



第3章

电器发热与散热

在现代化产品的设计,特别是可靠性设计中,热的问题已占有越来越重要的地位。电器装备在工作时会产生发热现象,对电器的正常工作有一定的影响。通常,电器装备的运行状态主要有三种:

(1) 正常运行状态,即电压和电流都不超过额定值的允许偏移范围。正常运行状态是一种长期工作状态。

(2) 故障运行状态,即系统发生故障至故障切除的短时间内的工作状态。短路故障将引起电流突然增加,短路电流要比额定电流大几倍甚至几十倍。

(3) 不正常运行状态,即介于上述两种运行状态之间的一种运行状态。它不能够长期运行,但也不需立即切除,即可以继续运行一定的时间。

设备选择中常用“正常”和“短路”两种运行状态进行计算。发热计算的目的是研究各种工作状态的发热与散热问题,保证这些部分最高温度不超过规定的极限允许温度,以保证电器工作的可靠性,对保证电器正常可靠地运行及缩小电器体积、节约原材料、降低成本、延长使用寿命等方面具有重要意义。本章对电器发热的原因、影响、不同工作制发热的特点及电器的散热问题等进行了一定的分析。

3.1 电器的允许温升

有触点电器是由导电材料、导磁材料和绝缘材料等组成的。电器在工作时由于有电流通过导体和线圈而产生电阻损耗。如果电器工作于交流电路,则由于交变电磁场的作用,在铁磁体内产生涡流和磁滞损耗,在绝缘体内产生介质损耗。所有这些损耗几乎全部转变为热能,其中一部分散失到周围介质中,另一部分加热电器本身,使其温度升高。

电器温度升高后,其本身温度与周围环境温度之差称为温升。电器的温度超过某一极限值后,其中金属材料的机械强度会明显下降,绝缘材料的绝缘强度会受到破坏,若电器温度过高,会使其使用寿命降低,甚至遭到破坏。反之,电器工作时的温度也不宜过低,因为电器工作时温度太低,说明材料没有得到充分利用,经济性差,相对体积大、质量大。

电器工作时,电流通过导电部分将产生电阻损耗,此损耗转变为热能使电器发热;常见

损耗是电阻损耗、磁滞和涡流损耗。对高压电器还应考虑介质损耗。

电器各部分的发热与散热是一个非常复杂的过程。影响它的因素很多,所以很难建立一个考虑到所有影响因素的热过程解析公式。目前,电器的发热计算还只能是近似的,但经过实验校核以后,对于各种不同的具体条件,应用一些经验数据,也可以得到比较准确的结果。近年来,采用电子计算机计算电器的温度场,可以得到更加准确的结果。为了确保电器的工作性能和使用寿命,各国电器技术标准都规定了电器各部件的发热温度极限及允许温升。

发热温度极限就是保证电器的机械强度、导电性、导磁性以及介质的绝缘性不受危害或使工作寿命过分降低的极限温度。

允许温升是发热温度极限与最高环境温度的差值。因为电器的工作环境温度的高低直接影响电器的散热过程,我国国家标准规定最高环境温度为 40°C (一般为 35°C),从发热温度极限减去最高环境温度即为允许温升值,即

$$\text{允许温升} = \text{发热温度极限} - 40^{\circ}\text{C}$$

表 3.1 所示为各种不同电器装备零部件及材料的发热温度极限值,该条件是在对电器装备的电压线圈施加最大电压,对电流线圈、触头等导电件通以额定电流情况下,各电器装备零部件在最高环境温度下的发热温度。

