

# 基于磁场和支持向量机的空心电抗器匝间短路诊断研究

翟雨佳<sup>1,2</sup>, 戴昀翔<sup>1</sup>, 刘浩<sup>1</sup>, 申刘飞<sup>1</sup>, 吴仕军<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

**摘要:** 针对干式空心电抗器的匝间短路故障检测问题,提出了一种利用电抗器磁场幅值与支持向量机的匝间短路故障诊断方法,并仿真验证其有效性。首先建立了干式空心电抗器的场路耦合模型,研究分析了电抗器在不同故障条件下底部磁场幅值和角度分布的变化情况,并以磁场幅值与角度的变化信息为特征数据,提出了基于 SSA-SVM 的故障分类诊断模型,结合实际应用中的限制条件,磁场分布选取均匀的测量位点处的磁场数据所组成的向量进行表示,并引入欧式距离这一数学指标描述其变化。仿真结果表明,磁场信息能够有效适用于 SVM 模型进行匝间短路故障的分类诊断,且通过麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)对其惩罚因子和核参数进行寻优后,得到的 SSA-SVM 模型获得了更好的诊断准确率。

**关键词:** 干式空心电抗器; 匝间短路; 磁场; 有限元分析; 支持向量机; 麻雀搜索算法

## Research on Inter-turn Short Circuit Diagnosis of Dry-type Air-core Reactor Based on Magnetic Field and Support Vector Machine

ZHAI Yujia<sup>1,2</sup>, DAI Yunxiang<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, SHEN Liufei<sup>1</sup>, WU Shijun<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In view of inter-turn short circuit fault detection of dry air core reactor, a kind of inter-turn short circuit faults detection method using the magnetic field amplitude and the support vector machine is proposed and its effectiveness is verified by simulation. Firstly, the field circuit coupling model for a dry type air-core reactor is set up, the variation in the amplitude and angle distribution of the bottom magnetic field of the reactor under different fault conditions is studied and analyzed and the the variation information of magnetic field amplitude and angle are taken as the characteristic data, the fault classification and diagnosis model based on SSA-SVM is proposed. To consider the limitations in practical applications, the magnetic field distribution is represented by a vector which is composed of magnetic field data at uniform measurement points, and the Euclidean distance is introduced as a mathematical indicator to describe its variation. The simulation results show that the magnetic field information can be effectively applied to the SVM module for classification and diagnosis of inter-turn short circuit faults, and the obtained SSA-SVM model achieves better diagnostic accuracy after optimizing its penalty factor and kernel parameters through SSA.

**Keywords:** dry-type air-core reactor; inter-turn short circuit; magnetic field; finite element simulation; support vector machine; sparrow search algorithm

## 0 引言

干式空心电抗器相较于传统的铁心式电抗器,因具有线性度好、机械强度高、重量轻、抗饱和能力

强等优点,广泛应用于当前的电力系统当中,在限流、滤波与无功补偿等方面起到重要作用<sup>[1-4]</sup>。但在实际运行过程当中,干式空心电抗器通常应用于户外,运行环境较为恶劣,因而容易出现不同类型的

收稿日期:2023-07-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52177019);中国科学技术协会青年人才托举计划(2021QNRC001);湖南省自然科学基金优秀青年项目(2021JJ20013);湖南省创新平台与人才计划-湖湘青年英才(2021RC3058)

故障,其中匝间短路故障出现的占比相对最高<sup>[5-7]</sup>。匝间短路的出现会致使电抗器短路位置处的温度骤升从而发生局部过热,最终致使电抗器烧毁。为确保电抗器的安全稳定运行,对干式空心电抗器的匝间短路故障诊断进行研究分析具有重要意义。

在干式空心电抗器匝间短路故障检测方面,国内已有诸多学者对其进行大量研究。目前已有的检测方法包括采用电流<sup>[8-9]</sup>、阻抗<sup>[10-11]</sup>、电感<sup>[12-13]</sup>等电气量作为监测参数进行的匝间短路故障检测,其虽具有可行性但并不易实施,测量时部分测量装置需和电抗器进行直接接触,因而装置布置的自由度将会受到一定的限制。而干式空心电抗器运行工作时,电流将通过电抗器的各层线圈并会相应产生磁场。当匝间短路故障发生后,电抗器周围的空间磁场分布也将势必发生改变,相较于电流、电感、电压等电气量,磁场是一个空间矢量,能够包含除幅值大小外的空间方向信息,而磁场方向也能反映电抗器的运行状态,同时磁场分布不易受外部环境的影响并可实施无接触检测,便于实际的应用测量。

在干式空心电抗器匝间短路故障磁场检测方面也有一部分学者进行了相关研究。文献<sup>[14-15]</sup>研究了干式空心电抗器匝间短路故障前后的磁场分布变化,并分析了故障程度、故障高度以及故障发生相对半径这3个不同故障条件下电抗器磁场的变化规律,但上述文献所分析的磁场参数为标量,并未考虑匝间短路故障后磁场的方向变化。在利用磁场信息对电抗器匝间短路故障情况进行诊断方面,目前通常采用函数拟合的方式对磁场数据进行处理分析,文献<sup>[15]</sup>基于其仿真数据建立了不同匝间短路故障条件下的检测函数,以实现匝间短路故障的具体情况检测,但这种检测方法缺乏一定的可靠性,因为检测函数是由单点的磁场数据拟合而成,并且仅考虑了磁场的幅值数据,这将使得诊断信息相对匮乏,容易对故障的实际情况进行误判。同时,一个检测函数仅适用于单一故障条件下的故障诊断,拟合时需以单一故障条件为变量,其余二个故障条件要事先确定,这将为故障检测的应用实施增添难度。在考虑故障发生相对半径这一条件时,由于匝间短路仅发生在线圈上,不同径向位置的匝间短路发生半径不会连续,这将使得连续函数的拟合无法进行,因而这种方法也存在着一定的局限性。

