

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.018

基于主热流分析的三芯电缆接头热点温度反演辨识方法及试验验证

侯澳港^{1,2}, 董旭柱^{1,2}, 阮江军^{1,2}, 邓永清^{1,2}, 李新海³, 张志强³

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学电网环境保护全国重点实验室, 武汉 430072;

3. 南方电网广东中山供电局, 广东 中山 528400)

摘要: 电力电缆由电缆本体和电缆接头组成, 电缆接头内部的温升是影响电力电缆线路载流能力的关键因素。针对电缆接头材料参数分散性大和热流扩散规律不明显等问题, 文中提出了一种基于主热流分析的电缆接头热点温度反演辨识方法, 以准确辨识接头内部的热点温度。首先建立了10 kV三芯电缆及接头的有限元仿真计算模型, 得到温度场分布规律。其次通过分析电缆接头的热流扩散规律, 建立了电缆本体的热路模型, 并采用正交试验法设计训练样本和测试样本, 确定了距离接头端部0.1、2.0 m的2个导体特征温度点, 从而构建了本体径向反演和导体轴向反演的接头热点温度组合反演方法。最后搭建了电缆多工况温升试验平台, 在不同负载、外界风速和环境温度下, 试验结果表明热点温度仿真值与试验值最大误差为2.29 K, 热点温度反演值与试验值最大误差为3.92 K, 为电缆接头热故障监测方法提供了参考。

关键词: 三芯电缆; 中间接头; 主热流; 热点温度; 轴向反演; 径向反演; 反演辨识; 试验验证

Inversion Identification Method and Test Verification of Hot Spot Temperature in Three-core Cable Joints Based on Main Heat Flow Analysis

HOU Aogang^{1,2}, DONG Xuzhu^{1,2}, RUAN Jiangjun^{1,2}, DENG Yongqing^{1,2},

LI Xinhai³, ZHANG Zhiqiang³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Guangdong Zhongshan Power Supply Bureau of China Southern Power Grid, Guangdong Zhongshan 528400, China)

Abstract: Power cables are composed of the cable body and cable joints, and the temperature rise inside the cable joints is a key factor affecting the current carrying capacity of power cable lines. In view of such issues as large dispersion of cable joint material parameters and unclear heat flow diffusion, in this paper a cable joint hot spot temperature inversion identification method based on main heat flow analysis is proposed to accurately identify the hot spot temperature inside the joint. Firstly, a finite element simulation calculation model for 10 kV three core cables and joints is set up to obtain the temperature field distribution. Then, a thermal path model of the cable body is set up by analyzing the heat flow diffusion law of cable joints. The orthogonal test method is used to design training and testing samples and determine two conductor characteristic temperature points at distances of 0.1 m and 2.0 m from the end of the joint, thus, a joint hot spot temperature combination inversion method for radial and axial inversion of the body is constructed. Finally, a multi condition temperature rise test platform for cables is set up. The test results shows that under different loads, external wind speeds and ambient temperatures the maximum difference between the simulated and experimental values of the hot spot temperature is 2.29 K, and the maximum error between the inversion value of the hot spot temperature and the experimental value is 3.92 K, which provide a reference for the thermal fault monitor-

收稿日期:2025-07-17; 修回日期:2025-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2066217);南方电网公司科技项目(GDKJXM20220135)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U2066217), China Southern Power Grid Company Limited (GDKJXM20220135).

ing method of cable joint.

Key words: three core cable; intermediate joint; main heat flow; hot spot temperature; axial inversion; radial inversion; inversion identification; test verification

0 引言

随着中国城市化进程的快速发展,城市配电网建设需求逐年增大,与架空线路相比,三芯电缆以其占地面积小、供电可靠性较高等优点,在城市配电网中发挥着越来越重要的作用^[1-2]。电力电缆一般由电缆本体和电缆中间接头组成。相较于电缆本体,中间接头材料参数分散性更大、绝缘结构更为复杂,更易引发温升过高等热故障,成为限制电缆线路载流量的瓶颈。因此准确监测电缆接头内部热点温度对于电缆线路安全运行具有重要意义^[3-4]。

电缆及电缆接头的温升研究方法一般可分为:直接测温法^[5]、间接测温法^[6-8]、解析热路模型法^[9-12]、数值算法^[13-18]和人工智能法^[19]等。

文[5]研发了植入式无源无线声表面波温度传感器(surface acoustic wave, SAW),并在110 kV电缆中间接头线芯处进行了高压温升试验。文[7]论述了各种光纤输电线路状态监测技术,重点提及在架空线路和高压电缆状态监测等领域的研究现状和发展趋势。文[8]建立了电缆各层结构的热阻热容集中参数等效模型,并分析热路等效模型的误差影响因素。数值算法主要包括模拟热荷法、有限元法和场路结合法。文[17]建立了三芯电缆接头及本体的3维模型,计算了稳态和暂态温度场并开展温升试验,结果显示接头热点温度的测量值和仿真值相对误差不超过9%。文[18]对比研究了不同电缆敷设条件下电缆的温度分布和载流量情况,对工程实践提供了理论支撑。文[19]构建了输入量为负荷电流和电缆表面温度、输出量为导体温度的Elman神经网络模型,通过不同工况下的电缆温升试验验证了该方法的有效性。

综上所述,直接测温法将传感器内置接头处直接监测温度,精确度高,但是会影响原有的绝缘结构,增大接头受潮的风险。间接测温法多用于监测电缆表面温度,进而计算内部导体温度。解析热路模型法基于现有的IEC 60287-2-1:2023标准^[20-21],适合用于电缆本体温升计算,但现在缺乏电缆中间接头温升计算的国内外相关标准。以有限元法为代表的数值算法适用范围广,计算精度高,适用于电缆中间接头温升仿真计算等场景。

文中提出一种基于主热流路径的三芯电缆中

间接头热点温度反演辨识方法,通过建立三维电缆中间接头有限元仿真模型,分析电缆本体外表面特征点与电缆接头热点的强耦合关系,确定特征点温度与接头热点温度之间的反演辨识方法,并搭建电缆接头温升试验平台予以验证。该方法有效结合表面测温、解析热路模型和有限元法,避免改变接头结构的同时,充分利用电缆本体热路清晰和有限元法精确度高的综合优势。

