

文章编号: 1001-1609(2007)03-0179-04

# 高电压真空断路器温升影响因素的仿真研究

余小玲<sup>1</sup>, 魏义江<sup>1</sup>, 刘志远<sup>2</sup>, 冯全科<sup>1</sup>, 王季梅<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学能动学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Simulation Researches on Influence Factors of Temperature Rise in  
High Voltage Vacuum Circuit Breaker

YU Xiao-ling<sup>1</sup>, WEI Yi-jiang<sup>1</sup>, LIU Zhi-yuan<sup>2</sup>, FENG Quan-ke<sup>1</sup>, WANG Ji-mei<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 以一种高电压真空断路器模型为研究对象, 对影响真空断路器温升的散热表面对流换热系数、动静触头接触点半径、接触点位置以及导电杆的半径4种因素进行了仿真研究。研究表明, 在考虑散热表面辐射和不考虑辐射两种情况下, 动、静触头接触处的温度差别在5%以内, 而考虑散热表面的辐射后, 接线端子的温度下降了14%。真空断路器温升随着动静触头接触点半径的增大迅速降低而与接触点位置无关, 但当接触点半径增大至2 mm以后, 温升降低趋势已不明显。真空断路器温升随着导电杆半径的增大而降低, 其中触头接触处温度降低的趋势最为显著, 但当导电杆半径增大至25 mm以后, 温升降低趋势已不明显。

关键词: 高电压真空断路器; 温升; 热分析

中图分类号: TM561.2

文献标志码: A

Abstract: The influence factors on the temperature rise, including heat transfer coefficients on radiating surfaces, radius and position of contact face between moving contact and stationary contact, and radius of current-conducting rod, had been simulated and analyzed by using a model of high voltage vacuum circuit breaker as research object. Simulation results show that the temperature of contact surface between moving contact and stationary contact decrease less than 5%, but the temperature of terminal decreased about 14% when the radiation on the heat sink surface is included. With the increasing of the contact surface radius between moving contact and stationary contact, the temperature rise of VCB decreasing rapidly, this is independent of its position. The temperature rise achieve saturated when the contact surface radius reach to 2 mm. With the increasing of the current-conduction rod radius, the temperature rise of VCB, especially the temperature rise of contact surface between moving contact and stationary contact decreasing. The

temperature rise achieve saturated when the rod radius reach to 25 mm.

Key words: high voltage vacuum circuit breaker (VCB);  
temperature rise; thermal analysis

## 0 引言

真空断路器具有使用寿命长、易于维护、适合频繁操作、体积小等优点, 目前在国内12 kV真空断路器的市场占有率已达到98.85%<sup>[1]</sup>。随着真空电弧理论研究工作的不断深入和人们对环境的日益重视, 真空断路器正在不断向真空灭弧室小型化、大容量和高电压方向发展<sup>[2]</sup>。这些都使真空断路器内的生热密度越来越高, 而热量如果不能通过有效途径疏散和排出, 过高的温升将会对导体的机械强度造成极大危害; 同时, 还易使与空气接触的金属导体表面氧化; 另外, 各种部件的工作温度也是影响其寿命的重要因素。

真空断路器的热问题已经受到国内外真空断路器研究专家们的广泛重视。文[3]分析了断路器导电回路材料、断路器相间距以及安装工艺3方面因素对真空断路器温升的影响, 并提出了降低温升的有效措施。文[4]从实际设计经验出发, 指出通过合理设计风道结构、降低电阻损耗和铁磁损耗可以有效控制真空断路器内的温升。这些研究成果为控制真空断路器的温升提供了宝贵经验。

应用传热学的基本理论对电力电子产品进行热模拟在许多电力电子产品的研制开发中已成为非常普遍且重要的一个步骤<sup>[5-7]</sup>。但是目前还没有文献对高电压真空断路器内的温度场进行详细的模拟研究, 面对高额定电流等级的高电压真空断路器的需

