

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.003

## 基于 CEEMDAN-INHT 的地下洞室 爆破振动时频分析应用研究\*

孙苗<sup>1,2a</sup>, 吴立<sup>2a,2b</sup>, 杨钧凯<sup>3</sup>

- (1. 湖北国土资源职业学院 环境与工程学院, 武汉 430090;  
2. 中国地质大学(武汉) a. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心; b. 工程学院, 武汉 430074;  
3. 武汉华中科大建筑规划设计研究院有限公司, 武汉 430070)

**摘要:** 爆破地震波信号采集会因监测环境、测试系统等因素导致实测信号中混有噪声, 噪声的存在将导致信号希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)时频分析结果失真。原因有二: 其一是经验模态分解(Ensemble Empirical Mode, EMD)处理含噪爆破地震波信号会得到具有模态混淆现象的固有模态函数(Intrinsic mode function, IMF)分量; 其二是 Hilbert 变换受 Bedrosian 定理的约束在处理模态混淆分量时会产生负值瞬时频率, 从而造成巨大的分析误差。为获得真实的爆破振动属性需对 HHT 进行改进, 在 EMD 中添加自适应噪声信号得到自适应补充集经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)算法; 再对 CEEMDAN 得到的 IMF 进行归一化 Hilbert 变换, 得到改进归一化 Hilbert 变换(Improved Normalized Hilbert Transform, INHT)。通过上述两步可建立 CEEMDAN-INHT 时频分析算法, 为验证该算法可有效提高含噪爆破地震波振动信号时频分析精度, 进行 HHT 和 CEEMDAN-INHT 含噪仿真振动信号时频分析对比研究。最后将 CEEMDAN-INHT 用于某地下洞室爆破地震波信号时频分析中, 发现该算法能有效克服 EMD 固有的模态混淆现象, 同时得到反映真实爆破振动属性的时-频-能特征参数, 对从频率-能量的角度进行洞室爆破开挖共振分析, 实现爆破地震波危害控制具有一定的现实意义。

**关键词:** 爆破地震波信号; 经验模态分解; Hilbert 变换; 固有模态函数

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)01-0014-07

## Application of Time-frequency Analysis of Blasting Vibration of Underground Cavern based on CEEMDAN-INHT

SUN Miao<sup>1,2a</sup>, WU Li<sup>2a,2b</sup>, YANG Jun-kai<sup>3</sup>

- (1. College of Environment and Engineering, Hubei Land Resources Vocational College, Wuhan 430090, China; 2. a. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education; b. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Huazhong University of Science and Technology Architectural Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

收稿日期(Date of reception): 2022-06-29

网络首发日期(Published online): 2022-11-10

作者简介: 孙苗(1993-), 女, 讲师, 主要从事改进 HHT 算法爆破地震波信号处理, (E-mail) 2357152544@qq.com.

通讯作者: 吴立(1963-), 男, 教授、博士生导师, 主要研究岩土与爆破工程, (E-mail) lwu@cug.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金(41672260); 岩土钻掘与教育部工程研究中心(202215); 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022602)

**About the author:** SUN Miao(1993-), female, lecturer, mainly engaged in improved HHT algorithm for processing blasting seismic wave signals, (E-mail) 2357152544@qq.com.

**Corresponding author:** WU Li(1963-), male, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in researching geotechnical and blasting engineering, (E-mail) lwu@cug.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China(41672260); Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education(202215); Hubei Provincial Department of Education Science Research Program Guidance Project(B2022602)

**Abstract:** The seismic wave signal acquisition will result in the mixed noise in the measured signal due to the monitoring environment, test system and other factors, and the existence of noise will lead to the distortion of the time-frequency analysis results of the signal Hilbert-Huang Transform. There are two reasons. One is that the empirical mode decomposition(EMD) algorithm will obtain the intrinsic mode function(IMF) component with modal confusion phenomenon when processing the blasting seismic wave signal containing noise; The other reason is that because the Hilbert transform is constrained by the Bedrosian theorem, which will produce negative instantaneous frequencies when dealing with modal confusion components. These lead to huge analytical errors. In order to obtain real blasting vibration properties, HHT should be improved. Complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) can be obtained by adding adaptive noise signal to EMD. Then normalized Hilbert transform is performed on the IMF obtained by CEEMDAN, and an improved normalized Hilbert transform (INHT) is obtained. Through the above two steps, the CEEMDAN-INHT time-frequency analysis algorithm can be established. In order to verify that the algorithm can effectively improve the time-frequency analysis accuracy of the noise-containing blasting seismic wave vibration signal, a comparative study on the time-frequency analysis of the HHT and CEEMDAN-INHT noise-containing simulated vibration signals is carried out. Finally, CEEMDAN-INHT is used in the time-frequency analysis of blasting seismic wave signals in an underground cavern, and it is found that the algorithm can effectively overcome the inherent mode confusion of EMD, and at the same time obtain the time-frequency-energy characteristic parameters reflecting the real blasting vibration attributes. It is of practical significance to carry out resonance analysis of blasting excavation in caverns from the perspective of frequency and energy, and to realize blasting seismic wave hazard control.

