

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0123

基于 CEEMDAN-小波包分析的隧道 爆破信号去噪方法*

王海龙^{1,2}, 赵岩¹, 王海军³, 彭婵媛², 仝潇¹

1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;
2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000;
3. 北旺建设集团有限公司, 河北 承德 067400)

摘要: 针对隧道爆破施工中采集到的实测振动信号, 引入一种基于总体平均经验模态分解方法(CEEMDAN 分解)联合小波包分析的降噪方法。首先, 通过 CEEMDAN 分解得到多个本征模态分量, 利用相关系数筛选出包含噪声的模态分量, 并通过模态分量的频谱图及方差贡献率进行校核。然后, 利用小波包阈值降噪方法对含有噪声的模态分量进行处理。最后, 将未经处理的模态分量与去噪完成的分量重构得到最终纯净的爆破振动信号。同时, 通过小波包能量谱分析验证此降噪方法的可行性。本文引入的方法兼具 CEEMDAN 分解及小波包分析的优点, 与现有方法相比, 去噪效果较好, 可以应用于类似隧道爆破信号的去噪处理中。

关键词: 隧道爆破振动信号; CEEMDAN 分解; 小波包分析; 去噪

中图分类号: O389; TU751.9

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis

WANG Hailong^{1,2}, ZHAO Yan¹, WANG Haijun³, PENG Chanyuan², TONG Xiao¹

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance of Hebei Province, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;
3. Beiwang Construction Group Co., Ltd., Chengde 067400, Hebei, China)

Abstract: Aiming at the measured vibration signals collected during tunnel blasting construction, a noise reduction method based on the overall average empirical mode decomposition method (CEEMDAN decomposition) combined with wavelet packet analysis was introduced. First, a series of multiple intrinsic modal components were obtained by CEEMDAN decomposition, and the modal components containing noise were selected using correlation coefficients, checked by the spectrogram and the variance contribution rate of the modal components. Then, the wavelet packet threshold noise reduction method was used to process the modal components containing noise. Finally, the unprocessed modal components and the de-noised components were reconstructed to obtain the final pure blasting vibration signal. At the same time, the feasibility of this noise reduction method has been verified by wavelet packet energy spectrum analysis. This method combines the advantages of CEEMDAN decomposition and wavelet packet analysis. Compared with existing methods, the de-noising effect is better, and it can be applied to the de-noising processing of similar tunnel blasting signals.

Keywords: tunnel blasting vibration signal; CEEMDAN decomposition; wavelet packet analysis; de-noising

* 收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51878242)

第一作者: 王海龙(1965—), 男, 博士, 教授, wanghai065@163.com

通信作者: 赵岩(1991—), 男, 博士研究生, 304965624@qq.com

作为铁路、公路隧道掘进最常用的破岩方式, 爆破施工带来的结构振动极有可能对在建隧道及周围构筑物产生损害。目前, 对爆破振动的分析研究大多是通过爆破振动信号的处理展开的。隧道施工现场环境复杂, 从现场获得的原始数据往往夹杂着各种各样的无用信号(噪声), 尤其随着隧道掘进深度的增加, 施工现场各个工序交叉进行, 噪声与有效信号相互交织, 对爆破信号处理分析产生极大的不利影响^[1]。因此, 对采集的原始隧道爆破振动数据进行降噪预处理显得尤为重要。

目前, 应用于爆破振动信号消除干扰分量的方法主要包括小波阈值方法^[2]、小波包阈值方法^[3]、最小二乘拟合方法^[4]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法^[5]、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法^[6]、变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)方法^[7]、EMD-小波阈值联合方法及 EEMD-小波阈值联合方法^[8-9]等。其中针对爆破信号中的高频噪声干扰分量, 傅里叶分析、小波分析及小波包分析均可应用于去除噪声的领域; 同时, EMD、EEMD 以及其与小波分析、小波包分析的联合方法也可以取得更为良好的效果。针对信号中存在的低频趋势项, 最小二乘法、EMD 分解、EEMD 分解及 VMD 分解等方法都能在保持信号特征的同时较为准确地去除趋势项。

作为爆破振动信号降噪的常用方法, 小波降噪首先通过选择合适的小波基函数及分解层数对原始信号进行分解, 然后选择合适的阈值函数对小波分解系数进行量化, 对于超过阈值的小波分解系数予以保留, 对于小于阈值的小波分解系数通过置零操作予以消除; 然后, 将小波系数进行重构即完成了信号降噪。小波包分析作为对小波算法的改进算法, 通过对小波变换过程中忽略的高频部分进行精细分解, 提高了小波算法的高频分辨率^[10-11]。但是, 小波及小波包算法均受制于小波基函数、阈值类型及阈值函数的选择, 给复杂的隧道爆破振动信号的降噪处理带来困难。

EMD 分解^[12]无需像小波分析一样设定小波基函数及阈值函数, 就能将信号分解为一系列本征模态分量(IMF)。EEMD 分解针对 EMD 分解中存在的模态混叠现象^[13], 对原始信号添加白噪声信号进行分析。许多学者通过经验模态分解去除高频模态分量的方式实现去噪, 然而这种“一刀切”式的降噪方式会在降噪的同时消除信号中的主要成分, 造成信号失真。

小波分析与经验模态类分解的联合去噪方法可以综合两种方法的优点, 在消噪的同时保持原始信号的完整性和特殊性; EMD-小波阈值降噪、EEMD-小波阈值降噪等方法已经应用于爆破振动信号的处理中。然而, EMD-小波阈值降噪、EEMD-小波阈值等降噪方法仍存在不少缺陷, 例如: 虽然 EEMD 分解通过在原始信号中添加高斯白噪声解决了 EMD 分解存在的模态混叠的问题, 但是 EEMD 并未对添加的白噪声信号进行隔离, 造成残留噪声由高频过渡到低频, 影响降噪效果。

