

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.002

弹簧触指的稳态温升仿真与实验研究

纽春萍¹, 强若辰², 荣命哲¹, 王 振³, 王小华¹, 金光耀³

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 国网陕西省电力公司经济技术研究院, 西安 710075; 3. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 高压断路器触指部位的仿真是热分析中的关键问题。各类高压电器的触指部位在稳态工作状态下往往是最高温升点, 却因结构复杂而难以实现准确仿真分析。笔者以弹簧触指为核心部件, 外加其他必要结构所构成的弹簧触指导电回路为对象, 通过对发热、传热二者作用规律的合理分析和建模, 提出了一个适用于弹簧触指温升的仿真分析方法。根据所提出的方法, 笔者对弹簧触指样品进行了交、直流各4组稳态温升仿真, 通过仿真计算结果和实验数据的对比, 验证了仿真方法的正确性, 对高压电器设计及其他复杂触头结构的温度场仿真具有一定的参考意义。

关键词: 弹簧触指; 接触电阻; 接触面积耦合法; 温度场仿真; 集肤效应; 对流传热; 辐射传热

Simulation and Experimental Research on Temperature Rise of Spring Contact in Steady State

NIU Chunping¹, QIANG Ruochen², RONG Mingzhe¹, WANG Zhen³, WANG Xiaohua¹,
JIN Guangyao³

(1. State Key Lab of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Economic Research Institute, Xi'an 710075, China;

3. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: Various contacts of high-voltage electrical apparatus always reach the highest temperature rise in steady operation state. However, the analysis of contacts is inconvenient because of the complex structure. This paper assembles a simple electrical circuit using spring contacts as the core components and other necessary structures. For the spring contact prototype, both heat generation and transfer are taken into consideration. Based on the above analysis, the temperature rise in steady state of the spring contact prototype was simulated at 4 current levels of each AC and DC groups. By comparing the simulation and experimental results, the research method was verified, which provides certain reference for further design of high-voltage electrical apparatus and other complex temperature field simulation.

Key words: spring contact; contact resistance; coupling area method; temperature field simulation; skin effect; convection heat transfer; radiation heat transfer

0 引言

电力设备中的电接触形式可分为固定接触、滚动滑动接触和可分合接触3类^[1], 在这3类之中工

作负担最重的是可分合接触, 即各类触头结构。现阶段高压电力设备中常用的触头结构有弹簧触指、梅花触指及表带触指, 其中弹簧触指尽管面世较晚, 但由于其触点多、机械特性好、加工要求低等优点, 被广泛应用于高压及特高压的断路器中^[2-4]。

弹簧触指在高压设备中正常工作时不可避免

收稿日期: 2014-09-27; 修回日期: 2014-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(51221005, 51377128); 国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A121)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51221005, 51377128), National High-tech R & D Program of China(863 Program)(2011AA05A121).

地会产生热量,其发热需满足国标所规定的温升允许值^[9]的要求。为指导电器设计并减少实验次数,触指的温升仿真分析十分必要。

以往的电器温升仿真多是针对中低压设备进行的,如塑壳或框架断路器、接触器等。传统仿真在触头接触电阻方面常采用导电桥结构^[6-8],触头两侧的接触面不再直接相连,而是通过接触面间建立的一个小圆柱实体以流过电流,但此方法在弹簧触指的多触点结构中不便于建模应用,并且触指更换时需要重新修改导电桥结构,模型的通用性不高。另外,传统方法在传热方面以考虑传导和对流为主,辐射换热常被忽略^[1],而事实上在几十摄氏度下辐射和对流换热量具有相同的数量级,需要同时考虑。

针对高压电器触指结构的特点,为了更准确地探究其温升仿真方法及规律,笔者以高压设备中常见的弹簧触指为核心部件,外加导电杆及绝缘罐体,构成一个简单的弹簧触指样品,以此样品为研究对象,从发热到散热过程逐一进行了分析,在以往的温升仿真研究基础上改进其不足之处,提出了一个适用于弹簧触指的温升仿真分析方法,并通过仿真与实验结果的对比,对所提出方法进行了验证。

