第 50 卷 第 2 期：579-589 高电压技术 Vol.50, No.2: 579-589
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230111

变频电流激励下 GIS 隔离开关机械缺陷的振动非线性行为及其辨识方法

李 旭[1]，郝 建[1]，李 滢[1]，邵子琦[1]，钟 尧[1,2]，蒋西平[3]
（1. 重庆大学输变电装备技术全国重点实验室，重庆 400044；
2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院，贵阳 550002；
3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院，重庆 401123）

摘 要：气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)机械缺陷是导致设备故障的关键因素之一，为此开展了变频电流激励模式下隔离开关底座松动缺陷的时频域振动图谱变化规律研究，进行了波形因子、重心频率等 6 个振动特征量的量化分析，采用灰狼算法优化的支持向量机研究提出了变频电流激励模式下 GIS 隔离开关底座松动缺陷严重程度辨识方法。结果表明：GIS 隔离开关缺陷振动信号特征量与电流激励频率具有强相关性，与单一工频电流激励模式相比，变频电流激励具备更有效检测 GIS 设备机械缺陷的优势；基于 126 kV 真型 GIS 试验平台验证获得构建的隔离开关底座松动缺陷辨识模型的平均识别准确率达 90%以上。该研究成果为揭示 GIS 设备的非线性机械振动特性及提升其机械缺陷检测水平提供了重要参考。

关键词：隔离开关；变频电流激励；机械缺陷；非线性行为；缺陷辨识

Nonlinear Vibration Behavior and Identification Method for GIS Disconnector Looseness Mechanical Defect Under Variable Frequency Currents Excitation

LI Xu[1], HAO Jian[1], LI Ying[1], SHAO Ziqi[1], ZHONG Yao[1,2], JIANG Xiping[3]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Scientific Research Institute of Electric Power, Guizhou Power Grid Company Ltd., Guiyang 550002, China;
3. State Grid Chongqing Electric Power Company Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: Mechanical defects of gas insulated switchgear(GIS) equipment is one of the critical factors leading to its failure. Therefore, we studied the evolution laws of time domain and frequency domain vibration spectra of disconnector base looseness defects under the excitation of variable frequency currents, and quantitatively analyzed six vibration characteristic values, such as waveform factor and gravity frequency. The support vector machine optimized by the Grey Wolf Optimizer algorithm was used to propose a method for identifiying the severity of GIS disconnector base looseness defects based on variable frequency current excitation mode. The results show that there is a strong correlation between the vibration characteristic values of GIS disconnector base looseness defects and the frequencies of excitation currents. Compared with the single power frequency current excitation mode, variable frequency current excitation has the advantage of more effective detection of GIS mechanical defects. Based on the verification of the 126 kV true GIS experimental platform, the average recognition accuracy of the disconnector base looseness defects identification model is over 90%. The results of this paper provide important references for revealing the nonlinear mechanical vibration characteristics of GIS equipment and improving its mechanical defect detection level.

Key words: disconnector; variable frequency excitation; mechanical defects; nonlinear behavior; defect identification

基金资助项目：国家重点研发计划(2022YFB2403705)；重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1247)；国网重庆市电力公司科技项目(2022 渝电科技 26#)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB2403705), Natural Science Foundation of Chongqing(CSTB2022NSCQ-MSX1247), State Grid Chongqing Electric Power Company Technology Project(2022 Yudian Technology 26#).

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)设备因其具有占地面积小、可靠性高、易维护等优点在电网中广泛应用[1-3]。近年来，由于 GIS 机械缺陷引起的设备故障频发。据统计，因机械缺陷导致设备故障的占比高达 39.3%[4-5]。因此，开展 GIS 机械缺陷的检测分析对于保障设备安全具有重要意义。

隔离开关是 GIS 设备的核心功能单元之一，具有使用数量大、操作次数多的特点，一般配合断路器承担一次电路的分合功能。随着 GIS 设备使用年限的增长以及频繁的分合操作，隔离开关各部分组成元件的磨损情况会逐渐加剧[6]，加之设备运行时会产生振动，极易使隔离开关底座的螺栓松动，最终可能引发绝缘故障。因此，开展 GIS 隔离开关机械状态的检测研究，是确保设备安全稳定运行的关键之一。

振动是反映电力设备运行状态的重要信息量，对于存在机械缺陷的 GIS 设备，其振动信号将发生畸变[7-9]。在 GIS 机械振动检测分析方面，河海大学臧旭等开展了 GIS 母线导电杆松动故障的振动特征研究，发现该故障振动信号的 1000~3000 Hz 频段能量显著增大，故障越严重能量越大[10]。华北电力大学徐志钮等分析了 GIS 外壳连接螺栓松动和导杆不对中缺陷的振动特性，发现螺栓松动缺陷的主频分量为 170 Hz 和 370 Hz，而导杆不对中缺陷主频分量为 215 Hz 和 235 Hz，两者差异显著[11]。国网江苏电科院刘媛等开展了 550 kV GIS 隔离开关存在接触不良缺陷的振动试验模拟分析，发现振动频谱中 50 Hz 和 200 Hz 频点存在较大幅值[12]。

在 GIS 机械振动特征提取及缺陷辨识方面，北京航空航天大学袁洋等提出了基于相干函数分析的频率特征提取方法，实现了隔离开关接触不良、法兰螺栓松动及支架螺栓松动这 3 类缺陷的有效识别[13]。河海大学刘宝稳等提出了一种基于 S 变换的时频域振动特征提取方法，实现了 GIS 传动杆卡涩、弹簧疲劳松动及外部连接螺丝松动故障的初步诊断[14]。山东大学马星光等联合时频法和数据序列法提取 GIS 断路器振动的组合特征量，实现了铁芯卡涩、缓冲器无效超程、绝缘拉杆松动等故障的有效区分[15]。上海交通大学徐明月等提出了一种基于改进梅尔倒谱系数的故障诊断方法，通过 GIS 断路器和隔离开关操动机构机械缺陷诊断验证了方法可行性[16]。但目前已有成果对 GIS 设备机械缺陷的检测均基于单一工频电流，对 GIS 设备的多频振动响应特性反映不足[17]。此外，GIS 设备会因机械振动缺陷的劣化引起阻尼下降和刚度软化，产生非线性动力学行为[18-19]，此现象的出现与激励电流频率密切相关，而尚未见此方面相关报道，变频电流激励下的 GIS 设备振动特性有待深入探索。

本文开展了变频电流激励下 GIS 隔离开关底座松动缺陷的机械振动非线性行为及其辨识方法研究。首先，基于 126 kV 真型 GIS 机械缺陷模拟平台设计不同严重程度的隔离开关底座松动缺陷，采集变频电流激励下设备在正常和缺陷状态下的振动信号，开展振动信号时频域图谱的演化规律分析；然后，提出 GIS 设备缺陷振动信号变频振动特征的提取算法，研究隔离开关底座在正常、轻度、中度、重度缺陷 4 种状态下振动信号的复合非线性特征值与变频电流变化的关联特性；最后，采用灰狼算法优化的支持向量机开展不同激励频段和不同激励模式下的 GIS 隔离开关底座松动缺陷状态辨识效果对比研究，验证变频电流激励实现 GIS 设备机械缺陷状态识别的技术优势。

