

DOI: 10.7667/PSPC170451

# 基于电磁-热耦合模型的架空导线温度分布和 径向温差的计算与实验验证

刘刚<sup>1</sup>, 李炆<sup>1</sup>, 陈垣<sup>1</sup>, 董选昌<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州供电局有限公司输电管理所, 广东 广州 510000)

**摘要:** 为了得到架空导线的径向温度场分布, 以 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 导线为例, 建立了架空线径向截面电磁-温度耦合场控制方程, 采用有限元分析软件, 对导线截面电磁场分布以及温度分布进行迭代计算。基于计算结果, 探究了电流密度分布以及径向温度分布的规律和成因。通过设计并搭建室内大电流实验平台, 对仿真计算结果进行了验证。在自然对流情况下, 导线钢芯温度、铝层温度以及铝层表面温度平均误差仅为 1.72%。结合 IEEE Std 738-2012 自然对流下径向温差经验公式, 比较了所建模型的准确度。对比结果表明: 计算导线径向温差时, 考虑集肤效应的热源分布以及空气间隙的热传导作用, 计算结果误差较小。

**关键词:** 集肤效应; 电流密度; 温度分布; 径向温差; 实验验证

## Calculation and experiment verification on temperature distribution and radial temperature of overhead transmission line based on electromagnetic-thermal coupling fields

LIU Gang<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, CHEN Yuan<sup>1</sup>, DONG Xuanchang<sup>2</sup>

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

2. Transmission Management Institute, Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** In order to get the radial temperature distribution of overhead transmission, taking LGJ240/30 mm<sup>2</sup> wire as an example, the control equations of the electromagnetic-thermal coupling field of radial section of overhead line are established and the electromagnetic field and the temperature distribution of the wire over cross section are calculated iteratively by using ANSYS. On the basis of calculation results, the regular pattern and cause of current density distribution and radial temperature distribution are discussed. Calculation results are verified by designing and establishing the indoor strong current experiment platform. The results show that in the case of natural convection, the average error of temperature of steel core, aluminum-layer temperature, and aluminum surface temperature is only 1.72%. The accuracy of the proposed model is compared with the experimental formula of radial temperature under natural convection combining IEEE Std 738-2012. The comparison shows that the calculation results considering the heat source distribution of skin effect and heat conduction in air gap has less error when computing conductor radial temperature.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050201).

**Key words:** skin effect; current density; temperature distribution; radial temperature; experimental verification

## 0 引言

架空输电线路的载流能力由最高允许运行温度决定, 而导线稳态温度与自身电阻发热、太阳辐射作用以及外部环境散热相关<sup>[1-2]</sup>。架空导线载流量在

发散热平衡方程的基础上形成了很多的计算方法, 解析法如 IEEE-738 标准、CIGRE 标准、摩根公式以及衍变模型<sup>[3-5]</sup>; 数值计算方法如电磁-热耦合场循环迭代方法、生热率计算与温度场仿真求解方法等<sup>[6-7]</sup>; 热电比拟类算法如暂、稳态热路模型<sup>[8-9]</sup>以及在统计学习方法基础上研究的载流量预测算法<sup>[10]</sup>。然而, 在关于导线载流量或者温度的计算中, 大部分是将导体视为等温圆柱体, 取表面温度。实

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助(2015AA050201)

实际上, 由于绞线型导线内部导体之间存在空气间隙和气隙, 外部散热条件好于内部, 导线截面存在径向温度梯度<sup>[11]</sup>, 并且随着风速和运行电流的增大, 径向温度差异更加严重。所以, 仅计算表面温度, 难免在线路增容时, 最高温度突破允许运行温度, 弧垂计算值偏于保守, 导致架空线路对树枝放电。计算结果表明: 在径向温度达到 9 °C 时, 500 m 孤立档弧垂计算差异达到 0.5 m, 极有可能不满足规程规定。研究不同运行环境条件下的径向温差, 有益于高温下温度弧垂模型的修正以及蠕变退火过程的研究<sup>[12-13]</sup>。

