基于多测点振动能量分布特征的开关柜母排螺栓松动故障诊断研究

普子恒[1]，王鑫风[1]，刘　蔚[2]，李　勇[2]，黎　鹏[1]，景星杰[1]，方春华[1]

（1. 三峡大学电气与新能源学院，湖北 宜昌 443002；2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院，重庆 401123）

摘要：针对开关柜内母排螺栓松动位置及松动程度难以在线诊断的问题，文中提出一种基于多测点振动信号频域能量分布特征的接触故障诊断方法。首先在简化试验模型上，通过接触电阻—力矩特性曲线划分故障等级，建立电磁—结构多物理场耦合仿真模型并验证其准确性。进而建立 ASN3-12 型全尺寸开关柜仿真模型，在母排搭接处和母排与断路器静触头连接处两个位置设置不同松动的接触故障，利用柜体表面 3 个加速度测点获取振动信号。对各测点信号进行变分模态分解，并计算各频段的能量占比及能量熵。提取对接触故障响应明显的 100 Hz 幅值、各频段能量占比和能量熵作为特征，通过同电流基准修正构造多测点损伤响应指数，采用分级诊断策略依次完成故障检测、故障位置判别和松动程度定级。留一交叉验证结果表明，该方法综合状态诊断准确率达 95.24%，较传统 SVM 分类方法提高了 19.04%，为开关柜母排螺栓松动故障的在线监测提供了可行的诊断途径。

关键词：开关柜；螺栓松动；振动信号；Hilbert 能量熵；故障诊断

Fault Identification of Busbar Bolt Looseness in Switchgear Cabinets Based on Multi-Point Vibration Energy Distribution Features

PU Ziheng[1]，WANG Xinfeng[1]，LIU Wei[2]，LI Yong[2]，LI Peng[1]，JING Xingjie[1]，FANG Chunhua[1]

（1. College of Electrical Engineering and New Energy，China Three Gorges University，Hubei Yichang 443002，China；
2. Chongqing Electric Power Research Institute State Grid Chongqing Electric Power Co.，Chongqing 401123，China）

Abstract：To address the problem that the location and severity of busbar bolt loosening inside switchgear cabinets are difficult to identify online，this paper proposes a contact fault identification method based on frequency-domain energy distribution features of multi-point vibration signals. First，on a simplified test model，fault grades are classified according to the contact resistance–torque characteristic curve，and an electromagnetic-structural multi-physics coupled simulation model is established and its accuracy is verified. Then，a full-scale simulation model of an ASN3-12 switchgear cabinet is built，where contact faults of different loosening degrees are set at two locations—the busbar lap joint and the connection between the busbar and the circuit breaker static contact. Vibration signals are acquired using three accelerometer measuring points on the cabinet surface. Variational mode decomposition is performed on the signals from each measuring point，and the energy proportion and energy entropy of each frequency band are calculated. The 100 Hz amplitude，energy proportion of each frequency band，and energy entropy，which respond significantly to contact faults，are extracted as features. Through same-current baseline correction，a multi-point damage response index is constructed，and a hierarchical identification strategy is adopted to successively accomplish fault detection，fault location discrimination，and loosening degree grading. Leave-one-out cross-validation results show that the proposed method achieves a comprehensive state identification accuracy of 95.24%，representing a 19.04% improvement over traditional SVM classification methods，and provides a viable diagnostic approach for the online monitoring of loose busbar bolts in switchgear.

Key words：switchgear；bolt loosening；vibration signal；energy entropy；fault identification

0　引言

高压开关柜承担着电力系统中的电能分配和控制任务，其运行状态直接影响电力系统的供电可靠性[1]。柜内铜母排采用螺栓紧固的方式搭接。在长期的载流过程中，电动力和热胀冷缩反复作用在连接部位，连接处的螺栓力矩逐渐下降，并进一步改变铜母排搭接面的接触状态，这种变化会影响电气连接以及改变母排的振动响应[2-3]。高压开关柜运行时，工频电流产生的交变电磁力主要生成 100 Hz 振动激励，母排振动通过绝缘支撑以及柜体结构向外传递，因此开关柜柜体表面的振动信号能够表征母排接触状态的变化[4-6]。实际开关柜内部存在有多个螺栓连接位置，各连接位置对应的振动传递路径不相同，单一的振动测点获得的振动信息难以同时

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52407178)。
Project Supported by Natural Science Foundation of China(52407178).

满足故障位置和松动程度的判别。文中据此选择多测点振动信息，研究母排螺栓松动状态下的频域能量变化及其分级诊断方法。

振动信号分析已经广泛应用于电力设备状态监测[7-10]。在变压器的振动研究方面，闫荣格等[11]利用多测点振动信息分析绕组形变状态，马宏忠等[12]通过固有频率变化研究绕组机械特性的改变。顾仲翔等[13]和张九思等[14]均采用 VMD 对变压器振动信号进行分解，并分别结合排列熵和能量熵进行绕组松动状态识别。相似的振动频率分解方法也被应用到 GIS 及断路器的振动分析中。王旭鹏等[15]对 GIS 隔离开关振动信号进行 VMD 分解，并结合 ILPSO-LSSVM 识别不同接触状态；庄瑞锋等[16]利用 VMD 提取断路器线圈电流中的特征分量。已有研究说明，将复杂的振动信号按照不同频率分离后再提取频率特征，能够很好地表征设备的故障。这也为文中分析开关柜螺栓松动引起的频带能量变化提供了方法基础。

现有电气设备接触不良振动研究主要面向 GIS 和变压器，针对开关柜的相关研究仍相对有限。黎鹏等[2]在开关柜的简化模型中通过分别设置螺栓松动和接触不良故障，试验结果表明这两种故障均导致开关柜外壳振幅减小、波形畸变并出现高次谐波。GIS 的相关研究进一步说明，不同形式的接触或者松动缺陷都会改变振动信号的频率组成。蒋西平等[17]发现，典型缺陷故障下振动以 100 Hz 成分为主，但是振动的高频成分有所增加；李国栋等[18]的结果表明，GIS 的内部松动主要影响 200 Hz、300 Hz 等频率分量，而外部松动对 1 500 Hz 以上成分的频率分量影响更加突出。除单一频率特征外，冯英等[19]采用多层振动数据融合方法开展 GIS 机械缺陷诊断，李秀广等[20]在 GIS 严重接触异常试验中观察到 300 Hz 和 600 Hz 分量明显增加。由这些结果可以看出，接触状态变化会引起振动能量在不同频段之间重新分配，并且由于故障位置的不同，频率响应也存在差别。对于开关柜而言，利用故障类型和振动频率特性的差异，需要结合多测点振动进行研究。