1 GIS 隔离开关机械缺陷模拟试验

1.1 GIS 隔离开关机械缺陷模拟平台

126 kV 真型 GIS 设备机械振动模拟平台如图 1 所示，由一次主回路、升流变压器、变频激励电源、无功补偿模块、控制模块和振动检测模块等组成，其中 GIS 设备一次主回路主要包括母线气室、隔离开关气室、接地刀闸、电流互感器气室、盆式绝缘子等部件，正弦变频激励电流的频率范围是 20 ~100 Hz，电流大小为 0~3150 A 可调。GIS 设备振动信号检测系统主要包括电源模块、振动信号传感模块、振动信号数据采集模块和用户控制模块。电源模块输入 220 V 工频，输出 0~30 V 直流；振动信号传感模块由灵敏度为 1 V/g 的压电式加速度传感器、电缆和电流适调器组成；数据采集模块利用采样频率为 125 kHz 的采集卡对信号进行 A/D 转换。

本文将隔离开关通流底座的 4 颗螺栓分别设置了轻度、中度和重度松动这 3 种程度的松动机械缺陷，并与正常状态的振动规律开展对比分析。隔离开关底座松动缺陷示意图如图 2 所示，缺陷严重程度设置见表 1。

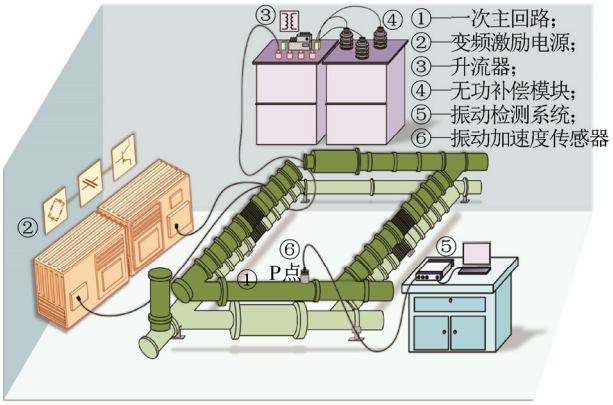


图 1　126 kV GIS 机械振动模拟平台

Fig.1　126 kV GIS mechanical vibration simulation platform

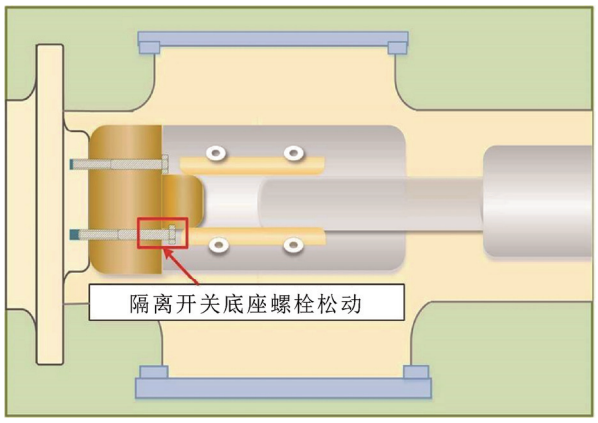


图 2　隔离开关底座松动缺陷模拟示意图

Fig.2　Simulation diagram of looseness defect of disconnector base

表 1　隔离开关底座松动缺陷严重程度等级划分

Table 1　Severity classification of looseness defects of disconnector base

缺陷严重程度	隔离开关底座螺栓松动圈数
正常	0
轻度	0.5
中度	1.5
重度	2.5

1.2　变频电流激励下机械振动特性测试

为探究激励电流频率、大小及机械缺陷严重程度这 3 种因素对 GIS 振动信号的影响，分别在正常、轻度、中度和重度缺陷状态下给 GIS 设备施加大小为 0~2400 A (每 300 A 设置为 1 个电流梯度)，频率为 20~100 Hz (每 10 Hz 设置为 1 个频率梯度)的变频电流。每次试验测试采集 1 个信号样本，采样时间为 5 s，每种条件下采样 3 次。完成一个频率下所有电流梯度的信号采集后，在下一次测试开始前设置 15 min 的时间间隔。同时，为提高实验结果的准确度和实验效果的可比性，本文涉及的所有实验测点均位于母线气室和隔离开关气室相邻的设备外壳同一位置处(如图 1 中 P 点位置)。

2　结果及分析

2.1　变频电流激励下非线性振动图谱演化规律分析

图 3、图 4 为不同状态下 GIS 隔离开关底座在 1200 和 2400 A，频率分别为 50、80 和 100 Hz 电流激励下振动信号的时域和频域图谱。在同幅值的变频电流激励下，正常状态振动信号时域波形基本呈正弦状态，几乎无畸变，振动主频率为激励电流频率的 2 倍(图 3(b)、图 4(b)①—③)。而存在松动机械缺陷状态时，80 Hz 电流激励的振动图谱非线性特性表现最强，100 Hz 次之(图 3、图 4④—⑫)，具体表现为：轻度缺陷时(图 3、图 4④—⑥)，相较于工频激励，80 Hz 时域波形畸变程度严重，频谱响应脉冲变强且范围变宽，2400 A 主响应近似为 0.06 m/s^2，在 640 Hz 频点处仍有较微弱的响应出现；中度缺陷时(图 3、图 4⑦—⑨)，80 Hz 信号畸变严重，在 800 Hz~960 Hz 的频响范围内有集中分布；重度缺陷时(图 3、图 4⑩—⑫)，80 Hz 时域图谱幅值最大可达近 0.6 m/s^2，几乎为同类缺陷状态下其他信号幅值的 2~6 倍，频响脉冲可达 0.2 m/s^2 及以上，高幅值频响点出现在 800 和 960 Hz 附近，集中响应在 1000~1500 Hz 频段内。

将同频率 2 种不同幅值电流激励所得信号图谱进行对比(图 3、图 4)，结果表明：激励电流越大，振动信号响应更强，且缺陷信号的频响范围、畸变程度均随之变大。具体表现为 2400 A 电流激励下的振动信号幅值近似为 1200 A 信号幅值的 2~4 倍，最高至 1600 Hz 仍有响应频点出现(图 4(b)⑪)；此外，2400 A 下缺陷信号的非线性现象更为显著，波形畸变程度加剧且出现更多高幅值倍频响应，其中中度缺陷信号在 800~1000 Hz 频段内产生一定程度的集中响应(图 4(b)⑦、⑧)；重度缺陷信号在 80 Hz 电流激励下于整数倍外激频率点 800 和 1120 Hz 附近出现超谐振动(图 4(b)⑪)。

将不同严重程度的缺陷状态下时频域振动图谱对比可知，随着隔离开关底座松动程度越严重，振动信号幅值越大，时域图谱波形畸变程度越大，频域响应更分散。由于随着缺陷严重程度加剧，系

