

武器装备

基于总体经验模态分解法的爆炸分离 冲击数据分析和处理

封雷, 刘曦*, 解龙, 贺旋, 宁晶

(西安现代控制技术研究, 西安 710065)

摘要: 目的 对炮弹发射过程的实测异常大量值爆炸分离冲击数据进行分析与处理, 准确获取真实的发射冲击信号。方法 利用基于总体经验模态分解法 (EEMD) 对实测爆炸分离冲击数据进行处理, 通过自适应构造冲击数据的模态分量, 剔除原始数据中的趋势项。结果 通过对某型炮弹发射过程的爆炸分离冲击数据进行处理, 有效剔除了冲击信号中的趋势项, 准确得到真实的时域信号和冲击响应谱曲线。结论 该研究能够为实测异常冲击数据时频域处理提供一种有效的方法。

关键词: 总体经验模态分解; 爆炸分离冲击; 模态分量; 冲击响应谱; 零位漂移; 放大器饱和

中图分类号: TJ410.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)03-0001-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.001

Analysis of Pyrotechnic Shock Data Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition

FENG Lei, LIU Xi*, XIE Long, HE Xuan, NING Jing

(Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the measured abnormal large values of pyrotechnic shock data from artillery launching to obtain the real launching shock signal. The ensemble empirical mode decomposition (EEMD) was used to process the measured pyrotechnic shock data, to construct intrinsic mode functions of the shock data by adaptive method and remove the trend item from the original shock data. By processing the shock data from the artillery launching, the trend item in the shock data was eliminated effectively, and the real time domain signals and the shock response spectrum curve were obtained accurately. This study can provide an effective method for the time-frequency domain processing of the measured abnormal shock data.

KEY WORDS: ensemble empirical mode decomposition; pyrotechnic shock; intrinsic mode function; shock response spectrum; zero drift; amplifier saturation

炮弹在发射任务中会经历多个冲击历程, 这些冲击信号一般为脉冲、阶跃或其他瞬态信号。该冲击信号通常持续时间很短, 但冲击幅值很大, 包含的频率

成分也相当复杂^[1]。在进行冲击信号测试过程中, 经常会遇到冲击信号基线漂移现象, 会严重影响测试数据的精度。

收稿日期: 2024-12-19; 修订日期: 2025-02-11

Received: 2024-12-19; Revised: 2025-02-11

引文格式: 封雷, 刘曦, 解龙, 等. 基于总体经验模态分解法的爆炸分离冲击数据分析和处理[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 1-7.

FENG Lei, LIU Xi, XIE Long, et al. Analysis of Pyrotechnic Shock Data Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 1-7.

*通信作者 (Corresponding author)

目前,对于冲击信号基线漂移的数据处理方法主要有小波分解和经验模态分解法(EMD)。李海广等^[2]提出冲击信号正负冲击响应谱互相关系数的定义,利用互相关系数开展监测基线漂移程度和检验修正效果,并对某机枪自动机动作过程中冲击振动基线漂移信号进行了分析和验证。龙源等^[3]在爆破振动实测信号预处理分析中采用最小二乘法和小波法去除趋势项开展了研究,研究表明,上述2种方法在剔除信号趋势项时,需要预先设定分解基函数,而EMD法在处理非平稳振动信号具有自适应性。张文伟等^[4]针对放大器饱和造成的零漂问题,提出了利用频域窗函数滤波的修正的EMD方法,能较好地克服现行EMD方法的缺陷。王燕等^[5]针对实测侵彻冲击信号中的零漂问题,提出了利用EMD法去除数据趋势项,再以侵彻结束后的零漂趋势项作为侵彻过程的零漂趋势,采用最小二乘法拟合后,分段完成修正处理。袁宏杰等^[6]研究了利用小波分析方法对爆炸分离冲击信号进行处理,通过小波分析方法对爆炸分离信号进行分解与重构,并给出了准确的冲击响应谱曲线。边杰等^[7]开展了基于能量特征和小波降噪的总体经验模态分解研究,解决了强背景噪声条件下的滚动轴承故障诊断问题。杨仁树等^[8]针对传统小波在爆震振动信号特征提取和分析方面的局限性,提出了基于CEEMD和TQWT组合的信号精细化特征提取方法。张俊红等^[9]开展了基于经验模态分解和时频分析的低振动机体优化设计研究。杨友涛等^[10]开展了基于多元经验模态分解方法和希尔伯特变换,对高速铁路轨道动态不平顺进行了时频特征分析和应用研究。郭泰等^[11]基于粒子群优化的改进EMD算法,在某轴承故障特征分析中开展了应用。方诗麟等^[12]、袁宏杰等^[13]、王翠荣等^[14]开展了基于冲击响应谱的导弹冲击试验条件制定与优化方法研究。

