

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.023

基于 LMD-MFE-SVD 的松动爆破降噪分析*

周红敏¹, 赵事成¹, 王慧珍¹, 余辉^{1,2}, 李文豪¹, 张宪堂^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 青岛 266590;

2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 淮南 232001)

摘要: 为提高松动爆破振动信号分析精度,在局部均值分解(LMD)的基础上,建立一种基于局部均值分解(LMD)-多尺度模糊熵(MFE)-奇异值滤波(SVD)的混合去噪方法。使用 LMD 方法对松动爆破振动信号进行分解,获得一系列乘积分量(PF);通过计算 MFE 和相关系数,对爆破振动信号进行初步降噪;针对主要 PF 分量的残留噪声,使用 SVD 滤波进行降噪处理,提取真实信号成分。通过上述处理,最终实现松动爆破信号降噪。结果表明:提出的 LMD-MFE-SVD 降噪方法具有可行性和应用价值,能够对含噪的 PF 分量进行有效处理;对于含多信号成分、多噪声的仿真信号,LMD 类算法相较 EMD 类改进算法降噪效率更高,信噪比(SNR)、均根方误差(RMSE)和失真百分比(PRD)指标表现显著提升,而相较 LMD 算法,提出的 LMD-MFE-SVD 算法降噪效率进一步提高,依次提升 11.73%、22.07% 和 9.25%,降噪效率显著;根据实测松动爆破振动信号去噪后的波形和频谱对比,提出的 LMD-MFE-SVD 降噪后的信号波形更为集中,能保留多数信号信息,信号频谱图更为清晰,有效显示信号频率波峰,更利于松动爆破振动信号的特征分析。

关键词: 松动爆破; 振动降噪; 局部均值分解; 多尺度模糊熵; 奇异值滤波

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0174-09

Noise Reduction Analysis of Loosening Blasting Vibration Signal based on LMD-MFE-SVD

ZHOU Hong-min¹, ZHAO Shi-cheng¹, WANG Hui-zhen¹, YU Hui^{1,2}, LI Wen-hao¹, ZHANG Xian-tang^{1,2}

(1. Shandong Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Civil Engineering,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of

Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to improve the analysis accuracy of loosening blasting vibration signals, a hybrid denoising method based on local mean decomposition (LMD), multiscale fuzzy entropy (MFE), and singular value filtering (SVD) was established. Firstly, the vibration signal was decomposed by LMD method to obtain a series of product components (PF). Then, the blasting vibration signal was preliminarily denoised by calculating MFE and correlation

收稿日期 (Date of reception): 2022-11-22

网络首发日期 (Published online): 2023-04-23

作者简介: 周红敏 (1975-), 女, 河北新乐人, 副教授、硕士生导师, 主要从事工程防灾减灾控制研究, (E-mail) hongminzhou@163.com。

通讯作者: 张宪堂 (1973-), 男, 河北井陘人, 教授、博士生导师, 主要从事岩土结构动力学和爆破工程研究, (E-mail) zxxhtm@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51874189); 2021 年度矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金资助项目 (JYBGCCZX2021102)

About the author: ZHOU Hong-min (1975-), female, born in Xinle, Hebei Province, associate professor, master's supervisor, mainly engaged in engineering disaster prevention and mitigation control research, (E-mail) hongminzhou@163.com.

Corresponding author: ZHANG Xian-tang (1973-), male, born in Jingxing, Hebei Province, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on rock and soil structure dynamics and blasting engineering, (E-mail) zxxhtm@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (No. 51874189), Project Supported by the Open Fund of the Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education (Anhui University of Science and Technology) the Ministry of Education for Mining Underground Engineering in 2021 (JYBGCCZX2021102).

coefficients. Finally, the real signal components were denoised and extracted by SVD filtering on the residual noise of the main PF components. The results show that the proposed LMD-MFE-SVD denoising method can effectively deal with the noisy PF components. For the simulated signal with multiple components with noise, the LMD algorithm is more efficient than the EMD algorithm. Furthermore, the signal-to-noise ratio (SNR), root mean square error (RMSE) and percentage of distortion (PRD) of the proposed LMD-MFE-SVD method are significantly improved by 11.73%, 22.07% and 9.25%, respectively, compared with the LMD algorithm, which indicates that the noise reduction efficiency is considerable. According to the waveform and spectrum comparison of the measured loosening blasting vibration signal after denoising by the proposed LMD-MFE-SVD method, the denoised signal waveform is more concentrated with most of the signal information retained. The frequency spectrum is clearer, and the signal frequency peaks are effectively displayed.

Key words: loosening blasting; denoising of vibration signal; LMD; MFE; SVD

松动爆破作为相对成熟的爆破技术,多用于矿山开采和基坑开挖。在进行松动爆破振动监测时,周边环境间断噪声多、噪声类型复杂,且松动爆破的段别间隔时间长,更易受到噪声的干扰,对信号降噪模型的性能和效果提出更高要求。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)作为主要的信号降噪方法,因其在处理非线性、非平稳信号时降噪效率稳定,在爆破振动信号分析领域中得到广泛应用^[1]。然而EMD在处理间断噪声时会出现明显的模态混叠现象,对分解精度产生不利影响。为了解决该问题,学界相继提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)^[2]、互补集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)^[3]和改进的经验模态分解方法(modified ensemble empirical mode decomposition, MEEMD)^[4]等一系列改进算法,在爆破振动和故障检测领域进行应用,取得了较好的去噪效果。而为处理模态分解类算法的端点问题,学界又陆续提出极点对称分解算法(extreme-point symmetric mode decomposition, ESMD)^[5]和基于模态分解类的熵值筛选算法,有效解决了固有模态分量((intrinsic mode function, IMF)筛选过程的端点问题。

IMF分量本质为调频信号,重构信号准确度更多取决于对IMF分量的人为界定,降噪效果波动较大^[6]。为处理上述问题,Smith在进行脑电感知数据处理时提出局部均值分解(local mean decomposition, LMD)方法^[7]。程军圣等建立仿真信号用于LMD方法降噪效果验证^[8],表现出良好的信号处理能力。后续李伟将LMD方法应用于矿山微震信号提取^[9],取得了可观的分类准确率。然而LMD方法仍存在缺陷:其一,LMD方法更多应用于机械故障

检测、脑电信号提取领域,其他领域的拓展较少;其二,在使用LMD方法对信号进行分解,需要有效判断噪声分量与真实分量的界限,而界限判断的难易多取决于信号的复杂程度。

基坑开挖时周边环境嘈杂,工程机械施工噪声大,振动信号成分复杂,对降噪精度要求更高。基于上述问题,本文建立一种基于LMD-MFE-SVD的爆破振动信号降噪模型,对松动爆破振动信号进行LMD分解,得到乘积分量(product function, PF);结合相关系数和多尺度模糊熵(multiscale fuzzy entropy, MFE)进行PF分量筛选,对含噪分量进行SVD滤波得到更准确的爆破振动信号,为后续信号分析提供依据。

1 模型理论基础

1.1 LMD原理

LMD方法是一种新的自适应非平稳信号的分析处理方法,从原信号分解出若干PF分量,每个PF分量都是单个包络信号和对应调频信号的乘积,其分解过程如下^[10]:

(1)确定原信号 $x(t)$ 的局部极值点,计算相邻两个极值点的平均值 u_i 和包络估计值 v_i 。

(2)将全部相邻的局部均值 u_i 和局部包络估计值 v_i 分别用折线连接,采用滑动平均方法对其进行平滑处理,得到局部均值函数 $u_{11}(t)$ 和局部包络估计函数 $v_{11}(t)$,从原始信号中剔除 $u_{11}(t)$ 得到零均值函数 $h_{11}(t)$ 。

(3)对 $h_{11}(t)$ 进行解调,得到解调信号 $l_{11}(t)$

$$l_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{v_{11}(t)} \quad (1)$$

(4)将 $l_{11}(t)$ 作为原始信号,计算包络估计值 $v_{12}(t)$,若 $v_{12} \neq 1$,重复步骤(1)、(2),迭代 n 次后得

到的 $l_{1n}(t)$ 为纯调幅调频信号,则迭代停止,可得到下式

$$h_{1n}(t) = l_{1(n-1)}(t) - \mu_{1n}(t) \quad (2)$$

考虑到 l_{1n} 为纯调幅调频信号为理想情况,实际中为使 $v_{1n}(t)$ 更快收敛,可进行简化处理。设置增量减量为 δ ,使 $|1 - v_{1n}(t)| \leq \delta$,则计算对应的包络信号如下

$$v_1(t) = v_{11}(t)v_{12}(t)\cdots v_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n v_{1q} \quad (3)$$

(5)将纯调幅调频信号 $l_{1n}(t)$ 与包络信号 $v_1(t)$ 相乘得到乘积函数 PF_1

$$PF_1(t) = v_1(t)l_{1n}(t) \quad (4)$$

式中, $v_1(t)$ 为乘积函数 PF_1 的瞬时幅值。

(6)从原信号 $x(t)$ 中分离出乘积函数 PF_1 ,得到新的函数 $w_1(t)$,重复步骤(1)~(5),直至残差分量 $w_j(t)$ 为常值或单调函数,可得到下式

$$w_j(t) = w_{j-1}(t) - PF_j(t) \quad (5)$$

原始信号 $x(t)$ 可分解为 j 个 PF 分量和一个残差分量的 $w_j(t)$ 和,则原始信号 $x(t)$ 重构为

$$y(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + u_j(t) \quad (6)$$

1.2 MFE 原理

熵是时间序列复杂性的度量,多尺度模糊熵可代替一般熵中的硬阈值准则,用以衡量时间序列于不同尺度因子下的复杂性和自相似性,统计结果稳定性更好^[11],其计算步骤如下:

(1)将原始时间序列粗粒化

对长度为 N 的原始序列 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$,预先设定嵌入维数 m 和相似容限 r ,建立粗粒向量 $y_i(\tau)$

$$y_i(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, 1 \leq j \leq \frac{N}{\tau} \quad (7)$$

式中: τ 为尺度因子, $\tau=1$; $y_j(1)$ 为原序列。对于非零 τ 原始序列 X_i 可分为 τ 个每段长为 N/τ 的粗粒序列 $y_j(\tau)$ 。

(2)计算多尺度模糊熵

对全部粗粒序列计算模糊熵,可认为其为尺度因子的函数,即多尺度模糊熵。通常认为熵值越小,序列的自相似性越高;熵值越大,序列越复杂。

1.3 SVD 滤波原理

SVD 是线性矩阵理论中的重要工具,目前已经广泛应用于工程降噪领域。一般认为,SVD 值越大

则对应能量较大或者能量集中信号,SVD 值越小对应能量较小或者能量分散的信号^[12]。

(1)构造 Hankel 矩阵

对于一维序列 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 构造 Hankel 矩阵。

(2)对矩阵 H 进行 SVD 滤波

$$H = UWV^H = U_1W_1V_1^H + U_2W_2V_2^H \quad (8)$$

式中: U_1, W_1, V_1 为较大奇异值;上标 H 表示共轭转置。

(3)重构滤波后信号

对信号矩阵斜对角线上元素求平均值,可得到滤波后信号序列 $\hat{s}(k)$

$$\hat{s}(k) = \frac{1}{n-m+1} \sum_{j=m}^n \hat{H}(k-j+1, j) \quad (9)$$

式中: \hat{H} 为滤波后信号矩阵; $m = \max(1, k-p+1)$; $n = \min(q, k)$ 。

1.4 LMD-MFE-SVD 混合去噪方法

针对松动爆破信号的特点,建立一种基于 LMD-MFE-SVD 的混合去噪方法,算法步骤见图 1。

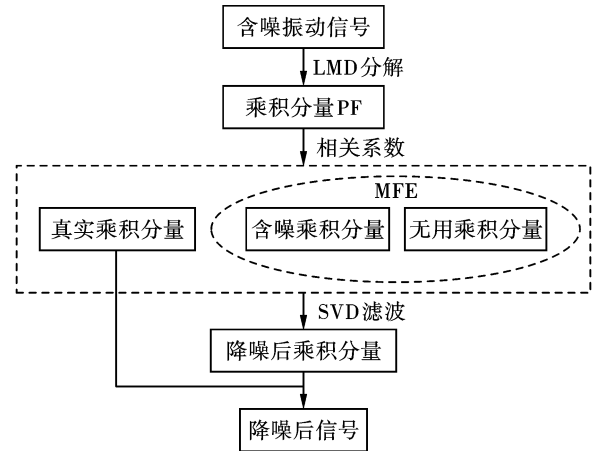


图 1 LMD-MFE-SVD 流程图

Fig. 1 Flow chart of LMD-MFE-SVD

2 仿真信号分析

2.1 建立仿真信号

为充分检验改进算法的可行性,有效计算信号熵值,合成由真实信号和噪声信号组成的仿真信号。真实信号包括低幅值低频余弦信号 $x_1(t)$ 、低幅值高频余弦信号 $x_2(t)$ 、调幅调频信号 $x_3(t)$ 和多频信号 $x_4(t)$ 、 $x_5(t)$,噪声信号包括间接噪声 $x_6(t)$ 和高斯噪声 $x_7(t)$ 。

仿真信号表达式如下

$$\begin{cases}
 x_1(t) = \cos(2\pi \times 10t) \\
 x_2(t) = \cos(2\pi \times 50t) \\
 x_3(t) = (1 + t) \sin[\pi t + \pi t^2 + \cos(10\pi t)] \\
 x_4(t) = [1 + 2\cos(2\pi \times 35t)] \cos(2\pi \times 145t) \\
 x_5(t) = [1 + \cos(2\pi \times 35t)] \cdot \\
 \quad \cos[2\pi \times 180t + \cos(2\pi \times 10t)] \quad (10) \\
 x_6(t) = \begin{cases} \text{zeros}(0, 0.2) \\ \text{randn}(0.2, 0.7) \\ \text{zeros}(0.7, 1.0) \\ \text{randn}(1.0, 2.0) \end{cases} \\
 x_7(t) = \text{wgn}(0.6) \\
 Y(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) + \\
 \quad x_5(t) + x_6(t) + x_7(t)
 \end{cases}$$

2.2 仿真信号分析

对仿真信号进行 LMD 分解,可得到 6 个 PF 分

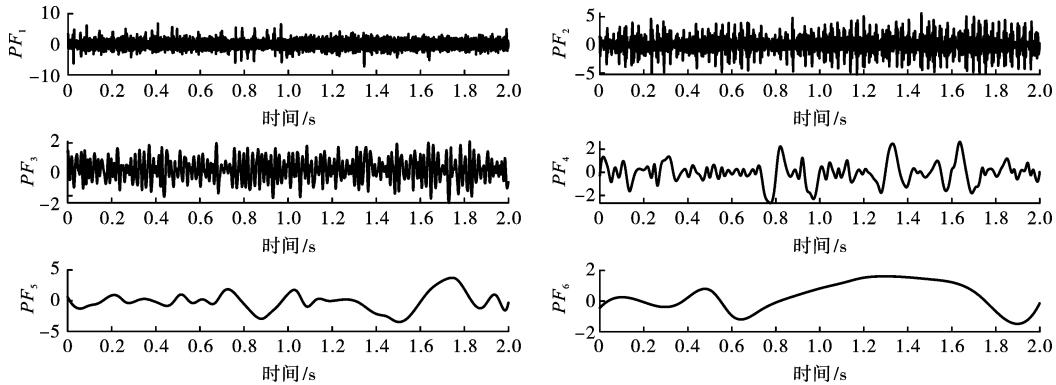


图 2 仿真信号 LMD 分解

Fig. 2 LMD decomposition of simulated signal

表 1 PF 分量模糊熵

Table 1 Fuzzy entropy of PF

	PF_1	PF_2	PF_3	PF_4	PF_5	PF_6
FuzzyEn1	0.7296	0.3540	0.2861	0.0534	0.0113	0.0053
FuzzyEn2	0.5022	0.3864	0.4452	0.1094	0.0230	0.0106
FuzzyEn3	0.3809	0.4459	0.5103	0.1627	0.0348	0.0160
FuzzyEn4	0.3136	0.4943	0.5574	0.2104	0.0470	0.0214

2.3 算法优劣对比

为更好比较改进算法的优劣,引入 EEMD、CEEMD、MEEMD 和 LMD 对仿真信号进行分解。采用信噪比(SNR)^[14]、均根方误差(RMSE)、失真百分比(PRD)对消噪质量进行量化分析。输入仿真信号进行分解,EEMD、CEEMD 和 MEEMD 等 5 类算法得到的分量相关系数见图 4,降噪指标数据见表 2。通过图 4 可知,对于成分复杂、具有多类噪声的复杂信号,LMD 类方法能够以更少的模态分解次数完成信号的整体分解,PF 分量相关系数整体呈递减

量,如图 2 所示,各分量的相关系数依次为 0.5178、0.6097、0.2560、0.2233、0.3907 和 0.1249,多尺度模糊熵见表 1。考虑到仿真信号由 7 类信号构成,分解得到的 PF 分量相关系数普遍较小,故本文相关系数阈值取 0.2^[13]。通过表 1 可知, PF_1 分量的多尺度模糊熵最大,且随着维度的增加而减少,与其余分量呈相反变换规律。参考相关系数, PF_1 分量为含噪乘积分量, $PF_2 \sim PF_5$ 为真实乘积分量,而 PF_6 为无用分量。

对 PF_1 进行 SVD 滤波去噪,具体去噪效果见图 3。通过观察图 3(a)可知,SVD 滤波对噪声分量进行了有效提取,得到了部分的信号特征;观察图 3(b)可知,SVD 滤波降噪后的信号更为集中,噪声分量得到了有效的剔除,具备一定的降噪效果。

趋势,表现出良好的分解稳定性,仅 IMF_5 分量作为折线凸点出现,与第二段的间接噪声有关。而 EEMD 类分解方法中的 $IMF_6 \sim IMF_8$ 整体作为凸点出现,可认为 EEMD 类方法难以有效处理间接噪声的出现,即对于间接出现的高频噪声,EEMD 分解类算法处理的稳定性低于 LMD 类算法。参考表 2 可知,LMD 类算法整体指标表现依次提升了 71.62%、39.51%和 35.71%。而提出的 LMD-MFE-SVD 算法相较 LMD 算法的性能略有提升,依次提升了 11.73%、22.07%和 9.25%,处理复杂信号的降噪

效率和精确度更高。

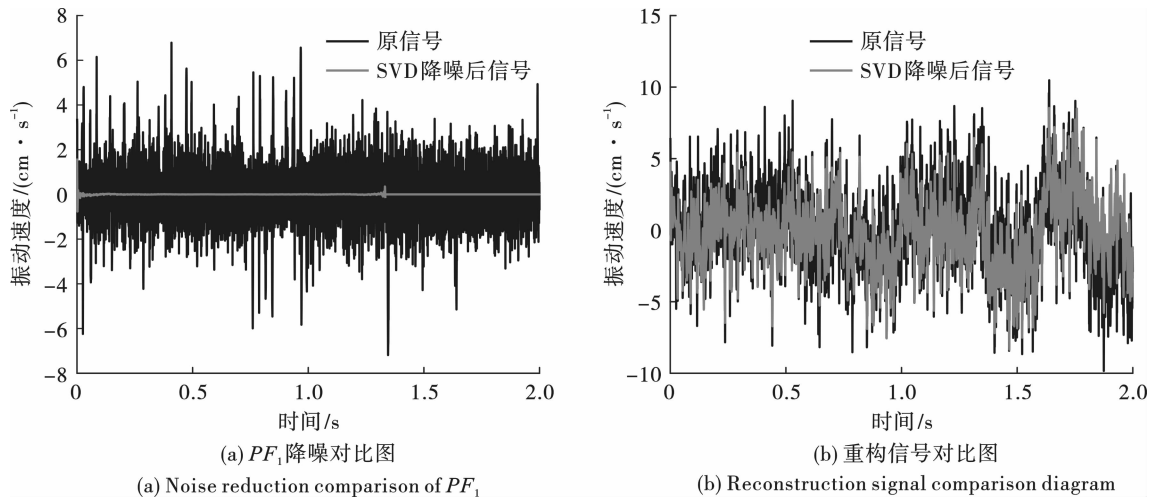


图 3 SVD 滤波降噪效果

Fig. 3 SVD filtering Noise reduction effect

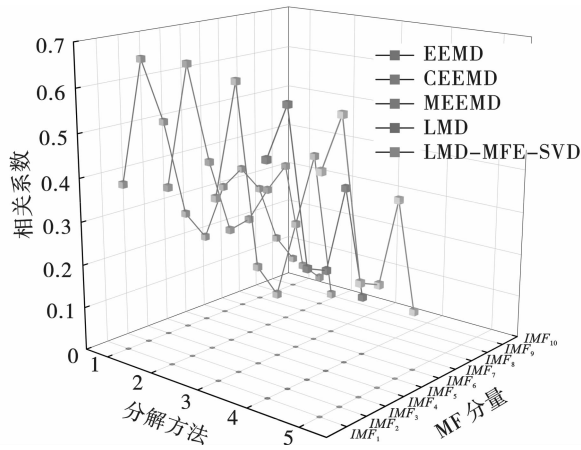


图 4 相关系数图

Fig. 4 Correlation coefficient diagram

3 实测信号分析

3.1 爆破振动监测

工程监测地点位于青岛市平度市旧店镇金山路 1 号,处于青岛金星矿业现有矿山 1#风井工业场地内,主要构筑物包括工业厂房、缓冲池、混凝反应池、

高效斜板沉淀池、污泥浓缩池等,多为钢砼结构。施工位置处于厂区地磅房西南方向,邻近缓冲池和主要厂房。工程采用浅孔松动爆破技术, YT28 凿岩机进行钻孔,炮孔孔深 2.2 ~ 2.3 m,炮孔直径 40 mm,共布设 6 个炮孔,炮孔间孔距、排距依次为 1.5 m、1.5 m,最大单段药量为 2.4 kg,单次爆破总药量为 7.2 kg。采用 2 号岩石乳化炸药进行连续不耦合装药,对所开挖的基坑石方进行多段松动爆破,产生的爆破振动可能对厂区内既有的衬砌结构产生不利影响^[15]。监测场地周围共布设 4 个爆破监测点,对土石方松动爆破进行监测,具体测点布置位置可见图 5。

为充分考虑松动爆破对相邻建筑物的影响^[16],取监测点 A 测振数据作为实测信号,采样频率为 8000 Hz,其振动信号如图 6 所示。通过振动信号可知,本次松动爆破共进行了 6 个段别的起爆,第 5 ~ 6 段起爆间隔时间较短,依次为 0.4 s、1.0 s、0.4 s、0.85 s 和 0.15 s,考虑到松动爆破的各段间隔时间均大于 0.1 s,可基本认为各段起爆之间的相互影响较小。松动爆破中 Z 向振速最高,最高振速为 1.37 cm/s,单段爆破持续时间约为 0.6 s。

表 2 降噪指标表

Table 2 Noise reduction index table

	EEMD	CEEMD	MEEMD	LMD	LMD-MFE-SVD
SNR	5.1121	6.8754	7.0651	10.2959	11.5031
RMSE	1.4129	1.2723	1.2435	0.8904	0.6939
PRD/%	44.9754	40.4991	40.6651	28.3444	25.7226

3.2 实测信号分析

为充分检验 LMD-MFE-SVD 算法对实测松动爆破振动信号的适用度和降噪性能,选取 0.4 ~ 1.2 s、

2.7 ~ 4.1 s 两段 Z 方向的振动信号进行分解,其中 0.4 ~ 1.2 s 为较完整的松动爆破信号,而 2.7 ~ 4.1 s 为信号中的高振速高频信号段,可能对监测点附近

的厂房造成振动损害^[17],分解得到表 3。通过分析表 3 可知,0.4 ~ 1.2 s 信号段分解得到的 PF 分量中,PF₂、PF₃ 两分量为含噪分量,而 PF₄、PF₅ 为无

用分量;2.7 ~ 4.1 s 信号段中,PF₄、PF₅ 和 PF₆ 分量为无用分量,PF₃ 为含噪分量。

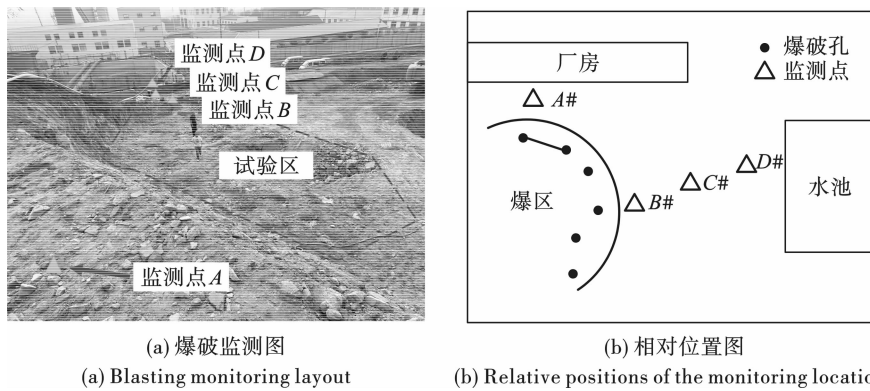


图 5 爆破测点布设图

Fig. 5 Blasting measuring point layout diagram

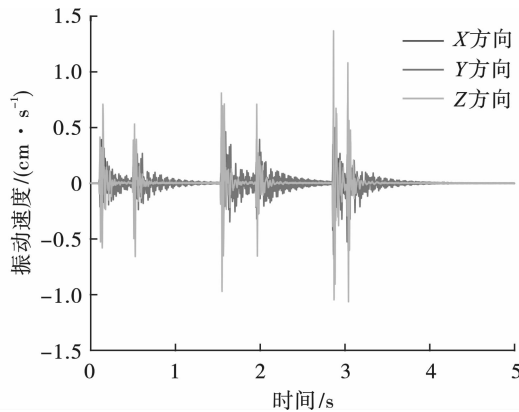


图 6 监测点 A 爆破振速图

Fig. 6 Monitoring point A blasting vibration velocity diagram

将 0.4 ~ 1.2 s 和 2.7 ~ 4.1 s 的松动爆破信号进行重构,对 0.4 ~ 1.2 s 信号中的 PF₂、PF₃ 分量和 2.7 ~ 4.1 s 信号中的 PF₃ 分量进行 SVD 滤波降噪,得到的信号波形及频谱图如图 7、图 8 和图 9 所示。观察图 7 可知,提出的 LMD-MFE-SVD 降噪方法能较好处理松动爆破信号,受限于整体信号段划分的影响,受到邻近波段干扰,信号起始部分有部分过度滤波的情况,但整体的降噪效果良好,波形更为集中,且有效消减了 0.7 ~ 1.2 s 和 3.2 ~ 4.1 s 信号段的模态混叠现象。观察图 8、9 可知,去噪后的频谱图更为清晰集中,能够明显标示出信号的高频波峰,更有利于对信号的频谱分析。

表 3 LMD-MFE-SVD 分解过程参数表

Table 3 Parameter table during the LMD-MFE-SVD decomposition process

信号段	PF 分量	相关系数	FuzzyEn ₁	信号段	PF 分量	相关系数	FuzzyEn ₁
0.4 ~ 1.2 s	PF ₁	0.9577	0.0123	2.7 ~ 4.1 s	PF ₁	0.5741	0.0067
	PF ₂	0.2761	0.0774		PF ₂	0.5458	0.0063
	PF ₃	0.2160	0.0823		PF ₃	0.2909	0.0077
	PF ₄	0.0523	0.1137		PF ₄	0.0174	0.0044
	PF ₅	0.0230	0.0601		PF ₅	0.0142	0.0029
			PF ₆		0.0115	0.0039	

4 结论

(1)文中提出的 LMD-MFE-SVD 降噪方法具备一定的可行性和应用价值,通过计算 MFE 和进行 SVD 滤波能够对含噪的 PF 分量进行有效处理,提高整体的降噪效果。

(2)对于多信号成分、多种类噪声的仿真信号,LMD 类算法相较 EEMD、CEEMD、MEEMD 算法降噪效率更高,SNR、RMSE 和 PRD 的指标表现依次提升了 71.62%、39.51% 和 35.71%,而相较 LMD 算法的降噪效率,提出的 LMD-MFE-SVD 算法也有明显改进,依次提升了 11.73%、22.07% 和 9.25%,具备

可观的信号降噪效率。

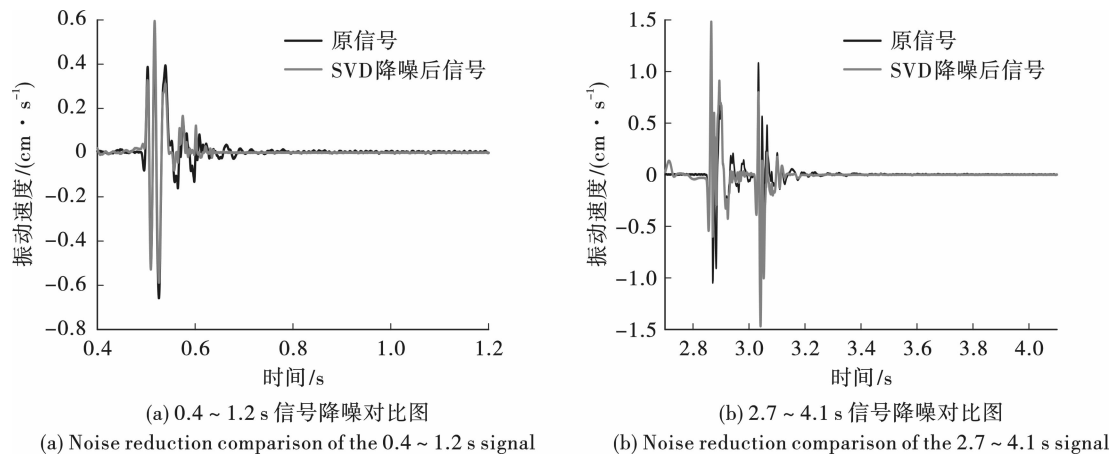


图 7 原信号与 SVD 降噪信号对比图

Fig. 7 Comparison of original signal and SVD noise reduction signal

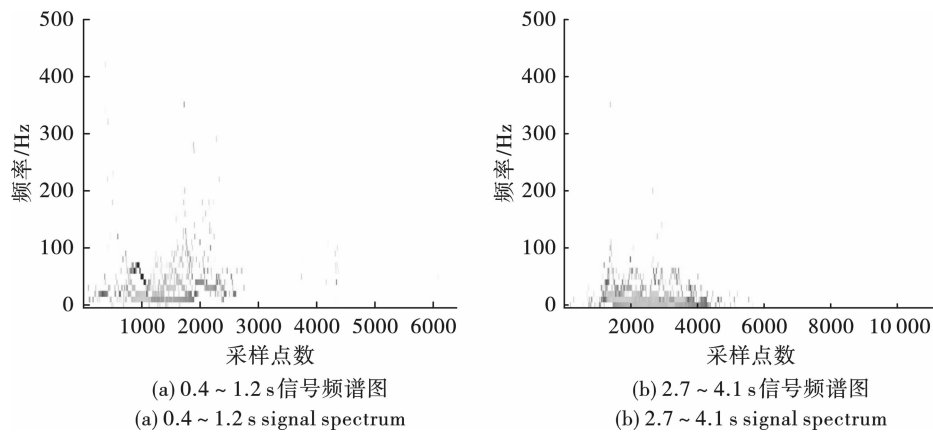


图 8 原信号频谱图

Fig. 8 Original signal spectrum

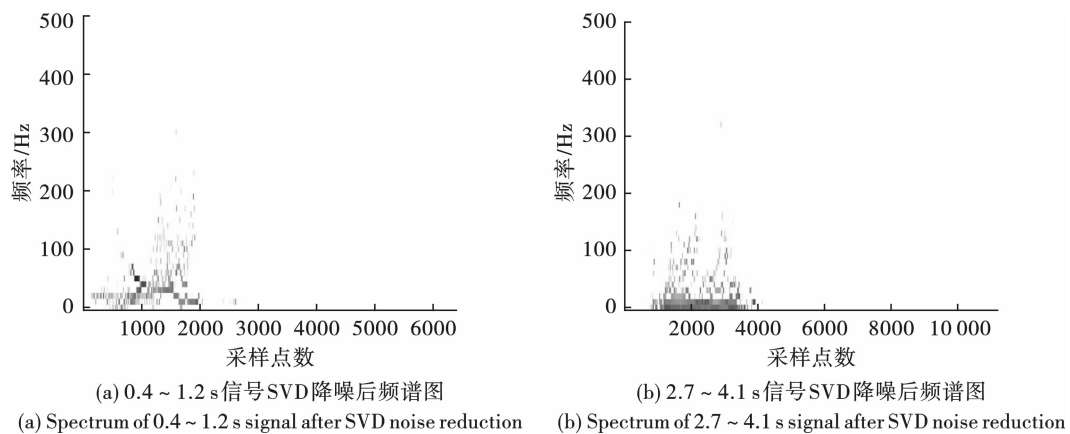


图 9 SVD 降噪后信号频谱图

Fig. 9 Signal spectrum after SVD noise reduction

(3) 根据实测松动爆破振动信号去噪后的波形和频谱对比,提出的 LMD-MFE-SVD 降噪后的信号波形更为集中,信号频谱图更为集中清晰,可以在消

除噪声分量的同时保留原始信号的能量特征信息,对松动爆破振动信号降噪和松动爆破效应分析具有指导意义。

参考文献 (References)

- [1] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [2] 韦 啸, 高文学, 王林台, 等. 基于 EEMD 的地铁隧道爆破振动信号分析与应用研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(8): 1293-1300.
- [2] WEI Xiao, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai, et al. Analysis and application of metro tunnel blasting vibration signal based on EEMD[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(8): 1293-1300. (in Chinese)
- [3] 陈 克, 张晓冬, 李 宁. 基于 CEEMD 与自适小波阈值组合降噪在 OPAX 方法的应用[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(16): 192-198.
- [3] CHEN Ke, ZHANG Xiao-dong, LI Ning. Application of CEEMD and adaptive wavelet threshold combined noise reduction in the OPAX method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 192-198. (in Chinese)
- [4] 苟倩倩, 赵明生, 张光熊, 等. 基于 MEEMD 分解的楔形掏槽爆破振动信号分析[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(10): 11-15.
- [4] GOU Qian-qian, ZHAO Ming-sheng, ZHANG Guang-xiong, et al. Analysis on blasting vibration signal in wedge-shaped cut based on MEEMD decomposition [J]. *Mining Research & Development*, 2019, 39(10): 11-15. (in Chinese)
- [5] 谢李为, 李 勇, 罗隆福, 等. 基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(21): 7326-7339.
- [5] XIE Li-wei, LI Yong, LUO Long-fu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(21): 7326-7339. (in Chinese)
- [6] 徐晓刚, 徐冠雷, 王孝通, 等. 经验模式分解 (EMD) 及其应用[J]. *电子学报*, 2009, 37(3): 581-585.
- [6] XU Xiao-gang, XU Guan-lei, WANG Xiao-tong, et al. Empirical mode decomposition and its Application [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 581-585. (in Chinese)
- [7] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. *Journal of the Royal Society. Interface*, 2005, 2(5): 443-454.
- [8] 程军圣, 张 亢, 杨 宇, 等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(5): 13-16, 201.
- [8] CHENG Jun-sheng, ZHANG Kang, YANG Yu, et al. Comparative study of local mean decomposition and empirical mode decomposition [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(5): 13-16, 201. (in Chinese)
- [9] 李 伟. 基于 LMD 和模式识别的矿山微震信号特征提取及分类方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1156-1164.
- [9] LI Wei. Feature extraction and classification method of mine microseismic signals based on LMD and pattern recognition [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1156-1164. (in Chinese)
- [10] 付晓强, 刘纪峰, 黄凌君, 等. 城市地铁区间隧道爆破振动信号趋势项和噪声消除方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(9): 2328-2337.
- [10] FU Xiao-qiang, LIU Ji-feng, HUANG Ling-jun, et al. Trend term removal and de-noising method for blasting vibration signal of urban subway tunnel excavation [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(9): 2328-2337. (in Chinese)
- [11] 郑近德, 陈敏均, 程军圣, 等. 多尺度模糊熵及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(1): 145-151.
- [11] ZHENG Jin-de, CHEN Min-jun, CHENG Jun-sheng, et al. Multiscale fuzzy entropy and its application in rolling bearing fault diagnosis [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(1): 145-151. (in Chinese)
- [12] 程铁栋, 吴义文, 罗小燕, 等. 基于 EWT_Hankel_SVD 的矿山微震信号特征提取及分类方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(6): 181-191.
- [12] CHENG Tie-dong, WU Yi-wen, LUO Xiao-yan, et al. Feature extraction and classification method of mine microseismic signals based on EWT_Hankel_SVD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6): 181-191. (in Chinese)
- [13] 张淑清, 孙国秀, 李 亮, 等. 基于 LMD 近似熵和 FCM 聚类的机械故障诊断研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(3): 714-720.
- [13] ZHANG Shu-qing, SUN Guo-xiu, LI Liang, et al. Study on mechanical fault diagnosis method based on LMD approximate entropy and fuzzy C-means clustering [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(3): 714-720. (in Chinese)
- [14] 费鸿禄, 山 杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. *爆破*, 2022, 39(3): 41-47, 164.
- [14] FEI Hong-lu, SHAN Jie. Application of CEEMDAN-Wavelet threshold method in blasting vibration signal processing [J]. *Blasting*, 2022, 39(3): 41-47, 164. (in Chinese)
- [15] 梁 琨, 王树欣, 张宪堂, 等. 大跨度小净距隧道爆破振动响应研究[J]. *爆破*, 2021, 38(2): 67-72, 159.
- [15] LIANG Kun, WANG Shu-xin, ZHANG Xian-tang, et al. Response of large-span tunnel to blasting vibration of small clear spacing tunnel excavation [J]. *Blasting*, 2021, 38(2): 67-72, 159. (in Chinese)

- [16] 吴钦鑫,王海亮,胡红星,等. 海底新建隧道爆破对既有隧道的振动影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(4):41-49.
- [16] WU Qin-xin, WANG Hai-liang, HU Hong-xing, et al. Study on blasting vibration of new undersea tunnel affecting existing tunnels[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(4):41-49. (in Chinese)
- [17] 孙 振,谢事臻,张宪堂,等. 减震孔在小间距隧道爆破开挖中的降振效应[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):25-31,39.
- [17] SUN Zhen, XIE Shi-zhen, ZHANG Xian-tang, et al. Vibration reduction effect of damping holes in blasting excavation of tunnels with small spacing[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(1):25-31,39. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接 165 页)

(3) 隔离板和石英砂共同作为能量消散阻挡层,在炸药的顶部形成一个能量聚拢屏障,在炸药爆炸瞬间,可将一部分炸药向上溢出能量阻挡聚拢,进而反作用于复层板上,以此来提高炸药的能量利用率,达到节能效果。

(4) 作为隔离板的灰板纸和石英砂均属于常见且易得的低成本材料,并且基本上可以无限投入使用,为规模化的生产提供了经济基础。同时,炸药爆炸瞬间,隔离板和石英砂被炸药能量击飞,相比于聚集能量的金属零部件等其他结构,危险度也大大降低,安全隐患得到了有效控制。

4 结论

(1) 通过对比试验验证可知,相比较于传统的爆炸焊接工艺,仅仅采用炸药表面覆盖物的方法,就可实现节能 1/3 的目的,并且和已公开的节能降耗工艺如双立爆炸法等比较,研发的节能型爆炸焊接生产工艺方法简单可靠,可规模化生产大幅面爆炸焊接复合板,实现节能降耗、安全高效的爆炸焊接生产目的。

(2) 使用节能型爆炸焊接工艺生产的产品,通过晶间腐蚀试验以及力学性能试验表明,节能型爆炸焊接工艺在炸药使用量减少 30% 的情况下,依然得到了高于国家及行业标准规定的性能指标,特别是结合界面剪切强度,大大高出标准要求的 210 MPa。

(3) 文中试验的节能型爆炸焊接 SB-575 N10276 金属复合板工艺,同样也可推广应用到其他化工装备用金属复合板如 N06022、N06059 等哈氏合金的生产工艺中。

参考文献 (References)

- [1] 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践[M]. 北京:国防工业出版社,2007:107-136.
- [1] WANG Yao-hua. Research and practice of explosive welding of metal plates [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:107-136. (in Chinese)
- [2] 史长根. 爆炸焊接下限原理与双立法[M]. 北京:冶金工业出版社,2015:139-184.
- [2] SHI Chang-gen. The lower bound theorem and double vertical method of explosive welding [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015:139-184. (in Chinese)
- [3] 赵林升,史长根,葛雨珩,等. 钛/钢双立爆炸焊接参数优化[J]. 材料科学与工艺,2016,24(1):80-84.
- [3] ZHAO Lin-sheng, SHI Chang-gen, GE Yu-hang, et al. Parameter optimization in double vertical explosive welding of Ti/steel [J]. Material Science Technology, 2016, 24(1):80-84. (in Chinese)
- [4] 史长根,尤 俊. 双立式爆炸焊接新方法[J]. 爆破器材,2008,37(3):28-30.
- [4] SHI Chang-gen, YOU Jun. New technology of double vertical explosive welding [J]. Explosive Materials, 2008, 37(3):28-30. (in Chinese)
- [5] 史长根,汪 育,徐 宏. 双立式爆炸焊接及防护装置数值模拟和试验[J]. 焊接学报,2012,33(3):109-112.
- [5] SHI Chang-gen, WANG Yu, XU Hong. Numerical simulation and experimental research of double vertical explosive welding and its safeguard [J]. Transactions of the China welding institution, 2012, 33(3):109-112. (in Chinese)
- [6] 韩顺昌. 爆炸焊接界面相变与端口组织[M]. 北京:国防工业出版社,2011:5-6.
- [6] HAN Shun-chang. Phase transformation and fractography of interface of explosive welding [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011:5-6. (in Chinese)
- [7] B 克劳思兰. 爆炸焊接法[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1979:5-6.
- [7] B Crossland. Explosive welding [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1976:5-6. (in Chinese)
- [8] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:498-505.
- [8] WANG Xu-gang. Blasting design and construction [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015:498-505. (in Chinese)

英文编辑:陈东方