

基于鲸鱼优化算法的金属化膜电容器热参数多变量反演方法

罗文博¹, 李凌飞², 侯婷², 关喜升¹, 史尤杰², 卢倚平²

(1. 广东电网有限责任公司阳江供电局, 阳江 529500;

2. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663)

摘要: 柔性直流输电换流阀用金属化膜电容器常运行于高温的恶劣环境中, 容易发生过热膨胀、端部脱落的故障, 其内部热点温度作为影响电容器绝缘老化速率的重要因素, 对电容器运行寿命具有重要影响。受限于现场热参数的难以准确获取, 电容器的温度分布无法实时预测。提出了一种基于鲸鱼优化算法的金属化膜电容器热参数多变量反演模型, 基于内部传热过程建立了表面温度分布目标函数, 通过逆向求解的最优思路, 实现了金属化膜电容器内部温度场分布、发热损耗、各向异性导热系数的反演, 反演结果平均相对误差仅为 2%。结合金属化膜电容器温度场有限元仿真计算与温升试验验证了该反演模型的有效性, 研究可为金属化膜电容器温度分布与热参数预测的工程应用提供理论依据和方法参考。

关键词: 换流阀; 金属化膜电容器; 热点温度; 参数反演; 鲸鱼优化算法

Multi-parameter Thermal Property Inversion Method for Metallized Film Capacitors Based on the Whale Optimization Algorithm

LUO Wenbo¹, LI Lingfei², HOU Ting², GUAN Xisheng¹, SHI Youjie², LU Yiping²

(1. Yangjiang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Yangjiang 529500, China;

2. State Key Laboratory of HVDC(Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, China)

Abstract: Metallized film capacitors (MFCs) used in flexible DC transmission converter valves typically operate under harsh high-temperature conditions, making them susceptible to failures such as overheating, expansion, and end-cap detachment. The internal hotspot temperature, as a critical factor influencing the rate of insulation aging, significantly affects the operational lifespan of the capacitor. However, due to the difficulty in accurately acquiring thermal parameters on-site, real-time prediction of the temperature distribution remains a challenge. This paper proposes a multivariable inversion model for the thermal parameters of MFCs based on the whale optimization algorithm (WOA). By formulating an objective function of surface temperature distribution derived from the internal heat transfer process, the model employs an inverse problem-solving approach to reconstruct the internal temperature field, heat generation losses, and anisotropic thermal conductivity of the MFC. The average relative error of the inversion results is only 2%. The validity of the proposed model is further verified through finite element simulations and temperature rise experiments. This study provides a theoretical foundation and methodological reference for engineering applications involving temperature distribution and thermal parameter prediction of MFCs.

Key words: converter valve; metallized film capacitor; hotspot temperature; parameter inversion; whale optimization algorithm

0 引言

金属化膜电容器(metallized film capacitor, MFC)

是换流设备的核心设备之一, 常运行于高温、高湿以及直流叠加谐波的恶劣环境中, 其内部热点温度作为影响电容器绝缘老化速率的重要因素, 对电容器运行寿命具有重要影响, 同时决定了柔性直流换流阀能否经济可靠地运行^[1-5]。

电容器温度场分布相关研究已有大量研究^[6],

基金资助项目: 南方电网公司科技项目(031717KC22120001/GDKJXM20222628)。

Project supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (031717KC22120001/GDKJXM20222628).

研究方法主要基于热路模型与有限元仿真。在电容器温度场求解的问题中,正问题是指在电容器的条件信息完备的情况下,求解热传导方程得到数值解的过程,正问题的求解可以获得整个电容器随时空变化的温度分布。葛雪峰等人基于电热耦合获得了电容器的温度分布^[7],岳国华等人考虑了铜排对温度场的影响^[8]。但在实际工程中,电容器的热点温度是无法直接测量得到的,发热损耗与环境温度等热参数也会随着运行状态变化而改变,由于主要参数的缺失或变化,基于热路模型与有限元仿真的温度场分布正问题无法求解,而反演算法是温度场求解的逆向思路,可以用较少的可测信息反推不可测量的参数,可以实时反馈与校核电容器现场工况下的热参数,实现温度场分布的有效预测^[9]。

目前在热点温度反演算法主要应用在变压器等电力设备中,武汉大学提出了基于流线分析的温度反演算法获得了变压器的热点温度^[10],在热点温度反演问题中通常会使用正则化方法、牛顿法、Kevenverg-Marquatde 法、最速下降法、共轭梯度法(conjugate gradient method, CGM)、神经网络法(neural network algorithm)、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等常用算法^[11-14],Lesnic 等人使用了正则化方法计算一维平板的线性热传导反问题,可以很好克服由于反问题的不适应性引起的弊端^[15],但正则化过程中的参数很难确定,王艳武等人用了 LEM 法解决参数估计的难题,但计算效率相对较低^[16]。李浩波等采用共轭梯度法建立了 MFC 温度反演模型,实现了热点温度的逆向求解,但未实现其他热参数的获取,且共轭梯度法的收敛效果严重依赖于初始值^[17]。赵璐瑶等人发现在热反演问题中,量子行为粒子群优化算法具有全局搜索能力强,反演精度高,鲁棒性好的特点,缺点是计算时间长;混合算法收敛速度快,稳定性好,但是反演精度略低于量子行为粒子群算法^[9]。为了解决以上问题,元启发式算法在多参数与网格架构优化问题上有很大潜力,其中相比于其他算法,于 2016 年由 MIRJALILI S 等人提出的鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)具有强大的全局搜索能力、算法参数少和更新机制独立等优点,在风机参数辨识、振动信号降噪、处方预测等工程问题的求解中表现出较好的寻优性能^[18-21]。

