

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.023

## 基于 CEEMDAN-MPE 算法的 隧道爆破地震波信号降噪方法及应用\*

黄智刚<sup>1,2</sup>, 吕虎波<sup>3</sup>, 林一庚<sup>4</sup>, 彭亚雄<sup>5</sup>, 吴立<sup>1</sup>, 陈劲<sup>1</sup>

- (1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2. 福州水务平潭引水开发有限公司, 福州 350001;  
3. 浙江省隧道工程集团有限公司, 杭州 310030; 4. 福州城建设计研究院有限公司, 福州 350001;  
5. 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

**摘 要:** 由于隧道工程的复杂环境、电磁干扰和仪器误差等原因, 现场实测爆破地震波信号中存在大量高频噪声。为有效降低实测信号的噪声成分, 对原始信号进行自适应噪声的完全集合经验模态分解(CEEMDAN), 对分解得到的模态函数(IMF)进行多尺度排列熵(MPE)的随机性检测, 去除噪声 IMF 分量达到降噪的目的。对实测隧道爆破地震波信号处理表明: 该方法不仅能够较好地去除高频噪声, 而且对地震波信号所含主要信息的影响极小。波形分析和降噪效果指标均表明 CEEMDAN-MPE 算法均优于 EEMD-MPE 和 CEEMDAN 算法, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** 隧道爆破; 地震波信号; 降噪方法; CEEMDAN-MPE

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)04-0138-07

## Denoising Method of Tunnel Blasting Seismic Wave Signal based on CEEMDAN-MPE Algorithm and its Application

HUANG Zhi-gang<sup>1,2</sup>, LV Hu-bo<sup>3</sup>, LIN Yi-geng<sup>4</sup>, PENG Ya-xiong<sup>5</sup>, WU Li<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>1</sup>

- (1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;  
2. Fuzhou Water Affairs Pingtan Water Diversion Development Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;  
3. Zhejiang Tunnel Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;  
4. Fuzhou City Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;  
5. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Due to the complex environment, electromagnetic interference and instrument error of tunnel engineering, there are a lot of high-frequency noises in the seismic wave signals measured in field blasting. In order to effectively reduce the noise components of the measured signals, the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise(CEEMDAN) is performed on the original signals, and randomness detection of the multi-scale permutation entropy(MPE) is performed on the intrinsic mode function(IMF), so as to remove the IMF component of the noise to achieve the purpose of noise reduction. The processing results of the measured blasting seismic signal show that the method can not only remove the high-frequency noise well but also has little influence on the main part of the seismic signal. Both waveform analysis and noise reduction effect indexes show that the CEEMDAN-MPE algorithm is superior to the EEMD-MPE and CEEMDAN algorithm, which verifies the effectiveness of this method.

**Key words:** tunnel blasting; seismic wave signal; denoising method; CEEMDAN-MPE

由于工程环境复杂、电磁干扰和监测仪器误差等因素影响,实测爆破地震波信号包含大量高频噪声,掩盖了地震波真实信息,直接影响隧道爆破有害效应分析与评价。为了准确掌握隧道爆破地震波波特征、能量特性和衰减规律,必须对实测爆破地震波信号进行降噪处理。小波算法具备较好的时频局域化特征,利用其进行信号降噪处理是一种广泛使用的方法<sup>[1]</sup>。熊正明等利用平移不变小波对爆破振动信号进行去噪处理<sup>[2]</sup>,消除信号的伪吉布斯现象,同时减小降噪后信号与原始信号的误差。路亮等提出了基于提升小波包最优基分解算法的爆破振动信号的降噪和能量提取方法<sup>[3]</sup>,验证了方法的有效性。由于小波变换算法降噪过程中小波基函数和分解层次难以确定,使得这类方法的自适应性不强,降噪效果难以保证<sup>[4,5]</sup>。经验模态分解(EMD)是一种处理非平稳信号的分解方法,对爆破振动信号分解有较好的适应性<sup>[6]</sup>。费鸿禄等将改进 EMD 和小波阈值算法结合进行降噪处理<sup>[7]</sup>,较好地去除了爆破振动信号所含噪声。

