

# 基于 EMD-FFT 特征提取的 GIS 机械缺陷诊断方法研究

梁基重<sup>1</sup>, 晋涛<sup>1</sup>, 牛曙<sup>1</sup>, 王璇<sup>1</sup>, 孙乃君<sup>2</sup>, 宋颜峰<sup>3</sup>, 李军浩<sup>3</sup>

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西太原 030012; 2. 国网山西省电力公司大同供电公司, 山西大同 037008;  
3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西西安 710049)

**摘要:** 气体绝缘组合电器(GIS)在组装和长期运行过程中会产生诸多机械缺陷, 检测和诊断机械缺陷对于保障 GIS 可靠运行具有重要意义。目前各学者进行了大量的振动信号检测, 但结果分析多是基于 FFT 的时频分析, 缺乏针对不同典型机械缺陷下振动信号特征提取的诊断方法。为此, 基于不同典型机械缺陷下振动信号频率特征量存在差异的基本原理, 提出采用 EMD-FFT 联合算法提取 GIS 振动信号特征, 根据 550 kV 实体 GIS 设备上典型机械缺陷振动信号的检测分析, 归纳总结出不同缺陷下的 GIS 机械振动信号特征图谱, 从而实现现场 GIS 设备的机械缺陷有效诊断。研究结果表明, 提出的 EMD-FFT 算法能够有效提取出不同典型缺陷下振动信号的主要特征频率点, 构建的特征谱图可直观反映不同缺陷下的频率信息变化, 实现对典型机械缺陷的诊断。基于上述诊断方法开展现场试验, 有效检测出某 GIS 设备存在的地脚螺栓松动缺陷, 证明了诊断方法的有效性。研究成果能够为现场 GIS 机械缺陷诊断提供方法和试验结果支撑。

**关键词:** 气体绝缘组合电器; 机械缺陷; 振动; 诊断; 经验模态分解

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.024 中图分类号: TM835.1 文章编号: 1673-9140(2023)03-0216-08

## Research on GIS mechanical defect diagnosis method based on EMD-FFT feature extraction

LIANG Jichong<sup>1</sup>, JIN Tao<sup>1</sup>, NIU Shu<sup>1</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>, SUN Naijun<sup>2</sup>,  
SONG Yanfeng<sup>3</sup>, LI Junhao<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030012, China;  
2. Datong Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Datong 037008, China;  
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Mechanical defects of gas insulated switchgear (GIS) may occur in the process of assembly and long-term operation. Detecting and diagnosing mechanical defects is of great significance to ensure the reliable operation of GIS. At present, scholars have carried out a large number of vibration signal detection. However, the result analysis is mostly time-frequency analysis based on FFT (fast Fourier transform), and the diagnostic methods for vibration-signal feature extraction under different typical mechanical defects is deficient. Therefore, based on the basic principle that frequency characteristics differences exists in the vibration signals of different typical mechanical defects, the method adopting EMD-FFT joint algorithm to extract the characteristics of GIS vibration signals is proposed in this paper. According to the

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-06-27

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(520530200010)

通信作者: 李军浩(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力设备状态检测及诊断研究; E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn

vibration signals detection and analysis of typical mechanical defects in 550 kV entity GIS equipment, the characteristic maps of GIS mechanical vibration signals under different defects are summarized. Thus the effective diagnosis of mechanical defects of on-site GIS equipment can be realized. The results show that the proposed EMD-FFT algorithm can extract the main characteristic frequency points of vibration signals under different typical defects effectively. The constructed characteristic spectrum can reflect the variation of frequency information under different defects directly. Which leads to realize the diagnosis of typical mechanical defects. Based on the proposed diagnosis method, field test is conducted to detect the loosening defects of anchor bolts in a certain GIS equipment, which proves the effectiveness of the proposed method. The research results can provide methods and test results reference for on-site GIS mechanical defect diagnosis.

**Key words:** gas insulated switchgear; mechanical defect; vibration; diagnosis; empirical mode decomposition

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是占比最高、增长速度最快的电网核心电力设备,110 kV特高压工程均采用GIS<sup>[14]</sup>。GIS在运行过程中除了产生电气缺陷外也会产生机械缺陷,根据近年来对GIS设备事故的统计,机械性缺陷在GIS事故中的诱因占比极高,达到39%,与电气缺陷引起的事故相当<sup>[5-9]</sup>。因此,对GIS设备机械性缺陷的检测和分析愈来愈受到研究人员的关注。