表 3.1 电器部件及材料发热温度极限

零部件名称	材料和形式	发热温度极限/ $^{\circ}\text{C}$
发热温度不影响接触压力的触头	紫铜或铜合金	115
	银或银合金触头	以不损害相邻部件为限
发热温度影响接触压力的触头	磷青铜	75
	弹簧负片构成的簧片	75
	夹形触头刀形开关铜质触头	90
用螺钉、铆钉紧固的导电连接	紫铜或黄铜	95
	紫铜或黄铜接触处镀银	100
	紫铜或黄铜接触处镀银	105
	铝质	80
单层电流线圈	铜质	145
软连接线	铜质镀(或搪)锡	130
电阻	康铜或类似的电阻带、丝	390
	铁铬铝电阻带、丝	640
	镍铬电阻带、丝	690
绝缘线圈及与绝缘材料接触的 金属零件	A 级绝缘	120
	E 级绝缘	135
	B 级绝缘	145
	F 级绝缘	170
	H 级绝缘	195

当金属材料的温度高达一定值以后,其机械强度就会显著降低,见图 3.1。机械强度开始显著下降时的温度称为材料的软化点。软化点不仅与材料种类有关,而且是加热时间的函数,加热的时间越短,材料达到软化点的温度越高。以铜为例,长期发热时它的软化温度

约 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$, 短时发热时它的软化温度增高到 300°C 左右。电器中裸导体的极限允许温度应小于材料的软化点。

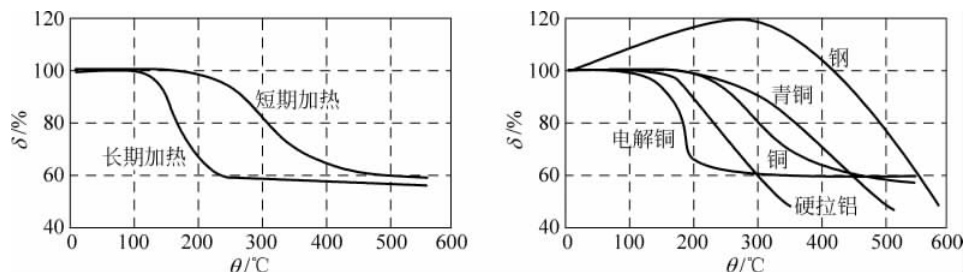


图 3.1 金属材料机械强度与温度的关系

对于触头材料,除考虑机械强度外,还要考虑氧化和其他问题(详见第 4 章电接触理论)。

绝缘材料和外包绝缘的导体,其极限允许温度决定于绝缘材料的老化和击穿特性。当绝缘材料的温度超过允许工作温度时,材料便急剧老化,温度越高,老化越快,寿命越短。当绝缘材料的温度超过一定极限后,其击穿电压明显下降。图 3.2 为陶瓷的击穿电压与温度的关系。

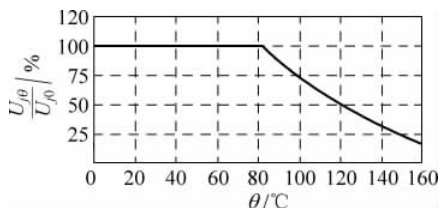


图 3.2 陶瓷的击穿电压与温度的关系

对于短路电流下电器各部分的短时发热允许温升,我国标准尚未作统一规定。如表 3.2 所示,

一般要求油中的裸导体不应超过 250°C , 不和有机绝缘材料或油接触的铜或黄铜部件不应超过 300°C , 铝在任何情况下都不应超过 200°C 。固定接触连接部分的发热不应超过其他部分载流导体的发热。电器主触头的温度应限制在 200°C 以内,对弧触头的要求是不熔焊。

表 3.3 所列数据为环境温度为 40°C 时,绝缘线圈及包有绝缘材料的金属导体的允许温升。

表 3.2 电器部件及材料短时发热极限温度

部件名称及材料	短时最高允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	部件名称及材料	短时最高极限温度/ $^{\circ}\text{C}$
油中未绝缘的载流导体	250	任何情况下的铝导体	200
不和有机绝缘材料及油接触的铜和黄铜部件	300	闭合情况下的主触头	200

表 3.3 绝缘线圈的允许温升

绝缘材料耐热等级	线圈在空气中允许温升/ $^{\circ}\text{C}$		线圈在油中允许温升/ $^{\circ}\text{C}$
	长期工作制	反复短时、间断长期及短时工作制	
A	65	80	60
E	80	95	60
B	90	105	60
F	115	130	—
H	140	155	—

