

基于SVM信号延拓改进的EEMD方法*

张梅军¹, 陈灏¹, 曹勤², 王闯¹

(1. 解放军理工大学野战工程学院 南京, 210007) (2. 国信证券股份有限公司基建办 深圳, 518001)

摘要 为了抑制经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称EMD)中出现的端点效应和模态混叠现象, 在信号组综合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, 简称EEMD)的基础上, 从抑制信号干扰和噪声污染影响以及三次样条函数插值拟合误差逐级传播方面, 提出利用信号支持向量机(support vector machines, 简称SVM)延拓改进EEMD。通过对仿真和实测信号研究, 比较了EMD和EEMD的分解, 提出改进的EEMD方法不仅减少了虚假模态分量、避免了模态混叠, 而且有效抑制了端点效应。与基于镜像延拓改进的EEMD方法比较表明, 本研究方法的时频谱更加清晰, 虚假模态分量更少, 有效解决了端点效应引起的分解失真问题。

关键词 经验模态分解; 支持向量机; 端点效应; 模态混叠; 故障诊断

中图分类号 TN911.7; TH165.3

引言

EMD方法^[1]作为一种信号分析理论, 适用于处理实际非线性、非平稳信号, 在医学^[2]、地震^[3]、目标识别^[4]和机械故障诊断^[5-6]等领域得到广泛应用。由于EMD分解存在端点效应和模态混叠现象, 影响分析结果的正确性和精确度, 从而影响其在实际机械故障诊断中的应用。目前, 许多学者致力于端点效应的研究, 胡爱军等^[7]用波形特征匹配延拓数据, 提高经验模态分解精度。窦东阳等^[8]采用时间序列模型预测延拓改进Hibert-Huang变换谱的端点效应。王婷等^[9]利用相似距离端点延拓方法抑制EMD端点效应问题。还有镜像拓延、用多项式拟合和自回归模型处理等端点效应处理方法。文献^[10]提出了一种白噪声辅助数据分析方法——信号组综合经验模态分解, 被认为是EMD方法改进的一个重要成果^[11], 在研究信号的局部特征方面具有独特的优越性, 适合于处理非线性、非平稳信号。但EEMD方法只是部分抑制了端点效应和模态混叠现象, 如何改进EEMD方法有效消除端点效应和模态混叠现象就成为其在实际机械故障诊断中成功应用的关键。

笔者在EEMD方法的基础上, 从信号干扰和噪声污染影响以及三次样条函数插值拟合误差逐级传

播方面入手, 研究基于SVM信号延拓改进的EEMD方法, 以消除端点效应和模态混叠现象。

1 EEMD方法和端点效应

1.1 EEMD方法

EEMD方法是在EMD“筛分”的基础上加入白噪声实现对信号的分解, 它的主要思想是基于统计学中对某个被分析量通过多次测量求平均值做为真值。图1为EEMD方法的实现过程, 图中: C 为内禀模态函数(intrinsic mode function, 简称IMF)分量; R 为余量。

1.2 EEMD方法的端点效应和模态混叠现象

EMD和EEMD方法采用三次样条函数插值获得信号的上、下包络和瞬时频率, 由于三次样条插值不能确定信号两端点是否为极值点, 使分解得到的第1个IMF分量在端点处产生误差, 第2个IMF分量又建立在由原始信号数据减去第1个IMF分量的残余项的基础上进行, 以此类推, 导致拟合误差由端点向内逐渐传播、不断积累、逐级放大, 产生虚假的IMF分量。特别是当信号比较短时, 端点效应会严重影响EMD和EEMD的分解质量, 使分解出来的IMF没有实际物理意义。对于多成分复杂信号, 需

* 国家自然科学基金资助项目(51175511)

