电力拖动
与控制技术



DIANLI TUODONG
YU KONGZHI JISHU

陈仕龙　单节杉　晏　妮　张文英 / 编著

四川大学出版社

前　言

随着高等学校电气类专业课程的改革，有的学校在设置电气类专业课程时，提出了将原有“电机拖动”课程中的直流电机原理与拖动、三相异步电动机原理与拖动内容及“电器控制”课程中的低压电器原理与控制内容合并，开设“电力拖动与控制技术”课程的要求，本书正是适应此需求而编写的。本书既可以作为电气工程及其自动化专业的本科教材，也可以作为电气技术、自动化等相关专业的本科教材，还可以作为电气工程技术人员的参考用书。

全书共八章。第一章常用低压电器的基本原理，概述了低压电器的分类，讲述了低压电器的触头系统和电磁机构的工作原理。第二章常用低压电器，主要介绍了隔离器、刀开关、低压断路器、接触器、热继电器、熔断器、继电器、主令电器等常用低压电器的结构及工作原理。第三章直流电机，主要介绍了直流电机的结构、工作原理以及电磁计算。第四章他励直流电动机的电力拖动，主要介绍了他励直流电动机的机械特性，以及他励直流电动机的起动、制动、调速。第五章三相异步电动机，主要介绍了三相异步电动机的结构、工作原理、绕组以及电磁计算。第六章三相异步电动机的机械特性，主要介绍了三相异步电动机的固有机械特性和人为机械特性。第七章三相异步电动机的电力拖动，主要介绍了三相异步电动机的起动、制动、调速。第八章电气控制的基本原理，首先介绍了三相异步电动机的基本控制环节，其次介绍了三相异步电动机的起动、制动、调速控制，最后介绍了直流电动机的电气控制。

本书的编写由以下人员完成：陈仕龙负责第一章、第二章、第七章、第八章，单节杉负责第三章、第四章，晏妮负责第五章，张文英负责第六章。全书由陈仕龙统稿。本书在编写过程中得到昆明理工大学电力工程学院领导和同仁的指导和帮助，作者的研究生参与了本书的文字编辑工作，在此一并表示感谢。

因编者水平有限，书中难免存在不足，望同仁及读者不吝指正。

编　者

2018 年 6 月 12 日

目　录

第一章　常用低压电器的基本原理……（1）
第一节　概　述……（1）
第二节　常用低压电器的基本问题……（5）
第三节　电气制图规则……（17）
习　题……（23）

第二章　常用低压电器……（24）
第一节　概　述……（24）
第二节　隔离器、刀开关……（25）
第三节　低压断路器……（28）
第四节　接触器……（34）
第五节　热继电器……（38）
第六节　熔断器……（40）
第七节　继电器……（44）
第八节　主令电器……（48）
习　题……（53）

第三章　直流电机……（54）
第一节　直流电机的工作原理及结构……（54）
第二节　直流电机的铭牌数据……（61）
第三节　直流电机的绕组……（61）
第四节　直流电机的励磁方式及磁场……（69）
第五节　感应电动势和电磁转矩的计算……（76）
第六节　直流电机的运行原理……（79）
第七节　直流电机的换相……（88）
习　题……（92）

第四章　他励直流电动机的电力拖动……（94）
第一节　他励直流电动机的机械特性……（94）
第二节　他励直流电动机的起动……（101）
第三节　他励直流电动机的制动……（103）

第四节　他励直流电动机的调速……（110）
习　题……（120）

第五章　三相异步电动机……（122）
第一节　三相异步电动机的工作原理及结构……（122）
第二节　三相异步电动机的铭牌数据……（129）
第三节　三相异步电动机的定子绕组……（130）
第四节　三相异步电动机的定子磁动势及磁场……（140）
第五节　三相异步电动机定子绕组的电动势……（155）
第六节　三相异步电动机运行时的电磁过程……（160）
第七节　三相异步电动机的等效电路及相量图……（169）
第八节　三相异步电动机的功率和转矩……（178）
第九节　三相异步电动机的工作特性及其测取方法……（183）
习　题……（185）

第六章　三相异步电动机的机械特性……（187）
第一节　三相异步电动机机械特性的三种表达式……（187）
第二节　三相异步电动机的固有机械特性与人为机械特性……（192）
习　题……（197）