隧道爆破振动信号中的噪声分量主要来自于钻孔装药、初期支护及运输渣土等施工工序中产生的高频干扰信号; 同时, 信号采集过程中, 仪器温度变化造成的零点漂移及测试仪器的安装松动也会造成采样信号产生基线偏离及形状不规则。针对上述隧道爆破信号处理中存在的噪声干扰问题, 本文引入一种基于 CEEMDAN 分解及小波包分析的联合去噪方法: 首先, 对采集得到的原始信号进行 CEEMDAN 分解, 获取多个本征模态分量(IMF); 然后, 利用相关系数筛选出包含噪声的模态分量^[17], 并对含噪分量进行小波包阈值降噪处理; 最后, 将经过处理的模态分量与未处理的分量重构得到纯净的爆破振动信号。通过 CEEMDAN 分解来解决添加白噪声由高频传递到低频的问题^[14-16], 提高高频成分的频率分辨率, 以期更为精细地去除噪声成分。

1 CEEMDAN-小波包分析降噪原理

1.1 CEEMDAN 分解原理阐述

EEMD 与 CEEMD 分解算法均是在待分解信号中加入高斯白噪声或者成对正负高斯白噪声来消除 EMD 分解的模态混叠问题。然而, 这两种算法均未对残留噪声进行隔离, 造成添加的白噪声信号总是可以从高频转移到低频。因此, 分解得到的模态本征分量中总会残留一定的白噪声信号, 影响后续信号分析处理。

CEEMDAN 分解从两个方面解决了上述问题: (1) 加入经 EMD 分解后含辅助噪声的 IMF 分量, 而不是将高斯白噪声信号直接添加在原始信号中; (2) EEMD 分解和 CEEMD 分解是将经验模态分解后得到的模态分量进行总体平均, CEEMDAN 分解与之不同, 则是在得到的第一阶 IMF 后就进行总体平均计算, 得到最终的第一阶 IMF, 然后对残余部分重复进行如上操作, 这样便有效地解决了噪声从高频到低频的转移传递问题。接下来阐述 CEEMDAN 分解原理。

设 E_i 为经过 EMD 分解后得到的第 i 个本征模态分量, CEEMDAN 分解得到的第 i 个本征模态分量为 $\overline{C_i(t)}$, v^j 为满足标准正态分布的高斯白噪声信号, ε 为噪声的标准差, $z(t)$ 为原始信号。CEEMD 分解步骤如下。

(1) 将正负成对高斯白噪声加入到原始信号中 $z(t)$ 得到新信号 $z(t) + (-1)^q \varepsilon v^j$, 其中 $q=1$ 或 2 。对新信号进行 EMD 分解得到第一阶本征模态分量 C_1^j :

$$E(z(t) + (-1)^q \varepsilon v^j) = C_1^j(t) + r^j \quad (1)$$

(2) 对产生的 N 个模态分量进行加总平均得到:

$$\overline{C_1(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_1^j(t) \quad (2)$$

(3) 计算去除第 1 个模态分量后的残差:

$$r_1(t) = z(t) - \overline{C_1(t)} \quad (3)$$

(4) 在 $r_1(t)$ 中加入正负成对高斯白噪声得到新信号, 以新信号为载体进行 EMD 分解, 得到第 1 阶模态分量 D_1^j , 由此可以得到第 2 阶模态分量:

$$\overline{C_2(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_1^j(t) \quad (4)$$

(5) 计算去除第二个模态分量的残差:

$$r_2(t) = r_1(t) - \overline{C_2(t)} \quad (5)$$

(6) 重复上述步骤, 直到获得的残差信号为单调函数, 不能继续分解, 算法结束。此时得到的本征模态分量数量为 K , 则原始信号 $z(t)$ 被分解为:

$$z(t) = \sum_{k=1}^K \overline{C_k(t)} + r_K(t) \quad (6)$$

1.2 小波包降噪原理

小波降噪是通过小波变换对分解得到的小波系数进行分类处理。经小波分解后, 有用信号的小波分解系数较大, 噪声的小波分解系数较小。因此, 通过设置阈值函数进行去噪处理, 保留分解系数大于阈值的信号, 而通过置零操作消除分解系数小于阈值的信号。小波包分析以小波变换为基础, 对小波变换中未处理的高频分量再次细化分解, 相比于小波降噪, 小波包分析具有更高的频率分辨率, 可以进一步消除高频部分存在的噪声余量, 提高去噪精度。

定义子空间 U_j^n 是函数 $U_n(t)$ 的闭包空间, U_j^{2n} 是函数 $U_{2n}(t)$ 的闭包空间, 令 $U_n(t)$ 满足^[18]

$$\begin{cases} U_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_n(2t-k) \\ U_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_n(2t-k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $h(k)$ 及 $g(k)$ 相当于长度为 $2N$ 的低通与高通滤波器, 同时有 $g(k) = (-1)^k h(k-1)$ 。通过式 (7) 构造的序列为由 $u_0 = \varnothing(t)$ 确定的正交小波包。

设 $g_j^n \in U_j^n$, 则 $g_j^n(t)$ 可以表示为:

$$g_j^n = \sum_l d_l^{j,n} u_n(2^j t - 1) \tag{8}$$

可以得到小波包分解结果:

$$\begin{cases} d_l^{i,2n} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{i+1,n} \\ d_l^{i,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{i+1,n} \end{cases} \tag{9}$$