必须指出,电器各部分的温度是用一定的测量方法得到的,标准中所规定的允许温度与测量方法有关。各类电器零部件极限允许温升及测量方法的具体规定可参考有关电器技术标准。

关于表中绝缘等级的说明:由于绝缘材料的品种繁多,耐热性各不相同,为此国家标准规定按耐热性将绝缘材料分为若干耐热等级,如表 3.4 所示。

表 3.4 我国标准规定的电气绝缘材料的极限温度

相对耐热指数(RTE)	极限温度/°C	以前表示方法
<90	70	—
>90~105	90	Y
>105~120	105	A
>120~130	120	E
>130~155	130	B
>155~180	155	F
>180~200	180	H
>200~220	200	—
>220~250	220	—
>250	250	—

3.2 电器中的热源

电器中的热源主要来自三个方面:①电流通过导体产生的电阻损耗。从广泛意义上说,电阻可以是导体的金属电阻,可以是导体连接处的接触电阻,也可以是触头开断线路时出现的电弧电阻。②交流电器铁磁体内产生的涡流、磁滞损耗。③交流电器绝缘体内产生的介质损耗。此外,还有电器运动部分产生的摩擦和撞击损耗等。

1. 电阻损耗

电器装备的导电回路中通过电流时会存在能量损耗,称为电阻损耗,其量值为

$$P = K_f I^2 R \quad (3.1)$$

式中: P 为电阻损耗功率(W); K_f 为附加损耗系数,该系数需要考虑到交变电流集肤效应和邻近效应对电阻的影响; I 为通过导体的电流(A); R 为导电回路中的导体电阻(Ω)。

在电器装备导电回路中,导电电阻可表示为

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.2)$$

式中: l 为导体长度; A 为导体截面; ρ 为导体材料的电阻率。

导体电阻率 ρ 与温度 θ 之间的关系为

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \dots) \quad (3.3)$$

式中: ρ_0 为 0°C 时的导体电阻率; α, β, \dots 为导体电阻温度系数。当温度 $\theta \leq 100^\circ\text{C}$ 时, θ 的高次幂项可以忽略不计,此时,式(3.3)可写作

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta) \quad (3.4)$$

当导电回路中的导体流过电流为交变电流时,会产生集肤效应和邻近效应而形成电阻

的附加损耗。此时,附加损耗系数 K_f 为集肤系数 K_j 和邻近系数 K_l 之积,即

$$K_f = K_j K_l \quad (3.5)$$

交流电流通过导体时在导体内将建立交变磁通,交变磁通感应电势和电流用以阻止原电流流通。导体中心部分匝链的磁通较其表面部分多,因而使导体中心部分电流密度减小,导体表面部分电流密度增大,产生所谓集肤效应;当两导体平行且靠得较近时,导体中的交变电流建立的磁通彼此耦合,使导体截面中的电流分布不均匀,产生所谓邻近效应。集肤效应和邻近效应都使电流分布不均,导体有效截面面积减小,有效电阻增大,损耗增加。

当一正方形截面的铜导体内通过工频正交电流时,越接近导体表面,电流密度值越大,相位越超前。这种现象称为集肤效应,它使导体的有效截面减少,使电阻值增大。这是由于当交变电流通过良导体时,在导体横截面上会出现电流分布不均匀的现象,并且有远离中心趋于表面的效应。根据电磁感应定律,时变电场产生时变的磁场,当电流频率升高时,由于导体内部电磁场的作用,电流就被驱向导体表面。交变电流的频率越高,导体表面的电流密度也会越大,中心位置的电流密度越小,甚至接近为零,通常称这种集肤效应的程度越高、越显著。集肤效应最直接的影响是导致导体的阻抗增加,并且根据信号频率的不同,导体的阻抗也随之改变。

