

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.023

基于自适应 CEEMD-MPE 算法的 矿山爆破振动信号去噪研究*

孙兵¹, 彭亚雄², 苏莹²

(1. 武汉城市学院, 武汉 430083; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湘潭 411201)

摘要: 由于矿山环境的复杂性、监测传感器的误差和磁场的干扰, 实测爆破振动信号不可避免地包含大量高频噪声。为有效去除噪声成分, 引入相关均方根误差获得了具有自适应能力的 CEEMD 算法, 对矿山爆破振动信号进行精细化分解, 得到频率由大到小排列的固有模态函数(IMF), 对各 IMF 进行 MPE 随机性检测, 将 MPE 值大于 0.6 的 IMF 成分去除, 以达到去噪目的。将自适应 CEEMD-MPE 算法应用于矿山爆破振动信号去噪处理, 研究表明: 该算法具有较好的保真度和去噪效果, 有效地去除了信号所含高频噪声成分, 同时对真实振动信息影响较小。对比分析表明自适应 CEEMD-MPE 算法优于 EMD-MPE 和 EEMD-MPE 算法, 验证了该算法的有效性。

关键词: 矿山爆破; 振动信号; 去噪处理; 自适应 CEEMD

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0153-06

Denoising of Mine Blasting Vibration Signal based on Adaptive CEEMD-MPE Algorithm

SUN Bing¹, PENG Ya-xiong², SU Ying²

(1. Wuhan City College, Wuhan 430083, China; 2. School of Civil Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Due to the complexity of mine environment, the error of monitoring sensors and the interference of magnetic field, the measured blasting vibration signal inevitably contains a lot of high-frequency noise. In order to remove the noise components, adaptive CEEMD algorithm was obtained by introducing the correlation root mean square error. This algorithm was used to fine decompose the blasting vibration signals, and obtain an intrinsic mode functions (IMF) with frequencies from large to small. Furthermore, the random MPE test was carried out for each IMF. In order to achieve the purpose of noise reduction, the IMF components with MPE value which was greater than 0.6 were removed. The results show that the algorithm has good fidelity and denoising effect. It eliminates the high frequency noise effectively and has little influence on the real information. Comparative analysis shows that the adaptive CEEMD-MPE algorithm is superior to the EMD-MPE and the EEMD-MPE algorithm, which verifies the effectiveness of the algorithm.

Key words: mine blasting; vibration signal; denoising process; adaptive CEEMD

收稿日期: 2022-01-05

作者简介: 孙兵(1981-), 女, 硕士, 主要从事岩土体加固与动力响应研究, (E-mail) 24781448@qq.com。

通讯作者: 彭亚雄(1990-), 男, 博士、讲师, 主要从事爆破及岩体动力学研究, (E-mail) 1020172@hnust.edu.cn。

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5163); 湖南省教育厅科学研究项目(20C0815)

爆破振动信号是分析爆破振动有害效应的基础, 反映了爆破引起岩体、建(构)筑物的动力响应特性。由于矿山环境的复杂性、监测传感器的误差、振动传播介质的反射、磁场的干扰等原因, 实测爆破振动信号包含了大量高频噪声, 导致振动信号畸变,

从而掩盖了真实信号成分^[1,2]。研究爆破振动信号的能量、波形等特征,必须建立在爆破信号去噪的基础上。

爆破振动信号属于一类非平稳随机信号,对这类信号进行去噪处理的方法主要有小波类和经验模态分解(EMD)类技术^[3-6]。谢全民等提出了基于SGWP小波包的信号去噪算法^[7],实现了爆破振动信号高效去噪与准确特征提取。Zhang等采用小波阈值算法对爆破振动信号进行处理^[8],结果表明基于 S 似然估计的Rigrsure阈值可以去除噪声。Peng等提出了爆破振动信号的CEEMDAN光滑去噪算法^[9],获得了较好的水下爆破振动信号去噪效果。小波分解过程中小波基选择和分解层次困难,导致了该类算法自适应性较差^[10];EMD是一种自适应性信号分解算法,但存在端点效应和模态混淆问题,只有解决这些问题才能更好地保证其去噪效果^[11]。