1 弹簧触指样品热源与散热分析

电器在额定电流下会达到稳态温升,其物理过程是发热和散热共同作用的结果,对二者进行合理的分析是准确计算稳态温升的必要条件。发热方面的主要工作是考察热源,根据发热机理的不同,确定各类热源仿真时的建模处理方法;在散热方面,主要是对热能传递的各种实际发生方式进行研究,最终目的是得到在仿真程序中既便于计算又满足工程精度的温升模拟方法。笔者对弹簧触指样品温升仿真方法的研究正是建立在以上两方面分析的基础上的。

1.1 热源分析方法

笔者弹簧触指样品结构见图1,其导电回路由罐体两侧伸入的导电杆、中间3对弹簧触指及导电套筒连结而成,通电时罐体内充SF₆气体。罐体外接有接线端子及铜排以构成实验回路。

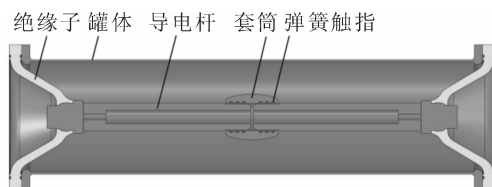


图1 弹簧触指样品结构图

Fig. 1 Structure of spring contact prototype

1.1.1 导体固有电阻

由导电回路的构成来看,每一段导体的电阻是造成温升的热源之一,这种固有电阻带来的焦耳热在仿真分析中通过对各导电结构赋予电阻率 ρ 来实现。(由于弹簧触指部位结构细密,其实际模型不便于在仿真中直接用于计算触指固有电阻。并且,在实际测量触头部位电阻时,往往并不区分触指固有电阻和接触电阻,而是获得触头电阻这一整体值,因此弹簧触指固有电阻的热效应并入“1.1.2 接触电阻”中一并考虑,以最终触头电阻等效为原则。)

在交流电流情况下,由于集肤效应的存在,电阻损耗将比同电流等级下的直流发热损耗大^[9],即

$$P=KI^2R。 \quad (1)$$

式(1)中: P 为金属电阻损耗功率, W ; I 为流过导体电流, A ; R 为导体固有电阻, Ω ; K 为考虑集肤效应后的附加损耗系数, $K>1$ 。

在仿真计算中,为了处理这种由交流电流密度分布集肤带来的附加热效应,需要对交流下通流导体及周围进行磁场分析,得到交流情况下回路导体的电流密度分布,即可进一步计算出交流电阻损耗。

1.1.2 接触电阻

除了导体固有电阻之外,弹簧触指及接线端子固定连接等处的接触电阻是造成温升的另一大热源。

弹簧触指实物图见图2,从图2可看出,绕圆周一圈触点很多,若采用实际结构建立导电桥模型,过于复杂细小的结构将使计算难于进行,因此需要修改弹簧触指处的仿真模型,使计算简化的同时满足接触电阻的要求。



图2 弹簧触指实物图

Fig. 2 Spring contact

为便于仿真顺利进行,笔者首先将弹簧触指的螺旋结构简化为一个圆环实体,圆环内侧和外侧分别紧贴导电杆和导电套筒,见图3,然后利用耦合接触面积的方法分别在内外侧的接触面上模拟接触电阻。耦合接触面积的方法是指在接触面上选取很小的一部分面积,令电流可以从选定面内流过,在

选定面外,即使两侧物体紧密相贴不存在缝隙,电流也无法流过,原理示意图见图4。由于接触电阻由收缩电阻和膜电阻构成^[10],而在高压 SF₆ 设备中主要以收缩电阻为主^[11],因此在该模型中通过选取适当的耦合面积制造电流收缩的效果可模拟出接触电阻。耦合接触面面积和个数的设定由计算结果与实际电阻测量值对比来确定,原则是在保证接触电阻值的情况下尽可能多的设置耦合面个数,以贴近实际弹簧触指极多触点的情况。经计算,当每块耦合面积为 1.34 mm²,沿圆周方向共 16 块接触耦合面,总面积为 21.4 mm² 时,触头电阻(含接触电阻和固有电阻)模拟值为 4.8 μΩ,与实际测量值 5 μΩ 接近。

