

第 3 篇

高压开关设备

第 3 篇

高压开关设备

主编单位 西安高压电器研究所

编写单位 西安高压电器研究所
华中理工大学
沈阳高压开关厂
西安交通大学
西安高压开关厂

主 编 李松乔

副 主 编 崔成恕

编 写 人 李松乔 刘绍峻 崔成恕 许镐娥
吴维忠 沈聿修 马志瀛 江全德
刘扬伟 赵伯楠 易志斌 陈慎言
李肇林 李 凯

主 审 楼家法

常用符号表

A ——面积	K_s ——电阻的附加损耗系数
能量	K_{pa} ——电阻的邻近效应系数
A_F ——机械利益(力的)	K_{sa} ——电阻的集肤效应系数
A_M ——机械利益(力矩的)	L ——长度
A_m ——磁路中最小截面积	M ——力矩
a ——距离	m ——质量
B ——磁感应强度	m_c ——归算质量
B_m ——磁路中最小截面处的磁感应强度	P ——功率
C ——对流换热系数	p ——压力
电容	R ——电阻
传动比	R_a ——交流电阻
c ——比热容	R_c ——接触电阻
D ——直径	R_d ——直流电阻
E ——电场强度	s ——间隔距离
E_b ——击穿场强	t ——时间
E_i ——工程闪络场强	t_{arc} ——燃弧时间
E_w ——耐受场强	t_s ——热稳定时间
E_{be} ——工程击穿场强	U ——电压
E_{ave} ——平均场强	U_a ——电弧电压
E_{max} ——最大场强	U_b ——击穿电压
E_{np} ——击穿场强	U_i ——工程闪络电压
F ——力	U_w ——耐受电压
H ——绝缘子内部有效绝缘距离	V ——速度
I ——电流	体积
I_a ——电弧电流	W ——重量
I_c ——电容电流	α ——表面传热系数
I_k ——电弧电流有效值	电流非周期分量衰减系数电阻温度系数
I_L ——小电感电流	α_0 ——0℃时的电阻温度系数
I_m ——短路电流周期分量的最大值	α_s ——表面散热系数
I_n ——额定电流	β ——电场不均匀系数
I_p ——峰值电流	ω ——角速度
I_s ——短路电流	ε ——压力比
I_t —— t 秒热稳定电流	δ ——厚度
J ——电流密度	δ_0 ——磁气隙初始长度
转动惯量	ε ——黑度
K ——温升	σ ——相对标准偏差
K_o ——回路系数	σ_0 ——斯忒藩-玻耳兹曼常数

η ——效率	μ ——磁导率
间隙利用系数	流出系数
θ ——温度	μ_0 ——真空中的磁导率
λ ——热导率	ρ ——密度电阻率
截面修正系数(电动力的)	ρ_0 ——0℃时的电阻率

TM—变压器 TV—电压互感器 G—发电机 M—电动机 QF—断路器 QD—隔离开关
QE—接地短路器 FU—熔断器 QL—负荷开关 R—重合器 S—分程器 RMU—环网供电单元