GIS设备在实际运行过程中承受着50 Hz的交流大电流,从而受到电动力的作用而产生主要为100 Hz的受迫振动。研究发现,当GIS设备存在机械性缺陷时,GIS振动发生异常,主要表现为激发的振动信号中频率分量或者信号幅值的异常变化。因此,通过测量GIS设备的振动信号能够有效发现设备存在的机械缺陷。基于该原理,研究人员通过检测GIS设备的振动信号对其机械状态进行了检测分析<sup>[10-17]</sup>。2015年西安交通大学李军浩课题组研制了基于GIS外壳振动信号的设备机械状态便携式检测系统<sup>[11]</sup>,对某110 kV变电站的GIS设备进行了振动普测,积累了大量的现场技术经验和检测数据。此外,研究人员在实验室中构建隔离开关接触不良等典型机械缺陷<sup>[18-19]</sup>,通过分析频域信号发现了不同缺陷下的信号特征。总的来说,目前学者们采用振动检测法进行GIS机械缺陷的检测已经积累了一定的检测数据,但是缺乏基于振动信号的GIS机械缺陷分析方法。目前,主要是采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)提取信号的频域信息,但是现场GIS机械缺陷类型繁多,振动信号受到外部干扰、设备负载等因素的影响,单纯的FFT分析难以准确地提取出设备的特征信号,也难以对设备的机械缺陷进行直观有效的诊断。

针对于此,本文提出经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法结合FFT算法的GIS设备振动信号特征提取方法,进而构建不同频率点的数值特征值统计谱,直观地反映振动信号的特征。根据前期在550 kV GIS试验平台上获得的弹簧触指松动、隔离开关不良、屏蔽罩松动以及地脚螺栓松动等典型机械缺陷的振动数据,归纳总结出不同缺陷下的振动信号数值特征值统计谱特征;提出基于EMD-FFT特征提取的GIS机械缺陷诊断方法,最终通过实际现场应用证明所提诊断方法的有效性。本文研究能够为现场GIS设备机械缺陷提供诊断方法,从而针对不同机械缺陷进行处理,预防机械性设备故障的发生。

## 1 基于EMD-FFT机械信号特征提取

### 1.1 EMD方法基本原理

EMD方法的基本原理是依照自身的时间尺度把信号分解成一系列本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),不需要事先设定基函数;而其分解出来的本征模态函数具有原信号不同时间尺度的局部特征,根据实际需要,对各个本征模态函数IMF进行再处理提取所需的特征<sup>[20-21]</sup>,因此可以认为其具有自适应性。

EMD方法无须预先设定基函数的自适应性,其建立在先验性的谐波基函数和小波基函数上的傅里叶分解与小波分解方法具有本质性的差别。因此,EMD方法在理论上可以应用于任何类型信号的分解,在处理非平稳及非线性数据上,具有非常明显的优势以及很高的信噪比。

EMD方法可建立如下假设<sup>[22]</sup>:①信号最少有一个极小值和一个极大值;②2个极值点之间的时间长度定义特征时间尺度;③若信号无极值点但有变形点,则可将数据微分一次或几次得到极值点,最后积分IMF获得分解结果。

详细的EMD方法分解过程:将原数据序列 $X(t)$ 中所有的极大值点和极小值点分别统计出来,然后将其分别通过三次样条插值函数拟合,形成2条包络线,将2条包络线的均值记作 $Y_1(t)$ ,原始数据减去 $Y_1(t)$ 得到新的数据序列:

$$X_1(t) = X(t) - Y_1(t) \quad (1)$$

若新数据 $X_1(t)$ 还存在负的极大值和正的极小值,则重复上述过程,直到分解至满足本征函数条件:①函数的过零点和局部极值点的数目相等或最多相差一个;②在任意时刻点,2条包络线的平均值为零<sup>[23-24]</sup>。

EMD方法分解过程得到的基函数是一系列幅度和频率均可变的函数,信号分解过程完全自适应。因此,EMD数据分析方法是基于信号数据自身特性分解、从高频至低频分解以及自适应时变滤波。将该方法应用于现场GIS设备振动信号时,能够有效适应不同条件和工况下的检测结果,准确提取信号的特征点。

## 1.2 基于EMD-FFT数据特征提取流程

EMD方法流程如图1所示,具体流程如下:

1) 初始化得到 $r_0(t) = x(t)$ ,  $n = 1$ ;

2) 得到第 $n$ 个IMF,即①初始化得到 $h_0(t) = r_n(t)$ ,  $j = 1$ ;②找出 $h_{j-1}(t)$ 的局部极值点,获得过零点 $N_0$ 和极值点数 $N_1$ ;③对 $h_{j-1}(t)$ 的极大和极小值点进行三次样条插值,得到上、下包络线;④计算2条包络线的均值 $M_{j-1}(t)$ ;⑤ $h_j(t) = h_{j-1}(t) - M_{j-1}(t)$ ;

