

# 基于LCD分解的微震信号分析与识别

赵国彦, 邓青林

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 针对矿山微震监测信号识别难, 识别速度慢的问题, 引入新的非平稳信号的分析方法——局部特征尺度分解法(LCD), 该方法可以自适应地将一个复杂的信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的内禀尺度分量(ISC)之和。与传统的经验模态分解(EMD)相比, LCD计算的效率更高, 并能更好地抑制端点效应。分别对矿山典型的岩石破裂微震信号和爆破振动信号进行LCD, 结果表明, 2种信号均得到了有效的分解。对各ISC作频谱分析表明, 2种信号在频率分布上存在较大差异。对各ISC作Hilbert变换, 得到的能量分析结果表明, 2种信号在能量分布上也存在较大差异。该方法为快速、准确地识别微震信号提供了新的途径。

**关键词** 微震; LCD; Hilbert变换; 信号分析

**中图分类号** TD76

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.008

## Analysis and Differentiation of Micro-seismic Signal Based on LCD Decomposition

ZHAO Guoyan, DENG Qinglin

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** A new method for non-stationary signal analysis, local characteristic-scale decomposition (LCD), was applied to analysis of micro-seismic signals to overcome the difficulties in differentiation of micro-seismic signals in mines and improve differentiation efficiency. With LCD, a complicated signal self-adaptively decomposes into a number of intrinsic scale components (ISC), whose instantaneous frequencies have physical significance. Compared with the conventional empirical mode decomposition method, LCD method has higher computational efficiency and better restriction of end effects. The results show that it was effective to use LCD to decompose typical micro-seismic signals of rock fracture and blast vibration signals in mines. Frequency spectrum analysis of each ISC shows that the two kinds of signals had significant difference in frequency distribution, and Hilbert transformation of each ISC shows that they also had significant difference in energy distribution. This method provides a new approach to rapid and accurate differentiation of micro-seismic signals.

**Keywords** micro-seismic; LCD; Hilbert transform; signal analysis

随着微震监测技术在南非、澳大利亚、加拿大等矿业发达国家的兴起, 中国越来越多的地下矿山也相继引进并装备了微震监测系统。工程试验表明, 岩体破裂变形会产生大量的微震信号, 每一个信号都含有岩体内部状态变化的丰富信息, 对系统接收到的微震信号进行分析、处理, 可作为评价岩体稳定性的依据<sup>[1,2]</sup>。但矿山现场作业环境复杂, 干扰因素多, 如机械设备运转、凿岩爆破施工等均会产生大量的噪声。因此, 如何快速、准确地识别有效的微震信号是当前微震监测

技术领域急需解决的重大问题<sup>[3]</sup>。

目前的微震监测系统, 还无法实现有效微震事件的自动识别和记录, 而人工识别效率低, 易出错。因此运用时频分析技术从信号中提取相关的信息尤为重要, 例如短时傅立叶变换<sup>[2,3]</sup>, 小波变换及小波包分析技术<sup>[4,5]</sup>等, 但这些方法都缺乏自适应性。1998年, Huang等<sup>[6]</sup>提出了经验模态分解方法(EMD), 由于其良好的自适应性而被广泛运用于微震、爆破振动信号的分析之中<sup>[7-10]</sup>, EMD分解得到的分量信号光滑, 但

收稿日期: 2014-05-14; 修回日期: 2014-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374244)

作者简介: 赵国彦, 教授, 研究方向为采矿工程、矿山安全和岩石力学与工程等, 电子信箱: 312929122@qq.com; 邓青林(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为矿山安全与岩石力学, 电子信箱: 369097322@qq.com

引用格式: 赵国彦, 邓青林. 基于LCD分解的微震信号分析与识别[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 49-55.

存在频率混淆、端点效应明显等问题,降低了信号的保真度,分解过程中使用3次样条插值也增大了计算量。2012年,程军圣等<sup>[11]</sup>提出针对非平稳非线性信号的局部特征尺度分解法(LCD),其吸收EMD等方法的思想,在定义瞬时频率具有物理意义的分量的基础上,假定每个复杂信号都由不同的内禀尺度分量(ISC)构成,且任意的2个ISC都相互独立,由此任意信号都可被分解成有限个ISC的叠加。由于LCD采用线性变换构造基线信号,使得计算量大大减小,所需迭代的次数减少,也在一定程度上遏制了端点效应,使得到的分量信号更能真实描述原始信号的特征。

