DOI: 10.11883/bzycj-2017-0251
文章编号: 1001-1455(2018)03-0509-08

低失真爆炸冲击信号零漂分析和处理方法*

张文伟,庞家志,杨仕超,翟 疆
(航天科工防御技术研究试验中心,北京 100854)

摘要: 短时的爆炸瞬态冲击信号,具有冲击频带宽、幅值高特点,在测试过程中,常常会有信号失真的零漂现象。本文中详细分析零漂现象产生的原因,对比各种修正方法的优缺点,提出基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)改进高效算法,结合频域窗函数滤波方法,这种新修正方法,能够较好弥补现行修正方法的缺陷,可为瞬态冲击信号时域模拟提供失真较小的环境条件数据。

关键词: 经验模态分解;爆炸瞬态冲击;零漂;信号处理
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

固体燃料飞行器的任务剖面中,爆炸冲击环境严酷。在环境测试和地面复现环境试验中,极易出现零漂现象,究其原因,多数是由于传感器、放大器饱和或传感器电缆噪声等测试系统噪声造成的,也有部分是由于传感器与被测产品之间的连接刚度不够造成的[1-3]。爆炸冲击由于安装状态对冲击波的传递影响大、可复现性低,同时,点火冲击试验多具有破坏性,一次冲击试验完成后,试验样品也基本是损伤报废了。因此,当冲击数据采集完成后,如发生零漂现象,对数据进行修正处理后应用成为了大多数工程应用的必然抉择[4-5]。

零漂现象是由于传感器与被测产品中间的连接刚度不够,或由于产品结构在受到冲击时,发生了不可恢复的变形或滑移造成的。这类冲击信号是不可修正的,难以判断其是否为产品结构的冲击响应特征,还是信号采集的零漂误差。由放大器饱和造成的零漂,信号的低频部分具有典型的电容放电特征,信号没有削波现象发生的情况下,认为信号放大器出现了轻度饱和,造成所测电压叠加了拥堵电压误差,此类误差能通过有效的信号分离手段进行信号修正[6-8]。

本文中针对这类由于放大器饱和造成的零漂,详细分析了零漂现象产生的原因和现行的数据修正方法,对比各修正方法的优缺点,提出了基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)结合频域窗函数滤波的新修正方法,能够较好弥补现行修正方法的缺陷。

1 零漂成因分析

爆炸冲击时间短,量级大,在爆炸冲击信号测量中,大多会出现零漂现象。零漂产生的原因较为复杂,在无法分析鉴别零漂产生原因的情况下,相当一部分零漂误差无法找到合理的理论依据进行修正处理。造成爆炸冲击零漂误差主要原因有:

(1)压电晶体的磁畴变化造成零漂。高量级冲击激励下,传感器由于自身的谐振响应,会导致过大的应力,造成压电晶体磁畴的变化,磁畴将随着应力、电磁场和温度等环境因素的变化而达到新的平衡,磁畴的变化过程反映到传感器输出信号中,形成零漂误差。

(2)压电晶体的微量运动。压电晶体相对于质量块与基体的微量运动会造成传感器的输出零漂。传感器基体与被测件由于连接刚度低,在冲击激励下,传感器与被测件之间的微量运动也会形成零漂。从传感器结构来看,压电式冲击传感器有压缩型和剪切型,如图 1 所示。压缩型传感器,在装配过程中,需要通过紧固螺钉对压电晶体施加预紧力来产生线性输出。冲击应力超出预紧力时,惯性质量块与压

* 收稿日期: 2017-01-20; 修回日期: 2017-02-28
第一作者: 张文伟(1985—),男,硕士,高级工程师; 通信作者: 庞家志,pangjiazhi@126.com。

电晶体之间会发生微量移动,导致输出传感器输出零漂现象。压缩性传感器在侧向冲击力作用下,输出零漂现象更为严重。剪切型传感器无须施加预紧力,抗零漂能力较强。

(3)电缆噪声。电缆与传感器之间的连接松动及接头附近电缆固定不牢固,在冲击力作用下,电缆发生较大位移的抖动,由于电缆弯曲拉伸静电摩擦效应产生感应电荷,相对于传感器输出的微弱电荷号,会形成显著的零漂误差。

(4)传感器基座应变引起零漂。在大量级冲击下,基座会承受较大的应力波,产生较大的应变,可导致压缩型传感器预紧力的变化,压电晶体相对基座和质量块也会发生微量滑移而产生零漂。剪切型传感器的基座应变向压电晶体传递过程中,被极大的削弱,所以剪切型传感器抗基座应力能力较强。

