

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006168

变压器铁芯搭接区磁热等效及温升影响研究*

刘行谋¹, 薛金鑫¹, 杨永明², 江帆³, 程鹏⁴

(1. 重庆邮电大学重庆市复杂系统与仿生控制重点实验室 重庆 400065; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400021; 3. 国家电网重庆市电力公司检修分公司 重庆 400000; 4. 国家电网四川电力公司成都供电局 成都 610000)

摘要:针对变压器叠片铁芯接缝搭接区温升异常和损耗难以实测的问题,提出了搭接区等效损耗方法来实现对铁芯接缝处损耗突变的准确计算。首先建立铁芯接缝搭接区三维等效模型,通过梯度曲线确定搭接区等效范围,得出搭接区等效损耗(JBF)的计算公式,并研究了JBF的影响因素;然后建立考虑JBF的变压器整体温升模型,计算并分析开路试验下铁芯及结构件上的不同热点及特定曲线上的温升及影响因素;最后搭建了变压器铁芯温升试验平台实测接缝搭接区和夹件的热点温度,结果显示测量值和计算值的相对误差均小于2.50%,证明了计算方法的有效性。所提出的搭接区等效损耗计算方法为变压器铁芯损耗评估及工程设计提供了理论基础,对变压器安全运行和在线监测具有重要意义。

关键词: 叠片铁芯; 电磁-热耦合; 有限元; 温升

中图分类号: TH81 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on magnetic heat equivalent and temperature rise of the lap area of transformer core

Liu Xingmou¹, Xue Jinxin¹, Yang Yongming², Jiang Fan³, Cheng Peng⁴

(1. Chongqing Key Laboratory of Complex Systems and Bionic Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400021, China; 3. State Grid Chongqing Electric Power Company Maintenance Branch, Chongqing 400000, China; 4. Chengdu Power Supply Bureau of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: There are abnormal temperature rise and difficult measurement of loss in the lap joint area of transformer laminated core joint. To solve these problems, this study proposes the joint building factor (JBF) method to obtain the accurate calculation of loss mutation at the lap joint. Firstly, a three-dimensional equivalent model of the overlapped zone of core joint is formulated and the equivalent range of the overlapped zone is determined by the gradient curve. Meanwhile, the calculation formula of JBF is determined and the influencing factors of JBF are studied. Then, the whole temperature rise model of transformer considering JBF is established. The temperature rise and influence factors of different hot spots on iron core and structural parts under open circuit test are calculated and analyzed. Finally, the temperature rise test platform of transformer core is built to measure the temperature of joint lap area and hot spots of clamps. Experimental results show that the relative error between the measured value and the calculated value is less than 2.50%, which proves the effectiveness of the calculation method. Therefore, this method of equivalent loss in the lap area provides a theoretical basis for transformer core loss assessment and engineering design. It is of great significance for transformer safety operation and on-line monitoring.

Keywords: laminated core; electromagnetic thermal coupling; finite element; temperature rise

0 引言

变压器内部损耗和温升是变压器研究和设计时需考虑的一项重要参数,硅钢片叠片铁芯产生的损耗不仅存在于铁芯柱和铁轭中,铁芯接缝区搭接处也存在异常损耗,该损耗会造成铁芯热点温度异常,这主要是因为叠片铁芯接缝区搭接处的气隙结构直接影响了内部磁通分布。然而,变压器投入运行后其内部损耗和热点温度难以实时测量和准确计算,进而影响对变压器运行的安全性和寿命评估的准确性。

传统铁芯损耗计算主要有两种方法,一种是利用斯坦梅兹(Steinmetz)公式计算铁芯损耗,其中韩帅等^[1]利用改进 Steinmetz 公式对不同材料铁芯损耗特性进行了三维拟合分析;另一种是 Lotfi 等^[2]提出采用损耗分离的方法来描述铁芯损耗,将铁芯损耗分解为磁滞损耗、涡流损耗、剩余损耗、谐波损耗分别计算。最近朱连双等^[3]利用漏磁场有限元法分析了漏磁场对变压器涡流损耗的影响,传统铁芯损耗计算方法在计算时假设铁芯内磁场分布均匀,并没有充分考虑铁芯接缝区搭接处磁场分布情况,因此理论计算结果和实际测量结果存在较大偏差,变压器损耗不仅存在于铁芯中,也存在于绕组里。随着计算机性能的提高和计算软件的发展,基于计算磁场和温度场的数值模拟成为研究损耗问题的重要手段^[4-5]。变压器绕组和铁芯会产生热量,因此研究变压器热点温度也成为当今趋势,周利军等^[6]对变压器热点进行了预测,同时也对变压器热点温升的热超调分析^[7],Feng 等^[8]用报废机组热模拟评价电力变压器有效热点因素,铁芯温度的计算方法也是研究人员的普遍方向,Li 等^[9]提出了一种研究电力变压器热点温升的新方法,朱显辉等^[10]考虑行驶工况的电动汽车驱动电机动态温升计算,基于铁芯温度复杂的情况有限元法是变压器铁芯耦合场计算中最常用的方法^[11-12]。陈振华等^[13]也采用有限元方法仿真了超声相控阵检测过程,分析了建模参数的影响及其优化方法,基于优化后的有限元模型开展了检测声场分析及试验验证工作。

本文采用以叠片铁芯接缝区搭接模型为基础,提出了铁芯接缝区等效损耗(joint building factor, JBF)方法对铁芯接缝区热源等效,并考虑了模型的不同结构和尺寸对 JBF 的影响,然后将其代入铁芯接缝区计算完整变压器铁芯损耗和温度异常区域,验证了计算方法的准确性。对铁芯发热规律进行分析,结果显示最为严重的异常热点温度分布在铁芯柱和铁轭处,最高温度约高达 368 K。同时采用红外测温仪对试验变压器测试系统测量铁芯及夹件表面热点温度,通过实验测量与理论值的对比和分析(相对误差均小于 2.50%)验证了该等效方