本文引入LCD法对2种典型的微震信号进行分析,以研究2种信号在频域和能量分布上的不同特征。

## 1 LCD方法

### 1.1 内禀尺度分量ISC

与经验模态分解定义瞬时频率具有物理意义的本征模态分量(intrinsic mode function, IMF)类似, LCD定义瞬时频率具有物理意义的ISC<sup>[12]</sup>,与EMD不同的是, LCD采用的局部特征尺度参数是基于极值点的,由于定义条件不是必要条件从而避免了计算速度慢等问题。

根据瞬时频率具有物理意义的典型单分量信号具有的共同特征,即信号的极小值点与相邻2个极大值点的连线对应极小值点时刻的取值关于时间轴近似对称,可以给出瞬时频率具有物理意义的单分量信号ISC需要满足的2个条件:

1) 整个序列之中,任意2个相邻极值点符号不同;

2) 整个序列之中,假设相邻2个极大(小)值点( $T_k, X_k$ )和( $T_{k+2}, X_{k+2}$ ) ( $k=1, 2, \dots, N$ , 为极值点数)确定线段  $y = \frac{X_{k+2} - X_k}{T_{k+2} - T_k}(t - T_k) + X_k$ , 在它们之间的极小(大)值点记为( $T_{k+1}, X_{k+1}$ ),其对应的时刻在线段上的取值为 $Y_{k+1}$

$$Y_{k+1} = X_k + \frac{X_{k+2} - X_k}{T_{k+2} - T_k}(T_{k+1} - T_k) \quad (1)$$

式中, $Y_{k+1}$ 与 $X_{k+1}$ 需满足

$$Y_{k+1}/X_{k+1} = C \quad (2)$$

式中, $C$ 为常数。式(2)写成一般形式为

$$aY_{k+1} + (1-a)X_{k+1} = 0, \quad a \in (0, 1) \quad (3)$$

一般 $a=0.5$ ,此时式(2)中 $C=-1$ 。

上述条件1)因极值点单调,保证了信号分量波形单一,条件2)则保证其光滑性与对称性,两者共同保证ISC为单一模态,使各分量局部近似吻合标准正弦曲线,即保证瞬时频率为正,从而使得瞬时频率具有物理意义<sup>[13]</sup>。

### 1.2 局部尺度分解LCD

与EMD相似,在定义了ISC之后,就可以将原始信号 $x(t)$ 进行LCD,实现过程<sup>[14]</sup>如下:

1) 确定信号 $x(t)$ 的所有极值点( $T_k, X_k$ ),  $k=1, 2, \dots, N$ ,然后设置参数 $a=0.5$ ,接着在任意2个极值点之间对 $x(t)$ 做线性变换

$$w_i(t) = L_k + \frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k}(x(t) - X_k) \quad (4)$$

式中 $L_{k+1}$ 的表达式为

$$L_{k+1} = a \left[ X_k + \frac{X_{k+2} - X_k}{T_{k+2} - T_k}(T_{k+1} - T_k) \right] + (1-a)X_{k+1} \quad (5)$$

2) 用原始数据减去 $w_i(t)$ 得到

$$c_i(t) = x(t) - w_i(t) \quad (6)$$

3) 由式(6)得到的 $c_i(t)$ 一般不满足ISC的条件,故将其视为新的 $x(t)$ ,重复以上步骤直至满足ISC条件,此时的 $c_i(t)$ 为第一阶ISC,记为 $I_1(t)$ ;

4) 用原始信号 $x(t)$ 减去 $I_1(t)$ 得到剩余信号 $r_1(t)$

$$r_1(t) = x(t) - I_1(t) \quad (7)$$

5) 把 $r_1(t)$ 作为新的原始信号,重复以上步骤,直至第 $n$ 阶的剩余信号 $r_n(t)$ 成为单调函数或者比预期值小,即可得到一系列ISC即 $I_1(t), I_2(t), \dots, I_n(t)$ 以及余项 $r_n(t)$ ,如此初始信号 $x(t)$ 就可分解成若干ISC与一个余项之和,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t) + r_n(t) \quad (8)$$

LCD的终止准则与经验模态分解类似,都可通过限制标准偏差(standard deviation, SD)实现

$$SD = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|h_k(t) - h_{k-1}(t)|^2}{|h_{k-1}(t)|^2} dt \quad (9)$$

式中, $T$ 为信号的时间长度, $h_{k-1}(t)$ 和 $h_k(t)$ 为2个连续处理结果的时间序列。

### 1.3 LCD与EMD分解对比

考察仿真信号 $z(t)$ ,由瞬时频率具有物理意义的2种单分量调幅调频信号 $x(t)$ 和调幅信号 $y(t)$ 构成,其表达式和相应的波形分别见式(10)和图1。

$$z(t) = x(t) + y(t) = [1 + \cos(50\pi t)] \cos[800\pi t + 0.5 \sin(50\pi t)] + 2e^{-t/2} \sin(50\pi t) \quad (10)$$