目前, 国内外关于绞线型导线截面温度分布以及径向温差计算已有研究, 但是仍存在一些不足。V.T.Morgan 等人虽然考虑了空气间隙的接触热阻以及空气热阻, 然而忽略了涡流场的作用, 将导体的生热率均匀施加在导体截面; W.Z.Black 在电流按照直流串并联分布的情况下, 建立了热传导方程, 然而导热系数的取值仍存在很大不确定性<sup>[14]</sup>。国内应展烽等人结合参数辨识和热电比拟方法, 建立了径向温度热路模型, 并通过实验验证<sup>[15]</sup>。文献[16]通过风洞平台实验表明, 同一径向截面的不同受风位置, 温度也有差异<sup>[16]</sup>。有限元仿真计算, 恰恰能将电磁场-温度场-流体场耦合结果直观展现, 可拓宽实验研究范围, 并减少实验工作量<sup>[7]</sup>, 成为研究绞线型导线径向温度分布的有效手段。

本文根据电磁场和传热学理论, 建立了架空线径向温度计算的电磁-热耦合场数学模型, 并以 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 为例, 采用有限元分析软件进行计算求解。为验证耦合场的准确性, 搭建了大电流实验平台, 在室内对导线径向温度分布进行实测, 验证了模型在自然对流条件下的有效性, 为后续研究强制对流情况奠定了基础, 同时与 IEEE Std 738-2012 方法计算结果进行比较, 体现了所建模型的准确度。

## 1 架空导线电磁-热耦合场计算

### 1.1 电磁场模型建立与计算分析

#### 1.1.1 基本假设

进行电磁-热耦合场分析时, 在能满足实际需求的情况下, 作如下基本假设:

(1) 根据 MQS 似稳条件, 工频下架空线电磁场作为似稳场处理, 并且略去位移电流<sup>[17]</sup>;

(2) 忽略钢芯铝绞线特性, 即认为由数根圆导体聚拢而成, 建立钢芯铝绞线二维几何模型<sup>[10]</sup>;

(3) 各媒质材料的磁导率、电导率以及导热系数为均匀、线性和各向同性;

(4) 钢芯铝绞线各导体之间为并联关系, 同一截面上各导体之间有相同的轴向电压梯度。

#### 1.1.2 电磁场数学模型

钢芯铝绞线二维电磁场求解域如图 1 所示。

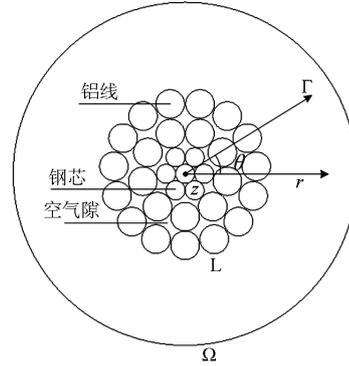


图 1 架空线电磁场与温度场求解域

Fig. 1 Solution area of electromagnetic-thermal coupling field of overhead transmission line

在上述假设条件下, 采用柱坐标系, 认为总电流沿 Z 轴方向, 电流密度在  $r-\theta$  平面分布, 根据麦克斯韦方程组, 并引入矢量磁位  $\mathbf{A}$  和标量电位  $\phi$ , 得到钢芯铝绞线空气域和导体域中的控制方程为<sup>[17-18]</sup>

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \\ -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi = \mathbf{E} \end{cases} \quad (1)$$

由于钢芯铝绞线内部电磁场的场域空间是由三种媒质组成, 所以应将不同媒质区域分界面的边界条件引入基本偏微分方程, 得

$$\begin{cases} \Omega: \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{\mu \rho^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} = -J_z \\ \Omega^1: J_z = -\frac{1}{\rho(T)} (\nabla \phi + \frac{\partial A_z}{\partial t}) \\ \Omega^2: J_z = 0 \\ C: A_{z1} = A_{z2} \\ C: \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_{z1}}{\partial n} = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_{z2}}{\partial n} \\ \Gamma: A_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Omega$  为整个电磁场求解区域;  $\Omega^1$  为导体区域;  $\Omega^2$  为空气区域;  $C$  为不同媒质分界线;  $\Gamma$  为空气域外边界;  $J_z$  为电流密度 Z 轴方向分量, A/m<sup>2</sup>;  $\mu$  为媒质的磁导率, H/m;  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  为两种不同媒质区域的磁导率, H/m;  $A_z$  为电磁场求解区域的矢量磁位的 Z 轴方向分量, Wb/m;  $A_{z1}$ 、 $A_{z2}$  为不同的电磁场求解区域在分界线上矢量磁位的 Z 轴方向分量, Wb/m;  $\rho$  为材料的电阻率与导体温度相关,  $\Omega/\text{m}$ ;

