

文章编号:0253-9993(2009)10-1322-06

GPS 用于矿区沉陷区地表高精度动态监测的可行性研究

张安兵^{1,2}, 张兆江^{1,2}, 高井祥², 刘新侠¹

(1. 河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056021; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在分析正交小波变换和 EMD 方法处理 GPS 信号能力的基础上, 结合矿区沉陷区地表移动特点, 提出小波多尺度降噪-EMD 变形量信息提取 GPS 变形监测数据处理模型。研究表明: 对包含非线性趋势的测量信号, 利用小波正交变换进行去噪和提取 EMD 分段信号段, 再利用 EMD 分解进行变形趋势提取, 具有较高的提取精度; 利用小波多尺度降噪-EMD 分段变形量提取数据处理模型处理 GPS 变形监测数据, 可以获得高精度的变形量信息, 动态变形监测垂直方向的精度可以达到毫米精度。

关键词: GPS; 矿区沉陷区; 变形监测; 小波变换; EMD

中图分类号: TD325.4 **文献标识码:** A

Feasibility study on mining surface subsidence high-precision monitoring using GPS

ZHANG An-bing^{1,2}, ZHANG Zhao-jiang^{1,2}, GAO Jing-xiang², LIU Xin-xia¹

(1. School of Resource, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China; 2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the analysis of GPS signals by the orthogonal wavelet transform and EMD (empirical mode decomposition) filter methods, and considered the characteristics of the surface mining subsidence, a new noise filter and trend extraction model were built up. Then, simulated data and real data (i. e., GPS data) were used to test the method separately. The following are the conclusions drawn from these tests: for signal with nonlinear trend, theoretic analysis and simulation results show that the new noise filter and trend extraction model is superior to EMD and union simply wavelet and EMD method, it not only can extract instantaneous features, but also reduce the decomposition layers of signals and accumulative end errors on later decomposition. This method improves a lot of accuracy of the extracted deformation; dealing with GPS deformation monitoring data by this model, available high-precision deformation information can be got. The result shows that the accuracy of dynamic monitoring of the vertical deformation can be achieved mm precision.

Key words: GPS; mining surface subsidence; deformation monitor; wavelet transform; empirical mode decomposition (EMD)

地表点动态下沉是井下采矿工作面推进过程中岩层移动随时间变化在地表上的动态反映, 是掌握地表

收稿日期: 2008-12-25 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40774010); 教育部博士点基金资助项目(200802900501); 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(200812)

作者简介: 张安兵(1978—), 男, 山东鄄城人, 讲师, 博士。Tel: 0310-3123128, E-mail: liuxinxia999@163.com

动态移动和变形规律的基础数据素材^[1]. 然而由于监测仪器、监测地表地形、监测时间及监测精度限制, 人们往往无法获得高精度实时监测动态数据^[2-3]. 本文结合 GPS-RTK 动态实际监测数据, 借助小波及 EMD 数据处理方法, 提出小波多尺度降噪-EMD 分段提取 GPS 沉陷区变形监测数据趋势项处理模型, 结合水准测量及全站仪测量数据, 对比结果表明采用该方法可以获得高精度的监测数据.

1 EMD 滤波去噪及趋势项提取方法

EMD 方法是由美国 NASA 的 Huang 博士等提出的一种信号分析方法^[4-5]. 它依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解, 无须预先设定任何基函数. EMD 方法在理论上可以应用于任何类型的信号分解, 在处理非平稳及非线性数据上具有非常明显的优势^[6]. 文献 [7] 研究了 EMD 在信号趋势项提取中的应用, 得到了一些有益的结论, 本文在此基础上, 结合实际工程应用, 进一步提出小波多尺度降噪-EMD 分段趋势项提取研究思路, 研究证实该方法能够有效的提高变形量提取精度.

EMD 的基本思想是, 认为任何复杂的信号都是由一些相互不同的、简单的、非正弦函数分量信号组成. 本征模函数 IMF 信号需满足以下 2 个条件: ① 待分析信号中的极大点和极小点数之和与过零点的个数之差不超过 1; ② 由极大点所构成的上包络线与极小点所构成的下包络线相对时间 t 轴对称. 本征模函数 IMF 两零点之间的每一个波动周期中只有一个单纯的波动模式, 没有其他叠加, 是 EMD 中分解信号的基本单元. 一维信号 $x(t)$ 的分解可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n I_{MF_i}(t) + r_n(t), \quad (1)$$

其中, $I_{MF_i}(t)$ 为所得的 i 个 IMF; $r_n(t)$ 为单调残差函数. EMD 信号处理技术的处理步骤见文献 [2-9].