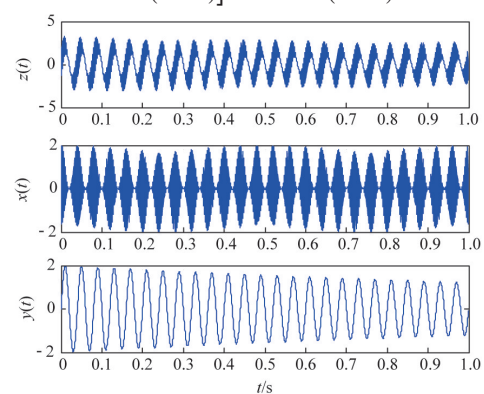


图1 仿真信号波形

Fig. 1 Waveforms of simulation signals

设置相同的终止条件 $SD < 0.3$ ,分别用EMD和LCD方法对仿真信号进行分解,如图2所示, LCD分解对端点效应的抑制优于EMD,使得各分量更具备真实性。

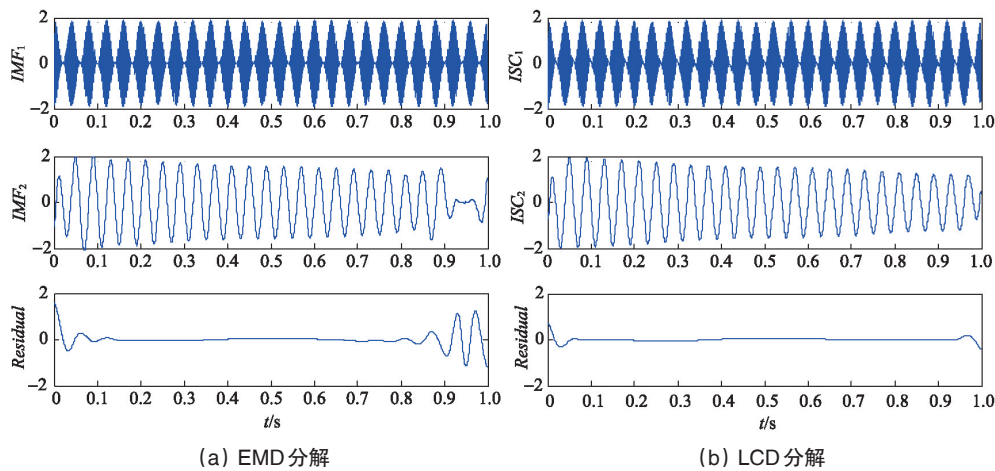


图2 仿真信号的EMD分解和LCD分解对比

Fig. 2 Comparison of simulation signals between EMD and LCD decomposition

保持上述终止条件不变,对10组不同的微震信号分别作LCD分解和EMD分解,以对比2种算法所消耗的时间。为减小系统误差,对每组信号分解3次求出平均分解时间,结果如表1所示,LCD分解所消耗的时间不到EMD的1/2,表明LCD分解能大大提高计算效率,是一种高效的信号分解方法。

表1 10组不同信号EMD分解和LCD分解时间对比  
Table 1 Time comparison of ten different signals between EMD and LCD decomposition

信号编号	EMD分解时间/s	LCD分解时间/s
1	1.575	0.673
2	1.710	0.694
3	1.301	0.532
4	1.776	0.777
5	1.281	0.547
6	1.085	0.610
7	1.334	0.594
8	2.309	0.937
9	2.394	0.982
10	2.312	1.051

### 1.4 Hilbert变换

采用LCD方法将信号分解得到多个ISC后,对各个ISC进行Hilbert变换处理,可求得每个ISC的瞬时频率以及Hilbert谱。具体计算过程<sup>[6]</sup>如下。

将每个ISC作Hilbert变换构建解析信号

$$z(t) = I(t) + iH[I(t)] = a(t)e^{i\Phi(t)} \quad (11)$$

式中,  $a(t)$ 、 $\Phi(t)$  分别为幅值函数和相位函数

$$a(t) = \sqrt{I^2(t) + H^2[I(t)]} \quad (12)$$

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \frac{H[I(t)]}{I(t)} \quad (13)$$

在此基础上求得各个ISC的瞬时频率为

$$\omega(t) = d\Phi(t)/dt \quad (14)$$

将信号幅值转化为时间与瞬时频率的函数,即Hilbert谱

$$H(\omega, t) = \text{Re} \left[ \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i\omega_i(t)t} \right] \quad (15)$$