**Key words:** blasting seismic wave signal; empirical mode decomposition; hilbert transform; intrinsic mode function

目前爆破地震波研究领域普遍采用控制爆破峰值振动速度作为控制爆破危害的依据,但除振动速度以外,爆破振动持续时间、爆破振动频率、爆破振动释放能量<sup>[1,2]</sup>,爆源信息以及被保护建(构)筑物结构类型等因素也会对被保护建(构)筑物危害控制产生不可忽略的影响<sup>[3,4]</sup>。

希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)<sup>[5]</sup>是目前应用最广泛的爆破地震波信号时频分析工具,其能建立爆破地震波信号时间-频率-能量之间的对应关系,为爆破振动控制提供分析依据。但由于爆破地震波监测信号多为含噪信号,噪声的混入使得经验模态分解(Ensemble Empirical Mode, EMD)<sup>[6]</sup>产生严重的模态混淆<sup>[7-10]</sup>,而Hilbert变换处理此类分量会得到负值瞬时频率,从而导致实测爆破地震波信号的时频特征难以识别<sup>[11-14]</sup>。

鉴于此对EMD进行改进得到自适应补充集合经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)<sup>[15]</sup>用于抑制由噪声引起的EMD模态混淆现象,再对CEEMDAN得到IMF进行改进归一化Hilbert变换(Improved Normalized Hilbert Transform, INHT)<sup>[12,16]</sup>,解除Bedrosian定理的约束。最终建立了CEEMDAN-INHT时频分析模型,首先通过混有噪声的仿真信号验证该算法不仅可有效抑制EMD

固有的模态混淆现象,同时得到具有实际物理意义的瞬时频率。再将该算法用于某洞室爆破地震波信号时频分析中,发现该算法可有效提取爆破地震波信号时频特征参数,实现爆破地震波危害识别,对爆破地震波危害控制具有一定的指导作用。

## 1 CEEMDAN-INHT 时频分析模型

### 1.1 CEEMDAN 算法

CEEMDAN在分解的每个阶段添加有限次的自适应白噪声<sup>[17-19]</sup>,能实现在较少的平均次数下,重构误差几乎为零。具体步骤如下:

第一步:在待分析信号 $S(t)$ 中添加自适应性白噪声 $B^i(t)$ , $i$ 表示添加噪声次数,本文取50次。则第 $i$ 次的信号可表示为 $S(t) = S(t) + \alpha_i B^i(t)$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 50$ ),其中 $\alpha_i$ 为第 $i$ 次添加白噪声的标准差,CEEMDAN一阶分量见式(1)。

$$IMF_1 = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} IMF_{1i} \quad (1)$$

第二步:构造新的待分解信号 $S(t) = S(t) + \alpha_i B^i(t)$ ,得到 $IMF_2$ 。

第三步:重复“第一步”和“第二步”,直到程序终止,共产生了 $c$ 个IMF,最终余项见式(2)。

$$R = S(t) - \sum_{i=1}^c IMF_i \quad (2)$$

## 1.2 INHT 算法

对传 Hilbert 变换进行改进归一化处理<sup>[12,16]</sup>,具体操作如下。

第一步:对 CEEMDAN 得到的 IMF 取绝对值,找出  $|IMFi|$  中的所有极大值。

第二步:求  $|IMFi|$  极大值点的样条包络线,记作  $x(t)$ 。

第三步:归一化处理,记  $|IMF_1|$  中的所有极大值点的样条包络为  $x_1(t)$ ,计算  $f_1(t) = IMF_1/x_1(t)$ 。

第四步:若所有的  $|f_1(t)|$  满足  $|f_1(t)| \leq 1$ ,则停止。反之对  $IMF_1$  重新赋值,即  $IMF_1 = f_1(t)$ ,重复“第二步”,得到  $|f_1(t)|$  中的所有极大值点的样条包络线为  $x_2(t)$ ,重复“第三步”得到  $f_2(t) = f_1(t)/x_2(t)$ ,检验  $|f_2(t)|$  是否满足  $|f_2(t)| \leq 1$ ,详见式(3),其中  $j-1$  为重复的次数,一般运行 2~3 次即可满足需求。