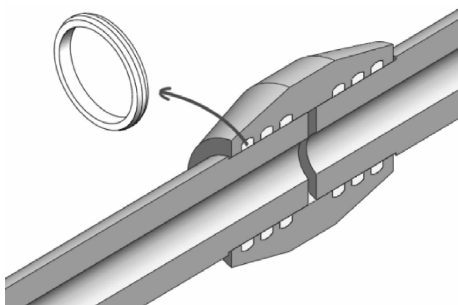


图3 弹簧触指仿真模型

Fig. 3 Simulation model of spring contact

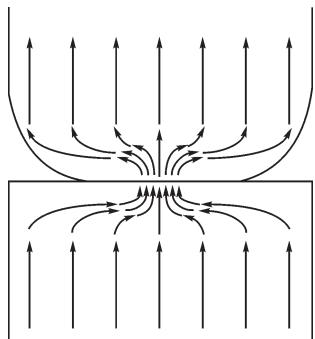


图4 耦合面积法模拟电流收缩的示意图

Fig. 4 Current constriction by coupling area method

另一处接触热源位于接线端子与外接排连结处,属于固定接触类型,其电阻大小由两侧接触物体表面状况以及螺栓固紧效果共同影响,若接触面氧化明显或螺栓固紧程度不佳,都会造成此处接触电阻增大。考虑到弹簧触指样品热分析中最关注的部位为触指处,而非外接端子,因此可对接线端子与外接排连结处做以下等效处理^[12]:在接线端子与外接排接触处建立一片薄层,薄层的横截面与接触面同等大小,薄层设置厚度时不能对原模型的整体结构造成较大变动,厚度设置应尽量小,但同时以不显著增大计算负担为宜。参照该样品两侧接线端子和外接排的尺寸,将薄层厚度设为 4 mm,接触薄层与两侧的连接情况见图5。在薄层几何尺寸确

定之后,可根据实际测得该接触部位的电阻值,利用电阻计算公式反算出薄层电阻率 ρ ,该样品中 ρ 取 $1.9 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 可满足 3 μΩ 接触电阻的要求。可以看出,依照此方法设置的薄层恰好能模拟出该处的接触电阻值,使处在弹簧触指样品罐体之外的接线端子既保留了热源的特性,又不会因接触建模过于复杂而加重计算负担。

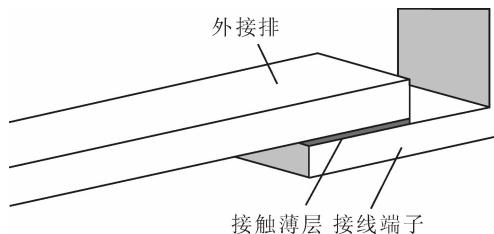


图5 接线端子与外接排间的接触电阻薄层模型

Fig. 5 Contact volume between terminal and busbar

1.2 传热分析方法

前文详细分析了弹簧触指样品中的几类热源及其建模处理方法,下面对该样品的传热方式进行分析。根据弹簧触指样品的结构,可将其热量传递过程分为导体内部的热传导、导体表面的对流传热,以及导体对外的热辐射。

1.2.1 导体内部的热传导

由热源分析可知,在弹簧触指样品主回路中,整个导体回路都会产生电阻损耗,同时触指及接线端子等处的接触电阻在微小的接触面处集中发热,这些热源产生的热量在导体回路中的传递遵循傅里叶定律,即

$$q = -\lambda \text{grad} t. \quad (2)$$

式(2)中: q 为空间中某点的热流密度矢量, W/m²; λ 为导热系数,表征材料导热性能的优劣, W/(m·K); $\text{grad} t$ 为空间里该点的温度梯度, K/m。