考虑上述研究的不足,针对干式空心电抗器匝间短路的故障诊断问题,本文提出了一种基于磁场和支持向量机的匝间短路故障定位诊断方法。为

获取电抗器的故障运行数据,本文以一台35 kV的干式空心电抗器进行有限元建模,并在所建模型的基础上,设置了不同条件的匝间短路故障。为充分利用磁场的空间矢量特性,除磁场幅值以外,同时分析了不同故障条件下磁场角度的分布变化,验证了磁场幅值与角度均可作为分类特征信息的可行性,并为后续诊断提供数据基础。支持向量机(support vector machine, SVM)作为一种机器学习算法,目前已广泛的应用于分类问题当中,利用其突出的数据特征提取和小样本数据处理能力,将空心电抗器分类的磁场分布信息引入至故障的分类诊断中,而磁场分布信息是由多个均匀分布的测量位点处的磁场数据所组成的向量进行表示,并采用欧式距离这一数学指标量化其变化情况。针对SVM中人为设定的核参数效率低且不能自适应的问题,本文利用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)对SVM的核参数与惩罚因子进行了优化,仿真结果表明该模型以空心电抗器的磁场幅值与角度信息为特征输入能够有效地对匝间短路故障进行分类诊断,且经过麻雀搜索算法优化参数后所得到的SSA-SVM模型有着更为明显的故障分类效果。

## 1 支持向量机与麻雀搜索算法

### 1.1 支持向量机

支持向量机是一种按监督学习方式对数据进行二分类的模型,它的基本模型是定义在特征空间上的间隔最大的线性分类器,在小样本、非线性数据处理方面性能突出,并且有着求解速度快,泛化能力强等优点<sup>[16-18]</sup>。

设可分样本为 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n, x_i \in R^n, y_i \in \{+1, -1\}$ ,在满足线性可分的条件下超平面一般情况下可以写为

$$\omega^T x + b = 0 \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为超平面的法向量; $b$ 表示偏差值。

可通过求解式(2)所示的约束条件得到最优分类超平面为

$$\begin{cases} \min & \varphi(\omega) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \\ \text{s.t.} & y_i(\omega x_i + b) \geq 1 - \xi_i \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\xi_i$ 为松弛变量; $C$ 为惩罚因子。

由于大多数样本为非线性数据,为此需引入核函数实现对最优分类超平面的求解,而径向基核函数(RBF)的使用较为普遍,具有较强的局部作用性,其公式为

$$K(x_i, x) = e^{-\|x_i - x\|^2 / 2\sigma^2} \quad (3)$$

基于此核函数的基础上,最优分类判定公式为

$$f(x) = \text{sgn} \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (4)$$

## 1.2 麻雀搜索算法

SSA 是一种模仿麻雀捕食和反捕食的新型智能优化算法<sup>[19-21]</sup>。在觅食过程当中,麻雀可分为探索者和追随者,其中探索者的适应度较高,能够进行大范围地搜索,当其发现食物时会优先觅食并为整个种群提供觅食区域和方向,探索者的位置更新数学公式为

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{ij}^t \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot T}\right), & R_2 < S_T \\ X_{ij}^t + Q \cdot L, & R_2 \geq S_T \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t$  和  $T$  分别表示当前的迭代次数以及最大迭代次数;  $X_{ij}^t$  表示维数为  $j$  时  $t$  次迭代时麻雀的位置;  $\alpha$  为随机数,取值范围为  $(0, 1]$ ;  $R_2$  为预警值,取值范围为  $[0, 1]$ ;  $S_T$  表示安全值,取值范围为  $[0.5, 1]$ 。

当探索者发现食物时,会向追随者发出消息,追随者收到消息后会及时调整位置,以便更好地捕捉食物,追随者的位置公式为

$$X_{ij}^{i+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(-\frac{x_{\omega}^t - x_{ij}^t}{t^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ x_{ij}^{i+1} + |x_{ij}^t - x_{ij}^{i+1}| \cdot A^+ \cdot L, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x_{\omega}^{t+1}$  为当前的全局最优坐标位置;  $x_{\omega}^t$  为当前的全局最差坐标;  $A$  为一个  $1 \times d$  的矩阵,其元素值为 1 或 -1,且  $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当  $i > n/2$  时,这表明第  $i$  个追随者并没有获得食物,需前往下一个区域进行觅食。

捕食期间麻雀中存在一部分预警者,其初始位置信息在种群中随机产生,当有危险逼近时,他们将会对其他麻雀发出预警信息,坐标位置更新为

$$x_{ij}^{i+1} = \begin{cases} x_{ij}^t + \beta \cdot |x_{ij}^t - x_{\omega}^t|, & f_i > f_g \\ x_{ij}^t + K \cdot \frac{|x_{ij}^t - x_{\omega}^t|}{(f_i - f_{\omega}) + \varepsilon}, & f_i = f_g \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $x_{ij}^t$  为当前全局最优坐标位置;  $\beta$  为步长控制参数;  $K$  为随机数,取值范围为  $[-1, 1]$ ;  $f_i$  为当前麻雀个体的适应度;  $f_g$  和  $f_{\omega}$  分别为当前全局最优适应度值和最差适应度值;  $\varepsilon$  为一个很小的常数,避免分母为零的情况出现。