$$\begin{cases} f_1(t) = IMF_1/x_1(t) \\ f_2(t) = f_1(t)/x_2(t) \\ f_3(t) = f_2(t)/x_3(t) \\ \vdots \\ f_j(t) = f_{j-1}(t)/x_j(t) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $f_j(t)$  的为  $IMF_1$  的调频部分,其调幅部分  $w_j(t)$  可用式(4)表示。

$$w_j(t) = x_1(t) \cdot x_2(t) \cdot \dots \cdot x_j(t) \quad (4)$$

因此归一化的  $IMF_1$  可用式(5)表示,不难发现归一化本质是将 IMF 的调频和调幅分量分离。

$$IMF_1 = f_j(t) \cdot w_j(t) \quad (5)$$

第五步:对  $IMF_1$  的调频部分  $f_j(t)$  进行 Hilbert 变换,见式(6)。

$$Hilbert[f_j(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f_j(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

上述操作可实现 INHT。对式(6)得到的时频谱对时间求积分得到信号的边际谱<sup>[5,6]</sup>,式(7)为边际谱计算式。边际谱是每个频率在全局上的幅度,代表统计意义上的全部累加幅度。

$$H(\omega) = \int_0^T Hilbert[IMF(t)] dt \quad (7)$$

对式(7)中的  $H(\omega)$  平方后,再对频率进行积分,可得到 Hilbert 瞬时能量<sup>[5,6]</sup>,见式(8)。

$$IE(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} H(\omega) d\omega \quad (8)$$

## 2 仿真信号 CEEMDAN-INHT 时频分析

构建仿真信号为混有白噪声的信号,仿真信号  $S(t) = x_1(t) + x_2(t)$ ,  $x_1(t) = wgn(1, N, 0.1)$ ,即功率为 0.1 的噪声信号,如图 1 所示;  $x_2(t) = \sin(2 \times$

$\pi \times 75 \times t)$ ,即频率为 75 Hz 的正弦信号,如图 2 所示;仿真信号如图 3 所示。采样点数  $N = 1024$ ,采样时间  $t = 1/N:1/N:1$ 。

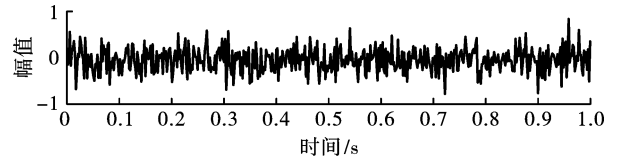


图 1 功率为 0.1 的噪声信号图

Fig. 1 Noise signal diagram with power of 0.1

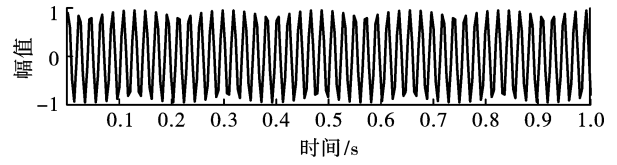


图 2 频率为 75 Hz 的正弦信号图

Fig. 2 Sine signal diagram with frequency of 75 Hz

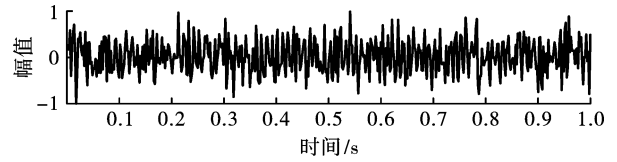


图 3 仿真信号波形图

Fig. 3 Waveform of simulation signal

为验证 CEEMDAN-INHT 算法含噪爆破地震波信号时频分析的准确性,进行 EMD-HT 和 CEEMDAN-INHT 仿真爆破振动信号时频分析,得到的变换结果即时频谱分别见图 4 和图 5。