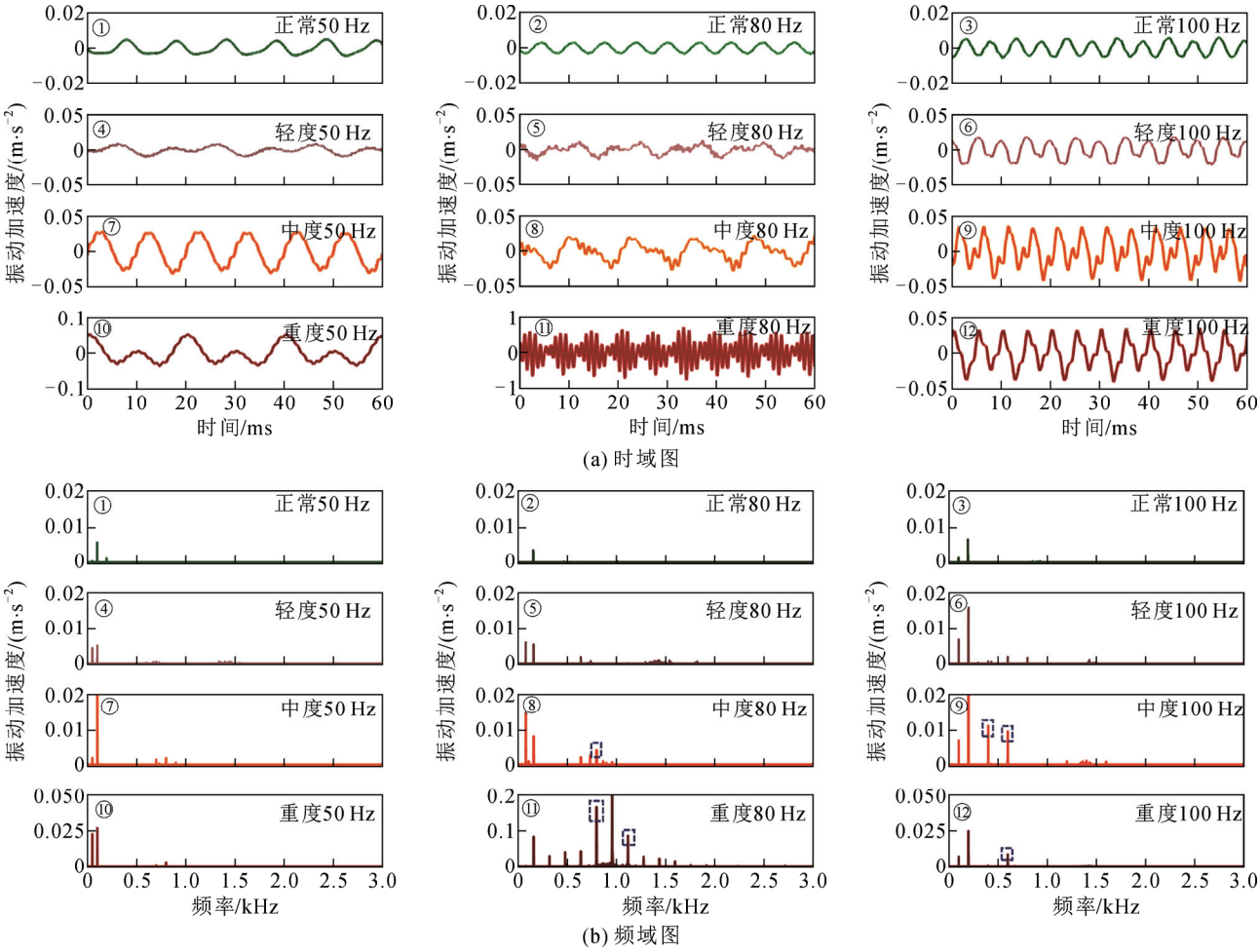


图 3 1200 A 变频电流激励下 GIS 设备存在隔离开关松动机械缺陷的振动图谱

Fig.3 Vibration spectra of GIS with disconnector looseness mechanical defect under 1200 A variable frequency currents excitation

统的非线性更强，底座松动后隔离开关触点承受电流更大，所受到的电动力更强[20]，在振动信号的幅值、频响等方面都表现得更为激烈。

正常运行的 GIS 设备会产生频率为激励电流 2 倍的主频响应[21]，但存在机械缺陷时，由于内部阻尼、弹性力、刚度和外激力的非线性变化，系统固有频率改变，振动信号具有极强的非线性和非平稳性，极易出现由超谐振动引发的倍频响应[22-23]。隔离开关底座松动后将承受更强的电动斥力，且该力与电流频率有关。因此，在不同频率电流激励下的振动现象存在差异，如 80 Hz 电流激励相较于工频表现出更复杂的非线性现象，产生大量频率为外激频率整数倍的超谐共振点。不同频率激励下的超谐振点分布如图 3 和图 4 频域图中虚线方框标注处。

2.2 非线性振动特征量提取及对比分析

由于缺陷状态下的 GIS 设备非线性振动规律十分复杂且受电流频率影响显著，因此需对振动信号开展进一步的定量化对比分析研究。为了更直观地表示 GIS 设备振动特征信息，本文分别从时域和频域两方面提取了振动信号的波形因子、脉冲因子、裕度因子、重心频率、频率标准差及幅值平方和共 6 种复合特征量。

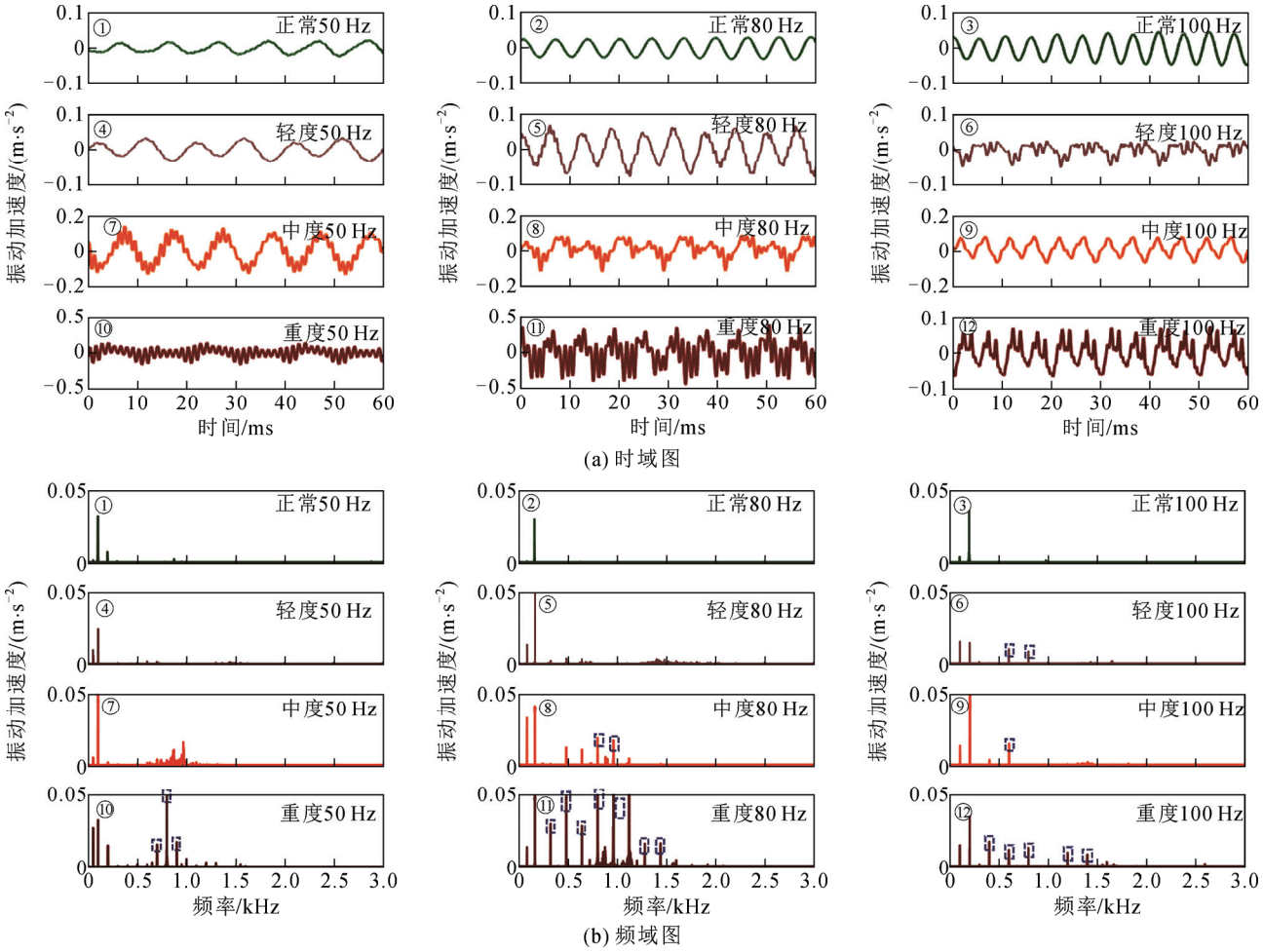
设 $x(n)$为信号的时域序列，n=1,2,…, N；N 为样本点数。将时域序列经过 FFT 变换后得到的频域信号定义为 $X(k)$。