第七章　三相异步电动机的电力拖动……（199）
第一节　三相异步电动机的起动……（199）
第二节　改善起动性能的三相异步电动机……（206）
第三节　三相异步电动机的制动……（208）
第四节　三相异步电动机的调速……（218）
习　题……（233）

第八章　电气控制的基本原理……（234）
第一节　三相异步电动机的基本控制环节……（234）
第二节　三相异步电动机的起动控制……（239）
第三节　三相异步电动机的制动控制……（247）
第四节　三相异步电动机的调速控制……（251）
第五节　他励直流电动机的电气控制……（257）
习　题……（265）

参考文献……（266）

第一章　常用低压电器的基本原理

第一节　概　述

低压电器包括配电电器和控制电器两大类，是组成成套电器设备的基础配套元件。本书将低压电器定义为：根据使用要求及控制信号，通过一个或多个器件组合，能手动或自动分合额定电压在直流（DC）1200 V、交流（AC）1500 V 及以下的电路，以实现电路中被控制对象的控制、调节、变换、检测、保护等作用的基本件。采用电磁原理构成的低压电器元件，称为电磁式低压电器；利用集成电路或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；根据电器的控制原理、结构原理及用途，又可有终端组合式电器、智能化电器和模数化电器等。

本章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，为电气控制电路设计打下基础。

低压电器的种类繁多、功能多样、用途广泛、结构各异，其分类方法有很多，通常按下列方法分类。

（一）按用途和功能分类

（1）控制电器。控制电器是指主要用于控制受电设备，使其达到预期要求工作状态的电器元件，如转换开关、按钮、接触器、控制器、继电器、熔断器及控制设备等。用于开关设备中控制、信号、联锁的电器，称为控制电路电器。控制设备是主要用来控制受电设备的开关电器及这些开关电器和相关联的控制、测量、保护及调节设备的组合的通称，也指这些电器和设备及相关联的内连接线、辅助件、外壳和支持结构件的组合件。

（2）配电电器。配电电器是指主要用于低压配电电路，对电路及设备进行保护及通断、转换电源或负载的电器，如刀开关、隔离器、熔断器、低压断路器、负荷开关等。

（3）终端电器。终端电器是用于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，实现对电路和用电设备进行配电、保护、控制、调节、报警等功能，包括各种小型化断路器、智能单元、信号指示、防护外壳和附件等。

（4）执行电器。执行电器是指用于完成某种控制动作的电器，如电动操作机构、电磁铁、电磁离合器等。

（5）可通信电器。可通信电器的基本特征是带有通信接口，如 RS232/RS485 接口等，可与工业网络连接，进行网络化控制，如智能化断路器、智能化接触器、通用变频器、可编程序控制器、软起动器及各种智能控制器等。

上述电器按应用系统、应用场合，又可分为一般工业用电器、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。专供安装在防风、雨、尘土、异常凝露、冰及浓霜的建筑物内或其他房屋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。

（二）按类别分类

按类别，低压电器可分为断路器、接触器、刀开关、熔断器、主令电器、继电器、执行器、电气安装附件、成套装置、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）	刀开关	主要用于电源隔离和短路保护
		负荷开关	
		熔断器式开关	
		隔离器	
		隔离器熔断器组	
2	熔断器	有填料密封式熔断器	主要用于短路保护
		无填料密封式熔断器	
		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、漏电等保护功能
		智能化断路器	
		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	主要用于远距离控制、频繁操作，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	

续表1－1

序号	类别	主要品种	用途
5	继电器	热继电器	专用于对三相异步电动机的过载保护
		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	
		可编程逻辑控制继电器	
6	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、负载通断等
		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	
7	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	
8	成套装置	自耦减压起动器	用于电动机电气控制操作，实现控制功能
		电磁起动器	
		星形—三角形起动器	
		软起动器	
		配电箱、照明箱、计量箱、插座箱	
		低压开关柜	
		控制柜	
9	电气安装附件	接线端子、接插器、塑料护套、尼龙扎带、母线槽、绝缘端头	用于电气装置安装
10	其他	通用变频器	实现自动控制系统和网络化控制
		可编程控制器	
		伺服控制器	

（1）断路器（俗称自动空气开关）。断路器主要用在不频繁操作的低压配电线路或开关柜（箱）中作为电源开关，并具有过载、短路、断相、漏电、欠电压等自动保护功能，有万能式断路器、装置式（塑料外壳式）断路器、模数化断路器、智能化断路器等类型。

