

伴随网格自适应剖分优化变压器内部温度仿真 模型计算效率方法

李元¹, 陈智秋¹, 刘志濠¹, 高一冉¹, 刘捷丰², 张冠军¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 广西大学电气工程学院, 530004, 南宁)

摘要: 针对变压器热-流场耦合仿真计算效率低的问题, 提出一种基于伴随网格自适应剖分的优化方法。首先, 以 110 kV 油浸自冷式变压器作为研究对象, 建立其二维全尺寸闭环热-流场仿真模型, 采用有限体积法求解温度场与油流场分布。然后, 基于伴随误差估计方法构建变压器热-流场误差指示器, 制定网格自适应剖分策略, 实现仿真区域网格的自适应加密。最后, 将网格自适应剖分方法应用于三角形和四边形主导网格的热-流场数值计算模型, 对比验证所提方法的有效性及适用性。结果表明: 伴随网格自适应剖分方法可在保证计算准确性的基础上显著提高热-流场耦合仿真模型的计算效率, 仿真用时减少 50% 以上, 且计算误差不超过 6%, 适用于不同类型的二维网格, 对三角形网格的优化效果尤佳。

关键词: 油浸自冷式变压器; 热-流场耦合; 仿真计算效率; 伴随误差估计; 网格自适应剖分

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603016 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0166-09

Adjoint-Based Adaptive Mesh Refinement Method for Optimizing Computational Efficiency of Transformer Internal Temperature Simulation Models

LI Yuan¹, CHEN Zhiqiu¹, LIU Zhihao¹, GAO Yiran¹, LIU Jiefeng², ZHANG Guanjun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To address the low computational efficiency in thermal-fluid coupling simulations of transformers, an optimization method based on adjoint-based adaptive mesh refinement is proposed. Firstly, a 110 kV oil-immersed self-cooled transformer is investigated, and a two-dimensional full-scale closed-loop thermal-fluid coupling simulation model is established. The finite volume method is employed to solve the temperature field and oil flow field distributions. Then, an error indicator for the thermal-fluid coupling of the transformer is constructed based on the adjoint error estimation method, and a mesh adaptive refinement strategy is formulated to achieve adaptive mesh encryption in the simulation region. Finally, the adaptive mesh refinement method is applied to thermal-fluid coupling numerical calculation models dominated by triangular and quadrilateral meshes, and the effectiveness and applicability of the proposed method are verified through comparative analysis. The results show that the adjoint-based adaptive mesh

refinement method significantly improves the computational efficiency of thermal-fluid coupling simulation models while ensuring calculation accuracy, reducing simulation time by over 50% with a computational error no more than 6%. This method is applicable to different types of two-dimensional meshes, with particularly notable optimization effects for triangular meshes.

Keywords: oil-immersed self-cooled transformer; thermal-fluid field coupling; simulation efficiency calculation; adjoint error estimation; adaptive mesh refinement

油浸式电力变压器是输配电系统中的枢纽设备,其良好的运行状态是电力系统安全可靠运行的基础保证^[1]。在运行中,绕组温升和热点温度是决定变压器负载能力及剩余寿命的关键因素^[2-3]。准确快速地获取内部温度分布对变压器运行状态实时评估具有重要意义^[4]。

目前,获取变压器内部温度的方法可分为直接测量法与间接算法两大类。直接测量法^[5-6]通过温度传感器(如光栅光纤、热电偶)实时监测绕组温度,但需要将传感器预埋至变压器内部,且传感器安装位置和数量缺乏相关标准指导,从运行经验看,广泛实施的难度依然很大^[7]。间接算法主要包括热路模型法、经验公式法与数值仿真法。其中,热路模型法与经验公式法计算虽能较快计算出热点温度^[8-10],但计算精度较低且获得的温度信息有限。相比之下,数值仿真法不仅可以获取详细的温度分布,还能精确模拟变压器内部复杂的热传递过程,已成为研究变压器温升特性的主要手段。

数值仿真法以变压器几何模型为求解域,将连续的求解域离散成有限个网格单元,通过求解热-流场控制方程计算变压器内部温度和流速分布^[11-13]。在多物理场耦合仿真计算中,网格剖分是决定计算准确度和效率的关键^[14]。高压变压器的结构尺寸跨度很大,例如油箱和铁心尺寸为 m 级,而很多精细结构为 mm 级(如横向油道、挡油板、角环)。若以变压器整体尺寸为基准设定网格参数,计算误差很大甚至不收敛;若均匀提升网格密度,又会使计算负荷剧增,计算速度缓慢,无法满足现场应用时效要求。

根据求解域各区域的计算需求划分网格,在保证计算准确度的前提下提高求解效率一直是此领域的研究热点。已有研究大多依靠经验判断求解域内的网格加密区域,并依据求解结果人工对网格进行迭代优化,耗费大量资源且主观性很强。合理离散多物理场耦合计算的求解域,达到计算误差与计算负荷间的平衡,是变压器热-流场数值仿真计算的难点问题^[15]。

