

绪 论

各工业生产部门的生产机械设备，基本上都是通过金属切削机床加工生产出来的，因此说机床是机械制造业中的主要加工设备，机床的质量、数量及自动化水平，都直接影响到整个机械工业的发展。机床工业发展的水平是一个国家工业水平的重要标志。

一、电气自动控制在现代机床中的地位

过去，生产机械由工作机构、传动机构、原动机三部分组成。自从电气元件与计算机应用在机械上后，现代化生产机械已包含第四个组成部分——以电气为主的自动控制系统，它使机器的性能不断提高，使工作机构、传动机构的结构大为简化。

所谓“自动控制”是指在没有人直接参与（或仅有少数人参与）的情况下，利用自动控制系统，使被控对象（或生产过程），自动地按预定的规律去进行工作。导弹能准确地命中目标，人造卫星能按预定轨道运行并返回地面指定的地点，宇宙飞船能准确地月球上着陆并安全返回，都是离不开自动控制技术的。在工业上，机器按照规定的程序自动地启动与停止；在微型计算机控制的数控机床上，依照计算机发出的程序指令，自动按预定的轨迹进行加工，自动退刀、自动换工件，再自动加工下一个工件；在轧钢机上，用电子计算机计算出轧制速度与轧辊压下量，并通过晶闸管可控整流电路控制电动机来实现这些指令；在自动化仓库中，由可编程序控制器自动控制货物的存放与取出；利用可编程序控制器，按照预先编制的程序，使机床实现各种自动加工循环，所有这些都是电气自动控制的应用。

实现自动控制的手段是多种多样的，可以用电气的方法来实现，也可以用机械的、液压的、气动的等方法来实现自动控制。由于现代化的金属切削机床均用交、直流电机作为动力源，因而电气自动控制是现代机床的主要控制手段。即使采用其它控制方法，也离不开电气控制的配合。本书就是以机床作为典型对象来研究电气自动控制技术的基本原理、方法和应用，这些基本控制方法自然也适用于其它机器设备及生产过程。

机床经过一百多年的发展，结构不断改进，性能不断提高，在很大程度上取决于电气拖动与电气控制系统的更新。电气拖动在速度调节方面具有无可比拟的优越性和发展前途。采用直流或交流无级调速电动机驱动机床，使结构复杂的变速箱变的十分简单，简化了机床结构，提高了效率和刚度，也提高了精度。近年研制成功用于数控车床、铣床、加工中心机床的电机—主轴部件，是将交流电机转子直接安装在主轴上，使其具有宽广的无级调速范围，且振动和噪音均较小，它完全代替了主轴变速齿轮箱，对机床传动与结构将产生变革性影响。

现代化机床在电气自动控制方面综合应用了许多先进的科学技术成果，如计算技术、电子技术、自动控制理论、精密测量技术、传感技术等，特别是当今信息时代，微型计算机已广泛用于各行各业，机床是最早应用电子计算机的设备之一。早在 20 世纪 40 年代末期，电子计算机就与机床有机结合产生了新型机床——数控机床。现在价廉可靠的微机在机床

行业中的应用日益广泛，由微机控制的数控机床与数显装置越来越多地在我国各类工厂中获得使用和推广。这些新科学技术的应用，使机床电气设备不断实现现代化，从而提高了机床自动化程度和机床加工效率，扩大了工艺范围，缩短了新产品试制周期，加速产品更新换代。现代化机床还可提高产品加工质量，减少工人劳动强度，降低产品成本等。近 20 年来出现的各种机电一体化产品、数控机床、机器人、柔性制造单元及系统等均是机床电气设备实现现代化的硕果。总之，电气自动控制在机床中占有极其重要的地位。

二、机床电气自动控制的发展概况

（一）电气拖动的发展与分类

电气控制与电气拖动有着密切的关系。20 世纪初，由于电动机的出现，使得机床的拖动发生了变革，用电动机代替蒸汽机，机床的电气拖动随电动机的发展而发展。

1. 成组拖动

一台电动机经天轴（或地轴）由皮带传动驱动若干台机床工作。由于这种方式存在有传动路线长、效率低、结构复杂等缺点，目前早已被淘汰。

2. 单电机拖动

一台电动机拖动一台机床。较之成组拖动简化了传动机构，缩短了传动路线，提高了传动效率，至今中小型通用机床仍有采用单电机拖动的。

3. 多电机拖动

随着机床自动化程度的提高和重型机床的发展，机床的运动增多，要求提高，出现了采用多台电动机驱动一台机床（如铣床）乃至十余台电动机拖动一台重型机床（如龙门刨床）的拖动方式，这样可以缩短机床传动链，易于实现各工作部件运动的自动化。当前重型机床、组合机床、数控机床、自动线等均采用多电机拖动的方式。

4. 交、直流无级调速

由于电气无级调速具有可灵活选择最佳切削用量和简化机械传动结构等优点，20 世纪 30 年代出现的交流电动机——直流电动机——直流电动机无级调速系统，至今还在重型机床上有所应用。60 年代以后，大功率晶闸管的问世和变流技术的发展，又出现了晶闸管直流电动机无级调速系统，它较之前者，具有效率高、动态响应快、占地面积小等优点，当前在数控机床、磨床及仿形等机床中已得到广泛应用。由于逆变技术的出现和高压大功率管的问世，80 年代以来交流电动机无级调速系统有了迅速发展，它利用改变交流电的频率等来实现电动机转速的无级调速。交流电动机无电刷与换向器，较之直流电动机易于维护且寿命长，很有发展前途。

（二）电气控制系统的发展与分类

1. 逻辑控制系统

又称开关量或断续控制系统，逻辑代数是它的理论基础，采用具有两个稳定工作状态的各种电器和电子器件构成各种逻辑控制系统。按自动化程度的不同分为：

（1）手动控制。在电气控制的初期，大都采用电气开关对机床电动机的起动、停止、反向等进行手动控制，现在砂轮机、台钻等动作简单的小型机床上仍有采用。

（2）自动控制。按其控制原理与采用电气元件的不同又可分为：

1) 继电器接触器自动控制系统。多数通用机床至今仍采用继电器、接触器、按钮开关等

电器元件组成的自动控制系统，因它具有直观、易掌握、易维护等优点，但功耗大、体积大，并且改变控制工作循环较为困难（如果要改变，需重新设计电路）。

2) 顺序控制器。由集成电路组成的顺序控制器具有程序变更容易、程序存储量大、通用性强等优点，广泛用于组合机床、自动线等。20世纪60年代末，又出现了具有运算功能和较大功率输出能力的可编程控制器 PC (Programmable Controller, 又称 PLC——Programmable Logic Controller)，它是由大规模集成电路、电子开关、晶闸管等组成的专用微型电子计算机，用它可代替大量的继电器，且功耗小、重量轻，在机床上具有广阔的应用前景。