（2）接触器。接触器是一类在电器控制系统中进行远距离控制、频繁操作的自动控

制电器，有交流接触器、直流接触器、切换电容器接触器、真空接触器、智能化接触器等类型。

（3）刀开关（隔离器）。刀开关（隔离器）是一类无载通断电路、起隔离电源作用的开关电器，分为单极、双极、三极等形式，并有多种安装形式。

（4）熔断器。熔断器是一类对电路和用电设备进行短路和过电流保护的电器，有插入式熔断器、螺旋式熔断器、有填料密封式熔断器、无填料密封式熔断器、快速熔断器、自复熔断器等类型。

（5）主令电器。主令电器是一类在电器控制系统中用于发送或转换控制指令的电器，包括按钮、指示灯、微动开关、接近开关、行程开关、主令控制器、万能转换开关等。

（6）继电器。继电器是一类自动控制逻辑控制元件，利用各种物理量的变化，将电量或非电量信号转化为开关量，通过其触头或突变量促使在同一电路或另一电路中的其他器件或装置动作。根据结构不同，有各种不同功能的继电器，用于各种控制电路中的信号传递、放大、转换、联锁、保护等，从而控制主电路的辅助电路中的器件或设备按预定的动作程序进行工作，实现自动控制和保护的目的。

①电磁式：根据控制信号不同，可分为电压继电器、电流继电器、信号继电器、温度继电器、速度继电器、时间继电器、中间继电器等。

②电子式：固态继电器、电动机保护用继电器、电子漏电保护器等。

③双金属片式：热继电器、温度继电器等。

④智能继电器（模块）：如德国西门子公司的 LOGO、施耐德公司的 Zelio、金钟－默勒公司的 easy 等。

⑤特种继电器：磁电式继电器、极化继电器、磁保护继电器等。

（7）执行器。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。执行元件又称执行机构或执行器。执行器按动力源，可分为电气式、液压式、气动式及其他方式。常用的执行元件有电磁铁、电磁离合器、电磁制动器等。

（8）电气安装附件。电气安装附件包括各种工业用电器连接插件、插头、插座、端子排、母线排、接线端子、连接器、行线槽、缠绕管、导轨、连接导线等。

（9）成套装置。成套装置主要有低压控制屏（柜）、配电屏（柜）、动力配电箱（柜）、照明配电箱（柜）四大类，还有各类非标准控制柜等。

上述低压电器多数属于电磁式低压电器。电磁式低压电器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，对电气系统的安全运行影响较大；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、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，对正确地设计、选用和操作低压电器元件至关重要。

第二节　常用低压电器的基本问题

电磁式低压电器是由触头系统和电磁机构组成的。触头系统存在接触电阻和电弧的物理现象，对电气系统的安全运行影响较大；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。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。因此，触头、电弧、灭弧装置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和工作原理的基础。正确地设计、选用和使用低压电器元件，对正确操作和电气系统安全运行是至关重要的。

一、电器的触头和电弧

（一）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，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。有时也在铜质触头表面电镀锡、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，甚至更小，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，触头为滚动接触，可将氧化膜去掉。这种结构的触头，一般采用铜质材料。