集肤效应的作用原理如下:当交变电流以一定的频率通过良导体时,根据电磁感应原理,导体内部及周围都会产生磁链,而导体中心相对于导体表面来说磁链会更大一些,再由楞次定律可知,电磁链又会感应出涡流,并且方向与导体内部原来的电流相反,导致导体中心两个相反方向的电流发生中和,其程度要远远大于导体表面,因此最终的结果就是导体表面的电流密度远远大于导体中心的密度,并且电流密度与离中心的距离成正比关系,即离中心越远电流密度越大。

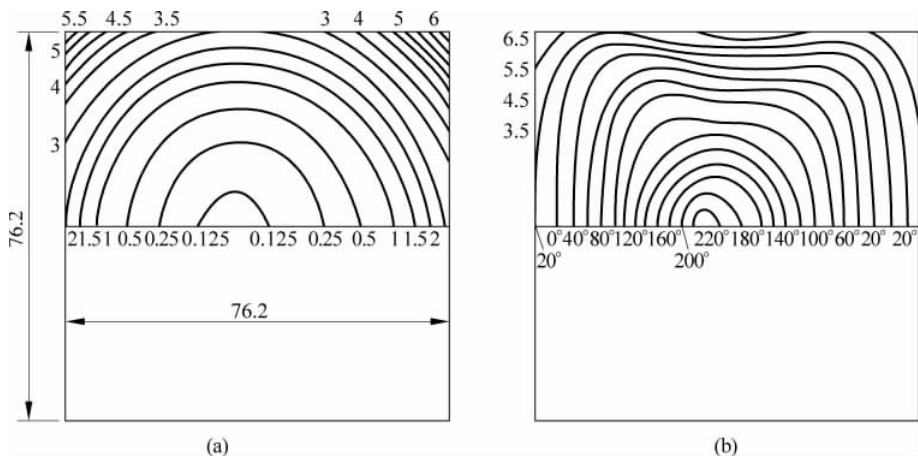


图 3.3 集肤效应示意图

为了更加形象地表示集肤效应的程度,定义集肤深度的概念:当导体中通有交变电流时在集肤效应的作用下,交变电流从导体的表面所能够达到的径向深度。其计算公式为

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (3.6)$$

式中: Δ 为集肤深度(mm); ω 为角频率; μ 为磁导率(H/m); γ 为电导率(S/m)。由此式可

知,集肤深度与角频率的平方根成反比,也与频率的平方根成反比,还与磁导率、电导率的平方根成反比。由于电流的集肤效应特性,使导体有效截面积得不到充分利用。在产品设计中,应根据不同的工作频率,合理地选用载流导体的尺寸,或采用多根导体并联,既满足载电流强度的要求,又提高导体的有效利用率。

由于相邻载流导体间磁场的相互作用,使两导体内产生电流分布不均匀的现象称为邻近效应。邻近效应与相邻载流导体内电流流向有关。如图 3.4 所示为两导体电流在邻近效应影响下的电流密度 $J(x)$ 分布图。当电流同向时,相邻侧感应的反电势偏大,故电流密度偏小;当电流反向时,相邻侧感应的反电势偏小,故电流密度偏大。

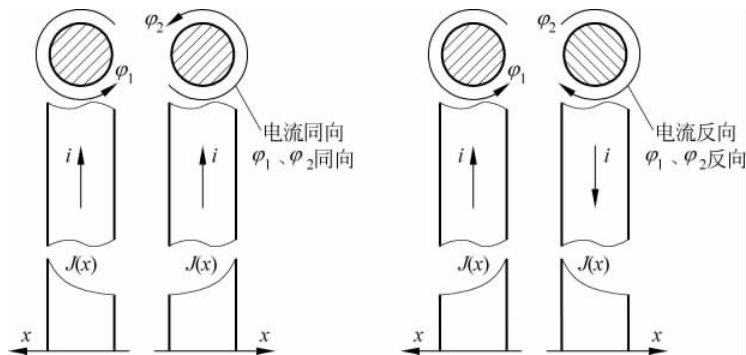


图 3.4 两导体电流在邻近效应影响下的电流密度 $J(x)$ 分布图

导电回路的电阻损耗将转变为热能。正常状态时,其中一部分散发到周围介质中去,另一部分使导体的温度升高,形成温升。如果发热时间极短(如短路时的发热),由于来不及散热,可认为损耗功率全部用来加热导体,提高导体的温升。此时可得出能量平衡公式为

