

[断路器]

126 kV真空断路器散热系统改进

文/杨 哲 高 博 潘巧梅
西安西电开关电气有限公司

真空断路器散热元件直接关系到产品额定电流水平,以额定电流2 500 A真空断路器为例,设计真空断路器主要散热元件,在此基础上依据温升仿真结果,对真空断路器主要散热元件进行改进,从而使真空断路器额定电流提高至3 150 A。通过126 kV真空断路器额定电流由2 500 A提高至3 150 A时主要散热元件的设计、改进研究,为提高真空断路器额定电流提供参考。

真空灭弧室的热量主要有三个传导途径:一是通过灭弧室静侧导电杆向上传导到散热器;二是通过灭弧室动侧导电杆向下传导到出线端子上;三是通过灭弧室外壳热辐射。前两种方式是真空断路器主要的散热途径。在热量传导路径上的散热器和出线端子的发热、散热性能决定了真空断路器的温升特性。以126 kV真空断路器为例,阐述其主要散热元件的设计、改进过程。

散热器的设计

真空断路器散热器的基本形式为:散热器底板通过与断路器紧密连接,将热量通过面接触传递到散热器上,热量通过散热器上若干个均匀分布的散热翅片与空气交流换热达到散热的目的。散热器的导热系数、比热容及辐射率等因素在散热器材料选定后就固定不变了。126 kV真空断路器散热器选用铸铝,所不同的是散热器底板厚度 D 、翅片高度 H 、翅片个数 F 及翅片厚度 S 外形因素需要重新设计,提高其散热效率。

1. 单一参数影响分析

模拟真空灭弧室额定电流2 500 A温升时,热源300 W,确定散热器底板厚度 D 、翅片高度 H 、翅片个数 F 及翅片厚度 S 各参数初始值,再改变某一参数而其余参数保持不变,分析真空灭弧室静端连接处

温度值变化情况。

工况一:改变散热器底板厚度 D ,其他参数保持不变,真空灭弧室静端温度随散热器底板厚度 D 增加呈线性下降趋势。

工况二:改变散热器翅片高度 H ,其他参数保持不变,真空灭弧室静端温度随散热器翅片高度 H 增加呈指数函数规律减小。

工况三:改变散热器翅片个数 F ,其他参数保持不变,真空灭弧室静端温度随散热器翅片个数 F 增加呈不规则下降趋势。

工况四:改变散热器翅片厚度 S ,其他参数保持不变,真空灭弧室静端温度随散热器翅片厚度 S 增加呈不规则上升趋势。

由以上分析可知,散热器底板厚度 D 增加、翅片高度 H 增加,翅片个数 F 减小,翅片厚度 S 减小,可降低真空断路器温度,提高散热效率。

2. 散热器多因素正交试验

根据散热器设计经验,散热器底板厚度 D 选择50~60 mm,翅片高度 H 选择250~350 mm,翅片个数 F 选择8~12个,翅片厚度 S 选择10~20 mm。把影响散热器散热性能的底板厚度 D 、翅片高度 H 、翅片个数 F 和翅片厚度 S 四个参数作为因素,分别记为因素 D 、 H 、 F 和 S 。每个因素取三个水平,以真空灭弧室静侧连接处最高温度为指标,采用正交

表模拟试验，利用仿真软件对每组试验进行温度仿真，结果见表1。

试验序号	影响因素				灭弧室静侧温度/℃
	因素D/mm	因素H/mm	因素F/n	因素S/mm	
1	50	250	8	10	71.8
2	50	300	10	15	66.4
3	50	350	12	20	62.2
4	55	250	10	20	72.2
5	55	300	12	10	65.3
6	55	350	8	15	63.7
7	60	250	12	15	75.1
8	60	300	8	20	67.3
9	60	350	10	10	61.6

由表1可知，改变散热器各因素参数，真空灭弧室静侧最高温度为75.1℃，最低温度为61.6℃，相差13.5℃，由此可见散热器的结构对真空灭弧室温度影响很大。

分析散热器各因素正交试验表：散热性能最好的试验3、试验6及试验9三组数据灭弧室静侧的温度都未超过65℃，三组数据有共同的因素H，即散热器高度都为350mm。试验1、试验4及试验7三组数据灭弧室静侧的温度都超过了70℃，三组数据有共同的因素H，即散热器高度都为250mm。由此可见，因素H为散热器设计的第一关键因素，散热器高度大，整个散热器的外表面积就大，对流散热的能力也就更强。

