

振动信号趋势项提取方法研究

张 军, 潘泽鑫, 郑玉新, 李 言

(白城兵器试验中心, 吉林白城 137001)

摘 要: 针对某车载武器振动位移测试中存在的严重趋势项干扰问题, 提出了基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的信号处理方法. 为有效提取趋势项, 提出了一种新的趋势项判定方法. 该方法根据振动信号相对时间轴对称的特点, 通过比较各 IMF 分量与原始信号的均值判定该阶 IMF 分量是否为趋势项. 模拟振动信号仿真证明了方法的有效性. 最后对实测信号进行了 EMD 处理并最终重构了振动位移信号, 与小波变换方法及一种定性的 EMD 趋势项判定方法进行了比较, 结果表明提出的基于 EMD 的信号趋势项提取和判定方法有更大的优越性, 有助于客观评价该武器性能.

关键词: 信号处理; 振动位移; 趋势项; 经验模态分解; 小波变换

中图分类号: TN911.7; TJ06 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)01-0022-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.01.004

Research on Vibration Signal Trend Extraction

ZHANG Jun, PAN Ze-xin, ZHENG Yu-xin, LI Yan

(Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng, Jilin 137001, China)

Abstract: A signal processing method based on empirical mode decomposition (EMD) is proposed, aiming at the serious interference problems that exist in the vibration displacement tests for the vehicle weapon. A new judgement criterion of determining the trend is presented for extracting the trend effectively. According to the symmetrical characteristics of the vibration signal relative to the time axis, the method determines whether the IMF component belongs to the trends by comparing the mean value between each order IMF component and the original signal. Effectiveness of the method is verified by the simulation vibration signal. The measured signals are processed by EMD, and the vibration displacement signal eventually is reconstructed. By comparing with wavelet transform method and a qualitative EMD trend determinant method, the results show that the trend extraction method based on EMD is effective and helpful to evaluate the performance of the weapon objectively.

Key words: signal processing; vibration displacement; trend; EMD; wavelet transform

1 引言

武器射击过程中各部件的振动信号复杂, 包含频率丰富的振动特征信号以及干扰信号, 干扰信号的存在增加了对测试结果正确评价的难度. 在进行某车载武器试验中, 为了计算武器后坐能量大小, 需要测试武器身管及其连接体整体后坐运动的位移变化情况, 测试传感器选用激光多普勒测振仪, 先获得结构的振动速度信号, 然后数值积分得到最终的位移量. 但是测试结果存在多重干扰, 导致积分结果产生趋势项使结果严重失真, 这就需要对测试结果进行一定的处理以获得真实的位移量.

信号趋势项的消除有很多方法, 如: 平均斜率法、差分法、低通滤波法、最小二乘拟合方法、小波变换方法以及经验模态分解方法(EMD)方法等^[1,2]. 与其他几种方法相比, EMD 方法无需关于原信号的先验信息, 具有较强的自适应性, 因而在多领域实践中得到了广泛的应用^[3-7].

经验模态分解方法(EMD)是一种新的信号处理方法, 它可以依据信号的自身尺度特征自适应地将其分解为若干个被称为本征模函数(IMF)的和. 因此, 采用 EMD 方法进行趋势项提取, 就是如何通过各阶 IMF 分量的性质确定趋势项的问题. 一般认为趋势项是指信号中周期大于记录长度的成分^[1], 所以趋势项的确定

一般采取以 EMD 余项作为最终的趋势项^[2-5]. 根据 EMD 方法的性质,理想情况下,其分解余项即为原始信号的趋势项,但在实际应用中由于端点效应及模态混叠等问题的存在,仅将余项作为最终趋势项可能会导致较大的误差. 因此,需要给出一种判定准则或方法将一部分属于趋势项的 IMF 分量也抽取出来以改善趋势项提取效果. 研究人员为此提出了一些改进方法,文献[8]提出一种结合 EMD 和 DFA (Detrended Fluctuation Analysis) 的综合降趋势方法并有效地应用到分数高斯噪声的趋势项提取中. 文献[9]通过将每阶 IMF 分量与原始信号求相关系数,认为低频 IMF 分量中与原始信号的相关系数较大的均为趋势项的一部分. 文献[10]在研究基于 EMD 方法诊断机械振动信号故障时介绍了一种趋势项识别方法,将 EMD 的分量分为噪声、信号以及趋势三部分,然后计算每阶 IMF 分量与所定义的原信号局部均值的皮尔森相关系数,通过设定的阈值将三部分分别提取出来. 文献[11]通过计算每个 IMF (把余项也看做一个 IMF) 的边际谱,计算相邻 IMF 的边际谱相关系数,当某个系数大于给定经验值,则取相应 IMF 及其后所有 IMF 的和作为趋势项提取出来. 文献[12]基于含有趋势项的 IMF 分量的均值不为零的思想,提出了一种趋势项判定方法,首先确定含有趋势项的几个 IMF 分量,再通过高通滤波从这些确定的 IMF 分量中去除高频分量,从而提取出最终的趋势项. 其他方法如比值法、能量法、比值-能量法也能在一定程度上提高趋势项提取精度^[13,14].