收稿日期: 2012-03-10; 修改稿收到日期: 2012-05-08

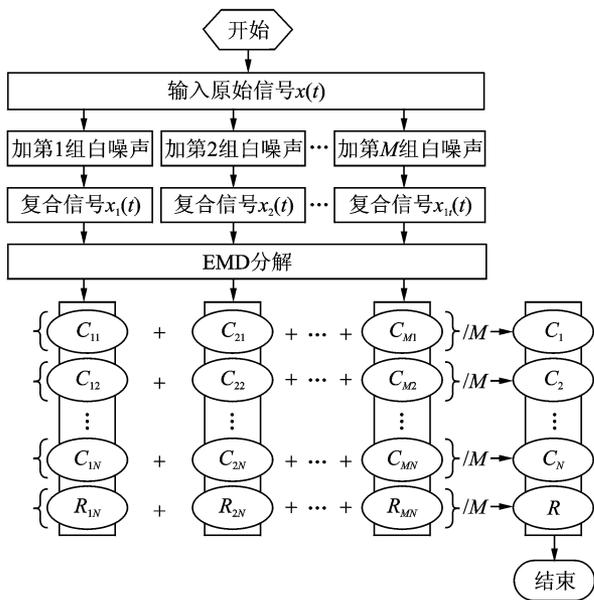


图1 EEMD方法流程

要进行多次EMD, EEMD分解, 端点效应就会由上至下逐级放大, 严重淹没信号的端点特征, 甚至“污染”信号内部区域, 产生许多虚假IMF分量, 造成分解结果失真。

2 利用SVM信号延拓改进的EEMD

笔者在EEMD方法的基础上, 提出了基于SVM信号延拓改进EEMD的方法。首先, 从抑制信号干扰和噪声污染开始研究EEMD自适应消噪; 然后, 改进三次样条函数插值包络线出现“过冲”和“欠冲”现象; 最后, 利用SVM预测功能对信号序列进行数据EEMD延拓, 对EEMD方法进行改进, 达到基本消除端点效应和模态混叠现象, 具体步骤如下。

1) EEMD自适应消噪, 去除信号中的噪声成分。

2) 对消噪后的信号 $x(t)$ 进行SVM延拓。基本原理是: a. 利用回归SVM对消噪后的信号进行拟合; b. 利用SVM的预测功能进行信号延拓。通过延拓使信号的端点向外延伸, 增加了可处理数据的长度, 从而提高EEMD的分解精度。

3) 在延拓后的信号中加入一组均值为零、方差相等的随机白噪声序列。

4) 将延拓和加噪处理后得到的复合信号 $x_1(t)$ 进行EMD。在分解过程中改进三次样条插值: a. 将原始信号的所有极值点用直线段连接形成上、下包

络折线以降低“过冲”或“欠冲”现象; b. 求上、下包络线的平均包络折线; c. 将平均包络折线的拐点用三次样条曲线平滑连接起来形成原来信号的均值包络。分解后得到 m 组IMF分量 $\{[c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}], [c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2n}], \dots, [c_{m1}, c_{m2}, \dots, c_{mn}]\}$ 和 m 组余量 $[r_{1n}, r_{2n}, \dots, r_{mn}]$ 。

5) 求出 m 组IMF分量相应的均值 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 和 m 组余量的均值 R

$$x_0(t) = R + \sum_{i=1}^n C_i$$

其中

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{in}$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{i1} \\ C_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{i2} \\ \vdots \\ C_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{in} \end{cases}$$

6) 截断SVM延拓部分, 做为原始信号 $x(t)$ 最终的分解结果。

3 基于SVM改进的EEMD方法对仿真信号的验证

为了验证EEMD改进方法的有效性, 设计一个仿真信号 x , 信号 x 由频率为200 Hz的正弦分量 a , 频率为50 Hz的余弦分量 b 和一个直流分量 c 叠加而成, 如图2所示。

$$x(t) = \sin(400\pi t) + 2\cos(100\pi t) + 2$$

图3为改进的EEMD方法对仿真信号 x 的分解及相应的Hilbert时频谱。改进的EEMD分解得到3阶IMF分量 $C_1 \sim C_3$ 和1阶余量 R , 如图3(a)所示。信号两侧端点基本没有产生波动。第1阶IMF分量 C_1 与分量 a 对应; 第2阶IMF分量 C_2 与分量 b 对应; 余量 R 与仿真信号的分量 c 对应。分解结果中产生了1阶虚假分量 C_3 , 但误差极小, 这说明改进的EEMD分解结果与仿真信号 x 构成分量基本一致。图3(b)为改进的EEMD分解得到的Hilbert时频谱, 与EMD分解的时频谱(如图4所示)和EEMD分解的时频谱(如图5所示)相比, 时频谱图更清晰, 说明虚假模态分量少; 改进的EEMD分解的时频谱两侧端点基本没有产生波动, 说明基本抑制了EMD和EEMD分解中的端点效应, 分辨率也非常高。因此, 基于SVM延