在仿真计算时,通过对弹簧触指各部件设置相应材料的导热系数 λ ,以完成导体内部热传导的计算。

1.2.2 导体表面的对流传热

在该样品中,弹簧触指内部导电回路被 SF₆ 气体所包裹,外部接线排暴露在自然环境中,与空气相接触,这前后两种气体流过导体表面时的热量交换均属于对流传热。对流传热满足的基本关系式为牛顿冷却公式,即

$$q = h \Delta t. \quad (3)$$

式(3)中: q 为单位面积下的热流量,即热流密度, W/m²; h 为表面传热系数, W/(m²·K); Δt 为壁面温度与流体温度之差(约定取正值), K。

对流传热分析的关键任务,在于通过理论或实验的方法得出表面传热系数 h 的取值。该样品中,

不论是弹簧触指样品罐体内部的 SF_6 气体, 还是外部的空气, 均为自然对流传热, 根据文[13-15]可得到如下计算式:

$$Gr = \frac{g\alpha_v \Delta t l^3}{\nu^3}; \quad (4)$$

$$Nu = C(Gr Pr)^n; \quad (5)$$

$$h = Nu \frac{\lambda}{l}. \quad (6)$$

式(4)~(6)中: Gr 为格拉晓夫(Grashof)数; Nu 为努赛尔(Nusselt)数; Pr 为普朗特(Prandtl)数, 均为对流传热中的特征数, 其中 Pr 为常数, 由气体性质决定, 各种气体的 Pr 数大致在 0.6~0.7 之间; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; α 为体胀系数, $\alpha \approx 1/T$, 单位为 K^{-1} ; Δt 为壁面温度与流体温度之差, K ; l 为特征长度, 在弹簧触指样品罐体内部取外壳体与导电杆半径之差, 外接排取铜排换热面积与周界长度之商, m ; ν 为气体运动粘度, m^2/s ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C 和 n 为常数, 其取值由壁面形状、摆放位置及 Gr 数共同决定。在该样品中, C 与 n 的具体取值见表 1^[16]。

表1 式(5)中常数 C 和 n 在该样品条件下的取值

Table 1 Values of C and n under the prototype condition

位置	对流类型	气体	计算得 Gr 数	C	n
罐体内部	有限空间自然对流	SF_6	1.273×10^8	0.061	1/3
外接铜排	大空间自然对流	空气	2.758×10^5	0.540	1/4

根据式(4)~(6), 最终可计算出该样品导电杆和外接铜排的表面传热系数分别为 $2.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $6.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.2.3 导体对外的热辐射

由文[17-19]可知, 对于表面温度为几十摄氏度($^{\circ}\text{C}$)的表面散热问题, 辐射散热量与自然对流散热量具有相同的数量级, 需要同时考虑。实际物体辐射传热的计算式满足斯忒藩—波尔兹曼定律的修正形式, 即

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (7)$$

式(7)中: 下标 1 和 2 分别代表发出和接受辐射能的物体; Φ 为辐射传热功率, W ; ε 为物体的发射率; A 为辐射表面积, m^2 ; σ 为斯忒藩—波尔兹曼常数, 5.67×10^{-8} ; T 为热力学温度, K 。

在仿真计算中, 常将导体的热辐射表示为式(3)牛顿冷却公式的形式

$$\Phi = A h_{\text{rad}} \Delta t. \quad (8)$$

式(8)中, h_{rad} 为辐射传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

若将热辐射与对流传热合并考虑, 可用一个综合传热系数 h 来表示^[20], 有

$$h = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}. \quad (9)$$

综合传热系数 h 合并了对流与辐射传热的效果, 在仿真中可以达到简化运算的目的。考虑到导电回路不同材料表面发射率的差异, 经计算, 该样品导电杆和外接铜排的综合传热系数分别取为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2 仿真分析结果及其验证

依照前文所述的热源及传热分析方法, 可对弹簧触指样品进行稳态温升仿真。

由于样品和场域均呈轴对称, 可沿对称平面取 1/2 模型进行分析。根据触指及接线端子的接触电阻建模方法, 可得到弹簧触指样品回路几何模型见图 6。导体的导热系数 λ 与导体表面的综合散热系数 h 分别作为材料属性和边界条件对模型加以限制, 因此导体回路外部的的气体及绝缘罐体在建模中可以省去。经划分网格后的有限元模型见图 7。