本文以柔性直流换流阀子模块 MFC 为研究对象,提出了一种基于 WOA 的电容器热参数多变量

反演模型,基于内部传热过程建立了表面温度分布目标函数,通过逆向求解的最优思路,实现了 MFC 内部温度场分布、发热损耗、各向异性导热系数与散热系数的反演,结合 MFC 温度场有限元仿真计算与温升试验验证了该反演模型的有效性,研究可为 MFC 温度分布与热参数预测的工程应用提供理论依据和方法参考。

1 换流阀电容器温度场计算

1.1 电容器电-热耦合计算方法

用于海上风电柔性直流换流阀子模块直流支撑环节的金属化膜电容器,主要是由双向拉伸聚丙烯薄膜镀上锌铝层的金属化薄膜卷绕而成,形状通常是一个圆柱体,芯轴为聚碳酸酯制成,两端再喷上毫米级的金属层作为引出电极,如图 1 所示。

由图 1 可知,金属化膜电容器内部发热损耗主要由金属电极损耗与介质损耗两部分组成,其中在低频谐波条件下,MFC 内部传导电流很小,电磁耦合作用极弱,可以忽略磁损耗的影响,在介质损耗中极化损耗占主导,本文给出的等效介损因数已将极化损耗与漏导损耗共同计入。

$$P_s = P_d + P_m \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_m = 2 \int_0^b i(x)^2 \frac{\beta}{L} dx = \frac{2}{3} \beta \frac{b}{L} I_r^2 \\ P_d = I_r^2 R_d = I_r^2 \frac{\tan \delta_0}{\omega C} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_s 为发热总功率; P_d 为介质损耗; P_m 为金属损耗; b 为金属电极层方阻; b 为有效宽度; L 为有效卷绕长度; $i(x)$ 为在膜宽方向上的电流大小; I_r 为纹波电流有效值; R_d 为介质损耗电阻值; d_0 为介质损耗角; ω 为角频率, $\omega=2\pi f$, f 为谐波频率; C 为元件电容值。

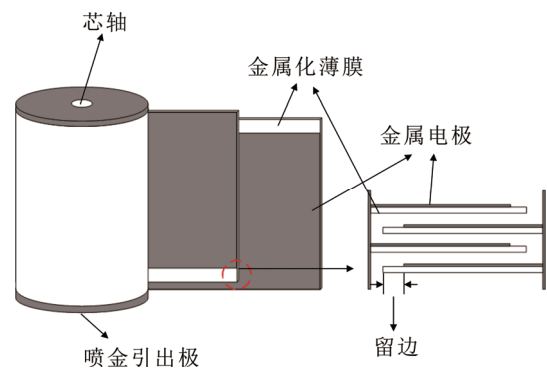


图 1 金属化膜电容器元件结构示意图

Fig.1 Diagram of structure of metallized film capacitor

MFC 的传热过程为发热损耗引起的内部自产热通过轴向与径向的金属化膜固体传递到电容器表面, 再通过外部环境对流与辐射条件达到热平衡, 电-热耦合计算过程满足电流控制方程与热平衡方程, 即:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \Delta T) = P_s + Q_{amb} \quad (3)$$

$$Q_{amb} = hS(T_s - T_{amb}) + \gamma \sigma_{sb} A(T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (4)$$

式中: r 为金属化膜密度; c 为比热容; k 为导热率; T 为温度; Q_{amb} 为环境散热损失; h 为对流换热系数; A 是表面积; T_s 为电容器表面温度; T_{amb} 为环境温度; g 为辐射发射率; σ_{sb} 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数。

由于金属化膜为聚丙烯薄膜和金属镀层复合而成的材料, MFC 的导热系数各向异性, 可以由热阻等效计算得到, 根据传热学理论, 材料热传导过程中热阻为:

$$R_{the} = \frac{d}{Sk} \quad (5)$$

式中: d 为材料厚度; S 为导热面积。在径向上, 热阻由聚丙烯薄膜、铝箔串联而成, 则热阻 R_r 为:

$$R_r = \frac{d_m}{\omega k_{Zn}} + \frac{d_p}{\omega k_p} \quad (6)$$

则径向上, 等效导热系数如式(7)所示:

$$k_r = \frac{d}{R_r S} = \frac{d_m + d_p}{d_m/k_{Zn} + d_p/k_p} \quad (7)$$

式中: d_m 、 d_p 分别是金属电极、聚丙烯薄膜的厚度; k_{Zn} 、 k_p 分别表示金属电极、聚丙烯薄膜的导热系数。在轴向上, 热阻由聚丙烯薄膜、铝箔并联而成, 则热阻 R_z 为:

$$R_z = (k_{Zn} \frac{d_m l}{\omega} + k_p \frac{d_p l}{\omega})^{-1} \quad (8)$$

