

基于变压器油温梯度条件下的局部放电定位研究

李亚波,丁贵立,康 兵,袁小翠,支腾飞

(江西水利电力大学,江西 南昌 330099)

摘 要:围绕变压器油温梯度对于局部放电超声定位精度的影响,文中提出一种基于到达时间差(time difference of arrival, TDOA)的混沌海鸥优化算法(tent seabull optimization algorithm, T-SOA)的超声波定位方法。该方法针对海鸥优化算法(seagull optiminzation algorithm, SOA)易陷入局部最优、寻优精度不足的缺陷,引入 Tent 混沌初始化与动态惯性权重,增强全局搜索与局部开发能力,从而提高复杂温度场中的定位准确性。通过搭建热传导场、层流场以及声场相互作用的油浸式变压器三维有限元仿真模型,对不同油温梯度条件下超声波的传播特性并比较粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、SOA 及 T-SOA 的定位效果进行研究。仿真结果表明:油温梯度对油中声速有较大影响,采取非固定的等效声速可以大大降低定位误差,在 20 ℃时改进的算法平均定位误差为 5.977 cm,在 40 ℃时为 10.903 cm,精度均明显优于对比方法。该研究可为考虑温度因素的变压器局部放电在线检测及其故障诊断提供参考。

关键词:局部放电定位;温度梯度;多物理场耦合;超声传播;混沌海鸥优化算法

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)03-0048-06

0 引言

变压器是电力系统实现电能输送及电压转换的重要电气设备,其运行可靠性直接影响电网的安全性和稳定性^[1]。绝缘老化是引起变压器各种故障的重要原因,而局部放电是绝缘缺陷形成和发展过程中一种比较常见的早期征兆。准确地找到局部放电源的位置对于变压器的状态监测以及预防性维护等具有重要意义,也是保证变压器可靠运行的关键技术之一^[2-3]。

目前,常用的局部放电定位技术主要有两类:电测法和超声定位法^[4-6]。电测法是根据局部放电产生的电磁脉冲进行定位,但是在现场存在较强的电磁干扰会影响信号质量,从而导致定位可靠性以及准确性较差;超声定位法因其具有良好的抗电磁干扰能力、信号传播路径清晰、便于观察的特点而在实际工程中被广泛使用^[7-10]。但是,传统的超声定位都以假定声速恒定,而实际运行的变压器内部由于温度分布不同,造成声音在其中传播的速度不固定。

在实际工作过程中,由于变压器铁芯以及绕组产

生电磁损耗,造成变压器内绝缘油存在较大的非均匀温升,在上下层之间温差可达到 20 ℃以上,而油温变化又会影响油中声速的变化,因此,温度引起的不同位置处声速发生变化,导致基于固定声速的传统到达时间差(time difference of arrival, TDOA)定位方法出现较大的偏差,从而影响定位精度,无法达到智能变电站对于设备故障准确定位的要求^[11]。

近年来,多物理场耦合仿真以及智能优化算法为解决复杂工况下局部放电定位提供了一种新方法^[12]。一些学者对声场建模、优化算法进行了一定的研究工作,但是仍然存在以下问题:第一,大部分定位方法没有同时考虑温度场、流场以及声场之间的相互作用关系,不能准确地表示油温梯度引起的超声波传播的变化;第二,对于非线性和有严格限制条件下的定位优化,传统的优化算法很难找到全局最优解或者陷入局部最优;第三,很少有文献把由温度梯度导致的不同声速值引入到定位算法中去,造成定位结果与实际情况不符^[13-14]。

