爆炸分离冲击信号修正及结构状态分析

王鹏，李伟，张军，王军评，黄含军
（中国工程物理研究院总体工程研究所，四川 绵阳 621900）

摘要：为了对爆炸分离冲击信号进行有效性分析及校正，进而对关键结构的状态变化进行分析，基于离散小波分解方法，对实测分离冲击信号及其速度积分进行校正，去除零漂趋势项。选取冲击结束后剩余自由响应阶段，对结构状态进行分析，基于冲击信号初始谱及剩余谱相关性分析，提出确定剩余自由响应阶段起始分析时间的确定方法。对该剩余响应信号结合频域窗滤波后进行谱分析，通过 2 轮试验中相同位置固有频率的改变，判断结构的状态变化。有效去除了某实测信号的零漂趋势项，确定了剩余自由响应阶段起始分析时间，基于频谱分析结果得到了某结构的状态变化。该分析可为复杂序贯试验过程中非平稳冲击情形下的关键结构状态监测及分析提供一种解决思路及方法。

关键词：爆炸分离冲击；趋势项；小波分解；冲击响应谱；相关系数
中图分类号：TJ02；V216.5+5 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2022)04-008-06
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2022.04.002

Correction and Structural State Analysis under Pyrotechnic Shock Signal

WANG Peng, LI Wei, ZHANG Jun, WANG Jun-ping, HUANG Han-jun
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: This paper is to analyze the status change of key structure through validity analysis and correction of pyrotechnic shock signal. The zero-shift trend item of an actual pyrotechnic shock signal and its velocity integral are corrected and eliminated based on discrete wavelet decomposition method. The residual free response stage after the shock is selected to analyze the structural state. Based on the initial spectrum of the shock signal and the correlation analysis of the residual spectrum, a method for determining the initial analysis time of the residual free response stage is proposed. The residual response signal is combined with frequency domain window filtering to perform spectral analysis, and the status change of the structure is judged by the change of the natural frequency at the same position in two tests. The zero-shift trend item of a measured signal is effectively eliminated, the critical analyzing time of residual free response stage is determined, and the structural status change is obtained by the spectrum analysis. This analysis can provide a solution idea and method for monitoring and analyzing the key structure state under pyrotechnic shock environment during the complex sequential tests.

KEY WORDS: pyrotechnic shock; trend item; wavelet decomposition; shock response spectrum; correlation coefficient

收稿日期：2021-01-10；**修订日期：**2021-03-03
Received：2021-01-10；**Revised：**2021-03-03
基金项目：国家自然科学基金（11802292，11902310）
Fund：The National Natural Science Foundation of China (11802292, 11902310)
作者简介：王鹏（1988—），男，博士，工程师，主要研究方向为冲击动力学与环境试验技术。
Biography：WANG Peng (1988—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: impact dynamics and environmental test technology.
引文格式：王鹏，李伟，张军，等. 爆炸分离冲击信号修正及结构状态分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 008-013.
WANG Peng, LI Wei, ZHANG Jun, et al. Correction and Structural State Analysis under Pyrotechnic Shock Signal[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 008-013.

爆炸分离冲击是一种具有持续时间短、加速度幅值高、频率高、频带宽等特点的复杂振荡型冲击。在航天、兵器等工程领域产品考核过程中，其对航天器、武器装备部组件尤其是电子学系统具有重要影响[1,2]。在分离冲击环境下，高频率、宽频带特征可能带来的传感器谐振、放大器饱和、数据混叠等问题，以及测试系统本身性能不足、本底噪声干扰、传感器与产品连接刚度不够等均可能导致实测信号与真实信号的漂移趋势项，影响后续谱分析的有效性[3-5]。在航天器复杂综合性环境试验考核过程中，爆炸分离冲击环境是其任务剖面中的一个重要环节，若发生测试数据失真，将无法重新进行，进而影响产品考核。此外，对于结构复杂、功能多样装备的考核，在冲击过程中对某些复杂关键部位的状态监测（如连接是否松动、结构是否疲劳损伤等）有时缺少直接手段，往往只能在所有试验完成后的装备分解阶段才能判断。若无法及时判断试验中关键结构的状态变化，将对后续试验考核造成影响。因此，如何对冲击测试数据进行有效性分析与校正，进而对所关注结构的状态变化进行分析预测，将是装备环境试验中试验分析的重要内容。

美军标、NASA 及 GJB 150.27 等国内外标准[6-8]都建议采用零漂法和正负冲击谱方法对冲击测试数据的有效性进行判定。针对零漂数据的处理校正过程主要是从信号中去除低频趋势项的分析过程，主要有低频滤波法、最小二乘法、离散小波分解及经验模态分解等方法[5,9-14]。前 2 种方法要求对结构的频率成分及趋势项特征有先验了解及假设，一般仅满足精度要求不高的工程应用。经验模态分解通常需要结合最小二乘法使用，其分解所得本征模态函数的均值不为 0。小波分解方法中基函数具有多项式正交性，可以有效提取低阶多项式趋势项。此外，结构的固有频率等模态参数一般可通过模态振动试验得到，但在高频高幅值的爆炸分离冲击环境下，仅通过冲击数据分析结构状态变化存在一定难度。

本文针对爆炸分离冲击试验中某中远场结构实测信号展开分析，基于数据的有效性判定及校正结果，通过分析冲击信号初始谱及剩余谱的相关系数，提出并确定冲击后剩余响应段的临界分析时间，对冲击后剩余响应信号在所关注频段内结合频域窗滤波，并进行响应谱分析，通过固有频率变化监测分析结构状态变化。该分析可为复杂序贯试验过程中爆炸分离冲击情形下关键结构的状态分析提供一种解决思路及方法。

1　冲击数据有效性

某装备爆炸分离冲击试验中所关注的某中远场测点 S1（位于关键连接结构附近）的实测数据见图 1。首先采用零漂法进行数据判定，将实测加速度时域信号分别进行二次积分，得到积分后的速度与位移。图 1 中显示积分后的速度及位移均不收敛于 0，说明实测数据存在零漂现象。由于载荷经历不同结构由近场传递至中远场，其零漂谱与典型的爆炸近场谱存在一定差别。

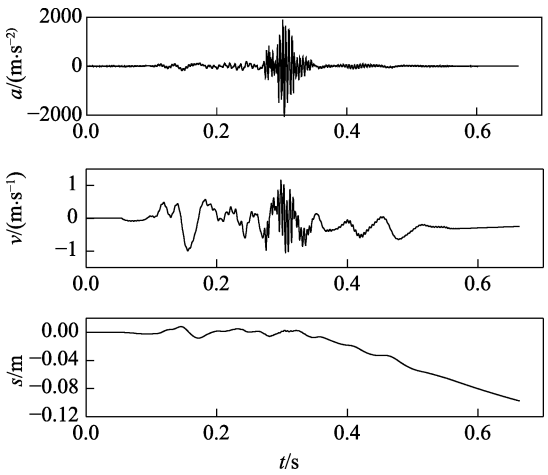

图 1　实测信号 S1 的零漂现象

Fig.1 Zero-shift phenomenon of measured signal S1

采用改进的数字递归滤波算法计算冲击响应谱。该方法最早由 Smallwood[15]提出，通过 Duhamel 积分计算不同单自由度系统在实测 S1 信号激励下的响应，得到最大响应与固有频率之间的关系，如图 2 所示。所得到的正负冲击响应谱主要在低频段出现偏差，也再次说明数据的有效性存在问题，在使用前需进行修正。

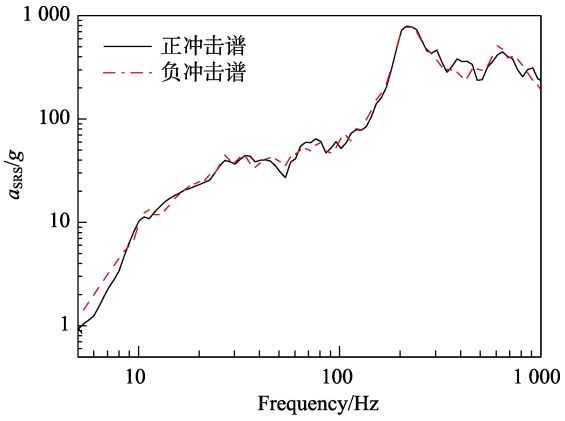

图 2　实测信号 S1 的正负冲击谱

Fig.2 Positive and negative SRS of measured signal S1

2　冲击数据修正处理

2.1　信号小波变换方法

小波分析具有多分辨率分析的特点，在时域及频域上均有表征信号局部信息的能力，广泛应用于各时频分析领域。一组实测信号 $f(x)$ 的小波变换及逆变换为：

$$\begin{cases} W_f(a,b)=\dfrac{1}{\sqrt{|a|}}\displaystyle\int_R f(x)\varphi\left(\dfrac{x-b}{a}\right)\mathrm{d}x=\left\langle f(x),\varphi_{a,b}(x)\right\rangle \\ f(x)=\dfrac{1}{C_\varphi}\displaystyle\iint W_f(a,b)\varphi\left(\dfrac{x-b}{a}\right)\mathrm{d}a\mathrm{d}b \end{cases} \tag{1}$$

式中：函数 $\varphi(x)$为母小波函数，其频谱满足条件 $C_\varphi=\int_R\frac{|\hat{\varphi}(\omega)|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty$，$\hat{\varphi}(\omega)$ 是母小波的傅里叶变换；$\varphi_{a,b}(x)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\varphi\left(\frac{x-b}{a}\right)$是由母小波函数通过伸缩和平移得到的一系列小波基函数，其中 a 为伸缩因子，b 为平移因子。在实际重构信号过程中，常对尺度及平移因子进行离散化，以消除式（1）中的积分变换冗余。经小波离散分解并重构后的信号表示为：

$$\begin{cases} f(x)=f_{\mathrm{a}}+f_{\mathrm{d}} \\ f_{\mathrm{a}}=A_N, f_{\mathrm{d}}=\displaystyle\sum_{i=1}^{N}D_i \end{cases} \tag{2}$$

式中：f_{a} 是第 N 次分解后的低频趋势项，需要剔除；f_{d} 为各阶高频细节分量 D_i 之和，即为修正后的信号。

2.2　信号修正结果

小波基函数的选择具有多样性，为了避免截断误差，这里采用 Daubechhies 等[16]构造的具有紧支集的正交 Db 小波基。在修正前，需要确定 Db 小波的分解层数及消失矩。S1 信号测试奈奎斯特频率 f_{N} 为 8 kHz，当分解层数为 N 时，可估算第一层低频趋势项的频率上限为 $f_{\mathrm{N}}/2^N$。由正负谱关系可知，当频率大于 200 Hz 后，正负谱基本无偏差，因此可估算出分解层数 N>5。已有研究表明，Db 小波消失矩大于 7 时，对修正结果影响不大[14]。因此，使用小波基函数 Db8（Db 小波函数，其消失矩阶数为 8）对实测信号 S1 进行 6 层分解，得到的各尺度分量如图 3 所示。

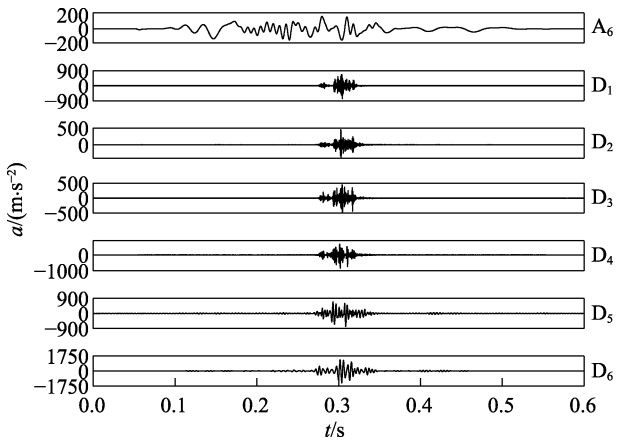

图 3　信号 S1 的 6 层分解结果

Fig.3 Level 6 decomposition of signal S1

信号 S1 经过一次离散小波分解后的加速度、积分后的速度和位移见图 4。可以看出，原始信号经一次修正后，积分速度收敛于 0，积分后的位移最大漂移量（约 0.5 mm）相比原始信号积分位移的最大漂移量（约 100 mm，如图 1 所示）减小了 99.5%。由图 4 可知，经过离散小波分解后，零漂现象已经基本消除。将修正前后的冲击响应谱进行比较，见图 5。从图 5 中可以看出，修正后，信号的低频段 SRS 值相比原始信号有明显减小。说明经过数据处理后，原始信号中低频趋势项得到了很好的抑制。此外，图 6

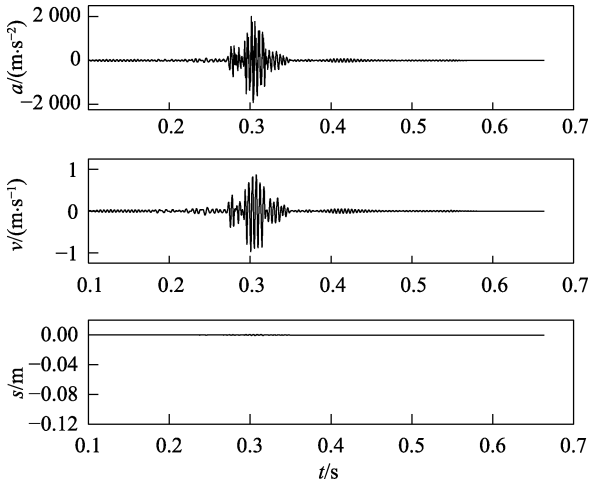

图 4　信号 S1 经修正后的加速度、速度及位移

Fig.4 Acceleration, velocity and displacement of signal S1 after modification

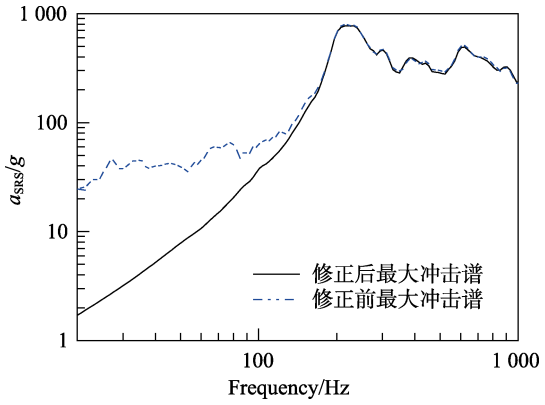

图 5　修正前后信号的冲击响应谱对比

Fig.5 Comparisons between original and modified SRS

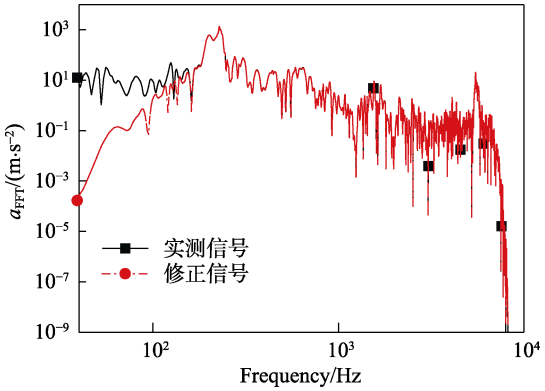

图 6　修正前后的 FFT 曲线

Fig.6 Comparisons of FFT between original and modified signals

给出了加速度信号在修正前后的傅里叶谱（FFT），可以观察到修正信号对原始信号的主要能量特征没有影响，剔除的趋势项主要对低频部分进行了能量抑制，对于高频部分几乎没有能量损失。以上结果也进一步说明了数据处理的有效性。

3　剩余响应阶段临界分析时间

爆炸分离冲击环境中，位于中远场区域的响应多数频率成分在 10 kHz 以下[2,7]。因此，对于远场结构来说，冲击衰减后的低频成分很可能对其造成结构损坏。载荷传递到关键结构位置 S1 的路径中，经过复杂的连接结构时，若连接状态发生变化，可能会影响系统的刚度，从而使得 S1 的一阶固有频率发生变化。这里将针对冲击激励结束后剩余自由响应段信号的频率成分进行分析，以求判断关注位置 S1 处的结构状态变化，而如何定量确定冲击后剩余自由响应段则是关键之一。

为了定量确定分析剩余响应段所需的临界起始时间，引入初始谱及剩余谱的相关系数，以便评价两者的相关程度，考察两谱之间的趋势变化特征，定义如下：

$$X_{\mathrm{orf}} = \frac{\mathrm{cov}(S_{\mathrm{I}}, S_{\mathrm{R}})}{\sigma_{S_{\mathrm{I}}}\sigma_{S_{\mathrm{R}}}} \tag{3}$$

式中：S_{I} 和 S_{R} 分别为某一时刻的初始响应谱及剩余响应谱；$\mathrm{cov}(S_{\mathrm{I}},S_{\mathrm{R}})$为两者的协方差；$\sigma_{S_{\mathrm{I}}}$ 和 $\sigma_{S_{\mathrm{R}}}$ 分别为变量 S_{I} 和 S_{R} 的标准差。在计算时，首先对信号进行有效性分析及修正，将冲击过程中任意时刻前的数据作为初始响应段计算初始谱 S_{I}，该时刻后的数据作为剩余自由响应段计算剩余谱 S_{R}。将不同时刻计算得到的初始谱及剩余谱数据代入式（3），得到相关系数 X_{orf} 随时间变化关系，如图 7 所示。参考 GJB 150.27[8]中分离冲击信号有效持续时间规定（27 ms），以此作为冲击特征时间尺度，将相关系数 X_{orf} 在时间尺度内的数据进行平滑处理，进而得到一般规律。从图 7 中可以观察到，在冲击进行过程中，初始谱及剩余谱有很高的相关程度，相关系数在 0.9 附近波动，直到冲击结束后，再缓慢减小，直至不相关。为保证信号主要特征的相关性，设定阈值为 0.9，使得 $X_{\mathrm{orf}} > 0.9$ 为强相关。以此为判据，结合时域信号，将 X_{orf} 在冲击结束后开始减小到阈值 0.9 以下且后续再也没有超过 0.9 的起始时间作为临界分析时间 T_{s}。在定量确定剩余自由响应阶段临界时间后，对结构状态变化情况进行分析。

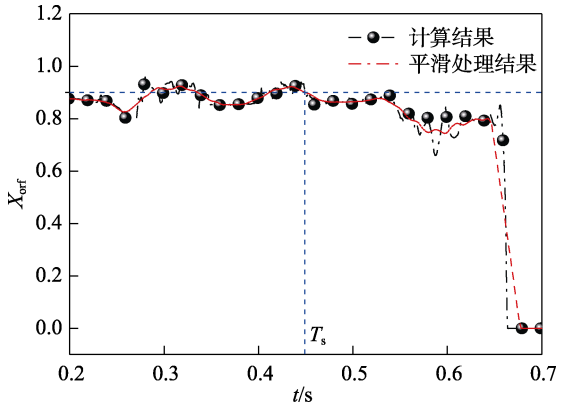

图 7　相关系数 X_{orf} 随时间变化关系

Fig.7 Variation of correlation coefficient X_{orf} with time

4　剩余自由响应阶段谱分析

在不可重复的复杂序贯试验过程中，无法通过停止试验单独对所关注结构展开分析，仅能通过试验中采集到的测试数据间接分析。为了准确判断关键结构位置 S1 处固有频率是否发生变化，不关注其余频率分量，在确定结构剩余自由响应信号的临界分析时间后，对该信号在所关注频段外进行滤波。已知该结构处不带阻尼减振装置，此处采用傅里叶谱加频域窗的方式进行滤波，以保证信号相位不发生移动以及较小的计算余量误差。频域窗采用常用的矩形窗，上下限截止频率分别设为 $0.707f_0$ 和 $1.414f_0$，如图 8 所示。图 8 中，f_0 为所关注的 S1 结构在试验前已知的固有频率。

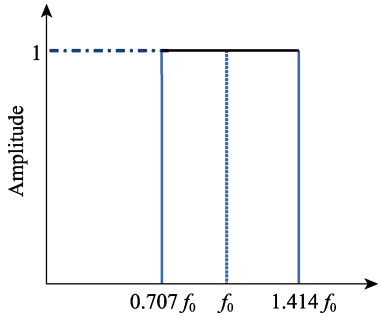

图 8　矩形频域窗

Fig.8 Schematic diagram of rectangular frequency domain window

对临界时间 T_{s} 后的剩余自由响应数据进行傅里叶频域滤波后，再计算其最大冲击响应谱，如图 9 所示。图 9 中，最大响应对应频率为 f_1，即为 S1 在经历爆炸分离冲击环境后的一阶固有频率。

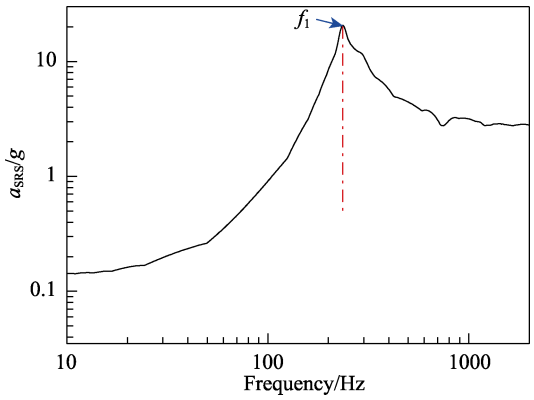

图 9　剩余响应最大冲击响应谱

Fig.9 Maximum SRS of residual response signal

为了证明该方法的有效性，对同样产品 2 轮相同试验中相同位置 S1 点的实测数据进行比较，如图 10 所示。S1 位置处为所重点关注的螺栓连接结构，试验 1 和试验 2 中采用相同的产品结构及连接螺栓，采用相同材质和尺寸但硬度规格不同的平垫圈，两者对螺栓施加相同的连接力矩，但试验 2 中的垫圈硬度小于试验 1，说明结构的实际连接状态不同。从图 10 可以得到，第 2 轮试验中，由剩余最大冲击响应谱反映的最大响应频率相比第 1 轮试验有明显减小，说明了 2 轮试验中螺栓连接状态不同，与实际状态相符合。也说明在本试验产品条件下，相同的螺栓连接结构在施加相同力矩的情况下，更小的垫圈硬度可能引起更低的冲击响应谱最大响应频率。通过以上分析，说明该分析方法可以为产品序贯试验过程中的状态变化提供思路及手段。

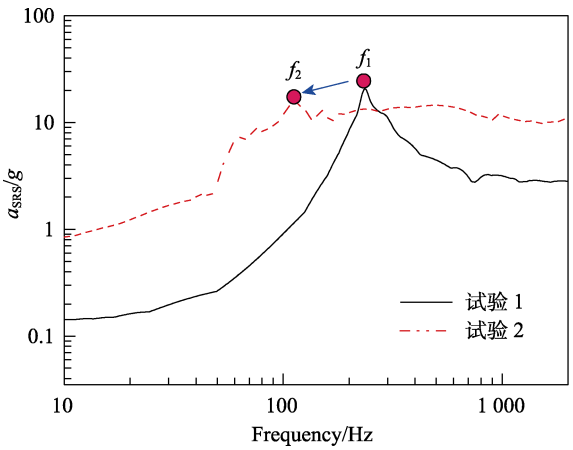

图 10　2 轮试验中最大剩余响应谱比较

Fig.10 Comparisons of maximum residual SRS between two tests

5　结语

基于离散小波分解方法对某装备在爆炸分离冲击环境下实测信号数据的有效性进行了分析，有效去除了零漂趋势项，且不会对原始信号的主要能量特征造成影响。

基于初始谱和剩余谱的相关性分析，通过相关系数阈值设定（X_{orf}=0.9），定量确定了高频非平稳冲击后自由响应阶段的起始分析时间，可通过自由响应阶段的谱分析结果开展结构状态变化分析。比较了不同试验中相同关键结构的频谱分析结果，基于冲击响应谱最大响应频率的变化分析，证明了结构状态的不同。

该方法可为不可间断、不可重复的复杂序贯环境试验中的非平稳冲击下关键结构状态监测及分析提供一种解决思路及方法，从而支撑产品设计及试验考核。

参考文献：

[1] MOENING C J. Views of the World Pyrotechnic Shock [J]. S &V Bul, 1986, 56(3): 3-7.

[2] 毛勇建，李玉龙. 爆炸分离冲击环境的模拟试验技术进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(4): 37-44.
MAO Yong-jian, LI Yu-long. Advances in Simulation Techniques of Pyroshock Environments[J]. Missiles and Space Vehicles, 2007(4): 37-44.

[3] CHU A. Zeroshift of Piezoelectric Accelerometers in Pyroshock Measurements[C]//Bulletin of the 57th Shock and Vibration. Washington DC: SAVIAC, 1987.

[4] 张国伟，冯顺山，俞为民. 高冲击过载加速度传感器零漂分析[J]. 华北工学院学报, 2004, 25(1): 64-67.
ZHANG Guo-wei, FENG Shun-shan, YU Wei-min. Analysis of Zero Drift of the Acceleration Sensor in High-Impulsion and High Overloading[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2004, 25(1): 64-67.

[5] 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 Wen-wei, PANG Jia-zhi, YANG Shi-chao, et al. Zero-Drift Analysis and Processing of Explosion Shock with Low Distortion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 509-516.

[6] MIL-STD-810G, Environmental Test Methods and Engineering Guides[S].

[7] NASA-STD-7003A, Pyroshock Test Criteria[S].

[8] GJB 150.27—2009，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[S].
GJB 150.27—2009, Laboratory Environmental Test Methods of Military Material—Part 27: Pyroshock Test[S].

[9] 王广斌，刘义伦，金晓宏，等. 基于最小二乘原理的趋势项处理及其 MATLAB 的实现[J]. 有色设备, 2005(5): 4-8.
WANG Guang-bin, LIU Yi-lun, JIN Xiao-hong, et al. Treatment of Tendency Part and Its MATLAB Accomplishment Based on Least-Square Principle[J]. Non-Ferrous Metallurgical Equipment, 2005(5): 4-8.

[10] SMALLWOOD D, CAP J. Salvaging Pyrotechnic Data with Minor Overloads and Offsets[J]. Journal of the IEST, 1999, 42(3): 27-35.

[11] HUANG N E, SHEN Zheng, 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.

[12] 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 Yuan, XIE Quan-min, ZHONG Ming-shou, et al. Research on Trend Removing Methods in Preprocessing Analysis of Blasting Vibration Monitoring Signals[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 63-68.

[13] 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 Hai-guang, PAN Hong-xia, REN Hai-feng. 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.

[14] 王锡雄，秦朝烨，丁继锋，等. 基于离散小波分解的火工冲击数据有效性分析与校正方法[J]. 振动与冲击，2016, 35(14): 1-6.
WANG Xi-xiong, QIN Zhao-ye, DING Ji-feng, et al. Validation and Correction of Pyroshock Data Based on Discrete Wavelet Decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(14): 1-6.

[15] SMALLWOOD D O. Improved Recursive Formula for Calculating Shock Response Spectra[J]. Shock and Vibration Bulletin, 1981, 51(2): 211-217.

[16] DAUBECHIES I, HEIL C. Ten Lectures on Wavelets[J]. Computers in Physics, 1998, 6(6): 697.

责任编辑：刘世忠