3) 数字控制。20世纪40年代末，为了适应中小批机械加工生产自动化的需要，应用电子技术、计算技术、现代控制理论、精密测量等近代科学成就，研制成了数控机床。它是由电子计算机按照预先编好的程序，对机床实行自动化的数字控制。数控机床既有专用机床生产率高的优点，又兼有通用机床工艺范围广、使用灵活的特点；并且还具有能自动加工复杂的成形表面、精度高等优点，因而它具有强大的生命力，发展前景广阔。

数控机床的控制系统，最初是由硬件逻辑电路构成的专用数控装置 NC (Numerical Control)，但其成本昂贵，工作可靠性差，逻辑功能固定。随着电子计算机的发展，又出现了 DNC (Direct Numerical Control)、CNC (Computer Numerical Control)、AC (Adaptive Control) 等数控系统。

为了充分发挥电子计算机运算速度快的潜力，曾出现过由一台电子计算机控制数台、数十台、甚至上百台数控机床的“计算机群控系统”，又称计算机直接控制系统，这就是 DNC。

随着小型电子计算机的问世，又产生了用小型电子计算机控制的数控系统 (CNC)，它不仅降低了制造成本，还扩大了控制功能和使用范围。

近十年来，随着价格低廉、工作可靠的微型电子计算机的出现，更加促进了数控机床的发展，出现了大量的微型计算机数控系统 MNC (Micro-Computer Numerical Control)，当今世界各国生产的全功能和经济型数控机床均系 MNC 系统。

AC 称为自适应控制系统，它能在毛坯裕量变化、硬度不均、刀具磨损等随机因素出现时，使机床具有最佳切削用量，从而始终保证具有高的加工质量和生产效率。

由数控机床、工业机器人、自动搬运车、自动化检测、自动化仓库等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线称为柔性制造系统 FMS (Flexible Manufacturing System)，它是自动化车间和自动化工厂的重要组成部分与基础。较之专用机床自动线，它具有能同时加工多种工件、能适应产品多变、使用灵活等优点，当前各国均在大力发展数控机床和柔性制造系统。

随着生产的发展，由单个机床的自动化逐渐发展为生产过程的综合自动化。柔性制造系统 FMS 再加上计算机辅助设计 CAD、计算机辅助制造 CAM、计算机辅助质量检测 CAQ 及计算机信息管理系统将构成计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System)，它是当前机械加工自动化发展的最高形式。机床电气自动化的水平在电气控制技术迅速发展的进程中将被不断推向新的高峰。

2. 连续控制系统

对物理量（如电压、转速等）进行连续自动控制的系统，又称模拟控制系统。这类系

统一般是具有负反馈的闭环控制系统，常具有功率放大的特点，且有精度高、功率大、抗干扰能力强等优点。例如直流电动机驱动机床主轴实现无级调速的系统，交、直流伺服电动机拖动数控机床进给机构和工业机器人的系统均属连续控制系统。

3. 混合控制系统

同时采用数字控制和模拟控制的系统称为混合控制系统，数控机床、机器人的控制驱动系统多属于这类控制系统。数控机床由数字电子计算机进行控制，通过数模转换器和功率放大等装置驱动伺服电动机和主轴电动机带动机床执行机构产生所需的运动。

三、本课程的内容及要求

机床电气控制技术就是采用各种控制元件、自动装置，对机床进行自动操纵、自动调节转速、按给定程序和自动适应多种条件的随机变化而选择最优的加工方案，以及工作循环自动化等。

机床电气控制技术课程，就是研究解决机床电气控制的有关问题，阐述机床电气控制原理、实际机床控制线路、机床电气控制线路的设计方法及常用电气元件的选择、可编程控制器等内容，本书只涉及最基本、最典型的控制线路及控制实例。

在学完本课程以后，学生应掌握电气控制技术的基本原理；学会分析一般机床的电气控制电路并具有一定的设计能力；对可编程控制器应具有基本的运用能力。

综上所述，通过本门课程的学习，学生能够具有对机电一体化产品的综合分析和设计能力。

第一章 常用低压电器

电器是自动控制的重要元件之一。现在，无论在工厂、矿山以及交通运输方面都已广泛地采用自动化及半自动化生产。生产过程的自动化意味着带有电气拖动的许多工作枢纽间密切和可靠的组合。它们间的密切联系和相互配合已不能光靠机械的装置去完成，而必须更多地借助于电器。举例来说，一个多电动机传动的巨型龙门刨床，它的主电动机带动工作台，而工作台在切削时要向前运动，以后又要向后退回。在向前进行切削时，速度要慢些，而在空刀无切削时则要快些；需要在试车时慢些，在正常工作时快些；又需要在切削过载时能自动的减轻负载；当油泵电动机没有启动以前工作台电动机不能启动等。这些要求无疑地要由许多电器来配合完成。

电器的用途很广，职能多样，品种规格繁多。本章主要介绍在工矿企业中常用的低压电器。

第一节 电器的定义和分类

电器是对于电能的生产、输送、分配和应用起控制、调节、检测及保护等作用的工具之总称，如开关、熔断器、变阻器等都属于电器。

电器有很多种分类方式：

(1) 按电器工作电压的高低，以交流 1000V、直流 1200V 为界，可划分为高压电器和低压电器两大类，我们要讨论的是低压电器。

(2) 按电器在电路中所起作用的不同，分为控制电器和保护电器两类。控制电器在电路中起控制作用，如各种按钮、接触器、中间继电器等；保护电器在电路中起保护作用，如熔断器、热继电器等。

(3) 按电器动力来源的不同，分为自动电器和手动电器两类。如刀开关由人力直接操作，属于手动电器；接触器由电磁力操作，则属于自动电器。

(4) 按电器的输出形式，又可分为：

有触点电器——电器通断电路的功能由触点来实现，如刀开关、接触器等。

无触点电器——电器通断电路的功能不是通过接触，而是根据输出信号的高低电平来实现的，如可控硅的导通与截止、三极管的饱和与截止等。

(5) 按其控制对象的不同，电器分为电器控制系统用和电力系统用两类。本书叙述的为电器控制系统用电器。

(6) 以电器在电器控制系统中的作用来看，可以把电器元件分为信号元件和控制元件两大类：

1) 信号元件——用以把非电量（如机械位移、压力、温度等）的变化转换为电信号的电器。这类元件有按钮、压力继电器、行程开关、热继电器等。

2) 控制元件——是一种电器逻辑门。常见的为“与门”和“非门”，其输入和输出都是电信号。在电器控制系统中，它将信号元件和控制元件的输出经逻辑运算后的结果作为输入。因其触点数较多，且可以互相隔离，故输出可以同时分别控制自身、其它控制元件和执行元件（如电动机、电磁阀等）。这类元件有电磁式继电器、接触器等。