CEEMD算法采用成对添加噪声的方式进行信号分解,抑制了模态混叠问题,提高了分解信号的真实性。本文利用相关均方根误差 R ,提出了自适应CEEMD算法,利用该算法对爆破振动信号进行精细化分解,得到频率由大到下排列下的模态函数(IMF);采用多尺度排列熵(MPE)对其进行随机性检测,确定IMF噪声成分^[12],构建了一种适用于矿山爆破振动信号的去噪方法。基于广东省天宇采石场爆破振动监测项目,采用自适应CEEMD-MPE算法对实测信号去噪,并通过原始与重构信号的标准差ESD、信噪比 ξ 、去噪前后信号的均方根误差 ε 等参数验证该方法的有效性。

1 自适应MCEEMD算法

1.1 CEEMD自适应优化

EMD是一种具有良好适应性、完备性和正交性的算法。该方法基于时标特性,将信号分解为一组模态函数(IMF)和余项,并将分解成分按瞬时频率由高到低的顺序排列。但该算法不适用于离散、脉冲信号,分解过程中将出现模态混叠现象。据此,提出了完全集合经验模态分解算法(CEEMD),在EMD分解过程中添加成对的白噪声信号,并将分解的结果进行组合得到最终IMF^[13]。CEEMD算法能够在保证较好的分解效果前提下,抑制由于随机添加白噪声导致的误差。CEEMD的主要步骤如下:

(1)在原始信号 $x(t)$ 中添加 I 组成对的白噪声 $n_i(t)$,此时信号转化为 $x^+(t) = x(t) \pm \varepsilon_0 n_i(t)$,其中 ε_0 为噪声系数。

(2)利用EMD对各组加噪信号进行分解,每组

加噪信号可以分别得到 j 个 IMF^{+ij} 和 IMF^{-ij} 分量,计算对应分量的平均值。

$$IMF_{ij} = (IMF_{ij}^+ + IMF_{ij}^-)/2 \quad (1)$$

式中, IMF_{ij} 为信号 n_i 的第 j 个IMF。

(3)通过对 I 组分量平均,得到最终分解结果。

$$IMF_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_{ij} \quad (2)$$

CEEMD算法利用幅值相同而方向相反的高斯噪声,多次平均获得IMF,消除了加入噪声而导致的误差。

加入的白噪声信号幅值对分解效果造成较大影响^[14]。噪声系数 ε 决定了白噪声幅值。 ε 过小,无法使原信号极值点均匀分布;过大则导致原始信号被白噪声信号覆盖,去噪效果较差。采用试算方式确定噪声系数 ε 将导致较大的人为干预误差。

为解决这一问题,引入相关均方根误差 R 作为评价指标,自适应确定最优噪声系数 ε ,即加噪幅值。

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N [x^+(t) - IMF(t)]^2}{\sum_{t=1}^N [x^+(t) - \bar{x}]^2}} \quad (3)$$

式中: N 为采样个数; \bar{x} 为原始信号均值。该公式定义了加噪信号与IMF之差的均方根与加噪信号均方根的比值,当 R 越大,IMF分量去除白噪声效果更好。

1.2 多尺度排列熵

多尺度排列熵(MPE)可用于量化检测信号的随机性和动力突变性,将信号按照其时间序列进行多尺度粗粒化,获得相应的排列熵^[15]。具体步骤如下:

①对 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_L\}$ 进行多尺度粗粒化

$$y_i^s = \frac{1}{s} \sum_{i=(j-1)s+1}^{js} x_i, 1 \leq j \leq L \quad (4)$$

式中: s 为尺度数; y_j^s 为多尺度序列。

②对 y_j^s 进行重构

$$Y_i^s = \{y_i^s, y_{i+\tau}^s, \dots, y_{i+(m-1)\tau}^s\} \quad (5)$$

式中: τ 为延时; m 为维数。

③升序排列重构 Y^{st} ,排列方式共有 $m!$ 种,各排列方式的显现次数为 N_L ,其概率为 P^{st} 。

$$y_{i+(j_1-1)\tau}^s \leq y_{i+(j_2-1)\tau}^s \leq \dots \leq y_{i+(j_m-1)\tau}^s \quad (6)$$