法的有效性和准确性。本文研究对变压器整体设计和在线监测具有重要意义。

1 叠片铁芯接缝区模型

1.1 叠片铁芯接缝区计算模型

变压器铁芯由多层硅钢片堆叠而成,为准确研究变压器叠片铁芯接缝区的磁场分布及热损耗特征,对其铁芯叠片搭接区域进行三维建模,如图 1 所示。图中 L 表示搭接区长度, W 表示搭接区宽度, h 表示域的高度, d_s 表示硅钢片厚度, δ 表示同一层的间隔, l 表示关节间隔, d_a 表示层的间隔, N 表示硅钢片层数。

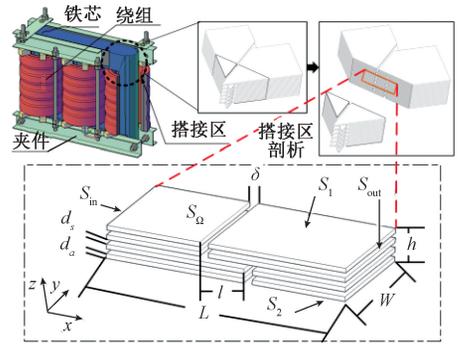


图1 变压器铁芯搭接区模型

Fig. 1 Transformer core joint

沿着 x 正方向施加电压 U_0 ,并忽略模型上的边缘效应。由于主磁通只与 x 轴方向上的磁通量有关,因此假设 S_{in} 与 S_{out} 之间的平均磁通密度为 B_{av} ,鉴于磁通密度是磁场的外部约束条件,并且铁芯接缝搭接区中实际磁通的路径未知,矢量分析模型^[14]可以表示为:

$$\begin{cases} \nabla \times v \nabla \times A = 0, & \text{in } S_{\Omega} \\ A_y = A_z = 0, & \text{on } S_{\Omega} \\ \frac{\partial A_z}{\partial z} = 0, & \text{on } S_1 - S_2 - S_{\Omega} \\ A_2 = \begin{cases} B_{av} h, & \text{on } S_1 \\ 0, & \text{on } S_2 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为正交各向异性非线性磁阻率张量; S_{Ω} 为分析搭接区的表面; A 为磁矢势, B 为磁感应强度; S_1 和 S_2 分别为坐标系中 $y=h$ 和 $y=0$ 的表面。

当变压器不正常工作时,会导致铁芯磁通分布异常,且存在难以估量的漏磁通。因此为减少因变压器工况变化引起的磁通计算误差,本文仅考虑在变压器正常工作的基本假设下,对铁芯叠片搭接区损耗的等效方法进行研究。

根据变压器工作原理,在绕组两端施加额定电压,会

产生额定工作磁通,同时产生铁芯损耗。铁芯材料单位质量损耗 P_i 由生产厂商试验确定,该损耗 P_i 与硅钢片轧制方向上的磁通密度 B 呈一定关系。本文选用最常用的 30Q120 硅钢为例进行研究,其损耗磁通密度(BP)曲线如图 2 所示,磁通密度磁场强度(BH)曲线如图 3 所示。计算中仅考虑磁通在轧制方向上通过,因为垂直方向上的磁导率较小,磁通密度极小。该型取向型硅钢片单位损耗(包括磁滞损耗和涡流损耗)由钢铁厂进行了测试和标定,其结果供直接使用^[15],可表明工作磁通下产生的总体损耗,本文不细致分析具体损耗成分。

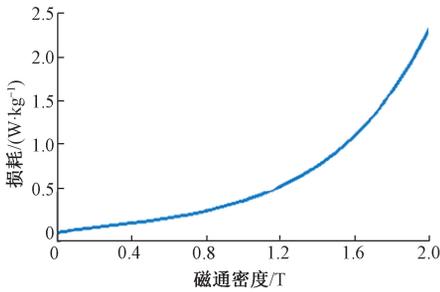


图 2 30Q120 硅钢的 BP 曲线

Fig. 2 BP curve of the 30Q120 silicon steel

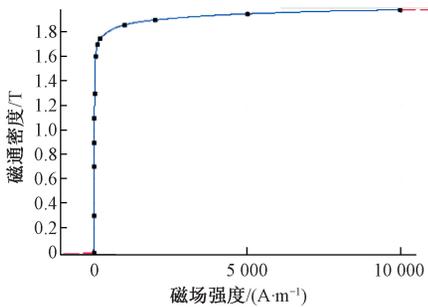


图 3 30Q120 硅钢的 BH 曲线

Fig. 3 BH curve of the 30Q120 silicon steel

计算过程中铁芯可看作有限个质量微元 $\rho\Delta V_i$ 的集合,其中 ΔV_i 为体积微元, ρ 为密度。因此,单位质量下的损耗 P_i 可通过 BP 曲线迭代的方法求出,总损耗可表示为:

$$P_t = \sum P_i \rho \Delta V_i \quad (2)$$

1.2 铁芯搭接区等效分析

基于选用的 30Q120 型硅钢片材料,其物性参数如表 1 所示,叠片铁芯搭接区域计算模型的具体尺寸如表 2 所示。为了提高迭代速度,缩短计算时间,采用多项式指数函数拟合方法对其 BP 曲线进行拟合,拟合结果参数如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_i(B_i) = a \cdot e^{b|B_i|} + c \cdot e^{d|B_i|} \\ a = 0.05534 \\ b = 1.87 \\ c = -0.05631 \\ d = -4.471 \end{cases} \quad (3)$$

式中: B_i 为第 i 个元素在轧制方向上的磁通密度。

表 1 30Q120 硅钢的热参数

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	热容量/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
7 650	502	42.5

表 2 计算模型的尺寸

L/mm	W/mm	l/mm	d_a/mm	d_s/mm	δ/mm	h/mm	N
20	10	2.5	0.02	0.3	0.5	11.5	2

基于有限元方法对叠片铁芯接缝区模型进行分析。运用 COMSOL Multiphysics 5.4 软件电磁场计算模块频域-稳态求解器实现对电磁-热耦合场的计算,设置收敛误差为 0.001。设定流入面 S_{in} 和流出面 S_{out} 法线方向上的磁通密度均为 1.5 T,计算求得 x - y 平面上磁场和损耗分布结果分别如图 4(a)和(b)所示。