小波包重构是小波包分解的逆运算, 由 $\{d_l^{i,2n}\}$ 与 $\{d_l^{i,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j+1,n}\}$, 得:

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k (h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}) \tag{10}$$

1.3 CEEMDAN-小波包分析联合降噪

图 1 为 CEEMDAN-小波包分析联合降噪流程图。如图所示, 首先, 利用 CEEMDAN 算法将爆破振动信号分解, 得到多个本征模态分量; 然后, 通过比较各个模态分量与原始信号的相关系数筛选出包含噪声的本征模态分量, 并通过各本征模态分量的频谱分布特征及方差贡献率进行校核; 最后, 利用小波包分析对筛选出含有噪声的模态分量进行阈值去噪, 将去噪完成的模态分量与未经处理的模态分量重构得到纯净信号。

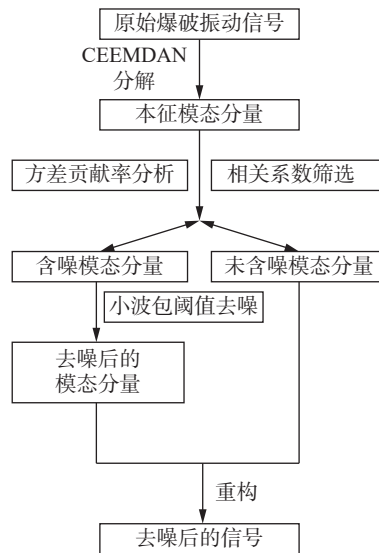


图 1 去噪流程

Fig. 1 Flow of de-noising

2 仿真信号分析

为验证本文引入的 CEEMDAN-小波包阈值降噪方法的可行性, 且不失一般性, 首先对仿真信号进行降噪分析。近年来, 有学者研究发现可以近似地利用正余弦函数模拟爆破振动信号进行分析^[19]。因此, 本文亦利用正余弦函数叠加得到的仿真信号进行研究。仿真信号表达式如下:

$$\begin{cases} y_1(t) = 25 \times 10^{-2} \times \cos(0.875\pi \times 50t) \\ y_2(t) = 30 \times 10^{-2} \times \sin(2\pi \times 50t) \times (1 + 1.5 \sin(0.5\pi \times 40t)) \\ y_3(t) = 15 \times 10^{-2} \times e^{-15t} \times \sin(200\pi t) \\ y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + \alpha(t) \end{cases} \tag{11}$$

式中: $t \in [0 \text{ s}, 2 \text{ s}]$, 时间间隔为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}$; $\alpha(t)$ 为人工噪声信号。

针对上述模拟信号, 利用 CEEMDAN 分解将其分解为一系列本征模态分量, 并利用 MATLAB 中互

相关函数的概念计算得到各个模态分量与原始信号的相关性, 并依据相关性绝对值的大小筛选得到需要处理的含噪分量。仿真信号 $z(t)$ 及 CEEMDAN 分解得到的本征模态分量 ($C_1 \sim C_{12}$) 见图 2。