文中围绕变压器油温梯度下,如何提升局部放电超声定位精度这一关键问题开展研究。根据 TDOA 建立定位方法;针对传统海鸥优化算法(seagull opti-

收稿日期:2026-03-10

基金项目:江西省重点研发计划项目(20243BBG71031)。

作者简介:李亚波(2000),男,硕士研究生,研究方向为变压器局部放电。

minization algorithm, SOA) 容易陷入局部极小值、寻优精度较低的问题,在 SOA 基础上加入 Tent 混沌映射进行种群初始化,并采用动态惯性权重策略,形成改进后的混沌海鸥优化算法(Tent-seabull optimization algorithm, T-SOA),增强其全局搜索能力和局部开发能力;采用多物理场仿真软件,搭建包含铁芯、绕组、绝缘油在内的油浸式变压器三维模型,实现热传导场-层流场-声场三者耦合,模拟油温梯度产生的超声波传播、反射、衰减及延迟情况,量化温度对声速的影响规律;分别对 20 °C、40 °C 两种情况进行仿真计算,并比较各种方法得的定位结果。研究表明,在定位算法中考虑温度对声速的影响,可以提高变压器局部放电超声定位准确性。

1 基于 TDOA 的定位方法

基于 TDOA,将变压器等效为图 1 所示立方体模型,以其一个顶角为坐标原点,建立三维直角坐标系。设局放源坐标为 $P(x,y,z)$,传感器坐标分别为 $S_1(x_1,y_1,z_1)$ 、 $S_2(x_2,y_2,z_2)$ 、 $\dots$ 、 $S_n(x_n,y_n,z_n)$,以 S_1 为基准传感器。

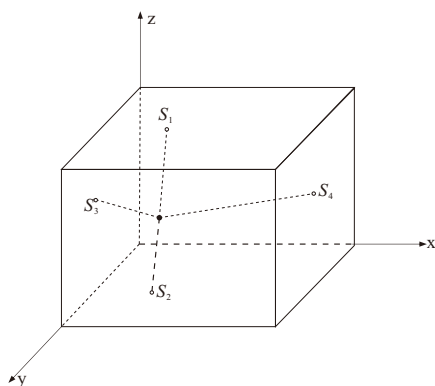


图1 局部放电超声定位原理图

局放点位置满足如下方程组:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = (vt_1)^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = [v(t_1+t_{21})]^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = [v(t_1+t_{31})]^2 \\ \vdots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + (z-z_n)^2 = [v(t_1+t_{n1})]^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_1 为传感器 S_1 到局部放电点 P 的时间; t_{i1} 表示第 i 个传感器与传感器 S_1 的时延估计值; v 为变压器油中超声波波速。

为便于求解,将式(1)两边开根号并整理,转化为

超定方程组:

$$f(x,y,z,v) = [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{1/2} - vt_1 = 0 \quad (2)$$

由于超定方程组无精确解,将其转化为带约束的优化问题,通过最小化目标函数确定局放源位置,目标函数与约束条件如下:

$$\begin{aligned} \min D(x,y,z,v) = & \sum_{i=1}^3 \left\{ [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{1/2} - vt_{i1} \right\} \\ & \begin{cases} 0 \leq x \leq x_{\max} \\ 0 \leq y \leq y_{\max} \\ 0 \leq z \leq z_{\max} \\ 1200 \leq v \leq 1500 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $x_{\max}$ 、 $y_{\max}$ 、 $z_{\max}$ 分别为模拟变压器的长、宽、高。

2 定位算法

2.1 SOA 算法

常用的启发式算法有 SOA,它是根据海鸥群体聚集、躲避障碍物以及螺旋觅食的行为进行优化求解的一种方法^[15-16],具有原理简单、全局搜索能力强的优点,在工程优化方面得到了广泛的应用。算法把每一个局部放电的位置作为一个海鸥个体,不断迭代以找到最优解,主要更新公式为:

个体与全局最优位置距离计算是位置更新的核心基础,距离向量 D 反映当前个体与全局最优解的差距,公式为:

$$D = |X_{\text{best}} - X_i(t)| \quad (5)$$

式中: X_{best} 为当前迭代全局最优位置; $X_i(t)$ 为第 i 只海鸥在第 t 次迭代的位置。

聚集-避障行为通过平衡聚集与避障,实现全局探索范围的合理控制,位置更新公式为:

$$X_i(t) = C \cdot X_{\text{best}} - A \cdot D \quad (6)$$

式中: $C=2 \cdot r_1$ 为聚集参数向量,表示个体朝向全局最优位置的聚集趋势; $A=2a \cdot r_2 - a$ 为避障参数向量,决定个体远离当前位置的扩散趋势; a 为收敛因子; $r_1, r_2 \in [0, 1]$ 为随机向量。

