第 51 卷 第 10 期：5216-5227 高电压技术 Vol.51, No.10: 5216-5227
2025 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241108

油浸式变压器绕组热点动态温升演化规律及推演计算模型研究

王吉祥，郝　建，许　晶，夏若淳，廖瑞金
（输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院)，重庆 400044）

摘　要：变压器绕组动态温度信息可有效衡量其负载能力和服役寿命，因此该文开展了油浸式变压器绕组热点动态温升演化规律及推演计算模型研究。首先，基于“电磁-流-热”多场耦合仿真获得了不同负载率下变压器绕组的稳态温度分布，并通过温升试验验证仿真模型的有效性；然后，仿真分析了绕组热点动态温升演化规律，研究了热点动态温升与负载率的关联关系；最后，采用差分进化算法对温升曲线进行预测，提出了绕组热点温升推演计算模型。结果表明，该文多场耦合温度仿真结果与实测结果的最大误差小于 5%；绕组热点温升值随负载电流施加时间的增长呈现饱和型指数函数增长规律，稳态温升值随负载率增大呈幂函数规律增长，动态温升时间常数值随负载率增大呈幂函数下降规律；采用该文推演计算模型求解获得的绕组热点稳态温升值的最大误差百分比仅为 2.83%，温升时间常数值的最大误差百分比仅为 4.76%。该文研究成果为小负载率温升试验推演获得大负载率电流下的温升数据提供了可行性，为解决现场变压器温升试验实施难、检测时间长的问题提供了技术参考。
关键词：油浸式变压器；温升试验；热点温度；动态演化规律；推演计算模型

Study on the Evolution Law of Hot Spot Dynamic Temperature Rise of Oil-immersed Transformer Windings and Deduction Calculation Model

WANG Jixiang, HAO Jian, XU Jing, XIA Ruochun, LIAO Ruijin
(National Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (School of Electrical Engineering, Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract：The dynamic temperature information of transformer windings can effectively measure their load capacity and service life. Therefore, this paper investigates the evolution law and deduction calculation model of the dynamic hot-spot temperature rise in oil-immersed transformer windings. First, based on multi-physics coupling simulations involving electromagnetic, fluid, and thermal fields, the steady-state temperature distribution of transformer windings under different load rates was obtained, and the validity of the simulation model was verified through temperature-rise tests. Then, the evolution law of the dynamic hot-spot temperature rise was analyzed by simulation, and the relationship between the dynamic hot-spot temperature rise and the load rate was studied. Finally, the differential evolution algorithm was employed to predict the temperature-rise curve, and a deduction calculation model for deducing the hot-spot temperature rise was proposed. The results show that the maximum error between the multi-physics coupling temperature simulation results and the measured results is less than 5%. The hot-spot temperature-rise value increases with the duration of the load current application following a saturated exponential function, while the steady-state temperature-rise value increases with the load rate according to a power function. The dynamic temperature-rise time constant decreases with the load rate following a power function. The maximum error percentage of the steady-state hot-spot temperature-rise value obtained using the proposed deduction calculation model is only 2.83%, and the maximum error percentage of the temperature-rise time constant is only 4.76%. The research findings provide a feasible method for deducing temperature-rise data under high load rates from low load rate temperature-rise tests, offering a technical reference for addressing the challenges of conducting on-site transformer temperature-rise tests, which are difficult to implement and time-consuming.
Key words：oil-immersed transformer; temperature rise test; hot spot temperature; dynamic evolution law; deduction calculation model

基金资助项目：国家自然科学基金创新研究群体项目(51321063)；国家电网有限公司科技项目(5500-202327118A-1-1-ZN)。
Project supported by Innovative Research Group Project of National Natural Science Foundation of China (51321063), Science and Technology Project of SGCC (5500-202327118A-1-1-ZN).

0　引言

作为输配电线路中电能传递及电压电流转换的重要装置，变压器在我国电力行业的需求量日益增大且类型广泛[1-4]。近年来，变压器负载波动剧烈情况日益凸显，随负载率变化，变压器温度会在一定范围内波动。变压器绕组热点温度的动态信息能及时反应变压器运行状况，是衡量其负载能力和服役寿命的重要依据[5-6]。因此，开展变压器绕组热点动态温升特性研究对提高变压器运行管控水平具有重要意义。

温升试验是确保变压器质量的重要检定项目。然而，GB/T 1094.1—2013 规定的标准条件下的大电流温升试验难以在现场实施，主要原因是现场温升检测试验设备体积庞大、电源容量受限、试验耗时长等，严重制约了现场变压器质量检测水平[7-9]。因此，研究变压器绕组热点动态温升推演计算方法，实现以小负载电流推演计算大负载电流条件下的温升试验数据，是提升变压器现场温升检测水平及效率的有效途径。

变压器绕组热点温度检测及分析的主要方法包括：直接测量法、数值仿真法、导则法和热模拟法[10-12]。通过多物理场耦合仿真方法研究变压器绕组温度分布特性是近年来的热点[13-17]。上海交通大学盛戈皞等基于多场耦合仿真与反向传播神经网络建立变压器绕组热点温度动态反演模型，提高了变压器绕组温度检测的精度[18]；华北电力大学刘云鹏等提出基于散热片温度的绕组热点温度计算模型，实现了绕组热点温度快速计算[19]；西南交通大学周利军等通过研究不同负载率下变压器绕组热点动态温升变化规律，指出随着负载率增大，温升速率逐渐变快，温升时间常数反比例减小[20]；华北电力大学刘刚等通过采用混合有限元法和降阶技术实现了变压器瞬态流-热耦合计算，提高了瞬态计算的速度及精度[21]；武汉大学阮江军等通过支持向量回归模型构建油浸式变压器绕组瞬态热点温度反演方法，提高了绕组动态温升反演精度[22]；清华大学贾志东等通过对变压器绕组动态温升规律研究，提出一种三段式热点温升推演模型，有效实现了不同负载率下绕组温升规律的关联分析[23]。总体上，目前已有成果主要聚焦于变压器绕组热点动态温升的计算，对不同负载率下变压器绕组热点动态温升演化规律的关联分析还需深入研究。此外，如何采用小电流温升试验数据推演获得额定电流或更大电流下的温度数据，为现场变压器温升性能检测提供可行的技术手段，目前未见相关报道。

本文开展了油浸式变压器绕组热点动态温升演化规律及推演计算模型研究。首先，以 S11-M-630/10 型油浸式配电变压器为研究对象，基于有限元法构建电磁-流-热多场耦合计算模型，并通过现场温升试验验证仿真模型准确性；然后，以 B 相高低压绕组热点为分析对象，分析变压器绕组热点温升动态演化规律，研究构建绕组热点温升与负载率的关联模型；最后，基于差分进化算法开展绕组热点温升预测分析，在此基础上提出绕组热点动态温升推演计算方法，并验证其准确性，进而实现以小负载电流推演获得大负载电流下的温升试验数据。本文研究成果可为解决现场变压器温升检测时间长、现场实施难等行业问题提供参考。

1　油浸式变压器电磁-流-热多场耦合建模仿真及有效性验证

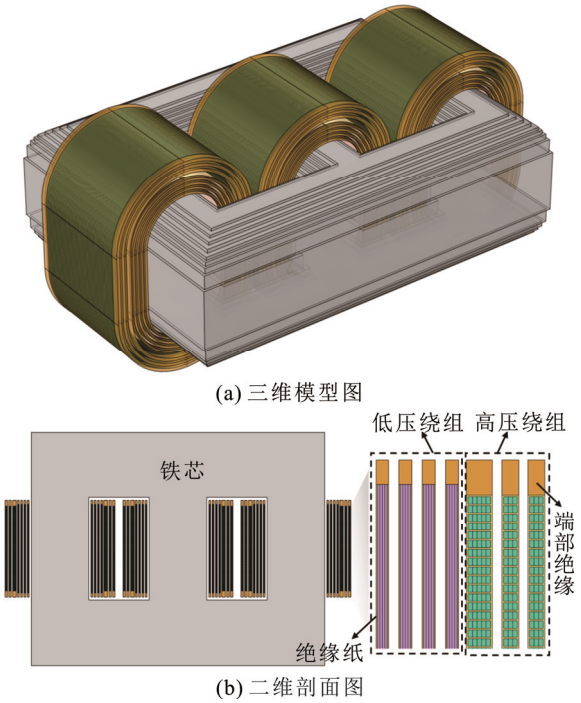
1.1　电磁-流-热多场耦合仿真方法

本文以 S11-M-630/10 型油浸式变压器为对象，其三维几何模型以及二维剖面图如图 1(a)、(b)所示。在构建变压器三维仿真模型时，主要考虑铁芯、绕组、绝缘纸、端部绝缘、铁芯套筒等，并忽略吊环、高压连接杆、撑条、夹件。其中，低压绕组采用箔式绕组，由内至外共 4 圈共 16 匝，每圈线圈匝数为 4 匝；高压绕组是由扁铜线绕制筒式线圈，由内至外共 3 圈共 638 匝；内圈共 5 层，每层共 58 匝；中圈每段共 3 层，每层共 58 匝；外圈每段共 3 层，每层共 58 匝。