文中围绕开关柜母排螺栓松动引起的接触状态变化与振动响应之间的关联展开。依据接触电阻—力矩特性曲线定量划分母排接触状态等级，在简化小模型上验证仿真方法准确性后，建立开关柜全尺寸仿真模型，在母排搭接处和母排与断路器静触头连接处分别设置不同松动程度的接触故障。对柜体表面 3 个测点获取的振动信号进行 VMD 分解，提取特征量并构造多测点损伤响应指数，依次实现故障检测、故障位置判别和松动程度定级。

1 电阻—力矩特性故障分级与仿真模型验证

1.1 回路电阻测量试验与力矩等级选取

为聚焦螺栓力矩变化对接触状态及振动响应的影响，将实际开关柜简化为仅保留单相母排搭接回路与柜体的等效小模型。为避免凭经验设定松动程度，在该模型上对母排搭接结构进行回路电阻测量，获取接触电阻随螺栓力矩的变化规律，为故障等级划分提供定量物理依据。试验平台见图 1，将回路电阻测量仪接在母排回路两端。



图 1 回路电阻测量试验平台

Fig. 1 Loop resistance measurement test platform

使用精度为±2%的力矩扳手同步调节 4 颗 M10 铜螺栓至目标力矩值，采用回路电阻测量仪测量对应力矩下的主回路总电阻。力矩从 0 逐步增加至 40 N·m 后，获得主回路电阻变化曲线见图 2。通过实际测量数据可知，回路电阻随力矩增加并不是均匀下降，而是在不同力矩范围内有着明显不同的变化速率。力矩低于 4 N·m 时，主回路电阻由 100 μΩ 快速下降至 72.2 μΩ，此时搭接面位置压力增加对回路导电能力的影响最明显，导电微凸体发生弹塑性变形，实际导电面积随之快速增加。力矩进入 4～10 N·m 范围以后，主回路电阻仍继续下降，但下降幅度已经明显减小。力矩超过 10 N·m 后，回路电阻保持在 70～71 μΩ，其中 30 N·m 和 40 N·m 对应的电阻仅相差 0.2 μΩ。表明在较高预紧力下，搭接面实际导电面积已经接近稳定，继续提高螺栓力矩对回路导电能力的影响有限。

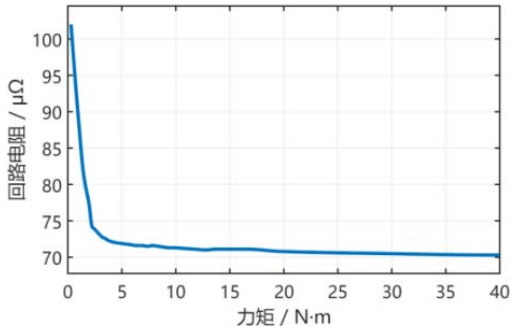


图 2　回路电阻-力矩特性曲线

Fig. 2　Loop resistance-torque characteristic curve

根据回路电阻—力矩特性曲线可知，回路电阻在不同力矩范围内的变化幅度不一致。30 N·m 下回路电阻已经进入稳定区，继续增加力矩后回路电阻变化很小，因此将其作为正常接触状态。10 N·m 位于稳定区向缓慢上升区过度的边界，可用于表示接触状态为轻度松动情况。力矩降低至 4 N·m 后，回路电阻进入缓慢上升区，将该工况定义为中度松动；2 N·m 处于急剧上升区，表示接触状态为重度松动情况。

1.2　小模型电—磁—结构多物理场耦合仿真

建立母排搭接结构有限元模型，用于分析不同接触状态下母排、绝缘支撑和柜体的振动传递，并根据振动传递情况确定柜体表面的振动测点位置。模型包括不锈钢柜体、两根铜母排、环氧树脂套管以及搭接位置的 4 个 M10 铜螺栓，见图 3。忽略该模型的螺栓螺纹、倒角等对振动响应影响极小的结构，降低有限元模型的网格规模和仿真计算量。

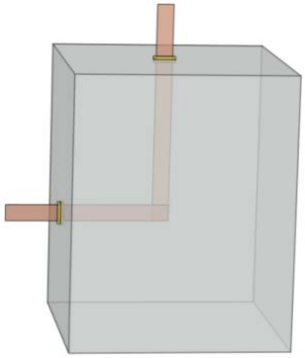


图 3　简化模型三维几何建模

Fig. 3　Simplified 3D geometric modeling

为模拟不同螺栓力矩下的接触状态，在母排搭接面上设置方形接触斑点，通过改变接触面积占总搭接面积的比例来表征不同力矩等级，见图 4。接触比的具体取值根据接触电阻试验结果确定，分别对应不同接触状态与试验力矩等级。

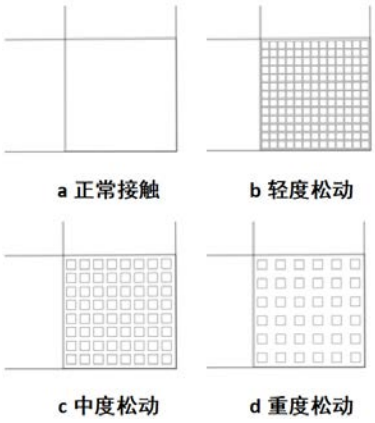


图 4　母排搭接部位接触斑点设置示意图

Fig. 4　Schematic diagram of contact spot placement at busbar lap joints

对简化模型进行电磁—结构多物理场耦合仿真。在磁场模块中对铜母排施加 1 250 A 工频交流电，计算导体在交变磁场作用下的电磁力分布；随后将电磁力作为体载荷耦合至结构场，求解柜体的振动响应，获得加速度分布。铜母排及接触区域采用扫掠网格精细化划分，柜体及其余部件采用常规四面体网格。

通过仿真，得到正常接触状态下的柜体表面加速度分布见图 5，选取加速度响应最大的两处作为传感器布置点，保证实测信号对接触状态变化具有足够的灵敏度，确定测点位置见图 5。

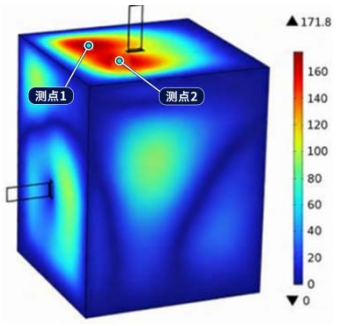


图 5　柜体加速度分布云图及测点位置

(单位：mm/s²)

Fig. 5　Cloud map of acceleration distribution in the cabinet and measurement point locations(unit：mm/s²)