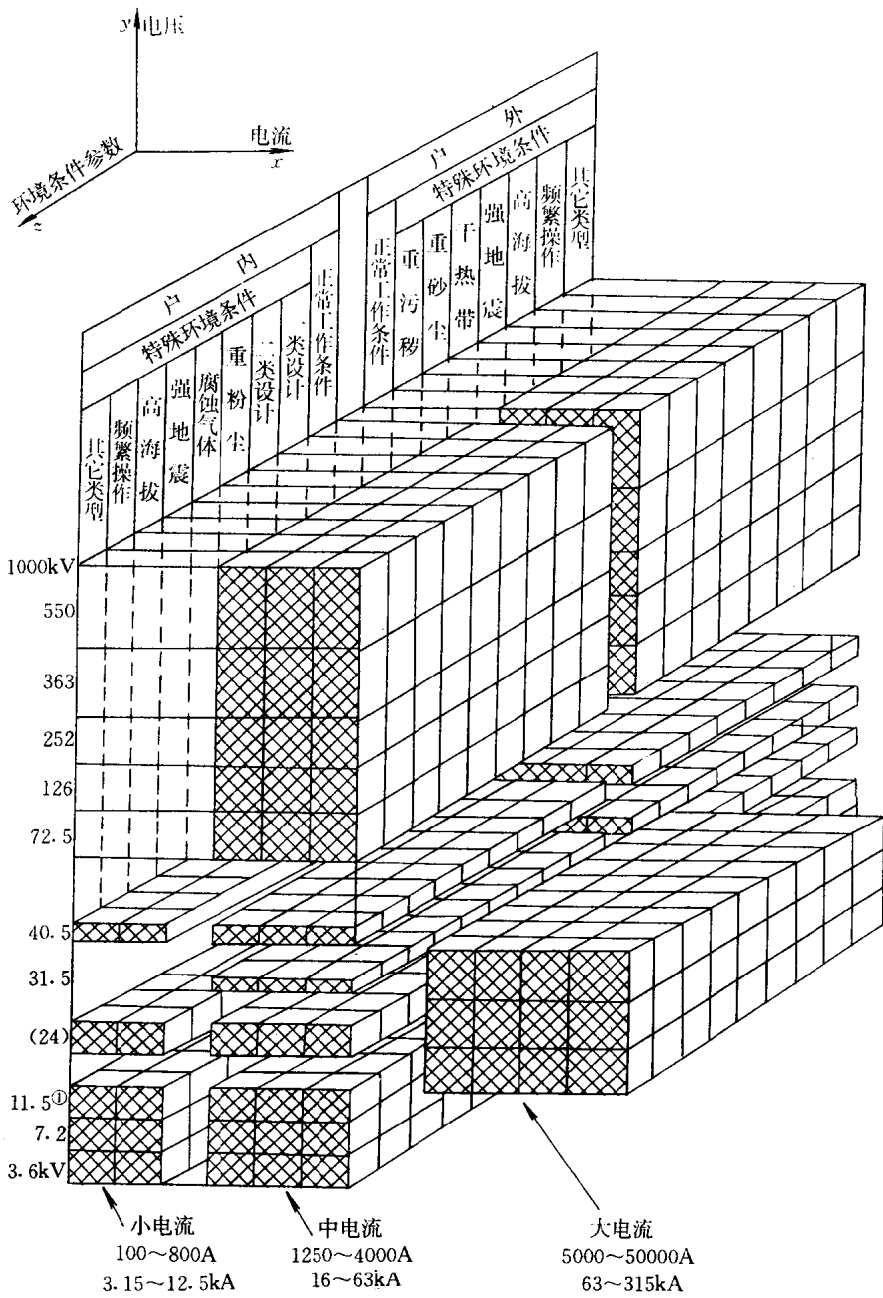


图 3-1-2 高压开关设备的主要功能参数三元图

① 按照 GB156—93《标准电压》的规定，此处应为 12kV，

但考虑原有产品的绝大多数都是在 11.5kV 下试验的，暂保留 11.5kV

成套性进一步提高，可将容量不是很大的整个配电站（包括电力变压器在内）制作成为一个整体，在制造厂预制、调试好出厂后发运给使用单位，这样就可显著地降低在运行现场的安装及调试工作量，使安装调试周期大为缩短，减少在现场安装、调试工作中的失误及偏差，提高了设备在运行中的可靠性。这类成套设备所需的占

地面积，和常规设备相比，亦会显著减少。

高压开关（电器）器件的分类及其基本功能见表 3-1-1，它们在电力系统中的具体应用见图 3-1-1。

高压开关设备使用于发电厂、电力系统中的各类变电站、所及线路上时，所处的环境条件差异很大，性能要求亦各不相同，常将产品做成各类品种及规

表 3·1-1 高压开关（电器）器件的分类及基本功能

功 能 \ 分 类			断路器	重合器	分断器	负荷开关	接触器	熔断器	隔离开关	接地开关
基 本 功 能	控 制	使电力线路、设备投入或退出运行	√	√	√	√	√	△		
	保 护	切除故障电力线路及设备	√	√				√		
		建立可靠的绝缘断口			△	△		△	√	
		停运的电力线路或设备可靠接地								√
主要功能参数 (包括对环境条件的适应性)	承载及切合 负荷电流	长期承载	√	√	√	√	√	√	√	
		关 合	√	√	√	√	√			
		开 断	√	√	√	√	√	△		
	短时承载及 切合短路故障 电流	短时承载	√	√	√	√	√		√	△
		关 合	√	√	△	△				△
		开 断	√	√			√			
	切合容性电流		√	√	√	√	△			
	切合小电感电流		√	√	√	√	√			
	机械寿命及电气寿命符合相应标准及技术条件的要求，器件的对地、断口及相间绝缘能长期承受电力系统最高电压，器件的对地、断口及相间绝缘能短时承受工频、雷电冲击及操作过电压，器件的噪声、无线电干扰水平、对环境的污染限定在规定的范围内，在规定的环境条件下（户外、高海拔、污染环境）仍能完成规定的功能									
备 注	√——表示具有该项功能 △——表示可能具有该项功能									

格。

尽管输电、配电及用电系统对高压开关设备的功能参数要求的项目比较多，但对产品结构影响最大的是电压、电流及环境条件参数。事实上，额定电压、最高电压、额定工频电压耐受水平、额定雷电冲击波及操作波耐受水平等电压参数之间有较为确定的配合关系，故可用额定电压这个参数来表征；而额定电流，特别是额定短路开断电流、额定短时耐受电流及额定峰值耐受电流之间，亦有确定的匹配、对应关系，可用额定电流和额定短时耐受电流联合表征；环境条件有户内、户外两大类，往下还可分为若干小类。因此，可用一个三元图来表述各类产品的三个主要功能参数及它们的相互关系，见图 3·1-2。

其中 x 轴中大电流档次产品主要用作发电厂中主回路用开关（电器）设备，电流偏低的可用作大型变电所低电压侧（二次侧）主开关（电器）设备； x 轴中

的中等电流档次产品用作变电所中的开关设备，其中 24kV 及以下电压等级参数偏高的，有时亦作较小容量发电机主回路的开关设备； x 轴中的小电流档次产品主要用在用电线路及设备上，但在容量较小的电网（例如农网）中，常用作变电所开关设备。框图中的每一个小方块——功能单元块，都是各类高压开关设备的器件、成套装置、预装式配电装备的最主要的设计依据和出发点。

