DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0255-07

模式自适应连续小波去除趋势项方法在爆破振动信号分析中的应用*

张 胜[1,2],凌同华[1],曹 峰[1],黄 戡[1]
(1.长沙理工大学土木与建筑学院,湖南 长沙 410114;
2.湖南城市学院土木工程学院,湖南 益阳 413000)

摘要:为了更精确提取爆破振动信号峰值速度、能量等重要特征,必须对爆破振动加速度信号时域积分中的趋势项予以去除。通过对实测爆破振动加速度信号进行梯形数值积分,提出以时域积分后的爆破振动速度信号来构造模式自适应小波基的方法,并用此方法去除时域积分后爆破振动速度信号中的趋势项,然后对去除趋势项后的爆破振动速度信号进行能量特征分析。结果表明:模式自适应连续小波法成功去除了时域积分后爆破振动速度信号中的趋势项;与建立在传统 Fourier 变换基础上的频谱分析相比,小波变换的能量分析具有更精细的频率分辨率,更适合于对频率分辨率要求更高的爆破振动信号进行分析;各频率区间范围划分越宽,爆破振动加速度信号与速度信号各频率区间内能量分布的相关程度越高,反之,相关程度越低。

关键词:爆破振动;能量分布;模式自适应小波;趋势项;小波基
中图分类号:O383;TD235.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

如何控制爆破振动,减少爆破施工对周围环境和人员的危害,一直是爆破工程安全技术人员研究的重要课题[1-2]。目前,爆破领域衡量爆破振动强度的物理量主要是速度和加速度[3]。虽然理论上已经有许多测试爆破振动速度和加速度的仪器与设备,但从实施难易程度看,爆破振动速度传感器的测量容易受到环境或传感器安装条件的限制,有时无法直接测量。和爆破振动速度传感器相比,爆破振动加速度传感器的安装要容易,这是因为爆破振动加速度传感器具有体积小、重量轻、安装方便、灵敏度高等优点。因此,在实际工程中爆破振动加速度测试得到了广泛的应用[4-5]。

理论上,对监测到的实测爆破振动加速度信号进行一次数值积分即可得到爆破振动速度信号。对实测爆破振动加速度信号进行数值积分的算法,按数据处理过程可以分为频域积分法和时域积分法两种。频域积分法主要是利用傅里叶正、反变换,积分在频域内以傅里叶系数来表示,这就不可避免地存在由于频率截断误差而引起的能量泄漏[6]。时域积分法通常采用梯形公式,受零点漂移或灵敏度漂移影响较大,需要对爆破振动信号进行剔除趋势项或滤波处理,具有代表性的算法主要有差分法、低通滤波法、最小二乘法、小波变换法或固有模态分解法等[7-9]。然而,采用上述方法仍不能将爆破振动信号中的时域积分趋势项予以去除,残余的微小误差在时域积分过程中也会积累而逐渐放大,甚至会使爆破振动信号发生非线性失真,而时域积分算法本身也会产生趋势项,从而严重降低爆破振动信号频谱分析的精度。

为了更精确地提取爆破振动信号中振动峰值和各频率区间内能量等重要特征,必须对爆破振动加速度信号时域积分中的趋势项予以去除。本文中以此为切入点,在模式自适应小波原理的基础上[10],通过对实测爆破振动加速度信号进行梯形数值积分,构建将时域积分后的爆破振动速度信号作为小波基函数的方法,用构造模式自适应爆破振动小波基函数的方法来剔除时域积分后爆破振动速度信号中的趋势项,从而提高爆破振动信号时域和频域分辨率。

* **收稿日期**:2014-10-24; **修回日期**:2014-02-04
基金项目:国家自然科学基金项目(51678071,51608183,51508037);湖南省自然科学基金项目(2016JJ4013);湖南省教育厅重点科学研究项目(16A038);湖南省教育厅科学研究项目(14B007)
第一作者:张 胜(1984—),男,博士; **通信作者**:凌同华,lingtonghua@163.com。