综上所述,针对实测异常冲击数据处理方法主要有小波分析和EMD。其中,小波分解需要预先设定基函数,不同基函数结果相差较大,主观性较大^[15-16]。EMD法在虽然有较好的自适应性,但实测信号中含有随机噪声和间歇信号时,EMD方法存在模态混叠^[17-18]、虚假模态及端点效应^[19]等,导致数据分解结果不可靠。总体经验模态分解法(EEMD)是通过在EMD分析过程中添加高斯白噪声来可有效解决信号分析中的模态混叠问题,同时提高了信号分解的鲁棒性^[20]。汪国元等^[21]研究了总体经验模态分解法(EEMD)在火箭解锁分离机构的冲击响应分析中的应用,通过EEMD分解可得到不同频率的模态分量,低阶模态分量则为高频冲击带来固有模态振动,并通过模态试验进行了验证。

炮弹发射过程中的爆炸分离冲击信号属于典型的短时非平稳信号,由于测试系统本身固有的频率上限等因素,导致实测冲击信号中包含有大量噪声及低

频趋势项,严重影响了数据的精度和可信度。为了准确获取炮弹发射过程中的时域曲线和冲击响应谱,必须对冲击信号进行预处理。本文针对某型炮弹的实测的爆炸分离冲击数据,应用EEMD方法对冲击信号进行了分解和重构,剔除了低频趋势项,获得了真实的冲击信号,通过开展冲击响应谱分析,可为进一步研究炮弹发射过程中的爆炸分离冲击响应,以及炮弹部件的抗冲击力学环境设计提供有力支撑。

1 爆炸分离冲击信号零漂分析

冲击传感器的放大器中电容的负载电流*i*如下所示:

$$i = C \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

式中: $\frac{dU}{dt}$ 为放大器的输出电压变化率;*U*为放大器额定输出电压;*C*为放大器输出的负载电容。

假设信号电压为 $U \sin(2\pi ft)$,则由式(1)可得,电流与电压大小及变化率均有关,见式(2)。

$$\frac{dU}{dt} = 2\pi ft U \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

当冲击信号频率较高时,由于放大器输出电流*I*基本保持不变,放大器输出的电压就会下降,则电压变化率就小于 $\frac{I}{C}$ 。

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\max} = 2\pi f_{\max} U \quad (3)$$

为了不受传感器放大器压摆率的限制,信号的最大频率 f_{\max} 应满足:

$$f_{\max} < \frac{I}{2\pi CU} \quad (4)$$

则放大器的饱和电压最大值应满足:

$$U < \frac{I}{2\pi f_{\max} C} \quad (5)$$

如果放大器输入的冲击信号的最大频率大于 f_{\max} ,且放大器的工作电压小于最大输出电压时,放大器输入信号的电压变化率就会受到放大器压摆率限制的影响,出现饱和现象并将引入零漂误差。此时,由于信号峰值电压并没有达到放大器输出的最大电压值,所以未出现削波。

2 EEMD法去除趋势项

2.1 经验模态分解

经验模态分解(EMD)法认为,任何复杂的时间序列都是由一些互不相同的、非正弦函数的模态函数构成^[22-23],这些模态函数即为内部模态函数(IMF),IMF需要满足以下2个条件^[24]:数据信号

中的极值点与过零点必须相等或者相差为 1; 任意时刻点, 数据的极大值与极小值包络的均值等于 0。

根据上述定义, EMD 分解主要包括以下步骤: 确定函数 $x(t)$ 的所有局部极大值和极小值点, 用样条函数曲线顺序分别连接所有极大值和极小值点, 拟合出曲线 $x(t)$ 的上下包络, 然后连接上下包络线中的均值得到 $m_1(t)$, 可得函数 $x(t)$ 和 $m_1(t)$ 的差值:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (6)$$

