



普通高等院校应用型人才培养规划教材
本教材承湖北文理学院协同育人专项经费资助

电气控制 ⑤

PLC 技术

DIANQI KONGZHI YU PLC JISHU

主 编 ● 吴何畏
副主编 ● 程 昊
主 审 ● 邬国秀

人才培养规划教材

本教材承湖北文理学院协同育人专项经费资助

电气控制与 PLC 技术

主 编 吴何畏
副主编 程 昊
主 审 邬国秀

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电气控制与 PLC 技术 / 吴何畏主编. —成都: 西南
交通大学出版社, 2019.5
普通高等院校应用型人才培养规划教材
ISBN 978-7-5643-6862-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 084404 号

普通高等院校应用型人才培养规划教材

电气控制与 PLC 技术

主编 吴何畏

责任编辑 穆 丰

封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13.75

字数 343 千

版次 2019 年 5 月第 1 版

印次 2019 年 5 月第 1 次

定价 38.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-6862-3

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是基于资源共享课程建设成果编写而成。全书突出了“机电结合、电为机用”的特点，在内容安排上注重理论联系实际，尤其体现了各种知识在生产实际中的应用，显得全面而实用。

全书主要包括三个方面的内容：常用低压电器；典型生产机械的继电-接触器控制系统；可编程控制器，三菱 PLC 的结构、工作原理、编程指令以及高级编程技巧。

本书的第 8 章由程昊老师编写，其余部分由吴何畏老师编写，全书由邬国秀老师审定。本书充分体现了电子技术、控制技术等领域的发展，主要思路是根据机械设计制造及其自动化等非电类专业的需要，处理好原理与应用，元件与系统，定性与定量，继承与创新，掌握与了解等几个方面的关系。

本书可作为高等学校机械设计及其自动化、机械电子工程、机电一体化专业的本、专科生教材，也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。书稿编写过程中，得到了课程组及兄弟院校的老师们的帮助，在多年教学实践的基础上提出了宝贵意见和建议，在此一并表示感谢。由于编者的水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请各位读者批评指正。

编 者

2018 年 11 月

目 录

| | |
|---------------------------|-----|
| 第 1 章 常用低压电器及其应用 | 1 |
| 1.1 低压电器概述 | 1 |
| 1.2 电磁式电器 | 2 |
| 1.3 开关和主令电器 | 6 |
| 1.4 接触器 | 16 |
| 1.5 继电器 | 18 |
| 1.6 保护电器 | 25 |
| 习题与思考题 | 28 |
| 第 2 章 继电器-接触器控制 | 30 |
| 2.1 电气控制线路基础 | 30 |
| 2.2 继电器-接触器的基本控制线路 | 34 |
| 2.3 继电器-接触器的联锁控制 | 42 |
| 2.4 继电器-接触器的行程控制 | 47 |
| 2.5 继电器-接触器的时间控制 | 53 |
| 2.6 机电液综合控制 | 61 |
| 习题与思考题 | 67 |
| 第 3 章 典型生产机械的电气控制 | 70 |
| 3.1 C650-2 普通车床电气控制 | 70 |
| 3.2 Z3050 型摇臂钻床电气控制 | 74 |
| 3.3 M7130 型平面磨床电气控制 | 79 |
| 3.4 X62W 型万能铣床电气控制 | 83 |
| 习题与思考题 | 88 |
| 第 4 章 PLC 基础 | 90 |
| 4.1 PLC 概述 | 90 |
| 4.2 PLC 的结构及工作原理 | 95 |
| 4.3 三菱 FX 系列 PLC | 107 |
| 习题与思考题 | 117 |
| 第 5 章 梯形图程序设计 | 118 |
| 5.1 三菱 FX 的指令系统 | 118 |
| 5.2 三菱 FX 的编程规则 | 130 |

| | | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 5.3 | 梯形图的转换设计法 | 133 |
| 5.4 | 梯形图的经验设计法 | 137 |
| 5.5 | PLC 系统开发的一般步骤 | 147 |
| 5.6 | 梯形图程序设计实例 | 148 |
| | 习题与思考题 | 153 |
| 第 6 章 | 顺序功能图程序设计 | 155 |
| 6.1 | SFC 基础 | 155 |
| 6.2 | STL 基础 | 157 |
| 6.3 | 单流程结构编程 | 159 |
| 6.4 | 选择型分支编程 | 163 |
| 6.5 | 并行型分支编程 | 166 |
| 6.6 | 跳转的编程 | 168 |
| 6.7 | SFC 程序设计实例 | 169 |
| | 习题与思考题 | 173 |
| 第 7 章 | 应用指令程序设计 | 175 |
| 7.1 | 应用指令概述 | 175 |
| 7.2 | 比较指令 | 177 |
| 7.3 | 传送指令 | 180 |
| 7.4 | 跳转指令 | 183 |
| 7.5 | 区间复位指令 | 183 |
| 7.6 | 四则运算指令 | 184 |
| 7.7 | 移位指令 | 186 |
| 7.8 | 循环指令 | 188 |
| 7.9 | 应用指令程序设计实例 | 190 |
| 7.10 | 三种编程方式的对比 | 193 |
| | 习题与思考题 | 196 |
| 第 8 章 | GX Works 编程软件 | 197 |
| 8.1 | 编程软件的使用 | 197 |
| 8.2 | 编写梯形图程序 | 200 |
| 8.3 | 编写 SFC 程序 | 203 |
| 8.4 | SFC 与梯形图程序的转换 | 205 |
| 8.5 | 仿真软件的使用 | 206 |
| 附表 | 常用电器图形符号及文字符号 | 211 |
| | 参考文献 | 213 |

第 1 章 常用低压电器及其应用

利用继电器、接触器、按钮、行程开关、电磁阀等低压电器元件，并按一定的接线方式组成的机电传动控制系统，具有结构简单、维护方便、价格便宜的特点，能满足一般生产工艺要求，时至今日，仍广泛运行在工业生产的各个领域。

1.1 低压电器概述

低压电器是指工作电压在交流（AC）1 200 V 或直流（DC）1 500 V 以下，用于接通或断开电路，以及用来进行保护、检测、控制与调节等作用的电器。

低压电器是机电传动控制系统的基本组成单元，生产机械中所用的控制电器多属低压电器，其种类繁多、功能多样，可按以下几种方式进行分类。

1.1.1 按工作原理分类

（1）电磁式电器。依据电磁感应原理工作的电器，如接触器、各类电磁式继电器等。

（2）非电量控制电器。依靠非电物理量（压力、速度、时间、温度等）或外力（人力、机械力等）变化而动作的电器，例如行程开关、刀开关和速度继电器等。

1.1.2 按动作方式分类

（1）自动电器。不需要人工直接操作，由自身参数变化或外来信号作用，通过电信号或非电信号自动完成通断电路任务的电器称为自动电器，如接触器、熔断器等。

（2）非自动电器。无动力机构，通过人工或外力直接操作而动作的电器，如按钮、行程开关等。

1.1.3 按控制对象分类

（1）配电电器。用于在低压配电电路中输送和分配电能，保护电路和设备以及控制电

路的通断与转换，要求系统发生故障时准确动作、可靠工作，如熔断器、低压断路器和刀开关等。

(2) 控制电器。用于各种控制电路和控制系统的电器。要求寿命长、体积小、重量轻且动作迅速、准确、可靠，如：接触器、继电器、主令电器、电阻器、电磁铁等。

1.1.4 按功能用途分类

(1) 主令电器。用于发送动作指令的电器，如按钮、行程开关、转换开关等。

(2) 检测电器。把电或非电的模拟量经过处理转换成开关量的电器，如时间继电器、速度继电器等。

(3) 执行电器。直接或间接、接通或断开电动机主电路，是用来操纵、带动生产机械和支撑、保持机械装置在固定位置上的一种执行元件，如接触器、电磁离合器等。

(4) 保护电器。保证电动机及设备正常运行的电器，如熔断器、热继电器等。

(5) 开关电器。作为电源的引入开关、局部照明电路的开关和用于小容量电动机的启停控制，其主要功能是实现对电路通断控制，如刀开关、低压断路器等。

随着科技的发展，目前在低压电器中出现了利用电网或以太网进行远程通信的智能化电器，如智能电表、智能化断路器、智能插座等，它们严格意义上已不属于任何现有分类的范畴，属于计算机控制装置。

1.2 电磁式电器

电磁式电器因为能够实现弱电控制强电、小电流控制大电流的功能，在机电控制系统中有着非常重要的地位。它的外形和种类很多，但结构上都是由感测部件、执行部件和灭弧机构三个基本部分组成。

1.2.1 感测部件

感测部件是指用来感测外界信号，并做出特定的动作或反应的部件。电磁式电器的感测部件是电磁机构（或称电磁铁），它通过将电磁能量转换成机械能量来驱动执行部件动作。

电磁机构由电路和磁路两部分组成。电路指它的电磁线圈，一般用绝缘导线在骨架上绕制而成，并且经过浸漆、烘干以提高绝缘强度；磁路由铁心和衔铁组成，一般是用高磁导率的软磁性材料制成；另外，电磁机构还需装有复位弹簧。工作时，电流通入线圈产生磁场和吸力，通过空气隙转换成机械能，带动衔铁运动使触头动作。电磁机构的结构如图 1-1 所示。

