统、控制系统、开关电器、现场执行器和传感器等。随着微处理器芯片技术的日新月

异，产品集成度越来越高，体积越来越小，处理速度越来越快，而价格却越来越低，使越来越多厂商将智能芯片集成到了传统电器产品、传感器、执行机构等，从而也促使了智能化电器、智能化配电系统的飞速发展。如，世界上的著名电气公司的新型框架式断路器都具有通信接口，可以与现场总线连接，其通信功能一般都嵌入智能控制器内部，需要通信时，选用带通信功能的智能控制器即可；一般壳架电流 250A 及以上的塑壳式断路器可带电子脱扣器，通信功能不嵌入脱扣器内部，而采用附件形式的专用通信接口（或称适配器），通信接口可与 PROFIBUS-DP、DeviceNet 等现场总线系统连接。如，西门子、ABB、金钟-默勒、施耐德等公司生产的框架式断路器和塑壳式断路器都已具有 PROFIBUS-DP 接口，或外部 RS-485/PROFIBUS-DP 转换器。施耐德公司的框架式断路器也均可带通信接口，通信体系是从一个 Power Logic 系统进入透明工厂技术（Transparent Factory Open for Business），这个 Power Logic 系统可从以太网通过一个 ModBus 协议调制解调器或网关与 4 种子站通信，分别用于电网管理、电力数据采集类仪表、智能化框架断路器和智能化塑料外壳断路器等低压电器元件、保护和控制、PLC 或其他第三方兼容设备。

西门子公司把所有该公司生产的带通信技术的低压开关电器称为 SIRIUSNET，以 PROFIBUS 为现场总线，最大数据传输率可达 12Mbit/s，可把现场分布的从设备和中央控制室中的主设备相互连网，通过标准的规范传输信息，一个 PROFBBUS 网络可连接最多 125 台现场设备。如图 7-2 所示。

图 7-2 所示是西门子公司的信息化电能管理系统的分层结构示意图。在现场设备层，通过 PROFIBUS-DP 总线，集成具有通信功能的开关电器设备等。如 SENTRON 3WL 和 3VL 系列断路器；SIMOCODE 智能电动机控制与保护装置；SIMEAS-P 多功能测量设备和电能表；ET200S 数据采集与控制装置等。可通信低压开关电器通过 PROFIBUS-DP 接口与主设备连接进行通信。系统的主设备为 PLC 和 PC，各自带有必要的软件支持，其中，GSD 文件为总线设置文件。通信数据包括模拟检测量（如相电流、接地故障电流等）、事故信息（如上次脱扣类型、超温报警、三相不平衡等）、运行状态（分合位置、分励欠压脱扣器状态、合闸准备就绪信号等）、远距离参数设置、远距离控制等。

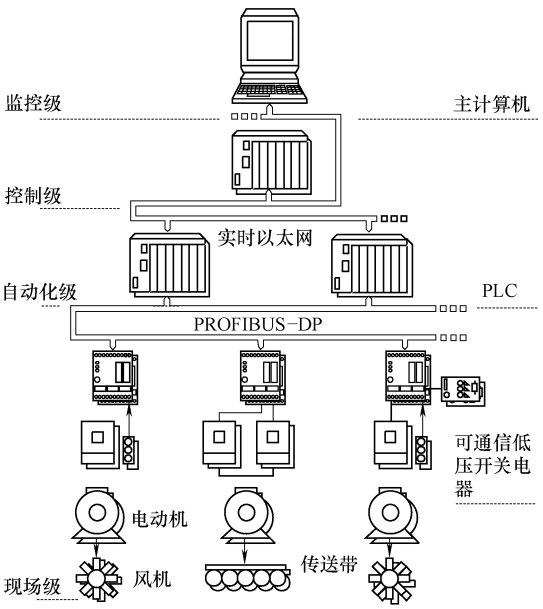


图 7-2　可通信低压开关电器的通信功能

另外，可利用电动机保护和控制装置 SIMOCODE-DP 作为接口与现场总线 PROHBUS-DP 通信。通过 SIMOCODE-DP 可测量合/分闸运行信息、故障信息（包括脱扣和过载报警）及最大相电流，并把这些信息通过 PROFIBUS-DP 传送给主设备，可由主设备下达合/分闸指令。

SIMOCODE-DP 系统能够保护额定电流范围从 0.25 ~ 820A 的单相或者三相电机等电气设备，具有过载、不平衡电流、相线故障、接地故障、转子堵转保护功能。通过以下两种途