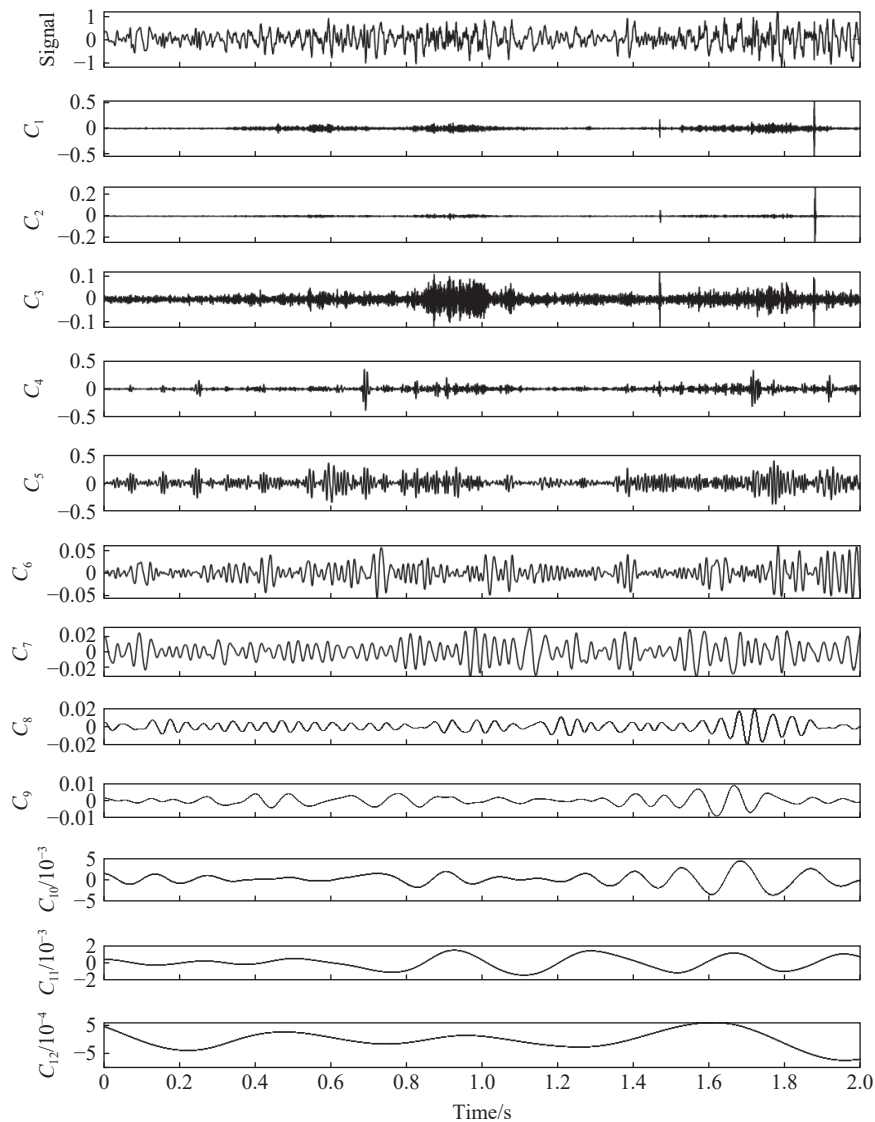


图 2 仿真信号及模态分量波形图

Fig. 2 Simulation signal and modal component waveform

通过比较本征模态分量与原始信号的相关性, 得到 $C_1 \sim C_3$ 、 $C_8 \sim C_{12}$ 与原始信号的相关性较差, 同时, 从图 2 波形的对比中也可以得到相同的结论。利用上文提到的方法对含噪分量进行降噪处理, 并将处理后的结果与未经处理的模态分量重构得到最终的纯净信号。降噪后的信号与原始含噪信号及初始纯净信号 $y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)$ 的对比关系如图 3 所示。

由图 3(a) 可知, 经处理后的纯净信号在保留仿真信号特征信息的同时, 基本别除了隐藏于其中的噪声信息, 且降噪后的信号较原始波形曲线更为光滑, 降噪效果良好。从图 3(b) 可以看出, 去噪后的纯净信号与初始仿真信号 $y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)$ 在信号峰值及局部波形特征上的相似吻合度较好; 为了进一步研究两种信号的相似程度, 利用 MATLAB 中互相关函数 `corrcoef` 计算得到纯净信号与仿真信号 $y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)$ 的相关系数为 0.9591。可以看出, 去噪后的信号与初始纯净信号表现出较好的相关性。综上所述, 本文引入的 CEEMDAN 分解联合小波包分析降噪方法在仿真信号领域应用效果良好, 为后续对实测隧道爆破振动信号的降噪处理提供了一定的理论基础。

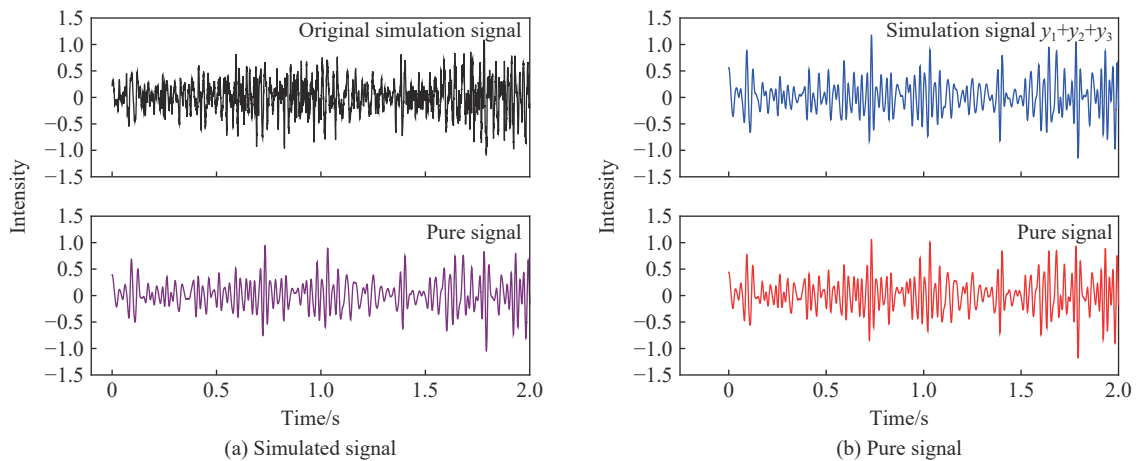


图 3 仿真信号及降噪处理后的纯净信号

Fig. 3 Simulated signal and pure signal after de-noising

3 工程实例分析

3.1 工程背景

本文以新建京张高铁草帽山隧道爆破施工为工程背景进行研究。草帽山隧道地形起伏较大, 穿越草帽山主脉, 穿越第四系上更新统新黄土, 粉质黏土地等地层, 穿越全风化凝灰岩, 具有中等膨胀性, 对隧道爆破施工造成较大的安全隐患。本文使用的原始数据来自于此隧道进口段钻爆法施工产生的爆破振动速度信号。图 4 为隧道进口工区场地布置图。



图 4 草帽山隧道进口工区^[20]

Fig. 4 Caomaoshan tunnel entrance area^[20]

3.2 爆破振动速度信号采集

此次爆破信号采集使用中科测控公司研发的 TC-4850 爆破测振仪。该爆破测振仪可以同时采集 X、Y 及 Z 方向的爆破振动速度, 同时利用 Blasting vibration analysis 的分析软件可以对采集到的振速数据进行初步分析。采集过程中, 利用配置好的不锈钢夹片将速度传感器固定于隧道初期支护上。其中 X 方向朝向掌子面的掘进方向, Y 方向朝向隧道径向, Z 方向垂直于 XY 平面垂直向上。测点布置见图 5。



图 5 测点布置^[21]