上述方法都能够较好地抽取原始信号中存在的趋势分量,在一定程度上改善趋势项提取质量. 李秀坤等人提出了一种更为简单实用的趋势项判定方法,文献[15]认为,缓慢趋势项的估计可能是分解后的余项和几个低频模式分量的和,因而提出根据 IMF 分量的均值取值情况确定趋势项的估计方法,认为当前阶 IMF 均值明显偏离零点时,即可判定此时的 IMF 进入了缓慢变化的状态. 该方法原理简单并且适用于振动信号特点,但其判定准则存在较大的主观倾向,不便于趋势项的自动抽取. 本文结合振动信号的特点以及文献[15]的趋势项判定方法,提出一种新的趋势项自动判定方法并应用于基于 EMD 的振动信号趋势项抽取中,取得了较好的效果.

2 EMD 方法

经验模态分解方法 (EMD) 是由美国 NASA 的黄锷提出的一种信号分析方法^[16]. 它依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解,无需预先设定任何基函数,具有自适应性. 由于 EMD 的特点,其在理论上可以应用于任何类型的信号的分解,因而在处理非平稳及非线

性数据上,具有非常明显的优势. 作为一种应用,EMD 方法可以有效地提取一个数据序列的趋势.

根据定义,EMD 方法将信号分解为若干本征模函数 (IMF) 的和. IMF 具有如下两个特征:(1) 极值点 (极大值或极小值) 数目与过零点数目相等或最多相差一个;(2) 由局部极大值构成的上包络和由极小值构成下包络的平均值为零. 这些 IMF 分量既可以是线性的,也可以是非线性的;既可以是平稳的,也可以是非平稳的. IMF 的分解通过一种称为筛选 (Sifting Process) 的步骤来完成. 具体过程见相关文献[16].

信号筛选过程中停止准则的选择关系到 EMD 效果,通常采用连续两次筛选结果之间的标准差 SD 值作为筛选停止条件^[16].

本文采取该筛选停止条件同时使得当前筛选结果满足 IMF 特征 (1),SD 值取 0.3.

3 趋势项判定方法

信号经 EMD 分解后,各阶 IMF 由高频到低频排列分布 (这里将余项也看作一个 IMF), 根据趋势项缓慢变化的特点^[1]可知趋势项即为第 j 个 IMF 分量到最后一个 IMF 分量的和. 因此,趋势项的判定即确定 j 的值. 文献[15]提出利用 IMF 均值为零的特点,通过计算前 n 个 IMF 均值的和,认为当 $n=j$ 、前 n 个 IMF 的均值和明显偏离零点时即可确定 j 的值. 上述方法是一种定性的判定方法,需要主观判断. 本文根据实测振动信号相对于时间轴对称的特点结合文献[15]提出一种改进方法,期望给出趋势项判定的新思路.

对于时间轴对称的振动信号来说,如果其上叠加了趋势项,则该信号 $s(t)$ 的均值 $\bar{s} = \sum_{t=0}^T s(t)$ 完全取决于趋势项的均值 \bar{tr} . 理想情况下,二者的比值 $\bar{tr}/\bar{s} = 1$. 但在实际应用中,这个条件过于严格,因此只需满足该比值 $\bar{tr}/\bar{s} > th$ ($0 < th < 1$) 即可. 经过大量仿真分析,认为当 th 取 0.95 是合适的.