$$Pt = Gc\tau (W \cdot s) \quad (3.7)$$

式中: P 为电阻损耗功率(W); t 为发热时间(s); G 为导体质量(kg); c 为导体的比热 [$W \cdot s / (kg \cdot ^\circ C)$]; τ 为导体的温升($^\circ C$)。上式可用于计算短路电流导体的温升。

2. 铁磁损耗

电器中的载流导体有时要从铁磁零件附近通过。由于铁的磁导率高,磁通将通过铁磁零件而成闭路。如果导体通过的电流为交流,则交变磁通在铁磁体内产生涡流和磁滞损耗。铁磁体在交变磁通的作用下,会在铁磁零件中产生一定的涡流。这是因为铁的磁导率很高,磁通将通过铁磁零件而成闭路,如果导体通过的电流为交流,而磁通变化速度又快,因而交变磁通产生相应的电动势和涡流损耗。同时,磁通的方向和数值变化使铁磁材料反复磁化,产生磁滞与涡流损耗可以导致铁质零件发热。一般来说,这个损耗不大。但如果制造不当,如材料较差、铁片较厚或片间绝缘不好,涡流损耗就比较大。

铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化时,内部的磁畴不停地往返倒转,磁畴之间不停地互相摩擦而消耗能量,引起的损耗称为磁滞(magnetic hysteresis)损耗。

导体置于随时间变化的磁场中或在非均匀磁场中移动,在电磁感应作用下,导体内会形成循环的电流,这些涡流使导体发热,因涡流而导致的能量损耗称为涡流(eddy current)损耗,涡流损和电流循环面积的大小成正比,和材料的电阻率成反比。

磁滞与涡流损耗一般与磁通密度大小、磁通变化率及铁磁材料有关,其损耗可用

式(3.8)进行计算:

$$P = \left[\sigma_c \frac{f}{100} + \sigma_\omega \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B_m^2 \times 10^{-8} \text{ (W/kg)} \quad (3.8)$$

式中: P 为铁磁材料的损耗(W/kg); σ_c/σ_ω 分别为磁滞、涡流损耗系数,见表 3.5; f 为电源频率,即磁通频率(Hz); B_m 为磁通密度幅值(Wb/m²)。

表 3.5 铁芯材料的磁滞、涡流损耗系数

钢 的 类 别	普通电机钢			高 硅 钢	
片厚/mm	1	0.5	0.35	0.5	0.35
σ_c	4.4	4.4	4.7	3	2.4
σ_ω	22.5	5.9	3	1.3	0.7

在交流电器中常采用硅钢片叠成导磁铁芯。所以也可根据选用导磁材料的型号,直接由 YB73—70、YB73—63(冶金部关于电工用热轧钢片及冷轧钢薄板部标)查得相应型号材料的单位铁损,经过计算而得整个铁芯的损耗。

图 3.5 为硅钢片单位质量铁磁损耗与磁感应强度的关系,实线片厚为 0.5mm,虚线片厚为 0.35mm。从图 3.5 可以看出,铁磁损耗(涡流损耗)与铁磁零件中的磁感应强度有关,减少铁磁损耗的途径就是减少铁磁零件中的磁通,或者不用铁磁件。常用的措施有:

(1) 改用非磁性材料。如无磁钢、无磁性铸铁、黄铜、硅铝合金等。

(2) 采用非磁性间隙。在围绕导电杆的环形铁件上开槽,在槽内充填黄铜或无磁钢等非磁性材料。铁件开槽后,在磁通的通路中出现非磁性间隙,磁阻加大,铁件内磁通量减小,因此损耗减小。非磁性间隙宽度越大,铁件内磁通量就越小,因而损耗也越小。当间隙不大时,增加间隙,对减少损耗的效果比较显著,间隙增大到一定值后,再进一步加大间隙,降低损耗的作用就不明显了。

