DOI: 10.13382/j.jemi.B2104065

基于机电联合的 GIL 局部放电趋势预测研究*

王立宪[1] 马宏忠[1] 戴 锋[2]
(1. 河海大学 能源与电气学院 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司 南京 211102)

摘 要:为研究气体绝缘输电线路(GIL)设备局部放电引发的 GIL 壳体异常振动机理与特征,并对 GIL 局部放电趋势进行预测。首先,以尖端放电为例建立了 GIL 设备尖端放电模型与实验平台;其次,通过测取不同电压等级下尖端放电的脉冲电流信号与异常振动信号,联合机电信号研究 GIL 异常振动行为的特征与机理;最后,建立鲸鱼优化算法-极限学习机(WOA-ELM)模型对 GIL 局部放电趋势进行预测,并与 ELM 模型进行对比。结果表明,GIL 尖端放电脉冲电流重复频率与异常振动信号频率一致,GIL 局部放电与 GIL 壳体异常振动直接相关,且异常振动能量多集中在 1 600~2 800 Hz 且以 20 Hz 倍频分布为主;相较于传统 ELM 模型,WOA-ELM 具有更为优越的预测能力,可以实现对 GIL 局部放电趋势的精确预测,为 GIL 局部放电趋势预测提供了新的方法。

关键词: GIL;局部放电;振动信号;鲸鱼优化算法;极限学习机
中图分类号: TM855; TN78 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510

Research on partial discharge trend prediction of GIL based on WOA-ELM

Wang Lixian[1] Ma Hongzhong[1] Dai Feng[2]
(1. College of Energy and Electrical Engineer, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: To study the mechanism and characteristics of abnormal vibration caused by partial discharge of GIL equipment, and predict the trend of partial discharge of GIL. Firstly, the tip discharge model and test platform of GIL equipment are established by taking the tip discharge as an example. Secondly, the characteristics and mechanism of GIL abnormal vibration behavior are studied by measuring the pulse current signal and abnormal vibration signal of tip discharge and combining with electromechanical signal. Finally, WOA-ELM model is established to predict the trend of GIL partial discharge and is compared with ELM model. The results show that the repetition frequency of discharge pulse current at GIL tip is consistent with the frequency of abnormal vibration signal, the partial discharge of GIL is directly related to the abnormal vibration of GIL shell, and the abnormal vibration energy is mainly concentrated in 1 600~2 800 Hz, and the frequency doubling distribution is mainly 20 Hz; Compared with the traditional ELM model, WOA-ELM has better prediction ability, which can realize the accurate prediction of GIL partial discharge trend, and provides a new method for GIL partial discharge trend prediction based on vibration signal.

Keywords: GIL; partial discharge; vibration signal; WOA; ELM

0 引 言

气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)在特高压输电网络中得到了广泛的应用,但由于装运过程中的碰撞与摩擦和故障在线监测技术的不完备,导致 GIL 设备故障常有发生。其中,局部放电(partial discharge, PD)是导致 GIL 设备绝缘劣化造成绝缘故障

收稿日期:2021-03-15 Received Date: 2021-03-15
*基金项目:中国博士后科学基金(2020M671318)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20190490)、国网江苏省电力公司重点科技项目(J2020040)资助

的最主要原因[1-5]。

与沿面闪络和放电击穿等现象不同的是,局部放电往往集中在 GIL 设备的一些微小区域[6],局部放电的产生是 GIL 设备出现绝缘问题的开端,若能对局部放电进行诊断并对其放电趋势进行预测将大大减少由放电引起的 GIL 设备绝缘故障。

在信号分析方面,根据不同的监测信号,目前已有很多分析方法,脉冲电流法是监测局部放电的最基础的方法,常用做高压电力设备的出厂检验,但脉冲电流法受外界环境影响(如电磁干扰)较大且不适用于在线监测[7-9];超声波检测法以其灵敏度高的优点常用于在线监测;特高频检测法主要检测 0.3~3 GHz 的电磁信号,具有抗干扰能力强等优点[10-11],但对于以振动信号形式体现,处于 0~15 kHz 频段的局部放电现象,利用以上方法的研究尚不充分。

对于振动信号的研究,文献[12]表明利用振动信号对 GIS 设备绝缘故障进行诊断具有可行性;文献[13]研究了尖端局部放电引起 GIS 壳体振动的规律,表明放电量与振动加速的成正比;文献[14]对比了局部放电引起的超声信号与振动信号的特征,表明相对于超声信号,振动信号的能量脉冲信息更大,频率宽度更窄。除此之外振动信号也常用于 GIL 以及其他设备的机械故障的诊断,文献[15]利用振动信号对旋转类型的机械故障进行故障诊断研究,文献[16]利用 GIL 低频振动信号对 GIL 设备机械故障进行诊断。目前,国内外对局部放电引发的振动信号进行的研究相对匮乏,仅给出了大致的频率范围与简单趋势;利用振动信号对 GIS 和 GIL 机械故障诊断的研究较为充分,但尚缺少基于机电信号联合的 GIL 局部放电故障诊断与趋势预警研究。

