

基于多频超声和GWO-RF算法的 绝缘油击穿电压预测研究

俞 华, 刘 宏, 王 璇, 梁基重, 李 帅

(国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘 要: 绝缘油是电抗器内部重要的绝缘介质, 击穿电压是评估其绝缘特性的关键指标, 与绝缘油的品质状态密切相关。本文共选取 155 组电抗器绝缘油进行实验, 分别进行击穿电压的测定和多频超声信号在油样中传播衰减后信号的采集, 分析多频超声声学参数和击穿电压之间的幅频响应、相频响应之间的关系, 并基于多频超声检测技术提出结合灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)优化随机森林算法(random forest algorithm, RF)的击穿电压预测方法。结果表明: GWO-RF 绝缘油击穿电压预测模型的预测值与实际值的平均相对误差为 4.04%, 预测准确率达到 95.96%, 相较于优化前的 RF 绝缘油击穿电压预测模型准确率提升了 20.25%。结合多频超声检测技术和 GWO-RF 建立的并联电抗器绝缘油击穿电压预测模型, 对击穿电压的预测具有可行性。

关键词: 绝缘油; 击穿电压; 多频超声; GWO-RF

Research on prediction of breakdown voltage of insulating oil based on multi-frequency ultrasound and GWO-RF algorithm

YU Hua, LIU Hong, WANG Xuan, LIANG Jizhong, LI Shuai

(State Grid Shanxi Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Insulating oil plays a critical role as a dielectric medium in reactors, and the breakdown voltage is a key indicator evaluating its insulating properties, which is closely related to the quality of insulating oil. In this paper, 155 reactor insulating oil samples were selected for experiments, which included the measurement of breakdown voltage and collection of multi-frequency ultrasound signals after propagation in the oil samples. The relationship between the breakdown voltage and the amplitude-frequency and phase-frequency responses of ultrasonic acoustic parameters was analyzed. A breakdown voltage prediction method was then proposed by combining multi-frequency ultrasound technology with a grey wolf optimizer (GWO) optimized random forest (RF) algorithm. The results show that the GWO-RF model achieves 4.04% of mean relative error and 95.96% of accuracy on the test set, and there is 20.25% of improvement in prediction accuracy compared to the unoptimized RF model. The proposed prediction model, which integrates multi-frequency ultrasound detection and GWO-RF optimization, demonstrates significant feasibility for predicting the breakdown voltage of insulating oil in reactor.

Key words: insulating oil; breakdown voltage; multi-frequency ultrasound; GWO-RF

0 引言

我国国土面积幅员辽阔, 但能源分布不均衡。发展远距离输电技术是解决能源分布不均衡的一种有效方法^[1]。随着输电距离的增加, 线路电压的容升效果愈发明显^[2]。为了降低线路的无功功率, 改善电力系统的功率因数, 高压并联电抗器广泛应用在高压输电线路之中^[3]。

为了提供良好的电气绝缘性能, 防止电气设备

内部发生放电或绝缘击穿现象, 绝缘油被广泛应用在高压并联电抗器内部^[4]。依据 GB/T 7595—2017《运行中变压器油质量》^[5]对矿物绝缘油质量标准的规定, 油品检测指标主要有击穿电压、介质损耗因数、界面张力等。目前击穿电压是表征绝缘油绝缘特性的重要电气参数, 绝缘油中极性杂质的含量能通过击穿电压的数值大小反映出来^[6]。GB/T 507—2002《绝缘油击穿电压测定法》^[7]规定, 击穿电压的测定是对绝缘油施加按一定速率连续升压的交变电场, 直至试样被击穿, 即现行的击穿电压测定法

为破坏性实验,且实验所用时间较长。因此,需要一种快速无损的检测方法来实现对击穿电压的测定是很有必要的。

超声波具有极强的穿透力,超声波检测具有抗干扰能力极强、对介质无损伤、检测分辨率高的特点^[8]。杨壮等^[9]基于多频超声检测技术,分析了多频超声波声学参数与变压器油界面张力之间的关系,并提出了基于遗传算法优化BP神经网络的界面张力预测模型。LI Baoliang等^[10]基于多频超声检测技术提出了粒子群优化Elman神经网络的变压器油介质损耗因数预测模型,并验证了超声波对于变压器油的无损检测特性。