1 模式自适应小波理论

1.1 连续小波变换

设函数 $\psi(t)\in L^2(\mathbf{R})$,其连续傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$[11]。当 $\hat{\psi}(\omega)$满足下列容许性条件:

$$C_\psi=\int_{\mathbf{R}}\frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty$$

时,则称函数 $\psi(t)$为一个基本小波。若将该基本小波 $\psi(t)$通过伸缩与平移等运算处理后,就可得到一组连续小波序列,称之为连续小波基函数,即:

$$\psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1}$$

式中:a 为尺度因子($a\neq0$),b 为平移因子。

对于任意平方可积的函数或信号 $f(t)$,即 $f(t)\in L^2(\mathbf{R})$,其关于小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$的连续小波变换为:

$$W_f(a,b)=<f(t),\psi_{a,b}(t)>=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_{\mathbf{R}}f(t)\,\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中:$<f(t),\psi_{a,b}(t)>$为函数或信号 $f(t)$与小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$的内积,$\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$的共轭函数。

由式(2)可以看出,连续小波变换的实质是将函数或信号 $f(t)$以小波基函数序列 $\psi_{a,b}(t)$为基底进行展开,由此可以求得函数或信号 $f(t)$在小波基函数序列 $\psi_{a,b}(t)$上的投影,即采用不同时间、不同尺度的小波基函数序列对被分析函数或信号 $f(t)$进行相似性分析。若要使被分析函数或信号 $f(t)$的时频特征在小波变换系数上更好地呈现,则需要将被分析函数或信号 $f(t)$在小波基函数序列 $\psi_{a,b}(t)$上的投影系数尽可能大。换一句话说,小波基函数序列 $\psi_{a,b}(t)$的时域波形应与被分析函数或信号 $f(t)$的特征波形具有良好的局部形状相似性。

1.2 模式自适应连续小波

模式自适应连续小波是利用最佳平方逼近方法来设计一个与给定函数(或信号波形)的局部特征相似度高的小波[12]。具体的实现方法有多项式逼近法和常数正交函数空间投影法 2 种。若给定的函数(或信号波形)比较简单,则可以选择多项式逼近法;若给定的函数(或信号波形)比较复杂,则可以选择常数正交函数空间投影法。参数规则度定义了模式自适应连续小波在紧支撑区间上的边界约束,可以是“无”或“连续”或“可微”。若对给定函数(或信号波形)进行多项式逼近,参数规则度选择连续约束条件时,多项式拟合阶次应大于等于 3;参数规则度选择可微约束条件时,多项式拟合阶次应大于等于 5。

基于上述构造模式自适应连续小波的思想[13-14],其过程大致可以分为 3 个步骤:

(1) 根据给定函数(或信号波形)的检测模式 $x(t)$,设置逼近方法和边界条件,构建模式自适应连续小波 $\psi_x(t)$,不失一般性,设模式自适应连续小波的紧支撑区间为[0,1],则有 $\int_0^1\psi_x(t)\mathrm{d}t=0$ 以及 $\|\psi_x(t)\|_2=1$;

(2) 检测给定函数(或信号波形)上所有的虚警,对任意 b 和 $a>0$ 的情况,搜索函数(或信号波形)的局部极大值点;

(3) 检测和丢弃给定函数(或信号波形)上所有错误的虚警,这一规则必须应用于确定每个虚警是否错误。

2 爆破振动信号趋势项的去除

2.1 爆破振动加速度信号的测试

爆破振动加速度信号测试时,除了考虑选择性能优良的仪器、设备与测试系统外,还需要根据爆破振动加速度信号测试的目的来标定测振系统与设置测振仪量程、采样频率、触发与延迟时间等参数[15]。

通过对某个矿床进行大量的爆破振动加速度测试，从中抽取 1 个测点所监测到的爆破振动加速度信号进行分析，实测爆破振动加速度信号 a 时程曲线及其相应的傅里叶功率谱密度 P 见图 1。

