

基于总体经验模态分解和连续均方误差的侵彻过载信号分析方法

唐 林, 陈 刚, 吴 昊

引用本文:

唐林, 陈刚, 吴昊. 基于总体经验模态分解和连续均方误差的侵彻过载信号分析方法 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 055104.

TANG Lin, CHEN Gang, WU Hao. Penetration Deceleration Signal Processing Method with Ensemble Empirical Mode Decomposition and Consecutive Mean Square Error [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 055104.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

混凝土靶体预开孔对弹丸侵彻性能的影响

王洪波, 杨世全, 谢若泽, 钱立新, 卢永刚

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.01.012

焊接薄壁弹体侵彻多层钢筋混凝土靶实验研究

戴湘晖, 段建, 周刚, 初哲, 王可慧, 古仁红, 李虎伟, 杨慧, 李鹏杰, 刘恒泽

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.04.016

带舱大型战斗部跌落响应数值分析

李广嘉, 周涛, 曹玉武, 栗保华

DOI: 10.11858/gywlxb.20170584

高速侵彻混凝土弹体在横向非对称作用下的动态响应

杨华伟, 王志华, 晋小超

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.01.011

弹体侵彻混凝土开坑阶段阻力的计算

薛建锋, 沈培辉, 王晓鸣

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.06.010

局部改性弹体低速贯穿金属靶板的破坏形式研究

沈正祥, 李亚哲, 张宏亮, 杨辉, 王芳, 周克, 刘峰涛

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.02.014

基于总体经验模态分解和连续均方误差的 侵彻过载信号分析方法^{*}

唐 林¹, 陈 刚^{1,2}, 吴 昊³

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 侵彻过载是攻坚武器及相关研究的重要参量。针对实测弹载侵彻过载曲线分析处理方法开展了研究, 提出采用总体经验模态分解(EEMD)结合连续均方误差(CMSE)理论获取弹体刚体过载信号的方法。通过 EEMD 获得测试信号的本征模态函数分量, 再运用 CMSE 理论判别高频干扰与侵彻信号的分界点, 对不含分界点分量的高频分量进行抛弃处理, 将其余低频信号进行重构获得弹体刚体过载信号。积分结果表明, 重构信号在有效去除高频干扰的同时, 完整保留了侵彻过载中弹体刚体的加速度信号。此外, 整个分析过程所具有的信号自驱动特性避免了不同弹靶工况下滤波频率选择困难。

关键词: 侵彻过载; 总体经验模态分解; 连续均方误差

中图分类号: O385

文献标识码: A

弹体侵彻靶体过程中的负加速度(即侵彻过载)是攻坚武器及其防护研究的一个重要参量。弹体侵彻过载关系到战斗部设计、炸药安定性、智能引信的计层定深功能实现等多个方面。同样, 防护工程中遮弹层结构的合理构筑、材料优化等也需要侵彻过载作为评估参量^[1]。侵彻过程中弹靶作用相当复杂, 弹体上的测试信号所包含的成分非常丰富。通常认为, 侵彻过载不仅包含弹体的刚体加速度, 还包括弹体结构的振动响应、碰撞产生的应力波传播效应、干扰及噪声等因素产生的信号^[2]。弹体的刚体加速度是弹在靶体内运动特性的表征, 是侵彻弹体设计的重要参数, 常常需要单独提取进行研究。

国内外学者对侵彻过载测试信号的分析处理开展了大量的研究工作。对试验弹和测试装置进行模态分析和频谱分析可以获取低通滤波截止频率, 从而对测试数据进行滤波, 获得刚体加速度^[1,3]。王成华等^[4]以积分后的速度和侵深历程发生突变的滤波频率作为截止频率, 以此滤波获得刚体过载。Forrestal 等^[5]在试验弹体内的不同位置安装两个加速度计, 滤波处理时, 将两个加速度计所测信号从高到低按一定频率步长进行滤波, 直到两条过载曲线没有区别, 即认为此时的频率为合适的滤波截止频率。Franco 等^[6]采用 4 kHz 的频率对直径为 85.1 mm 的弹体侵彻数据进行滤波处理。Wu 等^[7]对直径为 25.3 mm 的弹体侵彻混凝土的过载测试曲线采用 1.7 kHz 截止频率进行滤波。在这些研究中, 处理侵彻过载数据的基本思路是: 基于特定的条件找到合适的低通滤波截止频率, 以此频率对侵彻过载进行固定阈值滤波, 得到弹体的刚体过载。这种思路主要存在以下缺点: 一是滤波截止频率难以确定, 并且基于固定频率的阈值滤波在滤除高频无用信号时, 容易将有用信号部分滤除, 进而造成滤波所得信号与实际有用过载存在差异; 二是针对每种工况下的侵彻过载信号, 均需要借助频谱分析等一系列方法进行分