$T$  为导体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi$  为标量电位,  $\text{V}$ 。式(2)中  $\nabla\phi$  未知, 方程无唯一解, 为此需要添加  $Z$  方向的定解条件如式(3)。

$$\iint_{\Omega} J_z dS = I \quad (3)$$

式中:  $\Omega$  为整个电磁场的求解区域;  $J_z$  为电流密度  $Z$  轴方向分量,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $I$  为流经钢芯铝绞线截面的总电流,  $\text{A}$ 。

由式(2)可以看出在导体区域, 电流密度的分布与  $A_z$  的变化率、 $\rho$  和  $\nabla\phi$  有关。在一次求解中设置的温度不变, 根据假设(3),  $\rho$  不变; 根据假设(4),  $\nabla\phi$  不变; 而  $A_z$  与位置和时间均有关系。对于同种导体, 不同位置  $A_z$  的变化率不同使电流密度不同, 导致集肤效应。

### 1.1.3 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 二维电磁场有限元分析

本文以 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 型号导体为例, 采用 MAXWELL 电磁分析软件, 计算不同电流下导线截面径向电流密度分布, 仿真计算结果如图 2—图 4 所示。添加金属材料时, 打开材料中温度修正选项, 并且导入根据温度修正电导率的系数表。设置求解模式为 eddy current 模式, 电流频率为 50 Hz。施加电流时需开启 “set eddy effect”, 以模拟集肤效应。在空气的外边界施加气球边界条件, 并且根据精度需要设定网格大小。

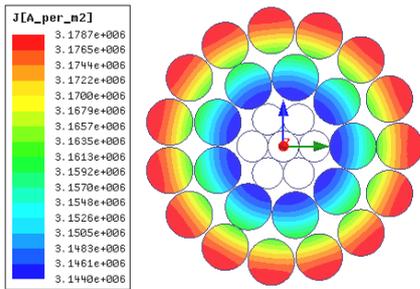


图 2 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 导线 550 A 时铝层电流密度分布  
Fig. 2 Current density distribution in aluminum layers of LGJ240/30 mm<sup>2</sup> conductor with 550 A current

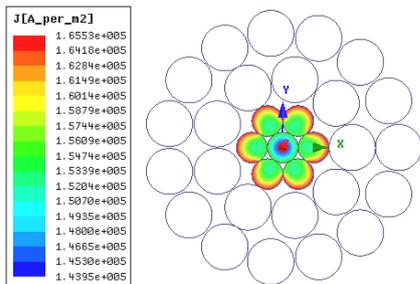


图 3 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 导线 550 A 时钢芯电流密度分布  
Fig. 3 Current density distribution in steel core of LGJ240/30 mm<sup>2</sup> conductor with 550 A current

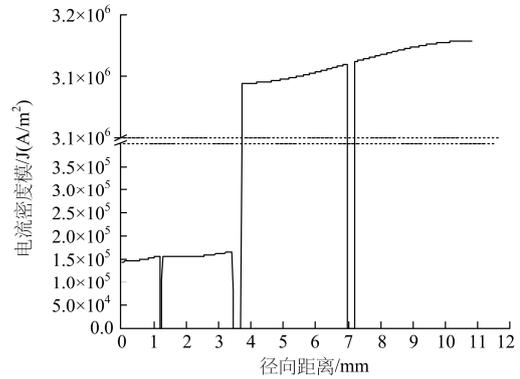


图 4 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 导线 550 A 时电流密度分布曲线  
Fig. 4 Current density distribution of LGJ240/30 mm<sup>2</sup> conductor with 550 A current

由图 2—图 4 所示, 电流密度在钢芯铝绞线内部分布并不均匀, 最外层铝层中的电流密度平均值为 3 172 758.33 A/m<sup>2</sup>, 约为最内层钢芯截面平均电流密度的 21.4 倍, 与摩根计算比例相差无几。这时导线铝层材料的电导率大于钢的电导率, 并且在交流情况下集肤效应导致电流贴近导体表层流过。由于工频交流下, 铝导体材料的集肤效应深度达到 11.73 cm, 远大于导体截面半径, 所以在两铝层导体中的电流密度变化值小于 1.08%, 即在非铁磁材料铝导体层中的电流密度沿径向衰减并不明显。