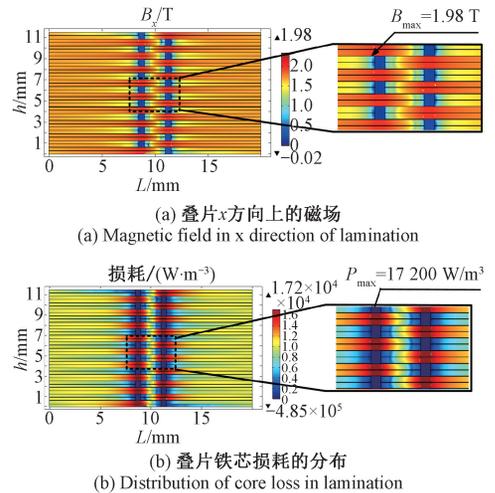


图 4 铁芯搭接区内磁场分布和损耗分布
Fig. 4 Magnetic field and loss in the the laminated area

由图 4(a)可知异常磁场基本上分布在叠片铁芯接缝区部分及叠片间气隙部分存在较大的异常磁通密度,气隙上下叠片内部最大 B_x 达到 1.98 T,远大于 1.5 T 正常工作值。同时,在图 4(b)中与最大磁通密度产生的对应位置上,损耗密度也达到最大值 17 200 W/m^3 。并且逐渐远离叠片气隙,其损耗密度迅速减小。这表明叠片铁芯搭接区是产生异常热损耗的关键部分。

取叠片模型体中轴线沿着 L 方向上的路径作为分析磁场与损耗变化的区域。以磁通密度 B_x 及其梯度作为参考量来研究接缝搭接区上位置变化特性,结果如图 5(a)所示。由图可知,在 $L=8.5$ mm 处磁通密度 B 达到最小值 0.02 T,而在 $L=11.5$ mm 处磁通密度 B 达到最大值 1.98 T,这都严重偏离正常工作值 1.5 T。其中 B_x 梯度曲线进一步描述了 B_x 在铁芯搭接区附近的变化率分布。如图 5(b)所示,铁芯接缝搭接区的损耗随距离变化规律与 B_x 变化规律具有一致性。结果表明在叠片铁芯接缝搭接区处磁通密度和损耗均呈现异常畸变情况。

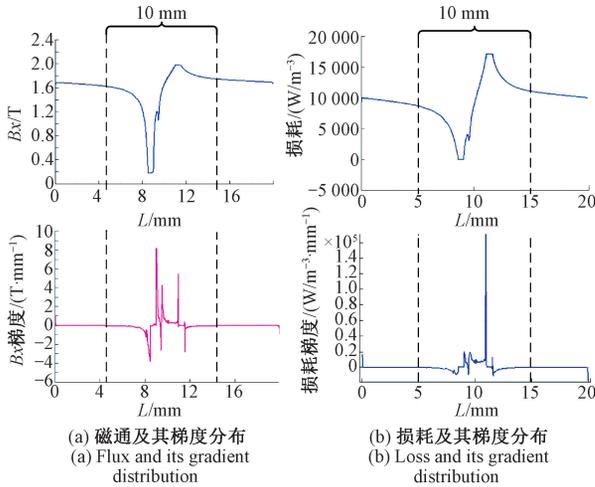


图 5 接缝区磁通及损耗分布情况

Fig. 5 The distributions of magnetic flux and loss in the core joint

为精确等效铁芯搭接区单位体积损耗,避免未发生损耗异常的区域对等效结果的影响,因此损耗变化异常区域的准确确定,是后续研究的关键。根据图 5,可认为梯度波动(梯度非 0)反映了对应参量的异常变化,因此定义磁通密度梯度和损耗梯度两端稳定区之间为异常区域,即沿着 L 中间 10 mm(从 5 mm 到 15 mm)的区域作为研究磁通密度和损耗异常变化的有效范围,计算其有效体积 V_j 中等效平均损耗可采用公式^[13]:

$$\bar{P}_j = \frac{\sum_{\text{joint}} P_i \Delta V_i}{V_j} \quad (4)$$

为进一步研究铁芯搭接区损耗的影响因素,提出搭接区等效损耗表示为:

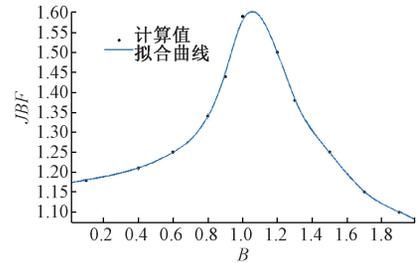
$$JBF = \frac{\bar{P}_j}{\bar{P}_i} \quad (5)$$

式中: P_j 为铁芯接缝搭接区平均损耗; P_i 为非搭接区平均损耗。根据可得到上述结果中 $P_j = 12\ 348$ kg/m³ 和 $P_i = 10\ 296$ kg/m³, 计算得到 $JBF = 1.199$, 表明铁芯接缝搭接区域平均损耗比正常区域平均损失高 19.9%。

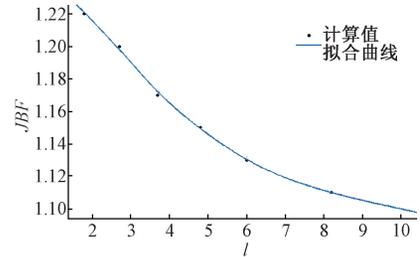
1.3 JBF 影响因素分析

1) 影响因素 B

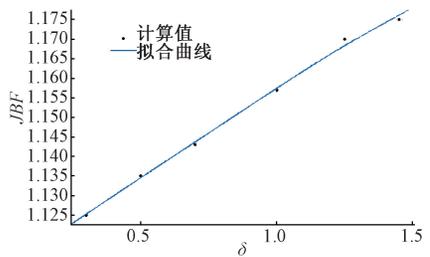
假设其他条件不变,设定工作磁通密度 B 从 0.12 T 到 1.93 T 变化,计算不同磁通密度 B 下的 JBF ,并采用 3 次样条曲线拟合,得到 $JBF-B$ 曲线如图 6(a)所示。由图 6(a)可知,在 $B = 1.1$ T 附近 JBF 达到最大值,约 1.54,这表明 $B = 1.1$ T 时损耗异常最为严重,铁芯接缝搭接区域平均损耗比非搭接区域平均损耗高 54%;当 $B < 1.1$ T 时, JBF 随着 B 的增加而增加;当 $B > 1.1$ T 时, JBF 随着 B 的增大而减小,最终随着磁场强度 B 的增大, JBF 逐渐趋向于 1。



