

一种仿真估算载流件长期温升的方法

朱琦琦, 程立

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 长期温升是高压电器设计时必须考虑的重要指标之一, 计算长期温升的关键是确定载流件的表面散热系数。创新地建立了结构和运行环境类似的导体的表面散热系数关系模型, 在此基础上, 提出了一种载流件长期温升的电热耦合仿真方法。在已知一个载流件的长期温升的前提下, 采用这种方法, 可以估算出类似载流件在类似环境下通过任一电流的长期稳定温升。以某电力设备上的关键载流件长期温升为例, 对上述方法进行了验证。

关键词: 载流件; 表面散热系数; 长期温升; 仿真; 预测

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0099-04

Method for Predicting Steady-state Temperature Rise of Conductor

ZHU Qiqi, CHENG Li

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Steady-state temperature rise is one of the most important parameters in high-voltage apparatuses design. The calculation of steady-state temperature rise of a conductor depends on the determination of its surface heat-transfer factor (SRF), relating to heat conduction, convection and radiation. This paper puts forward a model for revealing the relations between SRFs of similar conductors, and presents an electric-thermal coupling simulation based method for estimating the steady-state temperature rise of a conductor in high-voltage apparatus. If the steady-state temperature rise of a given conductor is known, the steady-state temperatures rise of similar conductors can be simulated by using the proposed method. The proposed model and method are verified by prediction of the steady-state temperature rise of a contactor blade in a power equipment.

Key words: conductor; surface heat-transfer factor; steady-state temperature rise; simulation; prediction

0 引言

长期温升是高压电器重要的性能指标, 温升过高可使材料的物理、化学性能起变化, 导致机械和电气性能下降, 例如铜在大于 100 °C 时, 其抗拉强度将显著降低, 而机械和电气性能下降则可能导致高压电器的工作故障, 甚至造成严重事故^[1]。因此, 有必要在设计时对载流件的长期温升进行估算, 避免其长期温升过高。

当前产品设计人员在考虑高压电器载流件长期温升时, 主要是通过比较载流件电流密度与参考书上规定的导体允许电流密度, 来定性评估长期温升是否满足设计要求, 若载流件电流密度比

允许电流密度小, 则认为温升满足要求, 如铜的允许电流密度为 2.2 A/mm²^[2], 设计时则要确保载流件电流密度小于 2.2 A/mm², 然而这种设计方法对温升的具体数值缺乏定量分析。另一方面, 尽管已有研究人员在高压电器的温升数值模拟方面做了大量工作^[3-5], 但高压电器设备载流件的散热方式和散热环境复杂, 很难定量确定对流换热以及热辐射相关的系数, 因此这给载流件长期温升的定量计算和仿真提供了难度。另外, 还有一种基于试验的估算方法, 对一个导体, 当通流 I_1 时, 通过实验获取其长期温升 $\Delta\theta_1$, 则当通流为 I_2 且散热环境不变时, 其长期温升 $\Delta\theta_2$, 可用式(1)进行估算, 但这种方法的局限性在于只适用于相同导体、不同电流时的温升估算。

$$\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{1.7} \quad (1)$$

工程中有大量的导体尽管尺寸大小不一样,但结构、运行环境类似,而且工厂往往有大量的温升数据,在这种情况下,由已知的温升数据,定量估算出类似结构和运行环境的导体的温升,对高压电器产品设计具有重要指导意义。笔者首先将热传导、对流换热以及热辐射综合考虑,用表面散热系数建立载流件的散热模型,建立了结构和运行环境类似的导体的表面散热系数关系模型。由已知导体1的长期温升数据,采用电热耦合仿真反求出该导体的表面散热系数,再根据表面散热系数关系模型,计算出与导体1结构和运行环境类似的导体2的表面散热系数,最后采用电热耦合仿真,求解导体2的长期温升。

1 结构类似导体的表面散热系数关系模型

高压电器设备载流件的散热方式包括热传导、对流换热以及热辐射等,其散热环境复杂,为了便于分析计算,在工程上将这3种散热方式综合考虑,统一用表面散热系数 a 进行综合考虑^[6]。通常表面散热系数 a 主要采用试验的方式确认^[7-9]。