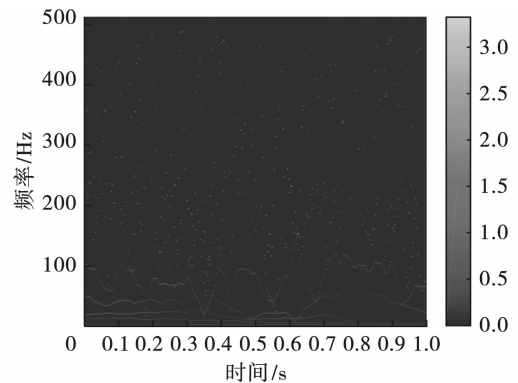


图 4 EMD-HT 得到的仿真信号时频谱图

Fig. 4 Time spectrum diagram of simulation signal obtained by EMD-HT

图 4 为 EMD-HT 时频谱,可发现时频谱出现了 75 Hz 以上的虚假分量,该分量较发散,难以识别,时频谱在时间和频率这两个维度的分辨率都不高。图 5 为 CEEMDAN-INHT 得到的时频谱图,该时频谱在时间和频率维度均具有较高分辨率,未见高频或

低频模态混淆。说明 CEEMDAN 得到的 IMF 经过 INHT 能够得到具有实际物理意义的时频信息,即 CEEMDAN-INHT 时频分析算法不仅可有效抑制噪声信号引起的 EMD 模态混淆,同时得到时频分辨率双高的信号频谱图。

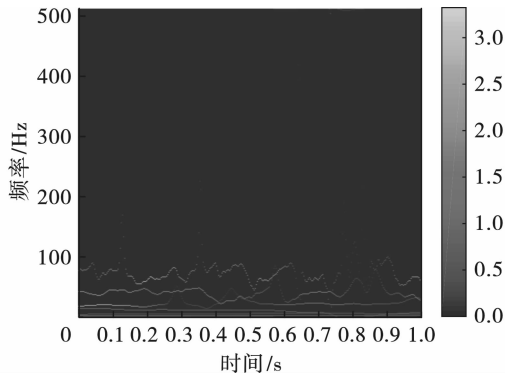


图5 CEEMDAN-INHT 得到的仿真信号时频谱图  
Fig. 5 Time spectrum diagram of simulation signal obtained by CEEMDAN-INHT

### 3 工程概况

以烟台某地下洞室爆破开挖工程为背景,该工程为地下水封 LPG 洞室爆破开挖工程,包含 3 条主洞室,3 条主洞室沿着东西向并排布置,主洞室间通过支洞室相通。工程场地较平坦,库容埋深 123 ~ 127 m,库容净距仅 36 m。由于围岩夹持力强,开挖爆破干扰大,施工中会出现安全问题。

由于实际爆破施工时主洞室之间库容净距仅 36 m,邻近洞室爆破开挖对既有洞室的影响需要重点关注。为分析洞室开挖爆破时频特征,研究邻近洞室爆破相互作用以及爆破地震波能量特性。选用 TC-4850 智能爆破测振仪进行现场监测,一共布置了图 6 中所示的 9 个监测点。选取中间主洞室监测点中一条典型爆破振动信号作为研究对象,研究中间主洞室爆破开挖是否会引起已经开挖形成的北部以及南部主洞室共振。现场得到的实测典型爆破地震波监测信号三个方向分量信号如图 7 ~ 图 9 所示。

观察图 7 ~ 图 9 可发现本次爆破地震波监测信号采样区间为 0 ~ 1.9 s,共包括 9601 个采样点。

### 4 CEEMDAN-INHT 邻近洞室爆破振动时频分析

对图 7 中的径向地震波信号进行 CEEMDAN,得到 6 个 IMF 和一个余项  $R$ ,详见图 10。从图 10 可知,CEEMDAN 得到的 IMF 从高频到低频依次排列,每个 IMF 分量都比较稳定。其中  $IMF_1 \sim IMF_4$  是本

次分解的中高频分量,也是爆破地震波能量的聚集分量,爆破危害也蕴含在这些分量中,在进行爆破振动分析时,应该重点关注  $IMF_1 \sim IMF_4$  所蕴含的时间-频率-能量关系; $IMF_5 \sim IMF_6$  是本次分解的低频分量,所蕴含的能量也很小,是分解的次要分量; $R$  是余项也是趋势项,在进行 NHT 时,不考虑余项分量  $R$ 。

