

基于 EEMD-Hilbert 变换的爆破振动信号 频带-能量分布特征研究^①

任艳民¹, 龙运杰¹, 唐虹靖¹, 侯胜心¹, 张 想², 李启月²

(1.西藏中金新联爆破工程有限公司, 西藏 拉萨 850000; 2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为研究爆破地震波传播时的能量分布规律, 以某基坑爆破工程为工程背景, 利用 EEMD-Hilbert 工具, 分析了同一测点不同方向、同直线不同爆心距以及同爆心距不同最大段药量的爆破振动信号。结果表明, 垂向信号能量主要集中在中频带, 水平径向信号能量在中、低频带均有分布, 水平切向信号能量主要集中在高频带; 同次监测下, 随着爆心距增大, 信号高频能量衰减得更快, 信号能量分布占比从高频向低频转移; 爆心距相等的情况下, 增加单段最大药量会促进信号低频能量占比增加, 药量显著增大时, 低频信号占比增加更为显著。

关键词: 爆破振动; EEMD-Hilbert; 爆破信号; 时频分析; 能量分布

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.008

文章编号: 0253-6099(2023)02-0035-05

Study of Frequency Bands vs Energy Distribution of Blast Vibration Signals Based on EEMD and Hilbert Transform

REN Yanmin¹, LONG Yunjie¹, TANG Hongjing¹, HOU Shengxin¹, ZHANG Xiang², LI Qiyue²

(1. Tibet Cgxinlian Blasting Engineering Co Ltd, Lhasa 850000, Tibet, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to study the energy distribution of blast wave propagation, the EEMD and Hilbert transform techniques were adopted to analyze the blast vibration signals at the same measuring point in different directions, on the same line with different distance away from explosion center, as well as with the same distance away from explosion center but with different maximum charges. It is found that vertical signal energy is mainly concentrated in the mid-bands, while the radial signal energy in horizontal direction is distributed in both the mid- and low-bands, and tangential signal energy in the horizontal direction is mainly concentrated in the high-bands. Under the same monitoring, a greater attenuation is found in high frequency energy and the proportion of signal energy distribution shifts from high-bands to low-bands as the distance is farther away from the explosion center. However, with the same distance away from the explosion center, increasing the maximum charge in a single stage can lead to higher proportion of low frequency energy, and significantly increased charge can bring more obvious effect.

Key words: blast vibration; EEMD-Hilbert; blast vibration signal; time-frequency analysis; energy distribution

爆破振动信号特征分析是研究爆破振动效应的重要方法。很长一段时间以来, 爆破振动信号特征分析都是建立在傅里叶变换 (FT) 基础上^[1]。傅里叶变换不适用于分析频谱随时间变化的非平稳信号的局部特性, 而爆破振动信号是非平稳随机信号, 具备不规则、持时短、突变和衰减快的特点, 且信号结构和频率都随时间变化。希尔伯特-黄变换 (HHT) 是近年来以傅里

叶变换为基础的线性和稳态谱分析的全新时频转换方法, 针对平稳和非平稳信号都具有极好的适用性。但 HHT 方法同样存在一些问题, 文献[2]提出了集合经验模态分解 (EEMD) 方法, 让信号中各尺度分量清晰分解出来, 有效改善了模态混合等问题。

学者们通过傅里叶变换、小波变换对爆破振动信号频域特性进行了不少研究^[3-8], 但将 EEMD-Hilbert 变换

① 收稿日期: 2022-11-23

作者简介: 任艳民 (1989—), 男, 河南太康人, 硕士, 高级工程师, 主要从事爆破工程、安全工程、矿山工程方面的研究工作。

通信作者: 张 想 (1999—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土工程爆破技术。

应用于对爆破振动信号频域-能量分布的研究并不多。本文结合某基坑爆破工程,利用 EEMD-Hilbert 方法准确提取爆破振动信号频谱特征,获得信号频域能量分布情况,局部划分子频带,研究了同一爆心距下,最大段药量及总药量对信号频域能量分布的影响,以及不同爆心距下的信号频域特征,得出了不同爆破参数下爆破振动能量的演化规律,可为爆破振动的预测与控制提供更为可靠的科学依据。

1 EEMD-Hilbert 分析方法

1.1 集合经验模态分解 (EEMD)