^{*} 收稿日期: 2018-02-13; 修回日期: 2018-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(11572299)

作者简介: 唐 林(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: tanglin1874@163.com

通信作者: 陈 刚(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: chengang@caep.cn

析,使得分析处理过程复杂且缺乏通用性。

本研究将总体经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)和连续均方误差(Consecutive Mean Square Error, CMSE)理论^[8]相结合,以文献[7]中两种侵彻工况的实验曲线为例,开展侵彻过载信号处理。将实测信号看成由有用信号和噪声组成,先利用 EEMD 对实验信号进行分解,得到本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量,然后利用 CMSE 判断噪声与信号的分界点分量,对不含分界点分量的前几阶高频分量进行抛弃处理,最后将剩下的低频信号进行重构,得到最终的有效信号。通过对比处理结果与原始实验曲线及文献[7]的分析结果,验证方法的有效性。

1 弹体撞击钢筋混凝土靶实验简介

Wu 等^[7]开展了弹体侵彻钢筋混凝土靶板实验。实验所用钢弹弹长为 152 mm,弹径为 25.3 mm,质量为 386 g;实验靶板为总厚度相同(300 mm)的单层和分层钢筋混凝土靶,靶板截面为方形,边长为 675 mm,不同厚度的靶板配有 2~4 层直径为 6 mm 的钢筋网。通过弹载记录装置,测试了 6 发实验弹体的火炮加速及侵彻靶板的完整过载历程。图 1 为弹体撞击单层靶和双层靶的典型测试曲线,其中 a 为侵彻过载, g 为重力加速度。

图 1(a)为文献[7]中实验编号为 1-1 的弹体侵彻 300 mm 厚单层钢筋混凝土靶板的过载曲线,弹体撞靶速度为 641.5 m/s;图 1(b)为实验编号为 3-2 的弹体侵彻总厚度为 300 mm 的双层钢筋混凝土靶板的过载曲线,其中第 1 层靶板厚度为 200 mm,第 2 层厚度为 100 mm,两层靶体的间距约 270 mm。由图 1 可见:实测曲线完整包含了弹丸膛内加速、自由飞行、穿靶和靶后自由飞行的全过程,但实测数据中包含干扰信号和侵彻过程中的高频振荡。在侵彻分析中,宜将干扰信号和高频振荡通过适当方法予以滤除。本研究拟针对图 1 所示曲线进行分析。

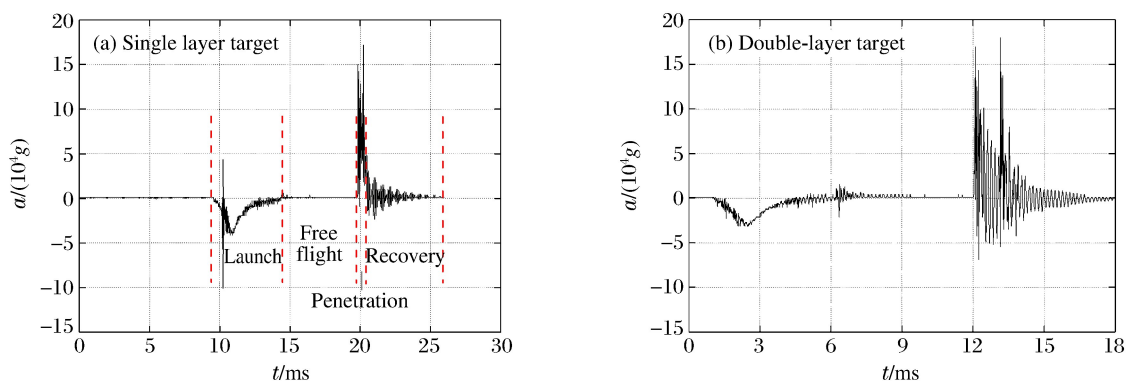


图 1 典型实测侵彻过载曲线^[7]