收稿日期: 2006-11-19; 修回日期: 2007-01-26

作者简介: 余小玲(1978-), 女, 湖北省潜江人, 讲师, 从事电力电子器件散热研究工作。

要,通过对断路器内的温升进行定量的计算分析,对影响真空断路器温升的各种因素进行研究在断路器的结构设计中非常必要。

我国在高额定电流等级的高电压真空断路器的研制上已经取得了一定进展,已制造出一台 126 kV 单断口真空断路器样机,其额定电流为 2 kA,短路开断电流为 40 kA。在此基础上,正在进一步研究更高电压等级和更大额定电流的真空断路器,真空断路器的传热研究已经成为一个必不可少的研究内容。在此背景之下,以一种高电压真空断路器作为研究对象,对影响真空断路器传热的 4 种因素,包括散热表面的对流换热系数、动静触头接触点半径、接触点位置以及导电杆的半径进行了模拟研究,并对其影响程度进行了评估,研究结果可为高电压等级真空断路器的热设计提供依据。

### 1 真空断路器的结构

一种高电压真空断路器的结构见图 1<sup>[6]</sup>。真空灭弧室极柱由陶瓷套管作为绝缘支柱,在陶瓷套管内装有真空灭弧室,静导电杆周围有上导电环和上法兰,并在陶瓷套管外面设有和上导电环连接的上接线端子;动导电杆周围有下导电环和导电支撑,导电支撑的下方有下法兰,并通过下导电环连接陶瓷套管外面的下接线端子。在上法兰的上方,设有第 1 散热器,在下法兰之后设有第 2 散热器,在陶瓷套管与真空灭弧室以及陶瓷套管与导电支撑之间的空隙中有绝缘油。图 2 为灭弧室内的静导电杆和触头的示意图,主要的结构参数见表 1。

### 2 真空断路器的温度场模拟

采用 Ansoft 软件对真空断路器的温度场进行

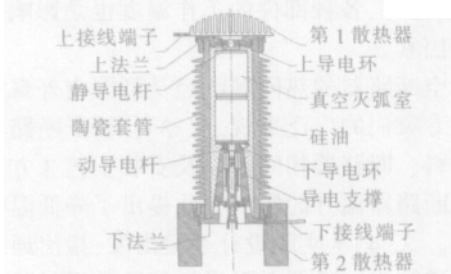


图 1 真空开关结构图

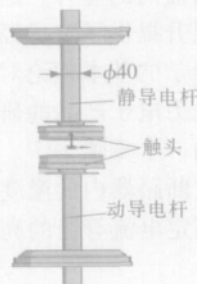


图 2 静导电杆和触头示意图

表 1 真空断路器主要的结构参数

名称	参数
散热器翅片	长度 70 mm, 厚度 16 mm, 高度 100 mm, 数目 48
散热器底座	内径 306 mm, 外径 446 mm, 厚度 22 mm
上下接线端子	内径 22 mm, 宽度 100 mm, 长度 200 mm
法兰	内径 306 mm, 外径 446 mm, 上法兰厚度 32 mm, 下法兰厚度 52 mm
静导电杆	直径 40 mm, 长度 335 mm
动导电杆	直径 40 mm, 长度 315 mm
触头	直径 100 mm, 厚度 35 mm
上导电支撑	直径 270 mm, 厚度 75 mm
下导电支撑	内径 100 mm, 外径 160 mm, 长度 545 mm

模拟。计算区域和建立的几何模型见图 3。有效值为 2 kA 的交变电流从上接线端子流入,从下接线端子流出,电流流经的每一个部分均为热源。静、动导电杆和触头位于真空灭弧室内,其表面可认为满足绝热边界条件。热量主要由上下两个散热器通过自然对流和辐射的方式散出。加载求解后温度场的分布见图 4,其中触头接触处的温度最高。