电器的分类方法很多，且相互交叉、覆盖。即某一电器按不同的分类方法，分属于不同的种类。如工作电压为 380V 的交流接触器，按不同分类方法分属：低压电器、有触点电器、电器控制系统用电器。

第二节 电磁式控制电器的基本结构和原理

从结构上看，电磁式控制电器由三个基本部分组成：触点、电磁机构和灭弧装置。

一、触点

触点是一切有触点电器的执行部件，这些电器就是通过触点的动作来接通和断开被控制电路的。

1. 触点的分断过程及电弧的产生

触点通常由动、静触头组合而成。两个触头之间的接触，从本质上来讲是许多个点的接触。因此，在两个触头分开时，势必最终要出现只有一个点在接触的现象。如果原先触点处于闭合状态，两个触点间有电流流过，此时该点处的电流密度惊人地增大（可达 $10^3 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ ），致使触头金属熔化，并随着触头的互相分离形成熔化了的高温金属液桥。一旦金属液桥被拉断，触头就完全分开，而在断口处立即产生电弧。如果随着触头的分离，电弧被熄灭了，则相应的电路才被断开。

电弧实际上是一种气体放电现象。所谓气体放电，就是气体中有大量的带电质点作定向运动。当触点分离的瞬间，动、静触头的间隙很小，电路电压几乎全部降落在触点之间，在触点间形成很高的电场强度，以致发生场致发射。发射的自由电子在电场作用下向阳极加速运动。高速运动的电子撞击气体原子时产生撞击电离。电离出的电子在向阳极运动过程中又将撞击其它原子，又使其它原子电离。撞击电离的正离子则向阴极加速运动，撞在阴极上会使阴极温度逐渐升高，到达一定温度时，会发生热电子发射。热发射的电子又参与撞击电离。这样，在触头间隙中形成了炽热的电子流即电弧。

电弧一经形成，在弧隙中产生大量热能，其间的原子以很高的速度作不规则的运动并相互剧烈撞击，撞击结果使原子造成电离，这种因高温使原子撞击所产生的电离称为气体热游离。特别当触头表面的金属蒸气进入弧隙后，气体热游离的作用更占主要地位。

显然，电压越高、电流越大，即电弧功率越大、弧区温度越高、游离程度越烈，电弧亦越强。

应当指出，伴随着电离的进行也存在着消电离的现象。消电离主要是通过正、负带电质点的复合进行的。温度越低，带电质点运动越慢，越容易复合。

带电触点的分断过程就是电弧的形成及抑制的过程。

2. 触点的接通过程及电接触原理

有触点电器接通被控电路是靠触点的闭合来实现的。一般来说，触头的接触面积越大

触点的接触电阻越小，则触点接通电路的性能越好。所以，触头一般都是选用导电率高的金属材料做成的。

但不论什么金属表面，即使加工粗糙度再低，也不可能形成理想的光滑表面，即两个金属接触面总是凹凸不平的，只有少数的点才能真正接触上。因此，当触点接通电路时，触点实际上通电截面很小。此外，金属在空气中不免要氧化或硫化，在其表面生成氧化膜或硫化膜，而后的电阻率比金属本体大得多，这都使得触头接触处的电阻增大。在触头接触处的电阻称为触头接触电阻。为了减少损耗、降低温升，希望接触电阻尽量小些。

接触电阻的大小与触头的接触形式、接触压力、触头材料电阻率、机械性能及表面状况有关。一般来说，接触面积大、接触压力大、触头材料电阻率小、塑性形变好、表面光滑的触头接触电阻较小。

触头在从分离到闭合的接通过程中，经常发生机械振动，即触头的闭合—分离—再闭合过程的重复。产生振动的原因可以从撞击的角度来解释。一般，触点是通过弹簧机构以保证有一定的接触压力，使接触可靠（如图 1-2 所示）。在触头闭合瞬间，动触头要撞击静触头，随之，动触头在反作用力作用下被反弹，而使动静触头分离、动触头弹簧被压缩。一旦弹簧的张力大于该反作用力，动触头又被推向与静触头接触。这样，动静触头又碰撞、反弹。但弹回的距离一次比一次小，直到弹跳完全停歇，触点完全闭合。除机械碰撞外，触点电流仅从两触头间少数接触点流过，形成收缩状电流线，触头间的收缩电流产生的电动力也能导致触头振动，特别是当接通较大电流时，电动力的影响更加显著。

触头的机械振动会使触头表面产生电气磨损，即触头弹跳时两触头间形成电弧，致使触头表面有部分金属被熔化，每次接触过程中动静触头间的相对滑动将熔化的金属带走；此外，熔化了的金属还可能喷溅或蒸发，而金属蒸气又可能被气流或磁吹作用所冲走，使触头材料越来越少，形成电气磨损的后果。当触头接触表面有熔化的金属时，一旦机械振动过程结束后，熔化了的金属便因失去电弧产生的大量热量而凝固，使动静触头粘在一起，再也不能分开，而发生熔焊现象。

电气磨损会缩短触头的使用期限，熔焊更使电器不能正常工作。防止的办法是减少触头的振动。根据力学原理，适当增大触头弹簧的初压力、减小触头质量、降低触头的接通速度都可减少振动。

3. 触头的基本结构形式

(1) 触点的接触形式。触点的接触形式有点接触（如球面对球面、球面对平面等）、线接触（如圆柱对平面、圆柱对圆柱等）和面接触（如平面对平面）三种，如图 1-1 所示。