经验模态分解 (EMD) 可以自适应地将信号分解为一系列从高频到低频排列的固有模态函数,但是 EMD 结果会出现模态混合问题,降低了 IMF 分量的有效性和准确性。为了解决这一问题而提出的集合经验模态分解 (EEMD) 方法是在原始信号中加入一簇有限幅值的白噪声后,EMD 算法产生的不同尺度的成分则自动投影到背景白噪声产生的适当尺度的参考上。由于每次试验中添加的噪声不同,在足够多组的试验下,所掺杂白噪声序列对分解结果的影响可以大大减弱甚至抵消,从而让信号中各尺度分量清晰分解出来。EEMD 方法的计算过程如图 1 所示。

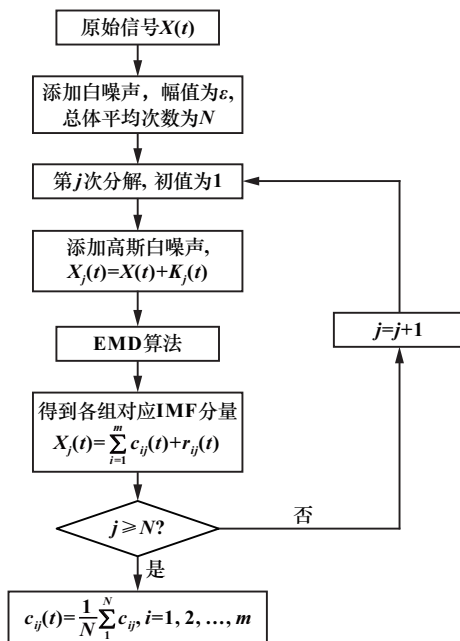


图 1 EEMD 方法流程

1.2 希尔伯特 (Hilbert) 变换

对 EEMD 方法得到的每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换的过程如下:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

式中 PV 为柯西主值,构造解析信号 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = a_i(t)e^{j\psi_i(t)} \quad (2)$$

其中:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]} \quad (3)$$

$$\psi_i(t) = \arctan\left(\frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)}\right) \quad (4)$$

式中 $a_i(t)$ 为瞬时幅值; $\psi_i(t)$ 为瞬时相位。对 $\psi_i(t)$ 求导得到瞬时频率:

$$\omega_i(t) = \frac{d\psi_i(t)}{dt} = \frac{H'[c_i(t)]c_i(t) - H[c_i(t)]c_i'(t)}{H^2[c_i(t)] + c_i^2(t)} \quad (5)$$

因而,原始信号可以表示为:

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^m a_i(t)e^{j\omega_i(t)t} \quad (6)$$

式中 Re 为实部,忽略残差,信号可以表示为时间和频率结合的函数,即 Hilbert 谱:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^m a_i(t)e^{j\omega_i(t)t} \quad (7)$$

将 Hilbert 谱在时域上进行积分,得到相应的边际谱 $h(\omega)$ 为:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (8)$$

边际谱反映各频率的整体振幅,它表示统计意义上的总累积振幅。进而对希尔伯特谱在时域上的平方积分,希尔伯特能量谱可以定义为:

$$E(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt \quad (9)$$

Hilbert 谱表示了各频率在时间长度内累积的能量,则信号频域内能量分布的百分比 P_ω 为:

$$P_\omega = \frac{E(\omega)}{E} \quad (10)$$

2 爆破振动监测

2.1 工程背景

以某基坑爆破工程为工程背景进行研究。爆源岩石为坚硬大理石,岩石普氏系数 $f=8\sim 10$,极限抗压强度 $10\sim 200$ MPa,泊松比 $0.04\sim 0.50$,岩石裂隙发育不明显,构造相对均匀。根据地质情况,设置孔深 $3.5\sim 8.0$ m、孔距和排距 $3.0\sim 3.5$ m,爆破施工采用 2# 岩石乳化炸药,为了减少爆破振动对周围建筑物的破坏,采用逐孔爆破的方法,延期时间为 50 ms。

2.2 现场监测

采用拓普测控 NUBOX-8016 爆破振动智能监测仪进行爆破振动监测。根据现场爆破施工方案及现场实测,为确保完整记录振动信号,设置采样时长为 5 s,采取外触发方式,触发水平为 0.1000 cm/s,采样频率