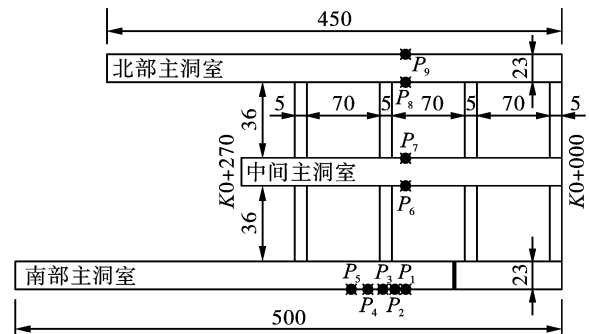


图6 地下洞室监测点布置(单位:m)  
Fig. 6 The plan of underground water-sealed LPG caverns with monitoring points(unit:m)

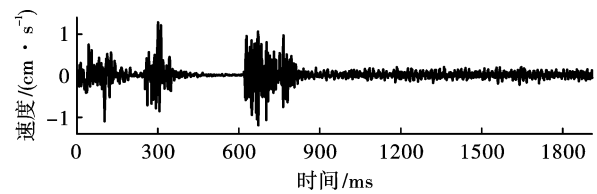


图7 径向地震波信号图  
Fig. 7 Radial seismic wave signal diagram

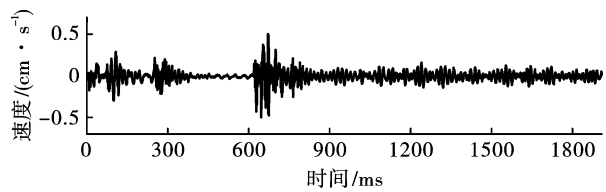


图8 纵向地震波信号图  
Fig. 8 Longitudinal seismic wave signal diagram

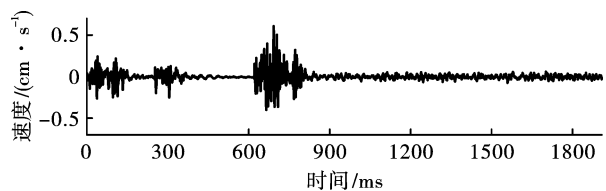


图9 垂向地震波信号图  
Fig. 9 Vertical seismic wave signal diagram

为突出 CEEMDAN 算法得到的 IMF 物理意义更明晰,且其分解结果能有效控制 EMD 模态混淆,特对图 7 径向地震波信号进行 EMD,得到图 11 所示结果。可发现, $IMF_1$  高频、低幅值、低能量具有噪声信号的典型特征,可将其归为未能除去在监测中混入的噪声; $IMF_2 \sim IMF_5$  是重点频带,其中  $IMF_3$  在

1200 ms 附近出现了中高频模态混淆,  $IMF_4$  在 300 ms 附近有向低频发展的趋势,  $IMF_5$  相对稳定;  $IMF_6$  和  $IMF_7$  是低频分量, 占有的能量比较低,  $IMF_6$  在 400 ~ 500 ms 附近有向低频发展的趋势,  $IMF_7$  相对稳定。

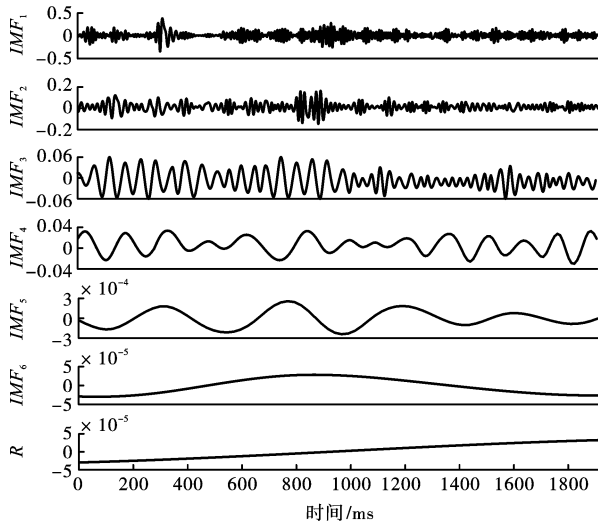


图 10 径向地震波监测信号 CEEMDAN 得到的 IMF  
Fig. 10 IMF obtained by CEEMDAN of radial seismic wave monitoring signal