本文首先以尖端放电为例建立 GIL 局部放电模型,分析局部放电产生振动的机理;并搭建 GIL 局部放电试验平台,获取 GIL 设备正常运行和不同电压等级下的局部放电振动频谱特征,并联合局部放电脉冲电流信号进行对比分析,研究 GIL 设备局部放电与 GIL 壳体异常振动行为的内在联系;最后利用鲸鱼优化算法-极限学习机(WOA-ELM)模型实现基于机电信号联合的 GIL 局部放电趋势预测。

1　GIL 局部放电引发振动分布模型

对于局部放电产生的原因利用汤逊理论和流注理论[17]可以进行较为完备的解释,局部放电示意图如图 1 所示,在 GIL 设备运行时,根据汤逊理论,附着于导体上的尖端污染物放电经历 3 个阶段:1)α 阶段,自由电子大量累积碰撞;2)β 阶段,正电荷碰撞电离;3)γ 阶段,正电荷碰撞到阴极产生自由电子。根据流注理论,在电荷数量与电子碰撞次数达到某一峰值时,电场畸变增强形成电子崩,且在这一过程中会释放大量光子,进而造成光电离,形成二次电子崩。同时,尖端污染物的放电会向前发展、延长朝阴极推进,且距离阴极越近,场强越强,放电通道常呈现细长状,这也解释了实际局部放电过程中的光电现象。

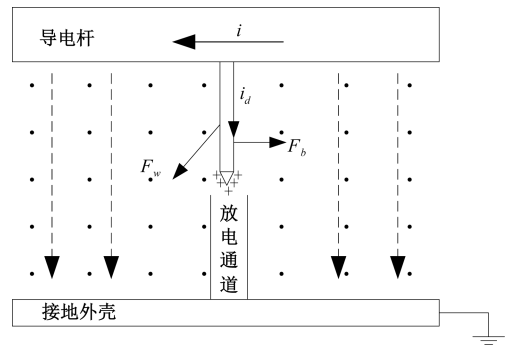

图 1　局部放电示意图

Fig. 1　Partial discharge diagram

GIL 设备内部局部放电引起的振动信号的原因可分为以下两个方面。

1)当 GIL 设备发生局部放电时,绝缘介质(SF_6)内部会形成小范围放电回路,并产生固有频率的振荡衰减电流 i_d,进一步在绝缘介质上产生与振荡衰减电流相对应的振荡衰减电压,该振荡衰减电压将会在回路中产生含有具有放电回路和充电回路两个固有频率的振荡电流,局部放电时尖刺所受电磁力为:

$$F_b = Bi_dL = B_0\cos(f_1t)I_0\cos(f_2t)L = B_0I_0\frac{\cos((f_1+f_2)t)\cos((f_1-f_2)t)}{2}L \tag{1}$$

式中:其中 B 为尖刺周围磁感应强度;B_0 与 f_1 为对应的幅值与频率;I_0 与 f_2 为对应的幅值与频率;L 为尖刺长度。局部放电引起的振动频率主要取决于振荡衰减电流的频率成分。

2)正如在局部放电产生机理部分所介绍到,当局部放电发生时会产生光电离同时伴随热释放,放电形成的气体膨胀压力引起离子风,加剧放电尖刺的振动,受力 F_w 振动成分存在随机性,但大致与放电通道方向一致。

2　实验平台及方法

由于局部放电产生的本质是带电离子在金属尖端的聚集,且为进一步验证 GIL 设备局部放电与异常振动行为之间的联系,本文在 GIL 实验平台内构建尖端放电缺陷模拟局部放电现象,实验电路如图 2 所示,实验平台如图 3 所示,尖刺缺陷设置如图 4 所示,实验系统分为 GIL 故障模型和多信号同步采集系统两大部分。

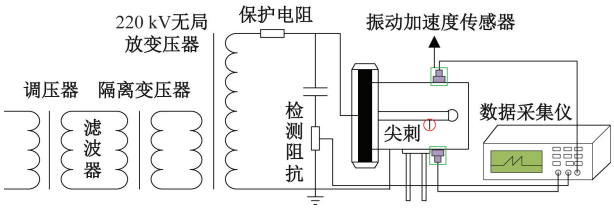

图 2　实验电路原理

Fig. 2　Schematic diagram of test circuit

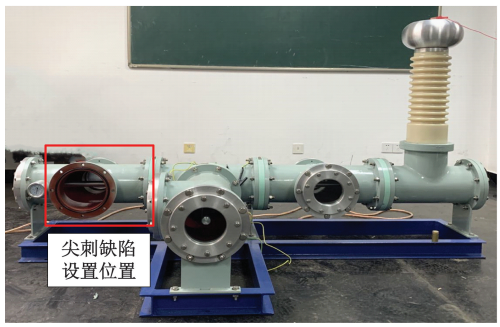

图 3　GIL 尖端放电模拟试验平台

Fig. 3　Test platform of GIL Discharge Fault

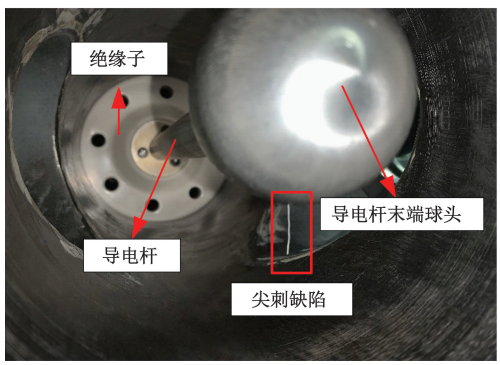

图 4　尖刺缺陷

Fig. 4　Prick defect

1)GIL 故障模型包含调压器、滤波器、隔离变压器、220 kV 无局放变压器、分压器以及 110 kV GIL 实验设备。GIL 设备导电杆直径 60 mm,腔体内直径 360 mm,故障设置在图 2 中红色框线位置,实验腔体含石英观察窗便于拆卸与观测。结合 GIL 设备额定电压与结构参数,为防止起始电压过高,尖刺长度不宜过短,确定为 65 mm。