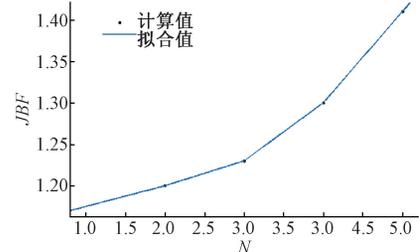
(a) $JBF-B$ 曲线($l = 2.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $N = 2$)
(a) $JBF-B$ curve($l = 2.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $N = 2$)



(b) $JBF-l$ 曲线($B = 1.7$ T, $d = 0.5$ mm, $N = 2$)
(b) $JBF-l$ curve($B = 1.7$ T, $d = 0.5$ mm, $N = 2$)



(c) $JBF-\delta$ 曲线($B = 2.5$ mm, $l = 2.5$ mm, $N = 2$)
(c) $JBF-\delta$ curve($B = 2.5$ mm, $l = 2.5$ mm, $N = 2$)



(d) $JBF-N$ 曲线($B = 1.7$ T, $l = 2.5$ mm, $d = 0.5$ mm)
(d) $JBF-N$ curve($B = 1.7$ T, $l = 2.5$ mm, $d = 0.5$ mm)

图 6 JBF 影响因素分析曲线

Fig. 6 The curves of JBF under different factors

2) 影响因素 l

假设其他条件不变, 计算搭接宽度 l 与 JBF 之间的关系, 结果如图 6(b) 所示, 结果表明随着搭接宽度 l 的增加而 JBF 逐渐减小, 并且 JBF 无限趋近于 1。然而, 由于要保证铁芯的机械强度, 实际制造中 l 不可能过大。

3) 影响因素 δ

水平叠片之间气隙宽度 δ 也是影响损耗变化的重要因素。设定 δ 为 0.3~1.5 mm 间不同值, 并计算 JBF 变化, 结果如图 6(c) 所示。从图 6(c) 中可进一步证明气隙会引起叠片铁芯接缝搭接区中磁场分布的异常, 导致局部损耗增加。随着 δ 增加, 局部损耗增加更为严重。

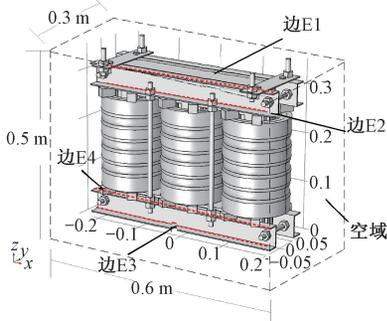
4) 影响因素 N

叠片铁芯的叠片组数 N 取决于铁芯的安装结构, 通常工程上 N 取 1~5 之间。对不同组数情况下的 JBF 进行计算。结果如图 6(d) 所示, JBF 随着 N 的增加而增加, 表明气隙体积随 N 的增大而增大, 因此损耗增量也增大。

2 变压器铁芯搭接区热点温度分析

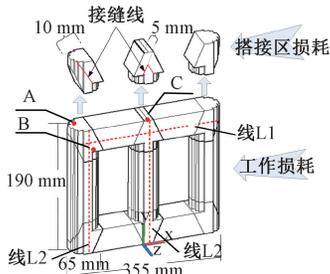
2.1 变压器模型建立

构建变压器三维计算模型, 如图 7(a) 所示, 叠片铁芯的结构尺寸与表 2 所示的一致。搭接区体积大小由工作磁通密度和叠片结构尺寸, 以及上述的损耗异常区域等效方法所确定。取搭接区处气隙中线两侧 5 mm 为接缝搭接区的等效面积, 如图 7(b) 所示。



(a) 变压器模型及夹件边缘示意图

(a) Schematic diagram of transformer model and clamp edge



(b) 铁芯计算对象分布

(b) Core calculation object distribution

图 7 变压器模型及研究对象

Fig. 7 Transformer solution domain and core analysis on test points, clamp surfaces and edges

温度场实际计算中常使用 BP 曲线迭代方式完成, 在该整体铁芯模型中, 铁芯接缝搭接区处等效损耗应通过 JBF -B 曲线和等效区域内的 BP 曲线的相应值的乘积进行迭代计算。运用 COMSOL Multiphysics 5.4 频域-稳态求解器, 采用电磁场模块和固体传热模块计算, 以温度和磁矢量位作为因变量, 采用广义最小残差法和共轭梯度法两步迭代算法求解瞬态过程, 其误差估计因子和最大迭代次数分别设为 400 和 10 000。

2.2 温度计算数学模型

王青于等^[16]以 400 kV 换流变干式套管为研究对象, 采用三维电磁-热-流耦合场分析方法, 考虑了热辐射、热传导和对流传热的影响, 计算并分析了其三维温度场分布, 得出了套管内部的温度分布规律。变压器是绕组产生磁场的电磁设备, 并基于麦克斯韦方程^[17-18], 磁矢量势方程可以描述为^[19]:

$$\begin{cases} \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla\right) A = -J_s + j\omega\sigma A \\ B = \nabla \times A \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ 为磁导率; A 为磁矢量势; σ 为电导率; J_s 为施加电流密度; ω 为角频率。

根据热传导理论, 稳态热传导方程为^[19]:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_v = 0 \quad (7)$$

式中: λ 导热系数; T 为温度; Q_v 为单位体积热量。变压器表面边界自然对流, 相应的边界条件可表示为^[18]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_0(T_f - T_{amb}) \quad (8)$$