1 10 kV 三芯电缆接头温度场仿真计算

1.1 仿真模型的建立

文中以型号为YJV22-8.7/15kV-3×300mm²的三芯电缆和冷缩式中间接头为研究对象,建立电缆本体及接头仿真模型。三芯电缆本体及接头材料的热力学参数见表1^[1],模型结构见图1。

表1 三芯电缆本体及接头材料的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of three core cable body and joint materials

| 结构 | 材料 | 导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹] | 密度/ (kg·m ⁻³) | 比热容/ [J·(m ³ ·K) ⁻¹] |
|--------|---------|-----------------------------------|------------------------------|--|
| 压接管 | 紫铜 | 401.000 | 8 900 | 394 |
| 接头绝缘 | 硅橡胶 | 0.450 | 1 100 | 2 219 |
| 铜屏蔽网 | 紫铜 | 401.000 | 8 900 | 394 |
| 导体 | 紫铜 | 401.000 | 8 900 | 394 |
| 绝缘层 | 交联聚乙烯 | 0.286 | 940 | 2 500 |
| 金属屏蔽层 | 铜带/铜丝 | 401.000 | 8 900 | 394 |
| 接头填充 | 聚丙烯 | 0.240 | 950 | 1 900 |
| 本体填充 | 聚丙烯 | 0.240 | 950 | 1 900 |
| 阻燃胶带 | 聚丙烯 | 0.240 | 950 | 1 900 |
| 内护层 | 聚氯乙烯 | 0.167 | 1 400 | 1 000 |
| 防水胶带 | 聚氯乙烯 | 0.167 | 1 400 | 1 000 |
| 钢铠 | 钢 | 45.000 | 7 850 | 450 |
| 铠装带 | 玻璃纤维 | 0.072 | 2 500 | 1 750 |
| PVC外护套 | 聚氯乙烯混合料 | 0.167 | 1 400 | 1 000 |

本体结构由内到外分别是导体、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层、金属屏蔽层、本体填充层、内护套、铠装层和外护套。中间接头结构由内到外分别是压接管、接头绝缘、铜屏蔽网、接头填充层、阻燃胶带、防水胶带和铠装带。

为简化模型,在建模过程中作出如下假设和处理:忽略多股导线绞合产生的细小空气间隙,将之等效为截面积相等的单芯圆铜导体;导体绝缘层和绝缘屏蔽层热力学参数与绝缘层相似,将二者归并

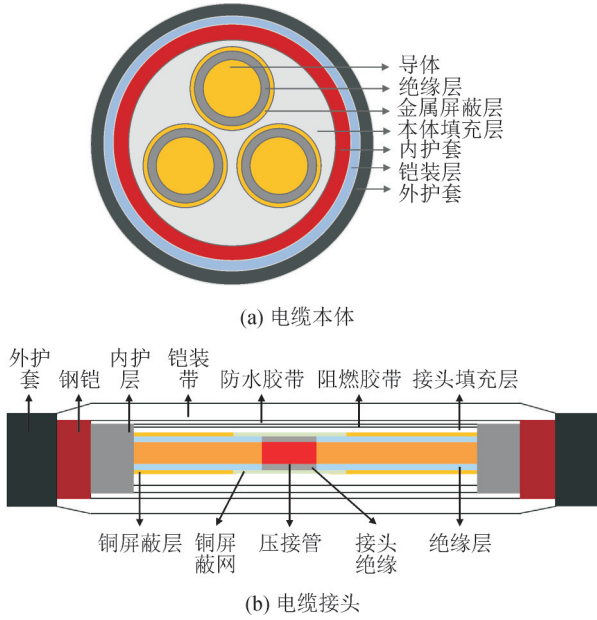


图1 三芯电缆本体及接头结构

Fig. 1 Three core cable body and joint structure

至绝缘层中;忽略应力锥、恒力弹簧、钢铠接地线等对电缆接头温度场分布影响较小的结构;忽略温度变化对几何结构参数和热力学参数的影响,认定均保持恒定;忽略接头填充处等由于施工过程中产生的空气间隙,并作固体填充处理。

1.2 边界条件

对于电缆本体及接头外表面:空气敷设的三芯电缆通常会受到空气对流、热辐射以及太阳辐射的影响,忽略太阳辐射的影响,此时电缆表面满足空气对流和热辐射的复合边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \varepsilon \sigma (T^4 - T_e^4) + h(T - T_\infty) \quad (1)$$

式(1)中: ε 为电缆表面发射率; σ 为斯特藩—玻尔兹曼常数; h 为对流换热系数; T 为电缆表面温度; λ 为导热系数。假设环境等效辐射温度 T_e 约等于空气温度 T_∞ ,式(1)可改写为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r \approx [\varepsilon \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty) + h] \cdot (T - T_\infty) = h_{\text{com}}(T - T_\infty) \quad (2)$$

式(2)中, h_{com} 为复合对流换热系数。

根据水平圆柱体的自然对流换热系数经验公式^[22],得到对流换热系数 h 为:

$$h = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.599/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\} \lambda / L \quad (3)$$

$$Ra = \frac{g \beta_a (T - T_\infty) L^3 Pr}{\nu^2} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: L 为圆柱体直径; Ra 为瑞利数; Pr 为热扩散系数; β_a 为空气热膨胀系数,其为热力学温

度的倒数 $1/T$; ν 为运动粘度。环境温度 $T_\infty=25^\circ\text{C}$ 时,运行时电缆表面温度约为 $T=40^\circ\text{C}$,计算得到 h_{com} 为 $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

电缆本体末端不受来自接头热流的影响,即不存在轴向热流,边界处法向热流密度为0,因此本体末端加载绝热边界条件。

1.3 热源加载

热源由电流在导体上的焦耳热产生,根据发热量的不同,热源分为本体导体发热和接头压接管导体(接触电阻)发热两部分,见图2。

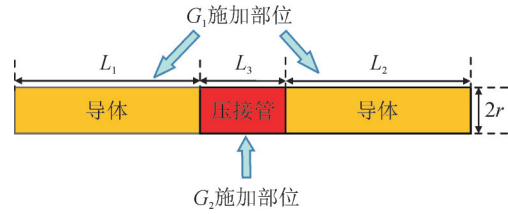


图2 热源加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat source loading

图2中导体和压接管的半径均为 r 。本体的热源计算公式为

$$G_1 = \frac{W_1}{V_1} = \frac{I^2 R_1}{S(L_1 + L_2)} = I^2 \frac{\rho_1}{\pi^2 r^4} \quad (5)$$