将  $H(\omega, t)$  对时间积分可得Hilbert边际谱

$$h(\omega) = \int_0^t H(\omega, t) dt \quad (16)$$

定义Hilbert瞬时能量为

$$IE(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H^2(\omega, t) d\omega \quad (17)$$

将  $H(\omega, t)$  的平方对时间积分得到Hilbert能量谱

$$ES(\omega) = \int_0^t H^2(\omega, t) dt \quad (18)$$

## 2 实例分析

从微震系统接收到的大量信号中识别出有效的微震事件是处理微震数据的关键,而其中干扰最多的就是爆破振动信号。为此,选取某矿山2种典型的爆破振动信号与岩石破裂微震信号进行分析,信号的采集仪(传感器)的采样频率为6000 Hz。观察图3所示的信号波形图,可见典型的爆破振动信号存在多重延迟的特征,表现为单个信号中有多个相似的波形形状,这是因为矿山爆破作业一般采取多段微差爆破方式。而典型的岩体破裂微震信号通常表现为连续单一的状态,且持续时间较长,衰减缓慢,这是由于岩体内部破裂生成裂纹时有一个扩展发育的过程。

### 2.1 频谱特性分析

利用傅里叶变换在频域内具有局部化的性质,可以考察信号的频域特性。图3的功率谱密度(power spectral density, PSD)表达了2种信号所包含的频率成分构成。对爆破信号进行LCD分解得到10个ISC,对岩体破裂微震信号进行LCD分解得到9个ISC,图4、图5分别是2种信号的分量图和频谱。从分量图可以看出,每个分量的幅值依次减小,包含不同的时间特征尺度,能正确反映出原始信号的特征,说明LCD良

好的自适应性。从各个分量的频谱图中可以清晰地看出 2 种信号的频带分布都很丰富, 各个分量按照频率由高自低依次排列, 爆破振动信号的频率在 0~1500 Hz 均有分布, 其优势频

率段集中在 200~300 Hz, 岩体破裂微震信号的频率则分布在 0~100 Hz 内, 其优势频率段分布在 20、30 及 55 Hz 左右, 这与原始信号的频谱基本一致。

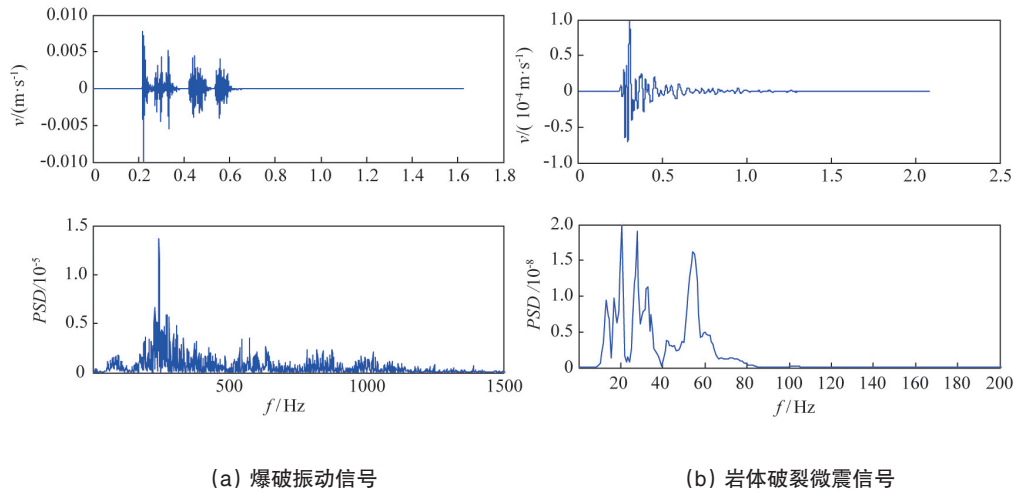


图3 原始信号及其功率谱密度(PSD)

Fig. 3 Blast vibration signal and micro-seismic signal of rock fracture and their power spectra