自适应噪声的完全集合经验模态分解算法(CEEMDAN)是一种基于 EMD 的改进算法,能够消除人为添加噪声对原始信号完备性的影响,抑制了模态混叠问题又避免了原始信号失真<sup>[8]</sup>。本文通过对信号进行 CEEMDAN 分解,利用多尺度排列熵(MPE)检测分解得到的模态函数(IMF)的随机性,去除噪声 IMF 分量以达到信号降噪的目的,构建了一种适合于隧道爆破地震波信号的降噪方法。将该方法应用于福建省平潭及闽江口水资源配置工程,对实测隧道爆破振动信号进行降噪处理,并验证了方法的有效性。

## 1 信号降噪算法

### 1.1 CEEMDAN

经验模态分解算法(EMD)根据信号的时标特性,将多分量信号分解为一系列固有模态函数分量和剩余分量,并按瞬时频率由高到低的顺序排列,具有良好的适应性、完备性和正交性<sup>[9]</sup>。然而该方法在处理含有不连续、脉冲和噪声的信号时存在模态混叠问题。Torres 等人对 EMD 算法进行改进<sup>[10]</sup>,

提出了自适应噪声的完全集合经验模式分解算法(CEEMDAN)。该算法在 EMD 分解各阶段自适应添加白噪声,计算唯一的残差信号以获取固有模态函数(IMF),能够在集成次数较少的情况下,使得重构误差几乎为零,重构信号与原信号几乎完全相同,并在一定程度上解决了 EMD 算法的模态混叠现象<sup>[11]</sup>。CEEMDAN 的主要步骤如下。

在原始信号  $x(t)$  中添加不同幅值的白噪声  $n_j(t)$ ,可表示为  $x(t) + \varepsilon_0 n_j(t)$ ,其中  $\varepsilon_0$  为噪声系数。利用 EMD 对加噪信号进行  $I$  次分解,通过集成平均得到第一个 IMF 分量。IMF 分量和残差分量如下所示

$$IMF_1(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_{i1}(t) \quad (1)$$

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (2)$$

定义  $EMD_j(\cdot)$  是 EMD 分解的第  $j$  个模态函数。对加噪信号  $r_1(t) + \varepsilon_1 \cdot EMD_1[n_j(t)]$  进行分解  $I$  次分解,得到第二个 IMF 分量

$$IMF_2(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMD_1\{r_1(t) + \varepsilon_1 EMD_1[n_i(t)]\} \quad (3)$$

计算  $k$  阶残差分量

$$r_k(t) = r_{k-1}(t) - IMF_k(t) \quad (4)$$

从  $r_1(t) + \varepsilon_1 \cdot EMD_1[n_j(t)]$  中提取第一个 IMF,得到  $IMF_{k+1}$ 。

$$IMF_{k+1}(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMD_k\{r_k(t) + \varepsilon_k EMD_k[n_k(t)]\} \quad (5)$$

重复上述计算直到残差分量不能继续分解,得到所有的 IMF 分量。

$$r(t) = x(t) - \sum_{k=1}^k IMF_k(t) \quad (6)$$

则原始信号  $x(t)$  可以表示为

$$x(t) = r(t) + \sum_{k=1}^K IMF_k(t) \quad (7)$$

CEEMDAN 算法利用了噪声辅助分析技术,能够完整地重构原始信号。针对不同类型信号,利用噪声系数  $\varepsilon$  加入不同信噪比的白噪音,能够有效地提高分解效果。

### 1.2 多尺度排列熵

多尺度排列熵(MPE)是一种检测信号随机性和动力突变的方法,将时间序列进行多尺度粗粒化,进而计算其排列熵<sup>[12]</sup>。具体步骤如下:

①对时间序列  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_L\}$  进行多尺度粗粒化处理

收稿日期:2020-08-25

作者简介:黄智刚(1977-),男,博士研究生、高级工程师,主要从事地下工程施工与研究工作,(E-mail)1330010036@qq.com。

通讯作者:陈劲(1967-),男,高级工程师,主要从事隧道工程方面的实验工作,(E-mail)zfx@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(41672260);湖南省自然科学基金项目(2020JJ5163);湖南省教育厅科学研究项目(19C0736)

$$y_j^s = \frac{1}{s} \sum_{i=(j-1)s+1}^{js} x_i, 1 \leq j \leq L \quad (8)$$

式中:  $s$  为尺度因子;  $y_j^s$  为多尺度时间序列。当尺度因子  $s$  为 1 时, 其时间序列  $y_j^1$  为原始时间序列, 计算结果为排列熵值。