(3) 采用短路圈。在围绕导电体的铁筒上绕以高电导率材料(如铜)制成的短路圈,在交流磁通通过铁筒时,就会在短路圈内感应出涡流,涡流使铁筒内的磁通减小,从而使铁筒中的涡流磁滞损耗下降。此时,在短路圈内虽有电阻损耗,但总损耗仍比不加短路圈时小些。短路圈截面 S 越大,总损耗不断越小,但过分加大短路圈截面 S 的尺寸效果也会变得有限。

3. 电介质损耗

电介质中的带电质点在交变电场的作用下,往复移动和重新排列,而质点来回移动需要克服质点间的相互作用力,即分子之间的内摩擦力,由此造成的能量损耗称为介质损耗。

绝缘介质中的介质损耗一般与电场强度及频率有关:电场强度和频率越高,则介质损耗也越大。对于电场强度较小的低压电器而言,介质损耗通常很小,可以忽略。但在高压电器中这种损耗应该考虑,电压很高,介质中的电场强度很大,必须考虑电介质损耗及其产生

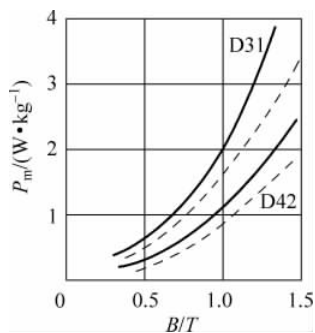


图 3.5 硅钢片单位质量铁磁损耗与磁感应强度的关系
(实线片厚 0.5mm,虚线片厚 0.35mm)

的发热,以免引起过热而使绝缘老化加速,甚至引起热击穿而损坏。例如,电容套管常因介质损耗发热而击穿。

介质损耗的大小可以用介质损耗角($\tan\delta$)表征,介质损耗角是指电介质内流过的电流向量和电压向量之间的夹角的余角。 $\tan\delta$ 与温度、材料、工艺等许多因素有关。交变电场中的介质损耗为

$$p = 2\pi fCU^2 \tan\delta \quad (3.9)$$

式中: f 为电场交变频率; C 为介质的电容; U 为外加电压; δ 为介质损耗角。

3.3 电器的散热

电器工作时,只要电器温度高于周围介质及接触零件的温度,它便向周围介质散热,所以发热和散热同时存在于电器发热过程中。

当电器产生的热量与散失的热量相平衡时,电器的温升维持不变,这时称电器处于热稳定状态,此时的温升称为稳定温升。若温升随着时间而变化,则称为不稳定发热状态。电器的散热以热传导、热对流与热辐射3种基本方式进行。

1. 热传导

当电流通过电器与装备时,温度会升高,与其相接触的零部件温度也会发生上升现象,这种通过物体之间直接接触,或者发生在物体内部由较热部分向较冷部分之间的传热现象就是热传导。内能存在于任意物质的基本质点之中。热传导现象的实质是通过质点与质点之间相互直接作用,将能量由一个质点传递到相邻的另一个质点。固体传热的主要方式是热传导,气体和液体中也可以进行热传导。在绝缘的液体和固体中,质点间的能量传递是通过弹性波进行的。气体中的热传导还伴随着原子和分子的扩散,金属中则有电子的扩散。