## 1.2 架空导线电磁-热耦合场数学模型与计算

### 1.2.1 电磁-热耦合场数学模型建立

架空导线各层导体中不断产生焦耳损耗, 同时与周围空气发生自然对流散热或者强制对流散热。在仅考虑自然对流散热时, 温度场的不均匀会引起空气的浮动, 在数值计算时作如下假设:

(1) 空气流体的粘性耗散项忽略不计;

(2) 空气流体中密度是温度的函数, 仅考虑动量方程中与体积力有关的项; 其他物性参数为常数;

(3) 忽略导体内部空气间隙的对流散热和辐射散热, 即空气间隙只存在热传导作用。

固体中的温度场应满足能量守恒定律和傅里叶定律, 由物体常物性假设, 钢芯铝绞线计算区域的稳态温度场求解归结为如下的边值问题<sup>[19-20]</sup>。

$$\begin{cases} \Omega: \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + Q_v = 0 \\ L: -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda^* \frac{\partial T^*}{\partial n} + \sigma_0 \varepsilon (T^4 - T_{\text{OUT}}^4) \\ L: T = T^* \\ C: T_1 = T_2 \\ C: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\Omega$  为导线温度场求解区域； $L$  为导线与包围空气域的分界线； $C$  为两固体求解区域之间的分界线； $T$  为固体材料的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\lambda$  为固体材料的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $Q_v$  为各层导体单位体积产热率， $\text{W}/\text{m}^3$ ； $\lambda^*$  为空气的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $T^*$  为空气的温度，由流体域求解得到， $^{\circ}\text{C}$ ； $\sigma_0$  为斯蒂芬玻尔兹曼常数  $5.67\times 10^{-8}(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ； $\varepsilon$  为导线表面发射率，光亮新线为  $0.23\sim 0.46$ ，发黑旧线为  $0.90\sim 0.95$ ； $T_1$  和  $T_2$  为固体分界线两侧的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

在交变电磁场中，架空导线流过电流产生焦耳损耗、磁滞损耗和涡流损耗，当达到发热与散热平衡时，导体各层温度达到稳定状态，而导体的电阻率与温度在低温区间可认为是线性增长关系，所以，温度场的计算是一个涉及电磁场与温度场的耦合计算过程。

$$Q_v = \frac{1 + \alpha(T - 293)}{2\gamma_{20}} \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* ds \quad (5)$$

式中： $\alpha$  为导线的电导率随温度的变化系数， $1/\text{K}$ ； $\gamma_{20}$  为导线金属材料在  $20^{\circ}\text{C}$  时的电导率， $\text{S}/\text{m}$ ； $\mathbf{J}$  为电流密度矢量值， $\text{A}$ ； $\mathbf{J}^*$  为电流密度矢量的共轭， $\text{A}$ 。

根据流体满足的质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本定律，空气域中流体掠过输电线路表面的传热应满足的控制方程通用形式为<sup>[21]</sup>

$$\begin{cases} \Omega_2: \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \\ \text{L}: u = 0, v = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\phi$  为通用变量，可以代表  $u$ 、 $v$ 、 $T$  等求解变量； $\rho$  为流体密度，为温度的函数； $\mathbf{U}$  为流体的速度矢量，在  $xy$  坐标平面是  $u$ 、 $v$ ； $\Gamma_{\phi}$  为广义扩散系数； $S_{\phi}$  为广义源项。

由于模型的对称性，在考虑集肤效应后的电流密度分布只与径向坐标  $r$  有关，即生热率分布基本只与坐标分量  $r$  有关。选取任意一条经过中心的直线，记录直线所经过的网格的电流密度与  $r$  坐标，根据电流密度在涡流场中的衰减规律，使用指数函数拟合得到  $J(r)(\text{A}/\text{m}^2)$ 。