Fig. 1 Typical deceleration-time histories of projectile^[7]

2 弹体撞击单层靶过载曲线的 EEMD

2.1 EEMD 方法

EEMD 方法由 Wu 等^[9]提出,是一种新型的自适应信号时频处理方法,适用于非线性、非平稳信号分析。EEMD 通过在原始曲线上多次叠加高斯白噪声,对叠加后的曲线分别进行经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD),得到不同信号的 IMF 分量和趋势项,再将各分量和趋势项进行平均得到最终的 IMF 分量和趋势项。由于高斯白噪声是一种零均值噪声,在把多次分解的结果进行平均时,信号中的高斯噪声就相互抵消了^[9]。利用高斯白噪声 EMD 的二进滤波特性以及加入高斯白噪声后的新信号在整个频域上连续这一特点,可以解决 EMD 中由于间断信号存在而引起的模态混叠问题。其中,EMD 的处理过程为^[10]:对于信号序列 $x(t)$,找到其局部极大值和极小值点,通过插值分别求出极大值点和极小值点的包络线,再求出上、下包络线序列的平均 $m(t)$;将原始信号序列 $x(t)$ 减去 $m(t)$,得

到一个去掉低频信号的新信号 $h(t)=x(t)-m(t)$, 若 $h(t)$ 在整个信号上的极值点个数和过零点个数相差不大于 1, 且任意点处包络均值为零, 则将 $h(t)$ 作为分解后的第一个 IMF 分量; 若 $h(t)$ 不满足条件, 则将其作为“原始”信号重新分解, 直到分解的分量满足条件, 得到第一个 IMF 分量 c_1 ; 将 c_1 从原始信号中分离出来, 得到剩余项 $r(t)=x(t)-c_1$, 对 $r(t)$ 重复上述操作, 得到若干个 IMF 分量 c_i , 直到最后一阶 IMF 分量或剩余项 $r_n(t)$ 满足预设条件为止。这样, 原始信号就可以表示为各 IMF 分量与剩余项之和。可以看出, EMD 是一种由数据驱动的具有自适应性的信号处理方法, 分解过程无需基函数, 并且可以对任意信号进行分解, 分解得到的 IMF 分量是一系列频率从高到低分布的量。

EEMD 方法的一个关键步骤是对信号的极值点进行包络拟合进而获取包络平均。经典算法采用三次样条曲线拟合极值点, 但是三次样条存在过冲和欠冲现象, 导致包络平均不能准确反映信号趋势, 造成提取的信号失真。对此, 研究者进一步提出了保形分段三次艾尔米特插值、极值中心插值等获取包络平均的方法^[11-12]。通过尝试以上几种方法, 发现采用极值中心插值法可以取得较好的结果。在后续分析中将采用该方法获取包络平均, 具体过程为: 采用直线段将极大(小)值连接形成上(下)包络折线; 基于折线包络求出所有极值点的平均中心点(极值中心), 再采用三次样条对极值中心进行拟合, 获得信号的包络平均。

筛分准则和停止条件是实际运用 EEMD 的另一个关键点。由于实际筛分的 IMF 分量很难完全满足定义, Huang 等^[10]提出: 采用判断两个连续筛分分量 $h(t)$ 之间的标准偏差来决定当前筛分项是否满足 IMF 的要求, 通常标准偏差的阈值取 0.2~0.3 之间; 同时将 c_n 或 r_n 序列小于给定阈值或 r_n 变为单调函数作为整个分解过程的停止条件。Wu 等^[9]采用连续筛分 10 次的方法获取每个 IMF 分量, 结合连续筛分 10 次时白噪声 EMD 的近似二进滤波特性, 将分解阶数取为 $n=\text{ent}(\log_2 M)-1$ ($\text{ent}(x)$ 表示对 x 向下取整, M 表示信号长度)。实际上, 两种方法的筛分停止条件都不依赖 IMF 分量的定义。通过对两种不同筛分准则下的分解结果进行比较, 发现连续筛分 10 次时 IMF 分量的过零点个数和极值点个数相差更小, 包络平均的标准差也更小, 相对来说, 此时的分量更符合 IMF 的定义, 同时也节省计算时间。在后面的分析中将采用 Wu 等^[9]的筛分准则进行 IMF 分量提取。