②对时间序列  $y_j^s$  进行重构, 可得

$$Y_i^s = \{y_i^s, y_{i+\tau}^s, y_{i+(m-1)\tau}^s\} \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为时间延迟;  $m$  为嵌入维数。

③对时间重构序列  $Y_i^s$  按升序排列, 序列共有  $m!$  种排列, 每种排列类型出现的次数  $N_l$ , 对应出现的概率为  $P_l^s$

$$y_{i+(j_1-1)\tau}^s \leq y_{i+(j_2-1)\tau}^s \leq \dots \leq y_{i+(j_m-1)\tau}^s \quad (10)$$

$$P_l^s = \frac{N_l}{n/s - m + 1} \quad (11)$$

④计算尺度因子为  $s$  时信号  $Y_i^s$  的排列熵

$$H_p^s = - \sum_{l=1}^{m!} P_l^s \ln P_l^s \quad (12)$$

⑤对上述计算的排列熵进行归一化处理

$$h_p^s = H_p^s / \ln(m!) \quad (13)$$

CEEMDAN-MPE 算法是对原始信号进行 CEEMDAN 分解得到 IMF 分量, 对各 IMF 分量进行多尺度排列熵的随机性检测, 计算得到各分量信号的 MPE 平均值。当 MPE 平均值大于设定的熵值时, 则被认为是异常或噪声成分, 将这些成分从原始信号中剔除, 达到降噪的目的。采用该算法对信号进行降噪处理, 避免了不必要的集成平均, 减小了计算量和添加白噪声的重构误差, 保证了分解算法的完备性; 有效地去除了原始信号中的噪声成分, 能够获得较好的降噪效果。

### 1.3 降噪效果评价指标

为研讨爆破地震波信号的降噪效果, 采用信噪比  $\xi$ 、降噪后信号和原始信号的均方根误差  $\varepsilon$  作为评价指标<sup>[13]</sup>, 如下所示:

(1) 信噪比  $\xi$

$$\xi = 10 \lg \left( \frac{\sum_{m=1}^M (x_m)^2}{\sum_{m=1}^M (x_m - \tilde{x}_m)^2} \right) \quad (14)$$

(2) 均方根误差  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_m - \tilde{x}_m)^2} \quad (15)$$

式中:  $M$  为采样点个数;  $x_m$  是原始信号第  $m$  个采样点数据;  $\tilde{x}_m$  是降噪后信号第  $m$  个采样点数据。

$\xi$  反映了原始信号和噪声的能量关系,  $\xi$  越大表明降噪后信号更好地保留了原始信号含有的信息与

特征。 $\varepsilon$  反映了噪声的平均能量值, 体现了降噪后信号与原始信号的相似程度, 通常  $\varepsilon$  越小降噪效果越好。此外, 除了采用定量参数客观评价降噪效果, 还应该分析降噪前后信号的波形特征, 确保特征波形的一致性和明显噪点已经去除干净。

## 2 工程应用

### 2.1 工程简介

福建省平潭及闽江口水资源配置工程是一项跨区域的重大水利工程, 属于国务院推进建设的 172 项节水供水工程之一。工程第 4 标段(大樟溪~石溪输水线路)由主洞和多条支洞组成, 隧洞累计长度高达 42078 m。隧洞区沿线分布的地层岩性主要有流纹岩、凝灰岩、凝灰质砂砾岩、凝灰质砂岩等, 埋深一般在 70~180 m, 最大埋深 520 m。

输水隧洞采用光面爆破开挖, 现场爆破监测采用 TC-4850 型测振仪。选取主洞爆破开挖的一条实测典型地震波信号为研究对象(如图 1), 信号采样频率为 4000 sps, 根据 Nyquist 采样定理, 实测信号的 Nyquist 频率为 2000 Hz, 采用时间为 1s, 共采集 4000 个采样点。

