

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.006

基于傅里叶分解-小波包分析的爆破信号去噪方法*

王海龙¹, 柏皓博¹, 赵岩², 王彬³, 王海军³

(1. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心, 张家口 075000;
2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3. 北旺建设集团有限责任公司, 承德 067000)

摘要: 针对由于爆破现场施工环境复杂, 爆破振动信号包含大量高频噪声的问题, 提出一种基于傅里叶分解(FDM)联合小波包阈值方法的降噪方法。首先, 基于傅里叶分解理论将爆破振动信号分解为若干傅里叶固有频带函数(FIBFs); 然后, 分别计算分解所得模态分量与原始信号的相关系数, 使用相关系数法筛选出优势分量, 将筛选所得优势模态分量进行重构; 最后, 利用小波包阈值方法对重构所得信号进一步降噪, 得到最终纯净的爆破振动信号。结果表明: 引入的新方法兼具傅里叶分解及小波包分析的优点, 与现有常用方法相比, 傅里叶分解-小波包分析联合降噪方法信噪比(10.3940)最高, 均方根差(0.0889)最小, 所得时程曲线更为平滑, 去噪效果更好, 为类似爆破振动信号去噪提供新的途径。

关键词: 爆破振动信号; 傅里叶分解; 小波包分析; 去噪

中图分类号: TU751.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)02-0037-08

Denoising Algorithm of Blasting Signal based on Fourier Decomposition Method-Wavelet Packet Analysis

WANG Hai-long¹, BAI Hao-bo¹, ZHAO Yan², WANG Bin³, WANG Hai-jun³

(1. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Hebei Innovation Center of Transportation Infrastructure in Cold Region, Zhangjiakou 075000, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Beiwang Construction Group Co Ltd, Chengde 067000, China)

Abstract: In allusion to the issue of the blasting vibration signal containing which a lot of high-frequency noise due to the complex blasting construction environment, a noise reduction method based on Fourier decomposition (FDM) combined wavelet packet threshold method is proposed. Firstly, based on Fourier decomposition theory, blasting vibration signals were decomposed into several Fourier intrinsic band frequency functions (FIBFs). Then, the correlation coefficients between the decomposed modal components and the original signal were calculated respectively, and the dominant modal components were screened out by the correlation coefficient method, the dominant modal components were reconstructed subsequently. Finally, the wavelet packet threshold method was used to further denoise the reconstructed signal, and the final pure blasting vibration signal was obtained. The results show that the new method has the advantages of both Fourier decomposition and wavelet packet analysis. Compared with the existing common methods, the combined denoising method of Fourier decomposition and wavelet packet analysis has the highest signal-to-noise ratio(10.3940) and the minimum root mean square difference(0.0889). The obtained time-history curve is smoothing and the denoising effect is better. It provides a new way to denoise similar blasting vibration signal.

Key words: blasting vibration signal; FDM; wavelet packet analysis; de-noising

目前,大多对于爆破的研究都是基于对爆破振动信号的研究展开的,但在进行信号采集时,受施工现场复杂环境影响,如钻孔作业、装载机与运输机等重型机运作。同时还受到信号采集仪器松动或由于温度变化产生零点漂移的影响,采样信号可能会出现形状不规则和基线偏移情况。故采集到的爆破振动信号可能带有无用干扰信号,即噪声。而噪声会对信号中 useful 信息的提取造成干扰,对信号处理带来困难,为进行后续爆破振动信号分析,原始信号的降噪处理就成为了不可或缺的前期工作。

由于隧道爆破的突发性,破坏性强,隧道爆破信号表现为典型的非平稳信号,处理这类非平稳信号去噪问题,较常见的方法为 EMD(empirical mode decomposition)方法^[1]、EEMD(ensemble empirical mode decomposition)方法^[2]、CEEMDAN(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise)方法^[3]、小波阈值方法^[4]、小波包阈值方法^[5]。同时,EMD-小波阈值方法联合去噪^[6]、EEMD-小波阈值方法联合去噪^[7]、CEEMDAN-小波包联合去噪在进行信号去噪中表现良好^[8]。

马宏伟等利用 EMD 分解方法对煤矿机械振动信号进行降噪处理^[9],利用相关系数,实现了非平稳信号的滤波。叶红宇等针对 EMD 方法模态混叠问题^[10],使用 EEMD-小波包阈值方法对隧道爆破振动信号进行降噪,在消除随机噪声的同时,该方法可保留更多的信号细节特征。刘霞等使用 CEEMDAN 方法对信号进行分解^[11],利用能量熵划分噪声主区间,对其进行阈值去噪,此方法在很大程度上缓解了模态混叠问题。李红延等在小波阈值去噪算法基础上^[12],改进阈值函数,提高了噪声与信号的可分离性。史贤俊等针对含噪信号的不同频段^[13],采用不同小波包阈值算法,用量化后的系数重构得纯净信号。

EMD 方法、EEMD 方法、CEEMDAN 方法均未从根本上解决噪声残留与模态混叠问题。小波阈值方法未对信号高频部分进行分析,存在局限性,而小波包阈值方法虽对高频部分进行分解,但二者均受制于小波基函数与分解层数的选取。