1）波形因子 W：定义为信号有效值与整流平均值的比值，计算式为：

$$W=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}x^2(n)}\Bigg/\left(\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}x(n)\right) \tag{1}$$

2）脉冲因子 I：定义为信号峰值与整流平均值的比值，检测信号中是否存在冲击，计算式为：

$$I=\max|x(n)|\Bigg/\left(\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}x(n)\right) \tag{2}$$



(a) 时域图

(b) 频域图

图 4　2400 A 变频电流激励下 GIS 设备存在隔离开关松动机械缺陷的振动图谱

Fig.4　Vibration spectra of GIS with disconnector looseness mechanical defect under 2400 A variable frequency currents excitation

3）裕度因子 L：定义为信号峰值与方根幅值的比值，检测设备的磨损情况，计算式为：

$$L=\max|x(n)|\Big/\left(\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\sqrt{x(n)}\right)^{2} \tag{3}$$

4）重心频率 f_c：描述信号在频谱中分量较大的信号成分的频率，反映信号功率谱的分布情况。计算式为：

$$f_c=\sum_{k=1}^{N}\left(X(k)f(k)\right)\Big/\left(\sum_{k=1}^{N}X(k)\right) \tag{4}$$

式中：$f(k)$为第 k 个频域信号点的频率值。

5）频率标准差 f_{RV}：描述功率谱能量的分散程度，其计算式为：

$$f_{RV}=\sqrt{\sum_{k=1}^{N}\left(X(k)\left(f(k)-f_c(k)\right)^2\right)\Big/\left(\sum_{k=1}^{N}X(k)\right)} \tag{5}$$

6）幅值平方和 E：描述频域振动信号的幅值变化特性，计算式为：

$$E=\sum_{k=1}^{N}X^2(k) \tag{6}$$

图 5 所示为不同健康状态下的隔离开关底座在 2400 A 变频电流激励下振动特征量的变化对比图。为使不同条件下特征量变化的对比更加明显，将波形因子、脉冲因子和裕度因子进行最大最小值归一化处理。正常状态下 6 种特征量的数值较小，整体上随频率变化存在轻微上下浮动；而缺陷信号特征量随电流频率变化显著，具体表现为：3 种缺陷信号特征量在高于 50 Hz 电流激励时整体呈现较高水平，多于 80 Hz 处达到最大值。其中，中度和重度信号的波形因子、脉冲因子、裕度因子归一化值近似为其他频率信号特征的 2~4 倍，重心频率最高可达 869.9 Hz，幅值平方和最大值约为其他信号的 4 倍。整体而言，特征量突增所对应的激励电流频率点同前述时频图谱的演化规律分析相符。且随着缺

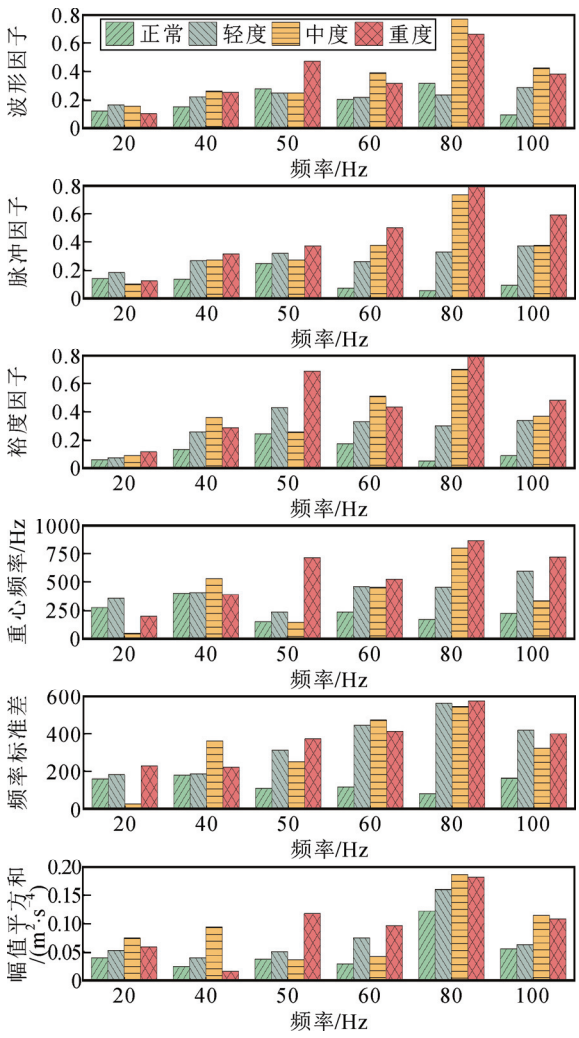


图5 2400 A电流激励下振动特征量随电流频率变化对比图

Fig.5 Comparison diagram of vibration characteristic values changing with frequencies under 2400 A current excitation

陷严重程度加剧，特征量数值整体呈现逐渐增大的变化规律。当缺陷越严重，振动信号响应更剧烈，畸变程度更严重，更容易诱发多倍频响应，频谱分布更宽且能量更加分散。

为进一步表征激励电流幅值对GIS设备振动信号的影响，选取正常和重度缺陷2种状态下的50、80和100 Hz变幅值电流激励时的振动信号探究特征量随电流幅值的变化规律，如图6所示。正常状态下除信号幅值平方和随电流幅值增大而增加外，其他特征量均走势平缓，近似为一条直线。而重度缺陷下的6种特征量整体上高于正常状态，其中50和100 Hz的波形因子、脉冲因子和裕度因子曲线随电流变化有微小波动，重心频率、频率标准差及幅值平方和曲线在大电流时略有上升；80 Hz电流下的波形因子、脉冲因子和裕度因子曲线在900和1800 A处出现峰值，信号畸变程度加剧；重心频率曲线在900 A电流处突增后基本维持在1000 Hz附近，这是由于在大电流激励下更容易出现高频响应且频谱脉冲增强，共同导致重心频率向更高频处偏移；缺陷信号的幅值平方和与电流幅值整体呈正相关，在2400 A激励时最高可达近0.3 $(m/s^2)^2$，激励电流越大，信号响应越强，幅值平方和越大，缺陷特征表现越明显。

