

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.022

基于 BLCS-AME 的爆破地震波信号 EMD 端点效应抑制研究*

吴静¹, 吴立², 孙苗³, 路亚妮¹, 韩燕华¹

(1. 湖北工程学院 土木工程学院, 孝感 432000; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074;

3. 湖北国土资源职业学院 环境与工程学院, 武汉 430090)

摘要: 针对爆破地震波信号经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)固有的端点效应问题,提出了一种基于边界局部特征尺度自适应匹配延拓(Boundary Local Characteristic Scale and Adaptive Matching Extension, BLCS-AME)的EMD端点效应抑制方法。该方法将原始信号全局时间参数之间的内在联系和信号在端点处幅值参数的局部变化趋势进行联合考虑,得到了延拓后的边界局部特征尺度(BLCS),再以BLCS为研究对象,在原始信号中找到与BLCS匹配度最高的一组时间序列,最后将该时间序列平移到端点处进行EMD,即可实现基于BLCS-AME的EMD端点效应抑制处理。通过多种方法仿真信号EMD端点效应抑制的对比分析,可得出结论:与常规端点效应抑制方法相比,BLCS-AME方法对EMD端点效应具有更好的抑制能力,能够得到精度更高的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),研究结果更能反映信号的内在属性。最后将该方法用于实际爆破地震波信号EMD中,进一步验证该方法能够有效抑制爆破地震波信号EMD过程中产生的端点效应,有利于爆破地震波信号细节特征参数的提取,得到反映爆破地震波信号内在属性的特征参数,对爆破地震波危害控制具有重要的现实意义。

关键词: 经验模态分解; 端点效应; 固有模态函数; 爆破地震波

中图分类号: O382 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0147-06

EMD Endpoint Effect Suppression of Blasting Seismic Wave Signal based on BLCS-AME

WU Jing¹, WU Li², SUN Miao³, LU Ya-ni¹, HAN Yan-hua¹

(1. Faculty of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Faculty of Environment and Engineering, Hubei Land Resources Vocational College, Wuhan 430090, China)

Abstract: Aiming at the inherent endpoint effect of Empirical Mode Decomposition(EMD) of blasting seismic wave signal, an EMD endpoint effect suppression method based on Boundary Local Characteristic Scale and Adaptive Matching Extension(BLCS-AME) is proposed. In this method, the internal relationship between the global time parameters of the original signal and the local variation trend of the amplitude parameters of the signal at the endpoint are considered together to obtain the extended Boundary Local Characteristic Scale(BLCS). Then, taking BLCS as the research object, a set of time series with the highest matching degree with the BLCS are found in the original signal. Finally, the time series are translated to the endpoint of the original signal for EMD, and the BLCS-AME based EMD endpoint effect suppression processing can be realized. Through the comparative analysis of EMD endpoint effect suppression of simulated signals by various methods, it can be concluded that compared with conventional endpoint effect suppression methods, the BLCS-AME method has better inhibition ability to suppress EMD endpoint effect, and inherent mode function(IMF) with higher accuracy can be obtained, which can better reflect the internal attributes of signals. Finally, the method is applied to the actual blasting seismic wave signal EMD, it can be found

that the method can effectively suppress the endpoint effect generated in the process of blasting seismic wave signal EMD, and it is beneficial to extract the detail characteristic parameters of blasting seismic wave signal and obtain the characteristic parameters reflecting the inherent properties of blasting seismic wave signal, which has important practical significance for blasting seismic hazard control.

Key words: empirical mode decomposition; endpoint effect; intrinsic mode function; blasting seismic wave

经验模态分解^[1] (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是一种根据爆破地震波信号本身特性进行分解的自适应算法, 在爆破地震波信号时频分析中得到了广泛的应用。解决爆破地震波信号在分解时产生的端点效应问题, 可有效提高 EMD 的分解精度^[2], 得到反映真实爆破特性的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)^[3]。