根据实际的温升试验确定某载流件1的表面散热系数 a_1 后,对于与该载流件形状类似、工作环境

类似的其他载流件2,其表面散热系数 a_2 可采用经验公式进行估算。通过大量的试验数据,建立了表面散热系数 a_2 与表面散热系数 a_1 的经验关系式为

$$a_2 = \left(\frac{j_2}{j_1} \right)^k a_1 \quad (2)$$

式(2)中: j_1 为载流件1的平均电流密度; j_2 为载流件2的平均电流密度; k 为指数, k 具体可按式(3)计算。

$$k = \frac{40V}{3S} + 0.597 \quad (3)$$

式(3)中: V 为载流件体积, m^3 ; S 为载流体散热表面积, m^2 。

式(2)中平均电流密度需要采用积分求解,然而对于形状复杂的载流件,为了减少计算量,可以在载流件上取若干截面并计算其电流密度,最后用这些截面电流密度的平均值作为载流件的平均电流密度。

2 长期温升的仿真估算

2.1 电热耦合仿真

采用 ANSYS Workbench 中的 Thermal-Electric 仿真模块进行仿真,该模块可以对导体长期通流的温升进行计算仿真,主要步骤见图1。

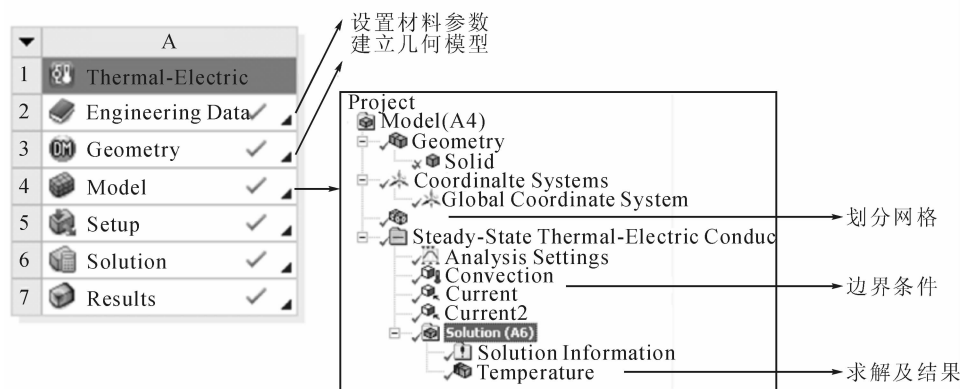


图1 电热耦合仿真步骤

Fig.1 Operation flow of electric-thermal coupling simulation

1)确定材料参数。主要是确定载流件的热传导系数以及电阻率,常用导体材料(如铜、铝等)可以从 ANSYS Workbench 自带的材料数据库中选择,也可以自己创建。

2)建立几何模型。可以利用 ANSYS Workbench 自带的建模工具进行三维建模,也可以利用 UG、Pro/E 等软件进行建模,然后关联到 ANSYS Workbench。

3)划分网格。根据计算精度需要,确定网格大

小,一般而言,采用默认大小既可。

4)施加边界条件。施加电流(current):电流流进为正值,流出为负值,且确保流进和流出的电流代数和为零。散热(convection):添加散热系数及环境温度。

5)求解。获取载流体长期载流的温度,减去环境温度,获得长期温升数据。

2.2 长期温升估算流程

当要估算某产品上载流件2的长期温升时,首先基于类似产品试验时的实测温升数据,对其中类

似于载流件 2 的零件 1 进行电热耦合仿真, 并采用试凑法, 反求出能满足试验温升结果的零件 1 的表面散热系数 a_1 , 继而采用式(2)计算出待求载流件 2 的表面散热系数 a_2 , 再采用电热耦合仿真, 求解载流件 2 的长期温升。上述计算流程见图 2。

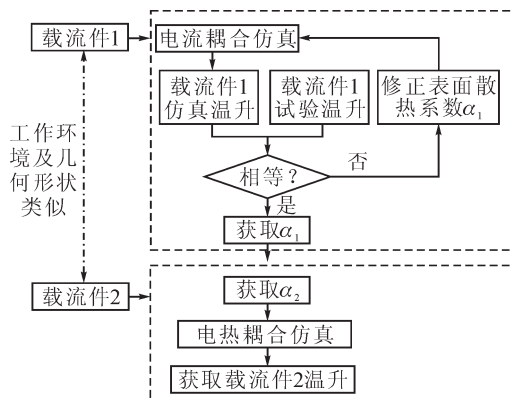


图 2 载流件长期温升仿真计算过程

Fig. 2 Process of using temperature data of a given conductor to predict steady temperature rise of a similar conductor