热传导现象的机理十分复杂,但分析其宏观规律需要用到著名的傅里叶定律。该定律可描述为,单位时间内通过物体单位面积的热量与该处的温度梯度成正比,其表达式为

$$q = -\lambda \text{grad}\theta \quad (3.10)$$

式中: λ 为热导率,负号表示热量的传递方向与温度梯度相反,即向温度降低的方向传递。根据傅里叶定律可以写出热传导功率 P_{cd} 的向量形式:

$$P_{\text{cd}} = -\text{div}(\lambda \text{grad}\theta) \quad (3.11)$$

式中: div 为向量,矢量单位。

热导率 λ 是表征物体传热能力的重要参数,它与材料、温度等许多因素有关。 λ 越大,物体的热传导能量越强,且有 $\lambda_{\text{金属}} > \lambda_{\text{非金属}} > \lambda_{\text{液}} > \lambda_{\text{气}}$ 。多数材料在一定的温度范围内 λ 与 θ 近似地成线性关系,即

$$\lambda = \lambda_0(1 + b\theta) \quad (3.12)$$

式中: λ_0 为 0°C 时的热导率; θ 为温度; b 为常数。

热导率范围甚大,银为 $425\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,铜为 $390\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,铝为 $210\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,黄铜为 $85\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,某些气体可达到 $0.006\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。气体的热导率与各种因素间的关系非常复杂。在 $100\sim 150^\circ\text{C}$ 范围内,空气的 $\lambda = (0.244\sim 0.75)\times 10^{-4}\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。 SF_6 的 $\lambda = 1.36\times 10^{-2}\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

2. 热对流

热对流是通过流体(液体与气体)的运动而传递热量。热量的转移和流体本身的转移结合在一起。根据流体流动的原因,对流分为自然对流和强迫对流。自然对流是指流体质点因温度升高而上升形成的对流;强迫对流是指质点在外力作用下被迫流动形成的对流。自然对流发生在不均匀加热的流体中,在高温区,粒子密度比低温区的小,温度较高的粒子向上迁移,温度较低的粒子向下迁移。这种因粒子密度的不均匀性产生的自然上升力和下降力,导致了流体中的自然对流和热交换。在中小容量电器中,一般都采用自然对流散热。强迫对流是在外界因素强迫作用下形成的,例如用气流或液流进行强吹和强冷,这在某些强电流电器或高频电器中采用。因受安装空间的限制,城市轨道交通车辆的电机、电器变流器等,大多采用强迫对流,即强迫风冷却或强迫油循环冷却及强迫水冷却,可加强散热,缩小体积。

图 3.6 所示为发热体附近流体介质的对流。对流有层流和紊流两种形式。前者粒子运动的特点是速度较低,运动平稳,粒子平行分层运动。后者的特点是粒子运动速度高,形成漩涡式的紊乱运动。靠近发热体表面的一薄层流体,质点平行分层运动为层流,在这层流体中有很高的温度梯度,热量通过热传导的形式传导到外层流体中去。粒子的运动速度越高,发热体表面的层流层越薄,热量散发越强烈。

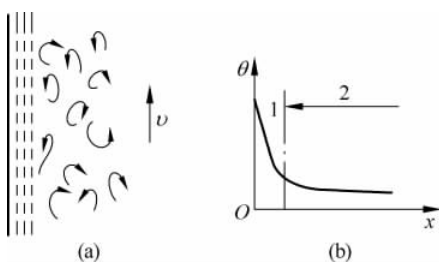


图 3.6 发热体附近流体介质的对流

单位体积流体介质因对流而散出的功率可用以下关系式表示:

$$P_{dl} = K_{dl}(\theta - \theta_0)A \quad (3.13)$$

式中: θ 、 θ_0 分别为发热体表面和流体介质的温度; A 为冷却表面的面积; K_{dl} 为对流散热系数,可由实验进行确定。

3. 热辐射

热辐射是发热体的热量通过电磁波的形式不需直接接触而进行能量传播的过程。热辐射可穿越真空和气体而传播,但不能透过固体和液体物质。根据斯忒藩-玻耳兹曼定律,物体单位面积的辐射功率为

$$P_f = \sigma \epsilon_f (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.14)$$

式中: σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T_2 为发热体表面的温度; T_1 为接受辐射物体的温度; ϵ_f 为发射率。

