

中文引用格式:付晓强,戴良玉,俞缙,等.气爆破岩振动信号优化分解与相关特征分析[J].中国安全科学学报,2025,35(5):64-72.

英文引用格式:FU Xiaoqiang, DAI Liangyu, YU Jin, et al. Optimization decomposition and related feature analysis of rock vibration signals in gas blasting [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 64-72.

气爆破岩振动信号优化分解与相关特征分析*

付晓强^{1,2,3}教授,戴良玉²高级工程师,俞缙³教授,邵艺强⁴

(1 三明学院 建筑工程学院,福建 三明 365004; 2 三明科飞产气新材料股份有限公司, 福建 三明 365500; 3 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 4 福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1493

基金项目:福建省自然科学基金联合资助(2024J01905)。

【摘要】为解决变分模态分解过程中模态数和二次惩罚因子难以确定的问题,提出灰狼优化-变分模态分解(GWO-VMD)算法。以龙龙隧道气爆法施工为依托,采用集成化采集模块采集气爆破岩过程中振动信号,利用相空间重构递归图(RP)相似度模型准确判别信号GWO-VMD主分量;重构得到去除干扰项的真实信号,揭示气爆信号能量在时频域的分布特征,并量化数码电子雷管精度误差。结果表明:与传统的变分模态算法相比,GWO-VMD算法在气爆破岩信号信噪比提升和自适应相关特征提取方面具有显著优势,具有很强的时变频率追踪性能,能够准确识别数码雷管起爆精度,有效识别隧道爆破雷管灾害源特征。

【关键词】 气爆破岩; 振动信号; 优化分解; 相关特征; 递归图; 灰狼优化-变分模态分解 (GWO-VMD)

Optimization decomposition and related feature analysis of rock vibration signals in gas blasting

FU Xiaoqiang^{1,2,3}, DAI Liangyu², YU Jin³, SHAO Yiqiang⁴

(1 College of Architecture and Civil Engineering, Sanming University, Sanming Fujian 365004, China; 2 Sanming Coffer Fine Chemical Industrial Co., Ltd., Sanming Fujian 365500, China; 3 Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China; 4 College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficulty in determining the number of modes and quadratic penalty factors in the process of variational mode decomposition, a GWO-VMD algorithm was proposed. Based on the Longlong Tunnel gas explosion method construction, an integrated acquisition module was used to collect vibration signals during the rock-breaking process. The phase space reconstruction recursive graph (RP) similarity model was used to accurately distinguish the GWO-VMD principal components of the signals. The real signal with interference removed was reconstructed, revealing the distribution characteristics of the energy of the gas explosion signal in the time-frequency domain, and quantifying the accuracy error of the digital electronic detonator. The results show that compared with traditional

variational mode algorithms, the GWO-VMD algorithm has significant advantages in improving the signal-to-noise ratio and adaptive feature extraction of gas explosion signals, and has strong time-varying frequency tracking performance. It can accurately identify the detonation accuracy of digital detonators and effectively identify the related of tunnel-blasting detonator disaster sources.

Keywords: gas rock breaking; vibration signal; optimize decomposition; related features; recurrence plot; grey wolf optimizer-variational mode decomposition (GWO-VMD)

0 引言

目前,爆破振动信号监测作为评价爆破效果和灾害效应的最有效手段受到广泛关注^[1-2]。对于爆破振动信号的处理常采用方法有:傅里叶变换(Fourier Transform, FT)、小波变换(Wavelet Transform, WT)、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)等,其中,EMD能够自适应处理非平稳信号,不存在如小波基选取等问题,并成功用于爆破振动信号分析领域。但其分解得到的分量易出现模态混叠,VMD能够有效处理非线性和非平稳信号,通过调制变分模型的频率中心和带宽,实现信号各分量的有效分离和频域分割。与EMD相比,可更好地避免模态混叠和端点效应等问题。

许多学者将VMD算法应用于爆破振动信号处理过程中,如杨建华等^[3]分离了典型深埋洞室爆破开挖产生的爆炸地震波和诱发地震波,并验证了其可靠性,在此基础上研究了爆炸地震波和诱发地震波的频率特性及振速衰减相关特征;贾贝等^[4]针对EMD算法中存在的模态混叠和识别精度低的缺陷,通过3种方法对比分析了爆破所用雷管延期时间识别结果,验证了VMD算法在短延时爆破识别中的优势;彭亚雄等^[5]针对测试环境引起的干扰,提出基于VMD算法的信号光滑降噪模型,获得了更为真实的爆破振动相关特征。然而,VMD算法运用中很难基于经验知识选择合适的分解层数 K 和惩罚因子 α 。若 K 太大,会生成伪分量,从而增加计算量。反之,则发生欠分解,并且对具有小波动的信号不敏感。 α 对模态分量的带宽也有很大影响。 α 越小,模式带宽越大;反之亦然。因此,优化VMD算法中参数成为决定分析精度的关键。如彭亚雄等^[6]为有效降低实测爆破信号的噪声成分,提出基于自适应VMD-MPE算法的矿山爆破信号降噪方法,并验证了算法的有效性;梁尔祝等^[7]针对VMD算法预设参数选择问题,提出基于模拟退火遗传算法模糊熵的VMD参数优化算法,对爆破信号具有