2 高压开关的基本构成及其结构

高压开关的品种及规格虽然繁多，但其基本产品都是由合分单元、绝缘支撑件、操作传动件、基座及操动机构五个部分组成，见图 3·1-3。其中合分单元是高压开关的核心部分。开关控制、保护、安全隔离等基本功能都是由合分单元来完成的，而其它四个组成件，都是为配合、保证合分单元的基本功能而配置的。重合

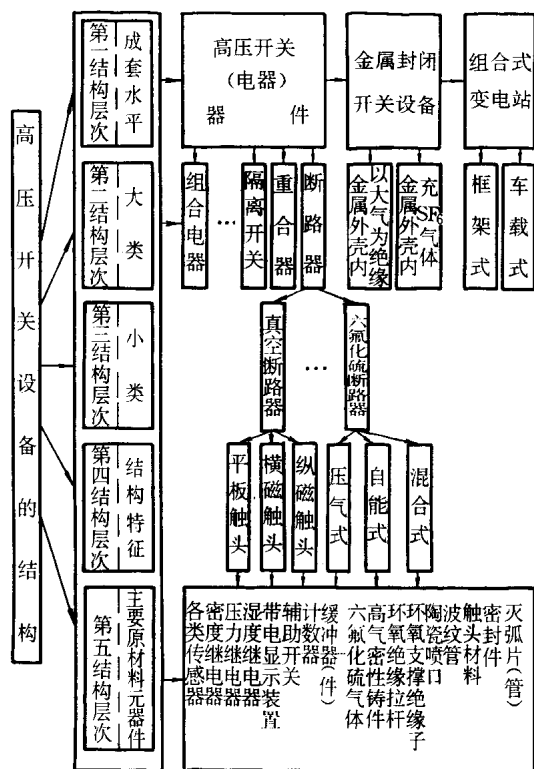


图 3-1-4 高压开关（电器）结构层次框图

3 技术发展^[1]

(1) SF₆ 和真空技术继续发展。SF₆ 及真空开关的技术进步步伐不断加快，产品及所占总产量的比重将迅速增长。在用地紧张地区、污秽、易于出现凝露、沿海地区将大量采用充气式金属封闭开关设备及气体绝缘金属封闭开关设备。

(2) 品种及规格迅速增加。为满足不同层次、不同环境条件及不同经济承受能力的地区、部门的需要，需不断开发新产品，如车载式组合式变电站、环网供电成套装

置、F-C 柜、重合器、分段器、电气化铁道所需大绝缘泄漏距离产品及沙漠油田所需防沙尘能力强的产品。

(3) 成套性要求不断提高。金属封闭开关设备、气体绝缘金属封闭开关设备、预装式组合式变电站等成套设备的产量不断上升，而单个器件产品作为商品单独出售的比例将下降。

(4) 尽快研制出不需检修的高压开关设备。真空开关及 SF₆ 开关的广泛应用，使其短路电流开断寿命提高到 30~100 次，额定负载电流的开断寿命达万次以上，在电寿命方面，已可做到 20 年或更长一点时间不需检修，这就为我们制造出不需检修的开关设备准备好了最关键的条件。全行业应加快绝缘性能、机械性能、密封性能、防腐蚀性能及所用配套零部件的研究，同样保证 20 年以上的使用周期，这样就可制造出少维护不需检修的开关设备。

(5) 不断提高产品的可靠性。高压开关设备是电力系统中最重要的控制、保护设备，长期处于静止、准备状态，一旦接到操作指令，需很短时间内（对断路器和重合器要求在百分之几秒内）准确地完成开断、关合任务。这种特殊的工作方式给产品的可靠性提出了更高的要求。

(6) 积极开展工业设计，不断提高产品的外观质量。

(7) 加快电子技术在高压开关设备中的应用。用电子技术对产品的关键参数，如温升、绝缘性能、机械特性等进行监控，使产品的隐患能在事故萌芽状态中得以消除，并向智能化开关器件及开关柜发展。

(8) 积极发展高压直流开断技术^{[1][2][3]}。为配合高压直流输电技术发展，高压直流开关设备正不断完善和更新。

(9) 开展无触点高压开关的基础研究工作。

第2章 高压开关设备通论

1 高压开关设备的温升

当高压开关设备的载流导体与电接触构件长期通过工作电流，或短时通过短路故障电流时，均会引起发热。由于零部件的温度升高可使其物理、化学性能发生变化，机械和电气性能下降，可能导致产品发生故障，造成事故。因此，产品各部分的温度必须限制在规定的

范围内：

(1) 金属材料的允许温度取决于其机械强度的变化，例如铜在不同温度下的抗拉强度如图 3-2-1 所示，在长期工作时，温度大于 100℃，机械强度有明显下降，而在短时发热情况下，在 300℃ 左右机械强度才明显下降；

