

# 基于 HHT 的导弹发射冲击时频谱分析\*

封雷, 卫炜, 刘曦, 高旭, 巩祥瑞

(西安现代控制技术研究所 西安, 710065)

**摘要** 为研究弹载部件在导弹发射过程中的冲击响应及冲击信号的传递特性,进行了基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform,简称 HHT)的导弹发射冲击时频谱分析。由于经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)结果易受白噪声的影响,研究了总体经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)技术。以弹体不同位置的实测冲击信号为对象,应用 HHT 技术进行分析,准确得到了导弹发射冲击信号的固有模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)和时间-频率-能量谱特征,并研究了两次冲击的频率分布和各阶 IMF 与原始信号的相关性。结合边际谱分析对比了两个舱段能量在中低频和高频的传递特性,进一步验证了 HHT 方法在分析非线性和非平稳冲击信号中的优越性。

**关键词** 导弹发射冲击; 希尔伯特-黄变换; 总体经验模态分解; 时频谱分析

**中图分类号** TH113; TN911.6

## 引言

导弹在发射过程中会经历一系列的冲击激励,而激励通常为短暂的脉冲、阶跃或其他瞬态非周期信号。该过程往往持续时间短,冲击量值大,频率成分非常复杂。虽然激起的振动能量衰减很快,但引起的最大位移却可能造成系统或部件的永久失效和损坏,对弹载部件的影响相当恶劣<sup>[1]</sup>。

目前,对于导弹发射飞行的冲击动力学问题的研究主要集中在弹载部件的冲击响应和冲击响应谱试验条件的研究等方面,而对于发射冲击信号的时频谱分析研究较少。袁名松等<sup>[1]</sup>对巡飞攻击导弹在发射及飞行过程中,导引头的发射和分离的瞬态冲击响进行了研究分析。袁宏杰等<sup>[2]</sup>对爆炸分离的冲击的实测信号进行分析处理,应用小波分析的方法对失真的冲击波形进行分解和重构,提取了真实的爆炸分离冲击信号,给出了标准的冲击响应谱。

EMD 是由 Huang 等<sup>[3]</sup>提出,EMD 对于处理非线性非平稳过程信号非常有效,可以将复杂的信号按不同特征时间尺度分解为若干 IMF 和表征整体趋势的剩余项之和,它是完全自适应的,但存在模态混叠<sup>[4]</sup>、虚假模态及端点效应<sup>[5]</sup>等缺陷。EEMD 在 EMD 的基础上添加高斯白噪声,有效抑制了模态混叠的问题,提高了模态分解的鲁棒性和准确性<sup>[6]</sup>。

吴建源等<sup>[7]</sup>利用希尔伯特-黄变换对高压管道爆裂振动信号的时频特性进行了分析,揭示了管道爆裂地震波的形成机理及传播规律,获取了地震波信号的时间-频率-能量的分布特性。汪国元等<sup>[8]</sup>利用 EEMD 对火箭解锁分离机构的冲击响应进行了分析,结果表明前两阶模态分量 IMF 主要为冲击引起的高频振动,而之后分量为冲击激励引起不同阶固有模态振动和局部振动。Amirat 等<sup>[9]</sup>研究了基于 EEMD 的希尔伯特-黄变换的方法在风机轴承故障监测中的应用。

为研究导弹发射过程中的冲击响应,笔者对导弹发射过程的冲击信号进行了测试,并对测试数据进行分析。首先,对实测信号进行滤波处理,分离了过载信号,利用 EEMD 进行模态分解,获得两个舱段位置、不同频率的模态分量;其次,分析了模态分量的传递特性及相关特性,给出了发射发动机点火冲击信号的时间-频率-能量分布特性;最后,对比了两个舱段冲击信号的传播及衰减规律,结合边际谱分析了能量的频率分布特性,为深入研究导弹发射冲击响应和弹上部件的抗冲击设计提供依据。

## 1 希尔伯特-黄变换

Hilbert-Huang 变换由 Huang 变换和 Hilbert 谱分析两部分组成<sup>[10]</sup>。

\* 国防科技工业技术基础资助项目(JSZL2017208B006)  
收稿日期:2019-03-26;修回日期:2019-05-07

## 1.1 Huang 变换

HHT 的核心是 EMD,该方法认为,任何复杂的时间序列都是由一些互不相同的、简单的、非正弦函数的固有模态函数组成<sup>[11]</sup>。基于此假设,在任意时刻可从复杂的时间序列分解出相互震荡的不同模态,这些震荡模态即为 IMF<sup>[12]</sup>。IMF 可利用以下步骤分解任意函数<sup>[8]</sup>:首先,确定时间函数  $x(t)$  的所有局部极值点;其次,用三次样条函数曲线顺序连接所有的局部极大值,得到曲线  $x(t)$  的上包络,对于局部极小值采用同样的方法获得曲线  $x(t)$  的下包络;然后,顺序连接上、下包络线的均值可得一条均值线  $m_1(t)$ ,函数  $x(t)$  和  $m_1(t)$  之间的差值是第 1 个成分  $h_1(t)$ 。按此方式,经过  $k$  次重复的抽取过程,  $h_{1k}$  成为一个 IMF,定义为  $c_1$ ,即