5 kHz。距爆区西侧约 140 m 处为学校宿舍,距爆区南侧约 30 m 处为在建楼房,距爆区西北侧约 50 m 处为塔吊,工程爆破作业环境较为复杂。各测点布置与爆破源尽量呈直线分布,且同直线分布的各测点尽量保持水平。爆破区域及监测点布置如图 2 所示。共采集 10 次爆破振动数据,如表 1 所示。

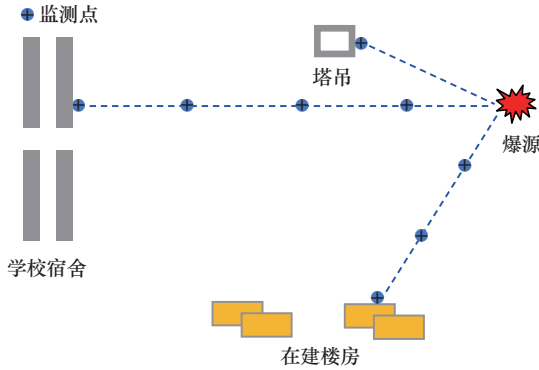


图 2 爆破振动监测点示意图

表 1 爆破振动参数

组别	总药量/kg	单段最大药量/kg	孔径/m	孔深/m	孔距×排距/(m×m)	雷管段数	孔数
1	640	20	115	3.5~4.5	3.0×3.0	3、9、13	42
2	624	22	115	3.0~4.0	3.0×3.0	3、9、13	58
3	544	22	115	3.5~4.5	3.0×3.0	3、9、13	45
4	720	24	115	2.5~3.5	3.0×2.5	3、5、9、13	42
5	800	28	115	4.0	3.5×3.5	5、9、13	46
6	848	24	115	8.0	3.0×3.0	5、9、13	45
7	960	32	115	4.0~5.0	3.0×3.0	3、5、9	54
8	1162	64	115	5.0~7.0	3.5×3.5	5、9、11	38
9	1032	40	115	3.5	3.0×3.0	3、9、13	60
10	696	32	115	4.0~5.0	3.5×3.0	5、9、13	25

3 爆破振动信号分析

影响爆破振动信号特性的因素很多,如最大段药量、爆心距、雷管微差时间间隔、自由面、地质条件等^[9-11]。鉴于本次信号监测持续时间较短,可以认为每次爆破地质条件不变,影响爆破振动信号特性的重要因素有方向、最大段药量(Q)和爆心距(R)。

3.1 信号预处理

监测数据通常受到环境噪声信号的干扰以及监测频率响应范围的限制,降低了信号分析的准确性,因而对其进行预处理具有重要意义。使用 EEMD 方法对第 3 组监测信号进行预处理,得到 EEMD 分解结果和各 IMF 对应的频谱,分别如图 3 和图 4 所示。