## 1.3 SSA-SVM 的原理

在 SVM 模型中,惩罚因子  $C$  与核参数  $g$  会直

接影响模型的分类诊断准确度,在训练优化过程当中,不同的训练参数会影响分类模型的分类效果。SSA 是一种新型的智能优化算法,其具有寻优能力强,收敛速度快等优点,因而可采用 SSA 对训练参数  $C$  和  $g$  进行寻优,以获得最优的分类效果,其优化过程具体如下:

1) 初始化各个麻雀搜索算法的相关参数,包括麻雀种群规模、最大迭代次数,以及 SVM 参数  $C$ 、 $g$ ;

2) 计算种群中麻雀的适应度值,并筛选出当前种群中的最优适应度值,保留最优的适应度值及位置信息;

3) 筛选出种群中适应度较高的麻雀为探索者,其余的麻雀为追随者,依据于式(5)、(6)更新其位置信息;

4) 麻雀种群中存在一部分预警者,能够察觉到危险并依据于式(7)更新位置;

5) 计算种群中各麻雀个体新位置的适应度值,将更新后的适应度值与原来的最优值进行比较,并更新全局最优位置信息;

6) 判断迭代次数是否满足预先设置的终止条件,如满足条件,则停止迭代并输出最优参数,将测试集样本输入到最优的 SVM 模型,输出诊断结果,如不满足,则重复步骤(2)。

## 2 空心电抗器匝间短路磁场分布分析

### 2.1 电抗器场路耦合模型建立

为探究匝间短路故障下干式空心电抗器磁场分布的变化规律,同时为获取后续诊断所需的磁场数据,本文以一台 35 kV 的串联电抗器样机作为研究对象,依据其实际结构参数,运用有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对干式空心电抗器进行建模仿真,并计算匝间短路故障所引起的空间磁场变化。其中电抗器绕组线圈材质为铝,绕制方式为单股绕制,内径 1 090 mm,外径 1 304.5 mm,具体电抗器参数见表 1。

表 1 电抗器样机额定参数  
Table 1 Rated parameters of reactor sample

| 参数      | 数值   | 参数     | 数值  |
|---------|------|--------|-----|
| 额定电压/kV | 35   | 额定电流/A | 125 |
| 容量/kvar | 360  | 频率/Hz  | 50  |
| 电感/mH   | 73.1 | 包封数    | 4   |
| 包封1层数   | 4    | 包封2层数  | 3   |
| 包封3层数   | 3    | 包封4层数  | 4   |

干式空心电抗器结构关于中心对称,因此可将模型等效为一个二维轴对称模型<sup>[22]</sup>,在分析电抗器

的每层线圈时,由于实际电抗器匝间的金属绕组分布均匀且紧密,为简化运算可将电抗器线圈横截面等效为一个长为线圈高度,宽为线圈线径的矩形。当电抗器发生匝间短路故障时,短路线圈部分可由单独的矩形块进行表示,其中矩形块的长度由短路线圈的匝数所决定,短路匝数与该层线圈总匝数的比值即为故障程度( $s$ ),有限元仿真模型见图1。

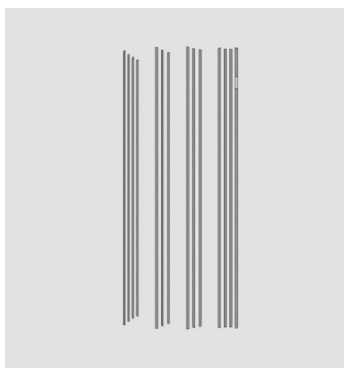


图1 干式空心电抗器二维有限元模型  
Fig. 1 2D finite element model of dry-type air-core reactor

## 2.2 电抗器匝间短路磁场变化分析

在实际运行过程中,电抗器需要通过绝缘子进行支撑,其底部会预留一部分空间,考虑到实际测试的便利性与安全性,本文以电抗器底部圆心处为起

点,沿水平横轴正方向至1 000 mm处提取电抗器底部磁场峰值时的分布数据,其数据提取路径的大致示意图见图2。由于提取路径处于中心横轴,除磁场的径向分量与轴向分量外,其余磁场分量均会被抵消,因而在路径位置处磁场的幅值与角度均可用轴向磁场分量与径向磁场分量求解计算得出。

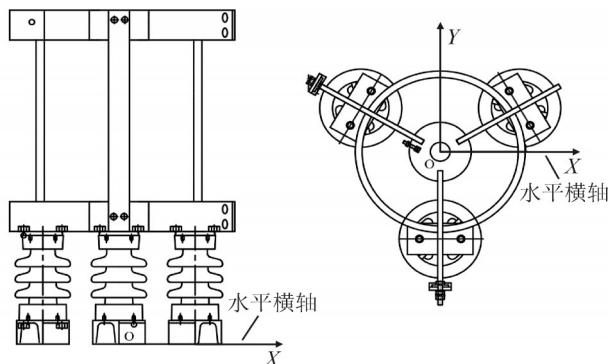


图2 底部磁场测量示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of bottom magnetic field measurement

