

基于 ICEEMDAN-盲源分离联合的微震信号降噪方法研究^①

黄 港¹, 郑禄林¹, 王英乐¹, 左宇军¹, 郑禄璟², 刘晓蓉¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州锦丰矿业有限公司, 贵州 贞丰 562200)

摘要: 针对黔西南锦丰金矿巷道施工采集的微震信号非平稳特征和背景噪声干扰问题, 引入一种基于完善的自适应噪声完备集成经验模态分解 (ICEEMDAN) 与盲源分离联合的降噪方法。该方法通过 ICEEMDAN 算法对微震信号进行初步分解, 再利用 MATLAB 平台计算出信号的相关系数和边际频谱, 筛选出含噪模态分量和信号的主频率分量, 最后通过 FastICA 算法进行盲源分离, 实现降噪。实际应用结果表明, 与经验模态分解 (EMD) 和小波包阈值传统方法相比, 该方法信噪比更大 (24.142 5 dB)、标准误差更小 (0.012 18)、降噪效果更好。

关键词: ICEEMDAN; 盲源分离; FastICA 算法; 微震信号; 降噪; 微震监测

中图分类号: TD853

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.006

文章编号: 0253-6099(2023)03-0024-06

Research on Microseismic Signal Denoising Based on ICEEMDAN and Blind Source Separation

HUANG Gang¹, ZHENG Lulin¹, WANG Yingle¹, ZUO Yujun¹, ZHENG Lujing², LIU Xiaorong¹

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Guizhou Jinfeng Mining Co Ltd, Zhenfeng 562200, Guizhou, China)

Abstract: Microseismic signals collected during roadway construction in Jinfeng Gold Mine in the southwest Guizhou Province are non-stationary and also contaminated with background noise. For solving this problem, a noise reduction method based on the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN) combined with blind source separation (BSS) was proposed. With this method, a microseismic signal can be preliminarily decomposed by ICEEMDAN algorithm, and then correlation coefficient and marginal spectrum of signal can be calculated with MATLAB. Components of noise-containing mode and main frequency of signal can be filtered, and FastICA algorithm is finally used for BSS to achieve noise reduction. The practical application in mine shows that compared to empirical mode decomposition (EMD) and traditional wavelet packet threshold method, the proposed method, with higher signal-to-noise ratio (24.142 5 dB), can bring better noise reduction effect with smaller standard error (0.012 18).

Key words: ICEEMDAN; blind source separation (BSS); FastICA algorithm; microseismic signal; noise reduction; microseismic monitoring

微震监测是一种动力灾害预警技术, 目前已广泛应用于国内外矿山^[1-2], 可以实时、连续监测矿山开采扰动下的动力现象及灾害, 对了解岩体破裂机制及损伤演化过程、指导矿山安全生产具有重要意义。但采集的微震信号往往含有机械振动等背景噪声, 这些噪声对波形初至拾取、震源演化机制等研究产生了较大

影响, 因而有必要对微震信号进行有效降噪。

基于微震信号非稳定性和动态性特点, 利用典型的傅里叶变换方法可以实现一定程度的去噪, 它对稳定周期性信号有较好的效果, 但对含有突变的微震信号效果不好。近几年, 比较常见的信号降噪方法有经验模态分解 (EMD)^[3]、集成经验模态分解 (EEMD)^[4]

① 收稿日期: 2022-12-05

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目 (黔科合支撑 [2021] 一般 516、黔科合支撑 [2022] 一般 247); 贵州省矿山动力灾害预警与控制技术科技创新人才团队 (黔科合平台人才 [2019] 5619 号)

作者简介: 黄 港 (1997—), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事矿山灾害防治研究。

通信作者: 郑禄林 (1983—), 男, 贵州大方人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事安全工程、矿山灾害防治、基础地质研究及教学工作。

和小波变换^[5]等。小波变换法虽能有效降低白噪声,但对非稳定信号有一定程度的抑制效果^[6]。EMD方法在解决非线性波动信号问题上有着不错的成效,但算法的数学理论基础还不够严密,计算效率低下,并且有模态混叠的现象^[7]。针对模态混叠的问题,文献[8]给出EEMD方法,虽有一定成效,但仍存在模态数量不一致和冗余噪声问题。基于上述问题,文献[9]给出了自适应噪声的完备集成经验模态分解(CEEMDAN)方法,解决了EEMD方法模态数量不一致和冗余噪声问题。然而在CEEMDAN分解前段会产生伪模态。针对该问题,文献[10]提出完善的自适应噪声完备集成经验模态分解(ICEEMDAN)方法,解决了CEEMDAN伪模态问题的同时,减少了不必要的固有模态分量,提高了信号分离的精确度。盲源分离能够将噪声有效去除,保留更多的有用信息,从而达到理想的降噪效果^[11]。

本文在深入研究各去噪方法优缺点基础上,引入一种基于ICEEMDAN和盲源分离联合的降噪方法,通过ICEEMDAN分解微震信号,匹配含噪部分的高阶模态分量,得到两路观测信号,再基于信号源和噪声源的相对独立性,利用FastICA算法进行盲源分离,实现降噪。

1 算法的基本原理

1.1 ICEEMDAN方法

为了克服CEEMDAN等方法存在的问题,文献[11]提出了ICEEMDAN方法,该方法添加了高斯白噪声,很大程度降低了CEEMDAN分解过程中产生的伪模态,同时也能精确分解得到模态分量,减少不必要的分量。ICEEMDAN方法是基于CEEMDAN进一步完善的算法,定义 x 为待分解信号, $E_k(\cdot)$ 代表 k 阶固有模态分量,由EMD分解生成, $N(\cdot)$ 代表信号的局部均值, $w^{(i)}$ 代表高斯白噪声。其分解步骤为:

1) 通过向原始信号集合中叠加1组高斯白噪声 $w^{(i)}$,构造集合 $x^{(i)} = x + \beta_0 E(w^{(i)})$,求出信号的局部均值 $N(\cdot)$,然后对 $N(\cdot)$ 取均值,可得出第1组残差 $Q_1 = N(x^{(i)})$ 。

2) 由步骤1)得到的残差,计算第1个模态分量 $d_1 = x - Q_1$ 。

3) 继续添加高斯白噪声,利用局部均值分解计算第2组残差 $R_1 + \beta_1 E(w^{(i)})$,定义第2个模态分量为 d_2 。计算第2个模态分量 $d_2 = Q_1 - Q_2 = Q_1 - (N(Q_1 + \beta_1 E(w^{(i)})))$ 。

4) 计算第 K 组残差 $Q_k = N(Q_{k-1} + \beta_{k-1} E(w^{(i)}))$ 和第 K 个模态分量 $d_k = Q_{k-1} - Q_k$ 。

5) 直至计算分解结束,得到所有的模态分量和残

差数。

1.2 盲源分离

盲源分离是对多维观测信号进行分离处理,估算出原始信号的相似值。近年来,该技术在阵列信号处理、图像处理等领域得到了广泛应用^[12-13]。目前,常用的盲源分离算法有Infomax、JADE和FastICA。FastICA算法在计算精确度上比Infomax和JADE更优,在算法性能上强于Infomax、与JADE相近。基于信号降噪效果和算法性能考虑,本文采用负熵更大的FastICA算法,负熵定义^[14]为:

$$N_g(Y) = \{E[g(Y)] - E[g(Y_{\text{gauss}})]\}^2 \quad (1)$$

式中 $E[\cdot]$ 为均值运算; $g(\cdot)$ 为非线性函数; Y_{gauss} 为与 Y 存在相同方差的高斯随机变量。FastICA算法基本步骤为:

1) 通过白化预处理和中心化处理,使各观测信号均值化为0,从而得出经预处理后的数据矩阵 W_0 ,将观测信号 $X(t)$ 映射到新的子区间中,并将其转换为白化向量 $Z(t)$ 。

$$Z(t) = W_0 X(t) \quad (2)$$

2) 筛选需要估算的分量数目 m ,设 p 的迭代次数为1。

3) 选择一个随机初始权矢量 W_p ,令:

$$W_p = E\{Z(t)g[W_p^T Z(t)]\} - E\{Z(t) \cdot g'[W_p^T Z(t)]\} W \quad (3)$$

其中 $g(\cdot)$ 为非线性函数。

4) 按式(4)进行迭代计算:

$$W_p = W_p - \sum_{i=1}^{p-1} [(W_p^T W_i) W_i] \quad (4)$$

5) 判断 W_p 的收敛性:若 W_p 不收敛,折返步骤4);若 W_p 收敛,令 $p=p+1$,返回步骤3);重复以上步骤,直至 $p>m$,停止计算,得到原信号的估计值 $Y(t)$ 。

1.3 ICEEMDAN-盲源分离

单从某一方面来看,以上两种方法并不能对微震信号进行有效降噪,但基于ICEEMDAN和盲源分离联合的方法进行降噪处理可以获得理想的效果。其降噪流程见图1。首先,通过ICEEMDAN分解微震信号产生系列的固有模态分量(IMF);然后,根据边际频谱峰分布特征判断信号的主频率分量个数 n ,再依据EMD带滤波的特性,计算获得主频率分量个数;将模态分量比较分类,使含噪模态分量分为一类并求其和,得到一类观测分量,对剩余的无噪模态分量,根据边际频谱分布特征和主频率个数相同的模态分量加以求和,从而获得相对应个数的分量,这样就获得了 $n+1$ 类观测信

号分量;最后,采用 FastICA 算法进行盲源分离,将含噪声分量 $Y(t)$ 与无噪声分量 $Z(t)$ 分离出来,实现降噪。

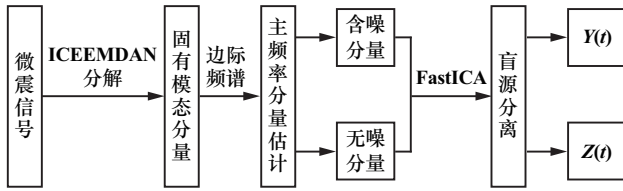


图1 降噪流程

2 仿真分析

为了验证本文方法的合理性和有效性,设计一个仿真信号,基于 MATLAB 平台对仿真信号进行降噪分析。仿真信号的表达式为:

$$\begin{cases} k_1(t) = 12 \times 10^{-2} \times \sin\left(2\pi \times 35t - \frac{2\pi}{5}\right) \\ k_2(t) = 10 \times \sin\left(2\pi \times 13t - \frac{3\pi}{5}\right) \\ k_3(t) = 5 \times \sin\left(2\pi \times 5t - \frac{4\pi}{5}\right) \\ k = k_1(t) + k_2(t) + k_3(t) + Y(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $t \in [0, 5]$, 时间间隔为 5×10^{-4} s; $Y(t)$ 为高斯白噪声。

针对上述仿真信号,利用 ICEEMDAN 分解得到从高频到低频的 10 个 IMF 分量,基于 MATLAB 平台计算仿真信号与 IMF 的相关度和信号的边际频谱,并根据其相关度以及边际频谱的主频率筛选出需要处理的含噪分量。仿真信号及其模态分量见图 2。通过对比仿真信号与各 IMF 的相关度,初步判断 IMF5~IMF7 与仿真信号的相关度较好,IMF1~IMF4、IMF8~IMF10 与仿真信号的相关度较差。从图 2 的波形比较中也可以得出同样的结论。

仿真信号的边际频谱见图 3。根据图 3 可以判断出信号中含有 2 个主频率,因此将 IMF1~IMF4 组合、IMF5~IMF7 组合和 IMF8~IMF10 组合得到 3 类观测信号,最后采用 FastICA 算法进行盲源分离,其结果见图 4。从图 4 可以看出,仿真信号经降噪后的波形变得更平滑,降噪效果较好。

为了探究本文方法的降噪性能,采用 EMD 和小波包阈值两种传统方法以及本文方法,在不同信噪比情况下,利用 MATLAB 平台进行了蒙特卡洛模拟试验。其降噪性能对比见图 5。由图 5 可知,在信噪比大于干扰情况下,与 EMD 和小波包阈值降噪方法相比,本文方

法有更好的降噪性能。当信噪比低于 0 dB 时,EMD 比小波包阈值降噪性能更优;当信噪比高于 0 dB 时,小波包阈值比 EMD 降噪性能更优。

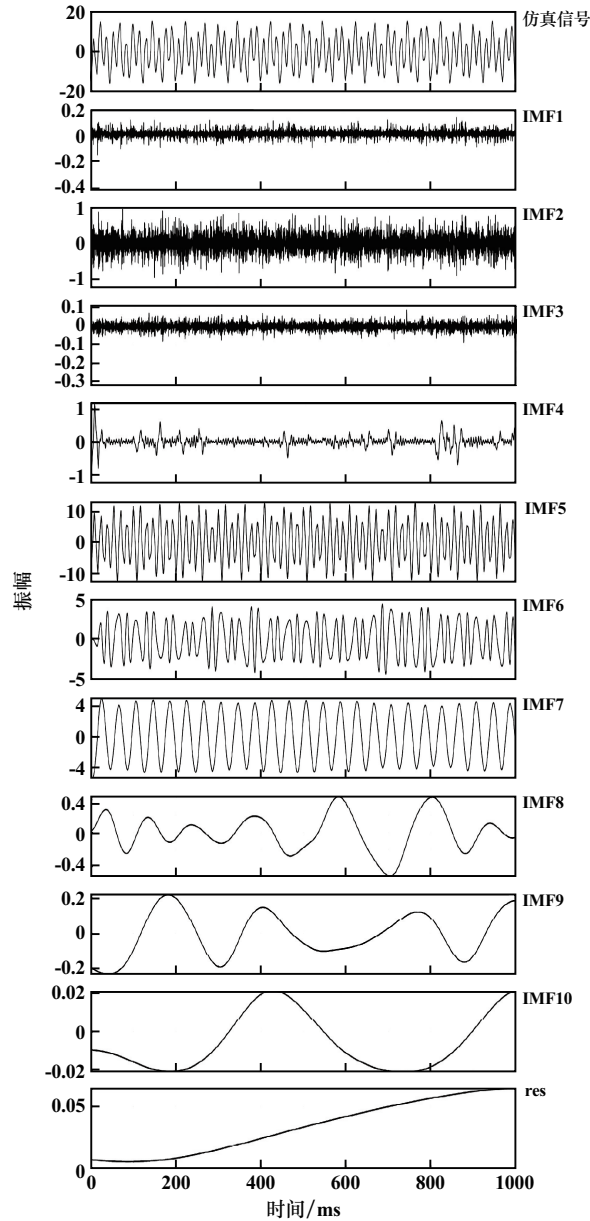


图2 仿真信号及其模态分量

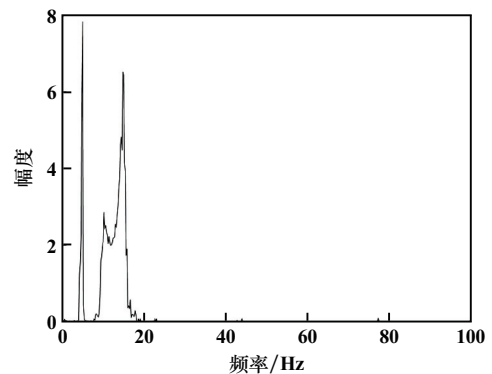
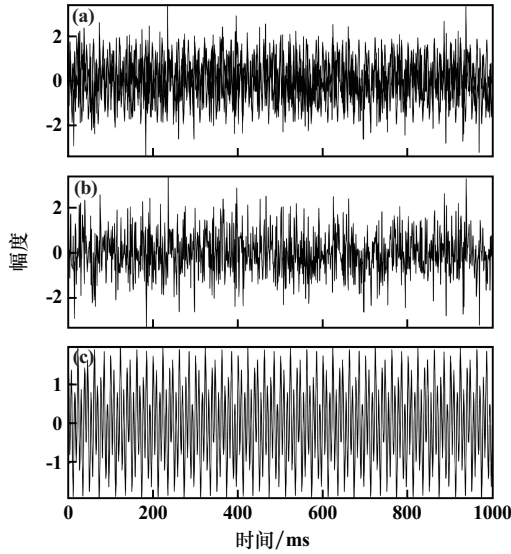


图3 仿真信号的边际频谱



(a) IMF1~IMF4; (b) IMF5~IMF7; (c) IMF8~IMF10
图4 降噪结果

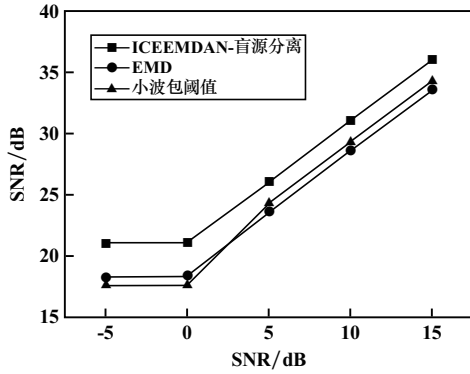


图5 降噪性能对比

3 实例分析

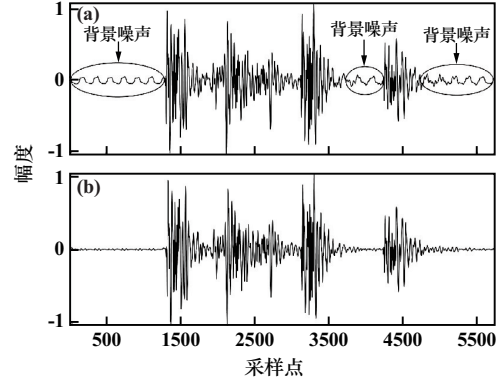
3.1 工程背景

黔西南锦丰金矿位于贵州省黔西南州贞丰县境内,区内属典型喀斯特地貌,地质条件复杂,使得金矿逐渐向深部开采时表现出高地应力的特点,造成巷道顶板冒落等动力灾害频发,表现出一系列工程响应问题,给巷道采掘工作带来重大安全隐患。

3.2 微震信号的预处理

采用8通道IMS微震监测设备,采集数据源自锦丰金矿厂沟矿区30巷道中段。

微震监测系统采集的信号数据显示,受施工现场环境噪声的影响,微震信号波形中夹杂着各种背景噪声。为了能达到理想的降噪效果,基于MATLAB平台采用EEMD方法对微震信号进行预处理,去除其背景噪声。预处理结果见图6。



(a) 处理前; (b) 处理后
图6 预处理结果

3.3 ICEEMDAN-盲源分离联合降噪

为了进一步验证本文方法的合理性和有效性,基于MATLAB平台对微震信号数据进行处理。微震信号经过ICEEMDAN依次分解为7个IMF分量。根据EEMD分解的取值方法区间,采取“试错法”对信号数据进行处理,最终设定ICEEMDAN分解的特征参数为:高斯白噪声的标准差为0.2,噪声添加次数为50次,最大允许10次迭代。微震信号及其模态分量见图7。



图7 微震信号及其模态分量

利用式(6)计算出原始微震信号与IMF1~IMF7模态分量的相关系数 r_i ,结果见表1。

$$r_i = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}_i)(y - \bar{y})]}{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum (y - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中 x_i 为各固有模态分量; y 为原始微震信号。

表1 模态分量的各相关系数

模态分量	相关系数 r	模态分量	相关系数 r
IMF1	0.4577	IMF5	0.1711
IMF2	0.7545	IMF6	0.0889
IMF3	0.5350	IMF7	0.0019
IMF4	0.2064		

由表1可见,微震信号与模态分量各相关系数差异较大。其中 IMF2、IMF3 相关系数均大于 0.5, 可作为较好的模态分量, IMF1、IMF4~IMF7 相关系数均小于 0.5, 初步判断 IMF1、IMF4~IMF7 这 3 组模态分量中含有噪声信号。

通过傅里叶变换方法,得到模态分量 IMF1~IMF7 的频谱见图 8。从图 8 可看出, IMF1 分量主频率集中分布在 350~500 Hz, IMF2~IMF3 分量主频率集中分布在 50~250 Hz, IMF4~IMF7 分量主频率均小于 50 Hz。因本文采集数据的频率范围在 50~250 Hz, 从频谱分布规律来看, IMF1、IMF4~IMF5 和 IMF6~IMF7 这 3 组分量确实含有某些噪声信号。

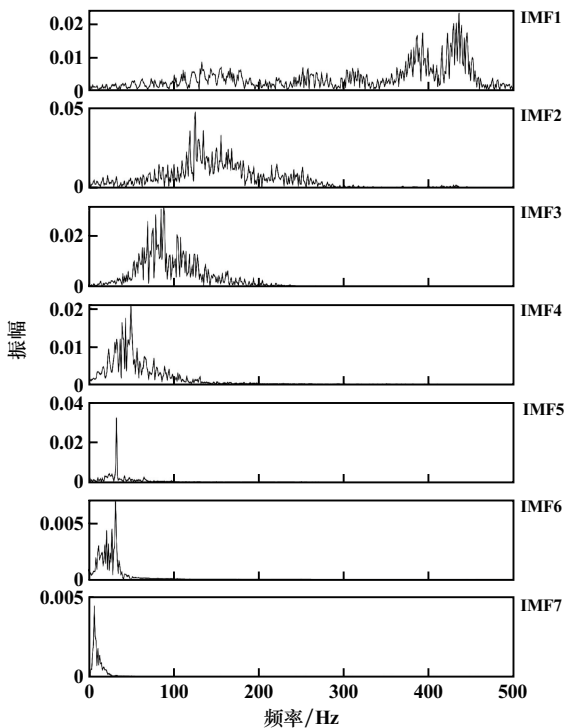


图8 模态分量频谱

基于 MATLAB 平台计算得到的信号边际频谱见

图 9。在实际工程背景下,微震信号频率波动较丰富,仅选择主频率进行分析。根据边际频谱峰分布特征判断微震信号中含有 3 个主频率,因此将 IMF1、IMF2~IMF3 组合、IMF4~IMF5 组合、IMF6~IMF7 组合得到 4 类观测信号,最后利用 FastICA 算法进行盲源分离,实现降噪。

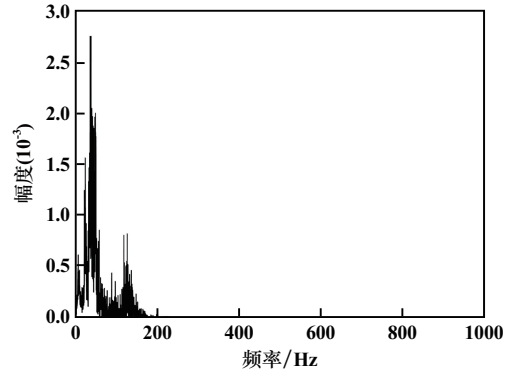


图9 微震信号的边际频谱

3.4 降噪效果评价

为了评判本文方法的降噪性能,利用信噪比 (SNR) 与标准误差 (RMSE) 两个参数作为量化标准。SNR 越高,说明微震信号降噪后所保留的信号信息越丰富,降噪效果越好。RMSE 越小,说明微震信号降噪后的信号信息越还原微震原始信号,降噪效果越好。其中 SNR 和 RMSE 的定义^[15]分别为:

$$SNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n s_i(t)}{\sum_{i=1}^n [s_i(t) - s_i(t)']^2} \right\} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [s_i(t) - s_i(t)']^2} \quad (8)$$

式中 $s_i(t)$ 表示含噪信号; $s_i(t)'$ 表示降噪后信号; n 为采样点。

为了评价本文方法的降噪效果,对比了 EMD、小波包阈值以及本文方法的降噪指标,结果见表 2,降噪效果对比见图 10。从表 2 和图 10 可看出,ICCEMDAN-盲源分离联合降噪总体效果优于 EMD 降噪和小波包阈值降噪,同时,ICCEMDAN-盲源分离联合降噪得到的信噪比更大 (24.142 5 dB)、标准误差更小 (0.012 18),且保留了完整的原始信号信息。小波包阈值降噪虽在一定程度上消除了信号中大部分的噪声,但却丢失了部分有用信号信息。因此,在保留完整原始信号信息的前提下,通过 ICEEMDAN-盲源分离联合降噪后的微震信号可以更好地消除信号中的噪声,由此证明了本文方法的合理性和有效性。

表 2 降噪指标对比

降噪方法	信噪比 SNR/dB		标准误差 RMSE
	降噪前	降噪后	
ICEEMDAN-盲源分离	0	24.142 5	0.012 18
EMD	0	9.954 5	0.062 37
小波包阈值	0	5.069 1	0.109 46

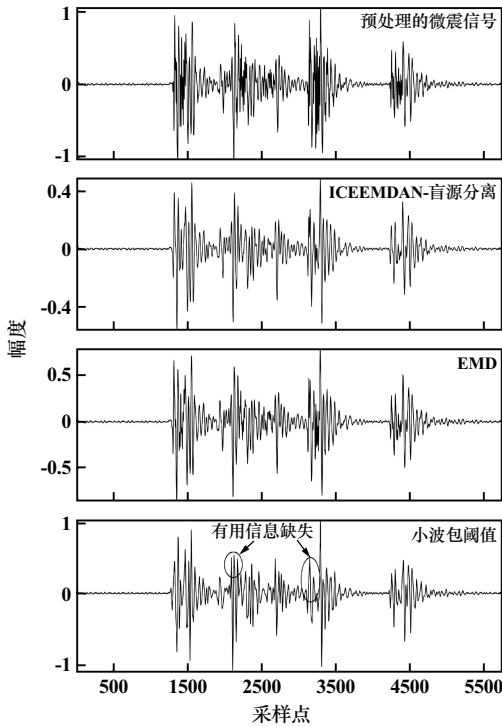


图 10 降噪效果对比

4 结 论

以黔西南锦丰金矿为工程背景,引入一种基于 ICEEMDAN 和盲源分离联合的方法对微震信号进行降噪处理,得出如下结论:

1) ICEEMDAN 方法能够有效减少在 EMD 分解过程中可能产生的模态混叠现象,有效解决了在 EEMD 分解过程中可能出现的模态数量不一致和冗余噪声问题,减少了 CEEMDAN 分解中不必要的固有模态分量,提高了信号分离的精确度;FastICA 算法性能与 Infomax 和 JADE 相比更优,计算难度也更低。

2) 基于 ICEEMDAN-盲源分离联合的降噪方法可以有效去除微震信号中的噪声,相较于单纯的 EMD 和

小波包阈值降噪方法,其信噪比更大(24.142 5 dB)、标准误差更小(0.012 18),降噪效果更好。

参考文献:

- [1] 李振春,张军华. 地震数据处理方法[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2004.
- [2] 徐奴文,唐春安,沙 椿,等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(5):915-925.
- [3] 李夕兵,张义平,左宇军,等. 岩石爆破振动信号的 EMD 滤波与消噪[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006(1):150-154.
- [4] 李启月,王宏伟,王靖博,等. 基于 EEMD 和小波阈值法的爆破振动信号预处理研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):28-31.
- [5] 杨凤芸,徐茂林,郭兆鹏. 露天矿边坡监测中的小波滤波与 BPANN 预测[J]. 矿冶工程, 2013,33(6):1-5.
- [6] Said Gaci. The Use of Wavelet-Based Denoising Techniques to Enhance the First-Arrival Picking on Seismic Traces[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2014,52(8):4558-4563.
- [7] Singh D S, Zhao Q. Pseudo-fault signal assisted EMD for fault detection and isolation in rotating machines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016,81:202-218.
- [8] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009(1):1-41.
- [9] Torres M E, Colominas M A, Schlotthauer G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2011 IEEE international conference on. 2011:4144-4147.
- [10] Colominas M A, Schlotthauer G, Torres M E. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing[J]. Biomedical Signal Process and Control, 2014,14:19-29.
- [11] 李振兴,翟 月,刘 学. 基于 EEMD 和盲源分离的遥测振动信号降噪方法[J]. 强度与环境, 2021,48(4):59-64.
- [12] 肖 瑛,马艺伟,刘 学. 遥测振动信号单通道盲源分离自适应滤波幅度校正方法[J]. 振动与冲击, 2021,40(23):127-133.
- [13] 沈 帆,李翰林,孙 斌,等. 基于 Anscombe 变换的 X 射线图像序列盲源分离降噪[J]. 光学精密工程, 2020,28(1):244-250.
- [14] 同晓荣. 基于负熵最大的 FastICA 语音信号分离算法[J]. 火力与指挥控制, 2017,42(8):101-104.
- [15] 蔡改贫,赵小涛,胡显能,等. CEEMDAN-小波阈值联合的球磨机筒体振动信号去噪方法研究[J]. 机械科学与技术, 2020,39(7):1077-1085.

引用本文: 黄 港,郑禄林,王英乐,等. 基于 ICEEMDAN-盲源分离联合的微震信号降噪方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):24-29.