$$P_l^s = \frac{N_l}{n/s - m + 1} \quad (7)$$

④计算得到多尺度下 Y^{st} 的排列熵

$$H_p^s = - \sum_{l=1}^{m!} P_l^s \ln P_l^s \quad (8)$$

⑤归一化处理 H^{st}

$$h_p^s = H_p^s / \ln(m!) \quad (9)$$

自适应CEEMD-MPE算法的信号降噪基本过程为:对实测信号进行自适应CEEMD精细化分解,将分解得到的IMF进行MPE随机检测,计算IMF的MPE均值。若IMF的均值大于预设阈值,则被认为是噪声成分,应当去除。自适应CEEMD-MPE信号去噪规避了大量集成平均计算,同时减少了噪声引起的误差,确保了信号分解的完备性。

2 实测信号去噪处理

2.1 爆破振动信号采集

天宇采石场位于广东省德庆县九市镇。矿体为黑云母二长花岗岩,相带不发育,呈灰白色微带肉红色,中粒花岗结构,块状构造。矿体上部为风化岩石,局部为强风化岩石,厚度30~50m,岩石破碎,裂隙甚为发育;下部为新鲜坚硬且裂隙不发育的岩

石,具有较高的抗压折性和较大硬度。矿山开采采用中深孔台阶爆破方式,爆破参数如表1所示。

表1 台阶爆破参数
Table 1 Bench blasting parameters

孔深/m	孔排距/(m×m)	总药量/kg	单段最大药量/kg	延时雷管
14	4.5×4.5	3800	480	MS1~MS12

矿山周围分布4个主要村庄,各村庄距爆区约为500~800m,高程差约为10~20m。为评价矿山爆破对村庄房屋的影响,开展了爆破振动监测,现场采集信号如图1。以一条典型实测振动信号为研究对象(如图2),共5760个采样点,其采样时间为1.8s,采样频率为3200sps,由Nyquist采样定理可以确定信号频率为1600Hz。