严格意义上,接触电阻部分的热源只存在于导体接触面上,但导体和压接管的热导率相较于其他结构均较高,压接区域可近似为等温体,因此文中将接触电阻对应的热源等效地均分到压接管上,该处的等效热生成率可计算为

$$G_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{I^2 R_2}{S L_3} = I^2 \frac{\rho_2}{\pi^2 r^4} = I^2 \frac{k \cdot \rho_1}{\pi^2 r^4} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: W_1 为导体热源对应的功率; W_2 为压接管处(接触电阻)热源对应的功率; R_1 为导体的电阻, R_2 为压接管处的总电阻; V_1 为导体的体积; V_2 为压接管的体积; I 为加载的负荷电流; r 为电缆与压接管的半径,为 9.75 mm ; L_1 为导体长端的长度; L_2 为导体短端的长度; L_3 为接触电阻的长度; S 为导体和等效接触电阻的截面积; ρ_1 和 ρ_2 分别为导体与接触电阻的电阻率, ρ_1 为紫铜的电阻率, $0.018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, ρ_2 为接触电阻的相对等效电阻率; k 为接触电阻系数,可反映实际工程中接触电阻的大小。根据试验中的实测值 $17.28 \mu\Omega$,计算 k 取值为 2.3 ,并得到 $G_1=I^2 \times 0.202 \text{ W}/\text{m}^3$, $G_2=k \cdot I^2 \times 0.202 \text{ W}/\text{m}^3$ 。

1.4 温度场仿真计算结果

环境温度为 25°C ,对流换热系数为 $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,额定电流为 552 A ^[23],开展三芯电缆本体及接头稳态温度场仿真计算,电缆单相导体温度分布见图3,电缆本体及接头的稳态温度场分布见图4。

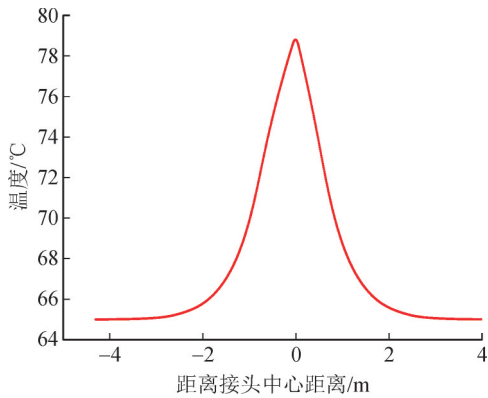


图3 电缆单相导体温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of single-phase conductor in cables

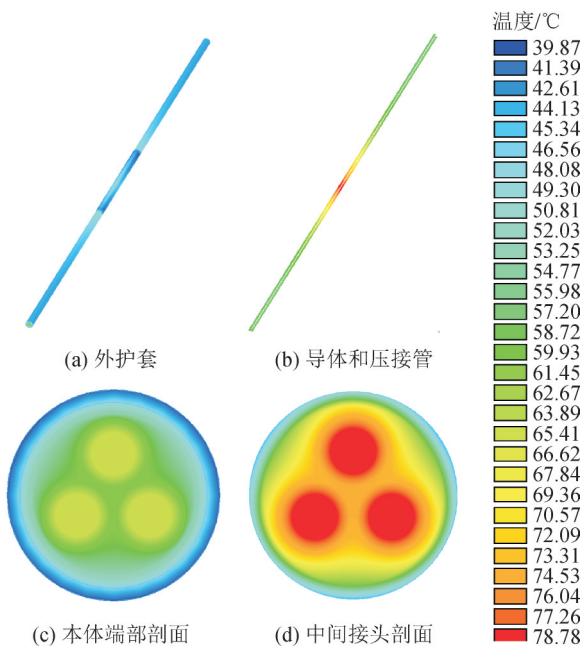


图4 电缆本体和中间接头温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution cloud diagram of cable body and intermediate joint

对于单相电缆导体,轴向温度分布近似为一个高斯函数,中间高两边低,整个曲线光滑过渡,距离接头中央1 m以内受接触电阻影响显著,距离接头2 m以外的区域几乎不受接头热传导的影响。图4显示,电缆接头热点温度约为78.78 °C,出现在接头内部的压接管处,且以此为中心沿径向和轴向延伸温度逐渐降低,电缆本体端部的导体温度约为65 °C。温度最低点约为39.87 °C,出现在接头最外层铠装带处。

2 基于主热流分析的三芯电缆接头热点温度反演辨识方法

2.1 电缆接头热点温度反演辨识方法原理介绍

对于内含热源的温度场,热源以热流的方式向外传递热量。在热量的传递过程中,物体吸收热量

的同时,也在向外散发热量,二者之间的差值构成了物体的温升,从而组成整个温度场分布。当两点或者数点的温度相关性越强,各点构成的热流路径越大,热流最大的路径称为“主热流”^[24]。

文中将三维温度场的求解问题降维为一维离散点的温度映射问题^[25]。准确反演热点温度的关键是建立特征点与热点温度之间的函数关系,进而通过特征点温度反推热点温度。根据“主热流”思想,反演路径应以主热流为依据,反演特征点应位于主热流路径上。

对于三芯电缆本体,其主热流的路径为内部导体到最外层护套的径向方向,与导体温度强相关的点即为径向路径上的特征点,该路径从内部导体延伸至本体外层的外护套。对于三芯电缆中间接头,除径向以外,其主热流的路径为内部导体的轴向方向,与热点温度强关联的点即为轴向导体上的特征点,该路径从中间接头延伸至两侧的电缆本体。轴向主热流和径向主热流见图5。

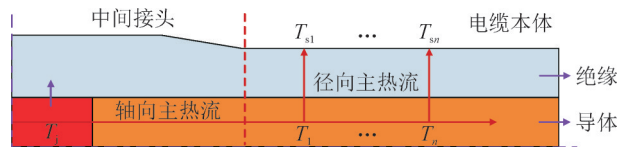


图5 电缆及接头主热流路径

Fig. 5 Main heat flow path of cables and joints

根据上述原理,对于三芯电缆中间接头,可确定热点温度的组合反演方法为:首先根据温度传感器监测的表面特征点温度 $T_{s_i}(i=1, 2, \dots, n)$ 和负载电流 I ,通过热路模型计算对应的径向导体温度 $T_i(i=1, 2, \dots, n)$,其次通过建立接头内部热点温度 T_j 与本体导体温度 $T_i(i=1, 2, \dots, n)$ 的函数关系,最后得到热点温度反演值 T_j ,组合反演过程见图6。