(2) 根据所处的介质环境，电接触连接的允许温度

规定得比较详细、严格,允许温度较低,不超过使触头表面快速形成氧化膜的温度,以保证接触电阻的稳定性;

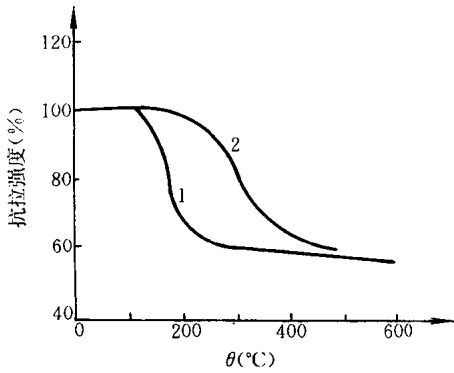


图 3·2-1 铜的抗拉强度与温度的关系

1—长期工作 2—短时工作

(3)绝缘材料的允许温度主要由于其绝缘性能、机械性能及使用寿命等因素决定。

各类高压开关设备在长期工作时的允许温度见 GB763《交流高压电器在长期工作时的发热》标准中的表 2。

开关设备发热的热源是其内部的能量损耗。降低其温度的主要措施是减少能量损耗,增强散热能力。

1·1 高压开关设备的发热计算

1·1·1 电阻损耗

电流流经开关导电部分时,由于导体有电阻,产生损耗。电阻损耗功率 P 可用下式表示:

$$P=I^2R \text{ (W)} \tag{3·2-1}$$

式中 I ——电流 (A);

R ——导电回路的电阻 (Ω)。

导电回路的电阻由两部分组成,即

$$R=\Sigma R_c+\Sigma R_a \tag{3·2-2}$$

式中 R_c ——导电回路中各接触部分的交流电阻 (参见本章 1·2 节);

R_a ——导电回路中各导体的交流电阻。

载流导体有圆形、矩形、槽形及圆管形截面等,当它为均质等截面时,其直流电阻为

$$R_d=\rho_0(1+\alpha_0\theta)L/A(\Omega) \tag{3·2-3}$$

式中 ρ_0 ——温度为零度时,导体材料的电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$);

α_0 ——温度为零度时,电阻的温度系数 (1/K);

L ——导体的长度 (m);

A ——导体的截面积 (m^2)。

几种金属材料的一些物理性能参数见表 3·2-1。

表 3·2-1 几种金属材料的 $\rho_0 \alpha_0 c_0 \gamma_0$ 值

材 料 名 称	银	铝	铜	铁
电阻率 ρ_0 ($\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$) (0℃)	1.590	2.635	1.670 (20℃)	9.700 (20℃)
电阻温度系数 α_0 ($\times 10^{-3}/\text{K}$) (0℃)	4.290	4.230	4.300	6.000
比热容 c_0 (20℃) [$\times 10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	0.234	0.900	4.300	0.460
密度 γ_0 ($\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$) (20℃)	10.49	2.700	8.960	7.870

导体通过交流电流时有集肤效应及邻近效应,因而交流电阻 R_a 大于直流电阻 R_d , 一般有

$$R_a=K_sR_d \tag{3·2-4}$$

$$K_s=K_{sa}K_{ps}$$

式中 K_s ——附加损耗系数;

K_{sa} ——集肤效应系数, 见图 3·2-2;

K_{ps} ——邻近效应系数。两平行圆截面铜导体的邻近效应系数见表 3·3-2。

表 3·2-2 两平行圆截面导体的邻近效应系数 K_{ps}

导体轴线间的距离 导体直径 (cm)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
2.5	1.2	1.05	1.02	1.01	1.00	—	—	—
5.0	—	1.50	1.20	1.09	1.07	1.05	1.03	1.01
7.5	—	—	1.80	1.40	1.14	1.10	1.08	1.05

1·1·2 铁磁损耗

载流导体附近的钢铁件会产生涡流和磁滞损耗,

称作铁磁损耗,其值与铁磁材料的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、电流的频率、磁感应强度、铁磁体的尺寸与形状有关。当大电流导体穿越整体不开槽的钢板、钢环时,如开关

