

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.007

## 基于 CEEMD-MPE-NHT 的 地下洞室爆破网路延时分析\*

孙苗<sup>1</sup>, 李兴明<sup>1</sup>, 吴立<sup>2</sup>

(1. 湖北国土资源职业学院 环境与工程学院, 武汉 430090; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 爆破网路延时识别易受 EMD 模态混淆的影响, 得到混有虚假分量的 IMF。而 Hilbert 变换受 Bedrosian 定理的约束在处理此类分量会产生负值瞬时频率, 造成巨大的识别误差。为解决传统 HHT 在爆破网路延时分析时遇到的问题, 提出了 CEEMD-MPE-NHT 爆破网路延时分析算法。该算法通过改进 EMD 得到补充集合经验模态分解-多尺度排列熵 (CEEMD-MPE) 算法, 实现 EMD 模态混淆抑制。再对 CEEMD-MPE 得到 IMF 进行归一化 Hilbert 变换, 解除 Bedrosian 定理对 Hilbert 变换的约束。对蕴含能量最大的 IMF 分量进行包络求解, 包络峰值对应的时间间隔即为爆破网路实际延时。最后通过分析实际延时和理论延时之间的差值, 可判断雷管是否处于正常服役状态。进一步通过干扰降震法得到本工程最合理爆破网路延时为 54.51 ~ 59.75 ms, 研究表明: 基于 CEEMD-MPE-NHT 的爆破网路延时分析对爆破安全控制具有重要的现实意义。

**关键词:** 爆破网路; 补充集合经验模态分解; 多尺度排列熵; 模态混淆; 希尔伯特变换

**中图分类号:** TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0042-06

## Delay Time Analysis of Blasting Network in Underground Cavern based on CEEMD-MPE-NHT

SUN Miao<sup>1</sup>, LI Xing-ming<sup>2</sup>, WU Li<sup>2</sup>

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

**Abstract:** The delay time identification of blasting network is easily affected by the mode confusion of EMD, and the IMF with false components is obtained. However, the Hilbert transform is constrained by the Bedrosian theorem. When dealing with such components, it will produce negative instantaneous frequency, resulting in huge identification error. CEEMD-MPE-NHT blasting network delay time analysis algorithm was proposed to solve the problems of traditional HHT blasting network delay time analysis. In this algorithm, EMD mode confusion suppression is achieved by improving EMD and obtaining the complementary set empirical mode factory-Multiscale Permutation entropy (CEEMD-MPE) algorithm. The IMF obtained by CEEMD-MPE is transformed by normalized Hilbert transform to remove the constraint of Bedrosian theorem on Hilbert transform. The envelope of the IMF component with the largest energy content is solved, and the time interval corresponding to the envelope peak value is the actual delay time of the blasting network. By analyzing the difference between the actual delay time and the theoretical delay time, it can be judged whether the detonator is in normal service condition. Further, through the interference reduction method, the most reasonable delay time of the project is 54.51 ~ 59.75ms. The research results show that the blasting network delay time analysis based on CEEMD-MPE-NHT has important practical significance for blasting safety control.

**Key words:** blasting network; complementary ensemble empirical mode decomposition; multiscale permutation

entropy; mode confusion; Hilbert transform

非电毫秒雷管段别越高,合理微差时间的设置越重要,非电毫秒雷管随爆破进程的展开产生的延时误差会逐渐积累,使得实际施工中的微差时间间隔和理论设计存在较大出入,进而影响爆破效果<sup>[1-3]</sup>。因此微差时间间隔设置好坏和整体爆破效果密切相关,有必要对爆破网路延时进行识别,从而检验雷管的可靠性和起爆网路设计的合理性<sup>[4-6]</sup>。

目前大量学者对爆破网路延时识别方法进行了研究,主要研究方法集中在两方面。小波分析和经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)<sup>[7]</sup>,小波分析过度依赖先验基函数,其本质无法脱离 Fourier 变换,不可避免会受到 Fourier 变换分析非平稳、非线性地震波信号缺陷的影响<sup>[8]</sup>。而 EMD 在分析爆破地震波时极易出现模态混淆现象,导致分析精度受到影响<sup>[9]</sup>,其改进算法 EEMD 能够在一定程度抑制 EMD 模态混淆,却无法证明人为引入的白噪声已经完全消除,实测信号完备性受到影响<sup>[10]</sup>。

针对此现象,本文通过结合补充集合经验模态分解(Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD)<sup>[11]</sup>的自适应性和多尺度排列熵(Multiscale Permutation Entropy, MPE)<sup>[12]</sup>的随机性检测功能,得到 CEEMD-MPE 算法,该算法能够有效抑制 EMD 在分析爆破地震波信号时出现的模态混淆现象,提取具有实际物理意义的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF);通过对 IMF 进行归一化 Hilbert 变换(normalized Hilbert transform, NHT)<sup>[13]</sup>掌握 IMF 能量分布情况,对能量占比最大的 IMF 提取包络得到高精度的爆破网路延时识别结果。再通过干扰降震法得到减震效果最优的微差时间间隔,实现爆破网路延时优化。

## 1 CEEMD-MPE-NHT 算法原理

### 1.1 CEEMD-MPE 算法原理

CEEMD 是在原始监测信号(用  $S(t)$  表示)中添加两个方向相反的噪声信号,并分别 $[S_1(t) = S(t) +$  正方向随机噪声, $S_2(t) = S(t) +$  反方向随机噪声]进行 EMD,即成对呈相反方向增加随机噪声。

CEEMD-MPE 算法,在 CEEMD 的基础上添加了 MPE 的代码,具体的操作流程见图 1。MPE 的实现步骤如下:

第一步:对任意时间序列  $x(i)$  进行粗粒化处理,得到多尺度时间序列  $y_j^s$ ,如式(1)所示。

$$y_j^s = \frac{1}{s} \sum_{i=(j-1)s+1}^j x_i, 1 \leq j \leq \frac{L}{s} \quad (1)$$

第二步:计算  $y_j^s$  排列熵值<sup>[14]</sup>(Permutation Entropy, PE),通过坐标延迟重构法对  $y_j^s$  进行空间重构,得到  $m$  维空间的重构向量  $Y_i^s = \{y_i^s, y_{i+\sigma}^s, y_{i+2\sigma}^s, \dots, y_{i+(m-1)\sigma}^s\}$ 。

第三步:计算  $Y_i^s$  每种排列出现的概率,对  $Y_i^s$  进行升序排列,得  $Y_i^s = \{y_{[i+(j-1)\sigma]}^s \leq \dots \leq y_{[i+(m-1)\sigma]}^s\}$ ,这样的排列有  $m!$  种,则每一种排列出现的概率为  $P_i (0 < P_i \leq 1, i \leq m!)$ 。

第四步:计算  $Y_i^s$  的 PE 值,  $PE = -\sum_{i=1}^{m!} P_i \times \lg P_i$ 。并进行标准化处理,当  $P_i = 1/m!$  时,有  $PE_{\max} = \lg_{10} m!$ ,标准化后的排列熵为  $PE^* = PE/PE_{\max}$ 。

显然  $PE^*$  的取值范围是  $0 \sim 1$ ,其值越趋向于 0,说明检测的时间序列越随机;反之则说明该序列具有一定的规律性。根据文献<sup>[15, 16]</sup>当  $PE^* > 0.6$ ,可认为检测的随机序列是非平稳随机信号,取  $PE_\theta = 0.6$  用于 CEEMD 所得 IMF 随机性检测。

CEEMD-MPE 算法是对 CEEMD 得到的 IMF 进行 MPE,若 CEEMD 得到的  $PE_{IMFi} \geq PE_\theta$ ,被认为是异常分量需要剔除;若  $PE_{IMFi} < PE_\theta$  则认为是正常信号,将所有正常信号重新组合,而后对重新组合的信号进行 EMD。对于爆破地震波信号,被剔除的异常分量是噪声分量,而噪声分量是导致 EMD 结果出现模态混淆的主要原因,剔除了噪声分量可实现 EMD 模态混淆抑制。

### 1.2 NHT 算法原理

对传统的 Hilbert 变换进行归一化处理,具体操作如下。

第一步:对 CEEMD-MPE 算法得到的 IMF 取绝对值,找出  $|IMFi|$  中的所有极大值。

第二步:求  $|IMFi|$  所包含极大值点的样条包络线,记作  $x(t)$ 。

第三步:归一化处理,记  $|IMF1|$  中的所有极大值点的样条包络为  $x_1(t)$ ,计算  $f_1(t) = |IMF1|/x_1(t)$ 。

第四步:若所有的  $|f_1(t)|$  满足  $|f_1(t)| \leq 1$ ,则停止。反之对  $IMF1$  重新赋值,即  $IMF1 = f_1(t)$ ,重

收稿日期:2022-01-22

作者简介:孙苗(1993-),女,讲师、博士,主要从事爆破地震波信号处理,(E-mail)2357152544@qq.com。

通讯作者:吴立(1963-),男,教授、博士生导师,主要研究岩土与爆破工程,(E-mail)lwu@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(41672260)

复“第二步”,得到 $|f_1(t)|$ 中的所有极大值点的样条包络线为 $x_2(t)$ ,重复“第三步”得到 $f_2(t) = f_1(t)/x_2(t)$ ,检验 $|f_2(t)|$ 满足 $|f_2(t)| \leq 1$ ,详见式(2),其中 $j-1$ 为重复的次数,一般运行2~3次即可满足需求。

$$\begin{cases} f_1(t) = IMF1/x_1(t) \\ f_2(t) = f_1(t)/x_2(t) \\ f_3(t) = f_2(t)/x_3(t) \\ \dots \\ f_j(t) = f_{j-1}(t)/x_j(t) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $f_j(t)$ 的为IMF1的调频部分,其调幅部分 $w_j(t)$ 可用式(3)表示。

$$w_j(t) = x_1(t) \cdot x_2(t) \cdots x_j(t) \quad (3)$$

因此归一化的IMF1可用式(4)表示,不难发现归一化本质是将IMF的调频和调幅分量分离。

$$IMF1 = f_j(t) \cdot w_j(t) \quad (4)$$

第五步:对IMF1的调频部分 $f_j(t)$ 进行Hilbert变换,见式(5)。

$$Hilbert[f_j(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f_j(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

通过五步,实现归一化Hilbert变换,即NHT<sup>[13]</sup>。此时瞬时频率为IMF的调频分量求得的,Hilbert变换不再受Bedrosian定理条件的限制,得到的瞬时属性更符合信号特征。见图1。

## 2 工程概况

以烟台某地下洞室爆破开挖工程为研究对象,其主要由主洞室、水幕巷道和水幕系统等部分组成,洞室之间空间位置较复杂,各部分爆破施工存在相互影响。主洞室爆破开挖施工分层进行,图2是具体分层施工细节。主洞室顶层采用非电起爆毫秒延时爆破,图3为主洞室顶层导洞的炮孔布置示意图,顶层导洞爆破开挖时,采用TC-4850智能爆破测振仪沿主洞室轴线方向布置测点,避免飞石损坏仪器设置距离爆源70m为1号测点,余下3个点间隔依次为10m、15m、30m。得到实测爆破振动信号的时程曲线如图4所示。

## 3 基于CEEMD-MPE-NHT的地下洞室爆破网路延时分析

通过CEEMD-MPE-NHT算法计算主洞室顶层导洞毫秒延时光面爆破实际延时时间,对图4中的时程曲线进行基于CEEMD-MPE-NHT的爆破网路延时分析,得到如图5所示的IMF分量,IMF分量从

高频向低频依次排列,EMD模态混淆得到了有效的抑制。

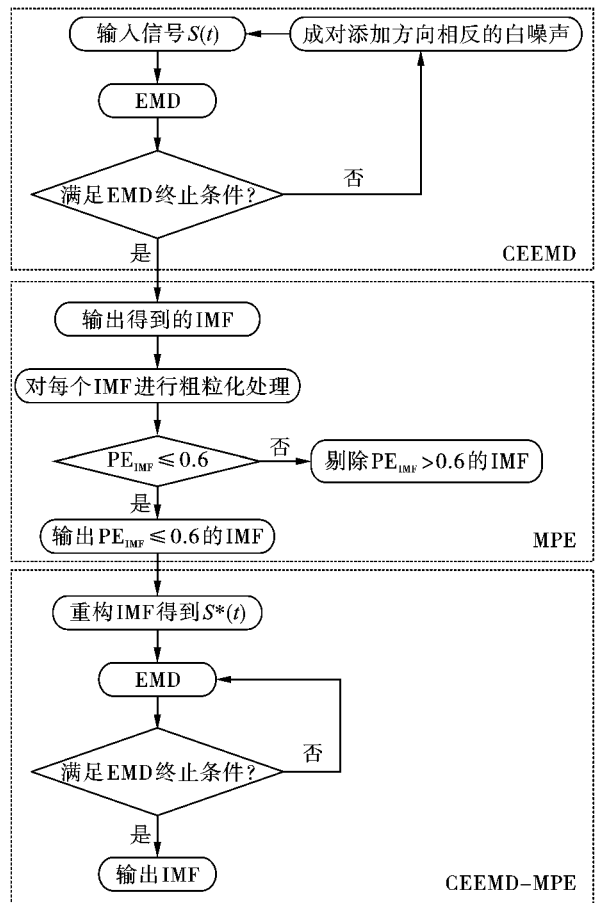


图1 CEEMD-MPE算法分析流程图

Fig. 1 CEEMD-MPE algorithm analysis flow chart

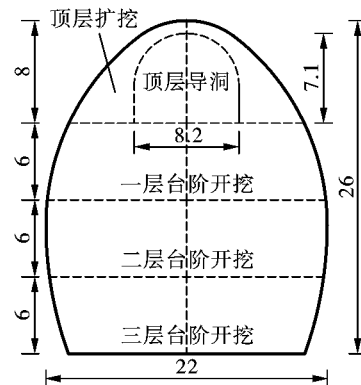


图2 主洞室断面形式及爆破开挖步骤(单位:m)

Fig. 2 Section form of main cavern and blasting excavation steps(unit:m)

每个IMF都携带爆破地震波信号一定的时频能量信息。能量占比最高的IMF分量,能在最大程度上反映爆破地震波监测信号所蕴含时频能量细节信息。对该分量提取其幅值包络变化曲线,包络峰值点对应的时间节点表示爆破网路每一段

别能量的叠加,也表示该段别实际起爆时间点,通过计算两相邻峰值对应时间节点之差即可得到实际网路延时时间。

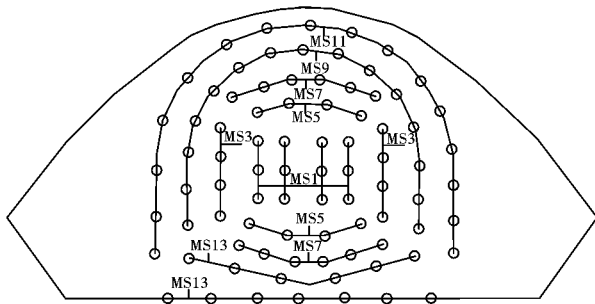


图3 主洞室顶层导洞扩挖爆破炮孔布置图

Fig. 3 Layout of blast holes for expansion excavation of pilot tunnel on the top floor of main cavern

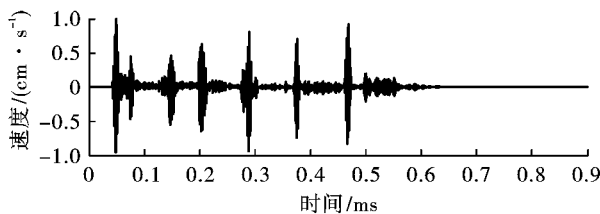


图4 实测爆破振动信号的时程曲线

Fig. 4 Time history curve of measured blasting vibration signal

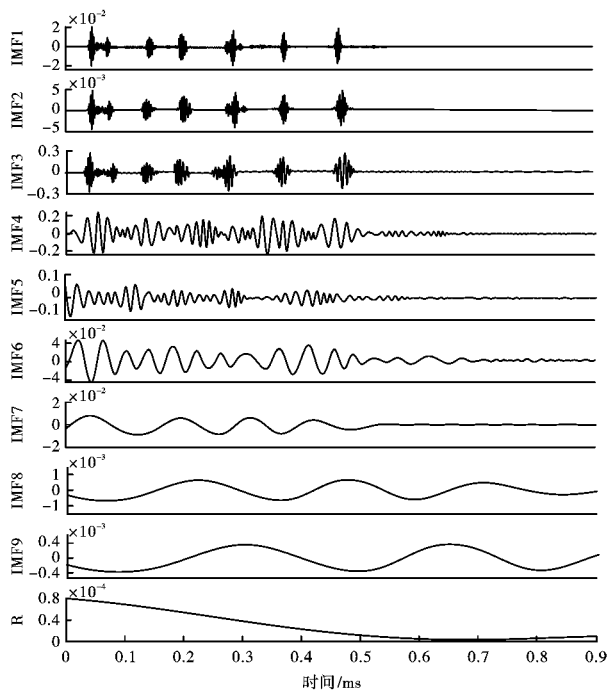


图5 基于 CEEMD-MPE 算法得到的 IMF

Fig. 5 IMF based on CEEMD-MPE algorithm

观察表 1 不难发现本次爆破能量最大的 IMF 分量是 IMF3,对 IMF3 进行包络提取,得到如图 6 所示的包络线。

表 1 基于 NHT 得到的各 IMF 能量及总能量占比

Table 1 Energy of each IMF and proportion of total energy based on NHT

分量	能量	百分比/%
IMF1	$4.016 \times 10^{-4}$	0.3063
IMF2	$2.334 \times 10^{-4}$	0.1780
IMF3	$8.127 \times 10^{-2}$	61.9841
IMF4	$4.078 \times 10^{-2}$	31.1027
IMF5	$6.549 \times 10^{-3}$	4.9949
IMF6	$1.742 \times 10^{-3}$	1.3294
IMF7	$1.364 \times 10^{-4}$	0.1040
IMF8	$0.627 \times 10^{-6}$	0.0005
IMF9	$0.167 \times 10^{-6}$	0.0001

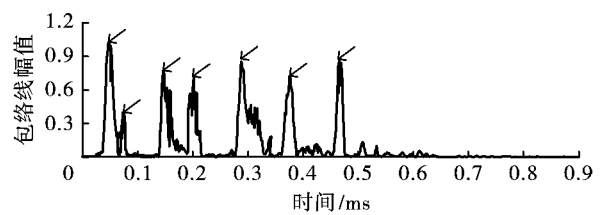


图6 IMF3 分量包络线

Fig. 6 IMF3 component envelope

观察图 6 可发现 7 个明显的峰值,出现的时刻分别为:0.0476 s、0.0739 s、0.1457 s、0.2029 s、0.2886 s、0.3745 s、0.4816 s,表明本次爆破由 7 段爆破地震波叠加而成。观察图 3 主洞室顶层导洞扩挖爆破炮孔布置图,可发现也是划分了 7 段进行爆破,侧面反映出,基于 CEEMD-MPE-NHT 算法得到的爆破网路延时计算结果具有科学依据。

将第一个峰值作为第一段雷管起爆时刻,可计算每段雷管起爆实际微差时间分别为:26.30 ms、71.80 ms、57.20 ms、85.70 ms、85.90 ms、107.10 ms,将其与施工组织设计中给出的雷管规格表中理论的爆破网路设计延时时间间隔进行对比,对比结果列于表 2 中。

观察表 2 可发现基于 CEEMD-MPE-NHT 算法得到的爆破网路延时计算结果在厂家提供雷管规格表规定的理论微差时间间隔内,说明本次爆破主洞室导洞毫秒延时爆破使用的该批次雷管性能可靠,在实际施工中的延时时间满足要求,使用此批雷管进行爆破,能确保主洞室导洞微差爆破顺利进行。

进一步分析观察图 4 可发现,本次爆破 7 段地震波信号幅值差别不大,根据 MATLAB 编程对图 4 实测爆破振动信号进行信号分离,得到 7 段子信号。这里假设各子信号的波形振幅、频率大致相同<sup>[17]</sup>,因此可用同一子信号代替,图 7 为分离出来的子信号。

表2 雷管理论延时和实际延时时间对比(单位:ms)

Table 2 Comparison between theoretical delay and actual delay time of detonator (unit: ms)

段别	名义时间	误差范围	段别	理论延时间隔	实际延时间隔
MS1	0	0.0 ~ 12.5			
MS3	50	37.5 ~ 62.5	MS1 ~ MS3	25.0 ~ 62.5	26.30
MS5	110	92.5 ~ 130.0	MS3 ~ MS5	30.0 ~ 92.5	71.80
MS7	200	175 ~ 225	MS5 ~ MS7	45.0 ~ 122.5	57.20
MS9	310	280 ~ 345	MS7 ~ MS9	55 ~ 170	85.70
MS11	460	420 ~ 505	MS9 ~ MS11	75 ~ 225	85.90
MS13	650	600 ~ 705	MS11 ~ MS13	95 ~ 285	107.10

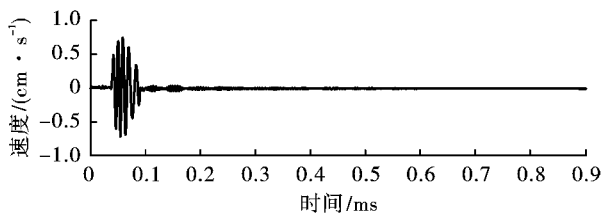


图7 子信号速度时间时程曲线

Fig. 7 Time history curve of sub signal speed

通过干扰降震法确定合理微差时间间隔,合理微差时间间隔能使微差爆破震动的强度大幅度降低。对图7所示子信号进行不同微差时间间隔的叠加,得到如图8所示的叠加后的信号峰值振动速度和微差时间对应图。

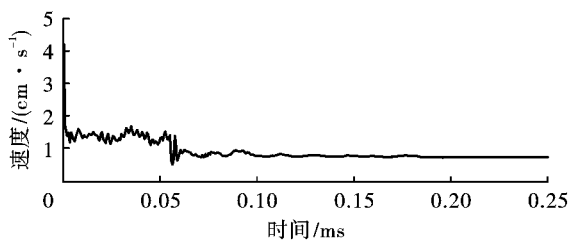


图8 不同微差时间对应的速度峰值

Fig. 8 Velocity peak corresponding to different differential time

观察图8可发现,微差时间间隔对爆破震动的强度具有很大影响。当微差时间间隔小于2.86 ms时,7段子信号为一次齐发,爆破震动效应达到最大,此时振幅为7段爆破叠加后的结果;当微差时间间隔处于54.71 ~ 59.65 ms时,微差爆破产生的振幅最小,减震效果最好;当微差时间间隔处于2.86 ms和111.34 ms之间时,7段子信号叠加后信号振动速度峰值幅值表现为不同程度的增加或者削弱,这是各段子信号之间相互干涉得到的结果;当微差时间间隔大于111.34 ms时,可发现叠加后信号峰值和子信号峰值无太大差异,说明此时叠加信号相当于各分量信号单独作用的结果,这也就解释了为什么电子雷管单孔连续起爆,具有良好的减震效

果<sup>[18]</sup>,其通过错峰减震,总的震动效果相当于各子信号单独作用的结果,信号震动强度取决于子信号本身强度。

综上,本次主洞室顶层导洞非电起爆毫秒延时爆破最合理爆破微差时间间隔是54.71 ~ 59.65 ms,以此为微差时间间隔进行的信号叠加得到的总信号峰值阵速最小,减震效果最好。基于CEEMD-MPE-NHT算法得到的爆破网路延时计算结果和起爆网路设计段别一一对应,从侧面反映出CEEMD-MPE-NHT算法求得的爆破网路延时结果具有科学性和真实性。将实际爆破网路延时结果和雷管理论延时进行对比分析,可判断施工中雷管是否正常服役,对爆破安全控制具有重要的现实意义。

## 4 结论

(1) CEEMD-MPE算法将MPE的随机性检测和CEEMD的自适应性有效结合,能够有效抑制EMD模态混淆,得到反应爆破地震波真实属性的IMF分量。

(2) NHT得到的瞬时频率为IMF的调频分量求得的,不再受Bedrosian定理的约束,瞬时频率物理意义更加明显。

(3) 基于CEEMD-MPE-NHT算法得到的爆破网路延时计算结果和起爆网路设计段别一一对应,从侧面反映出CEEMD-MPE-NHT算法求得的爆破网路延时结果具有科学性和真实性。

(4) 主洞室顶层导洞非电起爆毫秒延时爆破最合理爆破微差时间间隔是54.71 ~ 59.65 ms,以此为微差时间间隔进行的信号叠加得到的总信号峰值阵速最小,减震效果最好。

## 参考文献 (References)

- [1] 张阳光,林飞,赵彭,等. 延时时间对露天深孔爆破破碎效果的影响研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 69-75.
- [1] ZHANG Yang-guang, LIN Fei, ZHAO Peng, et al. Research on the influence of delay time on fragmentation in open-pit

- deep hole blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(4):69-75. (in Chinese)
- [2] 刘文胜,陈能革,朱末琳,等. 数码雷管高精度延时对爆破振动影响试验研究[J]. *金属矿山*, 2021(9):37-43.
- [2] LIU Wen-sheng, CHEN Neng-ge, ZHU Mo-lin, et al. Test study on the effect of digital detonator high precision delay time on blasting vibration[J]. *Metal Mine*, 2021(9):37-43. (in Chinese)
- [3] 李祥龙,张其虎,王建国,等. 地下爆破精确延时逐孔起爆减振试验研究[J]. *黄金科学技术*, 2021, 29(3):401-410.
- [3] LI Xiang-long, ZHANG Qi-hu, WANG Jian-guo, et al. Experimental study on precise delay hole-by-hole blasting vibration reduction of underground blasting[J]. *Gold Science and Technology*, 2021, 29(3):401-410. (in Chinese)
- [4] 郭侃,雷战,艾欣,等. 延时时间对岩石爆破效果影响的探讨[J]. *工程爆破*, 2021, 27(2):85-90.
- [4] GUO Kan, LEI Zhan, AI Xin, et al. Discussion on the influence of delay time on rock blasting effect[J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(2):85-90. (in Chinese)
- [5] 张亮,凌同华,陈增辉,等. 基于改进 CEEMDAN 方法确定微差爆破实际延期时间[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(20):274-280.
- [5] ZHANG Liang, LIN Tong-hua, CHEN Zeng-hui, et al. Identification of the real delay time of millisecond blasting based on the improved CEEMDAN method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(20):274-280. (in Chinese)
- [6] 吴超. 基于 MATLAB 的电子雷管合理时差试验研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2020.
- [6] WU Chao. Experimental research on reasonable time difference of electronic detonators based on MATLAB [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] 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 Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1998, 454(3):903-995.
- [8] 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.
- [8] JIA Bei, LIN Tian-long, HOU Shi-jun, 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. (in Chinese)
- [9] WANG Tong, ZHANG Ming-cai, YU Qi-hao, et al. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 83:29-34. (in Chinese)
- [10] 程军圣,王健,桂林. 改进的 EEMD 方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(16):51-56.
- [10] CHENG Jun-sheng, WANG Jiang, GUI Lin. An improved EEMD method and its application in rolling bearing fault diagnosis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(16):51-56. (in Chinese)
- [11] SUN Miao, WU Li, LI Chun-jun, et al. Smooth model of blasting seismic wave signal denoising based on two-stage denoising algorithm[J]. *Geosystem Engineering*, 2020, 23(4):234-242.
- [12] 郑近德,刘涛,孟瑞,等. 基于广义复合多尺度排列熵与 PCA 的滚动轴承故障诊断方法[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(20):61-66.
- [12] ZHENG Jin-de, LIU Tao, MENG Rui, et al. Generalized composite multiscale permutation entropy and PCA based fault diagnosis of rolling bearings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(20):61-66. (in Chinese)
- [13] HUANG N E, WU Z, LONG S R, et al. On Instantaneous Frequency[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(2):177-229.
- [14] BANDT Christoph, POMPE Bernd. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(17):1-5.
- [15] 郑近德,程军圣,杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 32(21):21-26.
- [15] ZHENG Jin-de, CHENG Jun-sheng, YANG Yu. Modified EEMD algorithm and its applications[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 32(21):21-26. (in Chinese)
- [16] 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):71-79.
- [16] 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):71-79. (in Chinese)
- [17] 凌同华. 爆破震动效应及其灾害的主动控制[D]. 长沙:中南大学, 2004.
- [17] LIN Tong-hua. Blasting vibration effect and initiative control of vibrational damage [D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese)
- [18] 傅洪贤,沈周,赵勇,等. 隧道电子雷管爆破降振技术试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(3):597-603.
- [18] FU Hong-xian, SHEN Zhou, HAO Yong, et al. Experimental study of decreasing vibration technology of tunnel blasting with digital detonator[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3):597-603. (in Chinese)