螺旋觅食行为模拟海鸥绕猎物螺旋飞行轨迹,强化局部搜索能力,位置更新公式为:

$$X_2(t) = D \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi l) + X_{\text{best}} \quad (7)$$

式中: $l \in [0, 1]$ 为均匀分布随机数, 用于产生不同的螺旋曲线从而防止陷入局部最优; b 为螺旋系数, 控制轨迹收缩速度; t 为当前迭代次数; e^{bt} 为螺旋半径衰减系数, 用于随迭代次数调整螺旋搜索半径, 提升局部搜索精度。

位置选择机制通过随机概率, 选择两种更新策略, 平衡全局探索与局部开发能力, 公式为:

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}_1(t) & r_3 < 0.5 \\ \mathbf{X}_2(t) & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $r_3 \in [0, 1]$ 为均匀分布随机数, 每轮迭代中随机生成一次; 当 $r_3 < 0.5$ 时选用聚集-避障策略强化全局探索; 当 $r_3 \geq 0.5$ 时选用螺旋觅食策略强化局部精准搜索。

2.2 T-SOA 优化算法

2.2.1 Tent 混沌初始化

原始 SOA 存在初始种群分布不合理以及搜索方式无自适应性问题, 容易陷入局部最优并且不能有效寻找到最优解。因此, T-SOA 在种群初始化以及搜索权重上进行了优化, 以达到全局探索和局部开发相结合的目的, 从而提高求解效率, 其改进核心、流程及参数设置如下:

采用 Tent 混沌映射生成初始种群, 利用其遍历性与随机性优化初始种群分布, 避免随机初始化导致的个体聚集, 提升种群多样性, 迭代公式为:

$$x_{ij} = \begin{cases} 2x_{ij-1} + \frac{r_4}{N} & x_{ij-1} \leq 0.5 \\ 2(1 - x_{ij-1}) + \frac{r_4}{N} & x_{ij-1} > 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_{i,j}$ 为第 i 个个体在第 j 维上的混沌值; N 为种群大小; $r_4 \in [0, 1]$ 为扰动因子, 用来破坏混沌序列周期性, 使种群更加均匀分布。

将混沌序列映射至实际解空间, 采用线性变换公式实现标准化初始化:

$$\mathbf{X}_{i,j} = \mathbf{b}_{l,j} + (\mathbf{b}_{u,j} - \mathbf{b}_{l,j}) \cdot x_{i,j} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{b}_{l,j}$ 和 $\mathbf{b}_{u,j}$ 分别为第 j 维变量的下界和上界; $\mathbf{X}_{i,j}$ 为初始化后的种群位置, 确保个体分布于预设解空间内。

2.2.2 动态惯性权重

引入指数衰减惯性权重 $\omega(t)$, 实现前期强全局探索、后期强局部开发, 公式为:

$$\omega(t) = 1 - e^{-\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}}} \quad (11)$$

式中: $t_{\max}$ 为最大迭代次数。迭代初期, 赋予全局最优位置较高权重, 强化全局探索范围, 在后期逐渐减小使其更注重局部优化, 提高精度。

基于上述改进, 优化后的位置更新公式如下:

聚集-避障行为融入动态惯性权重, 优化全局探索自适应能力, 公式为:

$$\mathbf{X}_1(t) = \omega(t) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_{\text{best}} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (12)$$

螺旋觅食行为结合惯性权重强化局部搜索针对性, 公式为:

$$\mathbf{X}_2(t) = \mathbf{D} \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + \omega(t) \cdot \mathbf{X}_{\text{best}} \quad (13)$$

2.2.3 T-SOA 算法详细流程

T-SOA 算法以最小化 TDOA 定位目标函数为优化目标, 具体步骤如下:

- 1) 初始化参数: 设置种群规模 N 、搜索维度 dim 、最大迭代次数 $t_{\max}$ 、螺旋系数 b 、惯性权重上下限 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 。
- 2) 混沌初始化种群: 采用 Tent 混沌映射生成初始位置, 确保种群均匀分布。
- 3) 计算适应度: 基于 TDOA 目标函数计算个体适应度, 确定个体最优与全局最优。
- 4) 参数更新: 计算动态惯性权重 $\omega(t)$ 、聚集参数 $\mathbf{C}$ 、避障系数 $\mathbf{A}$ 。
- 5) 位置更新: 按式(12)(13)生成候选位置, 执行边界约束, 选择较优位置更新个体与全局最优。
- 6) 终止判断: 若达到最大迭代次数, 则输出全局最优位置作为局部放电定位结果; 否则, 返回步骤4继续迭代。

3 多物理场耦合原理

3.1 温度场

油浸式变压器工作时, 其内部散热情况非常复杂。因为有电磁损耗产生, 所以铁芯、绕组是主要发热源, 不断发出大量热量, 而这些热量主要是以两种方式进行传播和扩散。一种是导热, 在铁芯中、绕组中乃至变压器油中都可以发生, 只要有温差, 就会有热量由高向低逐渐传导, 既可以发生在同一个物体内部, 也可以发生在相互邻近的不同物体之间; 另一种是流动, 是通过变压器内的油流动来实现换热。油流过温度较高的铁芯、绕组表面时, 会吸热并随之流动, 把热量从高温区带到温度较低的地方, 从而使整个变压器内温度达到均等。

在油浸式变压器中,变压器油和铁芯、绕组等的传热过程可以用能量守恒定律来描述,其数学表达式为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q}_{th} = Q_{th} \quad (14)$$

$$\mathbf{q}_{th} = -k \nabla T \quad (15)$$

式中: ρ 为介质的密度; C_p 为变压器油的比热容; $\mathbf{u}$ 为变压器油的速度矢量; T 为温度; $\mathbf{q}_{th}$ 为热流密度矢量; k 为介质的导热系数; Q_{th} 为单位体积内的热源强度,在文中主要包括铁芯、高压绕组、低压绕组产生的热量。

当温度变化时,油的密度及弹性模量发生变化,使声速随着温度增加而减小,在垂直方向上呈非线性变化趋势,这对超声波传播时间造成较大影响。

3.2 层流场

油在变压器内流动对于热传导以及超声波传播都有很大作用,且满足质量守恒和动量守恒定律。

质量守恒定律也称为连续性方程,描述了流体在流动过程中质量的守恒关系,其表达式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (16)$$

动量守恒定律描述了流体在流动过程中动量的变化与所受外力之间的关系,其表达式为:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-P_f \mathbf{I} + \mu \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{F} \quad (17)$$

式中: P_f 为压力; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; μ 为变压器油动力粘度系数; $\mathbf{F}$ 为外部体积力密度矢量。

通过对层流场控制方程求解,可获得变压器油在各处速度、压力等信息,这对研究变压器内部热对流及温度场分布有帮助,且能为研究超声波在流动介质中传播提供必要层流场参数。

3.3 压力声学声场

局部放电在变压器绝缘油中产生超声波,以压力的形式进行传播,在传播过程中受到温度场以及层流场的影响。为了精确地求得声波到达各个检测点所需的时间差,建立考虑温度场和层流场的作用下的压力声学控制方程。

在小振幅声波、弱可压缩流体、低速层流假设下,声场满足以下压力声学方程:

$$S_p = \frac{\partial^2 P_s}{\partial t^2} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \nabla P_s + \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{\partial P_s}{\partial t} \right) + \mathbf{u} \cdot \nabla (\mathbf{u} \cdot \nabla P_s) \quad (18)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(T)} \nabla P_s \right) - \frac{1}{\rho(T) v^2(T)} S_p = -Q_{pd} \quad (19)$$