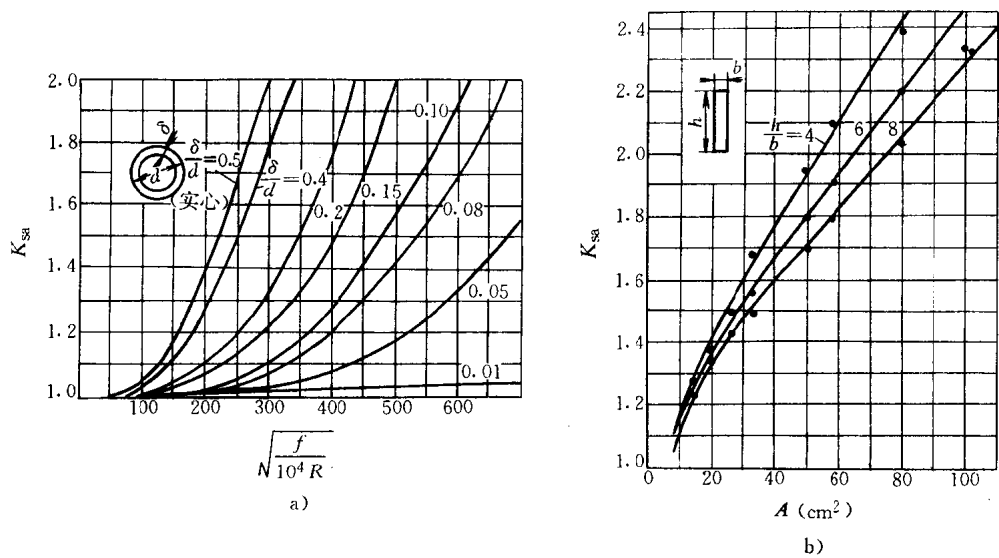


图 3·2-2 导体集肤效应系数
a) 实心和空心圆截面导体的 K_{sa} b) 矩形截面铜导体的 K_{sa}
 R —1cm 长导体的电阻 (Ω) f —频率 (Hz) $A=h \times b$

柜的面板、法兰盘时，一般会有大的铁磁损耗，局部区域的温升可能超过允许值，这时，在设计中应采取降低损耗的措施：

- (1) 改用非磁性材料；
- (2) 在围绕导电体的环形钢铁件上开槽；
- (3) 在环形钢铁件上绕以高电导率材料（例如紫铜）制成的短路环。

铁磁损耗的计算方法较复杂，见参考文献 [4]、[5]。

1·2 电接触联结与接触电阻

开关设备的导电回路总是由若干零部件构成。两

个零件通过机械连接方式互相接触而实现导电的称为接触联结。按工作方式，电接触一般可分为三大类：

- (1) 固定接触。用紧固件将两个以上导体压紧的电接触联结，它们在工作过程中没有相对运动；
- (2) 可分接触（触头）。在工作过程中可以分开的电接触，触头关合时，一般靠弹簧压紧；
- (3) 滑动及滚动接触（触头）。在工作过程中，触头间可以相互滑动或滚动但不能分开的电接触。

表 3·2-3 列出了断路器、负荷开关中使用的几种可分电接触及可动电接触。隔离开关中常用的触头结构及其特点见表 3·2-4。

表 3·2-3 几种可动接触及可分接触的结构及其特点

类别	结构图例	特 点
可分电接触	桥式 a) 平板式 b)	结构简单，动、静触头的同心度要求低，动触头的超行程较小，触头关合时易弹跳，关合能力差，极限熔焊电流较低，动、热稳定性差，开断或关合时触头接触面易被烧伤，对接触面上氧化物自清扫能力较差

(续)

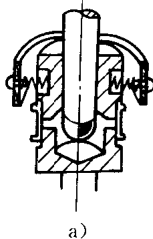
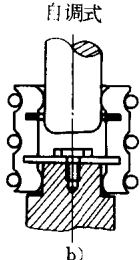
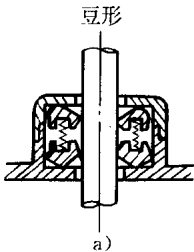
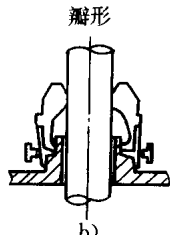
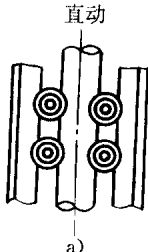
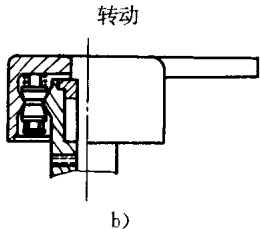
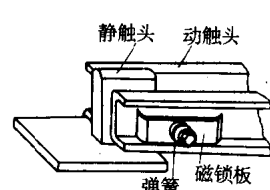
类别	结 构 图 例		特 点
可分电接触	插入式触头	瓣形  a) 自调式  b)	采用多个触指并联，结构紧凑，接触电阻小，电流分布均匀。触指与导电杆间所产生的夹紧电动力可提高触头的动热稳定性，触头的弹跳现象易克服，可提高关合能力。开断或关合时的弧根部位与关合后的接触部位不同，且能自清扫接触面上的氧化物，但摩擦力较大
	滑动触头	豆形  a) 瓣形  b)	动、静触头只作相对运动而不互相分离。轴向尺寸较短，当触头行程大时，基本不会增加轴向尺寸。各触指间电流分布较均匀，自清扫接触面上氧化物的能力强 触头运动时摩擦力较大
可动电接触	滚动触头	直动  a) 转动  b)	动、静触头通过滚轮作相对运动，摩擦力小，但自清扫触头表面氧化物的能力差，除触头结构尺寸较大外，直动式结构还需增加轴向行程尺寸，故轴向尺寸大

表 3·2-4 隔离开关常用触头结构及特点

名称	结构简图	特点	名称	结构简图	特点
闸刀形触头		动触头与主闸刀成为一体 静触头端部有导向倒角 接触点少，各点压力较高 触头的自动调整能力较差 常加装磁锁板来增大动、热稳定性	指形触头		接触点多，各点压力较低 触头的自动调整能力好 有喇叭形导向口 接触区长度根据在接线端受力情况下两端绝缘柱的最大偏移量确定

