

工厂电气设备

主 编 张方庆

副主编 潘朝辉、严艳平、唐晓剑

主 审 徐天宝

上海科学技术出版社

第一章 电弧及触点的基本知识

第一节 电弧现象

各种电气设备、线路在发生短路时，短路点处会产生强烈的电弧，当开关电器切断有电流的电路时，只要触头间的电压高于 20 V、电流大于 100 mA，在触头间也会产生电弧。电弧就是电流流过气体介质的现象。开关电器在刚刚分离后，在触头间发生了电弧，就是电流从触头间流过，电路仍处于通路状态，只有当电弧彻底熄灭后，电路才真正断开。

电弧产生的条件很低，因此是电路断开过程中不可避免的现象。在正、负两个极间燃烧的电弧可分成三部分，如图 1-1 所示：靠近负极一个极小的距离称为阴极区，靠近正极附近极小的距离称为阳极区，阴极区和阳极区之间叫弧柱区，其尺寸随电弧的长短而变。弧柱区发光强，温度很高，弧柱



图 1-1 电弧示意图

的温度在 6 000℃ 以上。而阴极区与阳极区由于受到电极传导散热等原因的影响，温度较低，但在阴极区与阳极区的个别点上温度特别高，特别明亮，叫做阴极斑点与阳极斑点。此外，电弧是正在导电的气体，质量小，容易变形，能迅速移动。如果在开关电器内电弧长久不熄灭，就会造成烧坏触头和触头附近绝缘的后果，并延长了断路时间，甚至使油断路器内的油不断汽化，压力不断增加，引起爆炸。我们研究电弧的目的，在于了解电弧的形成过程、特性和熄灭电弧的方法。

第二节 电弧的形成和特性

电弧是气体导电的现象，气体在正常条件下是绝缘介质，虽然气体的原子内也有电子存在，但这些电子受原子核中正电荷的吸引，只能在围绕原子核的轨道上运动，成为束缚电子，不能起导电作用。要导电必须有大量的带电粒子作定向运动。下面分析带电粒子，其实主要是自由电子的出现过程。

一、自由电子的来源

1. 热电子发射

高温的阴极表面能够向四周空间发射电子。当开关电器的触头分开时，触头间的接触压力及接触面积逐渐减小，接触电阻增大，触头分离到最后只剩下几处点接触，电流流过时使这些点急剧发热、温度升高而发射电子，这叫热电子发射。在显像管中就利用了热电子发射现象。

2. 强电场发射

当阴极表面的电场强度很大时，金属内部的自由电子在电场力的作用下也能被拉出来，这

就是强电场发射。当开关电器的动静触头刚分开、距离极小时,即使在低压电路中,触头间的电场强度 $E=U/d$ 仍可达到极大的数值,电场强度超过 $10^5 \sim 10^6$ V/cm 时,就有显著的强电场发射现象。

二、碰撞游离产生电弧

触头间的自由电子,在电场的作用下,向着阳极加速运动,能量逐渐增加,并在运动的过程中,不断地与其他中性粒子(原子或分子)发生碰撞。若运动着的自由电子具有足够大的动能时,则能从中性粒子中打出一个或几个电子,使中性粒子游离,形成自由电子和离子。这种现象称为气体的碰撞游离,又叫电场游离。新形成的自由电子也以高速向阳极运动,当碰撞其他中性粒子,又将产生碰撞游离。这样连续发生碰撞,使介质中带电粒子大量增加,弧隙中的电导逐渐增大,当碰撞游离达到一定强度,带电粒子累积到一定数量时,介质的导电性质发生改变,由绝缘体变成了导体,在外加电压的作用下,电流流过触头间的间隙,发生刺眼的白光,产生电弧,这种现象称为介质的击穿。使触头间介质击穿的外加电压,称为破坏性放电电压。

三、电弧中的物理过程

电弧产生以后,其中的物理过程主要有热游离、产生等离子体和去游离。

1. 热游离

静止气体中的各种粒子,如分子、原子、自由电子等,都处在不断的热运动中,这些粒子热运动的速度不同且无一定的方向。气体温度越高,热运动的平均速度越大,粒子的平均动能也越大。当气体温度升高,使粒子的动能超过一定值时,粒子相互碰撞,也可以使中性粒子分成自由电子和正离子,发生游离现象,称为气体的热游离。

电弧稳定燃烧时,弧柱的温度很高,电弧电压或弧柱的电场强度很低,因此,弧柱中的自由电子主要依靠强电场发射、热电发射和碰撞游离产生,碰撞游离还产生正离子。在碰撞游离达到一定强度产生电弧以后,产生导电粒子、维持电流通道的的是热游离。这时电弧电压降低,弧柱中的电场强度小,电场游离不起作用。

2. 产生等离子体流

当电弧电流和电弧强度大于一定数值时,在电弧产生 $1 \sim 2 \mu\text{s}$ 后,就产生等离子体流。凡是由正负带电粒子所构成的物质聚集状态,只要正负电荷数目足够多且大致相等就称为等离子体。它是物质除气态、液态、固态以外的第四态。等离子体流(或称等离子流)是由于电弧受其自身的电磁力压缩而产生的;当电弧移动、碰到绝缘板或金属板,如电弧进入具有灭弧栅的灭弧室受到压缩时,也会产生等离子体流;电弧的阴极斑点和阳极斑点由于其温度达到电极材料的沸点,会向弧内喷射电子、电极材料的正离子和中性粒子,形成一股等离子体和金属蒸气的混合气流,一般也统称为等离子体流,现已公认等离子体流对电弧的燃烧和熄灭有很大的影响。

等离子体流运动的方向垂直于电极表面,其中粒子的运动速度可达 $10^3 \sim 10^4$ m/s,随着与电极间距离的增大而减小。等到离子体流遇到固体障碍物时,将被反射而改变运动方向。等离子体流集中了大量能量,它的温度比弧柱中其余部分的温度高。电弧的燃烧和熄灭在很大程度上与等离子体流的运动方向有关,若两极产生的等离子体流是面对面运动,则能量聚集在