变压器几何模型中各部位的材料参数如表 1 和表 2 所示。其中，变压器铁芯、端部绝缘、绝缘纸等固体的相关材料系数视为定值，如表 1 所示。绝缘油作为流体材料，性能参数非线性特性表达式如表 2 所示。

变压器在实际运行时会产生绕组损耗和铁芯损耗。铁芯损耗与其内部磁通密度直接相关，绕组损耗以欧姆损耗和涡流损耗为主。绕组电磁场满足麦克斯韦方程全电流公式，通过引入矢量磁位 $\boldsymbol{A}$ 对工作电流下变压器绕组的磁场大小分布展开研究，磁场控制方程如式(1)所示。

$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu_{\mathrm{m}}}\left(\nabla\times\boldsymbol{A}\right)\right)=\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}+\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\tag{1}$$



(a) 三维模型图

(b) 二维剖面图

图 1 油浸式变压器几何模型

Fig.1 Geometrical modelling of oil-immersed transformers

表 1 油浸式变压器各组件材料参数

Table 1 Oil-immersed transformer components material parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	比热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)	热导率/(W·(m·K)$^{-1}$)
绕组	8 923	387	395
铁芯	7 500	446	51.9
绝缘纸	9 000	2 000	0.25
端部绝缘	9 800	1 400	0.276

表 2 变压器油材料属性

Table 2 Transformer oil material properties

物性参数	拟合数值
密度/(kg·m^{-3})	$f_{den}(T)$=1 055.748 5–0.59T
导热系/(W·(m·K)$^{-1}$)	$f_{the}(T)$=0.154 432–0.000 08T
动力黏度/(Pa·s)	$f_{dyn}(T)$=0.00 001T^2–0.005 2T+0.830 2
恒压热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)	$f_{cap}(T)$=276.443 75+5.375T
电导率/(S·m^{-1})	10^{-11}

式中：μ_m 为介质磁导率，H/m；$\boldsymbol{J}_s$ 为线匝的安匝电流密度，A/m^2；$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量，C/m^2。

油浸式变压器运行时的热量主要以热传导、热对流、热辐射形式传递。绕组区域热量传递主要控制方程如式(2)所示。流体的非等温流动过程遵循质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程，满足纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes，N-S)的约束，如式(2)—(7)所示。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{Q}{k_m}=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u})=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho u_x}{\partial t}+u_x\nabla(\rho \boldsymbol{u})=\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+F_x \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho u_y}{\partial t}+u_y\nabla(\rho u)=\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}+F_y \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho u_z}{\partial t}+u_z\nabla(\rho \boldsymbol{u})=\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+F_z \tag{6}$$

$$\rho c(u_x\frac{\partial T}{\partial x^2}+u_y\frac{\partial T}{\partial y^2}+u_z\frac{\partial T}{\partial z^2})=k_m\nabla^2 T+Q \tag{7}$$

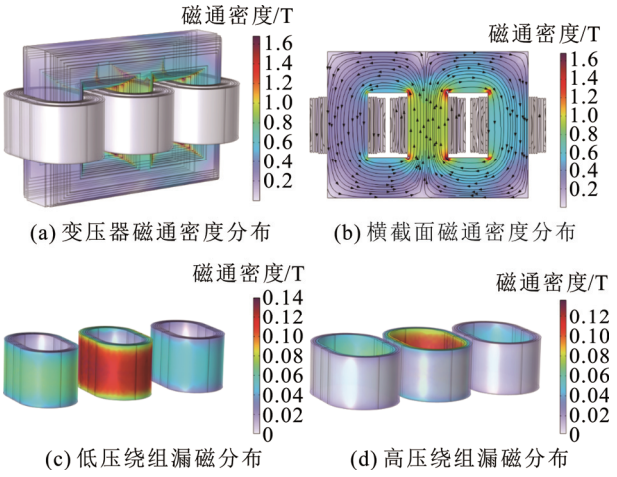
式中：k_m 为热传导系数，W/(m·K)；Q 为热流量，W；$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，m/s；p 为流体压力，N；ρ 为流体密度，kg/m^3；τ 为黏性力，kg/(m·s)；c 为比热容，J/(kg·K)；T 为变压器的温度标量值，K；F 为流体微元所受外力，N；x、y、z 为坐标方向。

对该型号变压器进行电磁场仿真，得到变压器整体磁通密度分布，将其代入式(8)得到变压器的铁芯损耗。由图 2 可知，绕组的漏磁分布呈周期性不均匀分布，导致绕组各匝位置处的损耗密度不同。为精确计算各匝线圈的损耗，对每匝线圈的漏磁分布进行分析。其中，将绕组漏磁分为轴向漏磁与辐向漏磁，将轴向漏磁与辐向漏磁仿真结果代入式(9)分别得到每匝线圈的轴向涡流损耗与辐向涡流损耗，每匝线圈总的涡流损耗为两者之和。为实现多物理场耦合，基于式(2)—(7)，将铁芯损耗、每匝线圈对应的欧姆损耗及涡流损耗作为热源激励进行施加，通过流体、能量和传导方程的耦合迭代，直到迭代过程中相邻两步间的最大温差小于 0.01 K，最终得到变压器整体温度分布结果。变压器电磁-流-热多场耦合求解流程图如图 3 所示。其中，变压器的损耗计算如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_0=P_h+P_e \\ P_0=C_1VB_{max}^{\eta}f \\ P_e=C_2VB_{max}^2f^2a^2 \end{cases} \tag{8}$$

式中：P_0 为铁芯损耗，W；P_h 为磁滞损耗，W；P_e 为铁芯涡流损耗，W；C_1 为磁滞损耗系数；V 为铁芯体积，m^3；f 为负载电流频率，Hz；B_{max} 为最大磁感应强度，T；η 为施泰因梅茨系数，取 1.6；C_2 为涡流损耗系数；a 为硅钢片厚度，m。

其中，变压器绕组轴向漏磁与辐向漏磁计算式如式(9)所示。



(a) 变压器磁通密度分布　(b) 横截面磁通密度分布

(c) 低压绕组漏磁分布　(d) 高压绕组漏磁分布

图 2　额定负载率下变压器本体及绕组磁场分布云图

Fig.2　Cloud diagram of magnetic field distribution of the transformer body and windings at rated load rate

$$\begin{cases} P_{Fi}=\dfrac{\pi R_i\gamma\omega^2 d^2 S_i}{12}B_{hi}^2 \\ P_{Zi}=\dfrac{\pi R_i\gamma\omega^2 h^2 S_i}{12}B_{ri}^2 \\ P_W=\sum_{i=1}^{N}P_{Wi}=\sum_{i=1}^{N}(P_{Fi}+P_{Zi})\cdot 2\pi R_i \end{cases} \tag{9}$$

式中：P_{Fi} 为绕组的辐向涡流损耗，W；P_{Zi} 为绕组的轴向涡流损耗，W；P_W 为绕组总的涡流损耗，W；d 为线匝宽度；h 为线匝厚度；S_i 为第 i 个单元的面积；R_i 为第 i 个线圈单元距离铁芯柱轴线的距离，m；γ 为电导率，S/m；ω 为角频率，rad/s；B_{hi}、B_{ri} 分别为第 i 个线圈单元的辐向漏磁及辐向漏磁，T。

基于以上耦合计算模型，仿真得到三维变压器模型在 40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%负载率下的温度分布云图。以 40%、60%、80%、100%负载率为例，变压器三维温度分布如图 4。可知，任一负载率下，绕组温度均高于铁芯温度，变压器热点出现在绕组处，这是因为绕组与变压器油接触面积小，对流散热效果差。随负载率增大，变压器绕组温度逐渐升高，绕组热点分布于绕组高度 80%~90%位置。这是因为变压器油受热以后其物理属性发生改变，产生升力将热量向上传递。由图 4 可知，在 40%负载率下的热点温升为 30.0 ℃，在 100%负载率下的热点温升为 73.6 ℃。

