

基于EMD算法的GIS机械振动信号分析

为了找到有效的气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 机械故障诊断方法, 利用经验模态分解 (Empirical Mode Transform, EMD) 算法对振动信号加以处理, 得到多级本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 分量。依据功率谱密度函数和向量空间模型定义出功率特征矩阵以及矩阵相似度, 形成GIS机械故障判据。通过试验室GIS简易模型, 构造螺丝松动、微粒振动两类常见的GIS故障, 证实通过振动信号的采集处理对于GIS机械故障检测诊断准确有效。基于异常振动的故障诊断方法对早期发现GIS潜在故障及故障定位有重要意义。

孙庆生 曹 涛 周章斌/国网合肥供电公司

侯 焰/山东大学电气工程学院

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 广泛应用于各电压等级的变电站中, 具有诸多优点, 如占地面积小、检修次数少、元件封闭不易受外部因素影响、运行可靠性高、技术先进且经济优越。虽然GIS有很多的优点^[1-3], 但是也存在一些问题: GIS全部元件的密闭封装使得故障定位困难; 并且一旦出现故障, 鉴于其复杂的结构, 不易拆卸, 很难实现现场维修。如果发生故障, GIS一般有两周的停电时间, 然而现实情况下检修需要两周以上的时间来完成。因此, GIS运行状况的实时监测非常必要。

GIS的异常机械振动在运行变电站时有发生, 异常振动会对GIS运行状态产生不利影响, 并且产生的超标噪声不利于运行人员及变电站附近人员工作和生活。同时, 异常振动会对现场GIS局部放电超声波检测造成干扰, 进而影响GIS运

行状态的准确评估。

目前用于GIS故障诊断的方法有很多种, 包括超高频检测法^[4]、脉冲电流法^[5]、光测量法^[6]及SF₆气体检测法^[7]等。以上检测手段由于所测信号频带过高或是操作困难, 均不适用于GIS机械故障诊断。振动信号检测方法作为一种与系统无电气连接, 抗干扰能力强的故障诊断方法, 广泛应用于电力、石油和化工等领域, 国内外将振动信号检测应用于GIS机械故障诊断并形成可靠故障判据的研究还非常有限。文献[8]对运行中的GIS振动信号进行了实测, 但数据获取困难且数据量有限, 未能分析出GIS具体的故障问题。文献[9]对正常和异常HGIS振动信号进行多次检测处理, 并从统计角度得出对应振动幅值和次数关于频率的相关图, 但并没有指明故障问题。

通过研究可现场带电检测的GIS振动检测系统, 对采集到的振动信号加以处理, 形成故障类型判据, 从而掌握不同机械故障类型下的振动信号特性, 可为GIS的故障检测和诊断提供更为全面的补充。

1 GIS异常振动信号

GIS设备在运行的过程中, 其导体和外壳都有自身的振动频率, 在正常情况下, 其自身的振动和声音都在正常的范围内, 当GIS内部有缺陷时, 就会导致异常振动或异音的出现, 如果缺陷不消除, 可能会导致GIS内部附件脱落或出现悬浮电位引起GIS内部放电, 甚至GIS爆炸的发生。



孙庆生/高级工程师

关键词/Keywords

GIS ·

经验模态分解 ·

本征模态函数 ·

功率谱密度 ·

向量空间 ·

故障判据 ·

常见的引起GIS振动或产生异响的因素：①设备内部发生局部放电；②断路器在操作时，机构动作和碰撞带来连续的振动信号；③GIS筒体紧固螺栓、支撑紧固螺栓出现松动现象，引发异常振动现象；④GIS内部器件松动，筒体局部产生异常振动，出现异响现象；⑤在电动力的激励下，异响部位导电杆的共振造成GIS异响；⑥当GIS临近设备间振动频率一致时，气体腔内的振动会产生共鸣。

机械故障构成了GIS故障类型中的绝大部分，可能损坏母线、隔离开关、接地开关、断路器和互感器，从而严重影响电力设备和系统的正常运行。

振动信号经GIS筒体管道衰减、传递到外壳表面。在筒体表面，通过安装传感器来监测、采集筒体振动信号，将所得的振动信号利用信号处理算法加以分析，最后通过信号特征判据及时发现故障隐患，从而最大可能地降低GIS大型事故发生概率。