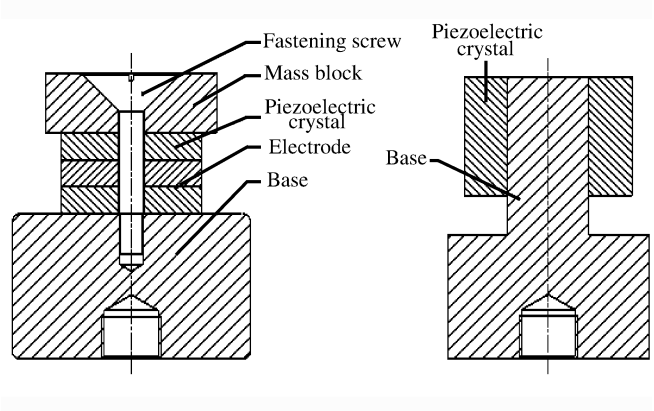


图 1 压电式冲击传感器结构

Fig. 1 Illustration of piezoelectric shock sensor

(5)信号放大器饱和。测量信号的电压变化速率,与信号频率相关。放大器输出电压信号为 $U\sin(2\pi ft)$,则输出电压信号的变化速率为:

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}=2\pi fU\cos(2\pi ft) \tag{1}$$

放大器输出信号的电压变化速率为 $2\pi f_{\max}U$,与放大器最大输出电压 U 和输入信号的最大频率 $f_{\max}$ 相关。放大器的电压最大变化速率即压摆率由输出电路参数所决定,输出信号电压的最大变化速率应小于放大器的压摆率:

$$\left.\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}\right|_{\max}=2\pi f_{\max}U<\frac{I}{C} \tag{2}$$

即:

$$U<\frac{I}{2\pi Cf_{\max}} \tag{3}$$

式中:I 为放大器输出电流,C 为放大器输出负载电容。

放大器在输出过程中,输出电流基本保持不变。如果信号的最大频率增加,则放大器信号的输出电压值就应降低,来满足放大器线性输出的压摆率要求。因此,当输入放大器的信号频率较大时,在低于放大器最大工作电压情况下,输入放大器信号的电压变化速率可能就超过了放大器压摆率的限制,出现放大器饱和堵塞状态,产生零漂误差。此时,信号峰值电压值叠加放大器饱和零漂误差值后的总电压峰值,可能还远没有达到放大器最大输出电压值,不会发生削波现象。放大器压摆率 $\frac{I}{C}$ 与输出电流和输出负载电容有关,放大器是否工作在饱和堵赛状态,与放大器负载等效 RC 电路的放电时间参数相关。放电时间短,则不易发生放大器饱和堵塞;放电时间长,则易发生放大器饱和和堵塞,产生零漂。

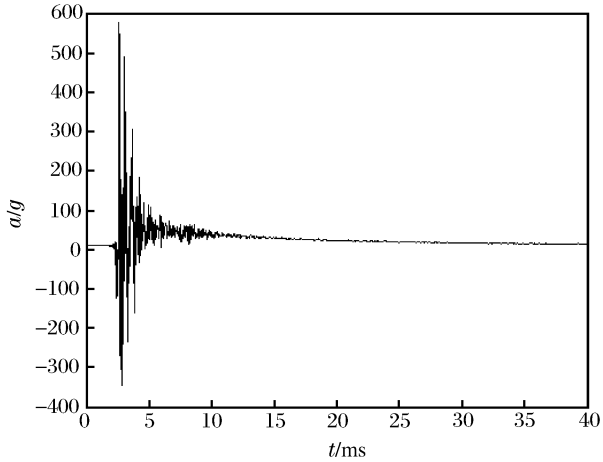


图 2 爆炸冲击信号

Fig. 2 Explosion shock signal

上述产生零漂的各个因素中，非放大器饱和造成的零漂，从信号特性上看，很难辨识出其是否是由于结构本身的响应引起的误差，还是是测量系统引起的零漂误差。如在明确知道冲击激励点至测量点之间传递关系的情况下，可以以传递关系来判断信号的修正可用性。多数情况下，认为此类零漂误差，在无法辨识因由和特征的情况下，是不可以进行合理修正后使用的，测量结果视作无效。对于由轻度放大器饱和引起的零漂误差，其来源明确、信号特征显著，认为可以通过合理的信号分离去噪处理进行修正。轻度放大器饱和引起的零漂信号具有两个特征，如图 2 所示。

图 2 中显见零漂呈现指数衰减规律，与 RC 电路放电曲线类似，同时加速度峰值也没有出现平顶削波现象。从这两个信号特征可以判断信号放大器出现了轻度饱和，产生了零漂误差。