弧隙中,使燃弧容易。相反,如果等离子体流运动方向是离开弧隙,并将能量从弧隙中带出,则燃弧变为困难。等离子体流的这一特点,已对电器的结构产生了影响。

3. 去游离

在电弧中,介质的中性粒子经过热游离变成带电粒子,阴极斑点与阳极斑点喷射出等离子体流。与此同时,电弧中还存在相反的过程,即电子与离子消失的过程,这称为去游离。

去游离过程包括复合和扩散两种形式。

(1) 复合 复合又叫再结合,复合是正负离子互相接触时,交换多余的电荷,成为中性粒子的现象。由于电子运动的速度约为离子运动速度的 10 000 倍,所以电子与正离子直接复合的可能性很小。在电弧内,复合是借助中性粒子进行的。首先,是能量较低的电子碰撞中性粒子时,附着在中性粒子上而形成负离子,然后再与正离子结合成中性粒子。带电粒子复合时要以光能形式放出能量,这正是电弧发出刺眼强光的原因。

复合也发生在与电弧接触的固体介质表面。较活跃的分子首先使表面充电到某一负电位,此时负离子和自由电子从这附近被排开,正离子则被吸引到表面上而失去电荷。

复合进行的快慢与电场强度有关,电场强度愈小,离子运动的速度就愈小,复合的几率就愈大。所以在交流电弧中,当加于电弧两端的电压接近零值的瞬间,复合进行得特别强烈。另外,复合的快慢还与电弧的温度和截面积有关,温度愈低,截面愈小,复合就进行得愈强烈。

(2) 扩散 扩散是弧粒中的自由电子及正离子从弧粒的内部逸出,进入周围介质的一种现象。弧隙中发生扩散的主要原因是电弧与周围介质的温度相差很大,以及电弧内和周围介质中的离子浓度相差很大。扩散出去的带电粒子在周围介质中进行复合,扩散使得弧柱内带电粒子减少,有助于电弧的熄灭。

电弧中去游离的强度,在很大程度上决定于电弧燃烧的介质的特性,如气体介质的导热系数、介质强度、热游离温度和热容量等。若上述各项数值越大,则去游离过程越强烈,电弧越容易熄灭。氢气具有良好的灭弧性能,水蒸气、二氧化碳和空气次之。国产新型六氟化硫高压断路器,采用 SF_6 气体为灭弧介质,具有很高的介电强度和优良的灭弧性能,使断路器的开断电流大,几何尺寸小。

电弧在气体介质中燃烧时,气体介质的压力对电弧去游离的影响也很大。气体的压力愈大,则单位体积中的粒子数量愈多,粒子间的距离就愈小,使复合加强。因此,增加气体介质的压力,电弧就容易熄灭。

触头的材料对去游离也有一定的影响,触头应采用熔点高,导热系数和热容量大的耐高温金属,以减少热电发射和电弧中的金属蒸气。

电弧的熄灭,取决于电弧中游离和去游离的过程,若热游离强度大于去游离强度,则电弧电流增大;如果两者相等,则电弧电流维持不变;若去游离强度大于热游离强度,则电弧电流减小,使电弧熄灭。因此,要熄灭电弧,就必须加强去游离,并使去游离强度大于热游离强度。至于等离子体流,可以利用它的特性促进电弧的熄灭。

四、电弧的特性

电弧电气方面的特性,除上述部分以外,还从以下两方面加以描述。

1. 电弧电压沿电弧长度分布

当电弧电流不变,电弧稳定燃烧时,电弧电压沿电弧纵向长度的分布如图 1-2 所示。

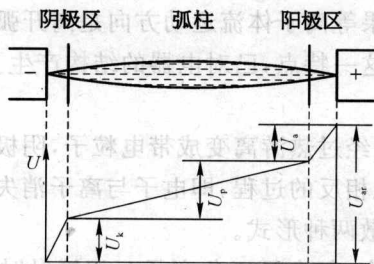


图 1-2 电弧电压沿弧长的分布

电弧两端的电压 U_a 由三部分组成,即阴极电压降 U_k 、弧柱电压降 U_p 和阳极电压降 U_a 。

阴极电压降就是电弧电流在阴极区的电压降。阴极区的范围很小,在大气中约为 10^{-4} cm,阴极电压降的大小,决定于电极的材料及电弧在其中燃烧的介质,一般约为 $10 \sim 20$ V,阴极附近的电位梯度为 $10^5 \sim 10^6$ V/cm,此值的大小与电弧电流无关,其原因是在阴极区内电子较少——一部分电子从阴极发射出来后,获得高速度离开阴极区;还有一部分从阴极出来后,立即与正离子结合。而运动速度缓慢的正离子则集中在阴极区域内,成为正空间电荷,形成集中的电场,致使阴极区内电位梯度高,电压降相对较大。

阳极电压降和阴极电压降相似,但一般小于阴极电压降,而且阳极电压降的变化较大,在很大程度上决定于电弧电流的大小,当电流很大时,阳极电压降接近于零。

弧柱电压降是电弧电流在弧柱上的压降。弧柱温度沿其轴向和径向是不同的,弧柱的直径沿全长也不相同,除靠近电极部分温度较低、直径较小外,当电弧较长、在灭弧介质吹弧的情况下也可能出现弧柱某些部分温度较低或直径较小的情况。因此在弧柱中,热游离的强度并不是处处相等的,电位梯度与电压降沿弧柱的分布并不完全相同。

弧柱电压降的大小在短弧与稀薄弧中是不同的。在几个毫米长的短电弧中,弧柱电压降很小,电弧电压主要由阴极和阳极电压降组成。阳极和阴极区的上述现象对整个电弧的特性起决定作用。

长度为几厘米以上的电弧,通常称为长弧。它的电压主要由弧柱电压降组成,阴极和阳极的压降相对较小,可以忽略不计。当电弧稳定燃烧时,认为沿弧柱全长热游离与去游离都是平衡的,即弧柱区内单位长度上的正、负电荷大约相等,因此沿弧柱的电位梯度为一常数,电弧电压降正比于电弧长度。

高压断路器中的电弧绝大多数是长电弧,电弧的长度随触头分开的距离不同而有所不同。

2. 电弧的伏安特性

电弧电压随电弧电流而变化的关系叫电弧的伏安特性。

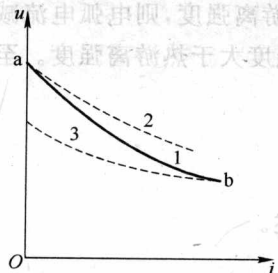


图 1-3 直流电弧的伏安特性

(1) 直流电弧的静态伏安特性曲线 某固定长度的直流电弧燃烧的伏安特性叫做电弧的静态伏安特性,一般简称伏安特性,如图 1-3 曲线 1 所示。图中曲线 1 上的每一点,都表示该固定长度的电弧稳定燃烧时,电弧电流与电弧电压间的固定关系。电弧电流加大,电弧电压下降。这是因为电弧电流加大时,热游离加剧,导电粒子增多,电弧导电能力加强,电弧电阻下降的结果。这说明电弧电阻是非线性的。伏安特性曲线与纵轴相交处的电压值称为发弧电压,加在电极两端的电压低于此值,就不能产生电