3.2 同一测点不同方向频带-能量分布

为分析同一测点不同方向上的频带-能量分布特性,将基坑第 1 组爆破振动信号通过 EEMD-Hilbert 时

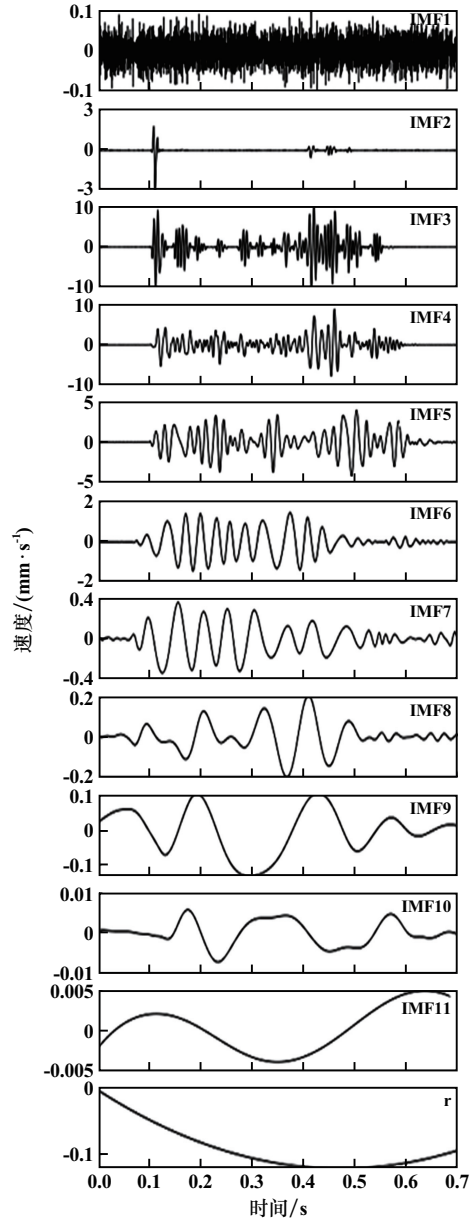


图 3 EEMD 分解结果

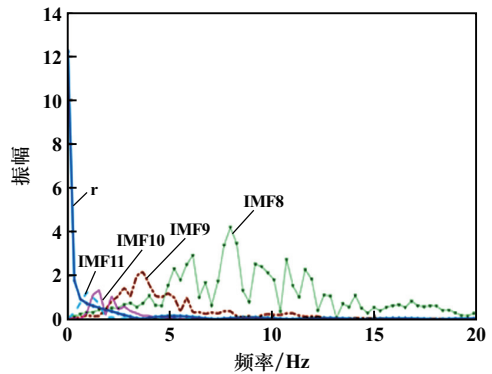


图 4 IMF 分量频谱

频转换得到各组别信号 Hilbert 能量谱,经归一化处理,各组信号频率-能量分布如图 5 所示。

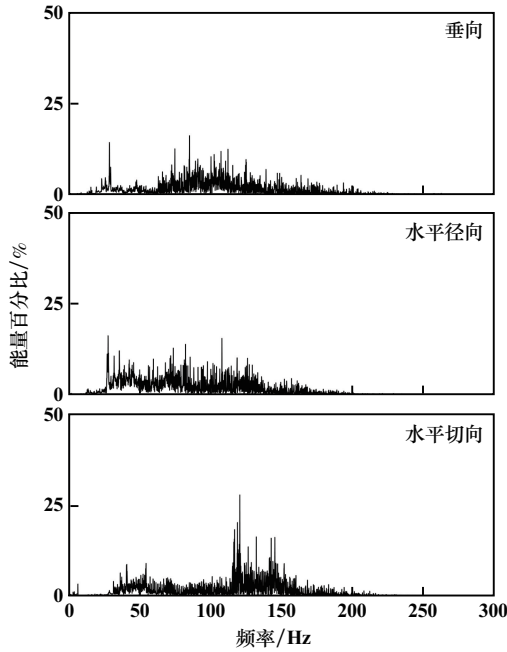


图5 同一测点不同方向频带-能量分布

由图5可知,爆破振动信号频域能量主要集中在300 Hz以内,超过90%能量主要集中在0~200 Hz,信号能量在频域内呈现出均匀分布状态。垂向信号能量在60~120 Hz范围内比例较高,水平径向能量在25~130 Hz范围内比例较高,水平切向信号能量则更加集中于110~150 Hz。这表明垂向信号能量主要集中在中频带;水平径向信号能量在中、低频带均有分布,且分布较宽;水平切向信号能量主要集中在高频带。水平径向和垂向信号频带-能量特性整体分布差别不大,但两者与水平切向的频带-能量分布特性差异性明显。

3.3 爆心距对信号频带-能量分布的影响

筛选出同次爆破监测的同一直线不同距离处的3组垂向信号,其最大段药量为20 kg,爆心距分别为25 m、55 m和85 m。3组信号通过EEMD-Hilbert时频转换得到的信号频带-能量分布情况如图6所示。

为进一步准确分析信号频带-能量分布情况,依据信号频域特性,采用局部划分频带的方法将上述3组信号划分为8个子频带,分别为:F1(0~30 Hz)、F2(30~60 Hz)、F3(60~90 Hz)、F4(90~120 Hz)、F5(120~150 Hz)、F6(150~180 Hz)、F7(180~210 Hz)、F8(210~240 Hz)。计算每组信号各子频带上的能量占比,得出各子频带-总能量占比分布情况如图7所示。