2　信号去零漂处理

在爆炸冲击中，由于信号频带宽、高频能量大，冲击测量极易产生放大器饱和引起的零漂。当前主要的信号修正方法有三种：最小二乘法、小波方法和 EMD 方法[9-11]。

2.1　最小二乘法

在离散信号数据采集与分析处理中，由于各种原因存在趋势噪声，最小二乘法通过估计离散数据的趋势变化函数去除信号中趋势噪声。由前述分析所知，在假定冲击零漂误差是由放大器轻度饱和引起的情况下，电荷放电服从指数曲线，可假设零漂误差的趋势函数为：

$$f(t)=a_0\mathrm{e}^{-a_1 t} \tag{4}$$

利用最小二乘法对图 2 所示冲击信号去零漂后，可得到如图 3 所示结果。

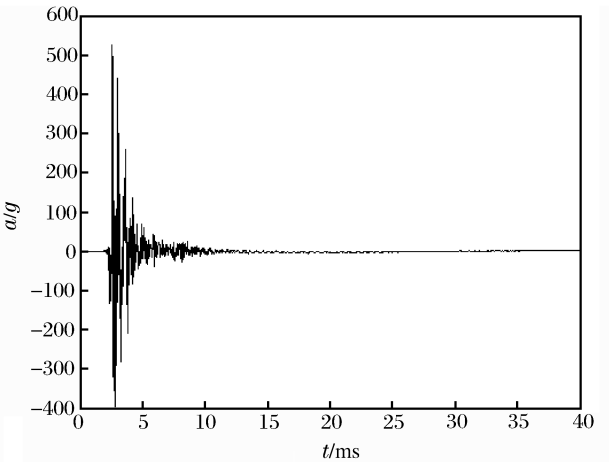


图 3　最小二乘法修正后信号

Fig. 3　Signal rectified using the least square method

2.2　小波信号分离法

小波变换是建立在傅立叶变换的基础上，把能量有限的信号用小波函数进行分解。可积平方函数 $\psi(t)\in L^2(R)$，若其傅立叶变换满足：$C_\psi=\int_R\frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty$，则称为一个基小波。在基波函数进行伸缩和平移得到小波基函数：$\psi_{a,\tau}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$，$a,\tau\in R$，$a>0$；由小波基函数可对任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 定义小波变换和逆变换：

$$\begin{cases}W(a,\tau)=\dfrac{1}{\sqrt{a}}\displaystyle\int_R f(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right)\mathrm{d}t\\[2ex] f(t)=\dfrac{1}{C_\psi\displaystyle\int_0^{+\infty}\frac{\mathrm{d}a}{a^2}\int_{-\infty}^{+\infty}W(a,\tau)\psi_{a,\tau}(t)\mathrm{d}\tau}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$C_\psi=\int_R\frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty$。系数 a 变化会使得基函数 $\psi_{a,\tau}(t)$ 的时间窗和中心频率发生相应变化，时间窗口与 a 成正比关系，中心频率与 a 成反比关系。小波变换是信号的时间-频率分析方法，具有多分辨率的特点，在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力。小波变换在低频段具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频段具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率，可同时观测信号时域和频域特征。采用 Daubenhies 小波对图 2 所示的冲击信号进行信号分离，得到结果如图 4 所示。

小波分离冲击信号，必须针对信号特点选择合适的小波基函数，实际应用表明，Db8 适用于冲击信号分析和处理，前 7 层作为重组信号，其它为零漂误差项 δ。修正后的信号如图 5 所示。