弧。电弧的长度、弧隙中不同的介质以及压力等因素都对静态伏安特性有影响,能使曲线上移或下移。

(2) 交流电弧的伏安特性 交流电路中,电流的瞬时值不断地随时间而变化,每半周过零点一次,电流变化很快,弧柱热惯性作用较大,电弧电压与电弧电流的关系要用动态伏安特性表示。工频交流电弧的动态伏安特性曲线如图 1-4 所示,随着正半周电弧电流的加大,电弧电压下降;而电弧电流达到最大值后逐渐减小,电弧电压对应的逐渐加大,但又不循原来的曲线回复,而是在此数值上比电流加大时的电弧电压低。当电流方向相反时,又类似地重复。图 1-4(a)中 A 点为燃弧电压, B 点为熄弧电压,熄弧电压在电流过零的附近。

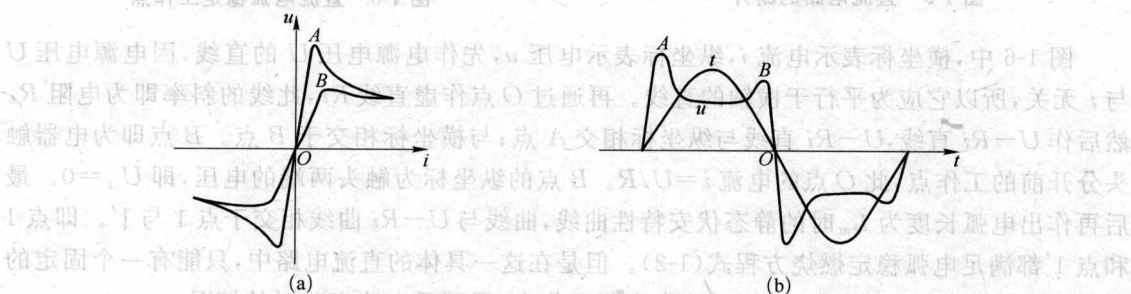


图 1-4 交流电弧伏安特性和电流、电压波形

(a) 交流电弧的伏安特性; (b) 交流电弧的电流、电压波形

而燃弧电压高于熄弧电压是因为电弧有热惯性,电流减小时温度下降,但热游离还没完全停止;去游离虽然加强,但赶不上电流的变化。即电流在变化过程中电弧的电阻大于电流减小过程中的电阻,故电弧电流从最大值减小时伏安特性曲线稍低。

第三节 直流电弧的熄灭

一、直流电弧的工作点

在直流电弧的伏安特性曲线上,每一点都能稳定燃烧。即是当弧长固定,其他燃弧条件(如弧隙中的介质等)固定时,某一电弧电流必然有相应的电弧电压,这就是电弧的工作点。本节讨论在具体电路中,怎样确定电弧的工作点,进而了解怎样减小电弧电流,熄灭直流电弧。

直流电路断开时如图 1-5 所示,即直流电源电压 U ,电阻 R 、电感 L 及代表开关触头的燃弧间隙。

当触头闭合时,电路稳定工作,则电流为:

$$I = U/R \quad (1-1)$$

当开关电器开断时,触头间产生电弧,弧长为 L_{ar} ,电弧电压为 U_{ar} ,则电弧稳定燃烧方程为:

$$U = Ri_{ar} + U_{ar} \quad (1-2)$$

或

$$U_{ar} = U - Ri_{ar}$$

在这两种稳定工作状态,电路中的 L 都相当于短接。画出对应于弧长 L_{ar} 的伏安特性曲线如图 1-6 所示,根据式(1-1)与式(1-2),就可以确定直流电弧的工作点。

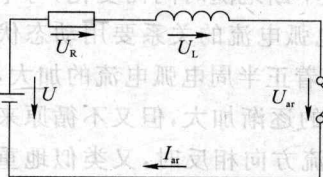


图 1-5 直流电路的断开

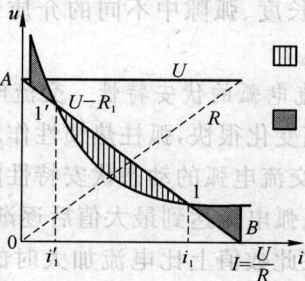


图 1-6 直流电弧稳定工作点

图 1-6 中,横坐标表示电流 i ,纵坐标表示电压 u ,先作电源电压 U 的直线,因电源电压 U 与 i 无关,所以它应为平行于横轴的直线。再通过 O 点作虚直线 Ri ,此线的斜率即为电阻 R 。然后作 $U-Ri$ 直线, $U-Ri$ 直线与纵坐标相交 A 点;与横坐标相交于 B 点。 B 点即为电器触头分开前的工作点,此 O 点的电流 $i=U/R$ 。 B 点的纵坐标为触头两端的电压,即 $U_{ar}=0$ 。最后再作出电弧长度为 L_{ar} 时的静态伏安特性曲线,曲线与 $U-Ri$ 曲线相交于点 1 与 $1'$ 。即点 1 和点 $1'$ 都满足电弧稳定燃烧方程式(1-2)。但是在这一具体的直流电路中,只能有一个固定的电流,即只能有一个工作点,为了要确定实际工作点,需要看电流变化时的情况。