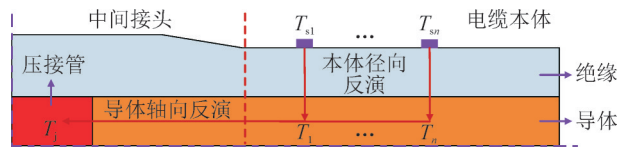


图6 电缆接头热点温度组合反演示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cable joint hot spot temperature combination inversion

2.2 电缆本体径向温度反演方法

对于电缆本体径向温度反演,可以根据负载电流和本体表面温度,通过稳态热路模型求解对应的特征点导体温度 T_i ,在该步骤中本体径向主热流显式地出现在热路模型中。

电缆本体的热路模型中,金属材料的热导率比绝缘材料大得多,均温效果较好,因此可以将金属层视为温度节点。由于外护套材料一致,经过铠装

层的均温作用,外护套表面温度基本相等,也可看作温度节点。因此在热路模型中,本体从内到外的温度节点为导体、铜屏蔽层、铠装层、外护套。忽略金属材料的热阻,得到的三芯电缆本体的等效热路模型见图7。

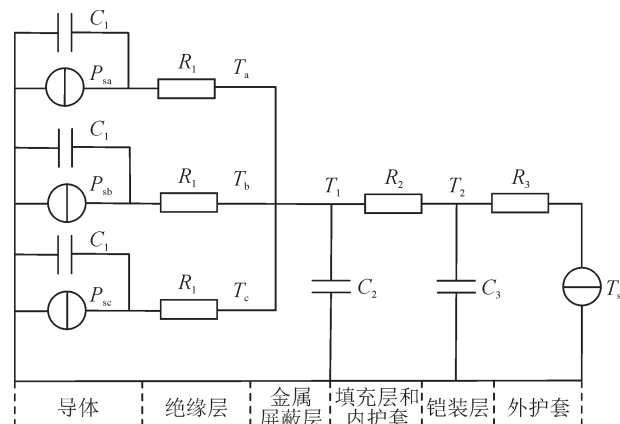


图7 三芯电缆等效热路模型

Fig. 7 Transient equivalent thermal circuit model of three core cable

图7中: P_{sa} 、 P_{sb} 、 P_{sc} 分别为A、B、C相的导体损耗; T_a 、 T_b 、 T_c 为三相的导体温度; T_1 为铜屏蔽层温度; T_2 为铠装层温度; T_s 为外护套温度,等效为一个热压源; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为绝缘层热阻、本体填充层+内护套热阻、外护套热阻, C_1 、 C_2 、 C_3 分别为导体+绝缘层热容、金属屏蔽层+本体填充层+内护套热容、铠装层+外护套热容。

三芯电缆的电流会受到集肤效应和邻近效应的影响,导体的交流等效电阻为

$$R_a = R_d(1 + y_s + y_p) \quad (7)$$

式(7)中: R_a 和 R_d 分别为单位长度电缆导体的交流电阻和直流电阻; y_s 为集肤效应系数; y_p 为邻近效应系数。

圆筒型热阻的计算公式为

$$R_i = \frac{\ln(r_i/r_{i-1})}{2\pi\lambda} \quad (8)$$

式(8)中: r_i 和 r_{i-1} 为第*i*层圆筒结构的内外半径; λ 为材料热导率。根据公式可得外护套热阻 R_1 为0.241 (K·m)/W,外护套热阻 R_3 为0.094 (K·m)/W。

填充层和内护套的结构不规则,不适用于圆筒形热阻计算公式,其热阻计算公式为

$$R_2 = \frac{\Delta T}{\Phi} \quad (9)$$

式(9)中: ΔT 为铜屏蔽层与内护套表面之间的温差; Φ 为内护套表面的热流密度。通过加载铜屏蔽层和内护套表面的边界条件,进行稳态温度场有限元仿真计算,可以得到填充层与内护套的热阻

$R_2=0.122$ (K·m)/W。电缆各层的热容为材料体积比热容与体积的乘积,可得 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为1 144.2、7 459.1、2 517.5 J/K。

2.3 电缆接头轴向温度反演方法

2.3.1 接头轴向反演原理

电缆接头轴向温度反演的目标是建立接头内部热点温度 T_j 与本体导体温度 $T_i(i=1, 2, \dots, n)$ 的函数关系,即

$$T_j = f(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (10)$$

电缆接头常敷设在室外,外界环境温度在接头和本体上的变化是相等的,因此轴向反演函数应满足恒等式为

$$T_j + \Delta T = f(T_1 + \Delta T, T_2 + \Delta T, \dots, T_n + \Delta T) \quad (11)$$

式(11)中, ΔT 为由环境温度变化引起的导体温度改变量。将等式右侧化为泰勒展开式,整理可得

$$\Delta T = \Delta T \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial T_i} + \frac{1}{2!} \Delta T^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial T_i \partial T_j} + \dots \quad (12)$$

由于式(12)恒等,因此二阶及更高阶项恒为0,可得:

$$\Delta T = \Delta T \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial T_i} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial T_i} = 1 \quad (14)$$

同时考虑到 f 二阶及以上的高阶偏导为零,因此 f 必须是一个线性函数为

$$\begin{cases} T_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_i + \alpha_0 \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (15)$$

当电流为0时,上式仍然成立,此时各点温度等于环境温度,因此 α_0 恒为0, T_j 与 T_i 的函数关系为

$$\begin{cases} T_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_i \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)表明,电缆接头轴向温度反演函数为热点温度等于导体各特征点温度的线性组合,且一次项系数之和为1。

2.3.2 轴向特征点的选取方法

为了确定式(16)中各特征点的个数和位置,根据上节电缆及接头的稳态温度场计算结果,选取导体本体5个不同位置的特征点,其温度近似为等差数列,距离中间接头端部分别为0.1、0.3、0.6、1.2、2.0 m,编号依次为1-5号,见图8。

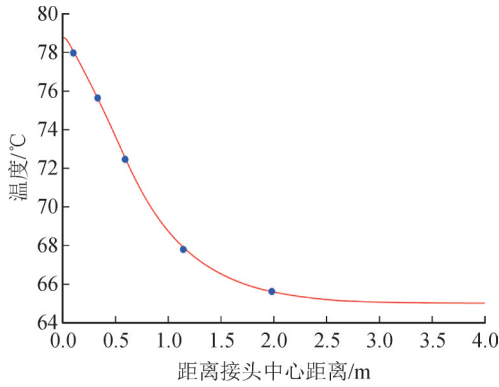


图8 导体测温点位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the location of conductor temperature measurement points