三种接触形式中，点接触的接触点数最少，因此它只能用于小电流的电器中，如接触

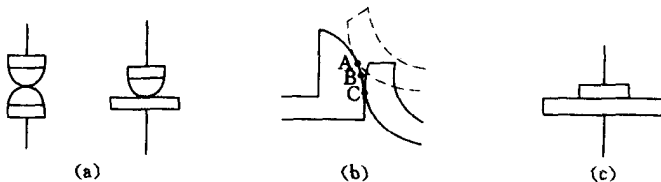


图 1-1 触点的三种接触形式

(a) 点接触；(b) 线接触；(c) 面接触

器的辅助触点和继电器的触点。面接触的接触点最多，它允许通过较大的电流。这种触点一般在接触表面上镶有合金，以减小触点接触电阻和提高耐磨性，多用于较大容量接触器的主触点。线接触的接触区域是一条直线，其触点在通断过程中有滚动动作，如图 1-1 (b) 所示。开始接触时，动静触点在 A 点接触，靠弹簧的压力经 B 点滚到 C 点；断开时作相反运动。这样可以清除触点表面的氧化膜；同时长期工作的位置是在 C 点而不是在易烧灼的 A 点，从而保证了触点的良好接触。这种滚动线接触多用于中等容量的触点，如接触器的主触点。

(2) 触点的结构形式。在常用继电器和接触器中，触点的结构形式主要有单断点指形触头和双断点桥式触头。

图 1-1 (b) 所示为单断点指形触头。该触头的特点是只有一个断口，一般多用于接触器的触头。其优点为：

a. 闭合、断开过程中有滚滑运动，能自动清除表面的氧化物，以保证接触可靠。可采用铜或铜基合金触头材料。

b. 触头接触压力大，电动稳定性高。

c. 触头参数较易调节。

其缺点是：

a. 触头开距大，从而增大了电器体积。

b. 触头闭合时冲击能量大，并有软连接，不利于机械寿命的提高。

图 1-2 为双断点桥式触头的结构示意图。这种触头的优点是：

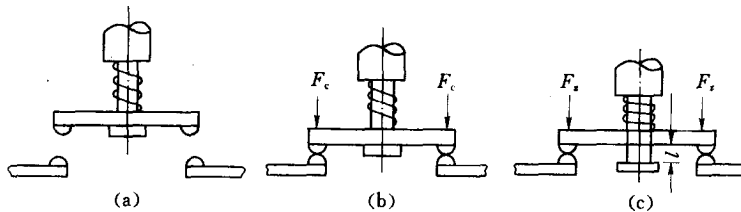


图 1-2 双断点桥式触点

(a) 最终断开位置；(b) 刚刚接触位置；(c) 最终闭合位置

a. 具有两个有效灭弧区域，灭弧效果很好。小容量交流接触器或继电器采用这种触头时，可利用两个断点，增长了电弧长度，有利于熄弧。

b. 触头开距小，使电器结构紧凑，体积小。

c. 触头闭合时冲击能量小，无软连接，有利于提高机械寿命。

这种触头的缺点是：

a. 触头不能自动净化，触头材料必须用银或银基合金。

b. 每个触点的接触压力小，电动稳定性较低。

c. 触头参数不易调节。

(3) 触点的初压力、终压力和超程。为了减小接触电阻及减弱触头接触点的振动，需要在触点间加一定的压力。此压力一般是由弹簧产生的。当动触头与静触头刚接触时，由

于安装时动触头的弹簧已经被预先压缩了一段，因而产生一个初压力 F_0 [如图 1-2 (b) 所示]。初压力的作用是削弱接触振动，它可通过调节触头弹簧预压缩量来增减。触点闭合后弹簧在运动机构作用下被进一步压缩，运动机构运动终止时，弹簧产生的压力为终压力 F_2 [如图 1-2 (c) 所示]。终压力的作用是减小接触电阻。弹簧被进一步压缩的距离 l 称为触点的超程，超程越大终压力亦越大。有了超程，使触头在被磨损的情况下仍具有一定的接触压力，使之能继续正常工作。当然，磨损严重时仍应及时更换触头。

二、灭弧原理及灭弧装置

如前所述，当动静触头于通电状态下脱离接触时，两者之间的间隙会产生电弧。电弧的存在既妨碍了电路及时可靠地分断，又会使触头受到磨损。为此，必须采取适当且有效的措施，以保护触头系统，降低它的磨损，提高它的分断能力，从而保证整个电器的工作安全可靠。

根据前述电弧产生的物理过程可知，欲使电弧熄灭，应设法降低电弧区温度和电场强度，加强消电离作用。当电离速度低于消电离速度时，电弧即逐渐熄灭。常用的灭弧方法有拉长电弧、切断或分隔电弧等。

1. 多断点灭弧

在交流继电器和接触器中常采用桥式触头（如图 1-2 所示），这种触头有两个断点。交流电路在过零后，若一对断点处电弧重燃需要 150~250V 电压，则两对断点就需要 300~500V 电压。若断点电压达不到此值，电弧过零后因不能重燃而熄灭。一般交流继电器和小电流接触器采用桥式触头灭弧，而不再加设其它灭弧装置。

当采用双极或三极接触器控制一条电路时，可灵活地将两个极或三个极串联起来作为一个触点使用，这组触点便成为多断点的，其灭弧效果将大大提高。

2. 磁吹式灭弧装置

这种灭弧装置的原理是使电弧处于磁场中间，电磁场力“吹”长电弧，使其进入冷却装置，加速电弧冷却，促使电弧迅速熄灭。

图 1-3 是磁吹式灭弧装置的原理图。其磁场由与触点电路串联的吹弧线圈 3 产生，当电流逆时针流经吹弧线圈时，其产生的磁通经铁芯 1 和导磁颊片 4 引向触点周围。触点周围的磁通方向为由纸面流入，如图中“×”符号所示。由左手定则可知，电弧在吹弧线圈磁场中受到向上方向的力 F 的作用，电弧向上运动，被拉长并被吹入灭弧罩 5 中。灭弧角 6 和静触头相连接，引导电弧向上运动，将热量传递给灭弧罩壁，促使电弧熄灭。

这种灭弧装置是利用电弧电流本身灭弧，电弧电流越大，吹弧能力越强，且不受电路电流方向影响（当电流方向改变时，磁场方向随之改变，结果电磁力方向不变）。它广泛地应用于直流接触器中。