1.3　多工况振动试验与仿真模型验证

在柜体表面测点处布置 IEPE 压电式三轴加速度传感器，通过磁吸粘贴固定于柜体表面，见图 6(b)。试验主回路通过连接在母排两端的大电流发生器提供所需电流，模拟母排在载流状态下的实际运行工况，试验装置接线见图 6(a)。



(a) 试验装置接线图　　(b) 加速度传感器磁吸放置图

图 6　多工况振动试验平台

Fig. 6　Multi-condition vibration test platform

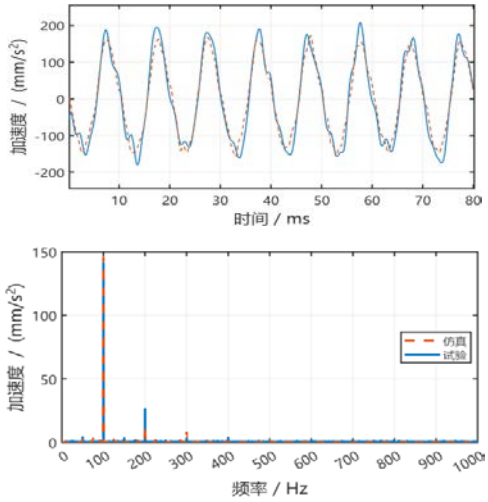
试验时，使用力矩扳手将 4 颗 M10 铜螺栓同步调节至目标力矩值，随后启动大电流发生器，依次施加 625、875、1 250 A 3 种电流。待振动信号进入稳定状态后，采集各工况下 10 s 的加速度信号。试验共覆盖 4 种力矩与 3 种电流交叉组合的 12 种工况。每种工况下重复 3 次试验，以检验数据的可重复性。传感器信号经同轴电缆传输至数据采集系统，在 PC 端完成记录与存储。两个测点仿真与试验对比平均误差见表 1。

表 1　各工况下仿真与试验对比平均误差

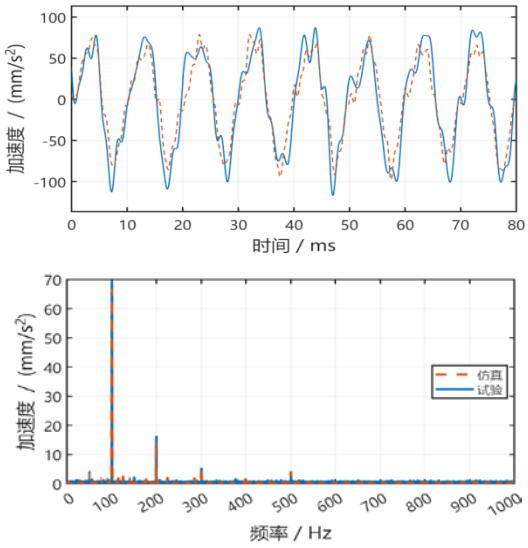
Table 1　Average Error Between Simulation and Test Results for Various Operating Conditions

电流/A	误差/%			
	2 N·m	4 N·m	10N·m	30N·m
625	3.24	1.82	3.50	2.27
875	2.68	4.13	3.96	3.41
1 250	4.63	4.08	1.89	3.67

由表 1 可见，各电流和力矩工况下仿真与试验的加速度幅值误差均在 4.7%以内。考虑到篇幅限制，选取 1 250 A 电流下正常接触和重度松动两种代表工况进行详细的时域与频谱对比。正常接触和重度松动两种工况下测点 2 的时域波形及频域结果见图 7，通过比较主频位置、振动幅值和高次谐波变化，判断设置接触斑点面积能否表征不同螺栓力矩下的振动变化。



(a)　30 N·m 工况时域与频谱图



(b)　2 N·m 工况时域与频谱图

图 7　1 250 A 不同工况下的仿真与试验加速度信号对比

Fig. 7 Comparison of simulation and experimental acceleration signals for the 1 250 A under different operating conditions

对比仿真与试验加速度时域信号可知，正常接触时波形较为平滑，接触状态变差时，波形幅值明显降低且叠加了更多高频成分。分析频谱发现，加速度信号均以 100 Hz 为主频，力矩降低时，主频幅值下降，且在 200、300、400、500 Hz 处存在可辨识的谱峰。以上结果表明，采用接触斑点面积占比表征不同螺栓力矩等级的仿真方法有效。

2　开关柜全尺寸仿真

全尺寸开关柜与简化小模型的差异主要在模态密度和传递路径复杂度，但频域能量分布主要受搭接面局部力学特性影响。因此可以将简化模型验证的接触模拟方法应用于 ASN3-12 型开关柜全尺寸模型。开关柜全尺寸模型保留三相母排、母排搭接部位、断路器、支撑绝缘子、金属隔板及柜体骨架等与电流传导和振动传递直接相关的结构见图 8。

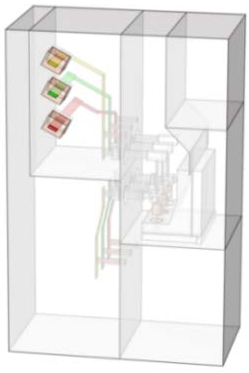


图 8　ASN3-12 型开关柜三维模型

Fig. 8　3D model of the ASN3-12 switchgear cabinet

对于不会明显改变主回路电流路径、整体质量分布情况和主要振动传递路径的局部位置做适当简化，用于减少开关柜全尺寸模型的仿真计算规模。主回路采用扫掠网格精细化划分，柜体及其余部件采用常规四面体网格。当网格继续加密时加速度变化小于 2%，说明当前网格精度满足要求。开关柜全尺寸模型主要部件所采用的材料参数见表 2。

表 2 开关柜主要材料参数

Table 2 Material parameters of the switchgear cabinet

部件	材料	密度/(g·cm^3)	杨氏模量/GPa	泊松比	电导率/(S·m^{-1})	相对磁导率
母排、断路器	铜	8.90	11.5	0.35	5.8×10^7	1
套管、绝缘子	环氧树脂	2.20	11.1	0.28	0.0	1
柜体结构	镀锌钢板	7.93	195.0	0.30	1.1×10^6	1

文中选取两处典型母排连接故障位置，设置接触不良故障，来模拟开关柜长期运行后螺栓同步劣化的典型工况。位置 A 位于母排室三相母排搭接处，位置 B 位于三相母排与断路器静触头连接处。为了观察不同故障源位置在柜体表面的振动响应特征，在仿真计算中不考虑位置 A 和位置 B 同时松动的复合故障，而是单独只改变其中一处的连接状态。松动程度划分正常、轻度、中度、重度四个等级。