信号重构把所有的 IMF 信号分量以及参与信号分量相加即可完成, 见式 (1). EMD 分解的本质是对一个信号进行平稳化处理, 产生一系列具有不同特征尺度的平稳的窄带信号.

对原始信号完成上述分解步骤后, 第 1 个 IMF 分量 $h_1(k)$ 中包含有原信号中时间尺度最小的成分, 随 IMF 阶数的增加, 其对应频率成分逐渐降低, 余量 $r_i(t)$ 中则包含频率最低的成分. EMD 分解的收敛准则使得分解余量 $r_i(t)$ 为单调函数, 则其周期大于信号的记录长度, $r_i(t)$ 即为信号的趋势项.

2 多尺度小波降噪-EMD 趋势项信息提取方法

利用小波滤波进行多尺度分析, 对原始信号中包含的各种频率成分进行分解, 去除观测序列的噪声 (测量误差), 提取变形监测对象的动态特性, 评定观测结果的质量, 在工程实践中有很高的应用价值^[10].

假设一加噪信号 $Y(i) = S(i) + N(i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 其中, N 为数据长度; $S(i)$ 为信号在 i 时的值; $N(i)$ 为独立同分布的高斯白噪声 $N(0, \delta^2)$, 为了去除噪声 $N(i)$ 尽可能地恢复信号 $S(i)$, 可采用基于阈值的正交小波变换方法:

(1) 选择合适分解尺度, 对加噪信号 Y 作二进正交小波变换, 得出各尺度小波系数 W_Y 和尺度系数;

(2) 按照某种准则选取阈值 t 和非线性阈值函数 $f(W_Y, t)$, 使得 $\widehat{W}_Y = f(W_Y, t)$, 其中 \widehat{W}_Y 为经过阈值处理后的小波系数;

(3) 对 \widehat{W}_Y 及尺度系数进行重构, 得到信号 S 的估计 \hat{S} .

其中, 分解尺度、阈值以及非线性阈值函数的选取可根据实际信号进行选择.

本文在基于以上 2 种算法分析及研究的基础上, 针对含非线性趋势的含噪声信号提出多尺度小波去噪 EMD 变形信息提取算法, 提高了去噪效果和趋势项提取精度. 该方法的基本步骤:

(1) 利用正交小波变换算法进行信号噪声识别及消噪计算;

(2) 如需趋势分段, 判断信号的整体运移趋势, 求解信号分段节点;

(3) 利用 EMD 信号分解算法进行消噪分段后信号的趋势项提取. 采用分段幂函数插值代替 3 次样条

插值算法,减小信号端点飞翼现象;

(4) 整体趋势项整合.

3 模拟数据分析比较

设数据模型为 $u_i = y_i + e_i$, 其中, y_i 为资料序列 u_i 中的信号量; e_i 为正态白噪声序列. 模拟信号为

$$y_i = at + \sum_{k=1}^4 b_k \sin(2\pi t/p_k) + 0.5 \text{randn}.$$

模型中, 仅以最复杂的非线性模型进行研究, 式中趋势项 at 用 $a(t/1000 - 2.5)^2$ 代替, $a = 0.2$, $k=1 \sim 4$, p_k 分别为 1200, 600, 300, 150 s. 为方便比较, 正弦分量幅值均设为 1, 即 $b_k = 1$.

采样间隔 $\Delta t = 1$ s, 样本数据为 5000 个, 为了验证多尺度小波联合分段 EMD 去噪及 EMD 趋势项提取效果, 采用小波、EMD 分解、小波-EMD 分解及多尺度小波联合分段 EMD 对模拟信号进行了降噪及趋势项提取的仿真研究. 其中小波消噪采用光滑性较好的正交小波 sym8 小波对信号进行 4 层小波分解, 然后利用基于 Heursure 启发式阈值的软阈值消噪法对信号消噪. 为了对上述算法进行定量比较分析, 选用 3 个评价指标^[3]:

(1) 滤波后信号部分的 RMS 值 S_{RMS} . $S_{\text{RMS}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\bar{u}_i(i) - y_i(i)]^2 \right]^{1/2}$, 其中, N 为信号的总长度; \bar{u}_i 为滤波后的信号; y_i 为不含噪声的原始参考信号.