在 ANSYS CFX 中建立钢芯铝绞线物理模型，施加生热率载荷时，通过式(5)计算钢芯和铝层的生热率，并通过 CEL 语言施加。施加边界条件时，对于空气外边缘施加开放边界条件以模拟无限大流体空间，对于固体部分边界条件根据式(4)进行，由于 CFX 默认边界条件包含边界两侧温度相等与热流密度连续，只需要对导线暴露于空气中的部分在流固交界面的基础上通过 CEL 语言施加负的生热率，以模拟热辐射散热边界条件<sup>[22]</sup>。

$$q = -\varepsilon\sigma_0(T^4 - T_{\text{OUT}}^4) \quad (7)$$

式中： $\sigma_0$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，取值  $5.67\times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2$ ； $\varepsilon$  为导线表面辐射系数，光亮新线取  $0.23\sim 0.46$ ，发黑旧线取  $0.90\sim 0.95$ ； $T_{\text{OUT}}$  为给定环境温度； $T$  为导线表面温度，由求解器实时给出， $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2.2 电磁-热耦合场迭代计算流程

首先设定一个初始  $K_1^{(0)}$  为环境温度，根据电导率与温度的关系计算  $J(r)(\text{A}/\text{m}^2)$ ，之后将  $J(r)(\text{A}/\text{m}^2)$  代入 CFX 模型之中，得到钢芯铝绞线内部的最高温度  $K_2^{(i)}$  和最低温度  $K_3^{(i)}$ 。根据迭代判据，判断  $|K_1^{(i-1)} - (K_2^{(i)} + K_3^{(i)})/2|$  是否满足控制精度要求。若不满足，则令  $K_1^{(i)} = (K_2^{(i)} + K_3^{(i)})/2$ ，并更新材料的电导率，继续循环迭代，直至满足精度要求；如果满足，则将最后的 ANSYS CFX 模型所得的温度场分布作为计算的最终结果，该方法的迭代计算流程如图 5 所示。

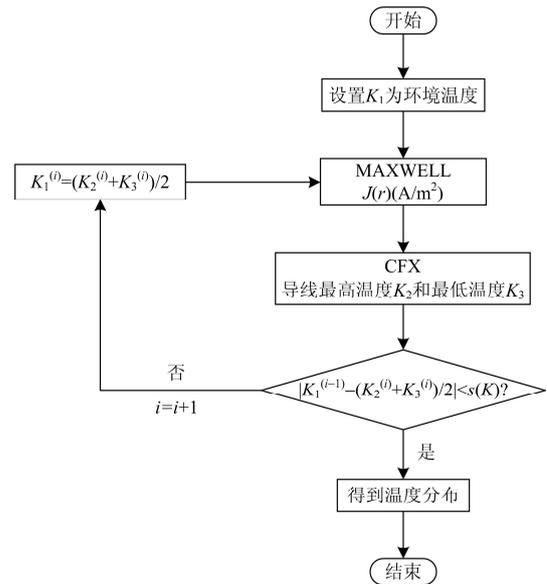


图 5 电磁-热耦合模型迭代计算流程图

Fig. 5 Iterative calculation flow chart of electromagnetic-thermal coupling model

### 1.3 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 仿真结果与分析

导体圆心竖直方向温度分布，如图 6 和图 7 所示。由于导线内部各股导体之间空气热阻较大，而且外表面利于散热，致使导线截面温度分布并不均匀，存在径向温度梯度；其中内部两层钢芯部位温度基本相等；而承担大部分电流的两铝层导体部位温度存在明显梯度，且最低温度位置位于外层。在自然对流条件，环境温度  $21^{\circ}\text{C}$  时，施加激励为  $550 \text{A}$ ，径向温差达  $4.1^{\circ}\text{C}$ 。

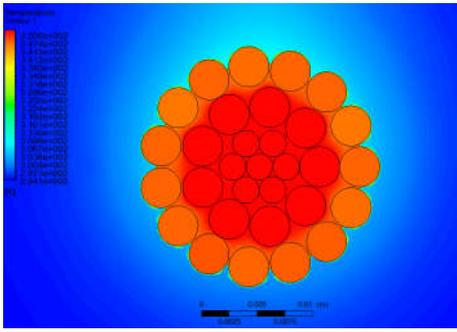


图 6 自然对流条件下 LGJ 240/30 mm<sup>2</sup> 550 A 时径向温度分布云图

Fig. 6 Cloud chart of the radial temperature distribution of LGJ240/30 mm<sup>2</sup> conductor with 550 A current under natural convection