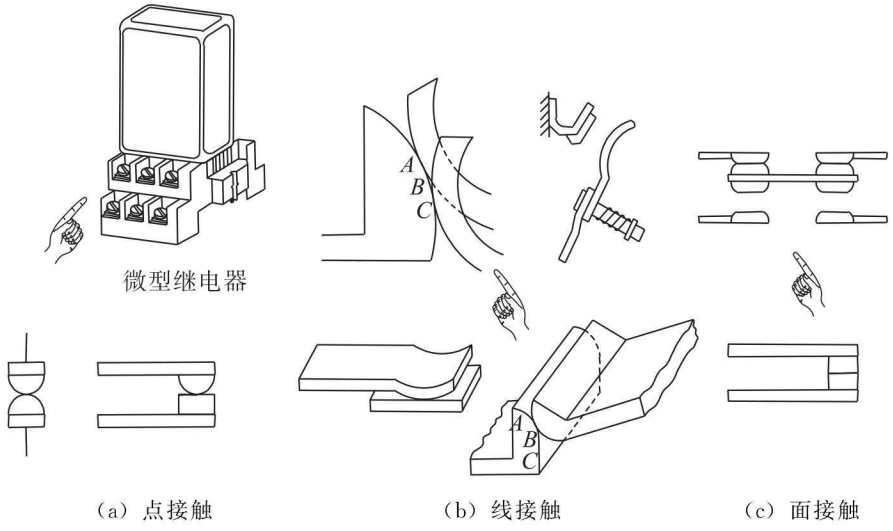
触头之间的接触电阻包括膜电阻和收缩电阻。膜电阻是触头接触表面在大气中自然氧化生成氧化膜而造成的。氧化膜的电阻要比触头本身的电阻大几十到几千倍，导电性能极差，甚至不导电，并受环境的影响较大。由于触头的接触表面不是十分光滑，在接触时，实际接触的面积总是小于触头原有可接触面积，这样使有效导电截面积减小，当电流流过时，就会产生电流收缩现象，从而使电阻增加及接触区的导电性能变差。由于这种原因增加的电阻，称为收缩电阻。如果触头之间的接触电阻较大，会在电流流过触头时形成较大的电压降落，这对弱电控制系统影响较严重。另外，电流流过触头时，电阻损耗大，使触头发热，导致温度升高、触头表面的膜电阻进一步增加，相邻的绝缘材料老化，严重时可使触头熔焊，造成电气系统发生事故。因此，对各种电器的触头，都规定了其最高环境温度和允许温升。

此外，触头在运行时还存在磨损，包括电磨损和机械磨损。电磨损是在通断过程中触头间的电弧作用使触头材料发生物理性能和化学性能变化而引起的。电磨损的程度取决于放电时间内通过触头间隙的电荷量及触头材料性质等。电磨损是引起触头材料损耗的主要原因之一。机械磨损是机械作用使触头材料发生磨损和消耗而引起的。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、耐磨性好的金属材料做触头，使触头本身的电阻尽量减小；二是要使触头接触得紧密一些。另外，在使用过程中，尽量保持触头清洁，若有条件，应定期清扫触头表面。

（2）触头的接触形式。

触头的接触形式及结构形式很多，通常按接触形式分为点接触、线接触和面接触三类（如图 1－1 所示），按结构形式分为指式触头和桥式触头等。微型继电器常采用分裂触头和片簧触头。



（a）点接触　　（b）线接触　　（c）面接触

图 1－1　触头的接触形式

由图 1－1 可知，面接触的实际接触点要比线接触多，而线接触又比点接触多。

图 1－1（a）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的压力，减小触头表面电阻。点接触常用于小电流电器，如接触器的辅助触头和继电器触头。图 1－1（b）为线接触，常做成指式触头结构，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，长期工作的位置不是在易灼烧的 A 点，而是在 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 1－1（c）为面接触，这种触头一般在接触表面上镶有合金，以减小触头的接触电阻，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。

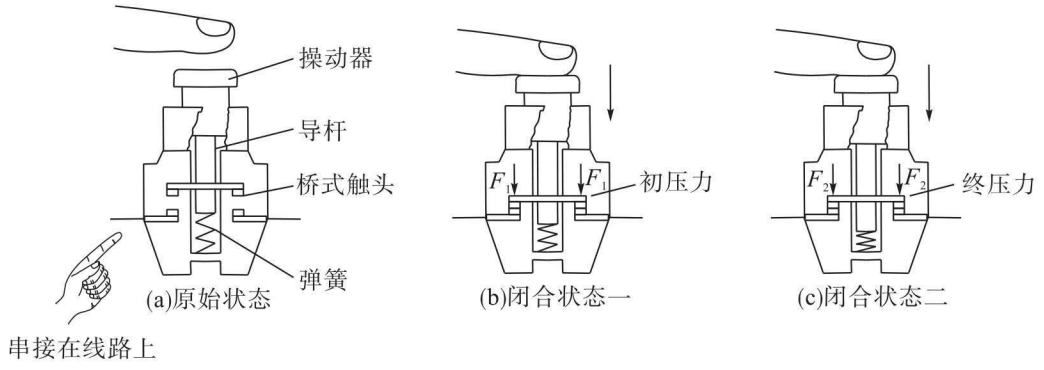


图 1－2　触头的闭合过程

图 1－2（a）是两个点接触的桥式触头，两个触头串接于同一条电路中，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，一般制造时在触头上装有接触弹簧，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间互压力，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（b)所示。触头闭合后，由于弹簧在超行程内继续变形而产生一个终压力 F_2。弹簧压缩的距离称为触头的超行程，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（c）所示。