式中: h_0 为对流传热系数; T_f 为核心的表面温度; T_{amb} 为环境温度; n 为法线方向。

铁芯和结构表面的接触面, 根据 Stefan-Boltzmann 定律, 可以描述热辐射如^[19]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \sigma_0 \varepsilon (T_f^4 - T_{cmb}^4) \quad (9)$$

式中: σ_0 为 Stefan-Boltzmann 常数; ε 是表面发射率。空气域表面的边界条件, 空气域边界的边界条件由式(10)边界条件设定^[18]。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

变压器铁芯的热源主要来自 BP 曲线和搭接区等效的 JBF -B 曲线的值迭代。每个小体积的损耗 Q_i 都可以带入式(7)进行计算, 从而确定了铁芯损耗的分布。使用双重迭代算法来计算电磁-热耦合场模型的计算流程如图 8 所示。

2.3 热点计算结果分析

以 5 kVA(视在功率)干式变压器为计算对象, 其主要尺寸如图 7 所示。求解所需热力学参数如表 3 所示。采用 AISI4340 型钢作为夹件材料, 参数如表 4 所示。

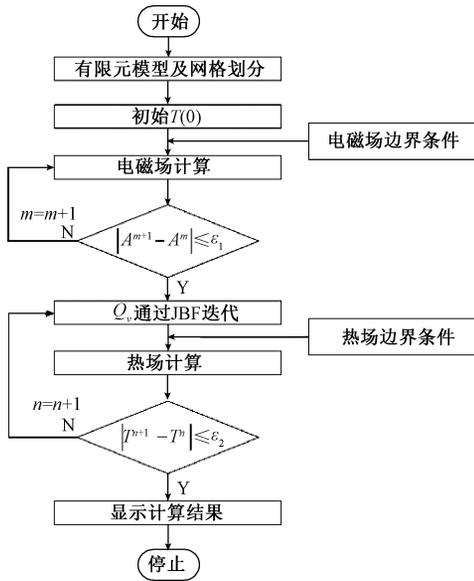


图8 计算流程

Fig. 8 Flow chart of calculation

表3 硅钢材料热参数

Table 3 Heat parameters of the 30Q120 silicon steel

T_{amb}/K	ϵ	$h_0/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
298.15	0.6	10

表4 结构钢件热参数 AISI4340

Table 4 Heat parameters of the steel AISI4340

密度/($kg \cdot m^{-3}$)	热容/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
7 850	475	44.5

为提高计算精度,采用不均匀网格方法,将网格最大单位尺寸设置为 0.042 m,设置最小单位尺寸为 0.005 25 m,最大单位增长率为 1.45,曲率因子为 0.5,窄区域分辨率为 0.6,计算时间约为 33 min 36 s。

当工作磁通密度为 1.5 T 时,计算得到铁芯的磁通量和热源的分布如图 9(a)和(b)所示。图 9(a)中铁芯的工作磁通密度约为 1.5 T,铁轭接缝搭接区中的磁通密度存在较大异常,其中最大值达到 1.98 T。图 9(a)左侧图为 xoz 平面上的磁通截面等值线图,其中最大值明显分布在搭接区内角处。通过 BP 曲线和 JBF 曲线计算出的热源分布与磁场分布规律相似。叠片铁芯接缝搭接区处的磁通量增大导致搭接区处损耗远高于铁芯其它部位损耗,最大损耗达到 17 200 W/m^3 。图 9(b)中最大值也明显分布在内部搭接区处,证明损耗分布与磁通密度分布规律存在一致性。变压器铁芯热点分布如图 9(c)所示,较高温度热点出现在铁芯的 4 个搭接区上,最高热点温度达到 354 K。 $x-o-z$ 平面上温度等值线如图 9(c)左

侧图所示,温度在铁芯中传导,从搭接区到铁芯柱和铁轭逐渐降低。由固体传热过程可知,夹件温度直接受铁芯接缝搭接区热点温度影响,从而可能加快变压器叠片铁芯接缝搭接区和周围结构的绝缘老化。

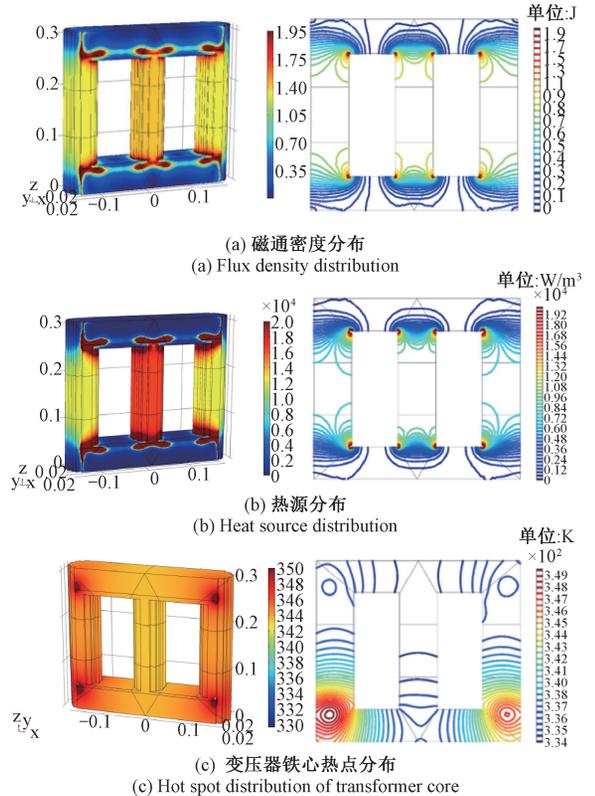
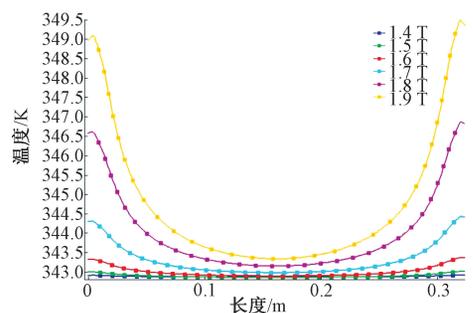