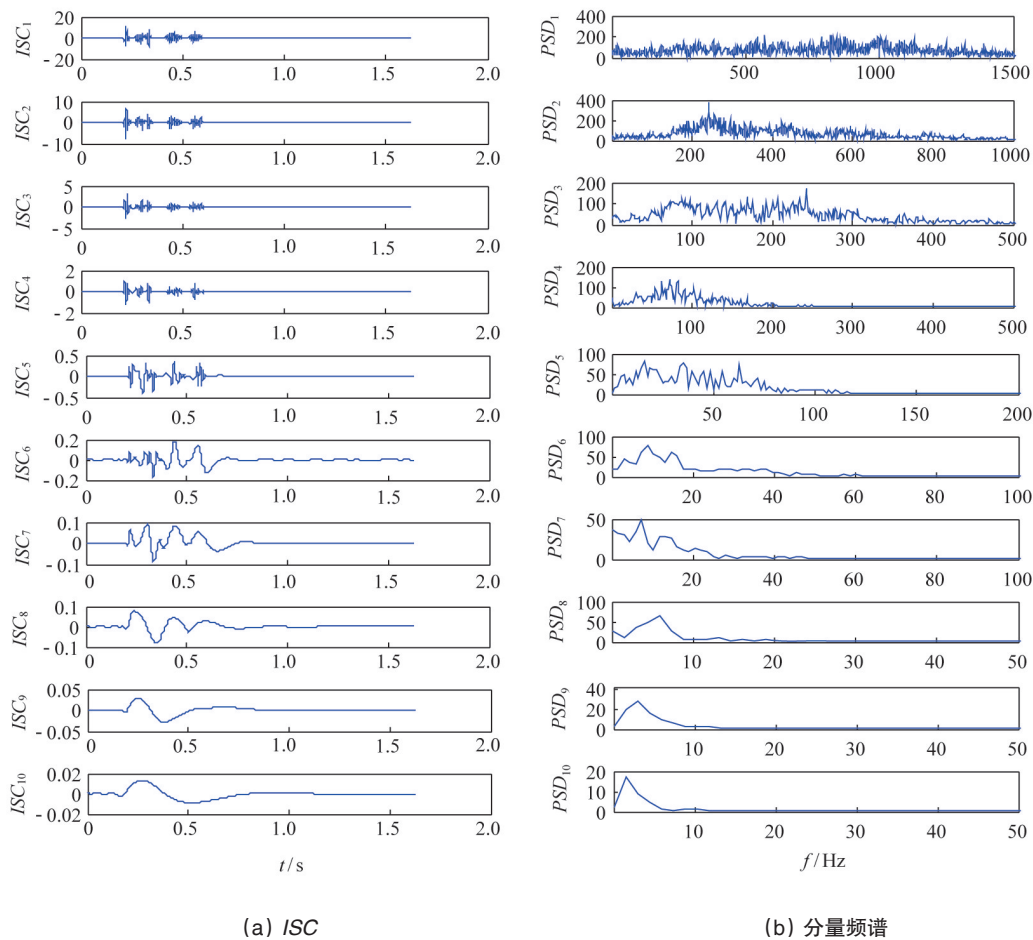


图4 爆破振动信号LCD分解及其分量频谱

Fig. 4 LCD decomposition and power spectra of each component of blast vibration signal

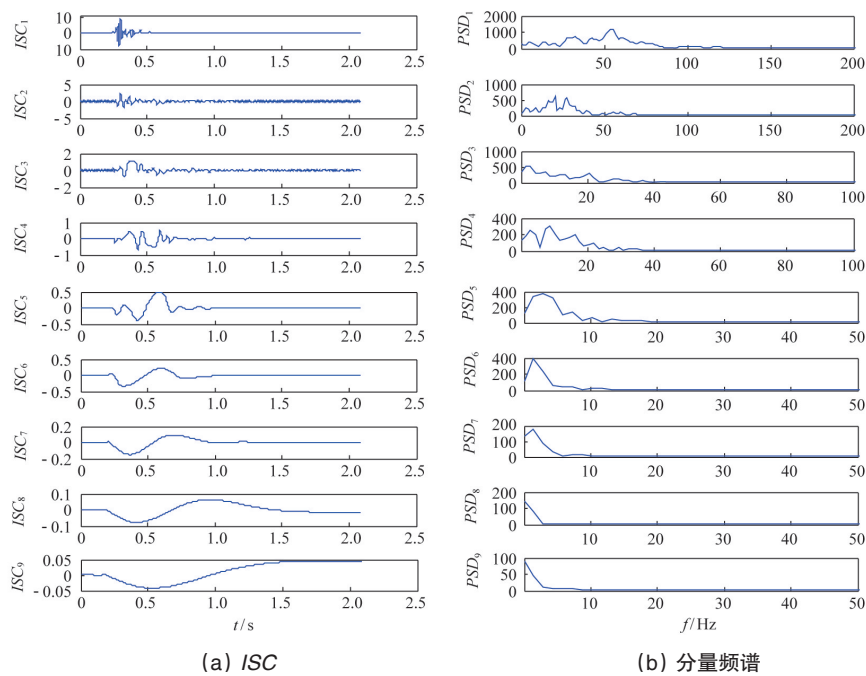


图5 岩体破裂微震信号LCD分解及其分量频谱

Fig. 5 LCD decomposition and power spectra of micro-seismic signal of rock fracture

