

# 基于 SET 方法的爆破振动信号时频特征分析

司凯凯, 张光权\*, 杨如孜, 王梦佳

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430000; 2. 湖北省工业安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430000)

**摘要:**传统的信号分析方法在爆破振动信号的时频特征提取中存在能量发散、时频分析结果精度差等问题。对此, 采用一种新的信号分析方法——同步提取变换 (Synchroextracting Transform, SET), 同时结合经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 和多尺度小波分解 (Wavelet Decomposition, WD) 对爆破振动信号进行滤波降噪, 以获得更加精确的时频分析结果。使用该方法对某矿山生产爆破振动信号进行分析, 结果显示, 经验模态分解 (EMD) 和多尺度小波分解 (WD) 可以有效滤除原始信号中的干扰分量, 降噪后的纯净信号与原始信号的相关性系数达到 0.959 8。同时, 对纯净信号分别进行短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform, STFT) 与同步提取变换 (SET), 通过比较两者的时频分析结果和信息熵, 表明同步提取变换 (SET) 在爆破振动信号时频分析中有着更高的时频分析精度。

**关键词:** 爆破振动信号; 经验模态分解; 小波分解; 同步提取变换; 信息熵

中图分类号: TD 76

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)02-0035-07

## Time-frequency Characteristic Analysis of Blasting Vibration Signal Based on Synchroextracting Transform Method

SI Kaikai, ZHANG Guangquan, YANG Ruzi, WANG Mengjia

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000, China;

2. Industrial Safety Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** About the extraction of time-frequency characteristics of blasting vibration signals, the traditional signal analysis method has problems, such as energy divergence and poor accuracy of time-frequency analysis. Therefore, this paper introduces a new signal analysis method, synchroextracting transformation (SET), and combines empirical mode decomposition (EMD) and multi-scale wavelet decomposition (WD) to filter and reduce the blast vibration signal to obtain more accurate time-frequency analysis results. This method is used to analyze the blasting vibration signal produced by a mine, and the results show that empirical mode decomposition (EMD) and multi-scale wavelet decomposition (WD) can effectively filter out the interference component in the original signal, and the correlation coefficient between the pure signal after noise reduction and the original signal reached 0.959 8. At the same time, the short-time Fourier transform (STFT) and the synchroextracting transformation (SET) are performed on the pure signals, which verify that the synchroextracting transformation (SET) has higher time-frequency analysis accuracy in the time-frequency analysis of the blasting vibration signal by comparing the time-frequency analysis results and information entropy of the two.

**Keywords:** blasting vibration signal; empirical mode decomposition; wavelet decomposition; synchroextracting transform; information entropy

爆破振动控制是爆破安全领域一个重要的研究方向。作为爆破振动研究的基础, 对爆破振动信号进行

分析,获取信号内在的时频特征等信息对控制爆破振动、保障安全生产具有重要的意义<sup>[1]</sup>.

对于信号的分析,最早的理论来源于 Joseph Fourier 在 1822 年出版的《热的解析理论》中提出的傅里叶变换(Fourier Transform, FT),但是傅里叶变换只是对平稳信号进行频域分析,无法同时获取信号的时频特征.爆破振动信号作为一种非平稳随机信号,傅里叶变换(FT)无法满足其要求.因此,诸如短时傅里叶变换(Short-time Fourier Transform, STFT)<sup>[2]</sup>、小波变换(Wavelet Transform, WT)<sup>[3-5]</sup>、频率切片小波变换(Frequency Slice Wavelet Transform, FSWT)<sup>[6-9]</sup>以及 Wigner-Ville 分布(WVD)<sup>[10-11]</sup>等新的时频分析方法在爆破振动信号时频分析中发挥了巨大作用.

以上传统的时频分析方法已经将爆破振动信号从一维时域扩展到二维时频域,但是由于海森堡原理的限制,以及交叉干扰性的存在,导致其时频分析结果会出现严重的能量发散及时频特征刻画不够细致.

基于以上研究,本文拟采用一种新的信号分析方法——同步提取变换(Synchroextracting Transform, SET)<sup>[12-14]</sup>,同时结合经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)<sup>[15-16]</sup>和多尺度小波分解(Wavelet Decomposition, WD)<sup>[17-18]</sup>对实际工程爆破振动信号进行处理,以期提高爆破振动信号的时频分析结果精度.