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

上述抽取过程使用的停止准则是由 Huang 等使用的,采用了 Cauchy 收敛性准则。 $c_1$  应该包含最细微的尺度或信号中的最短周期成分,此时  $c_1$  可从时间函数中分离出来

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (2)$$

剩余项  $r_1$  包含更长周期的震荡信号,将其看作新的数据,重复上述抽取过程,获得函数的全部 IMF 和剩余项,最终得到

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_n + r_n \quad (3)$$

其中:  $r_n$  可能是数据的趋势,也可能是一个常数值。

## 1.2 Hilbert 谱分析

对于给定的时间函数  $x(t)$ ,采用 Hilbert 变换<sup>[13]</sup>可得到  $x(t)$  的复共轭  $y(t)$

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

通过 Hilbert 变换,定义解析信号为

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t) e^{i\psi(t)} \quad (5)$$

对  $x(t)$  的  $n$  阶 IMF $c(t)$  进行 Hilbert 变换,即 Hilbert 谱

$$H(\omega, t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp \left[ i \int \omega_j(t) dt \right] \quad (6)$$

其中:  $a_j(t)$  为第  $j$  阶 IMF $c_j(t)$  的解析信号的幅值。

对 Hilbert 谱进行时间积分,得到 Hilbert 边际谱

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (7)$$

边际谱为每一个频率点幅值在时间全局上的积分,代表了振幅在整个数据区间概率意义上的累积。

## 2 总体经验模态分解

EEMD 是基于对噪声特性和 EMD 性能的理解,其核心是 EMD。文献[6]研究表明,EMD 分解对于噪声是一个有效的二进滤波器,EEMD 中加入的白噪声的效果在于提供时间-频率空间中的二进滤波的参考框架<sup>[14]</sup>。添加的噪声起着由单个观测记录模拟多个观测值现象的作用,因此使用 EEMD 分解可以不带任何显著的主观干预,是一个真正的自适应数据分析方法<sup>[8]</sup>。

## 3 试验情况

### 3.1 试验方案

导弹在发射过程中依次会经历事件 1、事件 2、发射发动机点火、事件 4、事件 5 和事件 6 等时序,如表 1 所示。这些事件均会对弹体轴向( $x$  方向)、垂向( $y$  方向)和侧向( $z$  方向)3 个方向产生瞬态冲击。为了进一步了解上述冲击对导弹四舱陀螺和五舱舵机位置的冲击响应,在弹体内安装了数据采集装置,其组成包括 2 个三轴冲击传感器和 1 个数据记录装置,如图 1 所示。

表 1 导弹发射时序

Tab. 1 Time series of missile launching

| 序号 | $t/s$     | 事件      |
|----|-----------|---------|
| 1  | -0.72     | 事件 1    |
| 2  | -0.26     | 事件 2    |
| 3  | 0         | 发射发动机点火 |
| 4  | 0.10~0.13 | 事件 4    |
| 5  | 0.135     | 事件 5    |
| 6  | 0.17      | 事件 6    |

两个冲击传感器分别安于在四舱陀螺位置和五舱舵机位置,用螺钉固定在转接座上,安装在弹壁上,如图 2 所示。三轴冲击传感器的型号为 ZHZD J13506,频响范围为 1 Hz~9 kHz,使用温度范围为



图 1 数据记录装置

Fig. 1 The data recording device

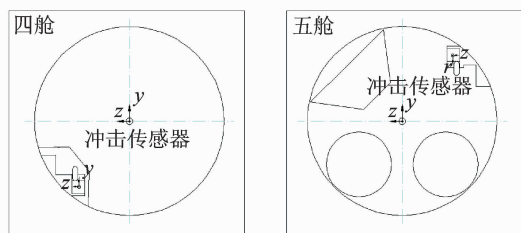


图2 传感器安装示意图

Fig. 2 The installation diagram of sensors

-50℃~120℃,非线性度 $\leq 1\%$ ,固有频率 $\geq 70$  kHz,量程为 $\pm 500g$ ,灵敏度为10 mV/g,数据记录装置的单通道采样频率为10 kHz。数据记录装置安装在战斗部位置,如图3所示。当导弹进入发射时序后,2号热电池点火且电压大于9 V时,记录仪开始启动,大约500 ms后开始记录导弹发射的冲击数据,直至导弹飞行结束。

