DOI: 10.11883/bzycj-2016-0194
文章编号: 1001-1455(2018)05-1006-07

深孔台阶爆破近区振动信号趋势项去除方法*

韩 亮[1],刘殿书[2],辛崇伟[3],梁书锋[2],凌天龙[2],武 宇[2],李 晨[2]
(1. 华北科技学院安全工程学院,北京 101601;
2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
3. 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083)

摘要: 基于深孔台阶爆破近区大量实测振动信号,总结了趋势项产生的原因主要为大振幅脉冲输入下的非线性失真及低频干扰叠加,在此基础上以测试仪器有效监测范围作为识别趋势项组成部分的判别准则。利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)、小波分解等信号分析手段,提出了以固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的频带分布为指标、人工判别的趋势项去除方法,以及基于自相关分析识别噪声特征的小波阈值去噪方法。实例证明该方法切实有效,可实现爆破信号的批量化预处理。

关键词: 近区;爆破震动;趋势项;集合经验模态分解;自相关分析;小波;去噪
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

振动测试过程中,由于周边环境及系统自身而导致的振动波形偏离基线中心的现象,称为信号趋势项。在深孔台阶爆破震动观测中,近区信号受趋势项的影响比远区更大。受趋势项影响,波形最大峰值将发生变化,频谱分析的精度降低,同时也会对信号的积分变换造成一定的影响。

近年来,有不少学者对趋势项的消除方法进行了研究[1-2],其中,小波法和经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)法应用于非平稳信号处理的案例较多[3-4]。二者区别在于,小波法需针对信号特征事先选择小波基函数及分解层数,分解得到的低频系数可能与趋势项频带差距较大,分解过程对操作者的先验知识水平要求较高;而 EMD 法为自适应分解,对先验知识水平要求较低,但 EMD 法在分解过程中,会受到端点震荡和模态混叠效应的影响,最重要的是,目前尚无依据确定哪个固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量为趋势项的主要组成部分。

基于此,本文中拟采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)并结合小波阈值去噪方法,辅以人工判别及自相关分析手段,探索并建立适用于爆破近区的振动信号趋势项去除方法。

1 趋势项去除方法

1.1 基于人工判别的 EEMD 趋势项去除方法

1.1.1 EEMD 方法对 EMD 方法的改进[5]

EEMD 方法较 EMD 方法的改进主要在于:在进行 EMD 分解时,加入高斯白噪声,原信号经多次添加噪声序列,并多次分解后,对同一尺度下各 IMF 分量求和,可得到各 IMF 分量的“集体”。由于加入的 i 次噪声是不相关随机序列,其统计均值为零,因此,对各 IMF 分量整体平均后,加入的 i 次噪声可近似相互抵消。

1.1.2 EEMD 方法的分解步骤

(1)添加标准白噪声信号 $w_i(t)$ 至原信号 $x(t)$,二者等长。

$$x_i(t)=x(t)+w_i(t) \qquad i=1,2\cdots,n \tag{1}$$

* **收稿日期**: 2016-06-30; **修回日期**: 2016-09-20。
基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(3142017092);廊坊市科技支撑计划项目(2017013149)
第一作者: 韩 亮(1985—),男,博士研究生,hanliang_1985@sina.com。

式中：i 为加入噪声的次数，$x_i(t)$为原信号 $x(t)$加入 i 次噪声后的信号。

(2)对 $x_i(t)$进行 EMD 自适应分解，得到相应的各 IMF 分量，记为 $c_{ij}(t)$，余项为 $r_i(t)$，$c_{ij}(t)$为第 i 次加入白噪声后分解得到的第 j 个 IMF，$j=1,2\cdots,k$，其中 k 为分解尺度。

(3)对各 IMF 分量进行总体平均，即得真实的 IMF 分量：

$$c_j(t)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}c_{ij}(t) \tag{2}$$