⑥若 $\sum_{i=0}^T \frac{|h_j(t) - h_{j-1}(t)|^2}{h_j(t)^2} \leq 0.3$ ,则 $c_i(t) = h_j(t)$ ;否则 $j = j + 1$ ,转到步骤2);

3)  $r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_i(t)$ ;

4) 若 $r_i(t)$ 极值点的个数不少于2个,则 $n = n + 1$ ,转到步骤2);否则分解结束。

上述流程中, $t$ 为时域信号时间, $i, j$ 为循环计数参量, $n$ 为模态分量和残差量的阶数, $x_{up}(t)$ 、 $x_{low}(t)$ 分别为拟合极值点得到的上、下包络线, $M(t)$ 为上、

下包络线的平均值, $x(t)$ 为原数据序列, $h(t)$ 为原数据序列与上、下包络线平均值的差值, $c_n(t)$ 为得到的第 $n$ 阶模态分量, $r_n(t)$ 为得到的第 $n$ 阶残差量。

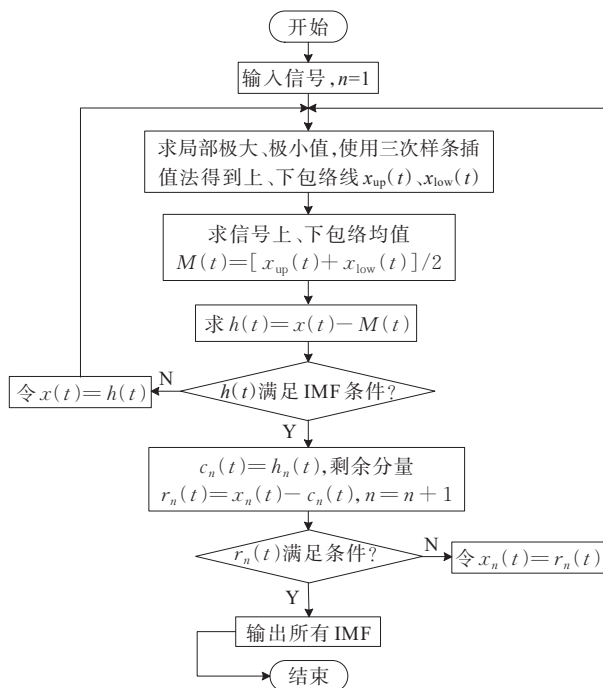


图1 EMD方法流程

Figure 1 EMD algorithm flow chart

通过计算,可以将GIS振动的原始时域信号分解成多个只包含单一信号特征的IMF分量信号,在最大程度保证信号原始特征的前提下,自适应地提取出信号的特征,无缺陷振动时域信号的EMD方法处理结果如图2所示。

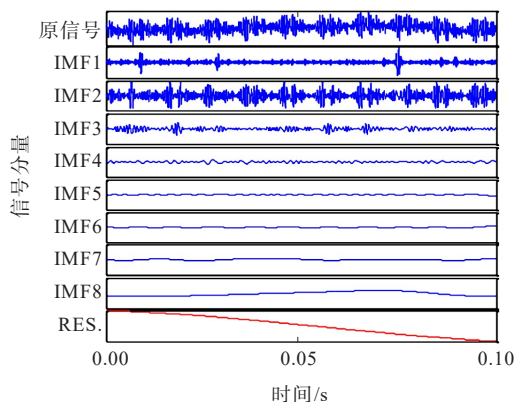


图2 GIS振动信号经EMD方法处理后得到的IMF分量

Figure 2 IMF components of GIS vibration signal after EMD

根据机械系统基础理论可知,系统产生振动信号是一系列特征信号相叠加的结果,特征信号为具

有不同频率的信号。因此,当 GIS 设备存在机械缺陷时,机械系统特征发生变化,最终导致振动信号中频率分量的变化。针对此,在经 EMD 方法处理后的时域信号基础上,本文利用 FFT 对不同的 IMF 分量进行分解,得到 EMD-FFT 方法处理后的振动信号分量,从而自适应提取出信号在不同频率点上最明显的信号特征,在图 2 基础上进一步经过 FFT 变换得到的信号如图 3 所示。