为考虑纵向和径向匝间短路位置对底部磁场分布的影响,本文分别在第11层线圈上、中、下部设置匝间短路以及在第1、5、8层线圈位置上部设置匝间短路,分析不同条件故障前后底部磁场幅值与角度的变化规律,其底部的磁场的幅值与角度的变化数据见图3-4。

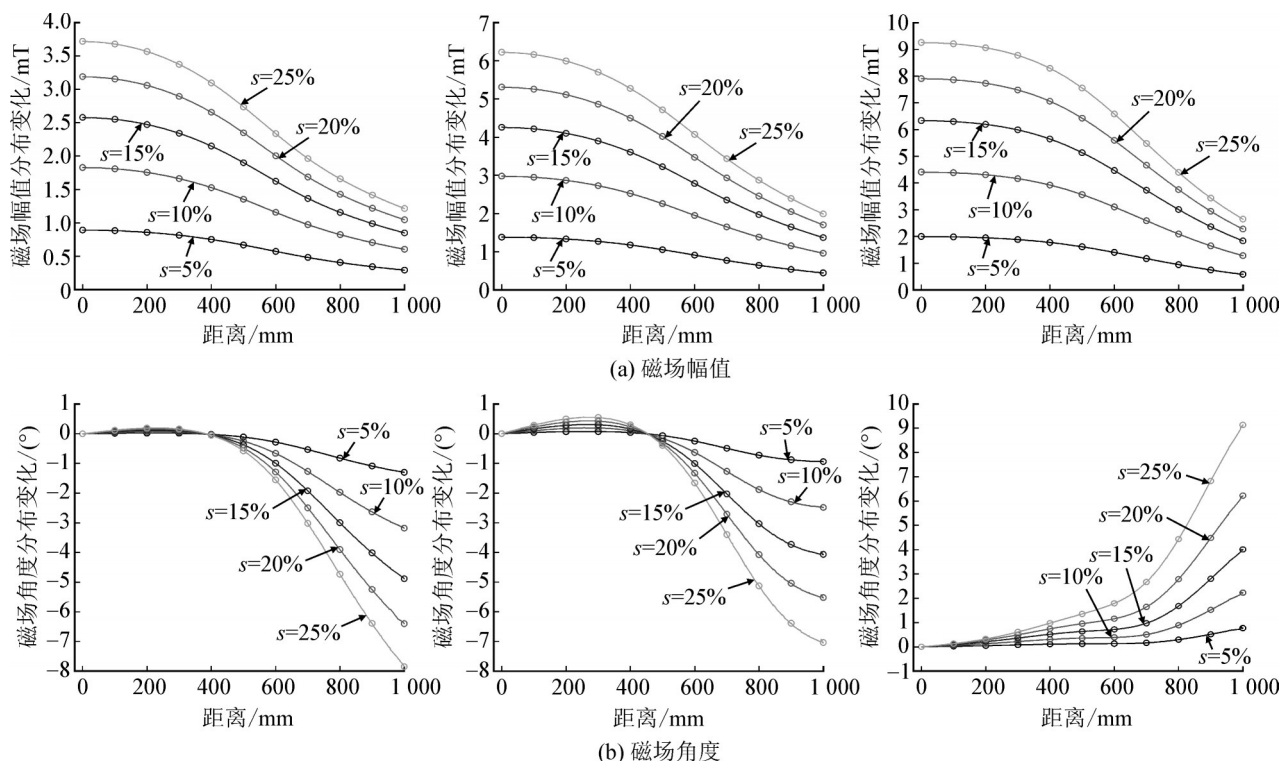


图3 纵向位置匝间短路故障时磁场幅值与角度分布变化  
Fig. 3 Variation in magnetic field amplitude and angle distribution of inter-turn short circuit faults at longitudinal position

图3所示为最外层包封的11层线圈上部、中部、下部位置处不同故障程度时的磁场分布变化,由图可知,底部横轴位置处磁场幅值与角度的变化均与故障程度呈正相关,随着故障位置的由上至下,故障位置越靠近于底部,其底部横轴上的磁场幅值变化也越大,同时可以看出磁场角度变化曲线也整体向上移动,当故障位置位于下端时,角度变化曲线完全反向,及随着故障的下移磁场的变化方向是由水平向着垂直方向进行了偏移。

图4分别表示第1层线圈、第5层线圈、第8层线圈中部位置处发生不同程度的匝间短路故障

时磁场分布的变化情况,可以看出,内层线圈故障时的磁场幅值变化小于外层,最外层线圈发生匝间短路故障时对底部磁场的影响最大。对于磁场角度,随着故障位置的由内向外,磁场角度变化曲线中出现的正负分界点也在逐步向外进行偏移,整体的角度变化程度也呈增大趋势。

由空心电抗器故障磁场的仿真分析可以看出,底部磁场的幅值变化能够有效反映不同条件下的匝间短路的故障情况,同时底部磁场的角度也会随故障情况的不同发生规律性变化,因而可以有效应用底部磁场幅值与角度两个特征信息实现对空心电抗器匝间短路故障情况的诊断。