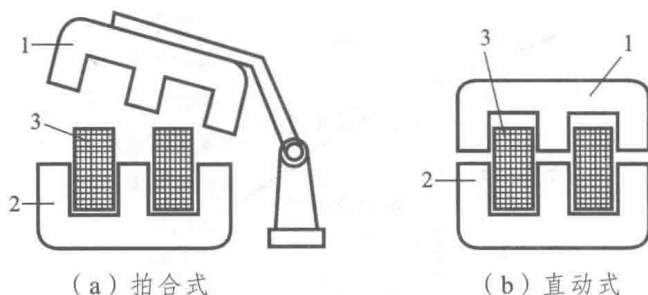


图 1-1 常用电磁机构的结构形式

1—衔铁；2—铁心；3—线圈

1. 铁 芯

铁心有拍合式和直动式两种主要类型，其中拍合式电磁机构常用于直流接触器、直流继电器等；直动式电磁机构多用于交流接触器、交流继电器等交流电操作电器。

2. 线 圈

吸引线圈通过将电能转换成磁能产生磁通，电磁吸力让衔铁产生机械位移使得铁心吸合，铁心和衔铁的原材料主要是软钢或工程纯铁。线圈根据输入电信号的不同分为直流线圈和交流线圈，直流线圈做成高瘦无骨架的瘦高型，与不发热的铁心接触，有利于散热；交流线圈的铁心有磁滞损耗和涡流，铁心和线圈都会发热，为了帮助散热，在铁心与线圈之间留出间隙，将线圈做成有骨架的矮胖型，铁心用硅钢片叠成以减小涡流。

根据线圈在电路中的连接方式又有串联线圈（又称电流线圈）和并联线圈（又称电压线圈）之分。串联线圈流过的电流大，通过加粗导线、减少匝数的方式减小阻抗；并联线圈为了获得较大的阻抗，采用多匝数和细导线来减小分流作用。

1.2.2 执行部件

执行部件是指通过接收感受机构的信号，接通或分断电路的部件，一般由触头完成。电磁式电器的动触头与衔铁连接，随衔铁运动而动作，静触头固定在电器上保持静止，动触头与静触头组成触头对。触头通常用铜制成，但表面易产生氧化膜，使触头的接触电阻增大。也有采用银质材料的，与铜质触头相比，除具有更好的导电、导热性能外，触头的氧化膜电阻与纯银相差很小，而且氧化膜的生成温度很高，所以接触电阻较小。

1. 触头的分类

触头的结构形式很多，分类方法具有多样化，如图 1-2 所示。

主触头是指用于接通或断开主电路的触头，它允许通过较大的电流。例如接触器的主触头，一般用于电气控制线路的主电路或动力回路中。主触头一般带有灭弧装置。

辅助触头是指用于接通或断开控制电路的触头，它只能通过较小的电流。例如继电器的触头，一般用于电气控制线路的控制电路中。

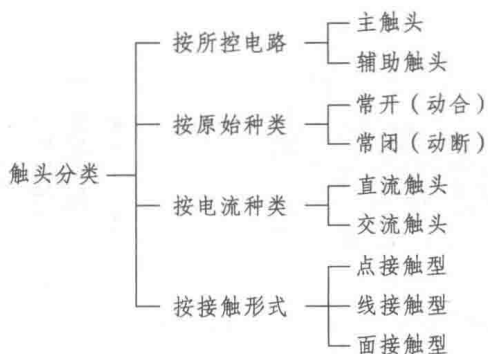


图 1-2 触头的分类

常开 (Normal Open, NO) 触头是指原始状态 (线圈未通电或未受外力作用时的状态) 时断开的触头, 它在动作之后会闭合, 因此也叫动合触头。常闭 (Normal Close, NC) 触头是指原始状态时闭合的触头, 它在动作后会断开, 因此也叫动断触头。

2. 触头的接触形式

触头的结构与接触形式如图 1-3 所示。对于点接触的触头, 由于接触区域只是个点, 因此只能用于小电流的电器中, 例如接触器的辅助触头和继电器的触头。线接触的触头, 由于接触区域是一条直线, 触头在通断过程中有滚动动作, 这样可以清除触头表面的氧化膜, 使其不易烧焦, 从而保证了触头的良好接触, 可用作中小电流接触器的触头。面接触的触头, 接触区域是个面, 因此允许通过较大的电流, 可以用作大电流接触器的触头。