爆破地震波信号通过 EMD 得到 IMF 需要进行多次筛选, 筛选的本质是根据信号全部极大值点确定的上包络线, 和全部极小值点确定的下包络线计算信号的局部均值。但信号的端点不可能同时处于极大值或极小值, 且存在信号的端点不一定是极值点的情况, 因此上、下包络线在端点处会产生发散的现象, 使得 EMD 的结果失真^[4-6]。一维信号存在开始和结束节点; 二维图像存在边界, 无论是一维信号的开始和结束节点还是二维图形的边界, 在进行处理的时候都会受到影响, 因此可以说绝大多数算法都存在端点效应^[7]。为了缓解 EMD 固有的端点效应问题, 有学者们提出了极值延拓法^[8]、多项式拟合法以及端点镜像法等方法^[9,10], 上述方法多关注信号端点处的局部变化趋势, 欠缺对信号全局进行考虑; 也有学者提出考虑信号全局关联性而弱化信号端点变化趋势的方法^[11]。

针对以上研究现状, 本文提出了一种基于边界局部特征尺度自适应匹配延拓 (BLCS-AME) 的 EMD 端点效应抑制法, 该方法可同时考虑信号在端点处的局部变化趋势和原始信号本身的全局特性。该方法不仅能有效地抑制端点效应, 同时可实现信号特征参数的精确提取。

1 边界局部特征尺度自适应匹配延拓法

BLCS-AME 方法由两步组成: 第一步, 进行边界局部特征尺度延拓, 即考虑信号端点幅值变化趋势, 同时考虑信号全局时间和端点时间间隔的内在联系

对信号端点进行延拓; 第二步, 进行自适应匹配, 即将延拓好的局部特征尺度在信号全局找到与之匹配度最高的时间序列。

1.1 边界局部特征尺度延拓

信号的变化趋势在端点处和在信号内部均有体现, 信号全局时间和端点时间间隔之间存在内在联系。根据这种联系, 在信号左右端点各求出一个极大值点和极小值点对应的的时间参数, 将时间参数导入到由端点极大(小)值点建立的多项式中, 可求极大(小)值点对应的幅值参数。

(1) 边界局部特征尺度延拓时间参数

以信号左端点为例, 找到信号所有的极大值点发生的时刻, 记为 $t_{\max 1}, t_{\max 2}, \dots, t_{\max i} (i=1, 2, 3, \dots, M)$, 同理找到信号所有的极小值点发生的时刻, 记为 $t_{\min 1}, t_{\min 2}, \dots, t_{\min i} (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 。需要延拓的极大值点和极小值点的时刻分别记为 $t_{\max 0}$ 和 $t_{\min 0}$, 其计算分以下 4 种情况:

情况 1: $t_{\max 1} < t_{\min 1} \cap t_{\max M} < t_{\min N}, M = N, t_{\min 0}$ 和 $t_{\max 0}$ 求解分别见式(1)和式(2)。

$$t_{\min 0} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (t_{\max i+1} - t_{\min i})}{N-1} - t_{\max 1} \quad (1)$$

$$t_{\max 0} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{\min i} - t_{\max i})}{N} + t_{\min 0} \quad (2)$$

情况 2: $t_{\max 1} < t_{\min 1} \cap t_{\max M} > t_{\min N}, M = N + 1, t_{\max 0}$ 求解同式(2), $t_{\min 0}$ 求解见式(3)。

$$t_{\min 0} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{\max i+1} - t_{\min i})}{N} - t_{\max 1} \quad (3)$$

情况 3: $t_{\max 1} > t_{\min 1} \cap t_{\max M} > t_{\min N}, M = N, t_{\max 0}$ 和 $t_{\min 0}$ 求解分别见式(4)和式(5)。

$$t_{\max 0} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (t_{\min i+1} - t_{\max i})}{N-1} - t_{\min 1} \quad (4)$$

$$t_{\min 0} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{\max i} - t_{\min i})}{N} + t_{\max 0} \quad (5)$$

情况 4: $t_{\max 1} > t_{\min 1} \cap t_{\max M} < t_{\min N}, M = N - 1, t_{\max 0}$ 求解同式(4), $t_{\min 0}$ 求解见式(6)。

收稿日期: 2022-01-20

作者简介: 吴静(1985-), 女, 副教授、博士, 主要从事土木工程防灾减灾方面的研究, (E-mail) wujinglalar@163.com。

通讯作者: 吴立(1963-), 男, 教授、博士生导师, 从事工程爆破和地下建筑工程理论技术研究, (E-mail) lwu@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672260, 41907259); 湖北省教育厅中青年人才项目(Q20202701)

$$t_{\min 0} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (t_{\max i} - t_{\min i})}{N-1} + t_{\max 0} \quad (6)$$

