DOI: 10.11883/bzycj-2016-0148
文章编号: 1001-1455(2018)01-0112-07

基于集合经验模态分解-小波阈值方法的爆破振动信号降噪方法*

费鸿禄[1],刘 梦[1],曲广建[2],高 英[3]
(1.辽宁工程技术大学爆破技术研究院,辽宁 阜新 123000;
2.广州中爆数字信息科技股份有限公司,广东 广州 510670;
3.华南理工大学计算机科学与工程学院,广东 广州 510641)

摘要: 为了更好地消除混杂在爆破信号中的噪声,引入一种基于集合经验模态分解和小波阈值共同作用的降噪方法。首先将信号进行集合经验模态分解,然后选择含噪的模态函数分量进行小波阈值降噪处理,最后把处理后的分量和未处理的分量进行叠加,重构的信号即为降噪信号。该方法不仅能有效的去除噪声,还能使爆破波形保留其真实性和完整性。

关键词: 爆破信号;集合经验模态分解;小波阈值;降噪
中图分类号: O389 **国标学科代码**:1303599 **文献标志码**: A

爆破振动信号是爆破分析中最重要的基础,反映了结构的动力响应特征。研究表明,在进行模拟动力响应计算时,经常使用爆破振动加速度信号进行输入来描述振动质点的受力状态,以此为基础来进行下一步的计算[1]。在对实际采集的振动速度信号进行微分处理时,由于微分变换会使速度信号中的噪声部分放大表现出来,造成加速度信号与实际工程情况不相符并伴随着极大的失真现象。因此,要对爆破信号进行降噪处理。

常用的爆破振动信号的降噪方法一般有小波类技术(小波阈值降噪[2]、模极大值小波降噪[3]、小波包阈值降噪[4]、平移不变小波降噪[5]等)、经验模态分解类技术(EMD 降噪[6]、EEMD 降噪[7]等)和两者联合如 EMD-小波阈值[8]方法。小波技术[9]具有多分辨率分析特性和良好的时频局部性,原始信号分解后,真实信号和噪声可依据小波系数的不同特性实现分离,小波阈值法被认为是计算快速、合理有效的降噪方法;经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是 Huang 等[10]、李夕兵等[11]提出的一种无需先验基底的自适应分解方法,该方法可以将信号分解为由高频到低频依次排列的若干个固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),对于爆破振动信号,通常认为噪声主要集中于高频 IMF 分量,对其进行滤除便可实现降噪。EMD-小波阈值联合降噪虽然结合了二者的优点,但不能解决 EMD 分解造成的模态混叠现象。

本文中引入一种基于集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)和小波阈值共同作用的降噪方法,该方法能有效去除噪声,并能使爆破波形保留其真实性和完整性,具有较好的工程应用前景。

1 降噪原理

1.1 小波阈值方法

小波阈值降噪的本质是对信号的滤波,在爆破信号的降噪处理中,就是特征提取和低通滤波的综合[12]。小波阈值方法首先对信号进行小波变换,得到信号的小波分解系数。小波系数反映了信号的性质,对其进行阈值处理,就可以过滤掉噪声信号。最后对处理后的小波系数进行小波逆变换即小波重构

* **收稿日期**: 2016-05-25; **修回日期**: 2016-08-26
第一作者: 费鸿禄(1963—),男,博士,教授,feihonglu@163.com。

运算，就得到了降噪后的信号。小波阈值采用基于 Stein 的无偏风险估计原理获取，小波分解层数为 3，小波分解基函数为 db8，选择半软阈值函数算法对其系数进行处理，半软阈值函数表达式为：

$$W_\lambda=\begin{cases}\operatorname{sign}(W)\left[|W|-\dfrac{T}{\mathrm{e}^{m(W^2-T^2)}}\right] & |W|\geqslant T\\ 0 & |W|<T\end{cases}$$

式中：W_λ 为阈值处理后小波系数，W 为信号分解后小波系数，T 为获得的阈值，$m=0.2$ 为调节因子。

1.2　EEMD 方法

集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition，EEMD)方法是由 Huang 等[10]在 EMD 方法基础上提出的一种改进算法，主要解决 EMD 造成的混叠现象。改进的原理是在 EMD 分解之前向信号中添加均匀分布于时频领域中的白噪声，然后对多次 EMD 分解的 IMF 分量进行平均而得到最终的 IMF 分量。由于白噪声具有频谱均匀性和零均值性，多次 EMD 分解可以有效改善模态混叠现象，且多次集成平均可以抵消掉之前加入的白噪声影响。