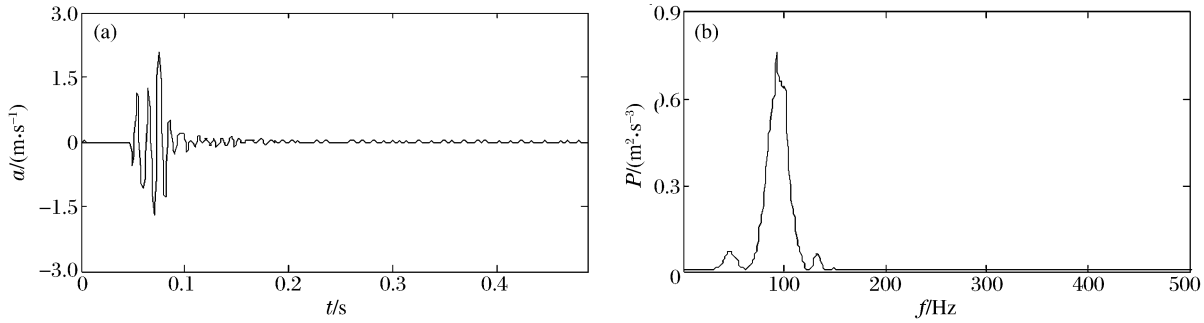


图 1 爆破振动加速度信号及功率谱密度

Fig. 1 Time history and power spectrum density of blast vibration acceleration signal

2.2 爆破振动加速度信号的积分变换

将爆破振动加速度信号转化为速度信号时，常采用梯形求积的数值积分法。设实测爆破振动加速度信号为$\{x(k)\}$ ($k=0,1,2,\cdots N$；N 为爆破振动速度信号序列中包含离散采样点的个数)，则可以根据梯形求积公式，求得爆破振动速度信号为

$$y(k)=\Delta t\sum_{i=1}^{k}\frac{x(i-1)+x(i)}{2}\qquad k=1,2,3,\cdots,N \tag{3}$$

根据式(3)，采用 MATLAB 编程语言对实测爆破振动加速度信号进行梯形数值积分，结果如图 2(a)所示。图 2(b)为时域积分后爆破振动速度信号的傅里叶功率谱密度。从图 2 可以看出，爆破振动速度信号时程曲线存在明显的零点漂移现象；爆破振动速度信号功率谱密度中的优势频率主要集中在 0～100 Hz 频率范围内，再对功率谱密度低频部分进行局部放大，可以清楚地观察到 0～5 Hz 频率范围内具有较大幅值的低频直流分量。因此，爆破振动速度信号中趋势项的存在严重影响了爆破振动速度信号时程曲线波动特征的准确性和功率谱分析的分辨率，必须予以去除。

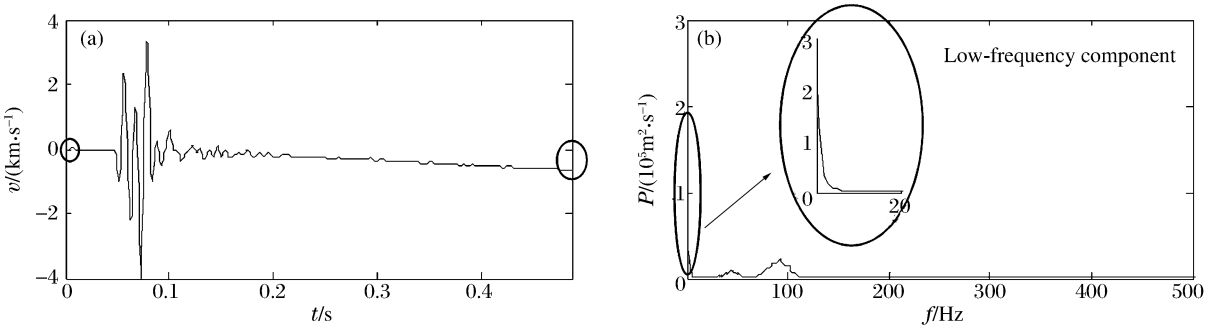


图 2 时域积分后的爆破振动速度信号及功率谱密度

Fig. 2 Time history and power spectrum density of blast vibration velocity signal after time integration