综上可见，机械缺陷振动信号在大电流激励下的复合特征量值更大，电流的增大改变了系统的参数特性，引发了更为激烈的非线性振动行为。

3 基于灰狼算法优化支持向量机的GIS机械缺陷状态辨识方法

3.1 GWO-SVM算法原理

鉴于本文提取的复合特征量具有非线性和多维度的特点，特选取支持向量机(support vector machine，SVM)算法构建缺陷辨识模型。SVM是一种基于结构风险最小化且有着强大的泛化能力的建模方法[24]，它可以很好地解决小样本、非线性以及陷入局部极值等问题，其主要是通过寻找具有“最大间隔”的决策面将数据集正确分类。假设一个输入为x_i、输出为y_i、大小为l的线性不可分训练样本集为$\{(x_i, y_i), i=1,2,\cdots, l\}$，引入非线性映射函数$\varphi(x)$将输入样本映射到高维空间，在高维空间里的回归函数可表示为：

$$f(x)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\varphi(x)+b \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{w}$为权向量；b为偏差量。

当训练数据不可线性分割时，通过引入松弛变量ξ_i采用软间隔最大化策略，优化目标函数表示为式(8)，约束条件为式(9)，其中，C为惩罚因子，用以权衡经验风险和结构风险。

$$\min\frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}\|^2+C\sum_{i=1}^{l}\xi_i \tag{8}$$

$$\text{s.t.}\,y_i(wx_i+b)\geq 1-\xi_i\quad(\xi_i\geq 0) \tag{9}$$

对于非线性分类问题，SVM通过引入核函数$k(x_i, x_j)$将数据从低维空间映射到高维空间而变得线性可分，其中高斯径向基核函数(radial basis function, RBF)因具有参数少、映射维度广等优点得到广泛应用，函数形式见式(10)，其中，σ为代表核函数作用的宽度参数。

$$k(x_i,x_j)=\exp\left(-\frac{\|x_i-x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{10}$$

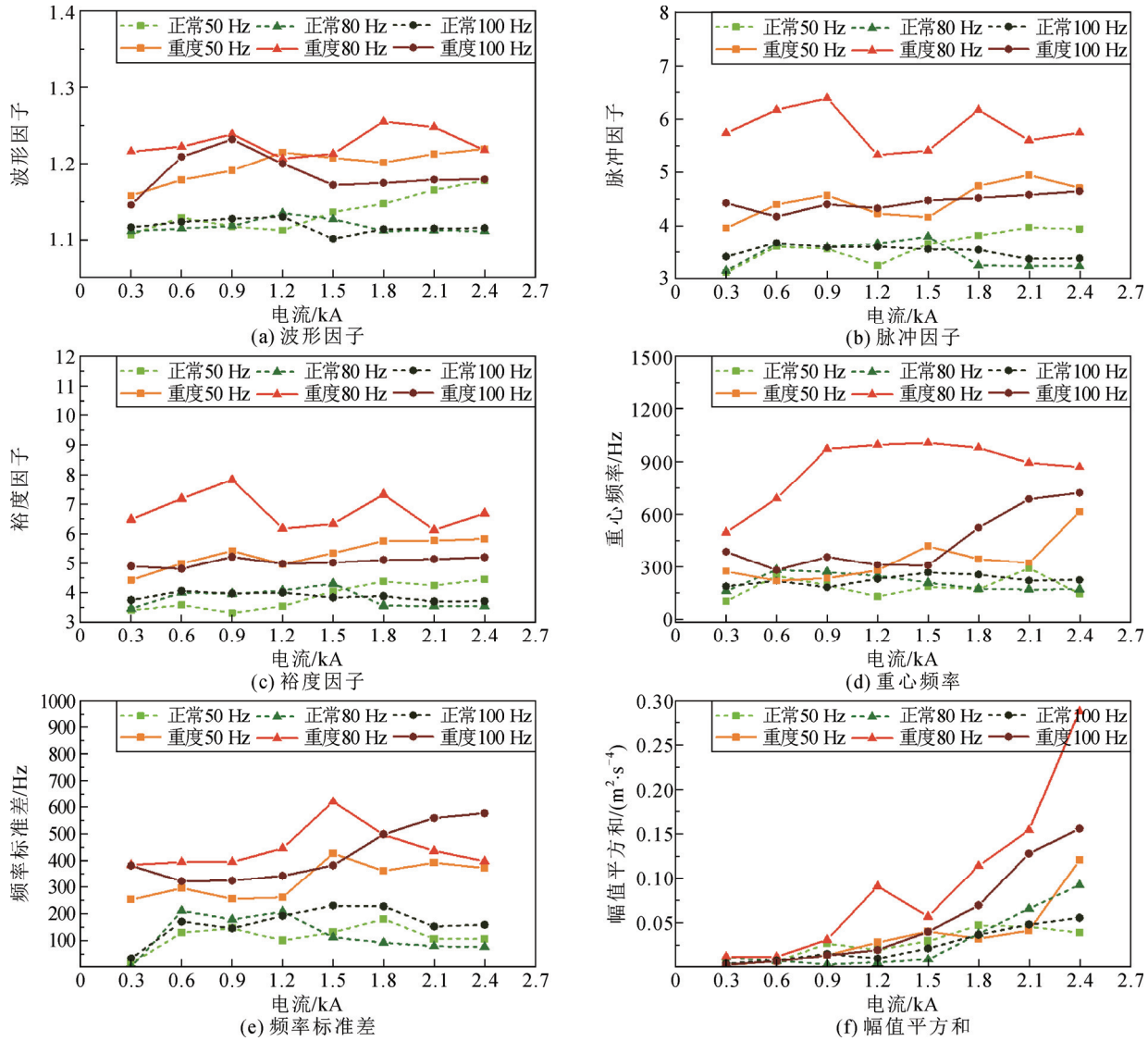


图 6　不同激励频率下振动特征量随电流大小变化对比图

Fig.6　Comparison diagram of vibration characteristic values changing with current amplitudes under different current frequencies