3. 灭弧栅

灭弧栅的原理图如图 1-4 所示。灭弧栅 3 是由许多镀铜薄钢片组成，片间距离为 2

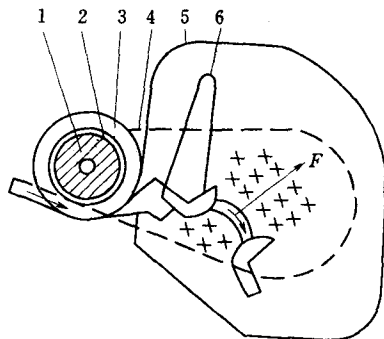


图 1-3 磁吹式灭弧装置

1—铁芯；2—绝缘管；3—吹弧线圈；
4—导磁颊片；5—灭弧罩；6—熄弧角

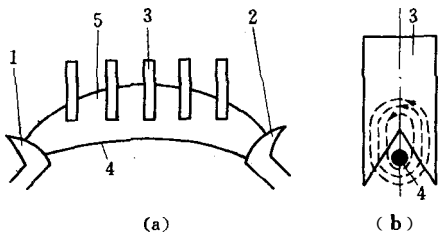


图 1-4 灭弧栅灭弧原理
 (a) 栅片灭弧原理；(b) 电弧进入栅片的图形
 1—静触头；2—动触头；3—灭弧栅片；
 4—长电弧；5—短电弧

3mm，安放在触点上方的灭弧罩内（图中未画出灭弧罩）。一旦发生电弧，电弧周围产生磁场，导磁的钢片将电弧吸入栅片，电弧被栅片分割成许多串联的短电弧。交流电压过零时，电弧自然熄灭；电弧要重燃，两栅片间必须有 150~250V 电弧压降。这样，一方面电源电压不足以维持电弧，同时由于栅片的散热作用，电弧自然熄灭后很难重燃。

这是一种很常用的交流灭弧装置。

4. 灭弧罩、

上面提到的磁吹式灭弧装置和灭弧栅灭弧装置都带有灭弧罩，它通常用耐弧陶土、石棉水泥或耐弧塑料制成。其作用一是分隔各路电弧，以防止发生短路；二是使电弧与灭弧罩的绝缘壁接触，使电弧迅速冷却而熄灭。

三、电磁机构

电磁机构是电磁式继电器和接触器的主要组成部分之一，它将电磁能转换成机械能，带动触头使之闭合或断开。

1. 电磁机构的结构形式

电磁机构由吸引线圈（激励线圈）和磁路两个部分组成。磁路包括铁芯、铁轭、衔铁和空气隙。吸引线圈通以电流后激励磁场，并利用气隙把电磁能转换为机械能，带动衔铁运动以完成触点的断开和闭合。

电磁机构的分类如下：

(1) 按衔铁的运动方式分为：

a. 衔铁沿棱角转动的拍合式铁芯。如图 1-5 (a) 和 (b) 所示，其衔铁绕铁轭的棱角转动，磨损较小，铁芯用软铁制成，适用于直流继电器和接触器。

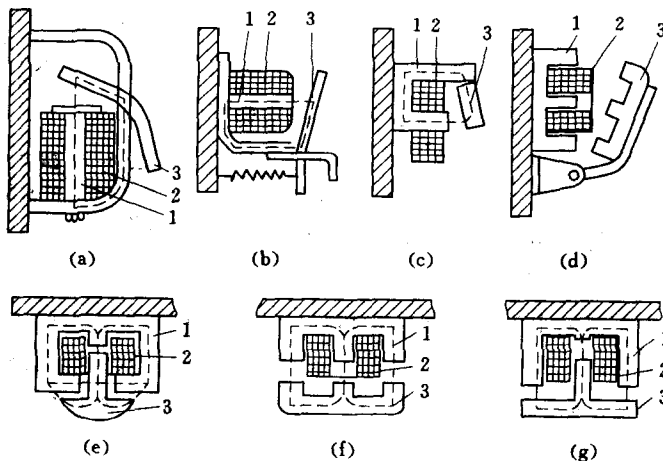


图 1-5 常用电磁机构的形式
 1—铁芯；2—线圈；3—衔铁

b. 衔铁沿轴转动的拍合式铁芯。如图 1-5 (c) 和 (d) 所示，其衔铁绕轴而转动，用于交流接触器，铁芯用硅钢片叠成。

c. 衔铁作直线运动的直动式铁芯。如图 1-5 (e)、(f) 和 (g) 所示，衔铁在线圈内成直线运动，较多用于交流接触器和继电器中。

(2) 按磁系统形状分类，电磁机构可分为 U 形 [如图 1-5 (c)] 和 E 形 [如图 1-5 (d) 所示] 两种。

(3) 按激励线圈的种类，可分为交流线圈和直流线圈两种。

(4) 按激励线圈的联接方式，可分为并联 (电压线圈) 和串联 (电流线圈) 两种。

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征。电磁机构使衔铁吸合的力与气隙的关系曲线称为吸力特性，电磁机构使衔铁释放 (复位) 的力与气隙的关系曲线称为反力特性。

(1) 反力特性。电磁机构使衔铁释放的力一般有两种：一种是利用弹簧的反力 [如图 1-5 (b) 所示]；一种是利用衔铁的自身重力 [如图 1-5 (d) 所示]。

弹簧的反力与其形变的位移 x 成正比，其反力特性可写成

$$F_{\text{反}1} = K_1 x \quad (1-1)$$

自重的反力与气隙大小无关，如果气隙方向与重力一致 [如图 1-5 (e)、(f) 和 (g) 所示]，其反力特性可写成

$$F_{\text{反}2} = K_2 \quad (1-2)$$

考虑到常开触点闭合时超行程机构的弹力作用，上述两种反力特性曲线如图 1-6 所示。其中 δ_1 为电磁机构气隙的初始值； δ_2 为动静触头开始接触时的气隙长度。由于超行程机构的弹力作用，反力特性在 δ_2 处有一突变。

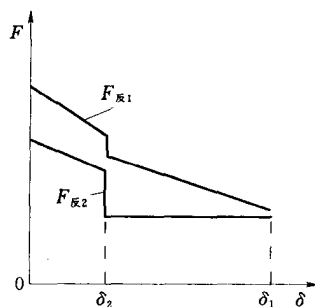


图 1-6 反力特性

(2) 吸力特性。电磁机构的电磁吸力可近似地按下式求得

$$F = 4 \times 10^5 B^2 S \quad (1-3)$$

式中 B ——气隙磁通密度 (T)；

S ——吸力处端面积 (m^2)；

F ——电磁吸力 (N)。

当端面积 S 为常数时，吸力 F 与磁密 B^2 成正比，也可以认为 F 与磁通 Φ^2 成正比，即

$$F \propto \Phi^2 \quad (1-4)$$

电磁机构的吸力特性反映的是其电磁吸力与气隙的关系。由于激励电流的种类对吸力特性的影响很大，所以要对交、直流电磁机构的吸力特性分别进行讨论。

1) 交流电磁机构的吸力特性。交流电磁机构激励线圈的阻抗主要取决于线圈的电阻 (电阻相对很小) 则

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi \quad (1-5)$$

$$\Phi = U / 4.44 f N \quad (1-6)$$

式中 U ——线圈电压 (V)；

E ——线圈感应电动势 (V);
 f ——线圈外加电压的频率 (Hz);
 Φ ——气隙磁通 (Wb);
 N ——线圈匝数。

当频率 f 、匝数 N 和外加电压 U 都为常数时，由式 (1-6) 知磁通 Φ 亦为常数。由式 (1-4) 又可知，此时电磁吸力 F 为常数 (因为交流激励时，电压、磁通都随时间作周期性变化，其电磁吸力也作周期变化。此处 F 为常数是指电磁吸力的幅值不变)。由于线圈外加电压 U 与气隙 δ 的变化无关，所以其吸力 F 亦与气隙 δ 的大小无关。实际上，考虑到漏磁通的影响，吸力 F 随气隙 δ 的减小略有增加。其吸力特性如图 1-7 所示。

虽然交流电磁机构的气隙磁通 Φ 近似不变，但气隙磁阻随气隙长度 δ 而变化。根据磁路定律

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN}{\delta/\mu_0 S} = \frac{(IN)(\mu_0 S)}{\delta} \quad (1-7)$$

可知，交流激励线圈的电流 I 与气隙 δ 成正比 (如图 1-7 所示)。一般 U 形交流电磁机构，激励线圈通电而衔铁尚未动作时，其电流达到吸合后额定电流的 5~6 倍； E 形电磁机构则达到 10~15 倍额定电流。如果衔铁卡住不能吸合或者频繁动作，交流激励线圈很可能烧毁。所以在可靠性要求高或操作频繁的场所，一般不采用交流电磁机构。

2) 直流电磁机构的吸力特性。直流电磁机构由直流电流激励。稳态时，磁路对电路无影响，所以可认为其激励电流不受气隙变化的影响，即其磁势 NI 不受气隙变化的影响。

由式 (1-7) 和式 (1-4) 知，此时

$$F \propto \Phi^2 \propto (1/\delta)^2 \quad (1-8)$$

即直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的平方成反比，其吸力特性如图 1-8 所示。它表明衔铁闭合前后吸力变化很大，气隙越小，吸力越大。

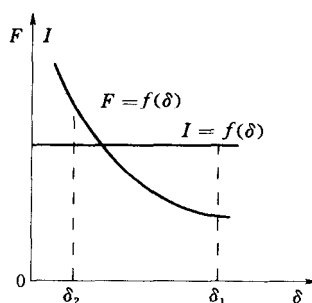
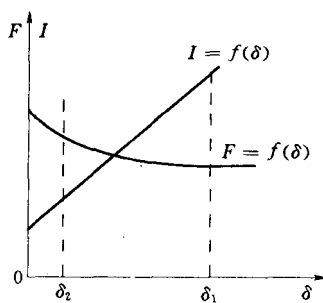


图 1-7 交流吸力特性 图 1-8 直流电磁机构的吸力特性

由于衔铁闭合前后激励线圈的电流不变，所以直流电磁机构适于动作频繁的场所，且吸合后电磁吸力大，工作可靠性好。

需要指出的是，当直流电磁机构的激励线圈断电时，磁势就由 NI 急速变为接近于零。电磁机构的磁通也发生相应的急速变化，因而就会在激励线圈中感生很大反电势。此反电势可达线圈额定电压的 10~20 倍，易使线圈因过电压而损坏。为减小此反电势，可在激励

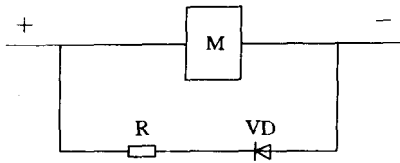


图 1-9 直流线圈的放电电路

线圈上并联一个放电电阻 R 。这样在线圈断电时,该电阻与线圈形成一个放电电路,使原先储存于磁场中的能量得以转换成热能消耗在电阻上,而不致产生过电压。从降低过电压出发,电阻 R 宜小一些,但这都会导致长期工作时能量的损耗增大。为解决这个矛盾,可以与电阻串联一个二极管(如图 1-9 所示),使

正常工作时放电电路不工作。通常,放电电阻的电阻值可取为线圈电阻的 6~8 倍。

3) 剩磁的吸力特性。由于铁磁物质有剩磁,它使电磁机构的激励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。剩磁的吸力特性如图 1-10 中曲线 4 所示。

(3) 吸力特性与反力特性的配合。电磁机构欲使衔铁吸合,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。当切断电磁机构的激励电流以释放衔铁时,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吸力特性之间(如图 1-10 所示)。

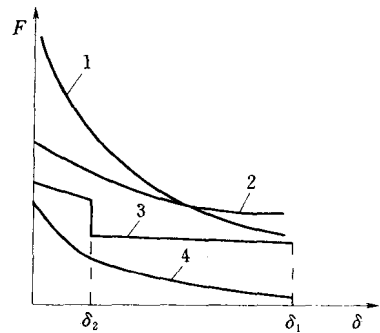


图 1-10 吸力特性和反力特性
1—直流吸力特性; 2—交流吸力特性;
3—反力特性; 4—剩磁吸力特性

在实际使用中,常常调整反力弹簧或触点初压力以改变反力特性,使之与吸力特性有良好的配合。

对于单相交流电磁机构,由于交流磁通过零时吸力也为零,吸合后的衔铁在反力作用下将被拉开,磁通过零后吸力增大,当吸力大于反力时衔铁又吸合。这样,在交流电每周期内衔铁吸力要两次过零,使衔铁产生强烈震动和噪音,甚至使铁芯松散。为避免衔铁振动,如图 1-11 所示在铁芯端面上装一个用铜制成的分磁环(或称短路环)。当电磁机构的交变磁通穿过短路环所包围的截面 S_2 时,环中产生了涡流。根据电磁感应定律,此涡流产生的磁通 Φ_2 在相位上滞后于截面 S_1 中的磁通 Φ_1 。这样,铁芯中有两个相位不同的磁通 Φ_1 和 Φ_2 ,电磁机构的吸力为它们产生的吸力 F_1 和 F_2 之和。只要此合力始终大于反力,衔铁的振动现象就消除了。

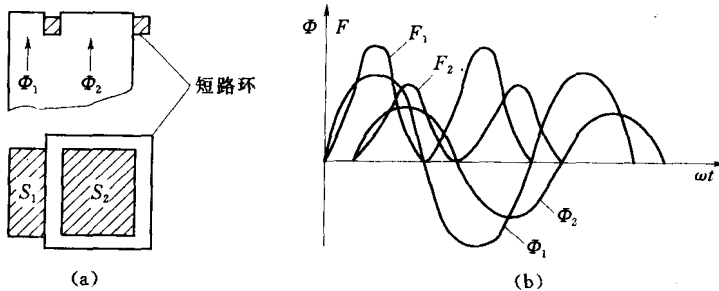


图 1-11 加短路环后的磁通和电磁吸力

(a) 磁通示意图; (b) 电磁吸力图

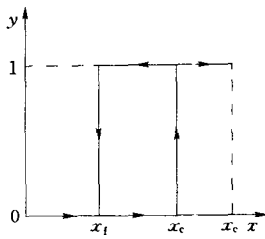


图 1-12 电磁机构的输入—输出特性——继电特性

(4) 电磁机构的输入—输出特性。电磁机构激励线圈的电压（或电流）为其输入量，衔铁的位置为其输出量，衔铁位置与激励线圈的电压（或电流）的关系称为输入—输出特性。

若以 y 代表电磁机构的输出量，并将衔铁处于吸合位置记作 $y=1$ ；把衔铁处于释放位置记作 $y=0$ 。由上面分析可知，当吸力特性处于反力特性上方时，衔铁被吸合；当吸力特性处于衔铁的下方时，衔铁被释放。若电磁机构的输入量用 x 来表示，使吸力特性处于反力特性上方的最小输入量以 x_c 表示，一般称其为电磁机构的动作值；使吸力特性处于反力特性下方的最大输入量以 x_f 表示，一般称其为返回值。为使电器工作可靠，一般的额定输入量

x_c 大于 x_c 。

电磁机构的输入—输出特性如图 1-12 所示：当输入量 $x < x_c$ 时衔铁不动作，其输出量 $y=0$ ；当 $x=x_c$ 时，衔铁吸合，输出量 y 从 0 跳变为 1；再进一步增大输入量使 $x > x_c$ ，则输出量仍为 $y=1$ 。当输入量 x 从 x_c 减小的时候，再 $x > x_f$ 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 $x=x_f$ 时，因吸力小于反力，衔铁才释放，输出量由 1 突变为 0；再减小输入量，输出量仍为 0。

可见，电磁机构的输入—输出特性为一矩形曲线，此类矩形特性曲线统称为继电特性。

第三节 手 动 电 器

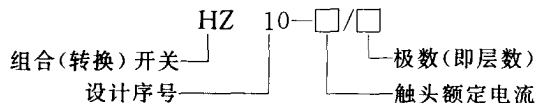
一、组合开关

在电气控制线路中，组合开关一般用作电源引入开关，也可直接用来控制小容量笼型异步电动机的起停或正反转。有时也用它来控制局部照明电路。

1. 结构和工作原理

组合开关的种类很多，常用的有 HZ10 系列，图 1-13 是 HZ10—10/3 型组合开关的结构图。它有三对静触片，每个静触片的一端固定在绝缘垫板上，另一端伸出盒外接到接线柱上，以便电源与用电设备连接。三个动触片套在装有手柄的绝缘转动轴上，转动手柄就可以将三对触头（彼此相隔一定角度）同时接通或断开。

2. 型号说明



二、刀开关

刀开关是低压配电电器中结构最简单，也是应用最广泛的电器。主要用于隔离电源；当刀开关有灭弧罩，并用杠杆操作时，也能接通或分断额定电流。

刀开关按极数分有单极、双极和三极；按结构分有平板式和条架式；按操作方式分有直接手柄操作式（如图 1-14 所示）、杠杆操作机构式（如图 1-15 所示）和电动操作机构式。

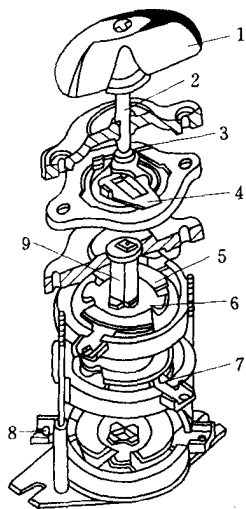


图 1-13 组合开关

1—手柄；2—转轴；3—弹簧；4—凸轮；
5—绝缘垫板；6—动触片；7—静触片；
8—接线柱；9—绝缘杆

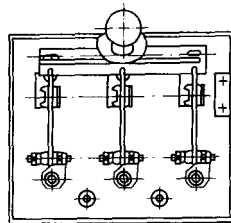


图 1-14 刀开关

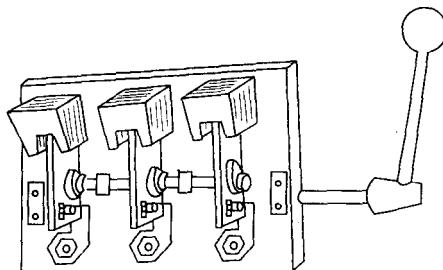


图 1-15 HD 系列刀开关

刀开关的主要技术参数为：

(1) 额定电压指在规定条件下，保证电器正常工作的电压值。目前国内生产的刀开关的额定电压一般为交流 500V (50Hz) 以下，直流 440V 以下。

(2) 额定电流是指在规定条件下，保证电器正常工作的电流值。目前国内生产的刀开关，额定电流为 10 ~ 1500A，有的可达 50000A。

(3) 通断能力指在规定的条件下，能在额定电压下接通和分断的电流值。

(4) 动稳定电流指在规定的使用 and 性能条件下，开关电器在闭合位置上所能承受的电流峰值。刀开关的动稳定电流为其额定电流的几十倍到两百倍，因为刀开关在闭合位置时，可能通过短路电流。

(5) 热稳定电流指在规定的使用 and 性能条件下，开关电器在指定的短时间内，于闭合位置上所能承载的电流。

刀开关在使用时，其额定电压应等于或大于电路额定电压；额定电流应等于或稍大于电路工作电流。若用刀开关来控制电动机，则必须考虑电动机的起动电流比较大，应选用额定电流大一级的刀开关。此外刀开关的通断能力、动稳定电流值等均应符合电路的要求。

三、按钮

按钮通常用来接通或断开控制电路（如接触器或继电器的线圈所在电路），从而控制电动机或其它电气设备的运行。它是专门发布信号或命令的电器，故常称为主令电器。

1. 结构和工作原理

图 1-16 是按钮的外型、结构原理和符号。从图 1-16(c) 所示的结构原理图看出，按钮帽通过推杆操纵下端桥式动触点的上下移动。当不揆按钮时，桥式动触点在复位弹簧的作用下与上面的一对静触点相接触，这时上面的一对静触点经过桥式动触点接通，称为常闭