隧道爆破过程中,由于施工现场环境复杂,噪声

对信号采集影响较大,针对此噪声干扰问题,提出一种基于傅里叶分解(FDM)和小波包阈值方法的联合去噪方法^[14-17]。傅里叶分解基于傅里叶变换,进行时频分析,可以将原始信号进行自适应分解,得到一系列正交的傅里叶固有频带函数(FIBFs)和一个残余分量,可以将有用信息与噪声进行有效分离,避免了模态混叠问题的出现,可以直接将噪声分量进行剔除,保留含少量噪声与有用信息的分量,进行初步信号去噪,并且由于在分解过程中未加入高斯白噪声,也就不会存在噪声残留问题。而小波包阈值方法,优化了对信号高频部分的分析,提高了信号的分析能力。

利用 FDM 和小波包阈值方法联合去噪主要流程为:将原始信号分解为若干正交的傅里叶固有频带函数,通过分析相关系数,找出噪声分量,剔除噪声分量后,将剩余包含原始信号信息和少量噪声的 FIBFs 进行重构;利用小波包阈值方法对重构信号进一步降噪,得到降噪处理后的爆破振动信号。

1 原理阐述

1.1 FDM 算法

Pushpendra Singh 等学者在傅里叶变换的基础上^[18],提出一种新的时频分析方法,其可用于分析非线性、非平稳信号,即 FDM(Fourier Decomposition Method),此方法通过在傅里叶域内自适应搜寻解析傅里叶固有频带函数(AFIBFs),从而获得一系列傅里叶固有频带函数和一个残余分量,获得多分量信号作为常数和单分量信号的唯一表示,该数学模型可用下式表示。

$$x(t) = \sum_{i=1}^M y_i(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $n(t)$ 为残余分量; $y_i(t) \in C^\infty[a, b]$ 为傅里叶固有频带函数(FIBFs)。FIBFs 具有如下性质:函数均为零均值函数;且不同分量函数之间两两正交;FIBFs 提供的解析函数的瞬时频率和瞬时幅值均不小于 0。用数学表达式表示为

$$\int_a^b y_i(t) dt = 0 \quad (2)$$

$$\int_a^b y_i(t) y_j(t) dt = 0 \quad (i \neq j) \quad (3)$$

$$y_i(t) + j\hat{y}_i(t) = a_i(t) \exp[j\phi_i(t)];$$

$$\forall t, a_i(t), \frac{d}{dt} \phi_i(t) \geq 0 \quad (4)$$

由以上性质可得,FDM 方法具有完备性、正交性、局部性、自适应性,对信号进行傅里叶分解后,基本可以将信号中的有用信息与噪声分离开来,且不

收稿日期:2021-01-19

作者简介:王海龙(1965-),男,教授、博士,从事隧道工程的安全性评价与超前支护机理研究,(E-mail) wanghailong-65@163.com。

通讯作者:柏皓博(1996-),男,硕士研究生,从事隧道爆破研究,(E-mail) 915624065@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(NO. 51878242);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2021153)

会发生模态混叠现象。

在搜寻 AFIBFs 时, 可以由高频向低频搜寻 (HTL-FS 算法), 也可以从低频向高频搜寻 (LTH-FS 算法), 具体步骤为^[19]

LTH-FS 算法:

$$\text{令 } i = 1, \dots, M; N_0 = 0; N_M = \frac{N}{2} - 1。$$

(1) 对原始信号 $x(t)$ 进行傅里叶变换, 即 $X[k] = \text{FFT}\{x[n]\}$;

(2) 令 $\text{AFIBF}_i = \sum_{k=N_{i-1}+1}^{N_i} X[k] \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) = a_i[n] \exp j\phi_i[n]$, 为获取最小数目的 AFIBFs, 令 $N_{i-1} + 1 \leq \frac{N}{2} - 1$, 并使其相位 $\phi_i[n]$ 在区间内单调递增, $\omega_i[n] = \left(\frac{\phi_i[n+1] - \phi_i[n-1]}{2}\right) \geq 0, \forall n$;

$$(3) \text{ 残余分量 } r[n] = X[0] + X\left[\frac{N}{2}\right](-1)^n;$$

(4) 对 AFIBFs 可求瞬时频率和瞬时幅值, AFIBFs 的实部即为 FIBFs。

HTL-FS 算法:

$$\text{令 } i = 1, \dots, M; N_0 = \frac{N}{2}; N_M = 1。$$

(1) 对原始信号 $x(t)$ 进行傅里叶变换, 即 $X[k] = \text{FFT}\{x[n]\}$;

(2) 令 $\text{AFIBF}_i = \sum_{k=N_i}^{N_{i-1}-1} X[k] \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) = a_i[n] \cdot \exp j\phi_i[n]$, 为获取最小数目的 AFIBFs, 令 $1 \leq N_i \leq N_{i-1} - 1$, 并其相位 $\phi_i[n]$ 在区间内单调递增, $\omega_i[n] = \left(\frac{\phi_i[n+1] - \phi_i[n-1]}{2}\right) \geq 0, \forall n$;

$$(3) \text{ 残余分量 } r[n] = X[0] + X\left[\frac{N}{2}\right](-1)^n;$$

(4) 对 AFIBFs 可求瞬时频率和瞬时幅值, AFIBFs 的实部即为 FIBFs。

1.2 小波包算法

小波分解通过一组低通与高通滤波器将原始信号分解为高频和低频两个部分, 而后将低频部分进行分解。小波包分解将小波分解中未涉及的高频部分进行进一步分解, 然后再选择最优小波基函数, 时频分析效果优于小波函数。其具体步骤为^[20]:

(1) 定义正交尺度函数 $\varphi(x)$ 以及其对应的小波函数 $\psi(x)$, 设 $h(k)$ 为低通滤波器系数, $g(k)$ 为高通滤波器系数, 并且有 $h(k)$ 和 $g(k)$ 为共轭滤波器系数。

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) \varphi(2x - k) \\ \psi(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) \varphi(2x - k) \end{cases} \quad (5)$$

令 $\mu_0 = \varphi(x), \mu_1 = \psi(x)$, 则

$$\begin{cases} \mu_{2n}(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) \mu_n(2x - k) \\ \mu_{2n+1}(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) \mu_n(2x - k) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 设子空间 U_j^n 为函数 $\mu_n(x)$ 的闭包空间, 子空间 U_j^{2n} 为函数 $\mu_{2n}(x)$ 的闭包空间, $g_j^n \in U_j^n$, 则 $g_j^n(x)$ 可表示为

$$g_j^n = \sum_l C_l^{j,n} \mu_n(2^j x - 1) \quad (7)$$

可得小波包分解算法为

$$\begin{cases} C_l^{j,n} = \sum_k h(k - 2l) C_k^{j+1,n} \\ C_l^{j,2n+1} = \sum_k g(k - 2l) C_k^{j+1,n} \end{cases} \quad (8)$$

(3) 将小波包分解进行逆运算, 得到小波包重构表达式为

$$C_l^{j+1,n} = \sum_k [h(l - 2k) C_l^{j,2n} + g(l - 2k) C_l^{j,2n+1}] \quad (9)$$

1.3 FDM-小波包联合降噪

基于 FDM 算法和小波包算法, 提出基于傅里叶分解和小波包阈值方法相结合的爆破振动信号去噪方法, 其具体步骤为:

- (1) 对原始爆破信号进行傅里叶分解, 将信号分解为若干傅里叶固有频带函数和一个残余分量;
- (2) 根据相关系数法筛选出噪声模态分量, 将剔除噪声模态分量后的信号进行重构;
- (3) 利用小波包阈值方法对重构信号进行降噪处理, 得到纯净信号。

2 仿真分析

2.1 爆破振动模拟信号建立

利用正余弦函数叠加函数模拟隧道爆破振动信号^[21], 仿真信号表达式为

$$\begin{cases} z_1(t) = z_2(t) + z_3(t) + z_4(t) \\ z_2(t) = 0.15e^{-15t} \times \sin(150\pi t) \\ z_3(t) = 0.25\sin(100\pi t) \times [1 + 1.5\sin(20\pi t)] \\ z_4(t) = 0.2\cos(50\pi t) \\ z(t) = z_1(t) + z_5(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $z_1(t)$ 为原始信号; $z_5(t)$ 为高斯白噪声。模拟信号建立如图 1 所示。

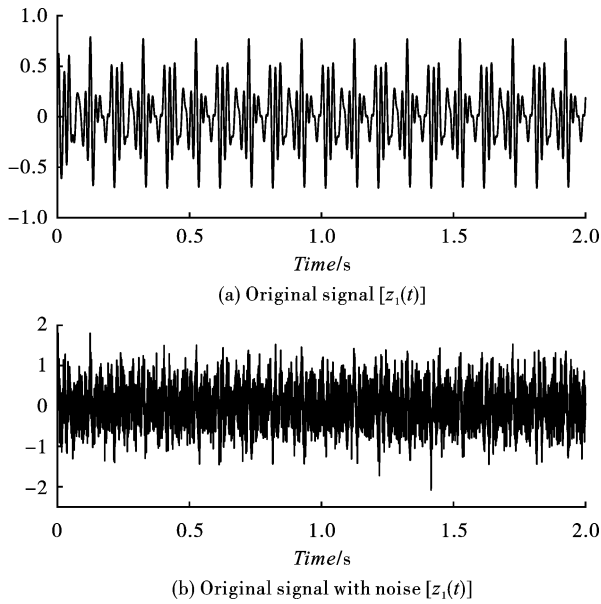


图1 仿真信号波形图

Fig. 1 Waveform of simulation signal

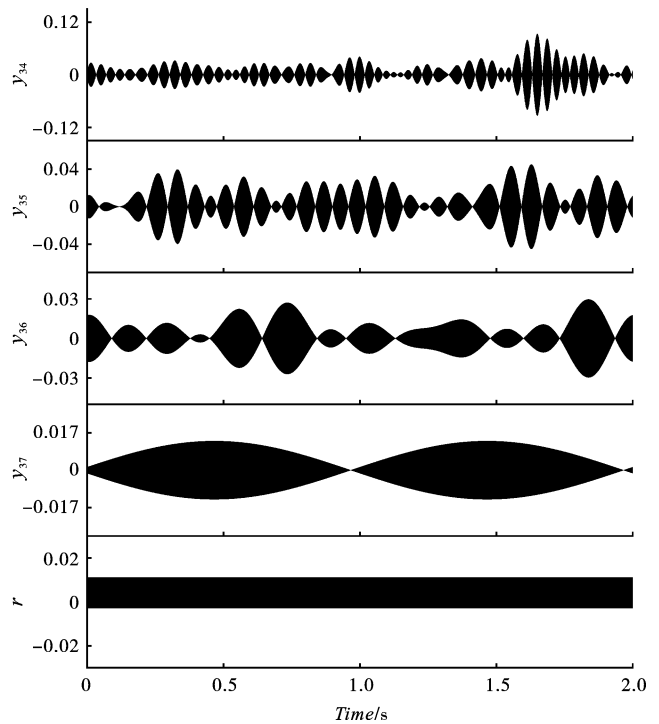
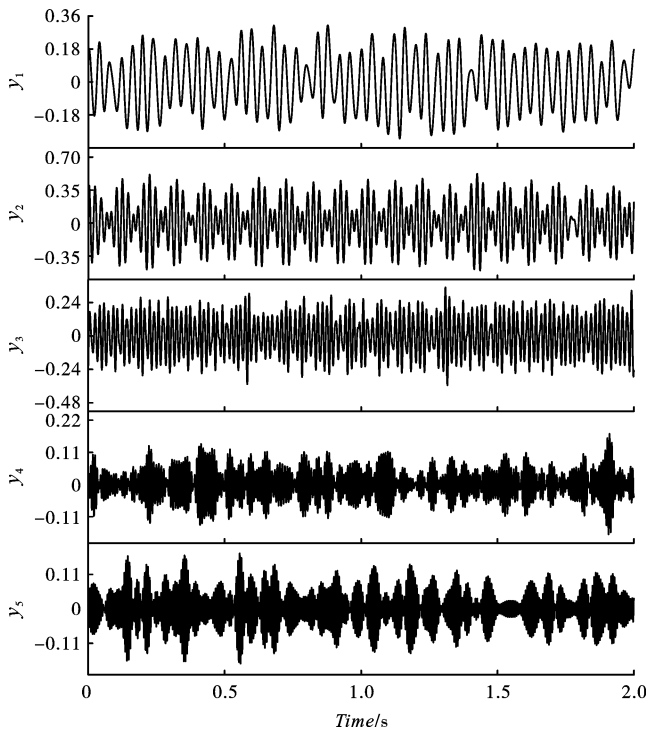


图2 FDM分解结果

Fig. 2 Decomposition result of FDM

通过互相关系数,并结合波形图可知, $y_4 \sim y_{37}$ 相关性较小,可认为是噪声分量,将其剔除, y_1, y_2, y_3 分量与原始信号互相关系数较大,且包含原始信号细节特征,将其保留并重构,利用小波包阈值方法进一步进行降噪。

2.3 小波包阈值方法降噪

将 y_1, y_2, y_3 进行重构,采用小波包阈值方法对其进行去噪处理,降噪后纯净信号如图3所示。

2.2 仿真信号的傅里叶分解及 FIBFs 相关性分析

对上述仿真信号进行 FDM 分解,采用 HTL-FS 算法,分解得到 37 个傅里叶固有频带函数和一个残余分量 r ,由于篇幅限制,选择其中 10 个模态分量进行展示如图 2 所示,其中 $y_1 \sim y_3$ 与原始信号波形相似,可初步认为其含有原始信号中有用信息,而其余分量与原始信号波形差异较大,初步认定其为噪声分量。

对傅里叶固有频带函数与仿真信号进行相关性分析,求得傅里叶固有频带函数与原信号 $z(t)$ 互相关系数,部分互相关系数如表 1 所示。

表 1 部分 FIBFs 与原信号 $z(t)$ 互相关系数Table 1 Correlation coefficient of part of the FIBFs and Original signal $z(t)$

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_{34}
0.3130	0.4806	0.3022	0.1035	0.1122	0.0491

2.4 仿真结果评价

通过对比波形图可以发现,降噪后的纯净信号基本保留了初始信号 $z_1(t)$ 的特征信息,且剔除了其中的噪声信息,利用 MATLAB 中互相关系数函数计算纯净信号与初始信号 $z_1(t)$ 的相关系数为 0.9575,表现出良好的相关性,可以发现,FDM-小波包联合去噪方法可以准确地去除信号中的噪声,在隧道爆破振动信号去噪中表现良好,可以得到精确的振动信号。

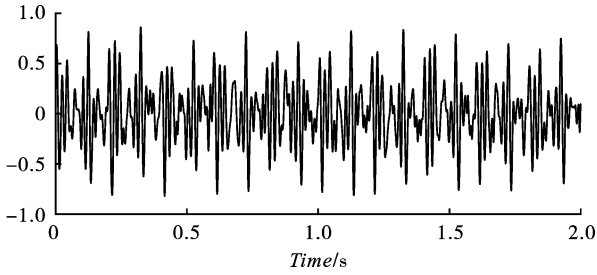


图 3 纯净信号波形图

Fig. 3 Pure signal after de-noising

再通过信噪比(SNR)和均方根差(RMSE)来评价爆破信号去噪效果^[22],信噪比越高,均方根差越小,说明去噪效果越好,表达式为

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n Z_i(t)^2}{\sum_{i=1}^n [Z_i(t) - Z'_i(t)]^2} \right\} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_i(t) - Z'_i(t)]^2} \quad (12)$$

式中: $Z_i(t)$ 为原始信号; $Z'_i(t)$ 为去噪后信号; n 为信号长度。

为验证此方法的降噪效果,对仿真信号分别采

表 2 降噪效果对比

Table 2 Noise reduction effect comparison

方法	小波包阈值	EMD-小波包	CEEMDAn-小波包	FDM-小波包
SNR	9.0726	9.2380	9.4267	10.3940
RMSE	0.1035	0.1016	0.0994	0.0889

通过对比可得,FDM-小波包联合去噪方法信噪比(10.3940)最大,均方根差(0.0889)最小,去噪效果最好,同时观察波形图可知,经 FDM-小波包联合去噪后,波形图的光滑程度得到显著提高,在保留原始信号细节特征的同时,有效剔除了噪声分量,证明了 FDM-小波包联合去噪方法在隧道爆破振动信号去噪中的有效性。

3 工程实例分析

3.1 爆破信号采集

实测爆破振动信号来自于新建京张高铁草帽山隧道爆破施工^[23,24],爆破振动信号采集仪器为中科测控公司研发的 TC-4850 爆破测振仪,最小工作采样频率为 5Hz,原始爆破振动信号如图 5 所示。

由图 5 可知,受复杂施工环境影响,此信号爆破振速时程曲线不平滑,包含大量毛刺噪声。

3.2 FDM-小波包联合降噪

先对原始信号进行 FDM 分解,采用 HTL-FS 算

用小波包阈值方法、EMD-小波包联合降噪方法、CEEMDAN-小波包联合降噪方法进行分析,所得波形图如图 4 所示。

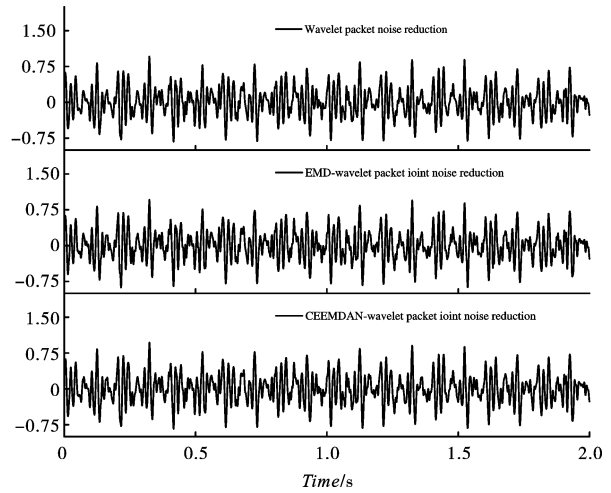


图 4 降噪效果对比图

Fig. 4 Noise reduction effect of several methods for comparison

分别计算上述方法信噪比和均方根差,所得结果如表 2 所示。

法,得到 48 个傅里叶固有频带函数和 1 个残余分量 r 。部分傅里叶固有频带函数如图 6 所示,其中, $y_1 \sim y_5$ 分量特征清晰,无模态混叠现象,且与原始振动信号波形相似,初步认为其包含大部分原始信号中 useful 信息,进行相关性分析进行验证。

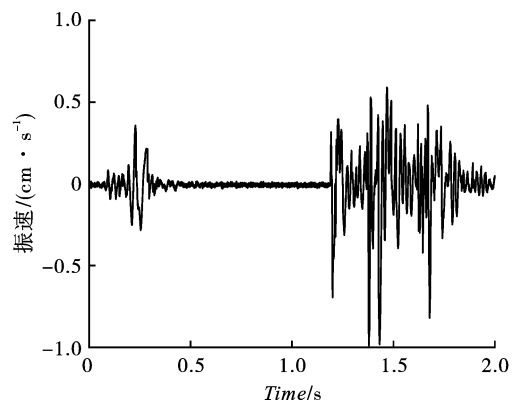


图 5 爆破振动信号

Fig. 5 Original signal of blasting vibration speed

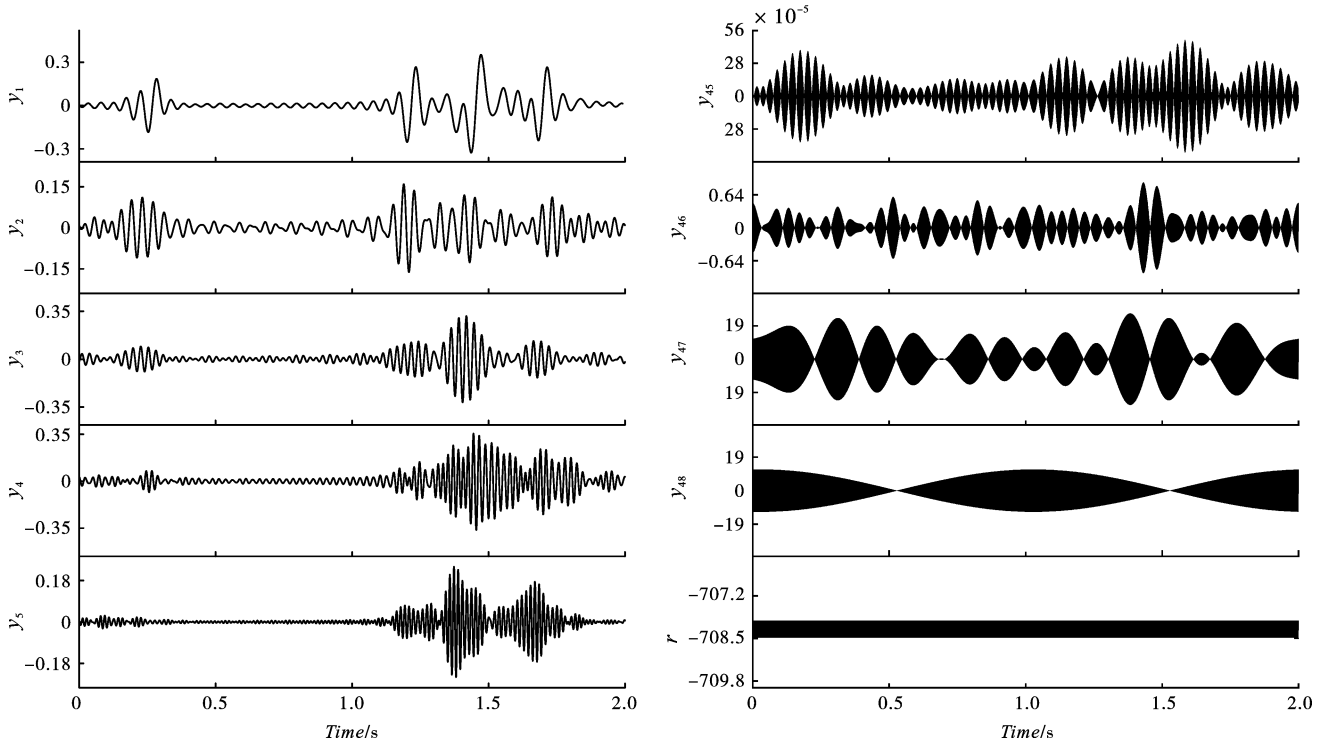


图6 FDM分解结果

Fig. 6 Decomposition result of FDM

对 FIBFs 进行相关性分析,部分互相关系数如表 3 所示。

表 3 部分 FIBFs 与原始信号互相关系数
Table 3 Correlation coefficient of part of the FIBFs and Original signal

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_{45}
0.5312	0.2845	0.4150	0.5451	0.2975	0.0011

$y_1 \sim y_5$ 相关系数较大,认为其含有原始信号有用信息,其余分量相关系数较小,认为其为噪声分量,将 $y_1 \sim y_5$ 进行重构,进行小波包阈值方法降噪,依据采样定理^[25],信号采集频率为 5000 Hz, Nyquist 频率为 2500 Hz,故小波基函数采取“db8”函数,进行 8 层分解,采用软阈值进行去噪。所得纯净信号如图 7 所示。

3.3 去噪结果评价与分析

为评价 FDM-小波包联合去噪方法,再分别采用小波包阈值方法、EMD-小波包联合降噪方法、CEEMDAN-小波包联合降噪方法对原始信号进行去噪,所得结果如图 8 所示。

由图 8 对比可知,FDM-小波包联合降噪方法所得爆破振动时程曲线相比较而言最平滑,且保留了原始信号中的细节特征,基本消除了原始信号中的

毛刺噪声,去噪效果最好。而其余三种方法在进行降噪后,所得时程曲线含有毛刺噪声,降噪效果不理想。故采用 FDM-小波包联合降噪方法,有助于得到更为精确的爆破振动信号,为进一步的爆破振动分析提供了更科学的基础。

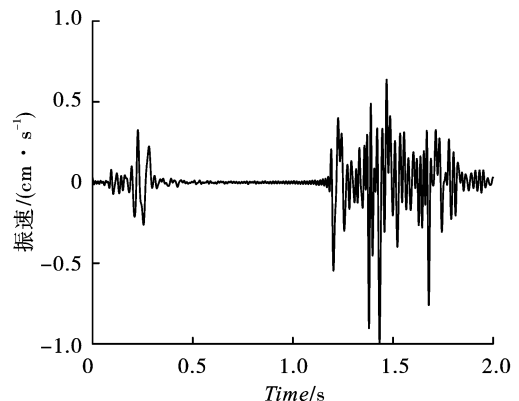


图7 纯净信号波形图

Fig. 7 pure signal after de-noising

对比不同方法的去噪过程,FDM-小波包联合去噪方法相对更简便,由于其可以有效将原始信号中 有用信息和噪声进行分离,故只需选择相关系数较大的分量进行重构,之后利用小波包阈值方法进一步降噪,可以在最大程度上保留有用信息,消除噪声。

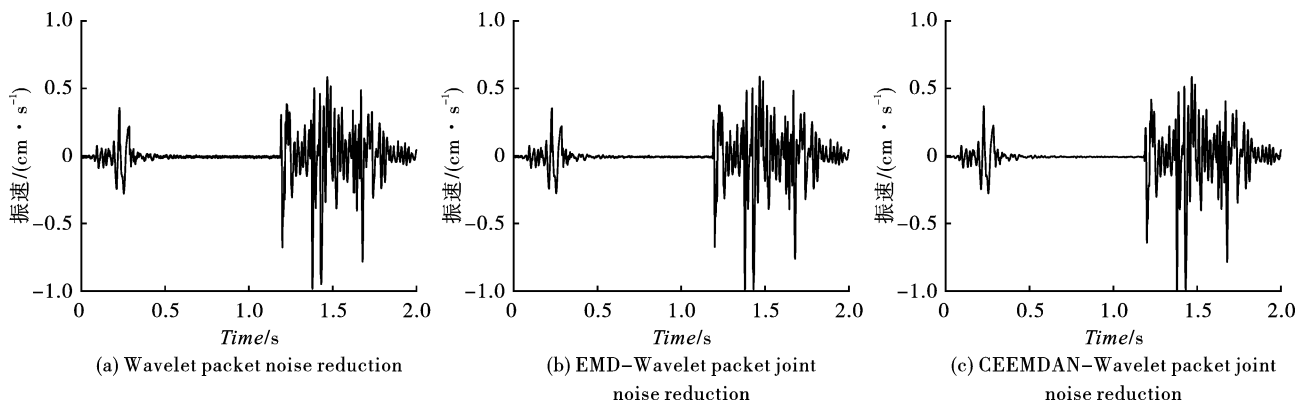


图8 不同方法去噪结果对比

Fig. 8 Noise reduction effect of several methods for comparison

4 结论

依托新建京张高铁草帽山隧道爆破施工,提出了一种傅里叶分解-小波包联合降噪方法,分别对仿真信号及工程爆破振动信号进行分析,得到如下结论:

(1) FDM 分解从根本上解决了模态混叠与噪声残留问题,提高了信号分解精度。

(2) 与小波包阈值方法、EMD-小波包联合降噪方法、CEEMDAN-小波包联合降噪方法相比,FDM-小波包联合降噪方法所得到信噪比(10.3940)最大,均方根差(0.0889)最小,降噪效果最好。

(3) FDM-小波包联合降噪所得纯净信号可有效保留原始信号中细节特征,可为后续信号精确分析奠定基础。

参考文献 (References)

[1] YUAN H P, LIU X L, BIAN H B, et al. Analysis of acoustic wave frequency spectrum characters of rock mass under blasting damage based on the HHT Method [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018(4): 1-8.

[2] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.

[3] HASSAN A R, SUBASI A, ZHANG Y C. Epilepsy seizure detection using complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 191(5): 1-12.

[4] 黄娟, 高静, 张玲. 基于小波去噪与HHT变换的轴承故障特征信号提取方法研究 [J]. *机床与液压*, 2020, 48(10): 50-55.

[4] HUANG J, GAO J, ZHANG L. Study on feature signal extraction method of axlebox bearing fault based on wavelet denoising and HHT transformation [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(10): 50-55. (in Chinese)

[5] 单仁亮, 宋永威, 白瑶, 等. 基于小波包变换的爆破

信号能量衰减特征研究 [J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(2): 119-128.

[5] SHAN R L, SONG Y W, BAI Y, et al. Research on the energy attenuation characteristics of blasting vibration signals based on wavelet packet transformation [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(2): 119-128. (in Chinese)

[6] 刘霞, 黄阳, 黄敬, 等. 基于经验模态分解(EMD)的小波熵阈值地震信号去噪 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(1): 262-269.

[6] LIU X, HUANG Y, HUANG J, et al. Wavelet entropy threshold seismic signal denoising based on empirical mode decomposition (EMD) [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1): 262-269. (in Chinese)

[7] 邓青林, 赵国彦. 基于EEMD和小波的爆破振动信号去噪 [J]. *爆破*, 2015, 32(4): 33-38.

[7] DENG Q L, ZHAO G Y. De-noising of blast vibration signal based on EEMD and wavelet [J]. *Blasting*, 2015, 32(4): 33-38. (in Chinese)

[8] 王海龙, 赵岩, 王海军, 等. 基于CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法 [J/OL]. *爆炸与冲击*: 1-15. [2020-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.O3.20200803.1813.004.html>.

[8] WANG H L, ZHAO Y, WANG H J, et al. De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis [J/OL]. *Explosion and Shock Waves*: 1-15. [2020-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.O3.20200803.1813.004.html>. (in Chinese)

[9] 马宏伟, 张大伟, 曹现刚, 等. 基于EMD的振动信号去噪方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(22): 38-40.

[9] MA H W, ZHANG D W, CAO X G, et al. Vibration signal de-noising method based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(22): 38-40. (in Chinese)

[10] 叶红宇, 卓越, 杨小林. 隧道爆破振动信号EEMD分解后小波包降噪法研究 [J]. *铁道建筑*, 2018, 58(7):

- 83-86.
- [10] YE H Y, ZHUO Y, YANG X L. Research on wavelet packet denoising of tunnel blasting vibration signals after EEMD decomposition [J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(7): 83-86. (in Chinese)
- [11] 刘 霞, 宋启航. CEEMDAN 自适应阈值去噪算法在地震方向的应用[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(7): 95-104.
- [11] LIU X, SONG Q H. CEEMDAN adaptive threshold denoising algorithm in application to seismic direction [J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(7): 95-104. (in Chinese)
- [12] 李红延, 周云龙, 田 峰, 等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(10): 2200-2206.
- [12] LI H Y, ZHOU Y L, TIAN F, et al. Wavelet-based vibration signal de-noising algorithm with a new adaptive threshold function[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(10): 2200-2206. (in Chinese)
- [13] 史贤俊, 林 飒, 李瑞亮. 基于最优小波包基的信号去噪算法及其应用[J]. *海军航空工程学院学报*, 2006, 21(5): 506-509.
- [13] SHI J X, LIN S, LI R L. Signal denoising algorithm and its application based on best wavelet packet basis[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2006, 21(5): 506-509. (in Chinese)
- [14] 任 岩, 黄 今, 胡雷鸣, 等. 基于傅里叶分解与排列熵的水轮机组去噪方法研究[J]. *水力发电*, 2020, 46(10): 96-99, 116.
- [14] REN Y, HUANG J, HU L M, et al. Denoising algorithm of hydro-generator set based on fourier decomposition and permutation entropy [J]. *Water Power*, 2020, 46(10): 96-99, 116. (in Chinese)
- [15] 郑近德, 潘海洋, 程军圣, 等. 基于自适应经验傅里叶分解的机械故障诊断方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(9): 125-136.
- [15] DENG J D, PAN H Y, CHENG J S, et al. Adaptive empirical fourier decomposition based mechanical fault diagnosis method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(9): 125-136. (in Chinese)
- [16] 刘 洋, 刘晓波, 梁 珊. 基于傅里叶分解方法的航空发动机转子故障诊断[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(18): 2156-2163.
- [16] LIU Y, LIU X B, LIANG S. Aeroengine rotor fault diagnosis based on fourier decomposition method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(18): 2156-2163. (in Chinese)
- [17] 林近山, 窦春红, 赵光胜, 等. 基于傅里叶分解方法的风电齿轮箱故障诊断[J]. *机械传动*, 2018, 42(11): 132-136.
- [17] LIN J S, DOU C H, ZHAO G S, et al. Fault diagnosis of wind-turbine gearboxes based on fourier decomposition method[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2018, 42(11): 132-136. (in Chinese)
- [18] SINGH Pushendra, JOSHI Shiv Dutt, PATNEY Rakesh Kumar, et al. The Fourier decomposition method for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 473(2199): 1-14.
- [19] 张国瑞, 王旭元, 郭文斌. 基于傅里叶分解与 1.5 维 Teager 能量谱的滚动轴承故障诊断方法[J]. *机械传动*, 2017, 41(3): 191-196.
- [19] ZHANG G R, WANG X Y, GUO W B. Fault diagnosis method of rolling bearing based on fourier decomposition method and 1.5-dimensional teager energy spectrum [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2017, 41(3): 191-196. (in Chinese)
- [20] 刘 毅, 张彩明, 赵玉华, 等. 基于多尺度小波包分析的肺音特征提取与分类[J]. *计算机学报*, 2006(5): 769-777.
- [20] LIU Y, ZHANG C M, ZHAO Y H, et al. The feature extraction and classification of lung sounds based on wavelet packet multiscale analysis [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006(5): 769-777. (in Chinese)
- [21] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [21] LI H T. Research on blasting seismic effect based on energy principle [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese)
- [22] 谢德红, 李俊锋, 刘 芮, 等. 基于改进 Hodrick-Pre-scott 分解模型的近红外自适应降噪方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(5): 1650-1655. (in Chinese)
- [22] XIE D H, LI J F, LIU D, et al. An improved hodrick-prescott decomposition based near-infrared adaptive denoising method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(5): 1650-1655. (in Chinese)
- [23] 王海龙, 赵 岩, 王永佳, 等. 新建京张高铁立体交叉隧道爆破振动控制研究[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(7): 130-134.
- [23] WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Study on blasting vibration control of three-dimensional cross tunnel on Beijing to Zhangjiakou high-speed railway[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(7): 130-134. (in Chinese)
- [24] 王海龙, 赵 岩, 王永佳, 等. 草帽山隧道爆破振动监测与分析[J]. *铁道建筑*, 2017, 57(12): 67-70.
- [24] WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Blasting vibration monitoring and analysis of caomaoshan tunnel[J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(12): 67-70. (in Chinese)
- [25] SIMAR L, ZELENYUK V. Improving finite sample approximation by central limit theorems for estimates from Data Envelopment Analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 284(3): 1002-1015.