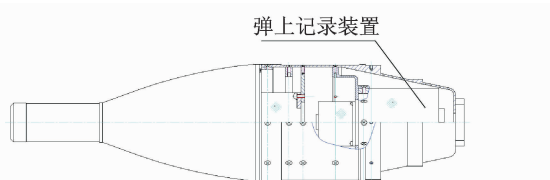


图3 数据记录装置安装示意图

Fig. 3 The installation diagram of data recording device

### 3.2 试验结果

图4为导弹发射的冲击时序信号时域波形,图中①②③④⑤⑥依次表征了事件1、事件2、发射发动机点火、事件4、事件5和事件6。其中,发射发动机点火冲击信号量值最大(约为500g),持续时间最长(约为50 ms),其他冲击量值较小(约为200g),持续时间较短(约为20 ms)。

为了减少计算量,后续数据分析选择产生最大冲击的发射发动机点火进行分析,如图5所示。该过程中出现两次连续冲击,经分析产生两次冲击的原因分别为发动机点火具点火和发射药燃烧结束时对弹体造成的冲击。对比两个位置的冲击量值,五舱位置的冲击量值整体大于四舱。这与五舱较四舱离发射发动机近有关,符合预期设想。

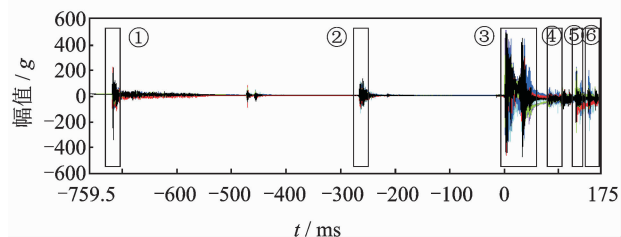


图4 导弹发射的冲击时序信号时域波形

Fig. 4 The shock signals of the missile launching

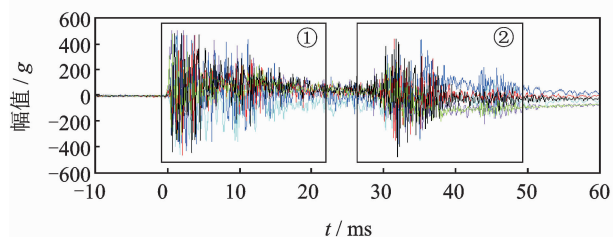
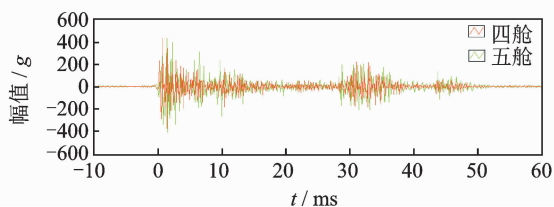
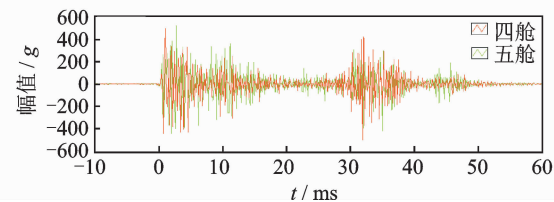
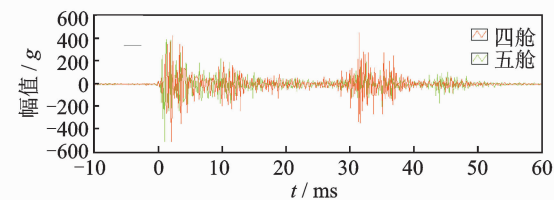