2)多信号同步采集系统包含 GH-313 A 型振动加速度传感器,检测范围 40 Hz~8 kHz(-3 dB);灵敏度为 100 mV/g±10%(25 ℃);Luomk 718 Series 振动信号采集仪,正负 25 V 宽电压输入,采样频率最高 152.4 kHz;HCPD-2622 型局部放电检测仪,采样频率 20 MHz,放电测量灵敏度 0.1 pC;放电量量程 0.1~10 000 pC。

实验过程采用逐步升压法,从初始电压 0 kV 逐渐升高电压,当观察到第一次出现局部放电信号时确定为该位置的局部放电起始电压 V_0,并保持恒压 7 s,重复此试验 5 次;在确定局部放电起始电压之后按步长 5 kV 逐步升高电压,同时通过局部放电检测仪记录不同阶段的局部放电信号,当出现密集放电信号时保持恒压 7 s,实验加压方法如图 5 所示。同时利用振动信号采集仪采集 GIL 设备外壳振动信号,采集步长 2.5 s,局部放电检测仪采集放电脉冲电流,每个工频周期采集步长 5 s,通过对比局部放电信号与 GIL 外壳振动信号的关系来研究局部放电引起的振动特征。

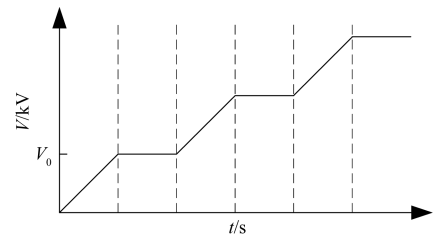

图 5　实验加压方法

Fig. 5　The applied form of experimental voltage

3　局部放电引发 GIL 振动特征与机理

3.1　局部放电引发 GIL 振动特征

为进一步研究 GIL 局部放电引起的 GIL 壳体振动特征,本文采集了 GIL 正常运行与发生局部放时的 GIL 壳体振动时域信号与频域信号,图 6 所示为 GIL 设备正常运行时振动的时域信号和频域信号。

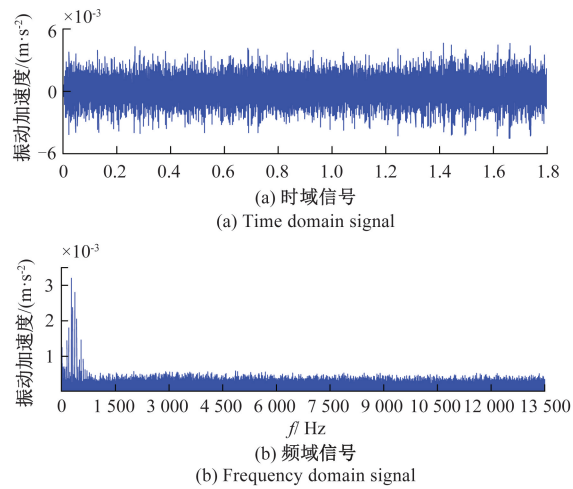

图 6　GIL 正常运行振动信号

Fig. 6　GIL normal operation vibration signal

由图 6 可知,GIL 设备在正常运行时的振动为低频振动,多集中在 0~600 Hz,主要振动源包含 GIL 设备运

行时的固有机械振动与工频电磁场影响下磁致伸缩效应引起的振动。GIL 设备正常运行时 1 000 Hz 以上的振动加速度均小于 0.005 m/s^2,图 7 所示为在不同电压等级下发生局部放电时 GIL 振动频域信号。