自适应网格技术^[16-17]可根据预设的误差判据

自动调整网格密度,可在保障计算精度的基础上大幅提升计算效率,为优化变压器热-流场数值计算提供了有效方法。该技术的关键是构建误差指示器,这直接关系到应加密区域的识别。目前,针对热-流场计算设计的误差指示器大多基于控制方程的求解误差或物理场变量的梯度。前者应用 N-S 方程等复杂的偏微分方程求解时,极易产生计算困难;后者则聚焦于局部区域的梯度降低,往往无法有效减少求解域内的全局误差,且不适用于处理多变量问题^[18]。为解决这些问题,研究者将用于求解微分方程约束优化问题的伴随方法引入误差指示器的构建中,利用伴随方程构建单元局部误差与目标函数全局解的数学关系,指导误差敏感区的网格加密,已在高速飞行器流动控制的计算中取得了良好效果^[19-22]。而在变压器多物理场耦合计算问题中,将伴随方程应用于网格自适应剖分的研究还鲜见报道。

本文针对变压器内部温度数值计算效率不高的问题,提出一种基于伴随方程的变压器热-流场耦合仿真模型网格自适应剖分方法。首先,以一台型号为 SFZ8-31500/110 的油浸自冷式变压器为研究对象,1:1 建立二维闭环热-流场耦合仿真模型,采用有限体积法求解温度场与流场分布。然后,基于伴随误差估计方法构建变压器热-流场误差指示器,制定网格自适应剖分策略,实现仿真区域网格的自适应加密。最后,对比验证所提出方法的有效性及适用性。

1 基于伴随方程的网格自适应剖分方法

1.1 变压器热-流场控制方程

对于油浸自冷式变压器,其内部热量传递主要依靠油流的自然循环,油流受动量守恒方程和质量连续性方程共同约束^[23],控制方程为

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \\ \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \rho f_y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; ρ 为油流的密度; x 和 y 为二维空间坐标, 分别表示水平方向和竖直方向; u 和 v 分别为油流速度在 x 和 y 方向的分量; $\mathbf{V}$ 为油流速度矢量; p 为油流压力; τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 为因绝缘油分子间黏性作用产生的应力分量, 其中第一个下标表示应力作用面的法线方向, 第二个下标表示应力作用方向; f_x 和 f_y 分别为 x 和 y 方向的体积力分量。

根据能量守恒定律, 油流微元能量的增量等于流入油流微元的净热流量与对微元所做功的和^[24], 即

$$\nabla \cdot [\rho E \mathbf{V}] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} \quad (3)$$

式中: E 为单位质量总能量; λ 为油的热导率; T 为油温; $\mathbf{f}$ 为体积力矢量。

式(1)~(3)反映了油流温度与速度场的耦合关系, 可表示为统一的微分形式^[25]

$$\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = J \quad (4)$$

式中: F 和 G 分别为 x 和 y 方向通量; J 为源项。

1.2 基于伴随方程的热-流场误差估计方法

记 U 为控制方程式(4)的离散解, $f(U)$ 为目标函数。对同一求解域, 定义两种网格剖分方案, 分别为单位尺寸为 H 的粗网格和单位尺寸为 h 的细网格。记粗网格和细网格上的目标函数分别为 $f_H(\mathbf{U}_H)$ 、 $f_h(\mathbf{U}_h)$, 其中 $\mathbf{U}_H$ 、 $\mathbf{U}_h$ 代表粗、细网格上控制方程的离散解。

细网格所得解 $\mathbf{U}_h$ 满足准确度要求, 视为真解。对粗网格进行网格自适应优化后也可得到 $\mathbf{U}_h$ 。自适应过程主要消除两部分误差: ① 因网格密度不足而产生的误差, 可通过缩小单元尺寸 H 消除, 此时大部分区域的网格密度已满足计算准确度需求, $\mathbf{U}_H$ 升级为插值解 $\mathbf{U}^*$, $\mathbf{U}^*$ 为 $\mathbf{U}_H$ 通过线性插值得到的解; ② 因网格单元密度分布不合理导致的误差 $\delta \mathbf{U}_h$, 通过进一步加密某些特殊区域的网格才能减少。 $\mathbf{U}_h$ 、 $\mathbf{U}^*$ 和 $\delta \mathbf{U}_h$ 满足

$$\mathbf{U}^* = \mathbf{U}_h + \delta \mathbf{U}_h \quad (5)$$

由于可得真解的网格尚未计算, 因此 $\mathbf{U}_h$ 和 $\delta \mathbf{U}_h$ 均为未知量。对 $f_h(\mathbf{U}_h)$ 进行泰勒展开并忽略高阶小项, 则由 $\delta \mathbf{U}_h$ 带来的目标函数误差 δf_h 可表示为

$$\delta f_h \approx - \left. \frac{\partial f_h}{\partial \mathbf{U}_h} \right|_{\mathbf{U}^*} (\mathbf{U}_h - \mathbf{U}^*) = \left. \frac{\partial f_h}{\partial \mathbf{U}_h} \right|_{\mathbf{U}^*} \delta \mathbf{U}_h \quad (6)$$

由于细网格上控制方程残差 $\mathbf{R}_h(\mathbf{U}_h) = 0$, 对

$\mathbf{R}_h(\mathbf{U}_h)$ 关于 $\mathbf{U}^*$ 线性展开可得

$$\delta \mathbf{U}_h = \left[\left. \frac{\partial \mathbf{R}_h}{\partial \mathbf{U}_h} \right|_{\mathbf{U}^*} \right]^{-1} \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) \quad (7)$$

联合式(6)与式(7), 并引入伴随方程, 得到目标函数误差 δf_h 的表达式

$$\delta f_h \approx (\Psi_h |_{\mathbf{U}^*})^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) \quad (8)$$

