第 50 卷 第 1 期：221-231 高电压技术 Vol.50, No.1: 221-231
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221664

# 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

袁发庭[1,2]，施文菀[2]，王　玥[2]，陈　炜[3]，唐　波[1,2]，姜　岚[1,2]
（1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)，宜昌 443002;
2. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002;
3. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，长沙 410007）

**摘　要**：准确计算油浸式变压器的温度分布并寻求优化方法，对设备运行维护具有重要意义。首先建立了 35 kV 油浸式变压器的 3 维等效模型，采用 Jiles-Atherton 模型模拟变压器铁芯材料的磁滞特性，通过磁场计算获取了铁芯和绕组的损耗密度分布。在此基础上将损耗密度作为热源，经过流–热耦合计算得到变压器的温度场和流场仿真结果。根据计算结果提取了铁芯、绕组区域的温度分布及截面的油流流速分布，并绘制了散热片的最高温度和流速曲线。最后结合中心组合设计和仿真分析方法得出不同散热器结构参数下的变压器热点温度，构建热点温度与结构参数间的支持向量机模型，采用粒子群算法获得了最优参数。变压器热点温度较优化前降低了 15.12 K，仿真与模型预测结果的相对误差为 6.42%，验证了优化模型的有效性。结果表明：优化方法能够显著降低变压器热点温度，为变压器的优化设计提供了新的思路和参考。

**关键词**：油浸式变压器；多物理场仿真；损耗密度；温度分布；支持向量机；散热器优化

## Temperature Characteristic Analysis and Radiator Optimization of Oil-immersed Transformer Based on Multi-physical Field Simulation

YUAN Fating[1,2], SHI Wenyu[2], WANG Yue[2], CHEN Wei[3], TANG Bo[1,2], JIANG Lan[1,2]
(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China)

**Abstract**: Accurately calculating the temperature distribution of oil-immersed transformers and seeking optimization methods are of great significance for equipment operation and maintenance. Firstly, the three-dimensional equivalent model of 35 kV oil-immersed transformer is established. The hysteresis characteristic of transformer core material is simulated by the Jiles-Atherton model, and the loss density distribution of core and windings is obtained by magnetic field calculation. On this basis, the loss density is taken as the heat source, and the temperature field and flow field simulation results of the transformer are obtained by fluid-thermal coupling calculation. According to the calculation results, the temperature distribution in the core and windings and the oil flow velocity distribution in the cross section are extracted, and the maximum temperature and velocity curves of heat sink are drawn. Finally, combined with the central composite design and simulation analysis method, the hot spot temperature of transformer under different radiator structure parameters is obtained, the support vector machine model between hot spot temperature and structure parameters is constructed, and the optimal parameters are obtained by particle swarm optimization. The hot spot temperature of the transformer is 15.12 K lower than that before optimization, and the relative error between simulation and model prediction results is 6.42%, which verifies the effectiveness of the optimization model. The results show that the optimization method can be adopted to significantly reduce the hot spot temperature of the transformer, which provides a new idea and reference for the optimization design of the transformer.

**Key words**: oil-immersed transformer; multi-physical field simulation; loss density; temperature distribution; support vector machine; radiator optimization

**基金资助项目**：湖北省教育厅科学技术研究项目 (Q20211212)；宜昌市科技计划项目 (A21-3-010)。
Project supported by Science and Technology Research Project of Department of Education of Hubei Province (Q20211212), Yichang Science and Technology Program Project (A21-3-010).

## 0 引言

变压器的使用寿命取决于油纸绝缘的老化程度，热老化是导致油纸绝缘老化的最主要因素。变压器内部温度升高会加快热老化的速率，导致绝缘性能降低，易引发设备损坏。变压器产生的热量来源于各部件的损耗，若没有良好的散热条件，变压器内部温度将会显著增加[1-2]。油浸式变压器一般是通过油箱外部的散热器进行散热，散热器性能对变压器内部温度有显著影响。因此，准确计算变压器的温度分布，分析温度特性并提出散热器优化设计方法，对变压器的运行维护具有重要意义。

近年来国内外学者在变压器温度场计算领域展开了大量研究。经验公式法[3-4]虽然计算方便，但无法考虑变压器结构对温度分布的影响。热路模型法[5-6]物理意义明确，但其参数依赖于变压器的运行数据，且模型构建较为复杂。数值模拟法因其较高的计算精度和效率，逐渐成为研究热点。文献[7-8]采用有限体积法求解传热和流体流动控制方程，模拟变压器的温度分布。文献[9-10]利用计算流体动力学模型对变压器绕组的温度特性进行了分析。文献[11]提出了基于混合有限元法的变压器流–热耦合计算方法，文献[12]在此基础上引入降阶技术提升了计算速度。文献[13-14]采用多物理场耦合分析方法获得了变压器的温度分布。文献[15-16]基于优化算法建立了变压器热点温度预测模型。现有研究大多基于 2 维、3 维简化模型对变压器温度场展开分析，难以全面反映温度和流场分布情况。另外在温度场计算过程中采用整体铁损和铜损作为热源，导致计算得出的热点与实际情况有所偏差。

为降低变压器绕组热点温度，在准确分析温度特性的基础上，提出变压器的优化设计方法，相关研究主要分为绕组和散热结构的优化。文献[17]结合计算流体动力学理论和遗传算法对干式变压器的绕组结构进行了优化。文献[18]通过正交试验和极差、方差分析获取了变压器绕组的最优结构参数。文献[19-20]对不同冷却方式下散热器的散热性能进行了数值研究。文献[21]提出了一种油浸风冷模式下散热器的流–热耦合计算模型。文献[22]考虑了散热片的几何形状对变压器内部温度和流体流动的影响。文献[23]通过响应面法实现了变压器散热结构的优化。已有研究表明，变压器优化设计方法可以有效降低热点温度，但目前对于散热结构的优化还比较盲目，未考虑到散热器结构参数与热点温度之间存在的响应关系。

本文采用多物理场仿真分析方法获取了 35 kV 油浸式变压器的温度和油流流速分布，并提出了散热器的优化设计方法。首先对变压器进行 3 维等效建模，采用 Jiles-Atherton(J-A)模型模拟铁芯材料的磁滞特性，通过磁场计算得到变压器铁芯和绕组的损耗密度分布。其次利用流–热耦合计算方法得出变压器的温度场和流场仿真结果，分析了温度分布特性和散热器散热特性。最后结合中心组合设计的思想，建立散热器结构参数与热点温度间的支持向量机模型，采用优化算法获得了最优参数，结果表明优化方法能够显著降低变压器热点温度。

## 1 变压器基本结构及等效模型

### 1.1 变压器基本结构及参数

本文研究对象为三相油浸式变压器，其主要电气参数如表 1 所示。变压器的核心部件是铁芯和绕组，铁芯由叠装在一起的冷轧硅钢片组成，绕组分为高压和低压绕组，同心绕在铁芯柱上。油箱内充满着变压器油，将铁芯和绕组浸没，起到绝缘和散热的作用。上、下集油管与散热片构成变压器的散热系统，实现油的循环冷却。

### 1.2 变压器等效模型

根据变压器实际结构参数，利用仿真软件对变压器进行 3 维等效建模。考虑到油浸式变压器内部结构复杂，为节省计算时间，对模型作出如下简化：1）将绕组等效为完全对称的圆筒式，不考虑绕组绝缘对传热和散热的影响。2）忽略夹件、垫块等结构件中产生的损耗，热源包括铁芯和绕组损耗。3）对散热片的结构及油道形状进行简化，由长方体薄片替代。变压器 3 维等效模型及内部结构如图 1 和图 2 所示，散热片组按逆时针方向依次列为组 1—6，绕组线圈分为 A、B、C 三相。