由于支持向量机的惩罚因子 C 与 RBF 核函数参数 σ 对 SVM 分类结果具有较大影响[25]，因此选用模型简单、全局搜索能力较强的灰狼优化算法(grey wolf optimizer，GWO)进行参数的全局寻优以加强 SVM 的学习和泛化能力。GWO 算法通过将优化问题的 1 个解视为 1 匹灰狼，若干数量的解集视为狼群，并对问题的解集根据问题结果的优劣进行分类，最优解为 α 狼位置，次优解为 β 狼位置，第三优解为 δ 狼位置，剩余解均为 ω 狼位置。等级顺序依次为 $\alpha>\beta>\delta>\omega$，猎物位置即目标函数的最优解。定义灰狼个体与猎物距离为：

$$\boldsymbol{D}=\left|\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}(t)-\boldsymbol{X}(t)\right| \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}(t)$表示在第 t 次迭代时猎物所处位置；$\boldsymbol{X}(t)$为 t 次迭代时灰狼所在测试集方位；$\boldsymbol{C}$ 为摆动因子。灰狼根据与猎物的距离而不断发生位置更新，表示为：

$$\boldsymbol{X}(t+1)=\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}(t)-\boldsymbol{A}\boldsymbol{D} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为系数向量，它的值决定狼群围捕面积的增大或减小，若$|\boldsymbol{A}|>1$，增大围捕面积即增强解决全局问题的能力；若$|\boldsymbol{A}|<1$，减小围捕面积即增加局部搜索问题的能力。当确定猎物准确位置后，狼群将对猎物进行围捕，通过不断的位置更新到达猎物位置，即得到最优解[26]。

3.2　GWO-SVM 模型构建及辨识流程

为了实现隔离开关底座松动程度的准确评估，本文基于已提取的 6 种非线性振动特征量构建了 GWO 算法优化 SVM 的 GIS 隔离开关底座松动缺陷状态辨识模型，模型构建及缺陷状态辨识的具体流程如图 7 所示。

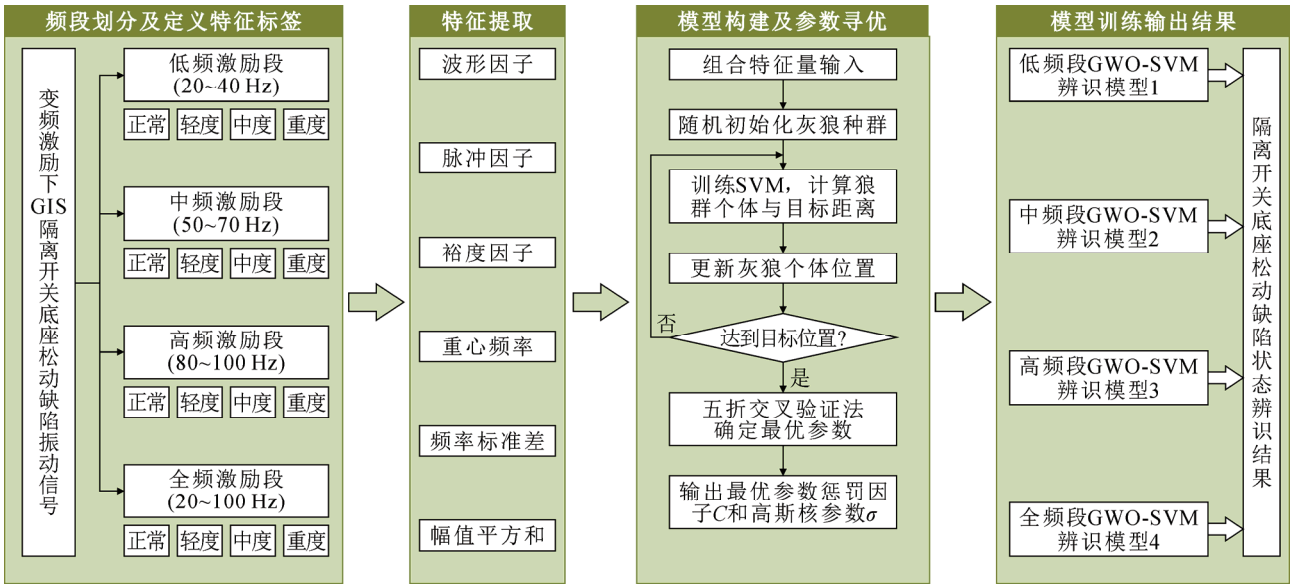


图 7 GWO-SVM 模型构建及缺陷辨识流程图

Fig.7 GWO-SVM model construction and defect status assessment flow chart

步骤 1：频段划分及定义特征标签：依据给 GIS 设备施加的激励电流频率将振动信号划分为 4 个频段，分别为低频激励段(20~40 Hz)、中频激励段(50~70 Hz)、高频激励段(80~100 Hz)和全频激励段(20~100 Hz)，并分别按照隔离开关底座处于正常状态、轻度缺陷、中度缺陷、重度缺陷定义特征标签。

步骤 2：特征提取：将变频电流激励下 4 种运行状态产生的振动信号提取波形因子、脉冲因子、裕度因子、重心频率、频率标准差及幅值平方和共 6 种复合非线性特征量，4 个激励频段分别构建以特征量为输入向量的样本集。

步骤 3：模型构建及参数寻优：针对不同激励频段下的样本集分别构建缺陷状态辨识 SVM 模型，核函数采用高斯核函数，同时引入 GWO 算法对惩罚因子 C 以及高斯核参数 σ 进行全局寻优，采取五折交叉验证法确定最优参数以提高模型的识别准确率。

步骤 4：模型训练输出结果：将测试样本集根据激励频段划分原则输入到其对应的缺陷状态辨识模型中，实现隔离开关底座松动程度的智能诊断。

3.3 辨识模型有效性验证

将各频段样本集每类特征标签下的数据样本均按照 2:1 的比例随机分为训练样本集和测试样本集，其中单一频段的样本数量均为 960，训练样本集数量和测试样本集数量分别为 640 和 320。将训练样本输入到模型中，设置参数 C 的范围在[0, 1000]，参数 σ 范围在[0, 100]，训练过程中 SVM 参数 C 和 σ 的变化与模型识别准确率的关系如图 8 所示。当 C 和 σ 均小于 1 时，模型精度较低，在 70%以下。随着 C 和 σ 同时增加，模型训练精度逐渐提高。当参数 C>100、σ>40 时，模型训练精度最大可达 100%，实现全局寻优。

根据已训练好的低、中、高频段缺陷辨识模型，分别将测试样本集对应代入到其中完成测试。随机选取 20 组测试结果，4 种运行状态和整体模型的平均识别准确率如图 9 所示，3 个激励频段下构建的缺陷状态评估模型的最高识别准确率、平均识别准确率及识别准确率标准差见表 2。

图 9 结果表明，3 个激励频段辨识模型的识别准确率呈现出：高频激励段>低频激励段>中频激励段的规律。高频激励段构建的模型评估效果表现得最好，在正常、轻度、中度、重度和整体四个方面的平均准确率相对较高，最高识别准确率可达到 97%以上，且识别准确率的标准差最小，模型输出识别准确度相对更加稳定。低频激励段构建的模型评估效果略次于高频段的，但仍具有较高的准确率和稳定性，中频激励段的模型评估效果相对较低，标准差略高。整体上 3 个频段下的缺陷状态辨识模型整体准确率均达到了 90%以上且评估效果比较稳定，验证了不同激励频段下构建的 GWO-SVM 模型对隔离开关底座松动缺陷状态辨识的有效性和可靠性。在工程实践中建议选用高频段电流(80~100 Hz)

