

# 爆破地震波时频域分析方法及应用

赵明生<sup>1</sup>, 朴志友<sup>2</sup>, 梁开水<sup>1</sup>, 王 洋<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 天津水泥工业设计研究院有限公司, 天津 300400)

**摘要:**为了研究各时频域分析方法对爆破振动信号时频特征提取的有效性,设计了仿真试验并对不同时频域分析方法进行了对比分析,验证了自适应最优核分布在最大程度抑制交叉项的同时具有较高的时频分辨能力和分辨精度,是适合爆破振动信号时频分析的最佳方法。应用此方法对实测的单段和多段爆破振动信号进行时频分析,结果表明:多段爆破振动信号出现多个能量峰值,并且峰值能量增大、持续时间延长是振动信号叠加的结果。此方法可从信号能量大小和持续时间的角度对爆破振动信号时频特性进行详细解读,为爆破地震效应的深入研究提供实用的分析技术。

**关键词:**爆破振动;仿真试验;时频分析;自适应最优核分布

中图分类号: TD235.1; O389

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)04-0022-07

## Method and Application of Blasting Vibration Signal Time-Frequency Domain Analysis

ZHAO Mingsheng<sup>1</sup>, PIAO Zhiyou<sup>2</sup>, LIANG Kaishui<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Tianjin Cement Industry & Research Institute Co. Ltd, Tianjin 300400, China)

**Abstract:** In order to study the effectiveness of time-frequency domain analytical method to time-frequency feature extraction of blasting vibration signals, simulation experiments are designed and different time-frequency domain analysis methods are analyzed, identifying that AOK distribution is a optimal method to the time-frequency analysis of blasting vibration signals, which can fully suppress the cross term and has high time-frequency resolving power and resolving accuracy. Applying it to the time-frequency analysis of single and multistage blasting vibration signals, the results show that multistage blast vibration signals appear several energy peaks, the increased energy and lengthened duration are caused by superposition of vibration signal. This method makes detailed interpretation on blasting vibration signals of time-frequency properties from the standpoint of energy size and duration. Our results are of importance for enriching mechanism of waveforms interference for vibration reduction.

**Key words:** blasting vibration; simulation experiment; time-frequency analysis; adaptive optimum kernel distribution

由于爆破地震波本身的瞬时性、复杂性以及爆破介质和赋存条件的多变性,导致爆破振动的随机性很大,爆破振动信号具有短时、突变等特点,是一种典型的非平稳随机信号<sup>[1]</sup>。非平稳信号时频域分析方法主要有3种:线性时频分析、双线性时频分析和AOK(自适应最优核函数, adaptive optimum kernel)时频分析。其中,线性时频分析包含短时傅里叶变换(STFT, short time Fourier transform)、连续小波变换(CWT, continuous wavelet transform)、S变换(S transform)等;双线性时频分析可以用统一的形式——choen类时频分布描述,如Wigner-Ville分布(WVD, Wigner-Ville distribution)。目前,应用于爆破振动信号的时频域分析方法

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金项目(2010-Ia-060)。

作者简介: 赵明生(1982—),男,黑龙江双城人,博士研究生,主要从事爆破工程及安全技术方面的研究。

E-mail: mingshengzhao@126.com.

主要有 STFT、CWT<sup>[2]</sup> 及重排的伪平滑 WVD(RSPWVD, rearrangement of pseudo smooth WVD)<sup>[3]</sup>。

爆破振动信号时频域分析在确定合理的微差间隔时间<sup>[4]</sup>、不同爆源参数的地震反应谱<sup>[5]</sup>、结构响应<sup>[6]</sup>以及多因素安全判据<sup>[7]</sup>的建立等方面有着重要应用。各种时频域分析方法的时频分辨能力和分辨精度是其应用的基础,时频域分析方法的选取直接影响到爆破振动信号时频特性提取的准确性,从而影响到实际的应用效果。因此,针对爆破振动信号特点,寻求适合于爆破振动信号时频域分析的方法尤为重要。

## 1 各种时频域分析方法的基本原理

### 1.1 线性时频分析

STFT 是一种固定时间窗的时频分析方法,把信号划分成许多小的时间间隔,用傅里叶变换(FT, Fourier transform)分析每一个时间间隔,以便确定该时间间隔存在的频率,信号  $s(t)$  的 STFT 定义为

$$H(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)g(\tau - t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (1)$$

其中,  $g(t)$  为窗函数,  $f$  为频率,  $\tau$  为时间间隔<sup>[2]</sup>。

CWT 是一种多分辨分析方法,针对高频、低频信号分别采用窄时窗和宽时窗。信号  $s(t)$  的 CWT 定义为

$$w_{\varphi}(a, \tau) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\varphi^*\left(\frac{\tau - t}{a}\right) dt. \quad (2)$$

其中:  $a$  为伸缩尺度,  $\tau$  为时间平移因子,  $\varphi(t)$  为小波母函数<sup>[2,8]</sup>。

S 变换时由 Stockwell 等提出的加窗 FT,是介于 STFT 和 CWT 之间的一种时频分布方法,信号  $s(t)$  的 S 变换为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right]} \times e^{-j2\pi ft} dt. \quad (3)$$

其中,  $f$  为频率,  $\tau$  为时间间隔<sup>[8]</sup>。

### 1.2 双线性时频分析

WVD 是一种典型的双线性时频分布,存在交叉项并且对噪声很敏感,为了提高信号分量的时频聚集性,文献[3]对爆破振动信号进行时频分析时采用 RSPWVD,其频谱图的表达式为

$$SPEC_z^{(r)}(t', f'; \varphi) = \iint_{-\infty}^{+\infty} SPEC_z(t, f; \varphi) \delta(t' - \hat{t}(z; t, f)) \delta(f' - \hat{f}(z; t, f)) dt df. \quad (4)$$

其中,  $SPEC_z(t, f; \varphi) = \iint_{-\infty}^{+\infty} W_h(\tau, v) W_{\varphi}(t - \tau; f - v) d\tau dv$ , 其中,  $h$  为窗函数,  $\varphi(\tau, v)$  为任意核,  $W_h$  为  $h$  的 WVD,  $(\hat{t}, \hat{f})$  为信号能量分布的重心。

### 1.3 自适应最优核时频分析

单一固定的核函数不能适应各类信号的时频分析,而核函数随信号的不同而变化的自适应时频分布有着重要意义。AOK 分布采用短时模糊函数和随时间变化的自适应核函数,能够在时频分布中区分出多分量信号的细节部分。

信号  $s(t)$  的 AOK 分布定义为

$$P_{AOK}(t, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(t; \theta, \tau) \varphi_{opt}(t; \theta, \tau) e^{-j\theta t - jf\tau} d\theta d\tau, \quad (5)$$

由此可知, AOK 分布具有信号能量在时间-频率上联合分布的明确物理意义。其中,  $\varphi_{opt}(t; \theta, \tau)$  为最优化核函数;  $A(t; \theta, \tau)$  为短时模糊函数, 定义为

$$A(t; \theta, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \omega\left(u - t - \frac{\tau}{2}\right) h\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \omega\left(u - t + \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta u} du. \quad (6)$$

其中,  $\omega(u)$  为对称窗函数,  $t$  为  $\omega(u)$  的中心位置。令  $|u| > T$  时,  $\omega(u) = 0$ , 则只有在  $[t - T, t + T]$  范围内

的信号才能计算其核函数,因此对于信号的任意细节部分,短时模糊函数都可以准确地刻画出来。

由于  $A(t; \theta, \tau)$  是随时间变化的,所以  $\Phi_{opt}(t; \theta, \tau)$  也是随时间变化的。 $\Phi_{opt}(t; \theta, \tau)$  可通过求解以下最优化问题得到:

$$\max_{\Phi} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} |A(t; r, \varphi) \Phi(t; r, \varphi)|^2 r dr d\varphi, \quad (7)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \Phi(t; r, \varphi) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2(\varphi)}\right) \\ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} |\Phi(t; r, \varphi)|^2 r dr d\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma^2(\varphi) d\varphi \leq \alpha, \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\sigma(\varphi)$  是控制径向高斯核函数在径向角  $\varphi$  方向上的扩展,称为扩展函数,  $\varphi$  为径向与水平向的夹角  $\varphi = \arctan \frac{\tau}{\theta}$ ,  $r = \sqrt{\theta^2 + \tau^2}$ ;  $\theta$  为模糊函数的极坐标角度,  $\tau$  为时间间隔,  $f$  为频率,  $\alpha$  为径向高斯核函数的能量体积。 $\alpha$  太小核函数会滤掉一些自项,  $\alpha$  太大核函数不能有效去除交叉项,其取值范围为  $1 \leq \alpha \leq 5^{[9]}$ 。

## 2 各时频域分析方法比较

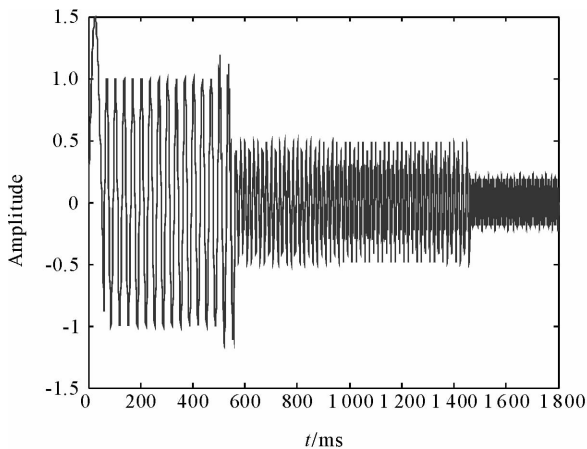
### 2.1 爆破振动仿真信号的构造

爆破振动信号是一种典型的非平稳随机信号,可以看作是不同频率分量正弦信号的叠加,并且不同频率分量持续时间不同。由于爆破振动信号的频域十分丰富,主频分布在  $0 \sim 200$  Hz 之间,能量主要集中在低频部分,高频部分的能量虽然很小,但是仍有分布<sup>[2-4]</sup>。因此构造 4 个频率成分的正弦信号叠加为非平稳信号作为仿真信号,来比较各时频域分析方法对爆破振动信号的分析能力。该仿真信号的主频为 30 Hz,能量主要集中在 30 Hz 的低频分量,300 Hz 分量作为高频部分能量较小,且各分量的持续时间不同。仿真信号的采样率为 1 000 Hz,采样点数为 1 800,其各分量信息见表 1、信号图见图 1(a)。

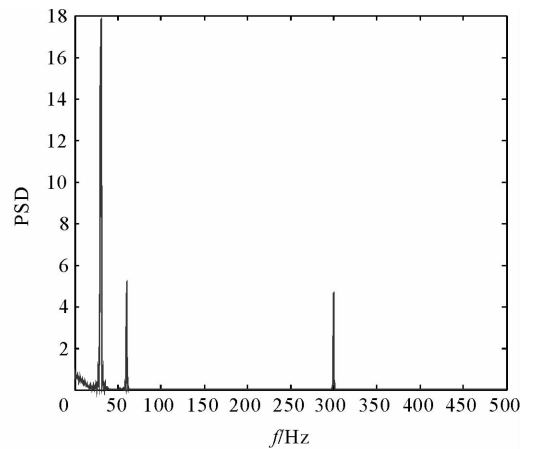
表 1 仿真信号各分量信息表

Tab. 1 The component information of simulated signal

频率/Hz	持续时间/ms	能量比/%
20	10~60	15.798 8
30	61~560	66.509 6
60	500~1 460	10.774 6
300	500~1 800	6.917 0



(a) 仿真信号



(b) 仿真信号的FFT谱

图 1 仿真信号及其 FFT 谱图

Fig. 1 The simulated signal and FFT spectrum

对仿真信号进行 FFT(分析长度为 1 800,矩形窗),得到信号的 FFT 谱见图 1(b)。由图 1(b)可见,信号的 FFT 谱显示出 3 个频率分量,对持续时间只有 50 ms 的 20 Hz 的频率分量无法识别,虽然通过改变窗函数和插值计算的方法可提高 FFT 的精度<sup>[10]</sup>,但 FFT 谱也无法显示出频率分量所发生的时刻和持续时间,时域和频域的矛盾使得 FFT 不适合爆破振动信号的时频域分析。

## 2.2 时频域分析方法的比较

采用 STFT(128 点高斯窗)、CWT(Morlet 小波基,中心频率为 6),S,WVD,RSPWVD(128 点高斯型时间窗和频率窗)以及 AOK 分布(128×128 点高斯窗,径向高斯核对仿真信号进行时频域分析。文献[11]和文献[12]的研究表明, $\alpha$  的选取依赖于具体信号,本研究对仿真信号分析中取不同的  $\alpha$  值进行了比较,发现  $\alpha=2$  在抑制交叉项和保留自项之间能够很好地折衷,因此取核函数体积  $\alpha=2$ ,结果如图 2 所示。

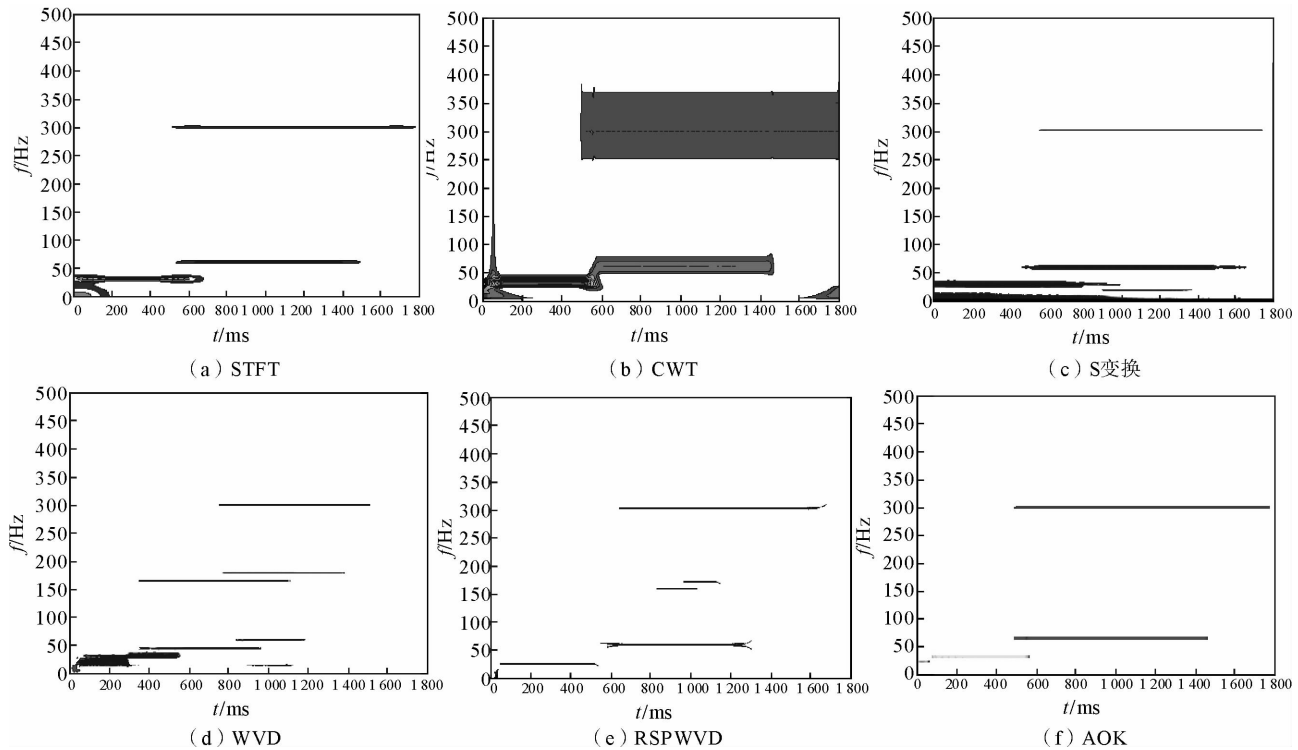


图 2 仿真信号的时频等高线图

Fig. 2 The time-frequency contour line of simulated signal

由图 2 可见:

1) STFT 克服了 FFT 的不足,能将仿真信号在时频面内展示,但 STFT 在整个频率域用一个分析窗,时频分辨率不能自适应调节,时频分辨率不高,使仿真信号低频分量的时频等高线堆积在一起,无法显示出具体的时频值。

2) CWT 虽然克服了 STFT 窗口宽度不易确定的问题,但其高频频率分辨率低,低频时间分辨率不高,难以对时频分辨率进行适当的折中,使仿真信号各频率分量出现的时刻和持续时间无法准确的定位识别,而且时频分析的结果依赖于小波基函数的选择。

3) S 变换吸收了 STFT 和 CWT 的优点,时频分辨率较 CWT 精确。S 变换虽能够得到仿真信号的全部时频信息,但是由于时频分辨率不高使得对信号能量的描述还较为粗糙,无法给出更高的时频分布精度。

4) WVD 产生的交叉干扰项严重,RSPWVD 虽然抑制了部分交叉项,但以降低时频分辨精度为代价,因此无法在最大程度抑制交叉项的同时保留较高的时频分辨精度。

5) AOK 分布使每一个瞬时间隔的核函数形状能够适应于时频平面,从而最大程度地集中能量,同时最大限度地抑制交叉项,因此,它对仿真信号中无论是持续时间长短、能量大小的频率分量的时频特性都能准确刻画,这种在时域和频域都能很好局域化的能力适用于爆破振动信号的时频特性分析。

### 3 AOK 分布在爆破振动信号时频特性提取中的应用

为了研究单段与多段爆破振动信号的时频特性,选取在金堆城钼业公司露天矿南露天 1344 平盘进行现场爆破振动测试。该平盘主要以燕山时期的花岗斑岩为主,岩石的普氏系数为 8~10,岩石完整性好,岩性完全相同。单段爆破振动信号由单孔爆破获取,试验孔孔径为 250 mm、孔深为 13 m、堵塞长度为 6 m、装药量为 430 kg。多段爆破振动信号由单孔进行微差延时(孔间微差为 17 ms、排间微差为 65 ms,共 36 个孔)逐孔起爆获取,每孔的爆源参数与单孔爆破相同,选取两情况下爆心距相同的垂直向振动信号为分析信号,见图 3。利用 AOK 分布(128×128 点高斯窗,径向高斯核,核函数体积  $\alpha=2$ )对单段和多段爆破振动信号进行时频域分析得到时频等高线、AOK 分布三维谱如图 4 和图 5 所示。

由图 3—图 5 可见:

1) 多段微差爆破的质点振动峰值速度为 4.362 0 cm/s、单段爆破质点振动峰值速度为 4.120 2 cm/s,两者相差很小。

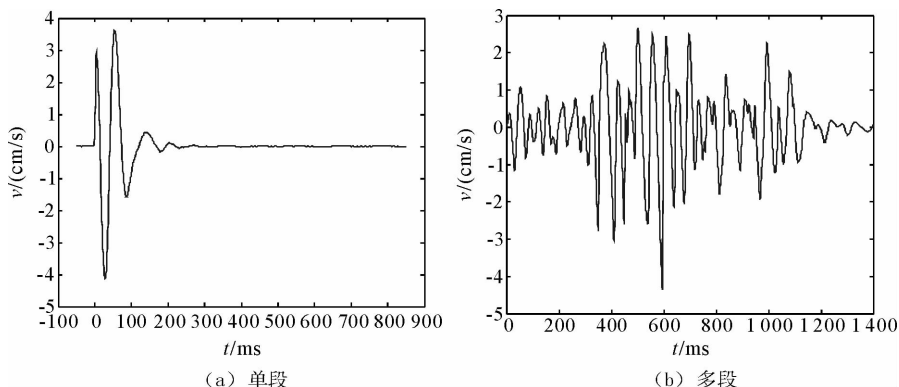


图 3 实测的爆破振动信号图

Fig. 3 Measured blasting vibration signals

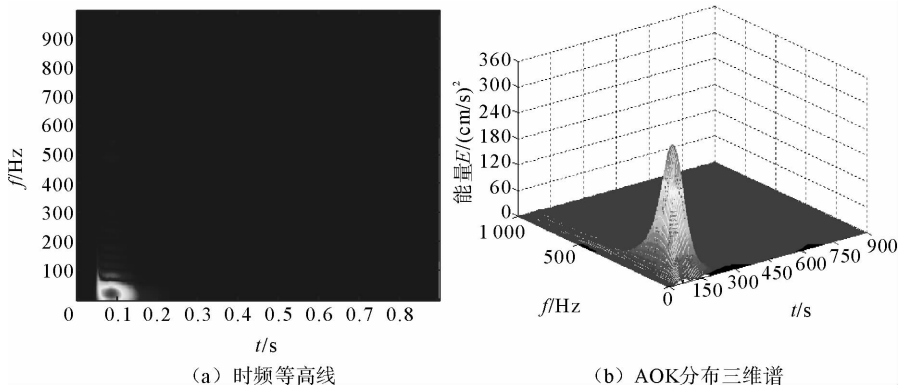


图 4 单段爆破振动信号时频谱图

Fig. 4 The time-frequency spectrum of single blasting vibration signal

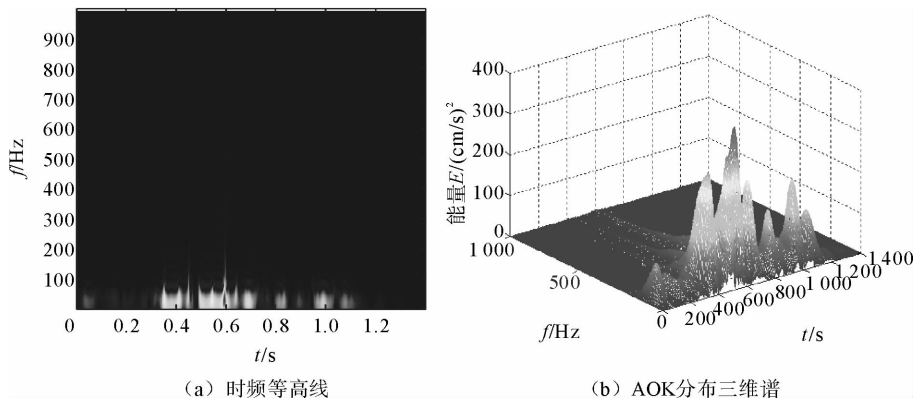


图5 多段爆破振动信号时频谱图

Fig. 5 The time-frequency spectrum of multistage blasting vibration signal

2) 单段爆破振动信号的频率成分比较单一, 能量主要集中在  $0 \sim 40$  Hz,  $0.05 \sim 0.15$  s; 多段爆破振动信号的频率较为丰富, 能量主要集中在  $0 \sim 60$  Hz,  $0 \sim 1.2$  s, 并出现多个与主频相差不大的子频; 由于爆破振动信号叠加效应的存在, 多段爆破振动信号在  $0.4 \sim 0.8$  s 出现了高频分布, 但其能量很小。

3) 由于振动的叠加效应, 多段爆破振动信号能量峰值增大且出现了多个子峰, 并且高能量持续时间延长。

由上述分析可知, 在段药量相同的条件下单段与多段爆破在相同爆心距处振动强度相差不大, 但多段爆破振动信号能量持续时间明显延长, 从而使结构低周疲劳破坏的积累效应增强, 并且能量峰值子峰个数的增加, 也使结构破坏的几率增加。因此, 在爆破设计中, 对于段数的设计不应单一以控制爆破振动强度为指标, 而应从能量的角度结合结构体对爆破振动信号能量的动态响应, 对合理段数做进一步的探讨和研究。

## 4 结语

1) AOK 分布是一种时频匹配最优的时频分布方法, 能够最大程度地抑制交叉项, 具有较高的时频分辨能力和分辨精度, 适用于爆破振动信号时频分析。

2) 单段与多段爆破振动信号的质点振动峰值速度相差不大, 但是多段爆破振动信号峰值能量增大, 持续时间延长且出现多个能量峰值。

3) 利用 AOK 分布能得到信号能量与能量的持续时间, 因此能够反映爆破振动三要素的综合作用, 值得进一步深入研究。

### 参考文献:

[1] 罗忆, 卢文波, 陈明, 等. 爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破, 2010, 27(1): 14-22.  
LUO Yi, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. View of research on safety criterion of blasting vibration[J]. Blasting, 2010, 27(1): 14-22.

[2] 马瑞恒, 时党勇. 爆破振动信号的时频分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 92-96.  
MA Ruiheng, SHI Danyong. Time-frequency analysis of blasting vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 92-96.

[3] 史秀志, 田建军, 王怀勇. 冬瓜山矿爆破振动测试数据回归与时频分析[J]. 爆破, 2008, 25(2): 77-80.  
SHI Xiuzhi, TIAN Jianjun, WANG Huaiyong. Blasting vibration measurement regression analysis and time-frequency analysis in Dongguahill mine[J]. Blasting, 2008, 25(2): 77-80.

[4] 宋光明, 曾新吾, 陈寿如, 等. 基于波形预测小波包分析模型的降振微差时间选择[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 163-168.  
SONG Gangming, ZENG Xinwu, CHENG Shouru, et al. The selection of millisecond delay interval of blasting for decreasing ground vibration based on the wavelet packets prediction model of waveforms[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 163-168.

[5] 李洪涛, 卢文波, 舒大强. 隧洞开挖爆破地震反应谱特征研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 331-334.  
LI Hongtao, LU Wenbo, SHU Daqiang. Response spectrum of blasting vibration induced by tunnel excavation[J]. Explosion

and Shock Waves, 2008, 28(4): 331-334.

- [6]樊剑,吕超,张辉.地震波时频特征及与结构地震响应的关系[J].工程力学,2010,27(6):98-106.  
FAN Jian, LU Chao, ZHANG Hui. Relation between time-frequency characteristic of earthquake ground motions and structural earthquake responses[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 98-106.
- [7]赵明生,梁开水,曹跃,等.爆破地震作用下建(构)筑物安全标准探讨[J].爆破,2008,25(4):24-27.  
ZHAO Mingsheng, LIANG Kaishui, CAO Yue, et al. Discussion on the security criteria of construction(structure) of building under blasting vibration[J]. Blasting, 2008, 25(4): 24-27.
- [8]徐红梅,郝志勇,贾维新,等.基于S变换的内燃机气缸盖振动特性研究[J].内燃机工程,2008,29(3):68-72.  
XU Hongmei, HAO Zhiyong, JIA Weixin, et al. Study on vibration characteristics of internal combustion engine cylinder head based on S transform[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(3): 68-72.
- [9]刘喜武,张宁,勾永峰,等.地震勘探信号时频分析方法对比与应用分析[J].地球物理学进展,2008,23(3):743-753.  
LIU Xiwu, ZHANG Ning, GOU Yongfeng, et al. The comparison and application of time-frequency analysis methods to seismic signal[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 743-753.
- [10]任祖华.基于窗函数的FFT谐波参数估计算法[J].电测与仪表,2010,47(5):8-12.  
REN Zuhua. The harmonic parameter estimation algorithm based on the FFT window functions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(5): 8-12.
- [11]王晓凯,高静怀,何洋洋.基于时频自适应最优核的时频分析方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(1):22-26.  
WANG Xiaokai, GAO Jinghuai, HE Yangyang. Time-frequency analysis based on time-frequency-adaptive optimal-kernel [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 22-26.
- [12]张子瑜,陈进,史习智,等.径向高斯核函数时频分布及在故障诊断中的应用[J].振动工程学报,2001,14(1):53-59.  
ZHANG Ziyu, CHEN Jin, SHI Xizhi, et al. Radial Gaussian kernel time-frequency distribution and its application to machine fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(1): 53-59.

(上接第 21 页)

- [5]JONES J C. Temperature uncertainties in oven beating tests for propensity to spontaneous combustion[J]. Fuel, 1998, 77(13):1517-1519.
- [6]王刚,程卫民,周刚.综放工作面采空区自燃“三带”分布规律的研究[J].矿业安全与环保,2010,37(1):18-22.  
WANG Gang, CHENG Weimin, ZHOU Gang. Study on distribution of three zones of gob spontaneous combustion in fully mechanized caving face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(1): 18-22.
- [7]李仁发,沈洪远,年晓红.基于物理仿真的煤炭自然发火研究[J].系统仿真学报,2001,13(2):231-233.  
LI Renfa, SHEN Hongyuan, NIAN Xiaohong. Research on coal spontaneous combustion based on physical simulation[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2001, 13(2): 231-233.
- [8]张国枢,戴广龙,王卫平.煤炭自燃模拟实验装置设计与研制[J].淮南工业学院学报,1999,19(4):11-13.  
ZHANG Guoshu, DAI Guanglong, WANG Weiping. Design and development of a device for simulating coal spontaneous combustion[J]. Journal of Huainan Institute of Technology, 1999, 19(4): 11-13.
- [9]张瑞新,谢和平.煤堆自然发火的试验研究[J].煤炭学报,2001,26(4):168-171.  
ZHANG Ruixin, XIE Heping. Experimental study of the propensity of coal stockpiles to spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(4): 168-171.
- [10]张瑞新,谢和平,谢之康.露天煤体自然发火的试验研究[J].中国矿业大学学报,2000,29(4):235-238.  
ZHANG Ruixin, XIE Heping, Xie Zhikang. Experimental study on spontaneous combustion of ground coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(4): 235-238.
- [11]徐精彩.煤炭自燃过程研究[J].煤炭工程师,1989(5):17-21.  
XU Jingcai. Process of coal spontaneous combustion[J]. Coal Engineer, 1989(5): 17-21.
- [12]文虎.煤自燃过程的实验及数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2003.
- [13]许延辉.煤自燃全过程测试和指标气体的研究与应用[D].西安:西安科技大学,2005.