

爆炸分离冲击数据的零漂校正

张军, 牛宝良, 黄含军, 黄海莹, 王军评, 岳晓红

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 为消除爆炸分离冲击信号中的零漂趋势项, 提出一种爆炸分离冲击数据处理方法。**方法** 基于分段和线性拟合思想, 获取测试数据的零漂趋势项。通过分析原始信号和校正信号的频谱相关性, 定量讨论分段窗口数对试验数据有效性的影响规律, 进而给出爆炸分离冲击加速度信号的校正原则。**结果** 通过对试验数据进行有效性分析与校正, 能够较好地抑制积分零漂, 消除基线零漂趋势项对冲击谱的影响。**结论** 该方法可提高试验数据的准确性和有效性。

关键词: 爆炸分离冲击; 零漂信号; 相关性分析; 冲击响应谱

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.05.002

中图分类号: TJ711.0 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)05-0006-04

Correction of Zero-shift Signal under Pyroshock Environment

ZHANG Jun, NIU Bao-liang, HUANG Han-jun, HUANG Hai-ying, WANG Jun-ping, YUE Xiao-hong
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To propose a method for pyroshock data processing to reduce the influence of the zero-shift trend in pyroshock signal. **Methods** Null drift trend items of tested data were obtained based on segmentation linear fitting thought. The influence of the segmentation number on the results of integration and spectrum analysis was discussed by relevance analysis between the original signal and validated one. Then, the correction principles on pyroshock acceleration signal were given. **Results** Effective analysis and correction on experimental data could restrain the zero-shift trend and reduce the influence of null shift trend on shock spectrum. **Conclusion** The method can improve accuracy and validation of experimental data.

KEY WORDS: pyroshock; zero-shift signal; relevance analysis; shock response spectrum

火工装置广泛应用于火箭有效载荷(战斗部、卫星等)的级间分离以及附件展开等硬件动作。火工装置工作过程中, 产品部件将会承受爆炸冲击波、连接机构预紧变形能释放甚至分离机构与产品二次碰撞等力学载荷。目前, 利用加速度传感器来获得爆炸分离过程中的载荷模拟边界已成为产品可靠性设计中的重要内容^[1-2]。与其他爆炸过程类似, 爆炸分离冲击具有瞬态、高量级、高频率和宽频带的特征, 可能会引起传感器本身的谐振、测量系统饱和或数据混叠等问题, 导致信号出现随机性的基线零漂趋势项, 最

终影响积分运算和频谱分析结果的有效性^[3-4]。

为了制定更为准确的环境试验条件, NASA、MIL-STD-810G 和 GJB 150A 等相关标准^[5-7]都建议采用零漂法和正负冲击响应谱进行冲击数据有效性判定。冲击数据的校正主要是剔除零漂趋势项的过程。目前零漂校正的主要方法有低通滤波法、离散小波变换、经验模态分解和最小二乘法等^[8-17]。低通滤波法是以 Fourier 分析为基础, 实现剔除低频信号的目的, 该方法适用于处理各频率能量成分稳定的信号, 且使用前对系统的频率结构应有预先了解^[8], 而对爆炸分

收稿日期: 2017-12-22; 修订日期: 2018-02-23

基金项目: 国家自然青年科学基金(11602256, 11602257); 中国工程物理研究院总体工程研究所统筹授权项目(TCSQ041602)

作者简介: 张军(1988—), 男, 重庆人, 博士, 主要研究方向为冲击动力学试验技术及其应用。

离冲击这类短时非平稳信号并不适用。离散小波变换和经验模态分解都具备处理非平稳信号的能力,在侵略^[9]、爆炸分离^[10-11]、爆破振动^[12-14]、地震^[15]等冲击零漂信号的处理中已有应用。小波变换必须选择与信号特征最为相近的小波基,且对分解深度也有较为严格的要求。经验模态分解方法具有自适应性,但分解所得本征模函数均值不为 0,通常需要结合最小二乘法使用。

文中基于分段和线性拟合思想,提出了一种爆炸分离冲击数据处理方法。该方法通过分析信号的频谱与相关性,能够定量给出分段窗口数对试验数据有效性的影响规律,进而给出爆炸分离冲击加速度信号的校正原则。