式(3.14)适用于发热体辐射表面积比吸收体表面积小得多的情况。发射率与发热体表面状况及颜色有关,对于绝对黑体,它的辐射及吸收能力最强, $\epsilon_f = 1$ 。对于一般物体, ϵ_f 在 $0 \sim 1$ 之间。由于电器装备的极限允许温度低,仅有几百摄氏度,因而辐射功率较小,电器散热通常考虑的方式是热传导和热对流。而对于电弧而言,辐射功率不能忽视。

4. 电器表面的稳定温升——牛顿热计算公式

热传导、热对流、热辐射 3 种传热过程可通过相关公式来计算,但是分别进行热计算是相当复杂的,而且结果并不十分准确。所以在实际计算发热体表面温升时,不进行单独考

虑,而是在一定表面情况和周围介质条件下,把3种散热方式综合起来,用综合散热系数 K_T 来考虑散热,这就是通常采用的牛顿热计算公式求电器表面的稳定温升值,即

$$P = K_T S \tau \quad (3.15)$$

式中: P 为总散热功率(W); K_T 为综合散热系($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$); S 为有效散热面积(cm^2); τ 为发热体温升($^\circ C$), $\tau = \theta - \theta_0$, θ 和 θ_0 是发热体温度和周围环境温度。

通过式(3.15)可得出,散热功率和温升及有效散热面积成正比,温升越高,有效散热面积越大,则散热功率越大。严格地讲,综合散热系数 K_T 不是常数,它是指温度升高 $1^\circ C$,发热体单位面积散发到周围介质的功率,其大小和发热体结构、工作制、布置方式及周围介质密度、传热系数等诸多因素有关。 K_T 值由实验方法确定。表3.6为 K_T 的一些实验数据,供参考。在应用牛顿公式时重要的问题在于正确地选取综合散热系数。

表 3.6 综合散热系数 K_T 的实验值

序 号	散热体表面及其特性	$K_T/[W/(cm^2 \cdot ^\circ C)]$	附 注
1	窄边直立的扁平铜母线	$(6 \sim 9) \times 10^{-4}$	
2	涂绝缘漆的钢或生铁表面	$(10 \sim 14) \times 10^{-4}$	
3	具有绝缘纸的线圈	$(10 \sim 12.5) \times 10^{-4}$	
4	螺旋状生铁电阻	$(10 \sim 13) \times 10^{-4}$	K_T 值对应于全部螺旋表面
5	由康铜或镍铬丝或带绕的电阻组件	$(10 \sim 14) \times 10^{-4}$	K_T 值对应于全部导体表面

3.4 电器的工作制

电器装备在使用过程中,由于工作任务的要求不同,其工作时间的长短也不同。如供电系统中的一些开关,只要不出现故障和必要的检修,它就一直处于工作状态,而列车上控制空气压缩机的电器则根据实际需要处于一种断续工作状态。由于工作时间长短不同,电器的发热及冷却状况也不同。根据国家标准规定,电器的工作状况可以划分为4种工作制:长期工作制、几小时工作制(间断长期工作制或8小时工作制)、反复短时工作制(间断工作制)和短时工作制。

1. 长期工作制时电器的发热

长期工作制是指电器通电后连续工作到发热稳定,此时温升达到稳定值。其特点是电器损耗所产生的热量全部散发到周围介质中。当发热未达到稳定前,这个热量一部分用于升高导体的温度,另一部分散发到周围介质中。电器工作于长期工作制时,其工作时间常数大于8h,有的连续工作几天,甚至几个月。实际上电器达到稳定温度的时间往往不需要8h或更长时间。根据能量平衡原理,得能量平衡公式为

$$P dt = cG d\tau + K_T S \tau dt \quad (3.16)$$

式中: $P dt$ 为 dt 时间内电器总的发热量; $K_T S \tau dt$ 为 dt 时间内电器的散热量; $cG dt$ 为加热电器本身的热量; S 为有效散热面积; G 为质量。

通过计算可得

$$\tau = \frac{P}{K_T S} \left[1 - e^{-t / \left(\frac{cG}{K_T S} \right)} \right] \quad (3.17)$$