3 仿真计算实例及验证

某电力设备上承载额定工作电流的关键载流件见图 3, 通过试验, 获取该载流件在通流 50 A 时的稳定温升为 49.4 K (环境温度 22 °C)。现要估算该载流件在额定电流为 54 A 时的长期温升, 并要确定该载流件的最大长期载流能力 (长期温升小于 65 K)。

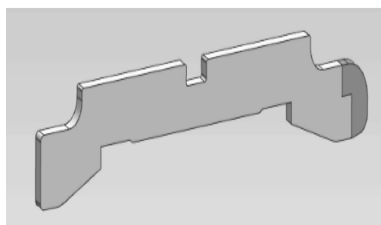


图 3 某电力设备上的载流件

Fig. 3 Conductor in a power-equipment

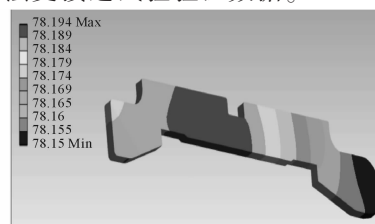
首先, 根据通流 50 A 时稳定温升 49.4 K 确定该导体在 50 A 时的表面散热系数 a_1 。通过电热耦合仿真, 反求得当表面散热系数 $a_1=1.295 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

时, 该载流件的长期温升为 49.4 K。

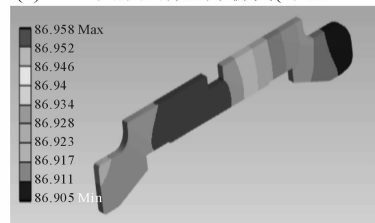
其次, 根据式(2)估算 54 A 时的该导体的表面散热系数 a_2 。该载流件的体积 V 与散热表面积 A 的比值为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$, 代入式(3)得 $k=0.622$, 根据式(2)可得, 在通流 54 A 时该载流件的表面散热系数 $a_2=1.36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

最后, 在获知 a_2 的情况下, 再采用电热耦合仿真, 得到该导流件在 22 °C 环境温度下的稳定温度为 78.1 °C, 由此可估算温升为 56.1 K, 见图 4(a)。而通过试验测得通流 54 A 时的长期温升为 54.9 K。54 A 下长期温升的仿真结果与实际结果比较接近, 由此可见, 文中所采用的方法具有一定的工程指导意义。

采用同样的方法, 可得当通流为 58.7 A 时, 根据式(2)可得此时的表面散热系数为 $1.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 长期温升接近 65 K, 见图 4(b), 因此该导体的最大长期载流能力为 58.7 A。上述估算和试验的结果见表 1, 另外, 由于上例是针对同一导体, 因此, 式(1)适用, 比较文中提出的方法和式(1)的估算结果, 笔者提出的方法更接近试验验证数据。



(a) 54 A 下的长期温升仿真 (环温 22 °C)



(b) 通流 58.7 A 时长期温升接近 65 K (环温 22 °C)

图 4 长期温升仿真

Fig. 4 Steady temperature simulation and prediction

由于工程需要, 对该载流件的结构进行了改进, 在其上端加工了一个台阶, 见图 5, 现要估算改进结构在通流 54 A 时的长期温升。由于结构改进, 此时式(1)已不适用, 这里采用文中提出的方法进行求解。

表 1 估算与试验数据对比

Tab. 1 Comparison between predicted results and experimental results

项目	通流/A	环温/°C	温升/K	备注
已知的长期温升数据	50.0	22	49.4	以此作为温升估算的基础
采用文中提出的方法估算长期温升	54.0	22	56.1	
采用式(1)估算长期温升	54.0	22	56.3	文中提出的方法, 比式(1)更准确, 误差仅为 2%
通流 54 A 时长期温升的试验验证	54.0	22	54.9	
采用文中提出的方法估算最大通流能力	58.7	22	65.0	估算的最大通流能力