Fig. 5 Layout of measuring points

图 6 为某次爆破施工采集到的 Z 方向爆破振动速度原始信号, 从图 6 可知, 受爆破施工现场复杂环境的影响, 爆破振速时程曲线中夹杂着各种毛刺噪声信号。

3.3 CEEMDAN-小波包阈值降噪实现

经 CEEMDAN 分解, 原始爆破信号被分解为 14 个本征模态分量。依据 EEMD 分解的取值范围, 利用“试错法”得到本次试验中 CEEMDAN 分解的特征参数为: 正负高斯白噪声标准差为 0.2, 加入噪声的次数为 100, 允许的最大筛选迭代次数为 3000。

利用式(12)计算得到每个模态分量与原始速度信号的相关系数(r_i), 计算结果见表 1。

$$r_i = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

式中: x_i 表示各本征模态分量, y 表示原始爆破信号。

表 1 本征模态分量(IMF)的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of modal components (IMF)

模态分量	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
r_i	0.129	0.103	0.097	0.063	0.051	0.687	0.760	0.562	0.260	0.139	0.023	0.003	0.007	0.001

从表 1 中可以看出, 各个本征模态分量与原始信号的相关系数差异较大。其中 C_6 、 C_7 、 C_8 、 C_9 的相关系数均大于 0.2, 可以看作是优势模态分量; 而 $C_1 \sim C_5$ 及 $C_{10} \sim C_{14}$ 的相关系数均小于 0.14, 初步认定 $C_1 \sim C_5$ 及 $C_{10} \sim C_{14}$ 这两组模态分量中含有较多的噪声信号。

对 $C_1 \sim C_5$ 及 $C_{10} \sim C_{14}$ 两组分量进行快速傅里叶分析得到频谱见图 7。从图 7 可以看出, $C_1 \sim C_3$ 分量的主频主要集中在 800~1 000 Hz, C_4 分量的主频集中在 400~600 Hz, C_5 分量的主频主要分布在 300 Hz 左右; 而 $C_{10} \sim C_{14}$ 分量的主频率均小于 5 Hz。由于本文振动测试仪的采集频率主要范围为 5~250 Hz, 因此从频谱分布特征来看, $C_1 \sim C_5$ 及 $C_{10} \sim C_{14}$ 分量确实含有某些干扰信号。

定义模态分量平方的算术平均值与其均值的平方之差为模态分量的方差($D(j)$), 通过各个模态分量的方差贡献率($e(j)$)^[22-23] 校验上述选择的可行性。模态分量的方差及方差贡献率计算如下:

$$D(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_j(i)^2 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_j(i) \right]^2 \quad (13)$$

$$e(j) = \frac{D(j)}{\sum_{j=1}^N D(j)} \times 100\% \quad (14)$$

计算得到各个模态分量的方差贡献率见表 2。由表 2 可知, $C_6 \sim C_9$ 模态分量的方差贡献率较大, 均大于 8, 而剩余模态分量的方差贡献率较小, 其中贡献率最大的 C_{10} 也只有 1.59。因此可以看出, 由方差贡献率得到的结论与相关系数筛选及频谱分析结果保持一致。综上, 可以认定 $C_1 \sim C_5$ 和 $C_{10} \sim C_{14}$ 两组分量包含噪声信号。

将 $C_1 \sim C_5$ 及 $C_{10} \sim C_{14}$ 重构得到新的分量 C_{15} , 以 C_{15} 为新信号进行小波包分析。由于本文中爆破测

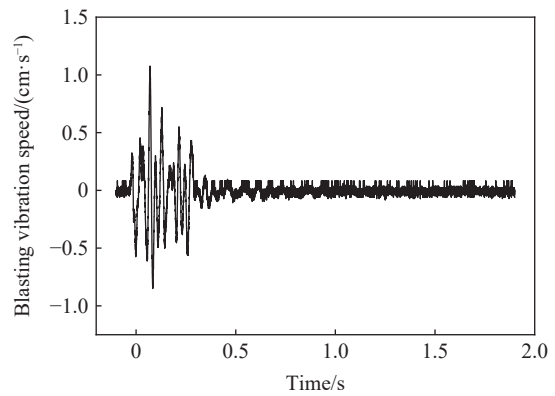


图 6 爆破振动速度原始信号

Fig. 6 Original signal of blasting vibration speed

振仪 TC-4850 设置的最小工作采样频率为 5 Hz, 根据采样定理^[24], 信号采集频率为 5 000 Hz, Nyquist 频率为 2 500 Hz, 因此根据小波包分解算法, 利用具有良好的紧支撑性、光滑性及近似对称性的“db8”小波基函数对新信号进行 8 层分解, 对应的最低频带为 0~9.765 625 Hz; 然后, 利用默认的软阈值函数进行去噪处理。图 8 为小波包降噪处理前后 C_{15} 信号时程, 从图 8 可以看出, 经过小波包降噪重构后的 C_{15} 分量的噪声信号基本被消除。