当电路中电流稍有变化,离开点 1 或点 $1'$ 时,电路中将产生自感电势,以电压降 $L di/dt$ 表示,于是可写出方程:

$$U = Ri + (L di/dt) + U_{ar}$$

或

$$L di/dt = (U - Ri) - U_{ar} \quad (1-3)$$

若电弧燃烧在点 $1'$,当电流稍有减小时,由图 1-6 知 $U-Ri < U_{ar}$,表示电源电压不足以维持稳态电压 U_{ar} 与电阻压降,电流将继续减小,直至电弧熄灭。就式(1-3)而论,就是 $L di/dt < 0$,点 $1'$ 以左都是 $L di/dt < 0$,电弧都要熄灭;反之,当电弧电流稍有增大时,由图知 $U-Ri > U_{ar}$,电源电压 $U > Ri + U_{ar}$,电流将继续增大至点 1 ,即式(1-3)中 $L di/dt > 0$ 。在点 $1'$ 与 1 之间,都是 $L di/dt > 0$ 的区域。只要电流进到 $L di/dt > 0$ 的区域都要到点 1 。若电弧燃烧在点 1 ,电流稍有减小进入 $L di/dt > 0$ 的区域,也要回到点 1 燃烧,在点 1 右边也是 $L di/dt < 0$ 的区域,电流增大进入此区时,由于 $U-Ri < U_{ar}$,电源电压也不足以维持稳态电弧电压及电阻压降,电流将减小回到点 1 。由此可知,点 1 是稳定燃烧工作点。

二、直流电弧的熄灭

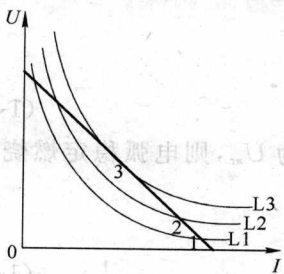


图 1-7 直流电弧在电弧长度不同工作点的移动

由上面的讨论得出直流电弧的熄灭条件为 $L di/dt < 0$,或

$$U_{ar} > U - Ri$$

由上节可知,电弧长度增大时,伏安特性曲线将上移。随着开关(断路器)触头的不断分开,电弧逐渐加长,伏安特性曲线不断上移,如图 1-7 所示。电弧工作点也不断随着左移,电弧电流逐渐减小,电弧电压 U_{ar} 不断提高。当工作点移至 3 时,达到临界状态,电弧稳定燃烧方程仍然满足。

很明显,当触头继续分开,电弧长度超过 l_3 ,电弧的静态伏安特性曲线与直线 $U-Ri$ 已无交点,不能满足电弧稳定燃烧方

程式 $U_{ar}=U-Ri$ 时, 电弧不能燃烧。电流减小到零, 电弧熄灭。

这样, 只要伏安特性曲线在 $U-Ri$ 的上面, Ldi/dt 永远为负, 电弧就要熄灭。降低电压 U , 加大电阻 R 和拉长电弧都能达到电弧熄灭的目的。最常见的措施是拉长电弧。

电弧熄灭过程中, 总要产生自感电动势。若此数值太大就会危及设备的绝缘。断路器的动作时间太短, 灭弧能力太强, 都能使电弧电流急剧减小到零, 产生过高的电压, 故在直流电路中不使用灭弧能力很强的断路器。

第四节 交流电弧的熄灭

一、交流电弧的特点

在交流电路中, 电流瞬时值的大小和方向随时间变化, 当电弧电流大小变化时, 电弧的温度、直径也随着发生变化。当电流方向改变时要过零, 这时电弧自然熄灭。电流过零后, 电弧可能又重燃, 电流又反向增大。因此, 对交流电弧来说, 电弧能否熄灭, 全看电流过零后, 电弧是否重燃, 若重燃, 则等待下一次过零。

二、交流电弧在电流过零时的特性

交流电弧在电流过零期间的特性比较复杂, 现简单分析如下:

1. 热游离与去游离

交流电弧的熄灭, 在原理上与直流电弧相同, 当电弧间隙的去游离强度大于热游离强度时, 电弧才能熄灭。电弧在燃烧时, 弧柱温度沿其轴向和径向是不相同的, 弧柱直径也不是处处一样, 在长弧、并有灭弧介质吹弧的情况下, 除靠近电极部分温度较低、直径较小外, 由于吹弧作用不完全均匀, 也可能出现弧柱的某一部分温度较低或直径较小的情况。这样当电弧电流过零期间, 在整个电弧的温度下降、直径变细、热游离减弱过程中, 弧柱的某一部分可能首先被冷却到热游离的温度以下, 热游离停止, 去游离特别强烈, 因而这一部分气体就形成一绝缘薄层, 电导变为零。由于电弧电流的大小、灭弧介质吹弧速度、电极材料等因素的不同, 形成绝缘薄层的时刻可以发生在电弧电流过零之后, 也可在电弧电流过零之前。

2. 弧隙介质电强度的恢复与恢复电压

(1) 等值电路图 断路器断开交流电路, 触头间产生电弧, 在电流过零期间的等值电路如图 1-8 所示。

图中电容 C 为电流过零、电弧熄灭时在触头间的等效电容, 电弧电压 U_{ar} 与电容两端的充电电压相等。断路器开断的电流 I_{ar} , 可以根据三种理想情况下的电流进行分析: 纯电阻性电流、纯电感性电流和纯电容性电流。这分别相当于断路器断开纯电阻负载, 且负载电阻比电路电感大得多, 断开短路电路, 空载长线路跳闸。

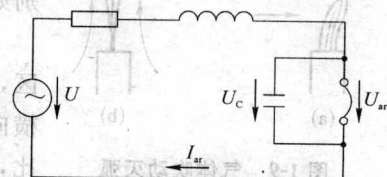


图 1-8 交流电路的断开

(2) 弧隙介质电强度的恢复 介质能够承受而不致产生放电现象的临界电压, 叫介质电强度, 又叫耐压强度或弧隙介质的击穿电压。如前所述, 当电流过零期间, 可能在弧柱的某一部分首先停止热游离, 强烈的去游离形成绝缘层, 从而有了一定的电强度, 称为初始介质电强

度。当断开的电流较小时,绝缘薄层往往在阴极区产生,数值为 $150 \sim 250 \text{ V}$,这称为近阴极效应。弧隙有了初始介质电强度以后,随着触头的不断分开,弧隙加长,弧隙的介质电强度要不断的增大,此外,介质电强度还与介质种类、灭弧装置的构造等有关。

(3) 弧隙的恢复电压 电弧电流未过零前,触头间的电压为电弧电压,电弧电阻不大,电弧电压很低,电源电压大部分降落在线路电抗上。当电流过零,电弧熄灭后,电源电压加在弧隙两端,称为恢复电压,它有不同的变化过程:

① 当电源电压与电流的相位相差很小,电流为零时,电源电压过零,弧隙的恢复电压沿电源电压上升。

② 电源电压的相位超前电流时,电流过零、电弧自然熄灭时,电源电压达最大值。但弧隙的恢复电压不会立即变到电源电压的最大值,因为正如图 1-8 的等值电路图所示,在弧隙两端有并联的等值电容。电容两端的电压不能突变,故恢复电压是按上升后经过振荡再回到电源电压,即产生了过电压。在这种情况下,电弧彻底熄灭时间可能延长。为了减轻断路器的工作负担和降低熄弧时的过电压,有的超高压断路器在触头间并联电阻,以使恢复电压为非周期性的。

3. 交流电弧的熄灭

综上所述,交流电弧在电流过零、电弧熄灭后是否重燃,取决于介质电强度的恢复与恢复电压的增长两者间的比较。必须要介质电强度高于恢复电压,电弧才不重燃。

以上讨论的是电流某一次经过零值后,电弧是熄灭还是重燃的情况。不过,由于断路器触头在不断分开,触头间的介质电强度一次比一次增长更快,而恢复电压的增长速度不如介质电强度的变化大,所以电流过零,一次比一次更容易满足电弧不重燃的条件,交流电弧将在电源某一次过零时熄灭,不再重燃。

第五节 熄灭电弧的其他方法

根据电弧中物理过程与特性,在高压断路器中,设有专供灭弧用的灭弧室;在低压电器中也设有灭弧栅。在开关电器中,加速电弧熄灭的基本方法主要有以下几种:

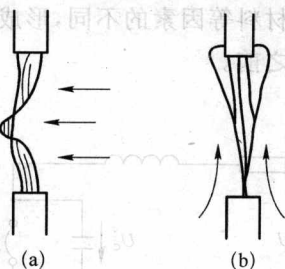


图 1-9 气体吹动灭弧

(a) 横吹灭弧; (b) 纵吹灭弧

1. 利用气体吹动灭弧

在采作气体吹动电弧加速熄弧的方法中,按照气体吹动方向的不同,可分为纵向吹动(简称纵吹)和横向吹动(横吹)两种,分别如图 1-9 所示。

采用横向吹动灭弧时,使未游离的低温气体穿过弧柱中心区,吹动的气流带走大量的电质点和热量,形成强迫扩散和降温;横向吹动电弧的另一个作用是拉长电弧,增大电弧周长与截面之比,同样加强复合与扩散。采用此方法时,因明显提高电弧的弧隙击穿电压而使电弧加速熄灭。

采用纵向吹动灭弧时,未游离的低温气体将沿着弧柱的表面逐渐向弧柱中心区深入,气流同样会带走许多带电质点和热量,形成强迫扩散和降温,同样明显提高电弧的弧隙击穿电压,达到较好的灭弧效果。在相同的工作条件下,纵吹灭弧较横吹灭弧效果要差一些。

利用气体或油气混合物吹动电弧是加速电弧熄灭的基本方法之一,它广泛地应用于高压断路器。吹弧的气体介质可用压缩空气、 SF_6 气体,或者用绝缘油、固体有机介质在电弧高温

下产生的气体。

2. 采用多断口灭弧

在高压断路器中,将一相触头的断点制造成两个或多个串联的断口。当断路器断开时,多断点同时断开,加速电弧熄灭,如图 1-10 所示,该方法称为多断口灭弧。当一相断路器触头选用 n 个断点时,在断路过程中形成 n 个电弧相串联的燃弧方式。在外电路条件不变的情况下,加至每个断口上的电压仅为每相为单断口的 $1/n$,显然,采用多断口灭弧是利用降低每个断口的恢复电压达到加速熄弧目的的方法。多断口灭弧适用于加速高压长弧的熄灭。每相断口较多时(如每相断口为 4~6 个),为使每个断口上的恢复电压均匀一致,常在各个断口上并联接入容量相同的高压电容器进行均压(其电容量一般为 1 000~2 000 pF),断口上并联接入均压电容后,一般能保证各个断口的实际电压值与均匀分布电压值之差小于 10%。

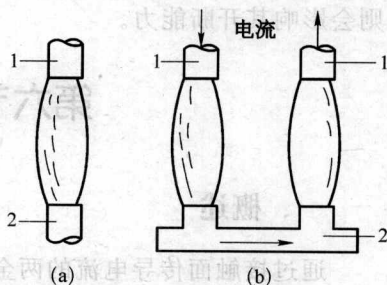


图 1-10 多断口灭弧

(a) 每相单断口; (b) 每相双断口

1—静触头; 2—动触头

3. 利用电弧与固本介质接触灭弧

当电弧与石英砂、瓷、石棉、水泥等耐高温的固体介质接触时,固体介质表面的带电质点使电弧的复合速度大大加快,并能加速降温,这种加速熄弧的方法称为利用电弧与固体介质接触灭弧。利用电弧与固体介质接触灭弧的方法,主要适用于 10 kV 及其以下的高压断路器、低压开关和有填料的熔断器之中。

4. 将电弧分为多个串联的短电弧灭弧

将电弧分为多个串联短电弧,加速电弧熄灭的方法又称之为金属灭弧栅灭弧。利用金属灭弧栅加速熄弧,是低压开关中常用的熄弧方法之一。

利用金属灭弧栅加速熄弧的示意图如图 1-11 所示。动、静触头之间产生电弧时,电弧 5 恰好处于金属栅片的下部[图 1-11(b)中的位置 A]。这时弧柱轴线位置与钢质的金属栅片 2 垂直,弧电流在弧柱周围的磁感应线途经磁阻最小的路径构成回路,因此电弧在金属栅片的开口处不断上移,直到电弧抵达金属栅片上方[图 1-11(b)中的位置 B]才停止移动。这样,原有的一个电弧被多个金属栅片分为多个串联的短电弧。当电弧被金属栅片分为多个串联的短电弧之后,弧电流再次经过零值时所有短电弧几乎同时熄灭。电弧暂时熄灭之后,低压外电路加到每个短电弧的恢复电压远小于近阴极效应所要求的 150~250 V 击穿电压。因此,在多个串联短弧形成以后,当弧电流再一次过零值时,电弧便会彻底熄灭。