1.2　仿真方法有效性试验验证

本文依据 GB/T 1094.2—2013 对型号 S11-M-630/10 kV 的油浸式配电变压器进行 40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%负载率下的温升试验。其中，绕组热点温度最能表征变压器温升最大幅度，

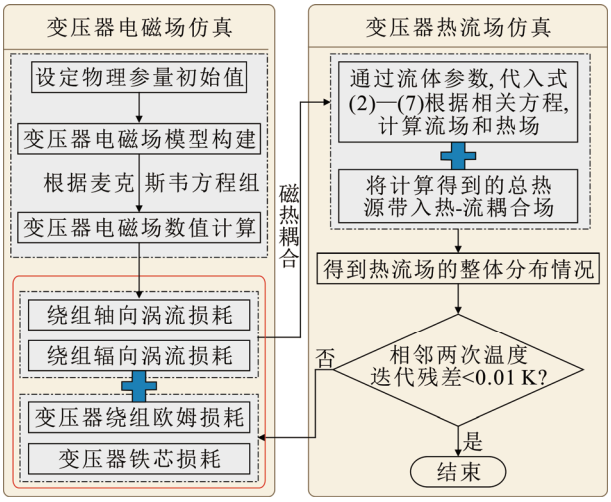
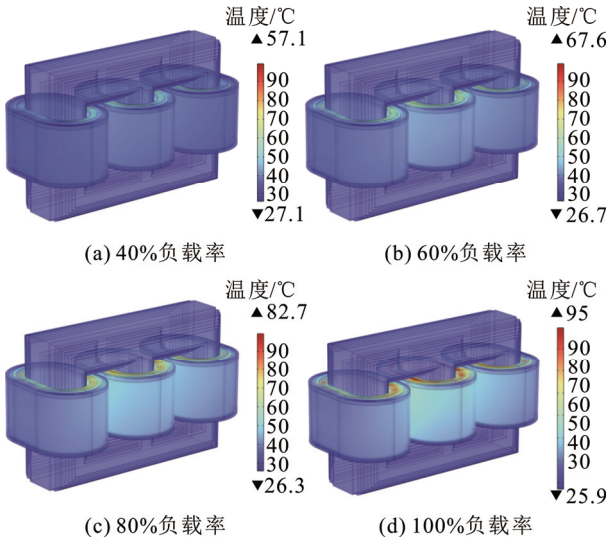


图 3　变压器电磁-流-热多场耦合求解流程图

Fig.3　Flowchart of transformer electromagnetic-fluid-thermal multi-field coupling solution



(a) 40%负载率　(b) 60%负载率

(c) 80%负载率　(d) 100%负载率

图 4　不同负载率下变压器整体温度分布云图

Fig.4　Cloud diagramof the overall temperature distribution of the transformer under different load factors

即最能表征变压器允许的负载能力。为验证上述仿真方法及稳态温度分布结果的准确性，在变压器 B 相低压绕组热点(T_1)、B 相高压绕组热点(T_2)、A 相低压绕组热点(T_3)、A 相高压绕组热点(T_4)部位埋设热电偶并记录实时温升数据，当顶层油温变化在 3 h 内保持不变时试验达到稳定，测温点布置如图 5 所示。温升试验平台包括控制系统、电源系统、信号采集系统、红外热像仪等，如图 6 所示。其中，温升实时数据通过控制系统及信号采集系统记录，试验时室温在 25~28 ℃之间。

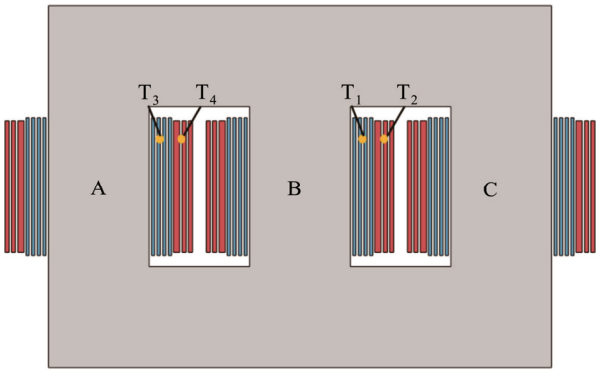


图 5 变压器关键测温点热电偶安装示意图

Fig.5 Diagram of transformer key temperature measurement point thermocouple installation

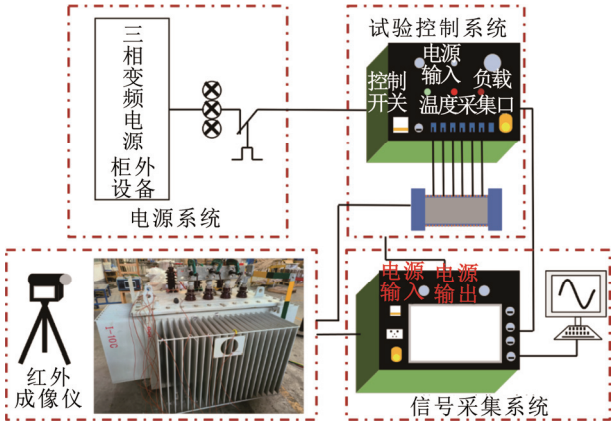


图 6 油浸式变压器温升试验平台图

Fig.6 Diagram of oil-immersed transformer temperature-rise test platform

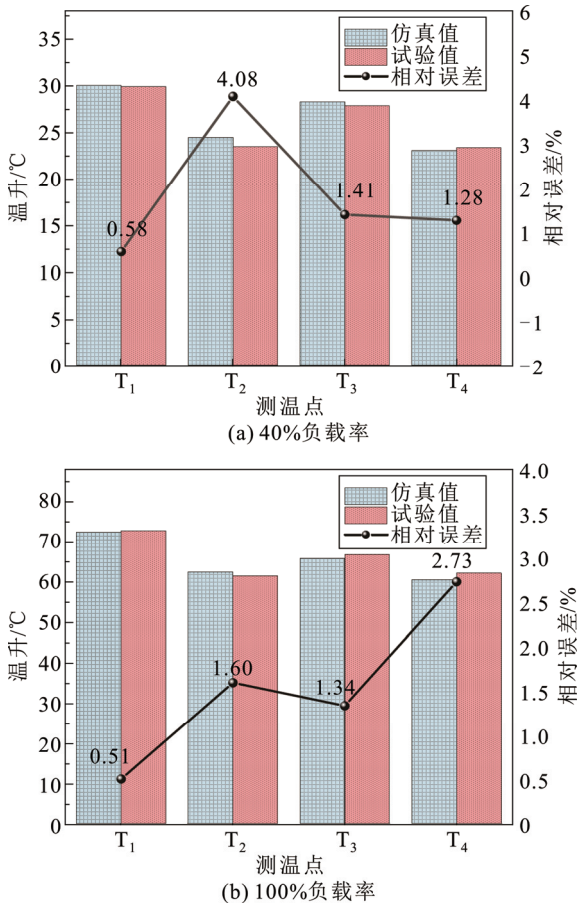


图 7 不同负载率下各测温点实测值与仿真值误差对比

Fig.7 Comparison of the error between the measured and simulated values of each temperature measurement point under different loading rates

图 7 给出了负载率为 40%和 100%时各测温点温度实测值与仿真计算值的误差对比情况，误差百分比计算如式(10)所示。

$$\delta_1 = \left| \frac{\theta_{\text{simulation}} - \theta_{\text{test}}}{\theta_{\text{test}}} \right| \times 100\% \tag{10}$$

式中：δ_1 为仿真计算模型误差百分比；$\theta_{\text{simulation}}$ 为仿真温度，℃；θ_{test} 为试验温度，℃。

图 7 结果表明，当负载率为 40%时，实测温度值与仿真温度值的最大相对误差为 4.08%；当负载率为 100%时，实测温度值与仿真温度值的最大误差为 2.73%。可见，上述计算方法是准确的，为后文基于仿真获得变压器绕组热点动态温升数据奠定了基础。此外，图 7 结果表明，变压器热点温度出现在 B 相低压绕组，且 B 相绕组上述测温点的温升值均高于 A 相绕组。所以 B 相绕组的温度特性更能表征变压器温升状态。因此，后文重点以 B 相绕组为对象进行其动态温升演化规律分析。