2 信号采集系统^[10]

振动信号采集系统如图1所示。试验装置包括GIS设备、加速度传感器、电荷放大器、数据采集仪和计算机。

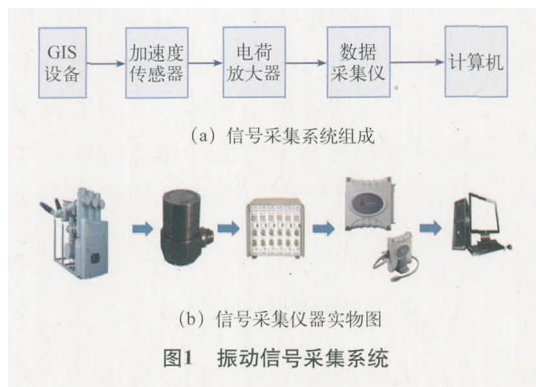


图1 振动信号采集系统

1) 拾振环节。通过安装在GIS设备上的压电式加速度传感器把被测的机械振动量转换为电信号。

2) 采集系统。本系统采用数据采集仪进行数据采集。其内部集成了电压放大器、电荷放大器、积分线路、微分线路和滤波线路等，可以通过相关的软件，设置选用的放大器和滤波电路等。

3) 信号分析及显示、记录环节。振动传感器

收集GIS设备外部振动加速度信号，通过数据采集仪的数据采集功能，最后传输到计算机进行数据存储、分析处理。

选取窥视孔、操作机构、气室中部和母线等几个位置作为测量点，将加速度传感器固定于相应位置的壳体表面。如图2所示，“▲”为对应四个传感器安装位置。

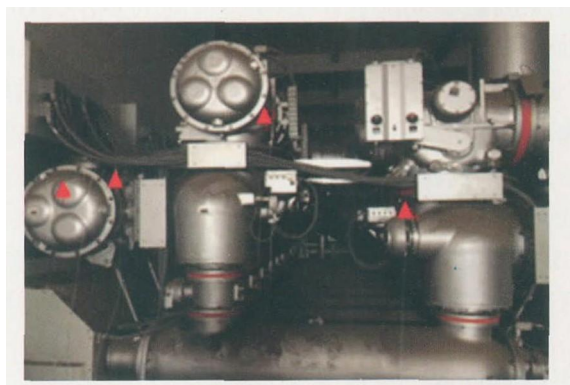


图2 传感器安装示意图

3 振动信号处理

3.1 EMD算法^[11-13]

经验模态分解（Empirical Mode Transform, EMD）算法从信号本身出发，将信号分解为若干本征模态函数（Intrinsic Mode Function, IMF），它具有传统小波变换多分辨的优点，同时又没有小波基函数选择的问题，可以有效地处理非线性、非稳态信号，实现信号的时频分析，提高信号处理的灵活性和有效性。

图3为EMD的流程图。图中IMF分量必须满足以下条件^[14-15]：①整个时间序列下，极值点数和过零点个数的差值最大为1；②任何时刻，上下包络线求得的均值为零。

任何信号在完成EMD过程后，得到的诸多IMF分量都仅包含一个信号特征，这个过程不仅将信号的无用分量去除（残余函数），实现信号去噪，同时能够重构剩余信号，便于下一步的故障诊断分析。