图5 发射发动机点火冲击信号时域波形

Fig. 5 The shock signals of the launch engine ignition

## 4 数据的HHT分析

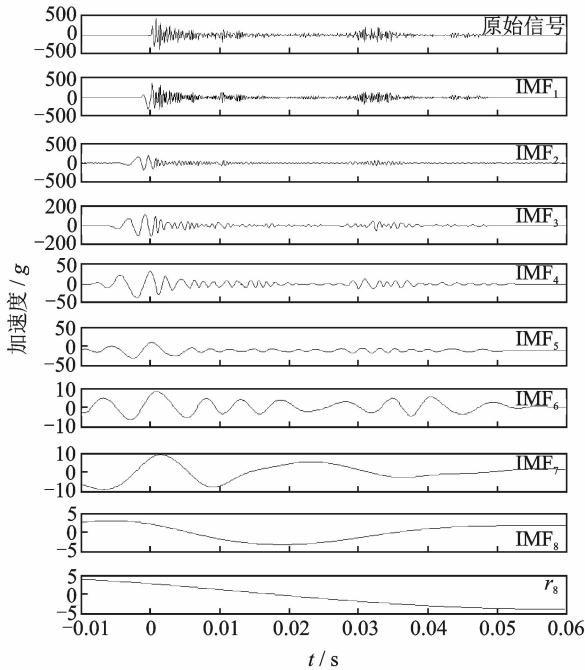
发射冲击信号存在零位漂移现象,其原因为导弹发射过载叠加于冲击信号所致,因此采用 Butterworth 滤波器进行2 Hz以上的高通滤波,消除了过载信号。两个测点  $x$ ,  $y$ ,  $z$  轴向的冲击信号如图6~8所示。从时域上来看点火具点火时,两个舱段  $y$  和  $z$  方向的冲击整体大于  $x$  方向;发射药燃烧结束时形成的冲击整体上两个舱段  $y$  方向大于  $x$  和  $z$  方向,这也表明爆炸冲击没有明确的方向性。前者的冲击量值和持续时间明显大于后者。对比两个舱段的时域波形,冲击信号传递没有延迟现象。

图6 高通滤波(2 Hz)后的冲击信号( $x$ 方向)时域波形  
Fig. 6 The high-pass (2 Hz) filtered shock signals ( $x$  direction)图7 高通滤波(2 Hz)后的冲击信号( $y$ 方向)时域波形  
Fig. 7 The high-pass (2 Hz) filtered shock signals ( $y$  direction)图8 高通滤波(2 Hz)后的冲击信号( $z$ 方向)时域波形  
Fig. 8 The high-pass (2 Hz) filtered shock signals ( $z$  direction)

### 4.1 基于 EEMD 的冲击响应分析

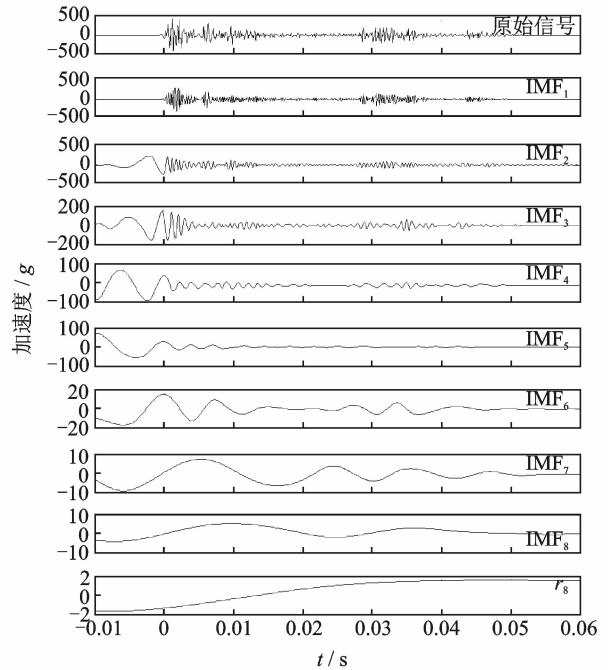
对预处理后的  $x$  轴向冲击数据进行 EEMD,如图 9 所示,图中左侧、右侧分别为四舱和五舱的冲击数据。其中:第 1 行为原始信号;后面依次为各阶模态分量  $IMF_1 \sim IMF_8$ ;最后一个为分解的剩余项  $r_8$ ,是一个幅值较小的单调函数,表示冲击信号的整体趋势。通过对冲击信号进行 EEMD 可得,模态分量  $IMF_1 \sim IMF_4$  为冲击信号中频率较高、波长较短的

信号,是冲击信号中的高频成分。表 2 和表 3 为各阶 IMF 分量与原始信号的占比,由此可见  $IMF_1 \sim IMF_4$  高频分量是冲击信号的主要成分,其余分量  $IMF_5 \sim IMF_8$  的频率逐渐降低,振动周期越来越长,且在冲击信号中的占比较小。通过对两个舱段各阶 IMF 分量进行相关性分析,由表 4 可知  $IMF_1 \sim IMF_7$  的模态分量的相关性与频率成反比。频率越低,相关性越高,这也表明高频冲击信号在传递过程中易被吸收而衰减较快,而低频信号则刚好相反。



