

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.05.011

基于小波包变换的爆破地震反应谱分析*

陈作彬^① 李兴华^② 范磊^② 孙飞^①
①核工业南京建设集团有限公司(江苏南京, 21003)
②解放军陆军工程大学(江苏南京, 210007)

[摘 要] 爆破地震反应谱理论能够反映爆破振动作用下结构体的动态响应。选取某项目模型试验测试得到的爆破振动加速度信号为研究对象,采用小波包分析方法将振动信号进行分解和重构,得到爆破振动信号的频谱、时频和能量特性。结合反应谱理论得到各节点小波包重构系数的反应谱曲线,反应谱曲线峰值对应的频率与该节点重构小波包系数主频基本一致。当节点频率增大时,反应谱曲线峰值有增大的趋势,且峰值上升和下降部分由缓变陡。将小波包分析方法和地震反应谱理论结合起来,能够得到爆破振动的精细反应谱,为抗爆破振动设计提供了一种新思路。

[关键词] 爆破振动;小波包分析;地震反应谱;动态响应

[分类号] O382; TD235.1

Analysis of Blasting Seismic Response Spectrum Based on Wavelet Packet Transform

CHEN Zuobin^①, LI Xinghua^②, FAN Lei^②, SUN Fei^①
① Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 210003)
② Army Engineering University of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] Blasting seismic response spectrum theory can reflect the dynamic response of structures under blasting vibration. The blast vibration acceleration signal obtained from the test of a certain project model was selected as the research object. The wavelet packet analysis method was used to decompose and reconstruct the vibration signal, and the spectrum, time-frequency and energy characteristics of the blasting vibration signal were obtained. The response spectrum curve of each node's wavelet packet reconstruction coefficient was obtained via applying for the response spectrum theory. The frequency corresponding to the peak of the response spectrum curve was basically consistent with the primary frequency of the reconstructed wavelet packet coefficient. When the node frequency increased, the peak value of the response spectrum curve increased. The peak rising and falling parts gradually become steeper. Combining the wavelet packet analysis method with the seismic response spectrum theory, the fine response spectrum of blasting vibration can be obtained, which provides a new idea for anti-blasting vibration design.

[KEYWORDS] blasting vibration; wavelet packet analysis; seismic response spectrum; dynamic response

引言

爆破地震反应谱理论是分析建(构)筑物爆破振动动态响应的一种重要手段。该理论不仅考虑了爆破地震波的特性,还涉及结构本身固有的动力特性、材料性能和地基约束等条件,因此在工程结构的抗爆破振动分析中有着广泛的运用。石玉成等^[1]

研究了爆破振动作用下斜坡体的地震反应谱特点。谭科^[2]利用反应谱理论分析了梁式桥在爆破振动作用下的动力响应。何姣云等^[3]利用反应谱理论分析了大坝爆破地震的动力响应。陈兴泽等^[4]研究分析了地下厂房爆破开挖中顶拱层开挖爆破、梯段爆破、保护层开挖爆破及预裂爆破几种不同爆源形式的爆破地震反应谱特点。

爆破地震波信号是一种典型的非平稳信号,包

* 收稿日期:2018-05-09
基金项目:国家自然科学基金(51608530)
作者简介:陈作彬(1973-),男,高工,从事岩土爆破工程施工与技术管理工作。E-mail:690841265@qq.com
通信作者:李兴华(1985-),男,讲师,从事爆炸力学相关研究。E-mail:379523589@qq.com

含丰富的频率成分,一般研究者更关心爆破地震波主频或者建(构)筑物自振频率所在频带成分对结构体动态响应的影响。非线性的小波包信号分析方法实现了对信号的等带宽分解,提高了分析信号的时频分辨率,是一种精细的信号分析方法。韩亮等^[5]利用小波包分析方法研究了深孔台阶爆破近远区振动能量的分布特征。饶宇等^[6]通过对预裂孔爆破和主爆破(主爆孔+缓冲孔)的振动信号进行小波包分析,获得预裂孔爆破和主爆破的功率谱和能量谱。费鸿禄等^[7]基于现场实测隧道掘进爆破振动信号数据,采用小波包分析技术对振动信号进行小波包能量谱分析,得到爆破振动信号能量在各频带上的分布。

本文中,将小波包分析方法和反应谱理论相结合,利用小波包分析方法分解爆破振动信号,分析爆破振动信号的时频特点和能量分布,然后研究不同频带下爆破地震反应谱特点,为建(构)筑物抵抗爆破振动的分析提供参考。

1 爆破振动小波包分析

1.1 爆破振动信号选取

依托某项目模型试验时爆破振动加速度测试数据,表 1 为部分工况下爆源参数和质点振动加速度峰值。加速度测试采用 Blast-UM 型爆破振动加速度采集仪,采样频率为 10 kHz。该测振仪可同时采集测点水平径向、水平切向和垂直方向 3 个方向的振动。选取工况 1[#]中水平径向(X)爆破振动加速度信号为研究对象,其时程曲线如图 1 所示,频谱曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,该测点的爆破地震波的频率范围为 0~100 Hz,且有一个主振频带,主频率为 18 Hz。

1.2 爆破振动信号的小波包分解

小波包分析方法是将小波分析方法中没有分解的高频部分同样进行分解,实现了频带的均匀划分,克服了小波分析中高频段频率分辨率较差、低频段

表 1 爆破振动加速度测试结果

工况	装药量/ g	距离 /m	a/g		
			X	Y	Z
1 [#]	513	10	0.650 8	0.340 8	0.590 6
2 [#]	513	8	0.787 4	0.381 1	0.784 4
3 [#]	500	4	1.576 4	0.840 3	1.481 0

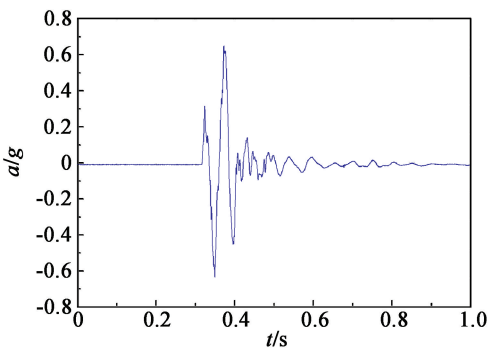


图 1 爆破振动加速度信号时程曲线
Fig. 1 Acceleration-time graph of blasting vibration signal

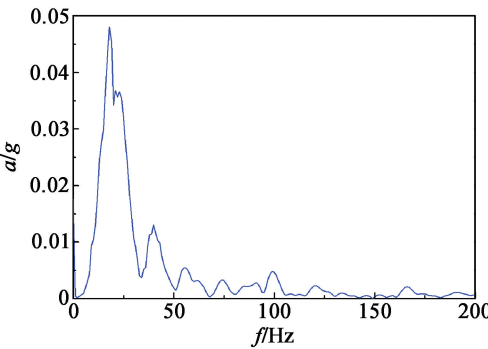


图 2 爆破振动加速度信号频谱曲线
Fig. 2 Spectrogram of acceleration of blasting vibration signal

时间分辨率较差的不足,提高了信号分析的时频分辨率,为爆破地震波非平稳随机信号分析提供了一种更精细的分析方法^[8]。

若对一个爆破振动信号 $x(t)$ 进行 i 层小波包分解,则可以得到 2^i 个子频带。若原始信号最低频率成分为 0,最高频率成分为 ω_m ,则每个子频带宽度为 $\omega_m/2^{[9]}$ 。试验中,设定爆破振动加速度采集仪的采样频率为 10 kHz,根据采样定理,则其奈奎斯特频率为 5 kHz。若对爆破振动信号进行 9 层小波包分解,则第 9 层共有 2^9 个子频带,最低频带为 0~9.8 Hz。

在利用小波包分析法对爆破振动信号进行分析中,选择恰当的小波基至关重要,db8 以其良好的紧支撑性、光滑性以及近似对称性,目前已广泛地应用于爆破振动信号分析^[10]。利用 db8 小波基对图 1 所示爆破振动加速度信号进行 9 层分解,得到 512 个频带的小波包系数。如果对所有频带进行分析,工作量会非常大,并且从图 2 可以看出,爆破振动频率成分主要在 0~100 Hz 之间,对于高频和超高频成分可以忽略不计;因此,本文中选择了[9,1]、[9,2]、[9,3]、[9,4] 4 个频段进行分析。图 3 为爆破

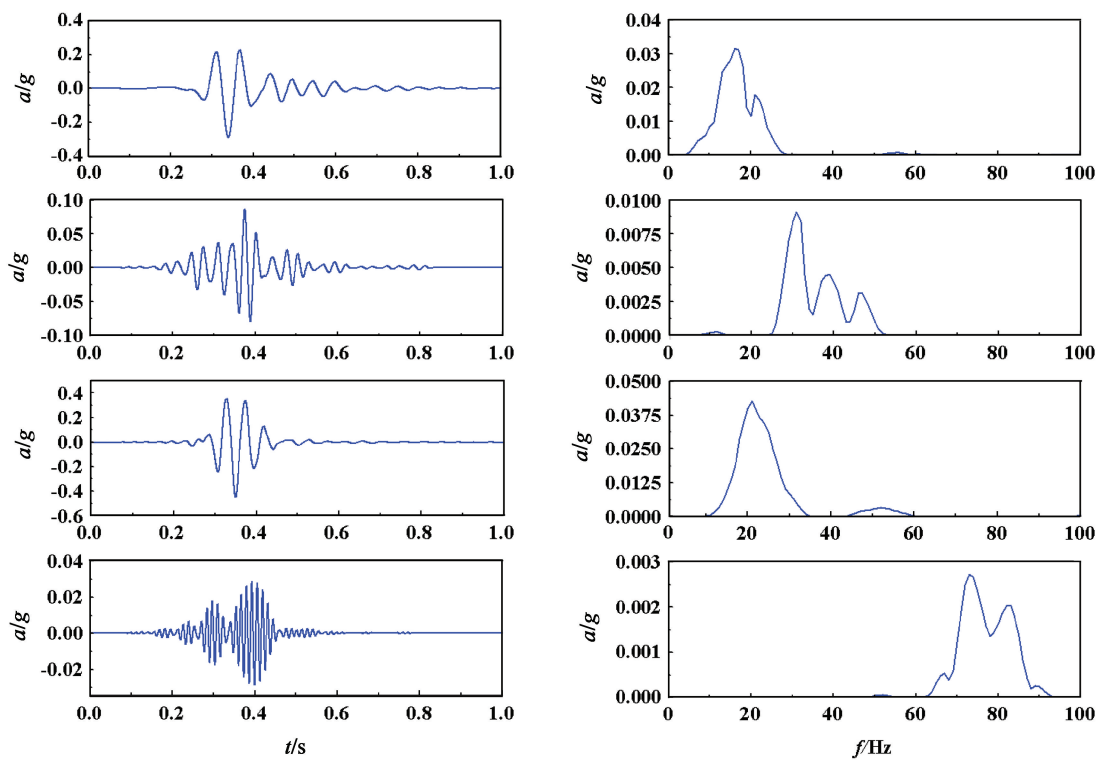
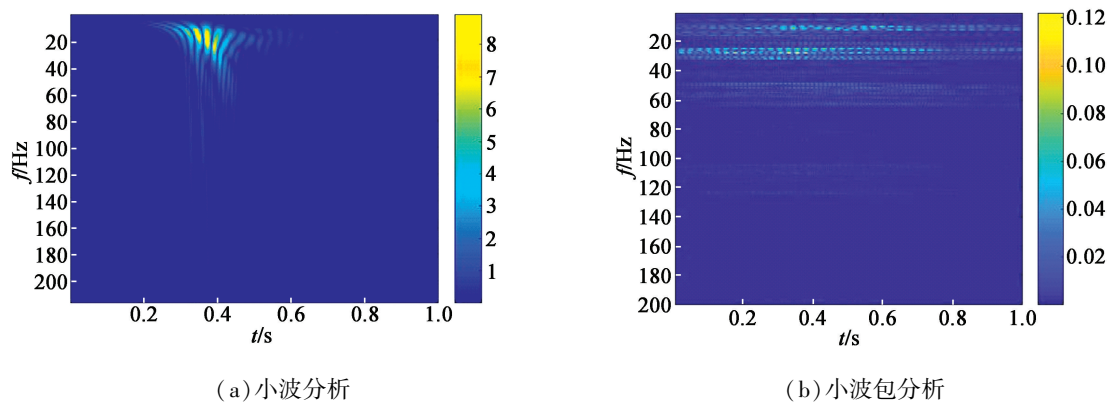


图 3 部分节点重构小波包系数及相应频谱

Fig. 3 Reconstructed wavelet packet coefficients of some nodes and corresponding spectrograms



(a) 小波分析

(b) 小波包分析

图 4 小波分析和小波包分析时频分布对比

Fig. 4 Comparison of wavelet analysis and wavelet packet analysis time-frequency distribution

振动信号部分重构小波包系数及相应的频谱图。图 4 为爆破振动加速度信号小波分析和小波包分析时频分布的对比。对比可知,通过小波包分析就可以很方便地将爆破振动信号放大分析,得到信号的细节信息,为进一步研究爆破振动下结构的响应奠定基础。

1.3 爆破振动信号不同频带的能量分布特征

对爆破振动信号 $x(t)$ 进行 i 层小波包分解,是将 $x(t)$ 投影到 db8 小波基上,第 i 层可以得到 2^i 个小波包系数,然后对小波包分解系数进行重构,则原始信号 $x(t)$ 的表达式为

$$x(t) = \sum_{k=0}^{j-1} x_{i,k} = x_{i,0} + x_{i,1} + \cdots + x_{i,j-1} \quad (1)$$

式中: $x_{i,k}$ 为爆破振动信号分解到节点 (i,k) 上的重构信号,其中, $j=2^i,k=0,1,2,\cdots,j-1$ 。

第 k 个频带重构信号的时频谱可以定义为

$$W(t,f_k) = |x_{i,k}(t)|^2 \quad (2)$$

式中: f_k 为节点 (i,k) 的中心频率; $k=0,1,2,\cdots,j-1$ 。

由 Parseval 定理及式(1)可知,第 k 个频带重构信号的能量定义为

$$E_k = \int W(t,f_k) df = \int |x_{i,k}(t)|^2 dt = \sum_{l=1}^n |v_{k,l}|^2 \quad (3)$$

式中: $v_{k,l}$ 为重构信号; $x_{i,k}(t)$ 离散采样点的幅值; $l = 1, 2, 3 \cdots n$, n 为离散采样点数。

第 k 个频带重构信号的能量占爆破振动信号总能量的百分比可表示为

$$e_k = \frac{E_k}{\sum_{k=0}^{i-1} K_k} \quad (4)$$

由式(2)可以求解爆破振动信号 $x(t)$ 在整个时域和频域上的时频谱, 由式(3)、式(4)可以求解爆破信号分解后各频带内的能量分布情况, 从而反映出爆破振动信号不同的时域和能量特征。

采用 db8 小波基函数, 对图 1 所示的爆破振动加速度信号进行深度为 9 层的小波包分解。根据式(1)~式(4)编制相应的 MATLAB 计算程序, 从而获得上述爆破振动信号的时域和能量分布特征, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 图 1 所示爆破振动信号有 [9, 1] 和 [9, 4] 两个能量主频带, 分别占总能量的 30% 和 58%, 振动信号能量分布比较集中。

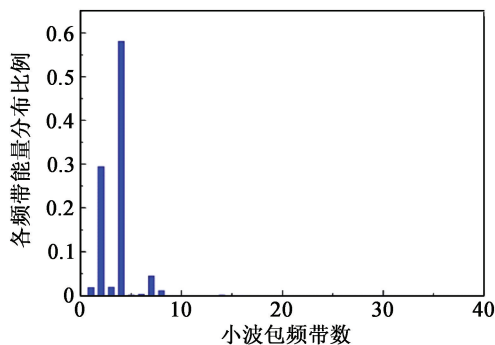


图 5 爆破振动信号各频带的能量分布

Fig. 5 Energy distribution in different frequency bands of blasting vibration signal

2 基于小波包变换的爆破振动反应谱分析

2.1 爆破地震反应谱

反应谱理论最早由美国的 M. Biot 于 1933 年提出^[11], 是工程结构抗震设计的基础理论之一。反应谱是指单质点体系在地震作用下的最大响应与结构自振周期(或频率)之间的关系, 它通过一系列理想简化的单质点体系的动力响应描述地震动频谱特征对结构的影响规律。

根据达郎贝尔原理建立单自由度弹性体系在爆破地震运动 $\ddot{x}_0(t)$ 作用下的动力平衡微分方程

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = -\ddot{x}_0(t) \quad (5)$$

式中: ξ 为体系的阻尼比, 一般工程结构的阻尼比在

0.01 ~ 1.00 之间, 抗震规范取为 0.05; ω 为无阻尼单自由度弹性体系的圆频率。式(5)的解为

$$x(t) = -\frac{1}{\omega'} \int_0^t \ddot{x}_0(\tau) e^{-\xi\omega'(t-\tau)} \sin\omega'(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

式中: ω' 为考虑阻尼时结构的自振圆频率, $\omega' = \omega \times \sqrt{1 - \xi^2}$ 。

式(6)为单自由度弹性体系在爆破地震作用下的位移反应。根据反应谱理论及位移、速度、加速度之间的关系, 可以求得单自由度弹性体系在水平地震作用下相对于地面的速度反应 $\dot{x}(t)$, 绝对加速度反应 $\ddot{x}(t) + \ddot{x}_0(t)$ 。

令 $S_d = |\dot{x}(t)|_{\max}$, $S_v = |\dot{x}(t)|_{\max}$, $S_a = |\ddot{x}(t) + \ddot{x}_0(t)|_{\max}$, 则将 S_d 、 S_v 、 S_a 分别称为相对位移反应谱、相对速度反应谱和绝对加速度反应谱。令 $\beta_d = S_d / |\dot{x}_0(t)|_{\max}$, $\beta_v = S_v / |\dot{x}_0(t)|_{\max}$, $\beta_a = S_a / |\ddot{x}_0(t)|_{\max}$, 则将 β_d 、 β_v 、 β_a 分别称为相对位移标准谱、相对速度标准谱和绝对加速度标准谱。

目前, 反应谱的数值计算方法有精确逐步积分方法(精确法)、褶积算法、插值算法、线性加速度法、中心差分方法、Z 变换方法和离散 Fourier 变换方法等。其中, 综合考虑精度、稳定性和效率 3 个因素, 精确法仍然是计算地震动反应谱的首选方法^[12]。根据精确法, 用 MATLAB 语言编制了反应谱计算程序, 对图 1 所示爆破振动加速度信号进行反应谱数值计算, 得到的不同阻尼比系数下的绝对加速度标准谱曲线, 如图 6 所示。

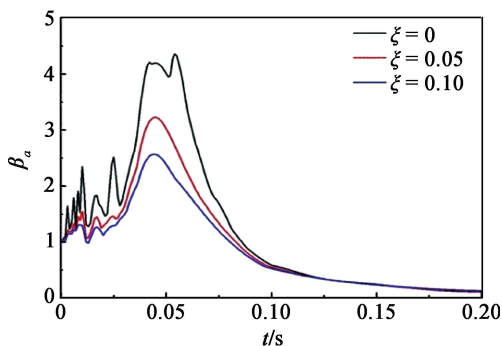


图 6 爆破地震绝对加速度标准谱曲线

Fig. 6 Absolute acceleration standard spectrum of blasting seismic wave

标准反应谱反映了结构体对爆破振动的选择放大作用, 体现出结构体对爆破振动响应时的动力效应。从图 6 中可以看出, 该加速度标准谱曲线具有多个峰值点, 最大峰值点对应的周期大约为 0.05 s (对应频率为 20 Hz), 当周期大于 0.10 s 时, 曲线变化趋于平缓, 逐渐趋近于 0。另外, 标准谱曲线峰值

随阻尼比增大而减小,而且变化较大,这说明阻尼对减弱爆破地震效应有显著效果。

2.2 不同频带成分的爆破地震反应谱

从反应谱的定义式可知,振动信号频率直接影响反应谱,爆破振动信号的小波包分解已经实现了频带的精细分析,且每个频带都有自己的主频,分析每个小波包系数的爆破振动反应谱能够实现反应谱的精细分析,同时得到频率对反应谱的影响。

图 7 为图 1 所示爆破振动加速度信号小波包分解第 9 层前 8 个重构小波包系数对应的反应谱曲线。从图 7 中可以看出,与原始信号反应谱相比,各节点重构小波包系数对应的反应谱曲线只有一个峰值,这主要是因为原始信号包含丰富的频率成分,而各节点重构小波包系数的频率成分比较单一;各节点重构信号反应谱曲线峰值对应的频率与该节点重构小波包系数主频基本一致,这说明当爆破振动频率与结构体频率接近时,出现共振现象,结构体振幅达到最大值;随着各节点重构小波包系数包含频率成分的增大,反应谱曲线峰值有逐渐增大的趋势,且峰值上升和下降部分由缓变陡。

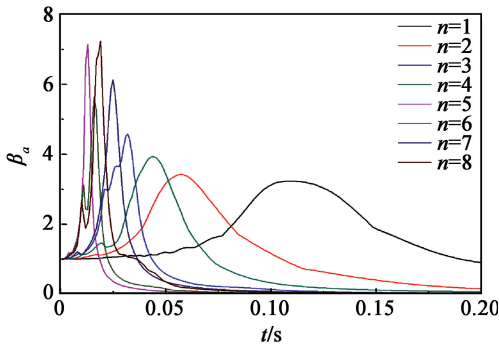


图 7 各节点重构小波包系数反应谱曲线
Fig. 7 Response spectrum of reconstructed wavelet packet coefficients in different nodes

3 结论

- 1)采用小波包分析方法对爆破振动信号进行分解和重构,得到了爆破振动信号的时频特征和能量分布特征,结果表明小波包分析法较小波分析法具有更高的时频分辨率,能够实现爆破振动信号的精细分析。
- 2)研究得到各节点重构小波包系数对应的反应谱曲线,反应谱曲线峰值对应的频率与该节点重构小波包系数主频基本一致,当节点频率增大时,反应谱曲线峰值有增大的趋势,且峰值上升和下降部分由缓变陡。

3)基于小波包变换的爆破地震反应谱分析方法实现爆破振动信号反应谱的精细分析,能够全面分析不同频率成分下结构体的动态响应,为抗爆破振动设计提供新的思路。

参 考 文 献

[1] 石玉成, 卢育霞, 何少林, 等. 爆破震动作用下斜坡体的地震动分布及其动应力响应特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2): 3707-3717.
SHI Y C, LU Y X, HE S L, et al. Distribution characteristics of ground motion and dynamic stress response of valley slopes under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Suppl. 2): 3707-3717.

[2] 谭科. 梁式桥在爆破振动作用下的动力响应分析与研究 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
TAN K. The research of beam bridge under the action of blasting vibration dynamic response analysis [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2017.

[3] 何姣云, 吴新霞, 钱胜国. 大坝爆破地震的动力响应计算 [J]. 爆破, 2002, 19(4): 1-3.
HE J Y, WU X X, QIAN S G. Calculation of dynamic response of seism in dam blasting[J]. Blasting, 2002, 19(4): 1-3.

[4] 陈兴泽, 杨兴国, 李洪涛, 等. 地下厂房开挖爆破地震反应谱特征研究 [J]. 工程爆破, 2012, 18(1): 44-47.
CHEN X Z, YANG X G, LI H T, et al. Study on response spectrum of blasting vibration induced by underground powerhouses excavation [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(1): 44-47.

[5] 韩亮, 辛崇伟, 梁书锋, 等. 深孔台阶爆破近远区振动特征的试验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(8): 65-70.
HAN L, XIN C W, LIANG S F, et al. Experimental study on vibration characteristics of deep hole bench blasting in both near and far field[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8): 65-70.

[6] 饶宇, 夏元友, 胡英国, 等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (7): 191-198.
RAO Y, XIA Y Y, HU Y G, et al. Influence of pre-splitting crack on spectrum distribution characteristics of blasting vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (7): 191-198.

[7] 费鸿禄, 曾翔宇, 杨智广. 隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 77-83.