进行 EEMD 分解时，要确定加入的白噪声幅值系数 k 和进行 EMD 分解的次数 N。依据前人经验和自身试验，选取 N 为 100，k 为 0.2(N、k 值可随噪声的强度而适当增大)，此时信号降噪的效果较好[14]。关于如何选择合适的 IMF 分量进行进一步的阈值降噪，引入互相关系数 R 和 IMF 频率进行判断。互相关系数的表达式为：

$$R(i)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}x(i,j)y(j)\qquad i=0,1,\cdots,N$$

式中：$R(i)$为互相关系数，$x(i,j)$为 IMF 分量，$y(j)$为振动信号分量，M 为信号长度，N 为 IMF 分量个数。互相关系数 R 的大小表现了 2 个信号间的相互关联程度，噪声分量与真实无噪声信号分量的互相关系数理论上为 0。在实际分解中，由于源信号分量为包含噪声的分量，且分解出的 IMF 分量中包含噪声和真实信息。若 IMF 分量中含有噪声信息，或有效信息含量较少，互相关系数 R 要接近于 0。根据前人经验和自身试验，取相关系数 R 小于 0.1 的 IMF 分量进行频率检验，若 IMF 分量不含噪声，则其主要频率应在仪器监测的范围内(即 2～200 Hz)[15]。通过二者判断 IMF 分量中是否含有噪声，对含有噪声的分量进行小波阈值降噪并与其余的 IMF 分量重构即完成对信号的降噪。

1.3　EEMD-小波阈值方法

EEMD-小波阈值方法先将信号进行 EEMD 方法的处理，在判断出含噪的 IMF 分量后，对其进行小波阈值方法处理，能够提取出 EEMD 方法中误删的有效信息，提高降噪的精度。具体流程如图 1 所示。

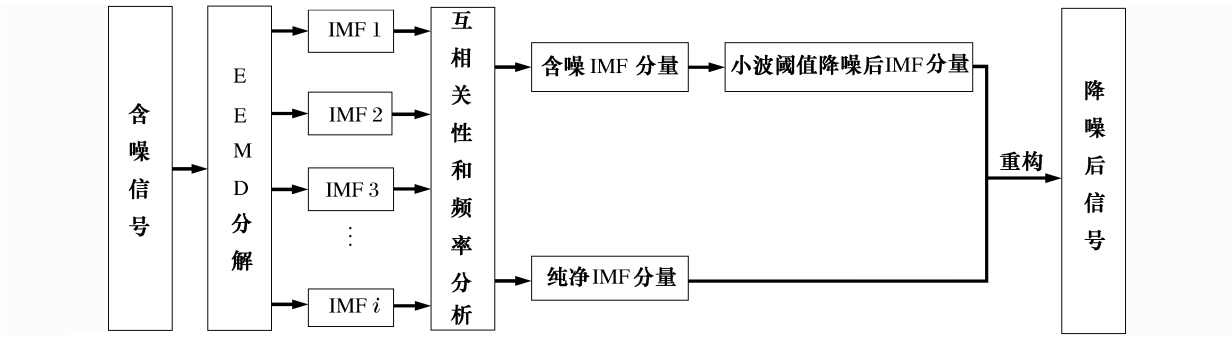


图 1　EEMD-小波阈值降噪流程图

Fig. 1　EEMD-wavelet threshold denoising process

2　降噪效果及评价分析

选取海州露天矿边坡爆破中的某次振动信号，进行数值微分后得到的加速度信号 S 如图 2 所示。由图中可知，由于微分转换过程将原信号中的噪声部分放大，信号 S 已经产生明显失真现象，需要进行降噪处理提取出纯净信号。