2.3 去均值化

爆破振动速度信号的均值是爆破振动速度信号离散值$\{y(k)\}$ ($k=0,1,2,\cdots N$)在整个时间坐标轴上的积分平均，其物理含义为该爆破振动速度信号变化的中心趋势，或称为零点漂移。由测振仪或传感器的低频直流分量引起，因此，可以通过去均值公式来实现：

$$y'(k)=y(k)-\mu_y=y(k)-\sum_{k=1}^{N}y(k)/N \tag{4}$$

式中：$y'(k)$为去均值后的爆破振动速度信号；$y(k)$为爆破振动速度信号；μ_y 为爆破振动速度信号的算术平均值。

2.4 模式自适应连续小波法去除爆破振动信号趋势项

利用 MATLAB 软件平台上的小波工具箱(Wavelet Toolbox),对图 2(a)所示的爆破振动速度信号进行去均值化处理,然后对其进行模式自适应波形匹配,构造出满足小波容许性条件的模式自适应小波基,用构造模式自适应小波基的方法剔除去均值化后爆破振动速度信号中的趋势项。图 3(a)和 3(b)分别为去除趋势项后爆破振动速度信号时程曲线及其相应的傅里叶功率谱密度。从图 3(a)可以看出,去除趋势项后爆破振动速度信号第一个记录点和最后一个记录点的速度值均为零,与图 2(a)中的时程曲线进行比较,模式自适应连续小波法已成功去除了去均值化后爆破振动速度信号中趋势项的影响。对比分析图 3(b)与图 2(b)可以看出,模式自适应连续小波法已成功去除了低频直流分量的干扰,同时可知去除趋势项后的爆破振动速度信号功率谱(见图 3(b))与实测爆破振动加速度信号功率谱(见图 1(b))的优势频率均为 92 Hz,且两者的相关系数高达 0.9538,由此可以表明用模式自适应连续小波法去除爆破振动信号中的趋势项是完全可行的。

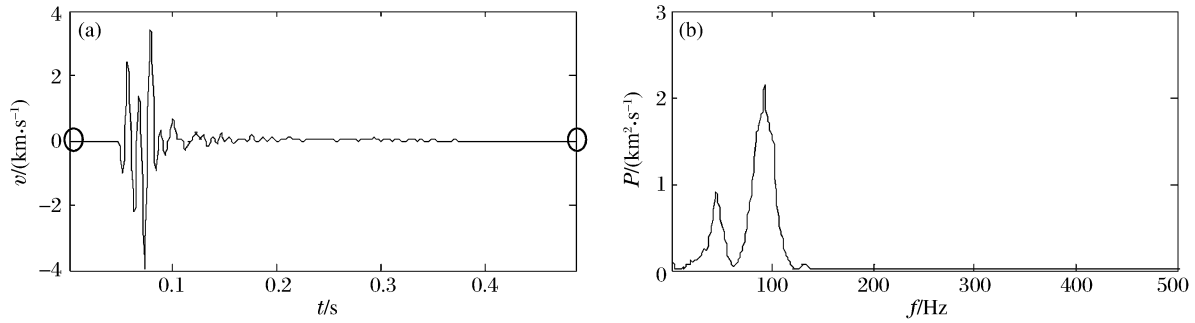


图 3 去除趋势项后的爆破振动速度信号及功率谱密度

Fig. 3 Time history and power spectrum density of blast vibration velocity signal after removal trend

3 爆破振动信号各频率区间的能量分布

3.1 爆破振动信号各频率区间的划分

采用小波包分析技术对爆破振动信号进行各频率区间分解,分解的有效深度实际上应根据爆破振动信号分析的目的以及所采用爆破振动记录仪的最小工作频率而定。本次现场实验所选用的采样频率为 1024 Hz,由 Shannon 采样定理可知,则其 Nyquist 频率为 512 Hz。由于爆破振动记录仪的最小工作频率为 5 Hz,根据小波包分解原理以及试验分析的需要,可以将各测点爆破振动信号分解到第 7 层,则爆破地震波按照从低到高划分为如下 128 个频率区间:0～4,4～8,8～12,…,508～512 Hz。

3.2 各频率区间信号的能量表征

选取爆破振动信号的全频带[0 Hz,512 Hz]作为频率区间,对爆破振动信号进行小波包分解,然后由小波包重构公式求取爆破振动信号各频率区间内的重构子信号,则原始爆破振动信号完全可以由这些重构子信号来表示[16],即:

$$f(t)=\sum_{j=0}^{2^7-1}S_{7,j}(t)=S_{7,0}(t)+S_{7,1}(t)+\cdots+S_{7,2^7-1}(t) \tag{5}$$

式中:$S_{7,j}(t)$ ($j=0,1,2,\cdots,2^7-1$)为原始爆破振动信号 $f(t)$第 j 个节点上的重构子信号。

爆破振动信号各频率区间内的重构子信号能量可以表示为:

$$E_{7,j}=\int |S_{7,j}(t)|^2\mathrm{d}t=\sum_{k=1}^{m}|x_{j,k}(t)|^2 \tag{6}$$

式中:$x_{j,k}(t)$ ($j=0,1,2,\cdots,2^7-1;k=1,2,\cdots,m$)为重构子信号 $S_{7,j}(t)$离散采样点的幅值;m 为爆破振动信号离散采样点的个数。

由式(6)可知,设原始爆破振动信号的总能量为 E_0,则有:

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^7-1} E_{7,j} \tag{7}$$

爆破振动信号各频率区间内的重构子信号能量占被分析信号总能量的比例为

$$\eta_j = \frac{E_{7,j}}{E_0} \times 100\% \tag{8}$$

3.3　各频率区间信号的能量分布规律

根据式(6)～(8)，用 MATLAB 语言编写程序，然后分别对图 1(a)所示的爆破振动加速度信号和图 3(a)所示的去除趋势项后的爆破振动速度信号进行小波包分解，得到各频率区间内信号能量分布的计算结果，图 4(a)和 4(b)分别为爆破振动加速度信号和去除趋势项后爆破振动速度信号在不同频率范围内的能量分布。通过分别对照图 4(a)与图 1(b)以及图 4(b)与图 3(b)可以看出，与建立在传统 Fourier 变换基础上的频谱分析相比，基于小波变换的能量分析具有更精细的频率分辨率。从图 4 可以看出，爆破振动信号绝大部分能量都集中在 40～140 Hz 频率范围内，分别占爆破振动信号总能量的 89.08%和 92.89%，但两者的相关系数仅为 0.546 6；实测爆破振动加速度信号与爆破振动速度信号在不同频率范围内能量分布的方差分别为 7.214 7 和 5.955 2，由此表明爆破振动速度信号比实测爆破振动加速度信号在不同频率范围内能量分布更均匀。若将爆破振动信号各频率区间范围划分得稍宽一点，即划分成如下 8 个频率区间：0～20、20～40、40～60、60～80、80～100、100～120、120～140 和 140～512 Hz，则爆破振动信号各频率区间内能量占被分析信号总能量的百分比见表 1。由表 1 可以计算出，实测爆破振动加速度信号与爆破振动速度信号各频率区间内能量分布的相关系数高达 0.968 1。由此表明，各频率区间范围划分越宽，实测爆破振动加速度信号与爆破振动速度信号各频率区间内能量分布的相关程度越高。