3.2 功率谱密度函数

首先研究仅在时间区间 $[-T/2, T/2]$ 内截取信

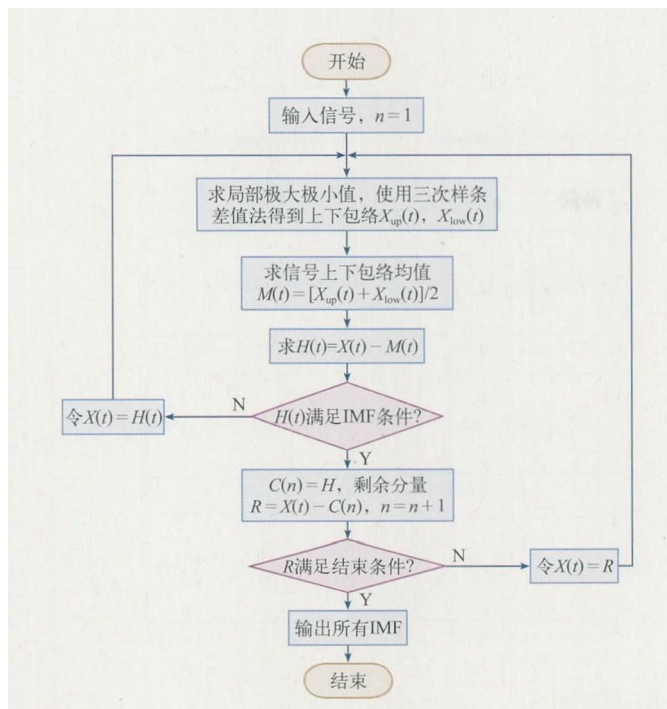


图3 EMD实现流程

号样本函数 $x(t)$ 而得到的函数 $x_T(t)$, 即

$$x_T(t) = \begin{cases} x(t) & (-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}) \\ 0 & (t \leq -\frac{T}{2}, t \geq \frac{T}{2}) \end{cases} \quad (1)$$

这种函数 $x_T(t)$ 的自相关函数可表示为

$$\begin{aligned} R_{x_T}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_T(t) x_T(t+\tau) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x_T(t) x_T(t+\tau) dt \end{aligned} \quad (2)$$

对此自相关函数作傅里叶变换, 并作变量代换 $t_1=t$, $t_2=t+\tau$, 再变换积分顺序后, 得

$$R_{x_T}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X_T(i\omega)|^2 \quad (3)$$

式中, $X_T(i\omega)$ 为 $x_T(t)$ 的傅里叶变换, 即

$$X_T(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_T(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

如 $T \rightarrow \infty$, 则 $x_T(t) \rightarrow x(t)$, 所以 $x(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 的傅里叶变换可表示为

$$\int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega \tau} d\tau = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X_T(i\omega)|^2 \quad (5)$$

式(5)所示的函数称为 $x(t)$ 的功率谱密度函

数, 简称功率谱。

3.3 功率特征矩阵^[16-17]

当GIS发生机械故障时, 故障信号分解所得的IMF分量必定与正常振动信号的IMF分量不同, 即包含的振动特征不一致。为了能够将各IMF振动信号特征数量化, 从而形成GIS机械故障判据, 本文利用功率谱密度函数对上述EMD分解的IMF信号分量进行功率特征提取。以 IMF_1 为例, 根据实验数据, 取 IMF_1 分量功率谱最大幅值所在的区间, 计算出所有IMF功率谱的积分和, 将该值与IMF在此区间的功率谱密度积分的比值作为特征值, 定义为局部极大功率特征 (Local Maximum Power Feature, LMPF), 即

$$LMPF = \sum \int_{f_{\min}-a_0}^{f_{\max}+a_1} E(f) df / \int_{f_{\min}-a_0}^{f_{\max}+a_1} E(f) df \quad (6)$$

式中, $f_{\max}$ 为功率谱最大幅值所对应的频率; $E(f)$ 为功率谱密度函数; $[a_0, a_1]$ 为附近区间, 其范围依据具体试验。

依据上述方法, 计算出所有通道分解出的IMF对应的LMPF值, 构成该工况下的功率特征矩阵, 就能够比较准确地反映GIS振动信号的本质特征, 因此可以将其作为机械状态的检测依据。

首先对正常工况下GIS运行过程振动信号进行分析, 图4为四个振动传感器测量点的经过降噪处理后的振动信号及利用EMD算法进行分解所得各IMF (限于篇幅, 仅给出 $IMF_4 \sim IMF_6$ 波形)。整个过程变电站GIS运行稳定, 无异常声响, 振动信号均呈现强时变与非平稳的特征。且由分解可知, $IMF_1 \sim IMF_6$ 包含了GIS绝大部分的振动特征, 因此可将 $IMF_1 \sim IMF_6$ 作为分析对象, 进而根据式(7)分别计算各通道各IMF的LMPF, 所得功率特征矩阵即为正常工况下的振动特征, 如表1所示。

为了更加直观有效地分析功率特征矩阵的不同, 实现对GIS各类机械故障的检测, 文章从向量空间模型的角度定义了矩阵相似度 m 为

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 * \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (7)$$