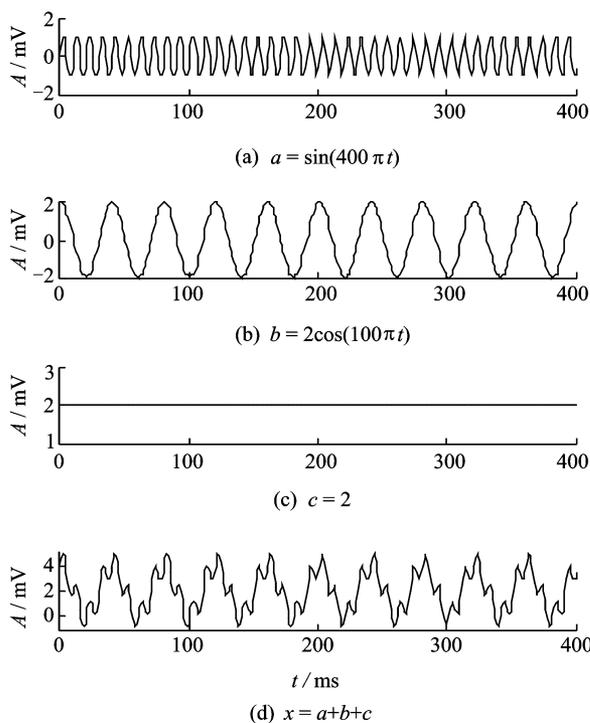
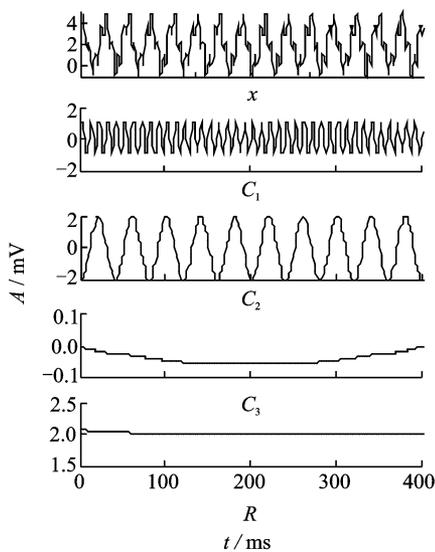
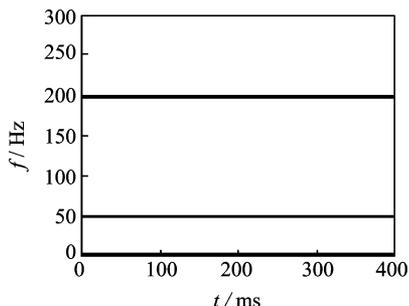


图2 仿真信号及其构成分量



(a) 各阶IMF分量



(b) Hilbert时频谱

图3 改进的EEMD方法对仿真信号的分解结果

拓改进EEMD的方法不仅解决了模态混叠,而且消除了端点效应,还原了仿真信号本质和特征,分解效果理想。

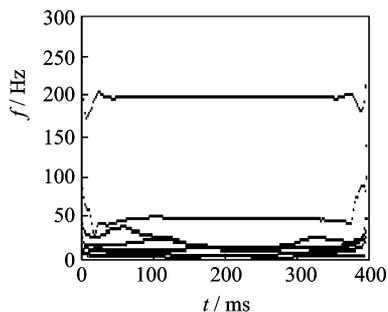


图4 仿真信号EMD分解的Hilbert时频谱

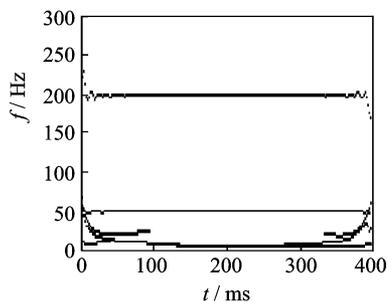


图5 仿真信号EEMD分解的Hilbert时频谱

4 基于SVM延拓改进的EEMD方法对实测信号的验证

4.1 基于SVM延拓改进的EEMD方法与EMD和EEMD方法的比较

为了验证笔者提出的基于SVM延拓改进EEMD方法的分析效果,采用改进的EEMD方法对实测振动信号进行分解,如图6所示,并与EMD, EEMD分解得到的Hilbert时频谱进行比较。