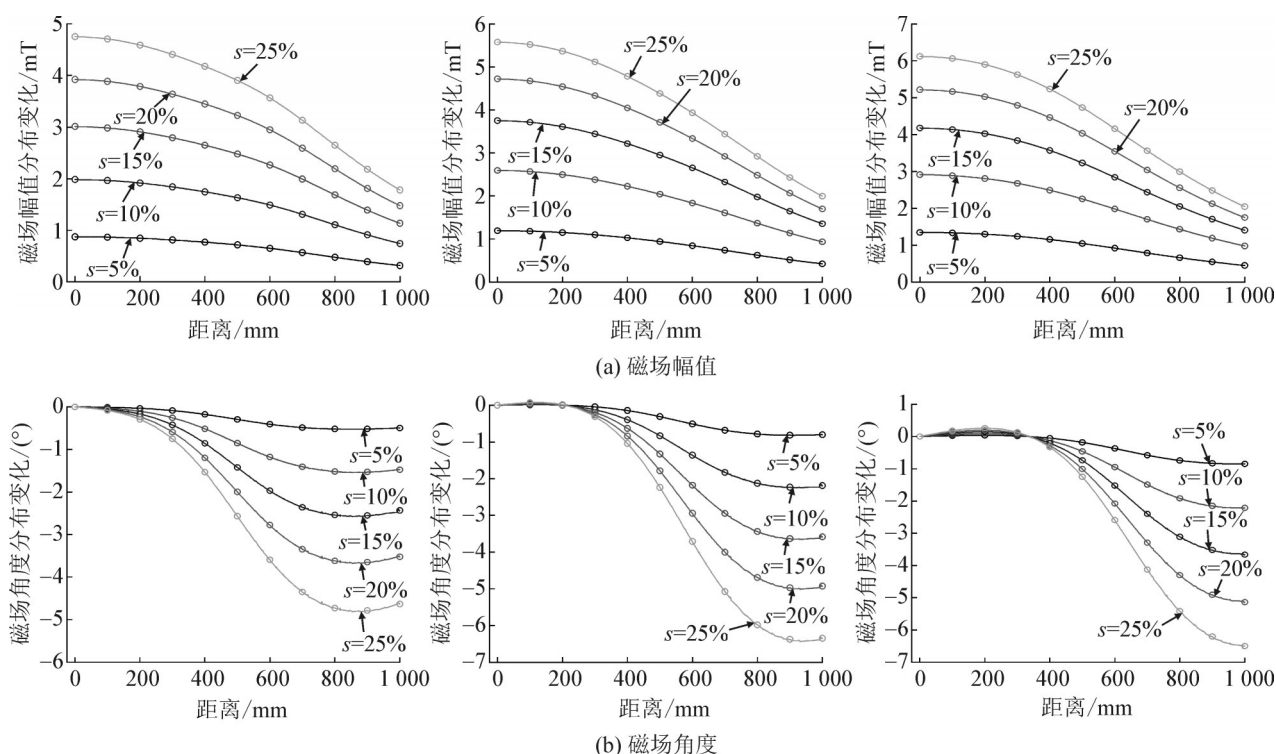


图4 径向位置匝间短路故障时磁场幅值与角度分布变化

Fig. 4 Variation in magnetic field amplitude and angle distribution of inter-turn short circuit faults at radial position

### 3 基于磁场和SVM的匝间短路故障诊断

#### 3.1 故障特征量的提取

由上述分析可知,干式空心电抗器发生匝间短路故障时,其磁场分布变化的情况能在一定程度上反映电抗器的匝间短路的故障状态,因而磁场的幅值以及角度信息可以作为特征量用以匝间短路的故障诊断。

磁场角度与幅值数据的提取路径仍如上节仿真一致,即沿电抗器底部的水平横轴为路径进行选取,但在实际试验条件下磁场的测量会受经济、安全等条件因素的制约,传感器的布置位置与安

装数量均会受到一定程度上的限制,为模拟实际的应用条件,在样本数据选取时仅采用原有路径上的部分位点进行仿真分析,以满足实际的应用需求,因而本文中磁场数据的采集并不连续,而是以圆心为起点,每隔100 mm的位置处选取一测量点进行磁场幅值与角度的数据提取,即通过这些均匀分布的测量点测得的磁场数据所组成的向量来对电抗器底部横轴的磁场分布进行近似表示。

本文以故障前后磁场幅值与角度的分布变化信息为特征量,为了能够定量分析磁场的分布变化,引入欧式距离(euclidean distance, ED)这一数学

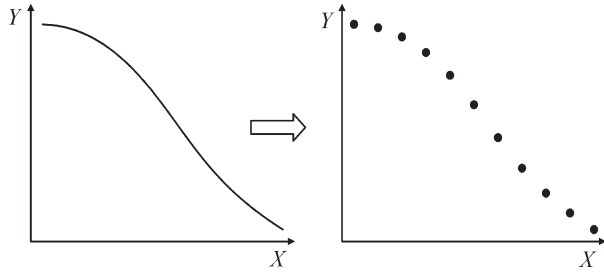


图5 磁场分布近似表示

Fig. 5 Approximate representation of magnetic field distribution

指标对匝间短路故障前后磁场幅值与角度的分布变化进行描述。欧式距离是指  $n$  维空间中两个数据点之间的距离,由于磁场分布是由多个测量点的磁场数据组成,因而可视为  $n \times 1$  的单矢量。当电抗器发生匝间短路故障时,对应测量点位置处的磁场数据均会发生改变,这将导致对应的单点在欧式空间中的位置发生变化,其中每一组对应点的距离可视为二维空间中的点距离,那么由  $n$  组对应点组成的故障前后磁场分布变化数据可被表示为  $n$  维空间的两点距离,因而可通过欧式距离衡量故障前后磁场分布之间的差异程度,其计算公式为

$$ED = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X(i) - Y(i))^2} \quad (8)$$