开关柜全尺寸模型最终形成 21 组计算工况。电流分别取 625、875、1 250 A，每个电流等级均对应 7 种接触状态，分别是位置 A 和位置 B 均正常，位置 A 轻度、中度和重度松动，位置 B 轻度、中度和重度松动。每一种工况下，同时提取三处柜体表面振动测点的加速度信号，分别比较不同电流、故障位置和松动程度所引起的振动响应差异。电流为 1 250 A 时，位置 A 和位置 B 分别发生故障和两处位置都正常接触时的柜体表面振动分布见图 9。

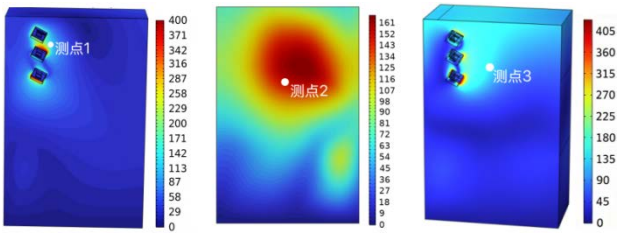


图 9 柜体表面加速度分布云图(单位：mm/s^2)

Fig. 9 Contour plot of surface acceleration distribution on the cabinet (unit：mm/s²)

由图 9 可知，铜母排受到周期性电磁力激励后，振动通过套管、支撑绝缘子、隔板和柜体骨架逐步传递到柜体外壳，并在绝缘套管和母排室附近的柜体面板上形成较强的振动响应。由于位置 A 和 B 两处故障的振动传递路径不同，柜体表面不同区域对这两处故障的敏感程度也存在明显差别。因此本文在开关柜侧板上选取 3 个位置不同的振动测量点，全面反应不同故障源引起的振动响应。测点 1 位于进线套管侧板上部，测点 2 布置在断路器安装隔板上方，测点 3 位于侧板中上部。

文中测点位置按仿真振动响应分布选取。在实际工程中，高压开关柜多为并柜运行，侧板安装空间可能受限，可以将传感器移至柜体前后面板或顶部等便于安装的位置。文中所提故障诊断方法不依赖于特定测点坐标，只要传感器能够有效采集到柜体振动信号即可，具有较好的工程适应性。IEPE 加速度传感器体积小，通过磁吸或粘贴方式固定，无需改变柜体结构，也不影响设备运行。

仿真得到 1 250 A 下位置 A 和位置 B 在正常与重度松动两种工况下 3 个测点的加速度频谱见图 10、11。正常接触时频谱能量高度集中于 100 Hz，高次谐波幅值较低，重度松动时 100 Hz 幅值下降，200～500 Hz 谐波幅值明显增大。当位置 A 故障时，重度松动工况下测点 1 的幅值降幅最大，测点 3 次之，测点 2 降幅最小；位置 B 故障时，测点 2 的幅值降幅最为显著，测点 1 和测点 3 的降幅相对接近。这表明测点 1 对位置 A 故障最为敏感，测点 2 主要响应位置 B 故障，测点 3 作为综合参考点反映经柜体框架传递的整体振动信息，3 个测点对不同故障位置形成互补的敏感关系。这种空间分布差异为后续通过多测点联合特征实现故障位置的判别提供了物理基础。

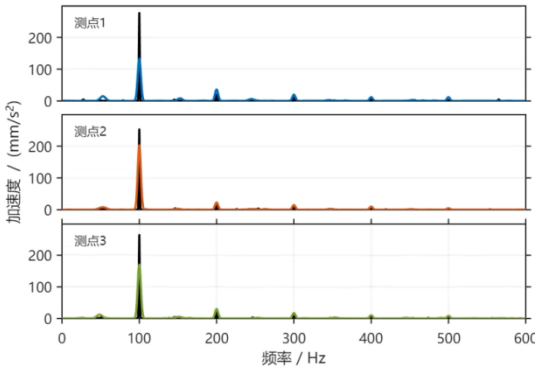


图 10 位置 A 松动前后各测点加速度频谱

Fig. 10 Acceleration spectra at each measurement point before and after loosening at Location A

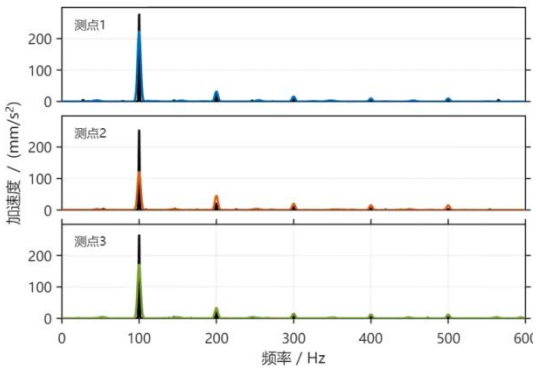


图 11 位置 B 松动前后各测点加速度频谱
Fig. 11 Acceleration spectra at each measurement point before and after the loosening at Location B

3 多测点振动信号处理与特征提取

3.1 VMD 分解与 Hilbert 能量计算

观察频谱发现，不同接触状态之间的振动信号的主要变化集中在 100 Hz 及其整数倍频率附近。文中采用变分模态分解(VMD)将振动信号分解为若干中心频率不同的窄带 IMF，以表征松动工况下振动能量在不同频带间的迁移。VMD 通过求解约束变分问题，自适应确定各模态的中心频率与带宽。结合原始频谱，为提取 100、200、300、400、500 Hz 附近的主要成分，取分解层数 K=5，此时 5 个频率的 IMF 可稳定分离。各 IMF 是以相应中心振动频率为主、具有一定带宽的窄带信号。以测点 1 在 625 A 正常接触工况下的分解结果为例，图 12 中 IMF1～IMF5 的能量位于对应中心振动频率±15 Hz 范围内，相邻频带未发生明显重叠。

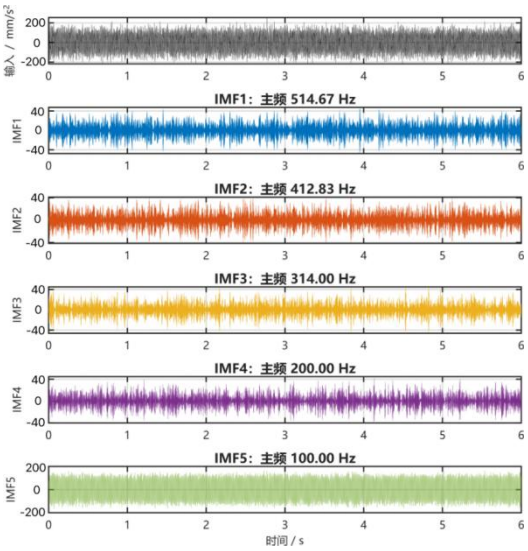


图 12 625 A 正常接触工况 VMD 分解
Fig. 12 VMD breakdown under normal operating conditions for the 625 A