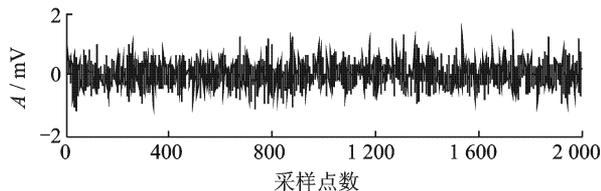


图6 某实测轴承振动信号

图7为改进的EEMD方法对实测信号的分解结果,共得到10阶IMF分量和1阶余量,各阶IMF分量两端基本没有出现端点效应。图8为改进的EEMD方法对实测信号分解得到的Hilbert时频谱。与EMD分解如图9所示和EEMD分解如图10所示结果相比,时频谱更加清晰,说明虚假模态分量明显

减少;且两侧端点基本没有产生波动,分辨率高,这说明改进的EEMD方法有效抑制了端点效应。

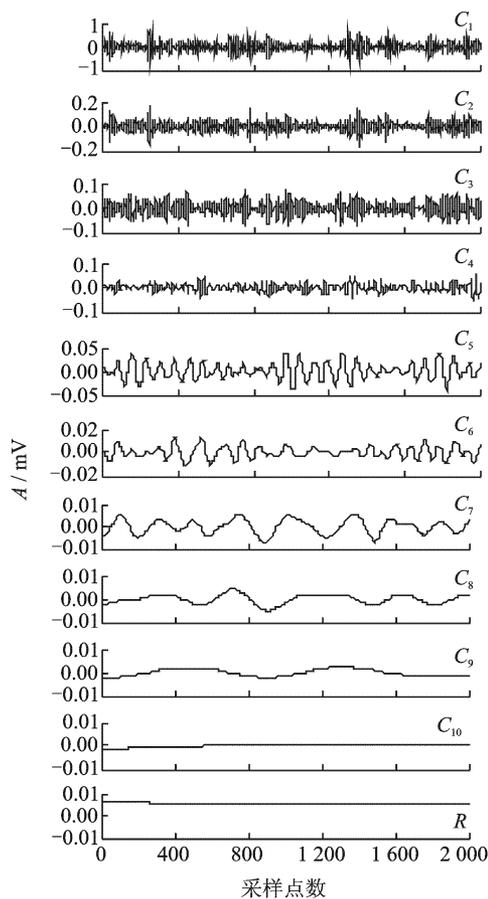


图7 改进的EEMD方法对实测信号的分解

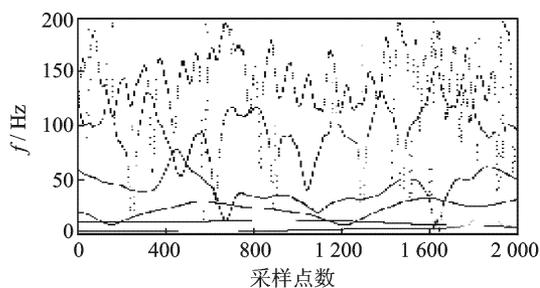


图8 实测信号EEMD改进方法的Hilbert时频谱

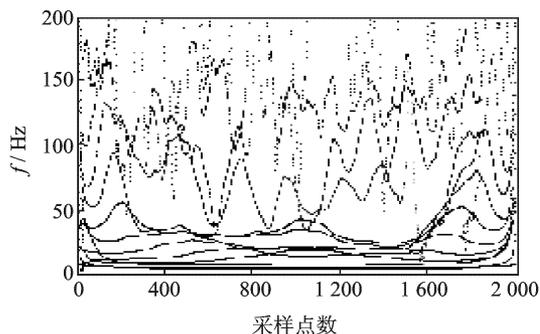


图9 实测信号EMD分解的Hilbert时频谱

4.2 基于SVM延拓改进的EEMD方法与基于镜像延拓改进的EEMD方法的比较