图9 变压器铁芯磁通密度、热源及热点分布

Fig. 9 Magnetic flux density, heat source and hot spot distribution on the transformer core

2.4 不同工作磁密对温度分布的影响

不同工作磁通密度会影响铁芯搭接区中 JBF 大小。因此研究了工作磁通密度从 1.4 T 到 1.9 T 间不同值对铁芯柱和铁轭温度分布的影响。以图 7(b)中所示在铁芯和铁轭中轴线 1 号线、2 号线和 3 号线上的温度为计算对象,计算结果分别如图 10~12 所示。



(a) 线L1的温度分布
(a) Temperature distribution of line L1

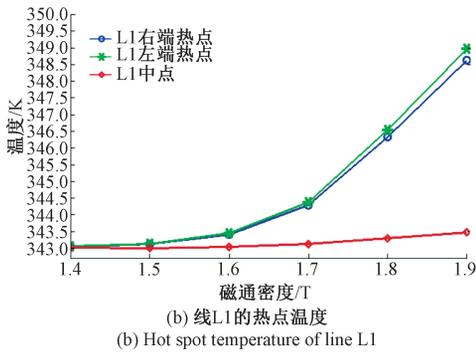


图 10 L1 上的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution on line L1

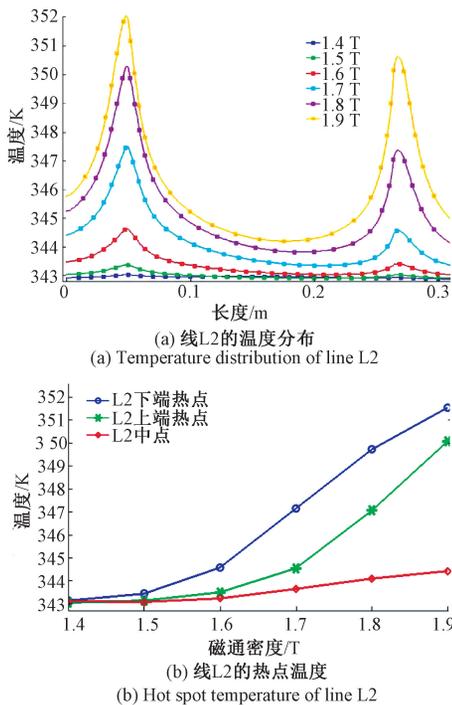


图 11 L2 上的温度分布

Fig. 11 Temperature distribution on line L2

随着磁通密度 B 逐渐增加线 L1、L2、L3 上的热点和中点温度都在增加,线 L1 左右两个搭接区处的热点温度随 B 增加而迅速上升,而中点温度只有少量增长,线 L2 和 L3 都为铁芯轴柱中线,其上的上下两个热点温度随 B 的增加迅速上升,中点温度也有明显上升,但远小于热点上升的幅度。

铁芯柱上 L3 轴向温度分布如图 12 所示,其中温度明显随着磁通密度 B 的增加而升高。当磁通密度 $B < 1.5$ T 时,铁芯柱两端温度均低于中间处温度。当 $B > 1.5$ T 时,铁芯柱两端温度远高于中间处温度。与线 L1 和线 L2 温度分布相对比不同的是,中间铁芯柱不同部位温度

相差均小于 1 K,这是由于中间铁芯柱的工作磁通分布较均匀,磁通密度相对较低。

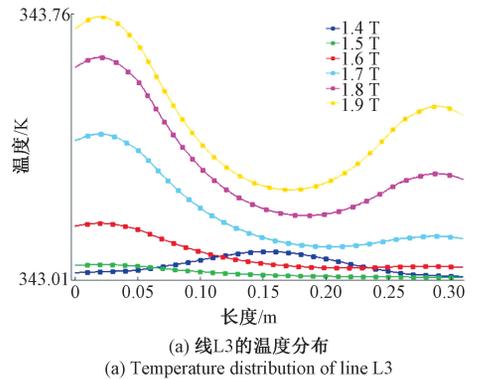


图 12 L3 上的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution on line L3

变压器铁芯损耗是由涡流在硅钢片中产生的焦耳热造成的。铁芯中涡流损耗随磁通密度的增加而增加,进而使温度升高。在搭接区叠片中会产生异常的磁通密度分布,导致叠片气隙磁通密度大于工作磁密,因此该区域中可能产生异常温升。上述 3 个结果表明,铁芯接缝处搭接区温度不可忽略,且搭接区上热点温度会随工作磁场而变化。

3 实验测试与结果分析

3.1 实验设计

实验使用 5 kVA 干式变压器,并使用 DT-883H 红外测温仪进行温度测试。磁通密度大小可通过电气测量和公式计算得出,表示为:

$$B = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi f N_1 S} \quad (11)$$

式中: U_1 为工作电压; f 为工作频率; N_1 为初级线圈匝数; S 为磁通量的横截面积。在该变压器中, $f = 50$ Hz, $N_1 = 400$, $S = 0.0026 \text{ m}^2$ 。测试系统示意图如图 13 所示。红外测温仪的参数如表 5 所示。

表5 DT-883H 红外测温仪的参数

Table 5 Parameters of the DT-883H infrared thermometer

范围 /°C	响应时间 /s	采样率 /Hz	发射率	发射功率 /mW	光谱响应 /μm
50~850	<1	2.5	0.95	<2	6~14



图13 红外测温试验布置

Fig. 13 Schematic diagram of the test system

在铁芯表面标记3个关键温度测试点,分布如图7(b)所示。根据式(8)设置电压以适应磁通密度 B 从 1.4 T 到 1.9 T 的变化值,以变压器工作 1 h 温度稳定后进行测量。

3.2 测试结果及相对误差分析

关键热点的计算和测试结果如图14所示,3个热点温度都随磁通密度 B 增加而增加。磁通密度 B 从 1.4 T 增大到 1.9 T 过程中,点A处计算温度从 343.05 K 增大到 345.48 K,测试温度从 342.10 K 增大到 345.30 K。B点处计算温度从 343.09 K 增大到 352.07 K,测试温度从 342.10 K 增大到 351.40 K。点C处计算温度从 343.03 K 增大到 342.61 K,测试温度从 342.10 K 增大到 342.30 K。由于实测时散热对测量值有一定影响,因此点A、点B和点C测量温度都要略低于计算点温度,可见计算结果与测试结果基本吻合。随着磁通密度 B 增加点B的温度比点A和点C的温度具有更大的增长率,而A点温度和C点温度几乎保持不变,这说明接缝搭接区侧面的热点温度异常最为严重。

