

# 基于 EWT-分量阈值与 SVD 的微震信号降噪方法

谢 博<sup>1</sup> 施富强<sup>2,3</sup> 马 胜<sup>2</sup> 李 锋<sup>2</sup>

1 西南交通大学牵引动力国家重点实验室,成都市二环路北一段 111 号,610031  
2 西南交通大学机械工程学院,成都市二环路北一段 111 号,610031  
3 四川省安全科学技术研究院,成都市武科西四路 18 号,610000

**摘 要:** 针对微震信号采集过程中存在大量不同频率的干扰信号,导致信号初至拾取难度大的问题,提出一种经验小波变换(EWT)结合分量阈值重构规则及奇异值分解(SVD)技术对微震信号进行降噪的方法。该方法利用 EWT 自适应分解和抗模态混叠的特点分解微震信号,得到各分量信号。对于高信噪比信号,选取相关系数大于 0.3 且方差贡献率大于 15% 的固有模态分量进行重构,具有较好的降噪效果;对于低信噪比信号,在高信噪比降噪方法的基础上利用 SVD 去除高频分量中的噪声,并与 EWT 分解出的低频有效分量进行重构。实验表明,对不同信噪比的构造信号与实际微震信号进行降噪,信噪比均得到明显改善;以修改的能量比法和分形维数法拾取实际微震降噪信号初至到时作为验证,拾取相对误差均小于 1%,证明了本文降噪方法的有效性。

**关键词:** 经验小波变换;微震信号;奇异值分解;降噪;信号初至拾取

**中图分类号:** P315      **文献标识码:** A

在将微震监测技术应用于矿山边坡、地质灾害的实时在线监测和岩体稳定性安全评估<sup>[1]</sup>时,由于采集到的数据中包含大量干扰信号<sup>[2]</sup>,探究微震信号降噪方法已成为识别岩石破裂信号和准确拾取信号初至时间的关键技术之一。部分学者将经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)及其改进方法引入到微震信号的分析处理中<sup>[3-7]</sup>,但与其相关的降噪方法不能完全消除边界效应和模态混叠的影响。

针对低信噪比微震信号初至拾取精度低、难度大等问题,本文基于经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)方法<sup>[8-9]</sup>,提出一种 EWT 结合分量阈值重构规则及奇异值分解技术的微震信号降噪方法,并通过仿真信号与实际微震信号验证本文降噪方法的有效性和适用性。

## 1 方法与原理

### 1.1 经验小波理论

EWT 是 Gilles<sup>[10]</sup>提出的一种构建自适应小波的新方法,其与 EMD 的相同之处是都能根据信号特点自适应调整相关参数,但 EMD 方法在理论基础方面有所欠缺,而小波变换方法无法自

适应划分频带。因此,EWT 是一种 EMD 自适应性与小波框架理论多尺度特点相结合的信号分析方法,具体分解过程与原理见文献[11]。

### 1.2 降噪算法流程

利用 MATLAB 软件编程,构建微震信号降噪处理算法模型,具体流程如下:

- 1) 选取合适的小波函数,利用 EWT 算法将原始微震信号  $f(j)$  自适应分解为各个频率尺度的固有模态分量  $C_0, C_1, \dots, C_i$ 。
- 2) 计算原始微震信号  $f(j)$  与分解出的固有模态分量  $C_i$  的相关系数及方差贡献率。
- 3) 对于高信噪比信号,选取相关系数大于 0.3 且方差贡献率大于 15% 的固有模态分量作为 EWT 分量阈值重构规则进行信号重构;对于低信噪比信号,利用 SVD 技术去除分量阈值重构规则未能除去的高频分量中的噪声,并与 EWT 计算出的低频有效分量进行重构,计算重构信号的信噪比。若信噪比无明显改善,则需返回步骤 1) 重新选取小波函数,再重复以上步骤。

## 2 仿真信号分析

利用式(1)生成能量随时间呈指数衰减的正

收稿日期:2020-05-03  
项目来源:国家重点研发计划(2017YFB1201302-09);四川省省级科研院所基本科研业务费(2018YSKY0038);四川省科技计划(C2016J8 号)。  
第一作者简介:谢博,博士生,主要从事安全监测研究,E-mail:534383673@qq.com。  
通讯作者:施富强,教授级高级工程师,主要从事应急管理和安全生产研究,E-mail:sfq@swjtu.edu.cn。

弦信号作为有效信号,并叠加不同能量的白噪声  $n(t)$ ,构造不同信噪比的仿真信号,结果见图 1(a)~(c):

$$x(t) = 0.3e^{(-0.0075t+2.25)}\sin(0.05\pi t - 15\pi) + n(t)$$

(1)

首先利用 EWT 方法分解原始信号,并按阈值重构规则对各仿真信号进行降噪,结果如图 1(d)~(f)所示。该降噪方法虽可改善原始信号的信噪比,但从各降噪信号的频谱(图 2)中可以看出,与高信噪比信号(图 2(c))相比,降噪后信号(图 2(a)、(b))仍包含高频噪声,原因为 EWT 方法分解出的高频分量未能被去除。

针对上述问题,本文构造 EWT-SVD 信号降

噪方法。以图 2(a)信号为例,对包含噪声的第 11、12 阶高频分量进行奇异值分解,得到各分量的奇异值分布如图 3 所示。由图可知,第 11 阶分量的奇异值具有“台阶”形式,选取前 2 个奇异值分量并通过奇异值分解逆过程进行重构,得到降噪处理的第 11 阶分量。而第 12 阶分量的奇异值不具有“台阶”形式,认为该分量主要由噪声信号贡献,可去除该分量。将降噪后的第 11 阶分量与满足分量阈值重构条件的其他低频 EWT 分量进行重构,得到降噪信号(图 4(a)),图 4(b)信号同样按上述步骤完成降噪。对比图 2 和图 4 发现,高频部分对应的幅值得到有效抑制,且降噪信号的信噪比分别升至 3.956 7 和 7.803 0。

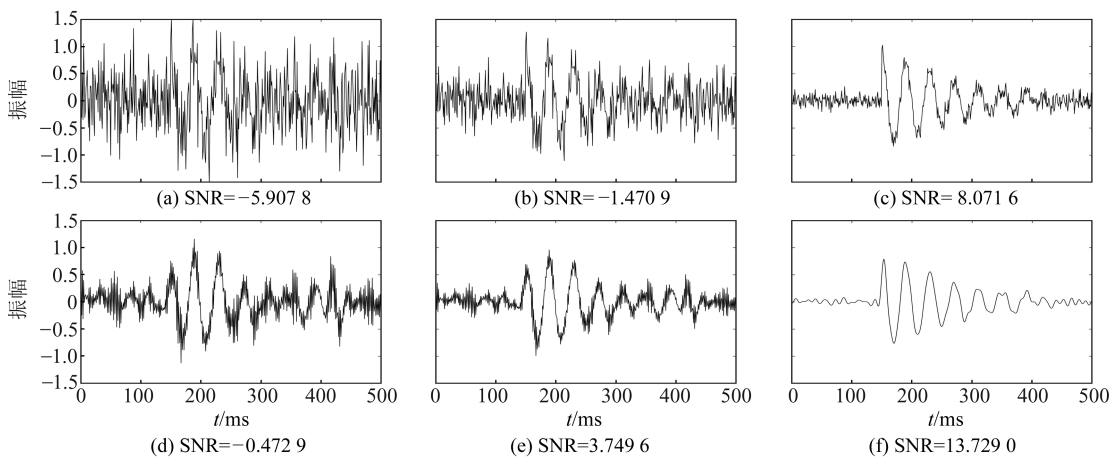


图 1 仿真信号与降噪结果  
Fig. 1 Simulation signal and denoising results

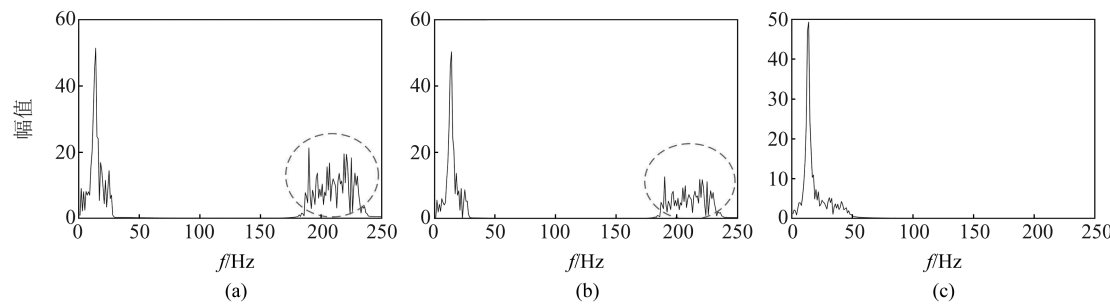


图 2 降噪信号频谱  
Fig. 2 Denoising signal spectrum

3 实例应用分析

截取一段微震信号,其时域图与频谱图分别如图 5(a)和 5(b)所示,微震信号的有效成分被噪声掩盖,且信号中混杂着不同频率的噪声信号,很难直接读取到微震信号的初至时间。利用本文提出的降噪方法分析该信号并拾取信号初至,进一步验证本文方法的适用性。

EWT 方法分解的微震信号中,第 1、4 和 6 阶分量满足分量阈值重构条件,但由于第 4 和 6 阶分

量中噪声信号贡献的频率占比较大,对其采用奇异值分解进行降噪,并与第 1 阶分量进行重构,得到的降噪结果如图 6 所示。从图中可以看出,与原始微震信号相比,降噪后的信噪比得到明显改善。从频谱图中可以看出,分解的微震信号中第 1 阶低频有效成分得以保留,但有效频率成分中仍包含部分噪声成分的第 4 和 6 阶分量,通过 SVD 降噪后所在频段的幅值均有所降低,其余由噪声贡献较多的频段则被完全去除。另外,利用修改的能量比(modified energy ratio, MER)法<sup>[12]</sup>和分形维数

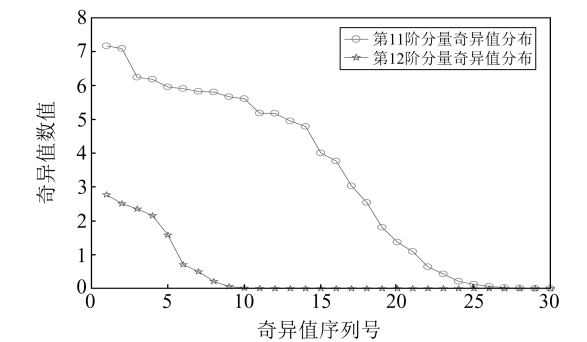


图 3 第 11、12 阶分量奇异值分布  
Fig. 3 The singular value distribution of 11th and 12th order components

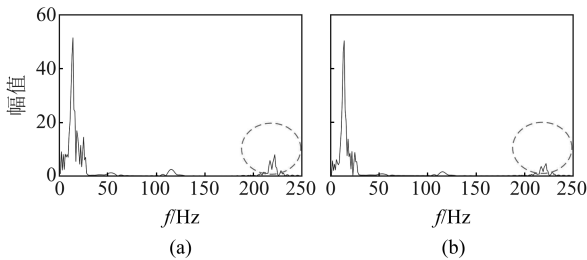


图 4 低信噪比信号 EWT-SVD 降噪频谱  
Fig. 4 EWT-SVD denoising spectrum of low signal-to-noise ratio signal