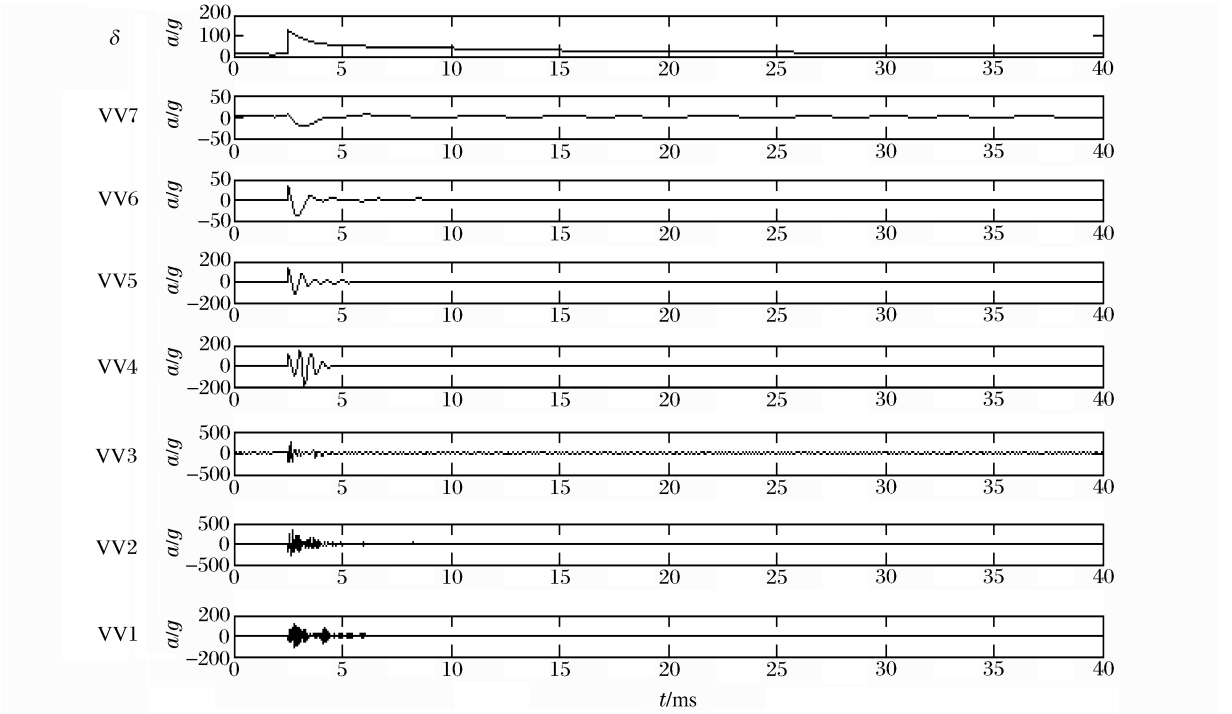


图 4 小波分离冲击信号

Fig. 4 Signals separated using the wavelet method

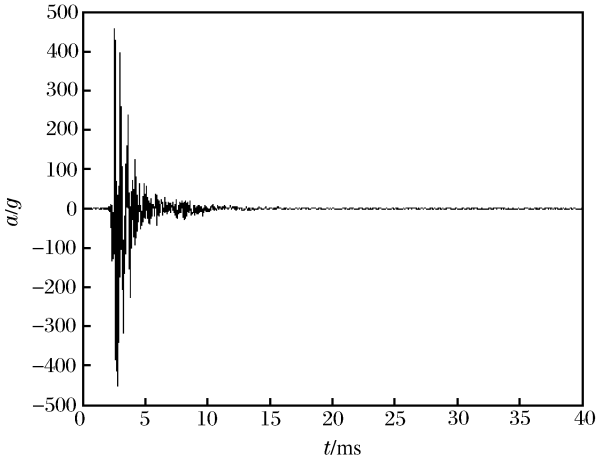


图 5 小波方法修正后信号

Fig. 5 Signal corrected by wavalet method

2.3 EMD 信号分离法

EMD 计算过程是一个筛选迭代过程,这一筛选过程类似于滤波作用,按照时间尺度的局部特征分解出频率高的 IMF 分量,而整个筛选过程会产生两个效应:一是消除低频载波;二是信号波形渐渐趋于对称。这正是去除时域趋势项所要求的结果。EMD 方法是自适应的信号处理方法,具有很高的信噪比。

EMD 方法的本质是通过特征时间尺度获得本征模函数,然后由本征模函数分解数据序列。本征模函数 IMF 分量,必须满足两个条件:一是整个信号的局部极大值与局部极小值的数目之和和过零点的数目相等或最多相差一个;二是在任何一时间点上,由局部极大值所定义的上包络线和极小值所定义的下包络线的平均值为零。然而,信号一般是复杂信号,并不满足 IMF 条件,可用经验模态的方法将待分析信号分解为一系列表征时间尺度的 IMF 分量,其原理和步骤如下:

(1)找出原始信号 $x_{n,k}(t)$ 的极值点;

(2)利用 3 次样条或 Hermite 多项式插值进行极值点拟合,找出局部极大值所定义的上包络线 $u_{n+1,k}(t)$ 与局部极小值所定义的下包络线 $l_{n+1,k}(t)$;

(3)计算包络线均值 $m_{m+1,k}(t)=[u_{n+1,k}(t)+l_{n+1,k}(t)]/2$;

(4)取出分量 $h_{n+1,k}(t)=x_{n,k}(t)-m_{n+1,k}(t)$;