(2) 边界局部特征尺度延拓幅值参数

以信号左端点为例,找到全局信号中所有的极大值点发生时刻所对应的幅值,记为 $x_{\max 1}, x_{\max 2}, \dots, x_{\max i} (i=1, 2, 3 \dots M)$,同理找到全局信号中所有的极小值点发生时刻所对应的幅值,记为 $x_{\min 1}, x_{\min 2}, \dots, x_{\min i} (i=1, 2, 3 \dots N)$,根据端点附近幅值变化趋势延拓出左端点附近的一个极值极大值点和一个极小值点。

边界局部特征尺度延拓具体步骤如下:

第一步:在信号的左端点附近,取最靠近左端点的 a 个极值点,即 $x_{\max 1}, x_{\max 2}, x_{\max 3}, \dots, x_{\max a}$, a 的取值和样本容量有关;

第二步:对所取出的 $x_{\max 1}, x_{\max 2}, x_{\max 3}, \dots, x_{\max a}$ 拟合出多项式,带入 $t_{\max 0}$ 求出 $x_{\max 0}$,实现左端点极大值延拓,即 $(t_{\max 0}, x_{\max 0})$ 。

同上,可以实现左端点极小值点延拓,即 $(t_{\min 0}, x_{\min 0})$ 。

1.2 自适应匹配延拓

信号的变化趋势在端点和信号内部均有体现,因此在信号内部寻找一段和边界局部特征尺度延拓结果匹配度最高的曲线是能够实现的。

自适应匹配延拓具体步骤如下:

第一步:取 1.1 节得到左端点延拓结果 $(t_{\max 0}, x_{\max 0})$ 和 $(t_{\min 0}, x_{\min 0})$,以及与其最靠近的两对极大(小)值点,即 $(t_{\max 1}, x_{\max 1})$ 、 $(t_{\min 1}, x_{\min 1})$ 和 $(t_{\max 2}, x_{\max 2})$ 和 $(t_{\min 2}, x_{\min 2})$,一共包括 6 个极值点的一段时间序列,记做 l_0 ,其包含 k 个采样点;

第二步:将原始信号分成 n 个采样点数为 k 的时间序列,记做 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$;

第三步:计算 n 个时间序列的自适应匹配系数(Adaptive matching, ξ_{am}), ξ_{am} 计算见式(7)。其中, $A = \max \{x_{\max 0}, x_{\max 1}, x_{\max 2}\}$, $B = \max \{x_{\min 0}, x_{\min 1}, x_{\min 2}\}$ 。

$$\xi_{am} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (l_0 - l_i)^2}{k}} \quad (7)$$

第四步:筛选出一个和 l_0 匹配度最高的 $l_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 。求自适应匹配系数 ξ_{am} 的最小值 $\xi_{am \min} = \min \{\xi_{am1}, \xi_{am2}, \xi_{am3}, \dots, \xi_{amn}\}$ 。 $\xi_{am \min}$ 所对应的 l_i 即为所求。

第五步:将和 l_0 匹配度最高的时间序列 l_i 平移到 l_0 的位置,进行 EMD。

2 仿真信号多种端点效应抑制方法对比研究

采用仿真信号进行多种 EMD 端点效应抑制对

比研究,再结合 EMD 得到的 IMF 和原始信号之间的相关系数和误差标准差进行 EMD 端点效益抑制评价。

仿真信号 $S(t)$ 由频率为 10 Hz、30 Hz、60 Hz 的 3 个正弦信号组成,即 $S(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t)$,其中: $x_1(t) = \sin(2 \times \pi \times 10 \times t)$; $x_2(t) = \sin(2 \times \pi \times 30 \times t)$; $x_3(t) = \sin(2 \times \pi \times 60 \times t)$ 。采样点 $N = 200$,采样时间 t 分别取 $0, \pi/100, 2\pi/100, 3\pi/100, \dots, \pi$,即在 $[0, 2\pi]$ 上,中间以 $\pi/100$ 为间距取点,仿真信号如图 1(a) 所示。

对 $S(t)$ 进行未采取端点效应抑制措施的 EMD,得到的 IMF 如图 1(b),可发现 IMF_1 、 IMF_2 和 IMF_3 分量的两端都出现了不同程度的发散,随着分解的进行 IMF_3 的发散最严重,并有向数据内部发展的趋势。采用边界局部特征尺度自适应匹配延拓法、极值延拓法、多项式拟合法得到的分解结果分别见图 1(c)、图 1(d)、图 1(e),考虑到图片的分辨率以及清晰度问题,这里仅展示不同端点效应抑制方法得到的 IMF 在左端点处的变化趋势。

进一步计算分量 and 对应正弦信号之间的相关系数(r_{xy})和误差标准差(D_{sde}),计算公式见式(8)和式(9)。式中, N 为采样点数, x 对应 $x_1(t)$, $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$, y 对应 IMF_1 、 IMF_2 和 IMF_3 。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^3 [x_k^i(t) - x^-(t)][y_k^i(t) - y^-(t)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^3 [x_k^i(t) - x^-(t)]^2 [y_k^i(t) - y^-(t)]^2}} \quad (8)$$

$$D_{sde} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^3 [x_k^i(t) - y_k^i(t)] \right\}^2}{N}} \quad (9)$$

边界局部特征尺度自适应匹配延拓法、极值延拓法、多项式拟合法的相关系数(r_{xy})和误差标准差(D_{sde})的计算结果见表 1。

表 1 端点效应抑制方法的评价指标

Table 1 Evaluation index of endpoint effect suppression method

评价指标	边界局部特征尺度 自适应匹配延拓法	极值 延拓法	多项式 拟合法
r_{xy}			
$IMF1$	0.9981	0.8969	0.8084
$IMF2$	0.9979	0.9384	0.7603
$IMF3$	0.9926	0.6837	0.6051
D_{sde}			
$IMF1$	0.0081	0.2095	0.2438
$IMF2$	0.0078	0.1563	0.2763
$IMF3$	0.0091	0.3319	0.3919

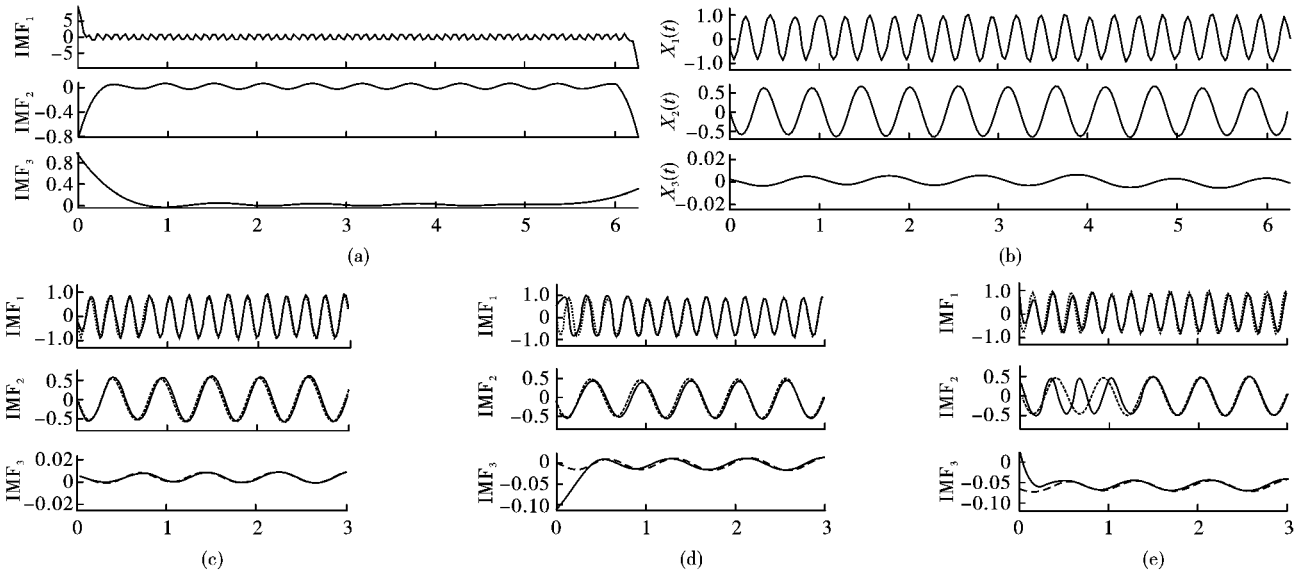


图1 仿真信号分解结果

Fig. 1 Simulation signal decomposition results

由图1和表1可知,边界局部特征尺度自适应匹配延拓法得到的3个IMF分量反映了仿真信号所包含的3个正弦信号,与对应正弦信号之间相关性最高、误差最小。即边界局部特征尺度自适应匹配延拓法得到的IMF精度最高,对EMD端点效应的抑制效果最好;极值延拓法的效果略优于多项式拟合法,尤其是对低频分量的抑制。

综上所述得出结论:边界局部特征尺度自适应匹配延拓法(BLCS-AME)对EMD端点效应具有较好的抑制能力,能够得到高精度的IMF。

3 爆破地震波信号EMD端点效应抑制应用

3.1 工程背景

工程爆破的发展极大提高了工作效率,给我国基础设施工程建设带来巨大的便利,但其产生的地震效应对周边建筑物、构筑物及周围环境的影响也日益突出^[12-14],特别是在城市进行的爆破施工,其影响更为显著。以湖北某水下钻孔爆破工程为对象,研究BLCS-AME方法在爆破地震波信号EMD端点效应抑制中的应用,得到反映爆破地震波真实属性的IMF,分析爆破产生的地震效应对爆破区周边建筑物的影响。

某爆破区施工环境图如图2所示,爆破区位于水下10~15 m,位于某城市道路交叉口附近,其中,主路距离爆破区150~180 m,辅路距离爆破区240~280 m,在爆破区与辅路之间距离爆破区100~120 m处有一栋地上7层地下1层花园洋房。为了

对控制爆破地震波的有害效应提供依据,开展了现场爆破振动监测,将花园洋房作为本次爆破施工重点监控对象。

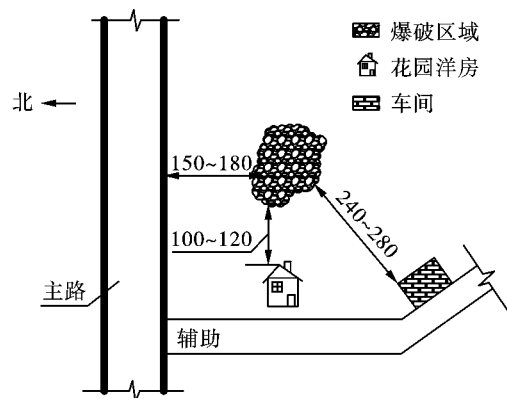


图2 爆破施工环境图(单位:m)

Fig. 2 Blasting construction environment (unit: m)

3.2 监测结果及分析

现场爆破采用TC-4850型爆破测振仪对该楼栋进行监测,设置的信号采样频率为4000 sps。选取一条典型爆破振动信号曲线作为研究对象,如图3所示,测试时间为1.8 s。根据奈奎斯特采样定理,实测爆破地震波信号的奈奎斯特频率值为2000 Hz,共包括4096个采样点。

对图3所示信号进行基于边界局部特征尺度自适应匹配延拓法的EMD分解,分解结果见图4(a),由图4(a)可知,仅 IMF_4 的右端点处出现了轻微的发散现象,其余分量的端点效应都得到了很好的控制。

基于边界局部特征尺度自适应匹配延拓法得到

的IMF,经过Hilbert变换,进一步分析求出每个IMF的边际谱,如图4(b)所示,由图4(b)可知,基于边界局部特征尺度自适应匹配延拓法的EMD分解得到的IMF从高频到低频依次排列,每个IMF都携带爆破地震波信号一组特定的频率信号。

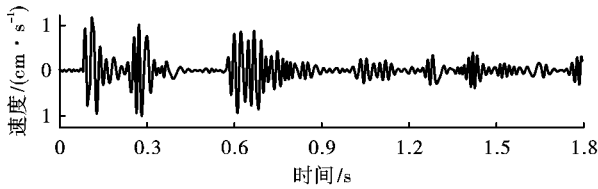


图3 地震波监测信号

Fig. 3 Seismic wave monitoring signal

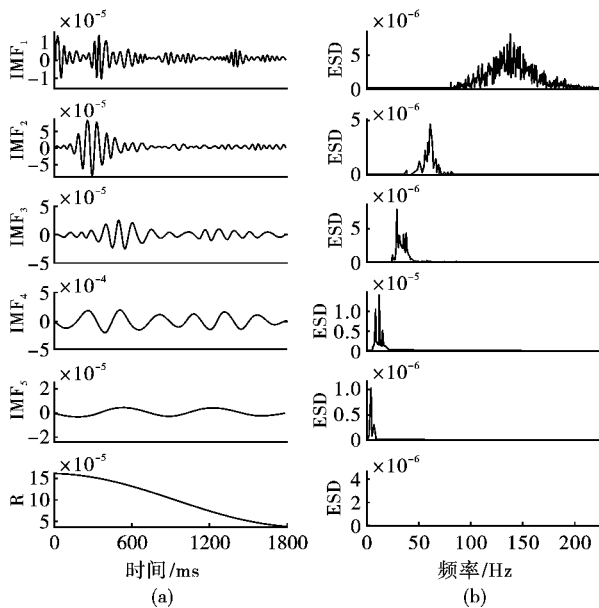


图4 地震波监测信号分解图

Fig. 4 Decomposition diagram of seismic wave monitoring signal

进一步计算,得到如图5所示的信号总边际谱,其纵坐标ESD为能量谱密度(Energy spectral density,

ESD),由图5可知水下钻孔爆破地震波能量主要集中在0~50 Hz,这与文献[15,16]得出的结论一致。信号的主频为最大能量密度对应的频率^[17],因此本信号主频为14.286 Hz。

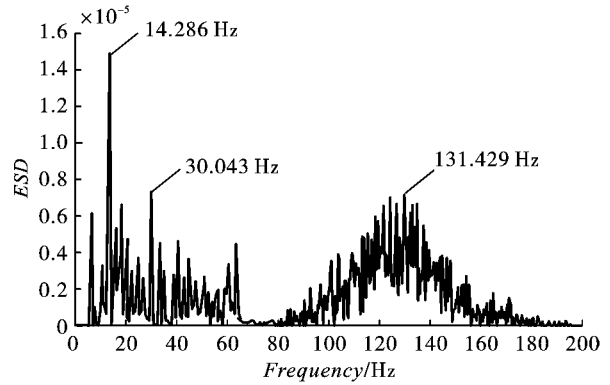


图5 信号的总边际谱

Fig. 5 Marginal spectrum of signal

3.3 数值模拟分析

通过有限元软件对该洋房进行建模分析,得到洋房的三维模型图如图6所示,并计算该洋房的自振频率。该洋房前8阶阵型对应的自振频率见表2。

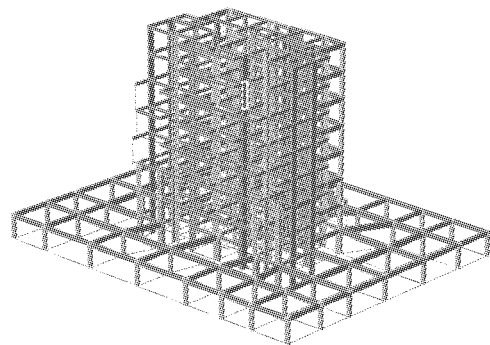


图6 洋房三维模型图

Fig. 6 Three-dimensional model of western style house

表2 洋房前8阶阵型对应的自振频率(单位:Hz)

Table 2 Natural frequencies corresponding to the first 8 formations of western style houses (unit: Hz)

阵型	自振频率	阵型	自振频率	阵型	自振频率	阵型	自振频率
1	8.234	3	18.806	5	29.920	7	42.714
2	13.806	4	25.023	6	32.156	8	44.976

由表2可见该洋房的第2阶阵型与本次爆破信号主频十分接近。该结果表明,本工程若继续采用目前的爆破参数,产生的爆破地震波极有可能引起该洋房共振,实际施工中必须采取相应控制措施才能保证该洋房的安全。

上述案例分析结果证明:本文提出的边界局部特征尺度自适应匹配延拓法,不仅有助于抑制EMD

产生的端点效应,得到蕴含爆破地震波特征参数的高精度IMF分量,而且有助于进一步识别爆破地震波效应,实现爆破地震波危害控制。

4 结论

(1)边界局部特征尺度自适应匹配延拓法(BLCS-AME)不仅考虑了信号在端点处的局部变化

趋势,同时通过波形匹配保留了信号原始波形的整体特征,是一种更具自适应性的EMD端点效应抑制算法。

(2)对比分析边界局部特征尺度自适应匹配延拓法(BLCS-AME)和其他常规端点效应抑制方法对仿真信号的分解结果,发现BLCS-AME能够在有效抑制EMD端点效应的基础上,实现仿真信号细节特征参数的提取,得到精度更高的IMF。

(3)基于边界局部特征尺度自适应匹配延拓法(BLCS-AME)得到的IMF经过Hilbert变换得到的边际谱,可有效提取爆破地震波所蕴含的频率-能量信息,该信息有助于爆破振动特征的识别,为科学制定抗震措施提供依据。

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 of London, 1998, 454(3): 903-995.
- [2] 孙 苗. 爆破地震波信号处理HHT改进算法及应用研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2021.
- [2] SUN Miao. Improved HHT algorithm for blasting seismic wave signal processing and its application[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2021. (in Chinese)
- [3] TIANLU M, ZENGLI L, ZHI Z. Inhibition of envelope correction method to EMD end effect[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 347-350: 3940-3944.
- [4] 孙浩然, 岳建平. 一种抑制边界效应的EMD方法及其在滑坡监测中的应用[J]. 测绘通报, 2021(5): 77-80. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0146.
- [4] SUN Hao-ran, YUE Jian-ping. An EMD method to suppress boundary effect and its application in landslide monitoring [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 77-80. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0146. (in Chinese)
- [5] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [6] QING, WENLONG, ZHANG, et al. Improved method and application of EMD endpoint continuation processing for blasting vibration signals [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2019(3): 428-436.
- [7] 付晓强, 俞 缙, 崔秀琴, 等. 爆破振动信号3种经验模态分解差异性研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(3): 21-28. DOI:10.19931/j.EB.20200145.
- [7] FU Xiao-qiang, YU Jin, CUI Xiu-qin, et al. Study on difference of three empirical mode decomposition of blasting vibration signal [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(3): 21-28. DOI:10.19931/j.EB.20200145. (in Chinese)
- [8] 沈 路, 周晓军, 张志刚, 等. Hilbert-Huang变换中的一种端点延拓方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(8): 168-168.
- [8] SHEN Lu, ZHOU Xiao-jun, ZHANG Zhi-gang, et al. Boundary-extension method in Hilbert-Huang transform [J]. Vibration and shock, 2009, 28(8): 168-171. (in Chinese)
- [9] 刘慧婷, 张 旻, 程家兴. 基于多项式拟合算法的EMD端点问题的处理[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(16): 84-86, 100.
- [9] LIU Hui-ting, ZHANG Min, CHENG Jia-xing. Dealing with the end issue of EMD based on polynomial fitting algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(16): 84-86. (in Chinese)
- [10] 郭 迪, 沈洋洋, 尹 兵. 经验模式分解端点效应抑制方法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(3): 89-92.
- [10] GUO Di, SHEN Yang-yang, YIN Bing. Research on method for end effects reduction of empirical mode decomposition [J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(3): 89-92. (in Chinese)
- [11] JIANFENG Y, GEGE S, TIANQI Z, et al. Waveform extension method based on similarity sequential detection for the end effects reduction of EMD [J]. journal of vibration and shock, 2018, 37(18): 121-125.
- [12] 徐 洋, 谢全民, 梅 比, 等. 远程测振系统在群楼拆除爆破振动监测中的应用[J]. 工程爆破, 2019, 25(6): 80-84.
- [12] XU Yang, XIE Quan-min, MEI Bi, et al. Application of remote vibration measurement system in blasting vibration monitoring of group building demolition [D]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 80-84. (in Chinese)
- [13] 田 园, 董英健. 地下巷道在爆破振动作用下的动态响应特征研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(6): 60-64.
- [13] TIAN Yuan, DONG Ying-jian. Dynamic response characteristics of underground roadway under blasting vibration [J]. Explosive Materials, 2019, 48(6): 60-64. (in Chinese)
- [14] 任少峰, 严鸿海, 张义平, 等. 某露天矿含水炮孔爆破危害效应控制试验研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 55-59, 79.
- [14] REN Shao-feng, YAN Hong-hai, ZHANG Yi-ping, et al. Experimental study on hazard control of water hole blasting in open-pit mine [J]. Blasting, 2018, 35(3): 55-59, 79. (in Chinese)