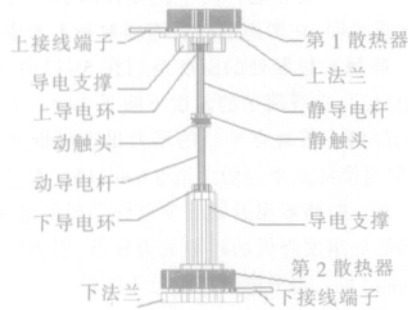


图 3 Ansoft 中的几何模型

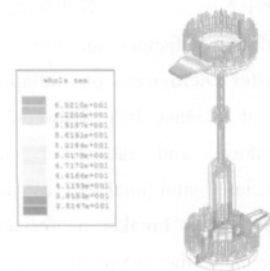


图 4 真空断路器的温度分布

### 3 真空断路器温度场的影响因素分析

#### 3.1 散热表面的综合对流换热系数

各个散热部件表面的辐射和空气自然对流的综合换热系数通过 Fluent 软件模拟求解而得。以散热器为例来说明综合对流换热系数的求解方法。散热器由翅片和底板组成。由于翅片的分布具有对称性,模拟过程中取相邻两个翅片的对称中心之间的区域进行计算。在翅片的长度方向,为了消除空气的影响,计算区域延伸至 5 倍翅片长度。散热器结构和计算区域分别见图 5(a)、(b)。

接线端子表面的换热系数也是通过 Fluent 模

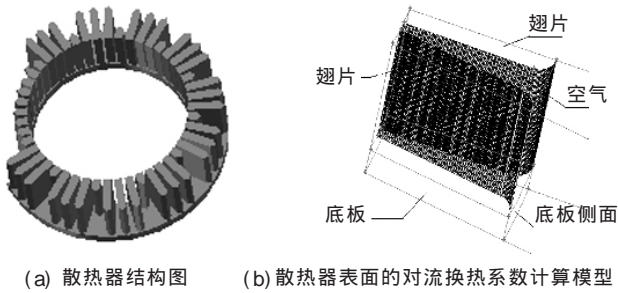


图5 散热器结构和计算区域

拟,由接线端子的对称性,取其1/2进行计算,见图6。

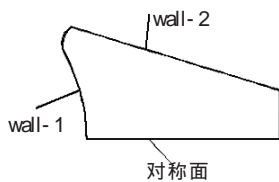


图6 接线端子的计算模型

取环境温度为10,散热器底板下表面温度为40,接线端子上下表面温度为40。在考虑散热部件表面辐射和不考虑辐射两种情况下,各表面的综合换热系数列在表2中。从表2中可以看出,在考虑辐射的情况下,作为主要散热表面的翅片表面综合对流换热系数大约是不考虑辐射时的2倍。

表2 自然对流和辐射情况下的综合换热系数

散热表面	$h/(W \cdot m^2 \cdot K^{-1})$	
	情况1: 自然对流	情况2: 自然对流和辐射
翅片侧面	4.00	7.74
翅片上端面	4.00	5.37
底板上表面	1.51	2.26
底板侧面	11.12	17.49
接线端子上表面	2.58	8.45
接线端子下表面	4.02	10.05
接线端子侧面1	6.44	12.47
接线端子侧面2	6.63	12.66

在两种情况下计算所得的触头接触处的最高温度和上接线端子的最高温度列在表3中。

表3 两种情况下的温度计算结果

	情况1	情况2	$\left  \frac{T_1 - T_2}{T_1} \right  \times 100\%$
	$T_1/$	$T_2/$	
触头接触处的最高温度	65.21	62.19	4.63
上接线端子的最高温度	36.85	31.59	14.27

