

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.009

基于 EP-CEEMDAN-PED 的隧道扩挖爆破网络延时分析*

孙 苗^① 李兴明^① 吴 立^②

①湖北国土资源职业学院环境与工程学院(湖北武汉,430090)

②中国地质大学(武汉)工程学院(湖北武汉,430074)

[摘 要] 经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)固有的端点效应和模态混淆导致其在进行爆破网络延时分析时出现不容忽视的误差。为了获得爆破现场实际网络延时,判断批次雷管的安全性,必须对 EMD 进行改进。通过对爆破地震波监测信号进行端点处理(endpoint processing, EP),改善 EMD 在处理信号实际端点时出现的端点突变现象,进而抑制 EMD 端点效应,提高固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的稳定性和精度。对 EMD 进行改进,得到自适应补充集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN),抑制低频趋势项模态混淆,并结合排列熵检测(permutation entropy detection, PED)来控制高频模态混淆。得到的 EP-CEEMDAN-PED 算法能识别微差爆破实际延期时间,且能有效克服 EMD 固有的端点效应和模态混淆现象,结合干扰减振法,可计算实际隧道扩挖爆破合理减振微差时间为 55.14 ~ 57.93 ms,对爆破振动控制具有重要的现实意义。

[关键词] 爆破地震波信号;微差起爆;经验模态分解;固有模态函数

[分类号] TD235.1; O382

Network Delay Analysis in Tunnel Expansion Blasting Based on EP-CEEMDAN-PED

SUN Miao^①, LI Xingming^①, WU Li^②

①College of environment and Engineering, Hubei Land Resources Vocational College (Hubei Wuhan, 430090)

②Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan (Hubei Wuhan, 430074)

[ABSTRACT] The inherent endpoint effect and modal confusion of empirical mode decomposition (EMD) lead to errors that can not be ignored in the analysis of blasting network delay. In order to obtain the actual network delay at the blasting site and judge the safety of batch detonators, EMD must be improved. Through endpoint processing (EP) of blasting seismic wave monitoring signal, the endpoint mutation phenomenon of EMD when processing the actual endpoint of signal was improved, so as to suppress the endpoint effect of EMD and improve the stability and accuracy of intrinsic mode function (IMF). The EMD was improved to obtain the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) to suppress the modal confusion of low-frequency trend term, and combined with permutation entropy detection (PED) to control the high-frequency modal confusion. The obtained EP-CEEMDAN-PED algorithm can identify the actual delay time of millisecond blasting, and can effectively overcome the inherent endpoint effect and modal confusion of EMD. Combined with the interference damping method, the reasonable damping millisecond time of actual tunnel expansion blasting can be calculated as 55.14-57.93 ms, which is of great practical significance for blasting vibration control.

[KEYWORDS] blasting seismic wave signal; millisecond blasting; empirical mode decomposition; intrinsic mode function

* 收稿日期:2021-10-27

基金项目:国家自然科学基金(41672260)

第一作者:孙苗(1993-),女,博士,讲师,主要从事爆破地震波信号处理研究。E-mail:2357152544@qq.com

通信作者:吴立(1963-),男,教授,博导,主要从事岩土与爆破工程的研究。E-mail:lwu@cug.edu.cn

引言

对隧道扩挖爆破而言,因相邻隧道距离较近,振速要求相对苛刻,从而影响爆破进程^[1-2]。采用普通雷管进行低振速精准控制爆破为隧道爆破面临的技术难题。非电毫秒雷管起爆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延时和理论设计延时存在较大的出入^[3-5];导致实际爆破网络延时不能满足减振要求。因此,对实际施工中非电毫秒雷管实际微差爆破时间进行识别,可检验爆破中使用雷管的可靠性;同时,通过分析实际微差起爆时刻与对应振速的内在关系,对进一步优化爆破设计参数、降低振动具有重要的意义^[6-7]。

目前,应用较多的爆破网络延时分析方法有小波变换^[8]以及希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)^[9]等。其中,小波变换过度依赖基函数,导致识别结果不唯一。HHT 中的经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是一种依靠数据本身特性进行分析的自适应算法。但爆破地震波这种特殊的非平稳、易突变信号因监测环境相对恶劣,导致很多时候爆破地震波监测信号中会混入噪声。噪声的存在将导致 EMD 分析出现模态混淆现象,影响分析精度。同时,EMD 尚存在绝大多数算法都无法避免的端点效应,模态混淆和端点效应是降低 EMD-HHT 分析精度的主要原因,最终导致网络延时分析精度不足。

为解决 EMD-HHT 爆破网络延时分析精度欠缺的问题,以福建某隧道扩挖工程为依托,提出了 EP-CEEMDAN-PED 爆破网络延时分析算法^[10]。该算法对 EMD 进行了改进,使之免受模态混淆和端点效应的抑制,得到真实可靠的爆破网络延时分析结果。针对识别结果采用信号分离技术,得到减振效果最优的微差时间间隔,对爆破网络延时优化及爆破振动控制具有重要的现实意义。

1 EP-CEEMDAN-PED 算法原理

该算法由两步构成:第一,通过端点极值延拓进行爆破地震波监测信号端点处理,改善 EMD 端点效应问题;第二,改进 EMD 得到 CEEMDAN-PED,抑制 EMD 模态混淆现象。

1.1 端点处理

找到信号所有极大值点对应的坐标 $(t_{\max 1},$

$x_{\max 1}), \dots, (t_{\max a}, x_{\max a}), \dots, (t_{\max M}, x_{\max M})$; ($a = 1, 2, 3, \dots, M$)。同理,找到所有极小值点对应的坐标 $(t_{\min 1}, x_{\min 1}), \dots, (t_{\min b}, x_{\min b}), \dots, (t_{\min N}, x_{\min N})$; ($b = 1, 2, 3, \dots, N$)。设需要延拓的极大值点和极小值点时刻分别为 $t_{\max 0}$ 和 $t_{\min 0}$,则

$t_{\max 1} < t_{\min 1}$ 时,求解 $t_{\min 0}$ 和 $t_{\max 0}$:

$$\begin{cases} t_{\min 0} = t_{\max 1} - (t_{\max 2} - t_{\min 1}); \\ t_{\max 0} = t_{\min 0} - (t_{\min 1} - t_{\max 1}). \end{cases} \quad (1)$$

$t_{\max 1} > t_{\min 1}$ 时,求解 $t_{\max 0}$ 和 $t_{\min 0}$:

$$\begin{cases} t_{\max 0} = t_{\min 1} - (t_{\min 2} - t_{\max 1}); \\ t_{\min 0} = t_{\max 0} - (t_{\max 1} - t_{\min 1}). \end{cases} \quad (2)$$

设需要延拓的极大值点和极小值点发生时刻对应的幅值分别为 $x_{\max 0}$ 和 $x_{\min 0}$,对所有极大值点坐标进行多项式拟合,代入 $t_{\max 0}$,可计算出 $x_{\max 0}$ 。 $x_{\min 0}$ 计算方法同 $x_{\max 0}$ 。

1.2 CEEMDAN-PED 算法原理

CEEMDAN-PED 算法本质是在自适应补充集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)^[11]的基础上添加排列熵检测(permutation entropy detection, PED)^[12]程序,用于计算 CEEMDAN 得到固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的 PED 结果,检验 IMF 的随机性。

CEEMDAN 在分解的每个阶段添加有限次的自适应白噪声,能实现在较少的平均次数下,重构误差几乎为零。具体步骤如下:

第一步:在 1.1 节端点处理后的信号 $S(t)$ 中添加自适应性白噪声 $B^i(t)$ 。其中, i 表示添加噪声次数,一般 i 的最大值为 50~100,本文中取 50。则第 i 次的信号可表示为 $S(t) = S(t) + \alpha_i B^i(t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 50$),其中, α_i 为第 i 次添加白噪声的标准差。CEEMDAN 的一阶 IMF 分量(用 f_1 代替)见式(3)。

$$f_1 = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} f_{1i}. \quad (3)$$

余项 $R_1(t) = S(t) - f_1$ 。

第二步:构造新的待分解信号 $S(t) = S(t) + \alpha_i B^i(t)$,得到 f_2 。

第三步:重复第一步和第二步,直到程序终止,共产生了 c 个 IMF 分量,余项见式(4)。

$$R = S(t) - \sum_{j=1}^c f_j. \quad (4)$$

PED 是一种检测时间序列随机性和动力学突变的方法,适用于非线性数据。具体实现步骤如下。

第一步:对任意一维时间序列 $X = \{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$ 中任一元素 $x(j)$ 进行空间重构。

第二步:取 $x(j)$ 中连续的 m 个点,得到 $x(j)$ 的 m 维空间重构向量

$$X_j = \{x(j), x(j+\sigma), \cdots, x[j+(m-1)\sigma]\}.$$

(5)

式中: σ 是时间延迟; m 是嵌入维数;则 $X = \{X_1, X_2, X_3, \cdots, X_{n-(m-1)\sigma}\}$ 。

第三步:对 X_j 进行升序排列,得到

$$X_j^* = \{x[j+(k_1-1)\sigma] \leq x[j+(k_2-1)\sigma] \leq \cdots \leq x[j+(k_m-1)\sigma]\}.$$

(6)

这样的排列有 $m!$ 种。计算每一种排列出现的概率 $P_j (0 < P_j \leq 1, j \leq m!)$, 并计算 X_j 的排列熵 PE (用变量 y 代替)。

$$y = - \sum_{j=1}^{m!} P_j \times \lg P_j.$$

(7)

第四步:PE 标准化。当 $P_j = 1/m!$ 时,PE 取最大值 $y_{\max} = \lg m!$ 。则标准化后, $y^* = y/y_{\max}$ 。 y^* 表示 PE^* 。

显然, PE^* 的取值范围是 $[0,1]$ 。 PE^* 越大,说明时间序列越随机;反之,说明时间序列越规则。根据文献[13-14],当 $PE^* > 0.6$,被认为是异常的非平稳随机信号,如噪声信号、脉冲信号或间断信号;否则,认为是平稳信号。将任意一维时间序列 X 替换成 CEEMDAN,得到 IMF 分量,便可检验 IMF 分量的随机性。不难发现,通过设置 PE 阈值可实现高频模态混淆抑制。

2 工程概况

以福建某隧道扩挖爆破工程为研究对象。该工程对既有双向四车道原位扩建为双向八车道隧道。施工要求在左侧隧道封闭爆破施工过程中右侧隧道依然保持正常通车状态。图 1 为左侧线路爆破施工时,在右侧通车隧道进行的测点布置图。采用 TC-4850 智能爆破测振仪沿洞室轴线方向布置测点,避免飞石损坏仪器,距离爆源 40 m 外设置为 1#测点,余下 4 个测点间隔依次为 5、10、15、30 m。

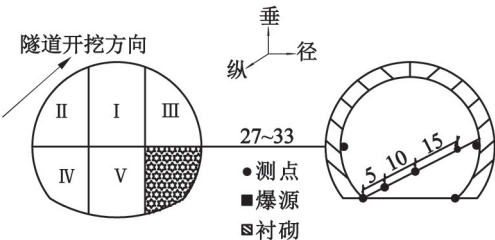


图 1 测点布置(单位:m)

Fig. 1 Layout of measuring points (unit:m)

为确保起爆网络的安全传爆、改善爆破质量、减少爆破危害、方便施工操作,采用非电导爆起爆系统进行联线复式微差起爆网络。起爆网络采用塑料导爆管和四通连接,BM-2000 型起爆器起爆。

以左线隧道 I 部围岩爆破为研究对象。现场 I 部围岩爆破炮孔布置示意图如图 2 所示。信号 S1 和信号 S2 是同次爆破不同位置监测得到的爆破振动信号,信号 S1 和信号 S2 的爆破时程曲线如图 3 所示。

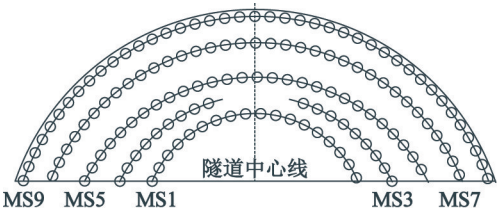
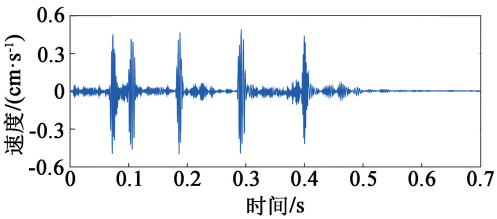
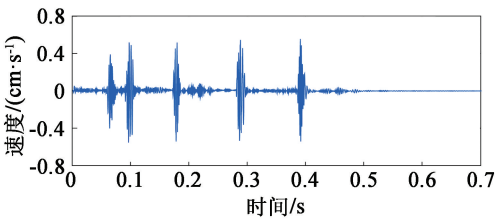


图 2 I 部围岩爆破炮孔布置

Fig. 2 Layout of blasting holes in Part I surrounding rock



(a) 信号 S1



(b) 信号 S2

图 3 I 部实测爆破振动信号的时程曲线

Fig. 3 Time history curves of measured blasting vibration signal in Part I

3 基于 EP-CEEMDAN-PED 算法的扩挖爆破网络延时分析

通过 EP-CEEMDAN-PED 算法计算 I 部围岩爆破起爆网络实际延期时间。对图 3 中的信号 S1 进行分解,得到如图 4 所示的 IMF 分量,以 f 表示。可发现每个 IMF 分量从高频向低频依次排列,EMD 模态混淆和端点效应都得到了有效抑制。

为使 EP-CEEMDAN-PED 算法得到的 IMF 分量的物理意义更明晰,且分解结果能有效控制 EMD 模

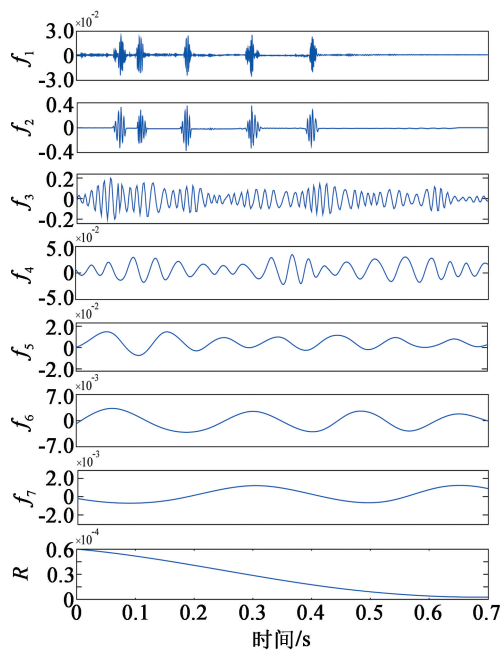


图 4 基于 EP-CEEMDAN-PED 算法得到的 IMF 分量
Fig. 4 IMF componetns based on EP-CEEMDAN-PED algorithm

态混淆和端点效应,特对图 3 中信号 S1 进行 EMD,得到图 5 所示结果。可发现, f_1 和 f_2 是未能除去在检测中混入的噪声; f_3 f_4 f_5 和 f_6 是重点频带,其中 f_3 高频模态混淆严重, f_4 相对稳定, f_5 左端点出现发散, f_6 在 0.3 ~ 0.6 s 存在向低频发展的趋势; f_7 右端点发散; f_8 f_9 出现了模态分裂的现象(模态混淆的另一种现象)^[15]。

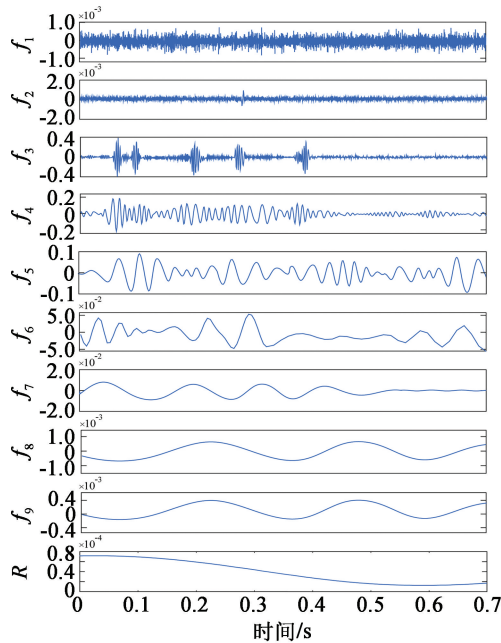


图 5 基于 EMD 算法得到的 IMF 分量
Fig. 5 IMF components based on EMD algorithm

对比图 4 和图 5 得出,EP-CEEMDAN-PED 算法分解结果可清晰地展示实测爆破振动数据内部蕴含的信号频率信息,将高频、中频和低频清晰地区分,噪声信号引起的模态混淆和算法本身存在的端点效应都得到了很好的抑制。未经处理得到的 IMF 分量会丢失真实的爆破地震波细节信息,导致时频提取精度大打折扣,而且对 IMF 分量进行 Hilbert 变换得到的瞬时频率有可能不具备实际物理意义。因此,对 EMD 进行模态混淆和端点效应抑制是十分有必要的,经过端点效应和模态混淆抑制将会提高 IMF 的分解精度,得到物理意义更清晰的 IMF 分量。

观察图 2 并进一步分析可发现: I 部围岩爆破设计了 5 段起爆,每一段雷管起爆势必会在其时程曲线上产生一定幅度的突变;图 3 中的信号 S1 也出现了 5 次突变,可将每次突变认为是一次能量的叠加。通过采用 Hilbert 变换对典型 IMF 分量进行包络求解,计算每次突变峰值对应时间点之间的时间间隔,便可得到实际网络延时时间参数。

每个 IMF 分量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的时频能量细节信息,确定该分量为典型 IMF 分量。提取典型 IMF 分量的幅值包络变化曲线。包络峰值点对应的时间节点表示爆破网络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,即可得到实际网络延期时间。

计算图 4 中信号 S1 单个 IMF 分量所蕴含的能量,进一步分析单个 IMF 分量能量占总能量的比例,将计算结果列于表 1。

表 1 基于 EP-CEEMDAN PED 算法得到的信号 S1 各 IMF 分量的能量及总能量占比

Tab.1 Energy and energy proportion of IMF components of Signal S1 based on EP-CEEMDAN-PED algorithm		
分量	能量水平	占总能量比例/%
f_1	3.616×10^{-2}	5.513
f_2	3.734×10^{-1}	56.928
f_3	2.087×10^{-1}	31.818
f_4	3.073×10^{-2}	4.685
f_5	1.649×10^{-3}	0.251
f_6	4.149×10^{-3}	0.633
f_7	1.127×10^{-3}	0.172

观察表 1 不难发现,本次爆破能量最大的 IMF 分量是 f_2 ,对 f_2 进行包络提取,得到如图 6 所示的包

络线。

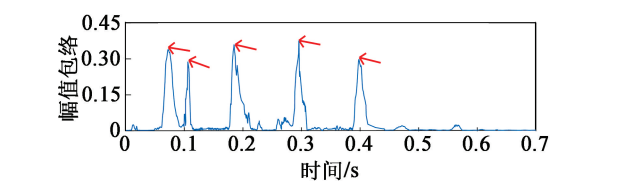


图 6 f_2 幅值包络线
Fig. 6 Amplitude envelope of f_2

观察图 6, 可发现 5 个明显的峰值, 出现的时刻分别为 0.072 2、0.105 7、0.184 0、0.294 3、0.397 6 s, 表明本次爆破由 5 段爆破地震波叠加而成。同样的方式, 可计算信号 S2 能量最大的分量 f_3 的包络线, f_3 的幅值包络线如图 7 所示。观察图 7, 也可发现 5 个明显的峰值, 出现的时刻分别为 0.059 8、0.093 1、0.173 6、0.282 5、0.386 6 s。

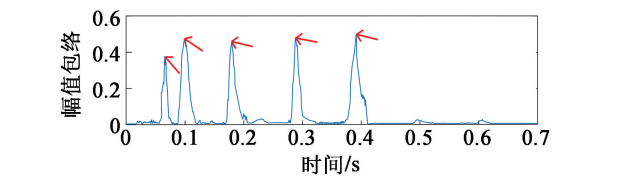


图 7 f_3 幅值包络线
Fig. 7 Amplitude envelope of f_3

进一步分析, 将厂家提供的雷管理论延时和计算得到的信号 S1 和信号 S2 的实际延时列于表 2。

观察表 2 可发现, 基于 EP-CEEMDAN-PED 算法得到的信号 S1 和信号 S2 的爆破网络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, 在实际施工中的延期时间满足要求, 使用此批次雷管进行爆破, 能确保 I 部围岩微差爆破顺利进行。比较两个信号 S1 和 S2 计算得到的实际延期时间可以发现, 这两个信号得到的实际延期时间之间误差较小, 具有较好的一致性。说明基于 EP-CEEMDAN-PED 算法的扩挖爆破网络延时分析是可行的, 侧面验证了此方法的有效性。

表 2 雷管理论延时和实际延时对比

Tab. 2 Comparison between theoretical delay time and actual delay time of detonators

段别	名义时间	误差范围	段别区间	理论延时	S1 实际延时	S2 实际延时
MS1	0	0.0~12.5				
MS3	50.0	37.5~62.5	MS1~MS3	25.0~62.5	33.5	33.3
MS5	110.0	92.5~130.0	MS3~MS5	30.0~92.5	78.3	80.5
MS7	200.0	175.0~225.0	MS5~MS7	45.0~122.5	110.3	108.9
MS9	310.0	280.0~345.0	MS7~MS9	55.0~170.0	103.3	104.1

进一步分析图 6 可发现, 本次爆破中, 5 段地震波信号的幅值差别不大。根据 Matlab 编程对图 3 中的 S1 实测爆破振动信号进行分离, 得到 5 段子信号。假设各子信号的波形振幅、频率大致相同, 则可用同一子信号代替。图 8 为分离出来的子信号。

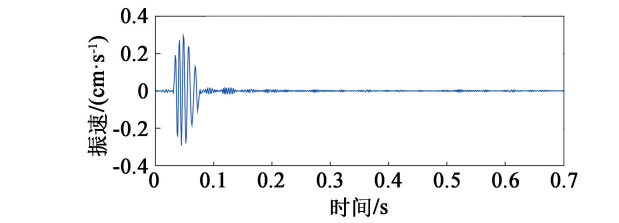


图 8 子信号速度时间历程曲线
Fig. 8 Speed time history curve of sub signal

通过干扰降振法确定合理的微差时间间隔。合理的微差时间间隔能使微差爆破振动的强度大幅度降低。对图 8 所示子信号进行不同微差时间间隔的叠加, 得到如图 9 所示的叠加后的信号峰值振速和微差时间对应图。

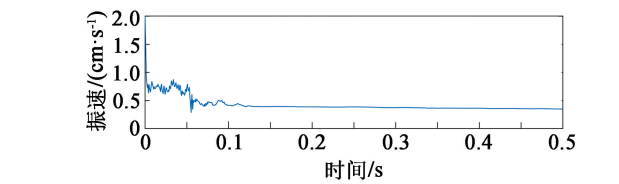


图 9 不同微差时间对应的峰值振速
Fig. 9 Velocity peak corresponding to different millisecond time

观察图 9 可发现, 微差时间间隔对爆破振动的强度具有很大影响。当微差时间间隔小于 3.17 ms 时, 5 段子信号为一次齐发, 爆破振动效应达到最大, 此时振幅为 5 段爆破叠加后的结果; 当微差时间间隔处于 55.14 ~ 57.93 ms 时, 微差爆破产生的振幅最小, 减振效果最好; 当微差时间间隔处于 3.17 ~ 136.36 ms 之间时, 5 段子信号叠加后, 信号峰值振速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

136.36 ms 时,可发现叠加后信号峰值振速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。

综上,Ⅰ部围岩非电起爆毫秒延时爆破最合理的爆破微差时间间隔是 55.14 ~ 57.93 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振速最小,减振效果最好。

通过上述研究可发现,干扰降振法的使用条件相对苛刻,需要满足一次爆破各段子信号之间幅值、频率相差不大这一条件。本工程近似满足该条件,因此计算得到的合理微差时间间隔具有一定的理想性。实际工程中,可以应用该方法进行合理微差时间辅助求解,用于优化爆破网络设计。

观察信号 S1 和信号 S2 计算得到的实际微差时间间隔可发现,基于 EP-CEEMDAN-PED 算法得到的爆破网络延时计算结果和起爆网络设计段别一一对应,从侧面反映出 EP-CEEMDAN-PED 算法求得的爆破网络延时结果具有科学性和真实性。将实际爆破网络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)CEEMDAN-PED 算法将 CEEMDAN 能有效控制低频趋势项的能力和 PED 对高频噪声的抑制能力相结合,能够有效抑制 EMD 模态混淆。

2)EP-CEEMDAN-PED 算法能有效克服 EMD 固有的端点效应和模态混淆现象,得到的 IMF 分量更稳定,更能反映真实的爆破振动属性。

3)将 EP-CEEMDAN-PED 算法得到的爆破网络延时计算结果和起爆网络设计段别一一对应,从侧面反映出 EP-CEEMDAN-PED 算法求得的爆破网络延时结果具有科学性。

4)通过干扰降振法可初步计算Ⅰ部围岩非电起爆毫秒延时爆破最合理爆破微差时间间隔为 55.14 ~ 57.93 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振速最小,减振效果最好。该结果是建立在假设的基础上,具有一定的理想性。在实际工程中可作为辅助条件,用于爆破网络优化。

参 考 文 献

[1] 张在晨,林从谋,李家盛,等.我国公路隧道改扩建技术发展现状及研究展望[J].隧道建设(中英文),

2022,42(4):570-585.

ZHANG Z C, LIN C M, LI J S, et al. Development status and prospect of highway tunnel rehabilitation and expansion in China[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2022,42(4):570-585.

[2] 吴慧,汪良忠.复杂环境下既有隧道扩挖爆破技术[J].工程爆破,2019,25(4):39-44.

WU H, WANG Y Z. Expansion blasting technique of existing tunnel in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2019, 25 (4):39-44.

[3] 张亮,孙新建,孟佳.基于 CEEMD-HHT 方法确定隧洞爆破网络实际延时时间[J].爆破,2017,34(1):27-32.

ZHANG L, SUN X J, MENG J. CEEMD-HHT method to identify real delay time in millisecond blasting[J]. Blasting, 2017, 34(1):27-32.

[4] 孙新建,张亮,孟佳.基于 EEMD-HHT 方法的隧洞爆破网络延时分析[J].工程爆破,2016,22(4):7-10,27.

SUN X J, ZHANG L, MENG J. Delay time analysis of tunnel blasting network based on EEMD-HHT method [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(4):7-10,27.

[5] 龚敏,邱燧可可,孟祥栋,等.基于 HHT 的雷管实际延时识别法在城市环境微差爆破中的应用[J].振动与冲击,2015,34(10):206-212.

GONG M, QIU Y K K, MENG X D, et al. Identification method of detonator's actual firing time delay based on HHT and its application in millisecond blasting under urban environment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(10):206-212.

[6] 徐振洋,杨军,陈占扬.高精度雷管逐孔起爆地震信号的精确时频分析[J].煤炭学报,2013,38(增刊2):331-336.

XU Z Y, YANG J, CHEN Z Y. Precise time-frequency analysis on seismic signal by hole initiation using high-precision detonators[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Suppl.2):331-336.

[7] 田振农,孟祥栋,王国欣.城区隧道电子雷管起爆错相减震机理分析[J].振动与冲击,2012,31(21):108-111.

TIAN Z N, MENG X D, WANG G X. Mechanism analysis of fault-phase vibration reduction for tunnel blasting initiated by electronic detonators in city area[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21):108-111.

[8] 李夕兵,张义平,刘志祥,等.爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J].爆炸与冲击,2005,25(6):528-535.

LI X B, ZHANG Y P, LIU Z X, et al. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal

[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 528-535.

[9] 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 Series A, 1998, 454(3): 903-995.

[10] 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.

SUN M. Improved HHT algorithm for blasting seismic wave signal processing and its application[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan),2021.

[11] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE Signal Processing Society, 2011: 4144-4147.

[12] CHEN S J, SHANG P J, WU Y. Multivariate multiscale fractional order weighted permutation entropy of nonlinear time series [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 515: 217-231.

[13] 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.

LI J, LI Q. 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.

[14] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 21-26.

ZHENG J D, CHENG J S, YANG Y. Modified EEMD algorithm and its applications [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(21): 21-26.

[15] 郑旭, 郝志勇, 卢兆刚, 等. 基于 MEEMD 的内燃机机体活塞敲击激励与燃烧爆发激励分离研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 109-113.

ZHENG X, HAO Z Y, LU Z G, et al. Separation of piston-slap and combustion shock excitations via MEEMD method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6):109-113.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部