由图6~7可知,爆心距 $R=25$ m时,信号能量在频域范围内分布比较分散,F2~F4(30~120 Hz)段占据了大多数能量,但F5~F8段高频能量仍然在爆破振动损伤中发挥着重要作用; $R=55$ m时,信号能量集中于F2

和F3段,F6、F7、F8能量占比几乎为0; $R=85$ m时,信号能量集中于F1和F2段,F5、F6、F7和F8段能量占比近似为0。这表明随着爆心距增大,信号能量分布占比从高频向低频转移。

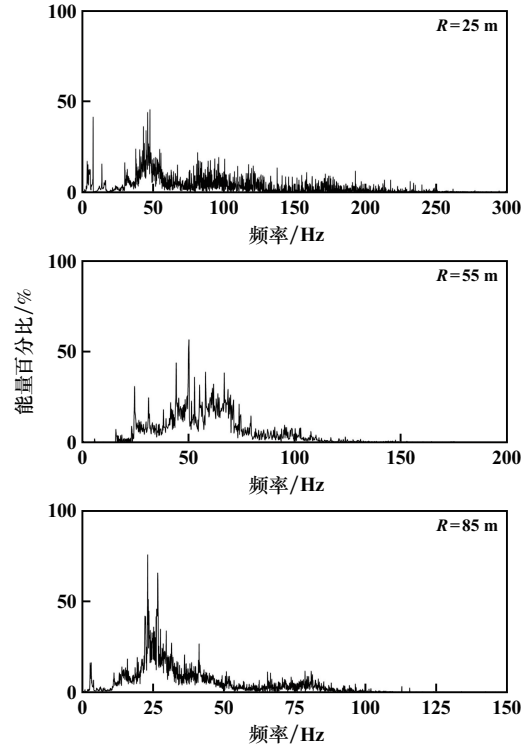


图6 不同爆心距垂向信号频带-能量分布

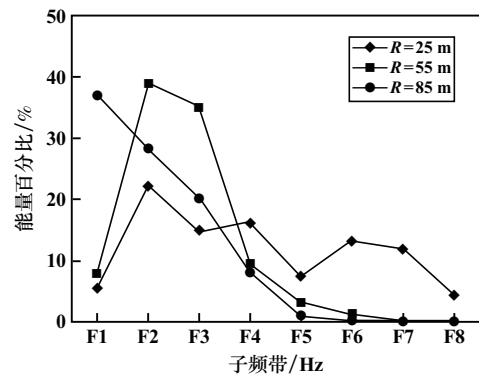


图7 不同爆心距垂向信号各子频带-总能量占比分布

随着爆心距增大,信号高频能量衰减得更快且向低频转移,F5~F8(120~240 Hz)段高频能量在 $R=55$ m处已几乎衰减至0,此时F2和F3段(30~60 Hz)是信号主要能量集中区域,而F1段能量占比相较 $R=25$ m处也有所提高;占据主要能量的F2和F3段(30~60 Hz)随着距离增大衰减更快, $R=85$ m时,信号F1段高频能量向低频转移占据了信号绝大多数能量。

3.4 最大段药量对信号频带-能量分布的影响

筛选出不同批次爆破监测点和爆破点的3组垂直

信号,通过 EEMD-Hilbert 时频转换得到信号频带-能量分布情况如图 8 所示。每组信号总药量大致相同,测试距离为 80 m,总药量分别为 960 kg、1 162 kg 和 1 032 kg,单段最大药量分别为 32 kg、64 kg 和 40 kg。

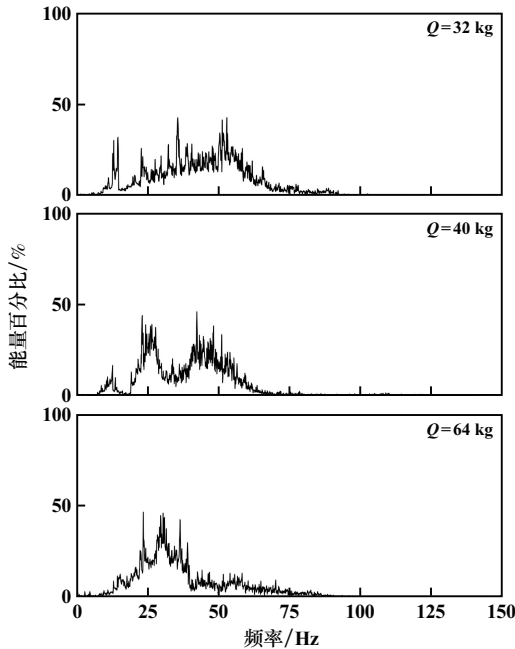


图 8 爆心距 80 m 时不同最大段药量垂向信号频带-能量分布

为进一步准确分析信号频带-能量分布情况,依据信号频域特性,采用局部划分频带的方法将上述 3 组信号分别划分为 7 个子频带,得出各子频带-总能量占比分布情况如图 9 所示。

