

以内部温度为判据的硅橡胶平板表面 稳态温度计算模型与试验分析

阳 林¹, 杨政霖¹, 郝艳捧¹, 王婷婷^{2,3}, 罗 兵^{2,3}, 肖 微^{2,3}

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080; 3. 中国南方电网有限责任公司 电网技术研究中心, 广东 广州 510080)

摘 要: 为了通过内置温度传感器实现复合绝缘子护套表面放电的检测, 以硅橡胶平板为研究对象建立热路模型, 实现以内部温度为判据的硅橡胶平板上表面温度的间接计算。首先依据传热学理论对硅橡胶平板建立热路模型, 考虑到外界大气对流过程中非线性因素的影响, 引入空气对流指数 n 对模型进行修正, 并提出对流换热系数 h 的求解方法; 然后模拟硅橡胶平板表面的发热情况开展温升试验, 测量硅橡胶平板表面和内侧的温度数据, 并将上表面的测量值与模型计算值进行比较。结果表明: 采用本研究提出的计算模型, 以内部温度为数据计算得到硅橡胶平板表面稳态温度的相对误差在 10% 以内, 满足精度要求。

关键词: 硅橡胶平板; 热路模型; 温度计算; 温升试验

中图分类号: TM216; TQ333.93 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)05-0098-06

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.05.015

Calculation Model and Experimental Analysis on Steady-state Temperature of Silicone Rubber Plate Surface Based on Internal Temperature

YANG Lin¹, YANG Zhenglin¹, HAO Yanpeng¹, WANG Tingting^{2,3}, LUO Bing^{2,3}, XIAO Wei^{2,3}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power Research Institute China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

3. China Southern Grid Corp Power Grid Technology Research Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to realize the detection of surface discharge by the temperature sensor inside the composite insulator sheath, we used silicone rubber plate as research object, and established a thermal model to realize the indirect calculation of surface temperature on the silicone rubber plate based on internal temperature. Firstly, according to the heat transfer theory, a thermal model of silicone rubber plate was established. Considering the influence of nonlinear factors in the process of atmospheric convection, the air convection index n was introduced to modify the model, and the solution method of convection heat transfer coefficient h was proposed. Then, temperature rise tests were carried out to simulate the heating condition of silicone rubber plate surface, and the temperature data of the upper and lower surfaces of silicone rubber plate were measured. The measured value of upper surface was compared with the calculated value of model. The results show that the relative error of the steady-state temperature of silicone rubber plate surface calculated by the model based on internal temperature is less than 10%, which meets the accuracy requirement.

Key words: silicone rubber plate; thermal model; temperature calculation; temperature rise test

收稿日期: 2020-07-08 修回日期: 2020-08-11

基金项目: 特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室开放基金(NEL201805)

作者简介: 阳林(1984-), 男(汉族), 湖南永兴人, 副教授, 博士, 主要从事输变电设备外绝缘和在线监测方面的研究。

0 引 言

复合绝缘子因其优良的憎水性和绝缘性能被广泛应用于输电线路中^[1-2]。长期运行在户外的绝缘子在污秽、降雨的作用下, 会出现泄漏电流增大

以及放电等现象,对输电线路的安全运行具有潜在的危害^[3-4]。当前,将传感器植入复合绝缘子内部实现复合绝缘子运行状态监测的思路引起了国内外学者的关注。将光纤植入复合绝缘子芯棒可实现对芯棒应力和温度的监测^[5];法国瑟迪威公司将光纤绕在芯棒上检测芯棒的局部温度^[6],但该方法具有不可逆性;将光纤光栅植入复合绝缘子硅橡胶护套可以实现覆冰监测^[7]。将传感器植入硅橡胶护套内部,以温度为参量检测表面放电故障的研究已经展开。为实现这一目标,需要建立护套表面放电温度与内部测量温度之间的关系。