(5)重复步骤(1)~(4),直到 $h_{n+1,k}(t)$ 满足 IMF 的定义,记为 $i_{n+1}(t)=h_{n+1,k}(t)$;

(6)计算余量 $r_{n+1}(t)=x_{n,0}(t)-i_{n+1}(t)$;

(7)如果 $r_{n+1}(t)$ 是一个趋势分量,计算停止;否则重复步骤(1)~(4)找出其他的 IMF 分量。

采用 EMD 方法分离图 1 所示冲击信号，如图 6 所示。

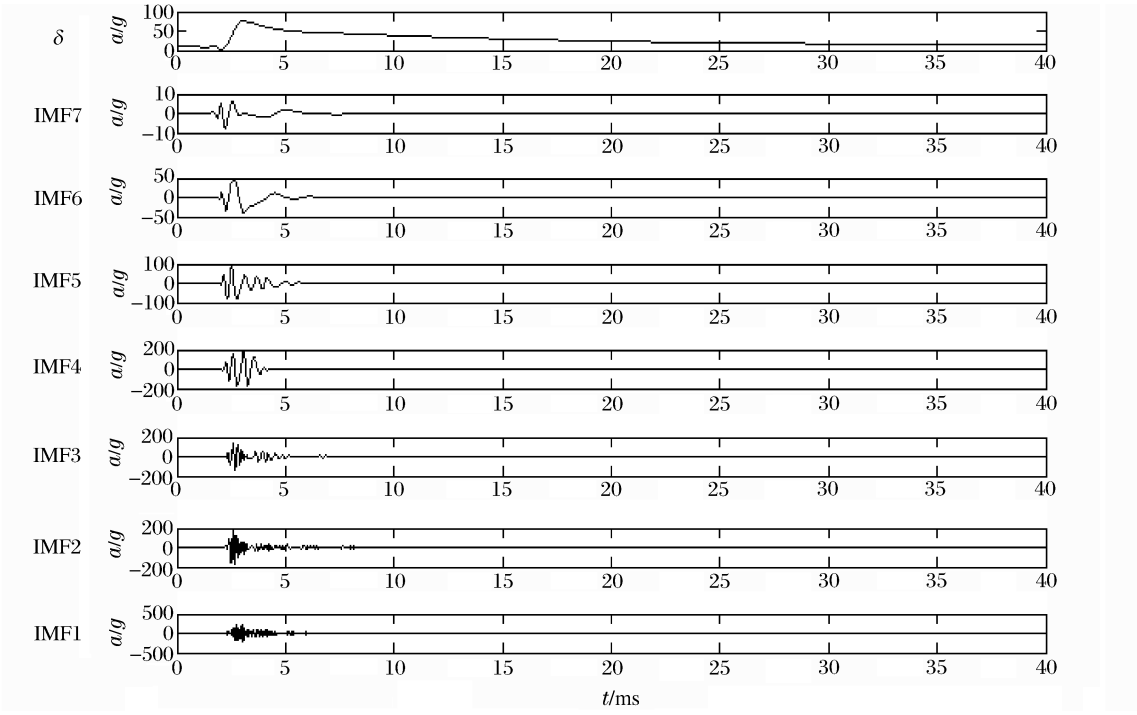


图 6　EMD 方法分离冲击信号

Fig. 6　Signals separated using the EMD method

通过 EMD 方法分离了 7 个 IMF 分量，余量为零漂误差量 δ，7 个 IMF 分量重组得到去除零漂后的冲击信号，如图 7 所示。

2.4　基于 EMD 的改进算法

由图 3、5、7 中可以看出，最小二乘法、小波方法及 EMD 方法都很好地去除了信号零漂误差，在时域上三者差异不大。图 8 所示为 3 种方法修正后的冲击响应谱。从图 8 中可以看出，最小二乘、小波方法及 EMD 方法在频域上的影响都超过 1 000 Hz，达到了 1 500 Hz 左右。在高频上，频谱与原始信号频谱也存在着差异，如图 9 所示。