### 3.2 故障位置标签编码

在故障位点设置方面,为验证该模型在不同故障条件下的诊断分类能力,即在第 11 层线圈上、中、下部以及在第 1、5、8 层线圈位置上部分别设置匝间短路,为便于分析,对上述不同的故障位置进行编码,对应编码见图 6。

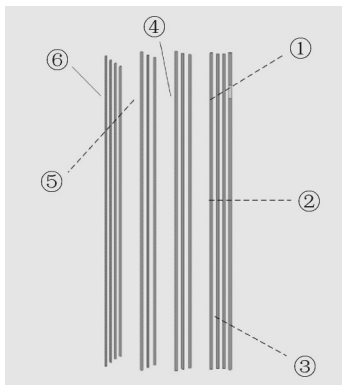


图6 故障位置编码

Fig. 6 Fault location code

### 3.3 故障诊断流程

基于磁场信息和 SSA-SVM 的电抗器匝间短路诊断流程见图 7,样本的特征量是不同故障条件下

由各个测量位点测得的磁场幅值与角度变化数据而计算得出的欧式距离,样本数据归一化后按一定比例将其划分为训练集与测试集,随后利用训练集对 SVM 进行训练,并通过 SSA 的寻优能力以获得最优参数,最后利用测试集数据对最优参数的 SVM 进行测试,并输出诊断结果。

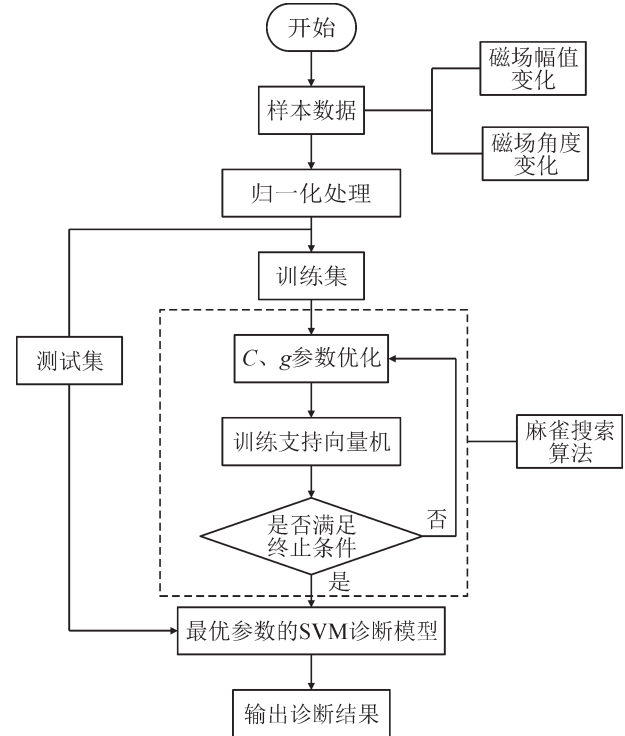


图7 电抗器故障诊断流程图

Fig. 7 Fault diagnosis flowchart of reactor

### 3.4 仿真分析

为获取更多不同故障程度时的磁场样本数据,在这 6 个故障设置位置处,以故障程度的 1%为间隔,至故障程度的 25%,提取各个测量位点处磁场的幅值以及角度变化,并分别计算磁场幅值以及角度分布变化的欧式距离,具体结果见图 8,仿真一共获得了 156 组数据,其中各位置的故障数据样本各 26 组,并在这些样本中随机选取 10 组样本作为测试集,剩余部分为训练集,则训练样本共有 96 组,测试样本共有 60 组。

本文采用 SSA 对 SVM 中的惩罚因子以及核参数进行寻优,其中种群数目设为 20;最大迭代次数设为 100;惩罚因子以及核参数的上限设为 500;交叉验证折数为 5,其中 SVM 的参数寻优过程见图 9。由优化过程可以看出,经过 24 次迭代后达到了最优适应度,具有较快的收敛速度。其中优化后的惩罚因子和核参数分别为 370.473 5 和 3.653 2。