径可以实现 SIMOCODE-DP 的在线修改参数、诊断和调试。一是在当地，通过 RS-232 接口进行点对点通信，使用 Win-SIMOCODE-DP/Smart 实现 SIMOCODE-DP 的在线参数分配、操作、监控和测试。另外一种在控制中心使用 OM-SIMOCODE-DP，通过 Profibus 通信，远程实现 SIMOCODE-DP 的在线参数分配、操作、监控和测试。能够获取的遥测量有三相电流、启动次数、脱扣次数、设备运行小时数等；遥信量有运行状态、故障信息等。PLC 数据处理层位于现场设备层和运行监控中心层之间，主要完成上下层之间的网络连接转换和信息的处理交换。通过 PROFIBUS 现场总线，把采集的数据传送到 PLC 数据处理层，对数据做规范化预处理，处理的数据与时标相对应，并可在数据缓冲区中储存一周。PLC 获取和处理的数据有选择性地上传到控制中心，以便于集中监视现场工况信息；同时，下达来自控制中心的遥控和遥调信息给现场设备层的各类智能设备及仪表。通过组态编程，PLC 能够自动控制现场设备层的智能设备。

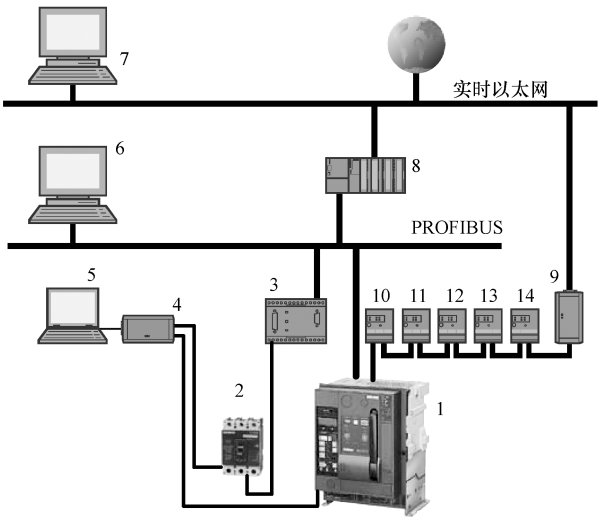


图 7-3 SENTRON 3WL 和 3VL 系列断路器的联网通信功能示意图

1—SENTRON 3WL 2—SENTRON 3VL 3—COM10 PROFIBUS 模块 4—断路器数据适配器（PDA） 5—具有浏览功能的输入输出设备（如便携式工控机） 6—安装在工控机上的 Switch ES Power 软件 7—电源管理软件 8—PLC 9—BDA Plus，带以太网接口 10—ZSI 模块 11—数字量输出模块 12—可组态数字量输出模块 13—模拟量输出模块 14—数字量输入模块

运行监控中心层的硬件可配置主备数据库服务器、主备前置机、操作员工作站、Web 服务器等，基于控制中心系统的安全，系统还可以配置不同的网段。监控中心软件由 WinCC 开发出友好的人机界面。配电实时工况信息以曲线、表格以及参数化处理后的数据进行显示，也可显示整个系统的数据。系统对重要的信息进行存盘归档，同时，具有报表功能，可以依据实际需求自定义报表。

图 7-3 是 SENTRON 3WL 和 3VL 系列断路器的连网通信功能示意图。SENTRON 3WL 具有 COM15 PROFIBUS 模块、断路器状态传感器（BSS）、LCD 显示电子脱扣器 ETU、测量功能模块。SENTRON 3VL 通过 COM10 通信模块实现 PROFIBUS 通信。

7.4 智能化配电系统简介

传统的低压配电控制方式主要是通过由断路器、接触器、热继电器、熔断器、控制继电器、各种主令电器、互感器及各种电工仪表组合成的低压开关柜实现的，并以人工直接操作为主，无法实现计算机智能管理，对于较复杂的控制实现起来比较困难。随着可通信低压开关电器的发展，各著名电气公司开始应用于配电系统，与计算机控制技术、网络通信技术相结合，从而诞生了智能开关柜及智能化配电系统，如，西门子公司的 SIVACON 系列、ABB