信号 $s(t)$ 经 EMD 后得到 n 个 IMF 分量,根据前述分析,趋势项判定方法为:

$$(1) \text{ 令 } j=n, \text{ 计算原信号 } s(t) \text{ 的均值 } \bar{s} = \sum_{t=0}^T s(t);$$

$$(2) \text{ 计算 IMF 分量的均值 } \bar{tr} = \sum_{i=j}^n \sum_{t=0}^T imf_i(t);$$

(3) 判断 \bar{tr}/\bar{s} 是否大于 th , 如果是,则结束判定,输出第 j 至第 n 个 IMF 分量的均值和为趋势项,如果不是,则令 $j=j-1$ 并转入 (2).

由此,最后将输出第 j 至第 n 个 IMF 分量的均值和,即为最终需要提取的趋势项.

4 仿真分析

本文以下面的模拟振动信号为例进行仿真实验,分析了本文提出趋势项判定和提取方法的效果. 仿真信号为 $f(t) = 0.6 \cdot \cos(2\pi \cdot 10 \cdot t) + 0.2 \cdot \cos(2\pi \cdot 50 \cdot t) + 0.4 \cdot \cos(2\pi \cdot 100 \cdot t)$, 其波形如图 1 所示. 以工程中常见的趋势项类型分别构造线性型、多项式型以及指数型三类趋势项^[1], 并将这三类趋势项分别加到图 1 所示的信号上构造包含不同类型趋势项的仿真信号. 这三种趋势项定义如下:

线性型: $tr1 = 0.5 - 0.4t$

多项式型: $tr2 = 0.7 + 0.2t + 0.05t^2 + 0.002t^3$

指数型: $tr3 = 0.3 \exp(-1.4t)$

将提出的 EMD 趋势项判定方法用于三种趋势项的提取中, 结果如图 2 所示. 图中虚线表示通过 EMD 趋势项判定方法提取的结果, 实线为实际趋势项, (a) 为线性型趋势项, (b) 为多项式型趋势项, (c) 为指数型趋势项. 由图中可以看出, 如果不考虑端点效应的影响, 文中提出的趋势项提取方法能够很好的自动判定和提取出各种类型的趋势项, EMD 提取的趋势项与实际趋势项

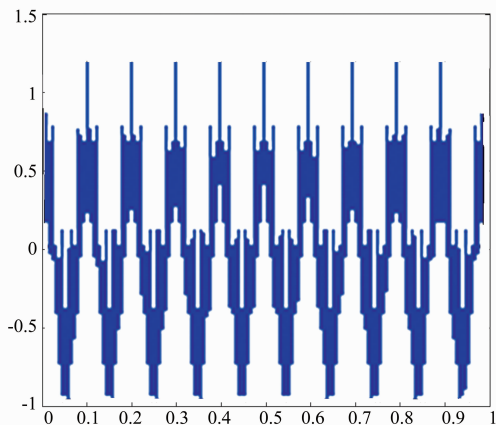


图1 仿真信号波形

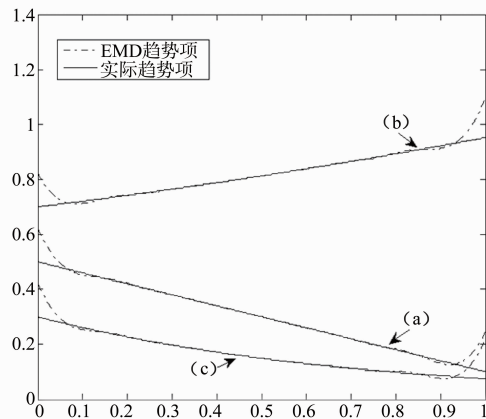


图2 EMD趋势项与实际趋势项比较

非常接近. 说明了本文提出的趋势项自动判定与提取方法的有效性.

5 基于 EMD 趋势项提取的信号处理

在进行某车载武器试验中需要测试武器身管及其连接体后坐运动的位移, 由于武器射击过程中结构产生的冲击振动频率丰富、频带较宽, 试验中采用激光多普勒测振仪进行测试得到振动速度信号, 然后再通过数值积分获得最终的振动位移信号. 实际测试典型结果如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为采用数值积分获得的振动位移变化曲线. 从数值积分曲线可以看出, 采集的振动速度信号存在严重的干扰使得积分后的信号出现较大的失真. 如果不对信号进行一定的处理就很难正确地给出实际的振动位移信号.