2.2 能量特性分析

利用式(11)~式(18)对各ISC进行能量分析,为提高计算效率,选取(0.2~0.8 s)代表信号的有效区段。

图6为爆破振动信号与岩体破裂微震信号的瞬时能量图。瞬时能量可以反映信号的能量随着时间变化的特征,从

图6可以得知,爆破信号的能量由于多段微差的原因呈区间式分布,能量的最大瞬时值位于采样125点处,而岩石破裂微震信号能量分布较为单一,主要集中在300~750点之间,最大瞬时值在575点处。两者的最大瞬时能量均对应质点的最大振幅。

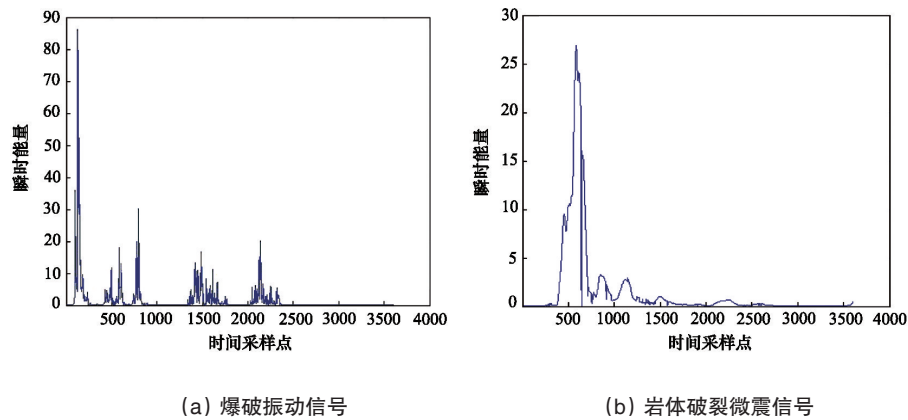


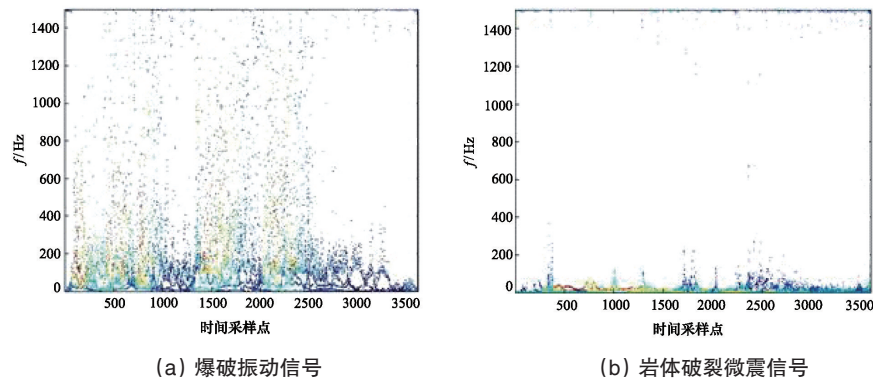
图6 瞬时能量谱图对比

Fig. 6 Comparison of instantaneous energy spectra

图7是2种信号各个ISC经Hilbert变换得到的Hilbert能量谱的等高线表达形式,该图能描述信号频率随时间的变化以及各个分量的能量分布情况,可见2种信号在高频区的能量分布较少,爆破振动信号的能量主要包含在0~200 Hz范围内,200 Hz以上能量分布较少,而微震信号的能量主要包含在0~50 Hz范围内。图8反映了原始信号在时间、频率和能量

上的对应关系,更加具有直观性,与图6、图7结果吻合。

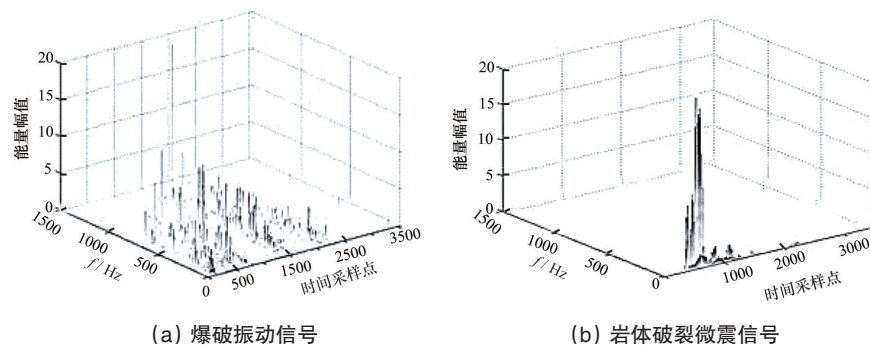
图9为2种信号边际能量谱对比,由图9(a)不难看出,爆破振动信号的频率主要集中在100~450 Hz,频带内存在能量大小不一的频率,在433 Hz处边际能量幅值达到最大。图9(b)中则表明岩体微震信号以低频为主,主震频带集中在0~40 Hz,包含多个子频带,在17.5 Hz时边际能量幅值达到最大。