2 变压器绕组热点温升动态演化规律分析

2.1 不同负载率下绕组热点温升动态特性

与稳态温度场仿真相比，变压器瞬态温度场仿真时，随着负载电流施加时间增加，存在突变现象，收敛性差的问题[24]。因此，本文在 1.1 节基础上对热源施加激励采取阶跃函数型曲线平滑处理，并将求解器中的恒定牛顿改为自由牛顿(会自动更新雅可比矩阵并使用动态阻尼项)，以提高仿真计算的收敛性。基于此，本文仿真获得 B 相绕组在 40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%负载率下 0~8 h 温升动态变化规律，其中，40%和 100%负载率下的温升动态过程如图 8 和图 9 所示。可见，变压器热点温度位于 B 相低压绕组上方区域，负载率从 40%增长到 100%的过程中，B 相低压绕组热点温度从 57.1 ℃增大到 99.4 ℃，B 相高压绕组热点温度从 51.9 ℃增大到 89.4 ℃。

本文进行温升试验时对环境温度进行了持续检测，环境温度在 25~28 ℃之间波动，为规避环境温度变化的影响，本文分析绕组动态温升随时间的变化。此外，由于外界环境温度变化范围较小，油箱壁面对流换热影响不显著，因此后续分析主要考虑负载率变化对温升特性的影响。以 B 相低压绕组热点(T_1)、B 相高压绕组热点(T_2)为研究对象(点位如图 5)，对其在不同负载率下的温升动态规律进行量化分析。以 0.25 h 为时间间隔，8 h 为负载施加时间进行数据采集，拟合 T_1、T_2 点位在不同负载率下随负载施加时间变化的动态温升数据，拟合结果如图 10、图 11 所示。图 10 和图 11 中，不同的数据点代表不同负载率下的仿真温度数据，不同的实线代表不同负载率下的数据拟合曲线。高压绕组热点 T_1、低压绕组热点 T_2 的动态温升数据拟合曲线函数表达式如表 3、表 4 所示。

表3、表4的拟合函数可采用通式(11)进行表达。其中，$\Delta\theta_{i/\beta}$表示在不同负载率下变压器不同位置的温升值，℃；$\theta_{Si/\beta}$表示变压器不同位置达到稳态时的温升，℃；$\tau_{i/\beta}$表示变压器不同位置动态温升时间常数值，h；t 表示负载施加时间，h；i=1、2，当 i=1 时代表低压绕组，当 i=2 时代表高压绕组；β 表示负载率大小，β=40%、50%、…、100%。

$$\Delta\theta_{i/\beta}=\theta_{Si/\beta}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_{i/\beta}}}\right) \tag{11}$$

表 3 和表 4 拟合结果表明，任一负载率下高压绕组和低压绕组的热点温升值均随负载施加时间延长呈现饱和型指数增长规律，且随着负载率增大，

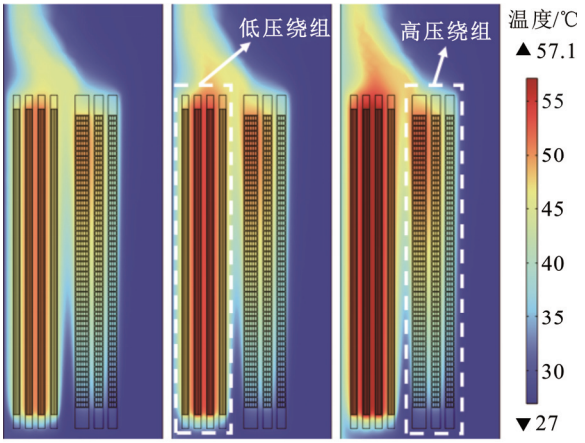


图 8　40%负载率下 B 相绕组动态温升过程图

Fig.8　Graph of dynamic temperature-rise process of B-phase winding at 40% load factor

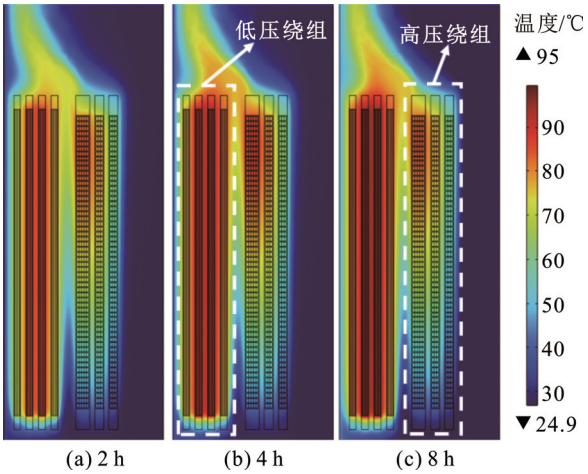


图 9　100%负载率下 B 相绕组动态温升过程图

Fig.9　Graph of dynamic temperature-rise process of B-phase winding at 100% load factor

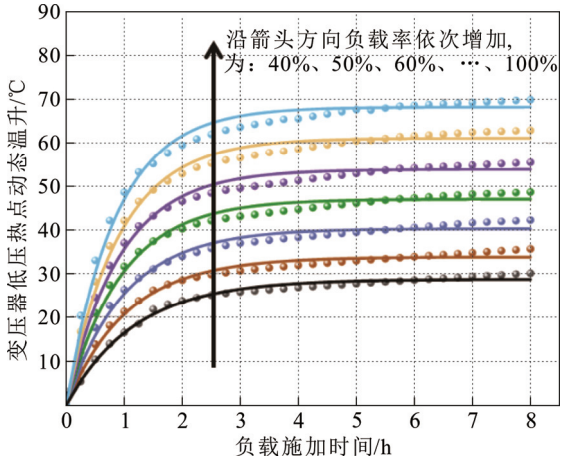


图 10　不同负载率下低压绕组热点动态温升曲线

Fig.10　Dynamic temperature rise curves of hotspots in LV windings at different load factors

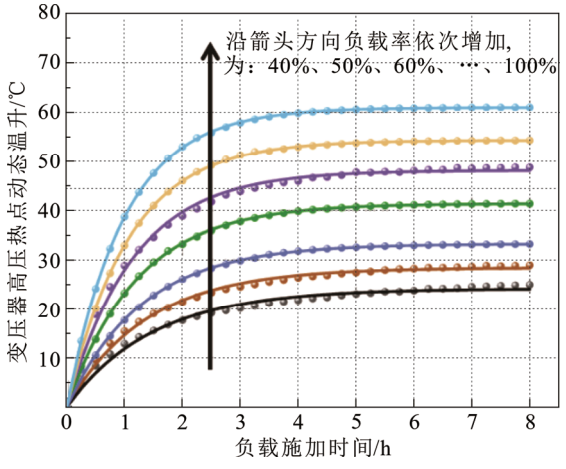


图 11　不同负载率下高压绕组热点动态温升曲线

Fig.11　Dynamic temperature rise curves of hotspots in HV windings at different load factors

表 3 热点 T_1 的动态温升拟合曲线函数表达式

Table 3 Dynamic temperature rise fitting curve function expression for hotspot T_2

负载率/%	拟合曲线函数表达式	拟合优度
40	$\Delta\theta_{1/40\%}=28.67(1-e^{-t/1.18})$	0.990
50	$\Delta\theta_{1/50\%}=33.78(1-e^{-t/1.06})$	0.987
60	$\Delta\theta_{1/60\%}=40.30(1-e^{-t/1.01})$	0.985
70	$\Delta\theta_{1/70\%}=47.04(1-e^{-t/0.96})$	0.982
80	$\Delta\theta_{1/80\%}=53.90(1-e^{-t/0.92})$	0.981
90	$\Delta\theta_{1/90\%}=61.07(1-e^{-t/0.88})$	0.985
100	$\Delta\theta_{1/100\%}=68.26(1-e^{-t/0.84})$	0.981

表 4 热点 T_2 的动态温升拟合曲线函数表达式

Table 4 Dynamic temperature-rise fitting curve function expression for hotspot T_1