表 1 变压器主要电气参数

Table 1 Main electrical parameters of transformer

| 参数 | 数值或型号 |
|---|---|
| 型号 | SZ11-10000/35 |
| 额定容量/kVA | 10 000 |
| 额定频率/Hz | 50 |
| 电压组合 | (35±3×2.50%)/10.5 kV |
| 联结组标号 | YNd11 |
| 冷却方式 | ONAN |

## 2　变压器多物理场仿真计算

### 2.1　磁滞模型参数辨识及损耗计算

#### 2.1.1　J-A 磁滞模型参数辨识

由于变压器的损耗计算与磁场有关，为准确计算变压器磁场，采用 J-A 模型模拟铁芯材料的磁滞特性。J-A 模型是一种基于微观物理现象的磁滞模拟方法，它考虑了牵制点对磁畴磁化过程的影响，具有物理意义明确、计算方便等优点。J-A 模型按照磁畴壁形变过程将磁化强度 $M$ 分解为可逆磁化分量 $M_{\mathrm{rev}}$ 和不可逆磁化分量 $M_{\mathrm{irr}}$[24]，即：

$$M = M_{\mathrm{rev}} + M_{\mathrm{irr}} \tag{1}$$

运用改进的 Langevin 方程对无磁滞情况下的理想磁化曲线进行拟合，曲线表达式为：

$$M_{\mathrm{an}} = M_{\mathrm{s}}\left(\coth\left(\frac{H_{\mathrm{e}}}{a}\right) - \frac{a}{H_{\mathrm{e}}}\right) \tag{2}$$

式中：$M_{\mathrm{an}}$ 为无磁滞磁化强度；$M_{\mathrm{s}}$ 为饱和磁化强度；$a$ 为理想磁化曲线的形状系数；$H_{\mathrm{e}}$ 为有效磁场强度，如式(3)所示，其中 $H$ 为实际磁场强度，$\alpha$ 为磁畴耦合系数。

$$H_{\mathrm{e}} = H + \alpha M \tag{3}$$

为表征可逆磁化程度，引入可逆磁化系数 $c$，无磁滞磁化强度与可逆磁化强度的关系表示为：

$$M_{\mathrm{rev}} = c\left(M_{\mathrm{an}} - M_{\mathrm{irr}}\right) \tag{4}$$

联立式(1)—式(4)，可得磁化强度关于磁感应强度 $B$ 的微分方程[25]为：

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}B} = \frac{(1-c)\dfrac{M_{\mathrm{an}} - M_{\mathrm{irr}}}{\mu_0 k\delta} + \dfrac{c}{\mu_0}\dfrac{\mathrm{d}M_{\mathrm{an}}}{\mathrm{d}H_{\mathrm{e}}}}{1 + \mu_0(1-c)(1-\alpha)\dfrac{M_{\mathrm{an}} - M_{\mathrm{irr}}}{\mu_0 k\delta} + c(1-\alpha)\dfrac{\mathrm{d}M_{\mathrm{an}}}{\mathrm{d}H_{\mathrm{e}}}} \tag{5}$$

式中：$\mu_0$ 为真空磁导率，值为 $4\pi\times10^{-7}$ H/m；$k$ 为牵制系数；$\delta$ 为方向系数，使磁化与牵制过程呈反向。当 $\mathrm{d}H/\mathrm{d}t>0$ 时，$\delta=1$；当 $\mathrm{d}H/\mathrm{d}t<0$ 时，$\delta=-1$。

根据硅钢片磁滞实验测量数据，采用差分进化算法辨识得到 J-A 磁滞模型的 5 个特征参数，辨识结果如表 2 所示。利用 J-A 模型生成的 $B$–$H$ 曲线与原始曲线对比如图 3 所示。

差分进化算法的均方根误差随迭代次数的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知，均方根误差约迭代 110 次后曲线收敛，误差的具体数值为 2.55，验证了算法辨识参数的有效性。

#### 2.1.2　损耗计算

为获取额定负载情况下的损耗分布，绕组线圈激励电流为额定电流，高压和低压绕组的额定电流

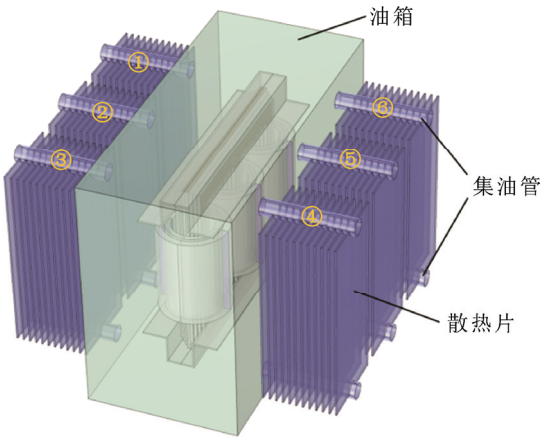



图 1　变压器 3 维等效模型

Fig.1　Three-dimensional equivalent model of transformer

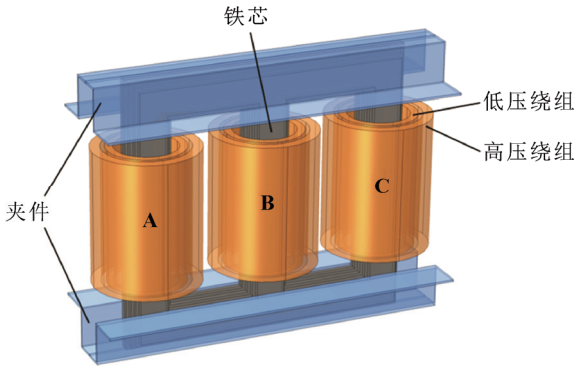



图 2　变压器内部结构

Fig.2　Internal structure of transformer

表 2　J-A 模型参数辨识结果

Table 2　Parameter identification results of J-A model

| 参数 | $M_{\mathrm{s}}$ | $\alpha$ | $a$ | $c$ | $k$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | $1.798\times10^{6}$ | $4.555\times10^{-5}$ | 18.688 | 0.204 | 34.477 |