1.1.3　人工判别

针对分解得到的各 IMF 分量，目前尚缺少明确的判别准则来识别哪一个分量为趋势项有效组成部分，趋势项的去除存在一定的盲目性。通过对深孔台阶爆破近区大量实测振动信号的分析，总结出趋势项产生的原因，结合现场振动测试系统的物理指标，可建立人工判别准则。

(1)近区爆破振动的特点是瞬时输入能量大、持时短、振幅波动大。传感器在较大脉冲的作用下，受内部惯性原件和电路部分的输出限制，测量指标很难保持线性输出；

(2)目前广泛使用的的爆破测振仪，其可测频率的最低值一般为 5 Hz。现场观测得到的爆破信号，低于 5 Hz 的部分将很难保持线性输出，因此可视为低频干扰。

1.2　基于自相关分析的小波阈值去噪

利用 EEMD 方法对原始信号分解并消除趋势项分量后，引入的高斯白噪声将导致重构信号的信噪比明显下降。此时，可通过小波阈值法对保留的 IMF 分量进行去噪。为了有效甄别噪声分量，可借助自相关函数的特性，对保留 IMF 分量进行辅助判别，并对判别得到的具有噪声特征的分量进行去噪处理，最后，将所有 IMF 分量重构，整个去噪过程结束。

1.2.1　自相关分析

随机变量在时间域的相互依赖关系可以用自相关函数来表示，如下所示：

$$R_x(t_1,t_2)=E[x(t_1)\cdot x(t_2)]=\frac{1}{N-1}\sum_i[x(t_1)\cdot x(t_2)] \tag{3}$$

式中：$x(t)$代表某一随机过程，N 为采样点个数，t_1 和 t_2 为不同时刻。

对于高斯白噪声，其自相关函数在图像上通常具备如下特点：最大值集中在坐标零点，其余各点近似为零。

1.2.2　小波阈值去噪

小波阈值去噪是通过比较小波系数与设定阈值的大小，以此来判断小波系数主要是由信号还是噪声引起。去噪前首先需要确定阈值门限并选择合理的去噪方法。阈值门限的选取规则主要有固定阈值门限准则、无偏风险估计准则、混合阈值门限准则以及极大极小阈值门限准则；去噪方法主要有为软、硬阈值法。将去噪后的小波系数重构，即得到了去噪后的信号。

1.3　趋势项去除流程

根据上述分析，整理得到了深孔台阶爆破近区振动信号的趋势项去除方法，通过 Matlab 平台可编程对实测波形进行批量化处理，如图 1 所示。

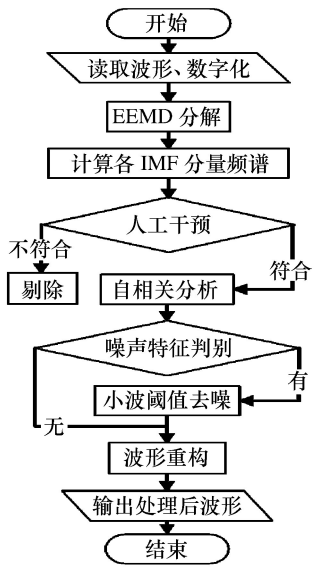


图 1　趋势项去除流程

Fig. 1　Removal process of trend

2　实例分析

2.1　测试条件

选取现场某次垂向振动信号，利用前述方法对实测信号进行趋势项去除，并对重构信号进行评价。测试的条件见表 1。

表 1 信号测试条件

Table 1 Conditions of the test signal

测区	爆心距/m	最大段药量/kg
近区	65	2 280

2.2 趋势项去除

2.2.1 EEMD 方法分解

初始设置白噪声标准差为 0.1,集成次数 100。分解得到 14 个 IMF 分量及 1 个余量 r,如图 2 所示。

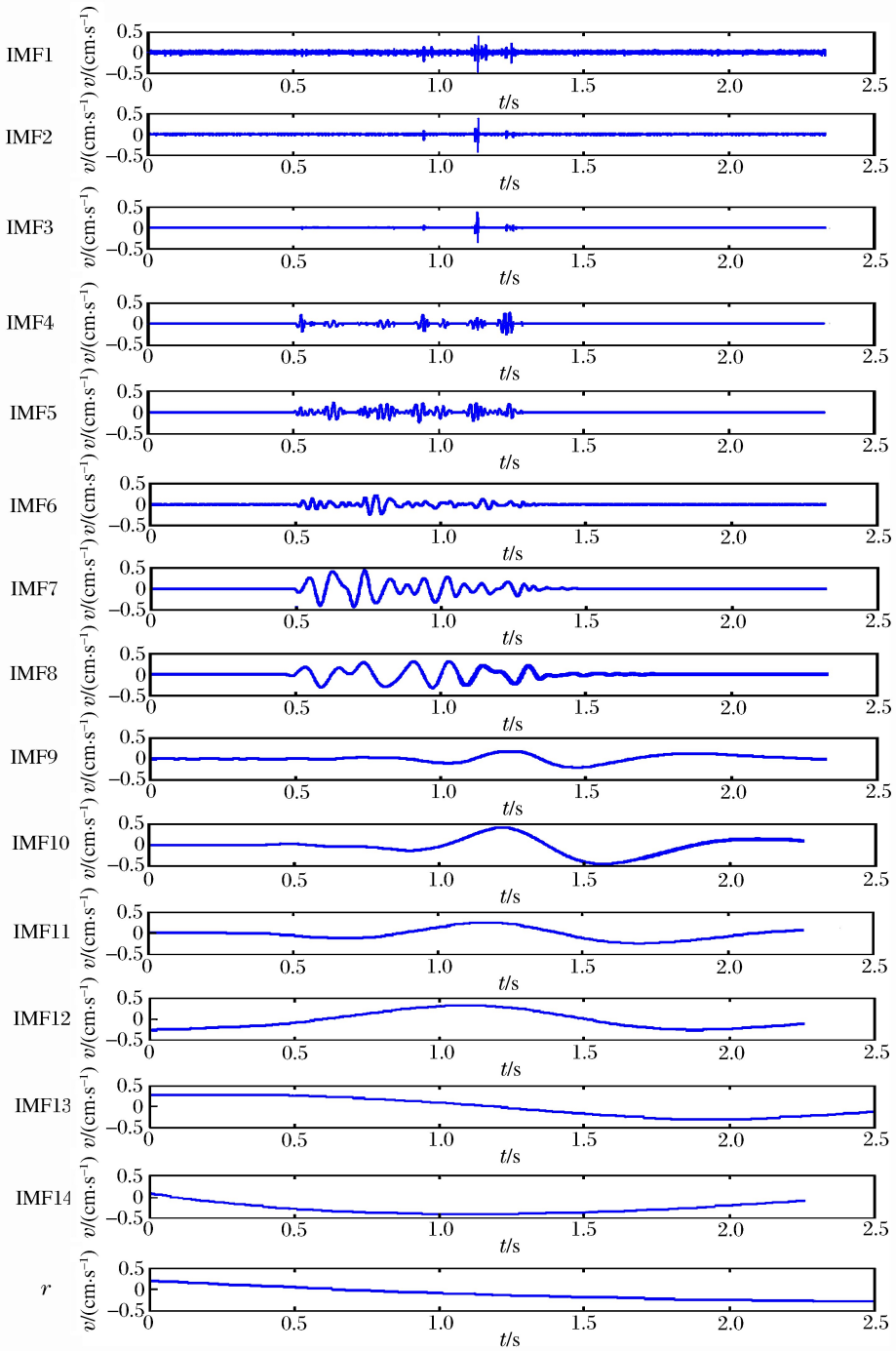


图 2 EEMD 方法分解结果

Fig. 2 Decomposition results by EEMD method

从图中不难看出，EEMD 方法分解得到的各 IMF 分量，端点振荡效应及模态混叠效应已基本消除。

2.2.2　IMF 分量尺度排序

利用 FFT 变换，可以得到各 IMF 分量的尺度信息。按照由大到小的顺序，各 IMF 分量的主频，如表 2 所示。由于趋势项是低频干扰，为简化显示范围，可略去高频分量 IMF1～IMF4，仅在频谱曲线图中显示 IMF5～IMF15 分量，如图 3 所示。

表 2　各 IMF 分量主频

Table 2　Dominant frequency of each IMF component

IMF 分量	主频/Hz	IMF 分量	主频/Hz
IMF1	33.40	IMF9	1.60
IMF2	14.40	IMF 10	1.00
IMF3	39.20	IMF 11	0.80
IMF4	32.40	IMF 12	0.60
IMF5	36.40	IMF 13	0.40
IMF6	19.40	IMF 14	0.20
IMF7	10.40	r	0.00
IMF8	7.60		

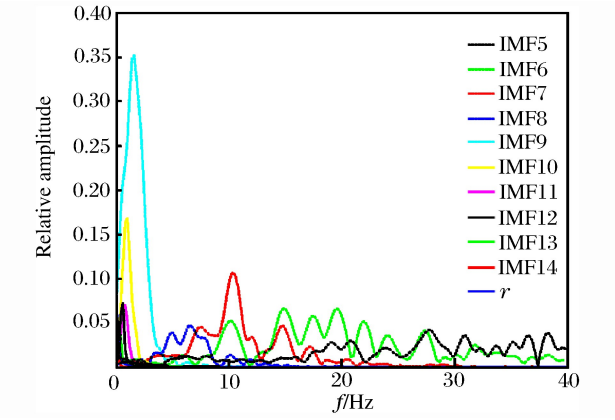


图 3　IMF 分量频谱图

Fig. 3　Frequency spectra of IMF component

2.2.3　人工干预判别

由图 5 可以看出，IMF5～IMF8 频段较高，频带较宽；IMF9～IMF14 频段较低，频带较窄。由表 2 中各 IMF 分量的主频值可知，IMF9～IMF14 分量主要集中在 0～5 Hz 频带，已明显超出爆破测振仪的有效监测范围，上述分量将引起信号趋势项的产生。因此，需将 IMF9～IMF14 分量去除。

2.2.4　趋势项去除后剩余分量重构

对保留的 IMF1～IMF8 分量重构，如图 4～5 所示。从图中可以看出，波形重新回到基线中心，主频也由低频缓慢过渡到合理区间，主频幅值突高的情况消失。

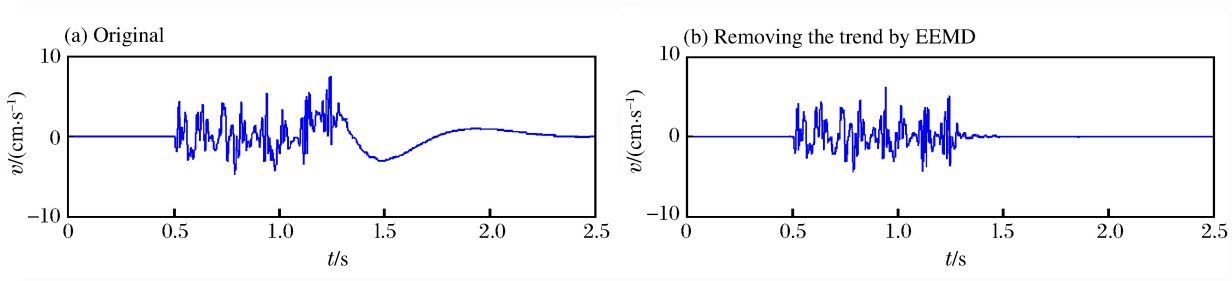


图 4　原始波形与重构波形

Fig. 4　Original and reconstruction waveforms

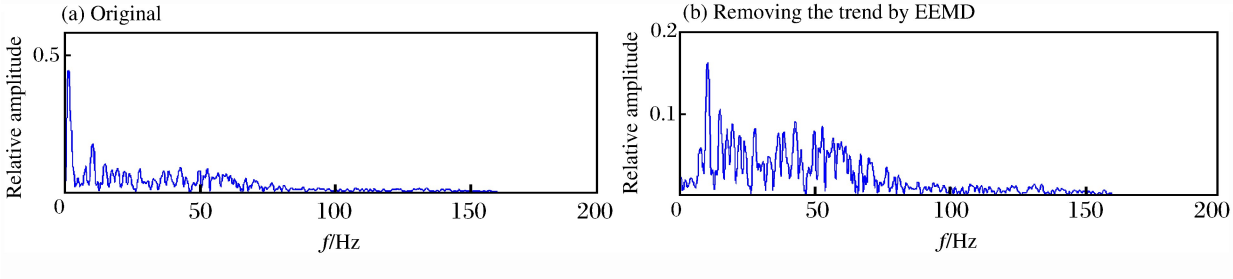


图 5　原始波形与重构波形频谱

Fig. 5　Spectra of original and reconstruction waveforms

2.2.5 自相关分析

对保留的 IMF1～IMF8 分量进行自相关分析，如图 6 所示。由图中可以看出，8 个 IMF 分量中，IMF1～IMF3 分量的自相关函数符合高斯白噪声的特征，因此，主要对 IMF1～IMF3 分量进行小波阈值去噪。

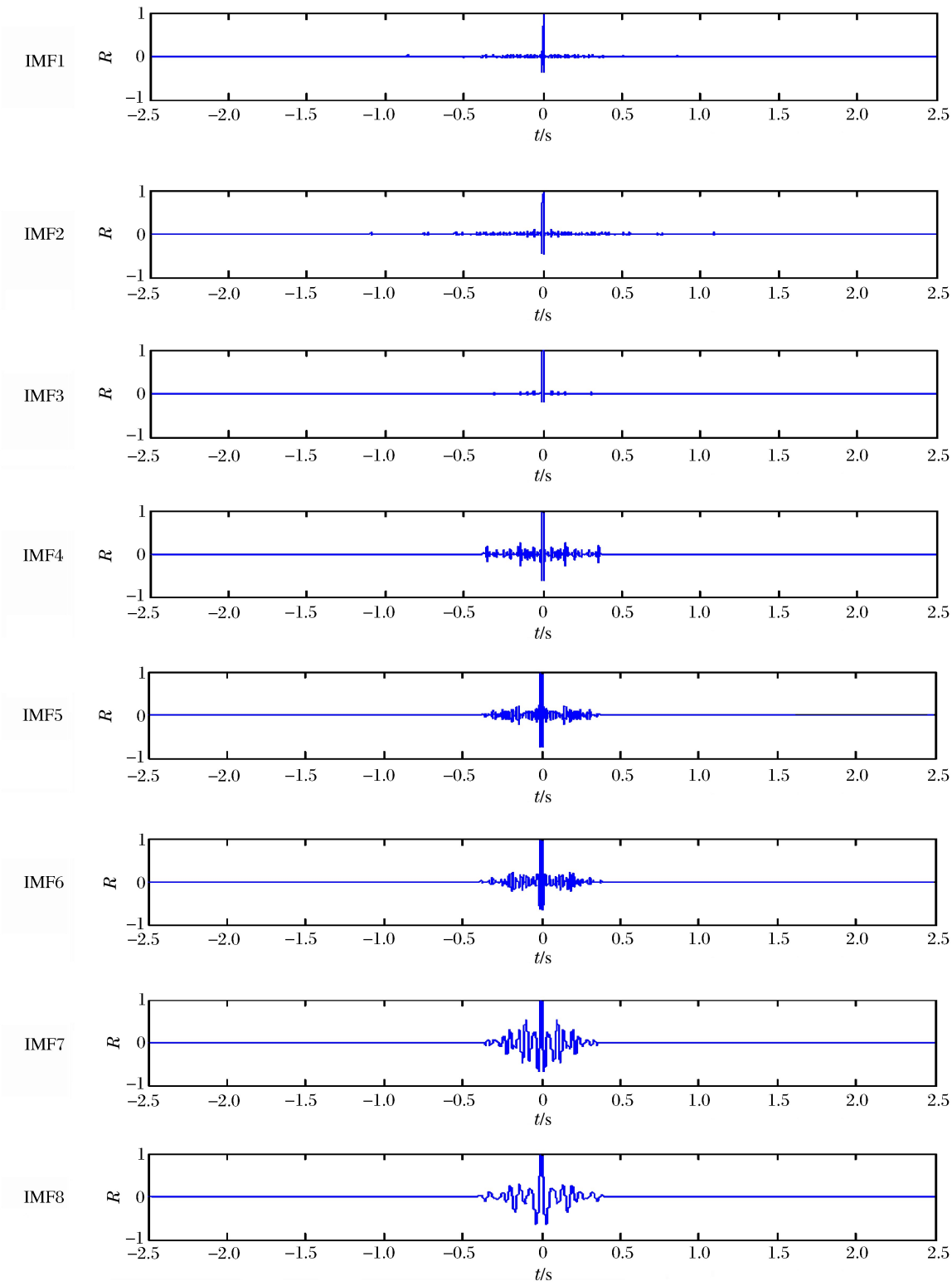


图 6 IMF 分量自相关函数图

Fig. 6 Autocorrelation function graphs of IMF components

2.2.6　小波阈值去噪

阈值函数确定方法较多[6]。本文中阈值门限准则采用 heursure 函数，去噪方法采用软阈值函数。

2.2.7　去噪后剩余分量重构

IMF1～IMF3 分量去噪结束后，将其与其余 IMF 分量一并进行重构，即可得到最终爆破振动信号，如图 7 所示。从图中可以看出，去噪后波形的信噪比得到一定提升，滤波效果显著。

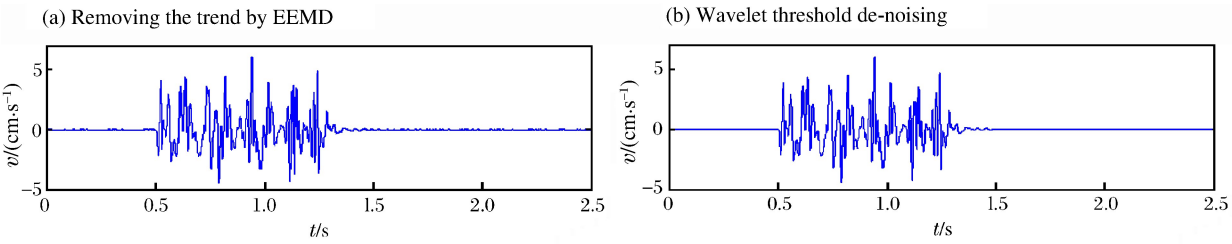


图 7　小波阈值去噪前后波形对比

Fig. 7　Contrast of wavelet thresholds before and after denoising

3　结　论

(1)深孔台阶爆破条件下，爆破近区振动信号产生趋势项的原因为瞬时大能量输入引起的非线性失真，在此基础上以测试仪器有效监测范围作为识别趋势项组成部分的判别准则。

(2)借助 EEMD 方法及小波分解，提出一种基于各 IMF 分量频带指标，辅以人工判别的趋势项去除方法，以及利用自相关分析识别噪声特征的小波阈值去噪方法，并通过实例验证了方法的有效性。

参考文献：

[1]　陈燕，刘哲，郑宾，等. 基于 LabVIEW 的测试信号预处理方法研究[J]. 国外电子测量技术，2008，27(10)：4-5，16.
CHEN Yan，LIU Zhe，ZHENG Bin，et al. Study on test signal pre-processing method based on LabVIEW[J]. Foreign Electronic Measurement Technology，2008，27(10)：4-5，16.

[2]　王若平，杨彦朋，王国林，等. EMD 在路面不平度信号趋势中的应用[J]. 拖拉机与农用运输车，2010，27(10)：64-66.
WANG Ruoping，YANG Yanpeng，WANG Guolin，et al. Application of EMD to road routhness trend[J]. Tractor and Farm Transporter，2010，27(10)：64-66.

[3]　朱学峰，韩宁. 基于经验模态分解的非平稳信号趋势项消除[J]. 飞行器测控学报，2012，31(1)：65-70.
ZHU Xuefeng，HAN Ning. Removal of non-stationary signal trend items by empirical mode decomposition[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology，2012，31(1)：65-70.

[4]　龙源，谢全民，钟明寿，等. 爆破震动测试信号预处理分析中趋势项去除方法研究[J]. 工程力学，2012，29(10)：63-68.
LONG Yuan，XIE Quanmin，ZHONG Mingshou，et al. Research on trend removing methods in preprocessing analysis of blasting vibration monitoring signals[J]. Engineering Mechanics，2012，29(10)：63-68.

[5]　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. DOI：10.1142/S1793536909000047

[6]　朱艳芹，杨先麟. 几种基于小波阈值去噪的改进方法[J]. 电子测试，2008(2)：18-22.
ZHU Yanqin，YANG Xianlin. Several new methods based on wavelet thresholding denoising[J]. Electronic Test，2008(2)：18-22.

[7]　李夕兵，张义平，刘志祥. 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. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(6)：528-535.

[8]　肖立波，任建亭，杨海峰. 振动信号预处理方法研究及其 MATLAB 实现[J]. 计算机仿真，2010，27(8)：330-337.
XIAO Libo，REN Jianting，YANG Haifeng. Study on vibration signal pre-processing method based on Matlab[J].

Computer Simulation, 2010,27(8):330-337.
[9] 徐长发,李国宽. 实用小波方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.
[10] 陈隽,李杰. 振动信号趋势项提取的几种方法及其比较[J]. 福州大学学报(自然科学版),2005,33(增刊):42-45.
CHEN Jun, LI Jie. Methods for signal trend extraction and their comparison[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edtion), 2005,33(Suppl):42-45.

Trend removing methods of vibration signals of deep hole bench blasting in near field

HAN Liang[1], LIU Dianshu[2], XIN Chongwei[3], LIANG Shufeng[2],
LING Tianlong[2], WU Yu[2], LI Chen[2]

(1. *Safety Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Beijing* 101601, *China*;
2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing* 100083, *China*;
3. *School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Based on a large number of measured vibration signals of deep hole bench blasting in near field, this paper has contributed the trend mainly to the nonlinear distortion and the low frequency interference superposition with a large amplitude pulse input. On this basis, the effective monitoring range of test instruments has been chosen as criteria to identify the part of the trend. Using ensemble empirical mode decomposition (EEMD), the wavelet analysis, and other signal analysis methods, a trend elimination method is proposed here, which is based on the combination of the frequency band distribution of each intrinsic mode function component and artificial identification. In addition, a wavelet threshold denoising method is also proposed based on autocorrelation analysis to identify noise characteristics. Examples show that the methods are effective and can be realized by batch pretreatment of blasting signals.

Keywords: near field; blasting vibration; trend; EEMD; autocorrelation analysis; wavelet; denoising

(责任编辑 王易难)