(续)

名称	结构简图	特点	名称	结构简图	特点
指形触头		接触点多,各点压力较低 触头的自动调整能力好 触头指能绕回转轴线回转一定角度,并可可靠地停留在限位钉限定的位置上,能有效地改进导向和接触	钳形触头		动、静触头都有很长的接触表面 接触点少;各点压力高 动触头的导向(钳夹)范围大,顶端有限位钩,防止静触头滑出 动触头与主闸刀成为一体

1.2.1 接触电阻^{[6][7]}

接触电阻决定于收缩电阻及表面电阻,其值的大小受材料、接触压力、接触形式(点、线或面接触)及表面状况等诸多因素的影响,可用下列经验公式估算:

$$R_c = K / (0.102F)^m \times 10^{-3} (\Omega) \quad (3.2-5)$$

式中 F ——接触压力 (N);

K ——常数。

m ——指数。

表 3.2-5 式 3.2-5 中的 K 、 m 值

电接触材料及表面状况	K 值	接触形式	m 值
银—银	0.06	点接触	0.5
铜—铜 (无氧化物)	0.08~0.14	线接触	0.75
铜—铜 (镀锡、无氧化物)	0.07~0.1	面接触	0.8~0.95
铜(镀锡)—铜(镀锡),干燥	0.1		
铝—铜	0.98		

接触面的粗糙度不要求很严,但平面度要好。

接触点的温升计算见参考文献^{[5][8][9]}。

1.2.2 触头的磨损及电接触在长期工作中的稳定性^[5]

新加工的触头,表面粗糙度较小,镀层完好,表面氧化膜薄,因而接触电阻较小。但经长期工作后,由于机械操作、开断、关合时的电弧烧蚀、化学腐蚀及电化学腐蚀,会使电接触变坏,接触电阻不断增加,危及高压开关长期工作中的可靠性,必须采取措施进行改善。

造成腐蚀及磨损的原因及对策见表 3.2-6。

表 3.2-6 触头被腐蚀及磨损的原因及对策

类型	腐蚀或磨损的原因	对 策
化学腐蚀	触头接触面上的金属或合金材料与周围介质中的氧气、酸、碱、盐起化学作用,生成不导电的化学膜或金属氧化物	在触头表面上镀银、镀锡、镀铬及增强触头的自清扫能力
电化学腐蚀	两种不同金属相互接触时,如它们之间的电化序差异大,在微量水份的参与下,产生电化学腐蚀,造成触头的金属腐蚀	动、静触头用相同的材料制造(避免采用电化序中相距较远的金属构成电接触),或在不同材料上加上中间层材料、过渡垫片
机械磨损	两触头在合、分操作中产生机械碰撞、摩擦,使触头表面变形,甚至开裂、剥落,使接触变坏	降低接触面的粗糙度,设计好动触头进入静触头的导向角以避免剧烈撞击,可涂少量导电润滑脂,以减小摩擦力
电弧磨损	触头分合闸时,电弧使触头表面层熔化,金属液体飞溅,金属气化	采用铜钨、铜钼等合金作弧触头,并使弧触头与导电触头分开

1.3 高压开关设备的散热计算

高压开关设备中产生的热损耗,通过传导、对流和辐射三种方式向周围介质散热。在不透明的固体中,只能通过热传导散热;在透明或半透明的固体中,有热传导和热辐射两种散热方式;在液体和气体中,可以同时出现热传导、对流和辐射散热过程。

1.3.1 热传导散热

当物体的内部存在温度差,由于分子和原子的微

观运动,热量会由高温区向低温区传递,这就是热传导。根据傅里叶定理,单位时间内通过单位面积的热量 Φ 与温度梯度成正比

$$\Phi = -\lambda \text{grad} \theta$$

当热量由平板的一侧传到另一侧时,有

$$\Phi = (\theta_1 - \theta_2) \lambda A / \delta \quad (\text{W}) \quad (3.2-6)$$

式中 Φ ——每秒通过平板传导的热功率 (W);

θ_1 ——平板高温侧的温度 (°C);

θ_2 ——平板低温侧的温度 (°C);

δ ——平板的厚度 (m);

λ ——平板材料的热导率,曾称导热系数 [W/(m·K)],见表 3.2-7;

A ——平板的面积 (m²)。

表 3.2-7 某些材料的热导率 λ [W/(m·K)]

金属材料	λ	非金属材料	λ
紫铜	380	胶纸板	0.26
银	420	电工纸板	0.13
铝	210	浸油电工纸板	0.197
硅铝合金	160	变压器油	0.13
黄铜	80~115	环氧树脂	0.197
钢	40~60	环氧树脂 加石英粉	0.65
铁	67	陶瓷	1.55
		石棉板	0.74

1.3.2 对流换热

流动着的流体和它直接接触的固体表面间的热传递过程称为对流换热,流动情况有自然对流和强迫对流(强迫通风)两种。对流换热的计算,现今仍采用牛顿所提出的公式,即对流换热的热功率

$$\Phi = \alpha A (\theta_1 - \theta_2)^m \quad (\text{W}) \quad (3.2-7)$$

式中 A ——散热体的散热面积 (m²);