当只选取一个测温点时,本体导体温度等于接头热点温度,不符合实际,因此特征点至少有两个。为了分析特征点位置和个数对轴向反演函数的影响,引入拟合优度 R^2 和灵敏度系数 S_c 衡量模型的性能。

拟合优度 R^2 是指回归直线对观测值的拟合程度,即

$$R^2 = 1 - \frac{1 - \sum_{i=1}^m (y - \hat{y})^2}{1 - \sum_{i=1}^m (y - \bar{y})^2} \quad (17)$$

式(17)中: y 为待拟合数值; \bar{y} 为均值; \hat{y} 为拟合值。该指标可以反映不同接触电阻系数下反演函数的拟合精度。拟合优度 R^2 越接近于1,则拟合精度越高。

灵敏度系数 S_c 为轴向拟合函数中各系数绝对值的最大值,即

$$S_c = \left| \max \sum_{i=1}^n \alpha_i \right| \quad (18)$$

灵敏度系数 S_c 越小,拟合误差越小。

2.3.3 训练样本和测试样本

在轴向反演模型的建立过程中,为综合考虑电缆负载率和环境散热条件的影响,同时尽可能的降低样本的数量,文中采用正交试验法设计反演模型训练样本。正交表可表示为 $La(bc)$,其中 L 为正交表; a 为试验次数,即正交表的行数; c 为考虑影响因素的个数,即正交表的列数; b 为各因素的水平数。综合考虑负载率、对流换热系数和接触电阻值对电缆接头稳态热点温度的影响,保持环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 不变,训练样本考虑的各因素和因素水平见表2,3因素5水平训练样本正交表见表3。

表2 训练样本的各因素和水平

Table 2 Factors and levels of training samples

| 水平 | 接触电阻系数 k | 对流换热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$ | 负载率/p.u. |
|----|------------|---|----------|
| 1 | 2 | 3 | 0.36 |
| 2 | 4 | 6 | 0.57 |
| 3 | 8 | 9 | 0.74 |
| 4 | 12 | 12 | 0.98 |
| 5 | 16 | 15 | 1.21 |

表3 训练样本的3因素5水平正交表

Table 3 3-factor 5-level orthogonal table for training samples

| 序号 | 接触电阻系数 k | 对流换热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$ | 负载率/p.u. |
|----|------------|---|----------|
| 1 | 2 | 3 | 0.36 |
| 2 | 2 | 6 | 0.74 |
| 3 | 2 | 9 | 1.21 |
| 4 | 2 | 12 | 0.57 |
| 5 | 2 | 15 | 0.98 |
| 6 | 4 | 3 | 1.21 |
| 7 | 4 | 6 | 0.57 |
| 8 | 4 | 9 | 0.98 |
| 9 | 4 | 12 | 0.36 |
| 10 | 4 | 15 | 0.74 |
| 11 | 8 | 3 | 0.98 |
| 12 | 8 | 6 | 0.36 |
| 13 | 8 | 9 | 0.74 |
| 14 | 8 | 12 | 1.21 |
| 15 | 8 | 15 | 0.57 |
| 16 | 12 | 3 | 0.74 |
| 17 | 12 | 6 | 1.21 |
| 18 | 12 | 9 | 0.57 |
| 19 | 12 | 12 | 0.98 |
| 20 | 12 | 15 | 0.36 |
| 21 | 16 | 3 | 0.57 |
| 22 | 16 | 6 | 0.98 |
| 23 | 16 | 9 | 0.36 |
| 24 | 16 | 12 | 0.74 |
| 25 | 16 | 15 | 1.21 |

2.3.4 轴向拟合公式的确定

首先从根据训练样本3因素4水平得到的稳态温度场仿真计算结果,提取各测温点的温度数据,然后从中分别选取2、3、4、5个测温点,一共可以得到26种组合,依次对函数进行拟合,不同测温点组合下的拟合优度 R^2 和灵敏度系数 S_c 汇总见表4,12号代表测温点1、2号的组合,其余各组合也以此类推。

表4 不同测温点的拟合优度和灵敏度系数

Table 4 The goodness of fit and sensitivity coefficient of different temperature measurement points

| 组合号 | R^2 | S_e | 组合号 | R^2 | S_e | 组合号 | R^2 | S_e |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|
| 12 | 1.00 | 6.87 | 45 | 0.94 | 19.64 | 245 | 1.00 | 16.90 |
| 13 | 1.00 | 3.94 | 123 | 1.00 | 18.94 | 345 | 1.00 | 37.98 |
| 14 | 0.99 | 2.98 | 124 | 1.00 | 10.86 | 1234 | 1.00 | 84.64 |
| 15 | 0.99 | 2.72 | 125 | 1.00 | 6.87 | 1235 | 1.00 | 56.77 |
| 23 | 0.99 | 7.90 | 134 | 1.00 | 8.86 | 1245 | 1.00 | 23.46 |
| 24 | 0.99 | 4.48 | 135 | 1.00 | 6.26 | 1345 | 1.00 | 25.37 |
| 25 | 0.98 | 3.82 | 145 | 1.00 | 9.23 | 2345 | 1.00 | 46.41 |
| 34 | 0.98 | 9.00 | 234 | 1.00 | 20.98 | 12345 | 1.00 | 175.87 |
| 35 | 0.97 | 6.42 | 235 | 1.00 | 14.74 | | | |

从表4可见,大多数组合的拟合优度均大于0.95,说明拟合精度并非影响导体轴向反演模型的主要矛盾。而不同组合下的灵敏度系数却存在巨大差异,从表4中还可以发现两个规律:①整体上来看,灵敏度系数最小值为2.72,最大值为175.87,最大值表明即使径向温度反演中仅存在1 K的误差,最终的整体反演误差也可能在100 K以上,因此为确保反演模型的鲁棒性,灵敏度系数越小越好。②仅采用两个测温点的情况下,测温点相距越远,灵敏度系数越小,鲁棒性越好,测温点1、5号进行组合的效果最好,对应的灵敏度系数 S_e 仅为2.72,其中靠近接头的测温点反映了接头本身对热点温度的影响,而远离接头的测温点则反映了本体的影响。