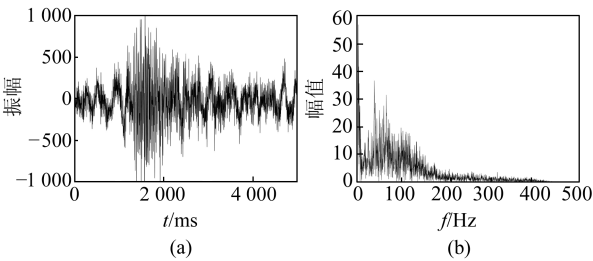


图 5 原始信号及其频谱  
Fig. 5 Original signal and its spectrum

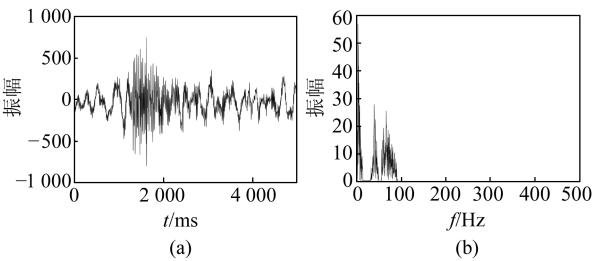


图 6 降噪信号及其频谱  
Fig. 6 Denoising signal and its spectrum

(fractal dimension, FD)法<sup>[13]</sup>拾取的初至时间分别为 1 155 ms 和 1 150 ms(图 7),与实际到时 1 146 ms 相比,相对误差分别为 0. 79%和 0. 35%,表明经 EWT-SVD 降噪后信号的初至特征更加明显,验证了本文降噪方法的有效性。

4 结 语

1)分量阈值重构规则能去除噪声含量高的 EWT 分量,采用 SVD 技术对其他高频分量进行

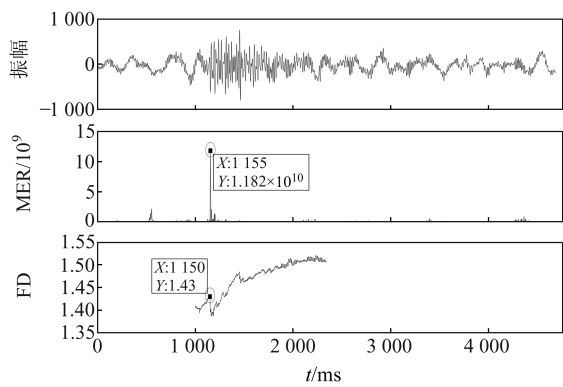


图 7 降噪信号的初至拾取结果  
Fig. 7 Primary arrival picking results of denoising signal

降噪并与低频有效分量进行重构,能最大限度地保留原始信号中的有效信息,改善信号信噪比。

2)利用本文降噪方法对仿真信号进行降噪,对比降噪前后信号的频谱变化发现,本文方法对不同信噪比的仿真信号均有较好的降噪效果。

3)基于 EWT 结合分量阈值重构规则与 SVD 技术对实际微震信号进行降噪,不仅能改善信号的信噪比,而且能明显增强信号的初至特征,使初至精度得到提高。实验证明,本文提出的降噪方法具有有效性和适用性。

参考文献

[1] 赵博雄,王忠仁,刘瑞,等. 国内外微地震监测技术综述[J]. 地球物理学进展,2014,29(4):1 882-1 888(Zhao Boxiong, Wang Zhongren, Liu Rui, et al. Review of Microseismic Monitoring Technology Research[J]. Progress in Geophysics,2014,29(4):1 882-1 888)

[2] 李成武,孙晓元,高天宝,等. 煤岩体振动破坏试验及微震信号特征[J]. 煤炭学报,2015,40(8):1 834-1 844(Li Chengwu, Sun Xiaoyuan, Gao Tianbao, et al. Coal and Rock Vibration Failure and the Characteristics of Micro-Seismic Signals[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(8):1 834-1 844)

[3] 官月,贾瑞生,卢新明,等. 利用经验模态分解及小波变换压制微震信号中的随机噪声[J]. 煤炭学报,2018,43(11):3 247-3 256(Gong Yue, Jia Ruisheng, Lu Xinming, et al. To Suppress the Random Noise in Microseismic Signal by Using Empirical Mode Decomposition and Wavelet Transform [J]. Journal of China Coal Society,2018,43(11):3 247-3 256)

[4] Han J J, Baan M. Microseismic and Seismic Denoising via Ensemble Empirical Mode Decomposition and Adaptive Thresholding[J]. Geophysics,2015,80(6):69-80

[5] 程浩,袁月,王恩德,等. 基于小波变换的自适应阈值微震信号去噪研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2018,39(9):1 332-1 336(Cheng Hao, Yuan Yue, Wang Ende, et al. Study of Hierarchical Adaptive Threshold Micro-Seismic Signal Denoising Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science,2018,39(9):1 332-1 336)

[6] Mousavi S M, Langston C A, Horton S P. Automatic

Microseismic Denoising and Onset Detection Using the Synchrosqueezed Continuous Wavelet Transform[J]. *Geophysics*, 2016, 81(4): 341-355

[7] 董林鹭,蒋若辰,徐奴文,等. 基于 LMD-SVD 的微震信号降噪方法研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 126-136 (Dong Linlu, Jiang Ruochen, Xu Nuwen, et al. Research on Microseismic Signal Denoising Method Based on LMD-SVD [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 126-136)

[8] 陈学军,杨永明. 采用经验小波变换的风力发电机振动信号消噪[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2018, 52(5): 988-995 (Chen Xuejun, Yang Yongming. De-Noising for Vibration Signals of Wind Power Generator Using Empirical Wavelet Transform[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2018, 52(5): 988-995)

[9] 覃发兵,徐振旺,啜晓宇,等. 基于经验小波变换的地震资料噪声压制方法[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(5): 100-110 (Qin Fabing, Xu Zhenwang, Chuai Xiaoyu, et al. Seismic Noise Suppression Based on Empirical Wavelet Transformation[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(5): 100-110)

[10] Gilles J. Empirical Wavelet Transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(16): 3 999-4 010

[11] 李志农,朱明,褚福磊,等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2 423-2 432 (Li Zhinong, Zhu Ming, Chu Fulei, et al. Mechanical Fault Diagnosis Method Based on Empirical Wavelet Transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2 423-2 432)

[12] 刘哈,张建中. 微震信号自动检测的 STA/LTA 算法及其改进分析[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1 708-1 714 (Liu Han, Zhang Jianzhong. STA/LTA Algorithm Analysis and Improvement of Microseismic Signal Automatic Detection [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(4): 1 708-1 714)

[13] 赵国彦,邓青林,李夕兵,等. 基于 EMD 和形态分形维数的微震波识别[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2017, 48(1): 162-167 (Zhao Guoyan, Deng Qinglin, Li Xibing, et al. Recognition of Microseismic Waveforms Based on EMD and Morphological Fractal Dimension [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2017, 48(1): 162-167)

Micro-Seismic Signal Denoising Method Based on EWT-Component Threshold and SVD

XIE Bo<sup>1</sup> SHI Fuqiang<sup>2,3</sup> MA Sheng<sup>2</sup> LI Feng<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 111 First Section of North-Erhuan Road, Chengdu 610031, China

2 School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 111 First Section of North-Erhuan Road, Chengdu 610031, China

3 Sichuan Academy of Safety Science and Technology, 18 Fourth West-Wuke Road, Chengdu 610000, China

**Abstract:** In the process of micro-seismic signal acquisition, a large number of interference signals with different frequencies make it difficult to pick up the primary arrival of the signal. We propose a method based on empirical wavelet transform(EWT) combined with EWT component threshold reconstruction rule and singular value decomposition(SVD) technology for signal denoising. The component signals are obtained by the EWT method, which decomposes the micro-seismic signals with the characteristics of adaptive decomposition and conquering modal mixing. For the high signal-to-noise ratio signal, the reconstruction of inherent modal components with a correlation coefficient greater than 0.3 and a variance contribution rate greater than 15% has a better denoising effect. For the low signal-to-noise ratio signal, based on the high signal-to-noise ratio denoising method, we propose a new denoising method using SVD to denoise the high-frequency components and reconstructing with low-frequency effective components decomposed by EWT. Through experimental analysis, the signal-to-noise ratio of the construction signals with different signal-to-noise ratio and the actual micro-seismic signals are obviously improved. The modified energy ratio method and fractal dimension method are used to pick up the primary arrival of actual micro-seismic denoising signals for verification. The relative error of picking up is less than 1%. The test results show the effectiveness of the denoising method.

**Key words:** empirical wavelet transform; micro-seismic signal; singular value decomposition; denoising; primary arrival picking of signal

**Foundation support:** National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFB1201302-09; Basic Research Fund of Sichuan Provincial Research Institutes, No. 2018YSKY0038; Science and Technology Project of Sichuan Province, No. [2016]8.

**About the first author:** XIE Bo, PhD candidate, majors in safety monitoring, E-mail: 534383673@qq.com.

**Corresponding author:** SHI Fuqiang, professor, majors in emergency management and safety production, E-mail: sfq@swjtu.edu.cn.