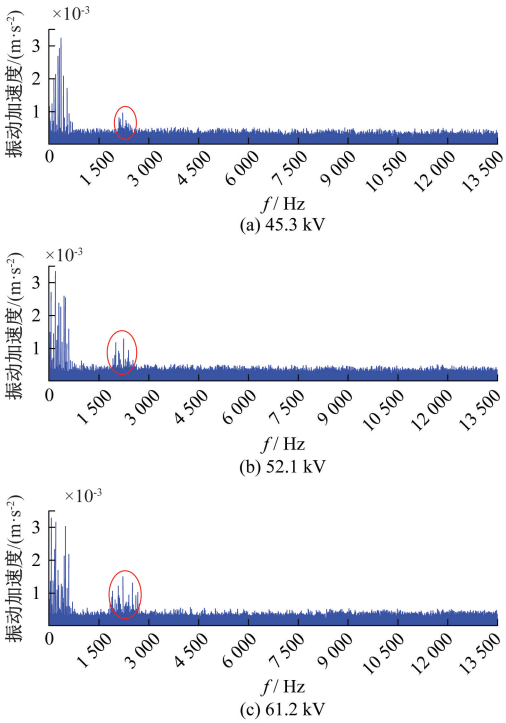

图 7　不同放电程度下 GIL 振动图谱

Fig. 7　Vibration Spectrums of GIL under different discharge

由图 7 红色圈中区域所示,伴随 GIL 设备中的局部放电现象,GIL 设备的固有振动频率也发生改变,在一定程度上印证了局部放电与 GIL 设备异常振动之间具有相关性。局部放电引发的振动为高频振动,集中在 1 600~2 800 Hz,且随着局部放电程度的增加,GIL 壳体异常振动能量和频率范围都有所增加,为进一步研究局部放电引起的异常振动规律与特征,文中对异常振动频段进行放大观察,如图 8 所示。

图 8 放大了局部放电密集的频段,通过对比可以发现,局部放电引起的 GIL 异常振动多集中在 1 600~2 800 Hz 内 20 Hz 倍频的频段上,规律性较强,这一特征明显区别于 GIL 固有的机械振动与电磁影响下的随机振动频率(0~600 Hz)。因此,可以将 1 600~2 800 Hz 内 20 Hz 倍频的振动聚集现象可以作为尖端放电的主要特征,并为基于机电联合信号的局部放电趋势预测与故障诊断提供依据。

3.2　局部放电引发 GIL 振动机理

为验证局部放电脉冲电流信号与 GIL 壳体振动信号的相关性,本文提出一种新的测量方法,脉冲重复率(pulse repetition rate, PRR),采集检测阻抗上检测到的

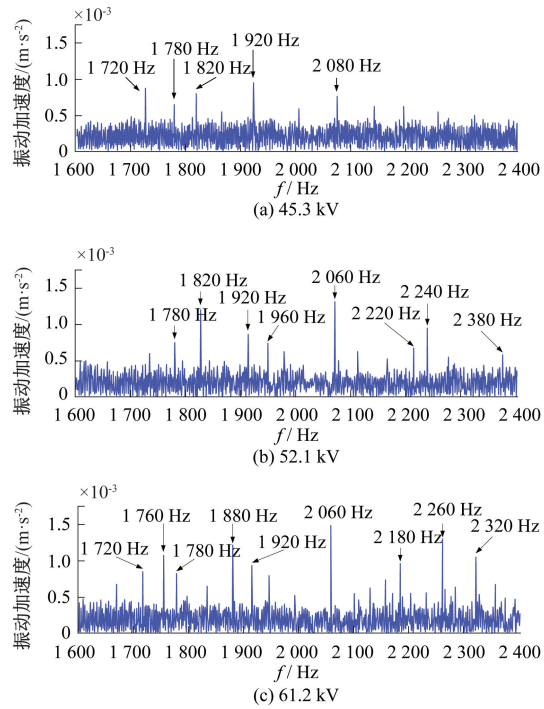

图 8　局部放电引起的异常振动聚集情况

Fig. 8　Vibration aggregation of GIL induced by partial discharge

脉冲电流信号,在单位时间 T_p 里,接收到的脉冲次数 N 与时间的比值即为脉冲重复频率:

$$PRR = \frac{N}{T_P} \tag{2}$$

为进一步研究局部放电与 GIL 异常振动信号特征的联系,并考虑局部放电现象的随机性,测取 50 组工频周期下的 PRR 和局部放电引起的 GIL 设备振动频率,利用二者 1 000~3 500 Hz 频段的概率密度分布进行对比,如图 9 所示。

通过对比统计规律可以发现,局部放电 PRR 与 GIL 壳体异常振动呈强对应关系,由此也验证了第一节理论分析中的内容,即局部放电产生的电流脉冲会作用于 GIL 设备引起异常振动,且每产生一次电流脉冲就会引起一次振动脉冲。随着电压等级的提升,局部放电现象逐渐强烈,同时,GIL 壳体异常振动频率与峰值也随之提升。基于以上分析,GIL 局部放电集中于 1 600~2 800 Hz 内 20 Hz 倍频的频段上,且放电趋势与 GIL 壳体异常振动频率与峰值直接相关。

4　WOA 优化 ELM 的局部放电趋势预测

4.1　ELM

ELM 作为一种改进的单隐含层前馈神经网络算法于 2004 年被提出[18-19],其优势在于 ELM 算法中唯一需

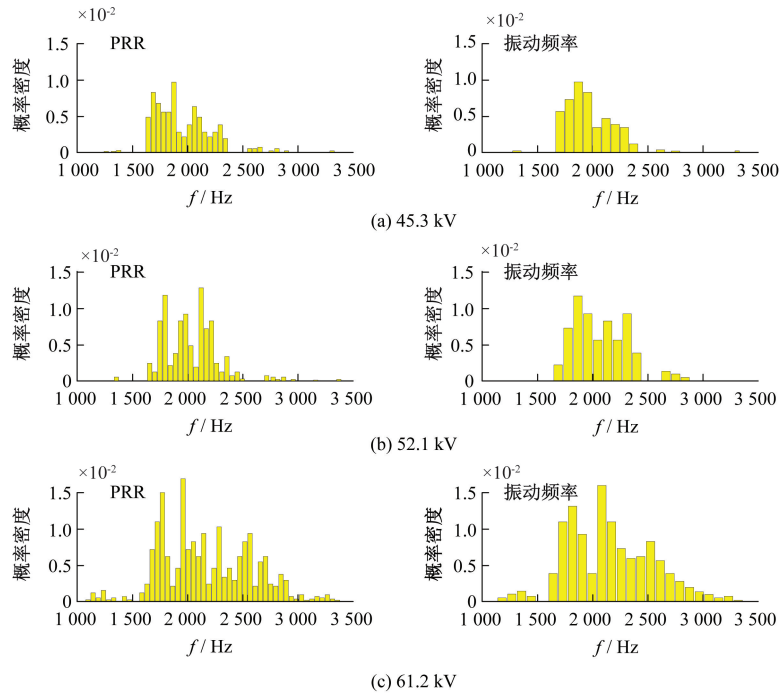

图 9　PRR 概率分布密度与局部放电引起 GIL 振动频率概率分布密度对比

Fig. 9　Comparison of PRF probability distribution density and GIL vibration frequency probability distribution density caused by partial discharge

要设定的只有初始神经元个数,在运行过程中网络的输入权值以及隐元偏置无需人为调整,并且产生的最优解有且仅有一个。因而相较于 BP 神经网络必须反向处理权值和阈值,ELM 的训练参数更少、学习速度更快、泛化性能更好,其结构图如图 10 所示。

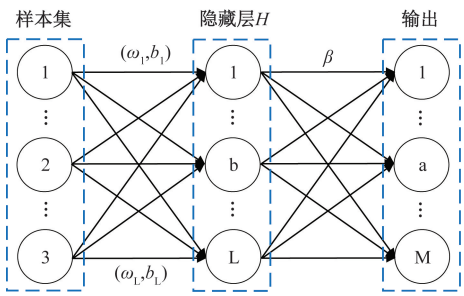

图 10　ELM 结构图

Fig. 10　The structure diagram of ELM

ELM 最终表示如下:

$$f_{ELM}(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{L} \boldsymbol{\beta}_i g_i(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{L} \boldsymbol{\beta}_i g_i(\boldsymbol{\omega}_i \times x_i + b_i) \quad (3)$$

式中:$\boldsymbol{x}$ 为输入向量;L 为隐藏层单元数量;$j = 1,2,\cdots,D$ 为样本数量;$\boldsymbol{\beta}$ 为权重向量,位于隐藏层和输出层之间;$\boldsymbol{\omega}$ 是位于输入和隐藏层输出之间的权重向量;g 为激活函数,本文使用对于特征值感知更为明显的 Sigmoid 函数作为激活函数;b 为偏置。

ELM 的反向传播过程如下:

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{\beta} \quad (4)$$

式中:$\boldsymbol{H}$ 是隐藏层输出矩阵。

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} g(\boldsymbol{\omega}_1 \times x_1 + b_1) & \cdots & g(\boldsymbol{\omega}_L \times x_1 + b_L) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g(\boldsymbol{\omega}_1 \times x_D + b_1) & \cdots & g(\boldsymbol{\omega}_L \times x_D + b_L) \end{bmatrix}_{D\times L}$$

$\boldsymbol{T}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 分别为训练集目标矩阵与权重矩阵,s 为尺度因子,N 为时间序列的长度,m 为输出数量。

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_D^T \end{bmatrix}_{D\times m}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{L\times m}$$

在算法初始化过程中随机给定输入权值与偏置,矩阵 $\boldsymbol{H}$ 即为确定矩阵。训练过程就是利用目标函数,不断迭代求解非线性最小二乘解的过程,最终结果即为 ELM 的最优权值。

4.2　WOA 算法

WOA 算法是一种启发式优化算法[20-21],采用随机或最佳搜索代理来模拟搜捕猎物(最优解)行为,并使用螺旋来模拟座头鲸的泡泡网攻击机制,相较于其他群优化算法,WOA 具有操作简便,参数调整少,优化速度快等优点。WOA 优化行为可以表述如下。

1)搜寻猎物(Search for prey),由于优化算法在搜索范围的位置是未知的,所以 WOA 假设当前候选位置是

目标猎物(最优解),在定义了当前搜索个体之后,接下来的搜索行为已该猎物为基准调整搜索位置。

$$\boldsymbol{D} = |\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}_{Best}(n) - \boldsymbol{X}(n)| \tag{5}$$

$$\boldsymbol{X}(n+1) = \boldsymbol{X}_{Best}(n) - \boldsymbol{A}\boldsymbol{D} \tag{6}$$

式中:n 为当前迭代值;$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 为系数向量;$\boldsymbol{X}_{Best}(n)$ 和 $\boldsymbol{X}(n)$ 分别是最优解位置和当前解的位置。

2)气泡网攻击方式(bubble-net attacking method),此阶段为利用阶段,包含包围行为和螺旋更新行为。

收缩包围机制为当迭代次数不断增加时,A 的波动范围不断降低,$\boldsymbol{A} \in [-a, a]$,当 $a \to 0$ 时,$\boldsymbol{A} \in [-1, 1]$,即新的代理位置处于原位置与最优位置之间,经过不断迭代达到缩小猎物范围的目的。

$$\begin{cases} \boldsymbol{A} = 2ar_1 - a, & r_1 \in [0,1] \\ \boldsymbol{C} = 2r_2, & r_2 \in [0,1] \end{cases} \tag{7}$$

$$a = 2\left(1 - \frac{n}{N_{\max}}\right) \tag{8}$$

式中:$N_{\max}$ 为最大迭代次数。

螺旋更新位置,设鲸鱼位置为 (X, Y),猎物位置为 (X', Y'),在两者之间建立螺旋等式,模拟鲸鱼的螺旋状移动:

$$\boldsymbol{X}(N+1) = \begin{cases} \boldsymbol{X}_{Best} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{D}, & p < 0.5 \\ \boldsymbol{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \boldsymbol{X}(n), & p \geqslant 0.5 \end{cases} \tag{9}$$

式中:D'表示鲸鱼与猎物之间的距离,b 为定义对数螺线形状的常数,$l \in [-1, 1]$,$p \in [0, 1]$。

4.3　WOA-ELM 模型

为降低 ELM 权值与阈值等参数选取的随机性,本文利用 WOA 进行优化,适应度函数如下:

$$f_{fit} = \left(\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(y_i - \hat{y}_i)^2\right) \tag{10}$$

式中:m 为样本容量;y_i 为实际值;$\hat{y}_i$ 为预测值。

WOA-ELM 模型计算流程如下。

1)数据预处理

由于 GIL 壳体异常振动采集样本变化波动较大,且 Sigmoid 激活函数在(0,1)外区分度不大,故首先对样本数据进行归一化处理:

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{11}$$

式中:x 为样本输入值;$x_{\min}$ 为样本最小值;$x_{\max}$ 为样本最大值;y 为归一化输出值。

2)ELM 初始参数设定

输入样本包括 GIL 壳体异常振动的频段、频率、峰值、采样点数以及振动加速度,故输入神经元设置为 $n=5$;根据实验分析 GIL 局部放电趋势与 GIL 壳体异常振动频段、频率、峰值直接相关,故设置 ELM 模型隐含层的节点个数为 $L=3$;输出 GIL 局部放电趋势应与输入信息一致 $m=5$。

等待优化参数 Z 的个数可以表示为:

$$Z = nL + m = 20 \tag{12}$$

3)WOA 初始参数设定及优化流程

根据 WOA 算法的收缩包围机制,设置下界、上界为(-1,1),最大迭代次数为 150,鲸鱼数量为 30,并初始化每个鲸鱼的位置。根据训练过程中的均方根误差计算所有个体的适应度值后选取最优个体,然后根据最低适应度值更新最优个体的位置。在到达设置的迭代次数之前不断地进行寻优,直到达到均方根误差低于设定值或达到最大迭代次数。保留鲸鱼的最优位置,在满足最大位置与误差精度要求后终止循环,将最优参数赋值 ELM。

WOA-ELM 模型具体计算流程如图 11 所示。

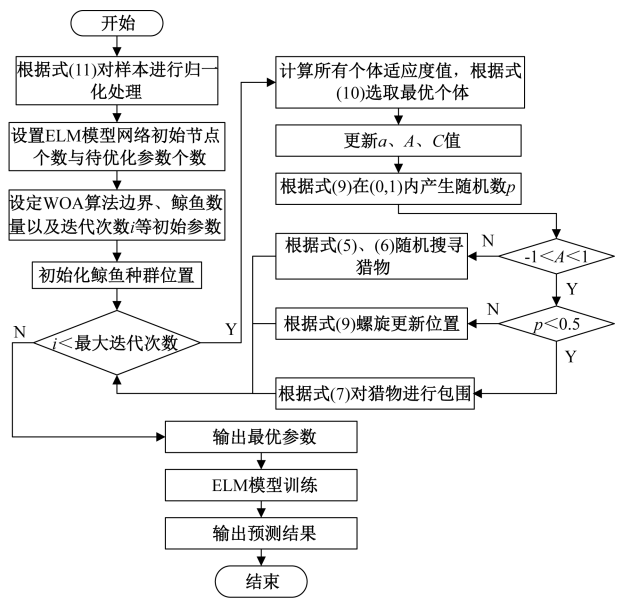

图 11　WOA-ELM 模型流程

Fig. 11　Flow chart of WOA-ELM model

4.4　实验数据选择

尖端放电引发 GIL 壳体振动的能量集中在 1 600~2 800 Hz 频段,且振动能量集中在 20 Hz 倍频处。考虑输配电系统频率波动范围为±0.2 Hz,同时现场运行或存在背景噪声,故文中选取 1 600~2 800 Hz 频段之间 20 Hz 倍频处±0.25 Hz 范围内的振动峰值为故障参量,大于 0.005 m/s^2 为有效值。实验设置了 3 种放电等级,共采集 1 020 个数据点,前 800 采样点作为训练样本,后 220 个采样点为组数据为测试样本,如图 12 所示。