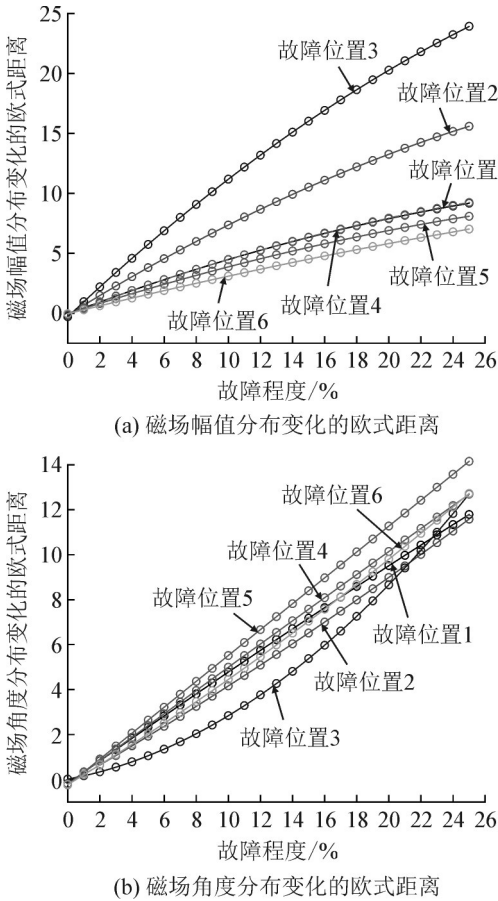


图8 磁场分布变化趋势  
Fig. 8 Variation trend of magnetic field distribution

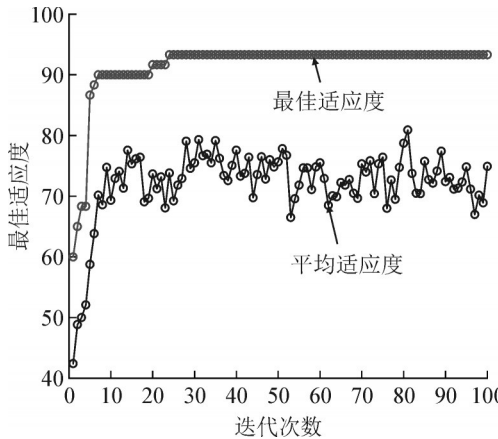


图9 SVM参数寻优过程  
Fig. 9 SVM parameter optimization process

同时为验证 SVM 通过 SSA 对其参数进行寻优后,所得到的 SSA-SVM 模型具有更优的故障分类效果,本文选择将 SSA-SVM 和 SVM 的故障诊断准确率进行对比,结果见图 10。

从上图可以看出,SVM 和 SSA-SVM 在磁场分布信息的输入下均有着较好的故障分类效果,这表明了磁场分布信息能够有效适用于 SVM 模型对匝间短路故障进行分类诊断,同时 SSA-SVM 模型的

诊断准确率为 93.33%,高于 SVM 模型的准确率,这反映了 SSA 对 SVM 参数的优化能够提高 SVM 的故障诊断性能。

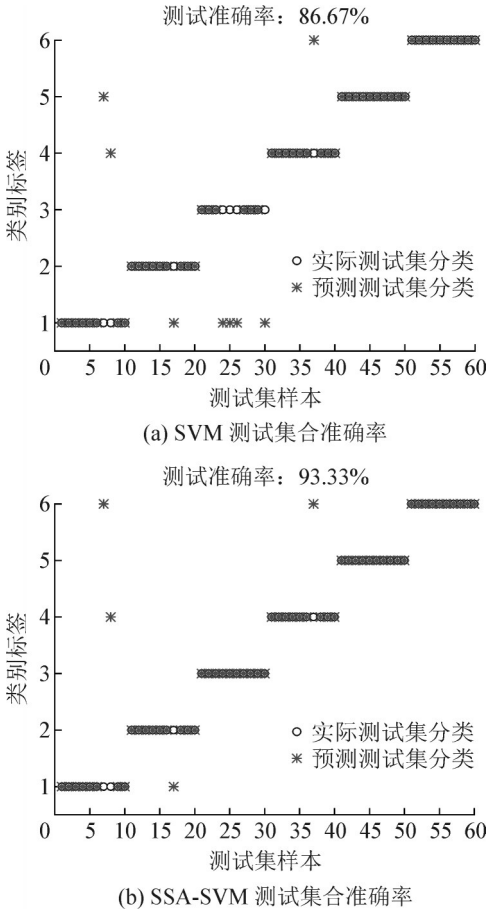


图10 两种模型的测试准确率  
Fig. 10 Testing accuracy of two models

#### 4 结语

依据干式空心电抗器的有限元模型,分析了不同故障状态下底部磁场幅值和角度分布的变化情况,同时利用由多个位点的磁场变化数据而计算出的欧式距离表示磁场的分布变化,并以此作为匝间短路位置分类的特征样本,提出了基于磁场信息和 SVM 的电抗器匝间短路故障诊断方法,建立了 SSA-SVM 的故障诊断模型。仿真结果表明,磁场分布信息能够有效适用于匝间短路故障的定位诊断,同时 SVM 模型在故障诊断中展现出良好的特征提取效果,且通过 SSA 对 SVM 参数进行优化后,所得到的 SSA-SVM 模型的故障诊断准确率有着进一步的提升。

#### 参考文献

[1] 林其友,刘全峰,梁艺超,等. 空心电抗器匝间短路故障监测方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(5):96-100.