(a) 爆破振动信号 (b) 岩体破裂微震信号

图7 等高线能量谱图对比

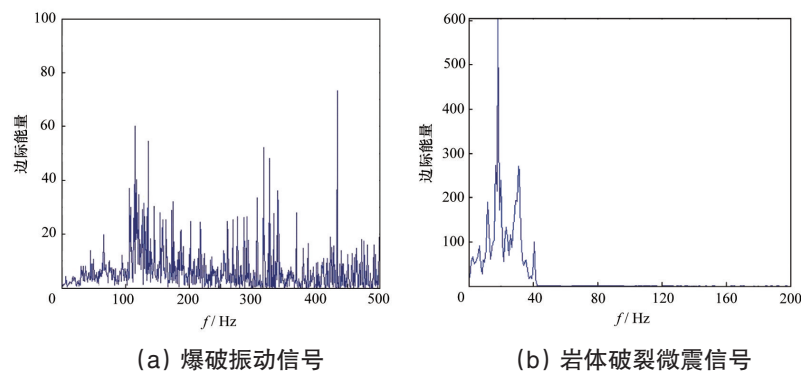
Fig. 7 Comparison of contour energy spectra



(a) 爆破振动信号 (b) 岩体破裂微震信号

图8 三维能量谱图对比

Fig. 8 Comparison of three-dimensional energy spectra



(a) 爆破振动信号 (b) 岩体破裂微震信号

图9 边际能量谱图对比

Fig. 9 Comparison of marginal energy spectra

### 2.3 爆破与岩体微震信号对比

通过分析可以推测,爆破振动信号与岩体微震信号具有不同的频域特性和能量分布特性。为验证该结论,分别选取5组爆破振动信号与5组岩体微震信号作以上的分析,得到的具体参数如表2所示。从表2可以看出,爆破振动信号的频带相对较宽,其频率主要在500 Hz以下,500 Hz以上高频也有一定分布,岩体破裂微震信号的频率则主要在0~250 Hz的范围之内,与文献[15]的结论相符,爆破振动产生的波形频率通常要比微震事件高,可能是两者的震源机制不同,微震事件

主要由剪切破坏引起<sup>[16]</sup>。其次,爆破振动信号边际能量对应的频率主要分布在一个相对较大的范围,其主频也相应较高,而2种信号等高线能量对应的频率分布区别就更明显,爆破振动信号主要分布在200 Hz以下,岩体微震信号主要分布在100 Hz以内。另外,爆破振动信号的瞬时能量一般随着时间表现为区间式分布,而岩体微震信号则呈现连续性分布的特点。值得注意的是,上述选取的都是波形特征明显的爆破振动事件及微震事件,实际上的信号往往复杂多变,通过对典型的分析以更有效地获得区分两类事件的特征。

表2 爆破振动信号与岩体微震信号不同参数对比

Table 2 Comparison of different parameters of blast vibration signals and micro-seismic signals

信号	频率分布/Hz	主频/Hz	边际能量主频/Hz	边际能量主要频率分布/Hz	等高能量主要频率分布/Hz
爆破振动1	0~500	126.80	84.17	40~110	0~200
爆破振动2	0~500	46.10	26.67	10~75	0~200
爆破振动3	0~350	54.20	51.67	10~110	0~200
爆破振动4	0~1000	241.70	433.30	110~340	0~200
爆破振动5	0~300	52.73	30.83	10~90	0~200
岩体微震1	0~70	26.37	12.50	0~30	0~100
岩体微震2	0~125	32.23	17.50	10~75	0~100
岩体微震3	0~100	20.51	18.33	0~40	0~100
岩体微震4	0~100	21.97	17.50	0~40	0~100
岩体微震5	0~250	49.80	34.17	0~70	0~150

### 3 结论

1) LCD能够实现微震信号的有效分解,因采用线性变换使得所需的迭代次数少,因此产生的端点效应不如EMD分解明显,使得各ISC信号更真实,物理意义更清晰;且由于采用线性变换得到基线信号,其计算效率高,分解速度快,对于实现信号的实时在线分析具有很大意义;

2) 利用Hilbert变换能够得到有意义的瞬时频率的特点,从频域及能量2个方面对矿山2种典型微震信号进行了分析,结果表明LCD结合Hilbert变换的有效性;

3) 通过对比爆破振动信号与岩体微震信号在频率范围以及边际能量和等高线能量频率分布上的差异,为矿山微震信号的分析识别提供了新的途径。

#### 参考文献 (References)

- [1] 赵兴东, 石长岩, 刘建坡, 等. 红透山铜矿微震监测系统及其应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(3): 399-402.  
Zhao Xingdong, Shi Changyan, Liu Jianpo, et al. Microseismic monitoring system establishment and its application study in Hongtoushan copper mine[J]. Journal of Northeastern University: Science & Technology Edition, 2008, 29(3): 399-402.
- [2] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 772-775.  
Lu Caiping, Dou Linming, Wu Xingrong, et al. Frequency spectrum analysis on microseismic monitoring and signal differentiation of rock material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 772-775.
- [3] 曹安业, 窦林名, 秦玉红, 等. 高应力区微震监测信号特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(2): 146-150.  
Cao Anye, Dou Linming, Qin Yuhong, et al. Characteristic of microseismic monitoring signal in high stressed zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007(2): 146-150.
- [4] 朱权洁, 姜福兴, 于正兴, 等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 723-730.  
Zhu Quanjie, Jiang Fuxing, Yu Zhengxing, et al. Study on energy distribution characters about blasting vibration and rock fracture microseismic signal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 723-730.
- [5] 朱权洁, 姜福兴, 尹永明, 等. 基于小波分形特征与模式识别的矿山微震波形识别研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2036-2042.  
Zhu Quanjie, Jiang Fuxing, Yin Yongming, et al. Classification of mine microseismic events based on wavelet-fractal method and pattern recognition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2036-2042.
- [6] 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 Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [7] 李夕兵, 张义平, 刘志祥, 等. 爆破震动信号的小波分析与HHT变换[J]. 爆炸与冲击, 2005(6): 528-535.  
Li Xibing, Zhang Yiping, Liu Zhixiang, et al. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves, 2005(6): 528-535.
- [8] 王福缘, 璩世杰, 申旭鹏, 等. 基于HHT方法的露天矿爆破振动信号分析[J]. 现代矿业, 2012(10): 24-27.  
Wang Fuyuan, Qu Shijie, Shen Xupeng, et al. Analysis on blasting vibration signals of open pit mine based on HHT method[J]. Modern Mining, 2012(10): 24-27.
- [9] 刘佳, 吴建星. 基于HHT的微震信号分析[J]. 武汉科技大学学报, 2013(2): 150-153.  
Liu Jia, Wu Jianxing. HHT-based analysis of microseismic signals[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2013(2): 150-153.
- [10] 商鹏, 雷文杰, 冷军发. 基于HHT的煤岩破裂微震信号分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014(2): 33-37.  
Shang Peng, Lei Wenjie, Leng Junfa. Analysis on micro-seismic signals of coal and rock fracture based on HHT[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014(2): 33-37.
- [11] 程军圣, 郑近德, 杨宇. 一种新的非平稳信号分析方法——局部特征尺度分解法[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 215-220.  
Cheng Junsheng, Zheng Jinde, Yang Yu. A new time-frequency analysis method: The local characteristic-scale decomposition[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 215-220.
- [12] 杨宇, 曾鸣, 程军圣. 一种新的时频分析方法——局部特征尺度分解[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(6): 35-39.  
Yang Yu, Zeng Ming, Cheng Junsheng. A nonstationary signal analysis approach: The local characteristic-scale decomposition method[J]. Journal of Hunan University: Science & Technology Edition, 2012, 39(6): 35-39.
- [13] 程军圣, 郑近德, 杨宇. 基于局部特征尺度分解的经验包络解调方法及其在机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 87-94.  
Cheng Junsheng, Zheng Jinde, Yang Yu. Empirical envelope demodulation approach based on local characteristic-scale decomposition and its applications to mechanical fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 87-94.
- [14] 杨宇, 曾鸣, 程军圣. 局部特征尺度分解方法及其分解能力研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(5): 602-609.  
Yang Yu, Zeng Ming, Cheng Junsheng. Research on local characteristic-scale decomposition and its capacities[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(5): 602-609.
- [15] 凌同华, 李夕兵. 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1117-1122.  
Ling Tonghua, Li Xibing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1117-1122.
- [16] Gibowicz S J, Kijko A. 矿山地震学引论[M]. 修济刚, 徐平, 杨心平, 译. 北京: 地震出版社, 1998: 188-238.  
Gibowicz S J, Kijko A. An introduction to mining seismology[M]. Xiu Jigang, Xu Ping, Yang Xinping, trans. Beijing: Seismological Press, 1998: 188-238.

(编辑 陈华蛟)