

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.018

基于 WOA-VMD-FastICA 爆破振动信号 降噪技术研究*

张仕泽¹, 柴修伟¹, 常志锋², 肖浩², 吴经霜³, 陈天涛³

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 武汉 430073; 2. 湖北宜化集团矿业有限责任公司, 宜化 443000;
3. 宜昌明珠磷化工业有限公司, 宜昌 443100)

摘要: 由于受爆区周围多源性信号的影响, 爆破实测采集到的振动信号多含高频高斯噪声。为解析爆破振动信号的真实性和准确性, 提出基于鲸鱼优化算法(WOA)-变分模态分解(VMD)-快速独立成分分析(FastICA)联合算法对爆破振动信号进行降噪处理, 利用 WOA 算法求得 VMD 分解所需模态数量 K 和惩罚系数 α 的最佳值之后, 对爆破振动信号进行 VMD 分解, 将分解出的 IMF 进行 FastICA 盲源分离, 计算各个独立成分的功率谱熵值并去除大于阈值的异常值后对信号进行重构, 输出滤波后的信号。通过频谱分析以及对比不同算法, 选用波形相似系数、信噪比和均方根差来量化算法的可行性。结果表明: 爆破振动信号在 WOA-VMD-FastICA 联合算法下信噪比最大, 均方根差最小并且具有良好的波形相似性, 相较于 CEEMD-FastICA、CEEMDAN-FastICA 以及 EWT-FastICA 算法来看, 信噪比分别提升了 21.5%、35.97%、62.4%, 均方根差分别减少 24.24%、39.55%、63%, 降噪效果优势明显, 为矿山爆破振动信号降噪研究提供新思路。

关键词: 爆破振动; 鲸鱼优化算法(WOA); 变分模态分解(VMD); 快速独立成分分析(FastICA); 信号降噪

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0166-12

Research on Denoising Technology for Blasting Vibration Signals based on WOA-VMD-FastICA

ZHANG Shi-ze¹, CHAI Xiu-wei¹, CHANG Zhi-feng², XIAO Hao², WU Jing-shuang³, CHENG Tian-tao³

(1. School of Resource and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Hubei Yihua Group Mining Co., LTD., Yihua 443000, China;

3. Yichang Mingzhu Phosphating Industry Co., LTD., Yichang 443100, China)

Abstract: Due to the influence of multi-source anisotropic signals around the blasting area, the vibration signals collected by blasting measurement mostly contain high-frequency Gaussian noise. To analyze the authenticity and accuracy of the blasting vibration signal, a joint algorithm based on the whale optimization algorithm(WOA), variational mode decomposition(VMD), and fast independent component analysis(FastICA) is proposed to denoise the blasting vibration signal. After the WOA algorithm is used to obtain the optimal value of the modal number K and the penalty coefficient required α for VMD decomposition, the blasting vibration signal is decomposed using VMD, and the de-

收稿日期(Date of reception): 2025-05-22

网络首发日期(Published online): 2025-12-15

作者简介: 张仕泽(2000-), 男, 硕士研究生, 从事岩土爆破方面的研究, (E-mail) zhangshize2000@163.com。

通信作者: 肖浩(1983-), 男, 高级工程师、注册安全工程师, 从事矿山安全管理, (E-mail) 117609759@qq.com。

基金项目: 2025年湖北省级科技计划项目

About the author: ZHANG Shi-ze(2000-), male, postgraduate, engaged in geotechnical blasting research, (E-mail) zhangshize2000@163.com.

Corresponding author: XIAO Hao(1983-), male, senior engineer, registered safety engineer, engaged in mine safety management, (E-mail) 117609759@qq.com.

Fund Programs: 2025 Hubei Provincial Science and Technology Program

composed IMF is subjected to FastICA blind source separation. The power spectrum entropy of each independent component is calculated, and any abnormal values greater than the threshold are removed. The signal is reconstructed, and the filtered signal is output. Through spectrum analysis and comparison of different algorithms, the waveform similarity coefficient, signal-to-noise ratio, and root mean square difference are selected to quantify the algorithm's feasibility. The results show that the blasting vibration signal has the most significant signal-to-noise ratio, the smallest root mean square difference, and good waveform similarity under the WOA-VMD-FastICA combined algorithm. Compared with CEEMD-FastICA, CEEMDAN-FastICA, and EWT-FastICA algorithms, the signal-to-noise ratio is increased by 21.5%, 35.97% and 62.4% respectively, and the root mean square difference is reduced by 24.24%, 39.55% and 63% respectively. The noise reduction effect has obvious advantages, providing new ideas for noise reduction research on mine blasting vibration signals.

Key words: blasting vibration; whale Optimization Algorithm (WOA); variational mode decomposition (VMD); fast independent component analysis (FastICA); signal noise reduction

在爆破作业中,由于爆破环境复杂且存在多源性信号,爆破测振仪器采集到的振动信号一般会掺杂多种噪声,进而影响爆破地震效应和结构动力响应分析的可靠性。因此为了获得真实的爆破地震波波形和传播规律,需对采集到的实测振动信号进行降噪去杂预处理,以解析出真实的爆破振动信号。

目前,信号降噪去杂技术主要经历了傅里叶变换(Fourier Transform, FT)、小波包分解、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)以及变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)^[1]。其中,傅里叶变换作为一种全局性的变换,将整个信号转换到频域,仅能反映整体频率特征,无法捕捉瞬时频率变化;小波包分解虽能处理局部信号,但小波基函数的选择依赖以往经验,导致降噪效果具有不确定性;EMD 算法及其衍生算法在提取内涵模态分量(intrinsic modal function, IMF)时易出现模态混叠或是端点效应,而 VMD 算法虽然可以将复杂信号分解为若干个具有明确频率中心和有限带宽的 IMF,避免传统分解方法的模态混叠问题,但其关键参数模态数量 K 和惩罚系数 α 需进行人为的设置^[2,3],分解效果易受人为因素的影响。针对上述问题,王海龙等结合傅立叶分解和小波包分析各自的优势^[4],结合相关性系数筛选 IMF。谢全明根据二代小波包变换原理构造插值细分小波 SGW 以此滤除爆破振动信号中的噪声分量^[5]。Mou 等利用互补集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)依据冲击波信号的特征自适应调整噪声强度从而更有效地提取信号特征^[6]。武强等通过增强鲸鱼优化算法自适应求解 VMD 所需的关键参数^[7],并且结合相关系数阈值法识别 IMF 中包含煤岩界面特征信息分量,为井下非平稳、非线性回波信号的处理提供参考。

为进一步提升爆破振动信号降噪效果,在深入

研究各去噪方法优缺点基础上,提出鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)-VMD-快速独立成分分析(Fast Independent Component Analysis, FastICA)联合降噪算法^[8]。FastICA 作为一种基于统计独立性准则的盲源分离算法,以负熵最大化作为衡量信号非高斯性的指标,可以有效地筛选出有用成分并剔除噪声成分,但其易受多频段噪声干扰,因此在 WOA 算法迭代寻优出 VMD 算法所需的关键参数后,通过 VMD 算法将爆破振动信号分解为若干个具有明确频率中心和有限带宽的 IMF 降低信号的复杂程度,随后 FastICA 算法依据有效信号与噪声在统计特性的差异,去除 IMF 中残留与有用信号频率重叠的噪声,以此深度分离噪声与有效信号,三者协同,既能更好地抑制噪声,又能较好地保留爆破振动信号的关键特征,从而提高降噪效果与爆破振动信号识别的准确度。

1 算法原理

1.1 快速独立成分分析(FastICA)

1) 信号中心化与白化

计算观测信号 X 的均值 μ , 对观测信号进行中心化^[9]

$$X' = X - \mu \quad (1)$$

式中, X' 为中心化后的信号数据。

将中心化后的信号协方差矩阵变为单位矩阵

$$C = E[X'X'^T] \quad (2)$$

$$C = EDE^T \quad (3)$$

式中: E 是 $[X'X'^T]$ 的特征向量矩阵; D 是特征角的对角矩阵。

2) 寻找最大非高斯方向

通过基于负熵的 FastICA 算法^[10-12], 极大化目标函数直到收敛

$$J(x) \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E[G'(x)]^2 \quad (4)$$

$$J(w) = \{E[G(w^T z)] - E[G(v)]\}^2 \quad (5)$$

$$w = E[zg(w^T z)] - E[g'(w^T z)]w \quad (6)$$

式中: $J(x)$ 为基于负熵的近似式; x 为高斯信号; G 为非二次函数; v 为零均值单位方差的高斯信号; w 为随机单位向量的权重向量; z 为预处理后的信号; $g(\cdot)$ 为非线性函数; $g'(\cdot)$ 为其导数。

3)将最终得到的权重向量 w 白化后的数据投影到独立成分上

$$s = w^T z \quad (7)$$

4)对其他成分提取

重复2)、3)来提取更多的独立成分,但需确保新的权重向量与之前的独立成分之间独立性。

1.2 变分模态分解(VMD)

VMD主要分为变分问题的构造和变分问题的求解^[13-16],其IMF定义为调幅调频分量

$$u_k(t) = A_k(t) \cos[\varphi_k(t)] \quad (8)$$

式中: $u_k(t)$ 为分解信号第 K 个分量; $A_k(t)$ 为信号 $u_k(t)$ 的包络幅值; $\varphi_k(t)$ 为瞬时相位; K 为模态数量。

VMD约束变分模型

$$\min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (9)$$

$$s \cdot t \sum_k u_k = f$$

式中: u_k 为模态函数; w_k 为中心频率;*代表卷积运算; f 代表原始信号波形; $\delta(t)$ 为冲激函数。

对于上式约束的重建,通过同时使用二次惩罚项和拉格朗日乘数使其变为非约束问题

$$\iota(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (10)$$

式中: α 为惩罚系数; $\delta(t)$ 为冲激函数; $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘数。

利用乘数交替方向方法求解各模态函数和带宽的最小值,并进行傅里叶变换,不断更新直到收敛

$$\hat{u}_k^{n+1}(w) = \frac{\hat{f}(w) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(w) + \frac{\hat{\lambda}(w)}{2}}{1 + 2a(w - w_k)^2} \quad (11)$$

$$w_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty w |\hat{u}_k(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(w)|^2 dw} \quad (12)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(w) = \hat{\lambda}^n(w) + \tau [\hat{f}(w) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(w)] \quad (13)$$

式中: n 为迭代的次数; ω 频率; $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 、 ω_k^{n+1} 、 $\hat{\lambda}^{n+1}(\omega)$ 表示进行傅里叶变换; τ 表示噪声忍度。

1.3 鲸鱼优化算法(WOA)

1)包围猎物

假设最优候选解为目标猎物,建立包围数学模型

$$D = |CX^*(t) - X(t)| \quad (14)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - AD \quad (15)$$

式中: D 为鲸鱼与猎物之间的距离; $X^*(t)$ 表示在 t 时刻最优解的位置; $X(t+1)$ 表示在 $t+1$ 时刻解的位置; A 为收缩包围系数; C 为随机系数。

2)螺旋攻击猎物(发泡网攻击)

模拟座头鲸的螺旋攻击过程,建立鲸群与猎物之间的螺旋方程

$$X(t+1) = D^* e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t) \quad (16)$$

$$D^* = |X^*(t) - X(t)| \quad (17)$$

式中: D^* 表示鲸鱼与猎物之间距离的绝对值; b 为常数,用来定义螺旋线形状; l 为 $[-1, 1]$ 的随机数。

在收缩包围和螺旋攻击猎物之间概率相等条件下,不断更新获得最优解

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - AD & , p < 0.5 \\ D^* e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t) & , p \geq 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

3)随机搜索猎物

随机选择一个鲸鱼的位置作为参考来更新下一个位置

$$X(t+1) = X_{\text{rand}} - AD \quad (19)$$

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \quad (20)$$

式中, X_{rand} 为随机一个的鲸鱼位置即随机一个解的位置。

以包络熵作为适应度函数,在阈值范围内不断迭代更新得到最小的平均包络熵即可得到最优的参数 K 和 α

$$\langle K, \alpha \rangle = \min_{K, \alpha} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^K H_{en}(i) \quad (21)$$

式中: $H_{en}(i)$ 是第 (i) 个模态分量; (i) 的取值范围为 $(1, 2, 3, \dots, K)$ 。

$$H_{en}(i) = - \sum_{n=1}^N p_i(n) \log_2[p_i(n)] \quad (22)$$

$$p_i(n) = b_i(n) / \sum_{i=1}^N b_i(n) \quad (23)$$

式中: $b_i(n)$ 为第 (i) 个包络分量; n 为采样点数; $p_i(n)$ 为第 (i) 个包络分量的归一化。

1.4 WOA-VMD-FastICA 联合算法

图 1 为 WOA-VMD-FastICA 联合算法,利用 WOA 算法迭代寻优求得 VMD 分解所需 K 和 α 后,对爆破振动信号进行 VMD 分解,将分解出的 IMF

分量进行 FastICA 盲源分离,计算出各个独立成分的功率谱熵值并去除大于阈值的异常值后对信号进行重构,输出滤波后的信号。

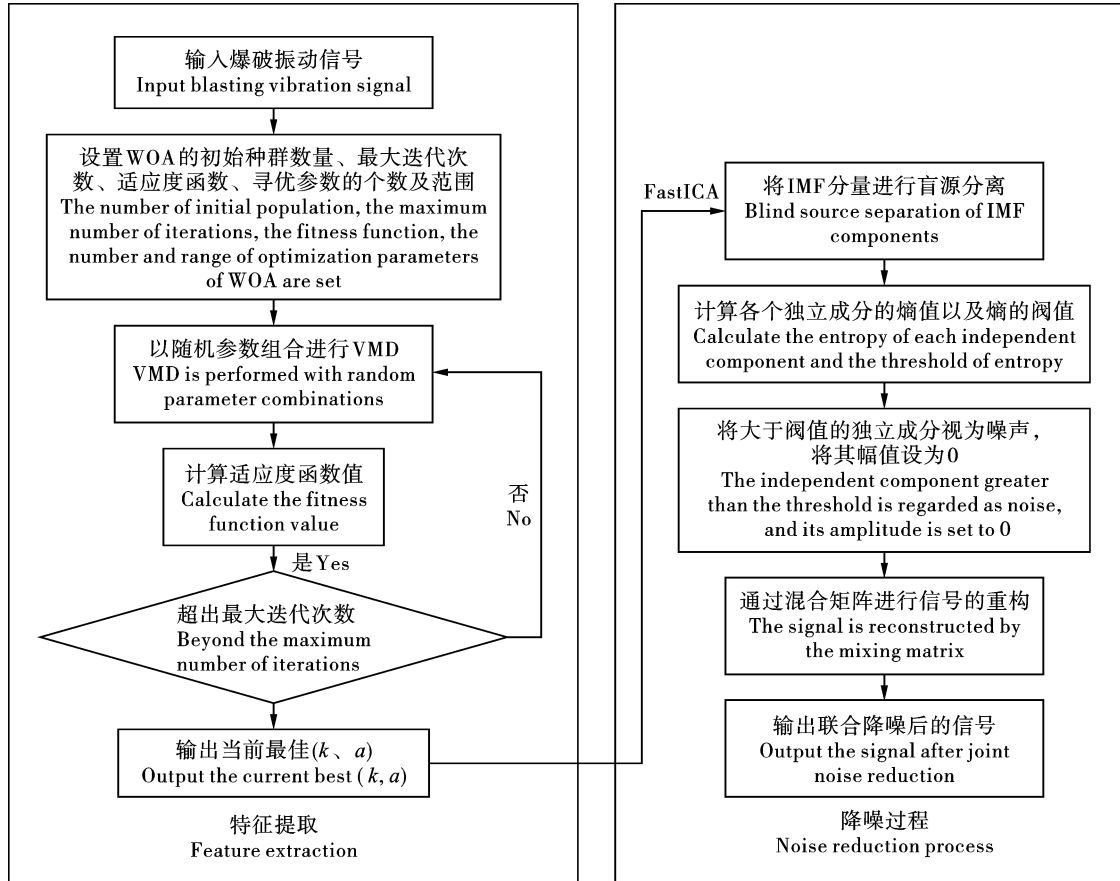


图 1 WOA-VMD-FastICA 算法模型
Fig. 1 WOA-VMD-FastICA algorithm model

2 仿真分析

为验证联合算法的有效性,设计一组具有不同频率和振幅的含噪仿真信号,信号表达式如下

$$\begin{cases} X_1 = 0.6 \sin\left(15\pi t + \frac{\pi}{5}\right) \\ X_2 = \cos[60\pi t + \sin(10\pi t)] \\ X_3 = [1 + 0.3 \cos(10\pi t)] \sin(200\pi t) \\ X_4 = wgn(1000, 1, -10) \end{cases} \quad (24)$$

其中 X_1 为一个低频信号,频率为 7.5 Hz,幅度为 0.6,用于测试算法对低频信号的分解效果; X_2 为一个中高频的调制信号,频率为 30 Hz,幅度为 1; X_3 为一个调幅信号,其载波频率为 100 Hz,调制频率为 5 Hz,信号的幅度由 $1 + 0.3 \cos(10\pi t)$ 所调制,用于测试算法对调幅信号处理的能力; X_4 为序列长

度 1000 的白噪声,其功率为 1,分贝值为 -10 dB 用于模拟随机干扰。仿真信号波形如图 2 所示。

采用 WOA 算法对 VMD 算法的关键参数(模态数 K 、惩罚系数 α)进行自适应寻优。迭代过程如图 3 所示。设置参数搜索范围^[17,18]: $K \in [5, 10]$ 、 $\alpha \in [100, 3000]$,种群数 $N = 30$,最大迭代次数 $T = 50$,以包络熵作为适应度函数,迭代到第 15 次时适应度稳定在最小值 0.3272,寻优确定参数 K 为 6、 α 为 2916,并将参数代入 VMD 算法,对仿真信号进行模态分解,为后续 FastICA 盲源分离提供准备。见图 4。

对分解得到的 IMF 进行 FastICA 盲源分离。从图 5 的结果可以看出,独立成分 6 为噪声分量,但为了避免人为主观判断,引入信息熵来作为判断的依据。信息熵越大,代表不确定性越大,信号中包含的信息量越少,信号越无秩序则越接近于白噪声。表 1 为各个独立成分的信息熵值。

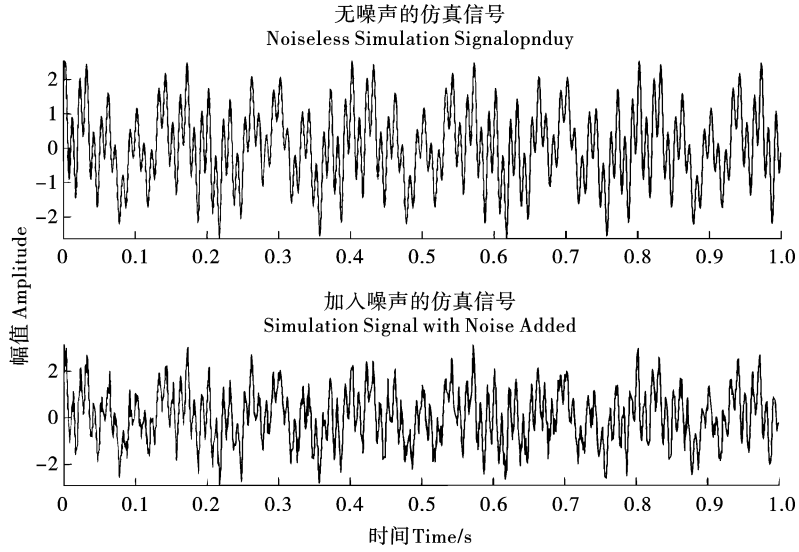


图2 仿真信号时域图
Fig. 2 Simulated signals

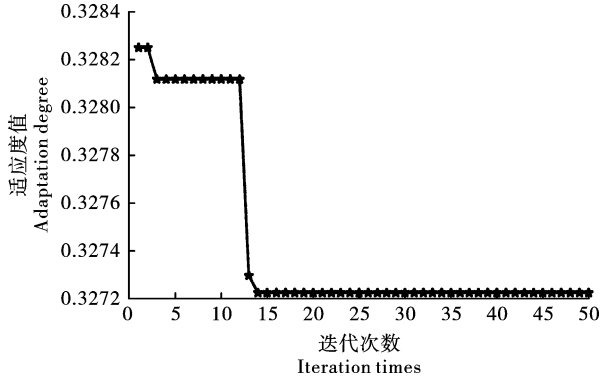


图3 WOA算法适应度收敛曲线
Fig. 3 Fitness convergence curve of WOA algorithm

表1 各个独立成分信息熵
Table 1 Information entropy of each independent component

独立成分 Independent component	信息熵值 Information entropy value
1	1.0766
2	1.5280
3	1.1975
4	0.9048
5	1.3725
6	3.6878

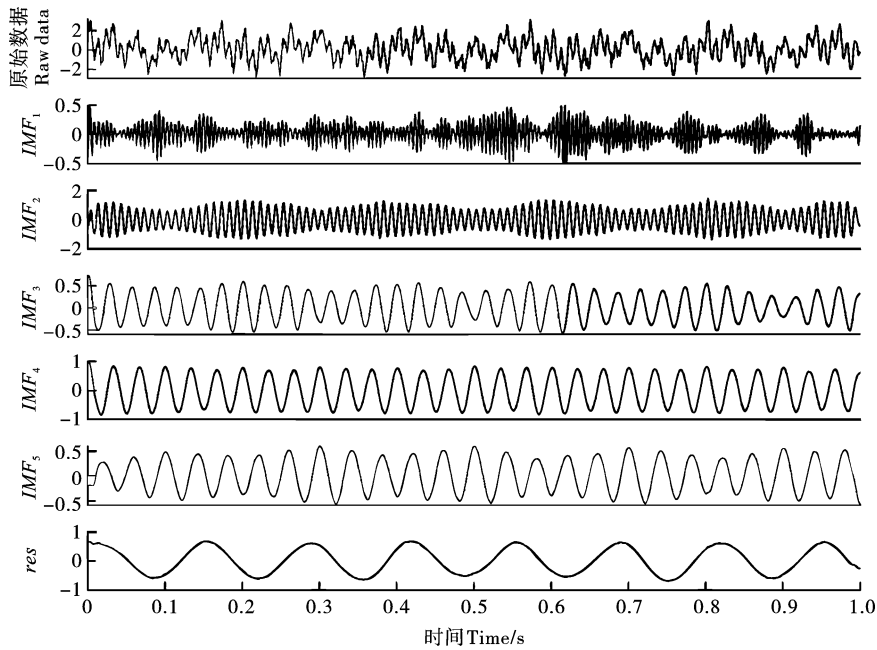


图4 VMD分解图
Fig. 4 VMD decomposition diagram

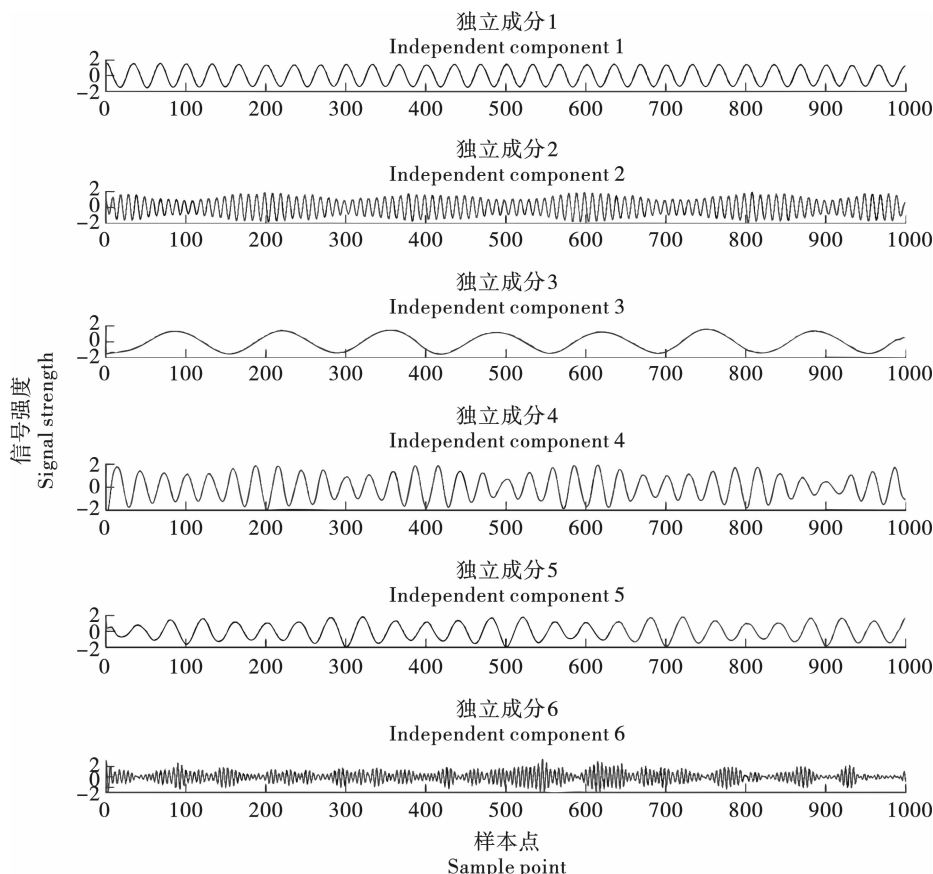


图 5 FastICA 盲源分离图

Fig. 5 FastICA blind source separation

通过设定阈值,判断独立成分中是否出现离群值,信息熵的阈值标准为功率谱熵均值 + 功率谱熵的标准差,计算求得阈值为 2.6604 将大于阈值的独

立成分 6 设为 0,将小于阈值的独立成分进行重构。从图 6 对比来看,WOA-VMD-FastICA 联合算法的降噪的效果明显,能有效去除噪声,还原真实信号。

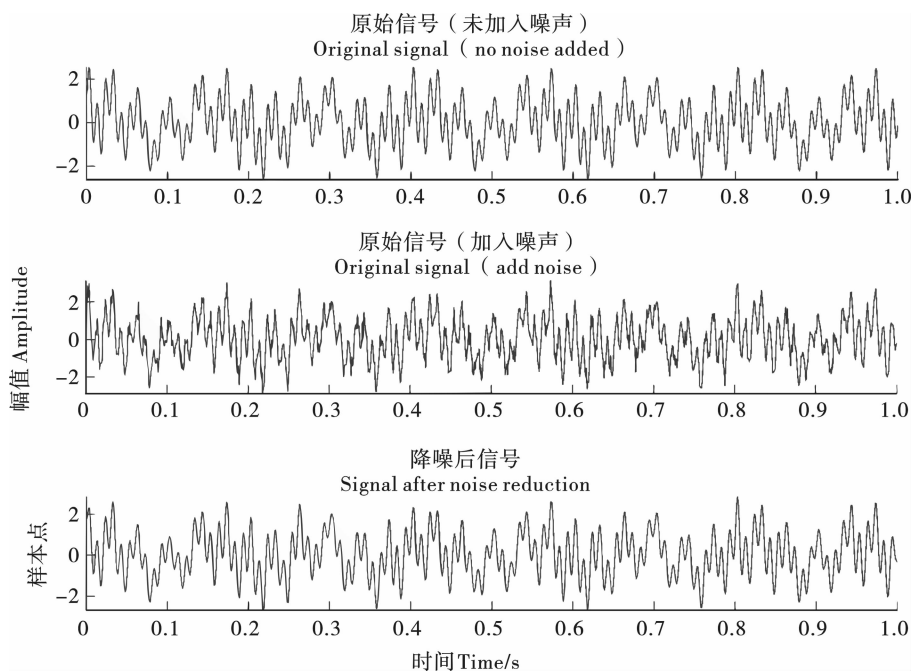


图 6 降噪后信号与原始信号对比图

Fig. 6 The comparison between the signal after noise reduction and the original signal

3 工程应用

3.1 工程背景

以某地下矿山爆破为工程背景,如图 7 所示,实测现场在古铜矿遗址和露天坑对侧民用建筑共设置 10 个监测点。监测仪器采用成都交博科技有限公

司生产的 L20(速度)型爆破测振仪及配套的速度传感器。

矿山采用地下中深孔爆破,本次共设计炮孔共 18 排,其中:掏槽区 1~3 排,侧崩区 4~18 排,第 5 排 4 发,一次爆破装药量 80 kg,7、9、11、13、15 排各 7 发,一次爆破装药量 140 kg,爆破参数如表 2 所示。

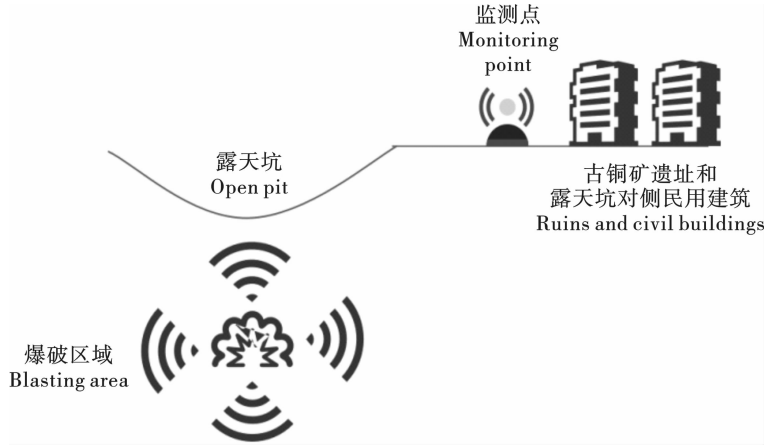


图 7 爆破测点示意

Fig. 7 Blasting measuring point schematic

表 2 爆破参数

Table 2 Blasting parameters

技术指标 Technology Index	参数值 Parameter Value
钻孔直径 Blast hole diameter /mm	64
采场宽度 Stope width /m	8
孔网参数 Spacing and burden/m	1.2 × 1.2
分段高度 Segment height/m	12
炮孔深度 Hole depth/m	8.6
装药系数 Explosive dust s-loading factor	0.8 改性粉状铵油粉状炸药 Modified powdery ammonium oil powdery explosive
掏槽区垂直孔排距、孔距 Cut area vertical hole row spacing, hole spacing/m	1.2 × 1.2

3.2 实测信号降噪

现场监测信号采用频率为 1024 Hz,选用距离爆源最近的测点 8 为研究对象,从图 8 的爆破振动信号波形来看,纵向分量相较其它两个分量受噪声的影响更为明显。因此,选其进行 WOA-VMD-FastICA 联合算法降噪处理。

在进行 VMD 分解前,通过 WOA 优化算法寻得最佳的 K 值为 4, α 值为 1925, VMD 分解后的爆破振动信号如图 9 所示,再将得到的 IMF 进行 FastICA 盲源分离,得到的独立成分如图 10 所示,根据设定的阈值标准求得阈值为 5.1369,将大于阈值的独立成分幅值设为 0 后对信号进行重构,每个独立分量的信息熵值以及降噪前后对比图如表 3 和图 11 所示。

表 3 独立成分信息熵

Table 3 Information entropy of independent components

独立成分 Independent component	信息熵值 Information entropy value
1	4.2542
2	5.3803
3	4.9779

使用相同步骤对采集到的振动信号纵向分量分别进行 CEEMDAN-FastICA、CEEMD-FastICA 以及 EWT-FastICA 算法降噪,在 CEEMDAN 算法中设置附加噪声标准差与原始信号标准差之比为 0.2,信号的平均次数为 100,最大迭代次数为 1000;CEEMD 算法中设置附加噪声标准差与原始信号标准差之比为 0.2,信号的平均次数为 100;EWT 算法中设置分量个数为 9,图 12、13、14 分别为 CEEMD-FastICA, CEEMDAN-FastICA 和 EWT-FastICA 降噪效果对比图,与这三个算法相比 WOA-VMD-FastICA 降噪后的信号,噪声残留显著减少,信号也更加地平

滑完整,能较好地保留原始信号中的有效信息。

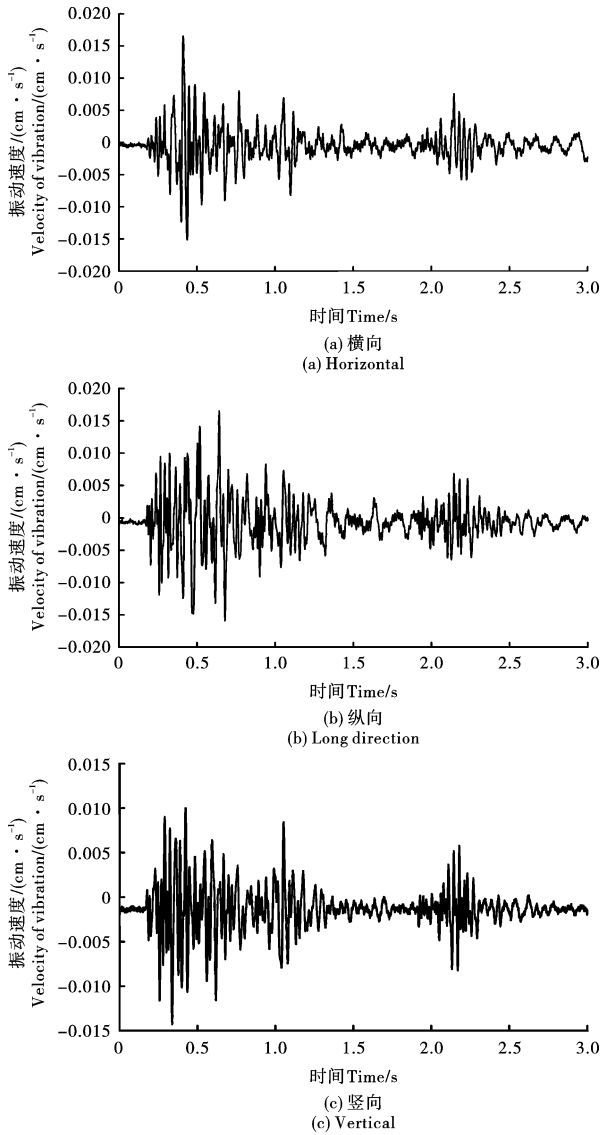


图 8 测点 8 爆破信号时域图
Fig. 8 Blasting signals at measuring point 8

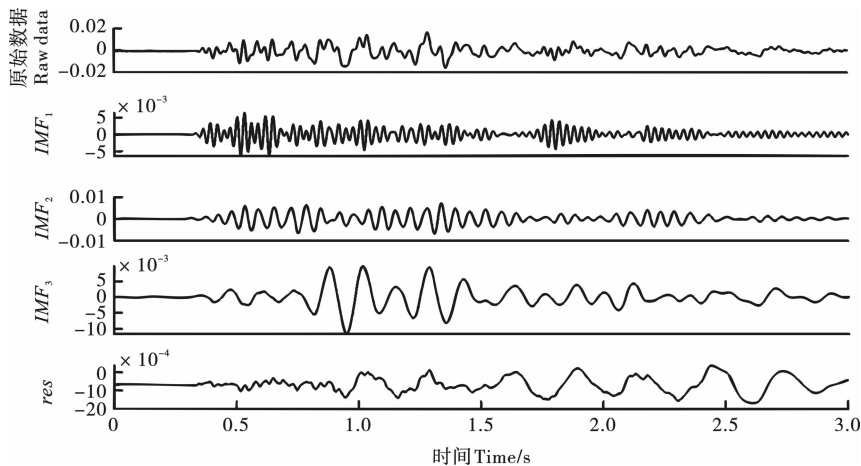


图 9 VMD 分解图
Fig. 9 VMD decomposition diagram

3.3 爆破振动信号 HHT 时频分析

希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform HHT) 是一种处理非线性、非平稳信号的时频分析方法。地下中深孔爆破振动信号能量主要集中在 100 Hz 以下, 10 ~ 50 Hz, 0 ~ 3 s 采样段是本次爆破能量集中区。对采集到爆破振动信号(纵向分量)经 WOA-VMD-FastICA 处理重构后的信号进行希尔伯特-黄变换。

如图 15 所示,基于 WOA-VMD-FastICA 联合算法降噪后的地下爆破振动信号,在时频图中具备良好的分辨率,不会造成信号失真现象,且完整保留了信号的有效信息,在时域和频域都能清晰体现信号特征。

3.4 降噪效果评价

利用信噪比 (signal noise ratio SNR)、均方根差 (mean square erro MSE) 以及波形相似系数 (Normalized Correlation Coefficient NCC) 三个指标来进一步评价 WOA-VMD-FastICA 联合算法降噪效果。公式如下

$$\xi = \text{Lg} \left[\frac{\sum_{m=1}^M X_m^2}{\sum_{m=1}^M (X_m - \bar{X}_m)^2} \right] \quad (25)$$

SNR

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (X_i - \bar{X})^2} \quad (26)$$

MSE

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (27)$$

式中: n 为信号长度; X 为含噪信号; \bar{X} 为降噪后的信号; \bar{x} 、 \bar{y} 为降噪前后信号样本的平均值。

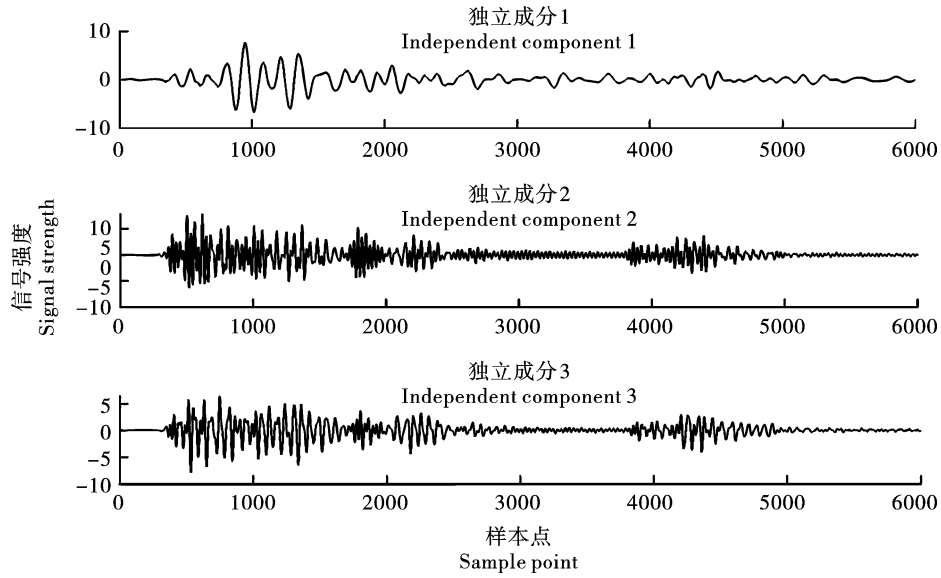


图 10 FastICA 盲源分离图

Fig. 10 FastICA blind source separation diagram

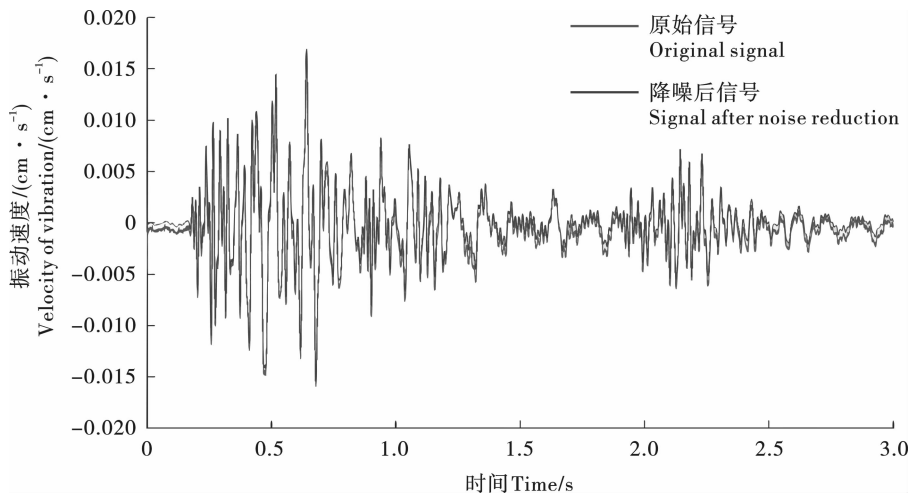


图 11 WOA-VMD-FastICA 降噪效果图

Fig. 11 WOA-VMD-FastICA noise reduction effect diagram

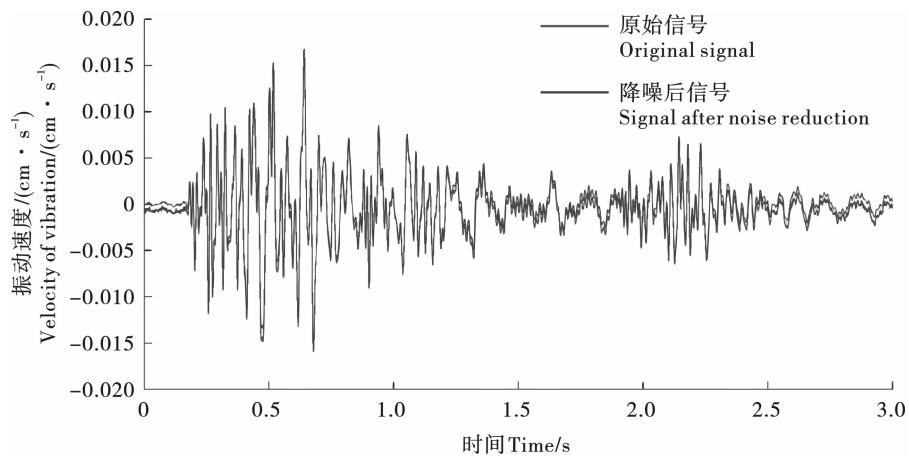


图 12 CEEMD-FastICA 降噪效果图

Fig. 12 CEEMD-FastICA noise reduction effect

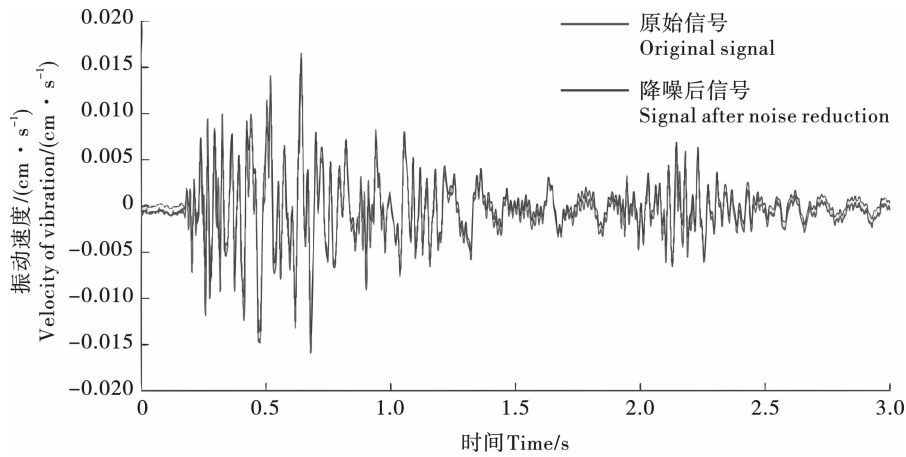


图 13 CEEMDAN-FastICA 降噪效果图
Fig. 13 CEEMDAN-FastICA noise reduction effect

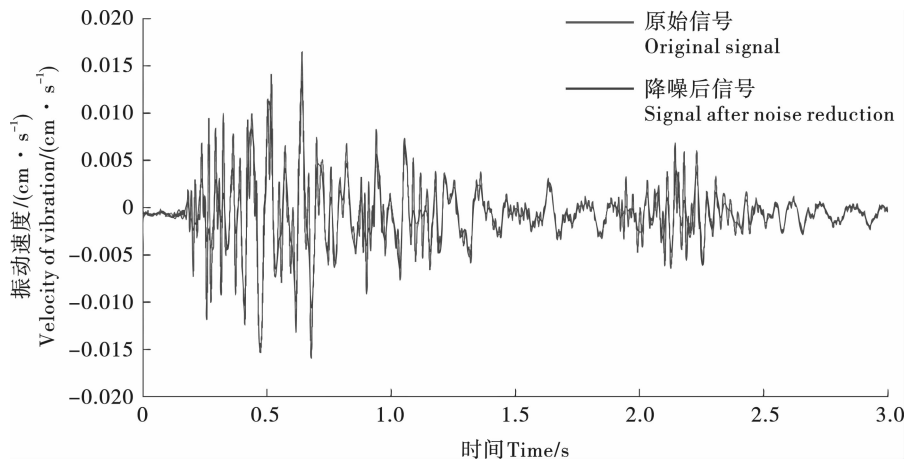


图 14 EWT-FastICA 降噪效果图
Fig. 14 EWT-FastICA noise reduction effect

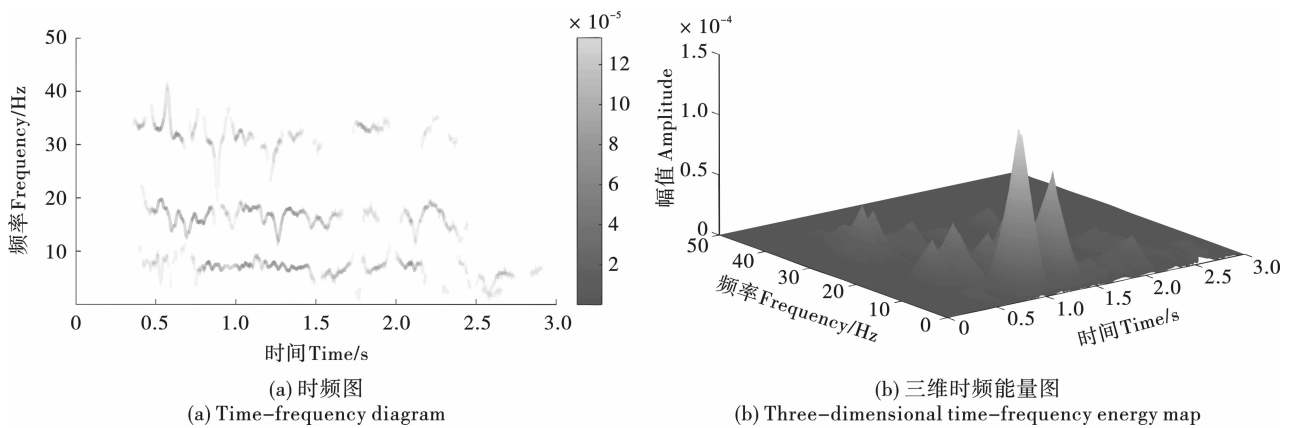


图 15 爆破振动信号 HHT 时频分析图
Fig. 15 HHT analysis of blasting vibration signal

由表 4 评价结果来看 WOA-VMD-FastICA 降噪后的信噪比最大,均方根差最小,相比于另外三个算法信噪比分别提升了 21.5%、35.97%、62.4%,均方根差分别减少 24.24%、39.55%、63%具有良好的降噪效果。说明 WOA-VMD-FastICA 联合算法能

更好地保留信号中的有效成分。

从波形相似系数可知爆破振动信号经过 WOA-VMD-FastICA 联合算法降噪后与原始信号的相关性最大,EWT-FastICA 降噪后的信号相关系数最小且在数据序列中丢失了部分特征信息。进一步说明

WOA-VMD-FastICA 联合算法信号降噪效果优于另外三个算法。

表 4 不同算法评价结果

Table 4 Evaluation results of different algorithms

指标 Index	VMD- FastICA	CEEMD- FastICA	CEEMDAN- FastICA	EWT- FastICA
SNR	11.3241	9.3181	8.3282	6.9729
MSE	0.041786	0.055160	0.069125	0.11375
NCC	0.9625	0.9525	0.9236	0.8945

4 结论

针对爆破工程中,实测振动信号易受爆区周围多源性信号干扰,影响对信号真实性和准确性的解析,提出 WOA-VMD-FastICA 联合算法用于爆破振动信号降噪处理,得到研究结论如下:

1) 仿真信号重构结果显示,通过 WOA-VMD-FastICA 联合算法进行降噪处理后的信号形态特征保留完整,整体波形与仿真信号具有较高的相似性,表现出良好的降噪能力。

2) 在实测信号降噪处理中,基于 WOA-VMD-FastICA 联合算法对比其他算法信噪比最大,均方根差最小,时频分析中,其在保留信号真实成分的前提下消除了噪声的影响,验证了该联合算法的实用性。

参考文献 (References)

- [1] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [2] 吴文轩,王志坚,张纪平,等. 基于峭度的 VMD 分解中 K 值的确定方法研究 [J]. 机械传动, 2018, v. 42, No. 260(8): 159-163.
- [2] WU Wen-xuan, WANG Zhi-jian, ZHANG Ji-ping, et al. Research on the determination method of K value in VMD decomposition based on kurtosis [J]. Mechanical Transmission, 2018, v. 42, no. 260(8): 159-163. (in Chinese)
- [3] 宋玉琴,邓思成,路彦刚. K 值优化的 VMD 在轴承故障诊断中的应用 [J]. 测控技术, 2019, 38(4): 117-121.
- [3] SONG Yu-qin, DENG Si-cheng, LU Yan-gang. Application of VMD optimized by K value in bearing fault diagnosis [J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38(4): 117-121. (in Chinese)
- [4] 王海龙,柏皓博,赵岩,等. 基于傅里叶分解-小波包分析的爆破信号降噪方法 [J]. 爆破, 2021, 38(2): 37-44.
- [4] WANG Hai-long, BO Hao-bo, ZHAO Yan, et al. Blasting signal denoising method based on Fourier decomposition-wavelet packet analysis [J]. Blasting, 2021, 38(2): 37-44. (in Chinese)
- [5] 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.
- [5] XIE Quan-min. Application of second generation wavelet packet transform in de-noising analysis of blasting vibration signal [J]. Engineering Blasting, 2011, 17(3): 21-24. (in Chinese)
- [6] MOU Zong-lei, NIU Xue-Ben, WANG Chen. A precise feature extraction method for shock wave signal with improved CEEMD-HHT [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020(3): 1-12.
- [7] 武强,王显辉,曾一凡,等. 基于 EWOA-VMD 的钻孔弹性波处理与煤岩识别方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 857-871.
- [7] WU Qiang, WANG Xian-hui, ZENG Yi-fan, et al. Drilling elastic wave processing and coal rock identification method based on EWOA-VMD [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2024, 53(5): 857-871. (in Chinese)
- [8] SEYEDALI Mirjalili, ANDREW Lewis. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [9] NITTA T. Natural gradient descent for training stochastic complex-valued neural networks [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 2014, 5(7): 193-198.
- [10] HYVRINEN A. New approximations of differential entropy for independent component analysis and projection pursuit [C] // Neural Information Processing Systems, 1998, 10: 273-279.
- [11] 李智明. 基于改进 FastICA 算法的混合语音盲分离 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [11] LI Zhi-ming. Blind separation of mixed audio signals based on improved FastICA [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [12] BALI J L, BOENTE G, TYLER D E, et al. Robust functional principal components: A projection-pursuit approach [J]. The Annals of Statistics, 2011, 39(6): 2852-2882.
- [13] 陶帅. 基于变分模态分解的语音增强算法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- [13] TAO Shuai. Research on speech enhancement algorithm based on variational mode decomposition [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 赵紫薇. 基于互信息 VMD 和 SVM 的煤矿流体管网泄漏检测算法与软件设计 [D]. 青岛: 山东科技大学,

- 2020.
- [14] ZHAO Zi-wei. Leakage detection algorithm and software design of coal mine fluid pipeline network based on mutual information VMD and SVM[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [15] 李士松. 基于改进 VMD 的单通道盲源分离滚动轴承复合故障诊断[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2021.
- [15] LI Shi-song. Single channel blind source separation based on improved VMD rolling bearing composite fault diagnosis[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] HUANG N E, SHEN Zheng, 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. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903-995.
- [17] 莫宏毅,徐振洋,刘鑫,等. 基于 SSA-VMD 的爆破振动信号趋势项去除方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(11):304-312, 330.
- [17] MO Hong-yi, XU Zhen-yang, LIU Xin, et al. Blasting vibration signal trend term removal method based on SSA-VMD[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(11):304-312, 330. (in Chinese)
- [18] 徐振洋,莫宏毅,包松,等. 基于 VMD-Teager 的露天边坡爆破振动信号能量特征研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7):77-88, 105.
- [18] XU Zhen-yang, MO Hong-yi, BAO Song, et al. Study on energy characteristics of blasting vibration signal of open-pit slope based on VMD-Teager[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(7):77-88, 105. (in Chinese)
-
- (上接第 78 页)
- [12] 张理维,王卫华,戴怡文. 基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究[J]. 爆破, 2020, 37(1):32-39.
- [12] ZHANG Li-wei, WANG Wei-hua, DAI Yi-wen, et al. Blast hole Arrangement optimization based on rock blasting damage[J]. Blasting, 2020, 37(1):32-39. (in Chinese)
- [13] 单仁亮,黄宝龙,高文蛟,等. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破新技术应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2):224-232.
- [13] SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, GAO Wen-jiao, et al. Case studies of new technology application of quasi-parallel cut blasting in rock roadway drivage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2):224-232. (in Chinese)
- [14] 王怀勇,裴斌,王顺,等. 光面爆破在节理裂隙发育巷道掘进中的试验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2):373-376.
- [14] WANG Huai-yong, PEI Bin, WANG Shun, et al. The experimental research of smooth blasting for roadway excavation with developed joint fissure [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2):373-376. (in Chinese)
- [15] 傅师贵,刘泽功,张健玉,等. 高地应力下岩体控制爆破机理与损伤演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4):867-878.
- [15] FU Shi-gui, LIU Ze-gong, ZHANG Jian-yu, et al. Study on mechanism of controlled blasting and damage evolution of rock mass under high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4):867-878. (in Chinese)
- [16] 徐颖,顾柯柯,葛进进,等. 装药不耦合系数对初始地应力下岩石爆破裂纹扩展影响的试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(4):1-9.
- [16] XU Ying, GU Ke-ke, GE Jin-jin, et al. Experimental study on effect of charge decoupling coefficient on crack propagation in rock by blasting under initial in-situ stress [J]. Blasting, 2022, 39(4):1-9. (in Chinese)
- [17] 潘勇. 岩体可爆性数值分级研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
- [17] PAN Yong. Research of mass blastability numerical classification[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] 张立国. 矿山爆破实用技术细节详解[M]. 北京:化学工业出版社, 2015:28-29.
- [19] HAO Hong, WU Chong-bin, ZHOU Yong. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models part 1: equivalent material property approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35:79-94.