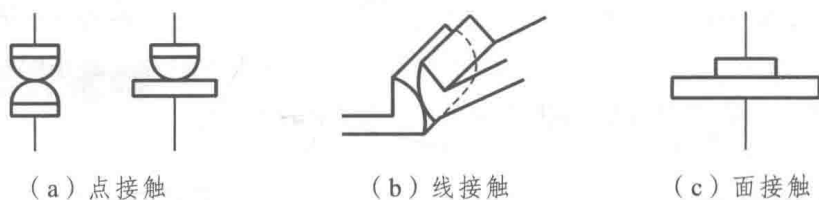


图 1-3 触头的接触形式

以上所述是触头的基本接触形式, 具体到继电器和接触器中, 分为桥式和指式两种触头, 桥式触头属于点接触和面接触相结合的形式, 指式触头属于线接触形式, 如图 1-4 所示。

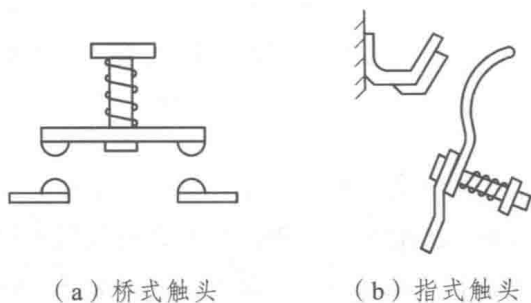


图 1-4 继电器和接触器的触头结构

3. 触头的工作情况

触头有四种工作情况，即分断状态、闭合状态、接通过程和分断过程，各种工作情况的特征如下：

分断状态：指动、静触头处于未操作前完全脱离接触的静止状态，此时动、静触头之间承受被控制电路的额定电压，触头之间没有电流通过。

闭合状态：动、静触头完全闭合，通过工作电流。由于正常情况下动、静触头之间的电阻很小，因此动、静触头的压降趋近于零。

接通过程：动、静触头由分断状态过渡到紧密接触状态的过程。由于动、静触头接触时有机械碰撞，会产生机械磨损和电磨损。

分断过程：动、静触头在紧密接触并通过工作电流的情况下脱离接触，直至完全分断的过程，在动、静触头刚出现间隙时，会产生电火花或电弧，既影响电路及时分断，又会使触头烧损。

1.2.3 灭弧机构

电器元件的触头在动作时，动、静触头之间的间隙会产生电火花或电弧。电弧的产生会伴随大量热能，电压越高、电流越大，所产生的电弧功率也越大，既烧损触头的金属表面，降低电器的寿命，又延长了电路的分断时间。因此，必须采取灭弧措施降低电弧的强度，最大限度地减小电弧的危害。

灭弧的措施主要有两种：一是迅速增加电弧长度（拉长电弧），使得单位长度内维持电弧燃烧的电场强度不够而使电弧熄灭；二是使电弧与流体介质或固体介质相接触，加强冷却和去游离作用，使电弧加快熄灭。

(1) 双断口灭弧：电弧在触头回路电流磁场下，受到电动力作用拉长，双断口降低了电场强度，电弧热量在拉长的过程中散发冷却而迅速熄灭，如图 1-5 所示。

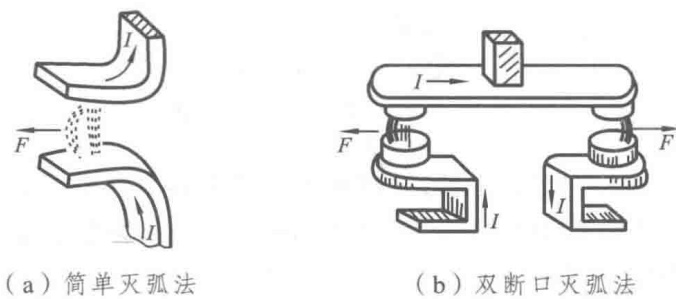


图 1-5 双断口灭弧

(2) 栅片灭弧法：当触头分开时，产生的电弧在电动力的作用下被推入一组金属栅片中而被分割成数段，彼此绝缘的金属栅片的每一片都相当于一个电极，因而就有许多个阴阳极压降。对交流电弧来说，近阴极处，在电弧过零时就会出现一个 150~250 V 的介质强度，使电弧无法继续维持而熄灭。由于栅片灭弧效应在交流时要比直流时强得多，所以交流电器常

常采用栅片灭弧，如图 1-6 所示。

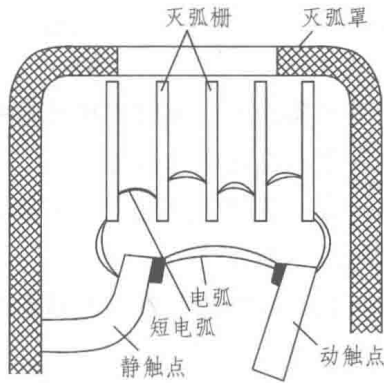


图 1-6 栅片灭弧装置

(3) 磁吹灭弧：在一个与触头串联的磁吹线圈产生的磁场作用下，电弧受电磁力的作用而拉长，被吹入由固体介质构成的灭弧罩内，与固体介质相接触，电弧被冷却而熄灭，如图 1-7 所示。