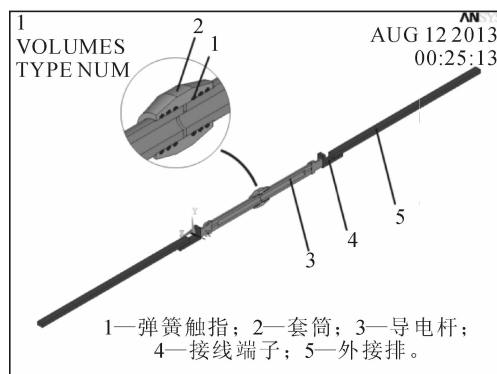


图6 弹簧触指样品 1/2 几何模型

Fig. 6 1/2 geometric model of spring contact

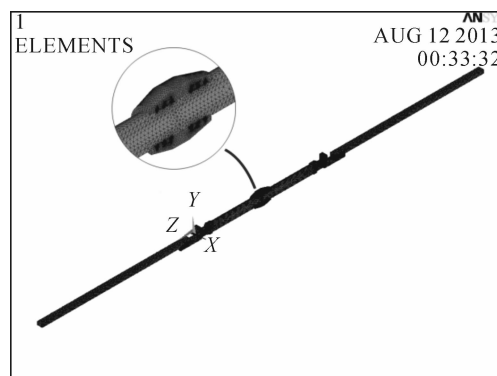


图7 弹簧触指样品 1/2 有限元模型

Fig. 7 1/2 finite model of spring contact

采用前文介绍方法, 笔者对弹簧触指样品分别进行了直流 1、1.5、2、2.5 kA 和交流 (有效值) 1、1.5、2、2.5 kA 共 8 组工况的稳态温升仿真, 环境温度均设为 20°C 。

为了验证温度场仿真结果, 笔者对弹簧触指样

品分别进行了相应工况下的稳态温升实验。实验选用热电偶测量样品温度,为减小不同热电偶线及测量通道的分散性带来的误差,各路热电偶统一进行了0~100℃间的温度标定。

弹簧触指样品温升仿真与实验结果的对比点,选在热分析最为关心的触指部位及两侧导电杆处,见图8。

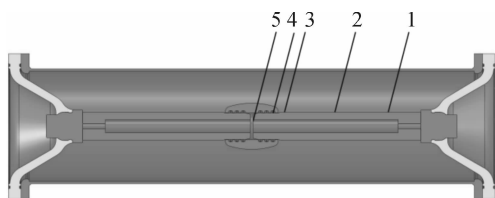


图8 样品温升仿真与实验对比点

Fig. 8 Contrast points of experiment and simulation

2.1 仿真结果

交、直流各1、1.5、2、2.5 kA等8组工况下,最高温升值的仿真结果见图9。由图9曲线可以看出,弹簧触指样品的最高温升随电流等级上升而增大。另外,交直流的差异在图9中也体现得十分明显,交流下的热效应更加突出,即交流电流的集肤效应会给导体带来更多的电阻损耗,造成交流温升值比相同电流等级的直流情况下更大。由此可知,在高压电器常见的尺寸结构下,交流集肤效应带来的附加损耗是不可忽视的。

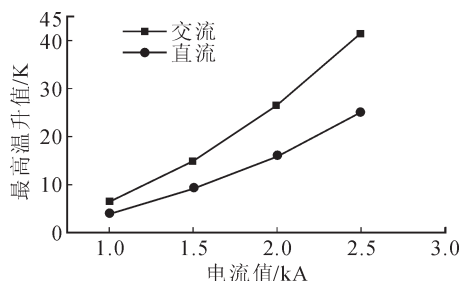


图9 交、直流共8组仿真的最高温升对比图

Fig. 9 Comparison of highest temperature rises under AC and DC

样品的温度场云图(取交流2 kA工况为例,其余工况具有类似的分布规律)见图10。图10温度场分布结果表明,最高温度均出现在模型中部的3对弹簧触指及其所在的导电套筒区域,同时,导电杆两侧与铜排相连的接线端处也保持着较高的温度,两处接触电阻的热源效果在仿真结果中明显可见。另外,由图10还可以发现,截面面积基本相同的导电杆与外接排,其所经过的电流虽然相同,但导电杆的温度值却明显高于外接排,这是由于导电杆为铝制而外接排为铜制,且导电杆表面的综合传热系数小于外接排,除此之外,导电杆位处触指和接线