计算值和测试值之间的相对误差 R 为:

$$R = \left| \frac{T_i - T_c}{T_c - 293.5} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中: T_i 为测试温度; T_c 为计算温度。其结果如图15所示。

图15显示了热点温度计算值与测试值相对误差均在 2.90% 以内,当磁通密度 B 超过 1.6 T 时,相对误差呈现下降趋势。实际测量结果表明理论与实际值基本吻合,进而证明了该方法的有效性。将本文的结果与以往

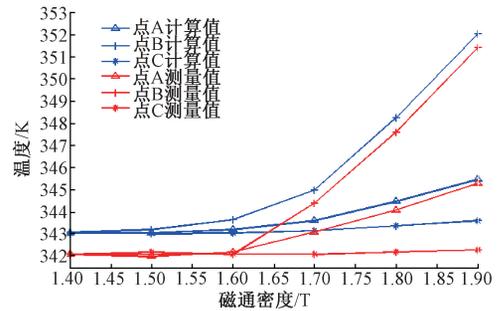


图14 热点计算值和测量值

Fig. 14 Calculated and measured values of hot points

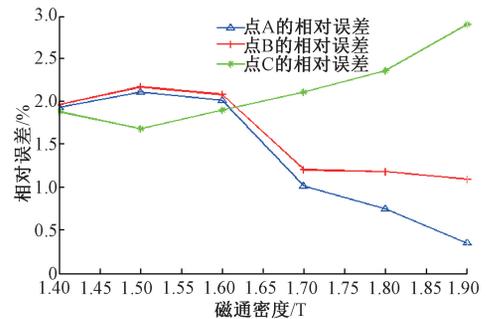


图15 热点温度的相对误差

Fig. 15 Relative error of hot spot temperature

文献进行了比较,进一步说明了热点温度位于搭接区处异常分布问题。

3.3 夹件热点分布及规律

在铁芯和夹件之间由高分子材料层保护以达到绝缘性能,但铁芯和夹件接触区域中较高温度可能导致绝缘涂层的加速老化。研究夹件上的热点温度是变压器监控的重要问题。因此本文研究了夹件表面温度,以夹件边缘线作为分析对象,如图7(a)所示,边E1、边E2、边E3、边E4分别表示上夹件上下边缘和下夹件上下边缘。

为分析夹件的温度规律及变化特性,研究了在磁通密度 B 为 1.4 T、1.6 T、1.9 T 时,夹件表面上下边缘(图7中标记为边E1至边E4部位)温度的情况,其结果如图16所示。热点分布于夹件两侧,在上夹件下边缘和上夹件下边缘温度分布相似,上夹件上边缘与下夹件下边缘温度分布相似,由于上夹件散热高于下夹件,因此下夹件温度略高于对应上夹件边缘。在磁通密度 B 为 1.4 T 时,下夹件上边缘最高温度达到 343.34 K;在磁通密度 B 为 1.6 T 时,下夹件上边缘最高温度达到 346.60 K;在磁通密度 B 为 1.9 T 时,下夹件上边缘最高温度达到 368 K。随着磁通密度增加,热点温度也迅速上升。

上述结果表明,上下夹件温度分布几乎对称。夹件不同侧面上均有两个热点。热点位于变压器铁芯的4个

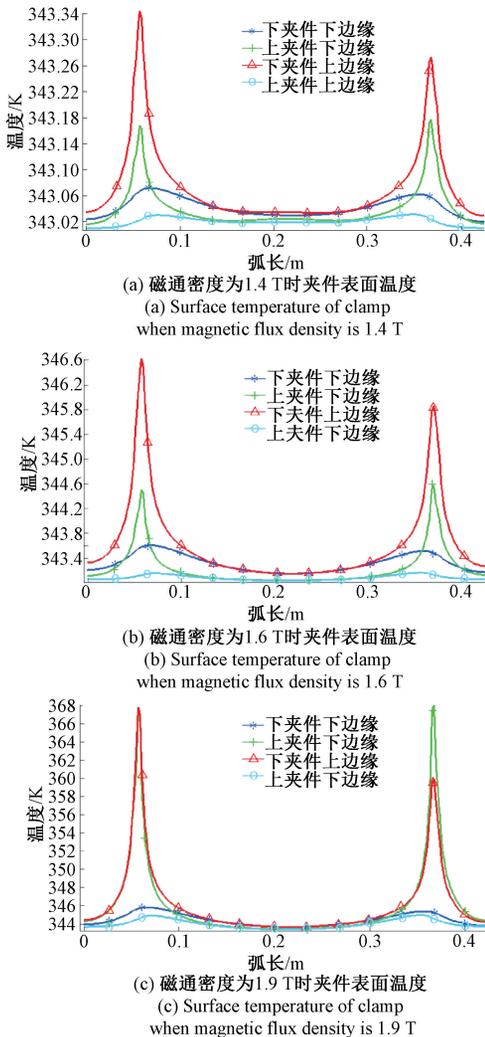


图16 不同工作磁通下的夹件表面温度

Fig. 16 Temperature of clamps surfaces in different flux

搭接区处,进一步表明了铁芯接缝搭接区上存在异常温度情况。当变压器中承受过电压产生的磁通密度大于1.7 T时,热点温度会迅速升高可能会对变压器正常运行。

4 结 论

本文针对变压器铁芯接缝搭接区的热点问题,提出考虑不同结构和尺寸影响的电磁-热耦合分析方法,对叠片铁芯接缝搭接区磁场和损耗模型进行计算。根据计算结果分析了铁芯搭接区等效损耗(JBF)与不同因素之间的关系,并总结了JBF变化曲线,用于计算等效损耗;然后,基于该等效方法研究了完整变压器铁芯的损耗和温度分布;最后,使用红外测温测试系统对该等效方法进行测量并验证了计算方法的可行性。本文可以得出以下