(2) 滤波后噪声部分的 RMS 值 N_{RMS} . $N_{\text{RMS}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\bar{u}_i(i) - u_i(i)]^2 \right]^{1/2}$, 其中, u_i 为含噪声的原始参考信号.

(3) 去噪后的信号与原始参考信号的互相关系数 R . $R = \frac{\text{Cov}(\bar{u}_i, y_i)}{\sigma_{\bar{u}} \sigma_y}$, 其中, $\text{Cov}(\bar{u}_i - y_i)$ 为 \bar{u}_i 与 y_i 的协方差; $\sigma_{\bar{u}}$, σ_y 分别为 \bar{u}_i 和 y_i 的标准差. 此处借用 R 来评价去噪后的信号与原始参考信号波形的相似度.

模型仿真效果分析: 小波去噪及 EMD 去噪试验原始信号及去噪后的仿真如图 1, 2 所示, 细部分层分解如图 2, 3 所示. 在原始信号的去噪方面从图 1 第 2, 3 层比较发现, 两者均具有较强的去噪功能, 小波去噪的 $S_{\text{RMS}} = 0.132$, EMD 方法的 $S_{\text{RMS}} = 0.232$, 数据处理计算, 发现在含非线性趋势项的信号提取中, 小波效果略好; EMD 方法的 N_{RMS} 对应噪声水平约为小波方法的 3 倍, 这说明小波去噪效果更好. 图 2 为