下一步, 将 $h_1(t)$ 看成新的时间函数, 重复上述过程, 得到:

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (7)$$

按照式 (6) ~ (7) 重复 k 次, 得到一个 IMF h_{1k} , 即:

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (8)$$

其中, c_1 为:

$$c_1 = h_{1k} \quad (9)$$

在上述抽取过程使用停止准则, 通过连续两次运算结果的标准差 S_k 值作为判断 h_{1k} 是否为 IMF 分量的标准, 定义如下:

$$S_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2} \quad (10)$$

经验表明, $S_k \in [0.2, 0.3]$ 时^[3], 既可保证 IMF 的线性和稳定性, 又可使 IMF 具有相应的物理意义。

c_1 应该是信号中的最高频率成分从原始信号中剥离:

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (11)$$

剩余部分 r_1 包含较低频率的信号, 将其看作新函数, 重复上述过程, 得到函数的全部模态分量与余项如下:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_n + r_n \quad (12)$$

r_n 一般是数据的趋势项, 也可能是一个常数。

2.2 总体经验模态分解

总体经验模态分解 (EEMD) 是改进的 EMD 方法。Wu 等^[20]研究表明, EMD 分解相对于噪声信号就是一个二进滤波器, EEMD 中加入的白噪声的主要目的是使得信号在整个时频空间分布均匀^[25]。当信号添加到这个统一的背景下, 不同尺度的信号就自动投影到由白噪声建立的尺度上, 虽然每次试验会产生嘈杂的结果, 但在足够多试验的总体平均里, 每个试验的噪声将消失, 显著减少模态混叠的问题, 因此是一个真正的自适应数据分析方法^[17,24]。

EEMD 的详细分解过程如图 1 所示, 根据图中的分解结果可得, c_i 就是信号通过 EEMD 分解后得到的所有模态分量^[26], 白噪声通常选择标准差为常数的随机白噪声, 其标准差一般为采集信号标准差的 0.1~0.2 倍^[27-28]。

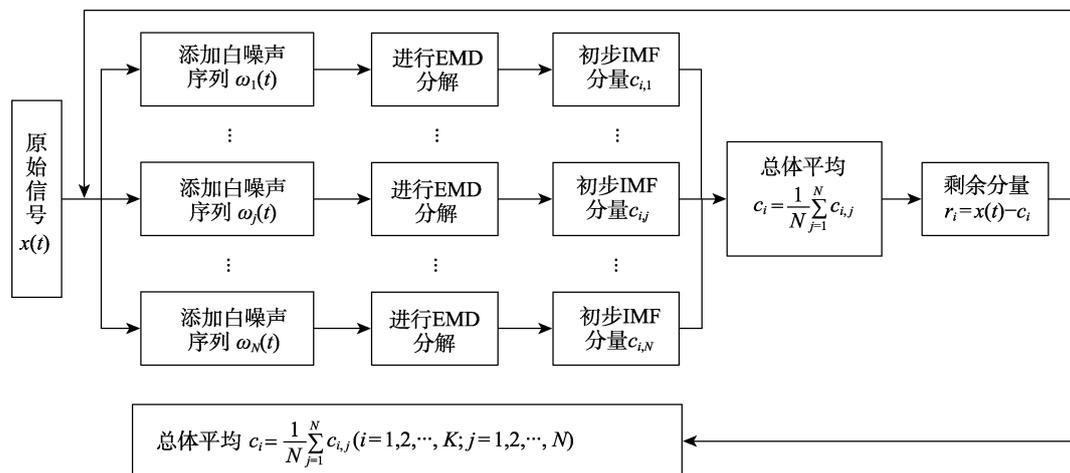


图 1 EEMD 具体分解过程
Fig.1 Specific decomposition process of EEMD

3 工程应用

制导炮弹在发射中将经历非常复杂的物理和化学过程, 依次经历发动机点火、挤进阶段、膛内加速和飞行阶段等过程, 上述过程中均会产生高过载、强冲击和高振动等环境, 将对弹体各部件产生剧烈的振

动与冲击响应。为了准确掌握炮弹在发射过程中的冲击响应, 本文选用大量程冲击传感器对炮弹惯性测量装置在发射过程的爆炸分离冲击进行测试, 选用的冲击传感器为三轴压电式传感器, 频率响应为 5~12 kHz, 工作温度范围为 -50~160 °C, 固有频率 >60 kHz, 量程为 ±50 000g, 幅值线性度 4%, 记录装

置的采样频率为 100 kHz。本次测试用传感器的放大器额定输出电压为 5 V，额定工作电流为 4 mA，负载电容为 10 000 pF，由式 (4) 计算可得放大器信号的最大频率为 13 kHz。由于 GJB 150.27A 爆炸分离冲击试验标准中提到冲击频率可达到 20 kHz 以上^[29]，因此当频率超过 13 kHz 以上，放大器的量程峰值就会下降，出现饱和现象并将引入零漂误差^[6]。

某型炮弹发射过程中的实测爆炸分离冲击曲线如图 2 所示。可以看出，冲击信号中正峰值存在明显零位漂移现象，对该冲击信号进行正负冲击响应谱分析^[2]，如图 3 所示。经计算可得，正负谱的相关系数为 0.744 2，相关性较小。由文献 27 附录 C 可得正向和负向冲击响应谱存在明显差异，属于异常数据。根据此次冲击事件历程计算的冲击响应谱如图 4 所示。如果直接对其进行冲击响应谱分析，冲击响应谱在低频段 (100 Hz) 量值很大，超过 10 000g。如果不对测试的冲击数据进行分析处理，直接将冲击响应谱作为产品的冲击试验条件，大量值的低频冲击将会对产品造成严重的损伤，将会造成过试验，因此需要对实测数据进行修正。

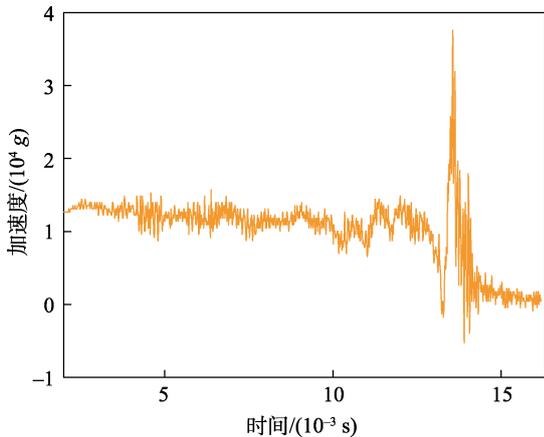


图 2 炮弹爆炸分离冲击信号时域波形
Fig.2 Pyrotechnic shock signals of cannonball ignition

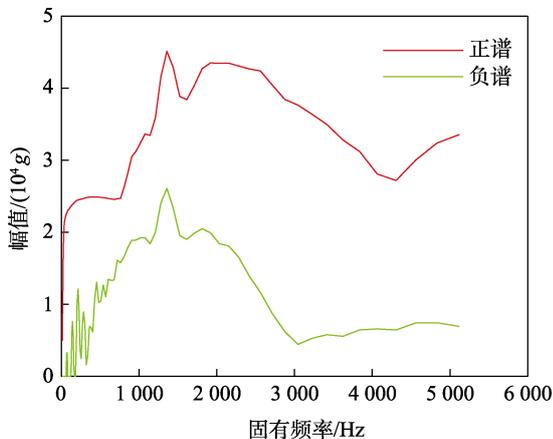


图 3 原始冲击信号正负响应谱
Fig.3 Positive and negative shock response of initial shock signals

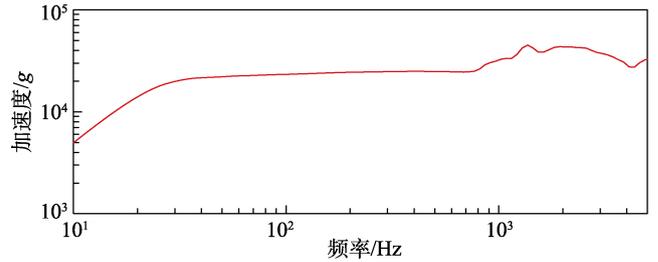


图 4 炮弹爆炸分离冲击响应谱
Fig.4 Shock response spectrum of cannonball pyroshock

对图 2 的冲击信号进行 EEMD 分解，随机白噪声的标准差为冲击信号标准差的 0.1 倍， S_k 取值为 0.2，可得 x 轴向的信号如图 5 所示。其中图 5 中的曲线 1 为原始测试数据，后面曲线分别为 $imf1 \sim imf9$ ，为原始数据的不同频率的模态分量，其中 r_9 为原始数据分解后的趋势项， r_9 是一个幅值变化很小的单调函数，表示冲击信号的整体走向。

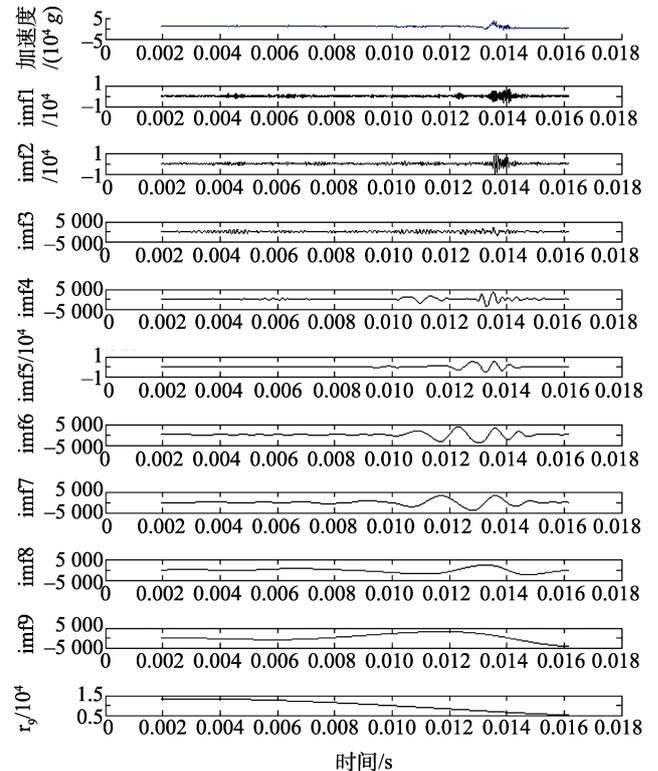


图 5 实测爆炸分离冲击信号的 EEMD 分解 (x 轴向)
Fig.5 EEMD decomposition of measured pyrotechnic shock signals (x direction)

由 EEMD 分解可知，实测冲击信号中频率成分较高、波长较短的是模态分量 $imf1 \sim imf4$ ；其余模态分量 $imf5 \sim imf9$ 则表现为频率逐渐降低、波长越来越长的规律。以上分解结果表明，炮弹发射冲击信号中包含了复杂的频率信号，其中信号的低频是炮弹发射过程中产生的膛压产生的，而高频成分是爆炸分离冲击激起局部振动的固有频率。表 1 给出了各阶模态分量与剔除趋势项后冲击信号的相关系数，其中 $imf9$ 低频成分相关性最高，是冲击信号的主要成分。

表 1 冲击信号各层 IMF 能量与修正冲击信号的相关系数
Tab.1 Correlation of between IMFs and revised shock signals

IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9
0.317 0	0.346 2	0.136 2	0.365 8	0.366 0	0.230 3	0.303 6	0.275 4	0.555 8

再对各级模态分量进行频谱分析, 如图 6 所示, 可以看到各阶模态的能量与频率的对应关系, 整体表现出响应频率由高频到低频, 能量由低到高的趋势。其中 IMF1 包含的频率成分最多, 而且主要集中在高频部分, 而 IMF2~IMF9 频率快速范围快速变窄, 形成由高频到低频的不同的固有模态分量。

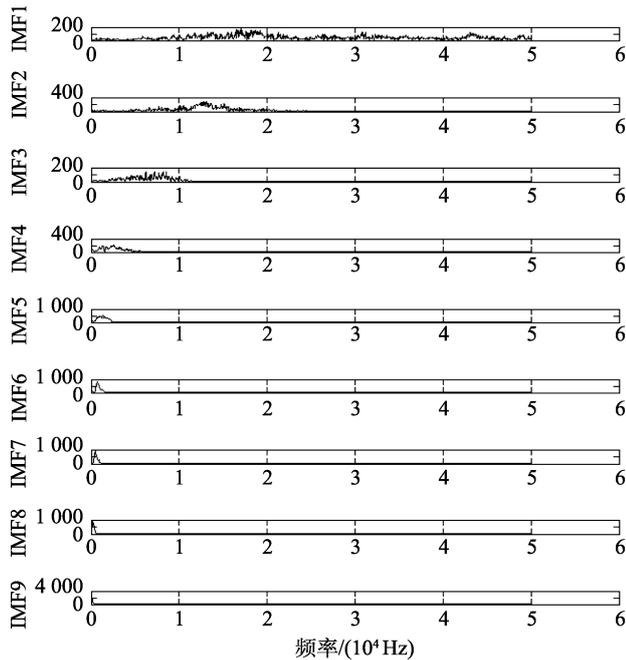


图 6 各阶 IMF 对应频谱图
Fig.6 Spectrums of each IMF

通过对原始异常冲击信号进行 EEMD 分解, 剔除趋势项后可得修正后的冲击信号如图 7 所示。对修正后的冲击数据进行正负谱分析, 如图 8 所示。经计

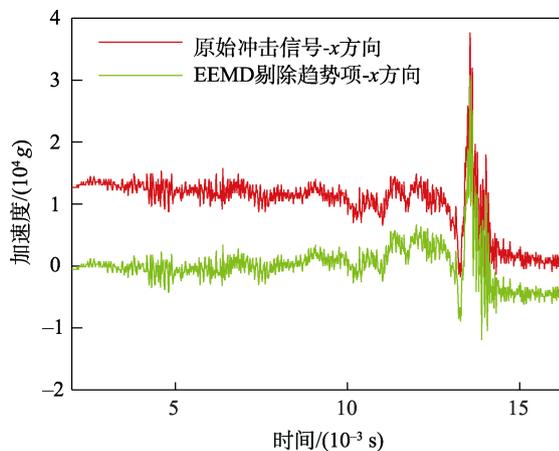


图 7 炮弹爆炸分离冲击信号与 EEMD 趋势项剔除对比
Fig.7 Comparison of pyrotechnic shock signals of cannonball and trend removal by EEMD

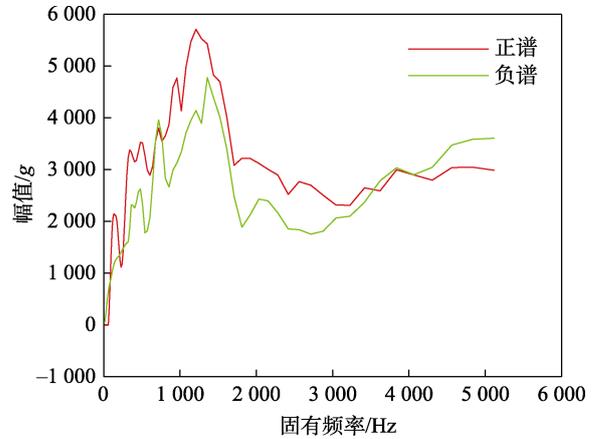


图 8 冲击信号 EEMD 趋势项后正负响应谱
Fig.8 Positive and negative shock response of trend removal by EEMD

算, 正负谱的相关系数为 0.938 8, 相关性较好, 冲击数据有效。修正后的冲击信号基本呈现出均值为 0 的修正后信号的最大冲击波形持续时间约为 1 ms, 冲击峰值为 30 700g。对修正后的冲击信号进行冲击响应谱分析, 其中倍频程为 1/12, 品质因子 $Q=10$, 曲线如图 9 所示。结果有效降低了由于趋势项带来的冲击响应谱低频 (700 Hz 以下) 量值, 冲击响应能量主要集中在高频, 峰值为 38 769g, 对应频率为 1 365 Hz, 低频能量较小。

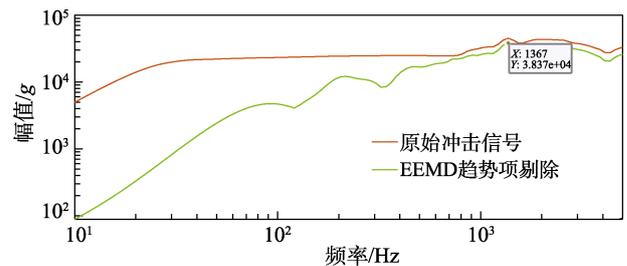


图 9 实测爆炸分离冲击信号与 EEMD 趋势项剔除后的冲击响应谱曲线
Fig.9 Shock spectrum of measured pyrotechnic shock signals and trend removal by EEMD

4 结语

针对当前异常大量值冲击数据时频域分析和处理中存在的问题, 本文提出了利用 EEMD 可自适应地对异常冲击信号进行固有模态函数分解与信号构建, 可有效剔除冲击信号中的趋势项, 并准确地获取了炮弹真实的爆炸分离冲击信号。最后对修正后的实测冲击信号进行冲击响应谱分析, 修正后的数据可显

著降低冲击响应谱中低频(700 Hz 以下)部分的量值,准确地获得了炮弹发射过程中的冲击响应。该研究为其他弹箭产品实测异常冲击数据时频域处理提供一种有效的方法。

参考文献:

- [1] 袁名松, 冯建伟, 黄云, 等. 巡飞攻击导弹红外成像导引头瞬态冲击响应分析[J]. 红外技术, 2014, 36(12): 953.
YUAN M S, FENG J W, HUANG Y, et al. Transient Impact Response Analysis of Loitering Attack Missile Imaging Infrared Seeker[J]. Infrared Technology, 2014, 36(12): 953.
- [2] 李海广, 潘宏侠, 任海锋. 冲击信号零漂修正的冲击响应谱互相关系数分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 219-225.
LI H G, PAN H X, REN H F. Baseline Correction of Impact Signals Using the Cross-Correlation Coefficient of Shock Response Spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 219-225.
- [3] 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.
LONG Y, XIE Q M, ZHONG M S, et al. Research on Trend Removing Methods in Preprocessing Analysis of Blasting Vibration Monitoring Signals[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 63-68.
- [4] 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.
ZHANG W W, PANG J Z, YANG S C, et al. Zero-Drift Analysis and Processing of Explosion Shock with Low Distortion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 509-516.
- [5] 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.
WANG Y, XUE Y Z, MA T H. Research on Zero Drift Processing Method Using EMD and Least-Square[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(2): 118-122.
- [6] 袁宏杰, 姜同敏. 实测爆炸分离冲击数据的分析和处理[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1): 72-74.
YUAN H J, JIANG T M. Analysis and Treatment of Measured Pyrotechnic Shock Data[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(1): 72-74.
- [7] 边杰, 王平, 梅庆. EEMD 结合能量特征和小波降噪的轴承故障诊断[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(6): 1206-1211.
BIAN J, WANG P, MEI Q. Fault Diagnosis of Bearings by Using EEMD Combined with Energy Feature and Wavelet De-Noising[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(6): 1206-1211.
- [8] 杨仁树, 付晓强, 杨国梁, 等. 基于 CEEMD 与 TQWT 组合方法的爆破振动信号精细化特征提取[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 38-45.
YANG R S, FU X Q, YANG G L, et al. Precise Feature Extraction of Blasting Vibration Signals Based on Combined Method of CEEMD and TQWT[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 38-45.
- [9] 张俊红, 王健, 毕凤荣, 等. 基于 EMD 和时频分析的低振动机体结构优化研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 117-121.
ZHANG J H, WANG J, BI F R, et al. Structural Optimization of a Low-Vibration Block Based on EMD and Time-Frequency Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 117-121.
- [10] 杨友涛, 刘国祥. 基于经验模态分解的轨道不平顺时频特征分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 733-740.
YANG Y T, LIU G X. Analysis of Track Irregularity Time-Frequency Characteristics Based on Empirical Mode Decomposition[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 733-740.
- [11] 郭泰, 邓忠民, 徐萌. 基于粒子群优化的改进 EMD 算法在轴承故障特征提取中的应用[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 182-187.
GUO T, DENG Z M, XU M. An Improved EMD Algorithm Based on Particle Swarm Optimization and Its Application to Fault Feature Extraction of Bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 182-187.
- [12] 方诗麟, 卢梅, 李铁. 基于冲击响应谱的导弹冲击试验条件制定与优化方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 203-207.
FANG S L, LU M, LI T. Institution and Optimization of the Percussion Experiment Condition of Missiles Based on the Shock Response Spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 203-207.
- [13] 袁宏杰, 李传日. 冲击响应谱控制的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(4): 494-496.
YUAN H J, LI C R. Study of Shock Response Spectrum Control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(4): 494-496.
- [14] 王翠荣, 施广富, 郭军. 固体火箭发动机冲击信号响应谱分析[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(2): 57-60.
WANG C R, SHI G F, GUO J. Analysis of Impact Signal Response Spectrum of Solid Rocket Motors[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(2): 57-60.
- [15] RATO R T, ORTIGUEIRA M D, BATISTA A G. On the HHT, Its Problems, and Some Solutions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(6): 1374-1394.
- [16] 胡爱军, 孙敬敬, 向玲. 经验模式分解中的模态混叠问题[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 429-434.
HU A J, SUN J J, XIANG L. Mode Mixing Problem in Empirical Mode Decomposition[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 429-434.
- [17] 罗奇峰, 石春香. Hilbert-Huang 变换理论及其计算中的问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(6):

- 637-640.
LUO Q F, SHI C X. Hilbert-Huang Transform and Several Problems in Its Calculation Method[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(6): 637-640.
- [18] YE H J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Novel Noise Enhanced Data Analysis Method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.
- [19] 汪国元, 徐洋, 胡晓楠, 等. 基于集总平均经验模态分解法(EEMD)的火箭解锁分离机构冲击响应分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 47-52.
WANG G Y, XU Y, HU X N, et al. Shock Response Analysis of the Unlocking Device of Satellite and Rocket Based on EEMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 47-52.
- [20] 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: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [21] 郭海东, 张永峰, 张强, 等. 优化 EMD 法及其在航空发动机振动信号分析中的应用[J]. 测试技术学报, 2015, 29(3): 271-276.
GUO H D, ZHANG Y F, ZHANG Q, et al. Optimization of Empirical Mode Decomposition and Its Application in Analysis of Aero-Engine Vibration Signal[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(3): 271-276.
- [22] 张海勇, 韩东, 王芳, 等. 希尔伯特-黄变换及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
ZHANG H Y, HAN D, WANG F, et al. Hilbert-Huang Transform and Its Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [23] LIU Z H, SU J, QIN C, et al. Wavelet Packet Decomposition and Grey Relational Analysis Application in Fault Diagnosis of Aero Hydraulic Pump[C]// 2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS). Beijing: IEEE, 2016.
- [24] RILLING G, FLANDRIN P. On Empirical Decomposition and Its Algorithms[C]// Grado IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. [s. l.]: NSIP, 2003.
- [25] 封雷, 卫炜, 刘曦, 等. 基于 HHT 的导弹发射冲击时频谱分析[J]. 振动测试与诊断, 2020, 40(1): 148-154.
FENG L, WEI W, LIU X, et al. Time Frequency Spectrum Analysis of Shock Signals Generated by Missile Launching Based on the Hilbert-Huang Transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 148-154.
- [26] 史云林, 郝如江, 安雪君. 基于 EEMD 和单通道盲源分离的齿轮箱复合故障诊断研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(1): 31-36.
SHI Y L, HAO R J, AN X J. Combination Fault Diagnosis of Gear Box Based on EEMD and Single Channel Blind Source Separation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2019, 32(1): 31-36.
- [27] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法第 27 部分: 爆炸分离冲击试验: GJB 150.27A—2009[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Laboratory Environmental Test Methods for Military materiel—Part 27: Pyroshock Test: GJB 150.27A—2009[S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2009.
- [28] LEI Y G, LIN J, HE Z J, et al. A Review on Empirical Mode Decomposition in Fault Diagnosis of Rotating Machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2): 108-126.
- [29] PENG Z K, TSE P W, CHU F L. A Comparison Study of Improved Hilbert-Huang Transform and Wavelet Transform: Application to Fault Diagnosis for Rolling Bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(5): 974-988.