笔者对实测振动信号(如图11所示)分别用基于SVM延拓改进的EEMD方法和基于镜像延拓改进的EEMD方法效果进行了比较。

图12为基于SVM延拓改进的EEMD方法对实

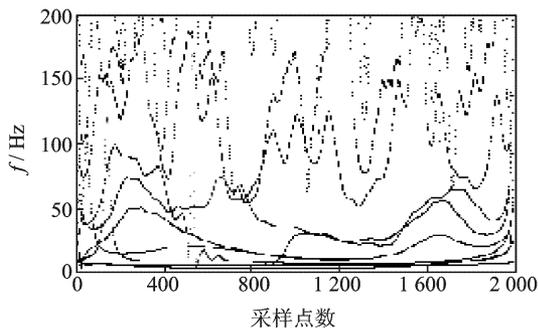


图10 实测信号EEMD方法的Hilbert时频谱

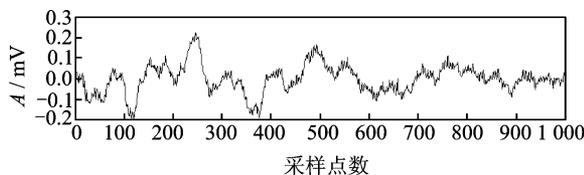


图11 某实测液压缸振动信号

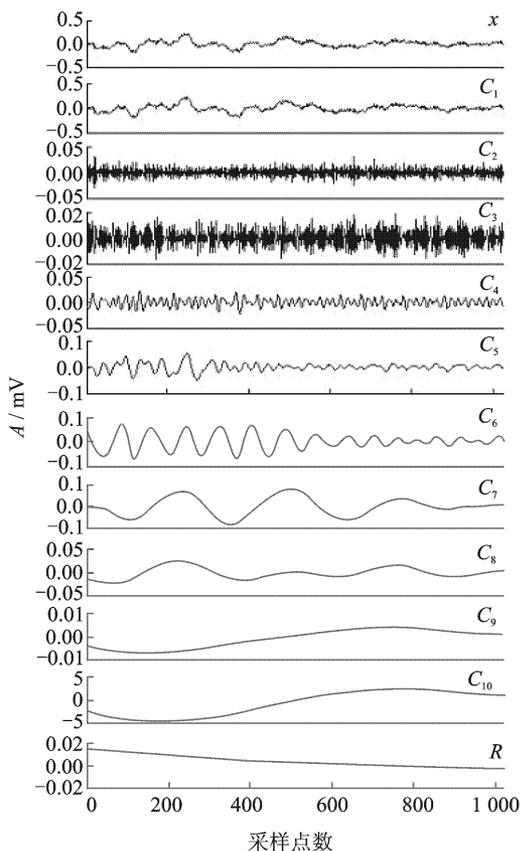


图12 基于SVM延拓改进EEMD分解

测振动信号进行分解,得到10阶IMF分量和1阶余量,其中,1~7阶IMF分量基本不存在端点效应,8~10阶IMF分量两端有轻微的振荡,端点效应不明显,分解效果较为理想。

图13为基于SVM延拓改进的EEMD方法对实测振动信号的Hilbert时频谱。与基于镜像延拓改进的EEMD的Hilbert时频谱(如图14所示)比较,时频谱更加清晰,瞬时频率高频与低频界限清楚,虚假模态分量更少;时频谱图两端的振荡更微弱,端点效应抑制效果更为理想。