式中: S_p 为层流绝缘油介质内声压二阶演化项; P_s 为

声压; Q_{pd} 为局部放电声源激励项。

4 仿真实验

4.1 变压器仿真模型的建立

为研究油温梯度下超声波在变压器内部传播特性及局部放电定位方法,在基于有限元分析软件建立的简化变压器三维模型基础上进行相关研究。此模型由铁芯、高压绕组、低压绕组、绝缘油和变压器外壳组成,在固体-流体传热模块和声学模块中,考虑了由于变压器工作而造成的温度梯度和出现局部放电情况时,超声波在该温度梯度中传播情况。

简化后的变压器模型尺寸为1.6 m×0.6 m×0.9 m。其中,铁芯是一个半径为0.1 m、高为0.6 m的圆柱体;三相绕组是空心圆柱体结构,套在铁芯外面,其外径为0.13 m、内径为0.1 m、高为0.6 m;局部放电源P所在位置为(0.400, 0.350, 0.500) m,如图2所示。

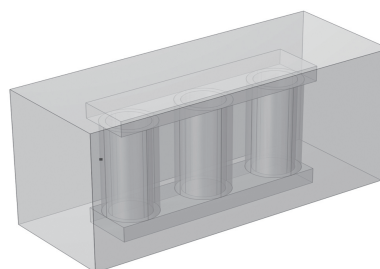


图2 变压器仿真模型

在油浸式变压器耦合场计算过程中,变压器油的性质对其传热能力和超声波传播有很大关系。在实际运行情况下,变压器油的恒压热容、导热系数、动力粘度和密度等都会随着温度改变而变化,为了使得到的结果更加准确地描述变压器温升以及超声波传播情况,此处将变压器油各项参数设置成温度函数,如表1所示。

表1 变压器油的物性参数与温度的关系

物理参数	变压器油
导热系数/(W/m·K ⁻¹)	0.151-7.1×10 ⁻⁵ T
密度/(kg/m ³)	1 051.2-0.579 5 T
恒压热容/(J/kg·K ⁻¹)	807.16-3.58 T
动力粘度/(Pa·S)	0.08-4×10 ⁻⁴ +5×10 ⁻⁷ T ²

变压器铁芯、高压绕组和低压绕组组成的复合材料成分多样、界面众多,对其进行精确,建立微细单元工作量并且耗时较长。因此,文中利用等效均质化方法,将此复合材料整体等效成一种均质、各向同性弹性固体介质,选择普通硅钢以及纯铜两种常见材料

的声学性能进行等效,这样可以较好地较大范围内描述其中声音传播的整体情况,如表2所示。

表2 铁芯和绕组的物性参数

物理参数	铁芯	低压绕组	高压绕组
导热系数/(W/m·K ⁻¹)	7 550	8 960	8 960
密度/(kg/m ³)	21	338	338
恒压热容/(J/kg·K ⁻¹)	550	385	385
密度/(kg/m ³)	5 100	4 700	4 700

绝缘油中的超声波传播速度随温度变化较大,变压器内部由于存在温度梯度,使绝缘油温度上升而密度下降,从而引起其中超声传播速度下降。文献[17]相关研究及试验结果表明,超声波速度与变压器油温呈线性关系,在20℃下,绝缘油中超声波速度约为1 420 m/s;当油温每提高10℃,超声波速度下降约33.5 m/s。因此,可以得到变压器油中超声波速度与温度的关系为:

v_{eq}=1 487-3.35T (19)

在油浸式变压器正常工作过程中,铁芯以及绕组由于电磁损耗会产生一定热量,在变压器中会形成温度梯度场,而文中主要是研究温度梯度对于超声波传播以及局部放电定位的影响,所以忽略了电磁场与温度场之间的相互影响,通过改变绕组的温度来构建不同的非线性温度梯度场。为了简化仿真实验,文中主要研究绕组温度为20℃和40℃时的超声波传播特性及局部放电定位效果。

4.2 声源方程

由于局部放电产生的超声波信号有其特点,一般为衰减振荡信号^[18]。因此,在仿真实现局部放电引起的超声波信号时,采用以下点声源时域模型:

Q_s = A e^{-(t-t₀)/τ} sin(2πft) (20)