- LIN Qiyou, LIU Quanfeng, LIANG Yichao, et al. Research of monitoring method for interturn short circuit fault of air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 96-100.
- [2] 刘全峰, 李勤, 姚恩祥. 电容器组串联用干式半铁心电抗器磁场分布特性的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(2): 21-24.
- LIU Quanfeng, LI Qin, YAO Enxiang. Study on the magnetic field distribution of dry-type half-iron core reactor for series connection of capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(2): 21-24.
- [3] 高晓东, 曲文韬, 陈仁刚. 35 kV 干式空心电抗器故障分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 85-88.
- GAO Xiaodong, QU Wentao, CHEN Rengang. Fault analysis and preventive measures on 35 kV air-core dry-type reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 85-88.
- [4] 凌云, 赵彦珍, 肖利龙, 等. 高电压大容量干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1600-1607.
- LING Yun, ZHAO Yanzhen, XIAO Lilong, et al. Online monitoring method for inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor with high voltage and large capacity[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1600-1607.
- [5] 徐林峰, 林一峰, 王永红, 等. 干式空心电抗器匝间过电压试验技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 71-75.
- XU Linfeng, LIN Yifeng, WANG Yonghong, et al. Technique research on turn-to-turn overvoltage test for dry-type air-core reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(7): 71-75.
- [6] 彭庆军, 姜雄伟, 司马文霞, 等. 35 kV 干式空心并联电抗器匝间绝缘故障综合分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 2005-2011.
- PENG Qingjun, JIANG Xiongwei, SIMA Wenxia, et al. Comprehensive analysis of turn-insulating fault of 35 kV dry-type air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2005-2011.
- [7] 杨建立, 田程涛, 黄小华, 等. 一起干式空心并联电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 87-90.
- YANG Jianli, TIAN Chengtao, HUANG Xiaohua, et al. Failure analysis on dry-type air-core shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 87-90.
- [8] 赵春明, 王永红, 敖明, 等. 匝间短路干式空心并联电抗器电气参数变化[J]. 变压器, 2019, 56(3): 31-36.
- ZHAO Chunming, WANG Yonghong, AO Ming, et al. Electric parameter variation of dry-type air-core shunt reactor with interturn short-circuit fault[J]. Transformer, 2019, 56(3): 31-36.
- [9] 咸日常, 鲁尧, 陈蕾, 等. 干式空心串联电抗器匝间短路故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 10-16.
- XIAN Richang, LU Yao, CHEN Lei, et al. Fault characteristics of an inter-turn short circuit of a dry-type air core series reactor[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 10-16.
- [10] 高自伟, 朱学成, 王永红, 等. 干式空心电抗器匝间短路在线监测系统研制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(2): 67-71.
- GAO Ziwei, ZHU Xuecheng, WANG Yonghong, et al. Study on turn-to-turn short circuit on-line monitoring system for dry-type air-core reactor[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(2): 67-71.
- [11] 孟子贺. 基于阻抗变化量频率特性的干式空心电抗器故障检测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [12] 陈炯, 付唐强, 魏泽民, 等. 匝间短路状态下干式空心电抗器电感量的分析[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 195-200.
- CHEN Jiong, FU Tangqiang, WEI Zemin, et al. Analysis on inductance of dry-type air-core reactor under inter-turn short circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 195-200.
- [13] 荀烜齐, 刘轩东, 杨昊, 等. 匝间绝缘故障对干式空心电抗器电感参数影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 117-121.
- GOU Xuanqi, LIU Xuandong, YANG Hao, et al. Simulation study of the influence of turn-to-turn insulation fault on inductance of dry-type air-core reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 117-121.
- [14] 鲁尧, 咸日常, 王立权, 等. 干式空心串联电抗器绕组匝间短路电磁特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 116-123.
- LU Yao, XIAN Richang, WANG Liquan, et al. Study on electromagnetic characteristics of winding inter-turn short circuit of dry-type air-core series reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 116-123.
- [15] 宋晗, 邹亮, 张秀群, 等. 基于空间磁场分布的干式空心电抗器匝间短路检测方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(z1): 105-117.
- SONG Han, ZOU Liang, ZHANG Xiuqun, et al. Inter-turn short-circuit detection of dry-type air-core reactor based on spatial magnetic field distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(z1): 105-117.
- [16] 吐松江·卡日, 高文胜, 张紫薇, 等. 基于支持向量机和遗传算法的变压器故障诊断[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(7): 623-629.
- KARI · Tusongjiang, GAO Wensheng, ZHANG Ziwei, et al.

- Power transformer fault diagnosis based on a support vector machine and a genetic algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(7): 623-629.
- [17] 李俊, 冯俊杰, 武文吉, 等. 基于改进萤火虫算法和多分类支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 131-135.
- LI Jun, FENG Junjie, WU Wenji, et al. Fault diagnosis of power transformer based on improved firefly algorithm and multi-classification support vector machine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 131-135.
- [18] 邱海枫, 苏宁, 田松林. 改进支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 48-53.
- QIU Haifeng, SU Ning, TIAN Songlin. Research on the application of improved support vector machine in power transformer fault diagnosis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 48-53.
- [19] 邓祥力, 吴文强, 杨梅, 等. 基于漏磁场和深度信念网络的变压器绕组变形诊断研究[J]. 变压器, 2021, 58(8): 42-48.
- DENG Xiangli, WU Wenqiang, YANG Mei, et al. Research on transformer winding deformation diagnosis based on leakage magnetic field and deep belief network[J]. Transformer, 2021, 58(8): 42-48.
- [20] 曹敬椿, 卢敏. 基于麻雀搜索算法优化支持向量机的区域水资源安全评价[J]. 水电能源科学, 2023, 41(5): 52-54.
- CAO Jingchun, LU Min. Regional water resource security evaluation based on sparrow search algorithm optimized support vector machine[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(5): 52-54.
- [21] 马晨佩, 李明辉, 巩强令, 等. 基于麻雀搜索算法优化支持向量机的滚动轴承故障诊断[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4025-4029.
- MA Chenpei, LI Minghui, GONG Qiangling, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on sparrow search algorithm optimized support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4025-4029.
- [22] 杨振宝, 黄文武, 赵彦珍, 等. 基于 ANSYS Maxwell 的干式空心电抗器匝间短路故障瞬态特性的仿真分析[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(6): 50-53.
- YANG Zhenbao, HUANG Wenwu, ZHAO Yanzhen, et al. Simulation analysis on transient characteristics of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on ANSYS Maxwell[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(6): 50-53.

#### 作者简介:

翟雨佳(1990—), 女, 教授, 主要研究方向为超导电力技术、电气设备状态检测与故障分析。

戴昀翔(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压设备故障检测。E-mail: 837680761@qq.com。

刘浩(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压设备故障检测。

申刘飞(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高压设备故障检测。

吴仕军(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压设备故障检测。