式中: Ψ_h 为 $\mathbf{U}_h$ 的伴随方程解, 量化了目标函数对控制方程残差的敏感程度。 Ψ_h 同样难以计算, 由粗网格伴随解 Ψ_H 插值得到的 Ψ^* 替代。类似地, Ψ^* 与 Ψ_h 满足 $\Psi^* = \Psi_h + \delta \Psi_h$, $\delta \Psi_h$ 为网格密度分布不合理导致的误差。由 $\delta \Psi_h$ 带来的伴随方程残差误差 $\delta \mathbf{R}_\Psi$ 可表示为

$$\delta \mathbf{R}_\Psi = \mathbf{R}_\Psi(\Psi^*) = \left[\left. \frac{\partial \mathbf{R}_h}{\partial \mathbf{U}_h} \right|_{\mathbf{U}^*} \right]^T \delta \Psi_h \quad (9)$$

由式(8)和式(9), 推导目标函数的误差 δf_h 为

$$\delta f_h = (\Psi^*)^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) - \delta \Psi_h^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) \quad (10)$$

目标函数误差包含两项, 其中, $(\Psi^*)^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*)$ 是可计算误差项, $\delta \Psi_h^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*)$ 为剩余误差项, $\delta \Psi_h$ 加权了网格密度分布不合理对目标函数误差的影响。剩余误差项还可表示为伴随方程残差误差 $\delta \mathbf{R}_\Psi$ 与控制方程解误差 $\delta \mathbf{U}_h$ 的内积, 公式为

$$\begin{aligned} \delta f_h &= (\Psi^*)^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) - \delta \Psi_h^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) \approx \\ &(\Psi^*)^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) - \delta \Psi_h^T \left[\left. \frac{\partial \mathbf{R}_h}{\partial \mathbf{U}_h} \right|_{\mathbf{U}^*} \right] \delta \mathbf{U}_h = \\ &(\Psi^*)^T \mathbf{R}_h(\mathbf{U}^*) - \mathbf{R}_\Psi^T(\Psi^*) \delta \mathbf{U}_h \end{aligned} \quad (11)$$

本文将伴随方程引入变压器热-流场数值计算中, 建立网格密度分布与目标函数的数学关系, 定量刻画了网格密度分布不合理对目标函数误差的影响, 进而构造自适应参数, 为网格自适应加密提供更合理的判据。

1.3 网格剖分质量的自适应指示规则

定义单元自适应参数 ϵ_m 为单元 m 可能产生的剩余误差最大值, 即两种剩余误差绝对值之和的平均值。由于实际计算中无法求得 $\delta \mathbf{U}_h$ 和 $\delta \Psi_h$, 因此通过粗网格解的高、低阶插值的差近似。 ϵ_m 的计算公式为

$$\begin{aligned} \epsilon_m &= \\ &\frac{1}{2} \sum_{n(m)} \{ |(L_B \Psi_H - L_A \Psi_H)_{n(m)}^T \cdot [\mathbf{R}_\Psi(L_A \mathbf{U}_H)]_{n(m)}| + \\ &\quad \{ | [\mathbf{R}_\Psi(L_A \Psi_H)]_{n(m)}^T \cdot (L_B \mathbf{U}_H - L_A \mathbf{U}_H)_{n(m)} | \} \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: L_A 和 L_B 分别为低阶与高阶插值算子; $n(m)$ 为粗网格单元 m 的插值点集。三角形和四边形网格单元的插值点集包含 4 个点, 取点方式如图 1 所示。在单元内, 相邻边(三角形网格)或对边(四边形网

格)中点的连线将原网格单元分割为4个子单元,子单元中心点即为插值点(蓝色点)。

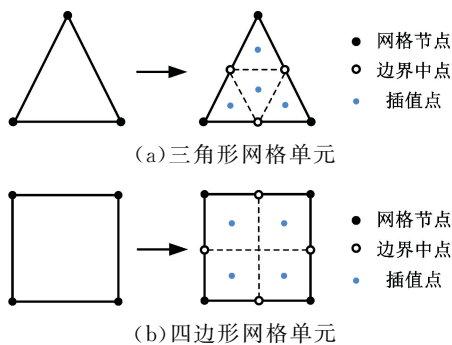


图1 单元插值点集示意图

Fig. 1 Schematic of interpolated points for a cell

在自适应过程中,目标函数作为热-流场解的代表参数,其剩余误差需正确反映所求场量的计算误差对单元密度变化的敏感度。选取单位时间内传热量 Q 作为目标函数,可描述为

$$Q = \int_{c_p} \Delta T \rho V dS \quad (13)$$

自适应参数根据指示规则确定需要加密的网格单元,指示规则为

$$\begin{cases} \epsilon_m > 30 \\ \epsilon_m > 0.5Q_m \end{cases} \quad (14)$$

式中: ϵ_m 和 Q_m 分别表示网格 m 的自适应参数和目标函数值。当网格自适应参数满足式(14)时,指示该网格需要加密。自适应参数与指示规则共同构成变压器热-流场耦合计算的误差指示器。

1.4 方法实施流程

自适应网格剖分以仿真结果为依据,通过迭代逐步加密网格。变压器热-流场数值仿真计算中伴随网格自适应剖分方法的实施流程如图2所示,具体实施流程如下。

(1)令迭代次数 $k=0$,根据变压器几何模型设定网格单元尺寸,以均匀剖分方式分散求解域,生成初始网格。构建变压器热-流场耦合仿真模型,计算变压器内部温度和油流速分布。