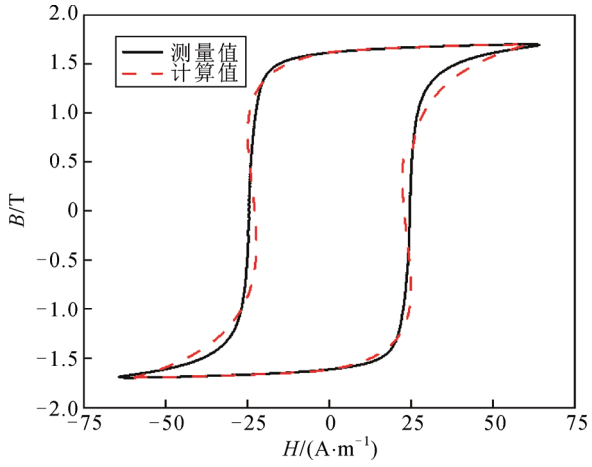



图 3　$B$-$H$ 曲线对比图

Fig.3　Comparison diagram of $B$-$H$ curve

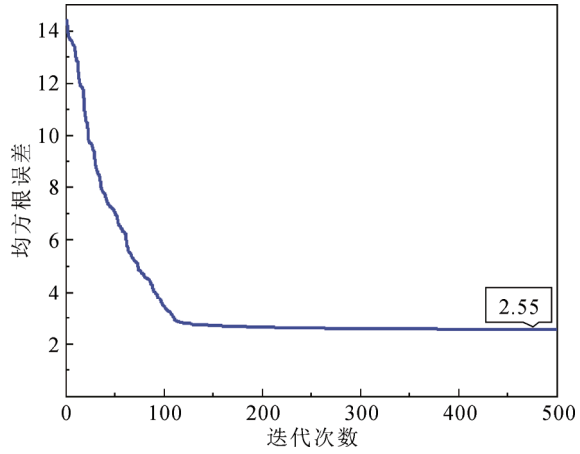



图 4 均方根误差变化曲线

Fig.4 Root mean square error variation curve

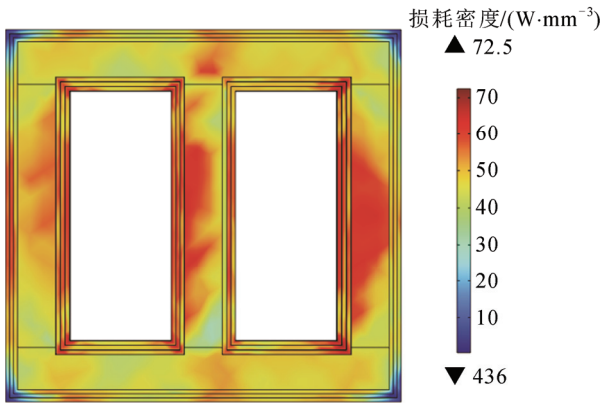



图 5 铁芯体积损耗密度分布

Fig.5 Volume loss density distribution of core

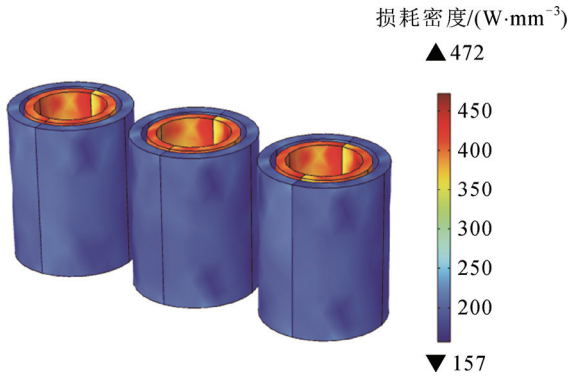



图 6 绕组体积损耗密度分布

Fig.6 Volume loss density distribution of windings

值分别为 165.0 A 和 549.9 A。基于 J-A 模型及其参数辨识结果，求解电磁场方程可以得到与损耗计算有关的物理量。铁芯损耗采用 Steinmetz 损耗模型进行计算，其主要考虑铁芯损耗密度与材料属性、磁化频率及磁通密度幅值有关，表达式[26]为：

$$Q_{\mathrm{c}} = k_{\mathrm{h}} f^{\alpha} B_{\mathrm{m}}{}^{\beta} \tag{6}$$

式中：$Q_{\mathrm{c}}$ 为铁芯损耗密度；频率和磁密幅值用 $f$ 和 $B_{\mathrm{m}}$ 表示；$k_{\mathrm{h}}$、$\alpha$ 和 $\beta$ 为损耗系数，一般通过拟合实验数据得到的损耗曲线获取具体数值。

忽略漏磁通的影响，绕组损耗仅考虑电阻损耗，绕组的电阻热计算式为：

$$Q_{\mathrm{w}} = \frac{1}{T_{\mathrm{w}}} \int_{t_{\mathrm{end}}-t}^{t_{\mathrm{end}}} J \cdot E \mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：$Q_{\mathrm{w}}$ 为绕组损耗密度；$T_{\mathrm{w}}$ 为周期；$J$ 为体电流密度；$E$ 为电场强度；$t$ 为时间值；$t_{\mathrm{end}}$ 为终止时间。

根据上述计算式可以获得一个周期内铁芯和绕组具体的损耗变化，通过计算周期内的平均发热功率，即可得到铁芯和绕组的损耗密度分布，如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知，铁芯心柱和内拐角处损耗密度较大，端角处损耗密度较小，铁芯平均损耗密度为 $4.81\times10^4$ W/m$^3$。绕组损耗密度沿轴向和径向呈不均匀分布，低压绕组的损耗密度高于高压绕组，低压和高压绕组的平均损耗密度分别为 $4.07\times10^5$ W/m$^3$ 和 $1.91\times10^5$ W/m$^3$。

## 2.2 流场-温度场仿真计算

### 2.2.1 变压器传热过程分析

油浸式变压器按照电压等级高低和容量大小可采用不同的冷却方式，本文所研究的变压器采用油浸自冷式。变压器的传热过程分为 3 种形式，分别是热传导、热对流和热辐射。

首先变压器运行时各部件产生损耗，通过热传导使部件外表面温度升高；其次变压器油流经外表面发生热对流使得油温相应升高，导致被加热的油流密度减小流至油箱的顶部；最后油流经上集油管流入散热片与外界空气发生对流换热，冷却后经下集油管重新流入油箱，形成变压器的循环流路。同时，变压器油流经油箱壁时使壁面温度升高，油箱壁与外界空气也会发生热对流。在传热过程中，热辐射发生于所有存在温度差的物体之间。油浸式变压器的传热过程如图 7 所示。

### 2.2.2 流-热耦合控制方程

流体流动和传热的数值问题需要遵循质量、动量和能量守恒定律，其中描述流体动量守恒的控制方程又称为 Navier-Stokes 方程，是流体流动建模的核心。由于变压器油处于自然循环状态，油流流速较低，对应的雷诺数较小，故将其视为层流流动。

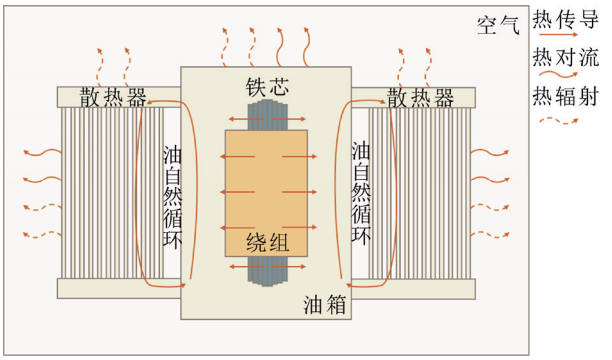



图 7　油浸式变压器的传热过程

Fig.7　Heat transfer process of oil-immersed transformer

变压器流–热耦合计算的控制方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{v})=0 \tag{8}$$

$$\rho\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t}+\rho\boldsymbol{v}\cdot\nabla\boldsymbol{v}=-\nabla p+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}+\boldsymbol{F}+\rho\boldsymbol{g} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{\tau}:\nabla\boldsymbol{v}=\nabla\cdot(\boldsymbol{\tau}\cdot\boldsymbol{v})-\boldsymbol{v}\cdot(\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}) \tag{10}$$

$$\rho c_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho c_{\mathrm{p}}\boldsymbol{v}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(k_{\mathrm{t}}\nabla T)-p\nabla\cdot\boldsymbol{v}+\boldsymbol{\tau}:\nabla\boldsymbol{v}+Q \tag{11}$$

式中：$\rho$ 为流体密度；$\boldsymbol{v}$ 为速度矢量；$p$ 为流体压力；$\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量；$\boldsymbol{F}$ 为外力；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度；$c_{\mathrm{p}}$ 为恒压热容；$T$ 为温度，K；$k_{\mathrm{t}}$ 为导热系数；$Q$ 为内热源；$\nabla$ 为哈密顿算子。