（3）触头的状态。

触头按其原始状态可分为常开（动合）触头和常闭（动断）触头。原始状态（线圈未通电）时断开、线圈通电后闭合的触头叫作常开触头。原始状态时闭合、线圈通电后断开的触头叫作常闭触头。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。

（二）电弧的产生及灭弧方法

（1）电弧的产生及物理过程。

在自然环境中断开电路时，如果被断开电路的电流（电压）超过某一数值（根据触头材料的不同，其值在 0.25～1 A、12～20 V 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，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，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，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少电弧，为此，首先要了解电弧的物理本质

及电弧产生的原因。电弧的产生主要经历强电场放射、撞击电离、热电子发射和高温游离四个物理过程。

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的间隙上，因此，该处电场强度很大，可达几亿伏特/米。此强电场将触头阴极表面（与电源负极连接的触头）的自由电子拉出到间隙中，使触头间隙气体存在较多的电子，这种现象即所谓的强电场放射。

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动能，它在前进途中撞击气体原子，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大，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，使阴极金属中的电子动能增加，当阴极温度达到一定程度时，一部分电子有足够动能从阴极表面逸出，再参与撞击电离。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运动，并造成相互碰撞，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气时，高温游离大大增加。

在触头分断电路过程中，以上四个过程引起电离的作用是不一样的。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，电场强度减小，电弧主要靠热电子发射、撞击电离和高温游离维持，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、负带电粒子在结合成为中性粒子的同时，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，减小离子的运动速度，可以加速复合过程。

在燃弧过程中，弧柱内的电子、正离子要从浓度大、温度高的地方扩散到周围的冷介质中去，扩散出来的电子、正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、正离子的浓度增加，就可以增加扩散作用。

电离和消电离作用是同时存在的。当电离速度大于消电离速度时，电弧就发展；当电离速度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，电弧就会熄灭。因此，要使电弧熄灭，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，减弱电离作用的措施往往也是增强消电离作用的途径。

熄灭电弧的基本方法有以下几种：①拉长电弧，以减小电场强度；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将电弧挤入绝缘壁做成的窄缝中，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，这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；而对于小容量继电器、主令电器等，由于触头通断电流小，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、过电压和浪涌电压抑制器。

①桥式结构双断口灭弧（图 1－3）。这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，在断口中会产生电弧。电弧电流在两电弧之间产生图 1－3 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，它也具有将一个电弧分为两个而削弱电弧的作用。这种灭弧方法效果较弱，一般多用于小容量电器。但是配合栅片灭弧后，其也可用于大容量电器。交流接触器常采用这种灭弧方法。

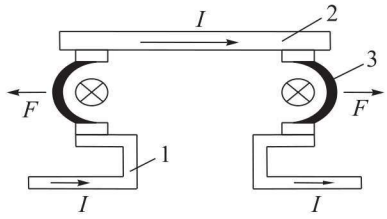


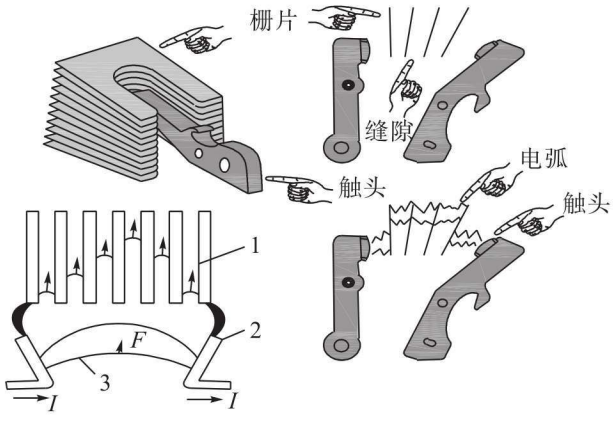
图 1－3　桥式结构双断口灭弧

1—静触头；2—动触头；3—电弧

②栅片灭弧（图 1－4）。灭弧栅一般由多片镀铜薄钢片（称为栅片）和石棉绝缘板组成，安放在电器触头上方的灭弧室内，彼此绝缘，片间距离为 2～5 mm。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 150～250 V 的绝缘强度，使整个灭弧栅的绝缘强度大大增加，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。

当触头上所加的是交流电时，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容易熄灭。另外，灭弧栅对交流电弧还有所谓的阴极效应，更有利于电弧熄灭。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（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向相反方向运动（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形成断流区，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 150～250 V 的电压。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。



（a）电弧进入栅片被分割　　（b）灭弧栅片和触头的结构

图 1－4　栅片灭弧

1—灭弧栅片；2—动触头；3—电弧

③磁吹灭弧。磁吹灭弧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，从而将电弧熄灭的，其原理如图1－5所示。图 1－5（b）中，导磁体（软钢）2 固定于薄钢板 a 和 b 之间，其上绕有磁吹线圈 1，线圈可与触头电路串联，主电流 I 通过磁吹线圈 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 1－5（a）中，“×”符号表示 Φ 方向为进入纸面。当触头打开时，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，电弧磁场方向为进入纸面，用“⊗”符号表示，它与线圈产生的磁场方向相同。这样，两侧的合成磁通就不相等，下侧大于上侧，从而产生强烈的电磁力，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的电流方向改变时，由于外磁场的方向也跟着改变，而电弧受力方向不变，灭弧吹力大小在设计时可以控制，可使吹力最大，则灭弧效果好。此外，由于这种灭弧装置利用电弧电流本身灭弧，因此电弧电流越大，吹弧能力越强，其被广泛应用于直流灭弧装置中（如直流接触器）。对于线圈与触头串联的形式，其吹力与电流二次方成正比，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。

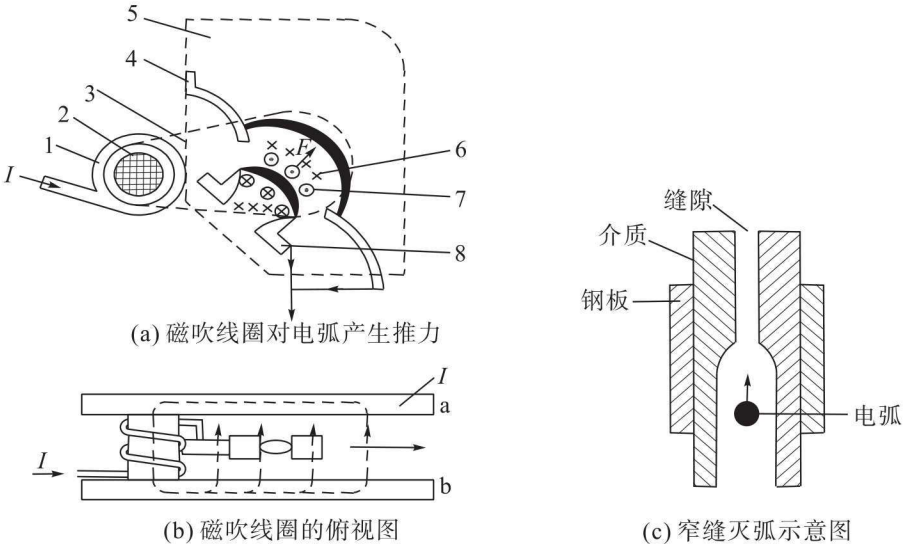


图 1－5　磁吹灭弧

1—磁吹线圈；2—导磁体（铁芯）；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

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，就会在触头间隙中产生较高的过电压，当此电压超过 270～300 V 时，就会在触头间隙产生火花放电现象。火花放电与电弧的不同之处是，火花放电的电压高，电流小，而且在局部范围内产生不稳定的火花放电。火花放电将使触头产生电灼伤，以致其寿命缩短。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：

a. 与线圈并联二极管的抑制电路，如图 1－6 所示。在触头 K 闭合时，线圈电感 L 中有稳定的电流。当触头突然打开时，由于二极管 VD 的存在，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被击穿。

b. 与触头并联阻容的抑制电路，如图 1－7 所示。在触头 K 突然断开时，线圈电感 L 的磁场能量就转变成为电容的电场能量，此时表现为对电容器的充电。因此，当触头突然断开时，线圈电感 L 的电流也不立刻降为零，而是随着电容器逐渐充满电荷而降为零，线圈不会产生过电压。