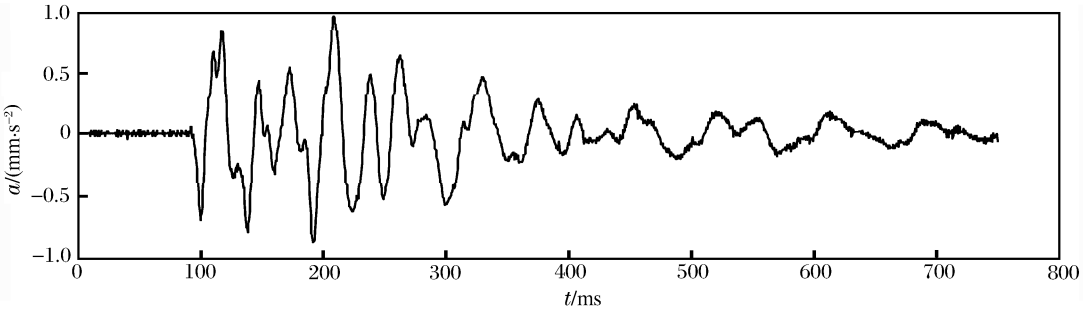


图 2 爆破振动加速度信号

Fig. 2 Blasting vibration acceleration signal

2.1 EEMD-小波阈值降噪

首先对信号进行 EEMD 分解，得到了 9 个 IMF 分量（x_1～x_9），求 IMF 分量和信号 S 的互相关系数 R_i，得到的互相关系数表如表 1 所示。

表 1 互相关系数对应表

Table 1 Cross correlation coefficient

互相关系数	IMF 分量								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
R_1	0.057	—	—	—	—	—	—	—	—
R_2	—	0.167	—	—	—	—	—	—	—
R_3	—	—	0.580	—	—	—	—	—	—
R_4	—	—	—	0.774	—	—	—	—	—
R_5	—	—	—	—	0.623	—	—	—	—
R_6	—	—	—	—	—	0.264	—	—	—
R_7	—	—	—	—	—	—	0.064	—	—
R_8	—	—	—	—	—	—	—	0.001	—
R_9	—	—	—	—	—	—	—	—	0.000

从表 1 中可以看出：R_1、R_7、R_8、R_9 均小于 0.1，初步认定为含噪 IMF 分量，对其进行主频带分析如图 3 所示。从图中可以发现，IMF1 的频率集中在 150～500 Hz，可认定其含有部分高频噪声，IMF7 的频率集中在 0～5 Hz，IMF8 的频率集中在 0～3 Hz，IMF9 的频率集中在 0～2 Hz，由于不含噪声的 IMF 信号主要频率应在仪器测得的范围内（即 2～200 Hz 间），因此可认定 IMF7、IMF8、IMF9 中存在微分变换放大的干扰噪声。将 IMF1、IMF7、IMF8、IMF9 组合起来进行小波阈值降噪，其中 S_1 为组合的加速度信号，s_1 为小波阈值降噪后的加速度信号，如图 4 所示，最后将阈值降噪后的分量与其余的分量重构就得到了 EEMD-小波阈值降噪的信号。