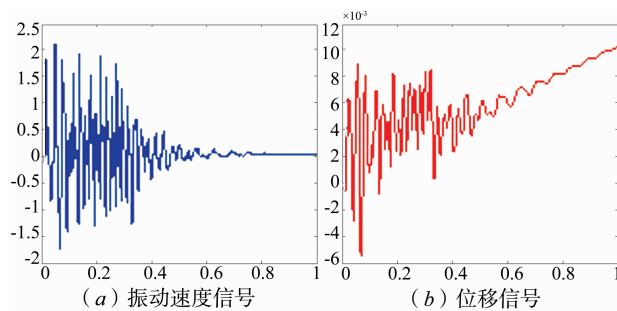


图3

产生信号干扰的主要原因有采集的速度信号中存在的直流分量以及由于传感器和放大器随环境温度变化而引起的零点漂移、传感器低频性能不稳定、传感器周围的环境干扰等.

5.1 振动信号预处理

为了消除信号中的直流分量, 可以采用以下方法:

首先求出采集信号的平均值, 即 $\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i$. 其中, N 为采集点数. 然后用原采样点的值减去平均值即可, $x'_i = x_i - \bar{x}$. 根据上述关系计算出去除直流分量后的振动速度值以及相应的数值积分后位移曲线如图 4 所示. 由图 4 所示, 信号中的直流干扰在一定程度得到了解决, 但是从位移的前半段仍可以看出存在严重的趋势项干扰. 因而有必要提取趋势项, 消除其对信号的干扰.

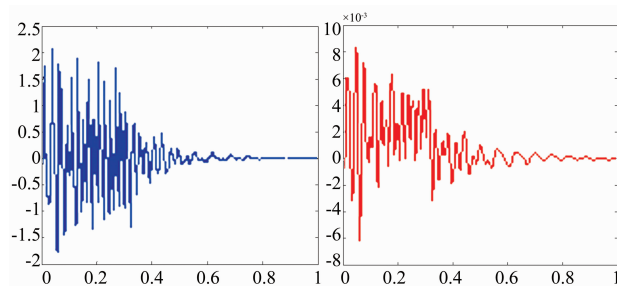


图4 去直流后的速度信号及相应的位移信号

5.2 基于 EMD 的振动信号分解与重构

EMD 方法在理论上可以应用于任何类型的信号分解,具有自适应性,在处理非平稳及非线性数据上具有非常明显的优势.这里采用 EMD 方法对武器振动信号

做进一步处理,即对信号进行分解,根据上述的趋势项判定方法提取出趋势项,最后重构出真实的振动位移信号.