负载率/%	拟合曲线函数表达式	拟合优度
40	$\Delta\theta_{2/40\%}=24.16(1-e^{-t/1.49})$	0.987
50	$\Delta\theta_{2/50\%}=28.41(1-e^{-t/1.39})$	0.994
60	$\Delta\theta_{2/60\%}=33.27(1-e^{-t/1.28})$	0.998
70	$\Delta\theta_{2/70\%}=41.36(1-e^{-t/1.21})$	0.999
80	$\Delta\theta_{2/80\%}=48.09(1-e^{-t/1.14})$	0.995
90	$\Delta\theta_{2/90\%}=54.30(1-e^{-t/1.07})$	0.999
100	$\Delta\theta_{2/100\%}=60.98(1-e^{-t/0.99})$	0.999

热点温升的温升速率呈上升趋势。但同一负载率下高压绕组热点和低压绕组热点的温升值与温升速率存在显著差异。以 B 相低压绕组热点为例，负载率从 40%增大到 100%过程中，低压绕组热点的稳态温升值θ_{S1}从 28.67 ℃增长至 68.26 ℃(增长 2.38 倍)，动态温升时间常数τ_1从 1.18 h 减小至 0.84 h(减小了 29%)。

2.2 绕组热点温升与负载率的关联关系分析

图 12 显示了在不同负载率下变压器高压绕组热点与低压绕组热点温升稳态值$\theta_{Si/\beta}$及温升时间常数值$\tau_{i/\beta}$，分别对$\theta_{Si/\beta}$、$\tau_{i/\beta}$与负载率变化进行曲线拟合，不同负载率下高压绕组热点与低压绕组热点$\theta_{Si/\beta}$值及$\tau_{i/\beta}$值如表 5 所示，拟合函数如表 6 所示。

由图 12 可见，$\theta_{Si/\beta}$值随负载率增大呈幂函数规律增大，负载率从 40%增至 100%的过程中，低压绕组热点的$\theta_{Si/\beta}$值从 28.67 ℃增大至 68.26 ℃，高压绕组热点的$\theta_{Si/\beta}$值从 26.16 ℃增大至 60.98 ℃，且低压绕组热点的$\theta_{Si/\beta}$值高于高压绕组热点的$\theta_{Si/\beta}$值。这是因为随负载率增大，绕组电流密度逐渐增大，进而导致$\theta_{Si/\beta}$值增大。此外，和高压绕组相比，低压绕组区域油道更窄，油流速较慢，进而导致低压绕组热点$\theta_{Si/\beta}$值更大；$\tau_{i/\beta}$值随负载率增大呈幂函数规律减小，负载率从 40%增至 100%的过程中，低压绕组热点的$\tau_{i/\beta}$值从 1.18 h 减小至 0.84 h，高压绕组热点的$\tau_{i/\beta}$值从 1.49 h 减小至 0.99 h。这是因为随负载率增大，变压器绕组与周围油域的对流换热作用带走更多热量，增大了绕组表面对流换热能力，

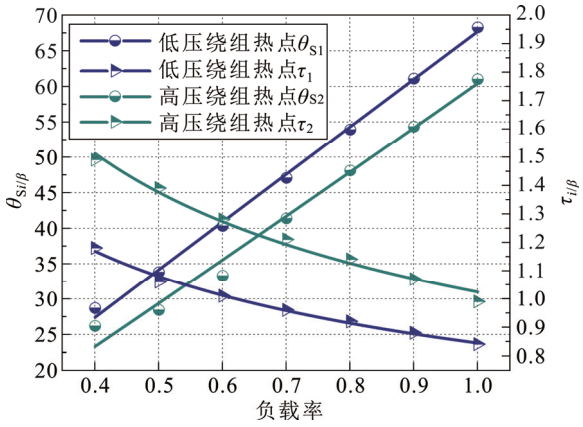


图 12 不同负载率下$\theta_{Si/\beta}$、$\tau_{i/\beta}$拟合曲线

Fig.12 Fitted curves of $\theta_{Si/\beta}$, $\tau_{i/\beta}$ at different loading rates

表 5 不同负载率下拟合曲线参数$\theta_{Si/\beta}$、$\tau_{i/\beta}$值

Table 5 Values of fitted curve parameters $\theta_{Si/\beta}$ and $\tau_{i/\beta}$ at different load factors

变压器部位	负载率/%	$\theta_{Si/\beta}$	$\tau_{i/\beta}$
低压绕组热点	40	28.67	1.18
	50	33.78	1.06
	60	40.3	1.01
	70	47.04	0.96
	80	53.9	0.92
	90	61.07	0.88
	100	68.26	0.84
高压绕组热点	40	26.16	1.49
	50	28.41	1.39
	60	33.27	1.28
	70	41.36	1.21
	80	48.09	1.14
	90	54.30	1.07
	100	60.98	0.99

表 6 θ_{Si}及τ_i与负载率变化的拟合曲线函数

Table 6 θ_{Si} and τ_i as a function of the fitted curve to the change in load factor

变压器位置	稳态温升值θ_{Si}	时间常数值τ_i
低压绕组热点	$\theta_{S1}=67.67\beta^{1.01}$	$\tau_1=0.84\beta^{-0.37}$
高压绕组热点	$\theta_{S2}=60.41\beta^{1.08}$	$\tau_2=1.04\beta^{-0.45}$

由于$\tau_{i/\beta}$值与对流换热系数成反比，进而导致$\tau_{i/\beta}$值减小。此外，和高压绕组相比低压绕组区域整体散热面积较小，换热效果差，温升速率更快，进而导致低压绕组热点$\tau_{i/\beta}$值更小。

根据表 6 拟合获得的函数公式，本文构建出绕组热点温度与负载率的关联计算模型，如式(12)所示。该计算模型不仅能够表达任意负载率下变压器绕组热点动态温升变化，还能够表达任意负载率下热点温升的变化速率，呈现不同负载率下变压器绕组热点温升的演化过程。

$$\begin{cases}\theta_{Si}(\beta)=r_i\beta^{s_i}\\ \tau_i(\beta)=p_i\beta^{q_i}\end{cases} \tag{12}$$

式中：r_i表示绕组热点稳态温升系数；s_i表示绕组热点稳态温升指数；p_i表示绕组温升时间常数系数；q_i表示绕组温升时间常数指数；i=1、2，当 i=1 时代表低压绕组，当 i=2 时代表高压绕组。值得注意的是：不同变压器结构尺寸和容量各不相同，式(12)关联计算模型的相关参数存在差异，需按照本文方法进行具体求解。

3　基于差分进化算法的绕组热点温升动态推演计算模型及其试验验证

3.1　差分进化算法原理

由 2.1 节可知，随着负载电流的施加，变压器绕组热点温升呈饱和型指数函数增长，函数表达式为$\theta_S(1-e^{t/\tau})$。因此，本文选取差分进化算法(differential evolution，DE)对变压器绕组热点动态温升进行预测。差分进化计算主要分为种群初始化操作、变异操作、交叉操作、选择操作 4 个步骤。当进行种群初始化时，将在解空间内随机均匀产生 N 个个体，每个个体的维度为 m，如式(13)所示。

$$\boldsymbol{Y}^i(0)=[y_1^i(0),y_2^i(0),y_3^i(0),\cdots,y_m^i(0)] \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{Y}^i(0)$代表第 i 个个体在初始时刻的状态；i=1,2,3,⋯,N；$y_j^i(0)$代表 i 个个体在初始时刻的第 j 个参数值；j=1,2,3,⋯,m。

在初始化种群后，需要对个体进行变异、交叉与选择操作直至获得最优解。最优解与随机向量差分法(DE/rand-to-best/1)在选取当前种群中最优个体的同时，充分利用种群内其余个体信息(进行向量差分并乘以贪婪因子)，又选取任意 2 个不相同的个体进行向量差分并乘以放大因子，将结果加至当前个体上，有效避免了陷入局部最优的情况。因此，本文选取 DE/rand-to-best/1 对个体进行向量差分。对于第 t 代的第 i 个个体$\boldsymbol{Y}^i(t)$，进行差分变异后产生的第 t+1 代实验个体$\boldsymbol{H}^i(t+1)$，如(14)所示。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}^i(t+1)=\boldsymbol{H}^i(t)+\lambda_{tl}\cdot(\boldsymbol{H}^{t.\text{best}}(t)-\boldsymbol{H}^j(t))+\\ G\cdot(\boldsymbol{H}^k(t)-\boldsymbol{H}^l(t))\ (i\neq k\neq l)\end{aligned} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{H}^{t.\text{best}}(t)$代表第 t 代种群最优个体；G 代表放大因子；$\boldsymbol{H}^j(t)$、$\boldsymbol{H}^k(t)$、$\boldsymbol{H}^l(t)$代表当前种群中非第 i 个个体外的其他 3 个互不相同的个体；λ_{tl}代表控制算法的“贪婪程度”。