端子两接触电阻热源中间,热传导效果与外接排相比将大打折扣,以上原因共同导致了罐体内部导电杆的温度值明显高于外接排。

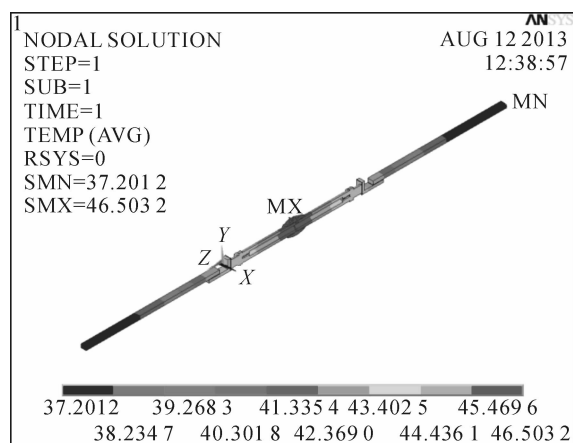


图10 交流2 kA下温度场仿真结果

Fig. 10 Simulation result of temperature field under AC 2 kA

2.2 仿真与实验结果对比

在直、交流各4种工况下,仿真与实验温升对比曲线(对比点位置如图8)见图11、12。对比结果表明,样品的稳态温升仿真可以较好地模拟出实际结果,8种工况对比中最大误差为8.3%,充分说明文中提出的方法在稳态温升仿真中是可行且有效的。

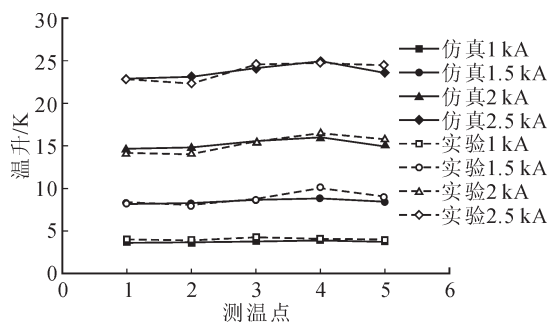


图11 直流仿真与实验温升测量点对比图

Fig. 11 Comparison of experiments and simulations under DC

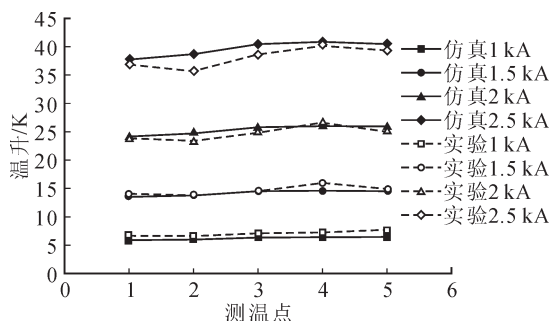


图12 交流仿真与实验温升测量点对比图

Fig. 12 Comparison of experiments and simulations under AC

虽然由图 10 温度云图表明, 触指区域是样品中发热最剧烈的部分, 然而从图 11、12 也可看出, 导电杆温升虽低于触指处, 但相差并不很大, 这是由于该弹簧触指样品导体回路结构较为简单, 罐体内除了导电回路外, 空间中也没有其他繁杂部件, 使其传热效果良好。由此可推知, 在实际复杂的高压电器中, 当不能明显增大电器尺寸的情况下, 通过合理设计尽量降低触头周边结构的热源密集度、加强散热条件, 是减小温升的有效途径。

3 结论

电器的温升一直是高压电力设备设计过程中的一个重要指标, 触指部位往往具有最高温升, 却因结构复杂而不便分析。笔者以现阶段高压电器各触指类型中触点最多的弹簧触指为核心部件, 两侧由导电杆连接, 辅以绝缘罐体及外接排等必要部件, 构成了一弹簧触指导电回路。针对此结构, 研究提出了一个弹簧触指稳态温升的仿真分析方法, 并通过仿真与实验结果的对比进行了验证。研究结果表明:

1) 利用接触面耦合面积法建立弹簧触指接触电阻模型, 通过电流收缩效果模拟出接触电阻, 解决了弹簧触指多触点且小结构不便于建导电桥的问题, 并通过电阻及温度场仿真结果证明了其有效性。

2) 样品外接线端子在温升分析中一般并非最关心的部位, 因此接线端子的接触电阻可通过建立薄层并赋予适当的电阻率来等效模拟, 薄层尺寸及电阻率可参考接线端结构及实际接触电阻。该接线端子薄层模型在文中的仿真研究中亦得到了验证。

3) 通过弹簧触指样品温升仿真与实验的对比研究结果, 验证了文中传热分析方法的合理性。

4) 弹簧触指温升仿真与实验结果表明, 交流稳态温升值高于同电流等级下的直流温升, 说明了交流集肤效应带来的附加电阻损耗十分明显, 在高压电器温升分析中必须予以考虑。

5) 文中样品温升仿真与实验研究表明, 触指处最高温升与导电杆处的温升相差不大, 由此可以推断高压电器的触指在设计时, 若触指及周边结构设计及分布合理, 能减小热源密集度, 加强散热, 有利于降低最高温升。

笔者提出的弹簧触指稳态温升仿真研究方法, 从理论分析与建模, 到仿真计算, 最终通过实验验证, 得出的规律可为今后高压电器的设计提供参考, 其分析方法在其他复杂触头结构的温升计算中也可借鉴。

参考文献:

- [1] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1989. ZHANG Guansheng. The foundational theory of electrical apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [2] 李健. 浅析弹簧触指在 GIS 中的应用[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 438-439. LI Jian. Application of the canted coil spring to GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 438-439.
- [3] 赵江涛, 陈文革. 螺旋弹簧触指及其材料的研究与进展[J]. 上海电气技术, 2012, 5(4): 30-37. ZHAO Jiangtao, CHEN Wenge. Research and development of screw spring contact and materials[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2012, 5(4): 30-37.
- [4] 张正周, 宋新锋, 独田娃, 等. 弹簧触头设计(Ⅲ)[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 87-91. ZHANG Zhengzhou, SONG Xinfeng, DU Tianwa, et al. Design of spring contacts(Ⅲ)[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 87-91.
- [5] GB 763—90 交流高压断路器在长期工作时的发热[S]. 1990. GB 763—90 Heating of AC high-voltage apparatus under long runs[S]. 1990.
- [6] 李兴文, 陈德桂, 刘洪武, 等. 触头间电动斥力的三维有限元分析[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 53-55. LI Xingwen, CHEN Degui, LIU Hongwu, et al. 3-D finite element analysis of electro-dynamic repulsion forces acting on contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 53-55.
- [7] 陈维, 张国钢, 张鹏飞, 等. 低压开关电器主电路温度场的有限元分析[J]. 低压电器, 2010(20): 1-4. CHEN Wei, ZHANG Guogang, ZHANG Pengfei, et al. Finite element analysis of temperature field of main circuit in low voltage apparatus[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(20): 1-4.
- [8] 纽春萍, 陈德桂, 刘颖异, 等. 计及主回路和电磁系统发热的交流接触器数值热分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 53-58. NIU Chunping, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Thermal simulation of AC contactor considering the heat generated by main circuit and electromagnet system[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(15): 53-58.
- [9] 胡冰, 张晓峰. 用有限元方法计算矩形母线的集肤效应[J]. 低压电器, 2005(3): 7-9. HU Bing, ZHANG Xiaofeng. Calculation of skin effect coefficient of rectangular bus bars using the finite element method[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(3): 7-9.
- [10] BOYER L. Contact resistance calculations: generalizations of Greenwood's formula including interface films[J]. IEEE

- Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(1):50-58.
- [11] 吴国华,周 洲,涂春华. 高压断路器接触电阻的研究[J]. 华中电力, 2011, 24(6):80-82.
WU Guohua, ZHOU Zhou, TU Chunhua. Research on contact resistance of high voltage circuit breaker[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(6):80-82.
- [12] 胡 方,杨文英,赵瑞平,等. 大功率直流接触器温度场仿真及影响因素分析[J]. 低压电器, 2011(23):1-6.
HU Fang, YANG Wenying, ZHAO Ruiping, et al. Thermal simulation of high-power DC contactor and analysis of influencing factors[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(23):1-6.
- [13] BEJAN A. Convection heat transfer[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [14] PITTS D R, SISSOM L E. Schaum's outline of heat transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [15] 王文龙,梁慧敏,翟国富. 密封电磁继电器接触系统机电热耦合仿真分析[J]. 机电元件, 2007, 27(1):3-6.
WANG Wenlong, LIANG Huimin, ZHAI Guofu. A mechanical electrical thermal coupled-field simulation analysis of contact system of sealed electromagnetic relays[J]. Electromechanical Components, 2007, 27(1):3-6.
- [16] INCROPERA F P, LAVINE A S, DEWITT D P. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. New York: John Wiley & Sons Incorporated, 2011.
- [17] 张天孙. 传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
ZHANG Tiansun. Heat transfer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [18] 郑必成. 继电器瞬态温度场仿真计算及其试验[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
ZHENG Bicheng. Numerical simulation of transient temperature field of relays and experiments[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [19] 张 旭, 陈文良, 于文剑, 等. 常用供暖散热器辐射——对流放热量比例的实验研究[J]. 暖通空调, 1994, 24(6): 13-15.
ZHANG Xu, CHEN Wenliang, YU Wenjian, et al. Experimental research on the ratio of radiation and convection heat release from common heat sinks[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 1994, 24(6): 13-15.
- [20] BARCIKOWSKI F, LINDMAYER M. Simulations of the heat balance in low-voltage switchgear[C]//20th International Conference on Electrical Contacts. Sweden: [s.n.], 2000: 1-7.

纽春萍(1975—),女,副教授,研究方向为现代电器设计方法、新型开关电器的设计与优化。

(上接第7页)

- (7):41-45.
- [19] DRAWIN H W, FELENBOK P. 1965 data for plasma in local thermodynamic equilibrium[Z]. Paris: Gauthier-Villars, 1965.
- [20] BACRI J, REFFANEL S. Calculation of some thermodynamic properties of air plasmas: Internal partition functions, plasma composition, and thermodynamic functions[J]. Plasma Chem and Plasma Proc., 1987, 7(1):53-87.
- [21] HERZBERG G. Molecular spectra and molecular structure. Vol 2: Infrared and raman spectra of polyatomic molecules[M]. New York: Van Nostrand, Reinhold, 1945.
- [22] CHASE M W Jr, DAVIES C A, DOWNEY J R Jr, et al. JANAF thermochemical tables[J]. J. phys. Chem. Ref., 1978 (7):793.
- [23] CHERVY B, GLEIZES A, RAZAFINIMANANA M. Thermodynamic properties and transport coefficients in SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300-30 000 K and pressures of 0.1-1 MPa[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994: 27(6): 1193-1206.
- [24] 王 亮, 林 莘. SF₆ 断路器开断小电流介质临界击穿电压数值模拟计算分析[C]//2012 输变电年会论文集. 上海: [s.n.], 2012: 89-94.
WANG Liang, LIN Xin. Numerical simulation analysis of the small current media critical breakdown voltage on SF₆ circuit breaker[C]//Transmission Annual Meeting Proceedings. Shanghai: [s.n.], 2012: 89-94.

林 莘(1961—),女,教授,博士生导师,从事高电压与绝缘技术、高压电器、智能化电器等方面的教学和科研工作。

王 亮(1986—),男,硕士研究生,主要从事高压 SF₆ 断路器气流场计算研究。

徐建源(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与控制、高电压与绝缘技术等研究。

王飞鸣(1986—),男,博士研究生,主要从事电力系统过电压与高压绝缘。

李鑫涛(1989—),女,博士研究生,主要从事超、特高压输电设备仿真计算研究。