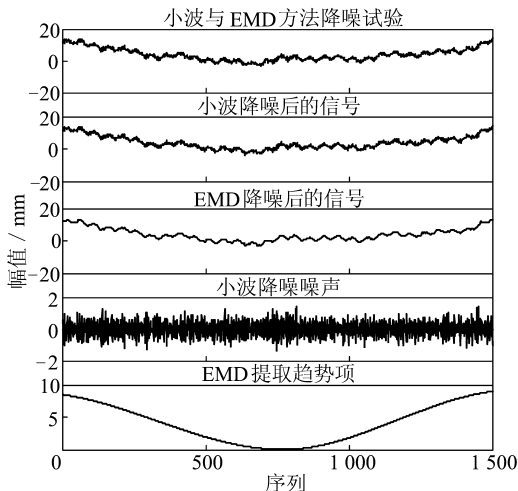


图 1 小波与 EMD 降噪试验模拟结果

Fig. 1 Simulation results of wavelet and EMD

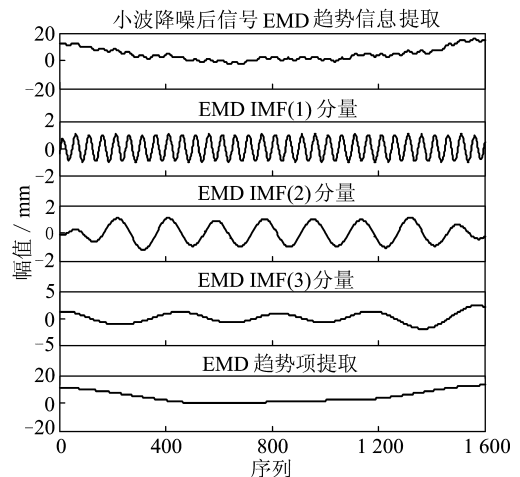


图 2 小波降噪后 EMD 信息提取

Fig. 2 Information extraction by EMD of denoised signal by wavelet

小波降噪后 EMD 分解进行趋势项提取, 图 3 为 EMD 降噪趋势项提取, 对比两图可以清晰的看出消噪后分解质量的提高, 这主要由于小波去噪能在一定程度上减少边界效应对有效信号分解的影响. 从图 2 可以看出, 由于小波降噪后信号去除了高频干扰, 信号主要成分在第 1, 2 层中就被分解出来, 因此边界效应对信号的影响只在第 1, 2 层. 而图 3 信号在分解过程中第 1, 2 层为无用的高频干扰, 且由于每层分解的边界误差积累, 传递到后面的分解层, 影响到有效信号的分解质量. 实验中发现, 如果采用趋势分段提取, 计算的 EMD 提取趋势项的 S_{RMS} 和 N_{RMS} 的值, 线性趋势提取精度要 3 倍以上于非线性趋势, 基于这个原因, 本文利用小波降噪后信号进行了趋势分段, 并与整体提取趋势结合原始信号进行了比较, 未分段提取趋势项的 $S_{RMS} = 0.691$, $N_{RMS} = 1.842$, $R = 0.99$, 分段后 $S_{RMS} = 0.203$, $N_{RMS} = 0.586$, $R = 1.00$. 分段后效果明显好于整体提取, 证实了分段的有效性. 分段提取仿真如图 4 所示.

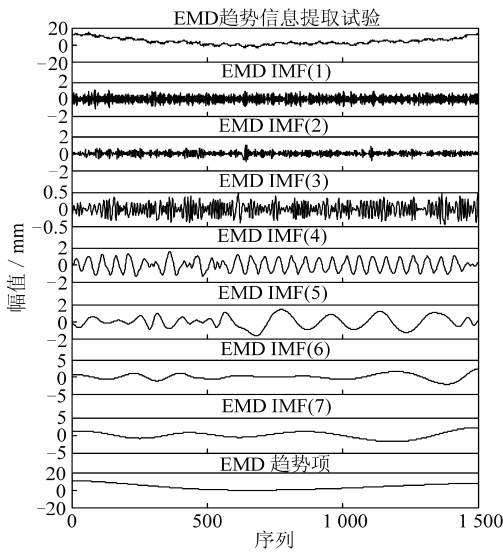


图 3 EMD 信号趋势提取试验

Fig. 3 Signal trend extraction test by EMD

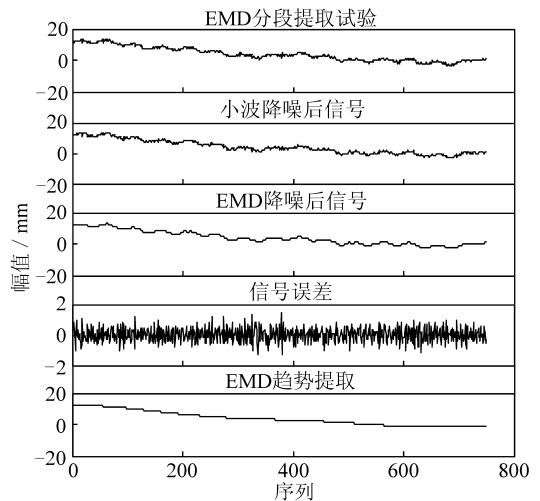


图 4 小波 - EMD 信号分段变形信息提取

Fig. 4 Wavelet - EMD model extract deformation information by segmentation

4 GPS 变形监测数据试验分析

试验选在内蒙古伊泰集团酸刺沟煤矿, 该区地面起伏较大, 属典型的丘陵地带, 采用水准测量方法进行变形监测特别是动态监测非常困难. 为准确获得地表实时动态变形数据, 选取该区沉降监测典型点位进行 GPS 动态监测试验. 试验方法采用水准仪检核、全站仪和 GPS 联合监测方法, 验证利用 GPS 进行动态变形监测的可行性. 采用国产华测 X90 系列接收机从 2008 - 12 - 03T08:00—04T18:00 连续 30 h 监测, 数据采样间隔为 5 s, 卫星截止高度角为 10°. 同时采用全站仪对该点每隔 1 min 进行 1 次监测, 水准每隔 4 h 进行 1 遍监测控制点稳定性检核, 2008 - 12 - 03T18:00 - 04T08:00, 因晚间的缘故全站仪及水准停测. 由于地表移动主要以沉降为主, 下面仍取 H 方向信号进行分析.