则轴向上, 等效导热系数如式(9)所示:

$$k_z = \frac{k_{Zn} d_m + k_p d_p}{d_m + d_p} \quad (9)$$

1.2 电容器温度场仿真结果

图3为采用 COMSOL 仿真软件建立的 MFC 三维模型, 分别为芯轴、膜层、喷金端, 仿真主要参数如表1所示。

设置环境温度为 25 °C, 有研究表明, 直流电容器谐波电压最大值可达直流电压幅值的 20%左右。以 500 MW 厦门柔性直流换流阀工程为例, 直流支撑电容器额定直流电压为 1 600 V, 谐波电压峰

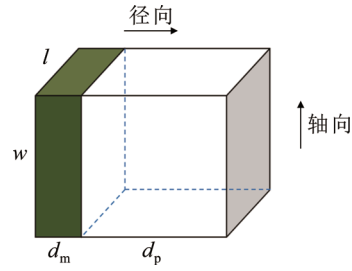


图2 金属化膜复合热阻示意图

Fig.2 Schematic diagram of metallized film composite thermal resistance

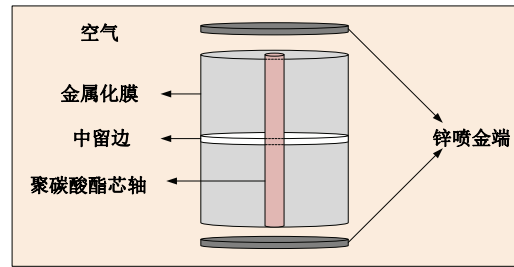


图3 金属化膜电容三维建模图

Fig.3 Three-dimensional modeling diagram of metallized film capacitor

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值	参数	值	参数	值			
聚丙烯薄膜厚度/mm	5.5	喷金层厚度/mm	0.75	直流电压/V	2 800			
金属层厚/nm	50	电容器直径/mm	68	谐波电压/V	560			
膜参数	相对介电常数	2.2	结构参数	芯轴直径/mm	10	工况参数	工频/Hz	50
	自然对流系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	10		膜宽/mm	120	最高谐波次数	4	
轴向导热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	1.102 4	径向导热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.221 6	环境温度/K	298.15			

值约为 285 V, 谐波电压峰值占到直流电压幅值的 17%左右^[22]。因此本文电压最大选择施加直流叠加 20%一次谐波, 由于本文采用单个电容器元件进行实验验证, 使用自然对流换热系数代替实际空气的流动, 仿真模型得到的 MFC 截面温度分布图见图4。由图可知, 最高温度点位于芯轴附近, 温升高达 8.15 °C, 约 800 层膜厚的位置, 温度由内部向表面逐渐降低, 最低温度出现在外表面交界处, 约为 29.56 °C。

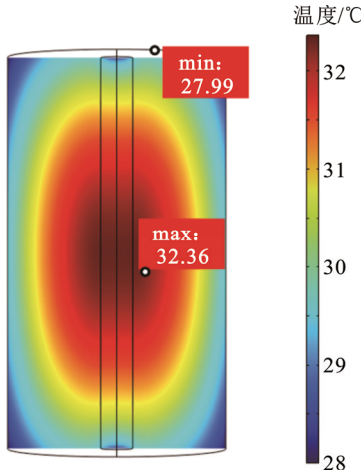


图4 MFC 截面温度分布图

Fig.4 Distribution map of MFC cross-sectional temperature

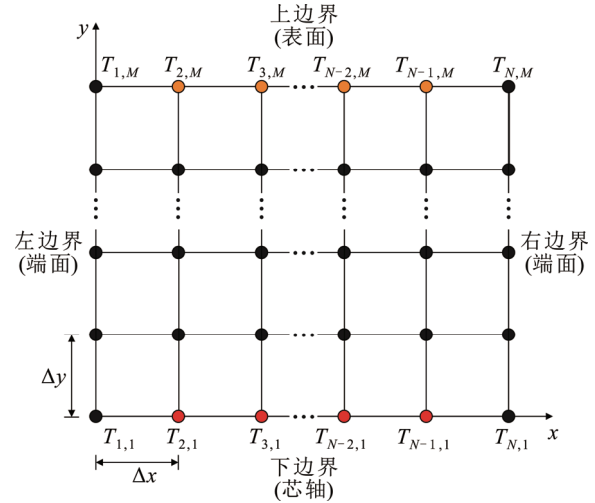


图5 MFC 二维网络模型

Fig.5 MFC two-dimensional network model

2 换流阀电容器稳态热参数反演模型

2.1 电容器稳态传热模型

单个 MFC 通常为圆柱形状，为轴对称结构，因此可以用二维模型来表征。在处理稳态二维热传导问题时，有限差分法可用于求解二维热传导方程的稳态解，对于每个内部节点 (i, j) 会产生一个线性方程，整个网格产生的线性方程可以用矩阵形式解决，如图 5 所示，其中 $T_{i,j}(i=1, 2, \dots, M)$ 表示节点 (i, j) 的温度。问题简化为求解一个椭圆型偏微分方程，即：

$$k_z \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_r \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\Phi \quad (10)$$

式中： F 是热源项，使用中心差分法对空间导数进行离散化，即：

$$k_z \frac{\Delta T_{i+1,j} + \Delta T_{i-1,j} - 2\Delta T_{i,j}}{\Delta x^2} + k_r \frac{\Delta T_{i,j+1} + \Delta T_{i,j-1} - 2\Delta T_{i,j}}{\Delta y^2} = -\Phi_{i,j} \quad (11)$$