在进行变异操作后，为保持种群的多样性，需要对个体进行交叉与选择操作。将差分变异产生的实验个体$\boldsymbol{H}^i(t+1)$与父代个体$\boldsymbol{Y}^i(t)$进行交叉，且每个维度 j 均生成随机数$R_{\text{and}\,j}^{\ i}$。若$R_{\text{and}\,j}^{\ i}\geq C_r$或当前维度 j 为随机选择的维度 J_{rand}，子代个体$\boldsymbol{V}^i(t+1)$将继承变异向量值，否则选择当前个体$y_j^i(t)$值。特别值得注意的是：选择操作是为了混合当前个体和变异向量，以确保至少有一个位置的值来自变异向量来，提高种群的多样性，如式(15)所示。

$$v_j^i(t+1)=\begin{cases}h_j^i(t+1), & R_{\text{and}\,j}^{\ i}\geq C_r \text{ 或 } j=J_{\text{rand}}\\ y_j^i(t), & R_{\text{and}\,j}^{\ i}\leq C_r \text{ 或 } j\neq J_{\text{rand}}\end{cases} \tag{15}$$

式中：$y_j^i(t)$代表当前种群第 i 个个体的第 j 位基因位值；$R_{\text{and}\,j}^{\ i}$代表第 i 个个体的第 j 位基因上的随机数，介于 0~1 之间；C_r代表交叉率，$C_r\in[0,1]$；$v_j^i(t+1)$代表经变异交叉后的子代个体中第 i 个个体的第 j 位基因位值；$h_j^i(t+1)$代表经差分变异产生的实验个体中第 i 个个体的第 j 位基因位值；J_{rand}代表随机选择的一个维度。

3.2　基于差分进化算法的绕组热点温升推演计算模型构建

为有效解决变压器温升检测时间长、现场实施难的行业难题，本文提出一种基于差分进化算法的绕组热点温升推演计算模型，在减少温升检测时间的基础上，实现以小负载率温升试验数据推演获得大负载率温升试验数据，为降低现场变压器温升性能检测难度提供了参考方法。绕组热点温升推演计算模型流程如图 13 所示。

步骤 1：基于电磁-流-热多场耦合瞬态计算模型仿真得到负载率为 40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%下的瞬态温度分布，并以高压绕组热点及低压绕组热点为研究对象，构建基于绕组热点动态温升与负载率变化的关联计算模型。

步骤 2：将 40%、50%、60%负载率下绕组热

点温升值前 3 h 的仿真数据$f_{\text{simulation}}$作为预测模型的真实值进行随机初始化种群，并根据关联计算模型确定目标函数$f(x)$的代求参数。

步骤 3：对种群个体进行适应度评估，判断适应度$F_{\text{fitness}}=\left|f(x)-f_{\text{simulation}}\right|$是否低于规定残差或者达到最大迭代次数。若是，则输出最优解；若否，则执行步骤 4、5、6 直至输出最优解。

步骤 4：对 40%、50%、60%负载率下热点温升预测曲线的准确性进行验证。

步骤 5：为验证推演计算模型的有效性，将预测曲线分为 6 组，负载率组合分别为 40%与 50%、40%与 60%、50%与 60%，结合步骤 1 中的关联计算模型，通过联立方程式求解模型参数r_i、s_i、p_i、q_i值，获得额定负载率下变压器热点动态温升规律。

步骤 6：进行额定负载率下的温升试验，并将试验获得的动态温升参数θ_{Si}、τ_i值分别与 3 组预测曲线经推演计算得到θ_{Si}、τ_i值进行比较，验证该推演计算模型的准确性。

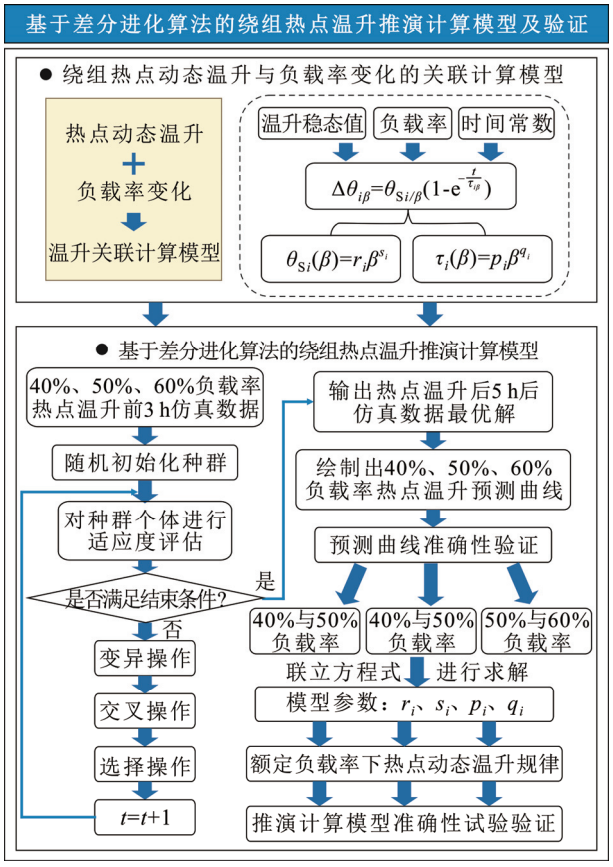


图 13 基于差分进化算法的绕组热点温升推演计算模型构建及验证流程图

Fig.13 Construction and validation flowchart of a computational model based on DE for the derivation of hot spot temperature rise in windings

3.3 绕组热点动态温升推演计算模型试验验证

图 14 显示了基于差分进化算法的绕组热点温升推演模型得到的 40%、50%、60%负载率下热点温升的预测曲线，曲线规律满足$\theta_S(1-e^{t/\tau})$形式。图 14 中，曲线的左侧为初始值提取区间，将 40%、50%、60%负载率下绕组热点温升值前 3 h 的仿真数据作为差分进化算法的初始值；黑色曲线的右侧为预测曲线验证区间，40%、50%、60%负载率下绕组热点温升值后 5 h 的仿真数据(1 h 提供 1 次)与预测曲线几乎一致。

为进一步验证预测曲线的准确性，将 40%、50%、60%负载率下热点温升的预测曲线与 40%、50%、60%负载率下热点温升仿真曲线进行对比分析，结果图见 15。可见，低压绕组θ_{S1}的最大误差为 1.14 ℃，低压绕组τ_1的最大误差为 0.03 h；高压绕组θ_{S2}的最大误差为 1.51 ℃，高压绕组θ_{S2}的最大误差为 0.04 h，预测与仿真结果一致，验证了基于差分进化算法的绕组热点温升预测曲线的准确性。

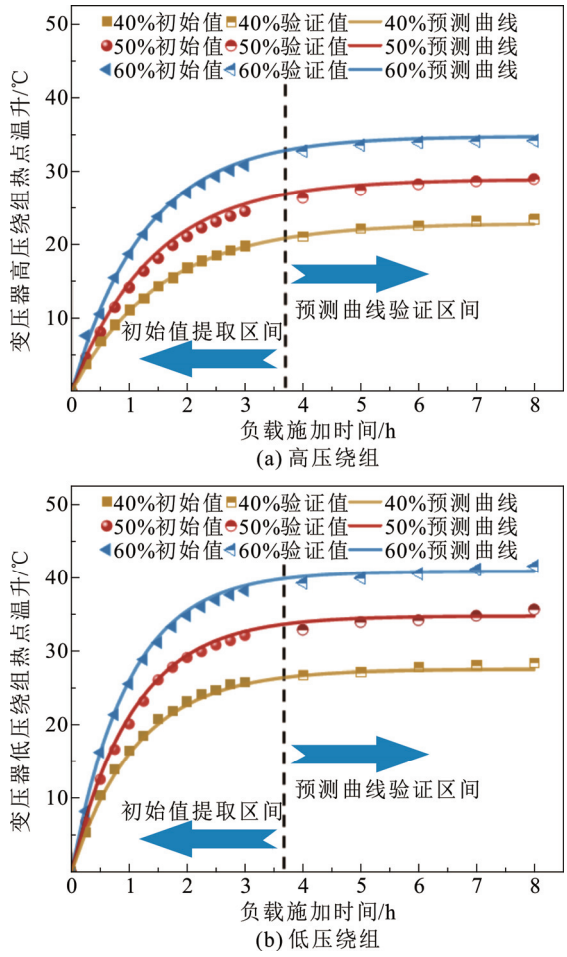


图 14 基于差分进化算法的绕组热点动态温升预测曲线

Fig.14 Dynamic temperature-rise prediction curves for winding hotspots based on DE algorithm