综上,导体轴向温度反演模型中确定特征点 T_1 和 T_2 ,分别距离接头端部分别为0.1、2.0 m,对式(16)进行拟合,统一的轴向反演函数为

$$T_j = 2.72T_1 - 1.72T_2 \quad (19)$$

为验证轴向反演函数的准确性和有效性,采用式(19)对测试样本的稳态热点温度进行反演。测试样本考虑的各因素和因素水平见表5,设计的3因素4水平测试样本正交表见表6。

表5 测试样本的各因素和水平

Table 5 Factors and levels of test samples

| 水平 | 接触电阻系数 k | 对流换热系数/ $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$ | 负载率/p.u. |
|----|------------|--|----------|
| 1 | 3 | 4 | 0.46 |
| 2 | 6 | 6 | 0.65 |
| 3 | 9 | 8 | 0.82 |
| 4 | 12 | 10 | 1.13 |

根据轴向反演函数,测试样本轴向温度反演误差对比见图9、10。结果表明,16组测试样本中,最小反演绝对误差小于1 K,最大反演相对误差不超

表6 测试样本的3因素4水平正交表

Table 6 3-factor 4-level orthogonal table for testing samples

| 序号 | 接触电阻系数 k | 对流换热系数/ $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$ | 负载率/p.u. |
|----|------------|--|----------|
| 1 | 3 | 4 | 0.46 |
| 2 | 3 | 6 | 0.65 |
| 3 | 3 | 8 | 0.82 |
| 4 | 3 | 10 | 1.13 |
| 5 | 6 | 4 | 0.65 |
| 6 | 6 | 6 | 0.46 |
| 7 | 6 | 8 | 1.13 |
| 8 | 6 | 10 | 0.82 |
| 9 | 9 | 4 | 0.82 |
| 10 | 9 | 6 | 1.13 |
| 11 | 9 | 8 | 0.46 |
| 12 | 9 | 10 | 0.65 |
| 13 | 12 | 4 | 1.13 |
| 14 | 12 | 6 | 0.82 |
| 15 | 12 | 8 | 0.65 |
| 16 | 12 | 10 | 0.46 |

过5.16%,反演精度较高。相对等效电阻率越大,反演误差整体呈现上升趋势,表明接触电阻是影响热点温度反演准确性的重要因素。

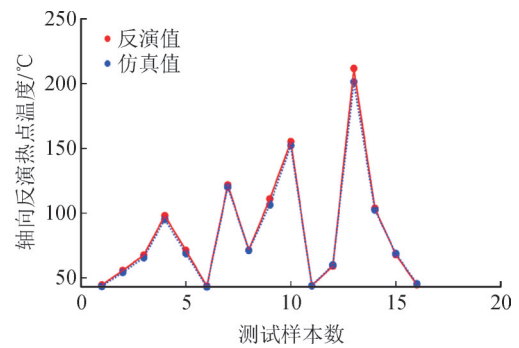


图9 测试样本轴向反演值

Fig. 9 Test sample axial inversion fitting value

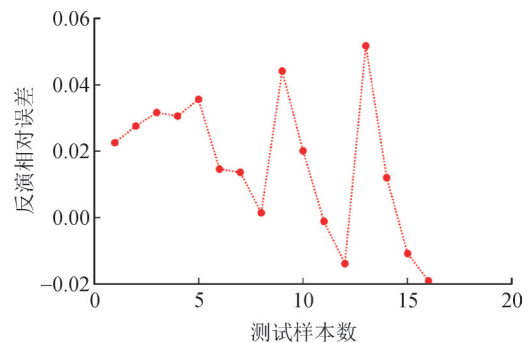


图10 测试样本轴向反演相对误差

Fig. 10 Relative error of axial inversion of test samples

3 三芯电缆接头热点温度反演辨识方法试验验证

3.1 电缆接头温升试验平台搭建

10 kV 三芯电缆及中间接头温升试验平台示意图见图 11,三芯电缆及接头温升试验平台见图 12。由若干三芯电缆线、终端头(D₁-D₂)和中间接头(Z₁-Z₂)串联形成回路,各接头之间相距 15 m 左右。其中,升流器型号为 GDSL-A-4000A/5V,单相最大电流为 4 000 A,含有零线,回路通过升流器提供并调节大电流。D₁的铜鼻子与大电流发生器的 ABC 三相连接,D₂采用星形接法,再与大电流发生器的零线端相连。根据安装位置的不同,Z₁、Z₂处的温度传感器包括内置传感器和外置传感器,内置传感器深入电缆接头压接管处测量 T_j温度,外置传感器测量电缆特征点 T_{s1}、T_{s2}温度。温度传感器通过 4G 信号通讯将数据上传至云端,进行实时采集和存储。此外,外部传感器包裹橡胶块,以减小外界自然风和太阳光照等的影响,减小传感器的测量误差。

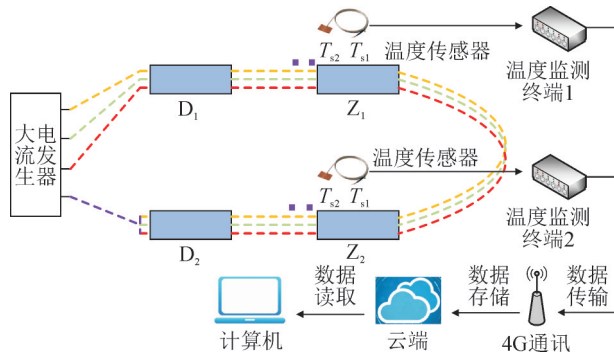


图 11 温升试验平台示意图

Fig. 11 Schematic diagram of temperature rise test platform

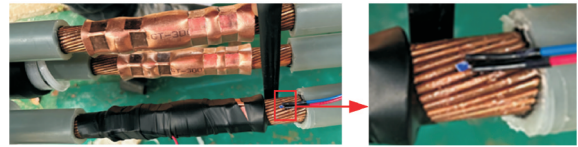
3.2 电缆温升试验结果对比与分析

试验中的三芯电缆载流量分别为 428、342、256、385、470 A,试验全程关注热点温度不超过 90 °C^[23]。试验过程中,待关注的测温点温升变化率小于 1 K/h,并且至少维持 2 h 时,可以调整负荷进行下一负荷下的温升试验,稳态温升试验中考虑负载率的变化。试验平台均处于自然风条件,风速变化范围为 0~2.4 m/s。为进一步分析仿真模型的准确性,对比特征测温点和接头热点温度的仿真计算值和试验值,结果见表 7。