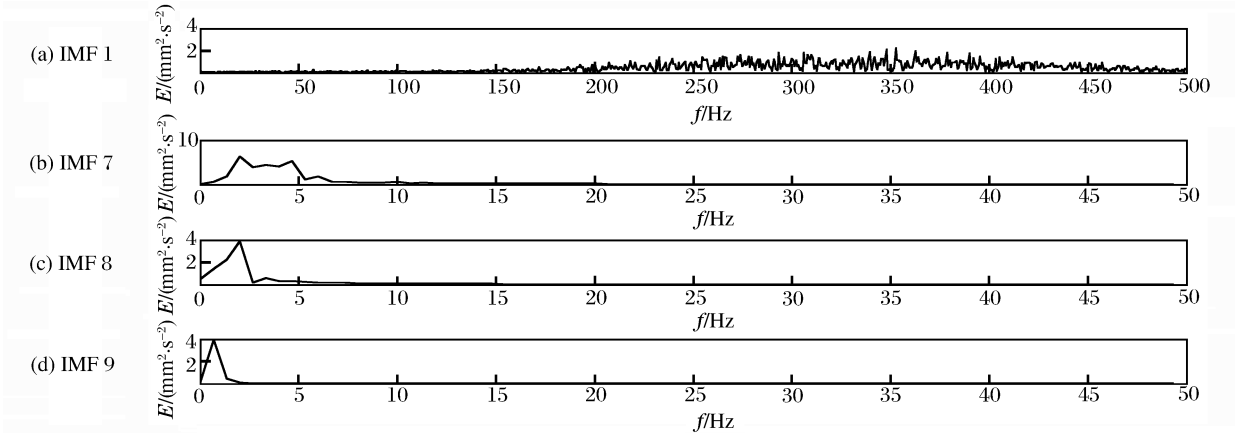


图 3 含噪的 IMF 分量频谱图

Fig. 3 Frequency spectrum of IMF with noise

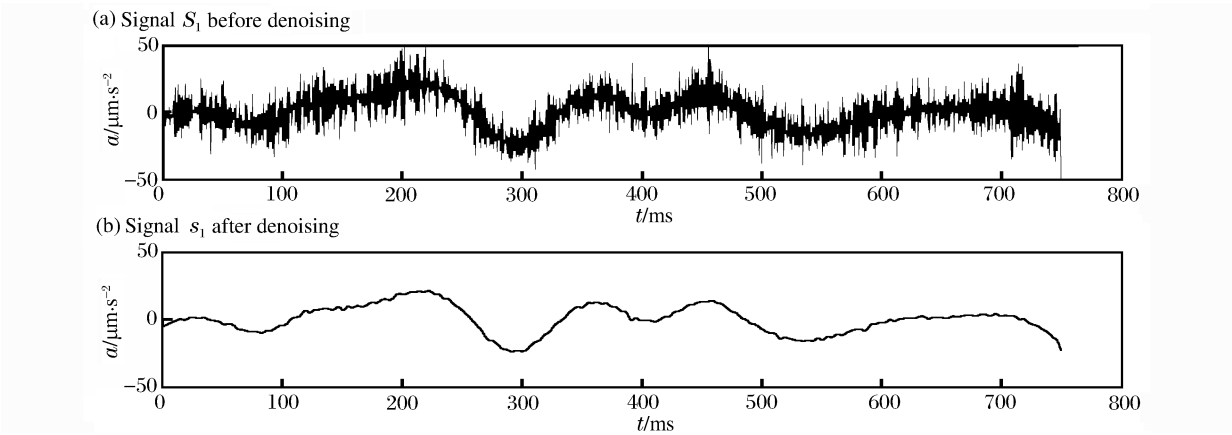


图 4　合成后信号与降噪后信号

Fig. 4　Synthesizing signal and denoising signal

2.2　降噪效果衡量指标

降噪效果一般采取信噪比 ξ、绝对平均误差 ε 等作为评价的客观性衡量指标，这在其他领域已被广泛应用[16-18]。信噪比、绝对平均误差的计算公式如下所示：

$$\xi = 10\lg\left(\frac{\sum_{i=1}^{M} S_i^2}{\sum_{i=1}^{M}(S_i - s_i)^2}\right)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(S_i - s_i)^2$$

式中：S_i 为降噪前的信号，s_i 为降噪后的信号。

信噪比反映了信号能量和噪声能量的比值关系，绝对平均误差反映了噪声的平均能量的大小，通常认为信噪比较大、绝对平均误差较小的方法其降噪效果较好。降噪效果不仅要评价客观性衡量指标，还要在主观上满足要求，即保证降噪前后的信号峰值处不能有所变化，局部波形不能出现太大偏差，信号噪点基本去除干净等。

2.3　降噪结果与评价

3 种方法得到的降噪指标如表 2 所示。图 5 所示为 EEMD-小波阈值降噪方法降噪后图像，图 6 所示为 EEMD 降噪方法降噪后图像，图 7 所示为小波阈值降噪方法降噪后图像。通过对比这 3 种方法的客观评价指标，发现三者的信噪比是小波阈值方法的最小，EEMD 方法其次，EEMD-小波阈值方法最大，绝对平均误差按大小排列为小波阈值方法最大，EEMD 方法其次，EEMD-小波阈值方法最小。说明 EEMD-小波阈值方法的降噪效果最好。从降噪后图像上看，0～100 ms内是爆破延时时间，此时爆破尚未发生，图5 中 EEMD-小波阈值降噪方法图像在此时间段内更为平缓且在零值点波动较小，更接近爆破实际。其他时间段上，图 6 中 EEMD 降噪方法的图像在 250～300 ms 内，图 7 中小波阈值降噪图像在 100～150 ms内均有波形与原信号差异较大的情况出现。综上所述，EEMD-小波阈值方法优于其他 2 种方法。

表 2　信号降噪指标

Table 2　Signal denoising index

降噪方法	ξ/dB	$\varepsilon/10^{-10}$
EEMD-小波阈值	26.07	1.30
EEMD	23.11	2.68
小波阈值	21.12	4.23