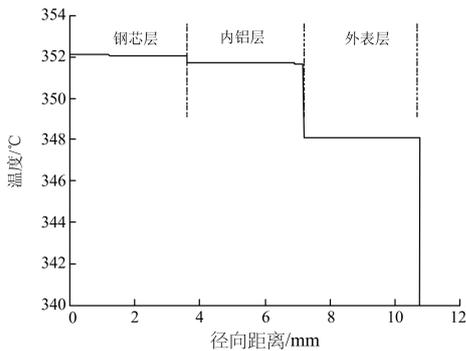


图 7 自然对流条件下, LGJ 240/30 mm<sup>2</sup> 550 A 时稳态径向温度分布曲线

Fig. 7 Steady-state radial temperature distribution of LGJ240/30 mm<sup>2</sup> conductor with 550 A current under natural convection

导体在自然对流情况下, 以热传导、对流散热以及热辐射形式向外散热。受浮升力影响, 导体周围热空气上升, 冷空气下沉, 通过查看周围风速分布和流线分布矢量图, 可以发现导体表层温度与环境温度达到 53 °C 时, 表面附近空气浮动速度小于 0.03 m/s, 此时热传导仍为主要的散热因素。

## 2 实验设计与结果分析

### 2.1 实验系统设计

为验证有限元模型的准确性, 设计并搭建了径向温度分布测量实验系统, 如图 8 所示。

该套温度测量实验平台位于室内, 由调压器、两台升流器、电容补偿装置、电流互感器、PLC 控制柜、小型自动气象站以及 LGJ 240/30 mm<sup>2</sup> 导线和温度测量显示设备组成<sup>[23]</sup>。温度测量方式为接触式测量, 测量元件是 T 型铜-康铜热电偶丝, 测量精度

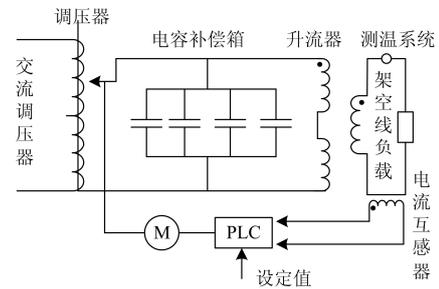


图 8 架空导线径向温度测量系统

Fig. 8 Radial temperature measurement system for overhead transmission line

0.1 °C。试验中, 电流通过升流器耦合到实验导线, 电流互感器以及 PLC 控制柜作为监测和反馈调节装置, 控制拖动电机调节分接头位置, 改变调压器输出电流。测量导线各层温度分布时, 将导线上部铝层用工具剥开并插入热电偶丝, 并在最外层用薄铝片包裹, 以测量内部钢芯温度; 测量导体表面温度时, 将热电偶丝紧贴于导线表面下部, 以测量最低温度, 并用相同光泽的薄铝片包裹测温球<sup>[24]</sup>。

### 2.2 实验过程与结果分析

实验夜间在室内开展, 通过恒温器控制室内温度在 21±1 °C, 温度测量位置可视为自然对流条件, 灯源的辐射强度可忽略。电容补偿箱调整为 500 μF 以减小流过调压器电流, 电流设置为 550 A, 加载 100 min, 足以使温度分布达到稳态。实验结果如图 9 所示。

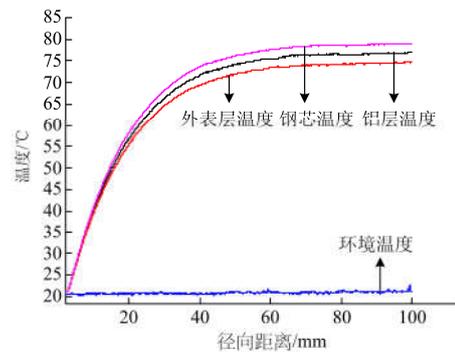


图 9 电流 550 A 时 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 各层温度实验测量曲线

Fig. 9 Experimental curve of temperature of each layer of LGJ240/30 mm<sup>2</sup> conductor with 550 A current

由实验结果可以看出: 在整个暂态过程中, 导体表面温度一直小于钢芯温度, 并且导线表层温度和钢芯温度的差异逐渐增大, 直至达到稳定状态; 在加载电流为 550 A, 环境温度 21 °C 时, 钢芯温度与表层温度差异可达到 4.3 °C, 而图 7 中径向温差仿真结果为 4.1 °C, 基本上相等。