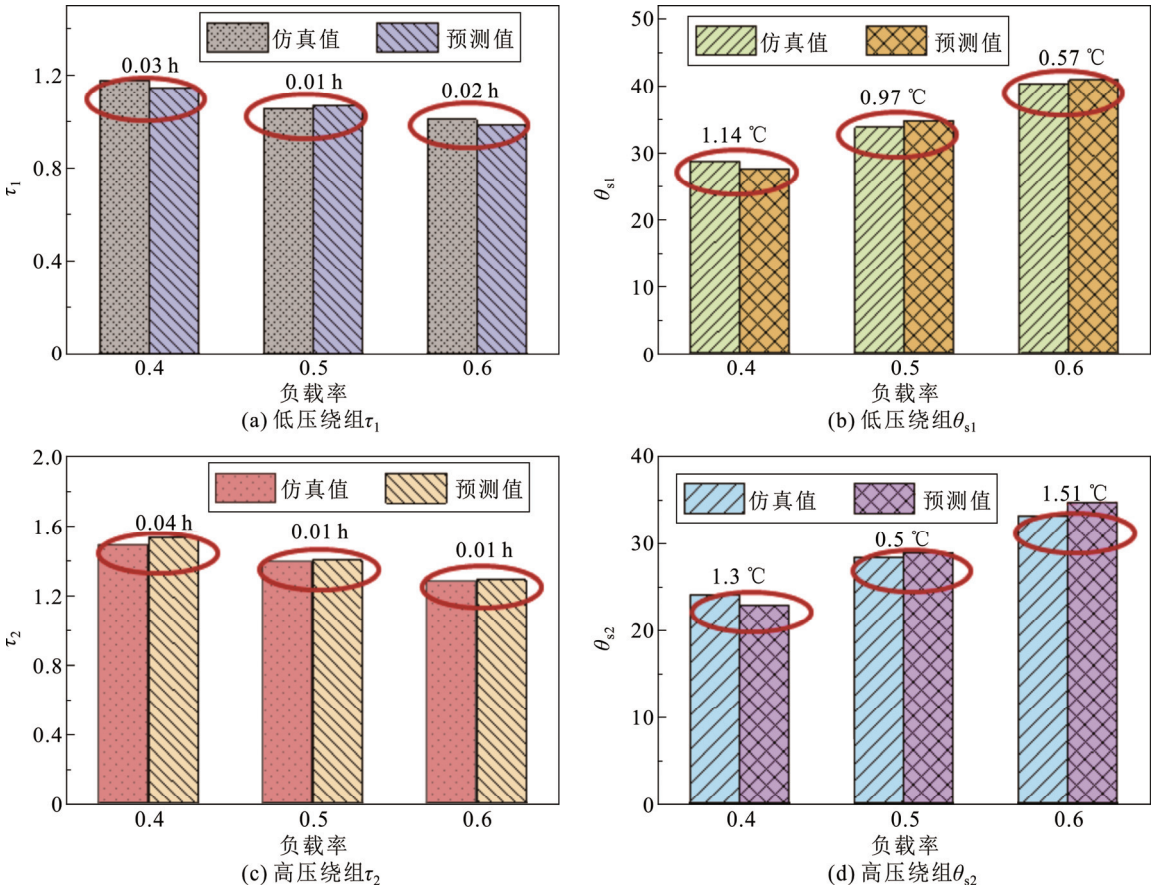


图 15　热点动态温升预测曲线参数θ_{si}及τ_i误差对比

Fig.15　Comparison of the error of the hot spot dynamic temperature-rise prediction curve parameters θ_{si} and τ_i

本文对负载率组合为 40%与 50%、40%与 60%、50%与 60%下的 3 组预测曲线进行方程式联立求解，得到高压绕组及低压绕组热点在每种情况下关联计算模型的参数 r_i、s_i、p_i、q_i，如表 7 所示。将基于式(12)推演模型计算的温度数据与额定负载率下温升试验数据进行对比，误差百分比计算如式(16)所示。

$$\delta_2 = \left| \frac{\varepsilon_{\text{deduction}} - \varepsilon_{\text{test}}}{\varepsilon_{\text{test}}} \right| \times 100\% \tag{16}$$

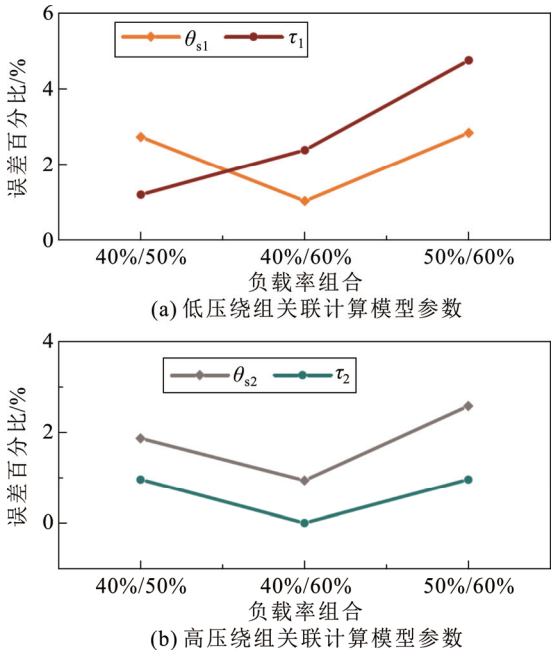
式中：δ_2为推演计算模型误差百分比；$\varepsilon_{\text{deduction}}$为推演模型数据；$\varepsilon_{\text{test}}$为温升数据。

由图 16 可知，变压器低压绕组热点试验与推演计算参数值θ_{s1}的最大误差百分数仅为 2.83%，高压绕组热点试验与推演计算参数值θ_{s2}的最大误差百分数仅为 2.58%，推演计算与实测结果一致性效果好，满足工程要求。变压器低压绕组热点试验与推演计算参数值τ_1的最大误差百分数仅为 4.76%，高压绕组热点试验与推演计算参数值τ_2的最大误差百分数仅为 0.96%，推演计算与实测结果一致性效果好，也满足工程要求。上述结果表明了基于差分进化算法的绕组热点温升推演模型的准确性，由小负载率温升试验数据推演大负载率温升试验数据客观可行。此外，由 1.1 节、1.2 节可知，任一负载率下变压器的仿真时间在 8~9 h 左右，且仿真与实测数据误差小于 5%，而采取推演计算模型则只需仿真不同小负载率下前 3 h 的温度数据，大致需要 4~5 h。因此，相较于直接采用仿真获取变压器绕组热点的温升变化规律，本文提出的推演计算模型可以有效减少计算时间，也为现场变压器温升试验检测时间长的行业难题提供方法参考。

表 7　变压器绕组热点温升推演计算模型结果表

Table 7　Calculation results of hot spot temperature rise derivation model for transformer windings Table

变压器部位	负载率组合	r_i	s_i	p_i	q_i
低压绕组热点	40%与 50%	69.52	1.01	0.85	–0.35
	40%与 60%	66.98	0.97	0.82	–0.37
	50%与 60%	65.75	0.98	0.80	–0.39
高压绕组热点	40%与 50%	59.28	1.04	1.05	–0.43
	40%与 60%	59.84	1.05	1.04	–0.44
	50%与 60%	61.97	1.10	1.03	–0.46



(a) 低压绕组关联计算模型参数

(b) 高压绕组关联计算模型参数

图 16 额定负载率下推演计算模型与温升试验误差百分比

Fig.16 Percentage error between the derived calculation model and the temperature-rise test at rated load factor

4 结论

本文以 S11-M-630/10 型号的油浸式变压器为研究对象，开展油浸式变压器绕组热点动态温升演化规律及推演计算模型研究，所得主要结论如下：

1）基于“电磁-流-热”多场耦合仿真分析方法获得了不同负载率下油浸式变压器的稳态温度分布规律，多测温点试验值与仿真值的最大误差小于 5%，表明了仿真方法的准确性。在此基础上，仿真获得不同负载率下油浸式变压器的动态温升演化规律：即在任一负载率下，绕组温升随负载施加时间的增长呈现饱和型指数函数增加，施加的负载率越大，绕组温升值增长越快，但绕组不同位置的稳态温升值和动态温升特性存在显著差异。