有关绝缘子温度间接计算的研究尚未全面展开,上世纪P H THOMAS^[8]曾提出求解平板表面放电时温度的方程,但该方法对热流量的求解不够准确;A SKOPEC等^[9]以硅橡胶平板内部测量温度为条件,通过建立传热方程求解了平板表面放电时的温度,但该方法较为繁琐。当前,热电类比法被广泛应用于电力设备关键部位温度的间接计算,例如结合变压器特点通过热电类比法建立热路模型,可通过变压器油箱壁温度计算绕组热点温度^[10-11];对电力电缆建立热路模型后,可通过电缆外表皮温度计算电缆导体温度^[12-13];针对架空导线建立热路模型,通过监测导线温度与环境温度可实现对架空导线隐含稳态载流量的评估^[14-15]。但将热电类比法用于绝缘平板表面温度计算的研究尚未开展。

本研究依据传热学理论建立硅橡胶平板的稳态热路模型,提出模型的改进方法。设计并开展硅橡胶平板的温升试验,测量硅橡胶平板内侧的温度,将内侧温度作为条件代入到模型中求解上表面温度,并将计算结果与实际测量值进行比较,验证模型的准确性。

1 硅橡胶平板稳态热路模型的建立

复合绝缘子表面发生放电时,最先产生电弧的位置往往是距离高压端较近的立柱^[6],立柱外表面导热过程可在平板模型下做近似研究。

根据污闪发展过程的三区段理论,在危险区时已出现剧烈电弧,此区段电流周波的有效值不同但变化不大^[17],此时可认为电流发热处于稳定状态。此种情况可视为一维稳态导热问题,结合热电类比理论可建立热路模型。

1.1 传热模型建立

由于热流量覆盖面积较小,可将复合绝缘子立

柱部分视为平板模型研究,由弧度造成的热阻计算误差可忽略。硅橡胶平板试样厚度依据实际绝缘子立柱尺寸选取。硅橡胶表面电流产生的热流量一部分将通过硅橡胶传递到护套和芯棒界面,还有一部分通过对流传热传导至大气中,如图1所示。

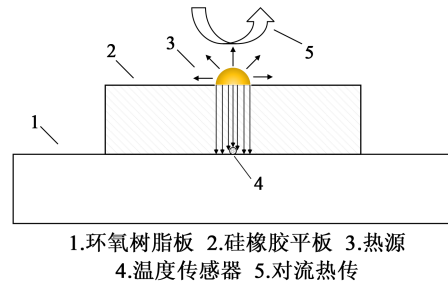


图1 硅橡胶平板热量传导过程

Fig. 1 Thermal conduction process of silicone rubber plate

当电流流过硅橡胶平板表面时,电流流过区域下方近似温度相同。针对流过硅橡胶平板表面电流建立起稳态导热过程后,根据硅橡胶平板电流热效应的特点,结合传热学理论和热电类比理论,可建立一个并联热路模型,如图2所示。图2中, θ_{in} 为硅橡胶平板内侧温度; θ_f 为硅橡胶平板上表面温度; θ_a 为环境温度; R_i 为硅橡胶平板热阻; R_a 为空气热阻; q 为热源的热流量。

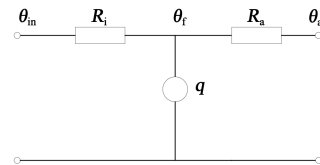


图2 硅橡胶平板稳态热路模型

Fig. 2 Steady-state thermal model of silicone rubber plate

依据上述稳态热路模型,可列出稳态时的热平衡方程如式(1)所示^[18]。

$$q = (\theta_f - \theta_{in})/R_i + (\theta_f - \theta_a)R_a \quad (1)$$

硅橡胶平板热阻 R_i 计算式如式(2)所示^[18]。

$$R_i = \delta/(A\lambda) \quad (2)$$

式(2)中: δ 为硅橡胶平板的厚度; A 为热流量穿过的区域面积; λ 为硅橡胶的传热系数, λ 取值为 $0.27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[19]。

空气等效热阻 R_a 计算如式(3)所示^[18]。

$$R_a = 1/(Ah) \quad (3)$$

式(3)中: h 为空气的对流换热系数,本研究通过试验求解。

1.2 对流换热系数求解

在集总参数法下含有稳态热源的导热微分方程简化形式如式(4)所示^[18]。

$$d\theta/dt = \Phi/\rho c \quad (4)$$

式(4)中: Φ 为广义热源; ρ 为硅橡胶平板的密度; c 为比热容。

空气对流与硅橡胶平板交界面上交换的热量可折算成物体的体积热源,如式(5)所示^[18]。

$$\Phi V = Ah(\theta - \theta_{\infty}) \quad (5)$$

式(5)中: V 为热流量流过物体的体积; θ_{∞} 为温度经历过暂态过程达到稳定时的温度。

联立式(4)和(5),解得暂态过程中温度随时间的变化式,如式(6)所示。

$$\theta = \theta_{\infty} + (\theta_0 - \theta_{\infty}) \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \quad (6)$$

式(6)中, θ_0 为硅橡胶平板的初始温度。

使用集总参数法求解时,毕渥数(Biot)小于0.1时计算较为准确,本研究选用的硅橡胶试样导热系数小,毕渥数大于0.1,但由于厚度小毕渥数仍在较小值。因此在已知 c 、 ρ 和硅橡胶平板几何尺寸的情况下,可以设计硅橡胶平板的冷却试验近似求取对流换热系数 h 。具体方法如下:

(1)首先通过试验装置对硅橡胶平板上表面进行加热,待平板表面温度达到稳态时撤去热源,将硅橡胶平板上表面暴露在大气中在自然条件下冷却,记录平板表面暂态冷却过程的温度变化数据。

(2)根据惟一性定理,将测得的温度变化曲线按照式(6)进行拟合。通过代入已知参数,可解得对流换热系数 h 的值。

1.3 传热模型的修正

本文研究的是硅橡胶平板在稳态时的温度计算。当热流量在平板上的流动达到稳态时,热流量 q 是平板两侧温差 $\Delta\theta$ 的一次函数,热阻 R 在稳态时是常数。但是平板表面与大气接触时没有强制对流,例如流过平板的热流量变为原来的两倍,则平板表面与大气温差也应该变为原来的两倍。而实际温差会远多于原来的两倍。这是因为与平板表面接触的空气热边界层会加速运动,空气对流效应也会更加剧烈,此时空气对流换热部分的模型不再是一个线性关系。参考文献[20]中给出的变压器箱壁温度计算方法得出非线性关系式,如式(7)所示。

$$q = (\Delta\theta)^n / R \quad (7)$$

将 n 定义为空气对流指数,在同一外界环境、同

一介质下流动速率越高, n 越大^[21],当外界环境变化不大时, n 为常数。在变压器热路模型中, n 为经验值,由于尚未有对复合绝缘子热流模型的研究, n 值可通过设计试验求解得到。

为了便于分析,将硅橡胶平板表面热流量分为两部分,通过热传导的方式向平板内侧传递的一部分热流量为 q_1 ,计算式如式(8)所示。此部分热流量与空气对流无关。

$$q_1 = (\theta_f - \theta_{in}) / R_i \quad (8)$$

由平板表面流向大气部分的热流量 q_2 会受到空气对流的影响,根据式(7)可得 q_2 ,计算式如式(9)所示。

$$q_2 = (\theta_f - \theta_a)^n / R_a \quad (9)$$

改进后的热平衡方程如式(10)所示。

$$q = q_1 + q_2 = (\theta_f - \theta_{in}) / R_i + (\theta_f - \theta_a)^n / R_a \quad (10)$$

将式(10)中 n 的表达式解出为式(11)。

$$n = \log_{(\theta_f - \theta_a)} (R_a q - R_i (\theta_f - \theta_{in}) / R_i) \quad (11)$$

开展硅橡胶平板温升试验,取原计划试验其中一组热源下的温度试验数据,然后将各数据代入式(11)即可求得 n ,该 n 值即为该试验条件下的空气对流指数。

2 试验

2.1 试验方案

试验所用试样为硅橡胶平板,与复合绝缘子护套材料一致,硅橡胶平板试样为边长为10 cm的正方形,参考实际绝缘子尺寸,选取硅橡胶平板试样厚度为4 mm。将试样紧贴在一块环氧树脂板上进行试验,试验原理如图3所示。

为了便于控制发热,本研究通过直流电源对电阻丝施加电流加热硅橡胶平板表面,模拟泄漏电流发热。直流稳压电源在计算机控制下可稳定输出恒定电流,输出精度为0.1%;电阻丝采用纯度为99%的钨丝,半径为0.5 mm,长度为14 cm。钨的导热系数为174 W/(m·K),远高于硅橡胶的导热系数,因此当对钨丝加热时可视其为等温体,硅橡胶平板与钨丝的接触区域温度等同于钨丝温度。

该装置采用K型热电偶作为温度传感器,在硅橡胶平板上表面和内侧对应位置布置相同数量的热电偶。内侧热电偶布置在电阻丝热源的正下方,模拟植入复合绝缘子内部的温度传感器,所测温度作为条件代入模型求解表面温度;同时,在电阻丝

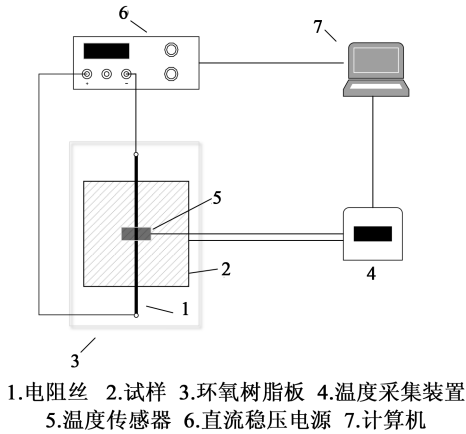


图3 硅橡胶平板温升试验原理接线图

Fig.3 Schematic of temperature-rising experiment for silicone rubber plate

与平板之间布置热电偶测量热源下方的表面温度，热电偶探头为镍合金薄片，对热量传递的影响可以忽略，采集到的表面温度用于和表面稳态温度的计算结果作比较。平板两侧传感器布置如图4所示。传感器测量温度通过英国Pico公司生产的PicoLog数据记录仪直接保存在计算机中，记录仪温度精度为0.2%，每隔1s采集一个温度数据。

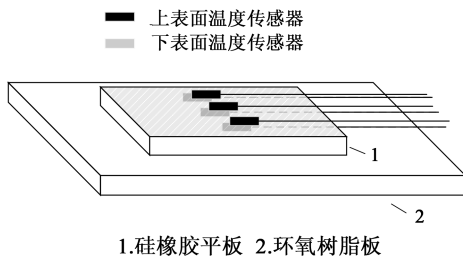


图4 温度传感器布置图

Fig.4 Temperature sensor layout

2.2 试验方法

本研究以电阻丝流过电流产生焦耳热模拟电流流过硅橡胶平板表面时产生的热量，其计算公式为式(12)所示。

$$q = i^2 R \tag{12}$$

式(12)中： i 为流过电阻丝的电流； R 为电阻丝电阻，本研究用电阻丝实测电阻值为 0.3Ω 。

为了选取合适的试验温度以模拟实际电流情况，本研究在硅橡胶平板表面开展了流过不同电流时的温升试验。当对电阻丝施加 $8.50 \sim 10.00 \text{ A}$ 电流时，硅橡胶平板表面温度与文献[22]硅橡胶平板漏电起痕试验中测量到的放电表面温度 $80 \sim 100^\circ\text{C}$

相近。因此，为了模拟真实放电温度，本研究在 $8.50 \sim 10.00 \text{ A}$ 电流范围内开展试验。

2.3 参数求解

2.3.1 对流换热系数 h 求解

对流换热系数根据所处的环境不同会有很大的差异。利用图3所示试验系统进行试验。首先，通过直流稳压电源对电阻丝施加 9 A 电流，通过热电偶对硅橡胶平板上表面温度进行采集。待硅橡胶平板上表面温度达到稳定状态时撤掉热源，使硅橡胶平板表面自然冷却。经过一个暂态的冷却过程，硅橡胶平板表面温度将达到新的稳态。

通过对冷却暂态温度数据进行拟合，可得到温度的暂态变化如式(13)所示，拟合结果如图5所示。

$$\theta = 29.63 + 185.62 \exp(-t/134.74) \tag{13}$$

从图5可以看出，拟合结果与测量数据吻合度高。已知硅橡胶密度 ρ 为 1680 kg/m^3 ，硅橡胶比热容 c 为 $822 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ，式(13)符合式(6)的变化规律，将所得式(13)与式(6)作比较，可解得试验条件下 h 为 $41.00 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

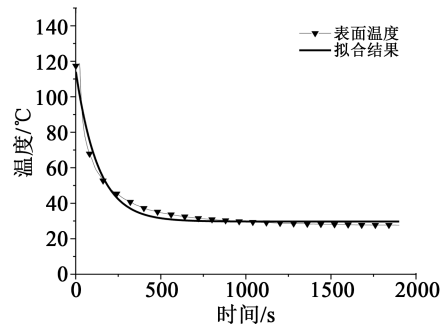


图5 暂态冷却过程的拟合结果

Fig.5 Fitting results of transient temperature cooling

2.3.2 空气对流指数 n 求解

n 值也利用图3所示系统进行试验求解。试验开始前，测得环境温度为 25°C ，硅橡胶平板表面温度已达到稳态。利用直流电源在电阻丝上施加 9 A 电流，然后测量内侧和上表面稳态温度数据。

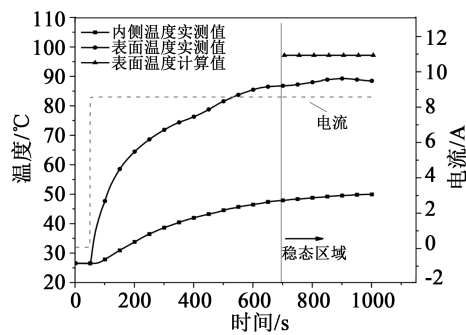
将已知参数代入热阻求解式(2)，计算得到硅橡胶平板热阻为 $148.15 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 。将已知参数代入式(3)，计算得到空气热阻为 $243.92 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 。将实测得到的一组温度数据和热阻值代入式(11)，可解得一组 n 值，取其平均值为2。

3 结果与分析

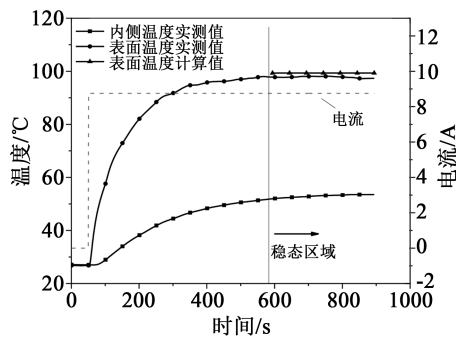
为了对硅橡胶平板表面温度计算的稳态热路

模型加以验证,在与求解 h 和 n 相同的环境下,对电阻丝分别施加8.50、8.75、9.25、9.50、9.75、10.00 A电流,测量平板表面和内侧温度数据。本研究定义硅橡胶平板温升达到稳态的标准是平板内侧温度在10 min内变化不超过 1°C 。