式中:A为幅值;t₀为起始时间;τ为衰减时间常数;f为衰减振荡频率,τ=20 μs;f=50 kHz。如图3所示。

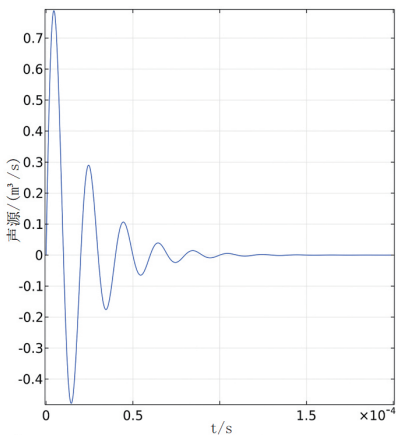


图3 模拟局部放电波形图

4.3 边界条件

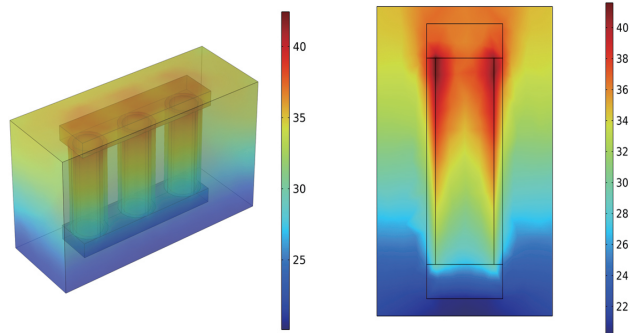
文中采用不同绕组温度来研究温升情况,变压器壁温定义为环境温度,设定为293.15 K,在变压器油箱外壁处施加刚性声学边界,边界法向位移为0,以保证超声波在固体壁面上进行反射条件,可表示为:

n · (-1/4 ∇p + q_s) = 0 (21)

式中:n为声学域边界上的外法向单位向量;q_s为声流密度向量。

5 结果分析

仿真得到的油温梯度分布如图4所示。变压器内部存在明显的上层高温、下层低温非线性分布,这是由于热油密度小向上浮升、冷油密度大向下沉降形成自然对流,最终形成稳定的温度梯度场。温度梯度直接导致油中声速沿垂直方向不均匀分布,进而影响传统恒定声速定位方法准确性。由图5可知,超声波基本呈球面波方式传播,在绕组及油箱之间有较强烈反射及折射现象。对比20℃与40℃工况可知,温度较高时,油中声速较低,波到达传感器所需时间较长;另外,绕组本身对超声波有一定的吸收和散射作用,在经过绕组路径处波幅会大大减弱。因此,将探测器置于变压器顶端可以避开强衰减区,而且顶端油温较平稳,能降低温度梯度对声速以及信号传输带来的不利因素,有助于提高接收信号质量。各传感器坐标分别为S₀(0.4, 0.5, 0.9) m, S₁(0.1, 0.3, 0.9) m, S₂(0.3, 0.1, 0.9) m, S₃(0.7, 0.4, 0.9) m,其中S₀为参考传感器。