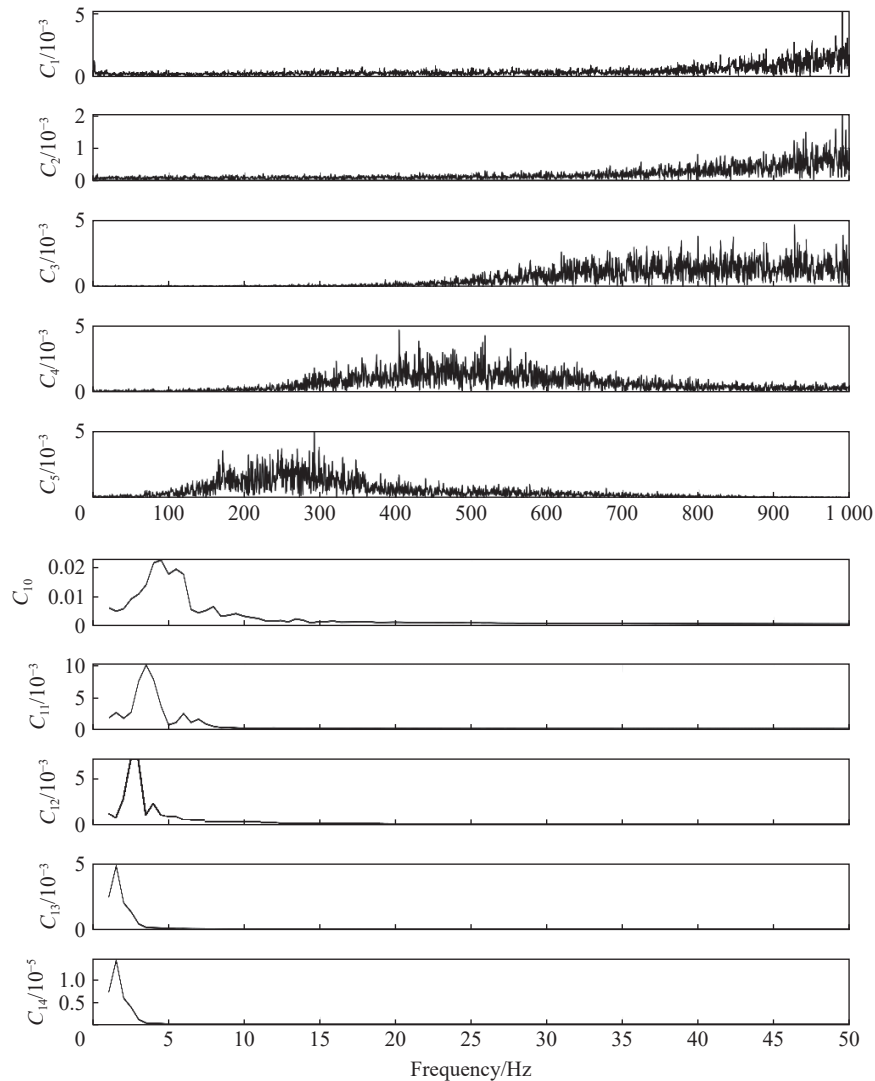


图 7 $C_1 \sim C_5$ 及 $C_{10} \sim C_{14}$ 分量频谱

Fig. 7 Spectra of $C_1 \sim C_5$ and $C_{10} \sim C_{14}$ components

表 2 模态分量(IMF)的方差贡献率

Table 2 Variance contribution rate of modal component (IMF)

方差贡献率	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
$e(j)$	1.65	0.07	0.41	0.29	0.23	13.42	38.31	34.98	8.71	1.59	0.28	0.24	0.04	0.01

将经过降噪处理的 C_{15} 与优势分量 C_6 、 C_7 、 C_8 、 C_9 重构得到最终的纯净信号如图 9 所示。由图 9 可知, 与原始信号相比, 经 CEEMDAN-小波包降噪后的纯净信号在保证局部波形特征及峰值不变的基础上, 基本消除了原始信号中存在的噪声分量。

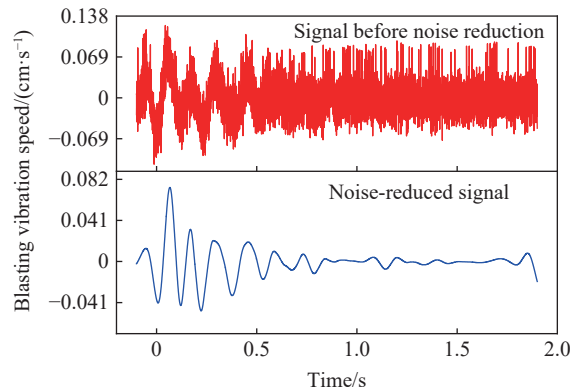


图 8 小波包降噪处理前后的 C_{15} 信号

Fig. 8 signal (C_{15}) before and after wavelet packet noise reduction

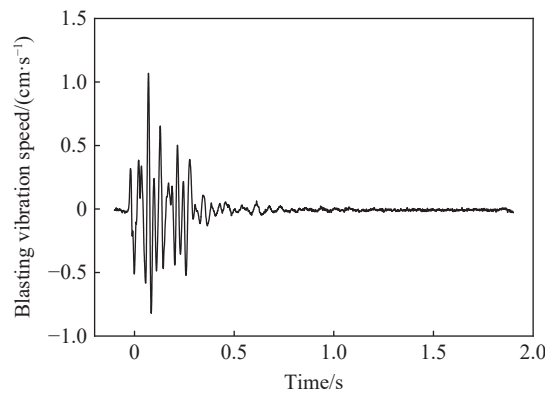


图 9 CEEMDAN-小波包阈值降噪后的信号

Fig. 9 CEEMDAN-wavelet packet threshold signal after noise reduction

3.4 降噪效果评价

爆破振动信号降噪效果常利用信噪比(η)、均方根差(σ)进行衡量, 信噪比越大, 均方根差越小, 去噪效果越好。信噪比、均方根差的计算公式^[25-26]如下:

$$\eta = 10 \times \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^n z_i(t)^2}{\sum_{i=1}^n [z_i(t) - z_i^*(t)]^2} \right] \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_i(t) - z_i^*(t)]^2} \quad (16)$$

式中: $z_i^*(t)$ 消噪后的信号, n 为信号长度。

为了评价本文方法的降噪效果, 利用小波包降噪、EMD-小波包联合降噪及EEMD-小波包联合降噪三种方法分别对原始爆破信号进行处理。四种方法的降噪指标见表 3, 降噪后的时程曲线如图 10 所示。