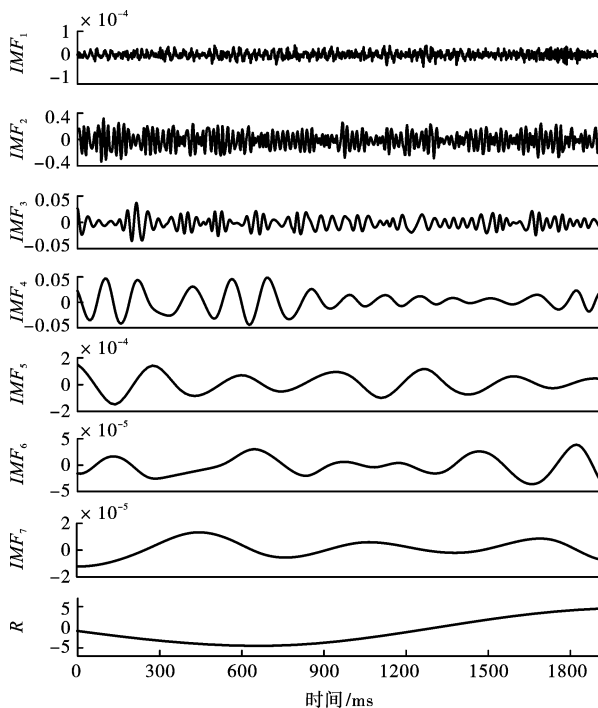


图 11 径向地震波监测信号 EMD 得到的 IMF  
Fig. 11 IMF obtained by EMD of radial seismic wave monitoring signal

对比图 10 和图 11 可得下列结论, CEEMDAN 对噪声引起的模态混淆具有很好的抑制作用, 可提高 IMF 的分解精度, 得到物理意义更清晰的 IMF。该分

析结果和仿真爆破振动信号时频分析结果一致。

进一步分析, 对图 10 得到的 IMF 进行 INHT, 再计算单个 IMF 边际谱, 得到如图 12 所示单个 IMF 的边际谱。

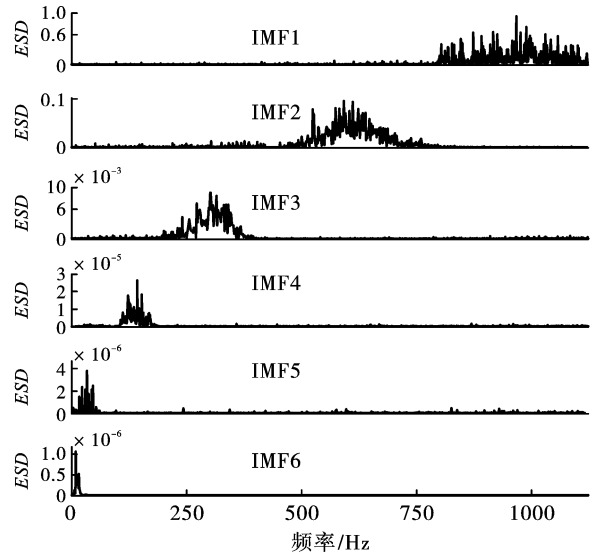


图 12 IMF 边际谱  
Fig. 12 IMF marginal spectrum

图 12 中纵坐标 ESD (Energy spectral density), 指的能量谱密度。从图 12 可以发现爆破能量主要集中在  $IMF_1 \sim IMF_4$ , 即集中在频率在 100 Hz 以上的频段。从  $IMF_4$  到  $IMF_5$  可以发现其纵坐标幅值能量谱密度数量级降低了 1000 倍, 说明了低频占有的能量十分少, 其占总能量的比例也十分小。

研究表明地下洞室自振频率在 10 ~ 40 Hz 左右<sup>[20]</sup>, 中间主洞室爆破开挖是否会引起北部以及南部主洞室共振, 需要重点关注爆破地震波在 0 ~ 100 Hz 的能量分布情况。为便于定量描述各频段携带能量的大小, 设置 > 800 Hz、400 ~ 800 Hz、200 ~ 400 Hz、100 ~ 200 Hz、0 ~ 100 Hz 共 5 个频段, 分别在这 5 个频段范围内对频率进行积分, 并将计算结果列于表 1 中。

同理, 图 8 和图 9 中纵向、垂向地震波信号各频段瞬时能量占比也可以通过相同的方法得出, 计算结果也列于表 1 中。

观察表 1 可发现, 地下洞室爆破三个方向的地震波监测信号呈现出明显的能量规律, 径向地震波信号能量最大, 垂向地震波信号次之, 纵向地震波信号最小。同时表 1 展示了中间主洞室爆破地震波监测信号三个方向分信号各频段能量占比, 为了方便统计, 对纵向、垂向地震波信号采取和径向地震波信号一致的频段划分。

