

# 爆破地震波能量分布研究

徐振洋, 杨 军, 陈占扬, 刘燕燕

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 使用电子雷管精确延时逐孔起爆可使爆破振动信号主频及能量分布主频带向高频发展且分布更加均匀。利用 EEMD(集合经验模态分解)算法分析振动能量分布规律,结果表明:爆破振动能量主频带出现在 15 ~ 45 Hz,主频带内能量占信号总能量的 80% 以上;爆破振动能量在 10 Hz 以下频带分布仅占总能量 4.5% 以下,有效避免了低频振动损伤;将爆破振动能量分布主频带及能量分布比例引入建筑物安全保护进行分析,是一种有效地尝试。

**关键词:** 电子雷管;精确延时;EEMD;能量;频率

**中图分类号:** TK235.1;TD235.37

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2014.11.007

## Blasting seismic waves energy distribution based on EEMD

XU Zhen-yang, YANG Jun, CHEN Zhan-yang, LIU Yan-yan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Blasting with electronic detonators can be used to make the main frequency band of energy distribution of blast vibration signals move towards high-frequency and the distribution trend is more even. Here, EEMD (a collection of empirical mode decomposition) was used to analyze the main frequency band of blasting vibration energy distribution. The results showed that the main frequency band of blasting vibration energy appears in the range of 15 ~ 45 Hz; blasting vibration energy distributing in the frequency range of below 10 Hz is less than 4.5% of the total energy, the low-frequency vibration damage was avoided effectively; introducing blasting vibration energy distribution and energy distribution proportion in frequency domain into the building safety analysis is an effective attempt.

**Key words:** electronic detonators; accurate delay; EEMD; energy; frequency

爆破地震效应是复杂环境控制爆破工程中的主要危害,电子雷管延时时间长、精度高,已广泛应用于各类爆破工程中<sup>[1]</sup>。现场结合预裂爆破,严格控制爆破振动并对爆破区域周边建筑物进行振动安全分析。使用 EEMD(集合经验模态分解)方法,对各测点爆破振动信号振速、频率与能量分布主频带及其变化规律进行分析<sup>[2]</sup>。将爆破振动信号能量分布主频带概念引入建筑物保护研究,为深入探讨爆破振动安全问题提供依据。

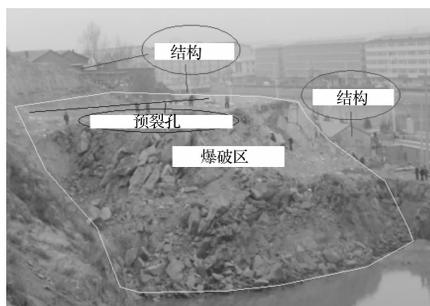


图1 爆破现场图

Fig. 1 Blasting areas

## 1 实验设计

### 1.1 工程概况

工程位于赤城县西侧汤泉河北岸。场地向北侧和东西两侧山体开挖扩展,表面覆盖层开挖后,下部岩体需要进行爆破开挖,区域面积约 13 500 m<sup>2</sup>,平均下挖深度 7 ~ 8 m,爆破方量约 6 000 m<sup>3</sup>。图 1 为爆破现场,图

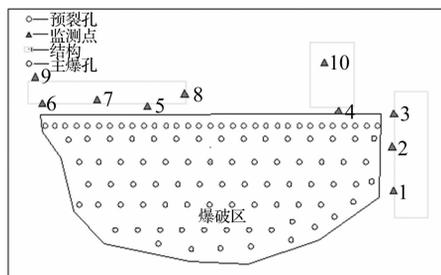


图2 监测点布置示意图

Fig. 2 Places of monitoring points

2 为监测点布置示意图。

### 1.2 爆破及监测点布置方案

采用精确延时逐孔起爆方案,所用雷管均为电子雷管,为确保临近建筑物的安全,在主爆区和保留区之间利用预裂爆破形成一条预裂缝,达到减震的目的<sup>[3]</sup>。本次爆破总药量约 3 600 kg,预裂孔单孔最大药量 10

kg,孔内不耦合装药,预裂孔孔距 0.8 m,排距 2.3 m。预裂孔先于主爆孔 70 ms 起爆,孔数为 33 个,三个孔一组,每组之间延期时间同为 3 ms。主爆孔单孔最大药量约为 21 kg,孔距 3 m,排距 2.5 m,采取孔内延期与孔外延期结合。具体延期时间设定如图 3 所示,所标注时间为炮孔雷管引爆时刻。