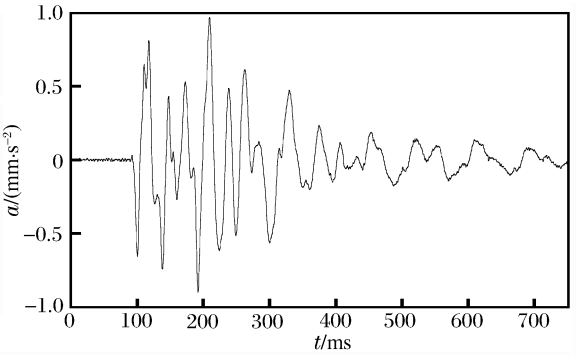


图 5　EEMD-小波阈值方法降噪后信号

Fig. 5　Denoising signal by EEMD-wavelet threshold method

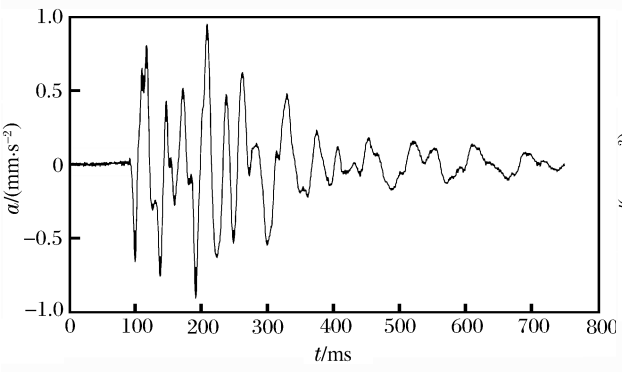


图 6 EEMD 方法降噪后信号

Fig. 6 Denoising signal by EEMD method

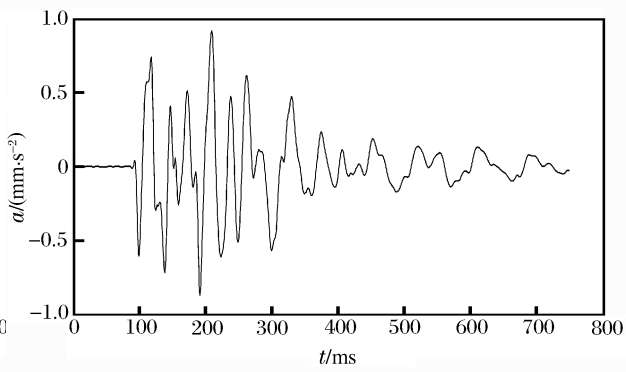


图 7 小波阈值方法降噪后信号

Fig. 7 Denoising signal by wavelet threshold method

2.4 EEMD-小波阈值的三维时频能量分析

为了进一步体现 EEMD-小波阈值方法降噪效果，采用三维图像表现其时间-频率-能量三者的降噪前、后变化规律。降噪三维时频能量图如图 8 所示。

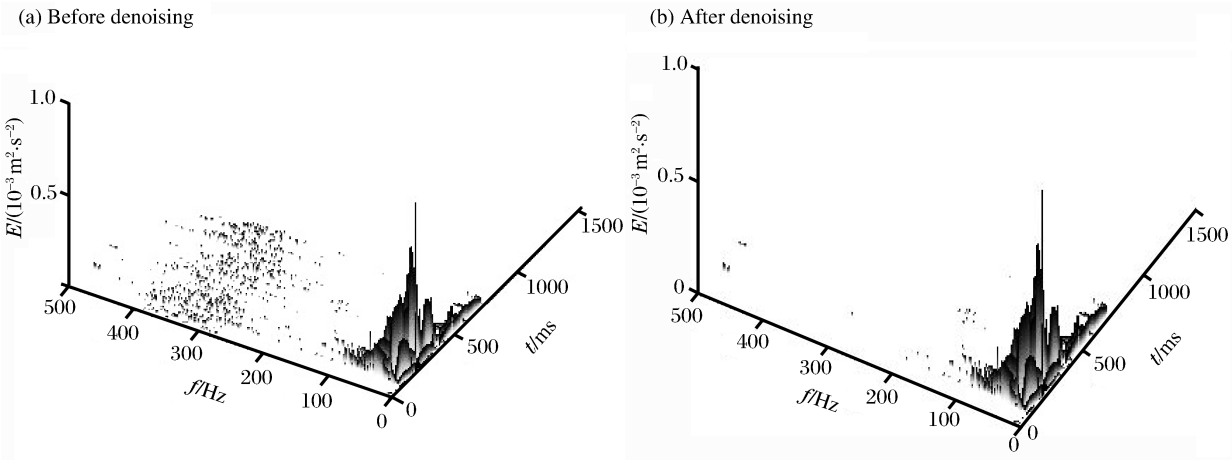


图 8 降噪前、后的信号三维图

Fig. 8 Three dimensional signal by EEMD-wavelet threshold method before and after denoising