3. 确定最优方案

为寻找出最优方案，对表1数据进行处理。 K_{ij} 表示散热器正交表中第j列上水平为i的各个试验指标的和。 K_{ij} 可由以下公式表示

$$K_{11}=\text{试验1}+\text{试验2}+\text{试验3} \tag{1}$$

$$K_{12}=\text{试验1}+\text{试验4}+\text{试验7} \tag{2}$$

$$K_{13}=\text{试验1}+\text{试验6}+\text{试验8} \tag{3}$$

$$K_{14}=\text{试验1}+\text{试验5}+\text{试验9} \tag{4}$$

同理得到 K_{2j} 、 K_{3j} 、 K_{4j} ，则平均值为

$$\overline{K_{ij}}=\frac{1}{S}K_{ij} \tag{5}$$

式中， $\overline{K_{ij}}$ 表示水平i在正交表中第j列的平均值；S为第j列上水平i出现的次数。

R_j 表示第j列因素水平i的极差，计算公式为

$$R_j=\max_i\overline{K_{ij}}-\min_i\overline{K_{ij}} \tag{6}$$

温度的求和公式为

$$T=\sum_{i=1}^9T_j \tag{7}$$

温度平均值 $\overline{T}$ 的计算公式为

$$\overline{T}=\frac{T}{9} \tag{8}$$

散热器各因素正交试验数据处理见表2。

极差	影响因素				温度/℃
	因素D	因素H	因素F	因素S	
K_{1j}	200.4	219.1	202.8	198.7	$T=605.6$
K_{2j}	201.2	199.0	200.2	205.2	
K_{3j}	204.0	187.5	202.6	201.7	
$\overline{K_{1j}}$	66.8	73.0	67.6	66.2	
$\overline{K_{2j}}$	67.1	66.3	66.7	68.4	
$\overline{K_{3j}}$	68.0	62.5	67.5	67.2	
R_j	1.2	10.5	0.9	2.2	

由表2可知，散热器每列每个水平的极差是不相等的，说明各列中散热器各因素的改变对温度影响的效果是不同的。极差越大，说明该因素的改变对温度影响越大。极差 $R_H>R_S>R_D>R_F$ 说明，设计的散热器正交试验中各因素对温度影响的次序是： $H\rightarrow S\rightarrow D\rightarrow F$ 。

根据各因素对散热器温度的影响可得到以下结论：对于主要因素H（散热器高度）和因素S（翅片厚度），都选择了具有最优的水平3和水平1；而对于次要因素D（底板厚度）和因素F（翅片个数），则选择了温度最低的水平1和水平2，因此，得到最优的试验方案为H3S1D1F2，即翅片高度350mm，翅片厚度10mm，底板厚度50mm，翅片个数10个。

出线端子的设计和弹簧触指的应用

1. 出线端子的设计

126kV真空灭弧室产生的热量向下经过导电杆传递给出线端子，出线端子外表面直接与外界空气接触，出线端子的对流散热和热辐射是灭弧室热量向下传导的主要散热途径。影响出线端子散热效率的主要因素有两点：散热面积和热传导率。散热面积主要由其外型尺寸决定；热传导率主要由其材质以及电气连接方式决定。

金属的热传导率见表3。从表3可知，铜的热传导率最高，其次是铝。出线端子应当选热传导率高的材料，因此首选铜材。但出线端子质量较大，如果使用铜材，其成本极高，从经济方面考虑宜选用铝材。

表3 金属的热传导率

材料	$\lambda/[W/(m \cdot K)]$	材料	$\lambda/[W/(m \cdot K)]$
铝	204	铸铁	102
钢	46	铜	392

出线端子对流换热计算采用牛顿公式，即

$$\Phi = \lambda A(\theta_1 - \theta_2) \quad (9)$$

式中， Φ 为热功率，单位为W； A 为与流体接触导体的外表面积，单位为 m^2 ； λ 为对流换热系数， $[10^2 W/(m \cdot K)]$ ； θ_1 为壁面温度，单位为K； θ_2 为流体平均温度，单位为K。

由式(9)可知，要提高出线端子的对流换热效率，就要提高其表面积。决定出线端子表面积的两个主要因素是散热翅片的个数和出线端子的高度。为确定出线端子高度和散热片个数，采用控制一个参量变化、保持另一个参数不变的方法，研究单一参数对出线端子散热效率的影响。

工况一：出线端子直径为360 mm，保持出线端子高度为100 mm不变，分别仿真每 6° 、 8° 、 10° 、 12° 及 15° 一个散热翅片时的散热情况，如图1所示。

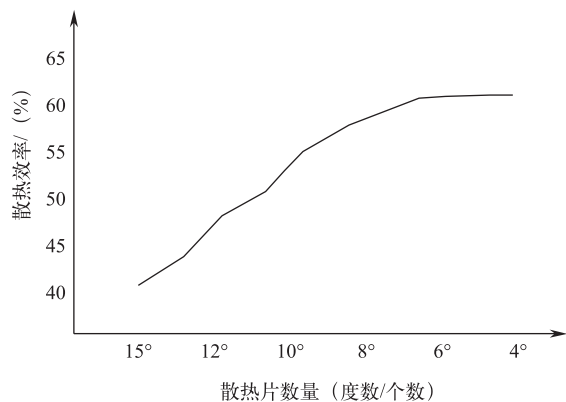


图1 出线端子不同散热片数下的散热效率

由图1可以看出，随着散热片数量从每 15° 一片增加到每 6° 一片时，散热效率从43%增大到61%，之后增幅不再明显，维持在61%左右。这是由于散热翅片数量的增加也相应增加了有效散热面积，散热公式为

$$Q = KA\Delta t \quad (10)$$

式中， Q 为热量，单位为J； K 为传热系数； Δt 为温差，单位为K。

在温差及传热系数不变情况下，增加散热面积是有利于散热的。但当散热翅片达到一定数量后散热效率趋近一定值，从经济性及工艺性方面考虑，应选择散热效率趋于饱和前的散热翅片数，即每 6° 一个散热翅片。

工况二：出线端子直径为360 mm，保持出线端子每 6° 一个散热翅片不变，分别仿真端子高度为80 mm、100 mm、120 mm、140 mm和160 mm时的散热情况，如图2所示。

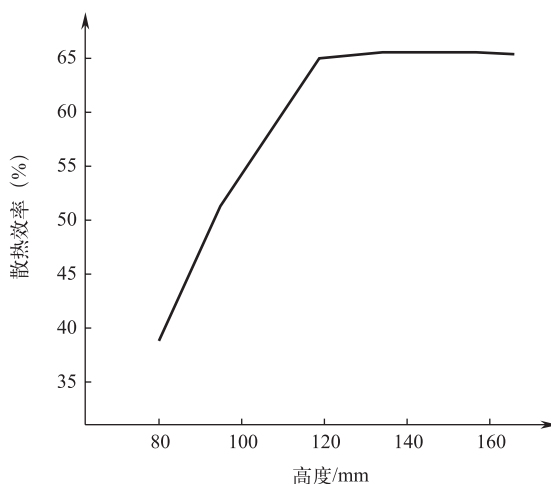


图2 出线端子不同高度下散热效率

由图2可以看出，随着端子高度由80 mm增加到160 mm，散热效率从38%快速增大到65%，之后增幅趋缓。这是由于端子高度由80 mm增大到120 mm，端子表面积快速增大，由于表面积快速增大，表面的平均热流密度在快速减小，所以其散热效率也快速增大。当端子高度达到120 mm以后，虽然表面积同样在增大，但端子体积过大时，端子上的热量已不是平均分布，靠近传热点的温度较高而远离传热点的温度较低，这时单纯增大表面积对散热效率影响较小，所以出线端子高度应选择120 mm较为合理。

2. 弹簧触指的应用

126 kV真空灭弧室动侧热量通过导电杆传递给出线端子进行散热，导电杆与出线端子之间的关键是电气连接，如果连接不可靠或接触电阻大，将导致灭弧室热量无法传递到出线端子上，导电杆及与

导电杆连接处的温升将超标。

目前较为常用的电气连接方式有弹簧触指、表带触指及梅花触指。本设计采用弹簧触指做为导电杆与出线端子之间的连接方式，弹簧触指具有以下优点：装配效率高，不需要专用工装；结构简单，成本低；压缩变形后接触点多，导热性、导电性好；允许变形量大，对安装沟槽和导体杆加工精度要求低；能够应用于各种通流量。

2 500 A 电流需要的弹簧触指数量需通过以下试验确定。如图3所示，左边安装2根弹簧触指，右边安装3根弹簧触指，弹簧触指相同，安装方式相同，其外部散热面积相同，在左、右导体相同位置贴序号为1~8的热电偶，对导体通以2 500 A 电流，待温升稳定后比较序号1~8的热电偶的温升值。

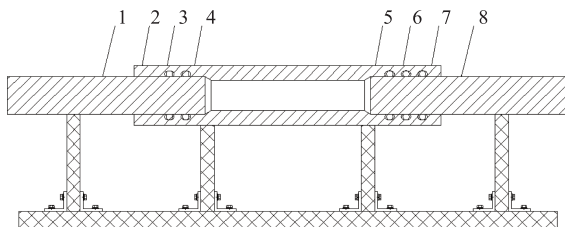


图3 2根与3根弹簧触指温升示意

2根与3根弹簧触指温升数据见表4。

表4 2根与3根弹簧触指温升数据

左侧2根弹簧触指温升值/K	序号1	序号2	序号3	序号4
	60	64	66	66
右侧3根弹簧触指温升值/K	序号5	序号6	序号7	序号8
	58	59	57	53

3根与4根弹簧触指温升示意如图4所示，左边安装3根弹簧触指，右边安装4根弹簧触指，弹簧触指相同，安装方式相同，其外部散热面积相同，在左、右导体相同位置贴序号为9~16的热电偶，对导体通以2 500 A 电流，待温升稳定后比较序号9~16的热电偶的温升值。

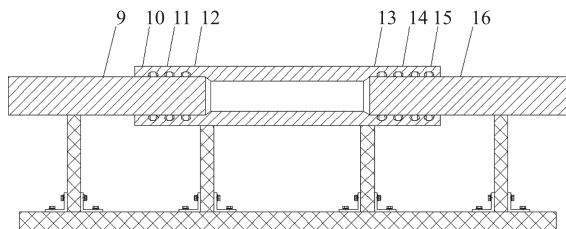


图4 3根与4根弹簧触指温升示意

3根与4根弹簧触指温升数据见表5。

表5 3根与4根弹簧触指温升数据

左侧3根弹簧触指温升值/K	序号9	序号10	序号11	序号12
	53	57	59	57
右侧4根弹簧触指温升值/K	序号13	序号14	序号15	序号16
	56	58	57	52

由表4、表5可知，在2 500 A 电流下， $\phi 45$ 导体的3根、4根弹簧触指的温升情况明显好于2根弹簧触指，但 $\phi 45$ 导体的3根和4根弹簧触指温升情况基本相同，说明在2 500 A 电流下，在安装有4根弹簧触指的导体上，大部分电流只通过前3根弹簧触指进行传导，实际通过第4根弹簧触指的电流相对较小，根据试验结果导电杆与出线端子间设计有3根弹簧触指。

散热系统仿真

126kV 真空断路器各部件散热示意图如图5所示，可将真空灭弧室外部的固封胶体、玻璃布棒缠绕筒和硅橡胶等绝缘材料视为一种热导率非常低的绝缘材料，其主要散热途径为散热器以及出线端子与空气之间的对流换热。

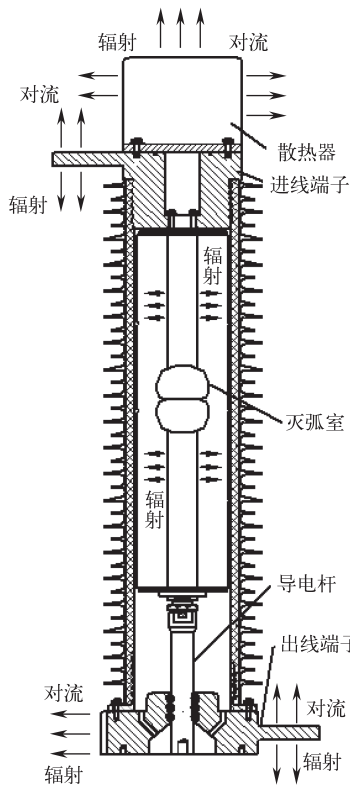


图5 真空断路器散热示意

散热器和出线端子126 kV 真空断路器模型，利

用有限元分析软件ANSYS进行2 500 A电流下温升仿真。

由环境温度22℃、载流2 500 A情形下的长期温升可以看出,在灭弧室动侧导电杆出现最高温度83℃,其最大温升为 $83^{\circ}\text{C}-22^{\circ}\text{C}=61^{\circ}\text{C}$ (61 K)。出现在灭弧室内部,最高温未超过70 K,真空断路器温升仿真合格。

以126 kV真空断路器为模型,将额定电流提高到3 150 A进行温升仿真。

可以看出,在灭弧室动侧导电杆出现最高温度94℃时,其最大温升为 $94^{\circ}\text{C}-22^{\circ}\text{C}=72^{\circ}\text{C}$ (72 K)。出现在灭弧室内部,温升超过70 K。由仿真结果看,该模型不能长期运行在额定3 150 A电流下。

基于上述仿真结果,传统126 kV真空断路器的散热结构能够长期运行在2 500 A电流下,但不能达到3 150 A额定电流水平。126 kV真空断路器额定电流要达到3 150 A,需要对主要散热元件进行改进。

散热器的改进

传统散热器的材质为铸铝,散热器底部通过螺栓使底面与进线端子连接,散热器顶部有多片散热翅片,翅片增大了散热器的表面积,通过更多的空气流动带走断路器的热量。这种结构的散热器适用于额定电流2 500 A以下的真空断路器,当额定电流达到3 150 A时,散热器的散热效率显然不够。

1. 热管技术的应用

为解决散热器散热能力不够的问题,需要提高真空断路器静侧灭弧室的散热效率。通过之前的设计可知,改变散热器外型以提高散热效率的设计已经做到最优化,再单纯增大散热面积的方法已不能明显提高散热效率。因此引进热管技术,使散热器具有主动散热的性能。

热管的截面积并不是很大,但能够完成较远距离的热量传导,使需要传热的零部件间保持较小的温度差,由于其具有高效的导热性能,因此可替代复杂笨重的散热器件。热管技术的原理是基本的热传导理论,热管内工作液由液态变为气态并带走大量的热量,再将气态的工作液变为液态释放大量的热量,通过此种方式循环来实现热量的快速传递。热管已在电子元器件散热领域大范围应用,但在高

压电气领域应用还比较少。

126 kV真空断路器应用的是重力热管,其由管壳、工作液体以及外部散热片构成。重力热管的管壳为铜,工作液为水,外部散热片为铜或铝。热管按功能可分为加热段、绝热段和冷却段。工作液在热管这个区域内循环往复,快速传递热量。热管工作原理如图6所示。

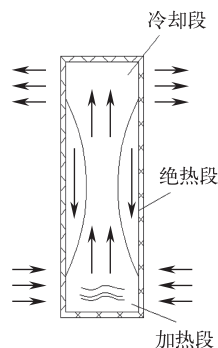


图6 热管工作原理

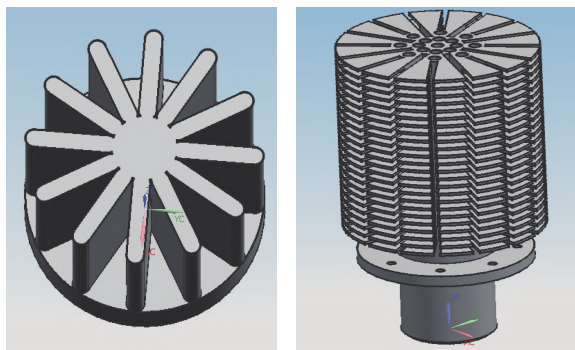
重力热管散热过程为:①热量从进线端子传递到散热器铝块基座;②铝块基座对嵌套在其内部的热管进行加热;③热量使热管内部工作液体蒸发。液体相变为蒸气,吸收大量热量;④蒸气越过绝热段后抵达冷却段;⑤蒸气将所携带热量传递给冷却段热管壁;⑥通过热传导将热量输送到贴附于热管外壁上的金属散热片中,借助散热片与周围冷却空气的自然对流传热过程将热量从散热片上带走。可以看出,热管散热器主要通过传导和对流的方式进行散热。通过散热器与热源接触来传导热源产生的热量,再通过热管的相变潜热将热量传递至散热片,再借助自然对流方式带走散热片的热量。

2. 散热器结构的改进

热管长约580 mm,直径为16 mm,共8~16根。热管通过熔焊插入散热器底部。散热器底部145 mm深入真空灭弧室静侧,散热器顶部重新设计了多层、多翅片散热器,与原散热器相比表面积增大了约2倍。散热器为铝质,热管外壳为纯铜,内置工作液,热管用银铅焊料与散热器焊接。126 kV真空断路器散热器如图7所示。

改进后散热器热管深入真空灭弧室,灭弧室传出的热量能够快速通过热管传导,当热量由热管加热段被传递到冷却段时,多层、多翅片散热器快速将热量与空气进行对流换热,极大地提高了散热效

率。如散热器材质由铝更换为铜，散热器散热效果将进一步提升。



(a) 改进前的散热器

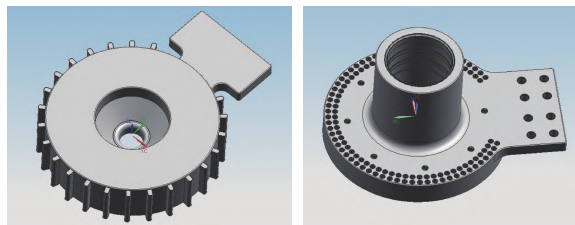
(b) 改进后的散热器

图7 126 kV真空断路器散热器

出线端子的改进

将出线端子的铝材更换为导电率更高的铜材，可使端子具有更小的体电阻和更高的散热效率，因为铜的热传导率接近铝的2倍。将散热翅片结构改为孔洞结构，因为孔洞结构具有更大的表面积，约为翅片结构表面积的1.5倍，更有利于出线端子的对流换热。当电流从2 500 A提高到3 150 A时有更多的热量需要通过出线端子散热，改进后出线端子的散热能力成倍提升，可以满足这种散热需求。

提高出线端子与导电杆接触指的高度，使导电杆电流以最短的路径传递到出线端子上，触指比原来提高了150 mm，热量从导电杆传导至出线端子的距离减少了150 mm，能够更快地在出线端子上进行对流散热。此外，还增大了触指圈直径，提高了触指通流能力，减小了触指接触电阻，并使得导电杆和出线端子导流横截面积增大，减小电流密度。出线端子的改进方案如图8所示。



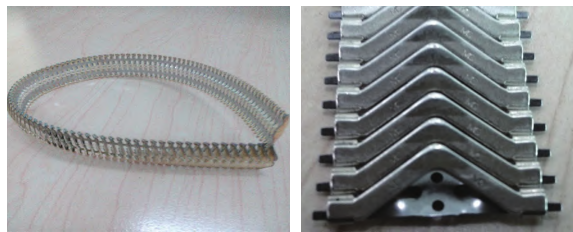
(a) 改进前的出线端子

(b) 改进后的出线端子

图8 出线端子的改进方案

更换螺旋弹簧触指为新型表带触指，如图9所示。新型表带触指是某公司最新产品，单根表带触

指通流能力达到3 000 A，使用两根这种表带触指，标称通流能力达6 000 A。表带触指在安装后，即使有加工、安装偏差，以及压紧力不够大等现象，但由于裕度够大，还是能达到3 150 A的通流要求。



(a) 整体

(b) 局部

图9 新型表带触指

散热系统改进后仿真

以改进后的126 kV真空断路器为模型，利用有限元分析软件ANSYS进行3 150 A电流下温升仿真。仿真结果如图10所示。

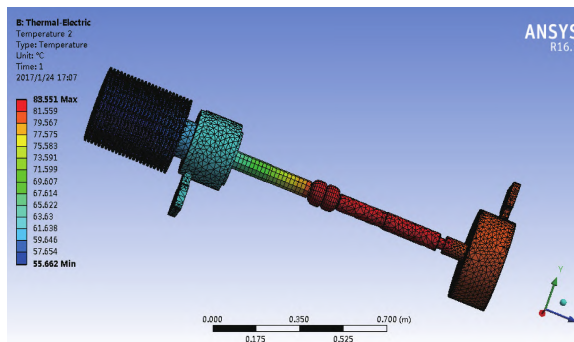


图10 模型改进后通流2 500 A温度场

由图10可见，温度最高点出线在触头接触面，环境温度依然为22℃，最高点的温升出现在灭弧室触头，为83℃-22℃=61℃（61 K），小于65 K，符合标准规定。改进后126 kV真空断路器各点温升如下：散热器温升为33 K，进线端子为43 K，导电杆为58 K，出线端子为56 K。以上各零件温升都取零件最高温度计算。

结束语

本文介绍了通过优化散热设计以及加装热管，提高电连接件导电导热性，从而提高真空断路器额定电流的方法，为真空断路器的设计、改进提供参考。EA

（收稿日期：2022-03-18）