2）分析获得了绕组不同部位稳态温升值及温升时间常数与负载率的关联规律，提出基于绕组热点动态温升演化规律与负载率变化的关联计算模型，表征任一负载率下变压器绕组热点温升的真实演化过程。其中，绕组不同部位达到稳态时的温升值均随负载率的增大呈现幂函数增长的规律，绕组不同部位的温升时间常数值均随负载率的增大呈现幂函数下降的规律。

3）提出了一种基于差分进化算法的绕组热点动态温升推演计算模型，在大幅度减少温升检测时间的基础上，实现了以小负载率温升试验来替代大负载率下温升试验。以 B 相低压绕组热点为例，温升试验与推演计算获得的稳态温升值 θ_{s1} 的最大误差百分比仅为 2.83%，温升时间常数值 τ_1 的最大误差百分比仅为 4.76%；以 B 相高压绕组热点为例，温升试验与推演计算获得的稳态温升值 θ_{s2} 的最大误差百分比仅为 2.58%，温升时间常数值 τ_2 的最大误差百分比仅为 0.96%，验证了推演计算模型的准确性与有效性。

参考文献 References

[1] 刘云鹏，李 欢，高树国，等. 分布式光纤传感在大型变压器温度和绕组变形监测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：6126-6135.
LIU Yunpeng, LI Huan, GAO Shuguo, et al. Research on application of distributed optical fiber sensing in monitoring of temperature and winding deformation of large transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6126-6135.

[2] 曲岳晗，赵洪山，马利波，等. 多深度神经网络综合的电力变压器故障识别方法[J]. 中国电机工程学报，2021，41(23)：8223-8230.
QU Yuehan, ZHAO Hongshan, MA Libo, et al. Multi-depth neural network synthesis method for power transformer fault identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8223-8230.

[3] 吕金潮，陈希之，刘 刚，等. 基于多孔介质理论的 35 kV 油浸式变压器热点简化计算[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1034-1042.
LYU Jinchao, CHEN Xizhi, LIU Gang, et al. Simplified calculation of hot spots of 35 kV oil immersed transformer based on porous medium theory[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1034-1042.

[4] 袁发庭，施文菀，王 玥，等. 基于多物理场仿真的油浸式变压器温度特性分析及散热器优化[J]. 高电压技术，2024，50(1)：221-231.
YUAN Fating, SHI Wenyu, WANG Yue, et al. Temperature characteristic analysis and radiator optimization of oil-immersed transformer based on multi-physical field simulation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 221-231.

[5] 袁发庭，杨文韬，韩毅凛，等. 基于电磁-流热双向耦合的变压器绕组温升计算及结构参数优化[J]. 高电压技术，2024，50(3)：952-961.
YUAN Fating, YANG Wentao, HAN Yilin, et al. Temperature rise calculation and structure optimization research of transformer winding based on electromagnetic-fluid-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 952-961.

[6] 刘 刚，靳立鹏，胡万君，等. 基于混合有限元法的油浸式变压器稳态流-热耦合场并行计算方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2259-2269.
LIU Gang, JIN Lipeng, HU Wanjun, et al. Parallel calculation method for steady-state fluid-thermal coupling field of oil-immersed transformer based on hybrid finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2259-2269.

[7] LI H, LIU Y P, ZHUANG X Y, et al. Test and analysis on extended temperature rise of 110 kV transformer based on distributed temperature sensing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1030-1041.

[8] RODRIGUES T F, MEDEIROS L H, OLIVEIRA M M, et al. Evaluation of power transformer thermal performance and optical sensor positioning using CFD simulations and temperature rise test[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:

7002511.

[9] GEZEGIN C, OZGONENEL O, DIRIK H. A monitoring method for average winding and hot-spot temperatures of single-phase, oil-immersed transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3196-3203.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电力变压器　第 2 部分：液浸式变压器的温升：GB/T 1094.2—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers-part 2: temperature rise for liquid-immersed transformers: GB/T 1094.2—2013[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2014.

[11] 黄晓瑞. 基于热路模型的变压器绕组温度分布研究[D]. 天津：河北工业大学，2021.
HUANG Xiaorui. Research on transformer winding temperature distribution based on thermal path model[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2021.

[12] 张　健，胡玉耀，宋士瞻，等. 基于数值求解的油浸式变压器瞬态热点温度计算[J]. 高压电器，2023，59(6)：103-110，127.
ZHANG Jian, HU Yuyao, SONG Shizhan, et al. Transient hot spot temperature calculation of oil immersed transformer based on numerical calculation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 103-110, 127.

[13] 李永建，闫鑫笑，张长庚，等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. 电工技术学报，2020，35(21)：4483-4491.
LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgeng, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4483-4491.

[14] 李立涅，饶　宏，董旭柱，等. 计算高电压工程学的思考与展望[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3441-3453.
LI Licheng, RAO Hong, DONG Xuzhu, et al. Prospect of computational high voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3441-3453.

[15] 王小飞，代　颖，罗　建，等. 基于流固耦合的车用永磁同步电机水道设计与温度场分析[J]. 电工技术学报，2019，34(增刊 1)：22-29.
WANG Xiaofei, DAI Ying, LUO Jian, et al. Waterway design and temperature field analysis of vehicle permanent magnet synchronous motor based on fluid-solid coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement 1): 22-29.

[16] 邓永清，阮江军，董旭柱，等. 基于自适应网格控制的 10 kV 油浸式变压器多物理场仿真计算[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2924-2933.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Simulation of multi-physical field of 10 kV oil-immersed transformer based on adaptive grid control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2924-2933.

[17] 张弦亮，郝　建，刘　丛，等. 变压器绕组热缺陷温度演化规律及其辨识方法[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1548-1559.
ZHANG Xianliang, HAO Jian, LIU Cong, et al. Temperature distribution evolution of transformer windings thermal defect and its identification method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1548-1559.

[18] 倪子瞻，盛戈皞，张立静，等. 基于多物理场仿真和神经网络算法相结合的油浸式变压器热点温度动态反演方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2466-2477.
NI Zizhan, SHENG Gehao, ZHANG Lijing, et al. Dynamic inversion method of hot spot temperature of oil-immersed transformer based on combination of multiphysics simulation and neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2466-2477.

[19] 李　欢，刘云鹏，王佳雪，等. 油浸式配电变压器动态热模型分析及其试验验证[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：389-398.
LI Huan, LIU Yunpeng, WANG Jiaxue, et al. Analysis and test verification of dynamic thermal model of oil-immersed distribution transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 389-398.

[20] 王路伽，周利军，王东阳，等. 过负载启动对牵引变压器热点动态温升的影响[J]. 中国电机工程学报，2017，37(24)：7350-7358.
WANG Lujia, ZHOU Lijun, WANG Dongyang, et al. Impact of overload pickup on dynamic hot-spot temperature rise in traction transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7350-7358.

[21] 刘　刚，荣世昌，武卫革，等. 基于混合有限元法和降阶技术的油浸式变压器绕组 2 维瞬态流-热耦合场分析[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1695-1704.
LIU Gang, RONG Shichang, WU Weige, et al. Two-dimensional transient flow-thermal coupling field analysis of oil-immersed transformer windings based on hybrid finite element method and reduced-order technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1695-1704.

[22] RUAN J J, DENG Y Q, QUAN Y, et al. Inversion detection of transformer transient hot spot temperature[J]. IEEE Access, 2021, 9: 7751-7761.

[23] HE D S, JIA Z D, WANG J X, et al. Investigating temperature rise dynamics at hot-spots within dry-Type transformer windings: a comparative analysis across varied loading rates and an extrapolative computational model[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60: 104699.

[24] WANG J X, HAO J, XU J, et al. Research on the dynamic simulation process of hot spot temperature rise of oil-immersed transformer[C]//Proceedings of the 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. Shanghai, China: IEEE, 2024: 1946-1951.



王吉祥
2000—，男，硕士生
主要研究方向为变压器多物理场耦合仿真
E-mail: jayficqu@126.com

WANG Jixiang



郝　建(通信作者)
1984—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为输变电设备运行状态监测及故障诊断、新型绝缘材料研发及工程应用
E-mail: cquhaojian@126.com

HAO Jian
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-07-07　修回日期　2024-09-29　　编辑　卫李静