(2)以绕组平均温度作为参考温度,由热-流场仿真结果计算迭代 k 次后的参考温度 T_k 。若相邻两次迭代的参考温度差大于阈值 θ_w ,则认为当前网格不符合计算准确度和网格独立性要求,继续步骤(3)和(4);否则,结束迭代。

(3)进入伴随网格自适应的实施流程, $k = k + 1$ 。提取各网格单元中心的参数值,代入相应的计算

式,求解伴随方程,得到各网格单元的伴随解,并计算各单元的自适应参数和目标函数值,依据自适应规则筛选待加密网格单元。

(4)依照加密规则和方法生成加密网格,应用加密网格构建热-流场耦合仿真模型,重复步骤(2)和步骤(3),直至计算结果满足准确度要求。

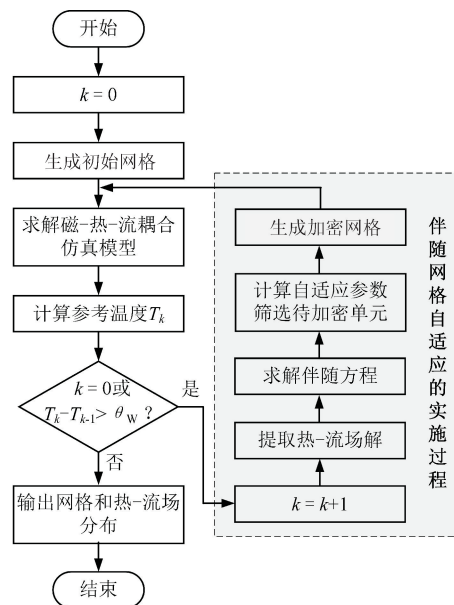


图2 伴随网格自适应剖分方法的实施流程

Fig. 2 Procedure for adjoint-based mesh adaptation

2 变压器热-流场仿真模型与验证

2.1 二维仿真模型

以铁心中心轴为对称轴,依据变压器结构图纸等尺寸建立变压器中间相的二维圆柱轴对称模型,如图3所示。模型包含铁心、高压绕组、低压绕组、油箱壁、散热器和构成绕组内主要油流通道的结构(绝缘筒、铁轭绝缘和角环)。考虑到绕组水平油道对线饼温升的影响,绕组结构被细分至饼级,散热器与变压器油箱连通,形成了闭合的油流循环回路。

2.2 数值计算方法

稳态热-流场仿真数值计算主要包含网格划分、材料物性参数及热源计算和边界条件设置3部分。

2.2.1 网格划分

针对变压器内部不同传热区域的计算需要,采用不同尺寸的网格剖分。计算不同网格尺寸下的绕组平均温度,并选为参考量,验证网格的独立性。判定网格质量已满足计算精度的原则是参考温度在较小范围(小于 0.5°C)内波动。

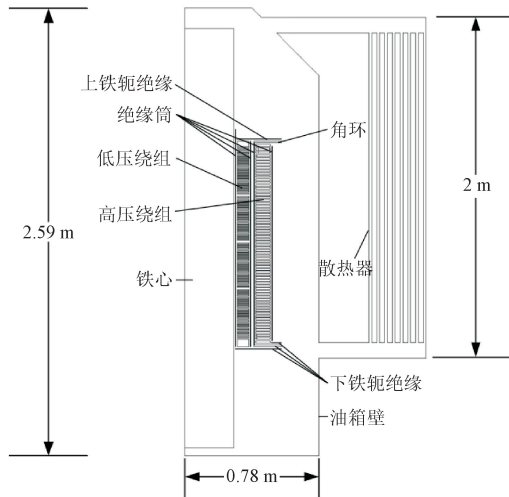


图 3 变压器二维几何模型

Fig. 3 2D geometric model of the transformer

2.2.2 材料物性参数及热源计算

变压器采用矿物油作为绝缘及冷却介质,其物理特性会随温度产生变化。矿物油的密度 ρ 、比定压热容 c_p 、热导率 λ 和动力黏度 μ 与绝缘油温度 T 的函数关系式分别为

$$\rho(T) = 1093 - 0.826T + 3.612 \times 10^{-4} T^2 \quad (15)$$

$$c_p(T) = -1.522 \times 10^{-3} T^2 + 5.191T + 455.9 \quad (16)$$

$$\lambda(T) = -7.645 \times 10^{-5} T + 0.1538 \quad (17)$$

$$\mu(T) = 7.863e^{\frac{632}{T-176}} \times 10^{-5} \quad (18)$$

变压器内的固体结构材料包含线饼、铁心和绝缘结构,分别由铜、硅钢片和纤维素构成。各材料的物理特性参数见表 1。

表 1 固体材料物性参数

Table 1 Physical properties of solid materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
铜	8 978	381	387.60
硅钢片	7 550	446	51.90
纤维素	1 400	1 600	0.15

设置的热源参数为体功率密度,即损耗与产热部件的体积之比。计算得到铁心、高压线饼和低压线饼在额定负荷下的热源密度分别为 5 800.0、136 519.9、194 656.7 W/m^3 。

