

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0154

EEMD 修正爆破加速度零漂信号中的 最优白噪声系数*

王志亮, 陈贵豪, 黄佑鹏

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了有效降低振动信号误差以提高数据的可信度, 先针对花岗岩爆破试验中的加速度零漂信号, 使用集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 与高低频处理相结合的方法进行修正; 接着, 根据信号冲击响应谱提出表征修正前后频域平均偏差幅度的修正指数; 最后, 基于频域和时域分别讨论了不同白噪声系数范围内信号的修正效果。分析表明: EEMD 方法能够有效地消除爆破加速度信号的零漂现象, 但对积分后速度信号的零漂趋势改善有限; 随着白噪声系数增大, 不同频段上修正指数均不同程度地增大, 二者呈现幂指数关系; 根据不同频段上的修正指数分析, 可以确定不同零漂加速度信号对应的最优白噪声系数范围。本文提出的修正指数可为 EEMD 方法处理加速度零漂信号时白噪声系数的合理选取提供参考。

关键词: 爆破信号; 零漂; EEMD; 白噪声系数; 冲击响应谱; 修正指数

中图分类号: O384 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

在岩石钻孔爆破过程中, 爆源近区岩石的冲击振动信号具有持时短、频带宽的特点^[1]。目前广泛使用的压电式加速度传感器在采集此类信号时, 大多会出现“零漂”现象^[2-6]。造成压电传感器出现零漂误差的原因主要有^[2-3]: (1) 受到高频冲击波作用时, 传感器由于自身谐振反应导致内部压电晶体磁畴变化, 这种变化反映到输出信号上, 出现零漂现象; (2) 高冲击作用下, 传感器压电元件受到的作用力超过其在装配时受到的预压力, 进而造成压电晶体与惯性质量块之间出现微量运动, 造成零漂现象; (3) 传感器的质量-弹簧系统受到高冲击作用时的动刚度不足会导致其幅值线性度变差, 可能造成零漂; (4) 受限于传感器压电材料和制造工艺, 信号放大器电路易过早进入饱和堵塞状态, RC 电路放电时间延长到冲击结束后, 表现为零漂; (5) 传感器基座与被测物体表面连接刚度不足造成零漂误差。由于爆破过程中岩石结构会产生不可逆的损伤, 因而每次爆破信号的采集是单次性的。所以, 如果爆破振动信号采集过程中出现零漂现象, 采用合理方法对误差信号进行修正非常有必要^[4-6]。

近年来, 不少学者对于零漂信号中产生的趋势项去除方法进行研究: 龙源等^[6]基于经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)、小波法、最小二乘法分别研究了爆破震动测试信号中趋势项的去除算法, 并对三种方法去除趋势项效果及重构信号的时频特征进行对比分析, 指出多项式趋势项中的多项式阶数选取对于信号的修正效果有较大影响; 王燕等^[7]采用 EMD 法和最小二乘法相结合, 以侵彻结束后的零漂趋势作为侵彻过程中的零漂趋势, 对侵彻不同介质的实测过载数据进行去除零漂的处理, 通过对修正后的过载数据进行一次积分和二次积分, 得到的侵彻速度和位移与实测结果吻合较好; 王济^[8]研究发现滑动平均法应用较为简便, 但其本质仅是为了曲线基线回归零点, 在处理信号时有一定的盲目性; 谢全民等^[9]认为小波法需要针对振动信号特点事先选取合适的小波基函数和分解层数; 吴祖堂等^[10]通过理论分析和实验验证得出冲击结束后的压电式传感器信号呈指数形式衰减的结论, 但是信号的零漂往往在冲击信号达到峰值前就已经形成, 冲击结束后信号的指数衰减规律和冲击过程中的趋势项类

* 收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51579062, 51379147)

第一作者: 王志亮(1969—), 男, 博士, 教授, cvewzL@hfut.edu.cn。

型是否一致,目前尚无定论;Huang 等人^[11]揭示 EMD 方法及其改进算法——集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法的基函数都来自于其信号本身,对于信号的先验性信息要求较低,在处理爆破冲击这类非平稳信号时优势明显。实际上,EEMD 方法在 EMD 方法基础上,通过添加在频谱上均匀分布的白噪声有效地解决了 EMD 方法分解得到的固有模态分量(intrinsic mode function, IMF)中存在的模态混叠和端点震荡问题^[12],故认为 EEMD 方法处理零漂信号的效果优于 EMD 方法。但 EEMD 方法中需要给出添加白噪声的系数,目前没有确定的量化指标去评价零漂信号的修正效果,从而无法确定白噪声系数的合理取值范围。

基于此,本文先给出不同白噪声系数下 EEMD 结合高低频处理方法修正岩石爆破中加速度零漂信号的过程;再辅以冲击响应谱分析,提出表征修正前后频域平均偏差幅度的修正指数 \bar{D} ;在修正指数分析的基础上确定 EEMD 修正爆破零漂信号中白噪声系数的最优取值范围,再用加速度信号积分后的速度信号对比讨论最优噪声系数范围的合理性,最后对比 EEMD 法与滑动平均法,讨论二者的优点与不足。

1 算法原理

EEMD 是针对 EMD 算法中所存在的不足进行改进的算法,EEMD 算法实现过程如图 1 所示^[11]。EEMD 主要利用高斯白噪声在频谱上均匀分布的特性来弥补原始信号中一些缺失的尺度,使得不同时间尺度的信号自动分解到其相适应的参考尺度上去,从而有效地抑制 EMD 分解信号时存在的模态混叠问题。由于添加的白噪声总体均值为零,所以将多次添加白噪声后所求得的 IMF 分量的集合平均值作为最终结果,以抵消白噪声对于真实 IMF 分量的影响。

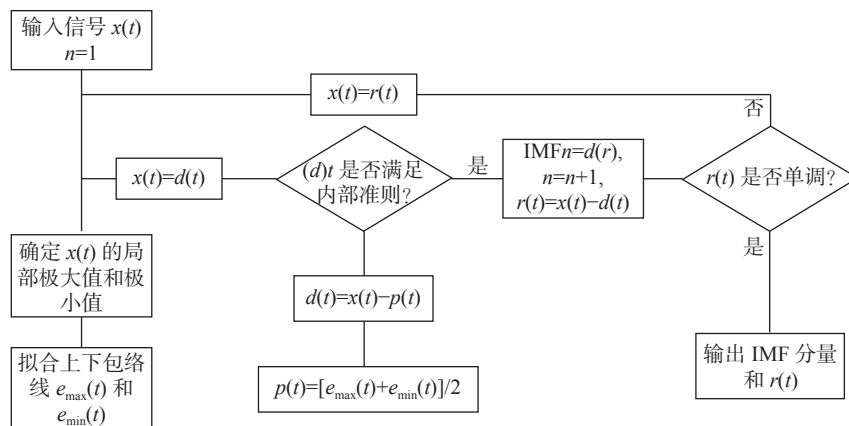


图 1 EMD 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of EMD algorithm

EEMD 算法的实现步骤如下^[12]。

(1) 将随机高斯白噪声信号 $n_j(t)$ 添加到原始信号 $x(t)$:

$$n_j(t) = k\sigma, \quad x_j(t) = x(t) + n_j(t) \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{1}$$

式中: $x_j(t)$ 是第 j 次加噪信号, k 、 m 分别是添加白噪声的系数和总次数, σ 是原始信号的标准差。

(2) 用 EMD 方法将 $x_j(t)$ 分解成一系列 IMF 分量 $c_{i,j}$ 和余项 δ_j :

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^{g_j} c_{i,j} + \delta_j \quad i = 1, 2, \dots, g_j \tag{2}$$

式中: $c_{i,j}$ 和 δ_j 分别为第 j 次加入白噪声后信号分解得到的第 i 个 IMF 分量和余项, g_j 为第 j 次加入白噪声后信号的分解尺度。

(3) 如果 $j < m$, 则重复步骤(1)和(2)。

(4) 获取 $I = \min(g_1, g_2, \dots, g_m)$, 计算 I 相应的分解的 IMF 的集合平均值作为最终结果:

$$c_i = \left(\sum_{j=1}^m c_{i,j} \right) / m \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (3)$$

2 信号处理

2.1 信号介绍

本文所处理的零漂信号来源于花岗岩爆破试验, 其数据采集过程和时程曲线分别如图 2 和图 3 所示。爆源为 1.5 g 太安炸药, 爆速约为 $6\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 3 中加速度信号 A 测点的爆心距约为 60 cm。信号放大器的采样频率为 $5 \times 10^5\text{ Hz}$, 加速度传感器的频响范围是 $40 \sim 4 \times 10^4\text{ Hz}$, 设置低通 $3 \times 10^4\text{ Hz}$ 。由图 3 可以看出峰值加速度超过了 $4 \times 10^4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 同时加速度信号在冲击结束后没有迅速归零, 而是持续一段时间后才缓慢归零, 这是高速冲击环境下的典型零漂信号。

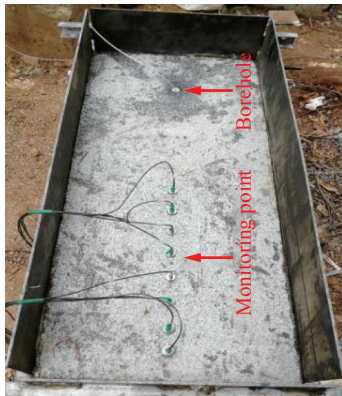


图 2 试验与数据采集

Fig. 2 Test and data collection

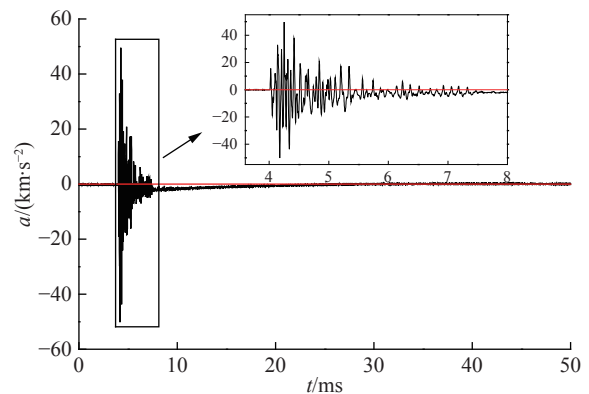


图 3 爆破加速度信号 A

Fig. 3 Blast acceleration signal A

2.2 白噪声系数范围

Wu 等^[12] 在分析 EEMD 理论时, 建议 k 近似取 0.20; Jiang 等^[13] 用 EEMD 方法对振动信号分析时指出, 如果信号主频段由高频分量组成, 则 k 的取值范围建议为 $0 \sim 0.20$ 。

岩石的爆破试验结果表明^[14-15], 岩石质点的振动主频率与炸药装药量成反比关系, 与炸药爆速成正比关系; 装药深度对振动主频率也有很大影响, 深孔爆破产生的地震波主频较低, 浅孔爆破产生的地震波主频较高。本文爆破试验的装药量小、深度浅、炸药爆速大且传播距离短, 故认为其主频段主要由高频分量组成。因此, 白噪声系数 k 选在 $0 \sim 0.20$ 范围内讨论。

2.3 修正过程

2.3.1 EEMD 分解

为分析白噪声系数对于 EEMD 方法修正零漂信号的影响, 在 $0 \sim 0.20$ 范围内选取 0.05、0.10、0.15 和 0.20 四个 k 值对应的白噪声添加到原始信号中进行 EEMD 分解, 添加次数均为 100 次。图 4 给出 $k=0.10$ 时分解得到的 IMF 分量和余项 δ 。

2.3.2 IMF 分量频谱分析

将分解得到的 IMF 分量分别进行 FFT 变换, 可得各 IMF 分量的频谱信息。不同白噪声系数下分解得到的各 IMF 分量的主频如表 1 所示。限于篇幅, 仅给出部分 IMF 分量的频谱图, 如图 5 所示。

从表 1 可以看出, 白噪声系数对前两阶 IMF 分量的主频影响很小, 前两阶 IMF 分量主频均在 $18\,800\text{ Hz}$ 左右。结合图 5(a) 可知, 白噪声系数主要影响其主频幅值, 系数越大, 主频幅值越小; 从

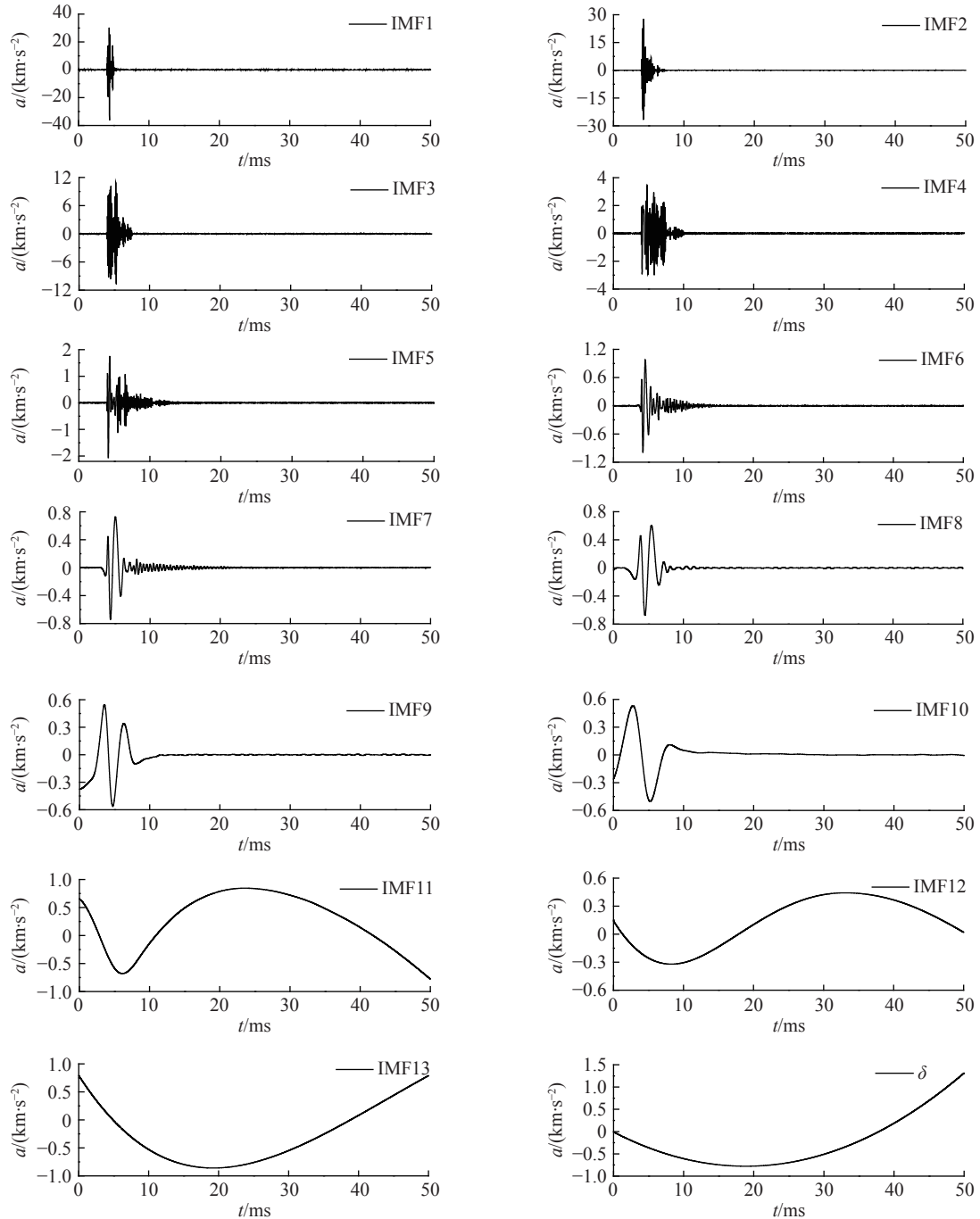


图 4 EEMD 分解信号 ($k=0.10$)

Fig. 4 Signals decomposed by EEMD method ($k=0.10$)

IMF2 至 IMF11 分量, 随着分解阶数的增加, IMF 分量主频迅速衰减, 且不同白噪声系数下分解的同阶 IMF 分量主频与白噪声系数呈现正相关关系; IMF11 之后的分量的主频降至低频段, 且基本保持不变。同时, 从图 5 可看出, 相同白噪声系数下分解得到的 IMF 分量随着分解阶数增加, 其频段降低, 频带渐窄。

2.3.3 IMF 分量处理

(1) 低频处理。由表 1 知, IMF11 至 IMF13 分量和余项 δ 的主频集中在 40 Hz 以下, 低于试验中加速度传感器的频响下限 (40 Hz), 故认为其可信度很低。因此, 将 IMF11 至 IMF13 分量和余项 δ 消除。

(2) 高频处理。由于原始信号就含有大量高频噪声, 故对不同白噪声系数下的 IMF1 至 IMF10 分量

表 1 不同白噪声系数下 IMF 分量主频

Table 1 Dominant frequencies of IMF components under different white noise coefficients

IMF分量	主频/Hz				IMF分量	主频/Hz			
	$k=0.05$	$k=0.10$	$k=0.15$	$k=0.20$		$k=0.05$	$k=0.10$	$k=0.15$	$k=0.20$
IMF1	18 860	18 740	18 760	18 760	IMF8	440	540	600	640
IMF2	18 880	18 800	18 840	1 800	IMF9	240	280	300	320
IMF3	7 500	8 420	8 480	8 500	IMF10	100	200	220	220
IMF4	5 100	7 520	7 520	7 520	IMF11	40	40	40	40
IMF5	2 280	3 180	5 160	5 160	IMF12	20	20	20	20
IMF6	1 240	1 360	1 560	2 340	IMF13	20	20	20	20
IMF7	660	740	800	840	δ	20	20	20	20

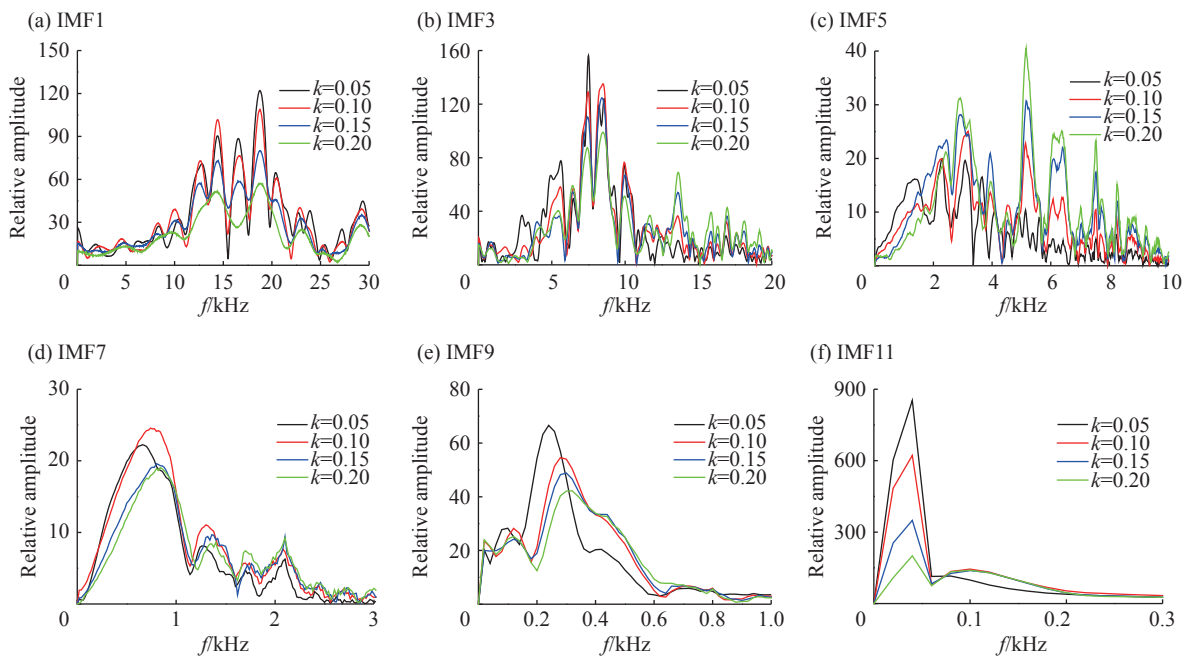


图 5 部分 IMF 分量频谱图

Fig. 5 Spectrograms of partial IMF components

分别进行小波阈值去噪处理, 阈值由 heursure 函数自适应获取, 去噪方式采用软阈值处理^[16-17]。

分别对处理过的分量 IMF1 至 IMF10 进行重构, 即可得到不同白噪声系数下 EEMD 修正后的爆破冲击信号。信号 A 修正后的四个加速度信号都很好消除了零漂趋势, 但由于彼此在加速度时程图上的波形差异很小导致难以区分, 故仅给出白噪声系数为 0.10 时的修正信号, 如图 6 所示。

3 修正信号分析

3.1 频域分析

图 7 给出了修正前后信号的冲击响应谱。从冲

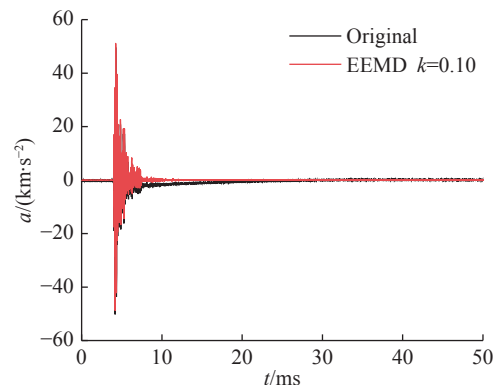


图 6 EEMD 修正前后的信号

Fig. 6 Signals before and after EEMD correction

击响应谱上来看,四个修正的信号与原始信号 A 的频域“差异”主要集中在 4 000 Hz 以下。在 4 000 Hz 以上的频段,修正前后的频域“差异”不明显,很好的保留了原始信号的峰值和变化规律。需要指出,这里的“差异”是指处理后的信号与原始信号在冲击响应谱幅值上的相对偏差度,而非绝对偏差值。由于 40 Hz 以下频段已经超出加速度传感器的频率响应范围,这部分原始信号认为是不可信的,采用的修正方法应将这部分的信号尽可能削弱,同时应该尽量保留中高频段可信信号的频谱特征。因此,为兼顾防止信号中高频段过度修正和尽量削弱低频失信段的目的,需要定义一个具体指标来评价信号的修正效果。

3.1.1 修正指数定义

设所选频段的频率序列为 $\{f_1, f_2, \dots, f_l\}$, 对应的冲击响应谱序列为 $\{P_1, P_2, \dots, P_l\}$, 其中 f 为频率, P 为每个频率对应的冲击响应谱幅值, l 为频段的频率点总数。则反映信号修正前后冲击响应谱平均偏差幅度的修正指数 \bar{D} 定义如下:

$$\bar{D} = \left[\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |(P_i - P'_i) / P_i| \right] \times 100\% \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

式中: P_i 和 P'_i 分别是原始信号和修正信号在所选频段上的第 i 个频率点的冲击响应谱幅值。

3.1.2 指数应用

根据加速度传感器频响范围和图 7 中的加速度冲击响应谱, 从整个频段中选出几个特殊频率, 分别是传感器频响下限 40 Hz、修正前后响应谱上存在明显差异频段的上限频率 4×10^3 Hz 和响应谱峰值对应的频率 1.9×10^4 Hz。先将整个频段分为 2 个分段: 失信频段 $0 \sim 40$ Hz、置信频段 $40 \sim 3 \times 10^4$ Hz, 再将置信频段分为三个分段: $40 \sim 4 \times 10^3$ Hz、 $4 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^4$ Hz 和 $1.9 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ Hz, 将这五个频段中的修正指数 \bar{D} 分别记为 \bar{D}_1 、 \bar{D}_2 、 \bar{D}_3 、 \bar{D}_4 和 \bar{D}_5 。

为了评价不同白噪声系数下信号在不同频段上的修正效果, 在 $(0, 0.20]$ 中以 0.001 为间隔取 200 个 k 值进行信号处理。原始信号 A 在这些白噪声系数下处理后, 可得 200 个修正信号。然后, 将这些修正信号与原始信号的冲击响应谱代入式 (5) 计算, 即可得到不同白系数噪声下相应频段的修正指数 \bar{D} , 如图 8 所示。在给出的五个频段上, 修正指数与白噪声系数都呈现近似幂指数的关系, 可假定修正指数与白噪声系数的函数关系为:

$$\bar{D} = a_0 e^{-a_1 k} + b \quad (5)$$

式中: a_0 、 a_1 、和 b 为常数。

不同频段的拟合曲线及拟合函数如图 8 所示。拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.95, 拟合效果良好, 可以认为修正指数与白噪声系数符合式 (5) 的幂指数关系。根据不同频段上修正指数及其拟合函数图, 可得不同频段上修正指数 \bar{D} 的取值范围, 如表 2 所示。其中, 修正指数下限 $\bar{D}_{\min} = (a_0 + b)\%$, 修正指数上限 $\bar{D}_{\max} = b\%$ 。

由于低频趋势项不仅会导致信号基线漂移, 还使得加速度信号积分后的速度信号严重失真^[18-19], 故 EEMD 方法处理零漂信号时, 首先是保证较好地去掉其低频趋势项, 其次是控制修正后信号与原始信号在高频段上偏差尽可能小。故针对信号中失信频段 $0 \sim 40$ Hz 的修正指数上限 \bar{D}_{\max} , 将其值的 $90\% \pm$

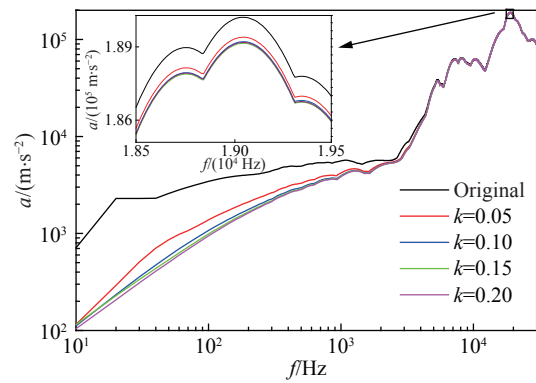


图 7 不同白噪声系数下 EEMD 修正信号的冲击响应谱
Fig. 7 Shock response spectra of signals modified by EEMD under different white noise coefficients

2% 分别代入拟合函数中去, 可得两个白噪声系数: $k_1 = 0.056, k_2 = 0.066$ 。

结合图 8 与表 2, 对不同的噪声系数 k 取值范围作如下讨论:

(1) $0 < k < k_1$ 。在此区间内, 失信频段上的修正指数随白噪声系数变化的幅度很大, 拟合函数最大值小于相应的修正指数上限值的 88%。故认为在此区间失信频段修正效果不够稳定, 且对信号失信频段的削弱效果不足, 不满足处理方法对于较好去除其低频趋势项的要求。

(2) $k_1 \leq k \leq k_2$ 。在此区间内, 失信频段上的修正指数随白噪声系数变化的幅度相比于前一区间减小很多。修正指数平均值达到 80.63%, 比失信频段的修正指数下限 8.86% 提高了 810%, 已经达到修正指数上限值的 92.98%。虽然在置信频段及其三个分段上, 修正指数会随着噪声系数取值区间的上升而增大, 可能导致在这些频段上出现信号修正过度的问题, 但在这四个频段上前后两个区间的修正指数平均值分别只相差 0.69%、3.73%、0.30% 和 0.13%, 修正指数上升的幅度不大。故认为这个区间内修正后信号较好地去除了低频信号, 且在置信频段尤其是高频段的频域失真很小, 是可以接受的。

(3) $k_2 < k \leq 0.20$ 。这一区间与 $[k_1, k_2]$ 区间相比, 噪声系数的增大会使置信频段尤其是高频段的频域失真增大, 但与此同时信号失信频段的削弱效果不能得到有效提升, 白噪声系数增大的意义很小。

综上所述, 可以确定信号 A 对应的最优的白噪声系数 k 取值区间为 $[0.256, 0.066]$ 。

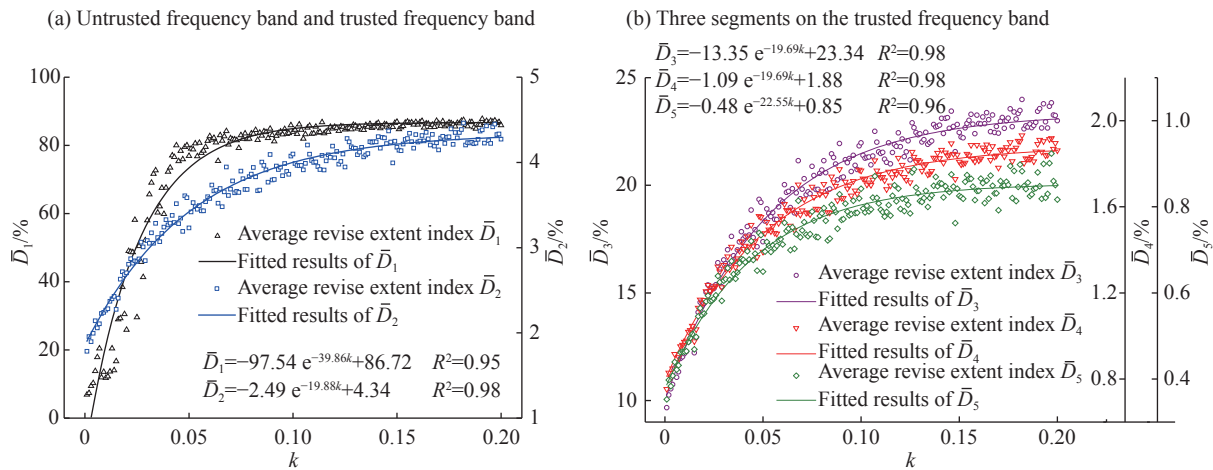


图 8 不同白系数噪声下不同频段上的冲击响应谱修正指数

Fig. 8 Correction indices of shock response spectra on different frequency bands under different white noise coefficients

表 2 不同频段修正指数范围

Table 2 Ranges of correction index on different frequency bands

频段/Hz	$\bar{D}_{min}/\%$	$\bar{D}_{max}/\%$	频段/Hz	$\bar{D}_{min}/\%$	$\bar{D}_{max}/\%$
(0, 40]	8.86	86.72	(4 000, 19 000]	0.79	1.88
(40, 30 000]	1.85	4.34	(19 000, 30 000]	0.37	0.85
(40, 4 000]	9.99	23.34			

3.1.3 修正指数验证

为了验证修正指数 \bar{D} 在 EEMD 修正零漂信号中确定最优白噪声系数范围方面的适用性, 现选取另一花岗岩试样上测得的零漂信号 B, 采用 2.3 节所示的方法进行处理, 得到不同噪声系数下不同频段上的修正指数分布, 如图 9 所示。零漂信号 B 和白噪声系数 $k=0.10$ 时的修正信号如图 10 所示。

通过图 9 看出, 随着噪声系数的提高, EEMD 方法修正后信号与原始信号 B 在冲击响应谱上的差异呈上升趋势, 修正指数与噪声系数依然呈现如式 (5) 的幂指数函数关系。但是当噪声系数 k 上升到

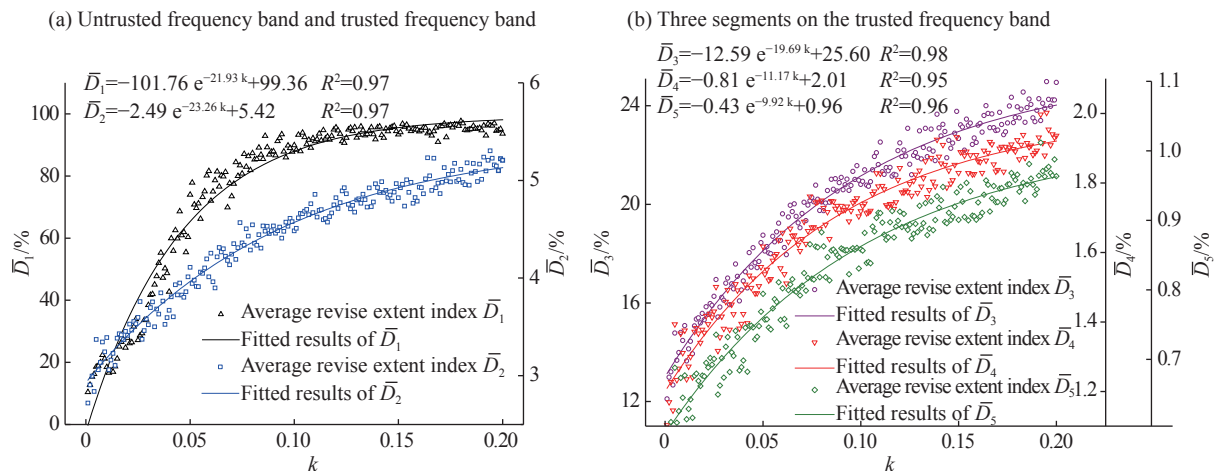


图 9 不同白系数噪声下不同频段上的冲击响应谱修正指数

Fig. 9 Correction indices of shock response spectrum on different frequency bands under different white noise coefficients

0.10 之后, EEMD 方法对失信频段 0~40 Hz 上信号的频域削弱几乎不再增加, 但是对于置信频段上的三个分段上信号的频域削弱依然在增加, 这也就意味着在 (0.10, 0.20) 范围内, 增大噪声系数不能进一步削弱失信频段信号, 反而会导致修正后信号在中高频失真加大。如采用 3.1.2 节中的方法, 同样可以确定一个大致的最优噪声系数取值范围, 即为 [0.098, 0.114]。

3.2 时域分析

从图 3、图 6 和图 10 中可以看出, 仅从加速度零漂信号本身来说, EEMD 处理零漂信号 A 和 B 后得到的信号均很好地去除了原始信号中的零漂趋势项, 其波形在爆破冲击结束后都很快回归基线, 保留了原始爆破信号的衰减特征。

事实上, 零漂偏差在加速度信号上表现得不如加速度时域积分后得到的速度信号显著, 这是因为不仅加速度信号基线漂移会导致积分后速度信号基线漂移严重, 而且原始信号上下振幅的不对称也会加剧积分曲线漂移。因此, 对于加速度信号 A 及其在不同白噪声系数下处理得到的修正信号进行积分, 得到的速度信号如图 11 所示。

图 11 表明 EEMD 方法对于速度信号的零漂失真有明显改善: 随着白噪声系数的提高, 修正后的速度曲线逐渐靠近零点。当 k 值大于 0.60 时, EEMD 对于速度信号的零漂修正效果几乎没有变化, 这也与图 7(a) 中失信频段的修正指数分布图相契合。同时, 这也表明通过修正指数分析确定信号 A 的最优白噪声系数范围 [0.056, 0.066] 是合理的: 将白噪声系数范围上调已经不能明显改善速度曲线零漂趋势; 而将白噪声系数范围下调, 速度曲线明显随之下滑, 零漂趋势加重。但是, 图 11 也表明了 EEMD 修正后的速度曲线无法完全消除零漂趋势, 优化的噪声系数也很难让速度曲线基线完全回归零点。

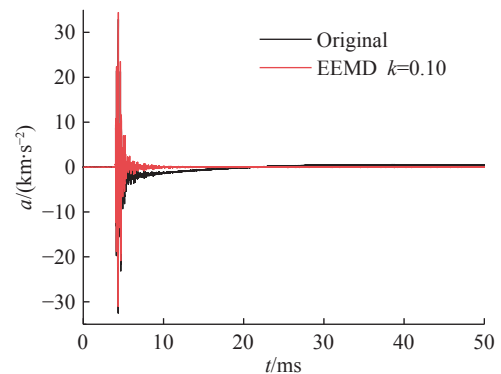


图 10 爆破加速度信号 B 及其修正信号

Fig. 10 Blast acceleration signal B and its corrected signal

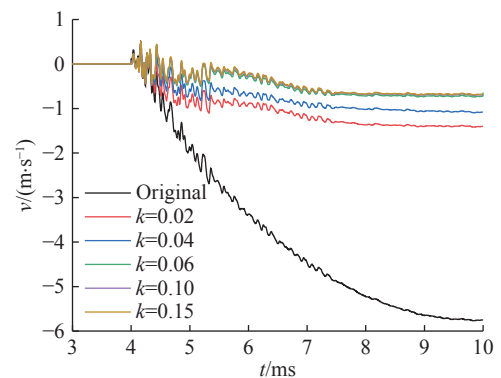


图 11 EEMD 修正前后速度曲线

Fig. 11 Velocity curves before and after correcting by EEMD

3.3 进一步讨论

以上的分析表明, EEMD 对于积分后的速度信号的零漂趋势去除得不够完善, 存在一定的局限性。仅是考虑让积分后速度信号基线完全恢复到零点上, 滑动平均法是一种简单有效的方法。影响滑动平均法去除信号零漂趋势的因素有两个^[8]: 平滑点数和滑动阶次。对加速度信号 A 进行平滑点数为 20 和滑动阶次为 10 的滑动平均法处理, 处理后的信号积分得到速度曲线如图 12 所示。图 11 和图 12 对比显示, 滑动平均法得到的速度曲线是优于 EEMD 的, 更符合爆破速度曲线的振动特征。

通过图 13 给出的原始信号以及两种方法处理后信号的冲击响应谱, 发现滑动平均法相对于 EEMD 方法在各个频段上频域损伤均更大。而冲击响应谱的低频部分, 往往反映了岩石自身大的位移或者应变, 其主要是由于零漂误差还是岩石自身的动力响应造成, 还难以界定。所以, 尽管滑动平均法很好地去除加速度信号积分后的速度信号的零漂趋势, 但这也会使得修正信号的频谱失真加重以及岩石自身的动力响应削弱。

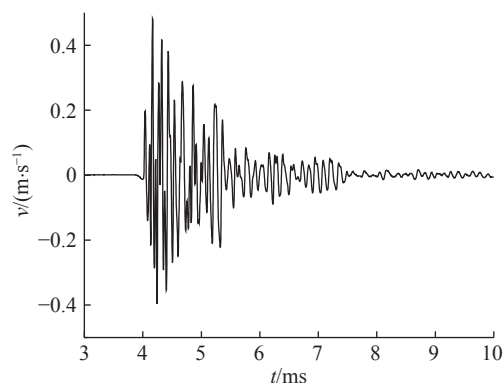


图 12 滑动平均法修正后速度曲线

Fig. 12 Velocity curve modified by sliding average method

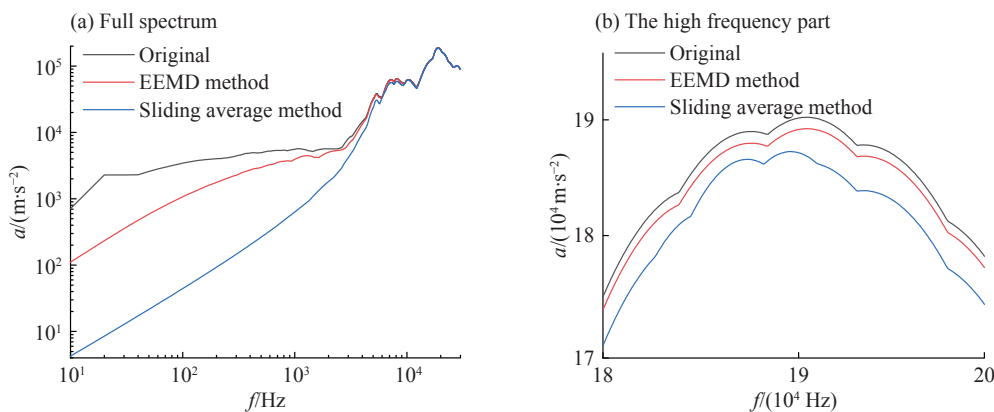


图 13 两种方法处理后信号与原始信号的冲击响应谱

Fig. 13 Shock response spectra of original signals and processed signals by the two methods

4 结 论

本文结合花岗岩的室外小型爆破试验, 对 EEMD 修正爆破零漂信号中最优白噪声系数范围进行了探析, 得出主要结论如下: (1) 利用 EEMD 方法并结合高低频处理能够较好地去除爆破加速度信号的零漂趋势, 是一种自适应且高效的处理方法; (2) 基于冲击响应谱定义的修正指数 \bar{D} , 能够较好地反映信号修正前后在冲击响应谱不同频段上的平均偏差幅度; 随着白噪声系数增大, 不同频段上修正指数 \bar{D} 均不同程度上升, 二者呈现相关性较高的幂指数函数关系; (3) 通过修正指数 \bar{D} 并结合对现场测试传感器的频响范围分析, 确定出加速度零漂信号对应的白噪声系数的最优取值范围, 优化的噪声系数使得 EEMD 法在最大程度削弱信号零漂趋势的同时尽量保留信号的频谱信息; (4) 优化 EEMD 法中的噪声系数只能改善加速度积分后速度信号的零漂趋势而无法将其彻底去除; 相对应的滑动平均法在速度信号的零漂修正效果上表现更好, 但同时也带来了修正前后频谱差异加大以及动力响应的过度削弱的问题。

参考文献:

- [1] 张耀平, 曹平, 高赛红, 等. 爆破振动信号的小波包分解及各频段的能量分布特征 [J]. *金属矿山*, 2007, 37(11): 42–47. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1250.2007.11.012.
ZHANG Yaoping, CAO Ping, GAO Saihong, et al. Wavelet packet decomposition of blasting vibration signals and energy distribution characteristics of frequency bands [J]. *Metal Mine*, 2007, 37(11): 42–47. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1250.2007.11.012.
- [2] 夏伟强, 马铁华, 范锦彪, 等. 压电式加速度传感器在高冲击环境下的零漂分析 [J]. *传感技术学报*, 2007, 20(7): 1522–1527. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2007.07.017.
XIA Weiqiang, MA Tiehua, FAN Jinbiao, et al. Analysis of zero-drift of the piezoelectric acceleration sensor in high-impact testing [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(7): 1522–1527. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2007.07.017.
- [3] 张文伟, 庞家志, 杨仕超, 等. 低失真爆炸冲击信号零漂分析和处理方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 509–516. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0251.
ZHANG Wenwei, PANG Jiazhi, YANG Shichao, et al. Zero-drift analysis and processing of explosion shock with low distortion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 509–516. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0251.
- [4] 郑水明, 周宝峰, 温瑞智, 等. 强震动加速度记录基线校正问题探讨 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(3): 47–50. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2010.03.011.
ZHENG Shuiming, ZHOU Baofeng, WEN Ruizhi, et al. Discussion on baseline correction of strong motion data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(3): 47–50. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2010.03.011.
- [5] 范锦彪, 祖静, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土目标减加速度信号的处理原则 [J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(4): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1194.2012.04.001.
FAN Jinbiao, ZU Jing, XU Peng, et al. Impact deceleration signal procession for concrete target penetration [J]. *Journal of Detection and Control*, 2012, 34(4): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1194.2012.04.001.
- [6] 龙源, 谢全民, 钟明寿, 等. 爆破震动测试信号预处理分析中趋势项去除方法研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(10): 63–68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.02.0093.
LONG Yuan, XIE Quanmin, ZHONG Mingshou, et al. Research on trend removing methods in preprocessing analysis of blasting vibration monitoring signals [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 63–68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.02.0093.
- [7] 王燕, 薛云朝, 马铁华. 基于 EMD 和最小二乘法的零漂处理方法研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(2): 118–122. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.02.002.
WANG Yan, XUE Yunzhao, MA Tiehua. Research on zero drift processing method using EMD and Least-Square [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(2): 118–122. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.02.002.
- [8] 王济. MATLAB 在振动信号处理中的应用 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2006: 73–82.
- [9] 谢全民, 龙源, 钟明寿. 基于小波、小波包两种方法的爆破振动信号对比分析 [J]. *工程爆破*, 2009, 15(1): 5–9. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2009.01.002.
XIE Quanmin, LONG Yuan, ZHONG Mingshou. Comparative analysis of blasting vibration signal based on wavelet and wavelet packets transform [J]. *Engineering Blasting*, 2009, 15(1): 5–9. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2009.01.002.
- [10] 吴祖堂, 杨德猛, 邹虹. 压电加速度传感器冲击测量中低频失真的理论分析与实验验证 [J]. *传感技术学报*, 2010, 23(11): 1586–1589. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.014.
WU Zutang, YANG Demeng, ZOU Hong. Theoretical analysis and validation of low frequency distortion of piezoelectricity accelerometer for shock measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(11): 1586–1589. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.014.
- [11] 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 and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.
- [12] 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. DOI: 10.1142/S1793536909000047.
- [13] JIANG H, LI C, LI H. An improved EEMD with multiwavelet packet for rotating machinery multi-fault diagnosis [J]. *Me-*

- chanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(2): 225–239. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.12.010.
- [14] 范磊, 沈蔚. 爆破振动频谱特性实验研究 [J]. 爆破, 2001, 18(4): 18–20. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2001.04.006.
FAN Lei, SHEN Wei. Experimental study on frequency spectrum characteristics of blast vibration wave [J]. *Blasting*, 2001, 18(4): 18–20. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2001.04.006.
- [15] 张继春. 三峡工程基岩爆破振动特性的试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 131–137.
ZHANG Jichun. Vibration characteristics of blasting in bed rock mass at Sanxia Project [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(2): 131–137.
- [16] 张德丰. 详解 MATLAB 数字信号处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 325–328.
- [17] 文莉, 刘正士, 葛运建. 小波去噪的几种方法 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2002, 25(2): 167–172. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2002.02.002.
WEN Li, LIU Zhengshi, GE Yunjian. Several methods of wavelet denoising [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2002, 25(2): 167–172. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2002.02.002.
- [18] 卢文波, 赖世骧, 舒大强, 等. 关于爆破震动速度和加速度等效性问题的讨论 [J]. 爆破, 2000(S1): 11–14.
LU Wenbo, LAI Shixiang, SHU Daqiang, et al. Discussion equivalence between blasting vibration velocity and acceleration [J]. *Blasting*, 2000(S1): 11–14.
- [19] 陆凡东, 方向, 郭涛, 等. EMD 与 SLS 法在爆破振动加速度信号时域积分中的应用 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 90–93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.09.018.
LU Fandong, FANG Xiang, GUO Tao, et al. Application of EMD and SLS in time integration of blasting vibration acceleration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(9): 90–93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.09.018.

Optimal white noise coefficient in EEMD corrected zero drift signal of blasting acceleration

WANG Zhiliang, CHEN Guihao, HUANG Youpeng

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: To reduce the deviation of vibration signals effectively and improve the reliability of the data, the method of combining the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and the processing of high and low frequency is first applied to correct the acceleration zero-drift signals collected in the blasting test of granite. Then, according to the shock response spectrum of vibration signals, a correction index is proposed to characterize the average deviation amplitude of the frequency domain between the original and the corrected signals. Finally, the correction effects of signals in different white noise coefficients are discussed based on the frequency domain and the time domain. The analysis shows that the EEMD method can effectively eliminate the zero-drift phenomenon of the acceleration signal, but the improvement of zero-drift trend of the velocity signal after integration is limited. With the increase of the white noise coefficient, the correction indices in different frequency bands increase to varied extents, and the power exponent relationship is presented between them. According to the modified exponential analysis in different frequency bands, the optimal white noise coefficient range corresponding to different acceleration zero-drift signals can be determined. The correction index proposed in this study can provide a reference for the reasonable selection of white noise coefficient when EEMD method is used to process the zero-drift signal of acceleration.

Keywords: blasting signal; zero-drift; EEMD; white noise coefficient; shock response spectrum; correction index

(责任编辑 王小飞)