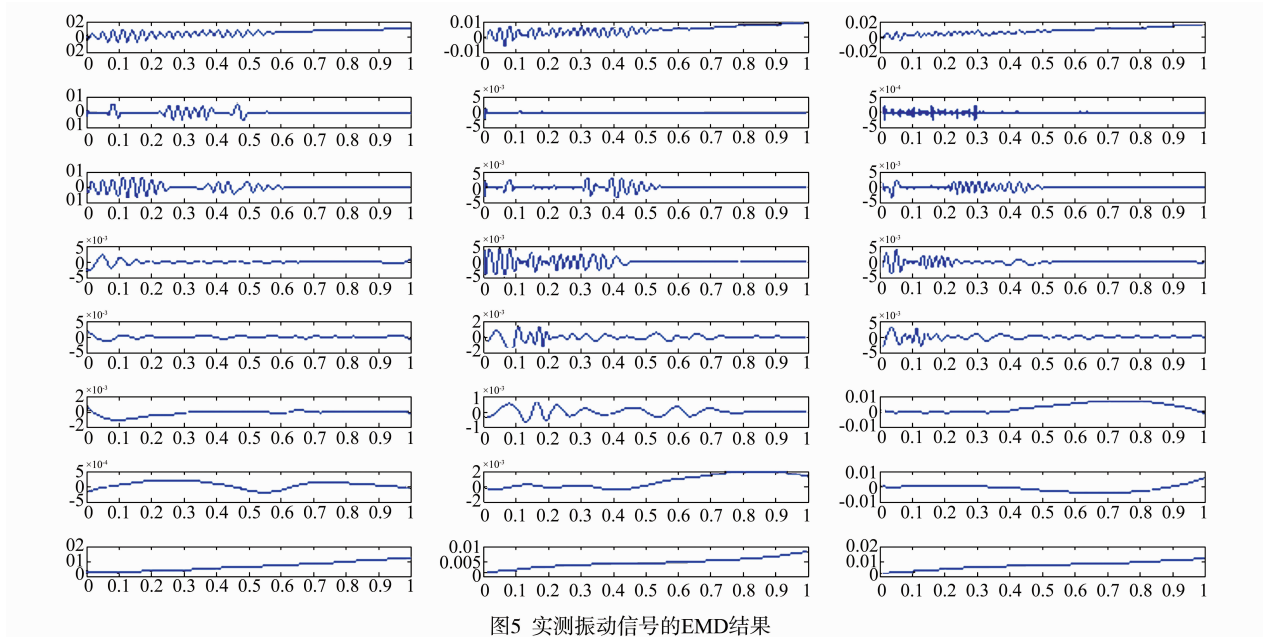


图5 实测振动信号的EMD结果

根据 EMD 方法原理,对 3 组实测振动信号进行了分解,结果如图 5 所示. 每组的第一排信号为原始振动信号,各组信号经 EMD 分解后均得到 7 个 IMF 分量 (包含余项). 根据趋势项判定方法,可以计算各组信号及相应 IMF 分量的均值如表 1 所示. 由此可以得出各组信号的趋势项提取结果为: 第一组趋势项 $tr_1 = \sum_{i=7}^7 imf_i(t)$; 第二组趋势项 $tr_2 = \sum_{i=6}^7 imf_i(t)$; 第三组趋势项 $tr_3 = \sum_{i=5}^7 imf_i(t)$.

振动信号中提取出来,利用其余 IMF 分量重构原信号,如图 6 所示. 从图中可以看出,信号的趋势项已被较好的去除,振动信号的变化特征与实际结构的振动特性比较吻合,证明了 EMD 趋势项提取方法的有效性.

表 1 信号及各阶 IMF 均值

	\bar{s}	\bar{i}_1	\bar{i}_2	\bar{i}_3	\bar{i}_4	\bar{i}_5	\bar{i}_6	\bar{i}_7
1	65.78	1.37	0.28	-0.50	0.13	-1.66	0.49	65.66
2	52.14	0.08	0.36	0.37	-0.22	0.06	6.74	44.76
3	88.55	0.01	0.46	-0.04	-0.02	28.18	-11.68	71.64