公司 HONOR 系列等。智能化配电系统是各种智能开关柜与计算机监控系统的组合，一般由若干面智能型低压开关柜组成。智能开关柜及智能配电系统改变了传统开关柜的概念，具有多功能、数字化、网络化、智能化、结构紧凑、易于维护等特点，通过网络通信接口可与中央控制室的计算机系统连网，从而可实现对各供配电回路的各种电参数进行监测，以及对断路器的分合状态、故障信息进行监视和控制，配合远程监控软件，可实现“四遥”。根据断路器的遥控、遥测、遥信等技术要求，每台断路器应配备通信模块，并通过 RS-485 串行接口以总线方式向本站计算机监控系统柜传输，遵循 MODBUS RTU 通信规约。

1. 遥测

通过计算机实时对系统进行电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率等进行不断的采集、分析、处理、记录，显示曲线、棒图，自动生成报表。遥测量通过 RS-485 串行接口以总线方式向本站计算机监控系统柜传输。

对于 380V 电源进线断路器开关柜需遥测三相电流、有功功率、无功功率、380V（Ⅰ）段或（Ⅱ）段母线电压、电压不平衡度及电流/电压的谐波分量（THD）；对 380V 分段断路器柜，遥测三相电流，其三相电流由外附三相 CT（或脱扣器内三相 CT）提供，母线电压由 380V 直接提取。由相应的测量模块实现以上遥测量的监测。对于其他馈线断路器柜（包括电容器柜和路灯馈线柜），均遥测三相电流、功率因数、有功电能；其三相电流由外附三相 CT（或脱扣器内三相 CT）提供，就地不再监测电量。电容器柜就地综合测量仪表均采用数字式仪表，精确度不低于 0.5（四位半），包括三相电流、三相电压、有功功率、无功功率和功率因数。

2. 遥信

可以实时对开关的运行状态、保护动作等开关量进行监视，计算机实时显示和自动报警，并对各柜内开关的状态、事故跳闸、过流、速断、温度等动作进行实时记录、打印。遥信量通过 RS-485 串行接口以总线方式向本站计算机监控系统柜传输。

对于 380V 电源进线断路器和 380V 分段断路器，其遥信量有断路器合闸位置信号、断路器跳闸位置信号、断路器就地/远方控制切换开关“远方位”信号、断路器控制电源消失及控制回路断线信号、断路器脱扣器跳闸事故信号、备用电源自动投入装置动作信号。

对于 380V 电容器柜（由塑壳断路器和接触器构成），其遥信量有电容器组投切的组数信号，即接触器合、断的位置信号；接触器控制电源消失及控制回路断线信号；断路器合闸位置信号；断路器跳闸报警信号；脱扣器微处理器故障信号。

对于其他 380V 馈线回路，其遥信量有断路器合闸位置信号、断路器跳闸报警信号；对于装设接地故障保护的断路器，应设有接地故障保护动作信号、脱扣器微处理器故障信号。

低压开关柜上均设有红、绿灯，以指示断路器的跳、合闸位置信号。

3. 遥控

通过计算机屏幕选择相应的站号、开关号、合/分闸等信息，并在屏幕上将要选择的开关的状态反馈回来，确认后执行，实时记录操作的时间、类型和开关号等。

4. 遥调

用于设定各种智能模块的运行参数，即计算机根据屏幕操作指令或计算机根据对系统分析判断结果，对智能模块的设定值和故障保护值进行远程整定。

参 考 文 献

[1] 张冠生. 电器学[M]. 北京：机械工业出版社，1980.
[2] 方承远. 工厂电气控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，1998.
[3] 中国电工技术学会电工标准化研究会. 电工最新基础标准应用手册[M]. 北京：机械工业出版社，1992.
[4] 李茂林. 低压电器及配电电控设备选用手册[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，1998.
[5] 天津电气传动设计研究所. 电气传动自动化技术手册[M]. 北京：机械工业出版社，1992.
[6] 马志勇. 常用自动化控制器件手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.
[7] 陈绍华. 机械设备电器控制[M]. 广州：华南理工大学出版社，1998.
[8] 熊葵容. 电器逻辑控制技术[M]. 北京：科学出版社，1998.
[9] 邓则名. 电器与可编程控制器应用技术[M]. 北京：机械工业出版社，1997.
[10] 邵富春. 怎样保护电动机[M]. 北京：中国农业出版社，1979.
[11] 陈伯时，等. 交流调速系统[M]. 北京：机械工业出版社，1998.
[12] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2000.
[13] 原魁，等. 变频器基础及应用[M]. 北京：冶金工业出版社，1997.
[14] 《低压电器》期刊，1989～2007 年各期有关文章.
[15] 谭世哲，等. 电路设计与制版 Protel 98[M]. 北京：人民邮电出版社，1998.
[16] 清源计算机工作室. Protel 99 仿真与 PLD 设计[M]. 北京：机械工业出版社，2000.
[17] 清源计算机工作室. Protel 99 原理图与 PCB 设计[M]. 北京：机械工业出版社，2000.
[18] George Omura. AutoCAD 14 从入门到精通[M]. 徐有光，等译. 北京：电子工业出版社，1998.
[19] 张冠生，丁明道. 常用低压电器及其应用(修订版)[M]. 北京：机械工业出版社，1999.
[20] 中国国家标准，目录见本书第 1 章表 1-8 等.
[21] 赵明. 工厂电气控制设备[M]. 2 版，北京：机械工业出版社，1994.
[22] 李振安. 工厂电气控制技术[M]. 重庆：重庆大学出版社，1995.
[23] 方展远. 工厂电气控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，1998.
[24] 王仁祥. 常用低压电器原理及其控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2001.
[25] 王仁祥，王小曼. 现代可编程序控制器网络通信技术[M]. 北京：中国电力出版社，2006.
[26] 王仁祥. 通用变频器选型与维修技术[M]. 北京：中国电力出版社，2004.
[27] 王仁祥，王小曼. 通用变频器选型、维修与应用[M]. 北京：人民邮电出版社，2005.
[28] 西门子股份有限公司自动化与驱动集团. SIMATIC 可编程序控制器产品样本、手册.
[29] 王仁祥. 常用低压电器原理及其控制技术[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2009.
[30] 王仁祥，王小曼. 西门子 S7-1200 PLC 编程方法与工程应用[M]. 北京：中国电力出版社，2011.

机械工业出版社相关书目

序号	书　　名	书号	定价	出版时间
1	中国电机工业发展史——百年回顾与展望(精装)	36180-0	88	201201
2	中国电机工业发展史——百年回顾与展望(平装)	36193-0	59.8	201202
3	电气传动自动化技术手册(第3版)	33989-2	198	201201
4	电气工程师手册(第3版)	19818-5	128	201103
5	IECEE-CB体系文件译文集	32371-6	198	201104
6	工业控制自动化技术实用手册	24703-6	98	200901
7	高压变频器应用手册	26564-1	88	200905
8	低压变频器应用手册	26701-0	188	200905
9	电力电子设备设计和应用手册(第3版)	25571-0	188	200901
10	中压变配电设备二次接线方案施工图集(上、下册)(含1CD)	24697-8	499	200810
11	光伏技术与工程手册	33935-9	198	201107
12	风电场工程技术手册	14023-8	88	201002
13	电气工程安装及调试技术手册(新版)(上、下册)	24228-4	398	200808
14	电气电子绝缘技术手册	22570-6	158	200801
15	电线电缆手册(第1册)(第2版增订版)	23975-8	138	201005
16	电线电缆手册(第2册)(第2版增订版)	25322-8	68	201011
17	电线电缆手册(第3册)(第2版)	28417-8	88	201105
18	电动机绕组布线接线彩色图集(新2版)	30679-5	138	201009
19	新2版电动机绕组布线接线彩色图集　遗补篇	33497-2	88	201107
20	低压电器选用手册	24333-5	49	200808
21	中小型变压器实用全书(第2版)	22653-6	98	200801
22	电力变压器手册	11082-X	118	200908
23	袋式除尘技术手册	28958-6	88	201005
24	常用低压电器原理及其控制技术　第2版	24874-3	49	200808

网上订购：中国科技金书网

（机械工业出版社旗下大型科技图书网站）

网址：www.golden-book.com

E-mail：service@golden-book.com

电话订购：010-68993821　010-88379639/9641/9643

传真订购：010-68990188

机械工业出版社官方网址：www.cmpbook.com

编辑热线：010-88379764　fuchenggui52@163.com

◎ ISBN 978-7-111-37326-1
◎ 策划编辑：付承桂／封面设计：陈沛

地址：北京市百万庄大街22号　邮政编码：100037
电话服务　网络服务
社服务中心：(010)88361066　门户网：http://www.cmpbook.com
销售一部：(010)68326294　教材网：http://www.cmpedu.com
销售二部：(010)88379649　封面无防伪标均为盗版
读者购书热线：(010)88379203

上架指导　工业技术／电气工程／电气自动化

ISBN 978-7-111-37326-1

定价：49.80元