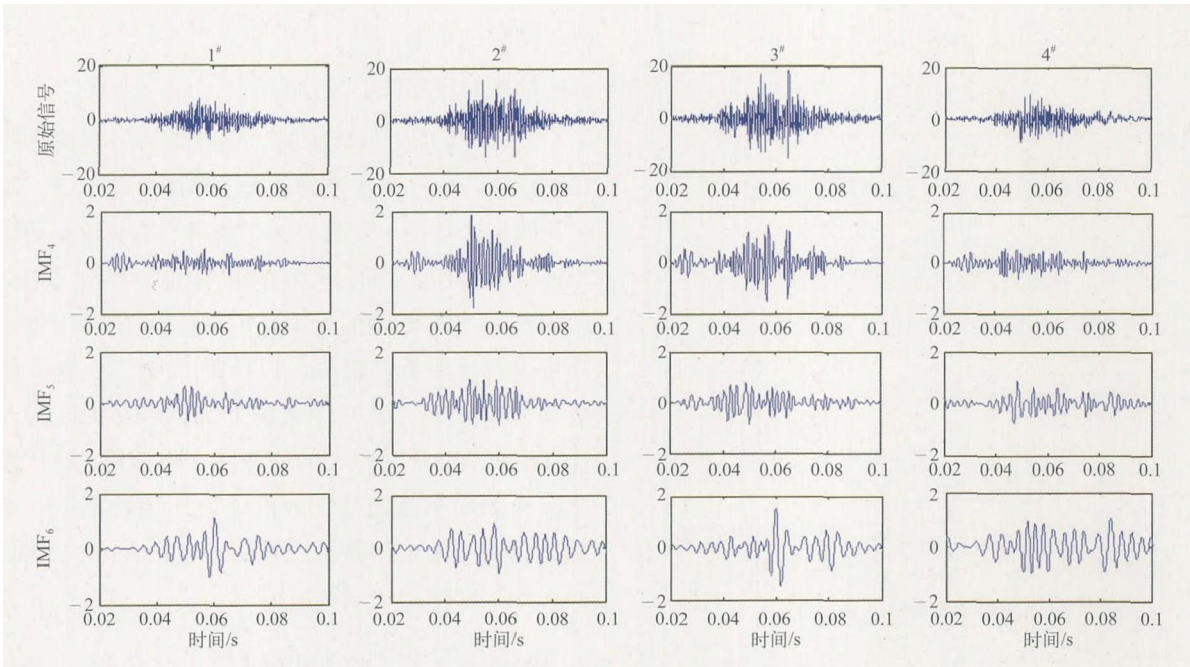


图4 GIS振动信号及其分解所得IMF

表1 正常工况下功率特征矩阵

通道 IMF	1	2	3	4
1	18.661	15.408	9.099 1	11.363
2	8.820 0	9.882 3	17.094	13.550
3	29.964	28.818	32.258	39.062
4	151.89	185.19	101.01	105.26
5	62.899	43.892	55.865	34.129
6	101.11	71.912	50.291	18.101

式中， x_i 、 y_i ($1 \leq i \leq n$) 为两功率矩阵的各个元素，且有 $0 \leq m \leq 1$ ， m 值越大，说明两矩阵越相似，反之则不相似。对于本研究而言，当 m 大于 0.9 时，可认为两矩阵较为相似；而当 m 小于 0.7 时，则认为两矩阵不相似。

4 GIS异常振动模拟平台

4.1 试验模拟

鉴于GIS筒体结构的复杂性，试验室条件下，通过模拟GIS筒体的一段，构造简单的微粒振动缺陷和螺钉松动故障，采集故障信号，计算出多次测量下的，基于两种故障类型的功率矩阵相似度 m ，以检测上述振动分析方法的可靠性。

图5为GIS模拟试验段，该器材是实际GIS箱体

按各部件同等比例缩小制得。使用不锈钢材料，导体外半径20 mm，外壳内半径60 mm，选取1 mm直径的金属微粒模拟GIS筒体自由金属颗粒缺陷，通过拧松装置底座一根或多根螺钉来模拟松动故障。试验室条件下，通过给GIS模拟试验段进行加压处理，腔内金属微粒跳动，撞击模拟壳体表面，通过吸附在壳体表面的传感器进行振动信号的监测。使用压电式传感器采集振动信号，采用带宽100 MHz，采样频率2 GHz的示波器记录信号，使用放大倍数为5 000的功率放大器对试验GIS段进行加压。图6为构筑的试验室仿真平台。