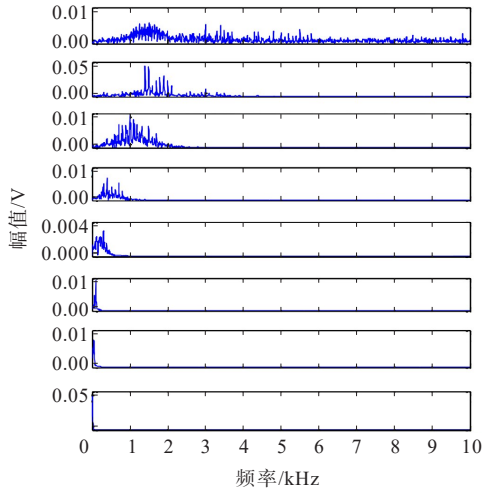


图 3 GIS 振动信号经 EMD-FFT 方法处理后的信号分量  
Figure 3 Signal components of GIS vibration signal after EMD-FFT processing

在经过 EMD-FFT 方法处理后的振动信号中,每个分量含有一个主要的信号频率分量,因此,本文从每个分量中提取信号的最大频率点和对应的幅值,构建 GIS 振动信号的特征谱图。

## 2 不同缺陷下的信号特征谱

### 2.1 典型机械缺陷设置和试验系统

统计近几年各电压等级 GIS 设备出现的机械缺陷,可以将常见的机械缺陷划分为内部电接触、内部紧固及外部紧固松动缺陷三大类型,在 550 kV 的实体 GIS 平台上,本文分别对弹簧触指松动、隔离开关触头接触不良、内部屏蔽罩松动及外部紧固螺栓松动这 4 种缺陷进行模拟,缺陷和缺陷位置如图 4 所示。

GIS 设备通过感应式大电流发生装置产生最大 5 kA 的导杆电流,模拟 GIS 设备实际运行的负载情况。选用检测频率范围为 1 Hz~4 kHz、灵敏度为

300 mV/g 的压电式加速度传感器,检测 GIS 设备外壳上的机械振动信号,测量信号经过 4 kHz 低通滤波和最大 160 倍放大的信号调理单元处理后通过采集装置进行采集。

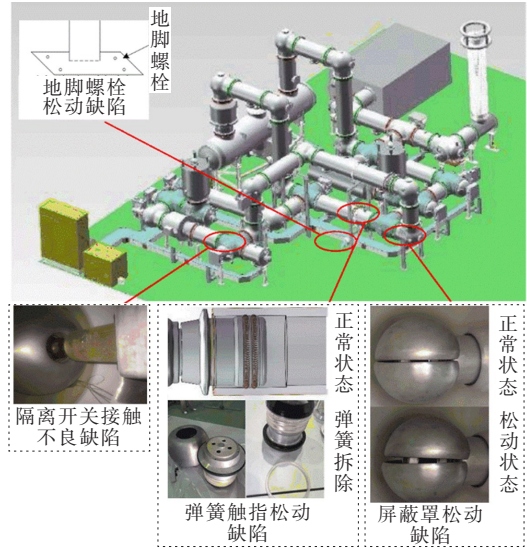


图 4 550 kV GIS 机械振动平台和机械缺陷设置  
Figure 4 550 kV GIS mechanical vibration platform and mechanical defects setting

### 2.2 不同缺陷振动信号特征谱特性分析

基于构建的试验系统,本文对不同机械缺陷下的机械缺陷振动信号进行检测分析。不同缺陷下检测得到的振动信号时域波形如图 5 所示。

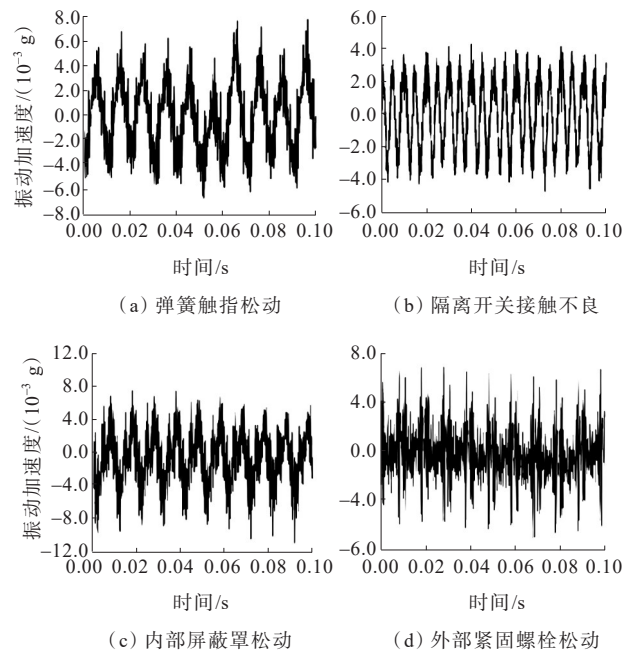


图 5 不同缺陷下振动信号时域波形  
Figure 5 Time domain waveforms of vibration signal for different defects