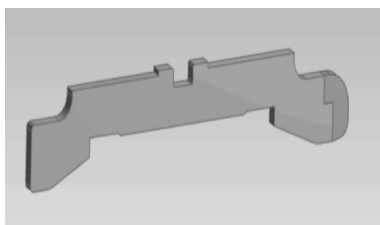


图5 1个新的改进结构

Fig. 5 A new improved conductor

首先求解改进后通流 54 A 的平均电流密度 $\bar{j}_2$ 与改进前通流 50 A 的平均电流密度 $\bar{j}_1$ 的比值,按照文中第 2 节所述方法,估算出 $\bar{j}_2/\bar{j}_1=1.14, k=0.622$ 。

然后求解改进后通流 54 A 时的表面散热系数 a_2 , 根据式(3)得, $a_2=1.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

最后,在获知 a_2 的情况下,采用电热耦合仿真,仿真计算出该载流件在 22 °C 环境温度下的稳定温度为 81.4 °C,由此可估算温升为 59.4 K,见图 6。试验结果显示,该载流件结构改进后在通流 54 kA 时的长期温升为 57.8 K,估算的误差为 2.7%。

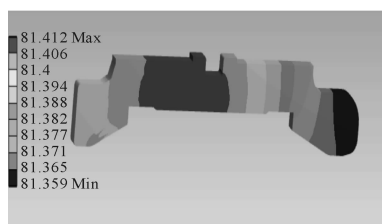


图6 载流件结构改进后通流 54 A 的长期温升(环温 22 °C)

Fig. 6 Steady temperature prediction for the improved conductor carrying current 54 A (ambient temperature: 22 °C)

4 结论

长期温升是高压电器设计时必须考虑的重要指标之一,笔者提出了一种通过已知导体长期温升来仿真计算与之类似的导体长期温升的方法,主要结论如下:

1)文中建立了结构和运行环境类似的导体的表面散热系数关系模型,通过该模型,在已知一个导体表面散热系数的情况下,可以求解出与之类似导体的表面散热系数。

2)提出了一种根据已知导体长期温升来仿真计算与之类似的导体长期温升的求解流程。由已知导体 1 的长期温升,采用电热耦合仿真的方法,反求出该导体的表面散热系数 a_1 , 再根据表面散热系数关系模型,确定与导体 1 结构和运行环境类似的导体 2 的表面散热系数 a_2 ,最后再采用电热耦合仿真,求解导体 2 的长期温升。

3)以某电力设备上关键的载流件为例,对文中

所采用的方法进行了验证,以 50 A 通流时的长期温升为基础,估算出通流 54 A 时的长期温升(结构不改动)与试验结果相比误差为 2%,即使结构有所改变,依然可以采用文中提出的方法,文中实例中,结构改进后温升估算误差为 2.7%,表明所采用的方法具有一定的工程指导意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黎 斌. SF₆ 高压开关设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [3] PAULKE J, WEICHERT H, STEINHAEUSER P. Thermal simulation of switchgear[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3): 434-439.
- [4] BARCIKOWSKI F, LINDMAYER M. Simulation of the heat balance in low-voltage switchgear[C]//Proceedings of 20th International Conference on Electrical Contacts. Stockholm, Sweden: [s.n.], 2000: 323-329.
- [5] 纽春萍,陈德桂,刘颖异,等. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 71-77. NIU Chunping, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Temperature field simulation of AC contactor and analysis of its influence factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 71-77.
- [6] 机械工程手册电机工程手册编委会. 电机工程手册[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [7] 张之辉,曹家庆. 开关设备一次回路温升的监测[J]. 高压电器, 1994, 30(5): 59-61. ZHANG Zhihui, CAO Jiaqing. Monitoring primary circuit temperature rise in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(5): 59-61.
- [8] 徐东晟,许一声. 高压开关柜触头温度在线检测的研究[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 54-55. XU Dongsheng, XU Yisheng. On-line monitoring of contact temperature inside HV switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1): 54-55.
- [9] 吴晓文,李洪涛,李 玲. 环境因素影响下气体绝缘输电线路温升过程数值模拟[J]. 陕西电力, 2013, 41(7): 1-6. WU Xiaowen, LI Hongtao, LI Ling. Numerical simulation of transient heat transfer characteristics of gas-insulated transmission lines influenced by environment factors[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(7): 1-6.

朱琦琦(1982—),男,工学博士,主要从事高压开关产品结构、传动仿真计算、长期温升仿真计算、结构可靠性寿命预测等。

程 立(1972—),男,高级工程师,主要从事高压开关产品研发设计工作。