### 3 有限元模型验证与讨论

为进一步证实本文模型的优越性,在相同环境温度下,分别加载 250 A、350 A、450 A 和 550 A 电流,测量其钢芯、铝层以及铝导体表层的稳态温度,并根据上述耦合场迭代方法计算各种电流下导体径向温度分布,计算结果如表 1 所示。同时,采用 IEEE Std738-2012 推荐公式,在相同的环境参数以及导线表面发射率情况下,对 LGJ240/30 mm<sup>2</sup> 导线径向温差进行计算。其中 IEEE 模型中的导线径向传热系数根据推荐值选取 1 W/(m<sup>2</sup>·K)。各方法计算结果以及实验结果对比如表 1 所示。

表 1 实验结果、仿真计算结果、IEEE 计算结果对比

Table 1 Results comparison among experiment, simulation and IEEE

电流/A		250	350	450	550
表层 温度/ ℃	实验	33.1	43.9	57.2	74.6
	计算	33.6	45.3	58.1	75.0
	误差/%	1.55	3.09	1.57	0.50
铝层 温度/ ℃	实验	33.5	44.7	58.8	76.7
	计算	33.7	45.6	61.3	78.9
	误差/%	0.60	2.01	4.25	2.87
钢芯 温度/ ℃	实验	33.9	45.4	60.0	78.9
	计算	33.7	45.9	61.4	79.1
	误差/%	-0.50	1.19	2.25	0.25
径向 温差/ ℃	实验	0.8	1.5	2.8	4.3
	计算	0.1	0.6	3.3	4.1
	IEEE	0.2	0.5	1.7	2.6

如表 1 所示,对导线表面温度、铝层温度以及钢芯温度而言,采用有限元方法计算结果与实验数据基本吻合,平均误差仅为 1.72%。进一步比较可知,各层实验温度比仿真计算温度略低,主要是由于热电偶测温时受热面较大,热端两接触面存在温差以及热电偶热端与导线接触热阻的存在导致。对比径向温差计算结果可知,根据钢芯铝绞线实际截面结构进行温度分布计算,比较接近实际热量传导过程,误差较小。而 IEEE 推荐公式在计算径向温差时,是由双圆柱体导体推导而来,并没有过多考虑内部的空气热阻以及接触热阻,所以计算误差较大。

实际架空输电线路所处运行环境复杂,风条件下可加强对流散热,太阳辐射可造成导线温度的升高。本文所建模型,虽然是在无太阳辐射的自然对

流条件下得到验证的,但是所述方法却可以为强制对流和太阳辐射条件下载流量计算以及径向温度分布提供重要的研究基础,同时为架空线路设计和增容改造提供借鉴。

### 4 结论

本文根据电磁-热耦合分析模型计算了架空导线温度分布和径向温差,并通过严谨的实验对所述方法进行验证,在自然对流环境下,得到以下结论。

1) 实验结果表明,钢芯铝绞线的稳态径向温差随着加载电流的增加而逐渐增大;暂态径向温差随着时间的延长而增大,并趋于平缓达到稳态。

2) 数值计算结果表明:在交流 50 Hz 电磁场中,钢芯铝绞线径向截面上的电流密度分布并非均匀,在导线表面附近达到最大,但铝层中变化并不明显;导体内部钢芯部分温度最高,并且可视为一个等温体,导体表层温度最低。

4) 本文模型中考虑架空导线空气间隙的热传导作用,径向温差计算精度高于传统计算方法。

5) 本文所述模型虽然以钢芯铝绞线为例,但仍适用于类似结构形式的输电导线。

### 参考文献

- [1] 马晓明, 范春菊, 胡天强, 等. 基于周期残差修正灰色模型的输电线路载流量的预测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 19-23.  
MA Xiaoming, FAN Chunju, HU Tianqiang, et al. Forecasting and analysis for current carrying capacity of transmission lines based on period residual modification grey model[J]. Power System Protection and control, 2012, 40(19): 19-23.
- [2] 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.  
LIU Gang, RUAN Banyan, LIN Jie, et al. Steady-state model of thermal circuit method for dynamic overhead lines rating[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1107-1113.
- [3] 吉兴全, 杜学斌, 李可军. 一种超高压输电线路动态增容办法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 102-106.  
JI Xingquan, DU Xuebin, LI Kejun, et al. A method of dynamic rating of ultra high voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 102-106.
- [4] IEEE Power Engineering Society. IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors: IEEE Std 738—2012[S].
- [5] 叶鸿声. 高压输电线路导线载流量计算的探讨[J]. 电力建设, 2000, 21(12): 23-26.  
YE Hongsheng. Inquire into calculation of conductor current carrying ampacity on HV transmission line[J].