4.5　预测结果分析

将 WOA-ELM 模型预测结果与 ELM 模型预测结果进行对比,并进行误差评价,预测结果如图 13 所示。

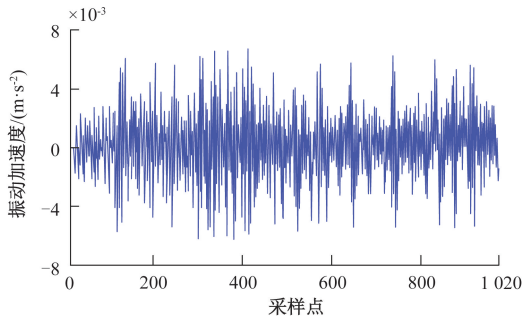

图 12　异常振动信号原始序列

Fig. 12　Original sequence of abnormal vibration signal

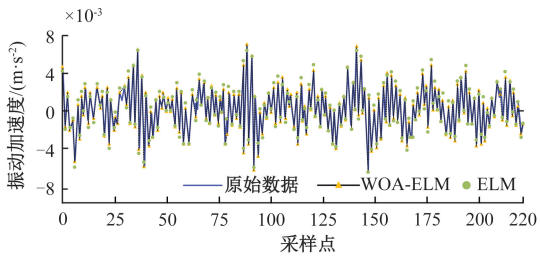

图 13　WOA-ELM 与 ELM 预测结果对比

Fig. 13　Comparison of prediction results between WOA-ELM and ELM

表 1　误差评价指标

Table 1　Error evaluation index

误差指标	ELM	WOA-ELM
均方根误差	16. 772	9. 674
方差	0. 401 2	0. 315 4
平均绝对误差	0. 276 5	0. 234 1
平均百分比误差	14. 543	8. 760

结合图 13 与表 1 可以发现，随着模型结构的优化，模型预测的误差系数越小，相较于 ELM 模型 WOA-ELM 模型对异常振动信号的预测更符合实际运行情况。以 ELM 模型的误差指标为基准，WOA-ELM 模型的均方根误差降低了 42. 32%，方差降低了 21. 39%，平均绝对误差降低了 15. 33%，平均百分比误差降低了 39. 76%，从而说明了 WOA-ELM 对于 GIL 设备局部放电故障程度预测具有优异的效果。结合局部放电引起的 GIL 振动特征与 WOA-ELM 预测结果，可以再一定程度上对局部放电趋势进行预测，避免局部放电严重影响 GIL 内部绝缘系统。

图 14 所示为 WOA 优化的 ELM 模型与传统 ELM 模型对于 GIL 局部放电程度分类识别的适应度曲线。

由图 14 可知，相较于传统 ELM 模型，经 WOA 优化 ELM 模型的权值、阈值等参数选取的随机性大大减小，这也保证了模型训练与检验的准确性和高效性，从而使得模型对于局部放电故障程度预测更为准确，WOA-ELM 的最佳分类准确率达 97. 89%，ELM 的最佳分类准确率 93. 21%。因此，WOA-ELM 模型对基于振动信号的局部放电趋势预测具有较高的预测准确度。

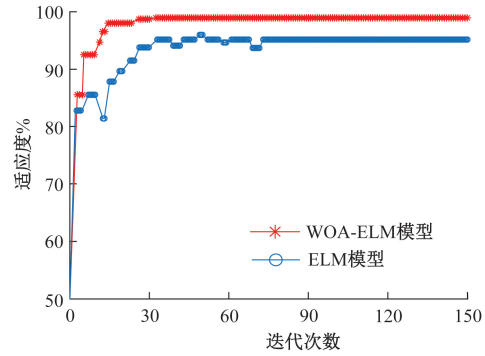

图 14　放电程度预测适应度曲线

Fig. 14　Fitness curve of discharge degree prediction

5　结　论

本文以 GIL 局部放电为研究对象，以尖端放电为例建立 GIL 局部放电模型，通过实验研究了 GIL 局部放电引起的异常振动行为机理与特征，并建立 WOA-ELM 模型对 GIL 局部放电趋势进行预测，得出以下结论，尖端放电会引起 GIL 设备的异常振动，异于 GIL 设备的固有低频振动，尖端放电引起的振动多集中在 1 600~2 800 Hz，且以 20 Hz 倍频分布为主，此特征可以作为 GIL 设备局部放电的检测依据。GIL 局部放电与 GIL 壳体异常振动频率分布直接相关，即尖端放电的脉冲电流为 GIL 壳体异常振动的振源，尖端放电脉冲诱发 GIL 壳体的异常振动行为。以 GIL 壳体机械振动信号与脉冲电流信号作为研究对象，并依托于 WOA-ELM 模型进行 GIL 局部放电故障趋势预测相较于传统 ELM 模型对 GIL 异常振动具有更为优越的预测效果，预测准确率达 97. 89%，为基于机电信号联合的 GIL 局部放电趋势预测提供了新的方法。

参考文献

[1] 肖登明，阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术，2017，43(3)：699-707.
XIAO D M，YAN J D. Application and development of gas insulated transmission line (GIL) [J]. High Voltage Engineering，2017，43(3)：699-707.

[2] 黄志高. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL) [M]. 北京：中国电力出版社，2018.

[3] 陈君强，王鹏，黄寅，等. 变频电机绝缘局放电压自动测试系统设计[J]. 电子测量与仪器学报，2019，33(7)：114-121.
CHEN J Q，WANG P，HUANG Y，et al. Design of an automatic test system for partial discharge voltage of inverter-fed motor insulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2019，33(7)：114-121.