(a) 三维温度分布云图 (b) yz面温度分布云图

图4 变压器温度分布云图

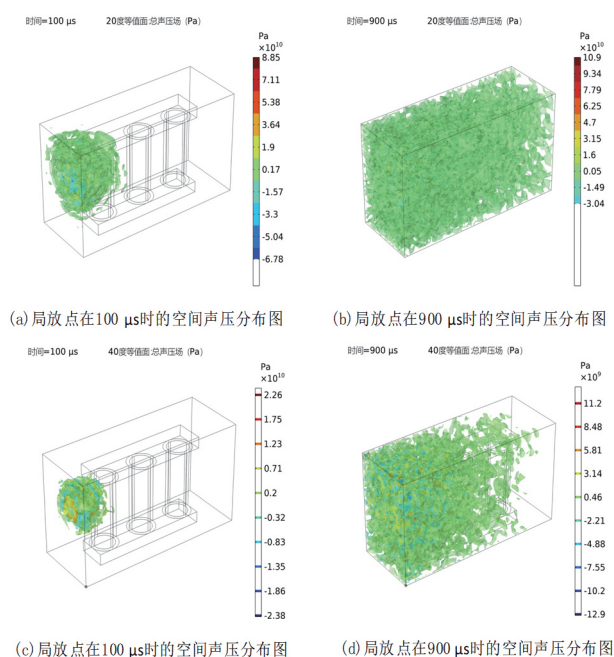


图5 变压器局部放电等值面声压图

在忽略绕组对于超声波衍射作用的情况下,超声波在变压器油中的平均传播速度介于顶层油温 T_1 与底层油温 T_2 对应的声速 $v_{eq}(T_1)$ 与 $v_{eq}(T_2)$ 之间。针对变压器内部油温沿垂直方向存在较大差异的情况,文中采用平均声速区间 $[v_{eq}(T_1), v_{eq}(T_2)]$ 作为声速选取区间来反映温度变化对于声速影响,来提高定位精度。

把仿真得到时延值代入到PSO、SOA以及T-SOA中进行定位,定位结果如表3、表4所示,其中定位误差是指所求得的位置与实际位置之间的欧氏距离。

表3 不同温度的定位位置

温度/℃	坐标	局放位置/m	T-SOA/m	SOA/m	PSO/m
20	x	0.400	0.362	0.384	0.376
	y	0.350	0.327	0.353	0.325
	z	0.500	0.540	0.578	0.584
40	x	0.400	0.391	0.356	0.389
	y	0.350	0.362	0.359	0.380
	z	0.500	0.392	0.618	0.361

表4 不同温度的定位误差

温度/℃	优化算法	定位位置/m	定位误差/cm
20	T-SOA	(0.362, 0.327, 0.540)	5.977
	SOA	(0.384, 0.353, 0.578)	7.968
	PSO	(0.376, 0.325, 0.584)	9.087
40	T-SOA	(0.391, 0.362, 0.392)	10.903
	SOA	(0.356, 0.359, 0.618)	12.626
	PSO	(0.389, 0.380, 0.361)	14.260

定位结果表明,T-SOA算法的定位准确度优于SOA算法与PSO算法,表现出良好的定位准确性。同时,随着油温的升高,三种算法的定位误差都呈现出增大的趋势,印证了温度梯度对局部放电定位精度

的显著影响,也说明在定位算法中,考虑温度对声速的影响是提高定位精度的有效途径。

6 结语

1) 文中采用有限元仿真软件对超声波在梯度油温条件下的传播特性进行分析。结果表明,由于变压器运行时内部存在温度梯度,在变压器油中会出现中心区向上和边缘区向下的循环流动,而且它有明显的分层特性;当温度变化时,油的密度及弹性模量发生变化,使得超声波传播速度随着温度增加而减小。

2) 使用非固定等效声速可以更好地模拟油温梯度情况下变压器内部情况,可以有效提高温度梯度下定位精度。

3) 提出了一种基于Tent混沌映射与动态惯性权重的T-SOA,改善了原始SOA易早熟、收敛精度低的缺陷,提升定位精度。

参考文献:

- [1] 于丹.电力变压器局部放电检测与诊断方法的研究进展[J].电子产品世界,2025,32(03):72-76.
- [2] 尹军辉,裴旭东.电力系统中变压器局部放电检测技术的实验研究与改进策略[J].电器工业,2025(03):29-35.
- [3] 胡雨婕,王奎.基于时差定位法的变压器绕组局部放电定位方法研究[J].黑龙江电力,2025,47(04):354-358,369.
- [4] 马文涛,严天峰,郑礼,等.基于电力变压器的局部放电定位方法研究[J/OL].现代雷达,1-7[2026-05-11].https://link.cnki.net/urlid/32.1353.TN.20250113.1856.002.
- [5] 余昌佳.变压器局部放电超声波信号分析与定位研究[D].南京:东南大学,2019.
- [6] 王学会,张伟超,赵洪,等.液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放超声传感器特性参数影响[J].光学学报,2018,38(04):88-96.
- [7] 钱定冬,宋柯,王伟.基于鲸鱼算法的变压器局放超声内部定位研究[J].电子科技,2023,36(11):41-46.
- [8] 袁易全.局部放电超声特性实验研究[J].电工技术学报,1992(01):18-23.
- [9] 郭雪婷,杨俊杰,薛乃凡,等.自适应细菌觅食算法的局部放电定位[J].科学技术与工程,2022,22(29):12867-12874.
- [10] 蔡谦,钱勇,徐治仁,等.基于广义二次相关和改进飞蛾扑火算法的变压器局部放电定位技术[J].电力自动化设备,2025,45(07):218-224.