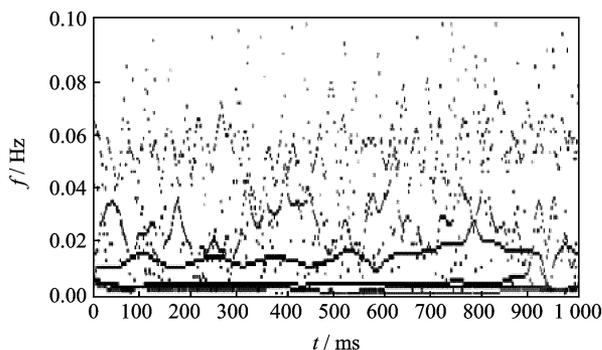


图13 基于SVM延拓改进的EEMD时频谱

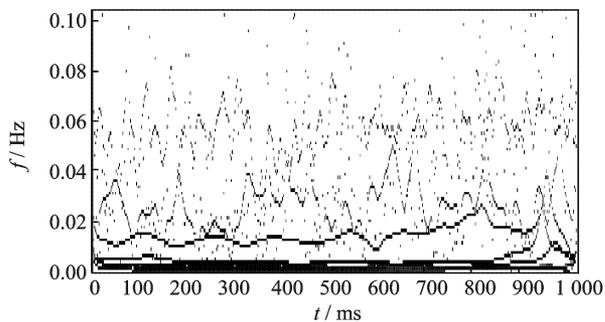


图14 基于镜像延拓改进的EEMD时频谱

5 结论

1) 从引起端点效应的原因着手,提出了基于SVM信号延拓改进的EEMD方法措施:阈值降噪抑制脉冲干扰和噪声污染、改进三次样条插值方法拟合包络线抑制“过冲”和“欠冲”现象、信号SVM延拓解决端点效应问题。

2) 仿真信号研究表明:基于SVM信号延拓改进的EEMD方法与EMD、EEMD方法比较,Hilbert时频谱图更清晰,虚假模态分量明显减少;时频谱两端没有产生波动,抑制了EMD和EEMD分解中的端点效应,有效还原了仿真信号的本质和特征。

3) 实测振动信号研究表明:基于SVM信号延拓改进的EEMD方法比与EMD和EEMD分解时频

谱更加清晰,虚假模态分量明显减少;两侧端点基本无波动,有效抑制了端点效应。与基于镜像延拓改进的EEMD时频谱比较,基于SVM信号延拓改进的EEMD方法时频谱更加清晰,虚假模态分量更少;因此,本研究方法不仅抑制了模态混叠现象,而且有效解决了端点效应引起的分解失真问题。

参 考 文 献

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceeding of the Royal Society London A, 1998, 454: 903-995.
- [2] 徐文良,孟明,马玉良. HHT方法在人体下肢表面肌电信号分析中的应用[J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 297-302.
Xu Wenliang, Meng Ming, Ma Yuliang. A HHT method application in the body of the lower limbs of multi-channel semg analysis [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(3): 297-302. (in Chinese)
- [3] 公茂盛,谢礼立. HHT方法在地震工程中的应用之初步探讨[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 39-43.
Gong Maocheng, Xie Lili. HHT method preliminary discussion in the application of earthquake engineering [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(3): 39-43. (in Chinese)
- [4] 袁朝庆,赵丹,才英俊. 基于经验模态分解法及波形指数识别简支梁桥损伤位置[J]. 无损检测, 2007(2): 123-126.
Yuan Chaoqing, Zhao Dan, Cai Yingjun. Based on the empirical mode decomposition method and waveform index recognition simply supported girder bridge damage location [J]. Non-destructive Testing, 2007(2): 123-126. (in Chinese)
- [5] Li Hui, Zhang Yuping. Bearing faults diagnosis based on EMD and Wigner-Ville distribution [C] // The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. China, Dalian: [s. n.], 2006.
- [6] 赵玲,刘小峰,秦树人,等. HHT新方法及其在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 30(2): 207-211.
Zhao Ling, Liu Xiaofeng, Qin Shuren, et al. A HHT new method and the gear box fault diagnosis application [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 30(2): 207-211. (in Chinese)
- [7] 胡爱军,安连锁,唐贵基. Hilbert-Huang变换端点效应

处理新方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 154-158.
Wu Aijun, An Liansuo, Tang Guiji. A end effect new method of Hibert-Huang transformation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 154-158. (in Chinese)

- [8] 窦东阳, 赵英凯. 利用AARIMA改进HHT端点效应的方法[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2): 249-253.
Dou Dongyang, Zhao Yingkai. A improved HHT end effect method using AARIMA [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 249-253. (in Chinese)
- [9] 王婷, 杨莘元, 李冰冰. 一种改善EMD端点效应的新方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(5): 23-26.
Wang Ting, Yang Xinyun, Li Bingbing. A kind of new method improve the EMD end effect [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2009, 14(5): 23-26. (in Chinese)

[10] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

[11] Lei Y G, He Z J, Zi Y Y. Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1327-1338.



第一作者简介:张梅军,女,1958年12月生,副教授、硕士生导师。主要研究为机械故障诊断、工程机械动力学。曾发表《工程机械动力学》(北京:国防工业出版社,2012年)等论著。

E-mail: Dingdf0365@sina.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊入选EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,为双月刊,每逢双月末出版,每本定价20元,全年120元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn