

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.024

基于 CEEMDAN · MPE-NHT 的 爆破地震波信号时频分析*

孙苗^{1,2a}, 吴静^{2a,3}, 吴立^{2b}, 杨钧凯¹, 覃亚男¹

(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. 湖北工程学院 土木工程学院, 孝感 432000)

摘要: 针对希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)处理混有噪声的爆破地震波信号时,会出现时频分析失真的现象,对影响HHT时频分析精度的因素进行逐一改进,得到改进后的算法来提高含噪爆破地震波信号时频分析精度。首先对经验模态分解(Ensemble Empirical Mode, 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)抑制低频趋势项,同时添加多尺度排列熵(Multiscale Permutation Entropy, MPE)代码控制高频噪声,最后对CEEMDAN · MPE得到的IMF进行归一化Hilbert变换(Normalized Hilbert Transform, NHT),通过上述三步即可改善传统HHT含噪爆破地震波信号时频分析精度不足的问题。为验证CEEMDAN · MPE-NHT算法时频分析的准确性,进行HHT和CEEMDAN · MPE-NHT算法的含噪仿真信号时频分析对比研究,并将CEEMDAN · MPE-NHT算法用于水下钻孔爆破地震波信号时频分析中。研究表明:CEEMDAN · MPE分解得到的IMF经NHT处理得到的时频谱在时域和频域上均具有较高的分辨率,得到的时频分析参数精度相比HHT有了很大的提升,可实现更准确提取含噪爆破地震波信号时频特征参数,对爆破地震波危害效应识别,制定科学的爆破地震波危害效应控制措施具有重要的现实意义。

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(2023)04-0183-09

Time-frequency Analysis of Blasting Seismic Signals based on CEEMDAN · MPE-NHT

SUN Miao^{1,2a}, WU Jing^{2a,3}, WU Li^{2b}, YANG Jun-kai¹, QIN Ya-nan¹

(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. Faculty of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China)

收稿日期(Date of reception): 2022-08-05

网络首发日期(Published online): 2022-11-17

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: 吴静(1985-), 女, 副教授, 主要从事土木工程防灾减灾方面的研究, (E-mail) wujinglalar@163.com。

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, 202208)

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 Jing(1985-), female, associate professor, mainly engaged in research on disaster prevention and reduction in civil engineering, (E-mail) wujinglalar@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China(41672260); Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education(202215, 202208)

Abstract: Distortion phenomenon would occur in time-frequency analysis when Hilbert-Huang Transform (HHT) is used to process the blasting seismic signal mixed with noise. In order to improve the analysis performance for noisy blasting seismic signals, the factors affecting the accuracy of time-frequency analysis of HHT were improved through an improved algorithm. Firstly, the empirical mode decomposition (EMD) was improved by the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) to suppress the low-frequency trend terms. Furthermore, the multiscale permutation entropy (MPE) code was added to control the high-frequency noise. Finally, the normalized Hilbert transform (NHT) was performed on the IMFs obtained by CEEMDAN · MPE. Through the above three steps, the problem of insufficient precision in the time-frequency analysis of noisy blasting seismic signals by the traditional HHT can be improved. In order to verify the accuracy of the CEEMDAN · MPE-NHT algorithm, a comparative study on the HHT and CEEMDAN · MPE-NHT algorithm was carried out, and the CEEMDAN · MPE-NHT algorithm was used for underwater drilling blasting seismic signals. The results show that the time-frequency spectrum of the IMF decomposed by CEEMDAN · MPE and processed by NHT has a greatly improved high resolution compared with HHT in both time and frequency domain. The research results can be used for identifying and controlling the hazards of blasting seismic waves.

Key words: blasting seismic signal; empirical mode decomposition; Hilbert transform; intrinsic mode function

希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 由经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode, EMD)^[1] 和希尔伯特变换 (Hilbert Transform, HT)^[2] 组成, 其中 EMD 以其能识别数据内在属性并根据数据本身特征进行分解在信号分析领域得到了广泛应用^[3]。对 EMD 分解结果进行 Hilbert 变换, 更是实现了将时域信号转变为频域信号, 帮助爆破工程技术人员对爆破地震波信号传播特征、内在属性进行识别, 对爆破地震波危害控制起到了一定的指导作用^[4-6]。

但 EMD 对含有噪声的爆破地震波信号相对敏感, 而实际爆破地震波监测又无法避免噪声信号的混入^[7], 这便造成了实际爆破地震波信号 EMD 得到的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)^[8,9] 存在严重模态混淆^[10-12], 而 Hilbert 变换处理这类 IMF 分量会产生错误的时频分析结果, 这样的结果对爆破地震波危害效应分析意义不大, 有时候甚至会成为阻碍爆破工程技术人员作出判断的干扰项。因此如何对 HHT 处理含噪爆破地震波信号遇到导致分析精度受损的问题进行处理, 是目前爆破地震波危害效应分析亟待解决的问题。

鉴于此, 对影响 EMD-Hilbert 时频分析精度的因素进行逐一改进。对 EMD 进行改进, 使其可降低对噪声的敏感性。具体实现通过两步, 首先在 EMD 中添加自适应白噪声, 得到自适应补充集合经验模态分解 (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)^[13-15], 用于抵抗监测中混入噪声的低频部分; 再者引入多尺度排列熵 (Multiscale Permutation Entropy, MPE)^[16-18] 到 CEEMDAN 中, 充分发挥 MPE 随机性检测能力,

抑制高频噪声对分解精度的影响。以上两步得到的 IMF 可认为是降噪处理后的 IMF, 对 CEEMDAN · MPE 得到的 IMF 进行归一化 Hilbert 变换 (Normalized Hilbert transform, NHT)^[19,20] 使得传统的 Hilbert 变换不受 Bedrosian 定理的约束, 降低负值瞬时频率出现的概率。通过上述三步可实现 HHT 时频分析精度提升。

最后进行含噪仿真爆破振动信号和实测含噪水下钻孔爆破地震波信号 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析算法和 HHT 算法对比研究, 以验证 CEEMDAN · MPE-NHT 算法能有效提高 HHT 时频精度, 得到反映真实爆破振动属性的时频特征参数, 对爆破振动特征识别和制定科学的防护措施具有一定的指导作用。

1 CEEMDAN·MPE-NHT 时频分析算法

CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析算法可分两步构建, 第一步建立 CEEMDAN · MPE 算法, 其后对 CEEMDAN · MPE 算法得到的 IMF 进行 NHT。

CEEMDAN · MPE 算法的核心是通过剔除噪声来抑制 EMD 模态混淆。它将 MPE 的随机性检测功能与 CEEMDAN 的自适应性相结合, 可有效地减少噪声的干扰。有关 CEEMDAN 和 MPE 的详细介绍, 请参阅文献^[13-15] 和^[16-18]。在这里, 仅通过流程图 1 分析 CEEMDAN · MPE 的操作过程。

Hilbert 变换得到具有实际物理意义的瞬时频率通常需满足十分苛刻的要求, 模态混淆的 IMF 分量往往不能满足要求。鉴于此 Huang 等提出 NHT^[20], 以此来提高瞬时频率的计算精度。

NHT 的原始操作是对 IMF 的调频分量进行

Hilbert 变换,IMF 来源是 EMD 或集合经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)。不难发现,本文得到的 IMF 物理意义较 EMD 和 EEMD 得到的 IMF 更加清晰,真实性更高。将文献 [20] 中的 IMF 替换成 CEEMDAN · MPE 得到的 IMF,便是本文的实现途径。进一步分析,得到 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析算法运算流程图,见图 2。

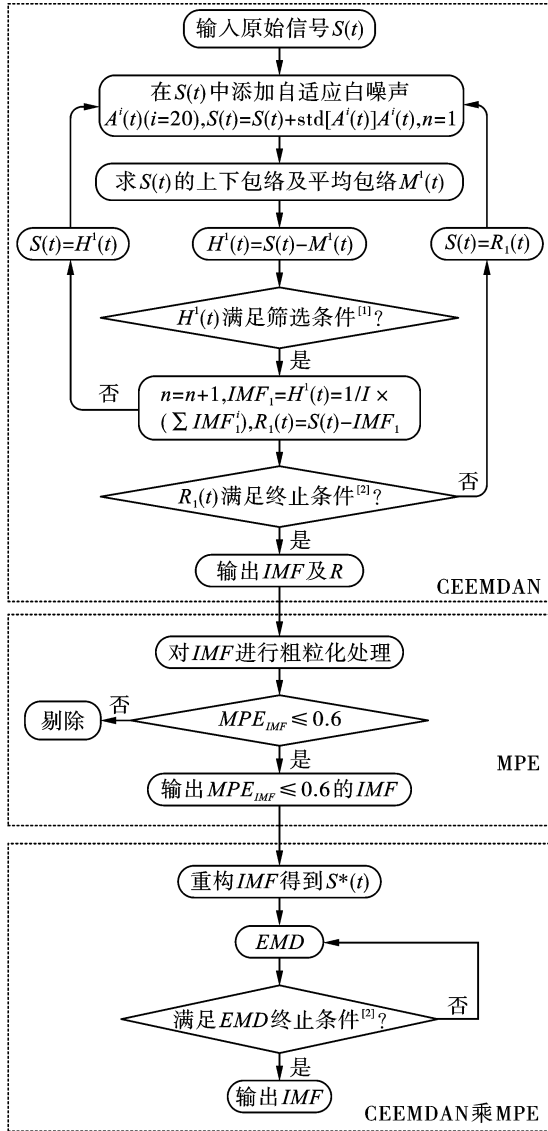


图 1 CEEMDAN · MPE 算法流程图
Fig. 1 CEEMDAN · MPE algorithm flow chart

2 仿真信号 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析

为突出 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析算法相比 HHT 可有效提高含噪爆破地震波信号时频特征参数的提取精度,特进行 CEEMDAN · MPE-NHT 和 HHT 的含噪仿真振动信号时频分析对比研究。

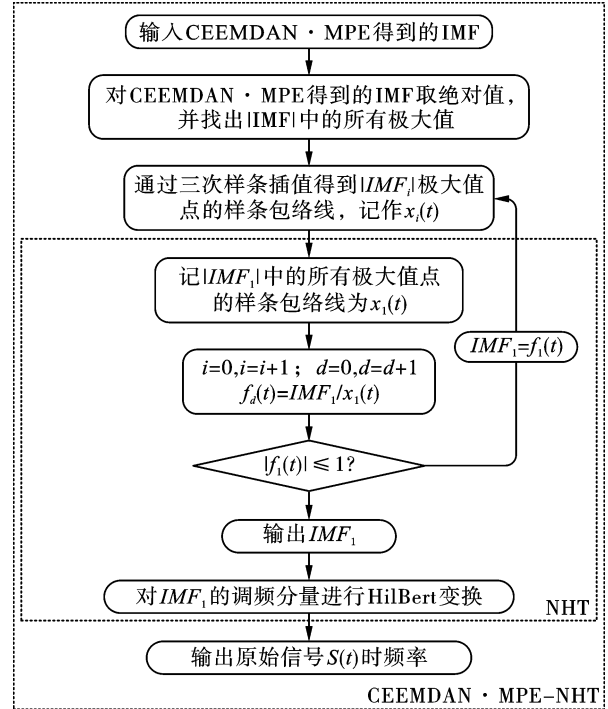


图 2 CEEMDAN · MPE-NHT 算法流程图
Fig. 2 CEEMDAN · MPE-NHT algorithm flow chart

含噪仿真振动信号 $S(t) = x_1(t) + x_2(t)$, 其中 $x_1(t) = wgn(1, N, 0.1)$, 即功率为 0.1 的噪声信号, 如图 3 所示; $x_2(t) = \sin(2 \times \pi \times 100 \times t)$, 即频率为 100 Hz 的正弦信号, 如图 4 所示; 仿真信号如图 5 所示。采样点数 $N = 512$, 采样时间 $t = 1/N:1/N:1$ 。

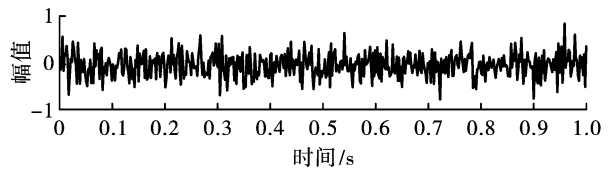


图 3 功率为 0.1 的噪声信号图
Fig. 3 Noise signal with power of 0.1

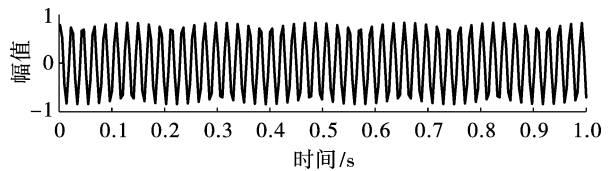


图 4 频率为 100 Hz 的正弦信号图
Fig. 4 Sine signal with frequency of 100 Hz

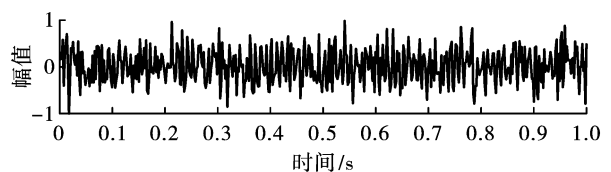


图 5 仿真信号波形图
Fig. 5 Waveform of simulated signal

为突出 CEEMDAN · MPE 对 EMD 模态混淆的抑制作用,分别采用 EMD 和 CEEMDAN · MPE 对 $S(t)$ 进行模态分解。图 6 为 EMD 分解结果,不难发现 IMF_1 是难以除去的噪声信号;高频模态混淆严重,如 IMF_2 在 0.53 s, 0.64 s 及 0.85 s 附近均出现了高频向中频发散的趋势;中频模态混淆有所缓解,如 IMF_3 在 0.41 s 及右端点附近存在向低频发展的趋势;低频相对稳定,如 IMF_5 和 IMF_6 。图 7 为 CEEMDAN · MPE 分解结果,分解得到的 IMF 从高频向低频依次排列,未见明显模态混淆现象,模态显示相比 EMD 结果清晰且稳定。

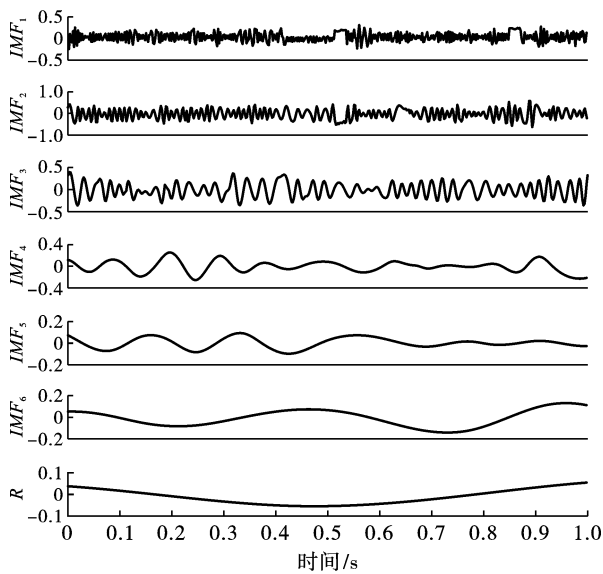


图 6 仿真信号经 EMD 得到的 IMF
Fig. 6 IMFs of simulated signal by EMD

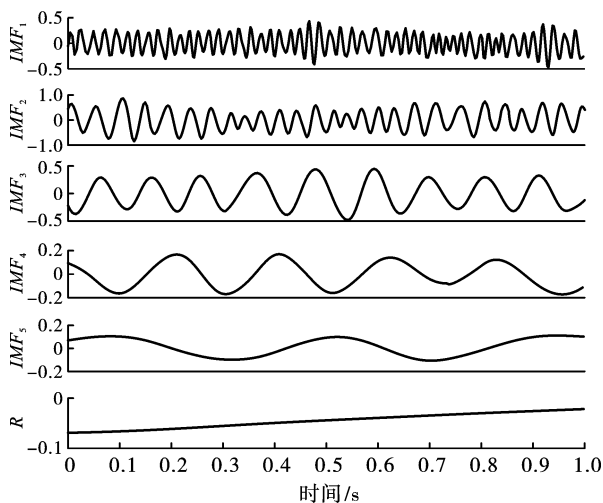


图 7 仿真信号经 CEEMDAN · MPE 得到的 IMF
Fig. 7 IMFs of simulated signal by CEEMDAN · MPE

为突出 NHT 对瞬时频率具备清晰物理意义的贡献,进行 Hilbert 变换和 NHT 对比分析。对 EMD

得到的 IMF 进行 Hilbert 变换,得到的时频谱见图 8。对 CEEMDAN · MPE 得到的 IMF 进行 NHT,得到的时频谱见图 9。

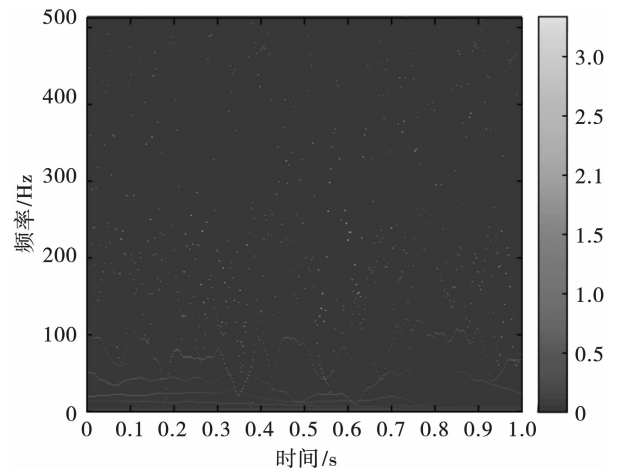


图 8 EMD-HT 得到的仿真信号时频谱图
Fig. 8 Time-frequency spectrum of simulated signal obtained by EMD-HT

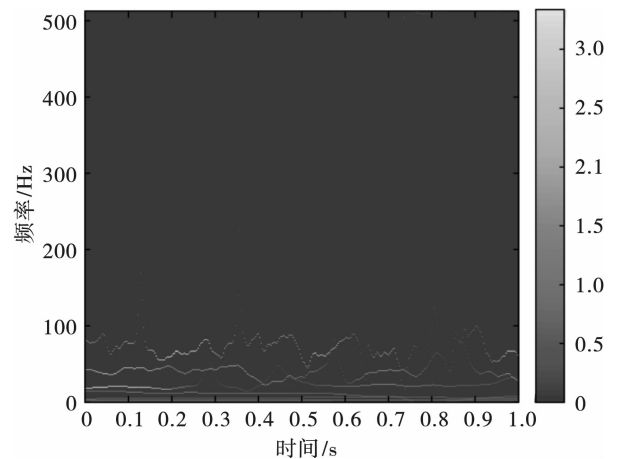


图 9 CEEMDAN · MPE-NHT 得到的仿真信号时频谱图
Fig. 9 Time-frequency spectrum of simulated signal obtained by CEEMDAN · MPE-NHT

图 8 为 EMD-HT 时频谱,模态混淆分量经 Hilbert 变换得到的时频谱分辨率不高,出现了 100 Hz 以上难以识别的虚假分量。图 9 为 CEEMDAN · MPE-NHT 时频谱,该算法通过 CEEMDAN · MPE 来抑制 $S(t)$ 中的 $x_1(t)$;CEEMDAN · MPE 得到的 IMF 经 NHT 处理后得到的频率分布在 0 ~ 100 Hz, 和 $x_2(t)$ 具有对应性,时频参数可清晰识别。侧面说明了 CEEMDAN · MPE 得到的 IMF 经过 NHT 能够得到具有实际物理意义的时频信息,即 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析算法不仅可有效抑制噪声引起的 EMD 模态混淆,同时得到时频分辨率双高的信号频谱图。

3 炸礁爆破地震波信号 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析

以三峡-葛洲坝两坝间莲沱河段航道整治炸礁工程为研究对象,选择下岸溪~丁头镇区间 LT5 炸礁区为研究对象。该区总的炸礁工程量 2561.0 m^3 ,清渣工程量 2484.2 m^3 。LT5 区周边环境复杂,炸礁区距离最近的民房 70 m、距离公路(陡纸线)81 m,还有滑坡、崩塌和泥石流等不良地质情况,对工程影响较大。

选取炸礁爆破施工期间处于较危险地带的民房作为研究对象,对民房进行现场监测得到一系列监测数据。观察监测数据发现水下钻孔爆破地震波信号三个方向振动速度呈现出有规律的一致性,水平径向峰值振动速度最大,水平切向次之,而垂直方向振动速度最小。考虑文章篇幅,仅对水下钻孔爆破地震波监测信号的水平径向峰值振动速度进行 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析。有代表性水平径向地震波监测信号如图 10 所示。

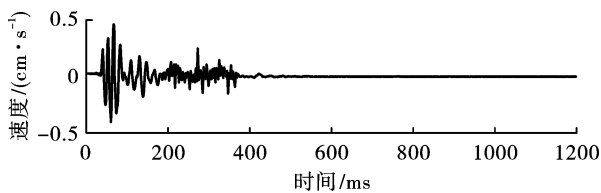


图 10 水平径向地震波监测信号波形图

Fig. 10 Waveform of monitored radial seismic signal

对图 10 信号进行 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析。先对图 10 信号进行 CEEMDAN · MPE,得到如图 11 所示的 IMF 分量。可发现,IMF 从高频到低频排列,每个 IMF 都携带了爆破地震波信号的特定信息。其中 IMF_3 携带图 10 所示信号的主要能量,其次是 IMF_4 和 IMF_5 。

进一步分析,对图 11 中的 IMF1 ~ IMF6 执行 NHT,获得每个 IMF 的时频能量特征图,其中图 12 ~ 图 17 为对应 IMF 的边际谱;图 18 ~ 图 23 为对应 IMF 的时频谱;这里未对 IMF_7 和 R 进行变换,是因为结合图 11 不难发现 IMF_7 和 R 占有的能量可忽略不计。观察图 12 ~ 图 23 可发现,CEEMDAN · MPE-NHT 获得的时频谱在时域和频域都具有高分辨率,这点和仿真信号时频分析得到的结果一致。IMF1 的频率范围为 100 ~ 250 Hz,持续时间为 0.24 ~ 0.38 s; IMF_2 的频率范围为 50 ~ 100 Hz,持续时间为 0.23 ~ 0.42 s; IMF_3 的频率范围为 20 ~ 50 Hz,持续时间为 0.22 ~ 0.47 s; IMF_4 的频率范围

为 10 ~ 30 Hz,持续时间为 0.28 ~ 1.17 s; IMF_5 的频率范围为 5 ~ 10 Hz,持续时间为 0.00 ~ 1.20 s; IMF_6 频率最低,约为 0 ~ 5 Hz,持续时间为 0.00 ~ 1.20 s。

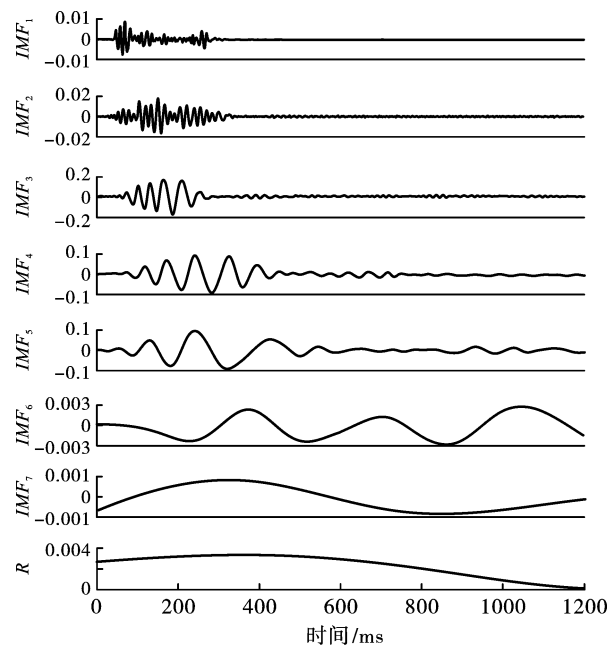


图 11 水平径向地震波信号 CEEMDAN · MPE 结果

Fig. 11 The results of CEEMDAN · MPE of the radial seismic signal

通过图 12 ~ 图 23 的分析,可发现信号在低频停留时间大于高频,主要能量集中在 50 Hz 以下。

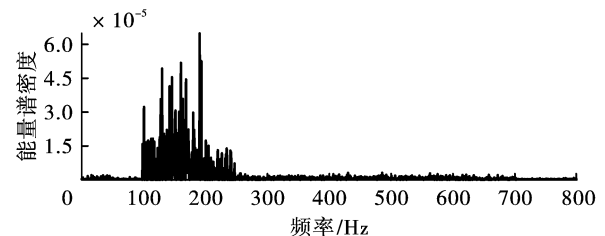


图 12 IMF_1 边际谱

Fig. 12 Marginal spectrum of IMF_1

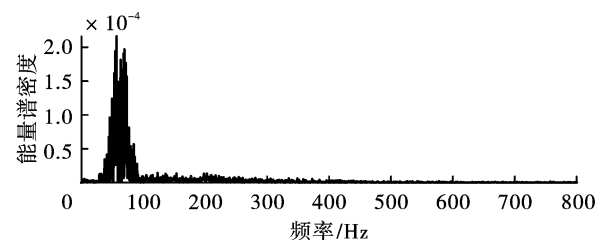


图 13 IMF_2 边际谱

Fig. 13 Marginal spectrum of IMF_2

进一步分析,获得图 10 中信号的三维时频能量谱,如图 24 所示。从图 24 可看出,本次水下炸礁工程监测得到的水下钻孔爆破地震波信号的主频为

26.83 Hz, 次主频为 19.32 Hz。

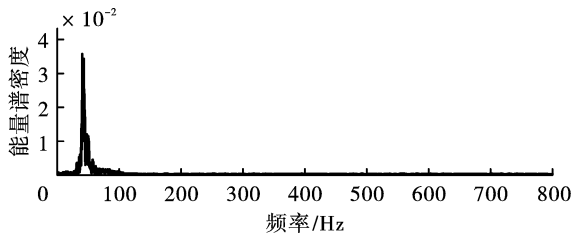


图 14 IMF_3 边际谱

Fig. 14 Marginal spectrum of IMF_3

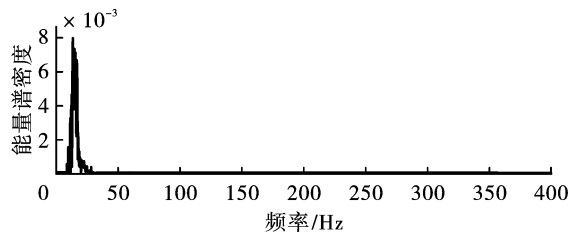


图 15 IMF_4 边际谱

Fig. 15 Marginal spectrum of IMF_4

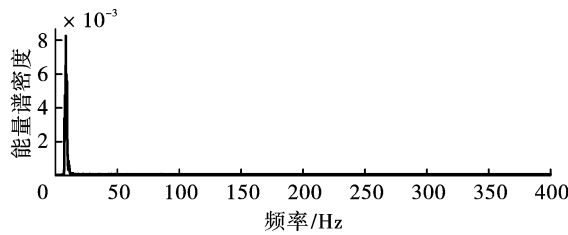


图 16 IMF_5 边际谱

Fig. 16 Marginal spectrum of IMF_5

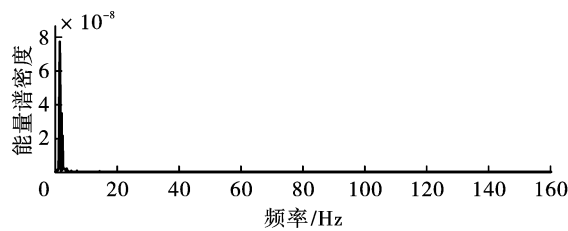


图 17 IMF_6 边际谱

Fig. 17 Marginal spectrum of IMF_6

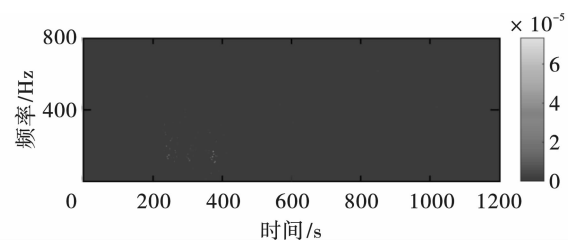


图 18 IMF_1 时频谱

Fig. 18 Time-frequency spectrum of IMF_1

根据结构抗震知识,当爆破地震波的频率与房屋的固有频率相同时,结构的振幅将达到最大,即发

生共振危险。物体的受迫振动是根据特定规律进行的,即由于形状和结构的不同,它们具有不同的固有频率。为了探索建筑结构的固有频率,有必要分析结构的振动特性,如振动特征频率与频率对应的振型,即模态分析。通过 PKPM 结构软件的 SETWE 模块,对距离爆区最近的 2 层房屋进行了模态分析。房屋的第一个 6 阶振型图如图 25 所示,每个振型对应的固有频率如表 1 所示。

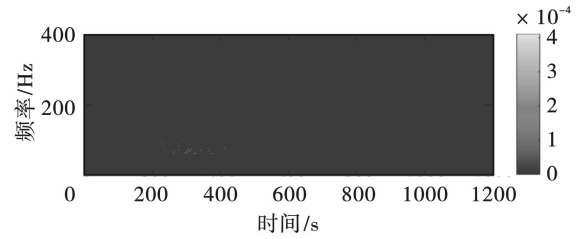


图 19 IMF_2 时频谱

Fig. 19 Time-frequency spectrum of IMF_2

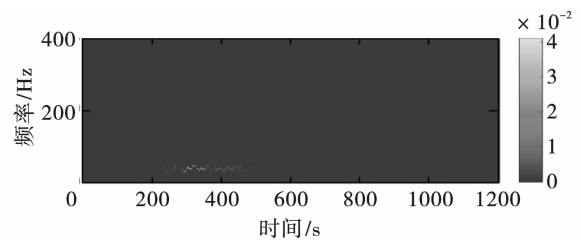


图 20 IMF_3 时频谱

Fig. 20 Time-frequency spectrum of IMF_3

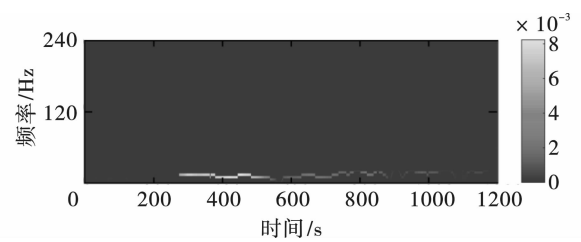


图 21 IMF_4 时频谱

Fig. 21 Time-frequency spectrum of IMF_4

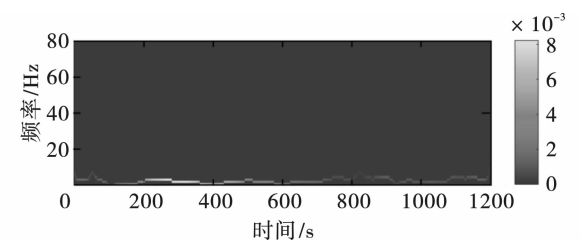


图 22 IMF_5 时频谱

Fig. 22 Time-frequency spectrum of IMF_5

从表 1 中可看出,受保护房屋的第六阶阵型对应的自振频率为 27.08 Hz,本次爆破的主频为 26.83 Hz;被保护房屋的第五阶阵型对应的自振频

率为 20.17 Hz,本次爆破的次主频为 19.32 Hz。根据结构共振的知识,不难发现此次爆破产生的地震波可能会引起该房屋的共振。

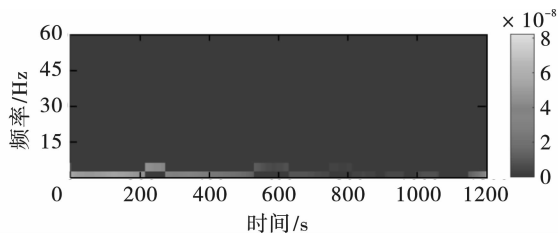


图 23 IMF_6 时频谱

Fig. 23 Time-frequency spectrum of IMF_6

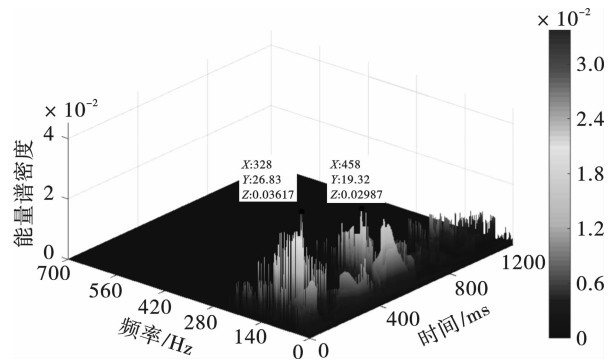


图 24 信号时间-频率-能量三维图

Fig. 24 Time-frequency-energy spectrum of the signal

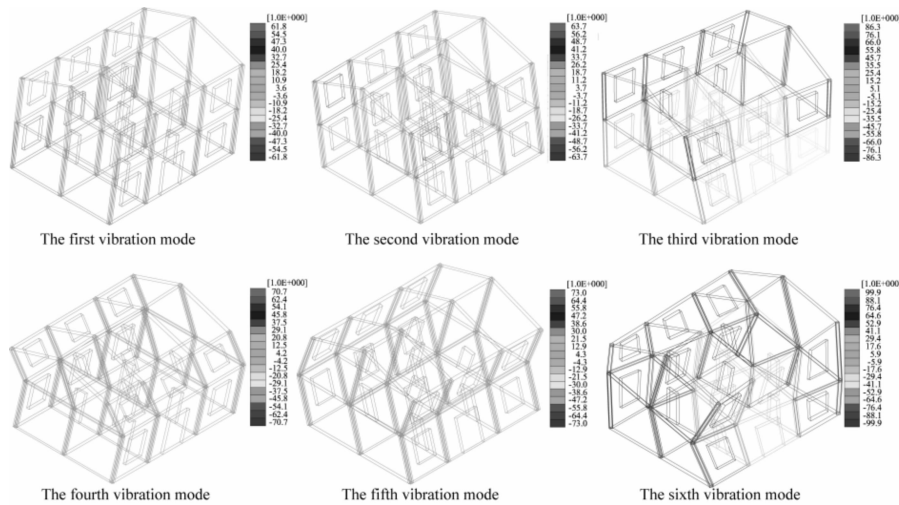


图 25 民房前 6 阶阵型图

Fig. 25 The first six formations of civilian houses

表 1 民房前 6 阶阵型对应的自振频率(单位:Hz)

Table 1 Natural frequency corresponding to the first 6-order array of civil houses (unit: Hz)

| 民房阵型 | 自振频率 |
|------|-------|
| 1 | 6.03 |
| 2 | 6.98 |
| 3 | 7.32 |
| 4 | 17.83 |
| 5 | 20.17 |
| 6 | 27.08 |

进一步定量分析不同 IMF 分量对民房每一阶阵型的影响程度, IMF 对不同的建筑结构具有不同的放大倍数,根据式(1),可计算 IMF 分量对民房每一阶阵型的放大倍数,计算结果见表 2, β 为单个 IMF 主频和房屋各阶阵型固有频率之比, λ 为阻尼比,一般建筑都 λ 取 0.05。考虑到本次爆破地震波能量主要在 IMF_3 中,其次在 IMF_4 及 IMF_5 中,所以仅对 $IMF_3 \sim IMF_5$ 对房屋不同阵型的放大性进行讨论。

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + 4\lambda^2\beta^2}} \quad (1)$$

表 2 IMF 分量对不同阵型下民房的放大系数 D

Table 2 The IMF component corresponds to the magnification factor D under different formations of civil houses

| 阵型 | IMF 分量 | | | | | |
|--------------|--------------------|------------|--------------------|------------|-------------------|------------|
| | IMF_3 (26.83 Hz) | | IMF_4 (19.32 Hz) | | IMF_5 (8.69 Hz) | |
| 1 (6.03 Hz) | $\beta = 4.45$ | $D = 0.05$ | $\beta = 3.20$ | $D = 0.11$ | $\beta = 1.44$ | $D = 0.49$ |
| 2 (6.98 Hz) | $\beta = 3.84$ | $D = 0.07$ | $\beta = 2.77$ | $D = 0.15$ | $\beta = 1.24$ | $D = 1.81$ |
| 3 (7.32 Hz) | $\beta = 3.67$ | $D = 0.08$ | $\beta = 2.64$ | $D = 0.17$ | $\beta = 1.19$ | $D = 2.31$ |
| 4 (17.83 Hz) | $\beta = 1.50$ | $D = 0.79$ | $\beta = 1.08$ | $D = 5.04$ | $\beta = 0.49$ | $D = 1.31$ |
| 5 (20.17 Hz) | $\beta = 1.33$ | $D = 1.28$ | $\beta = 0.96$ | $D = 8.07$ | $\beta = 0.43$ | $D = 1.22$ |
| 6 (27.08 Hz) | $\beta = 0.99$ | $D = 9.90$ | $\beta = 0.71$ | $D = 1.20$ | $\beta = 0.32$ | $D = 1.11$ |

分析表 2 可发现,房屋固有频率和信号主频越接近即单个 IMF 主频和房屋各阶阵型固有频率之比 β 趋近于 1 时, D 越大。 D 值大小反应在一定的外界爆破信号激励下,结构对应质点产生的质点振动速度放大效应, D 值越大对应的爆破作用放大效应越强,对结构的损伤越大,结构发生破坏的概率越大。

不难发现 IMF₃ 可使民房第 6 阶阵型房屋质点速度产生 9.9 倍的放大效应。当 IMF 主频和阵型自振频率相等时,即 $\beta = 1$,此时 $D = 10$,结构振动幅度达到最大,这便解释了为什么民房处测得的速度峰值仅 0.49 cm/s,但在民房处依旧产生了大量的裂缝,IMF 分量对民房每一阶阵型的放大倍数是不一样的,实际结构在共振的作用下振幅呈现出放大的特征,可据此解释房屋在监测低振速环境下发生开裂的原因。因此,实际工作中安全评估不能以单一速度峰值作为判别标准。

继续观察表 2 还可发现,对于民房结构而言由于结构前六阶阵型相对较小,而高频信号对此种结构的影响相对 50 Hz 以下的低频影响相对小。针对此现象建议施工采用降低单段药量法、微差起爆、优化装药结构等提高爆破地震波信号频率的方法。