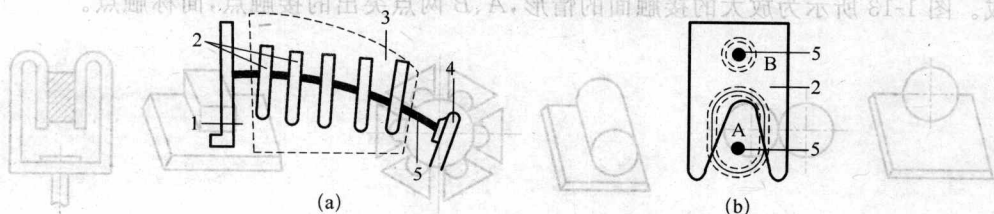


图 1-11 利用金属灭弧栅熄弧

(a) 灭弧栅示意图; (b) 灭弧栅片

1—静触头; 2—金属栅片; 3—灭弧罩; 4—动触头; 5—电弧区

金属栅片是用钢板冲压制成的,为了防止金属栅片腐蚀,在其外表面镀铜。运行中金属栅片与灭弧罩在电弧高温作用下会逐渐损坏,当金属栅片和灭弧罩损伤严重时,要及时更换,否则会影响其开断能力。

第六节 电气触头的基本知识

一、概述

通过接触面传导电流的两金属导体的端接部分称为电气触头或简称触头。

根据工作情况及在电路中的作用,触头可分为以下三大类:

(1) 固定触头 采取接触联接的两金属导体的端接部分相对固定不动,如母线的联接、载流导体和设备的联接等。这类触头的作用是安全可靠地传送工作电流和短路电流,并在必要时为电气联接的装、拆提供方便。

(2) 可动触头 触头的两部分(即动触头和静触头)可以相对运动,但始终不脱离接触,如电机中的滑环与电刷。可动触头的作用是在动、静触头相对运动的接触面之间安全可靠地通过长期工作电流和短时的短路电流。

(3) 可断触头 由静触头和可以操动的动触头两部分组成,在工作中可以分断和关合。其作用不但在关合时要安全可靠地通过长期工作电流和短时短路电流,而且在必要时要安全可靠地分断和关合电路。并根据其分断和关合时所起的作用,又可分为:① 不带电流分断和关合的可断触头;② 可带负荷电流分断和关合的可断触头;③ 可带短路电流分断和关合的可断触头。显然,后两种尤其是第③种可断触头是在最困难的条件下进行工作的。

二、触头的接触电阻和接触机理

触头是电气装置中的要害部分,对装置的工作可靠性具有重大的影响。运行经验表明,如果触头工作状况不良,常会发展为严重的事故。这种事故开始都表现为触头的过热,如果未及时发现和处理,将会发展成触头烧毁、拉出电弧和飞弧短路,最后使事故扩大。最能反映触头工作状况的参数是接触电阻 R 。它是触头接触面之间发生的电阻。触头在运行中的发热就是电流 I 在接触电阻 R 上的功率损耗,即 $I^2 R$ 。

触头的接触形式通常分为点接触、线接触和面接触三种,如图 1-12 所示,但根据微观分析,无论何种接触形式,都具有或大或小的接触面,而这些接触面或多或少由一些突出的接触点构成。图 1-13 所示为放大的接触面的情形, A 、 B 两点突出的接触点,简称触点。

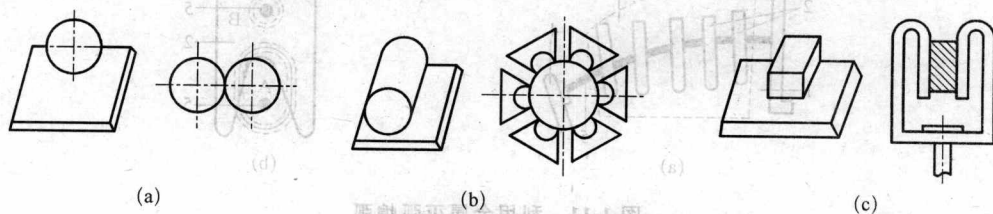


图 1-12 触头的接触形式

(a) 点接触; (b) 线接触; (c) 面接触

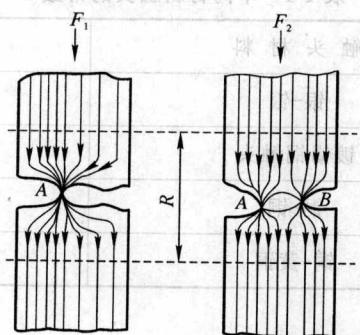


图 1-13 不同接触压力时触头的微观接触情况

1. 微观触点的接触电阻分析

当单个触点受到接触压力 F_1 时,尖端将被压平成一小小的联接面即触点。两导体中的电流经触点收缩传导,附近的电流密度很大,形成接触电阻。理论上单个触点的接触电阻应为

$$R = C_1 / \sqrt{F_1} \quad (1-4)$$

式中: C_1 为常数,决定于触头材料及表面覆盖层情况。

若接触面有 n 个触点并联,假定总接触压力 F 平均分配在 n 个触点上,得每一触点的接触压力为 F/n ,接触电阻 $R' = C_1 / \sqrt{(F/n)}$,则 n 个触点的并联电阻为

$$R = R' / n = C_1 / \sqrt{nF} \quad (1-5)$$

在平板触头中,当接触压力不断增加时,原接触的突出点被压扁,新的突出接触点不断形成,故触点的数目不断增多,如图 1-13 所示。一般认为,在平板触头中,触点的数目与接触压力成正比,即 $n = aF$, a 决定于触头材料硬度与表面加工情况。按触点间平均分配压力计算,接触电阻为

$$R = C_1 / \sqrt{(Fn)} = C_1 / \sqrt{(aF^2)} = C_2 / \sqrt{F} \quad (1-6)$$

式中: $C_2 = C_1 / \sqrt{a}$, 综合决定于触头材料(硬度与导电率)及接触面状况(加工与覆盖层)。

2. 触头接触电阻的实际变化规律

根据上述微观接触的理论分析及实验总结,对于各接触形式的触头,其接触电阻可概括为下式:

$$R = C / \sqrt{F^m} \quad (\Omega) \quad (1-7)$$

式中 F —— 接触压力(kg);

m —— 决定接触形式的指数,取 0.5~1,对点接触取小值,对面接触取大值,一般取中间值;

C —— 常数,决定于触头的材料。接触面加工状况和接触表面覆盖层情况。材料硬度愈小,电阻率愈小, C 值愈小;接触面加工平整和适度粗糙的(主要对面接触而言), C 值小;表面覆盖氧化层或其他固体不良导电层的, C 值急剧增大。接触面加工良好、表面未被明显氧化的不同触头的常数 C 可按表 1-1 取值。

