

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.022

## 基于 CEEMDAN 的塌落触地振动信号 最优降噪光滑模型算法\*

赵明生<sup>1,2</sup>, 苟倩倩<sup>2</sup>, 张光雄<sup>3</sup>, 池恩安<sup>1,2</sup>, 胡娟新<sup>1</sup>, 姚颖康<sup>4</sup>

(1. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002; 2. 贵州大学 矿业学院, 贵阳 550025;  
3. 保利民爆哈密有限公司, 哈密 839000; 4. 武汉爆破有限公司, 武汉 430000)

**摘 要:** 为了更精确的提取原始爆破振动信号特征信息, 针对 EMD 分解产生的模态混叠及 EEMD 分解完备性较差且计算复杂问题, 采用 CEEMDAN 分解的固有模态分量构建不同的带通滤波器, 建立基于 CEEMDAN 的爆破振动信号最优光滑降噪算法, 并且根据降噪均方误差指标、曲线曲折度指标建立最优光滑降噪算法的判断准则。通过构建仿真信号并以含噪信号与降噪误差比为指标分别对 EMD、EEMD 及 CEEMDAN 的最优光滑降噪算法效果进行对比分析。结果表明: CEEMDAN 分解得到的算法 A4 信噪比最小, 验证了本文算法的科学性和有效性。将其应用于实测的水塔塌落触地振动信号进行降噪处理和时频分析, 效果较好。

**关键词:** 塌落触地振动信号; CEEMDAN 分解; 带通滤波; 均方降噪误差; 曲线光滑度

中图分类号: X936

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)02-0127-09

## Optimal Denoising Smooth Model Algorithm for Blasting Collapse Ground Vibration Signal based on CEEMDAN

ZHAO Ming-sheng<sup>1,2</sup>, GOU Qian-qian<sup>2</sup>, ZHANG Guang-xiong<sup>3</sup>,  
CHI En-an<sup>1,2</sup>, HU Juan-xin<sup>1</sup>, YAO Ying-kang<sup>4</sup>

(1. BaoLi XinLian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Mining College of Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839000, China;

4. Wuhan Blasting Co., Ltd., Wuhan 430000, China )

**Abstract:** In order to extract the characteristic information of the original blasting vibration signal more accurately, the modal aliasing and EEMD decomposition generated by EMD decomposition are poorly completed and computationally complex. The optimal smoothing noise reduction algorithm based on CEEMDAN is established with different band-pass filters constructed using the inherent modal components of CEEMDAN decomposition, and the criterion of optimal smoothing noise reduction algorithm is established according to the mean square error index and curve tortuosity index. By constructing the simulation signal and comparing the effects of the noisy signal and the noise reduction error ratio to the optimal smoothing noise reduction algorithms of EMD, EEMD and CEEMDAN, the results show that the noise-signal ratio from algorithm A4 of CEEMDAN decomposition is the smallest, which proves the scientificity and validity of the algorithm of this paper. The application to the measured water tower collapse grounding vibration signal for noise reduction processing and time-frequency analysis shows that the method is very good.

**Key words:** collapsed ground vibration signal; CEEMDAN decomposition; band-pass filtering; mean square noise reduction error; curve smoothness

随着安全环保意识的提高,对城镇爆破拆除作业所带来的塌落触地振动危害控制越来越严格。在建(构)筑物倒塌过程中,炸药释放的能量使得部分构件解体,造成上部结构失去稳定性从而塌落,触地冲击地面瞬间会产生很大的能量,其中,部分能量促使地面介质产生振动,以地震波的形式向外传播,并在地表产生震动<sup>[1]</sup>。由于受爆破地震波监测点的随机性、仪器误差、磁场干扰、传播介质等因素影响,使爆破振动信号携带一定的噪声,难以精确识别其模态信息,从而影响振动危害评价的准确度。

目前,爆破振动信号降噪主要采取二代小波变换、集合经验模态分解及集合经验模态分解和小波阈值共同作用等方法<sup>[2-4]</sup>,小波变换分析法有效性很大程度上依赖小波基函数的选取,存在一定程度的主观因素影响<sup>[5]</sup>。集成经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)是在原始信号中多次添加不同白噪声,分别进行 EMD 分解,然后对多次 EMD 分解的 IMF 进行平均而得到最终的实际分量,它能有效地改善 EMD 方法所存在的模态混叠现象<sup>[6]</sup>。但是 EEMD 在信号重构时存在完备性不足,且计算耗时长的问题<sup>[7-9]</sup>。近年来,由 Torres 提出的具有自适应噪声的完整集成经验模态分解<sup>[10]</sup>(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN),通过在每个阶段添加有限次的自适应白噪声,计算唯一余项信号获取 IMF,实现在较少的平均次数下,几乎完全重构分解后的固有模态,实现精确的信号特征提取。该方法能有效解决 EMD 分解的模态混叠问题,同时还能克服 EEMD 分解的完备性较差及多次增加集成次数来降低重构误差而导致的计算效率低的问题<sup>[11-13]</sup>。

基于此,提出一种基于 CEEMDAN 的爆破振动信号最优光滑降噪算法,以设计仿真信号为研究对象,将其分别进行 EMD、EEMD 及 CEEMDAN 的最优光滑降噪算法效果对比,并将该算法应用于实测水塔爆破触地振动信号降噪分析。

## 1 建立最优降噪光滑模型

### 1.1 设计滤波器

将原始含噪信号进行 CEEMDAN 分解后的 IMF 分量进行高通、低通、带通滤波器的组合设计<sup>[14]</sup>。其中,高通滤波常用于增强高音成分以驱动扬声器的高音单元,低通滤波可以增强中音成分,而带通滤波可以对特定频率范围内的信号进行筛选,达到选择性传输的目的。

高通滤波器可设计为

$$HP_{\alpha} = \sum_{i=1}^{\alpha} IMF_i(n) \quad (1)$$

低通滤波器可设计为

$$LP_b = \sum_{i=\alpha}^n IMF_i(n) + R(n) \quad (2)$$

带通滤波器可设计为

$$BP_p^q = \sum_{i=p}^q IMF_i(n) \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $q$  为滤波器的上截断参数; $b$ 、 $p$  为滤波器的下截断参数,其取值应根据不同信号的滤波要求来优化确定。

假设由 CEEMDAN 分解出的固有模态分量 IMF 有  $N$  个,则具体的滤波器算法表达式为

$$\begin{aligned} A_1 &= s(n) - IMF1 \\ A_2 &= s(n) - IMF1 - IMF2 \\ A_3 &= s(n) - IMF1 - IMF2 - IMF3 \\ &\vdots \\ A_n &= s(n) - IMF1 - IMF2 - IMF3 - \dots - IMF_n \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.2 定义降噪偏差均方差

设原始信号为  $s_i$ ,降噪后的信号为  $\bar{s}_i$ ,则降噪偏差均方差可定义为

$$MES = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{s}_i - s_i)^2}{n}} \quad (5)$$

由定义可知,降噪均方差越小,降噪后的曲线越接近原始信号,即两个曲线相似度越高。

### 1.3 定义曲线曲折度

设有两条曲线  $P(t)$ 、 $q(t)$  ( $0 \leq t \leq 1$ ),如果曲线  $P$  在点  $P(1)$  处的二阶倒数等于曲线  $Q$  在点  $Q(0)$  的二阶倒数,则曲线光滑。

$$K_{P(1)} = \frac{|P''(1)|}{|1 + P'(1)|^{3/2}} + \frac{|Q''(0)|}{|1 + Q'(0)|^{3/2}} = K_{Q(0)} \quad (6)$$

将点  $P(1)$ 、 $Q(0)$  处的二阶倒数按照离散公式

收稿日期:2020-01-04

作者简介:赵明生(1982-),男,黑龙江双城人,博士、研究员,主要从事爆破工程与安全技术研究,(E-mail)99113294@qq.com。

通讯作者:苟倩倩(1993-),女,陕西咸阳人,硕士,主要从事爆破工程研究与安全技术研究,(E-mail)1093191798@qq.com。

基金项目:2017年新疆维吾尔自治区天池百人计划-新人社函;贵州省高层次创新型人才培养(百层次)-黔科合人才(2016)4030号

展开得

$$P''(1) \approx \frac{P(1-2h) - 2P(1-h) + P(1)}{h^2} \quad (7)$$

$$Q''(0) \approx \frac{Q(1+2h) - 2Q(0+h) + Q(0)}{h^2} \quad (8)$$

由于曲线光滑, 则点  $P(1)$ 、 $Q(0)$  一阶导数相等, 即可得到在  $x = x_0$  点处的光滑指标

$$SN_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + 2h) - f(x_0 - 2h) - 2[f(x_0 + h) - f(x_0 - h)]}{h^2} \quad (9)$$

式中:  $h$  为步长, 取值 1; 当  $x_0$  趋于零时,  $x_0$  附近的点对应曲线越光滑, 即曲线的曲折度越小, 信号越光滑。

### 1.4 基于 CEEMDAN 最优降噪光滑模型判定准则

在模型的建立中, 降噪偏差均方差  $MSE_f$  的值越小, 降噪后的信号与原始信号相似度越高, 同时滤波算法的光滑性指标  $SMSE_f$  的值越小, 曲线越光滑, 即目标函数值越小降噪效果越好。基于此, 建立约束条件

$$\text{约束条件} \begin{cases} \min \{MSE_f\} \\ \min \{SMSE_f\} \end{cases} \quad (10)$$

则爆破振动信号滤波算法目标函数可以写成

$$\min \{f\} = \min \{\alpha SMSE_f + (1 - \alpha) MSE_f\} \quad (11)$$

式中,  $\alpha$  为曲线降噪均方误差权重因子,  $1 - \alpha$  为曲线曲折度权重因子, 其取值按照信号处理过程中具体要求而定。基于 CEEMDAN 的最优光滑降噪流程如图 1 所示。

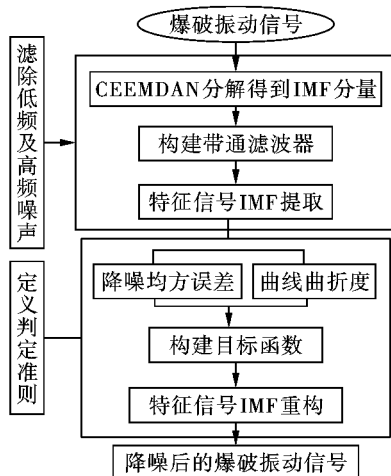


图 1 基于 CEEMDAN 的最优光滑降噪流程  
Fig. 1 Optimal smooth noise reduction process based on CEEMDAN

## 2 仿真信号降噪分析

设计仿真信号对上述降噪算法进行验证, 仿真

信号  $Y(t)$  分别由低频正弦信号  $x_1$ , 调频信号  $x_2$  及功率为 0.01 的高斯白噪声  $x_3$  合成。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 5 \sin(2\pi t) \\ x_2 &= 5 \cos(20t^2) \\ Y(t) &= x_1 + x_2 + x_3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:  $t = [0, 4]$ , 采样频率为 2000 Hz, 各组成信号及混合仿真信号时域波形如图 2 所示。

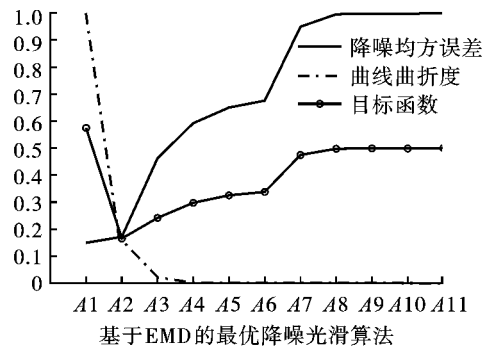


图 2 基于 EMD 的最优降噪光滑算法误差  
Fig. 2 Optimal de-noising smoothing algorithm error based on EMD

对仿真信号分别进行 EMD、EEMD 及 CEEMDAN 分解。其中, EMD 分解得到 10 个固有模态分量一个余项, EEMD 分解得到 12 个固有模态分量及一个余项, CEEMDAN 分解后得到 13 个固有模态分量及余项。按照式(4) EMD 分解将会产生 11 个带通滤波算法, 同理, EEMD 及 CEEMDAN 分解分别产生 13 和 14 个带通滤波算法, 将仿真信号分别用三种方法分解后组成的算法进行降噪处理, 求出每个算法的降噪均方误差及光滑度, 按照约束条件确定目标函数值, 并进行归一化处理, 当曲线降噪均方误差权重因子取 0.5 时, 三种方法分解后组成的算法的降噪误差曲线如图 2 ~ 图 4 所示。

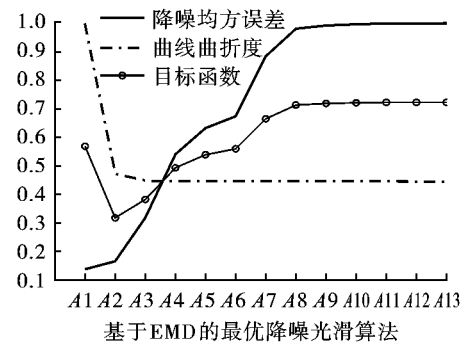


图 3 基于 EEMD 的最优降噪光滑算法误差  
Fig. 3 Optimal de-noising smoothing algorithm error based on EEMD

结合图 2 至图 4 可以看出: 当降噪均方误差权

重因子取0.5时,基于EMD分解的11个算法中,A2算法目标函数值最小,其值为0.1653;基于EEMD分解的13个算法中,A2算法目标函数值最小,其值为0.3179;基于CEEMDAN分解的14个算法中,A4算法目标函数值最小,其值为0.1353,即基于CEEMDAN分解的A4算法的目标函数值最小,降噪效果最好。图2至图4中目标函数曲线在算法A10之后几乎都趋于平衡,这是由于从A10算法之后减去的固有模态分量都是低频,而高频噪声在算法A10之前几乎被完全过滤掉。

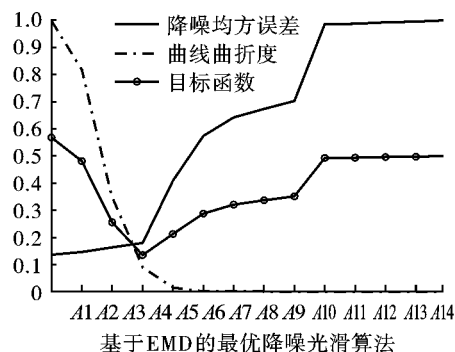


图4 基于CEEMDAN的最优降噪光滑算法误差  
Fig. 4 Optimal de-noising smoothing algorithm error based on CEEMDAN

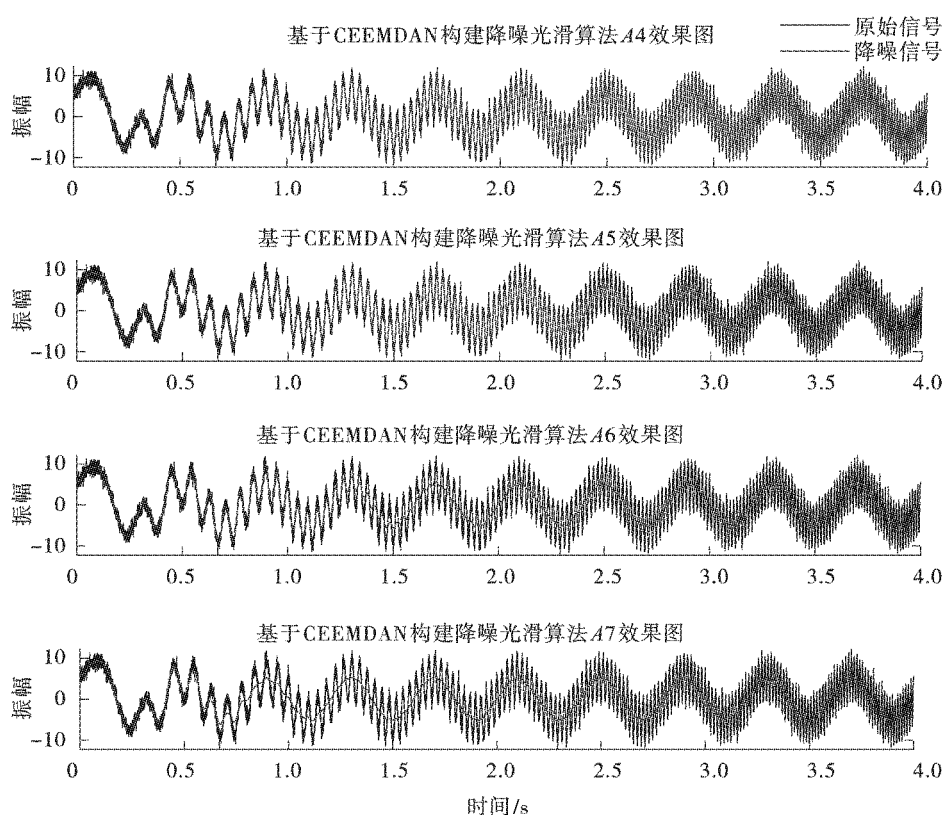


图5 基于CEEMDAN分解的A4、A5、A6、A7算法降噪效果对比  
Fig. 5 Comparison of de-noising efficiency of A4, A5, A6 and A7 algorithms based on CEEMDAN decomposition

图5为基于CEEMDAN分解的算法A4、A5、A6、A7降噪的仿真信号与原始仿真信号,由图可以看出:经算法A4降噪的信号在低频部分明显比原仿真信号光滑,并且重构后的信号几乎与原仿真信号重合,算法A5仅次于算法A4,而经算法A6、A7降噪的信号在1s之后频率明显较低,出现了过度降噪的情况,与原始仿真信号差别较大。

图6可以直观的看出CEEMDAN分解的A4算法降噪重构的仿真信号比原始信号光滑且相似度高,降噪信号与未加噪信号 $x_3$ 相关度高达0.9969;

并且重构信号与降噪信号之差与原始( $x_1 + x_2$ )噪声信号极其相似,其相关度为0.9134,降噪效果较好。

表1计算出三种方法分解下组成的最优算法的含噪信号与降噪误差比,CEEMDA分解的A4算法的值最小,该值越小,降噪误差越大,降噪信号越偏离含噪信号,则降噪效果越好。

实际上,当降噪均方误差权重分别取0.1~0.3时,基于CEEMDAN分解的算法A5都最优,其次是算法A4;当降噪均方误差权重分别取0.4~0.9时,算法A4最优。图7为降噪均方误差权重因子分别

取 0.1 ~ 0.9 时, CEEMDAN 分解的 14 个降噪算法对应的目标函数, 由图可以看出: 在 14 个算法中, 算法 A4 的平均目标函数值最小。

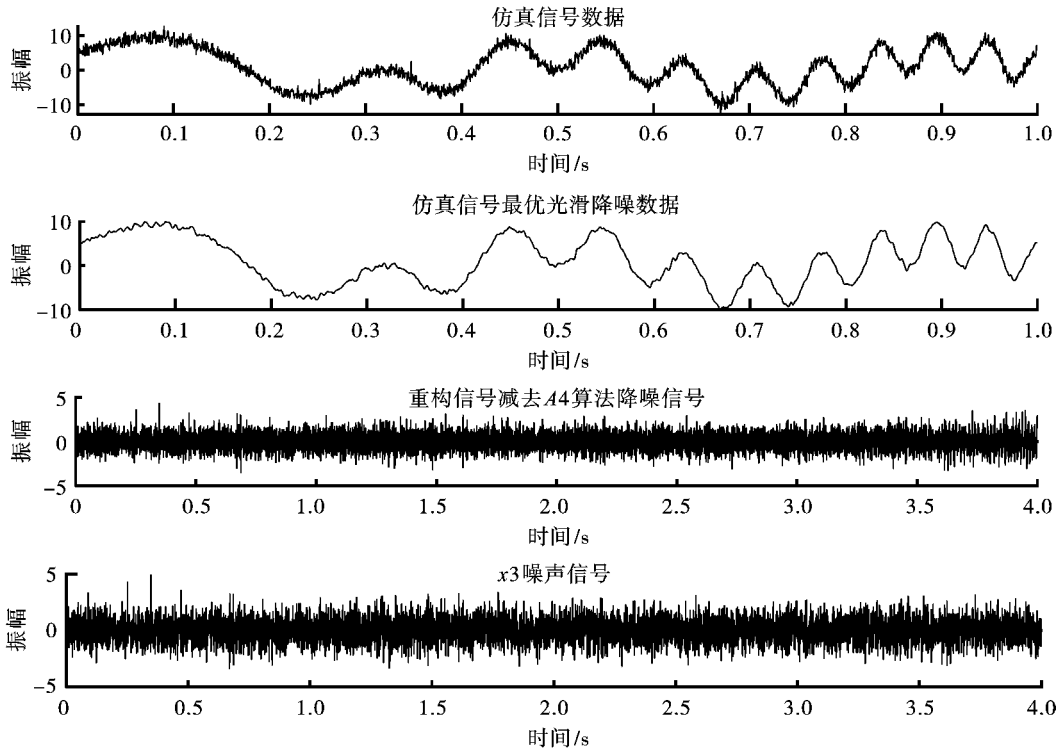


图 6 仿真信号与 CEEMDAN 分解 A4 算法降噪的效果对比  
Fig. 6 Comparison of the effect of noise reduction between simulation signal and CEEMDAN decomposition A4 algorithm

表 1 含噪信号与降噪误差比

Table 1 Noise signal to noise reduction error ratio

CEEMDA 分解 A4 算法	EMD 分解 A2 算法	EEMD 分解 A2 算法
14.7841	15.3562	15.5154

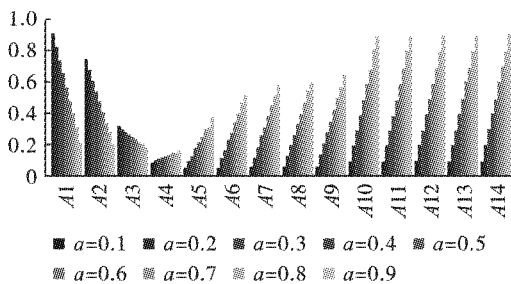


图 7 不同权重下各个算法目标函数值比较  
Fig. 7 Comparisons of algorithm errors under different weights

### 3 塌落触地振动信号时频分析

为了验证算法的实用性, 以实测水塔爆破触地振动信号为依据, 对其进行基于 CEEMDAN 的最优降噪光滑模型算法降噪后进行希尔伯特变换对比不

同测点的频率及能量分布。

#### 3.1 工程概况

待拆除水塔高 38.1 m, 其中, 塔身高 28.6 m, 倒锥伞形水箱高 9.5 m。水塔下部支筒为圆筒形, 筒体内径为 2.0 m, 壁厚 0.18 m, 筒内设有 5 个设备检修平台, 上部水箱为倒锥形结构, 伞形水箱最外径为 10.64 m。水塔筒体及水箱配有主筋和箍筋, 为研究高耸构筑物触地振动规律, 采用原地坍塌总体爆破方案, 爆破切口布设在水塔底部以及各层检修平台处, 共计 6 个爆破切口, 其结构示意图及切口布置如图 8 所示, 起爆网路延期时间如表 2 所示。利用 TC-4850N 爆破测振仪实测其速度 (仪器采样频率设置 2000 Hz, 采样时长 6 s), 振动测点布置如图 9 所示, 振动监测数据如表 3 所示, 其中三个测点信号三向合速度依次记为 S1、S2、S3, 降噪后的信号记为 S1-1、S2-2、S3-3。

#### 3.2 信号降噪

针对实测的信号 S1、S2、S3 进行 CEEMDAN 分解后分别得到 13 个固有模态分量 IMF 及余项  $r(t)$ , 同样产生 14 个带通滤波算法, 考虑到触地振动频率一般在 1 ~ 10 Hz, 属于低频率<sup>[15]</sup>, 滤波之后光滑度

权重大于相似度,所以均方降噪误差权重因子取值0.3或0.4较为合理。当 $\alpha=0.3$ 时,14个带通算法的降噪均方误差、折线曲折度、目标函数如图10所示(限于文章篇幅只列取S1信号降噪效果图)。

由图10可看出,当降噪均方误差权重因子取0.3时,算法A4的目标函数值最小,即算法A4的降噪效果最好;由图11可以看出,经算法A4降噪重构

后的信号与原始爆破振动信号相似度较高,在2.5~4s信号幅值有所减小,这可能是水塔塌落过程中结构碰撞或触地引起的噪声;图12截取S1及S1-1信号0~1s数据,可以看出,基于CEEMDAN分解的A4算法降噪重构后信号比原始信号光滑且相似度高,与仿真信号降噪效果一致。

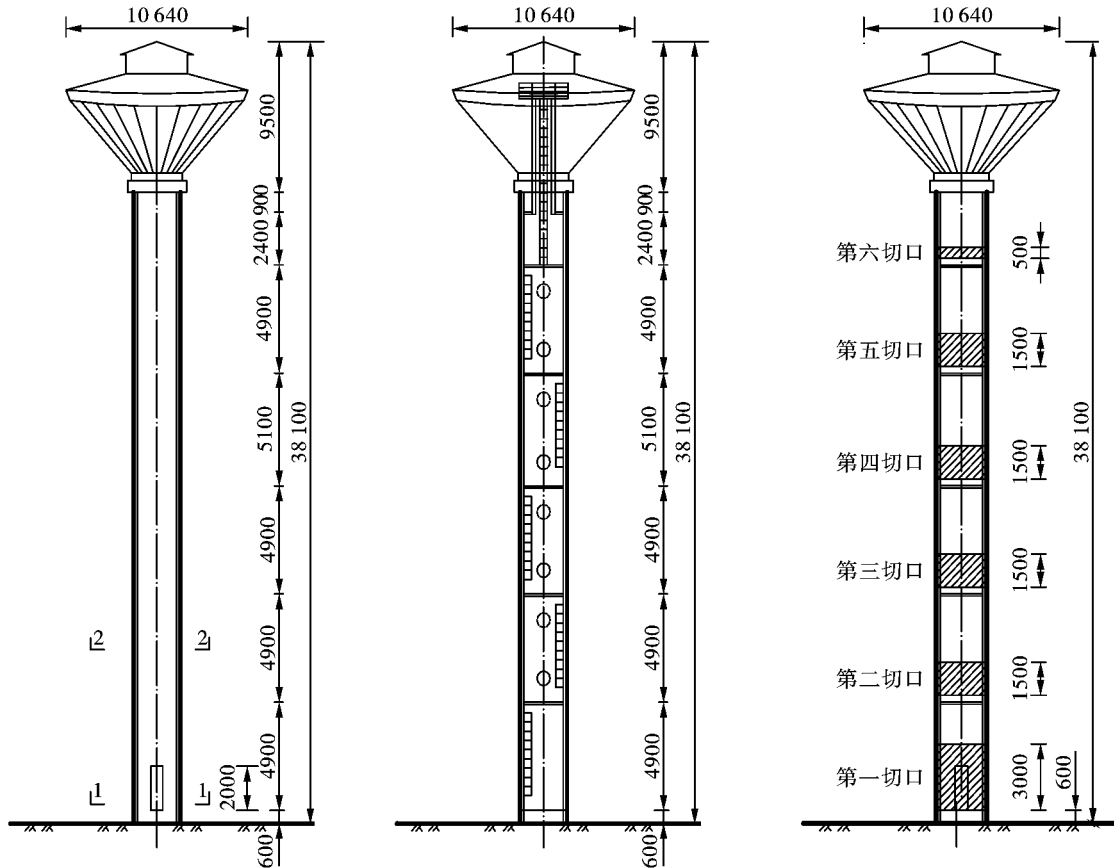


图8 结构示意图及爆破切口布置图(单位:mm)

Fig. 8 Schematic diagram of the structure and layout of the blasting cut(unit:mm)

表2 起爆网路延期时间(单位:ms)

Table 2 Detonation network delay time(unit:ms)

	第一切口	第二切口	第三切口	第四切口	第五切口	第六切口	水箱水压爆破
孔外	0	310	620	930	1240	1550	1860
孔内	1700	2010	2320	2630	2940	3250	3560

表3 水塔爆破触地振动数据监测结果

Table 3 Water tower blasting ground vibration data monitoring results

测点编号	距离	水平径向		水平切向		垂直方向	
		速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	频率/Hz	速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	频率/Hz	速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	频率/Hz
1#	40	1.2555	8.6390	1.1965	10.0380	1.0519	12.7590
2#	60	0.9790	13.3321	0.8731	9.8160	1.1284	12.6752
3#	80	0.6076	9.5120	0.7200	10.7090	0.2598	10.9740

为了进一步说明实测信号在三种方法分解下的

降噪效果,表4表计算出三个信号在三种方法分解

下组成最优光滑降噪算法的信噪比, 相比 EMD 分解 A2 算法和 EEMD 分解 A2 算法, 由 CEEMDAN 分解的 A4 算法的信噪比值最小, 说明降噪效果最好, 与仿真信号降噪效果一致。

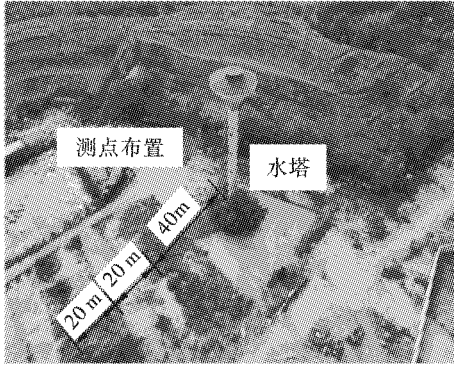


图 9 测点布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of measuring points

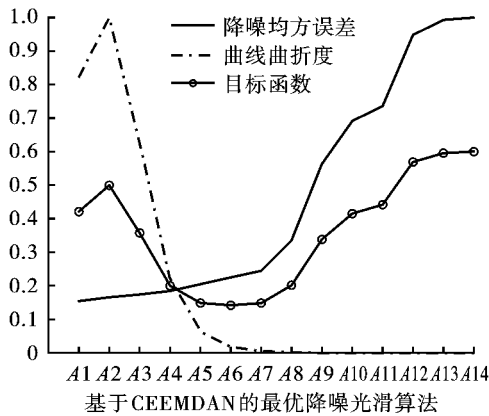


图 10 S1 信号基于 CEEMDAN 的最优降噪光滑算法误差  
Fig. 10 S1 signal based on CEEMDAN's optimal noise reduction smoothing algorithm error

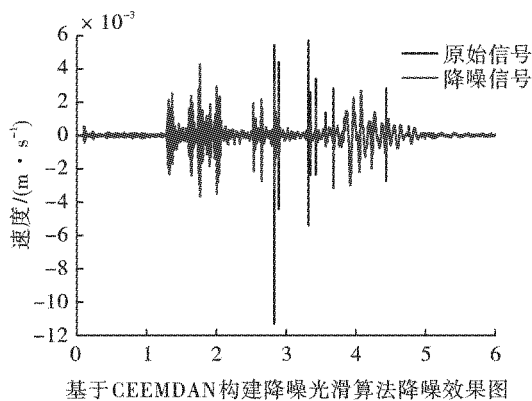


图 11 S1 信号经算法 A4 降噪效果

Fig. 11 S1 signal is denoised by algorithm A4

### 3.3 信号边际能量谱分析

对振动信号的边际谱幅值的平方在全局时间上进行积分得到振动信号的边际能量谱, 信号边际能

量谱上的曲线函数代表在不同频率时信号的总能量幅值。现对降噪后的 S1 - 1、S2 - 2、S3 - 3 水平信号进行希尔伯特-黄变换, 得到其边际能量谱, 如图 13 所示。

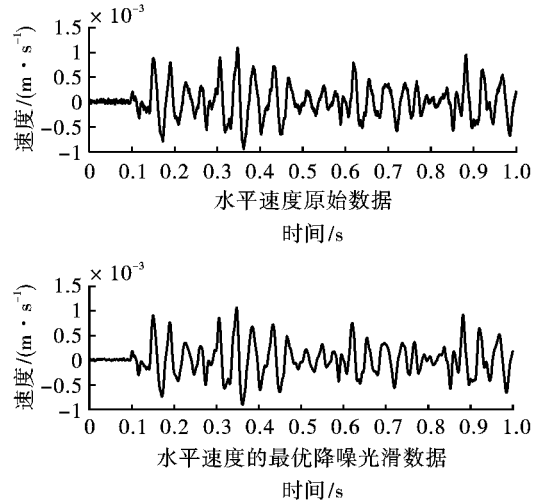


图 12 原爆破振动信号与经算法 A4 降噪的效果对比  
Fig. 12 Comparison of the effect of original signal and A4 de-noising

表 4 含噪信号与降噪误差比

Table 4 Noise signal to noise reduction error ratio

信号	CEEMDA 分解 A4 算法	EMD 分解 A2 算法	EEMD 分解 A2 算法
S1	13.7762	32.3433	16.7219
S2	11.4573	26.7305	20.6389
S3	15.7269	37.5412	18.4359

由图 13 可以看出: 信号 S1 - 1、S2 - 2、S3 - 3 边际谱在频率为 5 Hz 左右处能量出现最大值, 说明其在频率 5 Hz 附近能量最集中; 在能量达到最大值后紧接着又出现了两个幅值较大的曲线, 这主要是由于切口之间爆破时间间隔小, 前后切口爆破倒塌触地产生的冲击波累加导致频率有所增大。信号 S1 - 1、S2 - 2、S3 - 3 的边际能量谱幅值逐渐的减小, 也间接的说明振动波的能量在传播过程中在不断地衰减, 并且随着传播距离的增加衰减速度逐渐变慢。

### 3.4 信号三维时频能量谱分析

为直观的看到降噪后信号的时频、能量分布, 截取前 4 s 的 S1 - 1、S2 - 2、S3 - 3 水平信号再次经过 CEEMDAN 分解后, 进一步进行希尔伯特黄变换得到三维时频能量谱, 如图 14 所示。

由图 13 可以看出, 经塌落触地振动信号的主要频率集中在频率 0 ~ 20 Hz 的频带内, 大于 20 Hz 的频带内携带的能量较少; 偶尔在高频带段内有时会

突然出现局域能量峰值,通过峰值以后迅速衰减,这一现象表明塌落触地振动产生的地震波在高频部分衰减速度比在低频部分的衰减速度要快;随着测点距离增加,能量向低频带集中,并且3 s后各频带所

携带能量明显减少;塌落触地振动波在传播过程中不同频带能量的持续时间不同,低频部分振动波持续时间更长,几乎贯穿地震波传播的整个过程,这表明振动波主要以低频波携带的能量为主。

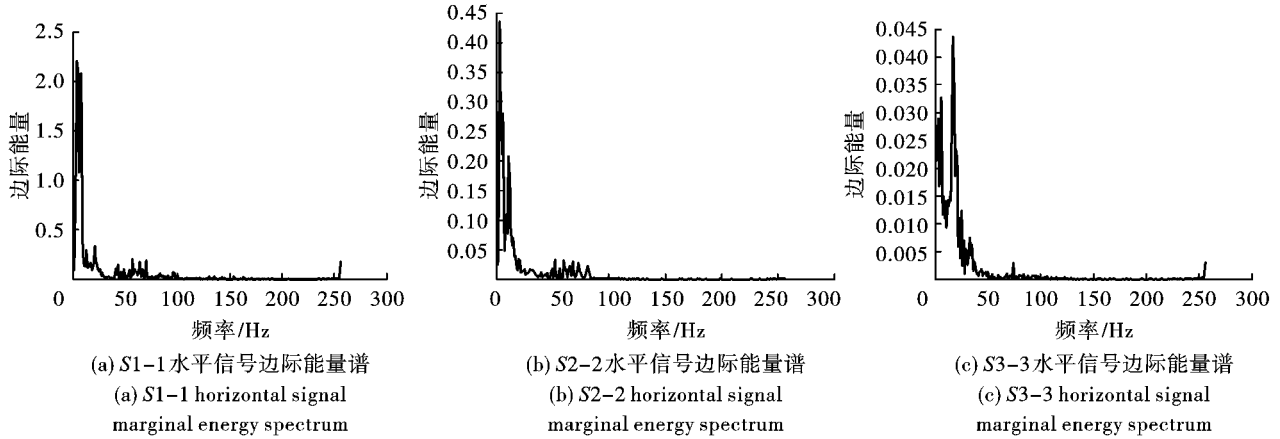


图 13 边际能量谱

Fig. 13 Marginal energy spectrum

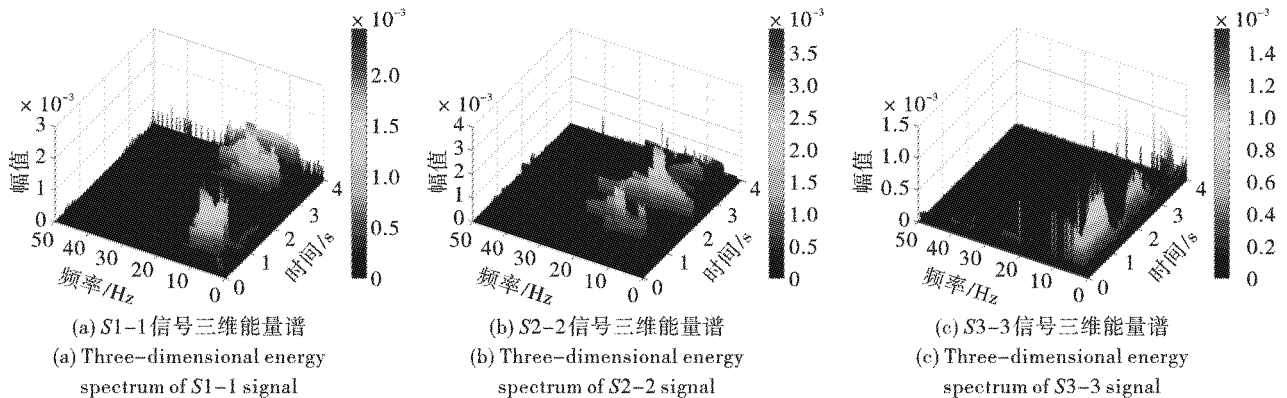


图 14 三维时频能量谱

Fig. 14 Three-dimensional time-frequency energy spectrum

## 4 结论

实测的非平稳爆破振动信号往往夹杂较大的噪声,因此,信号降噪在原始信号特征提取时显得尤为重要,本文将仿真信号分别进行 EMD、EEMD、CEEMDAN 分解,通过设计合理的滤波器,得到不同条件下的滤波算法,根据降噪均方误差指标、曲线曲折度指标建立最优光滑降噪算法的判断准则,最终确定基于 CEEMDAN 分解得到的算法 A4 降噪效果最好,其信噪比值最小。

将实测塌落触地振动信号进行降噪处理,对比分析了三种分解方法下信号 S1 的信噪比,结果表明,基于 CEEMDAN 分解的最优降噪算法信噪比值最小,验证了该算法模型具有良好的降噪能力以及

工程实用性,为实现精细爆破及提高振动危害评价的准确度都具有一定的应用价值。

对降噪后的触地振动信号进行时频分析,结果表明,塌落触地振动信号的主要频率集中在频率 0 ~ 20 Hz 的频带,且随着距离的增加能量向低频带集中。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨永强,胡进军,谢礼立,等. 高架桥爆破拆除触地振动速度特征分析[J]. 振动与冲击,2016,35(11):151-154.
- [1] YANG Yong-qiang, HU Jin-jun, XIE Li-li, et al. Characteristics of ground vibration velocity in viaduct blasting demolition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(11):151-154. (in Chinese)

- [2] 谢全民, 龙源, 钟明寿, 等. SGWT 在爆破振动信号信噪分离中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 24-28, 43.
- [2] XIE Quan-min, LONG Yuan, ZHONG Mingshou, et al. Application of SGWT in separation of noises from a blast vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1): 24-28, 43. (in Chinese)
- [3] 赵明生, 梁开水, 罗元方, 等. EEMD 在爆破振动信号去噪中的应用[J]. 爆破, 2011, 28(2): 17-20.
- [3] ZHAO Ming-sheng, LIANG Kai-shui, LUO Yuan-fang, et al. Application of EEMD in denoising of blasting vibration signals[J]. Blasting, 2011, 28(2): 17-20. (in Chinese)
- [4] 费鸿禄, 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.
- [4] FEI Hong-lu, LIU Meng, QU Guang-jian, et al. Denoising method of blasting vibration signal based on set empirical mode decomposition-wavelet threshold method[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 112-118. (in Chinese)
- [5] 凌同华, 刘浩然, 张亮, 等. 双正交小波基构造法及其在爆破振动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 273-280.
- [5] LING Tong-hua, LIU Hao-ran, ZHANG Liang, et al. The improved biorthogonal wavelet construction method and its application in blast vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 273-280. (in Chinese)
- [6] 周涛涛, 朱显明, 彭伟才, 等. 基于 CEEMD 和排列熵的故障数据小波阈值降噪方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 207-211.
- [6] ZHOU Tao-tao, ZHU Xian-ming, PENG Wei-cai, et al. A wavelet threshold denoising method for fault data based on CEEMD and permutation entropy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 207-211. (in Chinese)
- [7] 高佳程, 田蕴卿, 朱永利, 等. 基于完全集合经验模态分解和排列熵的局部放电信号的小波包去噪方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 1-7.
- [7] GAO Jia-cheng, TIAN Yun-qing, ZHU Yong-li, et al. Wavelet package denoising method for partial discharge signals based on CEEMD and PE[J]. Journal of Electric Power System and its Automation, 2018, 30(3): 1-7. (in Chinese)
- [8] 王亚萍, 匡宇麒, 葛江华, 等. CEEMD 和小波半软阈值相结合的滚动轴承降噪[J]. 振动. 测试与断, 2018, 38(1): 80-86, 207.
- [8] WANG Ya-ping, KUANG Yu-qi, GE Jiang-hua, et al. Noise reduction of rolling bearing based on CEEMD wavelet semi-soft threshold[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 80-86, 207. (in Chinese)
- [9] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [9] LI Shun-ming, GUO Hai-dong, LI Dian-rong. Review of vibration signal processing methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1907-1915. (in Chinese)
- [10] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2011: 4144-4147.
- [11] 李军, 李青. 基于 CEEMDAN-排列熵和泄漏积分 ESN 的中期电力负荷预测研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(8): 70-80.
- [11] LI Jun, LI Qing. Medium term electricity load forecasting based on CEEMDAN-permutation entropy and ESN with leaky integrator neurons[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(8): 70-80. (in Chinese)
- [12] 胡显能, 蔡改贫, 罗小燕, 等. 基于 CEEMDAN 和多尺度排列熵的球磨机负荷识别方法[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(3): 146-151.
- [12] HU Xian-neng, CAI Gai-pin, LUO Xiao-yan, et al. Load identification method for ball mills based on CEEMDAN and multi-scale permutation entropy[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(3): 146-151. (in Chinese)
- [13] 张建伟, 侯鸽, 暴振磊, 等. 基于 CEEMDAN 与 SVD 的泄流结构振动信号降噪方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(22): 138-143.
- [13] ZHANG Jian-wei, HOU Ge, BAO Zhen-lei, et al. A signal de-noising method for vibration signals from flood discharge structures based[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(22): 138-143. (in Chinese)
- [14] 郑一, 孙晓峰, 陈健, 等. 基于集合经验模态的随钻脉冲信号优良降噪算法[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 750-753.
- [14] ZHENG Yi, SUN Xiao-feng, CHEN Jian, et al. Extracting pulse signals in measurement while drilling using optimum denoising methods based on the ensemble empirical mode decomposition[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 750-753. (in Chinese)
- [15] 刘璉, 杨永强, 姚颖康, 等. 高层框剪结构爆破拆除振动监测及分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 198-205.
- [15] LIU Jin, YANG Yong-qiang, YAO Ying-kang, et al. Measurement and analysis of vibration caused by blasting demolition of high-rise RC building[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(5): 198-205. (in Chinese)