电容器传热问题为第三类边界问题，即规定了边界上物体与周围流体间的表面传热系数 h 及周围流体温度 T_{amb} 。在图 5 中， x 轴为电容器轴向， y 轴为电容器径向，上边界为元件表面，左右边界为端面，均与外界空气对流，下边界为芯轴绝热。

稳态有限差分法求解电容器传热正问题，计算参数同表 1，温度场分布结果如图 6 所示，由图 6 可知，有限差分法所求的温度场分布与仿真所得结果一致。

2.2 基于鲸鱼优化算法的热参数反演模型

作为元启发式优化算法，WOA 源于对自然界中座头鲸群体狩猎行为的模拟，这种狩猎模式是座

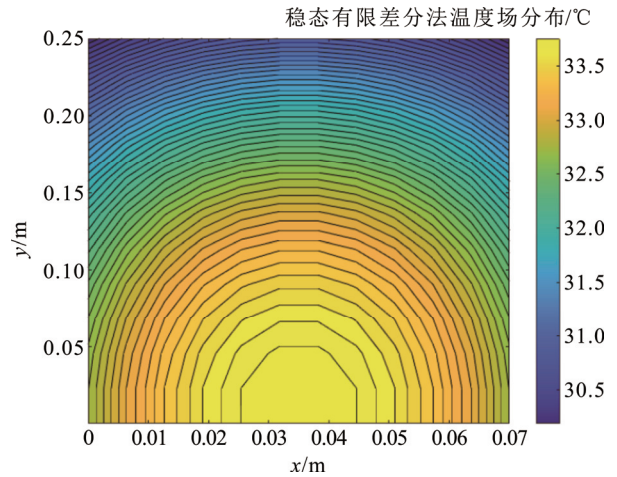


图6 稳态有限差分法温度分布等温线图

Fig.6 Isothermal line graph of temperature distribution using the steady-state finite difference method

头鲸包围猎物时，沿着螺旋路径形成独特气泡来完成的。与其他算法相比，WOA 整个过程包含搜索觅食、收缩包围和螺旋狩猎 3 种独立的更新机制，因此其寻优阶段的全局探索和局部开发过程得以分别运行和控制，具有强大的全局搜索能力、算法参数少和更新机制独立等优点，在许多数值优化和工程问题的求解中表现出较好的寻优性能。此外鲸鱼优化算法不需要人为的设置各种控制参数值，提高了算法的使用效率并降低了应用难度。

WOA 的种群初始化方法为在搜索空间中随机产生若干候选解作为鲸鱼个体，种群个体数量代表同一迭代步骤中候选解数量。

$$X_i^0 = u_{min} + \text{rand}(1, d_{im})(u_{max} - u_{min}) \quad (12)$$

式中: X_i^0 是第 i 个个体的初始位置; u_{\max} 和 u_{\min} 分别代表搜索空间的最大值与最小值; rand 为随机函数; d_{im} 表示个体向量长度。

假设目标猎物为算法的最优解, 由于最优解在搜索空间中的位置是未知的, 需要通过搜索觅食、收缩包围以及螺旋狩猎 3 种独立的更新机制不断更新鲸鱼个体位置逼近最优解。

$$A = 2ra - a \tag{13}$$

$$a = 2 - 2t/t_{\max} \tag{14}$$

式中: A 是收缩系数; a 是随迭代次数增加而从 2 线性减小到 0 的数; r 是一个分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; t 为当前迭代次数; t_{\max} 为最大迭代次数。

假设选择探寻过程与狩猎过程的概率分别为 50%, 那么设定一个随机数 p 位于 $[0, 1]$ 之间, 当 $p > 0.5$ 时, 且当 $A > 1$ 时, 选择搜索觅食机制, 反之则选择收缩包围机制, 如图 7 所示; 当 $p < 0.5$ 时, 选择螺旋狩猎机制。

1) 搜索觅食机制

$$X_i^{t+1} = X_{\text{rand}}^t - A \cdot D \tag{15}$$

$$D = |2r \cdot X_{\text{rand}}^t - X_i^t| \tag{16}$$

式中: X_i^{t+1} 是第 i 个个体第 $t+1$ 次迭代的个体位置; X_i^t 是第 i 个个体第 t 次迭代的个体位置; X_{rand} 是随机个体第 t 次迭代的个体位置; D 是当前个体距离随机个体的距离; 该阶段可以理解为个体在全局范围内的位置更新。

2) 收缩包围机制

$$X_i^{t+1} = X_{\text{best}}^t - A \cdot |2rX_{\text{best}}^t - X_i^t| \tag{17}$$

该阶段可以理解为鲸鱼个体围绕最优个体位置 X_{best} 进行位置更新, 将处于初始位置 (X, Y) 与最优个体 (X^*, Y^*) 包围圈之间的任意位置。

3) 螺旋狩猎机制

$$X_i^{t+1} = |X_{\text{best}}^t - X_i^t| \cdot e^{bl} \cos(2\pi l) + X_{\text{best}}^t \tag{18}$$