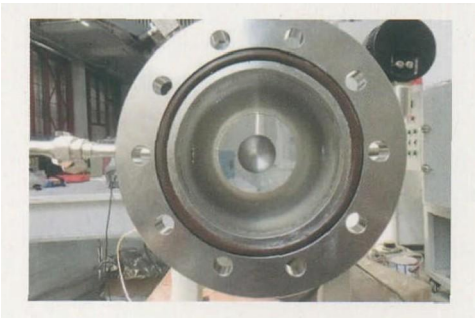


图5 GIS模拟试验段

4.2 过程及分析

4.2.1 自由微粒模拟试验

分别选择直流、交流和方波三种类型的电

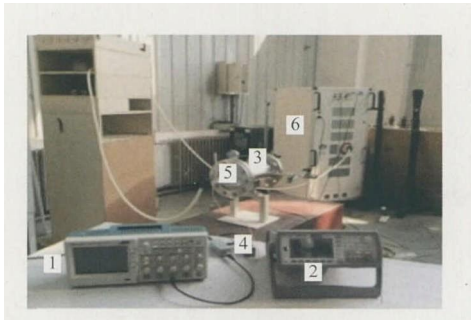


图6 GIS试验平台

1—示波器 2—信号发生器 3—传感器 4—前置放大器
5—GIS试验段 6—功率放大器

压，对GIS模拟筒体进行加压处理，严格控制所加电压值，使其出现自由微粒滚动、非贯穿性跳动和贯穿性跳动三种工况^[18]，记录9组波形，移除自由微粒记录9组电压值下的正常GIS筒体振动信号，对18组振动信号进行EMD算法处理，依据式（6）计算出对应的功率特征矩阵。依据式（7），计算出9组正常与自由微粒振动信号功率特征矩阵相似度，如表2所示。

表2 正常与自由微粒振动信号功率特征矩阵相似度

微粒状态	电压类型		
	直流	交流	方波
滚动	0.324 6	0.301 8	0.274 9
非贯穿性跳动	0.310 2	0.284 5	0.263 2
贯穿性跳动	0.256 2	0.296 3	0.300 1

4.2.2 螺钉松动故障模拟试验

记录GIS模拟筒体在20 kV、30 kV和50 kV三种交流电压下的正常振动信号波形，通过拧松GIS模拟筒体单根、双根及多根固定螺钉来模拟螺钉松动故障，并分别加上3组交流电压（即20 kV、30 kV和50 kV），对12组振动信号进行EMD算法处理，依据式（6）计算出对应的功率矩阵。依据式（7），计算出9组正常与螺钉松动信号功率特征矩阵相似度，如表3所示。

表3 正常与螺钉松动信号功率特征矩阵相似度

螺钉松动数目	电压等级/kV		
	20	30	50
单根	0.670 1	0.602 2	0.589 3
双根	0.624 3	0.597 5	0.547 8
多根	0.601 1	0.586 8	0.537 7

由表2可知，三种电压形式下，微粒贯穿性跳动功率特征矩阵相似度平均值为0.284 2，与正常波形相似度最低，表明电压等级越高微粒振动危害越大。由表3可知电压等级越高，正常与螺钉松动信号功率特征矩阵相似度越低，故障威胁越大，螺钉松动程度同样影响振动信号波形分布。

分别计算两表中各元素的平均值，得到 $m_{\text{微粒振动}}=0.294\ 8$ ， $m_{\text{螺钉松动}}=0.613\ 7$ 。由此可以看出，微粒振动时振动特征与正常工况之间的差异，要大于螺钉松动所引起的差异。这是由于螺钉松动仅是GIS外部振动，这种振动对GIS内部结构没有损害，仅增大了振动的幅值，通过螺钉拧紧等处理可以有效地减小这类振动的损害。而微粒振动是GIS内部引起的振动，这类振动早期幅值可能不会太大，但容易引发局部放电产生高频信号，因此振动信号会有明显差异。螺钉作为受迫振动部件，不直接产生振动，它的松动仅改变振动传播幅值，因此对振动信号的影响较小。