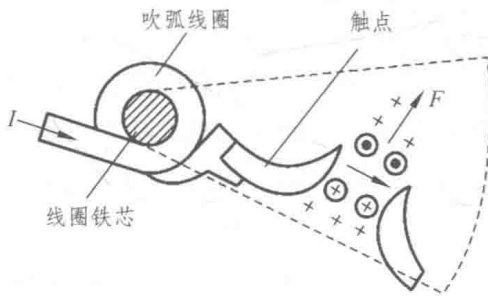


图 1-7 磁吹灭弧原理

1.3 开关和主令电器

1.3.1 刀开关

刀开关俗称闸刀，是一种手动电器，结构简单，在低压电路中用于不频繁地接通和分断电路或用于隔离电源，有时也用来控制小容量电动机的直接启动与停机。常用的有两种形式：开启式负荷开关和封闭式负荷开关。

1. 开启式负荷开关

开启式负荷开关又称胶盖开关，由胶盖、瓷底板及瓷柄、动触头、静触头等组成。其结构简单，价格低廉，安装维修方便，是最普遍的低压电器。主要适用于额定电压 380 V、直流 220 V、额定电流 60 A 以下的机床成套配电装置中，用于不频繁地手动启动与停止交、直流电器或用作隔离开关，如图 1-8 所示。

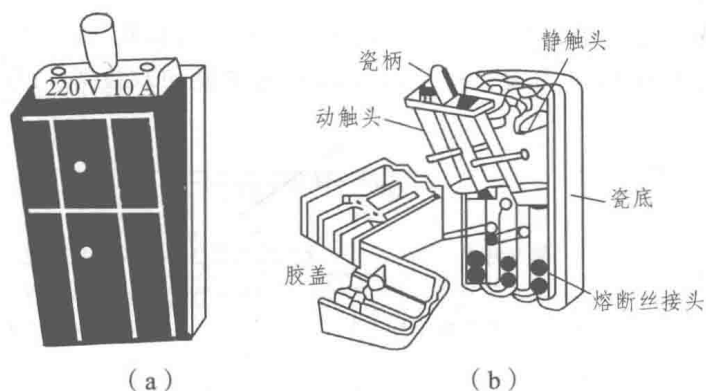


图 1-8 开启式负荷开关外形与结构

这种开关没有灭弧机构，容易被电弧烧伤，因此不宜带负载接通或分断电路。在安装刀开关时手柄必须朝上，不得倒装或平装。接线时应将电源线接在上端，负载接在下端，这样拉闸后刀片与电源隔离，可防止意外发生。

2. 封闭式负荷开关

封闭式负荷开关又称铁壳开关，具有灭弧机构，由于采用了储能分合闸方式，提高了通断能力，并通过设置联锁机构，确保了操作安全，其性能优于开启式负荷开关。主要适用于交流 50 Hz、380 V、60 A 以下的电路中，适用于不频繁接通和分断的负载电路，并能用作线路末端的短路保护，也可用于 15 kW 以下的交流电动机不频繁直接启动与停止的控制，如图 1-9 所示。

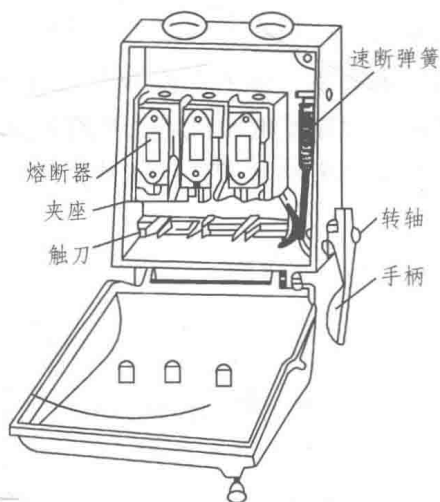


图 1-9 封闭式负荷开关结构图

铸铁壳内装有由刀片和夹座组成的触头系统、熔断器和速断弹簧，30 A 以上的还装有灭弧罩。

3. 刀开关的图形与文字符号

刀开关的种类很多。根据通路的数量分单极、双极和三极，常用的三极刀开关根据允许通过的电流分为 100 A、200 A、400 A、600 A 和 1 000 A 五种，目前生产的产品有 HD(单