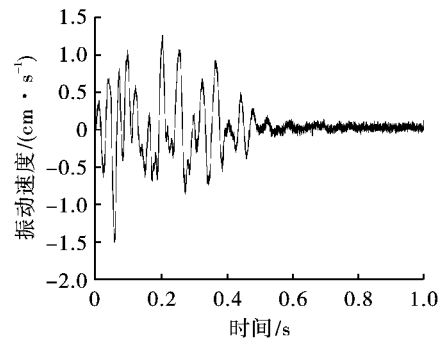


图 1 爆破地震波信号

Fig. 1 Blasting seismic wave signal

### 2.2 降噪处理与分析

对现场监测的地震波信号进行 CEEMDAN 分解, 分解过程中加入了 200 组信号标准差为 0.2 的高斯白噪声, 分解得到的各 IMF 分量如图 2 所示。

由图 2 可知, 原始信号经过 CEEMDAN 分解后共得到 12 个 IMF 分量,  $IMF_1 \sim IMF_{12}$  的中心频率逐渐降低, 高频噪声对 IMF 分量的影响逐渐减弱, IMF 分量所含真实信号成分不断增加。根据 IMF 分量的波形和中心频率变化, 可以推断  $IMF_1 \sim IMF_5$  可能为高频噪声分量,  $IMF_6 \sim IMF_{12}$  则为地震波真实信息。

为了准确确定真实信号成分和噪声, 利用多尺度排列熵方法计算各 IMF 分量的 MPE 值。计算过程中, 需要选取合适的嵌入维数  $m$ 、时间延迟  $\tau$  和尺

度因子  $s$ , 经过多次试算取  $m = 6, \tau = 1, s = 5$ 。计算 得到各 IMF 分量的 MPE 平均值如表 1 所示。

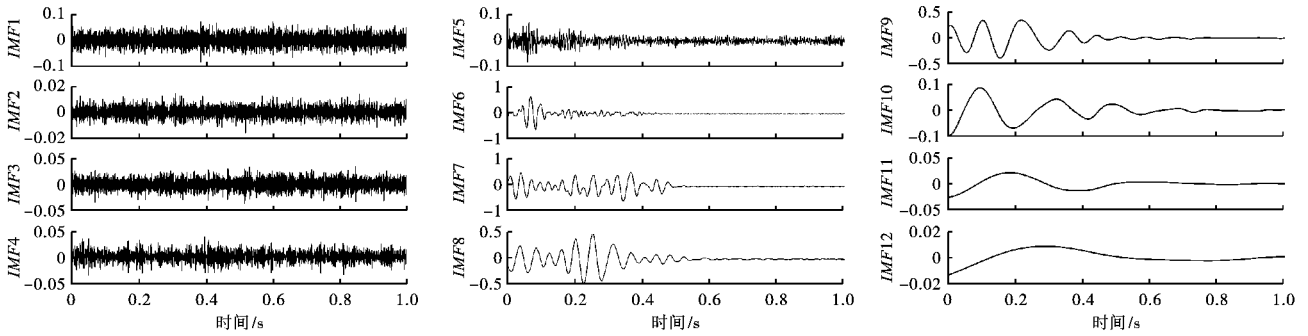


图2 IMF 分量信号

Fig. 2 IMF component signals

表 1 IMF 分量的 MPE 平均值

Table 1 Mean MPE of IMF

分量	$IMF_1$	$IMF_2$	$IMF_3$	$IMF_4$	$IMF_5$	$IMF_6$	$IMF_7$	$IMF_8$	$IMF_9$	$IMF_{10}$	$IMF_{11}$	$IMF_{12}$
MPE	0.9134	0.9056	0.8806	0.8446	0.7316	0.5376	0.3392	0.2451	0.1859	0.1472	0.1211	0.1121

由表 1 可知  $IMF_1 \sim IMF_{12}$ , MPE 平均值是逐渐减小的, 说明噪声成分逐渐减少, 说明噪声对不同 IMF 分量影响不同, 与上述波形分析结果一致。对于爆破地震波信号<sup>[14]</sup>, 通常有效信号成分的 MPE 阈值为 0.6,  $IMF_1 \sim IMF_5$  的 MPE 平均值大于阈值为