综上所述可发现,基于 CEEMDAN · MPE-NHT 的爆破地震波信号时频分析方法,不仅有助于抑制含噪监测信号引起的 EMD 模态混淆,同时 CEEMDAN · MPE 得到的 IMF 经 NHT 处理后,得到的时频谱在分辨率和精度上都得到了提升,分析结果有助于爆破振动特征的识别和爆破振动危害控制。

4 结 论

(1) 为提高 HHT 含噪爆破地震波信号时频分析精度,得到反映真实爆破振动属性的时频能量参数。对 HHT 进行了改进,得到 CEEMDAN · MPE-NHT 时频分析算法。该算法通过控制噪声来改善 EMD 模态混淆,对 IMF 调频分量进行 Hilbert 变换,降低负值瞬时频率出现的概率,从算法原理上实现提升信号时频分析精度。

(2) 通过 HHT 和 CEEMDAN · MPE-NHT 算法仿真爆破振动信号时频分析对比研究可发现,CEEMDAN · MPE-NHT 算法将 CEEMDAN 的自适应性和 MPE 随机性检测能力相结合,降低 EMD 对噪声的敏感性。不仅可有效抑制噪声引起的 EMD 模态混淆,同时结合 NHT 可得到时频分辨率双高的信

号频谱图。

(3) 根据结构共振放大系数 D 的原理,发现单个 IMF 分量主频和房屋不同阵型下固有频率越接近时,对应质点振动速度放大效应越明显。当出现极限情况,即当 $\beta = 1$,对应质点振动速度增幅可高达 10 倍。可据此解释房屋在低振速情况下,出现大量的爆破振动裂缝的情形。

参考文献 (References)

- [1] 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 of London Series A, 1998, 454(3):903-995.
- [2] HUANG N E. New method for nonlinear and nonstationary time series analysis: empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000, 4056: 197-209.
- [3] 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.
- [3] YANG Ren-shu, FU Xiao-qiang, LIANG Guo-liang, et al. Application of EMD and FSWT combination method in blasting vibration signal analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2):58-64. (in Chinese)
- [4] 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(武汉), 2021.
- [4] 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 (Wuhan), 2021. (in Chinese)
- [5] 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.
- [5] WANG Hai-long, BAI Hao-bo, WANG Sheng-hua. Time-frequency analysis of blasting vibration signal based on FDM [J]. Blasting, 2021, 38(3):143-151. (in Chinese)
- [6] 张智宇,张 智,黄永辉,等. 基于 HHT 频谱分析研究断层对爆破地震波传播的影响 [J]. 有色金属:矿山部分, 2021, 73(4):138-144.
- [6] ZHANG Zhi-yu, ZHANG Zhi, HUANG Yong-hui, et al. Analysis on the influence of fault on the propagation of blasting seismic wave based on HHT spectrum analysis [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(4): 138-144. (in Chinese)

- [7] 程军圣,王健,桂林.改进的EEMD方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2018,37(16):51-56.
- [7] CHENG Jun-sheng, WANG Jiang, GUI Lin. An improved EEMD method and its application in rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16):51-56. (in Chinese)
- [8] DEHGHAN Yaser, SADRINASAB Masoud, CHEGINI Vahid. Empirical mode decomposition and fourier analysis of caspian sea level's time series[J]. Ocean engineering, 2022, 252(15):114-123.
- [9] YANG Z, YANG L. The structures of some typical intrinsic mode functions[J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2012, 35(17):207-2084.
- [10] 易文华,董斌斌,刘连生,等.基于经验模态分解的爆破延期识别优化方法[J].振动与冲击,2022,41(2):217-223.
- [10] YI Wen-hua, DONG Bin-bin, LIU Lian-sheng, et al. An optimization method for the identification of blasting delay based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(2):217-223. (in Chinese)
- [11] 孙苗,李兴明,吴立.基于EP-CEEMDAN-PED的隧道扩挖爆破网络延时分析[J].爆破器材,2022,51(4):51-57.
- [11] SUN Miao, LI Xing-ming, WU Li. Network delay analysis in tunnel expansion blasting based on EP-CEEMDAN-PED[J]. Explosive Materials, 2022, 51(4):51-57. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 费鸿禄,山杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J/OL]. 爆破:1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20220421.1338.010.html>.
- [13] FEI Hong-lu, SHAN Jie. Application of CEEMDAN-Wavelet threshold method in the signal processing of blasting vibration[J]. Blasting:1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20220421.1338.010.html>. (in Chinese)
- [14] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]//IEEE International Conference on Acoustics. IEEE, 2011, 4143-4147.
- [15] 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,2021,2021,34(4):869-878.
- [15] 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)
- [16] CHEN S J, SHANG P J, WU Y. Multivariate multiscale fractional order weighted permutation entropy of nonlinear time series[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 515:217-231.
- [17] 冯云智,唐彬峰,赵宁.改进多尺度排列熵及模糊算法的JTC状态检测[J].铁道科学与工程学报,2021,18(12):3337-3346.
- [17] FENG Yun-zhi, TANG Bin-feng, ZHAO Ning. JTC state detection based on improved multi-scale permutation entropy and fuzzy algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(12):3337-3346. (in Chinese)
- [18] 赵建岗,宁静,宁云志,等.基于多尺度排列熵和线性局部切空间排列的机械故障诊断特征提取[J].振动与冲击,2021,40(13):136-145.
- [18] ZHAO Jian-gang, NING Jing, NING Yun-zhi, et al. Feature extraction of mechanical fault diagnosis based on MPE-LLTSA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13):136-145. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] HUANG N E, WU Z, LONG S R. ON Instantaneous Frequency[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1:177-229.