良好的适用性。近年来,环保型的气爆破岩技术受到更为广泛的关注,由于气爆测试环境的复杂性和破岩参数的差异性,采用优化VMD算法提取气爆破岩信号相关特征还未见报道。

鉴于此,笔者拟提出一种基于灰狼优化-VMD(Grey Wolf Optimization-VMD, GWO-VMD)算法,通过优化参数 K 和 α ,分解气爆破岩信号,获得更为真实的分量信号相关特征,并根据各分量递归图(Recurrence Plot, RP)谱确定关键主分量,实现气体破岩信号精细化重构过程,精确识别出隧道爆破网络中数码电子雷管延期精度,以期对气体破岩信号的相关特征提取和雷管灾害辨识提供量化分析手段。

1 基于GWO算法参数优化

1.1 参数优化过程

关于GWO和VMD算法的详细介绍见文献[8-11],此处不再赘述。采用GWO算法同时搜索VMD分解参数 $[K, \alpha]$ 最优值具体过程为:

1) 参数初始化。初始化狼群的大小及相关参数,最大迭代步长, K 和 α 的上、下限值。

2) 定义和计算适应度函数。为确保GWO-VMD分解后的重构信号能够最大程度保留信号特征信息,同时尽可能多地消除噪声,通过使用排列熵和峭度构建适应度函数,以最小化重构误差,适应度函数具体为:

$$f_n = -k_u + H_p \quad (1)$$

式中: f_n 为适应度函数; k_u 为峭度; H_p 为排列熵。

3) 更新狼群及参数。计算每只狼的适应度值后,使用算法相关规则更新狼群及参数。

4) 重新计算狼群的适应度。重新计算每只狼的适应度值,若更新值小于旧值,则比较新值与先前值,保持狼的最新位置,并用新值替换先前值;否则保持先前的适应度。

5) 终止条件判断。确定是否达到最大迭代;如不满足,则返回步骤2);否则,停止迭代并返回 $[K, \alpha]$ 的最优值。

1.2 仿真信号分析

为验证 GWO-VMD 算法的有效性,建立具有多个中心频率的仿真信号,其具体表达式为:

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} x_1 = 10\cos(2\pi f_1 t + 1.0) \\ x_2 = 10\cos(2\pi f_2 t + 1.5) \\ x_3 = 10\cos(2\pi f_3 t + 2.0) \\ x_4 = 10\cos(2\pi f_4 t + 3.5) \end{cases}, t \in [0, 1] \quad (3)$$

式中: x 为仿真信号; $x_1 \sim x_4$ 为各组分信号; $f_1 \sim f_4$ 为子信号对应中心频率,分别为 10、50、120 和 170 Hz; t 为采样时间。仿真信号波形如图 1 所示。

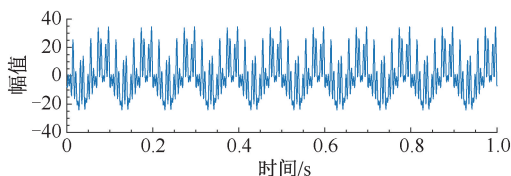


图 1 仿真信号波形

Fig. 1 Simulated signal waveform

根据仿真信号子波数量,适当扩大搜索范围,分解时设定 K 值为 $[2, 6]$, α 通常为信号采样点数的 1~2 倍,确定为 $[1\ 024, 2\ 048]$,将信号输入 GWO-VMD 计算模型,优化分解结果如图 2 所示。

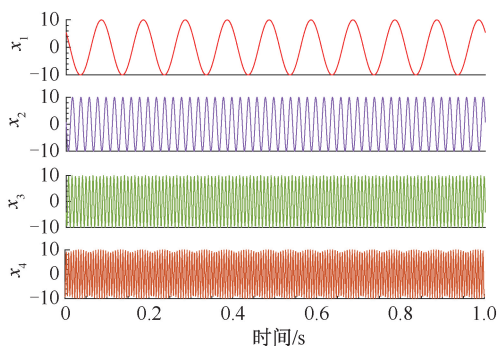


图 2 GWO-VMD 优化分解结果

Fig. 2 Results of GWO-VMD Decomposition

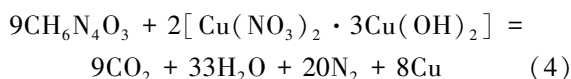
由图 2 可知:仿真信号经 GWO-VMD 分解后得到 4 阶固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 分量,其分别对应子信号 $x_1 \sim x_4$ 。从分解结果可知:各 IMF 分量在端点均未出现较大的扰动,仿真信号按照频率由低到高依次分解,幅值均介于 $[-10, 10]$,子信号周期分别为 0.1、0.02、0.008 和 0.006 s,与式(3)中幅值和频率设定一一对应,未出现因能量泄漏而引起的幅值衰减和模态混叠效应,有效避免了常规 VMD

分解中相关参数人为确定的缺陷,分解效果理想。

2 气爆破岩振动信号分析优化分解分析

2.1 新型破岩气体发生器

新型破岩气体发生器主要由产气筒、引发器和点火器 3 部分组成,如图 3 所示。产气剂配方主要组份为汽车安全气囊专用超细硝酸胍、纳米体碱式硝酸铜(非危化品),占比约为 80%,其他组份是黏合剂和 2%硝酸钾,其主体反应方程式为:



式中: $\text{CH}_6\text{N}_4\text{O}_3$ 为可燃剂; $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 为氧化剂。黏合剂作用是在反应过程中保持气体发生剂形状和防止其破裂,硝酸钾为燃速调节剂,同时对反应氧平衡也有积极作用,反应产生无污染、无害气体。



图 3 新型破岩气体发生器组件

Fig. 3 New type rock breaking gas generator assembly

产品 3 个部件在生产、运输、存储环节处于分离状态,使用时现场组装。产气筒壳体为聚氯乙烯管,管径为 32~75 mm,长度为 20~100 cm,厚度 1~3 mm,内装 200~2 000 g 产气药剂,两端由密封端盖加密封圈进行密封。引发器由管盖、引发管、引燃药和输入管盖组成,使用时将引发器由产气管的引发端所预留的中间通道孔内插入,由产气管内的预留管道固定;根据外管直径的大小和长度来设定引发器的长度,内装 6~50 g 的引燃药。点火器由启动管、引燃药、数码芯片电点火头及安全机构组成,引燃药(点传火药)药量 0.2~0.8 g,使用时将点火器由产气管的引发端所预留的中间通道孔内插入,并与产气管上的端盖固定。整个点火能量呈指数递增,在引燃管界面点燃产气药,形成由“点到面”的点火过程。主要性能指标为:①摩擦感度,在 95% 置信度下,50 发 0% 爆炸百分数置信区间 $(0, 7)$;②撞击感度,能量 $E > 2\text{ J}$;③爆破噪声,4 类声环境功能区(昼间) $\leq 120\text{ dB}$;④空气冲击波,对不设防的非作业人员 $\leq 0.02 \times 10^5\text{ Pa}$,掩体中的作业人员 $\leq 0.1 \times 10^5\text{ Pa}$;⑤最小发火电流,钝感型 $\leq 1.00\text{ A}$ 。

部件运输和储存时,管内气体发生剂均为非压

力约束状态,极大提高了安全性。点火器内含数码芯片,需要经过专用解码器云端进行定位解码和启动解码才能启动,产品结构如图 4 所示。

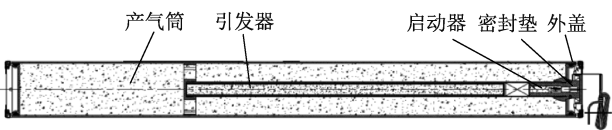


图 4 产品结构

Fig. 4 Sectional view of product structure

组装部件施工作业无最低压限制,自动适应岩石强度。在岩石孔洞内密闭环境下,点燃后逐步升压至超过岩石强度时,岩石被致裂,产气剂燃烧反应终止,有效降低破岩有害效应。

2.2 工程概况

龙龙铁路是一条连接福建省与广东省的高速铁路,全长约 92.6 km,桥梁、隧道众多,占线路总长的 82.94%。其中,隧道工程 22 座,共 30.73 km。

相见岭隧道试验段围岩等级为 V 类,采用破岩气体发生器致裂时,先要确保掏槽孔起爆形成临空面,在外围设置辅助孔起爆形成扩槽区,再采用小剂量对周边孔实施光面致裂。其中,掏槽和辅助孔采用直径 $\varphi 75\text{ mm}$ 、产气药剂量为 1.8 kg 的大药量产气筒,周边孔采用直径 $\varphi 32\text{ mm}$ 、药剂量为 0.2 kg 的小药量产气筒,以降低对围岩的损伤。最终致裂孔布置如图 5 所示,具体致裂管装填参数见表 1。

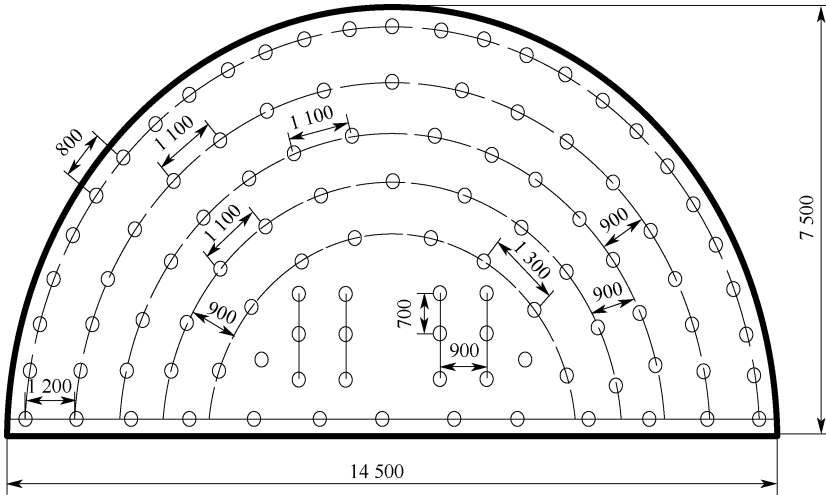


图 5 致裂孔布置

Fig. 5 Fracturing holes layout

表 1 致裂装填参数

Table 1 Charge parameters of fracturing

序号	孔位孔名	孔数	单支药量/kg	单孔药量/kg	炮孔角度/(°)	炮孔深度/m	单段药量/kg	延期时间/ms	药径/mm
1	掏槽孔①	6	1.8	3.6	65	2.97	21.6	0	75
2	掏槽孔②	6	1.8	3.6	75	3.00	21.6	50	
3	辅助孔①	9	1.8	1.8	90	2.50	16.2	100	
4	辅助孔②	11	1.8	1.8	90	2.50	19.8	200	
5	辅助孔③	14	1.8	1.8	90	2.50	25.2	300	
6	辅助孔④	17	0.6	1.8	90	2.50	30.6	400	32
7	周边孔	27	0.6	0.6	90	2.50	16.2	500	
8	底孔	11	1.8	1.8	90	2.50	19.8	600	
合计		101	—				171	—	—

破岩发生器燃放后,断面基本被整体推进,最终实际进尺为 2.3 m,部分达到 2.7 m,成型效果较好,半孔率超过 70%。超欠挖量均控制在 $\pm 10\text{ cm}$ 范围内。致裂后偶见大块但均可满足铲运要求。

为克服传统“随测随走”测试方法的缺陷,采用

集成化监测方法,定制专用防护箱和防爆锂电池组,将主机及相关配套组件集成化地固定在防护箱内,通过膨胀螺钉将防护箱固定在围岩表面,测振传感器通过螺栓固定在角铁所在的测振平台处并调整至水平,连接导线通过波纹管防护,同时将其探头布置

在防护箱的背爆侧,避免爆破飞石对测试模块的破坏。测振单元具体布置如图 6 所示。

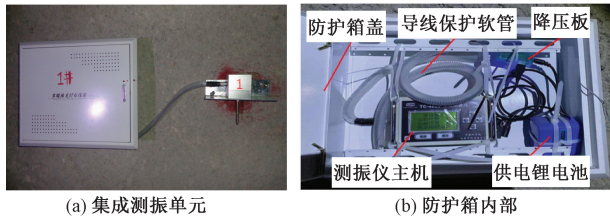


图 6 隧道内测点布置

Fig. 6 Layout of measuring points in the tunnel

测试时,将 x 向(径向)指向隧道掘进水平中轴线, y 向(切向)指向与中轴线垂直的水平方向, z 向(垂向)指向与 xy 所构成平面垂直的竖向,便可采集得到相互垂直的 3 个方向上的振动信息。为满足 Heisenberg 测不准原理的要求,测试时设定采样频率为 2 kHz,时长 1 s。三向振速波形如图 7 所示。其中, x 向信号峰值振速为 0.90 cm/s, y 向为 0.68 cm/s, z 向为 0.65 cm/s,三向振速波形具有显著差异,且总体呈现 x 向 $>y$ 向 $>z$ 向的特征,很大程度上是由于 x 向与岩体爆破抛掷方向一致引起的。隧道气体破岩三向振动主振波形持续时间主要集中在

0~0.7 s 时域范围内,随后逐渐衰减至零点附近,验证了测试方法的可行性和数据采集的有效性。

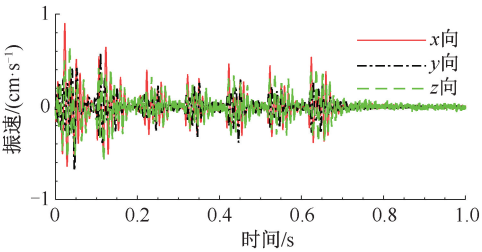


图 7 气爆破岩振动波形曲线

Fig. 7 Vibration waveform of gas rock breaking

2.3 气爆破岩振动信号优化分解过程与结果

对比可知: z 向信号包含明显噪声,对后续分析影响较大,因此,选取 z 向信号作为分析对象。为获得最佳参数 $[K, \alpha]$,分析过程中设定 K 为 $[2, 10]$,适当扩大 K 值搜索范围; α 值主要影响信号 IMF 优化分解的收敛速度,其取值与信号的长度有关,通常将 α 设置为 1~2 倍信号长度,即 $\alpha = (1 \sim 2)N$,从而确定其范围为 $[2\ 000, 4\ 000]$ 。基于 Matlab 平台编制程序,计算信号输入算法模型,具体流程如图 8 所示。

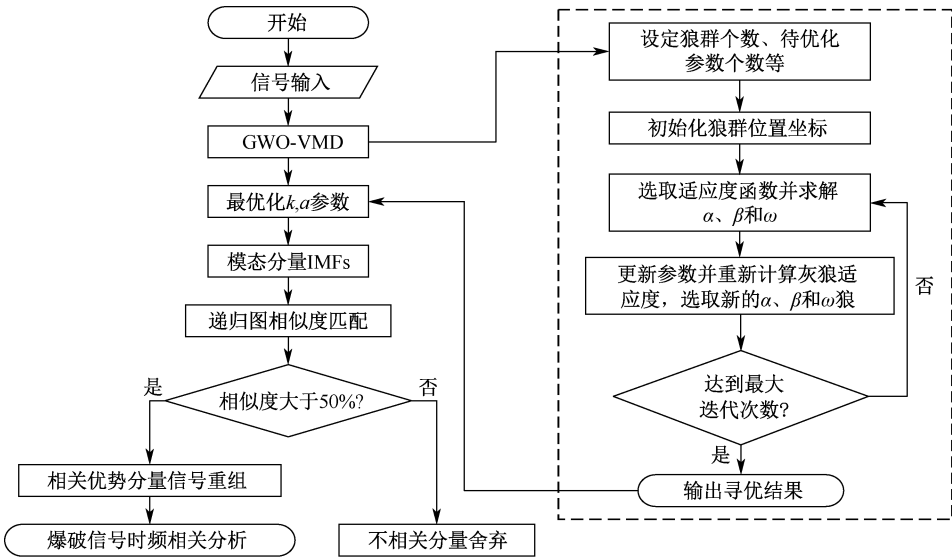


图 8 GWO-VMD 组合算法信号处理流程

Fig. 8 Signal processing flow of the GWO-VMD combined algorithm

利用 GWO 算法可寻找 VMD 中 K 和 α 参数的最佳值,气爆破岩信号通过 GWO-VMD 优化分解获得一系列 IMF 分量,如图 9 所示。分解后获得 9 个模态信号分量,其中,IMF1~IMF2 分量幅值集中在 $[-0.2, 0.2]$; IMF3~IMF4 在 $[-0.1, 0.1]$, IMF5 在 $[-0.05, 0.05]$, IMF5 在 $[-0.02, 0.02]$, IMF6~Res

(残余项)在 $[-0.01, 0.01]$,各波动形态在直观上具有显著辨识度。在频谱分析中,相较于峰值频率,中心频率反映其主要频率成分,是信号整体特征的一个综合反映。各模态信号中心频率分别为 50.26、74.66、103.72、110.81、155.20、298.78、338.96、387.38 和 453.32 Hz,且各模态频率范围相互独立。

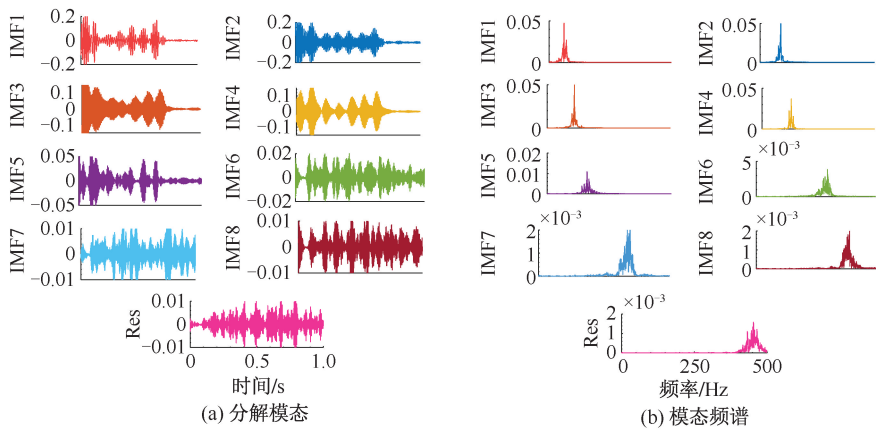


图 9 GWO-VMD 优化分解模式及频谱

Fig. 9 GWO-VMD optimize decomposition mode and spectrum

采用组合算法获得最佳参数后分解得到各模态分量,能够准确揭示原始信号的波动相关特征,很好地消除模态混叠的影响。

2.4 基于 RP 主分量判别与信号重构

RP 通过二维平面内的黑白点可视化相空间中状态,能够揭示信号的递归规律^[12]。它反映信号在其所有时间尺度上的动力相关特征,包含传统线性分析方法所无法展现的特性,从而揭示数据之间的隐藏关系,如非平稳行为、周期性和随机性。因此,采用 RP 信号图形化表示,可揭示数据中隐藏的动态模式和非线性结构变化。为生成可比较的 RP,将信息块颜色柱范围归一化设定在 $[0, 1]$,求解得到原始信号及各模态分量 RP,如图 10 和图 11 所示。RP 可视化信号序列中每个数据之间相对于序列中其余数据的一系列距离,其分布是沿着 45° 对角线对称的。

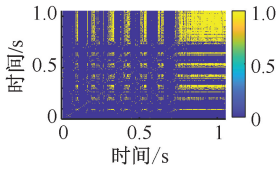


图 10 原始信号递归演化

Fig. 10 Recursive evolution of original signal

由图 11 可知:不同 IMF 分量 RP 出现明显差异,各分量对原始信号的保留程度主要体现在 RP 的局部细节,特别是在 RP 像的左下角、中部和右上角。其中,IMF1~IMF5 分量相关特征主要集中在中部和右上角,尤以右上角处最为明显,原始信号特征主要集中在中部和右上角,表明两者应为正相关;IMF6~IMF8 及 Res 分量特征主要集中在左下角,原始信号特征在左下角并未有分布,表明两者应为负相关,可判定为信号中的不相干分量。通过比较和

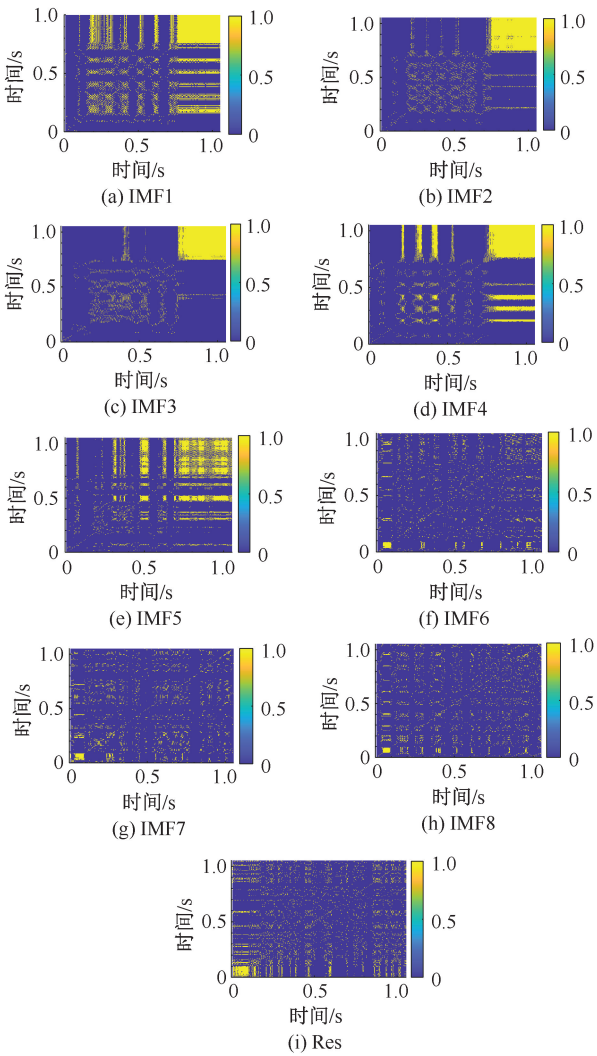


图 11 各模态分量 RP 演化

Fig. 11 Recursive evolution of each modal component

量化各模态分量 RP 和原始信号基准 RP 之间的相似性,可揭示不同分量对原始信号信息的继承度。

提取各模态分量与原始信号的公共结构特征相

似性是确定信号主分量的主要依据。为客观比较各模态分量 RP 与原信号 RP,需量化其相似性。将原始信号 RP 作为基准图像,各分量信号作为待匹配图像,通过相似性度量判断图像特征点的匹配度,设定相似度阈值 S_i 为 0.35 (S_i 介于 0.3~0.4),利用 RecurrenceVs 软件分别计算各模态分量与原始信号 RP 之间的相似度,结果见表 2。

表 2 RP 相似度结果

Table 2 Similarity results of RP

分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5
相似度/%	95.38	83.54	80.27	74.91	56.13
分量	IMF6	IMF7	IMF8	Res	—
相似度/%	6.38	5.25	4.33	3.72	—

由表 2 可知:IMF1—IMF5 分量 RP 与原始信号 RP 相似度普遍大于 50%,IMF6—IMF8 及 Res 与原始信号 RP 相似度均小于 10%,IMF5 与 IMF6 分量相似度出现跳跃突变,表明 IMF1—IMF5 与原始信号间的相关性较大,因此,可判定 IMF6—IMF8 及 Res 为信号中的干扰成分。线性叠加相似度大于 50%的 IMF1—IMF5 分量,从而得到消除干扰项后的重构信号,如图 12a 所示,对应频谱如图 12b 所示。

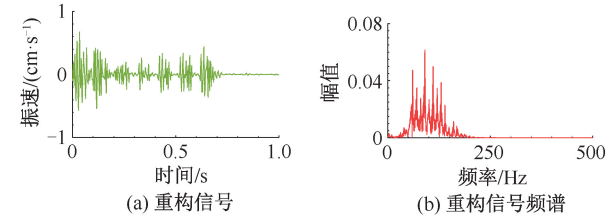


图 12 重构信号及其频谱

Fig. 12 Reconstructed signal and its spectrum

分别采用 VMD、多元集合经验模态分解 (Multivariate Ensemble Empirical Mode Decomposition, MEEMD)、经验小波变换 (Empirical Wavelet Transform, EWT) 和 GWO-VMD 进行重构对比分析,得到的统计结果如图 13 所示。

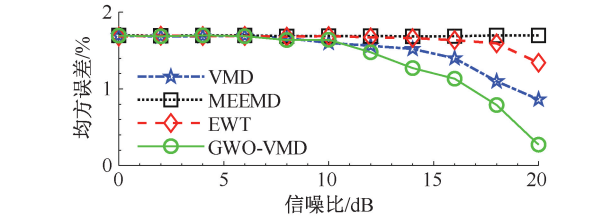


图 13 不同方法信号重构结果

Fig. 13 Reconstruction results of different methods

由图 13 可知:GWO-VMD 算法在确定的信噪比

区间可获得最佳的重构效果,特别是对于信噪比大于 10 dB 情况下均方误差最小,当信噪比为 20 dB 时均方误差仅为 0.3%,算法在气爆信号信噪比提升和自适应特征提取方面具有显著优势。重构后信号波形幅值与原始信号相当,消除了高频噪声和低频趋势项的影响。其频率主要集中在 200 Hz 以下,同时主频相对较高,中心频率位于 96 Hz,与前 5 阶模态分量中心频率均值 (98.93 Hz) 接近,并且远离建(构)筑物的 2~10 Hz 自振频率范围,与传统炸药相比主频有往高频转移的趋势,幅值相对也较小,在减振方面优势显著。

3 气爆破岩信号相关特征分析

3.1 时频特征

信号时频分析作为爆破信号非线性特征参数提取的主要手段,历来受到广泛关注。分别采用短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform, STFT)、小波变换 (Wavelet Transform, WT)、希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 和 GWO-VMD 这 4 种算法求取重构信号时频域分布,如图 14 所示。

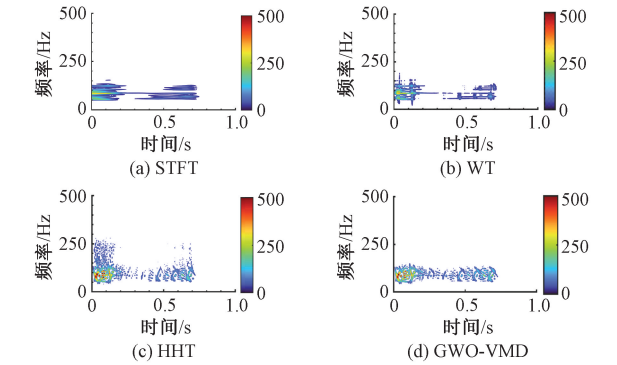


图 14 不同方法时频谱

Fig. 14 TF spectrum of different methods

由图 14 可知:STFT 由于采用固定窗函数,导致其时频分辨率也相对固定,整体上分辨率较低;WT 受小波基函数选取和冗余度影响,时频局部化解析能力差;HHT 对于各频率分量在时频域上均有较为清晰表达,且对交叉项有一定抑制,但易噪声残留,时频聚集性不高。相对而言,GWO-VMD 可根据信号局部特征而自适应地变化,包含短、长时成分都可很好地被局部化,精度达到最优,增强信号时频谱的可读性和解析能力,更适合低幅宽频气爆信号时频特征的提取过程。对图 14 d 中时频谱沿时间轴取切片获取信号频率能量分布,如图 15 所示。其消除低频趋势项和高频噪声对信号能量分布的影响,

能够客观反映频带能量分布特征。

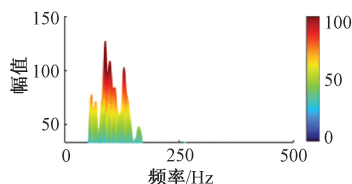


图 15 气爆破岩振动信号频率能量

Fig. 15 Frequency energy of gas explosion vibration signal

3.2 起爆网路延期精度特征

采用文献[13]中雷管延期识别图中 GWO-VMD 重构信号,结果如图 16 所示。

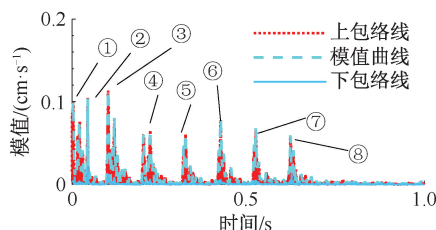


图 16 微差识别结果

Fig. 16 Result of millisecond identification

从图 16 可以看出,隧道气体破岩信号各设定延期雷管实际起爆时刻分别为 2.60、51.86、102.83、206.82、311.98、419.19、527.59 和 637.72 ms,说明该信号由 8 段数码电子雷管起爆波形叠加而成。同时,数码电子雷管实际延期时间与设定值均存在一定的误差,通过计算得到各段间实际延期时差,分别为 49.26、50.97、103.99、105.16、107.21、108.40 和 110.13 ms,与设定时间相比均产生一定偏差,原因通常是由数码电子雷管桥丝电阻值偏差和引火头药

量的偏差导致的。随着炮孔的依次起爆,偏差值亦不断增大,后续方案优化应重点调整辅助孔和周边孔、底孔间的延期时间,适当减小该部分炮孔的延期设定,尽可能与掏槽孔间延期保持一致,从而提高起爆网路精度,实现最优化的爆破效果。

4 结 论

1) 气爆破岩振动信号 GWO-VMD 算法分解得到的模态分量的时域保真度和频域分辨率均较好,气爆破岩振动信号的频谱能量主要集中在 200 Hz 以内,具有幅值小、频带宽泛的特征,其中心频率为 96 Hz,远大于常规炸药爆破振动主频,同时,远离周边建(构)筑物的自振频率范围,验证了其显著的减振效果和良好的环境适应性,适合在隧道及复杂环境土石方开挖工程中推广应用。

2) RP 能图像化各模态信号振动特征,对信号局部的特征变化较为敏感,可作为子信号对原始信号特征继承度的表征依据。将各模态 RP 与原始信号基准 RP 间的相似度作为信号主分量判别的基本度量参数,客观准确地实现气爆破岩真实信号的重构过程。

3) GWO-VMD 算法获得的重构气爆信号时频分布消除了低频趋势项和低频噪声对其能量的影响,在时频域平面均具有较高的解析精度,可获得更为真实的能量分布。随着各部分炮孔的依次起爆,数码电子雷管起爆偏差值亦不断增大,后续方案优化应调整辅助孔和周边孔、底孔间的延期时间与掏槽孔间延期时间,保持一致,从而提高起爆网路精度,实现最优化爆破效果。

参 考 文 献

- [1] 付晓强,俞缙,戴良玉. 破岩气体发生器安全性及能量分布特征[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 118-124.
FU Xiaoqiang, YU Jin, DAI Liangyu, et al. Safety and energy distribution characteristics of rock breaking gas generator[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 118-124.
- [2] 彭亚雄,周子霁,姚颖康,等. 爆破作用下层状围岩隧道突变失稳判据研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 171-178.
PENG Yaxiong, ZHOU Zipei, YAO Yingkang, et al. Study on catastrophe instability criterion of layered surrounding rock in tunnel under blasting[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 171-178.
- [3] 杨建华,章伟鹏,姚池,等. 基于变分模态分解的深埋洞室爆破开挖围岩振动特性分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3366-3375.
YANG Jianhua, ZHANG Weipeng, YAO Chi, et al. Characteristic analysis of rock vibrations caused by blasting excavation in deep cavern based on variational mode decomposition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3366-3375.

3 366–3 375.

- [4] 贾贝,凌天龙,侯仕军,等. 基于变分模态分解的延时识别法在短延时微差爆破中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2021,41(4):341–348.
JIA Bei, LING Tianlong, HOU Shijun, et al. Application of variational mode decomposition based delay time identification in short millisecond blasting[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021,41(4):341–348.
- [5] 彭亚雄,刘广进,苏莹,等. 基于变分模态分解算法的隧道爆破振动信号光滑降噪模型[J]. 振动与冲击, 2021, 40(24):173–179.
PENG Yaxiong, LIU Guangjin, SU Ying, et al. A smooth denoising model of tunnel blasting vibration signal based on VMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(24):173–179.
- [6] 彭亚雄,刘广进,苏莹,等. 基于自适应 VMD-MPE 算法的矿山爆破地震波信号降噪方法研究[J]. 振动与冲击, 2022,41(13):135–141.
PENG Yaxiong, LIU Guangjin, SU Ying, et al. Noise reduction method of mine blasting seismic wave signal based on adaptive VMD-MPE algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022,41(13):135–141.
- [7] 梁尔祝,徐淼,谷传宝,等. 基于 SA-GA 模糊熵的 VMD 算法在爆破振动信号分解中的应用[J]. 金属矿山, 2022(2):75–82.
LIANG Erzhu, XU Miao, GU Chuanbao, et al. Application of VMD parameter optimization based on SA-GA fuzzy entropy in blasting vibration signal decomposition[J]. Metal Mine, 2022(2):75–82.
- [8] 耿莹蕊,沈欢超,倪鸿飞,等. 近红外光谱结合灰狼算法优化支持向量机实现烟叶产地快速鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2022,42(9):2 830–2 835.
GENG Yingrui, SHEN Huanchao, NI Hongfei, et al. Support vector machine optimized by near-infrared spectroscopic technique combined with grey wolf optimizer algorithm to realize rapid identification of tobacco origin[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022,42(9):2 830–2 835.
- [9] 李晓燕,张明伟,宋雷,等. 基于优化领先狼群算法的微震源定位研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2):233–242.
LI Xiaoyan, ZHANG Mingwei, SONG Lei, et al. Research on microseismic source localization based on optimized leading wolfpack algorithm[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2):233–242.
- [10] 赵超,王斌,孙志新,等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022,43(1):256–262.
ZHAO Chao, WANG Bin, SUN Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022,43(1):256–262.
- [11] 贾贝,凌天龙,侯仕军,等. 变分模态分解在爆破信号趋势项去除中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2020,40(4):123–131.
JIA Bei, LING Tianlong, HOU Shijun, et al. Application of variable mode decomposition in the removal of blasting signal trend items[J]. Explosion and Shock Waves, 2020,40(4):123–131.
- [12] 何浩祥,王玮,黄磊. 基于卷积神经网络和递归图的桥梁损伤智能识别[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4):966–980.
HE Haoxiang, WANG Wei, HUANG Lei. Intelligent damage detection for bridge based on convolution neural network and recurrence plot[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020,28(4):966–980.
- [13] 龚敏,邱焱可可,李永强,等. 定制雷管微差时间实测与识别法在城市隧道爆破设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(6):1 179–1 187.
GONG Min, QIU Yikeke, LI Yongqiang, et al. Application of measuring and identifying detonation time of customized detonator in blasting design of urban tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(6):1 179–1 187.

作者简介: 付晓强 (1984—),男,山西运城人,博士,教授,主要从事工程爆破与岩石破碎方面的研究。
E-mail:fuxiaoqiang1984@163.com。