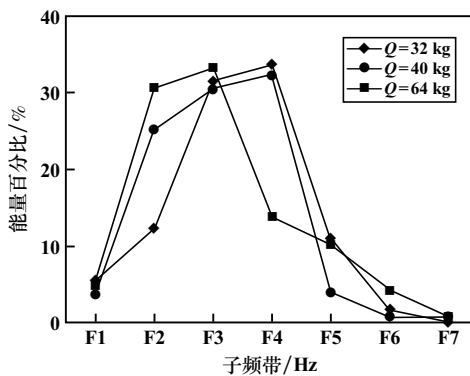


图 9 不同最大段药量垂向信号各子频带-总能量占比分布

由图 8~9 可知,在爆破源和监测地点接近、爆心距 80 m 时,不同批次爆破监测信号频域的能量分布特性整体上存在一定相似性,3 段信号频域能量基本集中于 100 Hz 以内,在 F2、F3 和 F4 频段内存在能量集中区域。不同的是, $Q=32$ kg 和 $Q=64$ kg 时,信号在频段 F3 和 F4 内更加接近,相比而言, $Q=40$ kg 时信号 F4 频段能量占比偏低,而 F2 低频段范围内能量显著

提高,且低频段 F2 内 3 段信号能量占比随着单段最大药量增加呈增加现象,这表明单段最大药量对低频段能量占比有一定促进作用。

4 结 论

1) 通过 EEMD-Hilbert 方法,能将爆破振动信号分解成各子频带信号,通过考察各子频带来分析原始信号不同频率成分所包含的特点,可以得到监测爆破振动信号的频带-能量分布情况。

2) 对比分析了同一测点不同方向信号频带-能量分布特性,垂向信号能量主要集中在中频带,水平径向信号能量在中、低频带均有分布,水平切向信号能量主要集中在高频带。

3) 对比分析了同组爆破下同一直线、不同爆心距信号频带-能量分布特性,爆心距较小时,信号频域能量分布较为分散,出现局部聚集的现象;爆心距较大时,信号频域能量分布较为集中于低频范围内。随着爆心距增大,信号能量分布占比出现从高频向低频转移的趋势。

4) 对比分析了爆破源和监测地点接近、爆心距相等信号频带-能量分布特性,表明在爆心距相等的情况下,增加单段最大药量会一定程度上促进信号低频能量占比增加,尤其是在单段最大药量显著增大时,影响更加明显。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WU Z, HUANG N E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):1-41.
- [3] 王海龙,柏皓博,王晟华. 基于 FDM 的爆破振动信号时频分析[J]. 爆破, 2021,38(3):143-151.
- [4] 杨仁树,付晓强,杨国梁,等. EMD 和 FSWT 组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.
- [5] 卢文波,张乐,周俊汝,等. 爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析[J]. 爆破, 2013,30(2):1-6.
- [6] 中国生,敖丽萍,赵奎. 基于小波包能量谱爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009,29(3):300-305.
- [7] 邓红卫,申一鹏. 基于变分模态分解和粒子群算法的微震信号降噪方法[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):7-10.
- [8] 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.
- [9] 陈冠,李启月,李易. 爆破振动主振频带随传播距离的变化规律研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(2):15-19.
- [10] 吴从师,徐荣文,张庆彬. 自由面对爆破振动信号能量分布特征的影响[J]. 爆炸与冲击, 2017,37(6):907-914.
- [11] 汪万红,冷振东,卢文波,等. 临空面数量对爆破振动特征的影响研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(6):17-22.

引用本文:任艳民,龙运杰,唐虹靖,等. 基于 EEMD-Hilbert 变换的爆破振动信号频带-能量分布特征研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):35-39.