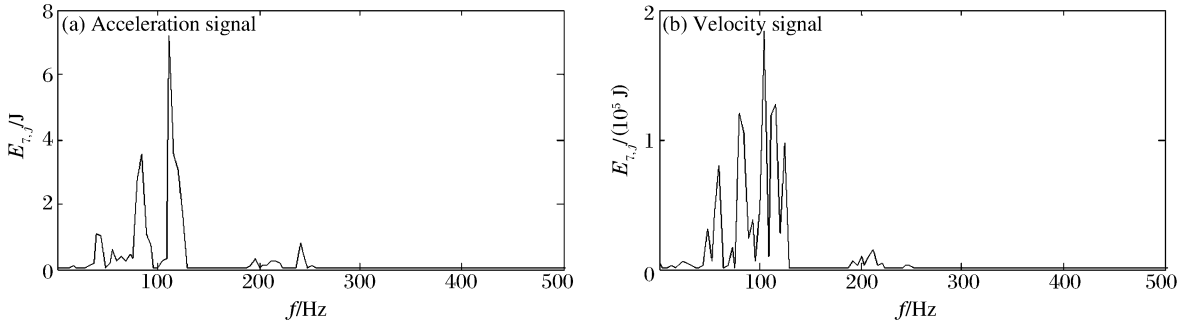


图 4　爆破振动信号的能量分布

Fig. 4　Energy distribution of blast vibration signal in different frequency ranges

表 1　爆破振动信号各频率区间内能量分数

Table 1　Percentage of energy of blast vibration signals in different frequency ranges

加速度信号		速度信号	
f/Hz	能量分数/%	f/Hz	能量分数/%
0～20	0.32	0～20	0.65
20～40	1.28	20～40	1.41
40～60	8.95	40～60	7.18
60～80	4.76	60～80	8.66
80～100	25.49	80～100	25.06
100～120	34.92	100～120	41.38
120～140	14.96	120～140	10.61
140～512	9.32	140～512	5.05

3 结 论

(1) 在模式自适应小波原理的基础上,提出了将实测爆破振动加速度信号梯形数值积分后的爆破振动速度信号作为一个模式自适应小波基的方法,采用该方法可成功去除时域积分后爆破振动速度信号中趋势项的干扰,并通过实测爆破振动加速度信号功率谱与爆破振动速度信号功率谱的比较,验证了该方法是切实可行的;

(2) 通过对去除趋势项后的爆破振动速度信号进行能量特征分析,并将此法与爆破振动速度信号傅里叶谱分析作了比较:基于小波变换的能量分析比傅里叶谱分析具有更精细的频率分辨率,更适合于对频率分辨率要求更高的爆破振动信号进行分析;

(3) 将实测爆破振动加速度信号与去除趋势项后爆破振动速度信号的各频率区间内能量特征作了比较,得到频率区间范围划分越宽,实测爆破振动加速度信号与爆破振动速度信号在不同频率范围内能量分布的相关程度越高;反之,相关程度越低。

参考文献:

[1] 凌同华,李夕兵.地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J].爆炸与冲击,2004,24(1):63-68.
Ling Tonghua, Li Xibing. The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):63-68.

[2] 宗琦,汪海波,周胜兵.爆破地震效应的监测和控制技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(5):938-945.
Zong Qi, Wang Haibo, Zhou Shengbing. Research on monitoring and controlling techniques considering effects of seismic shock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(5):938-945.

[3] 娄建武,龙源,方向,等.基于反应谱值分析的爆破震动破坏评估研究[J].爆炸与冲击,2003,23(1):41-46.
Lou Jianwu, Long Yuan, Fang Xiang, et al. Study on blasting vibration damage based on response spectrum[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):41-46.

[4] 周英杰.加速度测试积分位移算法及其应用研究[D].重庆:重庆大学,2013:1-7.
Zhou Yingjie. A study on integral algorithm for acceleration test to get displacement and application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013:1-7.

[5] 温广瑞,李杨,廖与禾,等.基于精确信息重构的故障转子系统振动加速度信号积分方法[J].机械工程学报,2013,49(8):1-9.
Wen Guangrui, Li Yang, Liao Yuhe, et al. Faulty rotor system vibration acceleration signal integration method based on precise information reconstruction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(8):1-9.

[6] 陈为真,汪秉文,胡晓娅.基于时域积分的加速度信号处理[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(1):1-4.
Chen Weizhen, Wang Bingwen, Hu Xiaoya. Acceleration signal processing by aumerical integration[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010,38(1):1-4.

[7] 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.

[8] 陆凡东,方向,郭涛,等.EMD 与 SLS 法在爆破振动加速度信号时域积分中的应用[J].振动与冲击,2012,31(9):90-93,101.
Lu Fandong, Fang Xiang, Guo Tao, et al. Application of EMD and SLS in time integration of blasting vibration acceleration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(9):90-93,101.