由图5可以看出,不同缺陷下的振动时域信号存在较大差异,但直接通过时域波形难以给出缺陷类型的准确识别,不同机械缺陷带来的振动信号变化主要反映在波形中低频和低频分量的占比不同。需要根据不同的时域波形特点,提取信号中的主要波形变化特征(主要频率信息)。

本文提出的EMD-FFT方法可以适应不同波形的特点,提取出波形信号中的主要频率点,从而

为缺陷识别诊断提供直观的依据,通过提出的EMD-FFT方法构建出不同缺陷下的信号特征谱。典型缺陷下的特征谱如图6所示,其中隔离开关通过动静触头的接触电阻表征不同的接触状态,74  $\mu\Omega$ 为正常状态下的触头接触状态,可以看出,当通过EMD-FFT方法对信号的特征进行提取时,可以根据不同缺陷信号结果,自适应提取出最为主要的频率点的信号特征。

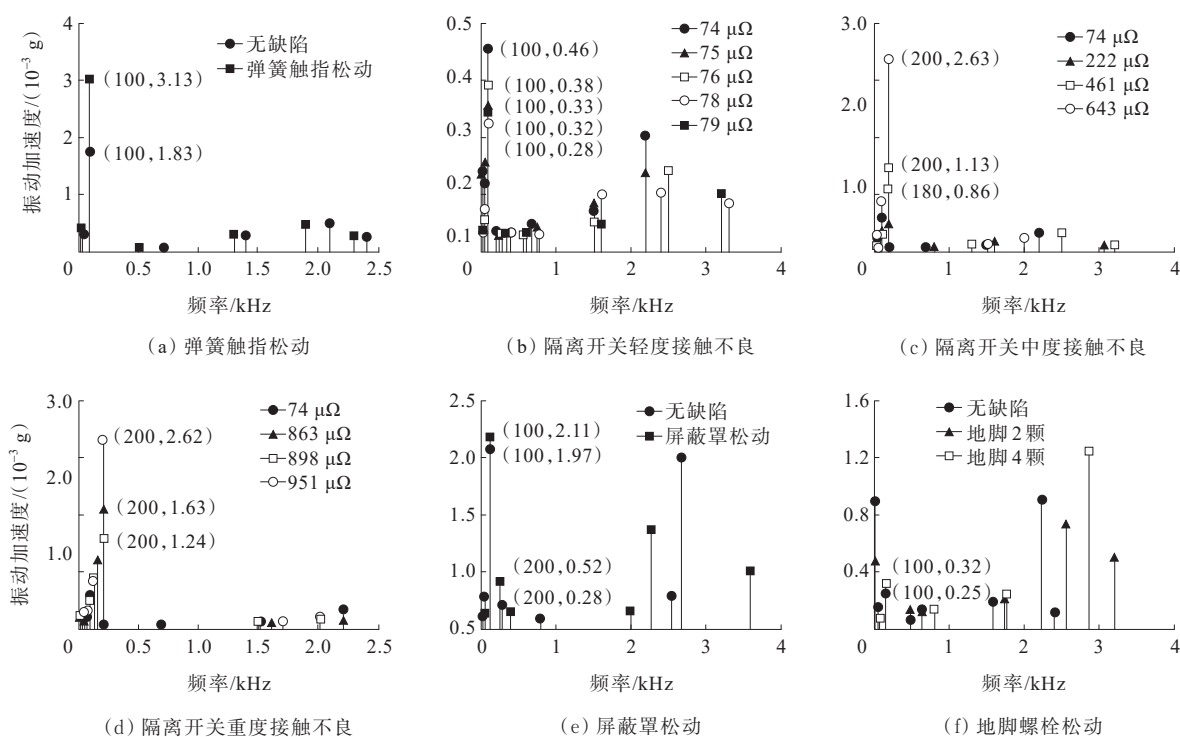


图6 基于EMD-FFT方法的典型缺陷振动信号特征谱

Figure 6 Characteristic spectrum of vibration signal for typical defects based on EMD-FFT algorithm