小波去噪及 EMD 去噪原始监测及去噪后的信号如图 5, 6 所示, 细部分层分解如图 5 所示. 在原始信号的去噪方面, 上述模拟数据试验已经证实两者均具有较强的去噪功能, 但具体到工程实际监测信号, 从图 5 可以看出, 分离的 IMF 分量仍有局部失真现象, 与 EMD 直接去噪进行趋势项信息提取试验比较, 消噪后分解质量仍得到大幅提高. 小波去噪的 $N_{RMS} = 0.016$, EMD 方法的 $N_{RMS} = 0.102$, 小波去噪效果明显较好. 图 5 最下部分分图为小波降噪后 EMD 分解进行趋势项提取, 地表沉降变形趋势得到明显显现. 对比两图可以看出, 由于小波降噪后信号去除了高频干扰, 信号分解质量和提取质量得到有效提高.

矿区采空区地表沉降监测的精度一般要求满足四等水准, 虽然利用上述方法去噪后变形信息提取质量明显提高, 但能否满足规范要求, 还应通过实际监测进行验证. 下面由观测数据中任意取出连续 90 min

的数据进行比较分析。

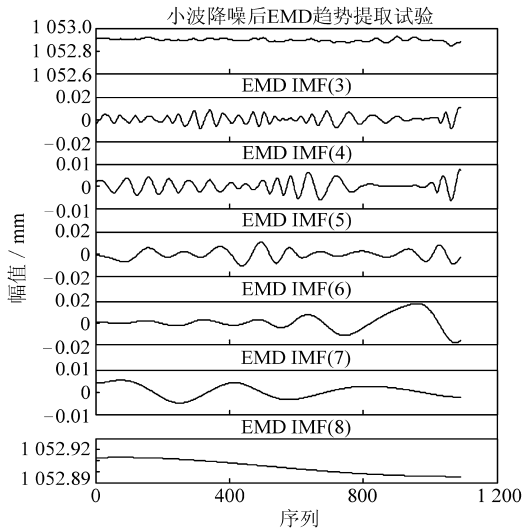


图5 小波 - EMD 方法变形量信息提取

Fig. 5 Deformation information extraction by wavelet - EMD method

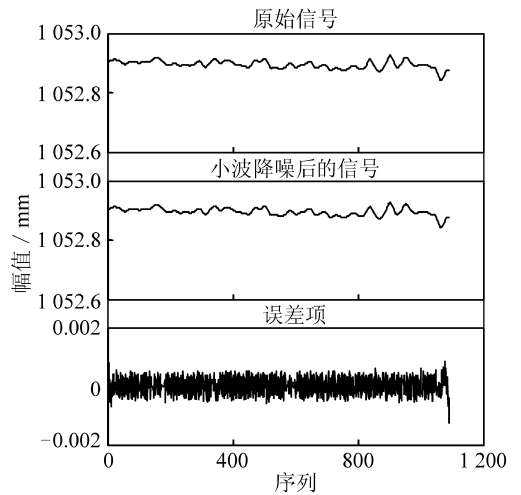


图6 变形数据小波降噪

Fig. 6 Denoise by wavelet for deformation data

表 1 是 2008 - 12 - 03T10: 20—11: 50 的观测数据, 因为利用全站仪及水准方法无法得到快速动态监测数据, 表中采取每隔 10 min 取 1 次值进行比较, 比较结果见表 1。

表 1 地表点 90 min 下沉量的数据比较

Table 1 Comparison of denoised surface subsidence data with original of a point in 90 min

mm

观测时间	全站仪配合水准方法		GPS - RTK 动态变形监测方法			
	下沉量	累计下沉量	处理前下沉量	累计下沉量	处理后下沉量	累计下沉量
10: 20	1	1	-10	-10	1	1
10: 30	3	4	8	-2	2	3
10: 40	1	5	-15	-17	1	4
10: 50	2	7	12	-5	2	6
11: 00	2	9	11	6	2	8
11: 10	1	10	8	14	2	10
11: 20	1	11	-9	5	1	11
11: 30	2	13	14	19	1	12
11: 40	1	14	-7	12	2	14
11: 50	3	17	-5	7	2	16

因水准仪与全站仪配合测量沉降精度较高, 笔者以该监测值作为真实沉降量进行比较, 由表格中处理数据来看, GPS - RTK 监测原始数据每隔 10 min 沉降量都在 ± 10 mm 左右, 而实际量仅为 1 ~ 3 mm, 监测最大误差达到 17 mm, 远远超过限差要求, 且累计下沉量与实际下沉量之差也达到 10 mm, 已失去分析意义; 对该数据经降噪处理和趋势提取后由表中可以看出, 监测下沉量与实际下沉量基本一致, 最大误差为 1 mm, 其中误差为 0.74 mm, 精度远远高于规范要求精度。