2.2.3 边界条件设置

由于几何模型提供了闭合的油流循环路径,油流速分布可由控制方程自行求解,无需在散热器出入口设定速度边界。因此,仅在流/固交界面设定两

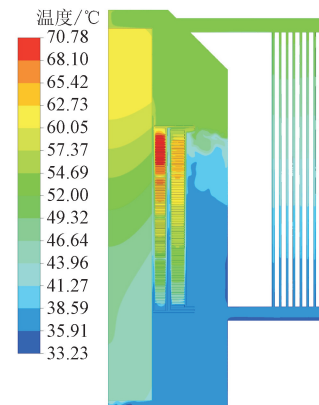
种壁面边界。

(1)流固耦合壁面:即变压器内部油流与固体结构的接触面,壁面传热系数及传热量由软件根据相邻流/固单元的物理场求解结果自主计算。此类壁面均设定为无滑移壁面,即壁面邻近油流相对壁面静止。

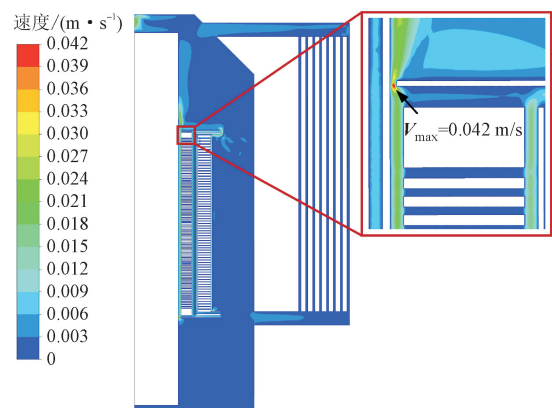
(2)对流传热壁面:设定油箱壁和散热器壁为对流传热壁面,对流系数 h 考虑热对流与热辐射的复合换热效果^[23-24],当壁面温度为 293.25 K 时, h 为 7.9 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2.3 仿真结果与温升试验结果对比

在基于有限体积法的计算流体力学仿真模拟软件中对热-流场仿真模型进行稳态计算,模拟额定工况下变压器内部温度和油流速分布。迭代 15 000 步后计算达到收敛,计算时间长达 3 h,变压器温度场与速度场计算结果如图 4 所示(未采用自适应剖分方法优化)。可见,变压器内部温度分布沿轴向有明显梯度,绕组和铁心的高温区均位于部件顶部,热点温度在低压绕组,达 70.78 $^{\circ}\text{C}$ 。由图 4(b)可见,大部分绝缘油流速很低,小于 0.004 m/s ,仅在绕组垂直油道出口附近油流速较高,最高达 0.042 m/s 。



(a) 温度场

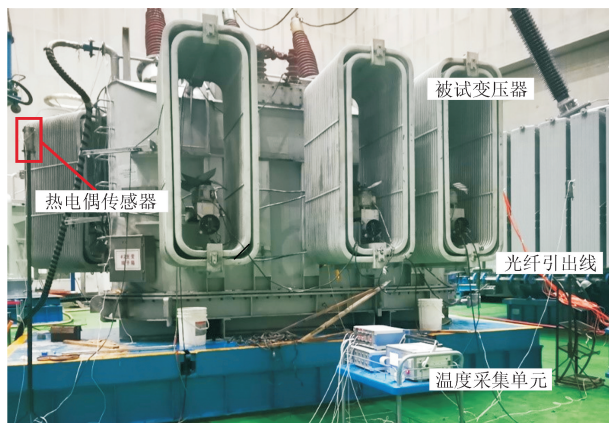


(b) 流场

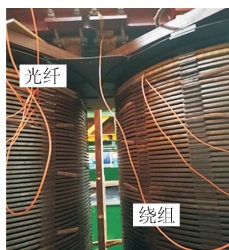
图 4 变压器温度场与流速场分布

Fig. 4 Distribution of transformer temperature and flow velocity

依据 GB/T 1094.2—2013^[26] 在变压器厂家开展了温升试验,现场布置如图 5 所示。



(a) 试验总体布置



(b) 光纤安装位置



(c) 光纤探头布置方式

图 5 温升试验现场布置

Fig. 5 Layout of the temperature rise test site

采用 8 支热电偶温度传感器和 6 根光纤传感器测量环境温度和变压器内部关键位置温升。热电偶传感器用于测量环境温度、变压器顶层油温和散热器出口温度。光纤传感器均布置在线饼间 5 号垫块中,如图 6 所示,分别测量高压绕组前 6 饼温度,线饼由上至下编号为 #1~#6。温升试验与仿真结果对比如表 2 所示,各对比参数的绝对误差均在 4℃ 以内,相对误差不超过 7%,满足工程应用中计算准确度要求。绝对误差的最大值出现在高压绕组 #1 线饼,为 -3.3℃,主要源于变压器几何模型的必要简化;相对误差的最大值为 6.9%,出现在底层油温测温点,由于底部温升幅度小,导致此处相对误差放大。

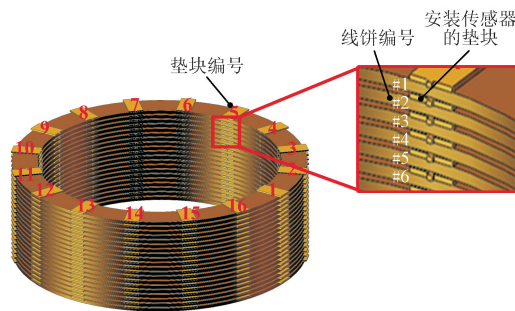


图 6 光纤传感器布置位置

Fig. 6 Arrangement location of the optical fiber sensor

表 2 温升试验与仿真结果对比

Table 2 Comparison of temperature rise of test and simulation results

参数	绝缘油		绕组		绕组线饼					
	顶层	底层	高压	低压	#1	#2	#3	#4	#5	#6
试验温度/℃	55.3	36.2	62.0	62.7	67.6	66.0	68.3	68.0	66.7	70.0
仿真温度/℃	56.1	38.7	61.3	63.1	64.3	66.1	67.1	66.9	67.4	68.2
绝对误差/℃	0.8	2.5	-0.7	0.4	-3.3	0.1	-1.2	-1.1	0.7	-1.8
相对误差/%	1.4	6.9	1.2	0.6	4.9	0.2	1.8	1.6	1.0	2.6