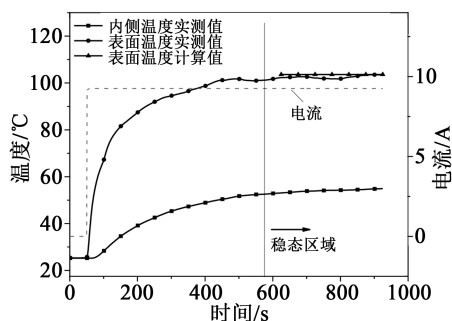
将稳态后的平板内侧测量温度和其他已知量代入式(10),求解硅橡胶平板表面稳态温度计算值,结果如图6所示。图6中同时列出了硅橡胶平板表面和内侧温度实测值,为了便于分析,图中稳态温度数据截止到稳态后5 min。从图6可以看出,稳定热源加热后,硅橡胶平板表面和内侧温度迅速升高,随后升温速度逐渐降低,并在加载电流后约10 min达到稳态阶段。为了分析表面温度计算值与实测值之间的差异,本研究以相对误差的绝对值表示,其计算式如式(14)所示。



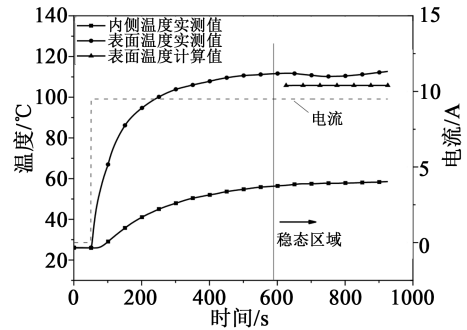
(a)8.50 A



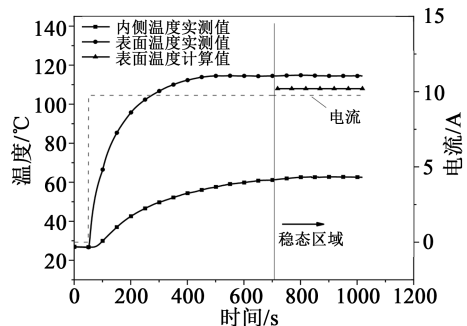
(b)8.75 A



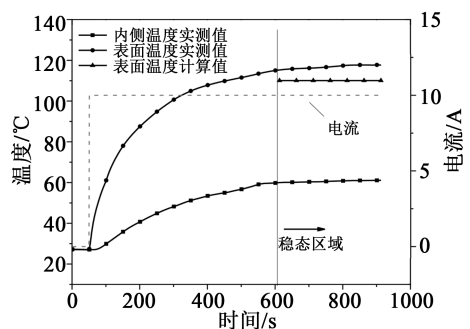
(c)9.25 A



(d)9.50 A



(e)9.75 A



(f)10.00 A

图6 硅橡胶平板表面温度实测值与计算值比较

Fig.6 Comparison between measured and calculated values of surface temperature for silicone rubber flat plate

$$\sigma = \left| (\theta_{ic} - \theta_{im}) / \theta_{im} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式(14)中: θ_{ic} 为硅橡胶平板表面温度的计算值; θ_{im} 为表面温度实测值。

相对误差计算结果如表1所示。由表1可知,当加载电流在8.75~9.50 A时,利用修正热路模型所得的硅橡胶平板表面温度计算值与测量值的相对误差较小,平均相对误差不超过5%。而加载电流为8.50 A或超过9.50 A时,相对误差稍大,但不超过10%。总体来看误差不大,可满足工程需要。

4 结论

本研究建立了硅橡胶平板的温度计算模型,并

表1 硅橡胶平板表面温度计算值与实测值相对误差

Tab.1 The error between calculated and measured value of surface temperature for silicone rubber flat plate

| 电流/A | 8.50 | 8.75 | 9.25 | 9.50 | 9.75 | 10.00 |
|-----------|------|------|------|------|------|-------|
| 相对误差最大值/% | 9.97 | 2.15 | 1.83 | 6.11 | 5.98 | 6.56 |
| 相对误差最小值/% | 8.86 | 1.24 | 0.05 | 4.01 | 5.60 | 2.76 |
| 平均相对误差/% | 9.62 | 1.58 | 1.05 | 4.78 | 5.80 | 5.08 |

通过试验对模型计算准确性进行验证,得到如下结论:

(1)依据传热学原理可建立硅橡胶平板表面温度计算热路模型。考虑外界对流因素,提出空气对流指数 n 和对流换热系数 h 的求解方法,通过试验求解所需参数。

(2)在求解得到模型计算所需的参数后,开展了模拟表面放电时发热状态的硅橡胶平板温升试验,结果发现,利用硅橡胶平板内侧测量温度得到的表面温度计算值与实测值之间的相对误差不超过10%,证明了本研究提出的温度计算模型的准确性。

参考文献:

- [1] 陈奇. 高压复合绝缘子应用及老化状态研究综述[J]. 绝缘材料, 2016,49(4):7-13.
- [2] 李允,谢红玲,李燕青,等. 运行复合绝缘子不均匀老化特性分析[J]. 绝缘材料,2018,51(7):65-69.
- [3] 谷裕,郝艳捧,薛艺为,等. 特高压换流站复合支柱绝缘子伞伸出对其高海拔直流污闪性能的影响[J]. 中国电机工程学报,2014,34(15):2478-2484.
- [4] 郝艳捧,黎卫国,阳林,等. 高海拔地区直流耐张绝缘子布置方式对其污闪特性的影响[J]. 高电压技术,2011,37(1):39-44.
- [5] 蔡炜,温生,邓鹤鸣,等. 植入复合绝缘子芯棒内的光纤布拉格光栅热应变和应力应变分析[J]. 高电压技术,2011,37(10):2370-2377.
- [6] 蔡炜,周国华,杨红军,等. 复合绝缘子光纤智能监测试验研究[J]. 高电压技术,2010,36(5):1167-1171.
- [7] WEI J, HAO Y P, FU Y, et al. Detection of glaze icing load and temperature of composite insulators using fiber bragg grating[J]. Sensors,2019,19(6):1321.
- [8] THOMAS P H. Some conduction problems in the heating of small areas on large solids[J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics,1957,10(4):482-493.
- [9] SKOPEC A, MORON L, ZYLKA P. Time-domain temperature variations of a composite insulator surface exposed to arc discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(2):369-377.
- [10] 陈曦,钱之银,汲胜昌,等. 基于热路模型的变压器内部温升计算方法研究[J]. 绝缘材料,2015,48(4):61-65.
- [11] SWIFT G, MOLINISK T S, BRAY R, et al. A fundamental approach to transformer thermal modeling II: Field verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(2):176-180.
- [12] 刘刚,雷成华,刘毅刚. 根据电缆表面温度推算导体温度的热路简化模型暂态误差分析[J]. 电网技术,2011,35(4):212-217.
- [13] 卞佳音,李永兰,单鲁平,等. 500kV 电力电缆稳态热路模型分析及载流量计算[J]. 绝缘材料,2019,52(9):96-101.
- [14] 刘刚,阮班义,林杰,等. 架空导线动态增容的热路法稳态模型[J]. 高电压技术,2013,39(5):1107-1113.
- [15] 阮班义,王金生,汪光煌,等. 基于热路模型的架空导线暂态载流量研究[J]. 绝缘材料,2015,48(8):73-78.
- [16] 李静,许鹏娟,刘树鑫,等. 复合绝缘子污闪动态发展过程与影响因素[J]. 沈阳工业大学学报,2019(5):481-488.
- [17] 司马文霞,李璟延,孙才新. 染污绝缘子污闪全过程泄漏电流波形及谐波特性分析[J]. 高电压技术,2010,36(5):1101-1106.
- [18] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [19] 薛杨. 导热绝缘硅橡胶复合材料的结构设计及性能研究[D]. 北京:中国科学院大学,2019.
- [20] SWIFT G, MOLINISK T, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling part I: Theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,16(2):171-175.
- [21] MONTSINGER V M. Abridgment of loading transformers by temperature[J]. Journal of the A.I.E.E.,1930,49(4):293-297.
- [22] 杜伯学,徐航,李云鹏,等. 特高压直流用高导热纳米复合绝缘子耐电痕特性研究[J]. 高电压技术,2013,39(12):2910-2915.