噪声信号成分, 需要将其从原始信号中除去。因此, 得到降噪后爆破地震波信号如图 3 所示。采用 AOK 时频技术<sup>[15]</sup> 分别对原始信号和降噪后信号进行处理, 得到二者的时频谱如图 3 ~ 图 4 所示, 图中  $X$  为峰值能量,  $Y$  为主频。

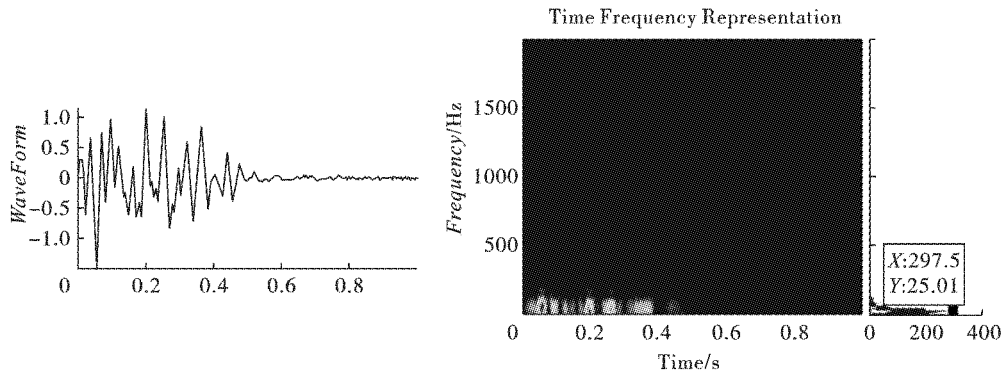


图3 降噪后信号与时频谱图

Fig. 3 Waveform and time-frequency spectrum of denoised signal

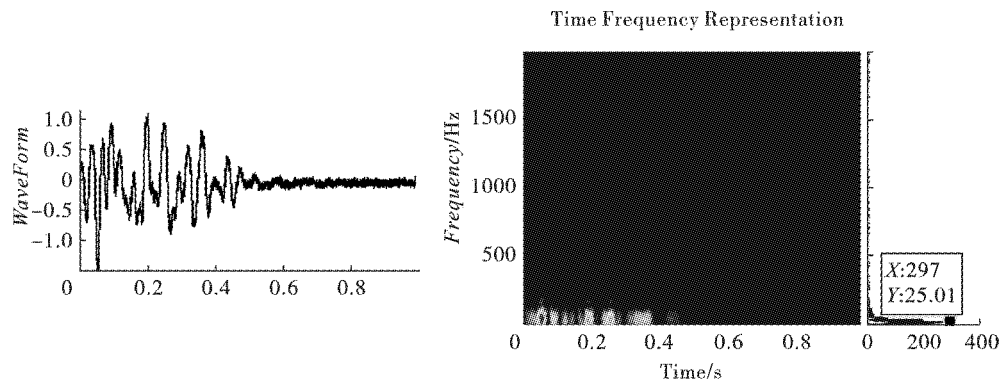


图4 原始信号与频谱图

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

对比图3和图4,与实测爆破地震波原始信号相比,降噪后信号的噪声成分明显减少,更好地反映了地震波波形特征。由频谱图可知,通过降噪处理去除了信号的高频成分,对信号的主频没有影响,峰值能量也仅降低了0.5。说明CEEMDAN-MPE算法不仅能成功地去除高频噪声能量,而且对地震波信号所含主要信息的影响极小。

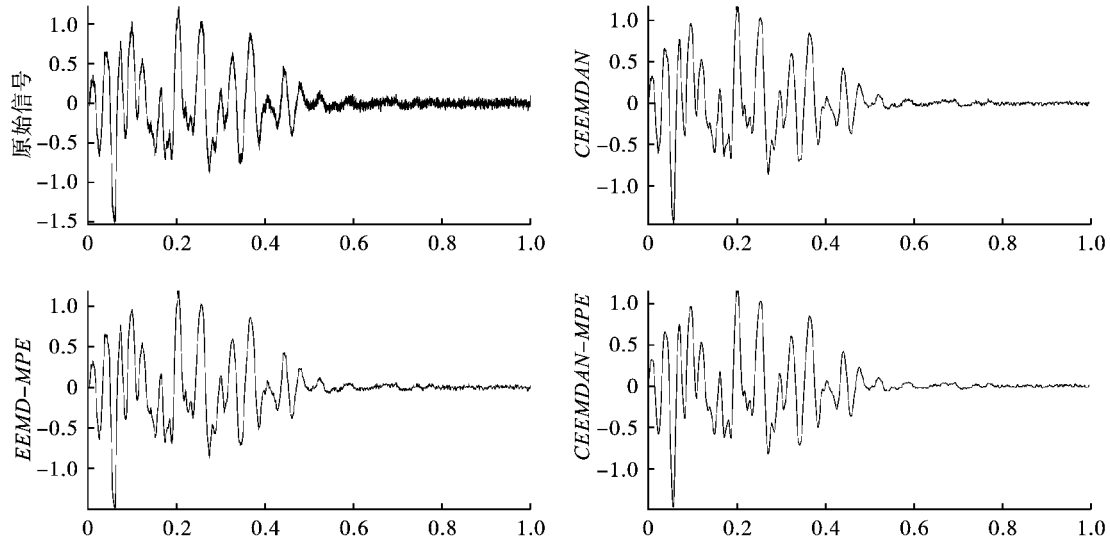


图5 原始信号与降噪后信号对比

Fig. 5 Comparison between original signal and denoised signal

表2 爆破振动信号降噪效果指标

Table 2 Denoised effect index of blasting vibration signals

降噪算法	信噪比 $\xi$ /dB	均方根误差 $\varepsilon/\times 10^{-2}$
EEMD-MPE	19.89	3.35
CEEMDAN	20.64	3.27
CEEMDAN-MPE	23.49	2.85

由表2可知,CEEMDAN-MPE算法的信噪比 $\xi$ 为23.49 dB,均大于EEMD-MPE和CEEMDAN算法,表明该算法得到的降噪后信号更好地保留了原始信号含有的信息与特征;CEEMDAN-MPE算法的均方根误差 $\varepsilon$ 最小,说明降噪后信号与原始信号有更高的相似度。表明CEEMDAN-MPE算法在处理爆破地震波信号中具有更好降噪效果。由图5可以看出,CEEMDAN-MPE算法将爆破地震波所含噪声成分基本去除干净,能够很好的展现其波形特征;而EEMD-MPE降噪后的信号仍有明显的噪声,CEEMDAN降噪后的信号则在峰值点处有较为明显噪声。其主要原因是,EEMD分解过程中加入了白噪声,以减少模态混叠现象,但由于加入的白噪声无法消除,导致降噪效果不理想;CEEMDAN方法成对加入白噪声,消除了白噪声的影响。通过计算IMF分量的MPE平均值,能够更好的判断各分量所含噪声成

### 2.3 降噪效果对比

为验证CEEMDAN-MPE算法的有效性,采用EEMD-MPE算法、CEEMDAN阈值算法对上述实测地震波信号降噪处理。原始信号与降噪后信号如图5所示。计算信噪比 $\xi$ 、降噪后信号和原始信号的均方根误差 $\varepsilon$ ,如表2所示。

分,去除高频噪声成分,提高了降噪效果。因此,由波形分析和降噪效果指标可知,CEEMDAN-MPE算法的降噪效果优于EEMD-MPE和CEEMDAN算法。

## 3 结论

由于工程环境和监测设备的影响,隧道爆破实测地震波信号中不可避免的存在大量噪声,掩盖了真实信号所包含信息,不利于爆破振动效应分析与控制。针对这一问题提出了CEEMDAN和MPE相结合的算法用于地震波信号降噪处理。主要研究结论如下:

(1)利用CEEMDAN算法对隧道爆破地震波信号进行分解,得到不同频带的IMF分量,对各IMF分量进行多尺度排列熵的随机性检测,利用MPE熵值去除噪声IMF分量,达到降噪的目的。工程应用表明该方法达到较好地去除高频噪声的目的。

(2)利用AOK时频分析技术,对比分析降噪前后地震波信号的时频特征,说明通过CEEMDAN-MPE算法的降噪处理去除了信号的高频成分,对地震波信号所含主要信息的影响极小。

(3)将EEMD-MPE、CEEMDAN和CEEMDAN-MPE三种算法的降噪效果进行对比分析,三种方法

均具有一定的降噪效果。波形分析和降噪效果指标均表明 CEEMDAN-MPE 算法的降噪效果最优,验证了基于该方法的有效性,对隧道爆破地震波信号降噪及分析具有指导意义。

参考文献 (References)

[1] 高勇军,陈小波,王伟策.小波分析在爆破地震信号降噪中的应用[J].爆破,1999,16(3):3-7.

[1] GAO Yong-jun, CHEN Xiao-bo, WANG Wei-ce. Applications of wavelet analysis in blasting seismic signals denoising[J]. Blasting, 1999, 16(3): 3-7. (in Chinese)

[2] 熊正明,中国生,徐国元.基于平移不变小波爆破振动信号去噪的应用研究[J].金属矿山,2006(2):12-14.

[2] XIONG Zheng-ming, ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan. Application of de-noising for blasting vibration signals based on translation invariant wavelet [J]. Metalmine, 2006(2): 12-14. (in Chinese)

[3] 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.

[3] 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)

[4] 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.

[4] 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)

[5] 张杏莉,卢新明,贾瑞生,等.基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法[J].煤炭学报,2018,43(2):356-363.

[5] ZHANG Xing-li, LU Xin-ming, JIA Rui-sheng, et al. Micro-seismic signal denoising method based on variational mode decomposition and energy entropy [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 356-363. (in Chinese)

[6] 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.

[6] 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)

[7] 费鸿禄,刘梦,曲广建,等.基于集合经验模态分解-小波阈值方法的爆破振动信号降噪方法[J].爆炸与冲击,2018,38(1):112-118.

[7] FEI Hong-lu, LIU Meng, QU Guang-jian, et al. A method for blasting vibration signal denoising based on ensemble empirical mode decomposition-wavelet threshold [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 112-118. (in Chinese)

[8] 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.

[8] 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)

[9] HUANG NE, SHEN Z, LONG SR, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454: 903-995.

[10] TORRES ME, COLOMINAS, MARCELOA, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C] // Acoustics, Speech and Signal Processing, 2011 IEEE International Conference on IEEE, 2011: 4144-4147.

[11] 闫琦,杨冬梅,张凤云,等.基于 CEEMDAN-SSA 的 MEMS 加速度计振动噪声抑制方法[J].火力与指挥控制,2019,44(8):168-171,176.

[11] YAN Qi, YANG Dong-mei, ZHANG Feng-yun, et al. Denoising method for mems accelerometers based on CEEMDAN-SSA [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(8): 168-171, 176. (in Chinese)

[12] 张建财,高军伟.基于变分模态分解和多尺度排列熵的滚动轴承故障诊断[J].噪声与振动控制,2019,39(6):181-186.

[12] ZHANG Jian-cai, GAO Jun-wei. Fault diagnosis of train rolling bearings based on variational modal decomposition and multi-scale permutation entropy [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(6): 181-186. (in Chinese)

[13] 孙远,杨峰,郑晶,等.基于变分模态分解和小波能量熵的微震信号降噪[J].矿业科学学报,2019,4(6):469-479.

[13] SUN Yuan, YANG Feng, ZHENG Jing, et al. Research on microseismic signal denoising based on variational mode decomposition and wavelet energy entropy [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 469-479. (in Chinese)

[14] 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.

- [14] 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]. *Ming R & D*, 2019, 39(10): 11-15. (in Chinese)
- [15] 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(武汉), 2018.
- [15] 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)

英文编辑: 袁必和

(上接第 110 页)

### 参考文献 (References)

- [1] 牛玉学, 王 铁, 孟凡金, 等. 伞状钢筋混凝土水塔爆破拆除技术[J]. *西部探矿工程*, 2019, 31(6): 174-177.
- [1] NIU Yu-xue, WANG Tie, MENG Fan-jin, et al. Blasting demolition technology of umbrella reinforced concrete water tower[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2019, 31(6): 174-177. (in Chinese)
- [2] 邓永兴, 付世玉, 马宏昊, 等. 特殊情况下水塔定向爆破及振动分析[J]. *工程爆破*, 2018, 24(5): 50-58.
- [2] DENG Yong-xing, FU Shi-yu, MA Hong-hao, et al. Directional blasting and vibration analysis of water tower with special circumstances [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(5): 50-58. (in Chinese)
- [3] 周凤仪. 钢筋混凝土水塔爆破失败原因分析[J]. *采矿技术*, 2005(3): 114-115.
- [3] ZHOU Feng-yi. Failure analysis of reinforced concrete water tower blasting[J]. *Mining Technology*, 2005(3): 114-115. (in Chinese)
- [4] 谢先启, 刘昌邦, 贾永胜, 等. 38 m 高倒锥形钢筋砼水塔控爆拆除[J]. *爆破*, 2009, 26(2): 61-63.
- [4] XIE Xian-qi, LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, et al. Controlled blasting demolition of 38 m high reverse cone shape RC water tower[J]. *Blasting*, 2009, 26(2): 61-63. (in Chinese)
- [5] 谢瑞峰, 傅菊根, 宗 琦. 钢筋混凝土水塔爆破拆除[J]. *工程爆破*, 2009, 15(2): 74-75.
- [5] XIE Rui-feng, FU Ju-gen, ZONG Qi. Blasting demolition of a reinforced concrete water tower[J]. *Engineering Blasting*, 2009, 15(2): 74-75. (in Chinese)
- [6] 张松峰, 雷 振, 高文蛟, 等. 伞形钢筋混凝土水塔爆破拆除[J]. *爆破*, 2018, 35(4): 90-93, 135.
- [6] ZHANG Song-feng, LEI Zhen, GAO Wen-jiao, et al. Explosive demolition of umbrella reinforced concrete water tower[J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 90-93, 135. (in Chinese)
- [7] 张 华, 陈龙伟, 郑德明, 等. 复杂环境下钢筋砼水塔精确控制定向爆破拆除[J]. *爆破*, 2010, 27(2): 68-70.
- [7] ZHANG Hu, CHEN Long-wei, ZHENG De-ming, et al. Directional explosive demolition of reinforced concrete water tower under complicated surrounding[J]. *Blasting*, 2010, 27(2): 68-70. (in Chinese)
- [8] 陆志民, 徐志斌. 薄壁伞形钢筋砼结构水塔爆破拆除[J]. *爆破*, 2010, 27(3): 61-63.
- [8] LU Zhi-min, XU Zhi-bin. Explosive demolition of thin walled umbrella shape RC water tower[J]. *Blasting*, 2010, 27(3): 61-63. (in Chinese)
- [9] 刘世波. 百米以上钢筋混凝土烟囱拆除爆破研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2004.
- [9] LIU Shi-bo. Study on higher than 100 meters reinforced concrete chimney blasting demolition [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2004. (in Chinese)
- [10] 谢春明, 杨 军, 薛 里. 高耸筒形结构爆破拆除的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 73-78.
- [10] XIE Chun-ming, YANG Jun, XUE Li. Numerical simulation of towering tubby structure blasting demolition[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 73-78. (in Chinese)
- [11] 李守巨, 刘玉晶. 爆破拆除砖烟囱爆破切口范围的计算[J]. *工程爆破*, 1999(2): 1-4.
- [11] LI Shou-ju, LIU Yu-jing. Calculation on gap length of brick chimney in demolition blasting [J]. *Engineering Blasting*, 1999(2): 1-4. (in Chinese)
- [12] 王 健. 高耸烟囱爆破拆除安全性的力学分析[D]. 唐山: 河北理工大学, 2005.
- [12] WANG Jian. Mechanics analysis on safety of demolition of tall chimneys by controlled blasting [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [13] 傅菊根, 姜建农, 张宇本. 高耸建筑物爆破拆除切口高度理论计算[J]. *工程爆破*, 2006(2): 56-58.
- [13] FU Ju-gen, JIANG Jian-nong, ZHANG Yu-ben. Theoretical calculation of notched height about tower building demolished by blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2006(2): 56-58. (in Chinese)

英文编辑: 柯 波