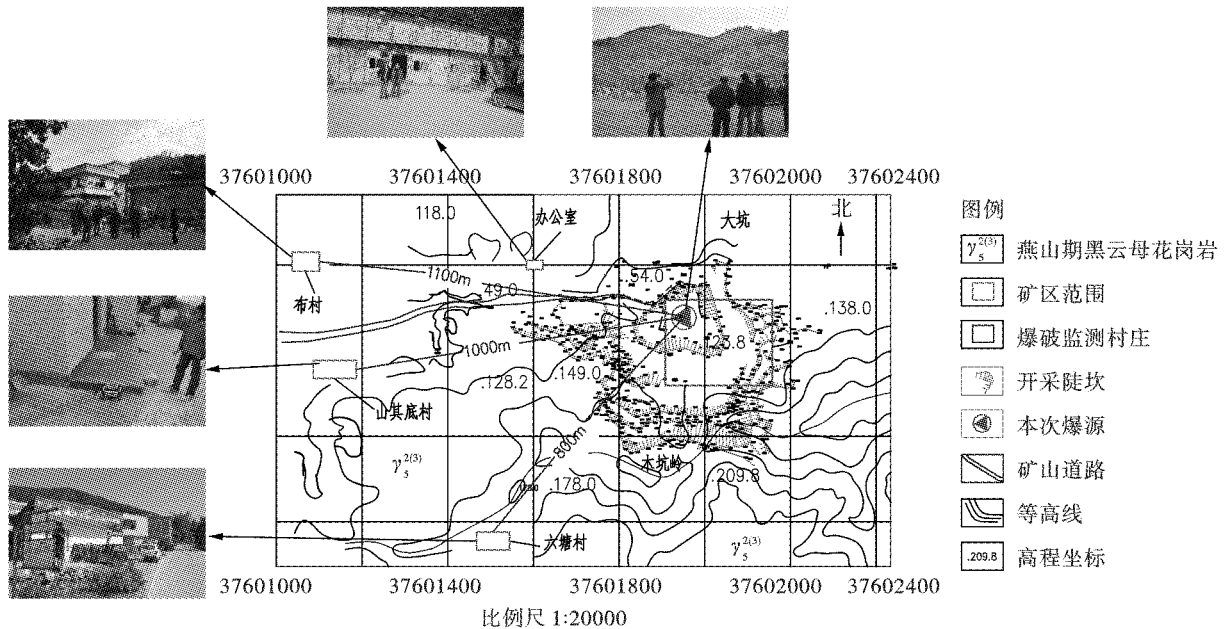


图1 振动信号现场采集

Fig. 1 Field acquisition of vibration signals

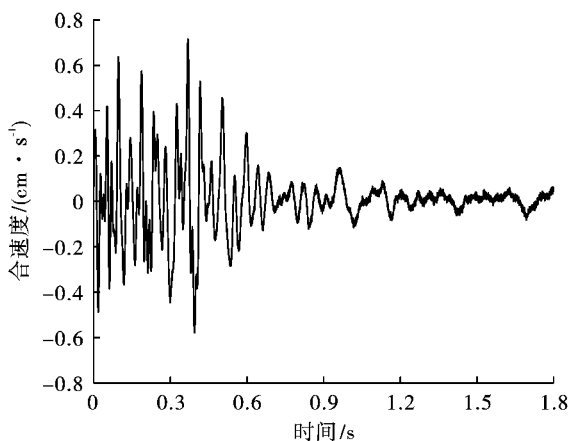


图2 爆破振动信号

Fig. 2 Blasting vibration signal

2.2 信号分解与去噪

采用自适应CEEMD算法对上述实测振动信号进行分解,自适应添加200组的白噪声,得到10个不同振动频率的IMF分量,如图3所示。IMF1~IMF10的中心频率依次降低,高频噪声对信号分量的影响也随之降低,可以推断IMF1~IMF2为高频噪声,而IMF3~IMF10是真实信号成分。

如表2,IMF1~IMF10的MPE均值逐渐减小,这说明了各分量所含噪声成分也在逐步降低。上述结果中IMF1~IMF2的MPE均值大于阈值0.6,可确定为噪声成分;而IMF3~IMF10则可认为是主要振动信号,该结论与波形分析结果相同。因此,从原

始信号中剔除 $IMF1 \sim IMF2$ 以到达去噪的目的,去噪后爆破振动信号如图 3 所示。对原始与去噪信号

进行 AOK 时频处理^[16],处理后的时频谱如图 4 ~ 图 5,其中 X 为主频能量, Y 为主频。

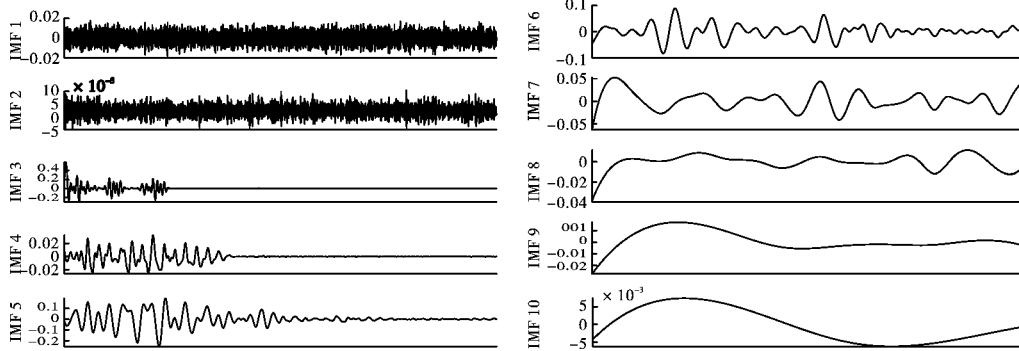


图 3 IMF 分量信号

Fig. 3 IMF component signals

表 2 IMF 分量的 MPE 均值
Table 2 Mean MPE of IMF

分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10
MPE	0.9331	0.8400	0.5804	0.4199	0.2478	0.1937	0.1437	0.1303	0.1157	0.1103

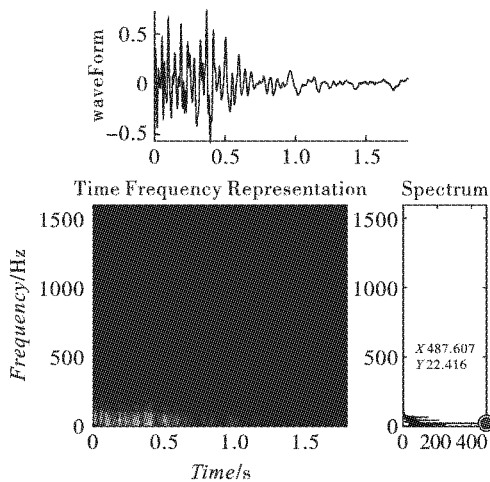


图 4 去噪信号与时频谱图

Fig. 4 Waveform and time-frequency spectrum of denoised signal

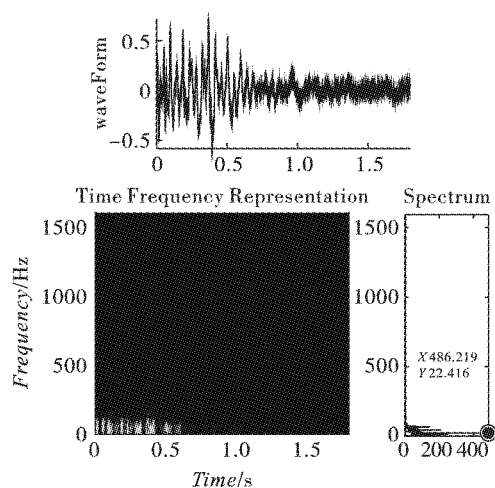


图 5 原始信号与频谱图

Fig. 5 Waveform and time-frequency spectrum of original signal

由图 4 ~ 图 5 可知,对比实测信号,去噪信号波形中的噪声成分明显减少,能更清楚地反映爆破振动时程特性和振动速度的峰值特征。对比去噪前后时频谱,去噪前后信号的主频均为 22.42 Hz,信号经过去噪处理后去除了高频成分但对信号主频没有影响,主频能量也仅降低了 $1.6 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。上述结论证实,自适应 CEEMD-MPE 算法在去除信号高频噪声的同时,能很好地保留真实信号成分,为进一步分析爆破振动效应提供了便利。

2.3 去噪效果对比

为检验自适应 CEEMD-MPE 算法的去噪效果,分别采用 EMD-MPE、EEMD-MPE 算法处理实测爆

动信号。对比分析各算法的去噪信号与原始信号的波形特点,并采用原始与重构信号的标准差 ESD、信噪比 ξ 、去噪前后信号的均方根误差 ε 评价去噪效果^[17],计算结果如表 3 所示。ESD 用于评估信号保真度,其值越小说明在分解过程中信号成分丢失越少。 ξ 反映了信号与噪声的能量关系,其值越大表明去噪信号保留了更多的原始信息与特征; ε 体现了信号去噪前后相似度,其值越小效果越好。

(1) 重构标准差 ESD

$$ESD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_m - \hat{x}_m)^2} \quad (10)$$

表3 爆破振动信号去噪效果指标

Table 3 Denoised effect index of blasting vibration signals

去噪算法	重构标准差 ESD	信噪比 ξ/dB	均方根误差 $\varepsilon/\times 10^{-2}$
EMD-MPE	0.0172	19.44	1.52
EEMD-MPE	0.0244	21.69	1.18
自适应 CEEMD-MPE	0.0157	22.63	1.05

(2) 信噪比 ξ

$$\xi = 10 \lg \left(\frac{\sum_{m=1}^M (x_m)^2}{\sum_{m=1}^M (x_m - \tilde{x}_m)^2} \right) \quad (11)$$

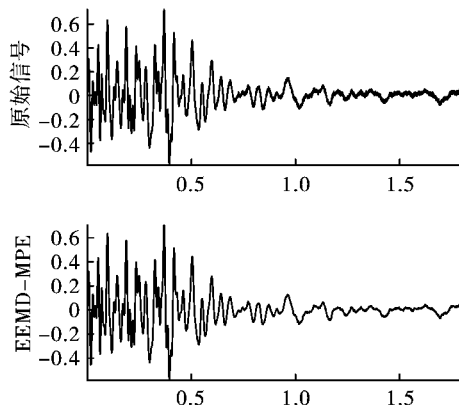


图6 原始信号与去噪后信号对比

Fig. 6 Comparison between original signal and denoised signal

由表3可知,原始与重构信号的标准差 ESD 在 0.0157 ~ 0.0224 之间,说明三种模型均具有较好的保真性;自适应 CEEMD-MPE 算法的 ESD 最低,说明对原始信号成分影响极小,而 EEMD 分解过程中所加入的白噪声使得 ESD 相对较高,存在一定的失真。自适应 CEEMD-MPE 算法的信噪比 ξ 为 22.63 dB,大于 EMD-MPE 和 EEMD-MPE 算法,表明该算法获得的去噪信号更好地保留了原始信号的有效信息;自适应 CEEMD-MPE 算法的均方根误差 ε 最小,说明其去噪信号与原始信号有更高的相似度。

因此,自适应 CEEMD-MPE 算法在矿山振动信号去噪方面具有一定的优越性,能够很好地保留复杂环境下矿山爆破振动信号的有效信息,去噪效果优于 EMD-MPE 和 EEMD-MPE 算法。

3 结论

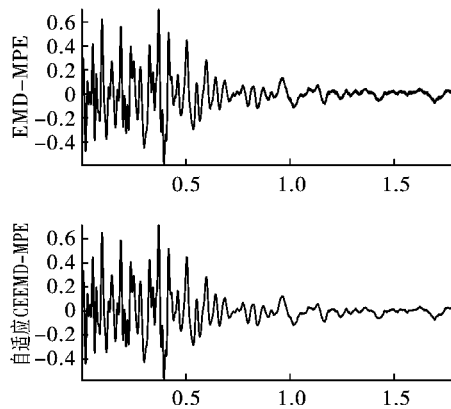
(1) 采用自适应 CEEMD-MPE 算法对矿山爆破振动信号进行精细化分解,得到频率由大到下排列的 IMF 分量,对各 IMF 分量进行随机性检测,将

(3) 均方根误差 ε

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_m - \tilde{x}_m)^2} \quad (12)$$

式中: M 为采样点个数; x_m 是原始信号第 m 个采样点数据; \hat{x}_m 为重构信号第 m 个采样点数据; \tilde{x}_m 是去噪信号第 m 个采样点数据。

由图6可知,采用 EMD-MPE、EEMD-MPE 和自适应 CEEMD-MPE 的去噪处理均取得一定效果,去除了部分高频噪声。对比原始与去噪后信号,自适应 CEEMD-MPE 算法去除噪声最为彻底,很好地展现波形特征;而 EMD-MPE 去噪后信号的噪声明显,信号分解后仅获得了一条 IMF 噪声分量。



MPE 均值大于 0.6 的噪声成分去除,实现信号去噪。该算法在实际工程去噪中得到了较好的应用效果,有效地去除了矿山爆破振动信号的高频噪声成分。

(2) 基于 AOK 时频分析方法,对比分析去噪前后信号的时频曲线,可以得知,自适应 CEEMD-MPE 算法不仅成功地去除了信号的高频噪声成分,而且不影响信号主成分。去噪后的信号可以清晰地反映爆破振动真实特征,为进一步的爆破有害效应分析提供便利。

(3) 分别利用 EMD-MPE、EEMD-MPE 和自适应 CEEMD-MPE 三种算法对爆破振动信号进行去噪处理,三种算法均具有较好的保真性和去噪效果。自适应 CEEMD-MPE 算法的去噪效果指标均最优,验证了该算法在处理矿山爆破振动信号的有效性,为矿山爆破振动信号去噪及分析奠定了理论基础。

参考文献 (References)