表1 典型地震波信号各频带能量值

Table 1 Energy values of typical seismic wave signals in each frequency band

频带		0 ~ 100 Hz	100 ~ 200 Hz	200 ~ 400 Hz	400 ~ 800 Hz	> 800 Hz
能量大小	径向	$0.291 \times 10^{-4}$	$0.235 \times 10^{-3}$	$0.682 \times 10^{-3}$	$0.973 \times 10^{-3}$	$2.351 \times 10^{-3}$
	纵向	$0.527 \times 10^{-5}$	$0.314 \times 10^{-4}$	$0.414 \times 10^{-4}$	$1.863 \times 10^{-4}$	$4.418 \times 10^{-4}$
	垂向	$0.536 \times 10^{-5}$	$0.367 \times 10^{-4}$	$0.549 \times 10^{-4}$	$1.926 \times 10^{-4}$	$5.156 \times 10^{-4}$
各频带能量汇总		$3.973 \times 10^{-5}$	$3.031 \times 10^{-4}$	$7.783 \times 10^{-4}$	$1.288 \times 10^{-3}$	$3.308 \times 10^{-3}$
占总能量比率		0.695%	5.302%	13.613%	22.529%	57.861%

通过表1可以发现本次爆破地震波监测信号主要能量都集中在100 Hz以上,该结果和边际谱得到的结果一致。其中大于800 Hz所占能量比例最大,占总能量的57.861%;其次是在400~800 Hz频段,该频段能量占总能量的比例为22.529%;100 Hz以下的能量占比很小仅占总能量的0.695%。而地下洞室自振频率在10~40 Hz左右,根据表1可知该频段能量占比极低,可初步判断中间主洞室爆破开挖不会引起邻近洞室的共振。

综上所述,该工程主洞室测得的爆破地震波监测信号不会引起北部以及南部主洞室共振,因此在做地震波安全评估时,可以不考虑频率对既有洞室的影响,或者将此项作为次重点项考虑。不难发现CEEMDAN-NHT算法可进行爆破地震波信号时频分析,得到的IMF具有清晰的模态分布;进一步对CEEMDAN得到的IMF进行NHT可得到具有实际物理意义的时频能量参数,实现从频率-能量角度进行地下洞室爆破是否引起邻近既有洞室共振判断分析,有助于爆破地震波危害分析。

## 5 结论

(1) CEEMDAN-INHT时频分析算法将CEEMDAN对噪声的抑制能力和INHT对调频分量的处理能力相结合,通过仿真爆破振动信号和实测信号时频分析检验该算法在提高爆破地震波信号时频分析精度方面具有很好的效果。

(2) CEEMDAN-INHT时频分析算法,可清晰展示爆破地震波信号所蕴含的时间-频率-能量三者之间的对应关系,该对应关系对识别爆破振动特征、判断爆破是否引发既有洞室共振具有重要的研究价值。

(3) 洞室爆破能量分布和频率变化具有一定的对应性,主要能量集中在100 Hz以上频段,高频能量占比高于低频能量占比。本爆破工程具体能量分布情况是800 Hz以上所占能量比例最大,占总能量

的57.861%;其次是400~800 Hz频段,占总能量的22.529%;100 Hz以下的能量占比很小仅占总能量的0.695%。

## 参考文献 (References)

- [1] 彭亚雄. 水下钻孔爆破地震波与水击波协同作用下桥墩动力响应特征研究[D]. 武汉:中国地质大学,2018.
- [2] PENG Ya-xiong. Study on the dynamic responses of bridge piers under the synergistic effects of seismic wave and water shock wave induced by the underwater drilling and blasting[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [2] 陈吉辉,仇文革,赵旭伟,等. 基于小波包技术地铁隧道分区爆破振动特性研究[J]. 振动与冲击,2022, 41(6):222-228,255.
- [2] CHEN Ji-hui, QIU Wen-ge, ZHAO Xu-wei, et al. Vibration characteristics analysis of the metro tunnel subarea blasting based on wavelet packet technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 222-228, 255. (in Chinese)
- [3] 马晨阳. 水下钻孔爆破作用下库岸边坡动力响应特征及稳定性评价[D]. 武汉:中国地质大学,2021.
- [3] MA Chen-yang. Study on dynamic response characteristics and stability of bankside slope under the action of underwater drilling and blasting[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2021. (in Chinese)
- [4] 周玉纯. 地下水封油库开挖爆破围岩损伤及邻近洞室动力响应特征研究[D]. 武汉:中国地质大学武汉,2019.
- [4] ZHOU Yu-chun. Study on damage of surrounding rock and dynamic response characteristics of adjacent caverns under excavation blasting in underground water-sealed oil storage caverns[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2019. (in Chinese)
- [5] 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 A, 1998, 454(3):903-995.