表 1-1 不同材料触头的常数 C

序 号	触 头 材 料	$C(\times 10^{-4} \text{ kg}^m \cdot \Omega)$
1	银-银	0.6
2	镀锡铜触头	0.7~1
3	铜-铜	0.9~1.4
4	铜-黄铜	3

三、触头在长期负载电流下的工作

1. 触头的长期工作温度

由于触头存在接触电阻 R , 所以有负载电流 I 流过时, 接触面会发热(发热功率为 $I^2 R$), 引起触头温度升高, 并向周围介质散热和通过导体传热。当发热等于散热时, 触头即稳定于工作温度。因发热与电流的平方成正比, 相对来说在大电流下限制工作温度值比较困难。由于接触部分的实际形状复杂, 发热和散热都无法准确计算, 故工作温度值一般要通过实验测定, 以下是降低工作温度和提高通流容量的途径。

① 保持稳定和必要的接触压力。在接触全过程中, 始终保持必要的接触压力是触头工作的根本。由式 1-4 可知, 增加接触压力可近似成倍地减小接触电阻。但对可断触头同时也增加其操作功, 加重触头的磨损, 并影响操作速度。过大的压强甚至可能使触头材料产生非弹性变形。故过分增加接触压力是不可取的。

② 采用具有优良接触性能的触头材料和覆盖层。对触头材料的要求是导电导热性能好、硬度低而强度高。对覆盖层除上述要求外还应有抗氧化的能力。铜是良好的触头材料; 银的氧化层结构细密, 而且是良导体, 故银是极好的覆盖层材料。

③ 增加触头的散热面积和改善散热条件。在相同的接触条件下, 增加触头的尺寸对散热有利; 在绝缘油中的触头比空气中的冷却效果好。

④ 选择合适的接触形式。点接触的接触性能稳定可靠, 但压力和电流集中一处, 压强较大, 散热和传热较困难, 故通流容量较小。面接触的接触性能不稳定。接触面的加工和触头的装配状况对接触电阻有很大影响。但散热传热好, 可承受压力大, 故通流容量大。线接触则介于上述两者之间, 通常固定触头采用面接触。小容量可断触头采用点接触。容量大的可改用线接触, 或由多个点接触或多个线接触并联。可动触头可兼作上述各种接触形式。在大容量时, 不妨优先考虑结构较简单的面接触形式。

2. 触面氧化与恶性循环

金属氧化层几乎都是不良导体(银的氧化层除外)。接触面的氧化层对接触电阻影响极大, 可使接触电阻成 10 倍、100 倍地增长。使氧化层产生和变厚的主要原因是温度。实验证明: 当温度超过 80°C 以上时氧化层的生成明显加快加厚。这必然引起接触电阻增加和发热加剧, 于是触头温度进一步上升和发生更严重的接触面氧化, 从而出现所谓恶性循环, 最终导致触头的烧毁, 并进而引发电弧和短路事故。避免出现恶性循环(也就是防止接触面氧化)的途径是:

① 严格限制触头的长期工作温度是防止接触而氧化的最根本措施。对铝固定触头应小

于等于 70°C , 铜触头无论在空气或油中不宜超过 75°C 。

② 触头接触面镀银不仅可改善接触性能, 也能有效地防止接触再氧化, 一般可提高工作温度约 10°C 。

③ 某些可断触头和可动触头的接触面在工作中常相互摩擦而自动除去氧化层, 具有“自洁”的作用。

④ 在接触面涂抹中性凡士林油加以覆盖, 虽简单易行, 但有效期不长久。

⑤ 保护接触面不受化学腐蚀或电弧烧伤。

四、触头在短时大电流下的工作

通过触头的大电流, 主要指电路中的短路电流、电动机负载的起动电流和变压器的冲击励磁涌流等。其特点是电流大而时间短(一般不超过数秒钟)。由于发热及电动力均与电流的平方成正比, 故短时大电流给触头的工作带来一系列特殊问题, 分析如下。

1. 触头的熔焊和短时过热

当触头通过很大的电流值时, 瞬间产生的大热量难以及时传出而聚集在各触点附近, 可能使触点瞬间达到熔点而相互焊接(或粘接), 致使可断触头不能进行分断。使触头发生焊接的最小有效值电流 I_h 称为焊接电流, 根据试验有

$$I_h = K \sqrt{F} \quad (1-8)$$

式中 F ——通过短时大电流时, 作用在接触面上的实际接触压力(kg);

K ——常数, 决定于触头材料。例如对铜-铜触头 $K=4.1$; 对铜-黄铜触头 $K=3.8$ 。使用高熔点材料时 K 值显著增大。

因为触点的加热是很快的, 故焊接现象是在瞬间大电流下发生的, 大多出现在短路电流冲击前后。如果大电流未达到焊接值 I_h , 但经过稍长时间(例如 1s 以下)的发热和传热, 整个触头的温度会发生短时的急剧上升。可能使触头材料发生退火, 降低机械强度; 使弹性部件失去弹力导致触头丧失接触压力。因此, 对触头规定有短时发热最高温度限值, 对一般铜-铜触头最高温度限值为 300°C ; 对铝-铝固定螺栓联接发热最高温度限值约 200°C 。为此, 生产企业在试验的基础上规定各型触头允许的“热效应值”即 I^2t 或 $I/\sqrt{t}$ 值(I 为短时大电流有效值, t 为流通时间), 以限制触头的总发热量。

2. 触头接触面之间的电动力

由前述接触机理分析可知, 接触传电实际上是接触面内若干触点的传电。每个触点处的电流线收缩情况如图 1-13 所示。在两个相对的接触面上的电流方向相反, 产生相互排斥的电动力。当通过大电流时, 此力可达相当大的数值。它抵消触头的接触压力, 结果加重了触头的短时温升, 增加了触头焊接的危险性。

3. 触头在大电流下的关合和分断

某些可断触头需要带电流甚至带短路电流分合和分断, 这给触头的工作带来特别的困难。

(1) 触头的弹跳 当某些触头快速关合而相互冲击时, 因材料的弹性变形所产生的反弹力, 使触头间产生所谓弹跳现象, 可能造成触头瞬间丧失接触压力甚至瞬间分离, 当有大电流通过时将引起接触面剧烈的熔化和焊接。弹跳现象的发生与触头的结构型式和预压力的大小有关, 并随动触头关合速度的增大而增加。