θ_1, θ_2 ——散热体及流体的温度 (°C);

m ——常数,其值在 1.25~1.33 之间;

α ——表面传热系数 [W/(m²·K)]。

对流散热是一个很复杂的物理过程,影响散热的因素有:流体的物理性质(如密度、粘度、比热容等)、流动情况(层流还是湍流)、散热面的几何形状和放置方式(水平、垂直放置)、流动空间的大小等。 α 的取值见参考文献^[5]。

1.3.3 热辐射换热

物体的热能不断地以电磁波的形式向四面八方发射,称之为辐射换热。若热力学温度为 T_1 的物体 1 放置在热力学温度为 T_2 的物体 2 内,且 $T_1 > T_2$,在此情况下,由物体 1 经辐射传到物体 2 上的热功率为

$$\Phi = \sigma_0 \epsilon' A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (3.2-8)$$

$$\epsilon' = 1 / [1/\epsilon_1 + (1/\epsilon_2 - 1)A_1/A_2] \quad (3.2-9)$$

式中 ϵ' ——等值黑度;

σ_0 ——斯忒藩-玻耳兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ϵ_1, ϵ_2 ——物体 1 与物体 2 的黑度,见表 3.2-8;

A_1, A_2 ——物体 1 与物体 2 的表面积 (m²)。

发热体 1 放在一个大的空间内,这时 $A_1 \ll A_2, A_1/A_2 \rightarrow 0$,物体 1 散失的热功率为

$$\Phi = \sigma_0 A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (3.2-10)$$

表 3.2-8 物体表面的黑度 ϵ

物体及其 表面状况	ϵ	物体及其 表面状况	ϵ
绝对黑体	1	灰、绿、 黑色漆	0.95
氧化了的铜	0.6~0.7	抛光的紫铜	0.15
铝板、铝管 (本色)	0.3~0.4	抛光的黄铜	0.05
无光泽的 钢板、钢管	0.88	抛光的银	0.02
		抛光的铝	0.08
涂釉瓷	0.92	抛光的铁	0.27
粗糙并氧化 了的铸铁	0.98		

1.3.4 表面散热及表面散热系数

高压开关设备的零部件表面处于气体或液体中时,它的散热过程是传导、对流和辐射三种散热方式的综合。为了便于分析计算,在工程上常将不同的表面散热方式综合考虑,用综合表面散热系数 α_s [W/(m²·K)] 按牛顿公式进行散热计算:

$$\Phi = \alpha_s A (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{W}) \quad (3.2-11)$$

式中 Φ ——散出的热功率 (W);

A ——散热体的散热表面积 (m²);

θ_1 ——散热体的温度 (°C);

θ_2 ——周围介质的温度 (°C)。

表面散热系数 α_s 由实验确定, 在一定的温度范围内可视为常数, 其参考值见表 3·2-9。

表 3·2-9 物体的表面综合散热系数 α_s

物体表面特征		α_s [W/(m ² ·K)] ①
水平放置的圆铜棒或铜管	外径 1~2.5cm	11~13
	2.5~4cm	9.5~11
	4~6cm	9~10
矩形铜母线(铜板)	平放	7~8.5
	竖放	8~9.5
铝 母 线		7~9
软连接铜带		13
槽形铜母线	仅外表面散热	10~12
	内外表面散热	6~8
钢或铸铁		10~12
涂漆的导体表面		12~16
大尺寸的瓷套, 外表面, 温差 10~40K		3.7~5.6
大尺寸的瓷套, 内表面, 油中温差 4~10K		46~92
强迫通风	风速 $v \leq 5\text{m/s}$	$6.5 + 4v$
	风速 $v > 5\text{m/s}$	$8v^{0.8}$

① 截面尺寸小时的 α_s 值大。

1.4 高压开关设备零部件温升的计算

温升是指高压开关设备通以规定的电流, 零部件各部位的温度无明显变化时, 与周围空气温度的差值, 处于空气中零部件的温升可按下式计算:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Phi / (\alpha_s \cdot A) \quad (3\cdot2\cdot12)$$

式中各项数值见式 (3·2-1) 与式 (3·2-11) 及其说明。

当散热途径比较复杂时, 可按式 (3·2-6)、式 (3·2-7)、式 (3·2-8) 及式 (3·2-11) 计算出热阻, 画出热路图, 再根据热路图计算各零部件的温升, 见参考文献 [5] 第 3 章第 4 节。

1.5 长期工作时导体中电流密度的选择

选择导体中允许的电流密度值受散热条件影响大, 表 3·2-10 表示某些载流导体采用的电流密度值。

表 3·2-10 某些载流导体采用的电流密度值

载流导体		电流密度 (A/mm ²)	使用电流 (A)
空气中圆截面导体	铜	2.2~1.5	1000~2000
	黄铜	0.9~0.7	
	铝	0.5~0.3	
金属封闭开关设备 (开关柜) 中的矩形母线	铜	3~1.8	400~1250
		1.9~1.4	1600~2500
		1.4~1	3150~4000
	铝	2.5~1.4	400~1250
		1.4~0.8	1600~2500
		0.8~0.5	3150~4000
充油套管内的圆导体	铜	2.5~1.5	200~4000
	铝	2~1	200~3000
瓷套管中的导体	铜	3.3~1.5	200~3000
	铝	2~1	200~3000
户内隔离开关的闸刀	铜	2.2~1.8	400~1000
	铝	1.8~1.1	1000~2000
户外隔离开关的闸刀	铜	2.5~1.1	630~2000
油断路器中的导电杆	铜(钢板油箱)	2.6~1.6	630~1250
	铜(绝缘油箱)	1.9~2.9	630
SF ₆ 电器中的导体	铜	2~1.6	1250~2000
	铝	1~0.8	1250~2000
真空开关中的导电杆①	无 氧 铜	2~3	1250~3150

① 真空开关导电杆的截面主要由机械强度决定。

1.6 短时通过短路电流的发热——高压开关设备的热稳定性

短路电流通过开关的时间短, 向外传出的热量很少, 可近似地看作是绝热升温过程, 导电回路载流导体允许通过的短路电流及通过的时间按下式计算:

$$I^2 t_s = \frac{\gamma c A^2}{K_s \rho_0 \alpha} \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_s}{1 + \alpha \theta_c} \right) \quad (3\cdot2\cdot13)$$

式中 ρ_0 ——0°C 时导体材料的电阻率 (Ω·m), 见表 3·2-1;

α ——导体材料的电阻温度系数 (K⁻¹), 见表 3·2-1;

c ——导体材料的比热容 [J/(kg·K)], 见表 3·2-1;

γ ——导体材料的密度 (kg/m³), 见表 3·2-1;

t_s ——热稳定时间 (s);

- A ——导体的截面积 (m^2);
 I_t —— t 秒热稳定电流 (A);
 θ_c ——导体开始通过短路电流时的起始温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 θ_s ——导体流过短路电流 t 秒后的温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 K_s ——电阻的附加损耗系数见式 (3·2-4)。

设计时,可采用 t 秒热稳定电流密度的概念,计算时所得的电流密度 J_t 应低于允许电流密度

$$J_t = \frac{I_t}{A} = \sqrt{\frac{rc}{K_s \rho_0 \alpha t_s} \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_s}{1 + \alpha \theta_c} \right)} \quad (\text{A}/\text{cm}^2) \quad (3 \cdot 2 - 14)$$

表 3·2-11 给出了几种导电材料在不同的 t_s 值时允许电流密度的经验数值。 t 秒热稳定电流密度可按下式计算 (t 一般不大于 5s):

$$J_t = J_1 / \sqrt{\frac{t}{t_1}} \quad (\text{A}/\text{cm}^2) \quad (3 \cdot 2 - 15)$$

式中 J_1 ——1s 允许电流密度 (A/cm^2),见表 3·2-11;
 t_1 ——1s。

表 3·2-11 几种导电材料在不同的 t_s 值时允许电流密度 (A/cm^2)

材 料	铜	黄铜	铝	铸铝
热 稳 定时间(s)				
1	15200	7300	9000	7000
4	7600	3700	4500	3500

2 电流的电动力效应

载流导体在下列情况下将受到电动力的作用:

- (1) 邻近有载流导体;
- (2) 邻近有铁磁体;
- (3) 载流导体中的电流改变方向。

载流导体通过额定电流时,一般作用在导体上的电动力很小。但当导体中通过大的短路电流时,可能产生很大的电动力,严重时可使开关设备零部件变形或断裂;使处于闭合位置的触头的接触压力显著降低,甚至触头被推开,导致触头熔焊及产生电弧;电动力还可能使断路器、负荷开关不能顺利关合到位,造成严重后果。

但亦可利用电动力改善开关设备的性能。例如:SF₆ 旋流灭弧室及真空横磁灭弧室利用电动力提高开断能力;适当设计接地开关的电流回路,可使电动力帮助动闸刀顺利合闸;利用电动力磁锁效应可提高触头

的动、热稳定性能……。

2·1 电流电动力的计算^[10]

两载流导体或两段载流导体间的电动力按下式计算

$$F = K_0 \lambda i_1 i_2 \times 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (3 \cdot 2 - 16)$$

式中 i_1 、 i_2 ——两载流导体电流的瞬时值 (A);
 K_0 ——回路系数。其值与导体的形状、尺寸、导体间的相互位置及周围空间媒介的磁导率有关,见表 3·2-12;
 λ ——截面系数。矩形截面导体的截面系数见图 3·2-3。

表 3·2-12 计算载流导体电动力的回路系数 K_0 值 (大气中)

项 号	导体布置简图	回路系数 K_0
1		$2l/D$
2		$\frac{(b_1 + b_2) - (a_1 + a_2)}{D}$
3		$\ln \frac{(b_1 + b_2)(b_2 + b_{22})}{(a_1 + a_{12})(a_2 + a_{22})}$
4		$2 \ln(L/D)$
5		$2 \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0.5 \textcircled{1}$ $b = a/r \quad c = a/h$