由图6(a)~(d)中的结果可以看出,当GIS设备存在内部电接触松动缺陷(包括弹簧触指松动缺陷与隔离开关轻接触不良)时,由于对电回路的影响引起设备所受胁迫力的改变,因此,均会导致数值特征谱中100 Hz幅值与无缺陷不重叠,但对其他频率分量影响较小,其中弹簧触指松动导致100 Hz幅值升高为1.71倍;隔离开关轻度触头接触不良导致100 Hz幅值下降,是无缺陷的0.595 8~0.816 1倍。此外,当隔离开关出现严重接触不良时,还会改变GIS设备的本征振动信号,出现低频信号的改变,如图6(c)、(d)所示,隔离开关中重度接触不良缺陷导致特征谱中200 Hz幅值增加明显,是无缺陷的

7.80~55.35倍。

对于内部紧固松动类缺陷(屏蔽罩松动),不会改变设备的电学回路,不改变100 Hz的受迫振动信号,但会影响设备本身结构,出现低频本征振动信号的变化,从图6(e)可以看出,主要是导致特征谱中200 Hz信号的幅值增加,是无缺陷信号的1.86倍。同样,当出现外部紧固松动(地脚螺栓松动)时,也不会改变设备的电回路,因此,100 Hz信号分量不会产生变化,但此时由于改变了机械系统的边界条件,会引起高频分量的变化,如图6(f)所示,地脚螺栓松动导致信号特征谱中出现了1 500 Hz以上的高频分量信号。

### 3 基于EMD-FFT特征提取的机械缺陷诊断方法

采集待测设备振动信号后对振动数据进行基于EMD-FFT方法提取特征谱,比对测得特征谱与典型缺陷特征谱,若特征量相同,则该设备具有相同缺陷,否则该设备无典型机械缺陷,如图7所示。

根据检测获得结果和理论分析,给出典型特征

谱:①当出现 100 Hz 幅值明显升高(1.5倍以上)时, GIS 内部存在弹簧触指松动缺陷;②当出现 100 Hz 幅值下降(0.85倍以下)时, GIS 内部存在隔离开关轻微接触不良缺陷;③当出现 200 Hz 幅值轻微增加(2倍以下)时, GIS 内部出现屏蔽罩松动缺陷;④当 200 Hz 幅值大幅升高(5倍以上)时, GIS 内部出现内部隔离开关严重接触不良缺陷;⑤当出现高频分量且幅值超过  $5.21 \times 10^{-4} \text{ g}$  时, GIS 外部出现地脚螺栓松动缺陷。

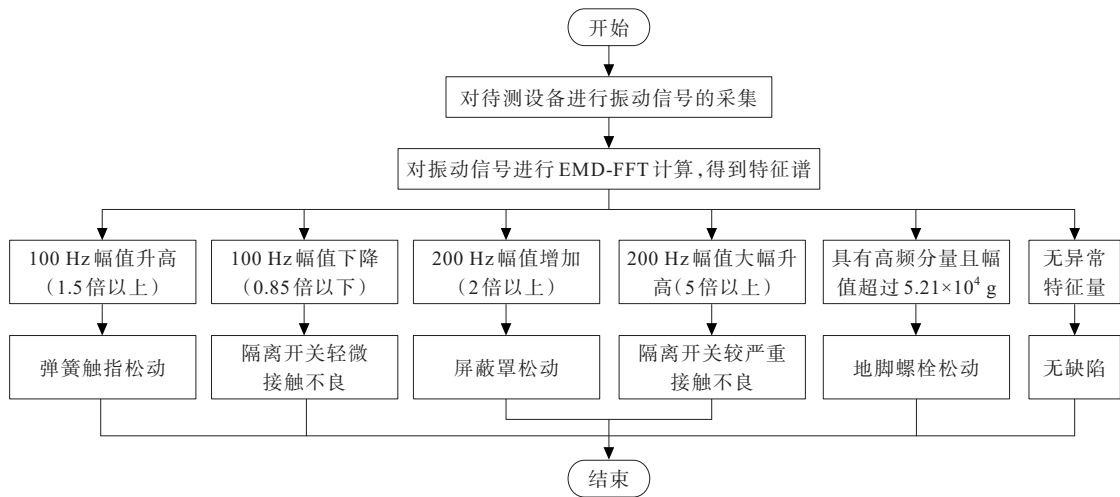


图7 基于EMD-FFT方法的故障诊断方法流程

Figure 7 Flow chart of fault diagnosis method based on EMD-FFT algorithm

### 4 现场检测应用

本文采用GIS振动检测法对10座110 kV变电站和10座220 kV变电站开展机械状态检测。20座变电站位于中心城区,经历过迎峰度夏、过负荷的考验;检测共历时2个多月,共检测204个气室间隔、816台设备;对采集的振动数据进行特征量提取和设备机械状态评估,并对判别有机械缺陷的设备进行X光数字成像检测。