根据上述结果,电缆表面的两个特征测温点的仿真值与试验值最大误差为 3.16 K,接头热点温度仿真值与试验值最大温差为 2.29 K。结果表明,在不同负载、风速以及不同环境条件下,电缆接头温度仿真值和试验值吻合度较好,仿真模型精确度较高。



(a) 大电流发生器及三芯电缆终端头



(b) 内部传感器安装



(c) 外部传感器安装

图 12 三芯电缆及接头温升试验平台

Fig. 12 Installation diagram of temperature sensor

表 7 仿真结果与试验结果对比

Table 7 Comparison between inversion results and experimental results

| 负载率/ p.u. | 环境温 度/°C | 项目 | T _j /°C | T _{s1} /°C | T _{s2} /°C |
|--------------|-------------|-----|--------------------|---------------------|---------------------|
| 0.78 | 25.29 | 仿真值 | 54.96 | 43.48 | 41.71 |
| | | 试验值 | 54.95 | 43.08 | 41.26 |
| | | 误差 | 0.01 | 0.41 | 0.46 |
| 0.62 | 24.43 | 仿真值 | 43.41 | 36.08 | 34.94 |
| | | 试验值 | 44.89 | 36.82 | 35.58 |
| | | 误差 | -1.48 | -0.74 | -0.64 |
| 0.47 | 24.48 | 仿真值 | 35.16 | 31.03 | 30.40 |
| | | 试验值 | 36.33 | 32.21 | 31.55 |
| | | 误差 | -1.17 | -1.18 | -1.15 |
| 0.70 | 26.71 | 仿真值 | 50.73 | 41.45 | 40.02 |
| | | 试验值 | 48.44 | 38.49 | 36.86 |
| | | 误差 | 2.29 | 2.96 | 3.16 |
| 0.85 | 23.90 | 仿真值 | 66.60 | 50.10 | 47.55 |
| | | 试验值 | 68.14 | 49.56 | 46.86 |
| | | 误差 | -1.54 | 0.54 | 0.69 |

为分析反演模型的准确性,选取 2 处特征测温点和负载电流作为输入量,结合公式图 7 热路模型和式(19),得到热点温度反演值,见图 13。结果表明,不同负载率下达到稳态时的电缆接头热点温度反演误差最大为 3.92 K,电缆接头温度试验值和反演值吻合度较好,整体反演辨识模型精度较高。

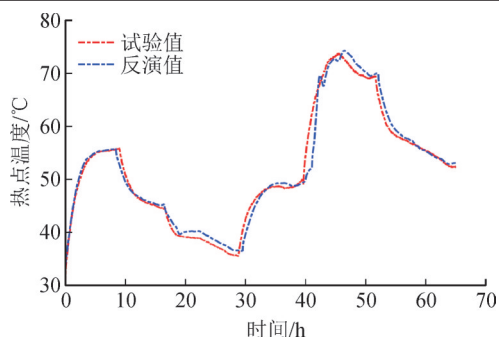


图13 热点温度反演结果

Fig. 13 Hot spot temperature inversion results

4 结论

文中以10 kV三芯电缆为研究对象,采用电缆接头有限元仿真计算求解方法,分析电缆接头热点温升和主热流扩散规律,并得到结论如下:

1)分析接头轴向和本体径向主热流,构建电缆本体热路模型和轴向反演函数,选取了与电缆接头热点具有强关联关系的本体表面测温点,研究了本体表面温度与接头热点温度之间的耦合关系,从而提出了电缆接头热点温度反演辨识方法。

2)结合实际运行工况组建热点温度反演训练样本和测试样本,并搭建了电缆多工况温升试验平台,验证了仿真模型和热点温度反演辨识方法的准确性,试验结果表明在不同负载、风速以及不同环境温度的条件下,热点温度仿真值与试验值最大温差为2.29 K,热点温度反演值与试验值最大误差为3.92 K。

3)文中所提热点温度反演辨识方法的有效性在接触电阻正常的电缆接头中得到有效试验验证,未来将进一步分析接触电阻异常时的热点温度反演辨识方法的准确性。

参考文献:

- [1] 唐科,阮江军,唐烈峥,等.三芯电缆接头温度场计算[J].高电压技术,2019,45(11):3571-3578.
TANG Ke, RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, et al. Temperature field calculation of three core cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3571-3578.
- [2] 赵学风,郝一帆,黄国强,等.基于有限元仿真的土壤直埋电缆中间接头稳态载流量计算[J].高压电器,2022,58(3):64-70.
ZHAO Xuefeng, HAO Yifan, HUANG Guoqiang, et al. Calculation on steady-state current carrying capacity of intermediate joint of direct buried cable based on the finite element simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 64-70.
- [3] 李根,杜志叶,肖湃,等.海上风电送出J型管段海底电缆载流量计算模型研究[J].电工技术学报,2023,38(13):3619-3629.
LI Gen, DU Zhiye, XIAO Pai, et al. Study on calculation model of submarine cable ampacity in J-tube section of offshore wind power transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3619-3629.
- [4] 陶贻青,舒胜文,董懿飞,等.基于多物理场的防爆盒对10 kV三芯电缆中间接头温升影响研究[J].高压电器,2023,59(9):268-275.
TAO Yiqing, SHU Shengwen, DONG Yifei, et al. Study on the influence of explosion-proof box on temperature rise of middle joint of 10 kV three-core cable based on multi-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 268-275.
- [5] 庞丹,王晓岩,赵昌鹏,等.高压XPLE电缆中间接头芯表面波测温技术研究[J].电子器件,2022,45(3):651-657.
PANG Dan, WANG Xiaoyan, ZHAO Changpeng, et al. Research on surface acoustic wave temperature measurement technology for high voltage XPLE cable intermediate joint core[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(3): 651-657.
- [6] 夏翔,李贤良,潘华,等.基于广义回归神经网络的光纤光栅传感器解调技术研究[J].电测与仪表,2025,62(2):62-68.
XIA Xiang, LI Xianliang, PAN Hua, et al. Research on demodulation technology of fiber bragg grating sensor based on generalized regression neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 62-68.
- [7] 黄刚,潘李克,何成章,等.基于S-G和CEEMDAN技术的光纤光栅传感信号降噪方法研究[J].电测与仪表,2025,62(2):69-75.
HUANG Gang, PAN Like, HE Chengzhang, et al. Research on denoising method of optical fiber grating sensing signal based on S-G and CEEMDAN technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 69-75.
- [8] 黄金朋,张哲,汪伟,等.基于分布式光纤测温技术的超导电缆局部失超检测和保护方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(14):76-84.
HUANG Jinpeng, ZHANG Zhe, WANG Wei, et al. A local quench detection and protection method for a superconducting cable based on distributed optical fiber temperature measurement technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 76-84.
- [9] 王伟平,周恒,梁国坚,等.110 kV单芯电缆缆芯暂态温度径向感知模型研究[J].智慧电力,2023,51(10):103-110.
WANG Weiping, ZHOU Heng, LIANG Guojian, et al. Transient temperature radial sensing model for cable cores of 110 kV single core cables[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 103-110.
- [10] 陶霁韬,张伟,龚慧,等.基于RFID测温芯片的电缆温度反演计算方法研究[J].高压电器,2023,59(4):116-124.
TAO Xiantao, ZHANG Wei, GONG Hui, et al. Research on inversion calculation method of cable temperature based on RFID thermometers[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 116-124.
- [11] 梁永春,王婧雅.基于热路模型和瞬态伴随模型的直埋电缆暂态缆芯温升计算[J].高电压技术,2022,48(9):3517-3525.
LIANG Yongchun, WANG Jingya. Transient temperature rise calculation of buried power cable based on thermal circuit model and transient adjoint model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3517-3525.
- [12] 边晓燕,谌云峰,周歧斌,等.基于热路解析模型的海底电缆动态温度场计算与短时允许载流量评估[J].高电压技术,2023,49(2):793-802.