这样, 在确定包络拟合方法、筛分准则和停止准则后, 就可以对信号进行 EEMD 处理。

2.2 过载曲线的分解及结果

首先, 采用 2.1 节所述方法对图 1(a) 所示单层靶侵入过载曲线做 EEMD 处理。通常, EEMD 的效果受添加的高斯白噪声幅值和添加次数影响, 大多数情况下, 噪声幅值一般取为原始信号标准差的 0.2 倍, 次数添加要足够多(通常需要上百次)。为防止噪声影响高频信号的极值点分布, 进而影响分解效果, 经试分解, 给定噪声幅值为原始信号标准差的 0.15 倍, 添加次数为 200, 分解阶数 $n=\text{ent}(\log_2 M)-1$ 。图 2 为图 1(a) 实验曲线的 EEMD 结果及 IMF 分量的频谱汇总, 其中 A 表示傅里叶展开时的频谱幅值。从分解结果来看, 各阶 IMF 分量均具有较好的上下对称性; 从汇总的频谱曲线上看, IMF 分量有明显的从高频到低频分布的变化趋势。除获取的 10 阶 IMF 分量外, 分解后最终剩余一个趋势项, 在一定程度上能够反映原始信号的变化特征, 但还并非最终的完整有效信号。

3 弹体撞击单层靶过载曲线分量的 CMSE 判别

相对来说, 弹体结构的振动响应、碰撞产生的应力波传播效应、干扰和噪声等信号是高频信号, 而弹体的刚体加速度是低频信号。在将测试信号进行 EEMD 之后, 还需要选择一种合适的方法对各阶分量做进一步分析, 以获取有效的弹体侵入刚体加速度。

Boudraa 等^[8]根据 IMF 分量按频率从高到低分布的特点, 认为存在某一阶分量, 使得该分量之前的分量为噪声主导, 之后的分量为有效信号主导, 进而提出 CMSE 方法对分解的分量进行判别。该方法的核心是通过求两个连续重构信号的均方误差寻找对信号的最佳估计。将测试信号分解为一系列 IMF 分量 $c_j(t)$ 和一个残余项 $r_n(t)$ 后, 对第 k 阶之后的低频分量(含残余项)进行叠加重构, 以实现对有效信号的估计, 即

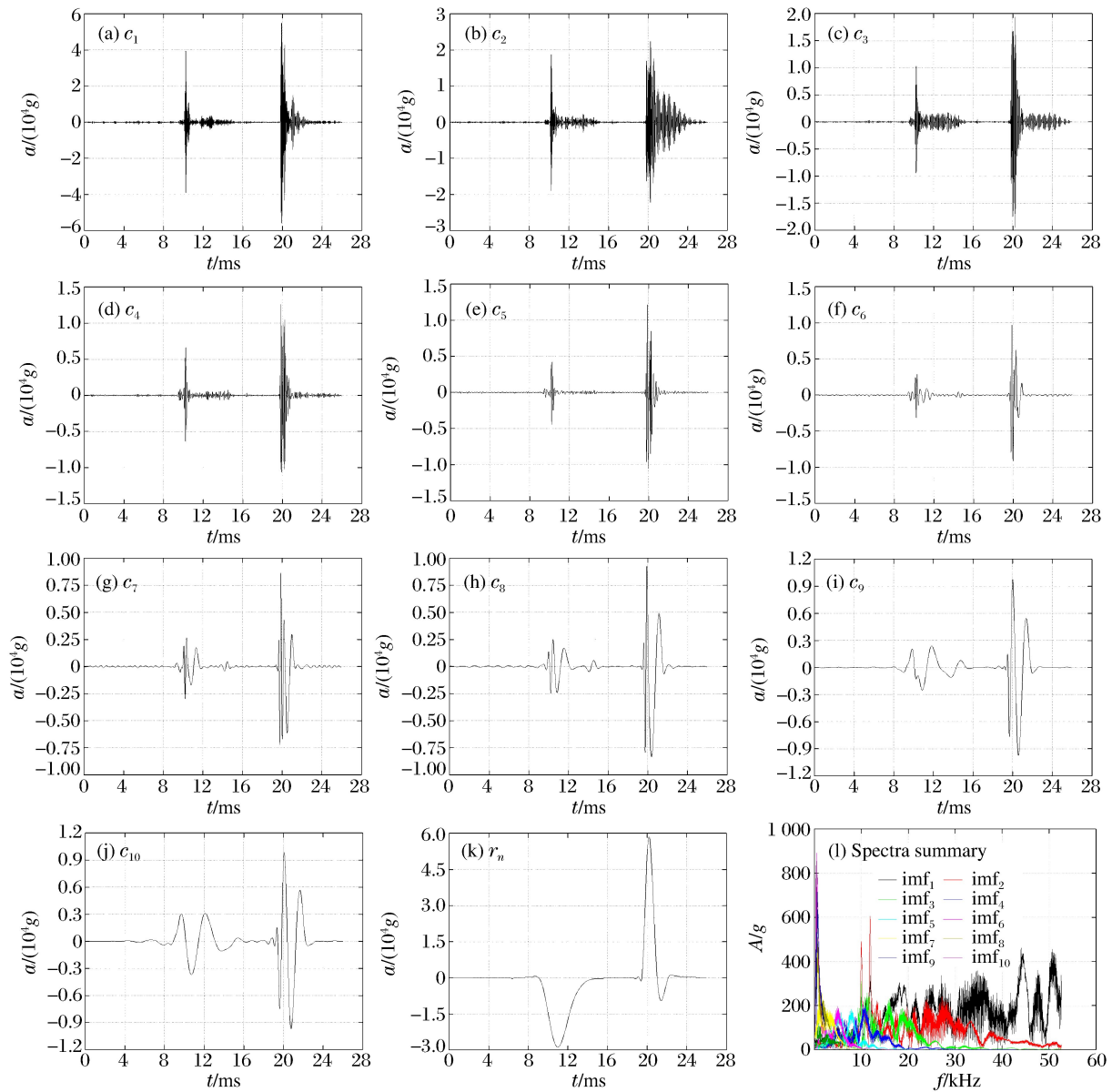


图2 EEMD分解所得 IMF 分量、趋势项及分量频谱

Fig. 2 IMF components, trend term from EEMD decomposition and components spectra

$$\tilde{x}_k(t) = \sum_{j=k}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中: $\tilde{x}_k(t)$ 表示低频部分的重构, 即对有效信号 $x(t)$ 的估计; $k=2, 3, \dots, n$ 。为获取有效信号的最佳估计, 对两个连续重构信号求取均方误差 (CMSE)

$$\Delta(\tilde{x}_k, \tilde{x}_{k+1}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\tilde{x}_k(t_i) - \tilde{x}_{k+1}(t_i)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [c_k(t_i)]^2 \quad (2)$$

式中: Δ 为 CMSE; $k=1, 2, \dots, n-1$ 。(2)式也表征第 k 阶 IMF 分量的能量密度。当利用(2)式求得所有连续重构信号之间的均方误差后, 其全局极小值对应的重构信号就是对有效信号的最佳估计。这样, 便可将此处的 IMF 分量作为高频噪声干扰和低频信号的分界点, 将不含分界点的前几阶分量作为高频分量进行抛弃, 其余分量(含趋势项)作为低频分量进行重构, 得到对原始信号有效成分的最佳提取。

针对图 2 所示的 IMF 分量, 运用(2)式计算 CMSE, 得到其变化曲线, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, CMSE 的全局极小值出现在第 6 阶, 即噪声等高频干扰信号主要集中在前 5 阶。对前 5 阶分量做

抛弃处理,并将剩余分量进行重构,得到图 4 所示结果。可见,处理后的信号几乎完全滤除了原始信号中的高频振荡、噪声干扰等,能够很好地反映实测信号的变化趋势。

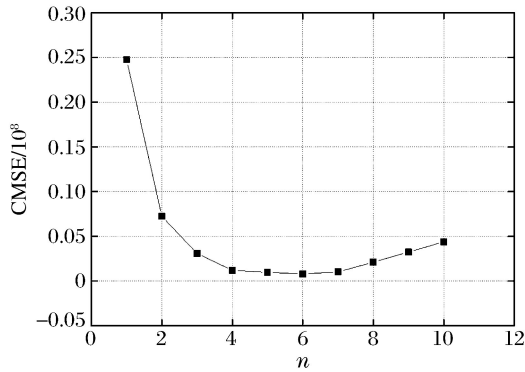


图 3 CMSE 曲线

Fig. 3 Consecutive mean square error curve

处理后的信号与文献[7]中 1.7 kHz 滤波信号在侵彻段附近的对比曲线如图 5 所示。可以看出,相比滤波信号,重构信号在基线上的振荡更小,其侵彻加速度的上升沿更能准确反映实测信号的变化,同时对于一些局部特征(比如侵彻过程中加速度的平台期),重构信号能更好地复现。

对原始信号、图 4 所示重构信号分别做一次和二次积分处理,得到速度 v 和位移 S 历程,如图 6 所示,其中图 6(b)仅给出侵彻段(19.82~20.43 ms)的位移。从图 6 可以看出,无论是速度曲线还是位移曲线,重构信号都能与原始信号吻合较好,表明重构信号充分地提取了原始信号的有效成分。

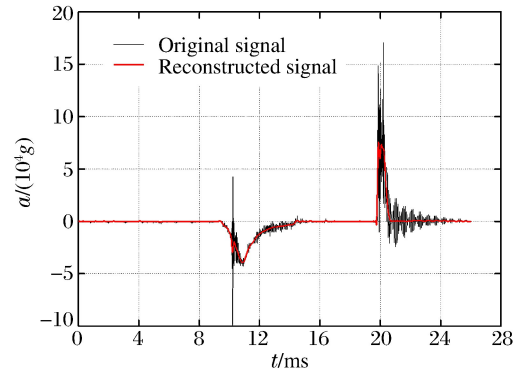


图 4 单层靶条件下重构信号与原始信号对比

Fig. 4 Comparison between reconstructed and original signals of single layer target case

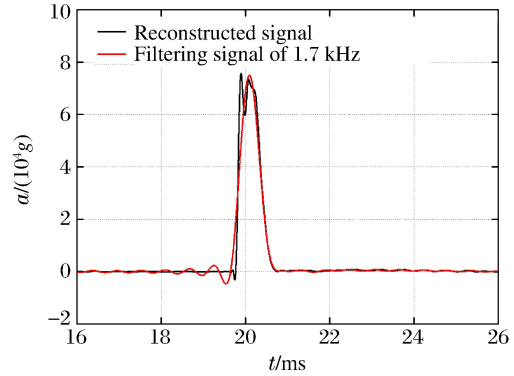
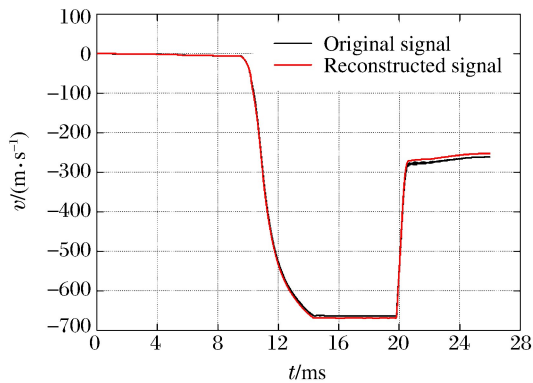
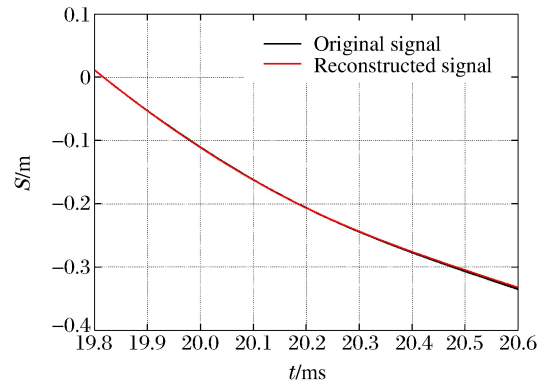


图 5 重构信号与滤波信号的对比

Fig. 5 Comparison between reconstructed and filtering signals



(a) Penetration velocity



(b) Penetration displacement

图 6 单层靶条件下的重构效果

Fig. 6 Reconstruction for single layer target case

4 弹体撞击双层靶实验过载曲线的分解处理

采用与单层靶信号处理相同的流程及参数,对图 1(b)所示双层靶侵彻过载信号进行处理。

原始信号经 EEMD 处理后得到 9 阶 IMF 分量,针对分解结果计算重构信号的 CMSE,得到全局极小值出现在第 8 阶,即噪声等高频干扰信号主要集中在前 7 阶。对前 7 阶分量做抛弃处理,并将剩余分量进行重构,得到重构信号,如图 7 所示。从图 7 可以看出,重构信号能准确反映原始信号的变化趋势,对于侵彻过程也能较好地表征。

对图 7 所示重构信号及原始信号分别做一次和二次积分,得到速度和位移历程,如图 8 所示,其中仅给出侵彻段(12.02~13.33 ms)结果。从速度和位移历程曲线上看,重构信号的速度和位移均能较好地吻合原始信号的速度和位移。

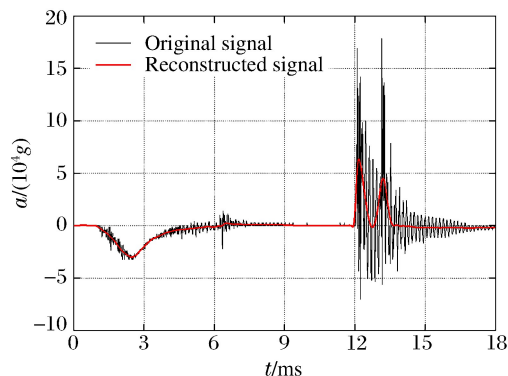
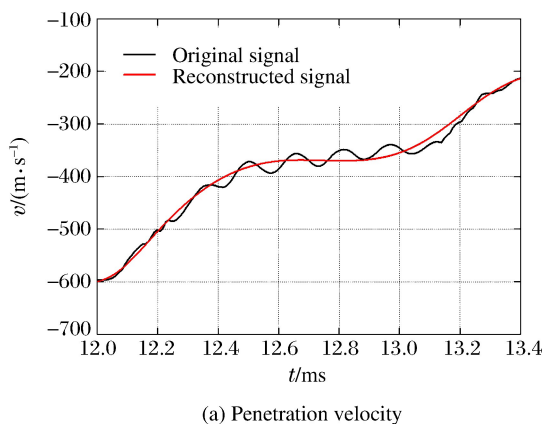
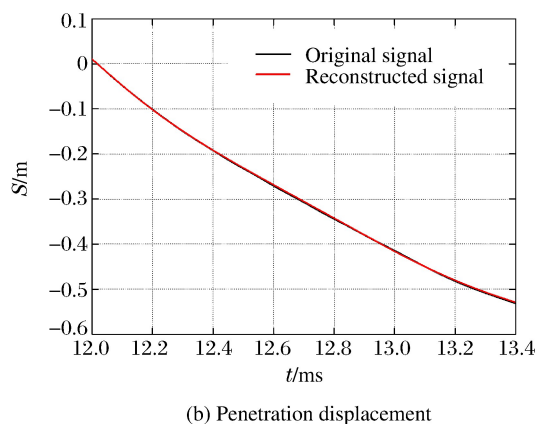


图 7 双层靶条件下原始信号与重构信号对比
Fig. 7 Comparison between reconstructed and original signals of double-layer target case



(a) Penetration velocity



(b) Penetration displacement

图 8 双层靶条件下的重构效果

Fig. 8 Reconstruction for double-layer target case

5 结 论

利用 EEMD 与 CMSE 相结合的方法,对典型单层靶和双层靶侵彻过载信号进行处理,并将处理结果与传统滤波方法处理结果进行对比。信号分解结果显示,EEMD 方法能将原始信号分解为一系列从高频到低频分布的分量,同时得到能描述信号基本特征的趋势项;采用 CMSE 方法可判断并获取恰当分量,使重构侵彻信号为有效信号的最佳估计,且比传统滤波方法获取的结果更准确。通过对重构信号进行一次和二次积分,获得了弹丸侵彻靶板过程的速度和位移曲线,积分结果验证了重构信号的有效性。整个分析处理过程完全由信号自驱动,避免了不同弹靶工况下滤波频率选择困难。

参考文献:

- [1] 黄家蓉,刘瑞朝,何翔,等. 侵彻过载测试信号的数据处理方法 [J]. 爆炸与冲击,2009,29(5):555-560.
HUANG J R, LIU R C, HE X, et al. A new data processing technique for measured penetration overloads [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 555-560.
- [2] 赵海峰,张亚,李世中,等. 侵彻弹体频率特性分析及过载信号处理 [J]. 中国机械工程,2015,26(22):3034-3039.
ZHAO H F, ZHANG Y, LI S Z, et al. Frequency characteristics analyses of penetrating missile and penetration overload signal processing [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22): 3034-3039.
- [3] 徐鹏,祖静,范锦彪. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究 [J]. 振动与冲击,2007,26(11):118-122.
XU P, ZU J, FAN J B. Study on acceleration test technique of high velocity kinetic energy projectile penetrating into

- hard target [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11): 118-122.
- [4] 王成华, 陈佩银, 徐孝诚. 侵彻过载实测数据的滤波及弹体侵彻刚体过载的确定 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(5): 416-419.
- WANG C H, CHEN P Y, XU X C. Filtering of penetration deceleration data and determining of penetration deceleration on the rigid-body [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(5): 416-419.
- [5] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 427-444.
- [6] FRANCO R A, INGRAM J K. A very high shock data recorder [C]//*IEEE Proceedings of Southeastcon '91*, 1991: 503-507.
- [7] WU H, FANG Q, PENG Y, et al. Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 232-250.
- [8] BOUDRAA A, CEXUS J C. Denoising via empirical mode decomposition [C]//*Proceedings of IEEE ISCCSP*, 2006.
- [9] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [10] 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 [C]//*Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, 1998, 454: 903-995.
- [11] 朱赛, 尚伟. 经验模态分解中包络线算法 [J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(9): 125-128.
- ZHU S, SHANG W. Analysis and study of envelope algorithm in EMD [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(9): 125-128.
- [12] 张海军, 唐建, 何晓晖. EEMD 方法及其在机械故障诊断中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

Penetration Deceleration Signal Processing Method with Ensemble Empirical Mode Decomposition and Consecutive Mean Square Error

TANG Lin¹, CHEN Gang^{1,2}, WU Hao³

(1. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China;*

2. *Key Laboratory of Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures of Sichuan, Mianyang 621010, China;*

3. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: The extraction of rigid-body deceleration characteristic plays a significant role in the research of anti-hard-target weapons and related areas. In this paper, we investigated the methods of processing on-board recorded penetration deceleration data. The intrinsic mode functions were separated from the raw signals by ensemble empirical mode decomposition (EEMD), and a demarcation point between high-frequency interference functions and the projectile rigid-body acceleration signal functions was distinguished by the consecutive mean square error (CMSE) theory. By discarding the first few high-frequency components without demarcation points, the rigid-body acceleration of projectile was reconstructed with the remaining low-frequency components. The consistency of the integral results between the final curve and the original data shows that, the high-frequency interference is removed effectively and the rigid-body penetration over-load is kept completely. In addition, the difficulty of selecting the filter frequency under different target conditions in the traditional filter method is avoided with the characteristic of signal adaptive in the analysis process.

Keywords: penetration overload; ensemble empirical mode decomposition; consecutive mean square error