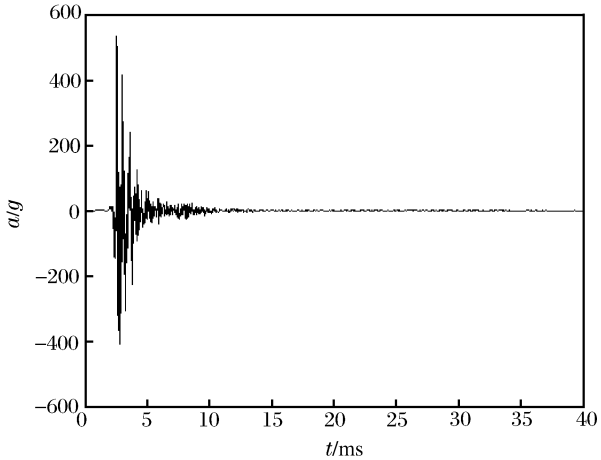


图 7　EMD 方法修正后信号

Fig. 7　Signal corrected by EMD method

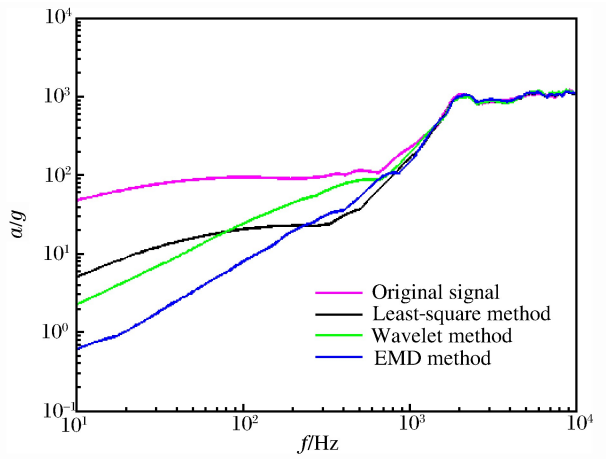


图 8　3 种方法修正后冲击响应谱

Fig. 8　Shock response spectrum rectified using three methods

从图 9 中可以看出，三者都很好的保留了信号频谱峰值特征，在约 2 000 Hz 的拐点频率以后，3 种方法去零漂修正后信号的冲击响应谱与原始信号冲击响应谱误差都不超过 1dB，对于以冲击响应谱进行环境复现试验来说，3 种信号处理方法都能够很好的满足要求。对于最小二乘法来说，需要一定的先验信息，需要确定零漂的类型，如线性函数、指数函数、幂函数等，分析计算过程较为复杂，工程适用性较差。以小波信号分离方法去除零漂误差，也需要先验信息来确定小波函数和小波分析阶数，分析阶数的变化对结果影响极大。总体来说，最小二乘方法及小波信号分离方法，都需要在信号处理前进行先验分析获得先验信息，才能获得较好的结果。EMD 方法具有较好的自适应性特性，在无任何先验信息的基础上使用 EMD 方法去除零漂误差，均能得到较好的结果。

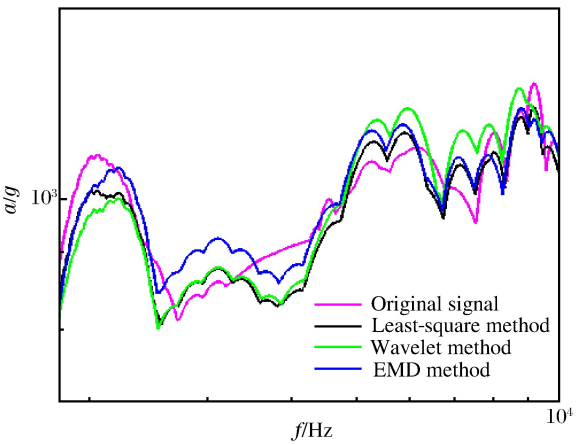


图 9 3 种方法修正后高频段冲击响应谱

Fig. 9 High-frequency shock response spectrum rectified using three methods

进行冲击响应谱(频域)模拟时，上述 3 种方法都较好的保留信号频谱峰值特征，误差也很小，处理后的信号均可以作为复现环境试验的条件谱。但冲击谱的低频部分往往反映了结构大应变或位移，产生应力的也较大。而低频段是难以确认信号是由结构本身响应引起的，还是零漂误差造成。

随着试验技术手段的进步，利用电磁冲击台，对量级较小的瞬态冲击，能够较好地从时域上进行模拟。这就要求经过零漂处理后的信号，尽量能够反映结构本身的响应特性。上述 3 种修正方法，在低频段的损伤均较大。在 EMD 信号分离中，第 1 次分离出来的分量 $h(t)$ 就包含了零漂误差。那么针对 $h(t)$ 进行处理就可快速得到零漂误差。同时，绘制包络线的过程，实质上是一个相对的低频重采样过程，会发生混叠现形象，是造成信号去零漂误差后高频段与原始信号偏离的主要原因。

单从除去零漂误差来说，可以用下面修正算法：

(1)对原始信号 $x_{n,k}(t)$ 进行滤波，滤波频率为采样频率 1/2.56 倍；

(2)找出原始信号 $x_{n,k}(t)$ 的极值点；

(3)利用 3 次样条或 Hermite 多项式插值进行极值点拟合，找出局部极大值所定义的上包络线 $u_{n+1,k}(t)$ 与局部极小值所定义的下包络线 $l_{n+1,k}(t)$；