## 1 同步提取变换原理

同步提取变换(SET)是一种短时傅里叶变换(STFT)后处理方法,通过 delta 函数构造同步提取算子(Synchronous Extraction Operator, SEO),用以保留时频脊线上的时频系数,剔除其余发散能量,获得高分辨率时频分布,其数学原理如下<sup>[14]</sup>:

设信号  $f(u) \in L^2(R)$ ,  $f(u)$  经短时傅里叶变换,得到二维时频谱  $G(t, \omega)$  :

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) f(u) e^{-i\omega u} du. \quad (1)$$

式中:  $g(u-t)$  为窗函数;  $t$  为时间;  $\omega$  为频率;  $i$  为虚数单位.

为了便于计算,令  $g_{\omega}(u) = g(u-t) e^{i\omega u}$ , 根据 Parseval 定理,式(1)可以写成:

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u) (g_{\omega}(u))^* du = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\xi) (\hat{g}_{\omega}(\xi))^* d\xi. \quad (2)$$

式中:  $\hat{f}(\xi)$  和  $\hat{g}_{\omega}(\xi)$  分别为信号  $f(u)$  和  $g_{\omega}(u)$  的傅里叶变换;  $(g_{\omega}(u))^*$  为  $g_{\omega}(u)$  的共轭.

$$\hat{g}_{\omega}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) e^{i\omega u} e^{-i\xi u} du. \quad (3)$$

令  $u-t = t'$ , 式(3)可以写成:

$$\hat{g}_{\omega}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t') e^{i\omega(t+t')} e^{-i\xi(t+t')} dt' = e^{i\omega t - i\xi t} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t') e^{i\omega t' - i\xi t'} dt' = e^{i\omega t - i\xi t} \hat{g}(\omega - \xi). \quad (4)$$

式中:  $\hat{g}(\omega - \xi)$  为窗函数的傅里叶变换.将式(4)代入式(2)中,同时考虑到信号初始相位不一定为 0,可以得到修正后的信号短时傅里叶变换的一般表达式  $S(t, \omega)$ .

$$S(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{g}(\omega - \xi) \hat{f}(\xi) e^{i\xi t} d\xi. \quad (5)$$

设一复指数信号  $f_h(t) = A e^{i\omega_0 t}$ , 由式(5)得到其短时傅里叶变换  $S(t, \omega)$  :

$$S(t, \omega) = A \hat{g}(\omega - \omega_0) e^{i\omega_0 t}. \quad (6)$$

因为  $|e^{i\omega_0 t}| = 1$ ,  $\hat{g}(\cdot)$  是紧支撑函数,所以复指数信号  $f_h(t)$  的能量主要集中在时频脊线 ( $\omega = \omega_0$ ), 最大振幅为  $A \hat{g}(0)$ .

同时对式(6)中时间  $t$  上求偏导,得到:

$$\partial_t S(t, \omega) = S(t, \omega) i\omega_0. \quad (7)$$

信号的瞬时频率则表示为  $\omega_0(t, \omega) = -i \frac{\partial_t S(t, \omega)}{S(t, \omega)}$ , 由此可以看出,当  $S(t, \omega)$  不为 0 时,  $\omega_0(t, \omega) \equiv \omega_0$ .

综上可以得出:在信号时频域中,其瞬时频率始终等于  $\omega_0$ , 且在时频脊线处能量最为集中.这一结论可以推广至任意信号.

同步提取变换(SET)的算法核心:通过 delta 函数构造同步提取算子(SEO),在上述结论基础上,对短时傅里叶变换(STFT)的时频结果进行二次提取,以保留时频脊线上的主要能量,达到理想的时频分析结果.其数学描述如式(8)和式(9).

$$T_e(t, \omega) = S(t, \omega) \delta(\omega - \omega_0(t, \omega)); \quad (8)$$

$$\delta(\omega - \omega_0(t, \omega)) = \begin{cases} 1, & \omega = \omega_0; \\ 0, & \omega \neq \omega_0. \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $T_e(t, \omega)$  为信号的同步提取变换(SET)时频结果;  $\delta(\omega - \omega_0(t, \omega))$  为同步提取算子(SEO).

## 2 爆破振动信号采集

本文以某非金属矿山为工程依托,对某次生产爆破振动信号进行采集.

该次爆破位于采场东南方向边界处+43 m 开采平面内,主要岩体为石灰岩,使用的炸药类型为 2 号岩石乳化炸药,总药量为 6 000 kg,炮孔采用三角形布孔方式,共布置 5 排 140 孔,爆破方式为数码电子雷管逐孔微差爆破,爆破参数如表 1 所示.

表 1 主要爆破参数

孔径/mm	孔距/m	排距/m	孔深/m	炮孔数	孔间延期时间/ms	单段药量/kg	填塞材料	填塞长度/m	总药量/kg
115	3.8	3.3	12	140	15	43	岩粉	4	6 000

出于安全考虑,在距离爆源较近的办公楼附近布置测点,使用中科测控生产的 TC-4850 测振仪进行信号采集,采样频率设置为 4 kHz,实际采集到的生产爆破振动信号如图 1 所示.

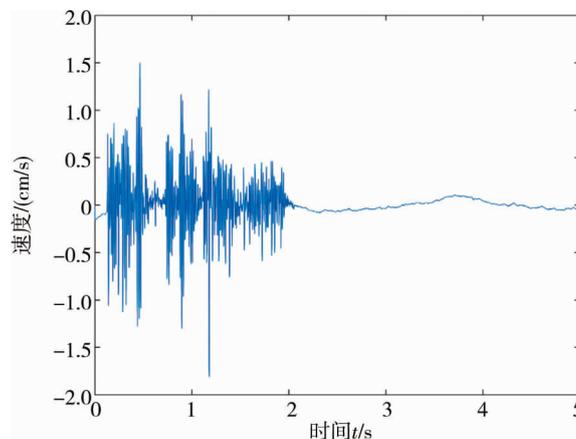


图 1 爆破振动信号

## 3 爆破振动信号降噪处理

为了使时频分析的结果更加精确,首先通过经验模态分解(EMD)和多尺度小波分解(WD)对爆破振动信号进行滤波,消除低频干扰项和高频噪声的影响,然后对重构后获得的纯净信号进行同步提取变换(SET),得出最终的时频分析结果,具体的信号处理流程如图 2 所示.

### 3.1 原始信号的经验模态分解(EMD)

经验模态分解(EMD)是由 N.E.Huang 于 1998 年提出的一种可以将复杂信号分解成一系列本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和残差函数( $R$ )线性叠加<sup>[15]</sup>的自适应信号分解方法,其数学表达形式如式(10).

$$S(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) + r(t). \quad (10)$$

式中： $S(t)$  为原始信号； $x_i(t)$  为经验模态函数； $i$  为经验模态函数个数； $r(t)$  为信号残余分量。

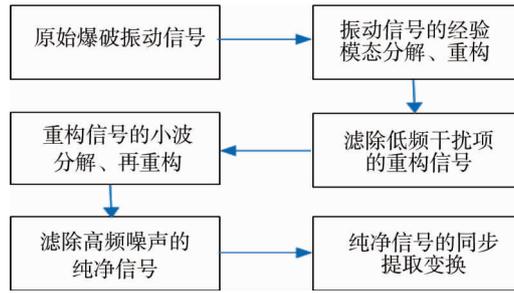


图2 爆破振动信号分析流程

这里对爆破振动信号进行了7层的经验模态分解(EMD),其分析结果如图3所示.由图3可以看到:从IMF1到IMF7,频率逐渐由高频过渡到低频.为了滤除信号中的干扰项,同时保证信号的主要信息不丢失,可以通过计算各经验模态函数的能量与信号总能量的比值,以及各经验模态函数与原始信号的相关系数,综合分析筛选出原始信号的优势分量.通过计算比较,得出爆破振动信号的主要能量集中于IMF1,IMF2和IMF3.具体的各经验模态函数的相对能量比,以及各模态分量对应的频带和相关系数如表2所示.

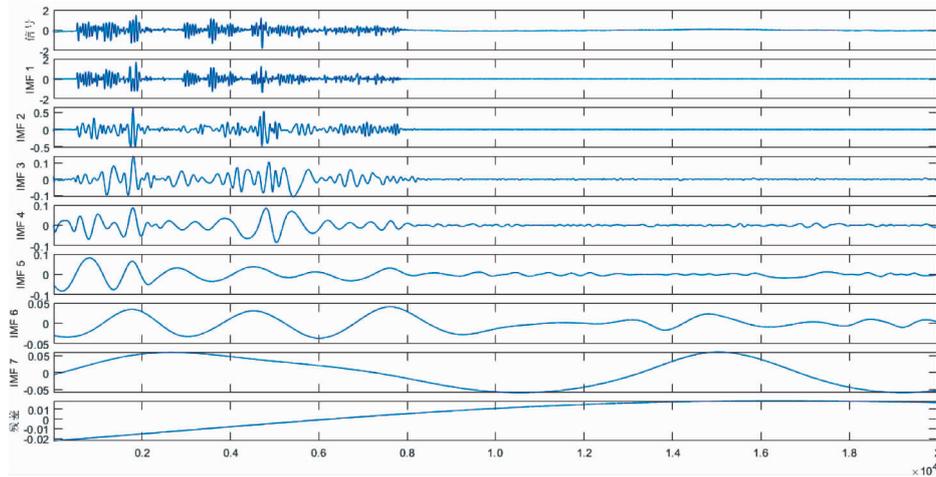


图3 振动信号的EMD

表2 IMF分量频带范围、能量占比、与原信号互相关系数

经验模态分量	频带范围/Hz	能量占比/%	相关系数
IMF1	30.200 0~95.700 0	85.32	0.920 700
IMF2	14.000 0~72.300 0	6.36	0.517 500
IMF3	5.790 0~37.100 0	1.63	0.106 500
IMF4	3.230 0~17.500 0	0.65	0.003 559
IMF5	1.560 0~8.340 0	1.29	0.030 960
IMF6	0.186 0~4.300 0	1.15	0.089 470
IMF7	0.187 0~1.790 0	0.08	0.128 800
R(残差函数)	0.041 2~0.868 0	2.82	0.134 100

经过综合的比较分析,IMF1,IMF2和IMF3集中了原始信号93.31%的能量,且覆盖的频带范围较宽,同时与原始信号的相关系数也较高,作为爆破振动信号的优势分量;IMF4,IMF5,IMF6,IMF7所占能量比值较小,且处于低频带,与原始信号相关性较差,认为是原始信号中存在的干扰项.对优势模态分量IMF1,IMF2和IMF3进行信号重构,得到滤除低频干扰项后的信号.

### 3.2 重构信号的多尺度小波分解

经验模态分解(EMD)已经滤除了原始信号中的低频干扰项,但是对于信号中可能存在的高频噪声则需要通过多尺度小波分解(WD)进一步处理.

多尺度小波分解的核心是 MALLAT 算法,其原理是将原始信号  $S$  通过一对互补的高通滤波器和低通滤波器,分别得到一个高频的细节信号  $D$  和一个低频的近似信号  $A$ ,如图 4 所示.在实际工程中,原始信号  $S$  迭代分解的次数将根据不同的需求确定.

为了滤除原始信号中可能存在的高频噪声,这里采用工程上常用的  $db_8$  小波对 EMD 分解重构后的信号进行进一步处理.由于原始信号的采样频率为 4 kHz,根据奈奎斯特采样定律,其奈奎斯特频率为 2 kHz,故对重构信号进行 8 层的小波分解,结果如图 5 所示.分解后各频带的能量占比如表 3 所示.

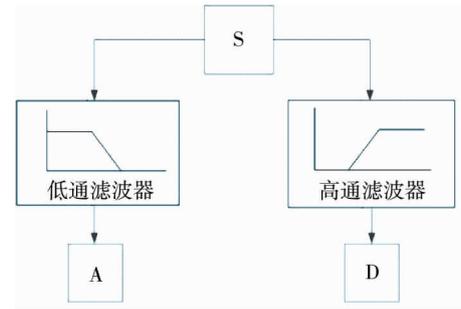


图 4 MALLAT 算法原理

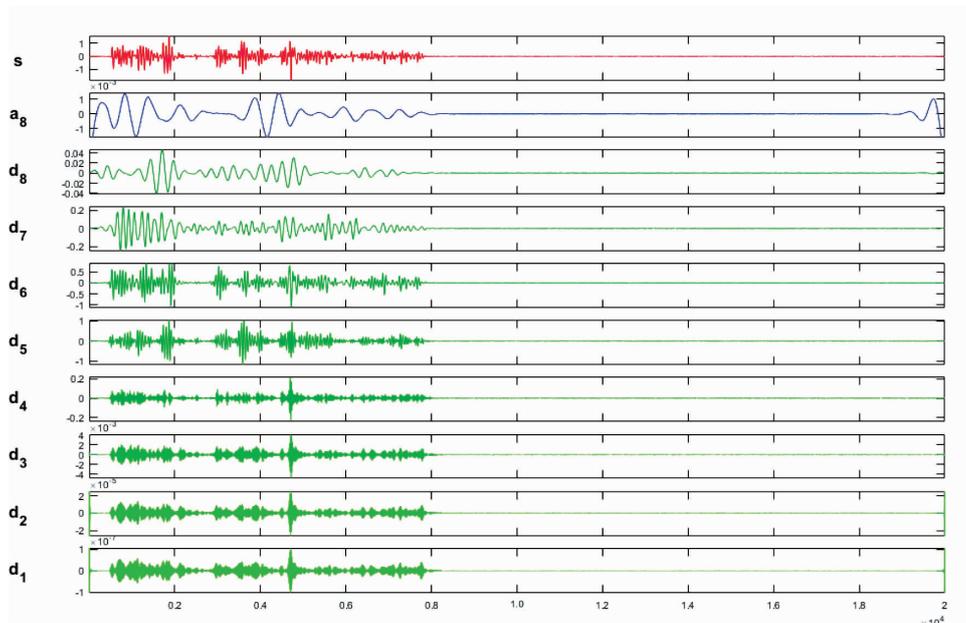


图 5 重构信号的小波分解

表 3 小波分解的频带范围和能量占比

频带划分	频率范围/Hz	能量占比/%
$a_8$	0~8	1.64
$d_8$	8~16	0.57
$d_7$	16~32	4.88
$d_6$	32~64	48.87
$d_5$	64~128	42.04
$d_4$	128~256	1.87
$d_3$	256~512	0.12
$d_2$	512~1 024	0
$d_1$	1 024~2 048	0

从表 3 可以看到,信号的主要能量集中在 16~128 Hz,而大于 128 Hz 的频带范围内的能量占比几乎为 0,这与爆破振动信号的频率分布主要集中在低频带范围内这一结论相吻合.对于大于 128 Hz 的高频小波,认为是信号中夹杂的高频噪声,可以直接剔除,最后将剩余的信号分量进行再一次重构.

此时,通过 2 次处理,得到最终剔除掉低频干扰项和 高频噪声的纯净信号  $S'(t)$ ,如图 6 所示.

### 3.3 纯净信号与原始信号的相关性分析

通过相关性分析,可以得到纯净信号  $S'(t)$  与原始信号  $S(t)$  的相关性系数达到 0.959 8,如图 7 所示.

由此可见,经验模态分解(EMD)和多尺度小波分解(WD)能够在保留原始信号有效信息的同时去除信号中的干扰项和 高频噪声.

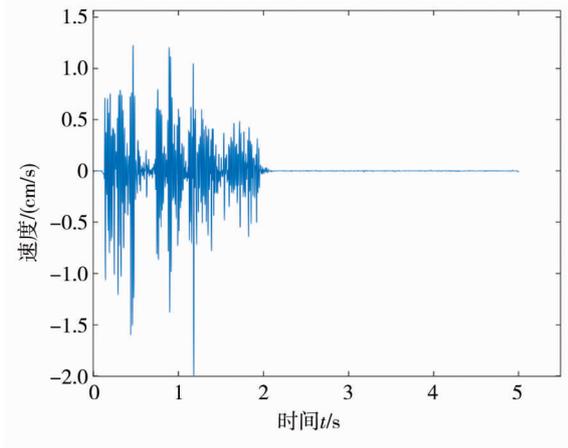


图6 纯净信号

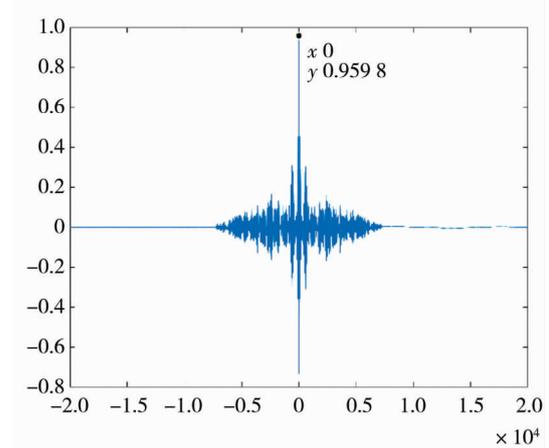


图7 纯净信号与原始信号的相关系数

## 4 纯净信号时频分析结果对比

### 4.1 纯净信号 STFT、SET 时频分析

对纯净信号  $S'(t)$  分别进行短时傅里叶变换 (STFT) 与同步提取变换 (SET), 得到两者的时频分析结果如图 8 和图 9 所示, 图中颜色的明亮程度代表能量的集中程度。

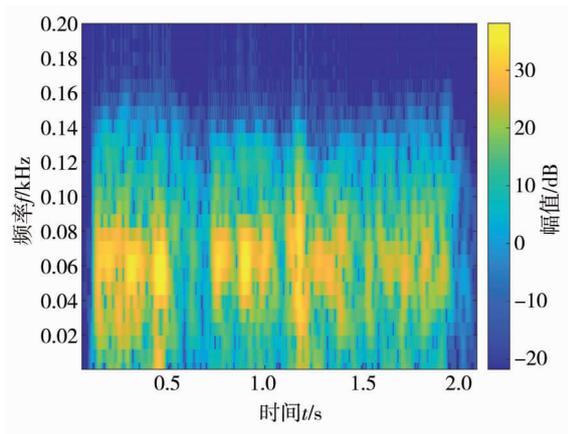


图8 纯净信号的短时傅里叶变换

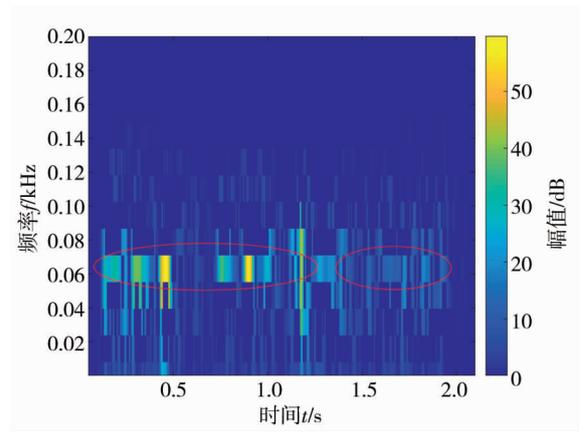


图9 纯净信号的同步提取变换

通过观察短时傅里叶变换 (STFT) 的时频分析结果可以发现, 爆破振动信号的能量主要集中在 20~80 Hz, 而同步提取变换 (SET) 的时频分析结果则显示爆破振动信号的能量更多集中在 60 Hz 附近, 而且从 SET 的时频分析结果中可以看到, 主频带的能量随着时间的推移会发生一定的衰减 (颜色由亮到暗)。

通过两者的时频分析结果对比可知: 同步提取变换 (SET) 的时频分析结果更加清晰, 相较于短时傅里叶变换 (STFT), 其能量发散的现象得到明显改善, 信号的时频特征刻画得更加细致。

### 4.2 时频结果的信息熵计算

为了能够定量比较 2 种不同方法的时频分析精度, 这里引入信息熵的概念。信息熵<sup>[19]</sup>是由 C. E. Shannon 从热力学中引入的概念, 用来定量描述信号的稳定性。其数学描述如式 (11)。

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i). \quad (11)$$

式中:  $H(X)$  为信息熵;  $p(x_i)$  为随机事件  $X$  为  $x_i$  的概率。

一般来讲, 信息熵越大, 意味着信息越混乱, 对应的图像也就越模糊; 信息熵越小, 意味着信息越稳定, 对应的图像也就越清晰。在时频图中, 信息熵的大小直接反映时频分析结果的精度和能量聚集性。信息熵大, 则分析结果精度低, 能量发散严重; 反之, 则代表分析结果精度高, 能量聚集性较高。

对两者的时频分析结果进行灰度处理后计算信息熵, 得出短时傅里叶变换 (STFT) 和同步提取变换

(SET)的一维信息熵分别为为 2.364 8 和 1.517 7.相较于短时傅里叶变换(STFT),同步提取变换(SET)的信息熵更低,进一步说明同步提取变换(SET)的时频分析精度更高.

### 4.3 爆破振动安全允许振速

本文的被保护对象属于一般的民用建筑物,根据同步提取变换(SET)的时频分析结果,结合《爆破安全规程》(GB 6722—2014)<sup>[20]</sup>中对不同保护对象类型的安全振速要求(表4),确定本次爆破的安全允许振速为 2.5~3.0 cm/s.

表4 一般民用建筑物 爆破振动安全允许标准

频率 $f/\text{Hz}$	安全允许振速 $v/(\text{cm/s})$
$f \leq 10$	1.5~2.0
$10 < f \leq 50$	2.0~2.5
$f > 50$	2.5~3.0

结合实测振动波形,从图1中可以看到本次爆破的实际峰值振速大约为 1.5 cm/s,符合《爆破安全规程》的安全振速要求,而且距允许的安全振速范围有较大的冗余,因此,在实际工程中可以适当增加爆破药量,以提高单次爆破的生产效率.

## 5 结论

1) 经验模态分解(EMD)和多尺度小波分解(WD)可以有效滤除原始信号中的干扰项,而且不会造成原始信号的失真.

2) 同步提取变换(SET)相较于传统的爆破振动信号时频分析方法,有更高的时频分析精度,能够更加细致地刻画爆破振动信号的时频特征.

### 参考文献:

- [1] 张义平,李夕兵,左宇军.爆破振动信号的 HHT 分析与应用[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] 马瑞恒,钱汉明,娄建武,等.时频分布在爆破震动信号处理中的应用[J].工程爆破,2004(2):8-12.
- [3] 付晓强,张世平,张昌锁.露天开采爆破振动信号小波包分析[J].工程爆破,2013,19(1/2):24-27.
- [4] 王涛,夏岸雄,廖新旭.基于小波变换的爆破振动信号不同频带能量分析[J].金属矿山,2014(3):52-55.
- [5] 陈作彬,李兴华,范磊,等.基于小波包变换的爆破地震反应谱分析[J].爆破器材,2018,47(5):60-64.
- [6] YAN Z H, MIYAMOTO A, JIANG Z W. Frequency slice wavelet transform for transient vibration response analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(5):1474-1489.
- [7] YAN Z H, MIYAMOTO A, JIANG Z W. An overall theoretical description of frequency slice wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(2):491-507.
- [8] 郭涛,方向,谢全民,等.频率切片小波变换在爆破振动信号时频特征精确提取中应用[J].振动与冲击,2013,32(22):73-78.
- [9] 杨仁树,付晓强,杨国梁,等.EMD 和 FSWT 组合方法在爆破振动信号分析中的应用研究[J].振动与冲击,2017,36(2):58-64.
- [10] 贾亚飞,朱永利,王刘旺.基于 VMD 和 Wigner-Ville 分布的局放信号时频分析[J].系统仿真学报,2018,30(2):569-578.
- [11] 梅比,汪旭光,杨仁树.基于改进 MP-WVD 算法的核电厂建设爆破振动信号处理方法[J].爆炸与冲击,2019,39(4):152-162.
- [12] 何周杰,涂晓彤,王凯,等.频率同步压缩与时间同步压缩的对比和应用[J].振动、测试与诊断,2021,41(2):354-361.
- [13] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2):243-261.
- [14] GANG Y, YU M, XU C. Synchroextracting Transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10):8042-8054.
- [15] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and nonstationary time series analysis [J]. Pro Roy Soc London A, 1998, 454:903-995.
- [16] 李夕兵,张义平,左宇军,等.岩石爆破振动信号的 EMD 滤波与消噪[J].中南大学学报(自然科学版),2006(1):150-154.
- [17] 陈正拜,付晓强,林天舒,等.小波熵去噪在微差爆破延时精确识别中的应用[J].工业安全与环保,2016,42(12):1-3.
- [18] 李启月,王宏伟,王靖博,等.基于 EEMD 和小波阈值法的爆破振动信号预处理研究[J].矿冶工程,2021,41(3):28-31.
- [19] 王军选,田小平,曹红梅.信息论基础与编码[M].北京:人民邮电出版社,2011.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].2014.