极)和 HS(双投)等系列;按结构分为平板式和条架式;按操作方式为直接手柄操作式、杠杆操作机构式和电动操作机构式;按转换方向分为单投和双投等。刀开关编号规则如图 1-10 所示。

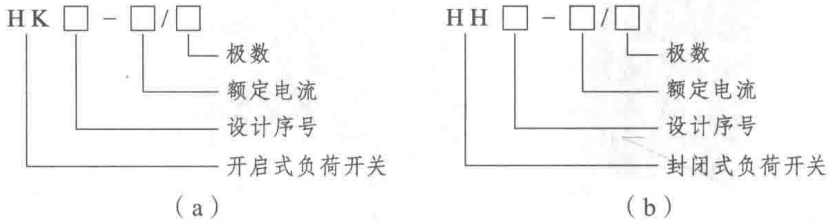


图 1-10 刀开关的型号

刀开关的图形与文字符号如图 1-11 所示。

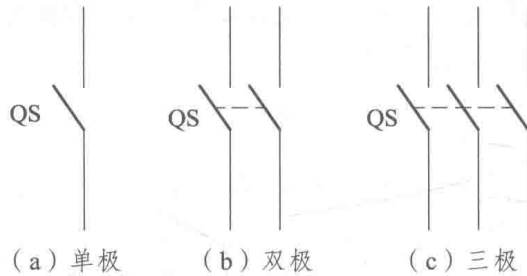


图 1-11 刀开关的图形与文字符号

4. 刀开关的选用

刀开关一般与熔断器串联使用,以便在短路或过负荷时熔断器熔断而自动切断电路。应根据工作电压来选择刀开关,额定电压应大于或等于线路工作电压。刀开关的额定电流应根据适用场合而定,用于控制三相异步电动机时,额定电流应等于线路工作电流的 3~5 倍;用于照明及电热电路时,额定电流略大于线路工作电流。刀开关的极数要与电源的进线相数相等。

1.3.2 空气开关

空气开关也叫自动开关或低压断路器,常用作低压配电的总电源开关,也可用于不频繁手动接通和分断电路的场合。它与刀开关的最大区别在于,当电路发生短路、过载和欠电压时,能自动切断电路,即具有短路、过载和欠压保护功能。尽管低压断路器形式各异,但其基本结构和动作原理都相同。低压断路器一般由触头系统、灭弧系统、操纵机构和各种可供选择的脱扣机构(保护装置)等部分组成,如图 1-12 所示。

低压断路器具有三对主触头,装有灭弧装置,依靠手动操作或电动合闸机构接通和分断主电路。主电路接通时,三对主触头处于闭合状态,自由脱扣机构将主触头锁在合闸位置上。当断路器因负载出现过载、短路或欠电压故障时,会在脱扣机构的作用下断开主触头,使主电路相应断开。通常包含如下四种脱扣机构:

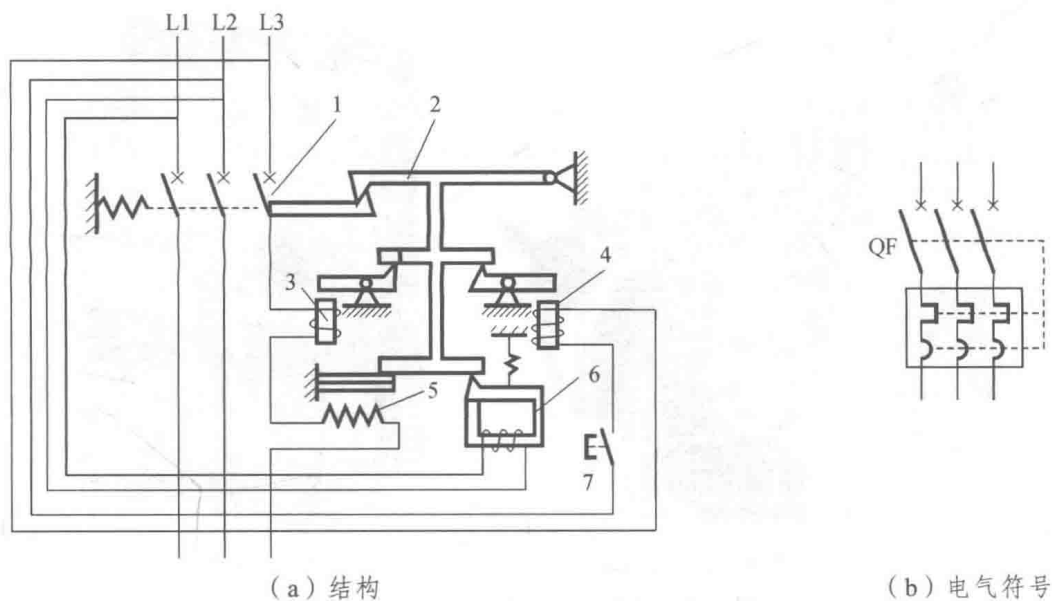


图 1-12 低压断路器结构和电气符号

1—主触头；2—自由脱扣器；3—过电流脱扣器；4—分励脱扣器；
5—热脱扣器；6—欠压脱扣器；7—按钮

1. 过电流脱扣器

过电流脱扣器的线圈 3 与主电路串联。电路正常工作时，线圈流过的电流所产生的电磁吸力不足以使衔铁吸合。当电路发生短路或严重过载时，线圈产生的电磁吸力增大，使过电流脱扣器的衔铁吸合，从而撞击杠杆，使自由脱扣机构动作，主触头断开主电路。

2. 欠压脱扣器

欠压脱扣器的线圈 6 和电源并联。电路正常工作时，欠压脱扣器的衔铁被吸合。当电路欠压或失压时，欠压脱扣器的电磁吸力减小，衔铁在弹簧力作用下撞击杠杆，使自由脱扣机构动作，主触头断开主电路。

3. 热脱扣器

热脱扣器的热元件 5 与主电路串联。当电路过载一定时间后，热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，主触头断开主电路。跳闸后，需待双金属片冷却复位后才能再合闸。

4. 分励脱扣器

当需要远距离控制时，则需要采用分励脱扣器 4。分励脱扣器由分励电磁铁和一套机械装置组成。在正常工作时，其线圈是断电的。在需要远距离断开电路时，按下跳闸按钮 7，使分励电磁铁线圈通电，衔铁带动自由脱扣机构动作，使主触头断开。分励脱扣器只用于远距离断电操作，不能用作电路保护。

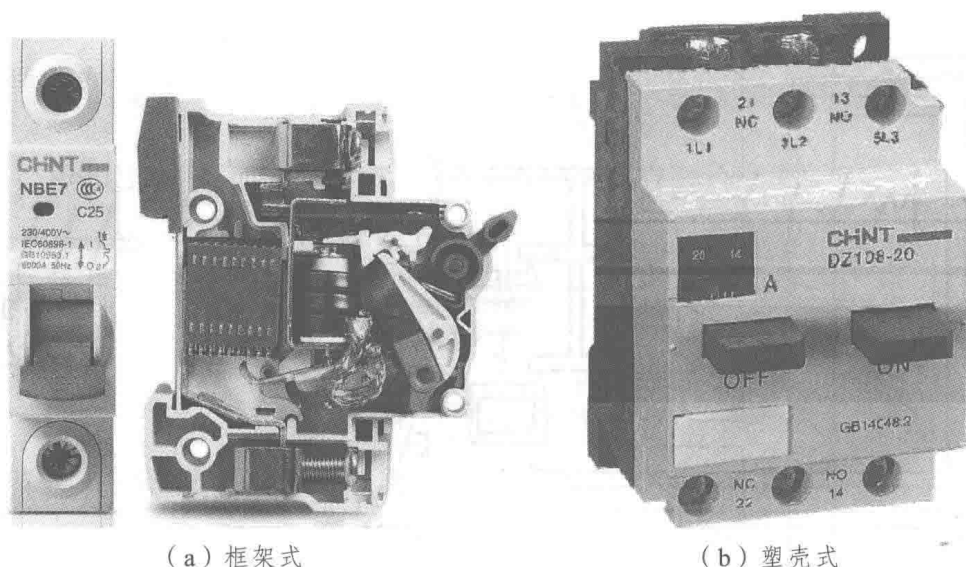


图 1-13 低压断路器外观及内部结构图

从结构形式上, 低压断路器有框架式(万能式)和塑壳式(装置式)两大类。如图 1-13 所示。断路器与隔离开关的区别在于, 断路器能在带负荷情况下接通和断开电路, 它相当于刀开关、熔断器、热继电器和欠电压继电器的组合, 是一种既有手动开关作用又能自动进行欠压、失压、过载和短路保护的电器。