通过图 8(a)可知，在源信号的 200～400 Hz 频率间，大量分布着一些低能量的噪声分量，这是造成爆破信号失真的主要原因。在频率 0～200 Hz 段上也存在着能量高低不等的信号分量，且其能量大小也随时间改变而产生变化。这说明爆破信号的能量主要集中在 0～200 Hz。由图 8(b)可知信号的高频(主要在 200～400 Hz)噪声分量通过 EEMD-小波阈值降噪后被成功去除，而低频部分信号能量并没有明显变化，这说明 EEMD-小波阈值降噪不但能成功去除高频噪声而且不会对低频爆破信号产生影响。

3 结 论

针对微分转换的爆破振动加速度信号存在大量分布噪声问题，提出基于集合经验模态分解和小波阈值共同作用的降噪方法。通过该方法与 EEMD 降噪和小波阈值降噪做对比分析，得出以下结论：

(1)EEMD-小波阈值降噪方法相比于 EEMD 降噪方法和小波阈值降噪方法，能够更有效地滤除爆破振动信号的噪声信号，使降噪后的信号更光滑，且不会改变局部的波形，提高信号的精度，为爆破信号的精确处理奠定了基础。

(2)对 EEMD-小波阈值降噪的信号进行三维时频能量分析，发现该方法可以有效地滤除高频部分(200～400 Hz)噪声，并不会对低频部分真实信号能量产生影响，更利于在爆破动力响应分析中应用。

参考文献：

[1] 李洪涛，卢文波，舒大强. 小波分析在爆破振动加速度推求中的应用[J]. 爆破器材，2006，35(5)：4-7.
LI Hongtao，LU Wenbo，SHU Daqiang. Application of wavelet analysis in calculating blasting vibration acceleration[J]. Explosive Materials，2006，35(5)：4-7.

[2] 中国生，徐国元，江文武. 基于小波变换的爆破地震信号去噪的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2006，37(1)：155-159.
ZHONG Guosheng，XU Guoyuan，JIANG Wenwu. Application of denoising in blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. Journal of Center Sorth University (Science and Technology)，2006，37(1)：155-159.

[3] 徐学勇，程康. 爆破震动信号模极大值小波消噪方法的改进[J]. 爆炸与冲击，2009，29(2)：194-198.
XU Xueyong，CHENG Kang. Improvement of the wavelet transform maximum modulus method for blasting vibration signals[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(2)：194-198.

[4] 夏晨曦，杨军，李顺波，等. 最优小波包基算法在爆破振动信号去噪中的应用[J]. 爆破，2011，28(3)：4-7.
XIA Chenxi，YANG Jun，LI Shunbo，et al. Application of best wavelet packet basis algorithm in denoising of blasting vibration signal[J]. Blasting，2011，28(3)：4-7.

[5] 熊正明，中国生，徐国元. 基于平移不变小波爆破振动信号去噪的应用研究[J]. 金属矿山，2006(2)：12-14.
XIONG Zhengming，ZHONG Guosheng，XU Guoyuan. Application of denoising for blasting vibration signals based on translation invariant wavelet[J]. Metal Mine，2006(2)：12-14.

[6] 李夕兵，张义平，左宇军，等. 岩石爆破振动信号的 EMD 滤波与消噪[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2006，37(1)：150-154.
LI Xibing，ZHANG Yiping，ZUO Yujun，et al. Filtering and denoising of rock blasting vibration signal with EMD [J]. Journal of Center Sorth University (Science and Technology)，2006，37(1)：150-154.

[7] 赵明生，梁开水，罗元方，等. EEMD 在爆破振动信号去噪中的应用[J]. 爆破，2011，28(2)：17-20.
ZHAO Mingsheng，LIANG Kaishui，LUO Yuanfang，et al. Application of EEMD in blasting vibration signal denoising[J]. Blasting，2011，28(2)：17-20.