3 伴随网格自适应剖分方法效果验证

在三角形和四边形主导网格剖分的变压器热-流场耦合仿真模型上实施网格自适应剖分,验证本文提出方法的可行性与适应性,从计算准确度和计算速度两个方面评价优化效果。初始网格的单元尺寸为 8 mm,参考温度阈值 ϵ_T 设定为 1℃。

在三角形网格上迭代 3 次,对比不同迭代步下的参考温度,第 2 次和第 3 次迭代间的参考温度差已满足准确度要求,以迭代 2 次时生成的加密网格为输出网格。各迭代步的计算结果如图 7 所示。相比于未优化网格,迭代 2 次的网格数减少 21.9%,计算时间缩短 63.9%,单次仿真时间为 1.1 h。在网格自适应加密过程中,随着迭代次数增加,网格数逐渐

增多,计算速度相应降低,计算步数先减少后增加。当网格数较少时,各单元间热-流场解的连续性较差,控制方程在一个计算步下的求解精度降低,

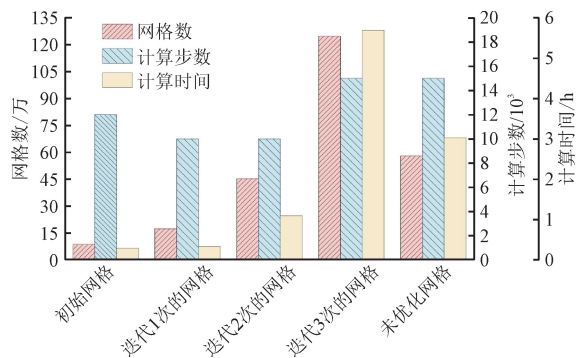


图 7 三角形主导网格优化结果

Fig. 7 Triangle mesh optimization results

导致计算步数增加;当单元数过多时,尽管小尺寸单元可以充分捕捉变压器内温度与流速的分布细节,但大多对绕组温度影响较小,网格单元的细化反而提高了方程求解的收敛难度,使计算步数增多。

迭代 2 次的三角形网格的加密区域集中在线饼端部、绕组垂直和水平油道、油箱壁与散热器的壁面边界以及绕组出口的部分油流,如图 8 所示。

表 3 列出了初始网格、迭代 2 次的三角形网格变压器内部温度计算结果与温升试验结果的对比。在初始网格下,温度绝对误差最大值出现在高压 #3 线饼,达 11.9°C ,而在迭代 2 次的网格中已降低至 1.4°C 。相比于未优化网格(表 2),迭代 2 次的网格的计算结果中,绝对误差最大值由 3.3°C 降低至 2.3°C ,表明伴随网格自适应剖分方法可在保证计算准确度基础上,实现三角形网格的自适应加密,提高计算效率。

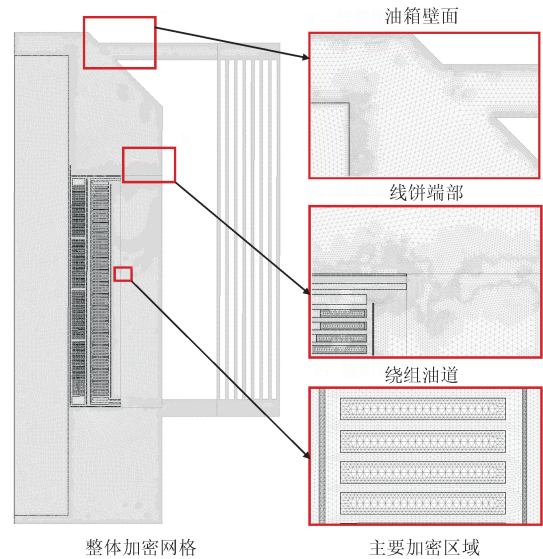


图 8 三角形主导加密网格

Fig. 8 Optimized triangle mesh

表 3 三角形加密网格计算与温升试验结果对比

Table 3 Comparison of optimized triangle mesh calculation results with temperature rise test

网格	参数	绝缘油		绕组		绕组线饼					
		顶层	底层	高压	低压	#1	#2	#3	#4	#5	#6
初始网格	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	55.3	36.2	62.0	62.7	67.6	66.0	68.3	68.0	66.7	70.0
	仿真温度/ $^{\circ}\text{C}$	55.1	45.8	69.8	69.8	76.5	77.1	80.2	78.7	75.5	76.1
	绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$	-0.2	9.6	7.8	7.1	8.9	11.1	11.9	10.7	8.8	6.1
	相对误差/%	0.4	26.5	12.6	11.3	13.2	16.8	17.4	15.7	13.2	8.7
迭代 2 次的 网格	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	55.3	36.2	62.0	62.7	67.6	66.0	68.3	68.0	66.7	70.0
	仿真温度/ $^{\circ}\text{C}$	55.9	37.6	59.8	60.9	65.7	66.1	66.9	66.5	67.1	67.7
	绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$	0.6	1.4	-2.2	1.8	-1.9	0.1	-1.4	-1.5	0.4	-2.3
	相对误差/%	1.1	3.9	3.5	2.9	2.8	0.2	2.0	2.2	0.6	3.3