(4)计算包络线均值 $m_{m+1,k}(t)=[u_{n+1,k}(t)+l_{n+1,k}(t)]/2$；

(5)取出分量 $h_{n+1,k}(t)=x_{n,k}(t)-m_{n+1,k}(t)$；

(6)计算余量 $r_{n+1}(t)=x_{n,0}(t)-h_{n+1,k}(t)$；

(7)余量 $r_{n+1}(t)$ 的冲击响应谱满足要求时，计算停止；否则重复步骤(1)～(6)找出合适的趋势项。

这里，滤波要求不引起信号相位移动，否则在计算余量时会引入较大的误差。因此，此处滤波采用傅立叶谱加频域窗的方式进行率滤波。对信号进行 FFT 变换，对变换后数据如图 10 所示的频域窗，加窗后数据进行逆 FFT 变换得到滤波后数据。傅立叶谱加窗滤波后的信号与原信号不存在相位差，是零相位滤波。

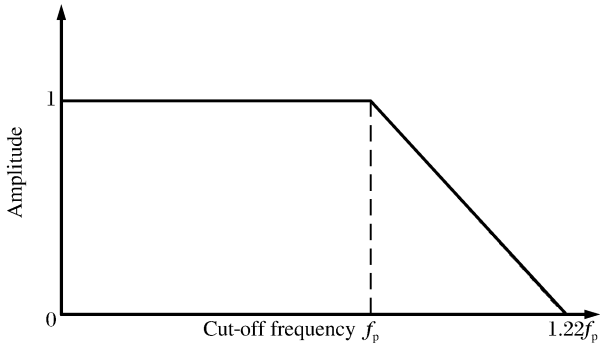


图 10 频域窗

Fig. 10 Frequency domain window

基于这种修正算法的去零漂误差处理后冲击信号，如图 11 所示，改进算法仅经过 3 次迭代运算即达到了要求，效率大大提高。

图 12～13 所示为最小二乘法、小波方法、EMD 方法和改进 EMD 方法修正后冲击响应谱对比图。从图中可以看出，修正算法较好地保留低频信号，700 Hz 以后信号拟合度都较好，前述的 3 种方法，低于 1 500 Hz 的低频信号削弱较大。另外，修正算法在高频段基本与原信号完全重合，高频信号基本无损伤。

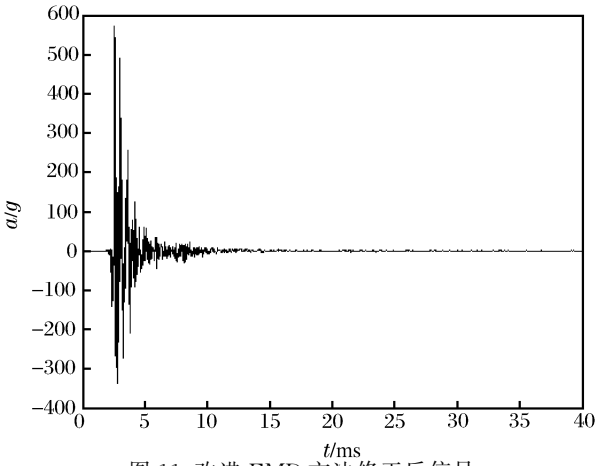


图 11 改进 EMD 方法修正后信号

Fig. 11 Signal rectified using improved EMD method

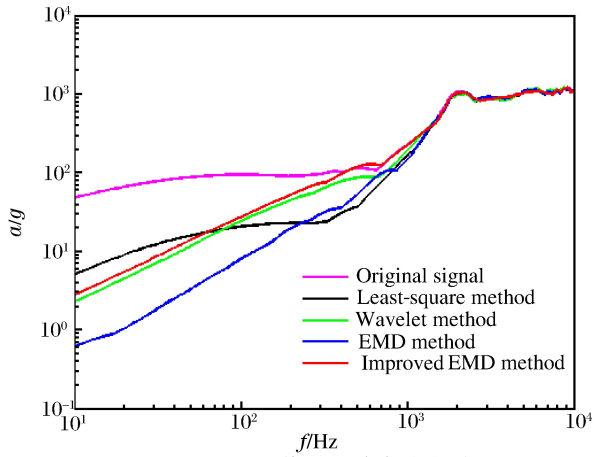


图 12 4 种方法修正后冲击响应谱

Fig. 12 Shock response spectrum rectified using four methods

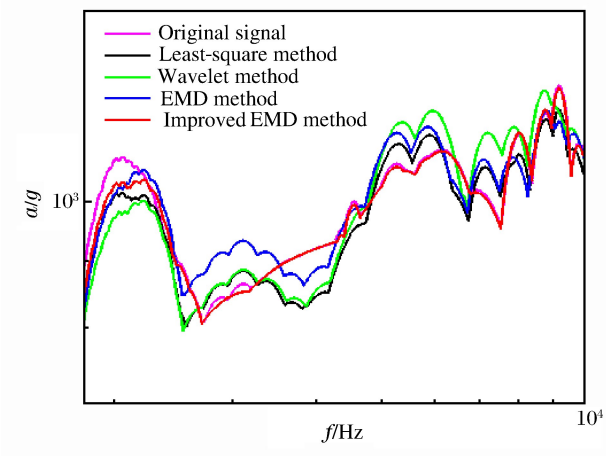


图 13 4 种方法修正后高频段冲击响应谱

Fig. 13 High-frequency shock response spectrum rectified using four methods

4 结　论

本文中给出通过采集信号判断放大器轻度饱和的原则，认为零漂具有电容放电特征；信号峰值不存在平顶小波现象。对比最小二乘法、小波信号分离法、EMD 方法后发现，3 种方法都能较好的去除零漂误差，但低频量削弱均较大。低频量的削弱可能导致低频模拟的失真，其可能剔除了结构本身的响应特征，不利于真实复现低量级爆炸冲击环境。使用基于 EMD 的改进算法，可大大降低低频信号的失真，高频区域也可较好地保持原信号特征，完全满足冲击环境时域模拟的要求。同时，基于 EMD 的改进算法，计算效率相比其它算法具有高效的特点，同 EMD 算法一样具有自适应性，适合工程上大数据量的处理，也尽可能保证了原始信号的有用信息。

参考文献：

[1] 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 Guowei, FENG Shunshan, YU Weiming. 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.

[2] 夏伟强，马铁华，范锦彪，等. 压电式加速度计在高冲击环境下的零漂分析[J]. 传感技术学报，2007，20(7)：1522-1527.
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.

[3] 何宗颖，解凤娟，郭旻，等. 高能量冲击条件下的加速度测试[J]. 火炮发射与控制学报，2011(1)：85-88.
HE Zongying, XIE Fengjuan, GUO Min, et al. Acceleration measurement technology in high energy shock envi-

ronment test [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011(1):85-88.

[4] 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 Haiguang, PAN Hongxie, REN Haifeng. 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.

[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.
FAN Jinbiao, ZU Jing, XU Peng, et al. Impact deceleration signal procession for concrete target penetration[J]. Journal of Detection & Control, 2012,34(4):1-5.

[6] 李晓强,李建刚,王继红,等.基于 GJB150 舰船冲击测量中零漂问题分析[J].环境技术,2016,34(5):75-78.
LI Xiaoqiang, LI Jiangang, WANG Jihong. Analysis on zero drift problem in ship shock measurement based on GJB150[J]. Environmental Technology, 2016,34(5):75-78.

[7] 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 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.

[8] 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 Xixiong, QIN Zhaoye, DING Jifeng, et al. Validation and correction of pyroshock data based on discrete wavelet decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(14):1-6.

[9] 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 Yan, XUE Yunchao, 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.

[10] 朱学锋,韩宁. 基于经验模态分解的非平稳信号趋势项消除[J].飞行器测控学报,2012,31(1):65-70.
ZHU Xuefeng, HAN Ning. Removal of non-stationary signal trend items by empirical mode decomposition [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012,31(1):65-70.

[11] 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.
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.

Zero-drift analysis and processing of explosion shock with low distortion

ZHANG Wenwei, PANG Jiazhi, YANG Shichao, ZHAI Jiang

(*Aerospace Science and Industry Defense Technology Research and Test Center, Beijing* 100854, *China*)

Abstract: Due to its wide shock frequency and high amplitude, an explosion shock signal is commonly characterized by the phenomenon of signal zero drift in its measuring shock tests. In this study, we examined the origin of this zero drift phenomenon, compared the advantages and disadvantages of various methods used to rectify it, and proposed an improved version of the empirical mode decomposition (EMD) method with the window function filter in the frequency domain. The result shows that our improved EMD method can make up for the defects suffered by the current methods and provide data for explosion shock signal processing with low distortion.

Keywords: empirical mode decomposition; explosion transient shock; zero drift; data processing

(责任编辑 王易难)