1.3.3 按钮

按钮是一种手动且可以自动复位的主令电器, 结构简单, 控制方便, 在低压控制线路中得到广泛应用。

1. 按钮的结构

控制按钮主要由按钮帽、桥式动触头、静触头、复位弹簧和外壳等组成。控制按钮的外形与结构图如图 1-14 所示。

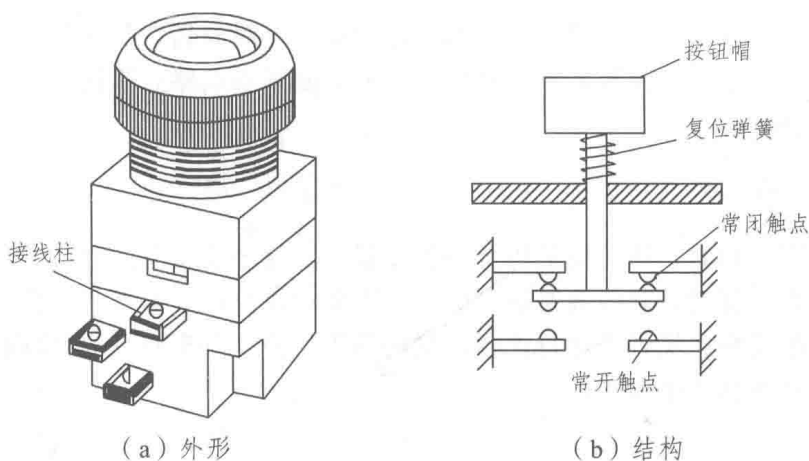


图 1-14 控制按钮的外形与结构

2. 工作原理

我们知道，常开（NO）和常闭（NC）是指按钮未动作时触头的状态。当按下按钮时，常闭触头被断开，常开触头被接通；当松开按钮时，在复位弹簧作用下触头复位，即常闭触头闭合，常开触头断开。

对于复合按钮来说，当按下按钮时，常闭触头首先断开，常开触头随后闭合；手指放开后，常开触头首先复位，常闭触头随后复位闭合。按钮的触头允许通过的电流很小，一般不超过 5 A。

3. 按钮的分类

控制按钮的种类很多，机床中常用的分类方法如下：

紧急式按钮装有突出的、面积较大并带有标志色为橘红色的蘑菇形按钮帽，以便于紧急操作。该按钮按动后将自锁为按动后的工作状态。按钮实物如图 1-15 所示。

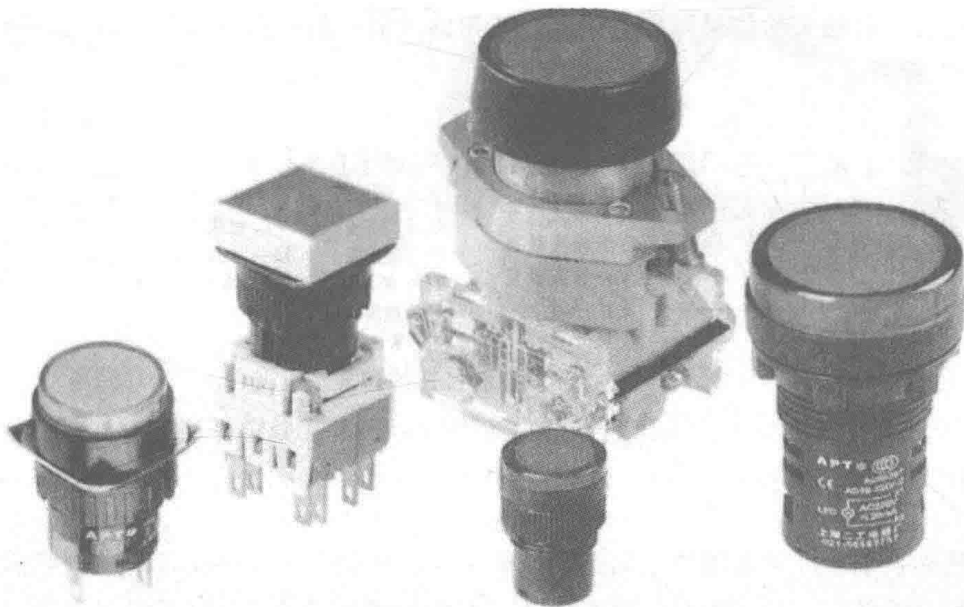


图 1-15 按钮实物图

旋钮式按钮装有可扳动的手柄式或钥匙式并可单一方向或可逆向旋转的按钮帽。该按钮可实现诸如顺序或互逆式往复控制。

指示灯式按钮则是在透明的按钮帽的内部装有指示灯，用作按动该按钮后的工作状态以及控制信号是否发出或者接收状态的指示。

钥匙式按钮则是依据重要或者安全的要求，在按钮帽上装有必须用特制钥匙方可打开或者接通装置的按钮。

为了标明各个按钮的作用，避免误操作，通常将按钮帽做成不同的颜色以示区别，其颜色有红、橘红、绿、黑、黄、蓝及白颜色等。一般以橘红色表示紧急停止按钮；红色表示停止按钮，绿色表示启动按钮，黄色表示信号控制按钮等。