- BIAN Xiaoyan, SHEN Yunfeng, ZHOU Qibin, et al. Dynamic temperature field calculation and short-time allowable ampacity evaluation of submarine cable based on thermal analytical model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2):793-802.
- [13] 吴琼, 李鸣, 高方玉, 等. 配电变压器数字孪生体构建技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(1):42-49.
- WU Qiong, LI Ming, GAO Fangyu, et al. Research on digital twin construction technology of distribution transformer[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1):42-49.
- [14] 李进, 刘松涛, 徐静, 等. 66 kV 高导热风机电缆载流量与温升特性研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1):244-250.
- LI Jin, LIU Songtao, XU Jing, et al. Research on current carrying capacity and temperature rise of 66 kV wind turbine cable with high thermal conductivity[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1):244-250.
- [15] 卢斌先, 薛涛, 王宜静, 等. 极端高温下 10 kV 电缆中间接头载流量分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4):215-222.
- LU Binxian, XUE Tao, WANG Yijing, et al. Current carrying capacity analysis of 10 kV cable joint under extremely high temperature[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4):215-222.
- [16] 魏艳慧, 郑元浩, 龙海泳, 等. 绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15):3932-3940.
- WEI Yanhui, ZHENG Yuanhao, LONG Haiyong, et al. Influence of insulation layer thickness on electric field and temperature field of HVDC cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15):3932-3940.
- [17] 唐科, 文武, 阮江军, 等. 基于有限元法的单芯电缆温度场仿真研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(9):811-816.
- TANG Ke, WEN Wu, RUAN Jiangjun, et al. Temperature field simulation of single core cable based on FEM[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(9):811-816.
- [18] 王启隆, 王国海, 于竞哲, 等. 多种敷设方式下集群电缆的直流载流量仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(6):157-164.
- WANG Qilong, WANG Guohai, YU Jingzhe, et al. Research on simulation of DC current-carrying capacity of clustered cables laying under various laying modes[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6):157-164.
- [19] 付明星, 李悦冬, 潘书磊, 等. 基于 Elman 神经网络的高压电缆导体温度动态计算方法[J]. 高压电器, 2019, 55(10):121-127.
- FU Mingxing, LI Yuedong, PAN Shulei, et al. Dynamic calculation method of high-voltage cable conductor temperature based on elman neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):121-127.
- [20] 罗炜, 陈煜敏, 钱海, 等. 基于分数阶导数理论的高频变压器铁心动态 J-A 磁滞模型[J]. 供用电, 2024, 41(6):90-96.
- LUO Wei, CHEN Yumin, QIAN Hai, et al. Dynamic J-A hysteresis model of high frequency transformer core based on fractional derivative theory[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6):90-96.
- [21] Electric cables-calculation of the current rating-part 2-1:Thermal resistance-calculation of thermal resistance: IEC 60287-2-1:2023[S].2023.
- [22] CENGEL Y. Heat transfer-a practical approach[M]. New York:McGraw Hill, 2003.
- [23] 电力电缆线路运行规程:DL/T 1253—2013[S].2013.
- Code of operation for power cable line: DL/T 1253—2013[S]. 2013.
- [24] 邓永清, 阮江军, 董旭柱, 等. 基于流线分析的 10 kV 油浸式变压器绕组热点温度反演模型建立及验证研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8):3191-3203.
- DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Establishment and verification of 10 kV oil immersed transformer winding hot spot temperature inversion model based on streamline analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8):3191-3203.
- [25] 裴丽君, 徐慧, 陈晗, 等. 基于 PSO 优化的 SA-LSTM 变压器绕组温度预测方法[J]. 供用电, 2025, 42(8):112-119.
- PEI Lijun, XU Hui, CHEN Han, et al. Prediction method for winding temperature of SA-LSTM transformer based on PSO optimization[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(8):112-119.

侯澳港(1999—),男,硕士,主要研究方向为电力设备状态在线监测(E-mail:huaogang@whu.edu.cn)。

董旭柱(1970—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为高电压技术、电力设备状态检测(通信作者)(E-mail:dongxz@whu.edu.cn)。

阮江军(1968—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为多物理场仿真、电力设备状态(E-mail:ruan308@126.com)。

(上接第 142 页)

- insulators string[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4):68-73.
- [25] 马建桥, 张瑞谦, 王向飞. 鸟窝对 10 kV 铁路贯通线杆塔顶部相间局部区域电场分布特性的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(5):1927-1938.
- MA Jianqiao, ZHANG Ruiqian, WANG Xiangfei. Influence of bird's nest on electric field distribution characteristics in the local area between phases at the top of the tower of 10 kV railway continuous transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5):1927-1938.
- 段承成(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘领域(通信作者)(E-mail:12211449@stu.lzjtu.edu.cn)。