5 结 语

模拟数据和 GPS 试验数据处理发现: 小波去噪方法和 EMD 方法组合模型在监测数据去噪和趋势项提取方面具有较强的能力, 且小波去噪后再进行 EMD 趋势项提取效果好于直接进行 EMD 提取, 小波降噪可以有效防止 EMD 分解边界效应的影响; 当含非线性趋势状态下, 采用本文提出的多尺度小波降噪 - EMD

分段趋势项变形信息提取的方法提取精度基本控制在 2 mm 范围内, 效果明显优于小波降噪后直接进行 EMD 提取和 EMD 直接提取算法. 应用该模型对多路径效应误差进行改正, 可有效削弱多路径效应的影响, 提高 GPS 进行变形监测的定位精度. 本文的研究结果表明, 采用小波 - EMD 融合去噪及信息提取算法, GPS 动态监测的成果精度可以达到毫米级, 可以用于矿区采空区地表动态变形监测. 但是小波基函数的选取、阈值的确定及 EMD 边界效应的影响仍会对数据处理产生影响, 在参数选取时要进行试验分析, 经多次试验证实, 采用本文提出的模型进行数据处理时, 小波阈值可以选择较小的值, 以避免有效信息的丢失, 提取精度仍能满足精度要求.

参考文献:

- [1] 栾元重, 范玉红, 薛利兵, 等. 地表移动趋势项预测模型的研究 [J]. 地下空间, 2004, 24 (1): 14 - 18.
Luan Yuanzhong, Fan Yuhong, Xue Libing, et al. A study on prediction model of trend term for ground surface movement [J]. Under Ground Space, 2004, 24 (1): 14 - 18.
- [2] 黄声享, 李沛红, 杨保岑, 等. GPS 动态监测中多路径效应的规律性研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, 30 (10): 877 - 879.
Huang Shengxiang, Li Peihong, Yang Baocen, et al. Study on the characteristics of multipath effects in GPS dynamic deformation monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition), 2005, 30 (10): 877 - 879.
- [3] 钟平, 丁晓利, 郑大伟, 等. Vondrak 滤波法用于结构振动与 GPS 多路径信号的分离 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2006, 37 (6): 1 189 - 1 195.
Zhong Ping, Ding Xiaoli, Zheng Dawei, et al. Separation of structural vibrations and GPS multipath signals using vondrak filter [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37 (6): 1 189 - 1 195.
- [4] 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军, 等. 基于经验模式分解的滤波去噪法及其在 GPS 多路径效应中的应用 [J]. 测绘学报, 2006, 35 (11): 321 - 327.
Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jianjun, et al. EMD filter method and its application in GPS multipath [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35 (11): 321 - 327.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical model decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1998, 454: 903 - 995.
- [6] 陈隽, 徐幼麟. 经验模分解在信号趋势项提取中的应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25 (2): 101 - 104.
Chen Jun, Xu Youlin. Application of EMD to signal trend extraction [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25 (2): 101 - 104.
- [7] 戴桂平, 刘彬. 基于小波去噪和 EMD 的信号瞬时参数提取 [J]. 计量学报, 2007, 28 (2): 158 - 162.
Dai Guiping, Liu Bin. Instantaneous parameters extraction based on wavelet denoising and EMD [J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28 (2): 158 - 162.
- [8] 刘霖雯, 刘超, 江成顺. EMD 新算法及其应用 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (2): 446 - 447.
Liu Linwen, Liu Chao, Jiang Chengshun. Novel EMD algorithm and its application [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (2): 446 - 447.
- [9] Nunes J C, Gu YOT S, Delechelle E. Texture analysis based on local analysis of the bidimensional empirical mode decomposition [J]. Machine Vision and Applications, 2005, 16 (3): 177 - 188.
- [10] Han M, Liu Y H, Xi J H, et al. Noise smoothing for nonlinear time series using wavelet soft threshold [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14 (1): 62 - 65.