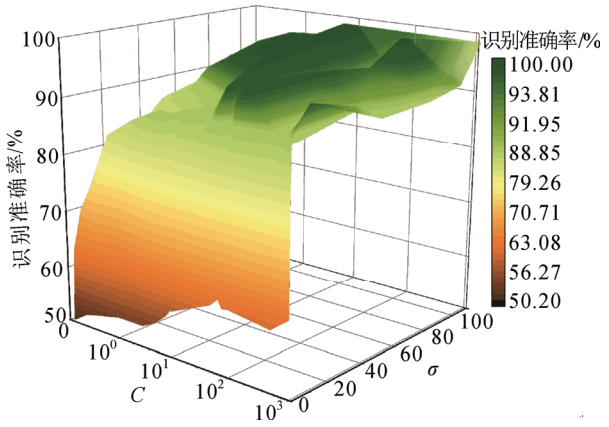


图 8　SVM 模型准确率随参数 C 和 σ 变化关系

Fig.8　Accuracy of SVM model varies with parameters C and σ

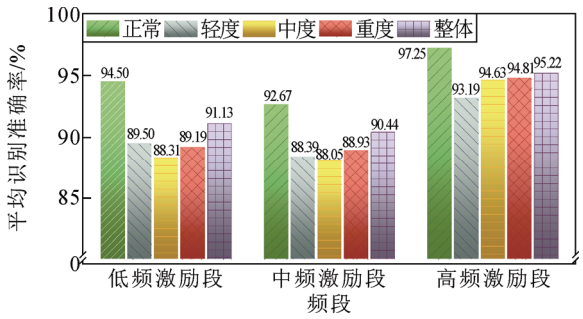


图 9　不同频段下 GWO-SVM 模型平均识别准确率

Fig.9　Average recognition accuracy of GWO-SVM model in different frequency bands

表 2　GWO-SVM 模型整体评估准确率

Table 2　Overall evaluation accuracy of GWO-SVM model

频段类型	最高识别准确率/%	平均识别准确率/%	识别准确率标准差
低频激励段	93.50	91.13	0.9989
中频激励段	92.56	90.44	1.2391
高频激励段	97.81	95.22	0.7503

施加激励信号可以更准确地实现隔离开关底座松动严重程度的智能辨识。

为了进一步对比变频电流激励相较于单一工频电流激励对缺陷辨识效果的优势，选取 20~100 Hz 共 9 个频率下的 6 种特征值重构变频组合特征矩阵。由前文可知，不同电流频率激励的缺陷信号表现出不同程度的异常特征，故选用熵值法为不同频率下获取的信号特征赋以权重，构建变频组合特征矩阵以凸显频率对缺陷信号特征的影响。4 种机械状态下变频激励产生的信号特征向量对应权重如图 10 所示。因缺陷信号在 50、80 和 100 Hz 下的非线性行为更显著，故其对应权重值更大。

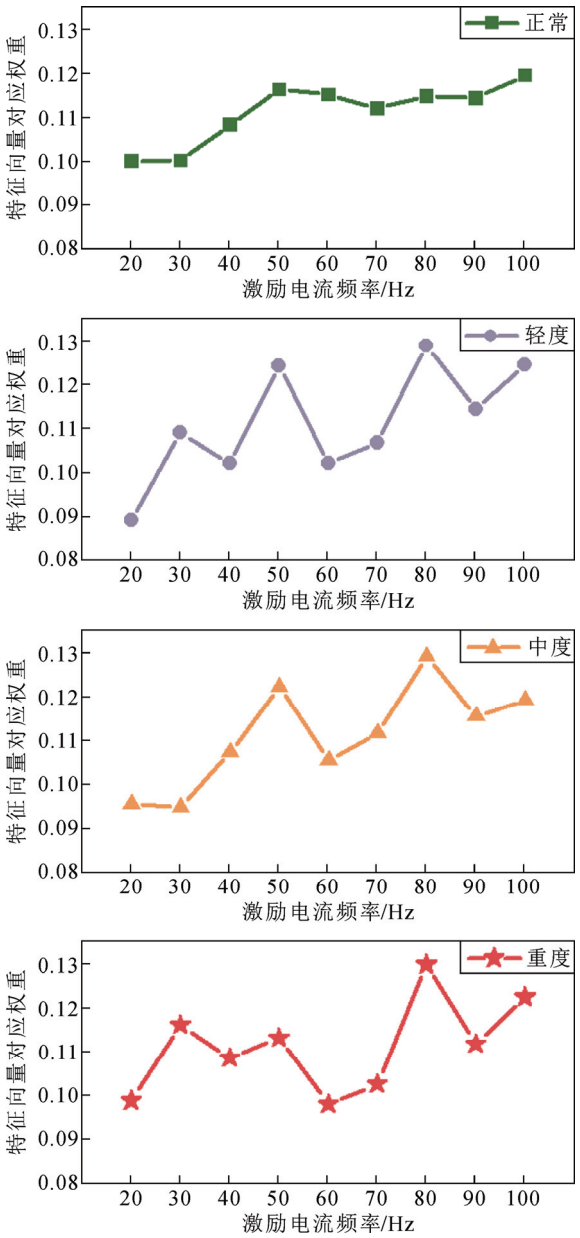


图 10　变频激励下 4 种状态信号特征向量对应权重对比图

Fig.10　Comparison diagram of corresponding weights of four state signal eigenvectors under variable frequency excitation

将变频组合特征矩阵和 50 Hz 信号特征矩阵分别代入全变频激励模型和中频激励模型，训练过程同前所述，2 种激励方式下不同运行状态的隔离开关底座松动缺陷识别准确率如图 11 所示。可见，相比于单一工频电流激励，采用变频电流激励能获得更高的缺陷辨识精度，尤其在轻度缺陷时变频电流激励的准确率较单一工频激励提升了 14.46%，有利于在缺陷未发展至严重状态时尽早发现，避免缺陷恶化。综上，变频电流激励可更有效激发机械缺陷特征，提升 GIS 设备机械缺陷检测及辨识水平。

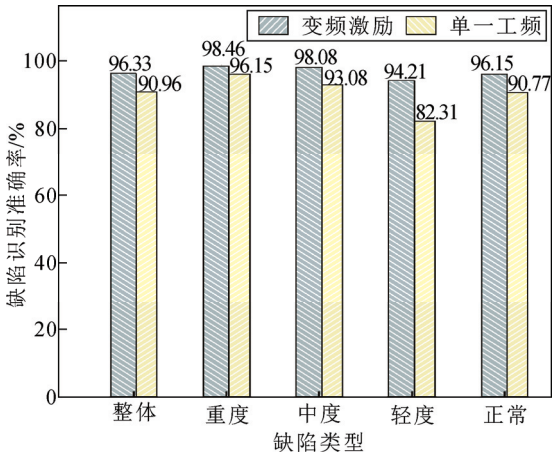


图 11 不同电流激励方式下隔离开关机械缺陷识别准确率对比图

Fig.11 Comparison diagram of disconnector mechanical defects identification accuracy under different current excitation modes

4 结论

1）相比单一工频激励，变频电流激励检测 GIS 机械缺陷效果更优异。正常隔离开关的振动图谱为单频正弦响应；底座松动缺陷条件下，结构刚度的软化和固有频率的转移将引发机构产生超谐波共振现象，导致 80 Hz 电流下的设备振动幅值及频响范围远高于其他频率激励的值，非线性振动现象更显著。

2）缺陷严重程度是导致 GIS 隔离开关产生非线性行为的关键因素。随着缺陷严重程度的增大，振动信号幅值增长和谐波畸变现象越显著，机械振动特征量整体增加。

3）联合 GWO-SVM 方法和变频电流激励模式缺陷辨识模型实现了 GIS 隔离开关底座松动缺陷严重程度的准确辨识，对 126 kV 真型 GIS 试验平台的模拟缺陷数据的识别准确率达 90%，相比单一工频激励识别效果更优异，工程中可选用高频段(80~100 Hz)电流激励开展缺陷检测和运维分析。

参考文献 References

[1] 李 鹏，李金忠，崔博源，等. 特高压交流输变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术，2016，42(4)：1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.