确定了各组信号中的干扰趋势项,就可以将其从原

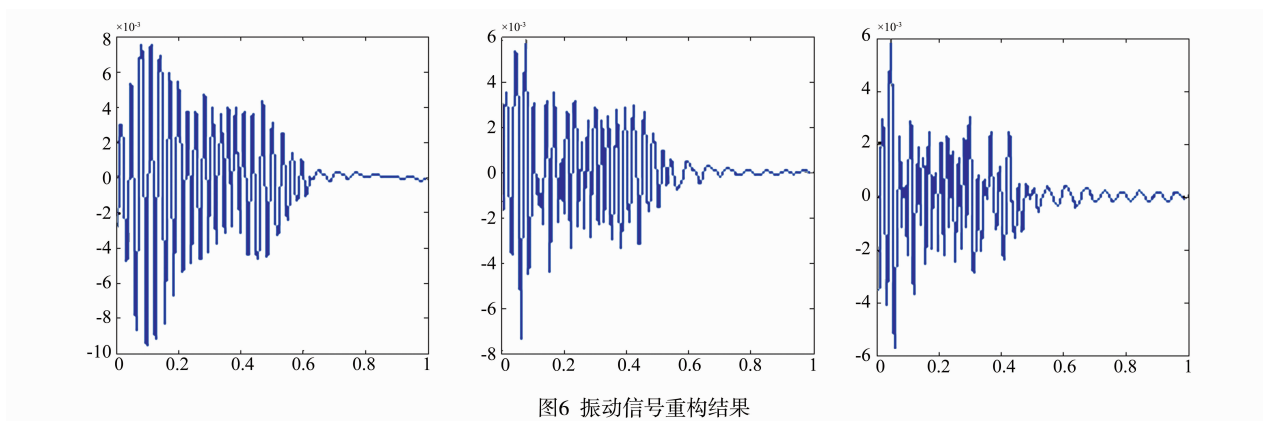


图6 振动信号重构结果

为了进一步说明本文提出方法在振动位移信号趋势项提取中的优越性,结合小波变换方法在复杂工况

下较好的分离趋势项的特性^[17],分别应用小波变换方法和文献[15]提出方法对上述三组实测数据进行趋势

项提取. 由于小波变换方法中小波基的选取对消除信号趋势项效果影响较大^[18], 因此, 本文通过对实际应用效果的比较优选出 3 种小波基分别为 db4、coif4 和 sym4. 为了发挥小波变换方法在趋势项提取中最大的优势, 进一步比较发现应用 coif4 小波基在实测数据上效果最好. 小波变换的另一个重要参数就是分解层数, 对于趋势项提取, 不同的分解层数对提取效果影响很大. 通过分析, 当分解层数在 10–11 时都能达到较好的效果.

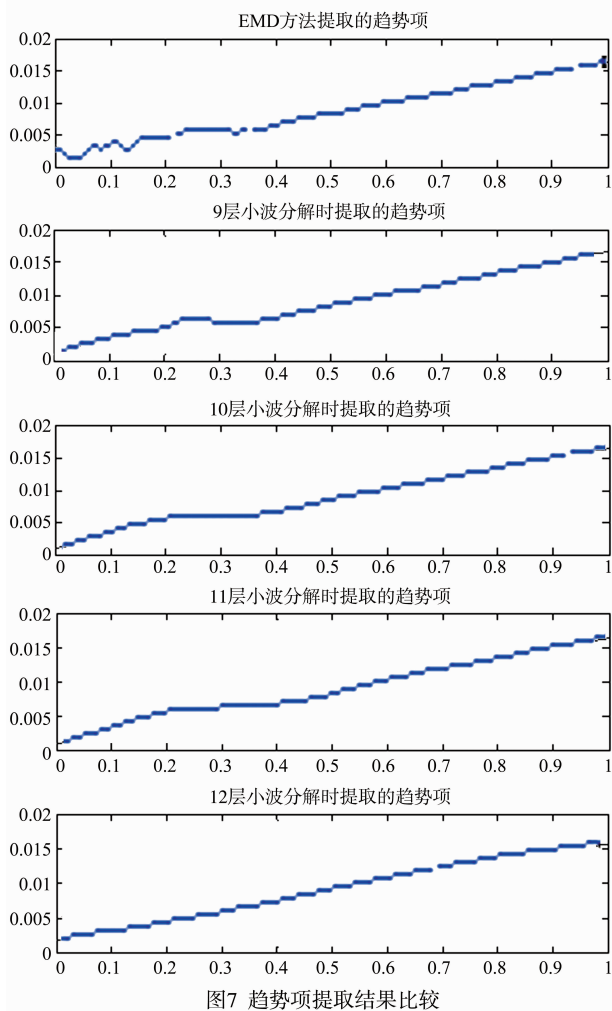
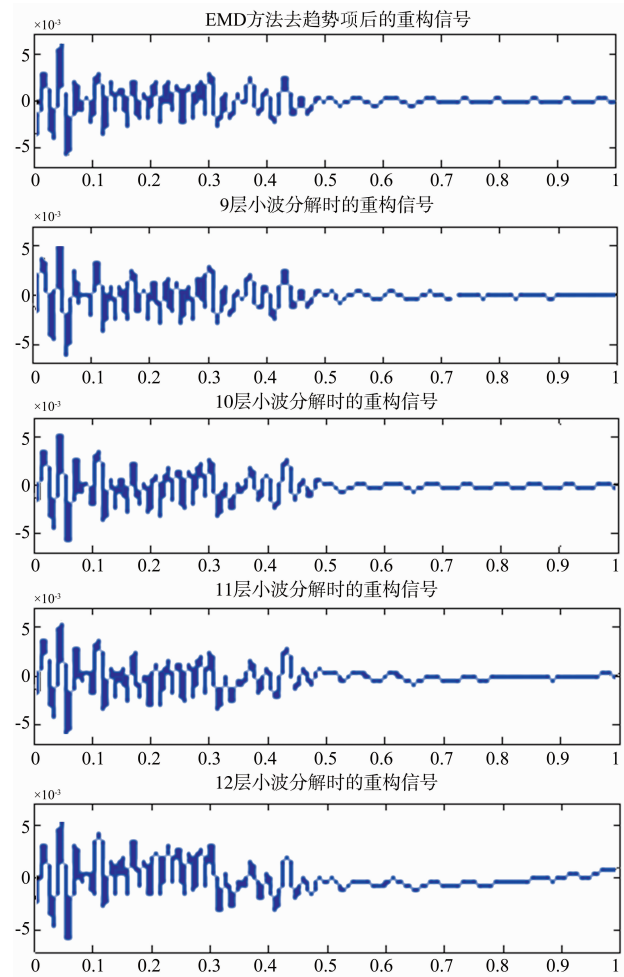


表2 前 n 阶 IMF 分量

	\bar{i}_1	\bar{i}_2	\bar{i}_3	\bar{i}_4	\bar{i}_5	\bar{i}_6	\bar{i}_7
1	1.37	1.65	2.15	2.28	3.94	4.43	70.09
2	0.08	0.44	0.81	1.03	1.09	7.83	52.59
3	0.01	0.47	0.51	0.53	28.71	40.39	112.03

如图 7、8 分别给出了小波分解层数为 9、10、11、12 层时提取的趋势项和重构的信号与 EMD 方法提取的趋势项和重构的信号的比较. 由图中可以看出, 从提取的趋势项看, EMD 方法与小波方法只在前半段有较大

差别, 而不同分解层数的小波方法之间在整体上存在较大的差别(注: 图中给出的纵轴精度是 0.01, 而实测的信号需要有 0.001 甚至 0.0001 的精度, 因此图中所见差别不明显). 从图 8 的信号重构结果比较来看, EMD 方法从信号趋势项的消除和峰值与实际值的吻合程度都达到了令人满意的效果, 而小波方法进行 9 层分解时趋势项消除效果较好但峰值与实际值差别较大; 10 层和 11 层分解时峰值吻合程度较好, 但趋势项去除效果一般; 12 层分解时峰值吻合程度一般, 趋势项去除效果较差.



如表 2 给出了根据文献[15]计算的前 n 阶 IMF 分量, 根据其定性的判定方法, 如第 1 组信号在第 7 阶 IMF 分量时明显偏离了零点, 则认为第 7 阶 IMF 为趋势分量, 同理判定第 2 组和第 3 组数据的趋势分量分别为第 6 阶与第 7 阶 IMF 分量之和以及第 5 阶至第 7 阶 IMF 之和. 这与本文方法判定结果是一致的.

综合上述分析可知, 采用小波变换方法进行趋势提取存在的主要问题是小波基函数的选取和分解层数的确定需要人为选定, 这两方面都需要通过试探分析

才能使该方法取得较好的效果. 文献[15]方法存在的问题是判定 IMF 分量是否为趋势分量需要人为定性确定, 存在较大的主观倾向. 本文方法结合 EMD 方法的自适应信号分解特点, 不存在重要参数选取问题, 同时在一定程度上克服了文献[15]的通过定性方法判定趋势项的弊端, 自动计算输出趋势项分量, 在实际信号处理特别是实现自动化方面有一定的应用价值.

6 结论

针对某车载武器试验中测试结果存在严重的趋势项干扰问题, 分析了产生该问题的原因, 提出了结合 EMD 方法提取信号中趋势项进行信号重构的方法. 结合文献[15]提出了趋势项判定的一种改进方法, 模拟振动信号仿真实验证明了该方法的有效性, 最后通过几组实测信号进行了应用分析, 结果表明, 提出方法能有效提取信号中的干扰趋势项并成功重构了振动位移信号, 与小波方法和文献[15]相比具有较大的优越性, 去趋势项结果与结构振动特性相吻合, 证明了该方法在武器振动信号处理中的有效性, 为正确评价武器性能提供了依据.