在现场检测过程中,绝大部分GIS设备机械状态良好,良好状态下检测结果如图8所示。检测过程中发现某220 kV变电站的110 kV GIS母联112间隔的隔离开关1122存在异常振动,母线负荷电流为102 A。本文对该间隔的2台隔离开关设备进行数据分析,针对隔离开关1122设备,以隔离开关1121为比照样本,得到的数值特征谱如图9所示。

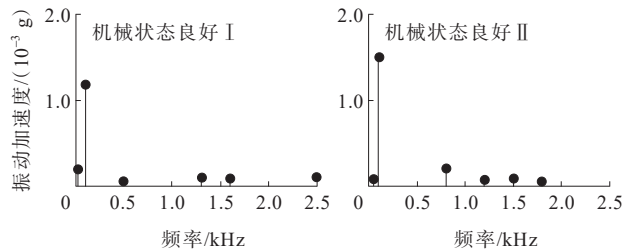


图8 机械状态良好振动信号特征谱

Figure 8 Characteristic spectrum of vibration signal in good mechanical condition

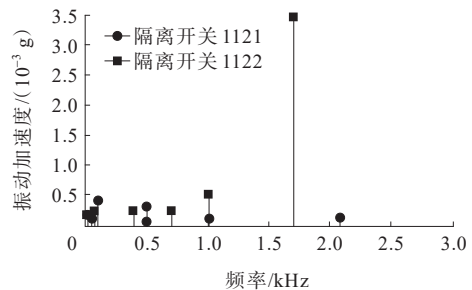


图9 某GIS设备隔离开关现场振动信号特征谱

Figure 9 Characteristic spectrum of field vibration signal for a GIS disconnector

由图9可以看出,隔离开关1122相比于相近的1121设备特征谱存在1.5 kHz以上分量,幅值 $3.5 \times 10^{-3}$  g,根据本文提出的诊断算法判据,当数值特征谱中出现高频分量且幅值超过 $5.21 \times 10^{-4}$  g时,设备存在地脚螺栓松动,故隔离开关1122设备可能存在于外部地脚螺栓松动缺陷。

现场GIS分布很紧密,不同设备间人员难以进行检查,因此针对该外部紧固缺陷,本文使用X射线同时对设备内部和外部进行成像检测,得到结果如图10所示,可以看出,被测的隔离开关设备确实存在外部地脚螺栓松动缺陷,证实了本文提出的诊断方法具有较好的应用效果。



图10 存在外部地脚螺栓松动的GIS设备X射线成像示意

Figure 10 X-ray imaging of GIS equipment with loose external anchor bolts

## 5 结语

本文提出采用EMD-FFT联合方法提取GIS振动信号特征,构建GIS机械振动信号特征图谱,根据特征图谱实现GIS典型机械缺陷的现场诊断。

1) 通过EMD-FFT方法对GIS诊断信号进行处理,能够适应不同的缺陷类型和工况条件,有效提取出信号中的主要变化频率点,从而反映出机械缺陷引起系统诊断频率变化的本质特征。

2) 通过在550 kV实体GIS设备上典型机械缺陷振动信号的检测分析,获得了基于EMD-FFT特征提取构建的振动信号特征谱图,不同缺陷下的特征谱图具备特点:①当出现100 Hz幅值变化时,存在内部电接触松动缺陷,而且对于比较严重的接触不良缺陷还会出现明显的200 Hz信号幅值升高;②当100 Hz信号不发生变化且仅出现200 Hz幅值轻微增加(2倍以下)时,存在内部紧固松动缺陷;③当

出现1 500 Hz及以上的高频分量且幅值超过 $5.21 \times 10^{-4}$  g时,GIS外部存在外部紧固松动缺陷。

3) 基于本文提出的诊断方法,有效检测出现场某GIS设备存在的地脚螺栓松动缺陷,证明了本文诊断方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [2] LI C, HE JL, HU J, et al. Switching transient of 1 000 kV UHV system considering detailed substation structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 112-122.
- [3] GU D X, ZHOU P H, DAI M, et al. Overvoltages and insulation coordination of 1 000 kV AC transmission systems in China[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 83-93.
- [4] OKUBO H, BEROUAL A. Recent trend and future perspectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride(SF6) substitutes for high voltage electric power equipment[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 34-42.
- [5] 王克胜,赵彦平,原帅,等.基于电场计算及模态分析的220 kV GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 32-38+47. WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 32-38+47.
- [6] 臧旭,马宏忠,吴金利,等.基于振动原理的GIS母线导体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.
- [7] 李争博,刘友波,任鹏哲,等.考虑地理信息聚类分区的配电网多阶段动态规划方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 38-45. LI Zhengbo, LIU Youbo, REN Pengzhe, et al. Multi-stage dynamic planning method for distribution network considering clustering and partitioning of geographic information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 38-45.