### 2.2.3　材料属性设置

对变压器的主要部件设置材料属性，如表 3 所示，其中铁芯和绕组分别添加硅钢片和铜，油箱和散热器中的流体材料为变压器油。变压器流–热耦合计算很大程度上受油的热物性影响，故将变压器油的热物性参数设定成随温度变化的关系式。

### 2.2.4　边界条件设置

由变压器的传热过程可知，油箱和散热片外表面与外界空气发生对流换热，计算得到各表面的对流换热系数 $h$ 如表 4 所示[27]。设定初始温度 $T_0$ 和室温为 298.15 K，油流初始流速 $v_0$ 为 0，流体壁面无滑移。流场计算中包含重力，重力加速度沿 $z$ 轴负方向为 9.8 m/s$^2$。边界条件示意图如图 8 所示。

### 2.2.5　网格划分

网格大小、形状与模型的几何结构有关，为保证较高的计算精度，采用非结构化网格进行划分。整体以自由四面体网格为主，在边界位置划分边界层网格。变压器油的流动对传热过程影响显著，包含油箱和散热器在内的流体域网格较为密集，且在结构衔接处和边界位置网格又进一步加密。网格划分示意图如图 9 所示，完整网格包括 700 836 个域单元、166 840 个边界单元及 23 006 个边单元。

表 3　材料属性参数

Table 3　Material property parameters

| 材料 | 参数 | 数值或表达式 |
|---|---|---|
| 硅钢片(铁芯) | 导热系数/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | 72 |
| | 恒压热容/(J·kg$^{-1}$·K$^{-1}$) | 446 |
| | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 7550 |
| 铜(绕组) | 导热系数/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | 400 |
| | 恒压热容/(J·kg$^{-1}$·K$^{-1}$) | 385 |
| | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 8940 |
| 变压器油 | 导热系数/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | $0.13–8.05\times10^{-5}T$ |
| | 恒压热容/(J·kg$^{-1}$·K$^{-1}$) | $-13\,408.15+123.04T-0.34T^2+3.13\times10^{-4}T^3$ |
| | 密度/(kg·m$^{-3}$) | $1\,055.05-0.58T-6.41\times10^{-5}T^2$ |
| | 动力黏度/(Pa·s) | $91.45-1.33T+7.78\times10^{-3}T^2-2.27\times10^{-5}T^3$ |

表 4　变压器表面对流换热系数

Table 4　Convective heat transfer coefficient on the surface of transformer

| 对流换热系数 $h$ | 油箱顶部 $h_1$ | 油箱侧面 $h_2$ | 油箱底部 $h_3$ | 散热片 $h_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 数值/(W·m$^{-2}$·K$^{-1}$) | 4.0 | 6.0 | 3.3 | 9.6 |

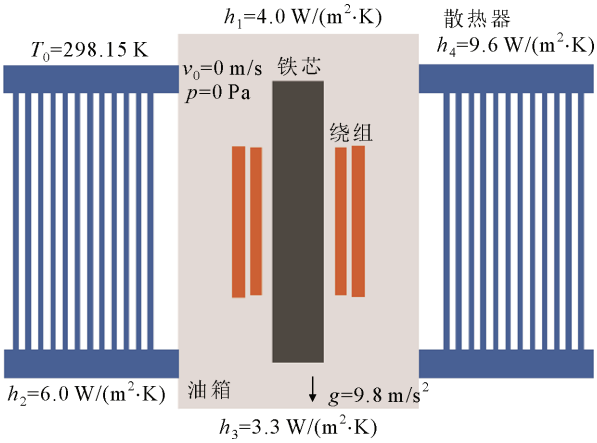



图 8　边界条件示意图

Fig.8　Boundary condition schematic diagram

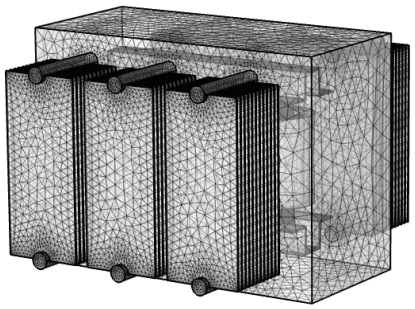


图 9　网格划分示意图

Fig.9　Schematic diagram of mesh division

2.2.6 温度场仿真结果

将变压器铁芯和绕组的损耗密度作为热源，经流–热耦合计算可得到变压器的整体温度分布，如图 10 所示。由图 10 可知，变压器热点温度为 362.46 K，温升为 64.31 K，油箱表面温度明显高于散热片温度。由于散热条件较差，处于中间位置的散热片组温度略高于两侧的散热片组。

2.2.7 流场仿真结果

通过求解流体流动控制方程，可得变压器的流场仿真结果，整体油流流速分布如图 11 所示，油流最大流速为 0.529 m/s。变压器油与铁芯、绕组表面接触，被加热后向上流动，在油箱中上部形成部分涡流，经油箱壁和散热片冷却后又流回油箱底部，实现整个循环流动过程。

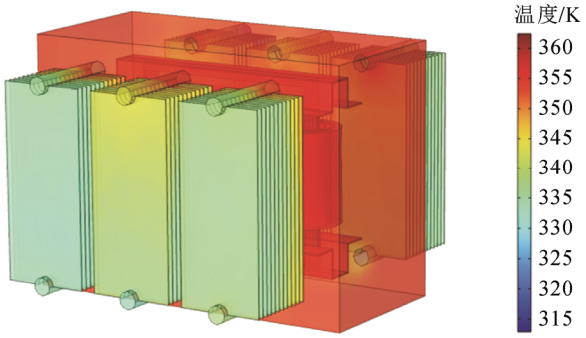



图 10 变压器整体温度分布

Fig.10 Overall temperature distribution of transformer

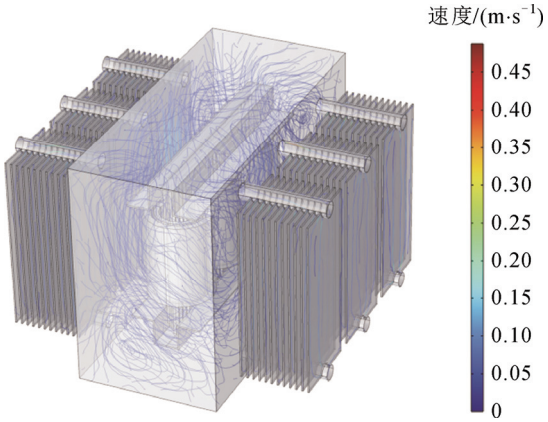



图 11 变压器油流流速分布

Fig.11 Oil flow velocity distribution of transformer

## 3 变压器温度分布及散热特性分析

### 3.1 变压器温度分布特性分析

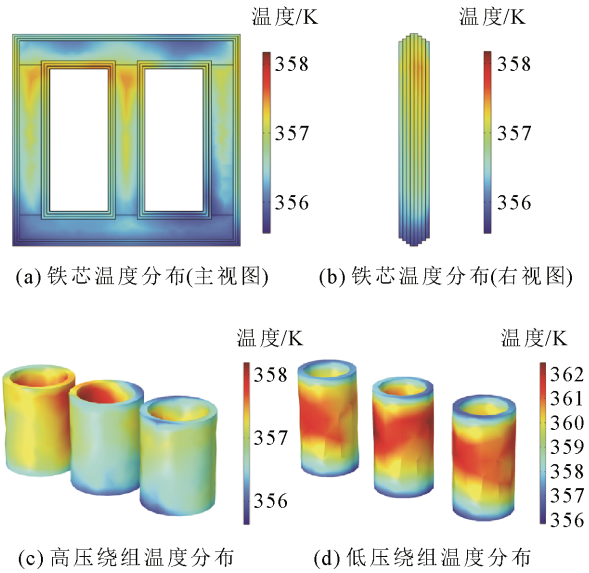
3.1.1 变压器温度场分析

根据变压器的温度场仿真结果，提取了铁芯和绕组区域的温度分布，如图 12 所示。由图 12 可知，变压器的热点位于低压绕组 B 相线圈中上端。变压器油与铁芯、绕组发生热交换后向上流动，油箱顶部的油流通过油箱壁与空气发生热对流，散失了部分热量，因此热点出现在绕组线圈的中上端。

铁芯最高温度为 358.17 K，温升为 60.02 K，位于 B 相心柱上端中心位置，下铁轭端角处温度偏低。高压绕组整体温差较小，A 相线圈温度略高于其他两相，且线圈相邻位置温度偏高。低压绕组三相线圈温度分布趋势相近，绕组端部温度偏低。由于低压绕组位于高压绕组内侧，散热效果较差，低压绕组总体温升大于高压绕组。

3.1.2 变压器流场分析

为更好地分析变压器油的流动和传热情况，截取了 *YOZ* 和 *XOZ* 平面的油流流速分布，如图 13 和 14 所示。从图中可以得到，在有散热器布置的 *YOZ* 平面油流总体流速更大，且高压绕组 A 相线圈附近有明显的涡流现象，直接导致 A 相线圈表面温度略高于其他两相。




(a) 铁芯温度分布(主视图) (b) 铁芯温度分布(右视图)

(c) 高压绕组温度分布 (d) 低压绕组温度分布

图 12 铁芯和绕组温度分布

Fig.12 Temperature distribution of core and windings

### 3.2 散热器散热特性分析

散热器的冷却效果对变压器温度分布有显著影响，对散热器的散热特性进行分析，可以为优化设计提供依据。选择变压器一侧的 3 组散热片作为研究对象，散热片序号离油箱壁距离由近及远可依次标为 1—12 号，在散热片中心位置绘制水平截线，如图 15 所示。根据散热片沿截线的温度和油流流速分布，绘制了各散热片组的最高温度和流速曲线，如图 16 和 17 所示。

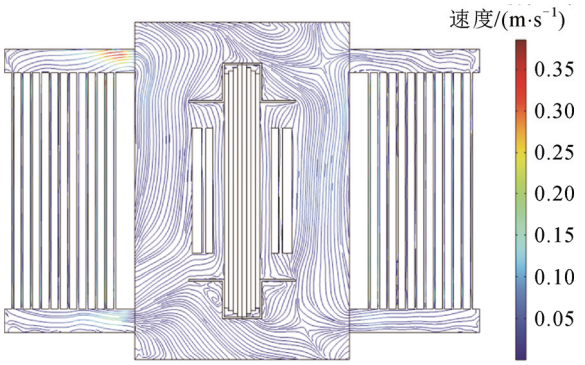



图 13　*YOZ* 平面油流流速分布

Fig.13　Oil flow velocity distribution in *YOZ* plane

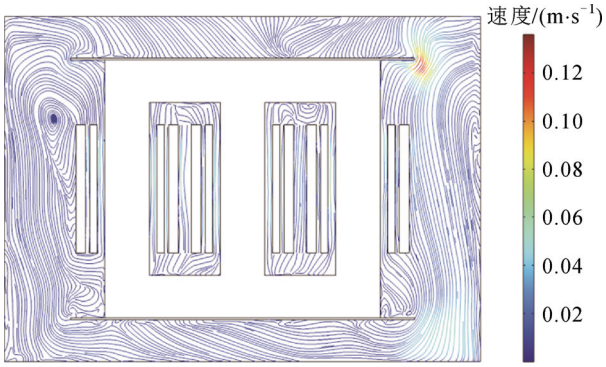



图 14　*XOZ* 平面油流流速分布

Fig.14　Oil flow velocity distribution in *XOZ* plane

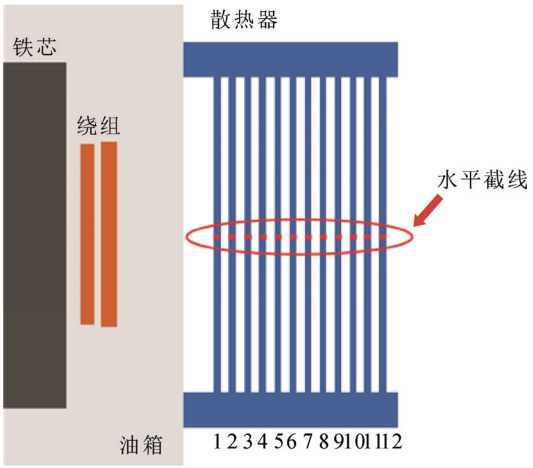



图 15　3 维截线选取

Fig.15　Three-dimensional cut line selection

由散热片最高温度曲线可知，靠近油箱侧的散热片温度偏高，且各散热片之间温度差值较大，远离油箱侧的散热片温度偏低。3 组散热片的最高温度分别为 348.23 K、346.17 K 和 341.55 K，分别位于 4 号、3 号和 1 号散热片。

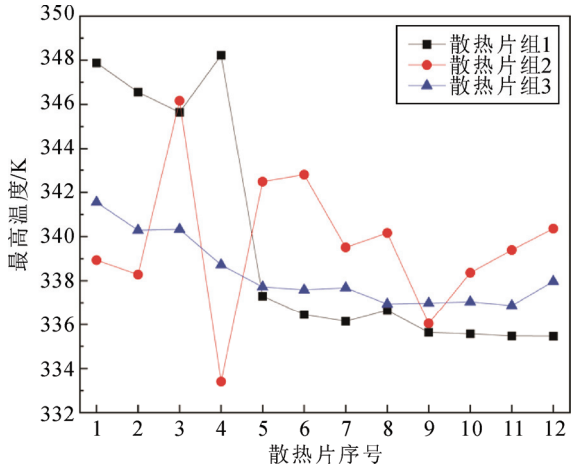



图 16　散热片最高温度曲线

Fig.16　Maximum temperature curve of heat sink

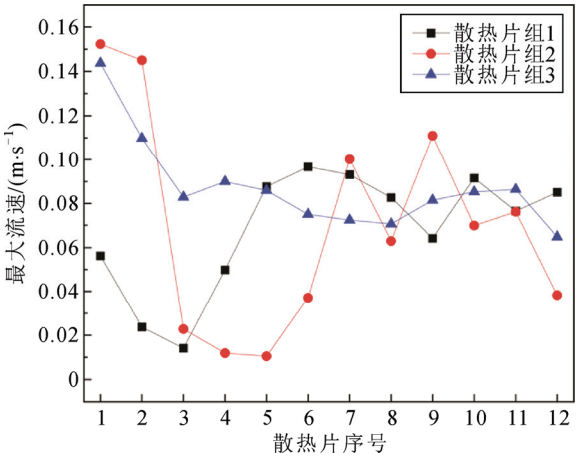



图 17　散热片最大流速曲线

Fig.17　Maximum flow velocity curve of heat sink

由散热片最大流速曲线可知，靠近油箱侧的各散热片之间油流流速差异较为明显，远离油箱侧的各散热片之间流速差值较小。散热片组 1 的最大流速为 0.097 m/s，位于 6 号散热片。散热片组 2 和组 3 的最大流速分别为 0.152 m/s 和 0.144 m/s，均位于 1 号散热片。

## 4　油浸式变压器散热器优化设计

为降低变压器绕组热点温度和实现最优的冷却配置，考虑到散热器对变压器散热效果的影响，对散热器结构参数进行优化设计，具体的优化流程如图 18 所示。

首先确定优化目标和约束条件，选取散热器结构参数作为优化变量，并确定变量的取值范围；其次结合中心组合设计和有限元仿真方法，计算不同

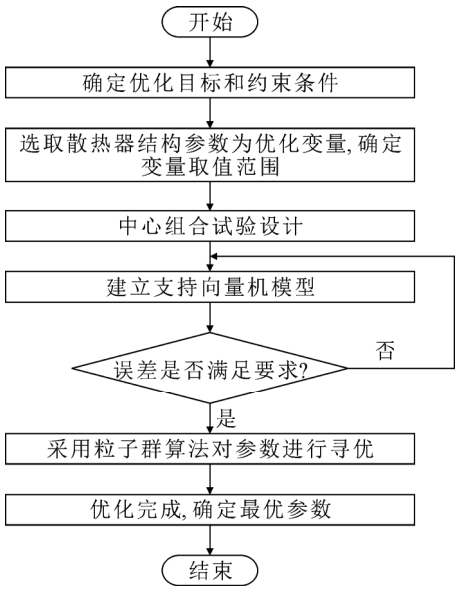



图 18 散热器结构优化流程

Fig.18 Radiator structure optimization process

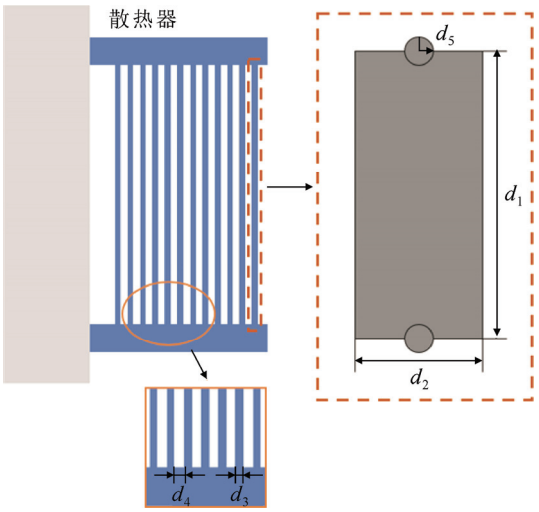



图 19 散热器结构参数选取

Fig.19 Radiator structure parameter selection

表 5 优化变量取值范围

Table 5 The value range of optimization variables

| 优化变量 | 取值范围 |
|---|---|
| $d_1$/m | [1.28,1.36] |
| $d_2$/m | [0.56,0.6] |
| $d_3$/m | [0.008,0.012] |
| $d_4$/m | [0.033,0.041] |
| $d_5$/m | [0.056,0.064] |

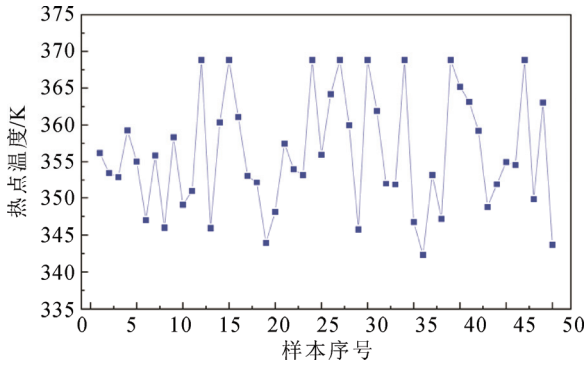



图 20 试验样本热点温度曲线

Fig.20 Hot spot temperature curve of test sample

散热器结构参数下的变压器热点温度；最后根据试验数据建立支持向量机模型，当模型误差满足要求时，采用粒子群算法对参数进行寻优。确定最优的散热器结构参数，并利用仿真方法进行验证。

### 4.1 优化变量选取

变压器热点温度能直接反映散热器散热效果，因此以最大程度降低热点温度作为优化目标。根据散热器的结构特点，筛选出可能影响散热器散热效果的结构参数作为优化变量，主要为散热片的高度、宽度、厚度、散热片间距以及集油管半径，分别用 $d_1$—$d_5$ 表示。散热器结构参数选取示意图见图 19。

参考变压器实际的几何结构和加工需求，以绝缘性能要求为约束条件，确定各优化变量的取值范围如表 5 所示。

### 4.2 中心组合试验设计

根据优化变量的取值范围，选用中心组合设计方法进行试验，该方法能够基于较少的试验次数获取建立回归模型的有效数据。通过流-热耦合计算可以得到不同散热器结构参数下的变压器热点温度 $T_{max}$，生成的试验样本矩阵及热点温度计算结果如表 6 所示，由此绘制的热点温度曲线如图 20 所示。从图 20 可得，所有试验样本中变压器热点温度最高为 368.83 K，最低为 342.32 K，散热器结构参数对变压器热点温度有显著影响。

### 4.3 支持向量机模型建立

支持向量机(support vector machine，SVM)是一种机器学习算法，通过结构风险最小化原理实现了良好的泛化性能。随着不敏感损失函数 $\varepsilon$ 的引入，SVM 逐渐应用于解决非线性回归估计问题。它的基本原理是寻找非线性映射 $\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x})$将输入空间中的样本 $x$ 映射到高维特征空间 $F$，在高维特征空间中进行线性回归。

SVM 模型的输入量 $x_i$ 包含全部散热器结构优化变量 $d_1$—$d_5$，输出量 $y_i$ 为变压器热点温度 $T_{max}$。

表 6　试验样本热点温度计算结果

Table 6　Hot spot temperature calculation results of test samples

| 序号 | $d_1$/m | $d_2$/m | $d_3$/cm | $d_4$/cm | $d_5$/m | $T_{max}$/K |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.303 | 0.572 | 0.92 | 3.87 | 0.062 | 356.19 |
| 2 | 1.337 | 0.572 | 1.08 | 3.87 | 0.062 | 353.46 |
| 3 | 1.303 | 0.588 | 1.08 | 3.87 | 0.058 | 352.89 |
| 4 | 1.303 | 0.588 | 0.92 | 3.87 | 0.058 | 359.26 |
| 5 | 1.303 | 0.572 | 0.92 | 3.53 | 0.058 | 355.02 |
| 6 | 1.320 | 0.560 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 346.97 |
| 7 | 1.303 | 0.588 | 0.92 | 3.87 | 0.062 | 355.85 |
| 8 | 1.337 | 0.588 | 1.08 | 3.87 | 0.058 | 345.99 |
| 9 | 1.320 | 0.580 | 0.80 | 3.70 | 0.060 | 358.34 |
| 10 | 1.303 | 0.572 | 1.08 | 3.87 | 0.058 | 349.07 |
| 11 | 1.320 | 0.600 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 350.92 |
| 12 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 13 | 1.303 | 0.572 | 0.92 | 3.87 | 0.058 | 345.91 |
| 14 | 1.337 | 0.572 | 0.92 | 3.87 | 0.062 | 360.35 |
| 15 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 16 | 1.337 | 0.588 | 1.08 | 3.53 | 0.062 | 361.09 |
| 17 | 1.303 | 0.588 | 0.92 | 3.53 | 0.062 | 353.06 |
| 18 | 1.303 | 0.572 | 1.08 | 3.53 | 0.058 | 352.13 |
| 19 | 1.337 | 0.588 | 0.92 | 3.53 | 0.062 | 343.94 |
| 20 | 1.320 | 0.580 | 1.20 | 3.70 | 0.060 | 348.08 |
| 21 | 1.303 | 0.572 | 0.92 | 3.53 | 0.062 | 357.46 |
| 22 | 1.337 | 0.572 | 0.92 | 3.53 | 0.058 | 353.96 |
| 23 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.056 | 353.17 |
| 24 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 25 | 1.337 | 0.572 | 1.08 | 3.87 | 0.058 | 355.95 |
| 26 | 1.303 | 0.588 | 1.08 | 3.87 | 0.062 | 364.18 |
| 27 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 28 | 1.337 | 0.572 | 0.92 | 3.53 | 0.062 | 359.98 |
| 29 | 1.337 | 0.572 | 1.08 | 3.53 | 0.058 | 345.75 |
| 30 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 31 | 1.337 | 0.572 | 0.92 | 3.87 | 0.058 | 361.93 |
| 32 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 4.10 | 0.060 | 351.96 |
| 33 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.064 | 351.86 |
| 34 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 35 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.30 | 0.060 | 346.71 |
| 36 | 1.337 | 0.588 | 1.08 | 3.87 | 0.062 | 342.32 |
| 37 | 1.337 | 0.572 | 1.08 | 3.53 | 0.062 | 353.18 |
| 38 | 1.337 | 0.588 | 0.92 | 3.87 | 0.062 | 347.15 |
| 39 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 40 | 1.303 | 0.588 | 1.08 | 3.53 | 0.062 | 365.15 |
| 41 | 1.337 | 0.588 | 1.08 | 3.53 | 0.058 | 363.15 |
| 42 | 1.360 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 359.22 |
| 43 | 1.303 | 0.588 | 1.08 | 3.53 | 0.058 | 348.77 |
| 44 | 1.337 | 0.588 | 0.92 | 3.53 | 0.058 | 351.88 |
| 45 | 1.280 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 354.95 |
| 46 | 1.303 | 0.588 | 0.92 | 3.53 | 0.058 | 354.53 |
| 47 | 1.320 | 0.580 | 1.00 | 3.70 | 0.060 | 368.83 |
| 48 | 1.337 | 0.588 | 0.92 | 3.87 | 0.058 | 349.82 |
| 49 | 1.303 | 0.572 | 1.08 | 3.53 | 0.062 | 363.07 |
| 50 | 1.303 | 0.572 | 1.08 | 3.87 | 0.062 | 343.69 |

将试验样本分为 10 组，其中 9 组为训练集，1 组为测试集，$n$ 为训练样本数。采用式(12)来估计函数，其中 $\boldsymbol{w}$ 为权值向量，$b$ 为偏差。

$$y = f(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}) + b \tag{12}$$

通过引入不敏感损失函数 $\varepsilon$ 和松弛因子$\xi_i$、$\xi_i^*$构建结构风险目标函数，寻找使目标函数极小化的 $\boldsymbol{w}$ 和 $b$ 的值[28]，即：

$$\begin{cases} \min\left\{\dfrac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2 + C\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\xi_i + \xi_i^*\right)\right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}_i) - y_i + b \le \varepsilon + \xi_i^* \\ y_i - \boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}_i) - b \le \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i^* \ge 0, \xi_i \ge 0 \end{cases} \end{cases} \tag{13}$$

式中：$C$ 为惩罚常数，用于平衡经验风险与正则化部分，$C$>0。

引入拉格朗日乘子 $\alpha_i$、$\alpha_i^*$ 使得优化问题转化为等效的对偶形式[29]，即：

$$\begin{cases} \max\left\{-\varepsilon\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\alpha_i^* + \alpha_i\right) + \sum\limits_{i=1}^{n} y_i\left(\alpha_i^* - \alpha_i\right) - \right. \\ \qquad \left. \dfrac{1}{2}\sum\limits_{i,j=1}^{n}\left(\alpha_i^* - \alpha_i\right)\left(\alpha_j^* - \alpha_j\right)K\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j\right)\right\} \\ \text{s.t.} \ \sum\limits_{i=1}^{n}\alpha_i = \sum\limits_{i=1}^{n}\alpha_i^* \quad \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C] \end{cases} \tag{14}$$

式中：$K(x_i, x_j)$为核函数，需满足 Mercer 条件。由于径向基函数参数少且能保证训练效果，故采用径向基核函数，$\gamma$ 为核参数，函数表达式为：

$$K\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j\right) = \exp\left(-\gamma\|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j\|^2\right), \gamma > 0 \tag{15}$$

求解上述问题可得支持向量机的回归函数表达式为：

$$f(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n}\left(\alpha_i - \alpha_i^*\right)K\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j\right) + b \tag{16}$$

结合 K 折交叉验证的思想，利用网格搜索方法对模型参数 $C$ 和 $\gamma$ 进行寻优。参数搜索范围均为 $[2^{-10}, 2^{20}]$，步进大小为 2，最终得出 $C$ 和 $\gamma$ 的参数值分别为 4.0 和 1.0。

### 4.4　优化结果及仿真验证

在支持向量机回归模型的基础上，采用粒子群算法对散热器结构参数进行寻优，最优参数和热点温度预测结果如表 7 所示。

为验证优化模型的有效性，采用仿真分析方法对最优参数进行验证，计算得到的变压器温度分布如图 21 所示。由图 21 可知，最优参数下变压器的热点温度为 347.34 K，较优化前降低了 15.12 K。按照摄氏温度计算，热点温度仿真计算值与模型预测

表 7 散热器最优参数及热点温度

Table 7 Optimal parameters of radiator and hot spot temperature

| 参数 | $d_1$/m | $d_2$/m | $d_3$/m | $d_4$/m | $d_5$/m | $T_{max}$/K |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 1.2857 | 0.5628 | 0.0108 | 0.0387 | 0.0617 | 342.58 |

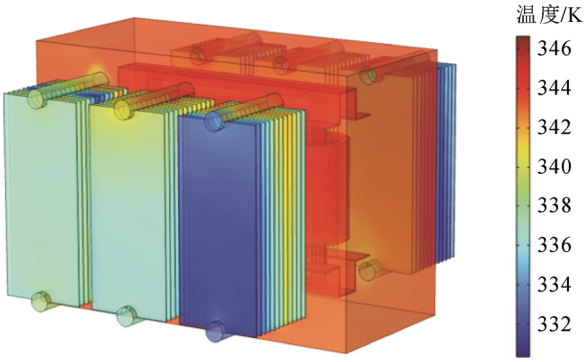



图 21 最优参数下变压器温度分布

Fig.21 Temperature distribution of transformer under optimal parameters

值之间的相对误差为 6.42%。综合考虑模型与计算误差，所建立的优化模型具备一定的可靠性，优化方法能够显著降低变压器的热点温度。

## 5 结论

1）根据硅钢片磁滞实验测量数据，采用差分进化算法辨识得到 J-A 模型的特征参数，用于模拟变压器铁芯材料的磁滞特性。对 35 kV 油浸式变压器进行 3 维等效建模，由磁场计算结果获取了变压器铁芯和绕组准确的损耗密度分布，损耗密度可作为热源代入温度场计算中。

2）通过流-热耦合计算得到变压器的温度和油流流速分布，变压器热点温度为 362.46 K，油流最大流速为 0.529 m/s。变压器的热点位于低压绕组 B 相线圈中上端，低压绕组温升大于高压绕组，并且 *YOZ* 平面的油流总体流速大于 *XOZ* 平面。由散热片的最高温度和流速曲线可知，靠近油箱侧的各散热片之间温度和油流流速差异较为明显。

3）结合中心组合设计和仿真分析方法得出不同散热器结构参数下的变压器热点温度，建立了热点温度与结构参数间的支持向量机模型，并利用粒子群算法获得了最优参数。经仿真计算可得，最优参数下变压器的热点温度为 347.34 K，较优化前降低了 15.12 K。热点温度仿真与模型预测结果的相对误差为 6.42%，验证了优化模型的有效性。结果表明优化方法能够显著降低变压器热点温度，对变压器的优化设计具有重要参考价值。

## 参考文献 References

[1] 廖瑞金，杨丽君，郑含博，等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.

[2] KIM Y J, JEONG M, PARK Y G, et al. A numerical study of the effect of a hybrid cooling system on the cooling performance of a large power transformer[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 275-286.

[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，2008.
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 7: loading guide for oil-immersed power transformers: GB/T 1094.7—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2008.

[4] IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators: IEEE Std C57.91—2011[S]. New York, USA: IEEE Power & Energy Society, 2012.

[5] 王丰华，周 翔，高 沛，等. 基于绕组热分布的改进油浸式变压器绕组热点温度计算模型[J]. 高电压技术，2015，41(3)：895-901.
WANG Fenghua, ZHOU Xiang, GAO Pei, et al. Improved thermal circuit model of hot spot temperature in oil-immersed transformers based on heat distribution of winding[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 895-901.

[6] 周利军，王 健，王路伽，等. 强油导向结构变压器绕组区域温度建模及热点定位[J]. 高电压技术，2020，46(11)：3896-3904.
ZHOU Lijun, WANG Jian, WANG Lujia, et al. Thermal modeling and hot spot locating for transformer winding in oil forced and directed cooling mode[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3896-3904.

[7] 陈伟根，苏小平，孙才新，等. 基于有限体积法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备，2011，31(6)：23-27.
CHEN Weigen, SU Xiaoping, SUN Caixin, et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 23-27.

[8] 王永强，马 伦，律方成，等. 基于有限差分和有限体积法相结合的油浸式变压器三维温度场计算[J]. 高电压技术，2014，40(10)：3179-3185.
WANG Yongqiang, MA Lun, LÜ Fangcheng, et al. Calculation of 3D temperature field of oil immersed transformer by the combination of the finite element and finite volume method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3179-3185.

[9] TORRIANO F, CHAABAN M, PICHER P. Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2034-2044.

[10] YUAN F T, YANG W T, TANG B, et al. Thermal optimization research of oil-immersed transformer winding based on the support machine response surface[J]. Thermal Science, 2022, 26(4): 3427-3440.

[11] 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.

[12] 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.
[13] 廖才波，阮江军，刘　超，等. 油浸式变压器三维电磁–流体–温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备，2015，35(9)：150-155.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 150-155.
[14] JIA X Y, LIN M, SU S W, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer[J]. Energy, 2022, 239: 121788.
[15] 骆小满，阮江军，邓永清，等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术，2020，46(3)：860-866.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 860-866.
[16] 彭道刚，陈跃伟，钱玉良，等. 基于粒子群优化–支持向量回归的变压器绕组温度软测量模型[J]. 电工技术学报，2018，33(8)：1742-1749.
PENG Daogang, CHEN Yuewei, QIAN Yuliang, et al. Transformer winding temperature soft measurement model based on particle swarm optimization-support vector regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1742-1749.
[17] SMOLKA J. CFD-based 3-D optimization of the mutual coil configuration for the effective cooling of an electrical transformer[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 124-133.
[18] YUAN F T, WANG Y, TANG B, et al. Heat dissipation performance analysis and structural parameter optimization of oil-immersed transformer based on flow-thermal coupling finite element method[J]. Thermal Science, 2022, 26(4): 3241-3253.
[19] KIM M G, CHO S M, KIM J K. Prediction and evaluation of the cooling performance of radiators used in oil-filled power transformer applications with non-direct and direct-oil-forced flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 44: 392-397.
[20] PARAMANE S B, VAN DER VEKEN W, SHARMA A. A coupled internal–external flow and conjugate heat transfer simulations and experiments on radiators of a transformer[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 961-970.
[21] GARELLI L, RÍOS RODRIGUEZ G, STORTI M, et al. Reduced model for the thermo-fluid dynamic analysis of a power transformer radiator working in ONAF mode[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 855-864.
[22] MAHDI M S, KHADOM A A, MAHOOD H B, et al. Effect of fin geometry on natural convection heat transfer in electrical distribution transformer: numerical study and experimental validation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2019, 14: 100414.
[23] RAEISIAN L, NIAZMAND H, EBRAHIMNIA-BAJESTAN E, et al. Thermal management of a distribution transformer: an optimization study of the cooling system using CFD and response surface methodology[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 443-455.
[24] 李　贞，李庆民，李长云，等. J-A 磁化建模理论的质疑与修正方法研究[J]. 中国电机工程学报，2011，31(3)：124-131.
LI Zhen, LI Qingmin, LI Changyun, et al. Queries on the J-A modeling theory of the magnetization process in ferromagnets and proposed correction method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 124-131.
[25] 耿　超，王丰华，苏　磊，等. 基于人工鱼群与蛙跳混合算法的变压器 Jiles-Atherton 模型参数辨识[J]. 中国电机工程学报，2015，35(18)：4799-4807.
GENG Chao, WANG Fenghua, SU Lei, et al. Parameter identification of Jiles-Atherton model for transformer based on hybrid artificial fish swarm and shuffled frog leaping algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4799-4807.
[26] 刘　刚，孙立鹏，王雪刚，等. 正弦及谐波激励下的铁心损耗计算方法改进及仿真应用[J]. 电工技术学报，2018，33(21)：4909-4918.
LIU Gang, SUN Lipeng, WANG Xuegang, et al. Improvement of core loss calculation method and simulation application under sinusoidal and harmonic excitations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4909-4918.
[27] 段辞涵，阮江军，邓永清，等. 变压器温度场计算边界辐射-对流复合换热等效方法研究[J]. 电机与控制学报，2020，24(10)：120-129.
DUAN Cihan, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Study on equivalent method of boundary radiation-convection heat transfer for transformer temperature field calculation[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(10): 120-129.
[28] 陈伟根，滕　黎，刘　军，等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型[J]. 电工技术学报，2014，29(1)：44-51.
CHEN Weigen, TENG Li, LIU Jun, et al. Transformer winding hot-spot temperature prediction model of support vector machine optimized by genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 44-51.
[29] 李元诚，方廷健，于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报，2003，23(6)：55-59.
LI Yuancheng, FANG Tingjian, YU Erkeng. Study of support vector machines for short-term load forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 55-59.



**袁发庭**
1988—，男，博士，副教授，硕导
主要研究方向为电工装备多物理场仿真计算、优化设计及故障诊断
E-mail: yuanfatinghss@163.com

YUAN Fating
Ph.D.
Associate professor



**施文菀**
1999—，女，硕士生
主要研究方向为变压器多物理场仿真分析与散热系统优化
E-mail: shiwenyu52@163.com

SHI Wenyu



**陈　炜**(通信作者）
1992—，男，博士，高工
主要研究方向为输变电工程噪声检测与降噪技术
E-mail: chenw69@163.com

CHEN Wei
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2022-10-07　修回日期　2022-12-27　　编辑　卫李静