[9] 蒋良潍,姚令侃,吴伟.边坡振动台模型实验动位移的加速度时程积分探讨[J].防灾减灾工程学报,2009,29(3):261-266.
Jiang Liangwei, Yao Lingkan, Wu Wei. Study on calculation of dynamic displacement from time integration of acceleration in shaking table model tests of side slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009,29(3):261-266.

[10] 凌同华,张胜,陈倩倩,等.模式自适应小波构造与添加及其在爆破振动信号分析中的应用[J].振动与冲击,2014,

33(12)：53-57，120.

Ling Tonghua，Zhang Sheng，Chen Qianqian，et al. Pattern adapted wavelet construction and addition and its application in blast vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock，2014，33(12)：53-57，120.

[11] 程正兴，杨守志，冯晓霞. 小波分析的理论、算法、进展和应用[M]. 北京：国防工业出版社，2007：1-11.

[12] 张胜，凌同华，刘浩然，等. 模式自适应小波时能密度法及其在微差爆破振动信号分析中的应用[J]. 煤炭学报，2014，39(10)：2007-2013.

Zhang Sheng，Ling Tonghua，Liu Haoran，et al. Pattern adapted wavelet time-energy density method and its application in millisecond blast vibration signal analysis[J]. Journal of China Coal Society，2014，39(10)：2007-2013.

[13] Mesa H. Adapted wavelets for pattern detection[C]// Progress in Pattern Recognition，Image Analysis and Applications. Berlin Heidelberg：Springer，2005：933-944.

[14] Chapa J O，Rao R M. Algorithms for designing wavelets to match a specified signal[J]. IEEE Transactions on Signal Processing，2000，48(12)：3395-3406.

[15] 管晓明，傅洪贤，王梦恕. 隧道近距下穿山坡楼房爆破振动测试研究[J]. 岩土力学，2014，35(7)：1995-2003.

Guan Xiaoming，Fu Hongxian，Wang Mengshu. Blasting vibration characteristics monitoring of tunnel underpassing hillside buildings in short-distance[J]. Rock and Soil Mechanics，2014，35(7)：1995-2003.

[16] 中国生，敖丽萍，赵奎. 基于小波包能量谱爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响[J]. 爆炸与冲击，2009，29(3)：300-305.

Zhong Guosheng，Ao Liping，Zhao Kui. Influence of explosion parameters on energy distribution of blasting vibration signal based on wavelet packet energy spectrum[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(3)：300-305.

Application of removal trend method of pattern adapted continuous wavelet to blast vibration signal analysis

Zhang Sheng[1,2]，Ling Tonghua[1]，Cao Feng[1]，Huang Kan[1]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture，Changsha University of Science & Technology，Changsha* 410114，*Hunan，China*；
2. *College of Civil Engineering，Hunan City University，Yiyang* 413000，*Hunan，China*)

Abstract：To accurately characterize such important characteristics as the peak velocity and the energy distribution in different frequency ranges of the blast vibration signal，this signal's trend after the time integral has to be removed. In this paper，the trapezoidal numerical integration of the measured blast vibration acceleration signal was carried out，the blast vibration velocity signal after the time integral as a method for the wavelet basis was proposed，the trend of the blast vibration velocity signal after the time integral was removed using this method，and the characteristics of energy distribution in different frequency ranges of the signal after the trend removal was analyzed. The results show that the trend of the blast vibration velocity signal after the time integral was successfully removed using the pattern adapted wavelet method. Compared with the frequency spectra analysis based on the conventional Fourier transform，the energy analysis based on the wavelet transform had a higher frequency resolution and was more suitable for the analysis that satisfied a higher requirement of frequency resolution for the signal. The more widely divided the different frequency ranges，the higher the degree of the energy distribution correlation in different frequency ranges between the measured blast acceleration signal and the blast vibration velocity signal and，on the other hand，the less widely divided，the lower the degree of the correlation.

Keywords：blast vibration；energy distribution；pattern adapted wavelet；trend；wavelet basis

（责任编辑　王小飞）