- [1] 孙苗,吴立,周玉纯,等. 水下钻孔爆破地震波信

- 号的最优降噪光滑模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 31-37.
- [1] SUN Miao, WU Li, ZHOU Yu-chun, et al. Optimal denoising smooth model of underwater drilling blasting seismic wave signal [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 31-37. (in Chinese)
- [2] 苟倩倩, 赵明生, 张光熊, 等. 基于 MEEMD 分解的楔形掏槽爆破振动信号分析[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(10): 11-15.
- [2] GOU Qian-qian, ZHAO Ming-sheng, ZHANG Guang-xiong, et al. Analysis on blasting vibration signal in Wedge-Shaped cut based on MEEMD Decomposition [J]. Mining Research & Development, 2019, 39(10): 11-15. (in Chinese)
- [3] 谢全民. 二代小波包变换在爆破振动信号去噪分析中的应用[J]. 工程爆破, 2011, 17(3): 21-24.
- [3] XIE Quan-min. Application of second generation wavelet transform in blasting vibration signal de-noising analysis [J]. Engineering Blasting, 2011, 17(3): 21-24. (in Chinese)
- [4] 路亮, 龙源, 谢全民, 等. 提升小波包最优基分解算法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 165-169, 186.
- [4] LU Liang, LONG Yuan, XIE Quan-min, et al. Application of lifting wavelet packet decomposing algorithm based on optimal basis in blasting vibration signal analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5): 165-169, 186. (in Chinese)
- [5] 杨仁树, 付晓强, 张世平, 等. 基于 EEMD 分形与二次型 SPWV 分布的爆破振动信号分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 41-47.
- [5] YANG Ren-shu, FU Xiao-qiang, ZHANG Shi-ping, et al. Analysis of blasting vibration signal based on EEMD fractal and quadratic time-frequency SPWV distribution [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 41-47. (in Chinese)
- [6] 赵明生, 苟倩倩, 张光雄, 等. 基于 CEEMDAN 的塌落触地振动信号最优降噪光滑模型算法[J]. 爆破, 2020, 37(2): 127-135.
- [6] ZHAO Ming-sheng, GOU Qian-qian, ZHANG Guang-xiong, et al. Optimal denoising smooth model algorithm for blasting collapse ground vibration signal based on CEEMDAN [J]. Blasting, 2020, 37(2): 127-135. (in Chinese)
- [7] 谢全民, 龙源, 郭涛, 等. SGWP 算法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(18): 40-45.
- [7] XIE Quan-min, LONG Yuan, GUO Tao, et al. Application of SGWP algorithm in blasting vibration signal analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18): 40-45. (in Chinese)
- [8] ZHANG L, YAN J L, LI D T. Application of wavelet threshold denoising method in signal preprocessing for blast vibration [C] // IEEE 3rd International Congress on Image and Signal Processing, 2010: 4028-4031.
- [9] PENG Ya-xiong, LIU Yun-si, ZHANG Chao, et al. A novel denoising model of underwater drilling and blasting vibration signal based on CEEMDAN [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021. DOI: 10. 1007/s13369-020-05274-z.
- [10] 孙苗, 吴立, 袁青, 等. 基于 CEEMDAN 的爆破地震波信号时频分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 76-82.
- [10] SUN Miao, WU Li, YUAN Qing, et al. Time-frequency analysis of blasting seismic signal based on CEEMDAN [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(3): 76-82. (in Chinese)
- [11] 张亮, 孙新建, 占其兵. 基于 CEEMD 和相关性函数特性的爆破震动信号滤波方法研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 37-42.
- [11] ZHANG Liang, SUN Xin-jian, ZHAN Qi-bing. Research of filtering method for blasting vibration signals based on CEEMD and correlation function property [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(6): 37-42. (in Chinese)
- [12] 陈坚, 刘思议, 金涛. 基于 SURE 小波阈值消噪和 MCEEMD-HHT 的低频振荡分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 151-160.
- [12] CHEN Jian, LIU Si-yi, JIN Tao. Analysis of low-frequency oscillation based on sure wavelet threshold de-noising and MCEEMD-HHT method [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 151-160. (in Chinese)
- [13] 邵东辉. 基于 CEEMD 低通的隧道爆破振动信号去噪[J]. 工程爆破, 2017, 23(6): 5-10.
- [13] SHAO Dong-hui. Denoising of tunnel blasting vibration signal based on CEEMD low pass [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6): 5-10. (in Chinese)
- [14] 付林军, 王凤随, 刘正男. 改进自适应 CEEMD 方法在心电信号去噪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 50-57.
- [14] FU Lin-jun, WANG Feng-sui, LIU Zheng-nan. Application of improved adaptive CEEMD method in denoising of ECG signals [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 50-57. (in Chinese)