[4] 李鹏，颜湘莲，王浩，等. 特高压交流 GIL 输电技术研

究及应用[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-3167.
LI P, YAN X L, WANG H, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.

[5] 黎卫国, 张长虹, 杨旭, 等. 换流站 GIL 设备关键部件故障分析[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 251-258.
LI W G, ZHANG CH H, YANG X, et al. Fault analysis of the key components of GIL in converter stations [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 251-258.

[6] CHEN G, ILLIAS H A, LEWIN, et al. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 99-109.

[7] JUNG H S, PARK Y, NA H S, et al. Performance evaluation of SHF sensor for partial discharge signal detection on dc rectifier[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2012, 61(7): 1056-1060.

[8] 王鹏, 赵政嘉, 刘雪山, 等. 电力电子设备中的电气绝缘问题[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2309-2322.
WANG P, ZHAO ZH J, LIU X SH, et al. Electrical insulation problems in power electronics devices [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2309-2322.

[9] 王鹏, 周婉亚, 王科镜, 等. 正弦和重复方波电压下变频电机绝缘局部放电特性对比[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3895-3900.
WANG P, ZHOU W Y, WANG K J, et al. Comparison of PD characteristics for inverter-fed Motor insulation under inusoidal and repetitive square wave voltage conditions [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3895-3900.

[10] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6452-6460.
ZHOU H Y, MA G M, ZHANG M, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the michelson fiber optic interferometer [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 6452-6460.

[11] 罗沙, 田宇, 李宾宾, 等. 基于尺度-能量熵特征对的特高频局部放电辨识方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 152-158.
LUO SH, TIAN Y, LI B B, et al. Pattern recognition of ultra-high frequency partial discharge by using scale parameters-energy entropy characteristic pairs [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 152-158.

[12] 臧旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于改进集总经验模态近似熵的 GIS 放电故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 129-137.
ZANG X, MA H ZH, WU J L, et al. Diagnosis of GIS discharge fault based on MEEMD approximate entropy [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 129-137.

[13] 李凯, 许洪华, 马宏忠, 等. GIS 针尖类局部放电引起的振动特性研究[J]. 智慧电力, 2016, 44(9): 80-84.
LI K, XU H H, MA H ZH, et al. Vibration characteristics of needle partial discharge in GIS [J]. Smart Power, 2016, 44(9): 80-84.

[14] HE L, LI S, ZHOU D, et al. Analysis method of abnormal condition in GIS based on ultrasonic detection [C]. 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2016: 570-573.

[15] 张立智, 徐卫晓, 井陆阳, 等. 基于 EMD-SVD 和 CNN 的旋转机械故障诊断[J]. 振动. 测试与诊断, 2020, 40(6): 1063-1070, 1228.
ZHANG L ZH, XU W X, JING L Y, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on EMD-SVD and CNN [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1063-1070, 1228.

[16] 蒋龙, 臧春艳, 胡学深, 等. 基于低频振动信号的 GIL 机械故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 86-91, 100.
JIANG L, ZANG CH Y, HU X SH, et al. Research on the diagnosis of GIL mechanical fault by low frequency vibration signal [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 86-91, 100.

[17] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705.
SHAO T, ZHANG Ch, WANG R X, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705.

[18] HUANG G, HUANG G B, SONG S, et al. Trends in extreme learning machines: A review [J]. Neural Networks, 2015, 61: 32-48.

[19] 王亚萍, 周蓓, 白健弘, 等. 基于 PLS-ELM 的滚动轴承性能衰退预测[J]. 振动. 测试与诊断, 2020, 40(2): 397-404, 424.
WANG Y P, ZHOU B, BAI J H, et al. Rolling bearing fault prediction method based on PLS-EWT [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 397-404, 424.

[20] BAHRAMI S, HOOSHMAND R A, PARASTEGARI M.

Short term electric load forecasting by wavelet transform and grey model improved by PSO (particle swarm optimization) algorithm-ScienceDirect [J]. Energy, 2014, 72(7): 434-442.

[21] 王坚浩, 张亮, 史超, 等. 基于混沌搜索策略的鲸鱼优化算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 1893-1900.
WANG J H, ZANG L, SHI CH, et al. Whale optimization algorithm based on chaotic search strategy [J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 1893-1900.

作者简介

王立宪,2015 年于南京师范大学获得学士学位,现为河海大学硕士研究生,主要研究方向为 GIL 设备运行状态监测与故障预警。
E-mail:837213579@qq.com

Wang Lixian received his B. Sc. degree from Nanjing Normal University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate at Hohai University. His main research interests include operation condition monitoring and fault early warning of GIL equipment.

马宏忠,1989 年于东南大学获得学士学位,1994 年于东南大学获得硕士学位,2002 年于东南大学获得博士学位,现为河海大学教授,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。
E-mail:hhumhz@163.com

Ma Hongzhong received his B. Sc. degree from Southeast University in 1989, M. Sc. degree from Southeast University in 1994, and Ph. D. degree from Southeast University in 2002. Now he is a professor at Hohai University. His main research interests include condition monitoring and fault diagnosis of power equipment.