1 冲击零漂现象

某模拟战斗部分离冲击试验采用了真实火工品作为冲击源,加速度测点 S1 位于爆炸螺栓附近。传感器类型为 CA-YD125,量程为 20 000 g,频响范围为 1 Hz~12 kHz,测试系统的采样频率为 50 kHz。实测的加速度信号 S1 如图 1 所示,对 S1 依次进行两次数值积分,分别获得速度和位移时间历程,采用改进的递归数字算法计算最大绝对值以及正负冲击响应谱[Skock Spectrum Response, SRS],如图 2 所示。

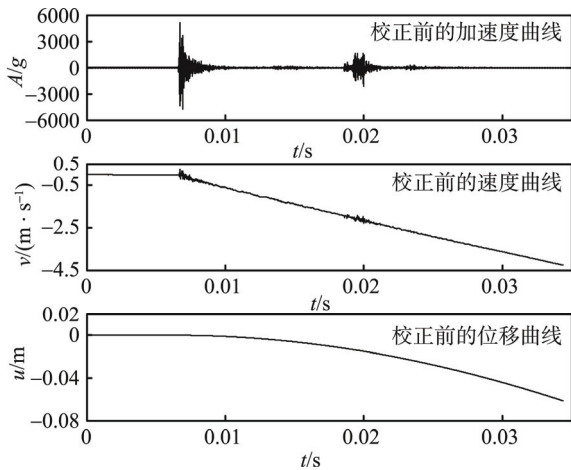


图 1 爆炸分离冲击加速度实测信号 S1 的积分零漂

从积分结果来看,测点的末速度达到 -4.2 m/s,末位移达到 7 cm。从客观实际来看,战斗部并未发生整体刚性位移,局部塑性变形并不明显。所得的正负冲击响应谱也不相同,初步表明测试数据发生了零漂。计算的冲击响应谱在[100, 1000] Hz 的低频段较大,在 20 g~100 g 之间,倘若把该次测量的冲击数据不经校正,直接作为爆炸分离冲击的环境试验条件,在地面试验中产品将无法通过试验考核。该次试验中产品的结构和功能均正常,能够承受住爆炸分离冲击载荷作用,说明测试的数据不正常,有必要从信号

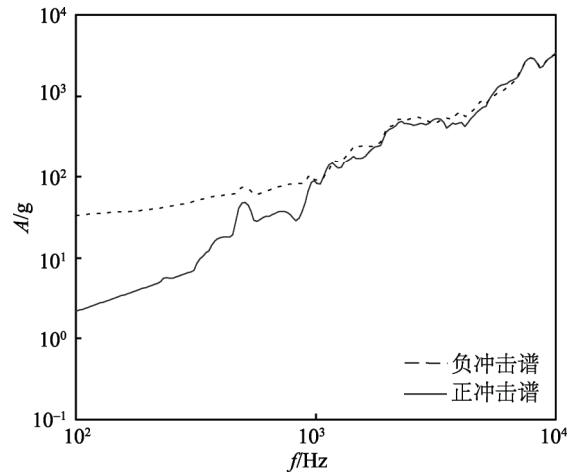


图 2 爆炸分离冲击加速度实测信号 S1 的正负冲击响应谱

S1 中去除零漂趋势项。

2 基于分段和线性拟合思想的去趋势项原理

在冲击信号处理中,将原始信号划分为不同阶段,每个阶段内假设零漂满足线性分布,即利用多个线性函数去逼近各自区间内的零漂趋势项。分段后的趋势项去除步骤如下:

- 1) 将时间序列 $x(t_i)$ 等分成 N_s 个不重叠的窗口,则每个分段窗口内含有的采样点数 $s=[N/N_s]$ (取整)。
- 2) 对第 j 段区间内信号的采样时间序列 $\{x^j(t_i)\}$ ($i=1,2,3,\dots,s$), 设定存在一次函数 $x_a^j(t)$ 去逼近采样序列,即逼近函数:

$$x_a^j(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot t \tag{1}$$

其中待定系数 a_j 可以通过 Matlab 的 Polyfit 拟合功能获得,使得逼近函数值 $x_a^j(t)$ 与原始数据 $x^j(t_i)$ 之间差的平方和 E 最小。

- 3) 采用多点平均方式对趋势项平滑降噪处理,其中平滑处理时左右的点数各为 $s/10$ 。

- 4) 得到所有窗口区间内的逼近函数后,就得到了整个时间序列上的拟合趋势项数据 $\{x_a(t)\}$,消除时间序列的趋势项便可得到校正后的信号 $x_d(t)$:

$$x_d(t) = x(t) - x_a(t) \tag{2}$$

3 爆炸分离冲击零漂校正实例

3.1 校正关键参数的选取

从第 2 节分析来看,分段的窗口数 N_s 是影响趋势项序列 $x_a(t)$ 的主要因素。为了避免剔除信号中的有用信息,提高数据分析的准确性,需要建立窗口数 N_s 的选取原则。

爆炸分离冲击试验数据校正的基本原则主要有

两个：一是依据 NASA、MIL-STD-810G 和 GJB 150A 等相关标准，积分后的速度和位移在试验结束后归 0，且正负冲击响应谱基本一致；二是剔除的信号 $x_a(t)$ 中包含导致积分零漂的误差趋势项，但校正后的信号 $x_d(t)$ 不应影响信号中的主要能量特征造成影响。

针对原则一，文献[11]通过信号的相关性分析给出了校正后的基本判断方法，引入速度零漂相关系数 $X_{or}(Z)$ 用于判断积分后对趋势项的包含程度，其中 $X_{or}(Z)$ 为校正前信号的积分与趋势项 $x_a(t)$ 的积分的相关系数，表达式为：

$$X_{or}(Z) = \frac{\text{cov}\left(\int x(t), \int x_a(t)\right)}{\sigma\left(\int x(t)\right)\sigma\left(\int x_a(t)\right)} \quad (3)$$

式中： $\text{cov}(A,B)$ 为变量 A 与 B 的协方差； σ_x 为变量 x 的标准差。

一般而言，趋势项对零漂的包含程度会随着分段数的增加进一步加强。为了保证校正后的信号满足速度和位移归零需求，确保尽可能包含低频趋势项，取 $X_{or}(Z)$ 为 0.999 以确定对应的分段窗口数下限。

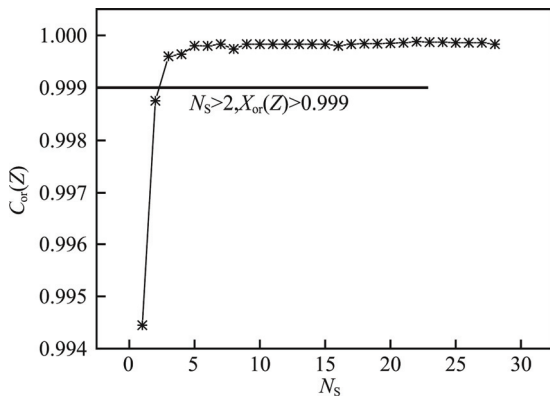


图 3 趋势项与原始信号积分的相关系数

针对原则二，主要通过冲击响应谱和傅立叶谱分析信号的能量分布特征确定需要消除的零漂频率范围。从图 2 中的冲击响应谱以及图 4 的傅立叶谱来看，冲击信号 S1 的能量分布较广，信号在 1500 Hz 以上的能量较大，去除零漂趋势项不应伤及 1500 Hz 以上的信号，每个段长度应不少于 1.333 ms，即 $1/(1500 \text{ Hz}/2)$ 。根据 GJB 150A.27 的相关规定，信号 S1 的有效持续时间约 27 ms，因此针对信号 S1 而言，分段数 N_s 应不大于 20 段，即 $27 \text{ ms}/1.333 \text{ ms}$ 。

经过上述分析，分段数的取值范围为 [3, 20] 之间。图 5 给出了在此区间内采用不同分段窗口数对 S1 进行校正后获得的冲击响应谱，结果发现在此区间内进行信号校正所获得的冲击响应谱曲线较为一致，结果趋于稳定。

3.2 校正结果分析

为对校正后的信号进一步分析，图 6 给出了

$N_s=18$ 时，从信号 S1 中提取的零漂趋势项 $x_a(t)$ 以及校正前后的加速度曲线，对零漂趋势项以及校正后的信号进行数值积分的结果如图 7 所示。

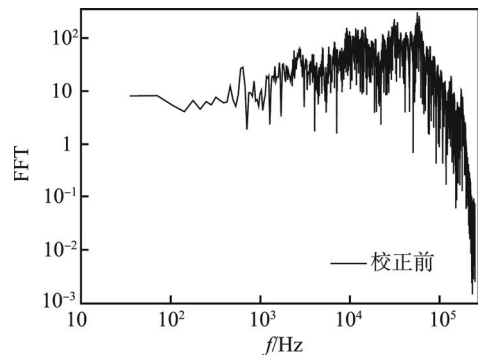


图 4 信号 S1 的傅立叶谱

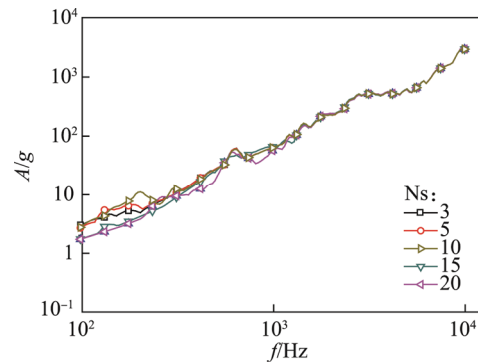


图 5 不同分段数下的最大冲击响应谱

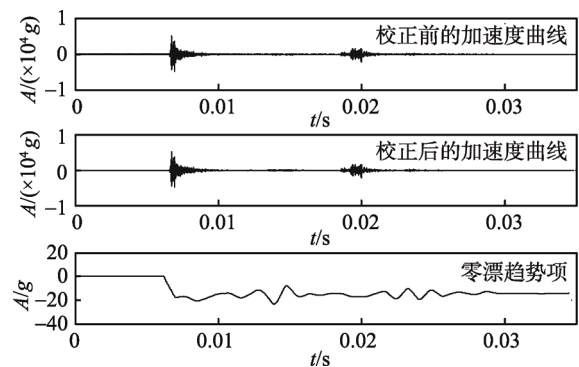


图 6 校正结果

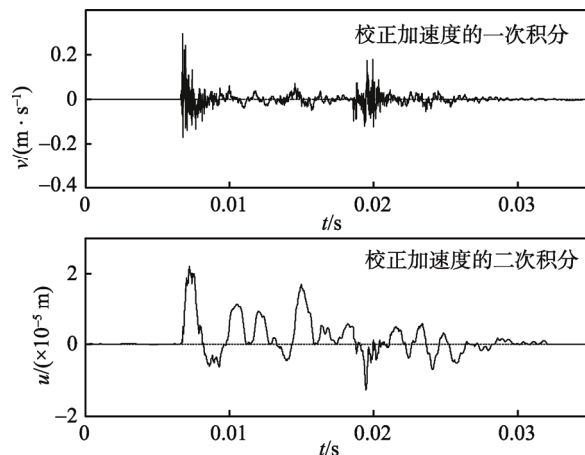


图 7 校正后一次和二次积分结果

1) 趋势项 $x_a(t)$ 呈现明显的非线性行为, 幅值范围为 $[-25, 0]g$, 对原始信号 $[-6000, 6000]g$ 的幅值范围而言很小。这也说明分离出的趋势项与原始信号为弱相关, 并未包含原始信号的主要能量。

2) 对趋势项 $x_a(t)$ 时域进行积分后, 速度零漂系数 $X_{or}(Z)$ 为 0.9999, 这说明剔除的 $x_a(t)$ 中包含了导致零漂产生的低频趋势部分。

3) 校正后的信号 $x_d(t)$, 无论是速度还是加速度均收敛至 0, 呈现出在基线上下的“震荡”现象, 基本规律与 NASA、MIL-STD-810G 和 GJB 150A 等相关标准中给出的典型爆炸分离冲击响应特征基本一致。

图 8 给出了信号 S1 在校正前后加速度曲线的傅立叶谱(FFT), 从图 8 可知, 当分段数 $N_s=18$ 时, 剔除的趋势项主要抑制了 $[1, 1000]Hz$ 范围内的低频部分, 对于高频部分几乎没有能量损失。计算校正后信号 S1 的正负冲击谱也基本一致, 响应的零漂已经消除(见图 9)。相比校正前, 在 $[1, 1000]Hz$ 的频率范围内, 校正后的冲击谱降低了 1~2 个数量级。当分段数 N_s 进一步增大时, 剔除的趋势项将包含更多原始信号的能量比重, 高频部分的能量损失将进一步增大(见图 8)。原始信号 S1 的正负谱不一致的部分主要集中在 1500 Hz 以下, 去除零漂趋势项不应伤及 1500 Hz 以上的信号。因此实际操作时, 文中结合着冲击谱和傅里叶谱的信息确定了每段应包含的时间长度, 进而

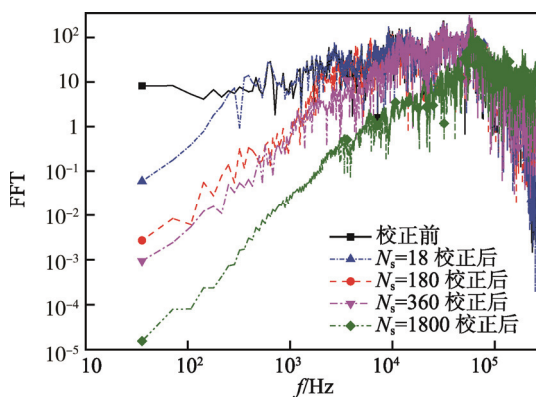


图 8 校正前后的 FFT 曲线

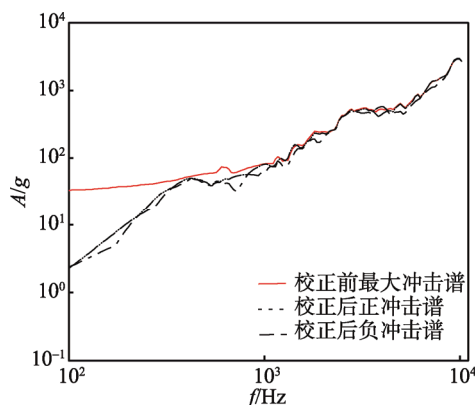


图 9 校正前后的冲击谱

选择合理的分段数。冲击信号的零漂趋势项使得预示结果偏大, 严重影响了数据的有效性, 文中提出的方法能够确定剔除低频零漂趋势项的基本原则, 实现爆炸分离冲击信号的有效校正。

4 结论

1) 基于分段线性拟合和相关性分析的去趋势项方法是一种简单有效的处理方法。

2) 以某爆炸分离冲击信号为例进行分析, 校正后, 加速度信号、速度信号均收敛至 0, 围绕基线上下“震荡”, 基本规律与 NASA、MIL-STD-810G 和 GJB 150A 等相关标准中给出的典型爆炸分离冲击响应特征基本一致。

3) 趋势项幅值相对原始信号而言很小, 分离出的趋势项与原始信号为弱相关, 未对原冲击信号主要分量造成影响。

参考文献:

- [1] LEE J R, CHIA C C, KONG C W. Review of Pyroshock Wave Measurement and Simulation for Space Systems[J]. Measurement, 2012, 45: 631-642.
- [2] 王军评, 毛勇建, 黄含军. 点式火工分离装置冲击载荷作用机制的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 32(2): 9-14.
- [3] CHU A. Zeroshift of Piezoelectric Accelerometers in Pyroshock Measurements[C]// Bulletin of the 57th Shock and Vibration. Washington DC, USA: SAVIAC, 1987: 71-80.
- [4] WALTER P L. Accelerometer Limitations for Pyroshock Measurements[J]. Sound & Vibration, 2009, 43(6): 17-19.
- [5] IEST-RP-DTE032.2, Recommended Practice for Pyroshock Testing[S].
- [6] MIL-STD-810G, Environmental Test Methods and Engineering Guides[S].
- [7] MULVILLE D R. Pyroshock Test Criteria, NASA Technical Standard[R]. Report NASA-STD-7003A, 2010.
- [8] 许朝阳, 刘俊民, 范延芳, 等. 时频分析技术在地震信号滤波中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(6): 1141-1145.
- [9] 王燕, 卢剑平, 马铁华. 侵入加速度信号零漂的处理方法[J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 510-514.
- [10] 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.
- [11] 王锡雄, 秦朝辉, 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.
- [12] 张胜, 凌同华, 曹峰, 等. 模拟自适应连续小波去除趋势项方法在爆破振动信号分析中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 255-261.
- [13] 谢全民, 龙源, 钟明寿. 小波包与分形组合技术在爆破震动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 12-6.
- [14] 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.
- [15] 胡灿阳, 陈清军. 基于 EMD 和最小二乘法的基线飘移研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 162-167.