结论:

1) 铁芯接缝搭接区的损耗在很大程度上取决于硅钢片叠层结构。接缝搭接区的等效损耗分别随结构 l 、 δ 和 N 增加而迅速增加。当磁场 B 增大时,等效损耗先增大后减小。

2) 由铁芯和铁轭的温度分布表明高温区域位于接缝搭接区处。在搭接区处产生由异常磁通密度引起的高损耗,由叠片层状结构造成。当 B 从1.4 T变为1.9 T时,最高温度从原来的342.1 K增加到351.4 K,增加了9.3 K。

3) 实际测试与计算之间的误差分析结果表明,在铁芯接缝搭接区上测试点温度相对误差均小于2.50%。验证了计算值与测试值的基本一致性。

4) 铁芯热扩散引起的夹件表面温度表明,搭接区侧面的热点是温度异常最严重的地方。在磁通密度1.4 T时,最高温度达到343.34 K。

参考文献

- [1] 韩帅,张黎,谭兴国,等. 基于损耗分析的大容量高频变压器铁芯材料选型方法[J]. 高电压技术,2012,38(6):1486-1491.
HAN SH, ZHANG L, TAN X G, et al. Material selection based on loss characterization for high-power high-frequency transformer cores [J]. High-Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1486-1491.
- [2] LOTFI A W, WILKOWSKI M A. Issues and advances in high-frequency magnetics for switching power supplies[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(6): 833-845.
- [3] 朱连双,董成海,李冬林. 基于磁场分析软件的变压器绕组涡流损耗分析[J]. 变压器,2019,56(9):1-8.
ZHU L SH, DONG CH H, LI D L. Eddy current loss analysis of transformer winding based on magnetic field analysis software[J]. Transformer, 2019, 56(9): 1-8.
- [4] 于亚婷,杜平安. 含铁氧体磁芯的电流感感器线圈阻抗理论模型和数值计算[J]. 仪器仪表学报,2007,28(12): 2267-2273.
YU Y T, DU P A. Theoretic model and numerical computation of coil impedance of ferrite-cored eddy current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007,28(12): 2267-2273.
- [5] 秦晔,张波,闫姝,等. 低热值燃气轮机喷嘴烧损问题的数值计算模拟研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4459-4466.
QIN Y, ZHANG B, YAN SH, et al. Numerical simulation study of low-heating-value gas turbine nozzle melting[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15):

- 4459-4466.
- [6] 周利军,王健,王路伽,等. 数据驱动下高速铁路牵引变压器热点温度预测[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18):5547-5554.
- ZHOU L J, WANG J, WANG L J, et al. Data driven prediction for traction transformer hot-spot temperature in high speed railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5547-5554.
- [7] ZHOU L J, WU G N, YU J F, et al. Thermal overshoot analysis for hot-spot temperature rise of transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1316-1322.
- [8] FENG D, WANG Z, JARMAN P. Evaluation of power transformers' effective hot-spot factors by thermal modeling of scrapped units[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2077-2085.
- [9] LI L N, NIU SH X, HO S L, et al. A novel approach to investigate the hot-spot temperature rise in power transformers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.
- [10] 朱显辉,武俊峰,师楠,等. 考虑行驶工况的电动汽车驱动电机动态温升计算[J]. 仪器仪表学报,2018,39(7): 127-133.
- ZHU X H, WU J F, SHI N, et al. Calculation of dynamic temperature rise of driving motor of electric vehicle considering driving condition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 127-133.
- [11] TSILI M A, AMOIRALIS E I, KLADAS A G, et al. Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53(1): 188-201.
- [12] 于旭东,魏国,张鹏飞,等. 激光航海惯性组件温度场与热变形有限元模拟[J]. 仪器仪表学报,2010,31(5): 1154-1160.
- YU X D, WEI G, ZHANG P F, et al. Finite element analysis on temperature field and thermal deformation of laser marine strapdown inertial measurement unit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5): 1154-1160.
- [13] 陈振华,黄智刚,王婵,等. 超声相控阵检测声场的有限元仿真建模及其试验验证[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(2):48-55.
- CHEN ZH H, HUANG ZH G, WANG CH, et al. Finite element modulation and its experimental verification on sound field of ultrasonic phased array testing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(2): 48-55.
- [14] YANG Y M, LIU X M, YANG F. Analysis of DC bias vibration of transformer core based on electromagnetic force field coupling[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 50(2): 297-309.
- [15] VAKHNINA, VERA V, SHAPOVALOV, et al. The influence of geomagnetic storms on thermal processes in the tank of a power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1702-1707.
- [16] 王青于,杨熙,彭宗仁,等. 应用三维电磁-热-流耦合场分析法计算换流变压器干式套管的温度场分布[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6269-6274.
- WANG Q Y, YANG X, PENG Z R, et al. 3D Coupled electromagnetic-thermal-fluid method for computation of temperature field of converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6269-6274.
- [17] YANG F, CHENG P, LUO H W, et al. 3-D Thermal analysis and contact resistance evaluation of power cable joint[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93(10): 1183-1192.
- [18] 杨永明,程鹏,刘行谋,等. 考虑空气流场影响的电缆散热研究及其影响因素与经济性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):50-54.
- YANG Y M, CHENG P, LIU X M, et al. Cable heat dissipation considering air flow field, its influencing factors and economical efficiency [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 50-54.
- [19] LIAO C B, RUAN J J, LIU C, et al. 3-D Coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed triangular wound core transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1-4.

作者简介



刘行谋(通信作者),2010年于吉林大学获得学士学位,分别在2013年和2017年于重庆大学获得硕士学位和博士学位,现为重庆邮电大学讲师,主要方向为电力设备传感设计与在线监测研究。

E-mail: liuxingmou@cqu.edu.cn

Liu Xingmou (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Jilin University in 2010, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree from Chongqing University in 2013 and 2017, respectively. He is currently a lecturer at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include power equipment sensing design, and online monitoring.