(或动断)触点;这时下面的一对静触点处于断开状态,称为常开(或动合)触点。当按下按钮时,桥式触点随着推杆一起往下移动,直至和下面的一对静触点接触,于是常闭触点断开、常开触点接通。在松开(释放)按钮时,复位弹簧使桥式触点复位,此时常开触点恢复断开状态,常闭触点恢复闭合状态。图 1-16 (c) 给出了按钮的图形符号和文字符号。

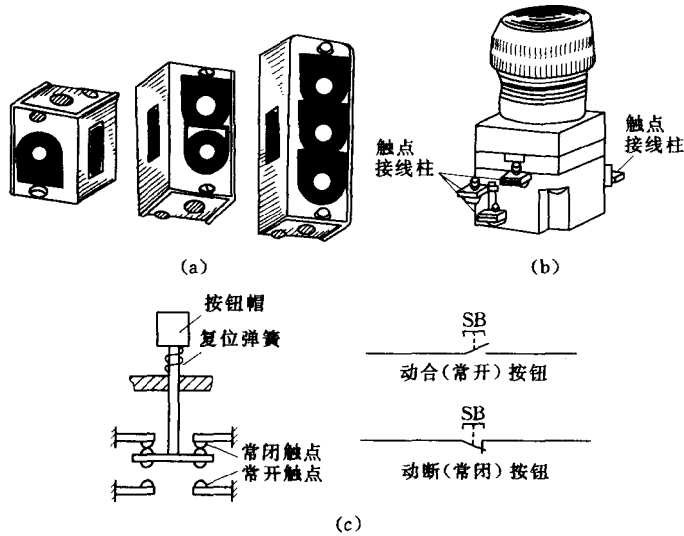


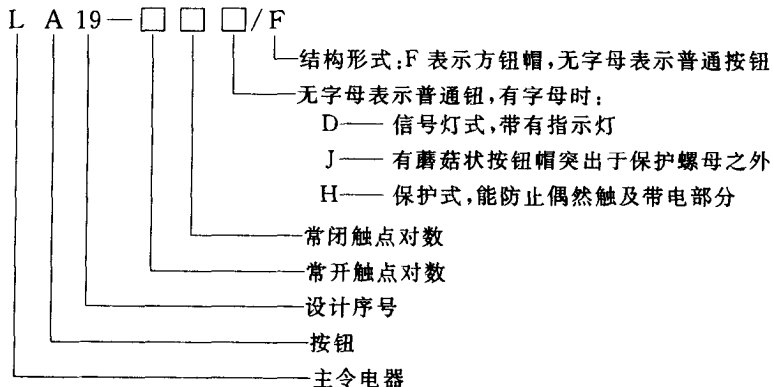
图 1-16 按钮的外形、结构原理和符号

(a) LA10系列按钮; (b) LA19系列按钮; (c) 结构原理和符号

从上述分析不难理解,所谓“常开”、“常闭”触点,是以电器不受外力作用时(对接触器、继电器而言,是指线圈没有通电),触点所处的状态来命名的。此外还应注意,电器在外力作用下动作时,常闭触点先断开,常开触点后闭合;外力消失后,常开触点先分断,常闭触点后复位。

2. 型号说明

按钮的型号很多,购置或选用按钮时,必须注明其型号。现举例说明如下:



四、自动空气断路器

自动空气断路器又称自动开关,广泛应用于各种低压电路中,可实现短路、过载及失

压保护。在正常供电情况下也可作不频繁接通切断电路用。

自动开关的结构形式较多，下面介绍一般原理。自动空气开关由触头系统、灭弧室、操纵机构及脱扣装置等组成，原理电路如图 1-17 所示。

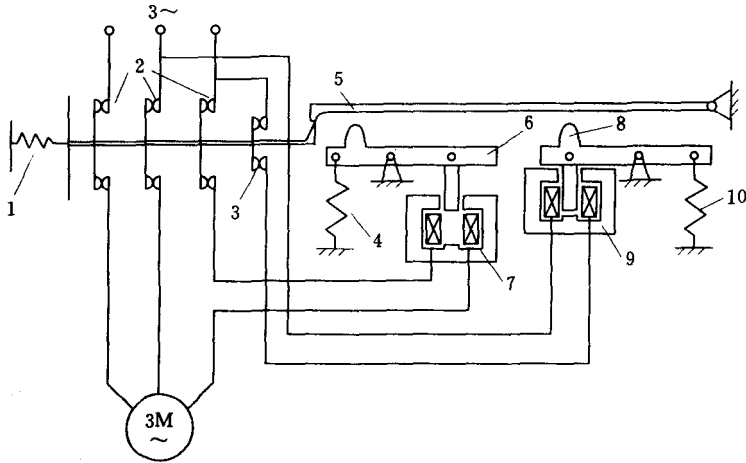


图 1-17 自动空气开关原理示意图

1—释放弹簧；2—主触头；3—辅助触头；4—弹簧；5—锁扣；6—过电流脱扣器；
7—电流继电器；8—欠电压脱扣器；9—电压继电器；10—弹簧

自动空气开关可通过手柄（图中未画出）扳断或接通电路。当开关的手柄扳到合闸位置时，与触头相连的连杆被锁钩扣住，触头保持接触状态。在电路保持接触状态时，过电流脱扣器和欠电压脱扣器均处于图示位置，不影响锁扣闭锁。

当电路失去电压时，电磁力消失，在弹簧 10 的作用下，欠电压脱扣器顺时针方向转动，将锁扣器顶开，触头在释放弹簧作用下断开，使负载断开电源。当电路出现过载或短路后，过电流继电器线圈中的电流增大，使其衔铁下移，带动过电流脱扣器顺时针方向转动，过电流脱扣器将锁扣顶开，触头在释放弹簧的作用下断开，亦使负载断开电源。在电路排除过载、短路或欠电压事故后，须再次扳动自动空气开关的手柄至合闸位置，使触头闭合，电路才能重新工作。

五、熔断器

熔断器主要用来对电动机进行短路保护。在控制、照明电路中的熔断器，既有短路保护作用，又有过载保护作用。

1. 结构和工作原理

图 1-18 (a)、(b) 所示是较常用的两种熔断器的结构图。图 1-18 (c) 是熔断器的图形符号和文字符号。

熔断器中的熔体（熔片或熔丝）用电阻率较高的易熔合金制成，例如铅锡合金等；也可用截面甚小的良导体制成，例如铜、银等。熔断器通常串接在被保护的电路中。在电路正常工作的情况下，熔断器的熔体不应熔断。当电路发生短路故障时，很大的电流通过熔断器，使熔体发热而被熔断，将故障电路从电源切除，从而起到保护电路或电气设备的