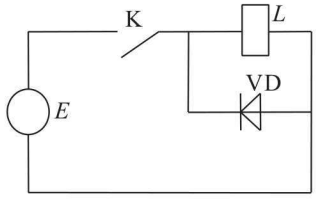


图 1－6　与线圈并联二极管的抑制电路

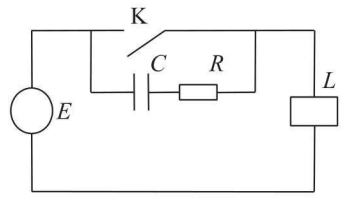


图 1－7　与触头并联阻容的抑制电路

二、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。

（一）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。磁路包括静铁芯、动铁芯和气隙。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 1－8 是几种常用电磁机构的结构形式。

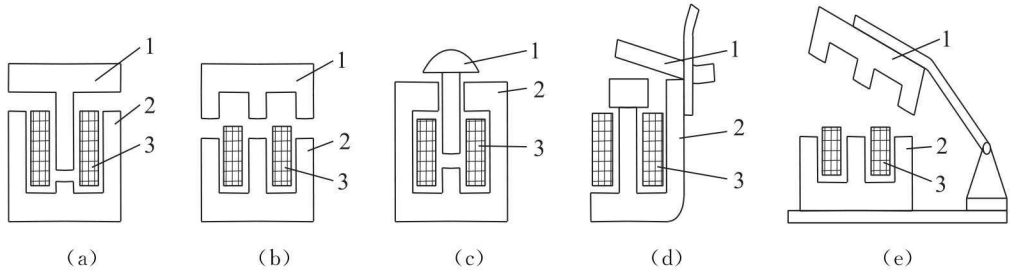


图 1－8　常用电磁机构的结构形式

1—动铁芯；2—静铁芯；3—线圈

图 1－8（a）（b）（c）是衔铁作直线运动的直动式铁芯，衔铁在磁力作用下作直线运动，这种结构主要用于中小容量交流接触器和继电器。

图 1－8（d）是衔铁沿棱角转动的拍合式铁芯，其衔铁绕静铁芯的棱角转动，磨损较小，铁芯一般用电工软铁制成，适用于直流继电器和接触器。

图 1－8（e）是衔铁沿轴转动的拍合式铁芯，其衔铁绕轴转动，铁芯一般用硅钢片叠成，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，当通以交流电时，为了减小因涡流造成的能量损耗和温升，静铁芯和衔铁用硅钢片叠成。对于直流电磁线圈，静铁芯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。

（二）电磁机构的工作原理

电磁机构的工作特性常用反力特性和吸力特性来表示。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；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。

（1）反力特性。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；二是利用衔铁自身的重力。

（2）吸力特性。电磁机构的吸力与很多因素有关，当铁芯与衔铁端面互相平行，且气隙 δ 比较小时，吸力的最大值可近似地按下式求得：

$$F_m = 4B^2S \times 10^5 \tag{1-1}$$

式中，F_m——电磁吸力的最大值（N）；

B——气隙磁通密度（T）；

S——吸力处端面积（m^2）。

在计算 F 时，可只考虑吸力的平均值，即 $F = 0.5F_m$。当端面积 S 为常数时，吸力 F 与磁通密度 B 的二次方成正比，也可认为 F 与磁通 Φ 的二次方成正比，而反比于端面积 S，即

$$F \propto \Phi^2/S \tag{1-2}$$

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。交流电磁机构励磁线圈的阻抗主要取决于线圈的电抗（电阻相对很小），则

$$U \approx E = 4.44f\Phi N \tag{1-3}$$

$$\Phi = \frac{U}{4.44fN} \tag{1-4}$$

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（1-4）可知，磁通 Φ 也为常数。由式（1-3）可知，此时电磁吸力 F 为常数，这是因为交流励磁时，电压、磁通都随时间作周期性变化，其电磁吸力也作周期性变化。因此，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 也与气隙 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。交流电磁机构的吸力特性如图 1-9 所示。

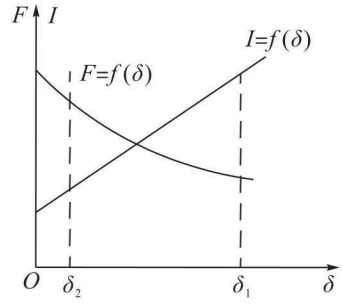


图 1-9　交流电磁机构的吸力特性

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 δ 而变化。根据磁路定律有：

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{NI}{\frac{\delta}{\mu_0 S}} = \frac{(NI)(\mu_0 S)}{\delta} \tag{1-5}$$