以四边形主导网格作为初始网格,采用伴随网格自适应方法加密 4 次,四边形网格在第 3 次和第 4 次迭代间的参考温度差小于 0.5°C ,满足准确度要求,输出第 3 次迭代后的加密网格迭代 3 次的

网格。各迭代步的计算结果如图 9。相比于未优化网格,迭代 3 次的网格的单元数减少 38.9%,仿真时间为 1.5 h,计算时间缩短 51.4%。四边形主导网格的单元数量、计算步数与计算时间随迭代次数的变化趋势与三角形网格相同。

迭代 3 次的四边形网格的加密区域集中在线饼端部、绕组垂直油道和出油口,如图 10 所示。表 4 对比了四边形网格迭代 2 次的网格和三角形网格迭代 3 次的优化效果。

表 4 网格优化效果对比

Table 4 Comparison of mesh optimization effects

网格	网格数	计算步数	计算时间/s	最大相对温差/%
迭代 2 次的四边形网格	452 308	10 000	3 932.03	3.9
迭代 3 次的三角形网格	234 190	12 000	5 302.23	5.2
未优化网格	579 422	15 000	10 800.00	6.9

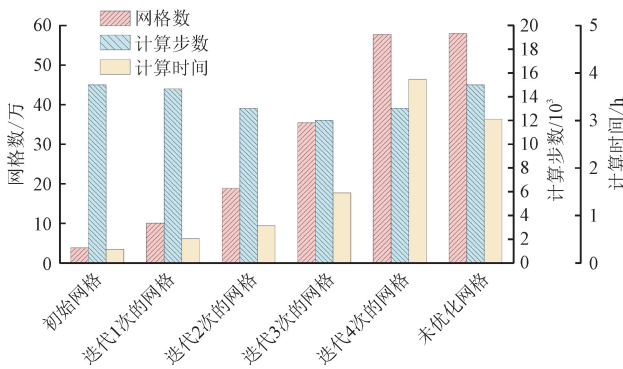


图 9 四边形主导网格优化结果

Fig. 9 Quadrilateral mesh optimization results

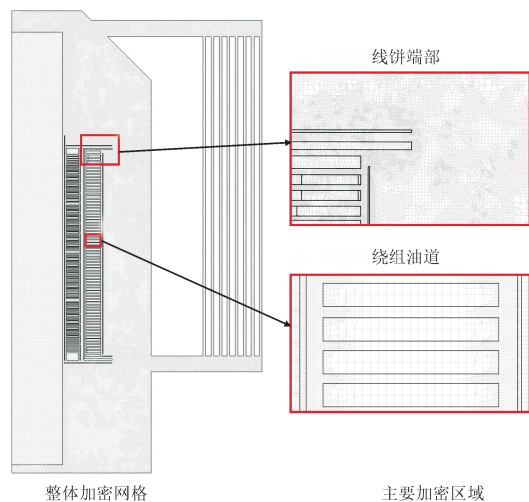


图 10 四边形主导加密网格
Fig. 10 Optimized quadrilateral mesh

由表 4 可见,四边形网格的网格数更少,但计算步数更多,耗时更长。这是因为在网格加密过程中,四边形单元外围会包裹一层三角形单元,以消除网格悬点;而新生成的三角形单元质量较低,增加了仿真的收敛难度和计算步数。同时,质量下降影响了温度计算结果的准确性。

表 5 对比了不同加密网格下的温度计算结果。采用四边形加密网格时的计算准确度大都低于三角形加密网格,表明三角形网格对当前网格加密策略的适应性更强。综上,伴随网格自适应剖分方法可在保证计算准确度的基础上提高计算效率,且适用于不同类型的二维网格,对三角形网格的优化效果更好。

表 5 网格计算结果对比
Table 5 Comparison of mesh calculation results

网格	参数	绝缘油		绕组		绕组线饼					
		顶层	底层	高压	低压	#1	#2	#3	#4	#5	#6
三角形加密网格	试验温度/℃	55.3	36.2	62.0	62.7	67.6	66.0	68.3	68.0	66.7	70.0
	仿真温度/℃	55.9	37.6	59.8	60.9	65.7	66.1	66.9	66.5	67.1	67.7
	绝对误差/℃	0.6	1.4	-2.2	1.8	-1.9	0.1	-1.4	-1.5	0.4	-2.3
	相对误差/%	1.1	3.9	3.5	2.9	2.8	0.2	2.0	2.2	0.6	3.3
四边形加密网格	试验温度/℃	55.3	36.2	62.0	62.7	67.6	66.0	68.3	68.0	66.7	70.0
	仿真温度/℃	57.1	37.7	60.5	61.6	64.1	66.4	66.7	66.5	66.9	67.4
	绝对误差/℃	1.8	1.5	-1.5	-1.1	-3.5	0.4	-1.6	-1.5	0.2	-2.6
	相对误差/%	3.3	4.1	2.5	1.8	5.2	0.6	2.3	2.2	0.3	3.7

4 结 论

(1)基于构建的二维轴对称热-流场耦合模型仿真获得变压器温度场和流速场的分布规律。仿真时间为 3 h,与温升试验结果相比,温度计算结果的最大误差小于 4℃,满足工程应用需求。

(2)基于伴随方程构建了目标函数误差与网格密度分布的定量关系,推导了网格密度分布不合理导致的目标函数误差,制定了网格自适应策略。应用于三角形网格时,二次加密后,网格计算时间比未优化网格缩短 63.9%,网格数减少 21.9%,温度最大绝对误差为 2.3℃,显著提高了变压器热-流场仿真模型的计算精度和效率。

(3)对于四边形优化网格,3 次加密后,网格数比未优化情况下减少 38.9%,仿真计算时间缩短 51.4%,最大绝对温差为 3.5℃。四边形自适应网格的计算效率和计算精度均不及三角形优化网格,且加密次数更多,综合优化效果比三角形网格差。

参考文献:

[1] 谢裕清,李琳,宋雅吾,等.油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5957-5965.
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.