- [8] 崔杨柳,马宏忠,王涛云,等.基于故障树理论的GIS故障分析[J].高压电器,2015,51(7):125-129.  
CUI Yangliu, MA Hongzhong, WANG taoyun, et al. GIS fault analysis based on fault tree theory[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51 (7):125-129.
- [9] 律方成,张波.基于S-Kohonen网络的GIS局部放电类型识别[J].电测与仪表,2014,51(20):21-24.  
LÜ Fangcheng, ZHANG Bo. GIS partial discharge type recognition based on S-Kohonen network[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2014, 51 (20):21-24.
- [10] 程林.特高压GIS/HGIS设备振动诊断方法研究[J].电力建设,2009,30(7):17-19.  
CHENG Lin. Research on vibration diagnosis method of UHV GIS/ HGIS equipment[J]. Power Construction, 2009, 30 (7):17-19.
- [11] 黄金剑,杨宝琨.基于振动信号的GIS机械状态检测系统及其应用[J].广西电力,2015,38(5):55-59.  
HUANG Jinjian, YANG Baokun. GIS mechanical state detection system based on vibration signal and its application[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38 (5):55-59.
- [12] 张利,屈斌,王永宁,等.GIS壳体振动机理和局部放电优化诊断与应用[J].中国电力,2022,55(3):80-86.  
ZHANG Li, QU Bin, WANG Yongning, et al. GIS shell vibration mechanism and partial discharge optimization diagnosis[J]. Electric Power, 2022, 55(3):80-86.
- [13] 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.
- [14] OHSITA Y, HASHIMOTO A. A diagnostic technique to detect abnormal conditions of contacts measuring vibrations in metal enclosures of gas insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2090-2094.
- [15] 李凯,许洪华,陈冰冰,等.GIS振动机理及固有频率研究[J].电测与仪表,2017,54(3):14-18.  
LI Kai, XU Honghua, CHEN Bingbing, et al. Study on vibration mechanism and natural frequency of GIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3): 14-18.
- [16] 郑浩,朱胜龙,欧阳昱,等.基于改进HHT算法的GIS机械振动信号时频分析[J].电气自动化,2018,40(1):15-18.  
ZHENG Hao, ZHU Shenglong, OUYANG Yu, et al. Time frequency analysis of GIS mechanical vibration signal based on improved HHT algorithm[J]. Electrical Automation, 2018, 40 (1):15-18.
- [17] YANG J G, LIU Y, LI J H, et al. Study on the vibration characteristics of GIS's vertical bus under fastening bolts on flange[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, China, 2016.
- [18] 王艳新,闫静,王建华,等.基于域对抗迁移卷积神经网络的小样本GIS绝缘缺陷智能诊断方法[J].电工技术学报,2022,37(9):2150-2160.  
WANG Yanxin, YAN Jing, WANG Jianhua, et al. Intelligent diagnosis for GIS with small samples using a novel adversarial transfer learning in convolutional neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9):2150-2160.
- [19] 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. Contact state detection technology of GIS disconnecter contact based on vibration principle[J]. High Voltage Technology, 2019, 45 (5):1591-1599.
- [20] 曹冲锋.基于EMD的机械振动分析与诊断方法研究[D].杭州:浙江大学,2009.  
CAO Chongfeng. Research on mechanical vibration analysis and diagnosis method based on EMD[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [21] 胡爱军. Hilbert-Huang变换在旋转机械振动信号分析中的应用研究[D].保定:华北电力大学,2008.  
HU Aijun. Application of Hilbert Huang transform in vibration signal analysis of rotating machinery[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [22] 胡劲松.面向旋转机械故障诊断的经验模态分解时频分析方法及实验研究[D].杭州:浙江大学,2003.  
HU Jinsong. Empirical mode decomposition time-frequency analysis method and experimental research for rotating machinery fault diagnosis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [23] 曾海平.基于经验模态分解法的滚动轴承故障诊断系统研究[D].杭州:浙江大学,2005.  
ZENG Haiping. Research on rolling bearing fault diagnosis system based on empirical mode decomposition [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [24] 王太勇,何慧龙,王国锋,等.基于经验模式分解和最小二乘支持向量机的滚动轴承故障诊断[J].机械工程学报,2007,43(4):88-92.  
WANG Taiyong, HE Huilong, WANG Guofeng, et al. Rolling-bearings fault diagnosis based-on empirical mode decomposition and least square support vector machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (4): 88-92.