处理后得到的 5 个 IMF 仍然是时域信号，只观察其 IMF 波形无法直接比较各振动频率成分在不同接触状态下所占的能量比例。因此，分别对各 IMF 进行 Hilbert 变换，通过 Hilbert 变换可构造各 IMF 的解析信号，进而计算瞬时幅值，并将瞬时幅值平方沿时间积分得到对应的振动频带能量 E_i。除五个 IMF 分量外，将其余振动频率成分合并记为残余能量 E_{other}。将各频段能量除以总能量 E_{total}，得到不同振动频段的归一化能量占比。

$$P_i=\frac{E_i}{E_{total}},i=1,2,\ldots,5 \tag{1}$$

$$P_{other}=\frac{E_{other}}{E_{total}} \tag{2}$$

式(1)中，P_1~P_5 分别表示 100~500 Hz 5 个 IMF 在总振动能量中的比例。其中，P_1 是 100 Hz 主频能量占比；$P_{high}=P_2+P_3+P_4+P_5$ 是 200~500 Hz 高次振动频率成分的总能量占比，反映接触松动引起的谐波增强效应。为进一步量化振动信号能量分布的均匀程度，在归一化能量比例基础上计算原始能量熵 H_0，见式(3)

$$H_0=-\sum_{i=1}^{5}P_i\ln P_i-P_{other}\ln P_{other} \tag{3}$$

当振动信号能量高度集中于某一频段时，H_0 值较小，能量向多个频带分散时，H_0 将随之增大。为消除频带划分数目对熵值的影响，将 H_0 除以其理论最大值 ln6，得到归一化能量熵 H。

3.2 振动信号特征提取

对各工况下 3 个测点的加速度信号分别进行 VMD-Hilbert 处理，并提取以下 4 个特征：100 Hz 能量占比 P_1、高次频率能量占比 P_{high}、能量熵 H 和 100 Hz 幅值 A_{100}。

测点 1 在位置 A 各工况下 100 Hz 幅值 A_{100} 随螺栓力矩的变化曲线见图 13。A_{100} 取自中心频率为 100 Hz 的 IMF 分量，其频带集中在 100 Hz 附近，受其他谐波分量串扰较小。同一电流下，A_{100} 随力矩降低呈单调下降趋势，这表明螺栓松动改变了结构振动能量的传递特性，导致机械能衰减。同一力矩下，A_{100} 随电流增大显著上升，验证了电磁激励强度与电流正相关的基本物理关系。但 A_{100} 受电流影响过大，不同电流之间无法直接特征对比。

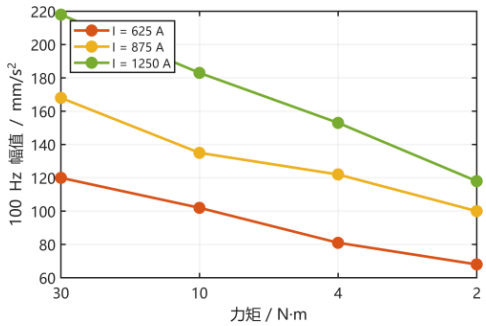
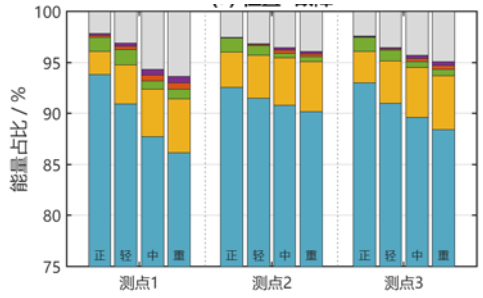


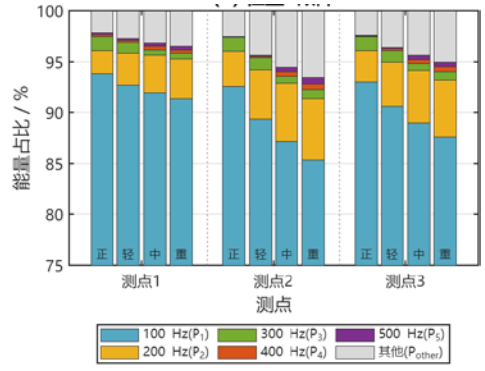
图 13　100 Hz 幅值随力矩变化曲线

Fig. 13　Curve showing the variation of 100 Hz amplitude with torque

为比较螺栓连接处不同松动程度下各振动频带能量比例的变化，以 1 250 A 工况为例，将位置 A 和位置 B 4 种接触状态下 3 个测点的振动频带能量绘制为图 14 所示的堆叠柱状图。每个柱体由 100、200、300、400、500 Hz 以及 Pother 六部分组成，各部分高度对应相应振动频带归一化能量占比。



(a)　位置 A 故障



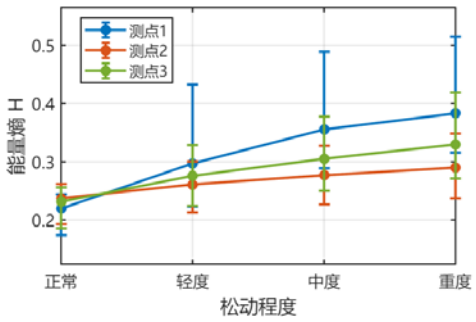
(b)　位置 B 故障

图 14　各测点振动能量分布对比图

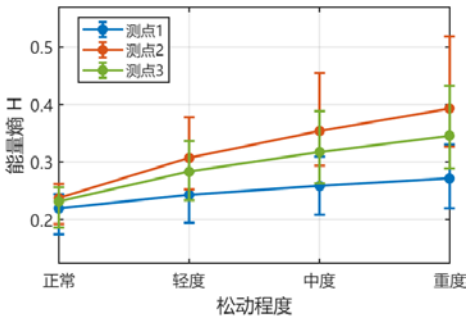
Fig. 14　Comparison of vibration energy distribution at various measurement points

由图 14 可见，正常接触时，各测点 100 Hz 占比均在 90%以上，振动能量高度集中于基频，表明此时母排连接界面约束较强，结构响应以稳定的周期性电磁激励响应为主。随螺栓松动程度从轻度增至重度，100 Hz 占比下降，200~500 Hz 段逐渐拉长，表明能量由基频集中趋势向多频段分散转移。对比图 14(a)、(b)，不同故障位置下各测点能量分布的变化幅度存在差异，靠近故障敏感区的测点在松动前后能量分布的变化更显著。

位置 A 和位置 B 故障下 3 个测点能量熵随松动程度的变化趋势见图 15。随松动程度从正常增至重度，3 个测点的能量熵均呈单调上升趋势。同一松动程度下，不同电流对应的能量熵存在一定差异，但整体变化趋势一致。以测点 1 在位置 A 正常工况为例，625 A 和 875 A 下的 H 值接近，1 250 A 下的 H 值略低。这是因为电流增大使电磁激励增强，100 Hz 振动分量更加突出，能量分布趋于集中，H 值随之下降。



(a)　位置 A 故障



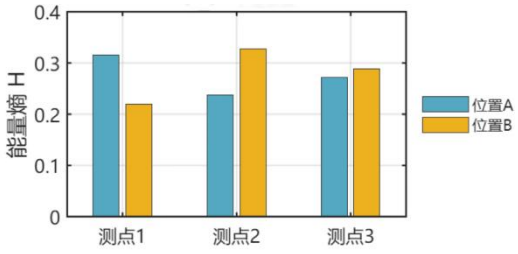
(b)　位置 B 故障

图 15　能量熵随松动程度变化趋势图

Fig. 15　Graph showing the trend of energy entropy as a function of looseness

3.3 不同位置故障的特征差异分析

不同测点对两个故障位置的敏感度存在差异，1 250 A、重度松动工况下，位置 A 和位置 B 分别故障时 3 个测点的能量熵 H 和 100 Hz 能量占比 P_1 对比见图 16。



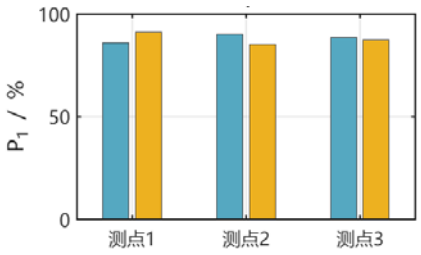


图 16　特征差异对比图

Fig. 16　Comparison of feature differences

由图 16 可知，位置 A 故障时测点 1 能量熵最高、测点 2 最低，位置 B 故障时测点 2 显著升高并超过测点 1 和 3；100 Hz 能量占比 P_1 的变化趋势与之对应，位置 A 时测点 1 最低，位置 B 时测点 2 最低。可见，测点 1 对位置 A 发生螺栓松动最敏感，测点 2 对位置 B 螺栓松动时响应最强，测点 3 对两处故障的区分能力相对较弱，但可作为辅助测点，为监测提供补充信息。

上述分析表明，单一测点难以同时对两个位置的故障保持高敏感度。采用 3 个测点联合的 12 维特征向量，可利用各测点对不同位置故障敏感度的互补性，进行故障位置和松动程度的准确诊断。

4　基于多测点损伤响应指数的接触状态分级诊断

4.1　故障诊断流程

文中电流分别设置为 625、875、1 250 A，每种电流下包含 7 种接触状态，分别为两处均正常、位置 A 轻度、中度和重度松动、位置 B 轻度、中度和重度松动，共计 21 组振动数据样本。每个样本包含 3 个测点的 100 Hz 幅值 A_{100}、100 Hz 能量占比 P_1、高次频率能量占比 P_{high} 和能量熵 H，构成 12 维原始特征向量。

在探索诊断策略的过程中，文中首先考察了基于两级 SVM 的分类方法。该方法以 3 个测点的原始特征构成原始 12 维向量，对故障位置进行三分类，再对松动程度进行三分类。SVM 采用 RBF 核函数，输入特征在训练前先做 Z-score 标准化处理，惩罚参数与核参数在训练集上通过交叉验证选取。留一交叉验证结果显示，该方法的位置诊断准确率为 94.4%，表明 SVM 能够利用多测点特征中的空间差异信息进行位置诊断，但其程度诊断准确率仅为 72.2%，尚不能满足故障分级诊断的精度要求。

针对上述 SVM 无法解决的问题，文中设计了多测点损伤响应指数的分级诊断策略，具体诊断流程见图 17。文中对原始振动特征先进行相同电流基准修正，再将四项特征数据融合为振动测点的损伤响应指数 Ds。利用 Ds 先判断当前运行状态是否发生异常故障，随后根据 3 个测点对位置 A 和位置 B 的响应差异构造位置响应指数，利用测点间损伤响应的空间差异诊断故障位置。完成位置确定后，构造松动程度指数，经电流修正后诊断故障为轻度松动、中度松动还是重度松动。

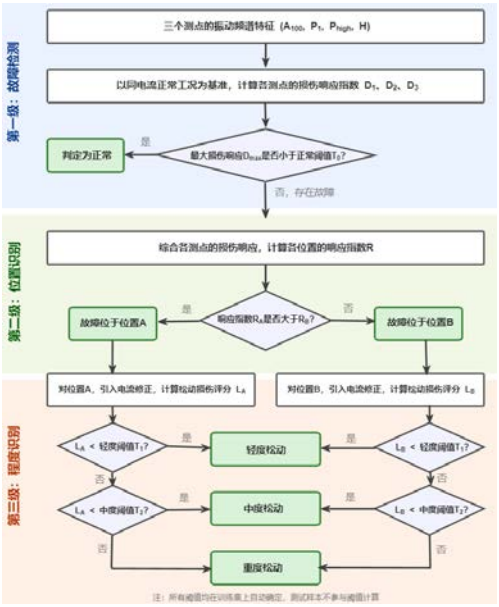


图 17　接触状态分级诊断流程图

Fig. 17　Flowchart of hierarchical contact-state diagnosis

4.2　分级诊断策略

第一级诊断为故障诊断，不同电流等级下的电磁激励水平存在差异，即使接触状态相同，各振动特征值也不同。为了减小电流变化产生的电磁激励水平对特征值的影响，文中以同一电流等级、同一测点位置的正常工况作为基准，计算 4 个特征相对于正常工况的变化量。对于测点 s(s=1，2，3)，4 个变化特征的计算公式见式(4)-(7)：

$$\Delta A_{100,s}=\frac{A^0_{100,s}-A_{100,s}}{A^0_{100,s}} \tag{4}$$

$$\Delta P_{1,s}=\frac{P^0_{1,s}-P_{1,s}}{P^0_{1,s}} \tag{5}$$

$$\Delta P_{\text{high},s}=\frac{P_{\text{high},s}-P^0_{\text{high},s}}{P^0_{\text{high},s}} \tag{6}$$

$$\Delta H_s=H_s-H^0_s \tag{7}$$

式(4)-(7)中，上标 0 表示相同电流、相同测点下正常运行工况的对应值。100 Hz 幅值 $\Delta A_{100,\,s}$ 和主频能量占比 $\Delta P_{1,\,s}$ 在接触状态恶化后表现为下降，而高次谐波能量占比 $\Delta P_{\text{high},\,s}$ 与能量熵 ΔHs 总体增加。经式(4)-(7)处理后，4 个变化量均满足数值增大

对应状态偏离正常程度增加的关系。随后按照式(8)将 4 个变化量融合为测点 s 的损伤响应指数 D_s。

$$D_s=w_1\Delta A_{100,s}+w_2\Delta P_{1,s}+w_3\Delta P_{high,s}+w_4\Delta H_s \quad (8)$$

为使 4 个变化量均参与损伤响应指数的计算，对各变化量权重设置为非零下限 $w_i\geq0.10$，，并要求同时满足权重和为 1 的归一化条件。在每一折留一交叉验证中，以 0.05 为步长对满足约束条件的 455 组候选权重进行网络搜索，并计算各组合在训练样本上的综合诊断准确率，最终采用准确率最高的一组作为该折的特征权重。取 3 个测点损伤响应指数中的最大值$D_{max}=\max(D_1,D_2,D_3)$作为设备整体故障响应指标。当任一振动测点对故障产生明显异常响应时，能够直接反映在D_{max}的指标中。D_{max}和当前训练折确定的阈值 T_0 相比较，低于 T_0 时设备为正常运行工况，达到或超过 T_0 后进入故障位置和故障程度的诊断。

第二级诊断为位置诊断，根据各个测点对于不同位置发生故障时振动响应敏感度不同，构造位置响应指数见式(9)、(10)：

$$R_A=\alpha D_1+(1-\alpha)D_3 \quad (9)$$

$$R_B=\beta D_2+(1-\beta)D_3 \quad (10)$$

位置响应中的 α 和 β 用于调整主要敏感测点与辅助测点的贡献比例，通过训练数据搜索确定 α 和 β 的具体数值。通过算法确定出 α=0.60、β=0.90。位置 A 响应主要由振动测点 1 确定，同时将测点 3 的 40%作为补充。位置 B 发生松动时测点 2 的变化最突出，因此对于故障发生于位置 B 处，主要使用测点 2，测点 3 仅提供 10%的辅助响应。通过比较 R_A 和 R_B 判断故障位于位置 A 或位置 B。

第三级诊断为故障程度诊断，在确定故障位置后，引入电流修正项，在位置响应指数 R 的基础上构造松动损伤评分 L 见式(11)

$$L=b_0+b_1R+b_2I_n+b_3I_n^2+b_4RI_n \quad (11)$$

式(11)中：I_n 为归一化电流；b_1R 项表征松动程度本身对评分的贡献。I_n^2 项依据电磁力与电流的平方关系。b_2I_n 项用于补偿线性偏差。b_4RI_n 交互项用于捕捉松动程度与电流的耦合效应。在每折训练中由岭回归拟合得到各系数b_0~b_4，正则化参数通过训练集内部五折交叉验证选取最优值，来平衡拟合精度与模型稳定性。

得到松动损伤评分 L 后，算法在训练集上自动搜索两个分级阈值 T_1 和 T_2。两个阈值以训练集综合诊断准确率最高为目标进行确定，搜索步长根据损伤评分 L 的取值范围自适应设定。当评分位于不同区间时，分别判为轻度、中度和重度松动，具体划分见式(12)

$$\begin{cases} L<T_1 & \square\text{轻度松动} \\ T_1\leq L<T_2 & \square\text{中度松动} \\ L\geq T_2 & \square\text{重度松动} \end{cases} \quad (12)$$

4.3 故障诊断结果分析

文中样本总量为 21 组，属于典型的小样本问题，因此采用留一交叉验证法来评估文中方法的性能，每次保留 1 组样本作为测试集，其余 20 组作为训练集，循环 21 次，确保每个样本均被独立测试一次。每一折中，测试样本完全不参与权重搜索、阈值确定、融合系数选择和回归模型拟合。

独立测试的综合状态诊断准确率为 95.24%，其中，875 A、位置 A 轻度松动工况被漏判为正常，该工况下测点 1 的 100 Hz 能量占比为 91.28%，与正常工况的 90.32%相比仅下降约 1.1%，能量熵为 0.224，与正常工况的 0.240 相比不升反降，损伤响应指数D_{max}仅为 0.019，低于该折训练集确定的阈值 0.086。这表明该工况下振动特征变化微弱，与 10 N·m 在接触电阻曲线上处于物理过渡区的特性一致，属于正常与轻度松动之间的边界模糊问题。此外，故障位置诊断中未发生任何误判，中度和重度松动故障全部诊断正确。结果表明，文中方法在中度和重度松动工况下具有极高的诊断可靠性，能够有效完成故障检测、故障定位和松动程度定级。

5 结论

文中围绕开关柜母排螺栓松动故障的振动在线诊断问题，通过多物理场耦合仿真获取多测点振动数据，提取了多测点振动信号特征并建立了接触状态分级诊断策略，得到以下结论：

1)接触电阻随螺栓力矩减小呈现出明显的三段式变化，根据电阻—力矩特性选取 30、10、4、2 N·m 划分不同接触状态。在仿真中采用接触斑点面积占

比表示不同螺栓力矩对应的接触状态，经简化小模型试验验证，仿真与试验加速度幅值误差均在 4.7%以内，可应用于全尺寸开关柜的振动仿真。

2)螺栓松动引起母排接触状态劣化，在开关柜表面测点处，振动响应呈现规律性变化。接触不良时，加速度信号的 100 Hz 主频能量占比下降，而高次谐波能量占比和能量熵均为上升趋势，这表明振动能量由主频逐步向其他高次频段分散。

3)文中围绕多测点振动能量分布特征开展分级诊断研究。以同电流下的正常工况为参考，对各振动特征进行修正，减小电流变化带来的影响。在此基础上，利用多测点损伤指数判断故障位置，并结合电流修正后的评分结果划分螺栓松动程度。留一交叉验证结果表明，综合状态诊断准确率达 95.24%，故障位置、中度和重度松动全部诊断正确。

参考文献：

[1] 朱根良．浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J]．高压电器，2002，38(5)：62-63.
Zhu Genliang. Simple explanation of faults analysis in incident investigation of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus，2002，38(5)：62-63.

[2] 黎　鹏，沈　忠，邱　雨，等．模拟开关柜典型机械故障下外壳振动特性分析[J]．广东电力，2026，39(4)：97-106.
Li Peng，Shen Zhong，Qiu Yu，et al. Analysis of shell vibration characteristics under typical mechanical faults of simulated switchgear[J]. Guangdong Electric Power，2026，39(4)：97-106.

[3] 王扬程，关向雨，赵俊义，等．不同接触缺陷下气体绝缘组合电器发热—振动多场耦合数值建模与分析[J]．高压电器，2026，62(5)：21-32.
Wang Yangcheng，Guan Xiangyu，Zhao Junyi，et al. Numerical modeling and analysis of thermal-vibration multi-field coupling of GIS under different contact defects[J]. High Voltage Apparatus，2026，62(5)：21-32.

[4] Zhong Yao，Hao Jian，Lliu Q，et al. Novel diagnosis method for GIS mechanical defects based on an improved lightweight CNN model with load adaptive matching[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2023，19(11)：11041-11051.

[5] Yang Yuan，Suliang Ma，Jianwen Wu，et al. Fault diagnosis in gas insulated switchgear based on genetic algorithm and density-based spatial clustering of applications with noise[J]. IEEE Sensors Journal，2021，21(2)：965-973.

[6] 施志伟，沈　忠，邱　雨，等．开关柜内部母排接触不良故障下外壳振动特性仿真分析[J]．湖南电力，2024，44(3)：3-8.
Shi Zhiwei，Shen Zhong，Qiu Yu，et al. Simulation analysis on enclosure vibration characteristic under poor busbar contact failure in switchgear cabinets[J]. Hunan Electric Power，2024，44(3)：3-8.

[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] 翟春雨，吴书煜，李颖斌，等．基于小波能量占比与时序预测的换流变压器机械状态智能诊断技术[J]．高压电器，2024，60(11)：68-76.
Zhai Chunyu，Wu Shuyu，Li Yingbin，et al. Intelligent diagnosis technology of mechanical state of converter transformer based onproportion of wavelet energy[J]. High Voltage Apparatus，2024，60(11)：68-76.

[9] 林　婧，张佳灏，黎　旭，等．基于振动信号的高压断路器螺栓松动故障诊断研究[J]．高压电器，2023，59(3)：28-33.
Lin Jing，Zhang Jiahao，Li Xu，et al. Research on bolt looseness of high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(3)：28-33.

[10]杜厚贤，刘　昊，雷龙武，等．基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J]．电工技术学报，2023，38(1)：83-94.
Du Houxian，Liu Hao，Lei Longwu，et al. Power transformer fault detection based on multi-eigenvalues of vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(1)：83-94.

[11]闫荣格，焦佩林，董正予．基于多测点振动信号的变压器绕组形变故障诊断研究[J]．变压器，2020，57(12)：27-31.
Yan Rongge，Jiao Peilin，Dong Zhengyu. Research on fault diagnosis of transformer winding deformation based on vibration signals at multiple measuring points[J]. Transformer，2020，57(12)：27-31.

[12]马宏忠，吴金利，陈冰冰，等．电力变压器振动特性分析与固有频率识别[J]．高压电器，2023，59(6)：82-92.
Ma Hongzhong，Wu Jinli，Chen Bingbing，et al. Vibration characteristic analysis and natural frequency identification

of transformer[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(6)：82-92.

[13]顾仲翔，马宏忠，张　勇，等．基于 VMD 与优化 SVM 的变压器绕组松动缺陷振动信号诊断方法[J]．高压电器，2023，59(1)：117-125.

Gu Zhongxiang，Ma Hongzhong，Zhang Yong，et al. Vibration signal diagnosis method of transformer winding looseness defect based on VMD and optimized SVM[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(1)：117-125.

[14]张九思，马宏忠，李　勇，等．基于 VMD 的变压器绕组松动故障分析与诊断[J]．高压电器，2021，57(8)：198-208.

Zhang Jiusi，Ma Hongzhong，Li Yong，et al. Analysis and diagnosis on looseness of transformer winding based on VMD[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(8)：198-208.

[15]王旭鹏，郝　建，钟　尧，等．基于 ILPSO-LSSVM 的 GIS 设备隔离开关机械异响振动识别方法研究[J]．高压电器，2023，59(11)：172-183.

Wang Xupeng，Hao Jian，Zhong Yao，et al. Research on identification method of mechanical abnormal noise and vibration of disconnector for GIS based on ILPSO-LSSVM[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(11)：172-183.

[16]庄瑞锋，陈丽安，肖梁贤．基于变分模态分解的高压断路器合分闸线圈电流特征值提取[J]．高压电器，2022，58(4)：145-150，157.

Zhuang Ruifeng，Chen Li’an，Xiao Liangxian. Feature value extraction of high voltage circuit breaker's opening coil current based on variational modal decomposition[J]. High Voltage Apparatus，2022，58(4)：145-150，157.

[17]蒋西平，李永福，龙英凯，等．GIS 设备机械缺陷振动信号特征分析技术研究[J]．高压电器，2025，61(2)：17-25，34.

Jiang Xiping，Li Yongfu，Long Yingkai，et al. Research on characteristics analysis technology of vibration signal of mechanical defects in GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus，2025，61(2)：17-25，34.

[18]李国栋，俞　华，刘　宏，等．GIS 设备内外部紧固松动机械缺陷振动特性对比分析研究[J]．高压电器，2024，60(5)：12-19.

Li Guodong，Yu Hua，Liu Hong，et al. Comparative analysis and research on vibration characteristics of internal and external fastening loose mechanical defects of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus，2024，60(5)：12-19.

[19]冯　英，李　旭，钟　尧，等．基于多层融合振动数据分析的 GIS 设备机械缺陷诊断方法研究[J]．中国电机工程学报，2024，44(14)：5797-5809.

Feng Ying，Li Xu，Zhong Yao，et al. Research on the GIS mechanical defects diagnosis method based on multi-layer fusion vibration data analysis[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(14)：5797-5809.

[20]李秀广，吴旭涛，朱洪波，等．基于振动信号的 GIS 触头接触异常研究分析[J]．高压电器，2016，52(10)：165-169.

Li Xiuguang，Wu Xutao，Zhu Hongbo，et al. Research on contacting fault of GIS contact based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus，2016，52(10)：165-169.

普子恒(1987—)，男，博士，副教授，研究方向为电网智能运维及输电线路防灾减灾。

王鑫风(2000—)，女，硕士研究生，研究方向为高压开关设备振动分析(E-mail：1786573718@qq.com)。