参考文献

- [1] 陈隽, 徐幼麟. 经验模分解在信号趋势项提取中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25(2): 101 - 104.
Chen Jun, Xu Youlin. Application of EMD to signal trend extraction[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(2): 101 - 104. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 侯青剑, 王宏力. 一种基于 EMD 的模拟电路故障特征提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1525 - 1528.
HOU Qing-jian, WANG Hong-li. Method of fault feature extraction for analog circuits based on EMD[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(6): 1525 - 1528. (in Chinese)
- [4] 王静, 李天云, 王永宏. 应用经验模态分解法的 $\tan\delta$ 在线监测数据趋势提取[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3007 - 3010.
Wang Jing, Li Tian-yun, Wang Yong-hong. Trend extracting of $\tan\delta$ on-line monitoring using EMD[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3007-3010. (in Chinese)
- [5] 曲从善, 许化龙, 谭莹, 等. 基于新型经验模分解的激光陀螺漂移趋势项提取[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 597 - 603.
Qu Cong-shan, Xu Hua-long, Tan Ying, et al. Trend extraction from laser gyro drift data based on modified empirical mode decomposition[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 597 - 603. (in Chinese)
- [6] 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 Yun-zhao, Ma Tie-hua. Research on zero drift processing method using EMD and least-square[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(2): 118 - 122. (in Chinese)
- [7] 雷达, 钟诗胜. 基于奇异值分解和经验模态分解的航空发动机健康信号降噪[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(3): 764 - 770.
Lei Da, Zhong Shi-sheng. Aircraft engine health signal denoising based on singular value decomposition and empirical mode decomposition methods[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(3): 764 - 770. (in Chinese)
- [8] Jingliang Sun, Huanye Sheng. A hybrid detrending method for fractional Gaussian noise[J]. Physica A, 2011, 390(17): 2995 - 3001.
- [9] Y H Dong, J X Zhang. Trend extraction in vibration signal based on EMD[J]. Advanced Materials Research, 2012, 459: 377 - 380.
- [10] Jacek Dybala, Radoslaw Zimroz. Rolling bearing diagnosing method based on empirical mode decomposition of machine vibration signal[J]. Applied Acoustics, 2014, 77: 195 - 203.
- [11] Zhijing Yang, Bingo Wing-Kuen Ling, Chris Bingham. Trend extraction based on separations of consecutive empirical mode decomposition components in Hilbert marginal spectrum[J]. Measurement, 2013, 46(8): 2481 - 2491.
- [12] C Li, M Liang. Extraction of oil debris signature using integral enhanced empirical mode decomposition and correlated reconstruction[J]. Meas Sci Technol, 2011, 22(8): 085701.
- [13] Azadeh Moghtaderi, Pierre Borgnat, Patrick Flandrin. Trend filtering: Empirical mode decompositions versus and hodrick-prescott[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2011, 3(1&2): 41 - 61.
- [14] Azadeh Moghtaderi, Patrick Flandrin, Pierre Borgnat. Trend filtering via empirical mode decompositions[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2013, 58: 114 - 126.
- [15] 李秀坤, 李婷婷, 马涛. 微弱信号强干扰分离方法研究

- [J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 225-227.
- Li Xiu-kun, Li Ting-ting, Ma Tao. The research on strong interference separation of weak signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 225-227. (in Chinese)
- [16] Huang N E, Zheng S, Steven R, et al The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J] Proc of the Royal Society of London, 1998, A(454): 903-995.
- [17] 王安麟, 石世宁, 李晓田. 挖掘机动态性能试验及其数据的小波处理方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 115-123.
WANG Anlin, SHI Shining, LI Xiaotian. Dynamic performance test and wavelet processing method for non-stationary random data of hydraulic excavator[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 115-123. (in Chinese)
- [18] 吴志成, 王重阳, 任爱君. 消除信号趋势项时小波基优选方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(8): 811-814.
WU Zhi-cheng, WANG Chong-yang, REN Ai-jun. Optimal selection of wavelet base functions for eliminating signal trend based on wavelet analysis[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(8): 811-814. (in Chinese)

作者简介



张 军 男. 1982 年 6 月出生, 黑龙江哈尔滨人. 2007 年毕业于国防科技大学仪器科学与技术专业, 硕士学位. 其后在中国白城兵器试验中心从事动态测试工作, 工程师. 研究方向为动态测试理论与方法、信号处理等方面的研究.

E-mail: zdh1007@163.com



潘泽鑫 男. 1977 年 2 月出生, 吉林松原人. 1998 年毕业于哈尔滨工业大学机械电子工程专业, 学士学位. 其后在中国白城兵器试验中心从事测试工作, 工程师. 研究方向为动态测试理论与方法.

E-mail: pzx202200@163.com