[2] 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.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386.

[3] 崔景春. 气体绝缘金属封闭开关设备[M]. 北京：中国电力出版社，2016：7.
CUI Jingchun. Gas insulated metal enclosed switchgear[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2016: 7.

[4] RUNDE M. Failure frequencies for high-voltage circuit breakers, disconnectors, earthing switches, instrument transformers, and gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 529-530.

[5] 刘 欣，晏年平，尹桂来，等. 超特高压 GIS 缺陷故障分类及成因的实例分析[J]. 江西电力，2015，39(3)：60-63.
LIU Xin, YAN Nianping, YIN Guilai, et al. Example analysis of fault classification and cause of UHV GIS defects[J]. Jiangxi Electric Power, 2015, 39(3): 60-63.

[6] 冯俊宗，孙利雄，陈维维，等. 不同运行状态下 GIS 隔离开关的振动特性[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4314-4322.
FENG Junzong, SUN Lixiong, CHEN Weiwei, et al. Vibration characteristics of GIS isolating switch under different operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4314-4322.

[7] 汲胜昌，张 凡，师愉航，等. 基于振动信号的电力变压器机械状态诊断方法研究综述[J]. 高电压技术，2020，46(1)：257-272.
JI Shengchang, ZHANG Fan, SHI Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 257-272.

[8] 丁登伟，何 良，龙 伟，等. GIS 设备运行状态下振动机理及检测诊断技术研究[J]. 高压电器，2019，55(11)：93-99.
DING Dengwei, HE Liang, LONG Wei, et al. Analysis on vibration mechanisms and detection diagnosis technology of GIS in operating condition[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 93-99.

[9] 万书亭，马晓棣，陈 磊，等. 基于振动信号短时能熵比与 DTW 的高压断路器状态评估及故障诊断[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4249-4257.
WAN Shuting, MA Xiaodi, CHEN Lei, et al. State evaluation and fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on short-time energy entropy ratio of vibration signal and DTW[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4249-4257.

[10] 臧 旭，马宏忠，吴金利，等. 基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(9)：12-20.
ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 12-20.

[11] 徐志钮，郭一帆，李先锋，等. 机械缺陷对 GIS 外壳振动影响[J]. 电力工程技术，2022，41(5)：156-164，185.
XU Zhiniu, GUO Yifan, LI Xianfeng, et al. Influence of mechanical faults on the vibration of GIS shell[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 156-164, 185.

[12] 刘 媛，杨景刚，贾勇勇，等. 基于振动原理的 GIS 隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1591-1599.
LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnector based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.

[13] YUAN Y, MA S L, WU J W, et al. Frequency feature learning from vibration information of GIS for mechanical fault detection[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1949.

[14] 刘宝稳，汤容川，马钰洲，等. 基于 S 变换 D-SVM AlexNet 模型的 GIS 机械故障诊断与试验分析[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2526-2535.
LIU Baowen, TANG Rongchuan, MA Zhengzhou, et al. GIS mechan-

ical fault diagnosis and test analysis based on S Transform D-SVM AlexNet model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2526-2535.

[15] 马星光，王晓一，黄　锐，等. 基于复合特征的 GIS 振动信号特征提取方法[J]. 高压电器，2021，57(12)：83-89.
MA Xingguang, WANG Xiaoyi, HUANG Rui, et al. Extraction method of GIS vibration signal characteristic based on composite feature[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 83-89.

[16] 徐明月，李　喆，孙汉文，等. 基于改进梅尔倒谱系数的 GIS 机械故障诊断方法[J]. 高压电器，2020，56(9)：122-128.
XU Mingyue, LI Zhe, SUN Hanwen, et al. Mechanical fault diagnosis method of GIS based on improved MFCC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 122-128.

[17] 吴旭涛，赵晋飞，马云龙，等. 基于多频激励下振动响应的 GIS 机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿，2022，43(4)：108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.

[18] ZHONG Y, HAO J, DING Y L, et al. Novel GIS mechanical defect simulation and detection method based on large current excitation with variable frequency[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-15.

[19] 陈树辉. 强非线性振动系统的定量分析方法[M]. 北京：科学出版社，2007：258.
CHEN Shuhui. Quantitative analysis method for strongly nonlinear vibration systems[M]. Beijing, China: Science Press, 2007: 258.

[20] 钟　尧，郝　建，丁屹林，等. GIS 设备典型机械缺陷的非线性振动行为表征参量分析和诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：7248-7259.
ZHONG Yao, HAO Jian, DING Yilin, et al. Nonlinear vibration behavior characterization parameter analysis and diagnosis model of typical mechanical defects of GIS equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7248-7259.

[21] 黄　清，魏　旭，许建刚，等. 基于振动原理的 GIS 母线触头松动缺陷诊断技术研究[J]. 高压电器，2017，53(11)：99-104，108.
HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangang, et al. Research of GIS bus loose contact fault diagnosis techniques based on mechanical vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 99-104, 108.

[22] 刘延柱，陈立群. 非线性振动[M]. 北京：高等教育出版社，2001.
LIU Yanzhu, CHEN Liqun. Nonlinear vibrations[M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2001.

[23] 侯　焰. 基于异常振动分析的 GIS 机械故障诊断技术研究[D]. 济南：山东大学，2017.
HOU Yan. Research on fault diagnosis of machine based on vibration signal of GIS[D]. Jinan, China: Shandong University, 2017.

[24] 黄新波，蒋卫涛，朱永灿，等. 基于时间序列和支持向量机的变压器故障预测[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2530-2538.
HUANG Xinbo, JIANG Weitao, ZHU Yongcan, et al. Transformer fault prediction based on time series and support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2530-2538.

[25] 肖怀硕，李清泉，施亚林，等. 灰色理论-变分模态分解和 NSGA-Ⅱ优化的支持向量机在变压器油中气体预测中的应用[J]. 中国电机工程学报，2017，37(12)：3643-3653.
XIAO Huaishuo, LI Qingquan, SHI Yalin, et al. Prediction of dissolved gases in oil for transformer based on grey theory-variational mode decomposition and support vector machine improved by NSGA-Ⅱ[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3643-3653.

[26] ZHAO S T, WANG E X. Fault diagnosis of circuit breaker energy storage mechanism based on current-vibration entropy weight characteristic and grey wolf optimization–support vector machine[J]. IEEE Access, 2019, 7: 86798-86809.



李　旭
2000—，女，硕士生
主要研究方向为电气设备绝缘在线监测及故障诊断
E-mail: lixu20000817@163.com

LI Xu



郝　建(通信作者)
1984—，男，博士，教授，博导
主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究
E-mail: cquhaojian@126.com

HAO Jian
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-01-29　修回日期　2023-08-16　　编辑　曾文君