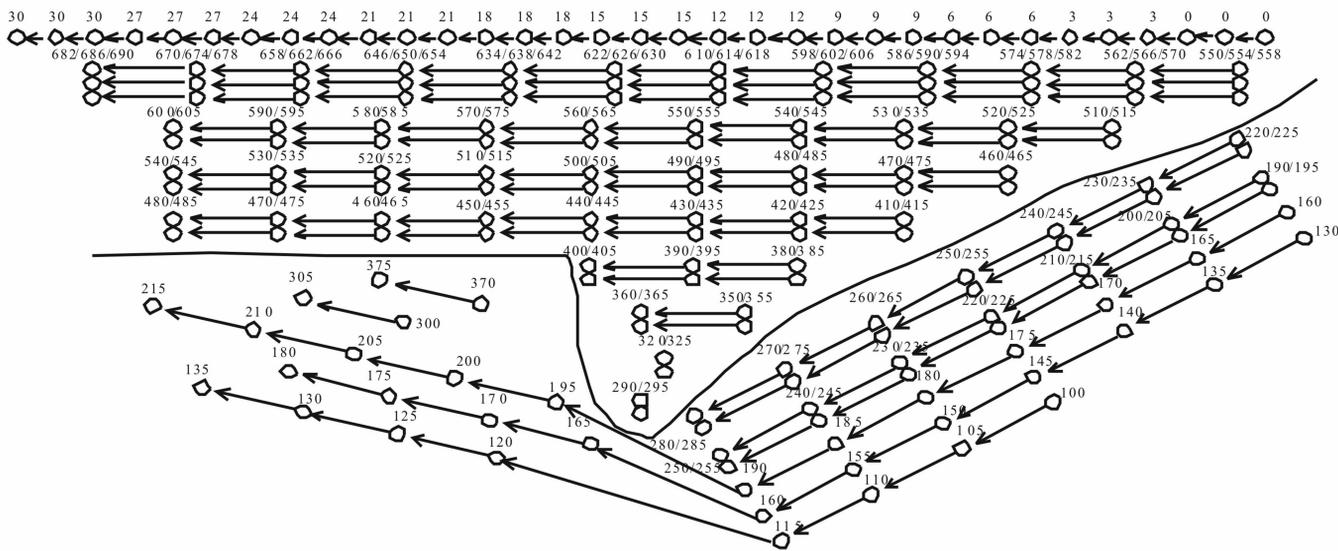


图 3 爆破延时时间

Fig. 3 Blasting delay time

表 1 爆破监测数据表

Tab. 1 Table of blasting vibration monitoring results

测点序号	水平切向 振速/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水平径向 振速/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	垂直向 振速/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水平切向 主频/Hz	水平径向 主频/Hz	垂直向 主频/Hz	与爆心 距离/m	与爆源底面 高程差/m
测点 1	1.21	0.98	1.36	19.2	18.4	21.8	39	3
测点 2	1.19	0.97	1.25	19.1	18.8	21.0	39	3
测点 3	0.83	0.78	0.59	15.6	18.7	15.3	47	3
测点 4	4.65	3.83	3.82	30.6	18.3	16.5	15	7
测点 5	4.18	2.66	2.2	28.4	21.0	24.7	28	7
测点 6	1.22	1.09	1.03	18.4	17.9	18.9	35	7
测点 7	0.64	0.58	0.52	20.8	21.2	18.2	47	7
测点 8	0.39	0.40	0.35	23.6	22.4	24.1	47	7
测点 9	0.41	0.29	0.30	23.9	21.2	23.8	52	7
测点 10	0.3	0.43	0.32	20.6	18.4	20.5	59	7

### 1.3 爆破振动信号监测结果

根据现场地形及周边建筑物受保护需要,共布置 10 个监测点,均使用三向传感器进行爆破振动信号监测,表 1 为爆破振动信号监测数据表。

测点 1、测点 2、测点 3 位于爆区侧面,高程相同,三个方向质点峰值振速均在安全标准之内。测点 4~10 位于爆区后方,高程相同,与爆破抛掷方向相反,一般爆区后方振动速度较大<sup>[4]</sup>。测点 4 距离砖砌民房只有 15 m,三个方向地表峰值振速在 10 个测点信号中均为最大,水平切向振速为 4.18 cm/s,明显大于水平径向

与垂直向振速。在高程相同条件下,质点峰值振速大小随监测点与爆源中心距离增大递减,除测点 8 与测点 10 外,余下 8 个测点信号水平切向振速均大于其余两个方向振速。考虑高程差的影响,测点 3、测点 7、测点 8 距爆心距离相同,爆破振动信号主频随高程增大而增大。

10 个测点信号主频在 20 Hz 左右波动,并未有明显变化规律,说明使用电子雷管精确延时逐孔起爆,可以较好的控制爆破振动主频。依据《爆破安全规程》(GB6722-2003)<sup>[5]</sup>,该类房屋最大振速不得超过 2.8

cm/s,测点4、测点5峰值振速已经超出安全标准,但爆破后检查发现民房并未受到破坏,需结合多因素综合分析<sup>[6]</sup>。

由于建(构)筑物的自振频率一般都比较低,所以降低低频振动能量与提高信号能量分布主频带是很重要的<sup>[7]</sup>,使用电子雷管精确延时主控起爆可以减少振动叠加,避免峰值振速过大并使振动信号主频提高<sup>[8]</sup>。爆破振动是时间、频率、振速三者共同作用的,爆破振动能量即为三个参数综合表现<sup>[9-10]</sup>,使用EEMD方法对信号能量特征进行分析。

## 2 信号能量分布

### 2.1 (EEMD)集合经验模态分解

在EEMD方法中附加的白噪声均匀分布在整个时频空间,不同尺度的信号区域将自动映射到与背景白噪声建立的相应尺度上。EEMD分解通过加上有限的噪声,IMF分量均值保持在正常的动态滤波器窗口范围内,自动排除了模态混叠<sup>[11-12]</sup>。

EEMD分解步骤如下<sup>[13]</sup>:

(1) 将均值为零、幅值标准差为常数的白噪声  $n_i(t)$  多次加入原始信号  $y(t)$ ,即

$$y_i(t) = y(t) + n_i(t) \quad (1)$$

式中,  $y_i(t)$  为含有第  $i$  次白噪声的信号。

(2) 将包含白噪声的信号  $y_i(t)$  分别进行EMD分

解,将各个IMF分量记为  $c_{ij}(t)$ ,余项记为  $r_i(t)$ 。

(3) 将之前得到的IMF分量进行总体平均运算,得到EEMD分解后最终的IMF分量,即

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

### 2.2 爆破振动信号分析

建(构)筑物水平向抗震能力相对薄弱,建(构)筑物受相同强度水平荷载的剪切破坏更为强烈<sup>[14]</sup>,且建(构)筑物高度对水平振动具有明显放大作用<sup>[15]</sup>。测点4与测点5信号水平切向振速均大于其余两个方向振速,超出安全振动标准,为讨论建筑物振动安全,选择测点4信号水平切向分量作为分析对象。图4为监测点4爆破振动信号水平切向分量波形图,图5为边际能量谱。

由于电子雷管精确延期,图4中可以看出,信号出现多个峰值,除0.29s处开始的2个峰值明显较大以外,其余峰值大小相当,分析峰值出现时间,考虑由于预裂孔距离测点4更为接近,信号最大峰值为预裂爆破振动信号。在预裂爆破之后,主爆区信号表现出精确延时逐孔起爆控制爆破振动速度的优势,且避免了信号叠加形成的峰值过大。图5中看出,信号能量分布主频带为17.6~38.2Hz,10Hz以下的低频能量较少,可以有效地减小共振危害。图6为监测点4三维能量谱,图7为能量分布图。

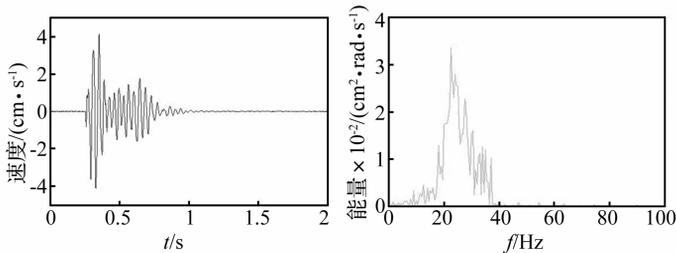


图4 波形图

Fig. 4 Blasting vibration signal waveform

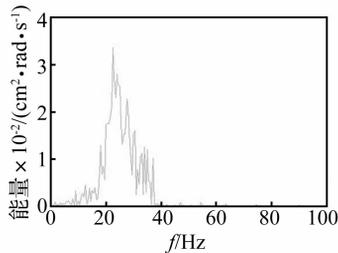


图5 边际能量谱

Fig. 5 Marginal energy spectrum

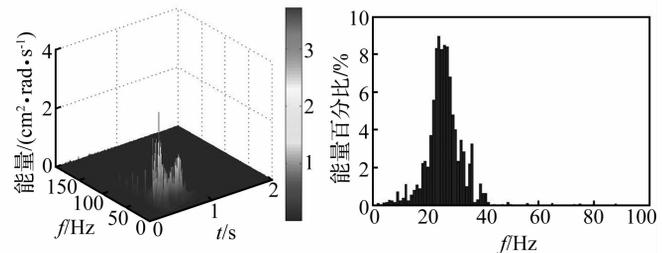


图6 三维能量谱

Fig. 6 Three-dimensional energy spectrum

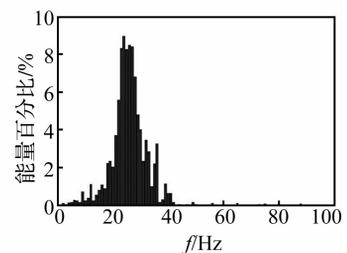


图7 能量分布图

Fig. 7 Energy scale plan

对三维能量谱进行分析,可以看出能量在低频带分布较少,且较为均匀。爆破振动能量在整个频域内较为分散,这就很好的避免了某个窄小的频带内能量过于集中,尤其是降低了与建筑物自振频率接近的低频带上的能量分布。

使用边际能量谱进行能量分布计算,用柱状图来表示振动能量的分布比例。可以得出能量从17.6Hz开始明显增大,超过40Hz的分布极少,10Hz以下频带振动能量分布非常少,只占信号总能量的3.3%。

### 2.3 能量分布主频带

爆破振动频谱一般以宽带频谱与窄带频谱相结合的形式表现,图6中这种形式明显的表现出来,较宽的频带内,不同的频率上出现能量较为接近的多个峰值,

此种表现正是宽带频谱的特点;在振动主频率较窄的范围内,振动主频能量峰值明显较大<sup>[16-17]</sup>。分析信号特征是,由于各谐波频率的能量都比较大,仅以主频率能量分析爆破振动对建(构)筑物的破坏作用是不全面的,使用能量分布主频带作为评价特征参数更为合理<sup>[18]</sup>。

在此做探索性研究,根据此次电子雷管逐孔起爆振动信号能量计算结果,如图7,能量分布图拟合后较为接近正态分布函数曲线,延时间坐标轴,在分布曲线最大值两侧存在两点导数值突然增大和减小,将此两点称为能量分布主频带上下限,将上限点与下限点之间具有一定宽度的频带定义为能量分布主频带。表2为爆破振动能量分布主频带。

表 2 爆破振动能量分布主频带  
Tab. 2 Energy distribution of blasting vibration frequency band

信号 序号	能量分布主频带									
	信号 1	信号 2	信号 3	信号 4	信号 5	信号 6	信号 7	信号 8	信号 9	信号 10
水平切向/Hz	16.2-40.3	17.1-40.9	16.6-34.5	17.6-38.2	20.5-43.7	17.4-39.8	16.8-36.4	17.6-35.1	16.9-35.6	15.6-33.1
水平径向/Hz	18.4-36.7	16.8-37.2	17.7-37.3	18.3-34.7	17.7-39.1	17.9-38.6	18.2-43.4	17.4-37.1	17.2-33.8	16.4-36.9
垂直向/Hz	14.8-30.6	15.0-34.6	15.3-35.8	15.5-41.2	16.9-35.7	18.9-40.3	16.2-33.7	14.1-35.1	15.8-37.0	13.5-33.3

表 2 中可以看出,使用电子雷管精确延时控制爆破的振动信号的能量主频带出现在 15 ~ 45 Hz,能量分布主频带发展随测点与爆心距离增大,主频带上下限有降低趋势,分布区间大致相当,频带宽度在 20 Hz 左右。同样场地条件与测点还进行过多次爆破,与使用普通毫秒延期雷管对比(同一工程进行过 3 次爆破,在场地条件相同条件下使用普通毫秒延期雷管与电子雷管进行过实验对比),使用电子雷管爆破振动能量主频带明显较高。在同样爆心距条件下,高程增大可使能量分布主频带提高,有利于建筑物保护,但由于高程对振速存在放大作用,必需严格控制振速<sup>[19]</sup>。

根据计算各向分量能量分布主频带内能量占此分量比例均在 80% 以上,监测点 4 能量分布主频带内能量占水平切向分量能量的 92.7%,监测点 4 水平切向分量能量占信号总能量的均在 47.2%。

### 3 能量分布规律

建筑物自振频率一般在 10 Hz 以下,计算各信号的三向分量能量分布在 10 Hz 以下频带的大小占此分量信号总能量的比例。监测点 4 ~ 10 高程相同,便于分析,图 8 为监测点 4 ~ 10 振动信号在 10 Hz 以下低频带上能量分布比例。

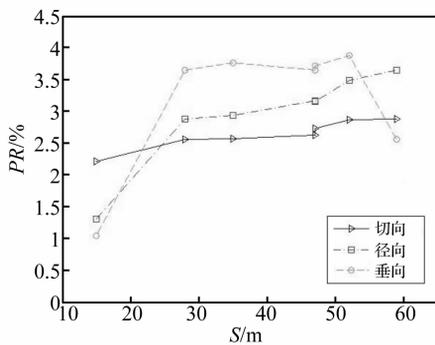


图 8 低频能量分布比例

Fig. 8 Low-frequency energy data

图 8 中坐标 PR/% 为低频能量所占百分比,横坐标 S/m 为测点至爆源中心距离,蓝色三角形数据点为水平切向分量能量比例数据,红色方形数据点为水平

径向分量能量比例数据,绿色圆形数据点为垂直向分量能量数据比例。将 10Hz 以下频带能量定义为低频能量,由于建(构)筑物自振频率较低,所以低频能量越小且占信号能量比例越低对保护建(构)筑物越有利<sup>[20-21]</sup>。信号 3 个分量能量在 10 Hz 以下所占比例均在 4.5% 以下,分布比例距爆源最近处水平切向分量最大,垂直向最低;在距离爆源 20 ~ 55 m,分布比例垂直向最大,水平切向最低;距离爆源 60 m 处,分布比例水平径向最大,垂直向最低。将最近与最远处两点去除后,可观察出整体规律,电子雷管逐孔起爆使振动能量仅有小部分分布在低频带,有效分散了低频能量的破坏性。图 8 中数据大致有以下规律:

(1) 同一高程,各方向分量上信号低频能量比例随距离增大而增大;

(2) 整体上观察,信号垂直方向低频能量比例最大,水平径向次之,水平切向最小。

此次爆破中,测点 4、测点 5 的质点峰值振速均超过安全允许值,但经过现场勘查,并未发现建筑物受到破坏,根据爆破能量主频带计算结果,爆破振动能量主频带区间大于建筑物自振频率,且 10 Hz 以下的低频带能量不到总能量的 4.5%,虽然振速超标,但低频能量较少,振动持续时间短,不会对建筑物产生破坏。

### 4 结论

(1) 电子雷管精确延时逐孔起爆可以使爆破频率及能量分布有向高频发展并且更加均匀化的分布趋势;

(2) 爆破振动信号能量分布主频带出现在 15 ~ 45 Hz,高于建筑物自振频率,可减小对振动对建筑物的损害。主频带内能量分布占此分量信号总能量的 80% 以上,主频带上下限频率的大小对振动安全至关重要;

(3) 高程的增加,会提高爆破振动信号能量分布主频带;同一高程,各方向分量上信号低频能量比例随距离增大而增大,10 Hz 以下的低频带能量不到总能量的 4.5% ;

(4) 质点振速并不是判断建筑物受振动是否破坏的唯一参数,建筑物受爆破振动的安全性与爆破振动累积效应有关,以能量分布主频带及能量分布比例来研究振动安全问题更为合理。

## 参考文献

- [1] Bhushan V. Electronic detonators-new era in blasting technology[J]. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2006, 52(11): 298-302.
- [2] 静行, 熊晓莉, 赵毅. 基于曲率模态和EEMD的结构损伤识别方法[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(1): 80-83.  
JING Hang, XIONG Xiao-li, Zhao Yi. Structural damage identification based on curvature mode and EEMD[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(1): 80-83.
- [3] 丁凯, 方向, 范磊, 等. 减震沟对爆破地震波能量特性影响试验研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(13): 113-118.  
DING Kai, FANG Xiang, FAN Lei, et al. Characteristics variation of blasting seismic wave energy affected by a damping ditch[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(13): 113-118.
- [4] 蒋耀港, 沈兆武, 杨昌德. 市内复杂环境下大药量爆破降振及振动监测分析的研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(1): 156-161.  
JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, YANG Chang-de. Big charge blasting vibration damping and vibration monitoring analysis under intracity complicated environment[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(1): 156-161.
- [5] 中华人民共和国国家标准《爆破安全规程》(GB6722-2003)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005, 55-58.
- [6] 李夕兵, 凌同华, 张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 226-239.
- [7] 言志信, 彭宁波, 江平, 等. 爆破振动安全标准探讨[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(8): 1281-1284.  
YAN Zhi-xin, PENG Ning-bo, JIANG Ping, et al. Research about blasting vibration safety criteria[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(8): 1281-1284.
- [8] Verma H K. Electronic detonators-A technological update[J]. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2006, 52(11): 290-292.
- [9] 凌同华, 李夕兵, 王桂尧. 爆破震动灾害主动控制方法研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1439-1442.  
LING Tong-hua, LI Xi-bing, WANG Gui-yao. A study on initiative control of blast vibration damages[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1439-1442.
- [10] 中国生, 房营光, 徐国元. 基于小波变换的建(构)筑物爆破振动效应评估研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(8): 121-124.  
ZHONG Guo-sheng, FANG Ying-guang, XU Guo-yuan. Study on blasting vibration effect assessment of structure based on wavelet transform[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(8): 121-124.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 903-995.
- [12] Huang N E, Hou T Y. On instantaneous frequency. *Advances in Adaptive Data Analysis*[J]. *World Scientific*, 2009, 1(2): 177-229.
- [13] 曹冲锋, 杨世锡, 杨将新. 大型旋转机械非平稳振动信号的EEMD降噪方法[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(9): 33-38.  
CAO Chong-feng, YANG Shi-xi, YANG Jiang-xin. Denoising method for non-stationary vibration signals of large rotating machineries based on ensemble empirical mode decomposition[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(9): 33-38.
- [14] 邵良杉, 白媛, 邱云飞, 等. 露天采矿爆破振动对民房破坏的LS-SVM预测模型[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(10): 1637-1642.  
SHAO Liang-shan, BAI Yuan, QIU Yun-fei, et al. LS-SVM analysis model and its application for prediction residential house's damage against blasting vibration from open pit mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(10): 1637-1642.
- [15] 李洪涛, 舒大强, 卢文波, 等. 建筑物对爆破振动中不同频率能量成分的响应特征[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(2): 154-158.  
LI Hong-tao, SHU Da-qiang, LU Wen-bo, et al. Response characteristics of a structure to different frequency components in blasting vibration energy[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(2): 154-158.
- [16] 赵春晖, 腾志军, 马爽. 基于广义功率谱密度的分布压缩宽带频谱感知[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2012, 42(4): 1015-1020.  
ZHAO Chun-hui, TENG Zhi-jun, MA Shuang. Distributed compressive wideband spectrum sensing based on generalized power spectrum density[J]. *Journal of Jilin University, Engineering and Technology Edition*, 2012, 42(4): 1015-1020.
- [17] 赵尔沅. 窄带频谱分析的一种新方法[J]. *通信学报*, 1986, 7(1): 75-80.  
ZHAO Er-yuan. A new method of narrow band spectral analysis[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 1986, 7(1): 75-80.
- [18] 郭学彬, 肖正学, 张继春. 爆破振动频率特性的测试与研究[J]. *中国矿业*, 2004, 13(9): 68-71.  
GUO Xue-bin, XIAO Zheng-xue, ZHANG Ji-chun. Testing and study of frequency specific property of blasting vibration[J]. *China Mining Magazine*, 2004, 13(9): 68-71.
- [19] Dowding C H. *Construction vibration* [M]. London: Prentice Hall International Limited, 1996.
- [20] 史秀志, 陈寿如. 爆破振动时频特征的段药量及抵抗线性效应[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(3): 345-349.  
SHI Xiu-zhi, CHEN Shou-ru. Explosive blasted per delay and burden effects on the time-frequency characteristic of vibration induced by blast[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(3): 345-349.
- [21] 林键, 林从谋, 林丽群. 爆破振动荷载作用下3~4层房屋结构响应测试研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(3): 48-51.  
LIN Jian, LIN Cong-mou, LIN Li-qun. Research on response characteristics of structure under dynamic blasting load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(3): 48-51.