[8] 饶运章，王柳，饶睿，等. 基于 EMD 与小波阈值的爆破震动信号去噪方法[J]. 福州大学学报(自然科学版)，2015，43(2)：271-277.
RAO Yunzhang，WANG Liu，RAO Rui，et al. A method for blasting vibration signal denoising based on empircal mode decomposition and wavelet threshold[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)，2015，43(2)：271-277.

[9] CHIEMENTIN X，KILUNDU B，RASOLOFONDRAIBE L，et al. Performance of wavelet denoising in vibration analysis：Highlighting[J]. Journal of Vibration and Control，2012，18(6)：850-858.

[10] HUANG N E，SHEN Z，Long S R，et al. The empirical mode decomposition and the Hibert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of Roval Society of London A，1998，454(3)：903-995. DOI：10.1098/rspa.1998.0193.

[11] 李夕兵，张义平，刘志祥，等. 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J]. 爆炸与冲击，2005，25(6)：528-535.
LI Xibing，ZHANG Yiping，LIU Zhixiang，et al. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(6)：528-535.

[12] GIAOUR D，FINCH J W. Denoising using wavelets on electric drive applications[J]. Electric Power Systems Research，2008，78(4)：559-565.

[13] WU Zhaohua，HUANG N E. Ensemble empirical mode decom position a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis，2009，1(1)：1-41. DOI：10.1142/S1793536909000047.

[14] 陈仁祥，汤宝平，马靖华. 基于 EEMD 的振动信号自适应降噪方法[J]. 振动与冲击，2012，31(15)：82-86.
CHEN Renxiang，TANG Baoping，MA Jinghua. Adaptived denoising method based on ensemble empirical mode decomposition for vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock，2012，31(15)：82-86.

[15] 张雪英，谢飞，乔铁柱，等. 基于 EEMD 与改进小波阈值的磁记忆信号降噪研究[J]. 太原理工大学学报，2015(5)：592-597.

ZHANG Xueying, XIE Fei, QIAO Tiezhu, et al. Denoising algorithm for metal magnetic memory signals based on EEMD and improved semisoft wavelet threshold[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015(5): 592-597.

[16] 刘希灵,李夕兵,洪亮,等.基于离散小波变换的岩石 SHPB 测试信号去噪[J].爆炸与冲击,2009,29(1):67-72.
LIU Xiling, LI Xibing, HONG Liang, et al. Rock SHPB testing signal denoising based on discrete wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(1):67-72.

[17] 钱伟新,刘瑞根,王婉丽,等.一种新的闪光照相 CCD 图像的扩散滤波方法[J].爆炸与冲击,2006,26(4):351-355.
QIAN Weixin, LIU Ruigen, WANG Wanli, et al. A new method of diffusion filtering for flash X-ray radiographic CCD image[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(4):351-355.

[18] 赵志刚,管聪慧.基于多尺度边缘检测的自适应阈值小波图像降噪[J].仪器仪表学报,2007,28(2):288-292.
ZHAO Zhigang, GUAN Conghui. Wavelet image denoising based on multiscale edge detection and adaptive threshold[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007,28(2):288-292.

A method for blasting vibration signal denoising based on ensemble empirical mode decomposition-wavelet threshold

FEI Honglu[1], LIU Meng[1], QU Guangjian[2], GAO Ying[3]

(1. *Institute of Blasting Technique, Liaoning Technical University, Fuxin* 123000, *Liaoning, China*;
2. *Guangzhou China Blast Digital Information Technology Co., Ltd., Guangzhou* 510670, *Guangdong, China*;
3. *School of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou* 510641, *Guangdong, China*)

Abstract: In this work we proposed a method based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and wavelet threshold for eliminating the noise contained a in blasting signal. Following this method, the signal is firstly decomposed using the ensemble empirical mode decomposition; then, the intrinsic mode function with noise is processed by the wavelet threshold denoising; and, finally, the processed signal is superimposed on the untreated component of the signal, and the signal thus reconstructed is the denoised signal. This method can not only can effectively remove the noise, but also enable the burst wave form to retain its authenticity and integrity

Keywords: blasting signal; ensemble empirical mode decomposition; wavelet threshold; denoising

(责任编辑 王易难)