- [6] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [7] 刘 涛, 杜世昌, 黄德林, 等. 基于改进的集合经验模态方法振动信号分解 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(9): 1452-1459.
- [7] LIU Tao, DU Shi-chang, HUANG De-lin, et al. Vibration signal decomposition based on an improved ensemble empirical mode decomposition method [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(9): 1452-1459. (in Chinese)
- [8] SUN M, WU L, LI C J, et al. Smooth model of blasting seismic wave signal denoising based on two-stage denoising algorithm [J]. *Geosystem Engineering*, 2020, 23(4): 234-242.
- [9] 付晓强, 俞 缙, 崔秀琴, 等. 爆破振动信号 3 种经验模态分解差异性研究 [J]. *工程爆破*, 2021, 27(3): 21-28.
- [9] FU Xiao-qiang, YU Jin, CU Xiu-qin, et al. Study on difference of three empirical mode decompositions of blasting vibration signal [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(3): 21-28. (in Chinese)
- [10] 徐 波, 黎会鹏, 周凤星, 等. 基于自适应 CEEMD 的非平稳信号分析方法 [J]. *振动. 测试与诊断*, 2020, 40(1): 54-61, 203.
- [10] XU Bo, LI Hui-peng, ZHOU Feng-xing, et al. Non-stationary signal analysis method based on adaptive CEEMD [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(1): 54-61, 203. (in Chinese)
- [11] 梁 岳. HHT 算法改进及其在储层预测中的应用研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- [11] LIANG Yue. An improved Hilbert-Huang transform and its application in reservoir prediction [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese)
- [12] WU J, WU L, SUN M, et al. Analysis and research on blasting network delay of deep-buried diversion tunnel crossing fault zone based on EP-CEEMDAN-INHT [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, DOI: 10.1007/s10706-021-01968-9.
- [13] MA C Y, WU L, SUN M, et al. Time-frequency analysis and application of a vibration signal of tunnel excavation blasting based on CEEMD-MPE-HT [J]. *Shock and Vibration*, 2021.
- [14] WU J, WU L, SUN M, et al. Application of boundary local feature scale adaptive matching extension EMD endpoint effect suppression method in blasting seismic wave signal processing [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021(5): 1-9.
- [15] MAR A E Torres, MARCELO A Colominas, GAST N Schlotthauer, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2011, May 22-27, 2011, Prague Congress Center, Prague, Czech Republic*. IEEE, 2011: 4143-4147.
- [16] HUANG N E, WU Z, LONG S R, et al. On instantaneous frequency [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(2): 177-229.
- [17] 王海龙, 李 帅, 赵 岩, 等. CEEMDAN-小波包联合降噪的优化方法 [J]. *爆破器材*, 2021, 50(4): 48-53.
- [17] WANG Hai-long, LI Shuai, ZHAO Yan, et al. Optimization method of CEEMDAN-Wavelet packet joint noise reduction [J]. *Explosive Materials*, 2021, 50(4): 48-53. (in Chinese)
- [18] 郑近德, 苏缪涎, 潘海洋, 等. 自适应噪声加权优选经验模态分解及其在机械故障诊断中的应用 [J]. *振动工程学报*, 2021, 34(4): 869-878.
- [18] ZHENG Jin-de, SU Miao-xian, PAN Hai-yang, et al. Weighted mean-optimized empirical mode decomposition with adaptive noise and its applications in mechanical fault diagnosis [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(4): 869-878. (in Chinese)
- [19] 蒋玲莉, 谭鸿创, 李学军, 等. 基于 CEEMDAN 排列熵与 SVM 的螺旋锥齿轮故障识别 [J]. *振动. 测试与诊断*, 2021, 41(1): 33-40, 198-199.
- [19] JIANG Ling-li, TAN Hong-chuang, LI Xue-jun, et al. Fault diagnosis of spiral bevel gear based on CEEMDAN permutation entropy and SVM [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(1): 33-40, 198-199. (in Chinese)
- [20] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [20] LI Hong-cao. Study on effect of blast-induced seismic based on energy theory [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese)