

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.022

基于 FDM 的爆破振动信号时频分析*

王海龙¹, 柏皓博¹, 王晟华^{2,3}

(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. 北旺建设集团有限责任公司, 承德 067400; 3. 河北省装配式建造与地下工程技术创新中心, 承德 067400)

摘要: 为提高爆破振动信号时频分析精度, 引入一种基于傅里叶分解(FDM)的时频分析方法。首先, 基于 FDM 理论对原始仿真信号进行分解, 计算模态分量与原始信号相关系数及其能量占比, 从而筛选优势分量。然后, 对筛选所得分量进行 Hilbert 变换, 求取时频谱。同时, 基于 EMD 方法、EEMD 方法、CEEMDAN 方法对原始仿真信号进行分解, 利用能量占比理论评价分解结果的模态混叠效应, 利用 Hilbert 变换求取对应时频谱, 比较四种方法时频谱分辨率。最后, 将该方法用于实测爆破振动信号时频分析。结果表明: FDM 可以有效解决模态混叠问题, 且其分解结果经 Hilbert 变换所得时频谱具有良好分辨率, 有利于提取爆破振动信号局部细节特征, 有助于获取爆破振动信号时间-频率-能量三者之间联系, 提高隧道爆破振动信号时频分析准确度。

关键词: 傅里叶分解; 模态混叠; 能量占比; 时频分析

中图分类号: TU751.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0143-09

Time-frequency Analysis of Blasting Vibration Signal based on FDM

WANG Hai-long¹, BAI Hao-bo¹, WANG Sheng-hua^{2,3}

(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. North Prosperous Construction Group Co., LTD., Chengde 067400, China;

3. Hebei Province Prefabricated Construction and Underground Engineering Technology Innovation Center, Chengde 067400, China)

Abstract: A time-frequency analysis method based on Fourier Decomposition Method(FDM) has been introduced to improve the accuracy of time-frequency analysis of blasting vibration signals. Firstly, the original simulated signals were decomposed based on FDM theory, and the correlation coefficient and energy ratio between the modal component and the original signal were calculated, so as to screen the dominant components. Then, the Hilbert transform was applied to the screened components to obtain the time-frequency spectrum. At the same time, the original simulated signals were decomposed based on EMD, EEMD and CEEMDAN methods, and the modal mixing effect of the decomposition results was evaluated by using the energy ratio theory. In addition, the corresponding time-frequency spectrums were obtained by using Hilbert transform, and the time-frequency resolutions of the FDM, EMD, EEMD and CEEMDAN methods were compared. Finally, the proposed method was applied to time-frequency analysis of measured blasting vibration signals. The results show that FDM can effectively solve the problem of modal aliasing, and the decomposition results have a better time-frequency resolution by the Hilbert transform. The proposed method is advantageous to the acquisition of local features and the time-frequency-energy relations of the blasting vibration signals, so as to improve the accuracy of time-frequency analysis of tunnel blasting vibration signals.

Key words: FDM; modal-aliasing; energy proportion; time-frequency analysis

目前,隧道掘进最常用的破岩方式为钻爆法,爆破开挖中产生的爆破振动势必会对周围岩体或建筑物的安全稳定性造成影响。而山岭隧道爆破振动效应经过复杂岩土体传播后,爆破振动信号更为复杂,给能量分析带来不便。爆破振动特征作为分析工程爆破影响的基础,对爆破振动信号进行时频分析,提取爆破振动特征具有重要意义。

爆破振动信号具有瞬时性、震荡性与突变性,表现为典型的非平稳信号,针对此类非平稳信号的分析,近年来使用较为广泛的方法有 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]、小波方法^[4]、小波包方法^[5]。

EMD 方法是一种基于瞬时频率的信号分析方法。它直接将信号在时域上进行模态分解,分解过程中保留信号本身特征。但会存在一个模态分量中包含不同频率的信号,或同一个频率信号被分解到不同模态分量中的问题,即模态混叠现象。为解决这一问题,EEMD 方法、CEEMDAN 方法被相继提出。EEMD 方法通过在原始信号中加入正态分布的高斯白噪声,使信号自动分布到合适的参考尺度,从而降低模态混叠现象,但不可避免地会产生噪声残留问题。CEEMDAN 方法自适应加入高斯白噪声,且在分解过程中得到各阶模态分量时均进行总体平均计算,从而缓解了噪声残留问题。但此类方法均未在根本上解决模态混叠问题。

小波分解会将小波系数较小的细节成分消除,有可能会丢失信号中有用信息,且主要针对信号低频部分进行分析,而小波包分解在此基础上可以同时信号高频部分进行分析。但二者均受制于小波基函数与分解层数的选取,不同的参数对分析结果影响较大。

鲁超等利用 EMD 方法与小波分析对井下深孔爆破振动信号提取信号主分量^[6],进行后续分析。韦啸等利用 EEMD 方法对地铁隧道爆破振动信号进行降噪处理^[7],取得良好效果。王海龙等利用 CEEMDAN 方法与小波包分析联合方法对爆破振动

信号进行降噪处理^[8],结果表明:CEEMDAN 方法可以更有效缓解模态混叠现象。林大超等应用小波变换方法对短时非平稳爆破振动过程提出了时频特征分析^[9],发现基于小波变换的爆破振动时频特征分析相较于传统频谱分析方法可以给出更为准确的细节信息。单仁亮等利用小波包分析对爆破振动信号能量衰减特征进行研究^[10],结果表明利用小波包变换有利于信号的精确分析。

傅里叶分解方法(Fourier Decomposition Method)近年来被广泛用于信号分析领域^[11-13]。因其分解完备性、正交性、自适应性,对于非线性、非平稳信号分析具有显著的优越性。

基于以上研究,引入一种基于 FDM 的隧道爆破振动信号分析方法。FDM 基于傅里叶变换理论,可有效解决模态混叠问题,提高信号分析精度。比较 EMD、EEMD、CEEMDAN、FDM 的仿真信号分解结果,分别计算能量占比,对比分析四种方法模态混叠程度;对 EMD、EEMD、CEEMDAN、FDM 分解所得模态分量进行 Hilbert 变换,比较三者时频分辨率。最后将 FDM 应用于实测信号中,得到实测信号时频谱,所得时频谱可精确表示爆破振动信号低频部分特征,对爆破振动控制具有重要意义。

1 原理阐述

1.1 FDM 理论

Pushendra Singh 等学者在傅里叶变换的基础上,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,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(FIBFs)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^[14]。

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

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)。

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^[15]:

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 $X[k] = FFT\{x[n]\}$;

$$(2) \text{ 令 } AFIBF_i = \sum_{k=(N_{i-1}+1)}^{N_i} X[k] \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) =$$

收稿日期:2021-04-21

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)

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

(3) 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

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 $X[k] = FFT\{x[n]\}$;

(2) 令 $AFIBF_i = \sum_{k=N_i}^{N_{i-1}-1} X[k] \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) =$

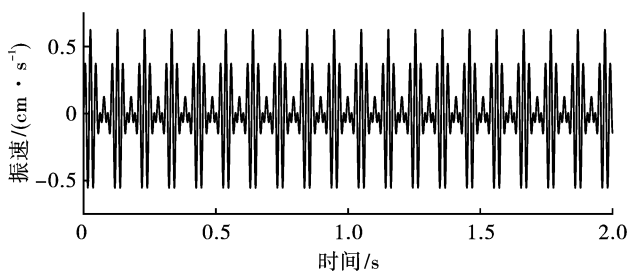
$a_i[n] \exp(j\phi_i[n])$, 为获取最小数目的 AFIBFs, 令 $1 \leq N_i \leq N_{i-1} - 1$, 并使其相位 $\phi_i[n]$ 在区间内单调递增, $\omega_i[n] = \left(\frac{\phi_i[n+1] - \phi_i[n-1]}{2} \right) \geq 0, \forall n$;

(3) 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 Hilbert 变换

利用 Hilbert 变换可求取 Hilbert 谱, 即时频谱,



(a) 原始仿真信号
(a) Original simulation signal

可表示幅度在时域与频域上的分布, 得到时间-频率-能量三者之间联系。时频谱表达式为^[16]

$$H(\omega, t) = Re \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (2)$$

式中: Re 为实部; $i = 1, 2, \dots, n$ 为模态分量个数; $a_i(t)$ 为幅值函数; $\omega_i(t)$ 为频率函数。

1.3 能量占比

由于爆破振动能量主要集中于信号的低频部分, 将爆破振动信号分解到不同频率带上后, 若无模态混叠现象, 低频模态分量与高频模态分量所占能量应有明显区分, 故引入能量占比的概念, 利用其来判别信号分解模态混叠程度。

通过对信号进行模态分解, 可以得到 n 个模态分量, 将残余分量忽略不计, 所有模态分量能量之和应恒等于原始信号能量。则能量占比定义为^[17]

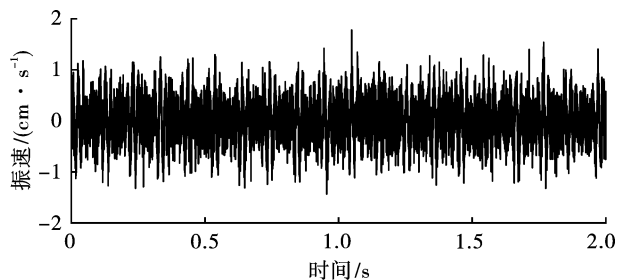
$$P_i = \frac{E_i}{E} \quad (3)$$

式中: E_i 为分解所得第 i 个模态分量能量; E 为信号总能量。

2 数值仿真

2.1 仿真信号构造

利用正弦函数与余弦函数叠加来构造爆破振动仿真信号^[18], 并加入信噪比为 -2 的高斯白噪声模拟由施工现场复杂工序交织进行产生的高频噪声, 仿真信号如图 1 所示。



(b) 含噪原始信号
(b) Original simulation signal with noise

图 1 仿真信号波形图

Fig. 1 Waveform of simulation signal

2.2 仿真信号模态分解

分别对含噪仿真信号进行 EMD 分解、EEMD 分解、CEEMDAN 分解、FDM 分解。分解结果如图 2 所示。含噪仿真信号经 EMD 分解得 13 个模态分量与 1 个残余分量; 经 EEMD 分解得 13 个模态分量与 1 个残余分量; 经 CEEMDAN 分解得 12 个模态分量与 1 个残余分量; 经 FDM 分解得到 37 个 FIBFs, 由于

篇幅限制, 展示 FDM 分解所得 13 个模态分量。图中 r 表示信号分解所得残余分量。

由图 2 可知, 当信号中存在高频噪声时, EMD 分解、EEMD 分解、CEEMDAN 分解所得分量高频部分模态混叠现象严重, 低频部分相对较为稳定, 但仍存在模态混叠问题。FDM 分解所得模态分量由低频至高频依次排列, 并未出现模态混叠现象, 且由于

未引进高斯白噪声辅助分析,故无噪声残留。

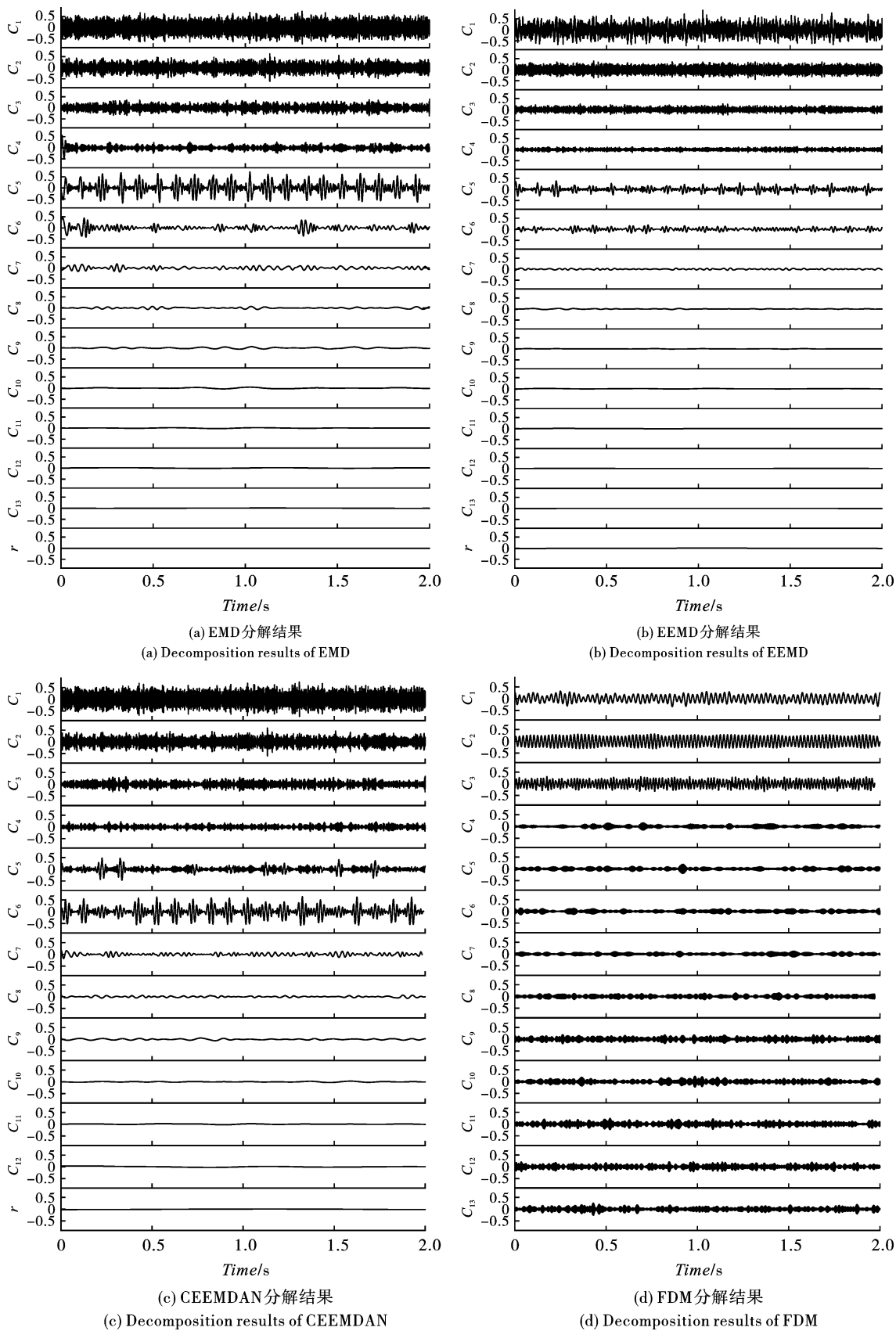


图2 仿真信号不同方法分解结果

Fig. 2 Decomposition result of simulation signal with different methods

2.3 模态分量能量占比

分别计算 EMD 分解、EEMD 分解、CEEMDAN 分解、FDM 分解所得模态分量能量占比, 计算结果如表 1 所示。由于篇幅限制, 展示 FDM 分解所得 13 个模态分量的能量占比。

表 1 不同方法所得模态分量能量占比

Table 1 The energy proportion of modal components with different methods

模态分量	能量占比 P_i			
	EMD	EEMD	CEEMDAN	FDM
C_1	0.3470	0.5507	0.4094	0.1116
C_2	0.1304	0.2084	0.1214	0.1868
C_3	0.0678	0.0568	0.0540	0.1206
C_4	0.0429	0.0225	0.0272	0.0110
C_5	0.3338	0.1102	0.0613	0.0110
C_6	0.0540	0.0445	0.2997	0.0110
C_7	0.0155	0.0045	0.0163	0.0083
C_8	0.0032	0.0011	0.0037	0.0135
C_9	0.0029	0.0004	0.0030	0.0240
C_{10}	0.0013	0.0005	0.0008	0.0199
C_{11}	0.0006	0.0002	0.0007	0.0250
C_{12}	0.0003	0.0002	0.0018	0.0244
C_{13}	0.0001	0.0001		0.0219

将表 1 计算结果与图 2 一一对应, 可以发现, EMD 分解、EEMD 分解和 CEEMDAN 分解高频部分模态混叠现象严重, 且分解所得模态分量能量占比混乱, 高频部分能量占比较高。而爆破振动信号能量主要位于信号低频部分^[19], 故此三种方法对爆破振动信号分析不利。FDM 分解所得模态分量低频部分占比较高, 且主要位于前三个分量之中, 与高频部分能量占比具有明显区分, 说明模态混叠现象得到有效消除, 对信号分析极为有利。

2.4 仿真信号 Hilbert 变换

利用 matlab 中互相关系数函数 (corrcoef) 计算 FDM 分解所得模态分量与原始信号相关系数如表 2 所示, 结合能量占比筛选出前三个分量为信号有用信息, 将其重构, 重构波形图如图 3 所示。

表 2 部分 FIBFs 与原始信号相关系数

Table 2 Correlation coefficient of part of the FIBFs and Original signal

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
0.3341	0.4323	0.3473	0.105	0.1049	0.1056

重构信号基本保留了纯净信号的峰值振幅与局部特征, 对其进行时频分析可以有效剔除噪声干扰, 获得更为精确的时频信息。

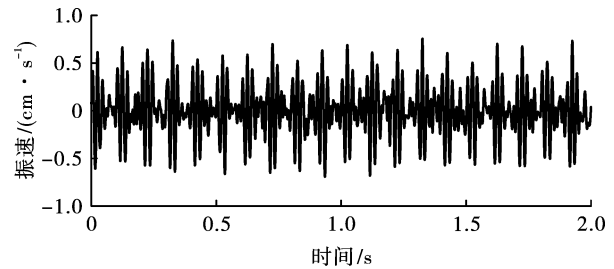


图 3 重构信号波形图

Fig. 3 Waveform of the reconstruct signal

利用 Hilbert 变换求得 EMD、EEMD、CEEMDAN 和 FDM 分解所得分量的时频谱, 如图 4 所示。

当信号中含有高频噪声分量时, EMD、EEMD、CEEMDAN 分解方法通过 Hilbert 变换获取所得时频谱图高频部分模态混叠现象严重, 同时影响低频部分信息提取, 分辨率不佳。EEMD 方法低频部分模态混叠严重是由于在分解时添加了正态分布的高斯白噪声辅助分析, 造成了噪声由高频传递到低频的问题。爆破振动能量主要居于信号低频部分, 当信号中存在高频噪声时, 使用此三种方法进行时频分析, 不利于获取准确的信号特征。FDM 分解后可准确获取信号低频部分能量分布特征, 且根据信号波形图可以发现, 经 FDM 处理后, 原始信号中有用信息得以有效保留, 在最大程度上保证了信号分析的准确性, 适用于爆破振动信号。

3 实测信号分析

3.1 工程概况

依托太锡铁路太崇段新建崇礼隧道下穿和平村工程, 新建崇礼隧道位于河北省张家口市崇礼区西湾子镇黄土咀村至崇礼区西湾子镇大夹道沟的崇山峻岭中, 崇礼隧道 3#斜井小里程方向于 $DK65 + 500 \sim DK65 + 800$ 段下穿和平村, 下穿段埋深约 30 m。和平村房屋多为砖混建筑和毛石房屋, 结构较差, 围岩等级为 III 级和 IV 级。崇礼隧道与村庄位置如图 5 所示。

3.2 爆破振动信号采集

为使爆破对村庄影响最小化, 对爆破振动进行实时监测, 监测设备采用中科测控公司出产的 TC4850 爆破测振仪。该爆破测振仪配有三轴向振动速度传感器, 分别对应 X 方向、Y 方向、Z 方向。使 X 方向指向 3#斜井小里程前进方向, Y 方向垂直于 X 方向指向村庄内部, Z 方向垂直于 X 方向与 Y 方向垂直向上。测点布置如图 6 所示, 采集所得部分数据如表 3 所示。

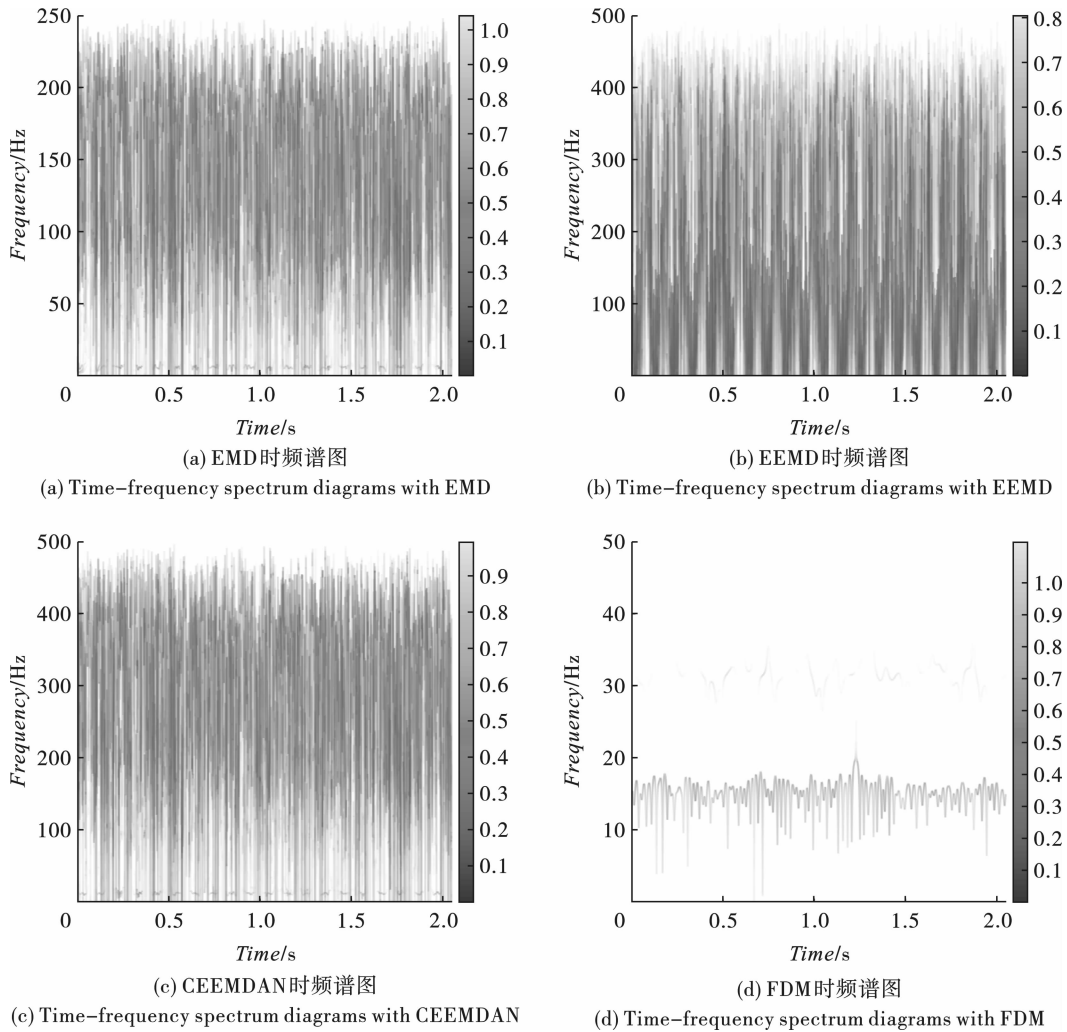


图4 不同分解方法时频谱图

Fig. 4 Time-frequency spectrum diagrams with different decomposition methods

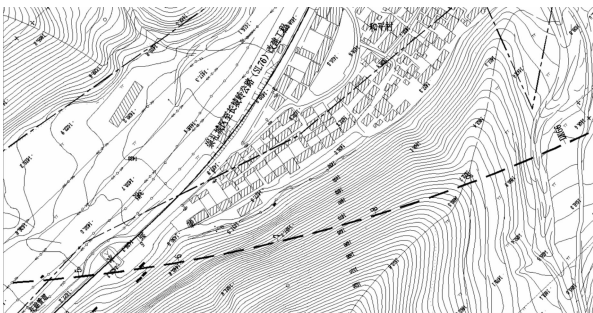


图5 崇礼隧道与村庄位置平面图

Fig. 5 Plan of Chongli Tunnel and village location



图6 测点布置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of measuring point layout

表3 爆破振动速度数据

Table 3 Blasting vibration velocity data

测点数据编号	峰值振动速度/(cm · s ⁻¹)		
	X方向	Y方向	Z方向
1	0.266	0.290	0.592
2	0.176	0.199	0.520
3	0.094	0.093	0.505
4	0.081	0.093	0.381
5	0.036	0.082	0.225

由表3可知本工程爆破振动对村庄的影响主要位于Z方向,选取Z方向爆破振动信号为研究对象。图7为某次爆破时采集到Z方向爆破振动信号,可以发现,受周围施工环境影响,爆破振动信号中含有高频噪声,对信号分析不利。

3.3 爆破振动信号时频分析

将实测信号进行FDM分解,由低频至高频得

39 个 FIBFs 和一个残余分量, 由于篇幅限制, 且爆破振动信号特征主要集中于中低频率带, 故展示分解所得中低频部分 10 个 FIBFs 如图 8 所示。

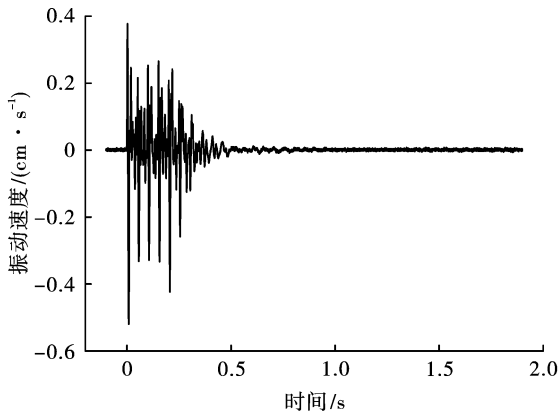


图 7 爆破振动信号波形图
Fig. 7 Blasting vibration signal waveform

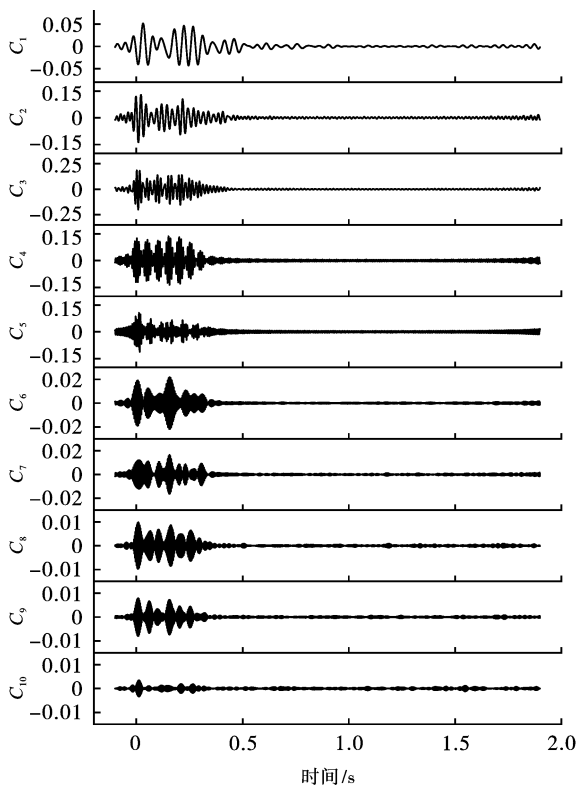


图 8 FDM 分解结果
Fig. 8 Decomposition result of FDM

利用 matlab 计算 FIBFs 与原始信号相关系数及其能量占比, 计算结果如表 4 所示。其余未展示 FIBFs 与原始信号相关系数均小于 0.02, 能量占比均小于 0.0005, 可认为其为高频噪声分量。

由相关系数与能量占比可得, $C_1 \sim C_5$ 与原始信号相关性较大, 且占有原始信号大部分能量, 可认为其为优势频带, 构成主要的爆破振动效应危害, 应对

其进行重点分析。将其重构如图 9 所示。重构后信号在保留信号局部细节特征的同时, 高频噪声分量被基本剔除。

表 4 FIBFs 与原始信号相关系数及其能量占比
Table 4 FIBFs energy ratio and correlation coefficient with the original signal

FIBFs	相关系数	能量占比
C_1	0.2258	0.0510
C_2	0.4506	0.2030
C_3	0.6288	0.3953
C_4	0.5085	0.2585
C_5	0.2879	0.0829
C_6	0.0643	0.0041
C_7	0.0476	0.0023
C_8	0.0292	0.0009
C_9	0.0223	0.0005
C_{10}	0.0088	0.0001

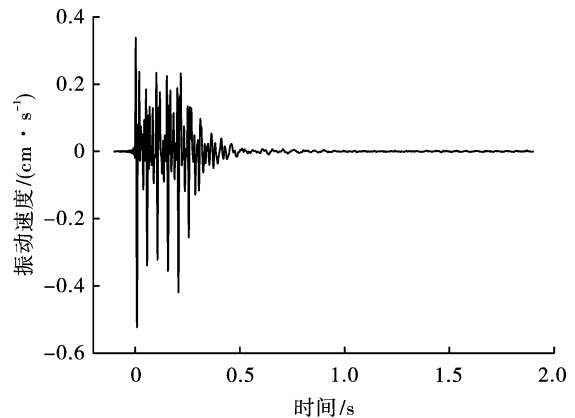


图 9 重构信号波形图
Fig. 9 Waveform of the reconstruct signal

对 $C_1 \sim C_5$ 模态分量进行 Hilbert 变换, 得到 Hilbert 谱, 分析其时间-频率-能量之间关系。时频谱如图 10 所示。

由图 10 可以发现, 基于 FDM 所得时频谱图在低频部分具有极高的分辨率, 有利于精确提取爆破振动信号细节特征。观察时频谱图可发现, 本工程爆破振动能量大部分位于 0 ~ 50 Hz 的低频段, 主要集中于 10 ~ 30 Hz 左右。同时, 可以发现, 此爆破能量最大值出现在 0.05 s 时刻, 为掏槽眼起爆时刻, 说明掏槽眼爆破产生能量较大。为降低爆破危害, 可采取降低掏槽眼药量、采用复式掏槽等合理的减震措施。

本工程为保护和平村房屋, 根据《爆破安全规程》GB6722—2014^[20], 属于保护对象为土窑洞、土坯房、毛石房屋的爆破工程。按爆破振动频率划分

安全标准,当振动频率小于 10 Hz 时,安全允许振动速度为 0.15~0.45 cm/s;当振动频率为 10~50 Hz 时,安全允许振动速度为 0.45~0.9 cm/s;当振动频率大于 50 Hz 时,安全允许振动速度为 0.9~1.5 cm/s。根据表 3 与图 8,可得爆破振动速度满足规范要求,且爆破振动所对应的低频部分振速均较低。

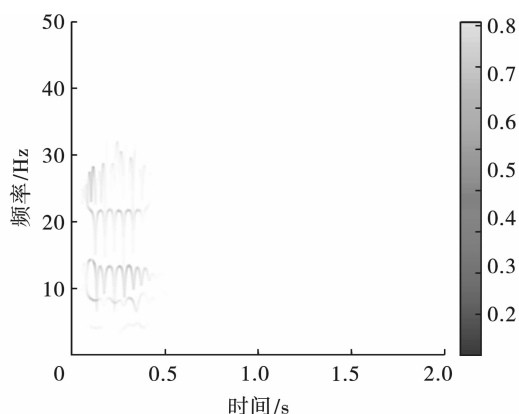


图 10 基于 FDM 的时频谱图

Fig. 10 Time-frequency spectrum diagrams based on FDM

一般地面建(构)筑物的自振频率为 10 Hz 左右,故此爆破工程可能会引发村庄房屋发生共振而产生破坏,需通过合理得降震增频措施来减少爆破振动产生影响,如通过降低单段药量、增加雷管段位、优化装药结构等来降低爆破振动强度。

综上,基于 FDM 得隧道爆破振动信号时频分析方法,解决了传统方法模态混叠问题与噪声残留问题,且可以精确获取爆破振动信号细节特征,而由 FDM 分解所得 FIBFs 经 Hilbert 变换所得时频谱图在时域与频域上都有着良好的分辨率,有利于爆破振动信号分析与爆破振动危害控制。

4 结论

依托太锡铁路太崇段新建崇礼隧道下穿和平村实际工程,引入一种基于 FDM 的隧道爆破振动信号时频分析方法,得到如下结论:

FDM 分解方法具有正交性、完备性、自适应性、局部性,无模态混叠现象与噪声残留问题。根据相关系数与能量占比选取 FIBFs 进行重构后可保留原始信号细节特征,且高频噪声被有效剔除,有利于进一步信号分析。

经 FDM 分解所得 FIBFs 经过筛选后进行 Hilbert 变换,所得时频谱在时域与频域均具有良好的分辨率,有利于对爆破振动信号细节特征进行精确分析。

基于实测信号的时频谱图分析可得,本工程爆破振速符合《爆破安全规程》GB6722—2014 安全要求,爆破振动能量主要位于 0~30 Hz 的低频部分,应重点关注村庄房屋共振问题。

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 non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1988, 454(1971): 903-995.
- [2] 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.
- [2] DENG Q L, ZHAO G Y. Denoising of blast vibration signal based on EEMD and Wavelet [J]. Blasting, 2015, 32(4): 33-38. (in Chinese)
- [3] 孙苗, 吴立, 袁青, 等. 基于 CEEMDAN 的爆破地震波信号时频分析 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 76-82.
- [3] SUN M, WU L, YUAN Q, et al. Time-frequency analysis of blasting seismic signal based on CEEMDAN [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(3): 76-82. (in Chinese)
- [4] 杨润强, 严鹏, 王高辉, 等. 地应力水平对深埋隧洞爆破振动频谱结构的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 118-129.
- [4] YANG R Q, YAN P, WANG G H, et al. Effect of in-situ stress level on frequency spectrum of blasting vibration in a deep-buried tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 118-129. (in Chinese)
- [5] 费鸿禄, 曾翔宇, 杨智广. 隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 77-83.
- [5] FEI H L, ZENG X Y, YANG Z G. Influence of tunnel excavation blasting vibration on earth's surface based on wavelet packet analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 77-83. (in Chinese)
- [6] 鲁超, 吴贤振, 刘建伟, 等. 基于小波与 EMD 的井下深孔爆破振动信号对比分析 [J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 84-90.
- [6] LU C, WU X Z, LIU J W, et al. Comparative analysis of vibration signals of deep hole blasting based on wavelet and EMD [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 84-90. (in Chinese)
- [7] 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.
- [7] WEI X, GAO W X, WANG L T, et al. Analysis and application research of blasting vibration signal of metro tunnel

- based on EEMD[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1293-1300. (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 [2020-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.03.20200803.1813.004.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 [2020-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.03.20200803.1813.004.html>. (in Chinese)
- [9] 林大超, 施惠基, 白春华, 等. 基于小波变换的爆破振动时频特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(1): 101-106.
- [9] LIN D C, SHI H J, BAI C H, et al. Time-frequency characteristic analysis of blasting vibration based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(1): 101-106. (in Chinese)
- [10] 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.
- [10] 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)
- [11] 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.
- [11] 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)
- [12] 付秀伟, 高兴泉. 基于傅里叶分解与奇异值差分谱的滚动轴承故障诊断方法[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 688-692.
- [12] FU X W, GAO X Q. Rolling bearing fault diagnosis based on FDM and singular value difference spectrum[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 688-692. (in Chinese)
- [13] 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.
- [13] 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)
- [14] SINGH P, JOSHI S D, PATNEY R K, 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.
- [15] 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.
- [15] 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)
- [16] HUANG N E, WU Z H. A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 1-23.
- [17] 张超, 陈建军. EEMD方法和EMD方法抗模态混叠对比研究[C]//中国振动工程学会故障诊断专业委员会. 第十二届全国设备故障诊断学术会议论文集, 中国振动工程学会, 2010: 4.
- [17] ZHANG C, HONG J J. Comparison of anti-modal aliasing between EEMD and EMD methods[C]// Fault Diagnosis Committee of China Society of Vibration Engineering. Proceedings of the 12th National Academic Conference on Equipment Fault Diagnosis, Chinese Society of Vibration Engineering, 2010: 4. (in Chinese)
- [18] 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.
- [18] LI H T. Research on blasting seismic effect based on energy principle[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese)
- [19] HUANG D, CUI S, LI X X. Wavelet packet analysis of blasting vibration signal of mountain tunnel[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117(117): 72-80.
- [20] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [20] GB 6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)