从表3中可以看出,两种情况下触头接触处的最高温度相差在5%以内,而考虑散热表面的辐射后,上接线端子的温度下降了14.27%。

### 3.2 触头接触点半径和位置

当真空断路器闭合时,两个触头表面的接触不是理想的面接触,而是离散的若干个点接触。对于单个接触点,接触半径 $r$ 按式(1)计算<sup>[9]</sup>:

$$r = \sqrt{\frac{F}{H}} \quad (1)$$

其中 $F$ 为接触压力; $H$ 为接触硬度,大约为布氏硬度的60%~80%;为修正系数,在1/3~1之间。

以下计算两个接触面间只存在一个接触点时的温升情况。触头材料为铜铬合金,查得 $H=784 \sim 1176 N/mm^2$ ;两个触头之间的接触压力 $F=5390 N$ 。这样根据式(1)计算得到 $r=1.35 \sim 3.31 mm$ 。接触点的圆心位置设在触头表面的中心。建模时,在接触面的圆心位置掏空一个小圆柱,圆柱半径为点接触半径,高度取为0.5 mm,然后在掏空的部分用相同的圆柱填补,再在触头接触面添加绝缘边界条件。不同接触半径下触头接触处的最高温度和上接线端子的最高温度变化见图7。

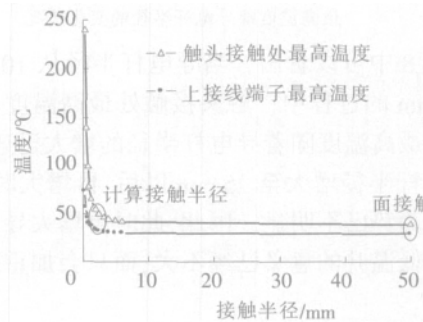


图7 触头接触处最高温度和接线端子最高温度随接触半径的变化情况

从图7中可以看出,当接触点半径从0.4 mm增大至2 mm的过程中,触头接触处最高温度和上接线端子的最高温度随着接触半径的增大迅速降低;但当接触点半径增大至2 mm以后,再增大接触半径时,两处温度降低趋势已不明显,接触点半径为6 mm时的两处的温度值已经和理想面接触时的温度值相当。

为了分析接触点位置对温度分布的影响,对接触半径为1 mm、不同接触点位置的温度分布情况进行模拟,模拟结果见表4。

表4  $r=1 mm$ 、接触点位置不同对温度影响

接触点圆心位置	触头接触处最高温度/ $^{\circ}C$	上接线端子最高温度/ $^{\circ}C$
(0, 0)	78.073	40.269
(10, 0)	78.473	40.678
(20, 0)	81.751	41.674
(30, 0)	82.284	41.286
(40, 0)	83.163	41.756

从表4中可以看出,接触点位置的变化对真空断路器的温度场几乎没有影响,进行温度场模拟计算时,可以将接触点位置设在两触头接触面的中心。

### 3.3 导电杆的半径

静、动导电杆半径的变化将会直接影响到导电杆的导热热阻。导电杆越粗,其热阻越小,触头接触处温升越低,反之则温升越高。但导电杆加粗的直接后果是造成操纵机构的负荷加重。因此导电杆直径

不能设计得过大,在满足机械强度和温升的条件下,其直径应尽量小。图 8 是触头接触处最高温度和上接线端子的最高温度随导电杆半径变化的模拟结果。模拟过程中假设动静触头之间只有一个接触点,接触点半径为 1 mm。

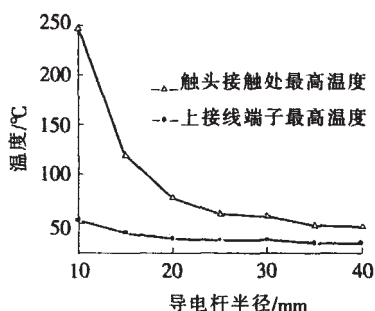


图 8 触头接触处最高温度和上接线端子最高温度随导电杆半径的变化情况

从图 8 中可以看出,当导电杆半径从 10 mm 增大至 25 mm 的过程中,触头接触处最高温度和上接线端子的最高温度随着导电杆半径的增大迅速降低;但当导电杆半径增大至 25 mm 以后,再增大时,二处温度降低趋势已不明显。因此,此时再增大导电杆的半径对降低温升的意义已经不大,而只会加重操纵机构的负荷。

## 4 结论

对影响高额定电流等级的高电压真空断路器温升的 4 种因素——散热表面的对流换热系数、动静触头接触点半径、接触点位置以及导电杆的半径,进行了仿真研究,得到如下结论:

(1) 在高电压真空断路器的热分析中,散热器表面的热辐射不能忽略。辐射对散热器表面综合换热系数的贡献与空气自然对流相当。

(2) 触头实际接触面积对触头接触处的温度和接线端子的温度影响显著,但这种影响随实际接触面积的增加迅速进入饱和区,在该计算条件下,当接触点半径增大至 2 mm 以后,断路器温升降低趋势已不明显。

(3) 触头接触区位置的变化对真空断路器的温度场几乎没有影响。

(4) 触头接触处温度和接线端子的温度均随着导电杆半径的增大而降低,其中触头接触处温度降低的趋势更显著,但这种降低在导电杆直径达到一临界值(在此研究对象中,该临界值为 50 mm)后会进入饱和区,继续增大导电杆直径对降低温升作用不大。

## 参考文献:

- [1] 李建基. 中压真空断路器的世界市场 [J]. 高压开关行业通讯, 2006(3): 21-23.
- [2] 王季梅. 真空开关的现状与发展趋势 [J]. 电力设备, 2005, 6(2): 1-5.
- [3] 陈剑光, 柳春芳, 郭福明. 大电流真空断路器温升与过热影响因素的探讨[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 25-26.
- [4] 刘爱华. 高开断大电流开关柜温升的试验研究 [J]. 河北电力技术, 2001, 20(3): 38-39.
- [5] SCHAEFFER C, FERRIEUX J P, PERRET R, et al. Thermal Simulation in Power Electronics[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1992. APEC 92. Conference Proceedings 1992, 1992: 780-784.
- [6] SAINI M, WEBB R L. Heat Rejection Limits of Air Cooled Plane Fin Heat Sinks for Computer Cooling [J]. Part A: Packaging Technologies, IEEE Trans on, 2003, 26(1): 71-79.
- [7] 余小玲, 曾翔君, 杨旭, 等. 混合封装电力电子集成模块内的传热研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 258-261.
- [8] 王季梅, 刘志远, 修士新, 等. 具有高额定电流等级的高压真空断路器[P]. 实用新型专利, ZL200420086275.3.
- [9] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 张晓虹, 张亮, 乐波, 等. 基于局部放电的矩特征分析大电机主绝缘的老化 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 94-98.
- [5] 宋建成, 谢恒堃, 石宗义, 等. 基于数字局部放电检测的大型电动机主绝缘老化特性的研究 [J]. 电工电能新技术, 2001, 20(2): 1-6.
- [6] 乐波, 李俭, 张晓虹, 等. 基于指纹参量的环氧云母绝缘多因子老化的实验研究 [J]. 电工电能新技术, 2001, 20(2): 29-32, 68.
- [7] 黄成军. 基于小波理论的大型汽轮发电机局部放电在线监测系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
- [8] 邵震宇, 黄成军, 赵亚奎, 等. 用 PSO 算法训练神经网络抑制发电机局放随机脉冲干扰 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 49-52.
- [9] 徐冰雁, 黄成军, 钱勇. 多小波相邻系数法在局部放电去噪中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 61-64, 70.

(上接第 178 页)

主要分布在第 1 象限,呈现三次曲线的形状。相比局放轻微的情况,局放严重的发电机的数据变化范围出现较大幅度的增加,实例显示,后者的偏斜度和突出度的变化范围分别增加了大约 4 倍和 14 倍。

## 参考文献:

- [1] 黄成军, 郁惟镛, Paole G, 等. 局部放电在线监测及其在大型电机中的应用 [J]. 大电机技术, 2000(6): 33-38.
- [2] KIM C S, TANI Y, MIZUTANI T. Investigation of Aging Process with New PD Pulse Parameters [C]// Proceedings of 2001 International Symp. on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001), Japan: Himeji, 2001: 19-22.
- [3] 张百华, 高乃奎, 马小芹, 等. 基于运行历史的大电机主绝缘老化特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 134-137.