[2] 丁玉琴,张乔根,高萌,等.油浸式配电变压器分布式热路模型[J].高电压技术,2019,45(3):968-974.
DING Yuqin, ZHANG Qiaogen, GAO Meng, et al. Distributed thermal circuit model of oil-immersed distribution transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 968-974.

[3] 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 7 部分:油浸式电力变压器负载导则:GB/T 1094.7—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.

[4] 胡万君,刘刚,朱章宸,等.油浸式电力变压器绕组稳态温升降阶计算方法研究[J].中国电机工程学报,2023,43(16):6505-6516.

- HU Wanjun, LIU Gang, ZHU Zhangchen, et al. Reduced order calculation method of steady temperature rise of oil immersed power transformer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(16): 6505-6516.
- [5] 王恩, 赵振刚, 曹敏, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的油浸式变压器多点温度监测 [J]. *高电压技术*, 2017, 43(5): 1543-1549.
- WANG En, ZHAO Zhengang, CAO Min, et al. Multi point temperature monitoring of oil immersed transformer based on fiber Bragg grating [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(5): 1543-1549.
- [6] BADAR M, LU Ping, WANG Qirui, et al. Real-time optical fiber-based distributed temperature monitoring of insulation oil-immersed commercial distribution power transformer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 3013-3019.
- [7] 杨志, 黄雯利, 赵丽娟. 光纤传感技术在油浸式电力变压器状态监测应用的研究进展 [J]. *高压电器*, 2023, 59(6): 137-146.
- YANG Zhi, HUANG Wenli, ZHAO Lijuan. Research progress of fiber-optic sensing technology in condition monitoring and application in oil-immersed power transformer [J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(6): 137-146.
- [8] 李元, 王晨, 张冠军. 传热学与电学问题的迁移类比研究: (2) 工程实践 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(9): 1-8.
- LI Yuan, WANG Chen, ZHANG Guanjuan. Analogical transfer between heat transfer and electrology: (2) engineering practices [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(9): 1-8.
- [9] AMODA O A, TYLAVSKY D J, MCCULLA G A, et al. Acceptability of three transformer hottest-spot temperature models [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(1): 13-22.
- [10] QIAN Tong, WEI Qianlong, YU Zeyuan, et al. Multi-parametric sensitivity analysis of improved transformer thermal models considering nonlinear effect of oil time constant [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023, 9(5): 1950-1958.
- [11] 刘刚, 靳艳娇, 马永强, 等. 基于混合法的油浸式变压器二维瞬态温度场仿真 [J]. *高压电器*, 2019, 55(4): 82-89.
- LIU Gang, JIN Yanjiao, MA Yongqiang, et al. 2-D transient temperature field simulation of oil-immersed transformer based on hybrid method [J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4): 82-89.
- [12] TORRIANO F, PICHER P, CHAABAN M. Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40: 121-131.
- [13] DAGHRAH M, ZHANG Xiang, WANG Zhongdong, et al. Flow and temperature distributions in a disc type winding: part I forced and directed cooling modes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 165: 114653.
- [14] 梁义. 自适应表面网格生成研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [15] 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.
- [16] BERGER M J, OLIGER J. Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1984, 53(3): 484-512.
- [17] 施安峰. 复杂地层油藏蒸汽注入数值模拟自适应网格法的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [18] 杨夏颢, 周春华. 目标函数误差估算及网格自适应处理 [J]. *空气动力学学报*, 2014, 32(5): 688-693.
- YANG Xiaxie, ZHOU Chunhua. Output-based error estimation and grid adaptation [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2014, 32(5): 688-693.
- [19] 杨振虎, 周磊. 基于误差估计的伴随网格自适应方法 [J]. *航空计算技术*, 2011, 41(3): 14-16.
- YANG Zhenhu, ZHOU Lei. Output-based error estimation and grid adaptive mesh refinement [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2011, 41(3): 14-16.
- [20] 杨凯. 三维欧拉流动的基于伴随方程的网格自适应模拟 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [21] BALAN A, PARK M A, ANDERSON W K. Adjoint-based anisotropic mesh adaptation for a stabilized finite-element flow solver [C]//AIAA Aviation 2019 Forum. Reston, VA, USA; AIAA, 2019; AIAA 2019-2949.
- [22] CUI Pengcheng, CHEN Jiangtao, LI Bin, et al. A wide-template and high-accuracy data transfer method for unstructured adjoint-based grid adaptation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1985(1): 012021.
- [23] 陶文铨. 传热学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [24] BÖCKH P, WETZEL T. Heat transfer: basics and practice [M]. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [25] ANDERSON J D Jr. 计算流体力学入门 [M]. 姚朝辉, 周强, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [26] 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.

(编辑 亢列梅)