

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.06.010

基于 CEEMDAN 法的隧道爆破信号趋势项去除^{*}

张 佳^① 赵 岩^②

①山西工程科技职业大学(山西太原,030031)

②中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院(北京,100083)

[摘 要] 以京张高铁某隧道工程为背景,引入一种通过 CEEMDAN(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise)法消除隧道爆破信号趋势项的方法。首先,利用 CEEMDAN 法分解实测爆破信号,得到一系列本征模态分量及余项。然后,通过均值比法识别筛选信号趋势项的有效组成部分,并去除含有趋势项的分量。为验证 CEEMDAN 法去趋势项的可行性,通过数值仿真信号进行校核。结果表明,与现有 EMD(empirical mode decomposition)法、EEMD(ensemble empirical mode decomposition)法比较,基于 CEEMDAN 法筛选得到的趋势项与人为添加的趋势项最为接近。同时,利用此方法处理实测爆破信号,解决了原始信号中存在的基线偏移及低频超高异常等问题。

[关键词] 隧道爆破振动信号;数值仿真;CEEMDAN;去趋势项

[分类号] O382

Removal of Trend Items of Tunnel Blasting Signals Based on CEEMDAN

ZHANG Jia^①, ZHAO Yan^②

① Shanxi Vocational University of Engineering Science (Shanxi Taiyuan, 030031)

② School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing) (Beijing, 100083)

[ABSTRACT] Based on a tunnel project of the Beijing-Zhangjiakou high-speed railway, a method of eliminating trend items of tunnel blasting signal through CEEMDAN (complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise) was introduced. Firstly, CEEMDAN was used to decompose the measured blasting signal to obtain a series of eigenmode components and residual terms. Then, effective component of trend item of the initial signal was identified by the mean ratio method, and the component containing the trend item was removed. In order to verify the feasibility of removing trend item by CEEMDAN method, it was checked by numerical simulation signal. Results show that, compared with EMD (empirical mode decomposition) method and EEMD (ensemble empirical mode decomposition) method, the trend item obtained by CEEMDAN is closest to the artificially added trend item. At the same time, this method is used to process the measured blasting signals, which solves the problems of baseline offset and low-frequency super-high abnormality in original signals.

[KEYWORDS] tunnel blasting vibration signal; numerical simulation; CEEMDAN; removal of trend item

引言

爆破施工由于经济效益好、回报率高、操作易行等优点已被广泛应用于隧道掘进、矿山开采、坝体修建等大型土建工程中^[1-3]。然而,爆破施工带来的飞石、有害气体及爆破振动等附加产物均会对人体及周边环境造成不利影响。其中,隧道爆破施工引起

的振动效应极易危害建(构)筑物的正常运营及结构安全。

爆破振动信号分析是研究爆破振动效应的主要途径^[4-5]。爆破振动信号采集过程中,受采样环境及测试仪器的影响,采集到的信号往往会出现时程波形偏离中心基线的现象,即产生趋势项^[6]。受趋势项的影响,实测信号的时域分析及频谱分析准确性下降,甚至会出现低频信号失真的现象。因此,有必

^{*} 收稿日期:2021-04-08
基金项目:山西交通控股集团有限公司科技项目(19-JKKJ-46);国家自然科学基金(51878242)
第一作者:张佳(1984-),男,硕士,讲师,主要研究方向为隧道与地下工程的施工技术、质量检测以及变形监测等。E-mail:24175702@qq.com
通信作者:赵岩(1991-),男,博士研究生,主要研究方向为爆破振动及损伤。E-mail:304965624@qq.com

要在信号分析前对爆破振动信号进行趋势项的消除处理。

目前,信号趋势项消除的方法主要包括最小二乘拟合法^[7]、小波法^[8]、EMD(empirical mode decomposition)法^[9]、EEMD(ensemble empirical mode decomposition)法^[10]、VMD(变分模态分解, variational mode decomposition)法^[11]等。

最小二乘法通过多项式拟合逼近原始信号,去除信号中的趋势部分,但其去除效果与多项式函数的阶次选择有关,受主观影响较大。小波法适用于非稳态信号的处理,但选取不同小波基函数、不同分解深度可能会得到不同的结果。因此,以上两种方法均要求研究人员具有一定的经验。

EMD 法根据信号特征可以将原始信号分解为一系列频率由高到低排列的本征模态分量,不需要过多的经验就可以识别信号趋势项,具有自适应性;但 EMD 过程中存在端点效应及模态混叠等问题,影响识别效果。为了解决 EMD 法存在的问题,EEMD 法、CEEMD(complementary ensemble empirical mode decomposition)法^[12]、VMD 法、PEMD^[13](PCA 联合 EMD)法等改进方法被应用于信号预处理中。EEMD 法与 CEEMD 法以 EMD 法为基础,在信号中加入高斯白噪声来抑制模态混叠;但受算法本身限制,分解过程中常常会残留白噪声,影响分解效果。VMD 法通过迭代搜寻变分模型最优解,自适应地实现信号的频域剖分,可有效识别低频信号;但 VMD 法分解效果受信号频率及振幅的影响较大,只有在特定频率、振幅范围内才能得到满意效果。PEMD 法在 EMD 法中引入主成分分析,得到多个完全正交的模态分量,解决了模态混叠的问题;然而,PEMD 法只重构了累计贡献率超过 85% 的主成分^[13],并未真正对信号趋势项进行识别。

为解决上述问题,引入一种基于 CEEMDAN^[14-16]法的趋势项去除方法。CEEMDAN 法以 EEMD 法、CEEMD 法为基础,很好地解决了分解残留白噪声的问题;同时,相比于 VMD 法、PEMD 法、自适应连续波法等,CEEMDAN 法不受信号自身条件限制,具有较强的自适应性,可提高识别精度。

1 CEEMDAN 趋势项去除

1.1 CEEMDAN 原理

EEMD 法及 CEEMD 法解决了 EMD 法存在的模态混叠问题,但分解过程中并不能完全消除添加的噪声信息,从而影响信号趋势项的消除效果。

CEEMDAN 法^[17-19]法从两方面解决了分解存在的问题:1)每一次分解完成后加入成对正负高斯白噪声;2)每分解得到一阶本征模态分量,随即进行 1 次平均计算,直至整个分解过程结束。如此操作,可以在 EEMD 法及 CEEMD 法的基础上解决白噪声的残留问题。

设 $\overline{u_i(t)}$ 为第 i 个本征模态分量, v^j 为人工合成的白噪声信号, $z(t)$ 为待分解信号。

首先,将人工白噪声加入到待分解信号中,得到 $z(t) + (-1)^p \varepsilon v^j(t)$,其中, $p=1$ 或 2。通过 EMD 法得到第一阶本征模态分量:

$$E[z(t) + (-1)^p \varepsilon v^j] = u_1^j(t) + R^j. \quad (1)$$

对得到的本征模态分量进行算数平均计算:

$$\overline{u_1(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_1^j(t). \quad (2)$$

计算得到残差项为

$$R_1(t) = z(t) - \overline{u_1(t)}. \quad (3)$$

在 $R_1(t)$ 中再次加入高斯白噪声,并通过 EMD 法得到本征模态分量 O_1^j ,进而得到了第二阶模态分量为:

$$\overline{u_2(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N O_1^j(t). \quad (4)$$

计算去除第二阶模态分量的残差:

$$R_2(t) = R_1(t) - \overline{u_2(t)}. \quad (5)$$

循环上述步骤,直至获得的残差分量为单调函数。记得到的本征模态分量数量为 L ,则信号 $z(t)$ 可以被分解为

$$z(t) = \sum_{l=1}^L \overline{u_l(t)} + R_L(t). \quad (6)$$

1.2 趋势项判别方法

采用均值比法^[20]识别 CEEMDAN 法分解得到的本征模态分量 u 及余项 R ,判断哪些分量包含信号趋势项。

1)求得原始信号、模态分量 u 以及余项 R 的均值为:

$$\overline{z(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n z(t_i)}{n}; \quad (7)$$

$$\overline{u_l} = \frac{\sum_{i=1}^n u_l(t_i)}{n}. \quad (8)$$

式中: n 表示信号长度; u_l 为第 l 个模态分量($l=1, 2, \dots, L$)。

2)计算得到每个模态分量及余项与原始信号的均值比:

$$g_l = \frac{\overline{u_l}}{\overline{z(t)}}. \quad (9)$$

3)从余项开始,反向累加余项及各个模态分量的均值比 G ,直至 $G>0.95$:

$$G=\sum_{l=P}^Lg_l。$$

(10)

4)当 $G\geqslant 0.95$ 时,停止计算,认为第 L 列至第 P 列余项及模态分量之和为信号趋势项。

2 仿真计算

为了验证引入的 CEEMD 法趋势项消除方法的可行性及普适性,首先利用正弦信号 $v(t)=(1+0.5\sin0.5\pi)\sin165\pi t$ 添加人为趋势项,从而进行仿真计算。

$$\mu(t)=v(t)+m(t);$$

(11)

$$m(t)=3e^{-1.47t}-0.02t^3-0.50t^2+2.05t-1.50。$$

(12)

式中: $v(t)$ 为无趋势项信号; $m(t)$ 为人为添加的趋势项; $\mu(t)$ 为添加趋势项的混合信号。

为模拟真实监测环境中复杂的监测条件,人为添加的趋势项包含线性、多项式及指数型 3 种趋势项模式^[21]。

人为添加趋势项如图 1 所示;添加趋势项前、后的仿真信号见图 2。

利用 CEEMDAN 法将混合信号 $\mu(t)$ 分解为 13 个本征模态分量及一个余项,并计算模态分量及余项与初始信号的均值比,计算结果见表 1。

从表 1 可知,余项 R 与 u_{13} 的均值比累加值超过 0.95。根据均值比法,可以认为 R 与 u_{13} 的重构信号

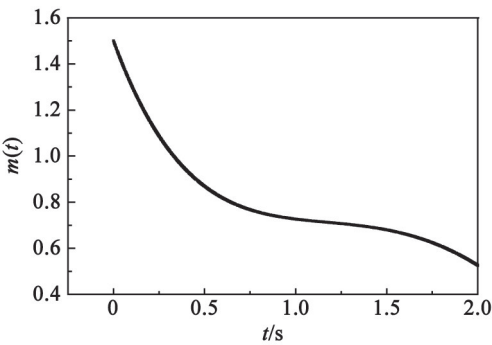
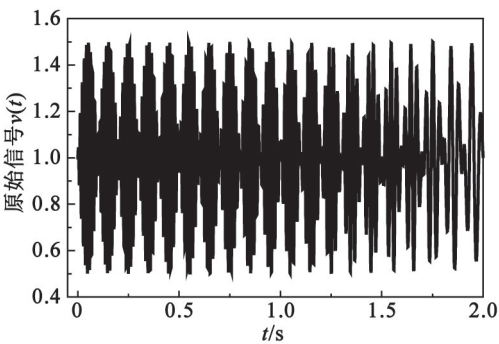
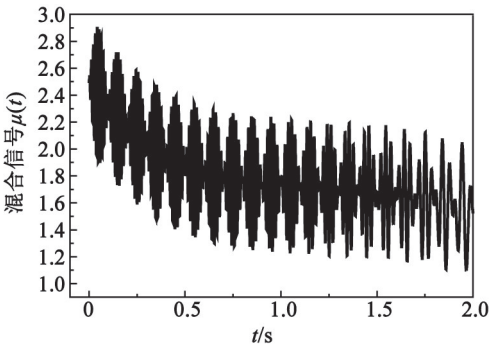


图 1 趋势项时程曲线

Fig. 1 Time history curve of the trend item



(a) 初始信号



(b) 混合信号

图 2 初始信号及混合信号的时程曲线

Fig. 2 Time history curves of initial signals and mixed signals

为信号的趋势项。

作为对比,分别应用 EMD 法及 EEMD 法识别信号趋势项,并将 EMD 法、EEMD 法、CEEMDAN 法识别筛选出的信号趋势项与人为添加的趋势项绘制于图 3。

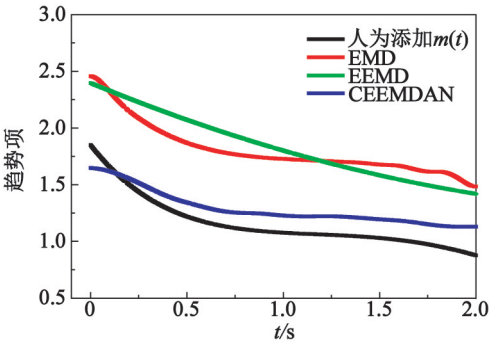


图 3 不同方法识别的仿真信号中的趋势项对比

Fig. 3 Comparison of trend items in simulation signals identified by different methods

表 1 模态分量及余项与初始信号的均值比

Tab. 1 Mean ratio of the modal components and the residual term to the initial signal

参数	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	R
均值比	6.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	-8.0×10^{-6}	6.1×10^{-2}	-6.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	-5.0×10^{-4}	-7.0×10^{-5}	2.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.5×10^{-1}	0.848 2

由图 3 可知,EMD 法、EEMD 法、CEEMDAN 法 3 种方法均可以从仿真信号中提取趋势项,但不同分解方法会得到不同的识别结果。其中,CEEMDAN 法提取结果更接近人为添加的趋势项。

为了进一步验证 CEEMDAN 法分解在识别信号方面的优势,分别计算 3 种方法提取出的趋势项与人为添加趋势项 $m(t)$ 的平均误差、最大误差及均方根差,计算结果见表 2。

表 2 不同识别方法的统计性参数
Tab. 2 Statistical parameters of different identification methods

识别方法	平均误差	最大误差	均方根差
EMD 法	0.648 7	0.666 0	0.634 2
EEMD 法	0.681 6	0.853 1	0.692 4
CEEMDAN 法	0.131 7	0.253 3	0.363 0

由表 2 可知:与 EMD 法相比,CEEMDAN 法提取结果的平均误差、最大误差及均方根差分别下降 79.69%、61.62%、42.76%;与 EEMD 法提取结果相比,CEEMDAN 法的平均误差、最大误差及均方根差分别下降 80.67%、70.30%、42.76%。因此,证明 CEEMDAN 法识别筛选出的趋势项与原添加趋势项相似度最高。

综上所述,CEEMDAN 法在数值仿真领域应用效果良好,为后续实测爆破信号中的应用奠定了一定的理论基础。

3 实例分析

以京张高铁某隧道爆破工程为例,研究 CEEMDAN 法在实测爆破信号趋势项识别中的应用。隧道位于河北省张家口市宣化区陈家庄附近,穿越草帽山主山脉。隧道围岩主要为全风化凝灰岩。凝灰岩具有中等膨胀性,遇水力学性质会出现明显劣化,给隧道爆破施工带来了困难。图 4 为隧道进口施工场地布置图^[22]。

利用 TC-4850 爆破测振仪采集现场爆破振动信



图 4 隧道场地布置
Fig. 4 Site layout of the tunnel

号,采样频率为 5 000 Hz,测振仪最小工作频率为 5 Hz,可以通过配套的处理软件对实测信号进行分析。具体测点布置见图 5^[23]。典型爆破信号时程曲线及功率谱密度如图 6、图 7 所示。



图 5 测点布置
Fig. 5 Layout of measuring points

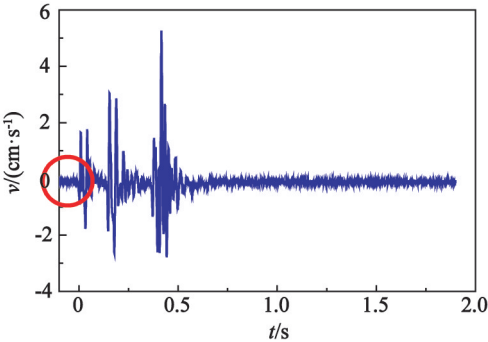


图 6 典型爆破振动信号的时程曲线
Fig. 6 Time history curve of typical blasting vibration signal

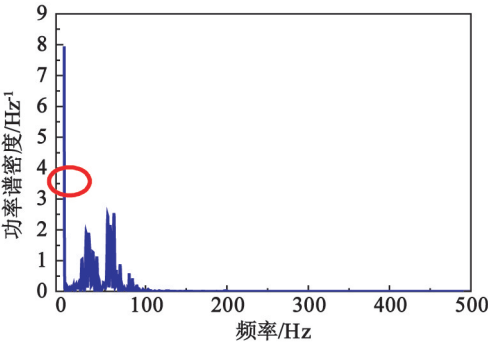


图 7 典型爆破振动信号的功率谱密度
Fig. 7 Power spectrum of typical blasting vibration signal

由图 6 可知,受监测环境及低频振动的影响,爆破振动信号在起点处表现出明显的零点漂移。从图 7 信号功率谱密度可以看出,在 0~5 Hz 范围内,爆破信号存在明显的低频超高异常幅值,严重影响了信号分析的准确性。因此,有必要在信号分析前对实测信号进行趋势项消除处理。

首先,利用 CEEMDAN 法将实测信号分解为 15

个本征模态分量及 1 个余项,具体波形如图 8 所示。计算各个模态分量及余项的均值比,结果见表 3。

由表3可知,余项 R 与模态分量 u_{15} 的均值比累加

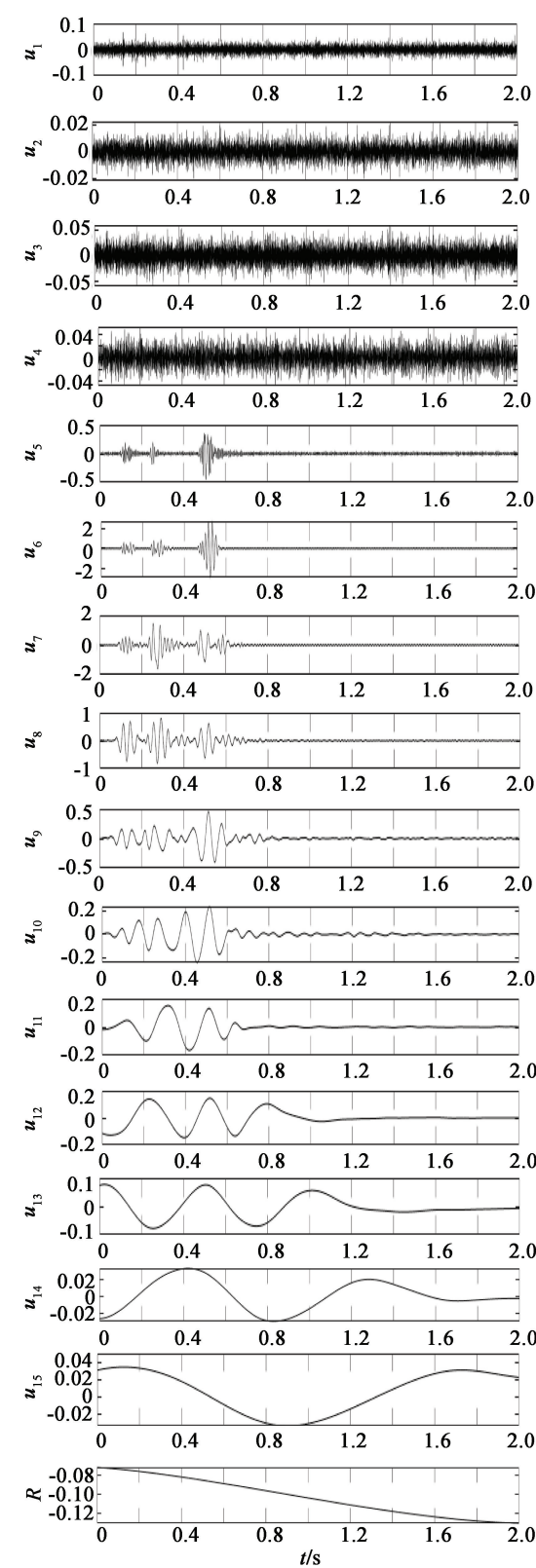


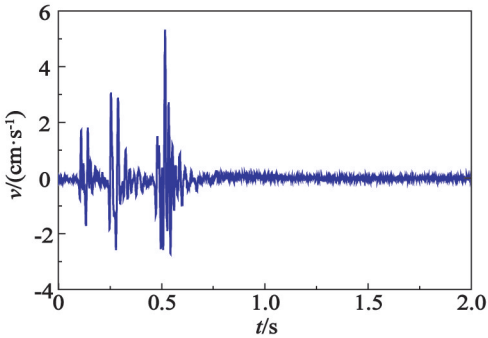
图 8 本征模态分量及余项的波形

Fig. 8 Waveform of eigenmode components and the residual term

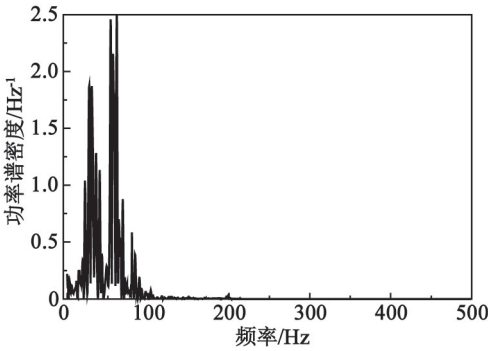
表 3 各模态分量及余项与原始信号均值比
Tab.3 Mean ratio of each modal component and the residual term to the original signal

模态分量	均值比	模态分量	均值比
u_1	3.8×10^{-4}	u_9	0.014 9
u_2	2.9×10^{-4}	u_{10}	0.014 8
u_3	2.3×10^{-4}	u_{11}	-0.003 1
u_4	2.6×10^{-4}	u_{12}	0.014 0
u_5	-7.9×10^{-4}	u_{13}	0.020 6
u_6	0.017 0	u_{14}	-0.012 8
u_7	0.077 8	u_{15}	0.055 9
u_8	0.007 1	R	0.905 2

值超过 0.95,根据均值比识别准则,余项 R 与模态分量 u_{15} 可以视为信号趋势项有效组成部分。因此,在原始信号的基础上去除 R 与 u_{15} 分量,得到消除趋势项的修正信号及功率谱密度曲线如图 9 所示。



(a) 时程曲线



(b) 功率谱密度

图 9 去趋势项后振动信号的时程曲线及功率谱密度
Fig.9 Time history curve and power spectral density of blasting vibration signal after the removal of trend item

对比图 6 与图 9(a)可以发现,经 CEEMDAN 法去趋势项处理后,基本消除了爆破信号中的零点漂移现象,信号的基线偏离问题得到了解决。此外,由图 9(b)可知,经预处理后的爆破振动信号功率谱密度消除了原始信号频谱中的超高幅异常低频分量,修正信号的主频集中在 62 Hz 附近,满足爆破信号主频率的分布范围^[24-25]。

4 结 论

以京张高铁某隧道为工程背景,引入一种基于 CEEMDAN 法消除隧道爆破信号趋势项的方法,并通过数值仿真验证了其普适性。

1) CEEMDAN 法通过优化算法消除了 EEMD 法及 CEEMD 法中存在的残留白噪声,可以应用于爆破振动信号的趋势项识别。

2) 数值仿真结果显示:CEEMDAN 法可以有效地去除仿真信号中添加的人为趋势项;与 EMD 法及 EEMD 法相比,CEEMDAN 法识别趋势项的精度更高,CEEMDAN 法筛选出的结果与人为添加的趋势项具有更好的相关性。

3) CEEMDAN 法可以有效地去除原始爆破实测信号中的趋势项,经 CEEMDAN 法处理后的修正信号解决了爆破振动信号零点漂移及基线偏离问题。依据信号功率谱密度,原始信号的超高异常低频分量被去除,信号主频回归到爆破振动信号主频率分布范围,为后续爆破振动信号的准确分析奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 单仁亮,白瑶,宋永威,等. 冻结立井模型爆破振动信号的小波包分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1923-1932.
SHAN R L, BAI Y, SONG Y W, et al. Wavelet packet analysis of blast vibration signals of freezing shaft model [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1923-1932.

[2] 朱正国,杨利海,王道远,等. 立体交叉隧道爆破动力响应和安全范围研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(1): 59-64.
ZHU Z G, YANG L H, WANG D Y, et al. Analysis of dynamic response and safety range of crossing tunnel based on blasting vibration [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(1): 59-64.

[3] 何理,钟冬望,陈晨,等. 岩质高边坡开挖施工的爆破振动监测与分析[J]. 金属矿山, 2017(1): 6-10.
HE L, ZHONG D W, CHEN C, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration in high rocky slope excavation [J]. Metal Mine, 2017(1): 6-10.

[4] 张乐文,王洪波,邱道宏,等. 小波降噪与粒子群优化综合回归爆破震动参数[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 338-342.
ZHANG L W, WANG H B, QIU D H, et al. Blasting vi-

bration parameters using comprehensive regression of wavelet denoising and particle swarm optimization algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Suppl. 2): 338-342.

[5] 单仁亮,宋永威,白瑶,等. 基于小波包变换的爆破信号能量衰减特征研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(2): 119-128.
SHAN R L, SONG Y W, BAI Y, et al. Research on the energy attenuation characteristics of blasting vibration signals based on wavelet packet transformation [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(2): 119-128.

[6] CHEN G, LI Q Y, LI D Q, et al. Main frequency band of blast vibration signal based on wavelet packet transform [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 74: 569-585.

[7] 王燕,薛云朝,马铁华. 基于 EMD 和最小二乘法的零漂处理方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(2): 118-122.
WANG Y, XUE Y C, MA T H. Research on zero drift processing method using EMD and least-square [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(2): 118-122.

[8] 吴志成,王重阳,任爱君. 消除信号趋势项时小波基优选方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(8): 811-814.
WU Z C, WANG C Y, REN A J. Optimal selection of wavelet base functions for eliminating signal trend based on wavelet analysis [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(8):811-814.

[9] 龙源,谢全民,钟明寿,等. 爆破震动测试信号预处理分析中趋势项去除方法研究[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 63-68.
LONG Y, XIE Q M, ZHONG M S, et al. Research on the trend removing method in preprocessing analysis of blasting vibration monitoring signals [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 63-68.

[10] 韩亮,刘殿书,辛崇伟,等. 深孔台阶爆破近区振动信号趋势项去除方法[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1006-1012.
HAN L, LIU D S, XIN C W, et al. Trend removing methods of vibration signals of deep hole bench blasting in near field [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1006-1012.

[11] 贾贝,凌天龙,侯仕军,等. 变分模态分解在爆破信号趋势项去除中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(4): 045201.
JIA B, LING T L, HOU S J, et al. Application of variable mode decomposition in the removal of blasting

- signal trend item [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(4): 045201.
- [12] 杨孟, 王瑾, 周西峰, 等. 基于 CEEMD 和小波包的降噪方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 41-47.
- YANG M, WANG J, ZHOU X F, et al. De-noising method based on CEEMD and wavelet packet [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 38(2): 41-47.
- [13] 易文华, 刘连生, 闫雷, 等. 基于 EMD 改进算法的爆破振动信号去噪[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 095201.
- YI W H, LIU L S, YAN L, et al. Vibration signal denoising based on improved EMD algorithm [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(9): 095201.
- [14] YU C, YUE H Z, LI H B, et al. Scale model test study of influence of joints on blasting vibration attenuation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 533-550.
- [15] 王海龙, 赵岩, 王海军, 等. 基于 CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5): 055202.
- WANG H L, ZHAO Y, WANG H J, et al. De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5): 055202.
- [16] 黄金, 吴庆良, 陈钊. 基于 CEEMDAN-WPT 联合去噪的灾后求救信号能量分布特征研究[J]. 南京理工大学学报, 2020, 44(2): 194-201.
- HUANG J, WU Q L, CHEN F. Study on energy distribution character about post-disaster rescue signal based on CEEMDAN-WPT denoising [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(2): 194-201.
- [17] HASSAN A R, SUBASI A, ZHANG Y C. Epilepsy seizure detection using complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 191: 105333.
- [18] HE C B, NIU P, YANG R, et al. Incipient rolling element bearing weak fault feature extraction based on adaptive second-order stochastic resonance incorporated by mode decomposition[J]. Measurement, 2019, 145: 687-701.
- [19] 刘霞, 宋启航. CEEMDAN 自适应阈值去噪算法在地震方向的应用[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(7): 95-104.
- LIU X, SONG Q H. CEEMDAN adaptive threshold denoising algorithm in application to seismic direction [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(7): 95-104.
- [20] 张军, 潘泽鑫, 郑玉新, 等. 振动信号趋势项提取方法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(1): 22-28.
- ZHANG J, PAN Z X, ZHENG Y X, et al. Research on vibration signal trend extraction [J]. ACTA Electronic Journal, 2017, 45(1): 22-28.
- [21] 李宗春, 邓勇, 张冠宇, 等. 变形测量异常数据处理中小波变换最佳级数的确定 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 285-288.
- LI Z C, DENG Y, ZHANG G Y, et al. Determination of best grading of wavelet transform in deformation measurement data filtering [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(3): 285-288.
- [22] 王海龙, 赵岩, 王永佳, 等. 草帽山隧道爆破振动监测与分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(12): 67-70.
- WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Blasting vibration monitoring and analysis of Caomaoshan Tunnel [J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 67-70.
- [23] 王海龙, 赵岩, 王永佳, 等. 新建京张高铁立体交叉隧道爆破振动控制研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(7): 130-134.
- WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Study on blasting vibration control of three-dimensional cross tunnel on Beijing to Zhangjiakou high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(7): 130-134.
- [24] HUANG D, CUI S, LI X Q. Wavelet packet analysis of blasting vibration signal of mountain tunnel [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 72-80.
- [25] LI L, WANG F, SHANG F, et al. Energy spectrum analysis of blast waves based on an improved Hilbert-Huang transform [J]. Shock Waves, 2017, 27: 487-494.