(下转第87页)

LCC 谐振网络实现了原边电流和负载电流恒定的功率传输,有效降低了高次谐波对信号传输的干扰,并在此基础上设计了全双工信号传输通道。电能与信号共用一对耦合线圈进行传输,在信号接收回路加入阻波网络以隔绝其它信号源的影响;文中分析了信号传输电压增益以及系统的干扰,提出了一种参数设计方法以提高信道增益;最后,搭建了双向传输速率均为 100 kb/s 的仿真模型,验证了所提方法的可行性。

参考文献:

- [1] FAN Y, SUN Y, DAI X, et al. Simultaneous wireless power transfer and full-duplex communication with a single coupling interface[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(06): 6313-6322.
- [2] Ge Xuejian, Sun Yue, Tang Chunsen, et al. Dual-output inverter for dynamic wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(04): 786-798.
- [3] X. Liu, C. Xia, X. Han, et al. Simultaneous wireless power and information transmission based on harmonic characteristic of soft-switching inverter[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 69, no. 6, pp. 6090-6100, Jun. 2022.
- [4] Z. Wu, L. Tan, X. Hu, et al. A three-channel M ary simultaneous wireless power and data transfer system[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 72, no. 5, pp. 5440-5451, May 2025.
- [5] 王佩月. WPT 系统双向信号并行传输技术与拓扑研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [6] P. Wang, Y. Sun, Y. Feng, et al. An improvement of SNR for simultaneous wireless power and data transfer system with full-duplex communication mode[J]. IEEE Trans. Power Electron. vol. 37, no. 2, pp. 2413-2424, Feb. 2022.
- [7] Y. Jing, K. Fu, J. Yu, et al. Simultaneous wireless power and data transfer system with full-duplex mode based on half-cycle OFDM[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 72, no. 2, pp. 1412-1421, Feb. 2025.
- [8] Y. Yao, H. Cheng, Y. Wang, et al. An FDM-based simultaneous wireless power and data transfer system functioning with high-rate full-duplex communication[J]. IEEE Trans. Inform., vol. 16, no. 10, pp. 6370-6381, Oct. 2020.
- (上接第 53 页)
- [11] 蒋惠中, 魏本刚, 文杰, 等. 分体式油浸自冷变压器三维温度场和流场仿真与分析[J]. 高压电器, 2021, 57(02): 63-69.
- [12] 蔡萌萌, 孙浩. 基于多绕组模型的变压器局部放电检测定位方法[J]. 电工技术, 2025(22): 270-272.
- [13] 回恩良, 蔡志远. 基于声电联合的局部放电定位方法研究[J]. 电工技术, 2024(23): 47-50, 54.
- [14] Mondal M, Kumbhar G B. Partial discharge localization in a power transformer: Methods, trends, and future research[J]. IETE Technical Review, 2017, 34(05): 504-513.
- [15] 韩毅, 徐梓斌, 张亮, 等. 国外新型智能优化算法—海鸥优化算法[J]. 现代营销(经营版), 2019(28): 70-71.
- [16] 王培崇, 张天颖, 李丽荣. 一种改进的海鸥优化算法及其应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(06): 991-998.
- [17] Ren S, Hao D, Zhao X, et al. An ultrasonic signal propagation model of transformer partial discharge considering nonlinear attenuation in the temperature gradient field[J]. Electrical engineering, 2024, 106(01): 53-62.
- [18] 徐艳春, 王泉, 李振兴, 等. SA-APSO 算法及其在变压器油中局部放电超声定位中的应用[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 143-149.