对比四种方法的客观降噪指标发现, 经验模态分解与小波包分析联合降噪的总体效果均

表 3 去噪效果对比

Table 3 Comparison of noise reduction effects		
去噪方法	η	σ
小波包阈值去噪	66.412	1.40×10^{-4}
EMD-小波包联合去噪	84.951 1	2.55×10^{-5}
EEMD-小波包联合去噪	84.031 3	2.43×10^{-5}
新方法去噪	94.080 2	2.40×10^{-5}

优于小波包降噪。同时,与 EMD-小波包联合降噪及 EEMD-小波包联合降噪相比,CEEMDAN-小波包降噪方法得到的信噪比(94.0802)最大,得到的均方根差(2.4001×10^{-5})最小。对比图 9 及图 10 可以看出,与另外三种方法相比,经 CEEMDAN-小波包阈值降噪后的纯净信号在保留原始信号完整信息的同时,可以更有效地去除信号中的噪声分量,有助于提高后续对隧道爆破信号分析的准确性。

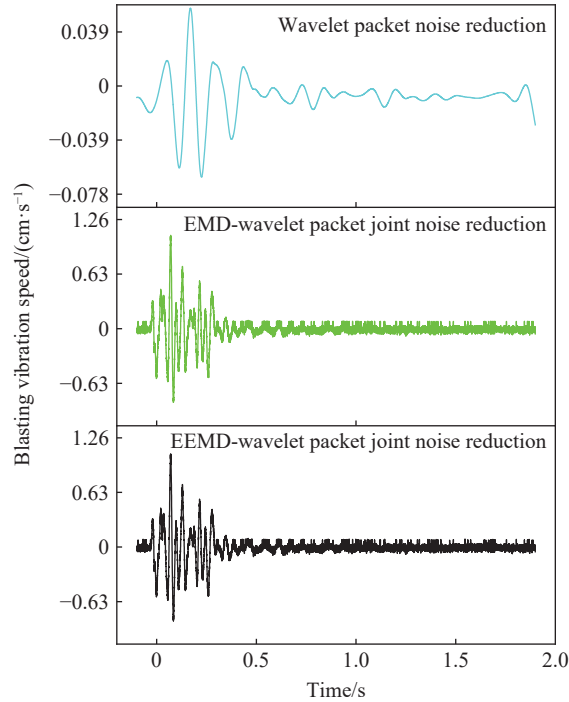


图 10 用于对比的几种方法的降噪效果

Fig. 10 Noise reduction effect of several methods for comparison

4 小波包能量谱分析

利用小波包能量谱分析可以得到爆破信号能量在频率范围的具体分布特征,其实现过程如下:

频率为 f 的爆破信号进行 j 层小波包分解,得到 2^j 个等宽的子频带。每个子频带宽度为 $\frac{f}{2^j}$,将各个子频带信号重构得到原始信号。小波包的分解与重构如下^[27]:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{2^j-1} y(t)_{ji} \quad (17)$$

子频带重构信号 $y(t)_{ji}$ 的所含能量可以表示为:

$$E_{ji} = \int |y_{ji}(t)|^2 dt = \sum_{l=1}^L |z_{i,l}|^2 \quad (18)$$

式中: $z_{i,l}$ 为子频带离散点对应的信号幅值, l 为离散点的个数 ($l \in (1, L)$), L 为采集数据长度。

信号的总能量可以表示为:

$$E = \sum_{i=0}^{2^j-1} E_{ji} \quad (19)$$

各个频带的能量占有百分比表示如下:

$$P_{ji} = \frac{E_{ji}}{E} \quad (20)$$

以原始爆破信号及经降噪处理后的纯净信号为研究对象进行小波包分析, 选用“db8”小波基函数分别进行 8 层分解, 并利用 MATLAB 对式 (17)~(20) 进行编程, 得到各个子频带的能量及信号总能量, 并求得各频带能量百分比如图 11 所示。

由图 11 中可知, 与原始信号相比, CEEMDAN-小波包降噪得到的纯净信号中低频带能量百分比有较大幅度的增加; 同时, 降噪后信号的高频带能量百分比呈减小的趋势。研究发现^[27], 隧道爆破信号的特征信息主要集中在中低频率带。因此, 可以得到: 经过 CEEMDAN-小波包降噪处理的隧道爆破信号在去除噪声分量的同时, 信号能量分布向中低频带转移, 很好地保留了原始爆破信号中的特征信息, 为后续对爆破信号进行深入分析奠定了基础。

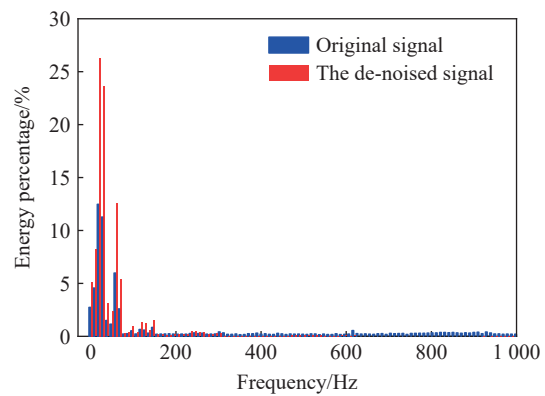


图 11 小波包能量占有百分比

Fig. 11 Signal energy distribution before and after noise

5 结 论

本文以新建京张高铁草帽山隧道爆破施工为工程背景, 引入一种基于 CEEMDAN 分解联合小波包分析的降噪方法对实测爆破振动信号进行处理, 得到如下结论:

(1) CEEMDAN 分解可以有效解决 EMD 分解中存在的模态混叠问题及 EEMD 分解中存在的白噪声传递问题; 与小波去噪相比, 小波包去噪可以精细地去除信号中的噪声分量;

(2) 与小波包单独降噪、EMD-小波包联合降噪及 EEMD-小波包联合降噪方法相比, CEEMDAN-小波包降噪得到的信噪比最大, 均方根差最小, 去噪效果较好;

(3) 通过小波包能量谱分析得到, 经过 CEEMDAN-小波包降噪的信号可以在消除噪声分量的同时有效保留原始信号中的能量特征信息, 为后续对爆破信号进行准确分析奠定了基础。

参考文献:

- [1] 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(S2): 338–341. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s2.037.
ZHANG L W, WANG H B, QIU D H, et al. Blasting vibration parameters using comprehensive regression of wavelet denoising and particle swarm optimization algorithm [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 338–341. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s2.037.
- [2] 王翔, 葛晓霞. 基于小波变换的汽轮机振动信号软阈值消噪技术研究 [J]. *汽轮机技术*, 2009, 51(3): 204–206, 228. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2009.03.014.
WANG X, GE X X. A study on signal thresholding de-noising technique based on the wavelet transform [J]. *Turbine Technology*, 2009, 51(3): 204–206, 228. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2009.03.014.
- [3] 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. DOI: 10.14132/j.cnki.1673-5439.2018.02.007.
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. DOI: 10.14132/j.cnki.1673-5439.2018.02.007.
- [4] 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. DOI: 10.1016/j.apm.2019.05.005.
- [5] YUAN H P, LIU X L, LIU Y, et al. Analysis of acoustic wave frequency spectrum characters of rock mass under blasting damage based on the HHT method [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 9207476. DOI: 10.1155/2018/9207476.

- [6] 邓青林, 赵国彦. 基于 EEMD 和小波的爆破振动信号去噪 [J]. *爆破*, 2015, 32(4): 33–38. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.04.007.
DENG Q L, ZHAO G Y. De-noising of blast vibration signal based on EEMD and wavelet [J]. *Blasting*, 2015, 32(4): 33–38. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.04.007.
- [7] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0092.
JIA B, LING T L, HOU S J, et al. Application of variable mode decomposition in the removal of blasting signal trend items [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(4): 045201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0092.
- [8] 费鸿祿, 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. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0148.
FEI H L, LIU M, QU G J, 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. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0148.
- [9] 陈仁祥, 汤宝平, 马婧华. 基于 EEMD 的振动信号自适应降噪方法 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(15): 82–86. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.15.015.
CHEN R X, TANG B P, MA J H. Adaptive de-noising method based on ensemble empirical mode decomposition for vibration signal [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15): 82–86. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.15.015.
- [10] 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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1526.
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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1526.
- [11] 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. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.003.
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. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.003.
- [12] 邹德臣, 王海亮, 王春慧, 等. 基于 HHT 分析的浅埋隧道爆破振动控制研究 [J]. *隧道建设*, 2014, 34(8): 760–764. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2014.08.009.
ZHOU D C, WANG H L, WANG C H, et al. Study on blasting vibration control of shallow tunnel based on HHT analysis [J]. *Tunnel Construction*, 2014, 34(8): 760–764. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2014.08.009.
- [13] 叶红宇, 卓越, 杨小林. 隧道爆破振动信号 EEMD 分解后小波包降噪法研究 [J]. *铁道建筑*, 2018, 58(7): 83–86. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.07.21.
YE H Y, ZHUO Y, YANG X L. Research on wavelet packet denoising of tunnel blasting vibration signals after EEMD decomposition [J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(7): 83–86. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.07.21.
- [14] 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. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2019.07.011.
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. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2019.07.011.
- [15] 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. DOI: 10.1016/j.knsys.2019.105333.
- [16] 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. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.05.052.
- [17] 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(3): 487–494. DOI: 10.1007/s00193-016-0667-7.
- [18] 王明同. 基于小波包分析法的电压暂降检测研究与 LabVIEW 实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [19] 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] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.12.18.

- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.12.18.
- [21] 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. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201710120003.
- 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. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201710120003.
- [22] 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. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2020.44.02.010.
- 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. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2020.44.02.010.
- [23] 李火坤, 刘世立, 魏博文, 等. 基于方差贡献率的泄流结构多测点动态响应融合方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(19): 181–191. DOI: 10.13465/j.cnki.Jvs.2015.19.029.
- LI H K, LIU S L, WEI B W, et al. Multi-point dynamic response data fusion method for a flood discharge structure based on variance dedication rate [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(19): 181–191. DOI: 10.13465/j.cnki.Jvs.2015.19.029.
- [24] SIMAR L, ZELENYUK V. Improving finite sample approximation by central limit theorems for estimates from Data Envelopment Analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 284(3): 1002–1015. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.01.036.
- [25] 谢德红, 李俊锋, 刘葑, 等. 基于改进 Hodrick-Prescott 分解模型的近红外自适应降噪方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(5): 1650–1655. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1650-06.
- XIE D H, LI J F, LIU D, et al. An Improved Hodrick-Prescott decomposition based near-infrared adaptive denoising method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(5): 1650–1655. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1650-06.
- [26] 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. DOI: 10.13203/j.whugis2011.03.006.
- 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. DOI: 10.13203/j.whugis2011.03.006.
- [27] 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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.11.025.

(责任编辑 王小飞)