5 结束语

本文通过利用EMD算法对振动信号进行处理，得到多组能够反映振动信息的多级征模态函数，运用功率谱密度函数和向量空间模型得到能够反映机械故障类型的矩阵相似度 m 判据。利用试验室模拟的GIS筒体对判据进行验证，得到结论：在实际应用时，可以通过比较振动信号功率矩阵相似度，实现对GIS机械状态的检测。若某GIS振动信号功率矩阵与正常工况矩阵的相似度 m 大于0.9时，说明其运行正常。而当其相似度 m 小于0.7时，说明有可能发生了故障，值得关注。具体来说，当 m 较小时，有可能是振源结构本身发生了变化，如微粒振动；而当 m 较大时，则有可能为螺钉或其他附属部件松动故障。显然，当诸如此类的两种或两种以上故障同时发生时，其正常工况下功率矩阵相似度将会较单一故障下变得更小。

鉴于GIS结构的复杂性，真实GIS机械故障可遇而不可求，下一步还需要对更多故障进行模拟试验与分析，并逐步完善GIS机械状态特征数据库，这可为建立GIS在线监测及故障诊断系统提供

理论依据与实践指导。

参考文献

- [1] 吴广宁. 电气设备状态监测的理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版, 2005.
- [2] 胡红红, 钟建灵, 郑亚君. 运行中SF₆全封闭组合电器的故障检测 [J]. 中国电力, 2010, 43 (12): 19-22.
- [3] 高自伟, 郑哲钰, 周威勇. 基于声测法的GIS局部放电测试及故障分析 [J]. 东北电力技术, 2010, 31 (7): 1-3.
- [4] Judd M D, Li Yang, Hunter I B B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors, part I: sensors and signal interpretation [J]. IEEE Transactions on Electronics Insul Mag, 2005, 21 (3): 5-14.
- [5] Contin A, Cavallini A, Montanari G C, et al. Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals [J]. IEEE Transactions on Dielectr Electronics Insul, 2002, 9 (4): 335-348.
- [6] Kreuger F H, Morshuis P H F, Sonneveld W A. Optical detection of surface discharges [J]. IEEE Transactions on Electronics Insul, 1988, 23 (1): 447-449.
- [7] 唐炬, 李涛, 胡忠, 等. 两种常见局部放电缺陷模型的SF₆气体分解组份对比分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (3): 487-492.
- [8] 徐天乐, 马宏忠, 陈楷, 等. 基于振动信号HHT方法的GIS设备故障诊断 [J]. 中国电力, 2013, 39 (3): 39-42.
- [9] 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.
- [10] 王文利, 段宝岩, 等. 设备远程监测诊断系统 [J]. 机电一体化, 1999 (6).
- [11] 张永宏, 许学明. 基于小波包变换的EMD算法在超声信号处理中的应用 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2012, 4 (5): 442-446.
- [12] 杨德昌, Rehtanz C, 李勇. 基于改进希尔伯特-黄变换算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 电机工程学报, 2011, 31 (10): 102-107.
- [13] 胡劲松, 杨世锡, 吴昭同, 等. 基于经验模态分解的旋转机械振动信号滤波技术研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23 (2): 96-98.
- [14] 汪沅, 朱瑞荪. 基于小波除噪和经验模式分解的信号分析方法 [J]. 机械研究与应用, 2008, 21 (5): 99-101.
- [15] 姚熊亮, 康庄, 戴伟. 经验模态分解 (EMD) 法及其在流噪声实验研究中的应用 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28 (1): 49-54.
- [16] Wang B H, Wang Y L, Chen H, et al. Robust DOA estimation and array calibration in the presence of mutual coupling for uniform linear array [J]. Science in China Ser. F Information Sciences, 2004, 47 (3): 348-361.
- [17] Wang L B, Chen C. Direction-of-arrival estimation in the presence of mutual coupling based on joint sparse recovery [J]. Journal of Electronics (China), 2012, 29 (5): 408-414.
- [18] 谭向宇, 郭浩, 张乔根. 直流下GIS内运动金属微粒的超声波特性及状态识别 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (2): 391-395.

(收稿日期: 2015-12-08) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告