本文搭建了多频超声波检测平台,以155组不同击穿电压的绝缘油样品作为样本集,超声波声学参数(幅值、相位、飞行时间和声速)作为输入,绝缘油的击穿电压作为输出,建立灰狼优化算法优化随机森林模型,实现对绝缘油击穿电压的有效预测。

1 多频超声波检测平台的搭建和绝缘油的检测

结合超声波反射检测法和超声波透射检测法搭建多频超声波检测平台,超声波反射检测法和超声波透射检测法之间的主要区别在于超声波发射器和超声波接收换能器两者的位置相对于绝缘油的不同^[11]。

用于检测绝缘油的多频超声波检测平台如图1所示,包括控制单元、超声波传感器单元和超声波信号处理单元3个单元。多频超声波控制单元包括超声波发射和超声波接收两个模块,分别用于向测量室内的绝缘油样发射超声波信号和接收在油样中传播衰减后的超声波信号。本文选取的超声频率为590~950 kHz,超声波发射模块20 s内可产生40个多频超声检测信号。

多频超声波检测平台中的超声波传感器单元由超声波换能器、温度传感器和测量室组成。其中超声波传感器中包含两个超声换能器,即收发一体超声波换能器 T_1/U_1 和超声波接收换能器 U_2 ,中心频率为750 kHz。超声波换能器 T_1 进行发射信号,位于测量室两端的两个超声波接收换能器 U_1 和 U_2 可用于接收在测量室中的绝缘油传播衰减后的超声波信号。超声波传感器单元与控制单元的信号输出口相连,将电信号通过延迟线中的超声换能器转

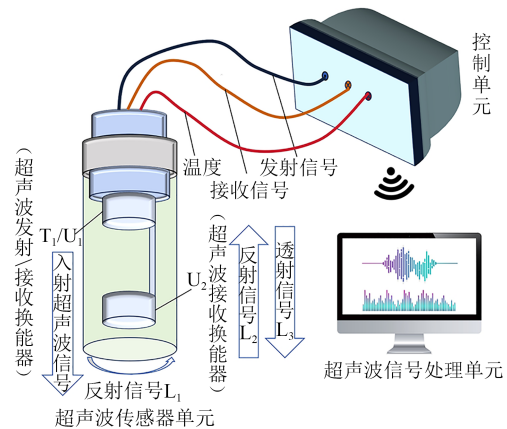


图1 多频超声波检测平台

Fig.1 Multi-frequency ultrasonic testing platform

换为声波信号后传播至待测绝缘油中,进入测量室。位于测量室内的温度传感器可以监测温度,为确保实验能够获得准确的结果,实验在水温保持在27.5℃的水浴恒温环境中进行。信号处理单元用于对多频超声波接收模块接收到的超声信号进行处理,与控制单元相连接。信号处理单元需要处理的超声波信号主要包括两个超声波接收换能器 U_1 和 U_2 所接收到的超声波信号在绝缘油中传播时的幅值和相位等信息。

如图1所示,由超声波换能器 T_1 发射的信号在经过延迟后到达测量室的待测介质绝缘油的界面处,由于遇到声阻抗不同的界面,超声波信号的反射发生在基准介质和测量室的绝缘油界面之间,该信号发生反射后返回超声波接收换能器 U_1 ,形成信号 L_1 。另一部分超声波信号以透射的形式在绝缘油中进行传播,信号至超声波接收换能器 U_2 时被接收,形成信号 L_3 。同时,以透射的形式传播至超声波接收换能器 U_2 的超声波信号 L_3 ,其中的一部分再次发生反射,以信号 L_2 的形式在绝缘油中传播至超声波接收换能器 U_1 。传输时间为71.92 μs ,传输速度为1 396.96 m/s。

超声波发射器每次发出40个不同频率的超声波信号,检测信号中,信号 L_1 包含20个主频率对应的幅值响应、20个偏移频率对应的幅值响应、20个主频率对应的相位响应、20个偏移频率对应的相位响应,共计80个幅值、相位响应。同理,信号 L_2 、 L_3 超声信号也分别包含80个幅值、相位响应,再加上超声信号的飞行时间和声速,每个测试样品的超声响应由242维特征变量组成。

2 多频超声信号响应分析

2.1 多频超声信号幅频响应分析

实验共选取 155 组不同击穿电压的绝缘油进行实验。为尽可能分析不同油样超声波信号幅值、相

位等参量之间的关系,选取 6 组击穿电压分别为 8.6、13.9、19.7、34.6、45.1、65.6 kV 的绝缘油样。图 2 为超声波在 6 组不同击穿电压的油样中传播时,超声波接收换能器所接收到的三相信号的幅频响应对比图。

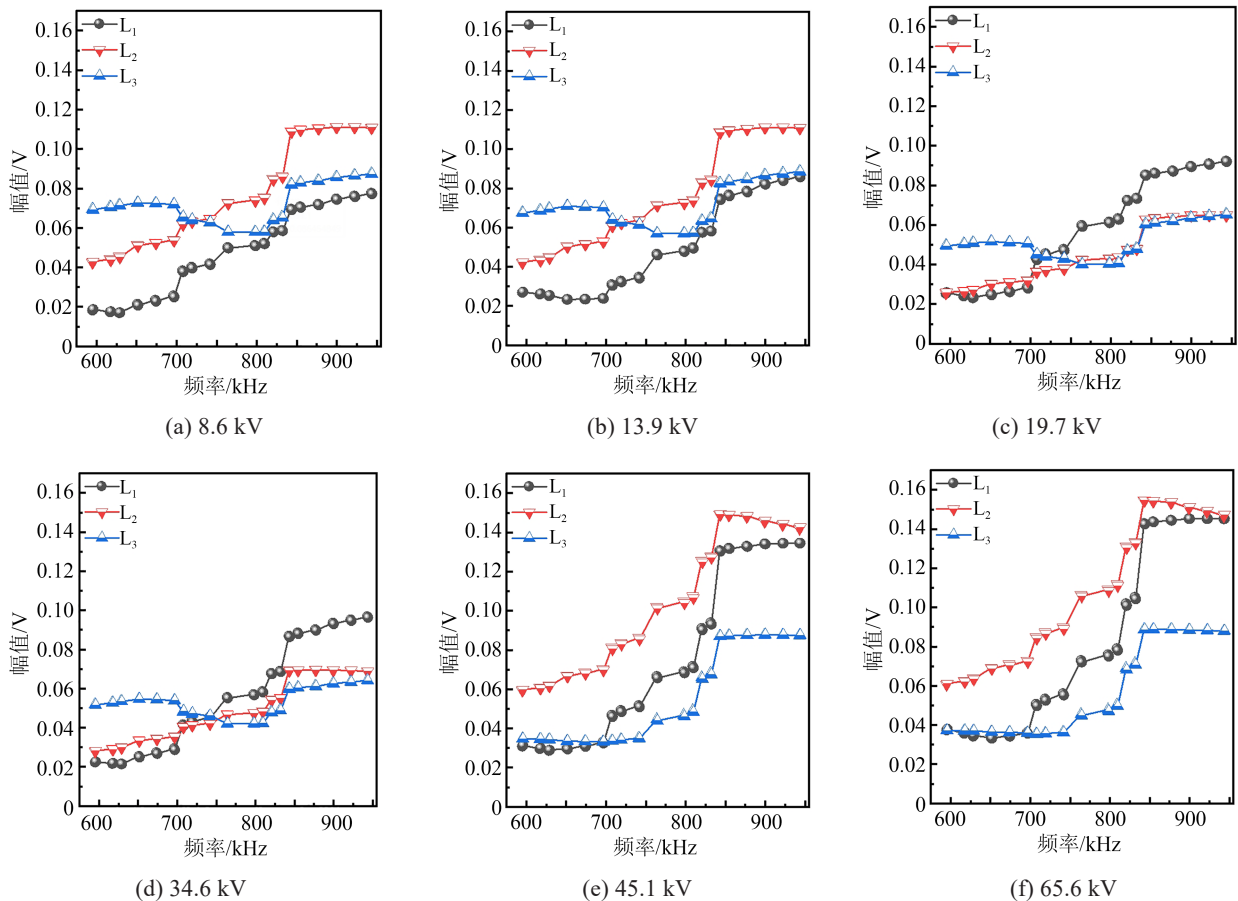


图2 6组油样的三相信号幅频响应对比图

Fig.2 Comparison on amplitude-frequency response of three-phase signal of six oil samples

由图 2(a)和图 2(b)可知,当绝缘油的击穿电压小于 19.7 kV 时,在低频段 600~700 kHz 内,三相超声波信号幅值的增幅变化较小,呈现出较为平稳的变化趋势,且在该频率范围内三相超声波信号幅值大小始终保持 $L_3 > L_2 > L_1$ 的规律。在中频段 700~850 kHz 内, L_1 、 L_2 两相信号幅值呈现上升的趋势,但 L_3 信号的幅值变化呈现“凹槽”状,且上升后的幅值大于“凹槽”下降前的幅值。在高频段 850~950 kHz 内,三相信号幅值的变化趋势与低频段大体相同,但在幅值大小上有所变化,幅值大小保持 $L_2 > L_3 > L_1$ 的规律。由图 2(c)和图 2(d)可知,当击穿电压大于 13.9 kV 且小于 45.1 kV 时, L_1 、 L_2 和 L_3 三相超声波信号幅值变化趋势与击穿电压小于 19.7 kV 的油样

幅值变化趋势相同。但可以明显观察到击穿电压大于 13.9 kV 且小于 45.1 kV 油样的 L_1 和 L_2 信号幅值变化幅度相较于击穿电压小于 19.7 kV 的油样分别发生了明显的上升和下降,且当频率增加至高频段后, L_1 信号的幅值始终大于 L_2 和 L_3 信号的幅值。与击穿电压小于 45.1 kV 的 4 组绝缘油样幅频响应相比,图 2(e)和图 2(f)所示击穿电压分别为 45.1 kV 和 65.6 kV 的绝缘油样,其 L_3 超声波信号幅值响应发生明显变化,总体呈现上升的趋势。在整个检测频率 600~950 kHz 内, L_2 超声波信号幅值始终大于其他两相信号。在中频段和高频段,三相信号幅值大小始终保持 $L_2 > L_1 > L_3$ 的规律。

综合分析所选取的 6 组不同击穿电压绝缘油样

的幅频响应,可以发现三相超声波信号幅值变化较大的频率范围主要处于中频段,即700~850 kHz,而低频段和高频段的幅值变化趋势较平稳。超声波接收换能器 U_1 接收到的 L_1 和 L_2 两相信号,在整个检测频率范围内表现出相似的特点:随着频率增加,它们的幅值逐渐上升,呈现出递增的幅频响应趋势。而超声波接收换能器 U_2 接收到的透射信号 L_3 ,在油样的击穿电压低于等于34.6 kV时,幅频响应变化呈现一种“凹槽”形态;当击穿电压高于34.6 kV时,则显示出递增的趋势。

2.2 多频超声信号相频响应分析

图3展示了6组不同击穿电压绝缘油样的相位响应对比图,包含两个超声波接收换能器所收到的三相超声波信号。从图3(a)可以看出,由超声波接

收换能器 U_1 接收的反射超声波信号 L_1 的相位分别在696.6、832.1两处出现峰值,在707.9、843.4 kHz两处出现谷值。从图3(b)可以看出,不同击穿电压油样的 L_2 信号的相位图与基准信号 L_1 相似,在检测频率范围内都存在两个谷值和峰值,但各峰值和谷值对应的频率点分布由于击穿电压不同而有所不同。从图3(c)可以看出,当击穿电压小于19.7 kV时, L_3 信号的相位变化趋势与 L_2 相似,出现两次谷值和峰值;而当击穿电压大于等于19.7 kV时,只出现了一次峰值和谷值。这是因为换能器 U_1 和 U_2 所接收到的 L_1 、 L_2 、 L_3 三相超声波信号在绝缘油中传播过程中经过的路径和传播时间不同,从而导致了相位差异。

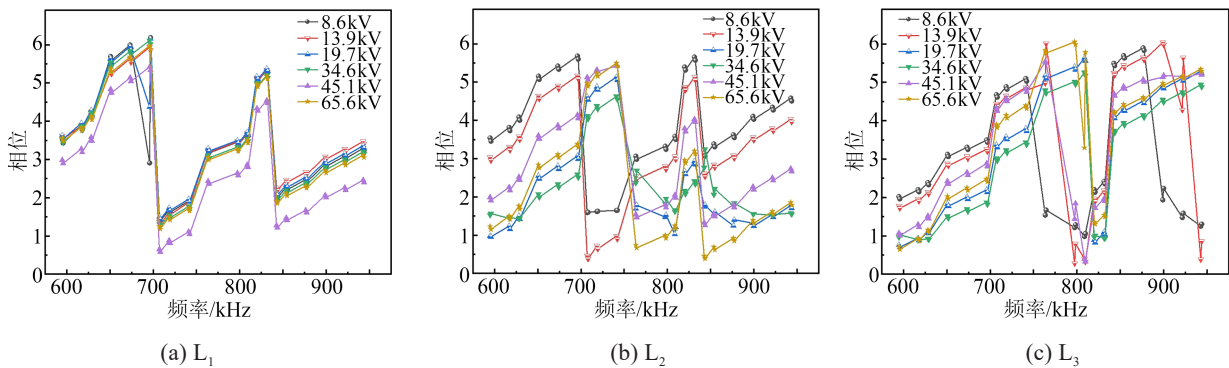


图3 多频超声波相位响应

Fig.3 Multi-frequency ultrasonic phase response

对不同检测频率下超声波接收换能器所接收到的三相超声信号和相位信息进行综合分析,可以得出在不同检测频率下,超声波信号的幅值和相位信息都反映了超声波信号在绝缘油中传播时的衰减情况。因此,通过分析超声波信号在绝缘油中传播的幅值、相位等信息,可以有效地评估绝缘油的品质状况。

3 基于随机森林算法的绝缘油击穿电压预测模型的建立

3.1 击穿电压预测模型的建立

实验共选取155组击穿电压不同的绝缘油样,其中训练集和测试集分别为140组和15组。

3.1.1 随机森林算法

实验中选取的训练集样本为 T ,定义 X 和 Y 分别为输入变量和输出变量, P 为样本子集。在本文建立的模型中, X 为输入的242维变量, Y 为输出的油

样击穿电压。随机森林算法^[12-13](random forest algorithm, RF)属于集成学习中Bagging的典型算法,在原始训练集中利用基于有放回随机抽样准则的Bootstrap抽样方法获得自助样本并生成新的子树 P_i (子训练集, $i=1, \dots, n$),随机选择每个节点中的特征子集,构建合适的决策树。

用构建的决策树模型组成随机森林,以分类回归树(classification and regression tree, CART)作为基回归器。CART是由二分递归分割技术得到的二叉树,即除叶子节点外,在每个节点上将当前的样本集二分递归地划分。针对样本子集 $P_i(x_i, y_i)$,根据切分值将样本特征划分为两个子空间单元,分别由式(1)和式(2)表示。

$$R_1(j, s) = \{x_i | x_i^{(j)} \leq s\} \quad (1)$$

$$R_2(j, s) = \{x_i | x_i^{(j)} > s\} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: R_1 和 R_2 表示划分的两个子空间单

元; j 表示分割样本集的最优特征; s 表示最优切分
值; x_i 表示样本数据的子集; $x_i^{(j)}$ 表示第*i*个样本在特
征*j*上的值。

最优样本的分割是使损失函数(即式(3))所示
的目标平方误差)达到最小,确定分割样本集的最
优特征*j*和最优切分*s*。

$$\min_{j,s} \left[\min_{c_1} \sum_{x_i \in R_1(j,s)} (y_i - c_1)^2 + \min_{c_2} \sum_{x_i \in R_2(j,s)} (y_i - c_2)^2 \right] \quad (3)$$

式(3)中: y_i 表示样本数据的子集; c_1 、 c_2 分别为 R_1 和 R_2 上输出变量的平均值。

图4为RF算法流程图,最终的预测结果是所有
子训练集的预测结果的平均值。

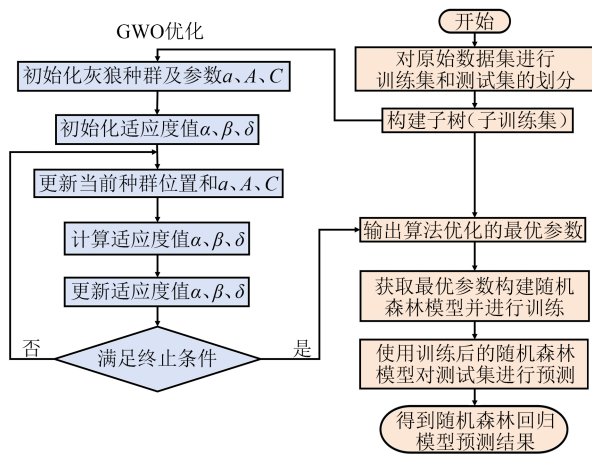


图4 RF算法流程图

Fig.4 Algorithm flow chart of RF

3.1.2 灰狼优化算法

灰狼优化算法^[14-15](grey wolf optimizer, GWO)具有收敛性强、参数少、容易实现等优点。灰狼优化算法模拟了自然界灰狼的领导层级和狩猎机制,将随机分布的参数分为4个阶层,分别为具有最高决策权力的 α 狼、辅助 α 狼决策的 β 狼、联合 α 狼和 β 狼实现猎物定位追踪的 δ 狼以及位于狼群最底层的 ω 狼。其中, α 狼在算法中用于预测“猎物”的位置, β 狼起桥梁作用, δ 狼受前者 α 狼和 β 狼决策影响实现定位追踪, ω 狼则通过前3个阶层共同决策得到的定位追踪结果向猎物趋近,起到平衡和调节的作用。

在灰狼优化算法的整个优化过程中,寻优灰狼种群通过环绕猎物寻找狩猎的最佳路线,在该阶段目标位置和寻优种群位置的确定可分别表示为式(4)和式(5)。

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (4)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}\vec{D} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: \vec{D} 表示目标位置; t 表示当前迭代次数; $\vec{X}(t)$ 表示优化种群的位置; $\vec{X}_p(t)$ 表示目标方向矢量; \vec{A} 和 \vec{C} 表示系数向量。

系数向量可分别由式(6)和式(7)表示。

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r}_1 - a \quad (6)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (7)$$

式(6)~式(7)中: \vec{r}_1 和 \vec{r}_2 是大小在[0, 1]范围内的随机向量; a 代表收敛因子,随着迭代次数的增加,从2减小到0。

迭代过程如式(8)表示。

$$a(t) = 2(1 - t/t_{\max}) \quad (8)$$

式(8)中, t 和 t_{\max} 分别代表当前迭代次数与最大迭代次数。

灰狼可以精确定位猎物位置,通过包围猎物进行捕猎。通常围猎由 α 狼主导, β 狼和 δ 狼参与。灰狼个体追踪猎物位置如式(9)所示。

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: \vec{D}_α 、 \vec{D}_β 和 \vec{D}_δ 分别表示 α 狼、 β 狼和 δ 狼与其他个体之间的距离; \vec{C}_1 、 \vec{C}_2 和 \vec{C}_3 表示灰狼个体当前位置的随机数; \vec{X}_α 、 \vec{X}_β 和 \vec{X}_δ 表示 α 狼、 β 狼和 δ 狼的当前位置; \vec{X} 为灰狼当前的位置。

单个灰狼的位置更新如式(10)所示。

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \\ \vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: \vec{X}_1 、 \vec{X}_2 和 \vec{X}_3 分别表示受 α 狼、 β 狼和 δ 狼影响, ω 狼调整的位置; \vec{A}_1 、 \vec{A}_2 和 \vec{A}_3 为动态系数,决定了灰狼向猎物移动的强度和方向; $\vec{X}(t+1)$ 为 ω 狼最后调整的位置。

GWO算法优化RF参数的具体优化过程如图4中所示。

3.2 预测结果与分析

图5是以140组样本作为训练集,对RF和

GWO-RF 预测模型分别进行训练后的预测值与实际值散点图。从图 5 可以看出,优化前的 RF 预测模型所对应的散点图分布较为零散,尤其是击穿电压在 25~55 kV 区间的油样预测值与实际值相差较大。而 GWO 算法优化后的 RF 预测模型所对应的散点图分布较优化前相对更加集中在直线两侧,预

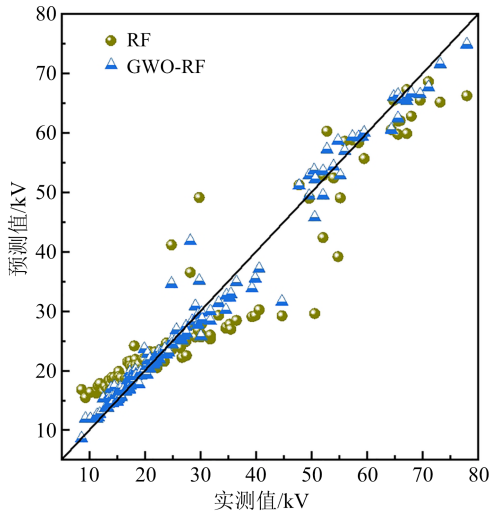


图 5 训练集预测散点图

Fig.5 Scatter plot of training set predicts

测值与实际值之间的差值进一步缩小,GWO-RF 预测模型的平均绝对误差为 5.91%,相较于 RF 预测模型 15.53%的平均绝对误差降低了 9.62%。

为更准确地分析两种模型的预测准确率,原始数据集中的 15 组油样数据和超声波数据被划分为测试集,不参与预测模型的训练。图 6 为两种模型测试集的散点图、预测绝对误差折线图和相对误差折线图。从图 6(a)可以看出,GWO-RF 的测试集散点图更紧密地分布在直线两侧,即预测值和实际值之间的差值更小。由图 6(b)可知,RF 和 GWO-RF 两种预测模型绝对误差绝对值最大对应的样本分别为测试集样本 10 和 8,绝对误差分别为 -4.76 kV 和 -21.00 kV。由图 6(c)可知,两种预测模型相对误差绝对值最大对应的样本分别为测试集样本 1 和 8,相对误差分别为 95.36% 和 -13.97%。RF 和 GWO-RF 两种预测模型的平均相对误差为 24.29% 和 4.04%。从测试集的预测效果分析,GWO-RF 模型的预测结果和实测值更接近,且经过 GWO 优化后的模型预测准确率显著提升,在 RF 模型的基础上准确率提高了 20.25%,对绝缘油击穿电压的预测效果更佳。

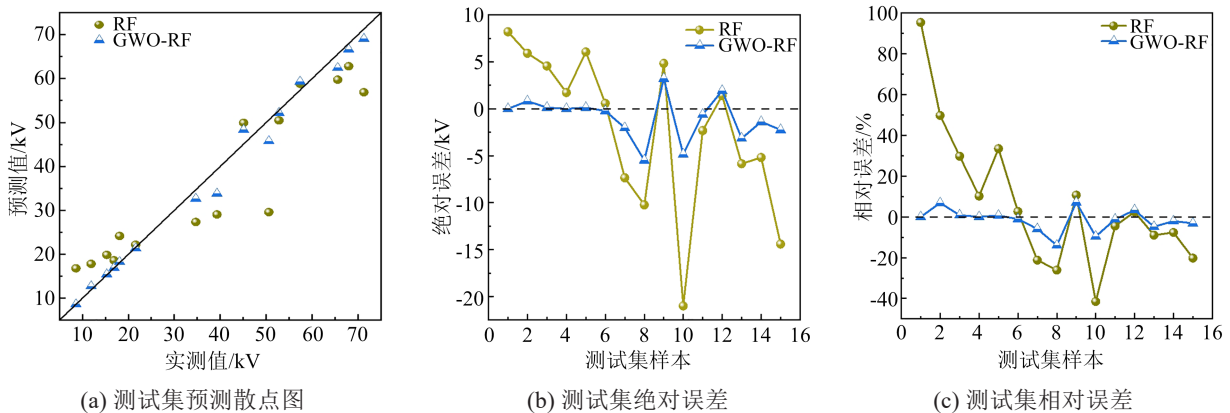


图 6 测试集预测结果对比

Fig.6 Comparison of test set prediction results

4 结论

本文基于多频超声检测技术对绝缘油的击穿电压与超声波信号在绝缘油样中经过传播衰减后的声学参数相关性进行分析和研究,并结合人工智能算法实现了对绝缘油击穿电压的有效预测,主要得到如下结论:

(1)对于选取的 6 组不同击穿电压油样,在整个检测频率范围内, L_1 信号幅值与油样击穿电压值呈正相关关系, L_2 、 L_3 两相信号与油样击穿电压值则呈

一定的负相关关系,尤其在高频段 850~950 kHz 范围内,不同击穿电压油样对应的信号幅值之间有明显差异。

(2)基于分析的多频超声信号和击穿电压之间的相关性,结合人工智能算法建立了基于 RF 和 GWO-RF 的两种绝缘油击穿电压预测模型。对比 RF 和 GWO-RF 预测模型的准确率,结果显示 GWO 优化后的击穿电压预测模型的预测值与实际值的平均相对误差为 4.04%,预测准确率达到 95.96%,预

测效果优于RF预测模型。因此将多频超声检测技术应用到绝缘油的检测,并结合超声波衰减特性和GWO-RF建立的绝缘油击穿电压预测模型对击穿电压的预测具有可行性。

参考文献 References

- [1] 韩先才,孙昕,陈海波,等.中国特高压交流输电工程技术发展综述[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4371-4386,4719.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. Overview of technical development of UHV AC transmission engineering in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.
- [2] 赵庆波,张正陵,白建华,等.基于特高压输电技术的电力规划理论创新及实践[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2523-2532.
ZHAO Qingbo, ZHANG Zhengling, BAI Jianhua, et al. Theoretical innovation and practice of power planning based on UHV transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2523-2532.
- [3] 张勇军,李钦豪,刘轩.特高压交流电网的无功电压控制[J].电力系统自动化,2017,41(5):159-168.
ZHANG Yongjun, LI Qin hao, LIU Xuan. Reactive voltage control of UHV AC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 159-168.
- [4] 郭金明,田树军,卓浩泽.绝缘油老化特性及诊断方法研究进展[J].绝缘材料,2021,54(8):8-17.
GUO Jinming, TIAN Shujun, ZHUO Haoze. Research progress on ageing characteristics and diagnostic methods of insulation oil [J]. Insulating Materials, 2021, 54(8): 8-17.
- [5] 全国电气化学标准化技术委员会.运行中变压器油质量:GB/T 7595—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
National Technical Committee 322 on Electric Chemistry of Standardization Administration of China. Quality of transformer oil in operation: GB/T 7595—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [6] 陈彬,韩超,刘阁.颗粒污染物对变压器油击穿电压的影响[J].高电压技术,2018,44(12):3903-3909.
CHEN Bin, HAN Chao, LIU Ge. Influence of particulate contaminants on breakdown voltage of transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3903-3909.
- [7] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会.绝缘油击穿电压测定法:GB/T 507—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
National Technical Committee 280 on Petroleum Products and Lubricants of Standardization Administration of China. Determination of breakdown voltage of insulating oil: GB/T 507—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [8] BAËSSO R M, COSTA-FELIX R P B, MILORO P, et al. Ultrasonic parameter measurement as a means of assessing the quality of biodiesel production[J]. Fuel, 2019, 241: 155-163.
- [9] 杨壮,周渠,赵耀洪,等.基于神经网络和多频超声波检测技术的变压器油界面张力预测[J].高电压技术,2019,45(10):3343-3349.
YANG Zhuang, ZHOU Qu, ZHAO Yaohong, et al. Prediction of interfacial tension of transformer oil based on artificial neural network and multi-frequency ultrasonic detection technology[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3343-3349.
- [10] LI Baoliang, ZHOU Qu, LIU Yupeng, et al. A novel nondestructive testing method for dielectric loss factor of transformer oil based on multifrequency ultrasound[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1659-1665.
- [11] 杨华昆,马显龙,李胜朋,等.基于多频超声和神经网络的变压器油中微水含量检测[J].绝缘材料,2022,55(4):114-120.
YANG Huakun, MA Xianlong, LI Shengpeng, et al. Detection of trace water content in transformer oil based on multi-frequency ultrasound and artificial neural network[J]. Insulating Materials, 2022, 55(4): 114-120.
- [12] 李冠争,李斌,王帅,等.基于特征选择和随机森林的电力系统受扰后动态频率预测[J].电网技术,2021,45(7):2492-2502.
LI Guanzheng, LI Bin, WANG Shuai, et al. Dynamic frequency prediction of power systems after disturbances based on feature selection and random forest[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2492-2502.
- [13] 程养春,张振亮.基于随机森林的变压器多源局部放电诊断[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5246-5256,5322.
CHENG Yangchun, ZHANG Zhenliang. Multi-source partial discharge diagnosis of transformers based on random forest[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5246-5256, 5322.
- [14] 马高权,周娜,谢蒙飞,等.基于GWO-KELM模型的变压器油纸套管典型绝缘故障辨识方法[J].电网与清洁能源,2023,39(5):38-48.
MA Gaoquan, ZHOU Na, XIE Mengfei, et al. Typical insulation fault identification method for transformer oil-paper sleeve based on GWO-KELM model[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 38-48.
- [15] 左剑,张程稳,肖逸,等.基于灰狼优化算法的多机电力系统稳定器参数最优设计[J].电网技术,2017,41(9):2987-2995.
ZUO Jian, ZHANG Chengwen, XIAO Yi, et al. Optimal design of stabilizer parameters for multi-machine power systems based on grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2987-2995.

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-03-26。

作者简介:

俞华(1980-),男(汉族),江西东乡人,正高级工程师,主要从事输变电设备高压试验、状态监测和故障诊断的研究工作。