- Electric Power Construction, 2000, 21(12): 23-26.
- [6] 何整杰, 李震彪, 梁盼望. 输电线温度及载流量的 ANSYS 计算方法[J]. 浙江电力, 2010, 29(8): 1-5.  
HE Zhengjie, LI Zhenbiao, LIANG Pangwang. ANSYS calculation method of temperature and current carrying capacity for transmission lines[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(8): 1-5.
- [7] 刘赞, 俞集辉, 程鹏. 基于电磁-热耦合场的架空输电线路载流量分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 28-34.  
LIU Yun, YU Jihui, CHENG Peng. Analysis and calculation on the ampacity of overhead transmission lines based on electromagnetic thermal coupling fields[J]. Power system protection and Control, 2015, 43(9): 28-34.
- [8] 刘刚, 阮班义, 张鸣. 架空导线动态增容的热路法暂态模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 58-62.  
LIU Gang, RUAN Banyu, ZHANG Ming. A transient model for overhead transmission line dynamic rating based on thermal circuit method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 58-62.
- [9] 应展烽, 徐捷, 张旭东, 等. 基于脉动参数热路模型的架空线路动态增容风险评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 89-95.  
YING Zhanfeng, XU Jie, ZHANG Xudong, et al. Risk assessment of dynamic overhead lines rating based on thermal circuit model considering pulsating characteristic of parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 89-95.
- [10] 徐伟, 鲍颜红, 周海锋, 等. 基于阻塞分析的架空线路动态增容研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 15-22.  
XU Wei, BAO Yanhong, ZHOU Haifeng, et al. Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 15-22.
- [11] DOUGLASS D A. Radial and axial temperature gradients in bare stranded conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(2): 7-16.
- [12] 任丽佳. 基于导线张力的动态提高输电线路输送容量技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
REN Lijia. Dynamic overhead transmission line rating based on tension measurement[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [13] SEPPA T O. Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1460-1471.
- [14] BLACK W Z. Theoretical model for temperature gradients within bare overhead conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(2): 707-716.
- [15] 应展烽, 杜志佳, 冯凯, 等. 高压架空导线径向热路模型及其参数计算方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 13-21.  
YING Zhanfeng, DU Zhijia, FENG Kai, et al. Radial thermal circuit model and parameter calculation method for high voltage overhead transmission line[J]. Techniques in Electrotechnics, 2016, 31(4): 13-21.
- [16] HALL J F, DEB A K, SAVOULLIS J. Wind tunnel studies of transmission line conductor temperatures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 3(2): 801-812.
- [17] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [18] 谢德馨, 姚纓英, 白保东, 等. 三维涡流场的有限元分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [19] 陶文栓. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [20] 殷巧玉, 李伟力, 于海涛, 等. 大型同步发电机断股故障情况下电磁场和温度场的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 59-67.  
YIN Qiaoyu, LI Weili, YU Haitao, et al. Calculation and analysis of electromagnetic field and temperature field under broken strands for a large synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 59-67.
- [21] 陈家庆, 俞接成, 刘美丽, 等. ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014.
- [22] 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 Dejie, 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.
- [23] 张鸣, 阮班义, 杨敏, 等. 对流散热对架空导线温度影响的实验研究[J]. 广东电力, 2013, 26(9): 21-25.  
ZHANG Ming, RUAN Banyu, YANG Min, et al. Experimental study on impact of heat loss through convection on overhead conductor[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(9): 21-25.
- [24] 刘刚, 林杰, 陈荣锋, 等. 架空线载流量的导线温度测量方法研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(4): 42-44.  
LIU Gang, LIN Jie, CHEN Rongfeng, et al. Method of measuring conductor temperature for ampacity of overhead lines[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2013, 50(4): 42-44.

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-06-13

作者简介:

刘刚(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断、过电压及其防护、电力设备外绝缘技术研究; E-mail: liugang@scut.edu.cn

李炆(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事架空线路动态增容研究。E-mail: 1010125719@qq.com

(编辑 葛艳娜)