式中: b 是控制对数螺旋形状的常数; l 是 $[-1, 1]$ 上的一个随机数, 该阶段鲸鱼个体沿着螺旋线围绕着猎物游动, 如图 8 所示。

温度反演问题的求解实际上是寻优与正问题求解相结合的过程, 通过优化算法来更新未知条件, 再通过传热正问题求解得到可测量的量, 达到反演结果与测量值之间的目标函数最优化。

对于电容器热参数多变量的反问题, 例如下边界温度分布未知(热点温度)与发热损耗未知, 需要通过可测得的上边界温度分布(表面温度)及式(17)中的其他已知条件来确定。

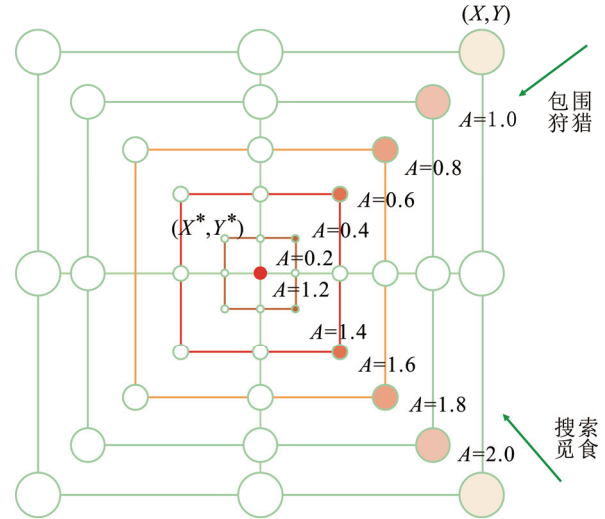


图 7 基于 A 值的更新路径
Fig.7 Update path based on A value

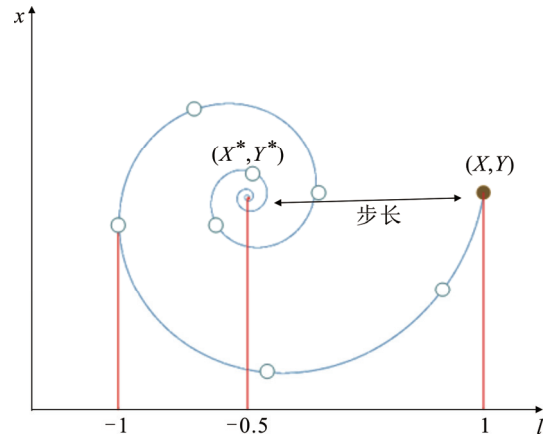


图 8 螺旋狩猎机制更新路径
Fig.8 Update path for the spiral hunting mechanism

以最小二乘法作为 WOA 优化目标函数 $J(R)$ 为:

$$J(R) = \sum_{k=1}^L (T_k^{\text{pre}}(R) - T_k^{\text{test}})^2 \tag{19}$$

式中: R 为待反演参数向量, 即 $R = [T_{2,2}, T_{3,2}, \dots, T_{N-1,2}, P_1]$, $T_{N-1,2}$ 为图 5 中所示二维网格中第 2 行的分割点, P_1 为待求解的发热损耗; $T_k^{\text{test}} (k=1, 2, \dots, L)$ 为通过测量或仿真模型获得电容器表面温度, 其中 L 为测点个数; $T_k^{\text{test}}(R)$ 为通过反演模型获得电容器表面温度。

最终获得当优化目标函数 $J(R)$ 最小时的待反演参数向量 R , 即为所求电容器热参数。

将有限差分与鲸鱼优化算法结合得到热参数反演模型, 具体流程如下:

1) WOA 算法随机生成初始种群 R_0 , 令 $t=0$, 给定一个小正整数 a 。

2) 代入候选解种群向量, 基于有限差分法求解温度场分布得到 $T_k^{pre}(R_i)$, 判断是否满足下列条件中的任意一个:

$$J(R) = \sum_{k=1}^L (T_k^{pre}(R_i) - T_k^{real})^2 < \alpha \quad (20)$$

或 $t < t_{max}$

如果满足则停止迭代, 其中 t 为迭代次数, t_{max} 为最大迭代次数, 本文取为 10 000 次, 否则继续。

3) 随机生成 p 值, 根据式(13)和式(14)更新 a 、 A 的值。

4) 判断是否满足 $p < 0.5$, 如果满足, 则根据式(19)更新种群 R 的值, 跳到步骤 7, 否则继续。

5) 判断是否满足 $A > 1$, 如果满足, 则根据(15)更新种群 R 的值, 跳到步骤 7, 否则继续。

6) 根据(12)更新种群 R 的值。

7) 令 $t=t+1$, 返回步骤 2。

2.3 稳态热参数反演检测

表 2 为反演模型参数取值, 在有限差分中具体取电容器二维模型轴向、径向各 12 个点, 将电容器截面划分为 12×12 的网格模型, 种群个体数为 100 个, 该数量可在较低的计算资源中保证高搜索效率, 同时减少优化时间, 测点个数为去掉两个边界点的 10 个点, r 为 0.1, 其他参数与表 1 中仿真参数一致。

实际工程应用中, 传热正问题的求解往往缺少所需参量中的多个, 正问题无法求解。我们在该反演模型中设定热点温度、材料导热系数与热耗率为待反演参量, 对热参数多变量同时进行反演, 取 COMSOL 仿真结果元件表面温度模拟表面实测温度进行目标函数的最优化, 计算总用时为 2.03 s, 可见, 反演模型相较于有限元模型可以快速获得未知热参数, 所得 MFC 内部温度分布如图 9 所示。

由图 9 可知, MFC 热点温度出现在芯轴中间位置, 沿径向与轴向逐渐减小, 与仿真所得温度场结果相符。

定义待求解参数相对误差为:

$$\delta_r = \sum_i^{\dim} \left(\frac{R_{i,cal} - R_{i,atc}}{R_{i,atc}} \right) \times 100\% \quad (21)$$

表 3 热参数反演结果

Table 3 Inversion results of thermal parameters

反演参数	$T_2, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_3, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_4, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_5, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_6, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_7, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_8, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_9, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{10}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{11}, \text{ } ^\circ\text{C}$	P_1/W	$K_2/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
仿真数值	32.66	32.88	33.03	33.12	33.15	33.12	33.03	32.36	32.88	32.69	1.448	1.2456
反演数值	34.73	31.46	32.08	34.36	32.04	35.62	36.15	32.47	31.72	34.9	1.412	1.2937
相对误差 $d_r/\%$	4.86	3.67	2.43	6.18	2.55	7.54	9.04	1.69	2.96	5.66	0.20	3.86

式中: $R_{i,cal}$ 和 $R_{i,atc}$ 演分别为反演模型计算与仿真模型待求解参数值, 值得注意的是, 相对误差在不同温度选取条件下有所差别, 本文在同一温度条件下给出的温度相对误差能一定程度上说明模型准确性。

以选取热点温度 $T_{k,2}(k=2,3,\dots,11)$ 、发热损耗 P_1 与轴向导热系数 K_2 作为待反演量为例, 反演模型所得结果如表 3 所示, 同样本模型可以选择其他热参数组合, 如热点温度、径向与轴向导热系数, 此处不做另外展示。

由表 3 可见, 热点温度的反演平均相对误差为 4.22%, 这是由于有限差分法在求解相同的表面温度时, 内部热点温度分布的解不唯一导致的, 也恰好证明了电容器热点温度并非引起外表面温度变化的原因, 而对发热损耗与导热系数的反演结果与实际结果符合度高, 实际上这两个热参数是影响电容器温度场分布的关键参量, 有实际的物理意义, 同时反演结果证明该模型可以快速准确地解决导热系数与热耗率的多变量反演问题。

表 2 反演模型参数

Table 2 Inversion model parameters

模型参数	数值
N	12
M	12
种群个体数	100
d_{im}	10
r	0.1

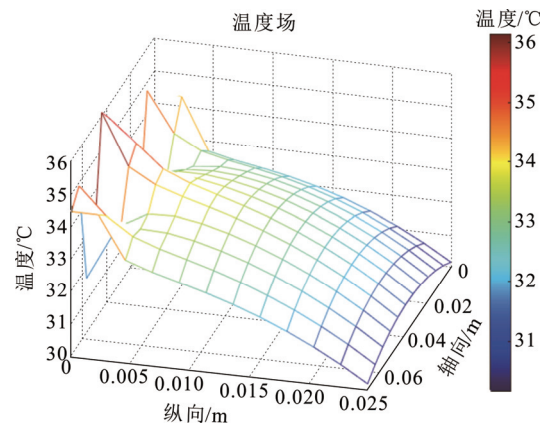


图 9 MFC 反演内部温度分布图

Fig.9 Distribution map of MFC inversion of internal temperature

在反演模型中, 由于取了 10 个不同的下边界点作为热点温度分布点, 在传热问题中被判定为下边界出现了多个不同的稳定热源, 为了符合工程实际与物理过程, 热点温度约束为一个在二维轴向上中间高两边低分布的向量, 改进的反演温度场分布图如图 10 所示, 热点相对误差结果如表 4 所示。

综上所述, 改进后的热点温度反演结果平均相对误差仅为 2%, 较未改进模型降低了 2.22%, 最大绝对误差为 1.14 °C, 改进后的反演模型能够准确地反演出热点温度分布。

3 电容器稳态热参数反演模型试验验证

3.1 电容器温升试验

以型号为 DA01-2K80-5005-1422 的 MFC 单元为试验对象, 电容量为 50 mF, 额定直流电压为 2 800 V, 环境温度为 25 °C, 试验电压为额定直流电压 20% 的谐波电压。

试验用红外成像仪对 MFC 表面温度进行测量, 在 MFC 表面交界处外的地方沿膜宽方向等距取 10 个点, 图 11(a)为 MFC 表面温度分布的红外成像图, 由图可知, 随试验时间的增加电容器表面温度逐渐增大, 温度从高压端至接地端减小, 这是由于实际实验过程中, 高压端接线接触电阻大, 形成了一个单边热源, 且散热条件不一致; 在模型边缘处增加 0.2 W 热耗率, 其他条件与表 1 保持一致, 图 11(b)为设置了单边热源的仿真模型获得的热场分布结果, 与试验结果基本一致。

3.2 电容器温升试验结果对比分析

将 MFC 样品放置于 25 °C、40%湿度的烘箱环境中, 每隔 1 h 进行一次表面温度测量, 最终在 10 h 左右达到稳定, 10 h 后的测量的结果与反演的结果如表 5 所示。

由表 5 可见, 在考虑一定的红外热成像的精度范围内, 表面温度的反演最大误差不超过 3%, 最终反演的表面温度分布与单边热源的实际测量结果一致, 热耗率的反演结果仅 2.9%, 可以说明该模型能够适用于非理想的复杂环境中, 如实际紧凑排布的换流阀工况。

4 结论

1) 基于电容器内部传热过程建立了表面温度分布目标函数, 通过逆向求解的最优思路, 实现了 MFC 内部温度场分布、发热损耗、各向异性导热系

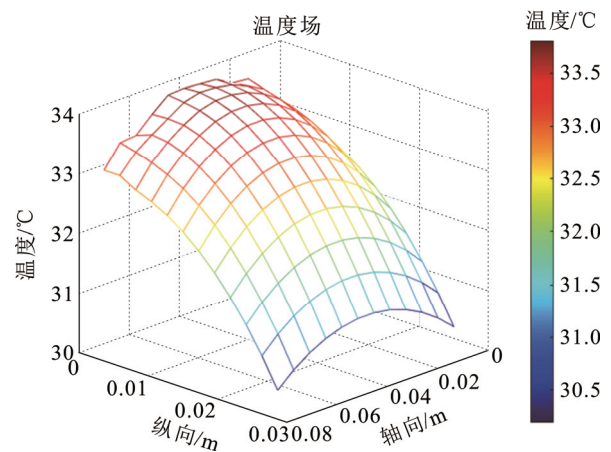
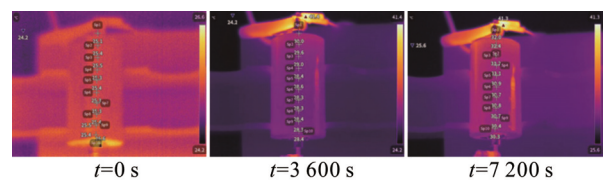


图 10 改进后的 MFC 反演内部温度分布图

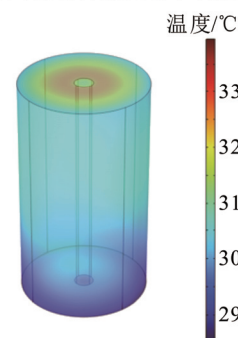
Fig.10 Distribution map of improved MFC inversion of internal temperature

表 4 改进的热点温度反演结果

热点	数值/°C	相对误差 $d_i/\%$	热点	数值/°C	相对误差 $d_i/\%$
$T_{2.2}$	33.21	1.70	$T_{7.2}$	33.78	2.01
$T_{3.2}$	33.55	2.06	$T_{8.2}$	33.77	2.24
$T_{4.2}$	33.58	1.67	$T_{9.2}$	33.54	3.66
$T_{5.2}$	33.74	1.87	$T_{10.2}$	33.29	1.25
$T_{6.2}$	33.76	1.85	$T_{11.2}$	33.26	1.75



(a) 实测电容器元件表面温度



(b) 单边热源仿真结果

图 11 实测电容器元件表面温度与单边热源仿真结果
Fig.11 The measured surface temperature of the capacitor component and the simulation results of the single-sided heat source

数的反演, 热点温度的反演平均相对误差为 4.22%。

2) 改进后的热点温度反演结果平均相对误差

表 5 实测热参数反演结果

Table 5 The inversion results of the measured thermal parameters

参数	实际数值/°C	反演数值/°C	相对误差 δ_r /%
T_{2-11}	32.0	31.79	0.66
T_{3-11}	32.4	31.99	1.28
T_{4-11}	31.2	32.03	2.59
T_{5-11}	31.1	31.84	2.32
T_{6-11}	30.9	31.51	1.93
T_{7-11}	30.7	31.14	1.41
T_{8-11}	30.8	30.72	0.26
T_{9-11}	30.7	30.22	1.58
T_{10-11}	30.4	29.69	2.39
T_{11-11}	30.1	29.24	2.94

注: P_1 实际数值 1.372 W, 反演数值 1.332 W, 相对误差 2.9%。

仅为 2%, 较未改进模型降低了 2.22%, 最大绝对误差为 1.14 °C, 改进后的反演模型的温度分布自中心沿两边降低, 与仿真结果一致, WOA 算法在多参数辨识稳态上具有较高的适用性。

3) 结合 MFC 温度场有限元仿真计算与温升试验验证了该反演模型的有效性, 表面温度最大误差不超过 3%, 经验证在一定误差范围内, 该模型适用于更复杂多变的环境中。

参考文献 References

- [1] LI Y B, ZHU L Y, ZHENG L Z, et al. Multi-physics coupling simulation analysis of DC-link capacitors under DC superimposed multi-harmonic voltage[C]//2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, USA: IEEE, 2024: 5324-5330.
- [2] ROCHEFORT C, VENET P, CLERC G, et al. Thermal runaway indicators of metallized polypropylene film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(4): 2136-2143.
- [3] LI H, WANG B W, LI Z W, et al. Effect of pulsed discharge current on lifetime performance of metallized polypropylene film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 957-963.
- [4] LI Z W, LI H, HUANG X, et al. Temperature rise of metallized film capacitors in repetitive pulse applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 2038-2045.
- [5] KUANG K N, GUO X H, LI C Z, et al. A novel multiscale perspective based hotspot temperature assessment method for film capacitor in DC-link applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(6): 9111-9122.
- [6] 楼顺凯. 基于电热场耦合的金属化薄膜电容器建模方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
LOU Shunkai. Research on modeling method of metallized film capacitors based on electrothermal field coupling[D]. Wuxi, China: Jiangnan University, 2023.
- [7] 葛雪峰, 姜佳宝, 赵耀. 金属化膜电容器电热仿真分析[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 224-231.
GE Xuefeng, JIANG Jiabao, ZHAO Yao. Electrothermal simulation analysis of metallized film capacitor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 224-231.
- [8] 岳国华, 杜志叶, 孟圣淳, 等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4915-4924.
YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.
- [9] 赵璐瑶. 一维非稳态对流换热流体温度反演算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
ZHAO Luyao. Research on fluid temperature inversion algorithms for one-dimensional unsteady convection heat transfer[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [10] 邓永清, 阮江军, 董旭柱, 等. 基于流线分析的 10 kV 油浸式变压器绕组热点温度反演模型建立及验证研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3191-3203.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Establishment and verification of 10 kV oil immersed transformer winding hot spot temperature inversion model based on streamline analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3191-3203.
- [11] 常洪江. 遗传算法综述[J]. 电脑学习, 2010(3): 115-116.
CHANG Hongjiang. An overview of genetic algorithm[J]. Computer Study, 2010(3): 115-116.
- [12] 宋艳琴, 王华倩, 张晓东, 等. 基于蚁群算法的双链传输路由改进算法[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(4): 142-145.
SONG Yanqin, WANG Huaqian, ZHANG Xiaodong, et al. An improved routing algorithm of double chain transmission based on Ant algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2015, 32(4): 142-145.
- [13] 张宏. 基于 QPSO 算法的二维热传导反问题的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
ZHANG Hong. Research about heat conduction inverse problem based on quantum-behaved particles swarm optimization[D]. Wuxi, China: Jiangnan University, 2007.
- [14] 程蕾. 被测目标热参数反演算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
CHENG Lei. Research on inverse algorithms of thermophysical properties[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [15] LESNIC D, ELLIOTT L, INGHAM D B. Application of the boundary element method to inverse heat conduction problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(7): 1503-1517.
- [16] 王艳武, 杨立, 孙丰瑞. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的内部缺陷导热反问题研究[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 85-88, 125.
WANG Yanwu, YANG Li, SUN Fengrui. Inverse heat conduction problem of inherent defect based on the Levenberg-Marquardt method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 85-88, 125.
- [17] 李浩波, 李化, 张国豪, 等. 基于共轭梯度法的金属化薄膜电容器热点温度反演[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4163-4170.
LI Haobo, LI Hua, ZHANG Guohao, et al. Hot-spot temperature inversion for metallized film capacitors based on conjugate gradient method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4163-4170.
- [18] 谭继勇, 罗俊, 谢江涛, 等. 基于鲸鱼优化和批量规范化卷积神经网络的振动信号去噪[J]. 机械与电子, 2024, 42(4): 3-8.
TAN Jiyong, LUO Jun, XIE Jiangtao, et al. A convolutional neural network with whale optimization and batch normalization for the denoising of vibration signal[J]. Machinery & Electronics, 2024, 42(4): 3-8.
- [19] 张三妹, 林晓, 洪燕龙, 等. 基于鲸鱼算法优化反向传播神经网络的中药安慰剂溶液颜色模拟处方预测[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(16): 4437-4449.

ZHANG Sanmei, LIN Xiao, HONG Yanlong, et al. Prediction of color simulation prescription for traditional Chinese medicine placebo solution based on whale algorithm-optimized back propagation neural network[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(16): 4437-4449.

[20] 邓 俊, 陈 杰, 李怡然, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的双馈风电机组控制参数辨识[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 496-505.

DENG Jun, CHEN Jie, LI Yiran, et al. Identification of control parameters of doubly-fed induction generator based on enhanced whale

optimization algorithm[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2025, 46(5): 496-505.

[21] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.

[22] 许然然. 柔性直流换流阀直流支撑电容器用聚丙烯薄膜绝缘失效及其抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.

XU Ranran. Failure mechanism and suppression method of dielectric insulation of DC-link capacitor in flexible DC converter valve[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2020.



罗文博

1990—, 男, 高工

主要从事高电压技术、输电线路运维方面的研究工作

E-mail: 714758191@qq.com

LUO Wenbo
Senior engineer



关喜升

1991—, 男, 工程师

主要从事变电高电压试验技术

E-mail: 893208901@qq.com

GUAN Xisheng



李凌飞

1985—, 女, 硕士, 正高级工程师

主要从事直流输电与电力电子系统研究与成套设计的研究工作

E-mail: lilingfei@csg.cn

LI Lingfei
Professor



史尤杰(通信作者)

1991—, 女, 博士, 高工

主要从事直流输电与电力电子方面的研究工作

E-mail: shiyj@csg.cn

SHI Youjie
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author



侯 婷

1981—, 女, 硕士, 正高级工程师

主要从事直流输电与电力电子方面的研究工作

E-mail: 20956886@qq.com

HOU Ting
Professor



卢倚平

1997—, 男, 博士

主要从事直流输电与电力电子方面的研究工作

E-mail: luyip@csg.cn

LU Yiping
Ph.D.