(2) 触头的预压力和压缩行程 无预压力触头只能空载关合电路, 若带电流关合时, 在开

始阶段易造成触头熔焊,且弹跳现象严重。预压力对关合大电流的可断触头非常重要,不仅可保障关合电流初始时的接触压力,而且能有效地抑制弹跳现象的发生。

(3) 触头间的电弧 在可断触头关合过程中,当间隙缩小时会提前击穿发生电弧,这种关合电弧在快速合闸中燃弧时间很短,但若发生在工作接触面上也能造成触头损伤并增加焊接的危险性。在带大电流分闸时,即使有最好的灭弧装置,也必须采取措施保护好触头的工作接触面免遭电弧烧伤。相应措施大体上有以下几方面:

① 采用导电良好、高熔点的金属材料作触头,例如银-钨陶塑合金,将银和钨(或钼)的粉末混合特经高温高压熔合在一起,得到一种具有良好导电、耐弧、耐磨和防氧化的合金,适合作空气中的灭弧触头。在油中则可用铜-钨或铜-钼合金触头代替。

② 利用电磁力和热力将电弧引至接触面边缘或特制的弧角上,以保护工作接触面不被烧伤。

③ 采用专门的灭弧触头与工作触头并联,并让灭弧触头关合在前而分断在后,承受触头的关合电弧和分断电弧,使工作触头受到可靠保护。

五、触头的结构类型

常见触头主要有固定触头、可断触头、可动触头,各种触头结构除需满足上述有关接触性能、动热稳定和防氧化、耐电弧、抗熔焊、抗弹跳等要求外,还需保障结构可靠,便于调整、维修和更换。

1. 固定触头

按连接方法不同,固定触头主要有螺栓连接和压接两种。后者是根据在大压力作用下相互扩散的特性,使金属合为一体化。该法使用相应规格的压接模具,由压力机械或爆炸冲击施压成形。

2. 可断触头

可断触头的结构形式有对接式和插入式。

对接式触头其特点是结构简单,分断速度快,但关合时触头易发生弹跳,对接触面上的氧化物的自洁作用差,动热稳定性差,触头易遭损坏。动热稳定性差是由于触头间的触点少而集中,不易向外传热,加上接触面的分离电动力较大,故其触点熔焊和触头短时温升的危险性也较大。为减小弹跳需增大接触预压力至几十公斤甚至超过 100 kg。为了保障在行程改变或触头磨损后仍能维持稳定可靠的接触压力,触头需有适当的压缩行程(超行程),一般可取为 10~15 mm。对接式触头只适用于电流为 1 000 A 以下的情况。

插入式触头特点是接触电阻较稳定,所需接触压力较小,有自洁作用,无弹跳现象,触头磨损小,动热稳定度高。缺点是结构复杂,分断时间较长,分断功率较大。而闸刀形触头,是插入式触头中结构最简单的一类,广泛用于手动操作的各种高低压开关电器。而瓣式触头的静触头由多瓣独立的触片排列成圆圈。这种触头间电流主流为同一方向,产生的电动力能增加接触压力。该型触头易于与灭弧室相配合,广泛用于多种油断路器。而指式触头的一方为刀形,另一方为一对独立的触指,可根据电流的大小并列 4~9 对,额定电流可达 5~12 kA。指式触头不受额定电流大小的限制,动热稳定性好,但不易与灭弧室配合,在大型油断路器中只用作主触头,另需有灭弧触头和它并联。在新型隔离开关中也常采用。

3. 可动触头

可动触头也叫中间触头,用于供电给活动的受电器。例如电机的滑环电刷、行车的滑线装置、油断路器的滑动触头和可动触头。

复习思考题

1. 电弧中有些什么物理过程? 它们对电弧的燃烧或熄灭各起什么作用?
2. 电弧被拉长后为什么容易熄灭?
3. 交流电弧有什么特点?
4. 为什么用气体介质吹弧,电弧容易熄灭?
5. 多断口灭弧与将一个长弧变成几个短弧灭弧有什么不同?
6. 开关电器中有哪些熄灭电弧的方法?
7. 什么叫触头? 触头的接触电阻是如何产生的? 其变化规律如何? 影响因素有哪些?
8. 触头表面氧化的恶性循环是怎样发生的,后果如何? 怎样切实避免出现恶性循环?
9. 触头的弹跳现象是怎样发生的? 有何危害? 如何消除?
10. 触头的熔焊是如何发生的? 有何危害?
11. 影响触头熔焊的因素有哪些? 为什么说在关合短路电流时触头熔焊的危险性最大?

第二章 常用低压电器

第一节 概 述

凡是根据外界特定信号自动或手动地接通或断开电路,实现对电路或非电对象控制的电工设备都叫电器。

工作在交流电压 1 200 V 或直流电压 1 500 V 及以下的电路中,起通断、保护、控制或调节作用的电器产品叫低压电器。

低压电器是电力拖动自动控制系统的基本组成元件,控制系统的可靠性、先进性、经济性与所用的低压电器有着直接的关系,作为电气技术人员必须熟练掌握低压电器的结构、原理,并能正确选用和维护。

一、低压电器的分类

低压电器用途广泛,功能多样,种类繁多,分类方法各异。

1. 按用途分类

① 控制电器——用于各种控制电路和控制系统的电器。如接触器、各种控制继电器、控制器、起动器等。

② 主令电器——用于自动控制系统中发送控制指令的电器。如控制按钮、主令开关、行程开关、万能转换开关、控制开关等。

③ 保护电器——用于保护电路及用电设备的电器。如熔断器、热继电器、各种保护继电器、避雷器等。

④ 配电电器——用于电能的输送和分配的电器。如断路器、隔离开关、刀开关等。

⑤ 执行电器——指用于完成某种动作或传动功能的电器。如电磁铁、电磁离合器等。

2. 按工作原理分类

① 电磁式电器——依据电磁感应原理来工作的电器,如交直流接触器、各种电磁式继电器等;

② 非电量控制电器——电器的工作是靠外力或某种非电物理量的变化而动作的电器。如刀开关、行程开关、按钮、速度继电器、压力继电器、温度继电器等。

3. 按执行机能分类

① 有触点电器——利用触点的接触和分离来通断电路的电器。如刀开关、接触器、继电器等。

② 无触点电器——利用电子电路发出检测信号,达到执行指令并控制电路目的的电器。如电感式开关、电子接近开关、晶闸管式时间继电器等。

有触点的电磁式电器在电气自动控制电路中使用最多,其类型也很多,各类电磁式电器在