(a) 四舱

(a) The fourth compartment



(b) 五舱

(b) The fifth compartment

图 9 冲击信号的 EEMD 分解( $x$  方向)

Fig. 9 The EEMD decomposition of shock signals ( $x$  direction)

表 2 冲击信号各层 IMF 能量所占比例(四舱)

Tab. 2 Energy percentage of IMFs of the shock signals(fourth compartment)

| $IMF_1$ | $IMF_2$ | $IMF_3$ | $IMF_4$ | $IMF_5$ | $IMF_6$ | $IMF_7$ | $IMF_8$  |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 0.806   | 0.200   | 0.098   | 0.008   | 0.000 2 | 0.000 1 | 0.000 2 | -0.000 1 |

表 3 冲击信号各层 IMF 能量所占比例(五舱)

Tab. 3 Energy percentage of IMFs of the shock signals(fifth compartment)

| $IMF_1$ | $IMF_2$ | $IMF_3$ | $IMF_4$ | $IMF_5$ | $IMF_6$  | $IMF_7$  | $IMF_8$  |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 0.763   | 0.363   | 0.148   | 0.003   | 0.000 7 | -0.000 2 | -0.000 1 | -0.000 2 |

表 4 两舱各层 IMF 能量的相关系数

Tab. 4 The correlation of IMFs between two compartments

| $IMF_1$ | $IMF_2$ | $IMF_3$ | $IMF_4$ | $IMF_5$ | $IMF_6$ | $IMF_7$ | $IMF_8$ |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -0.145  | 0.003   | 0.016   | 0.400   | 0.188   | 0.266   | 0.350   | -0.450  |

上述分析过程表明,冲击信号中包含了大部分的高频信号和少量的低频信号,其中低频信号是由高频发射冲击激起的振动固有频率。对上述信号进行频谱分析如图 10 所示,其中五舱位置中  $IMF_1 \sim IMF_5$  模态分量较四舱量值较大,这是由于五舱离发射发动机更近,高频冲击信号在传递过程中不断衰减所致。两舱各阶 IMF 的时频图如图 11 所示,可以看出各频段产生的频率及对应时刻。利用同样的方法分析  $y, z$  方向的数据,对应各 IMF 分量之间的相关性没有确定的规律。

### 4.2 Hilbert 时频谱分析

通过对图 6~8 的冲击信号进行 EEMD,对分解后的全部 IMF 分量进行希尔伯特变换,得到了 2 个位置 3 个方向冲击信号的时频谱(也称为希尔伯

特谱)。图12和图13分别为四舱和五舱3个方向冲击的Hilbert能量谱,图中直观地给出了IMF各分量的能量分布。由图可知以下结论:2个位置3个方向的冲击信号的希尔伯特谱整体形状基本相同,两次冲击历程清晰可见,第1次冲击的频率成分复杂,冲击幅值较大,频率成分在0~5 000 Hz之间均匀分布;第2次冲击的量值较小,频率主要集中在中高频1 000~3 000 Hz之间。

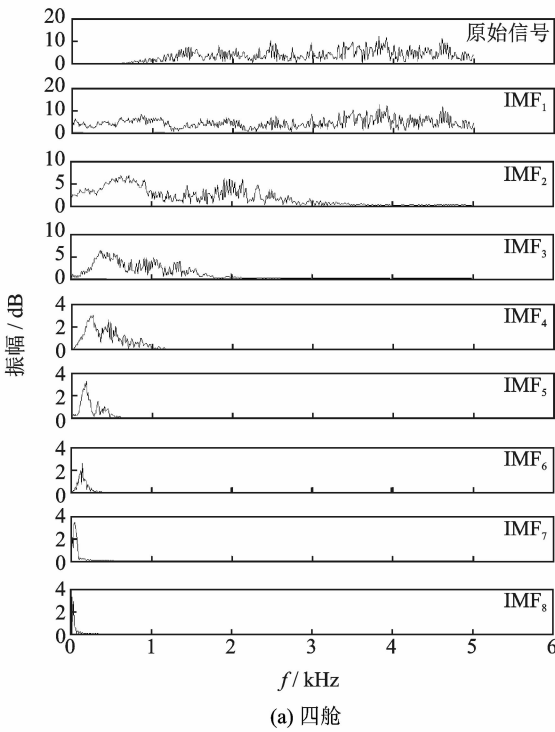
图14为两个舱段 $x$ ,  $y$ 和 $z$ 3个方向的Hilbert边际谱,对比3个方向边际谱可以得到以下结论。

$x$ 轴向:五舱在0~300 Hz范围能量最大,明显

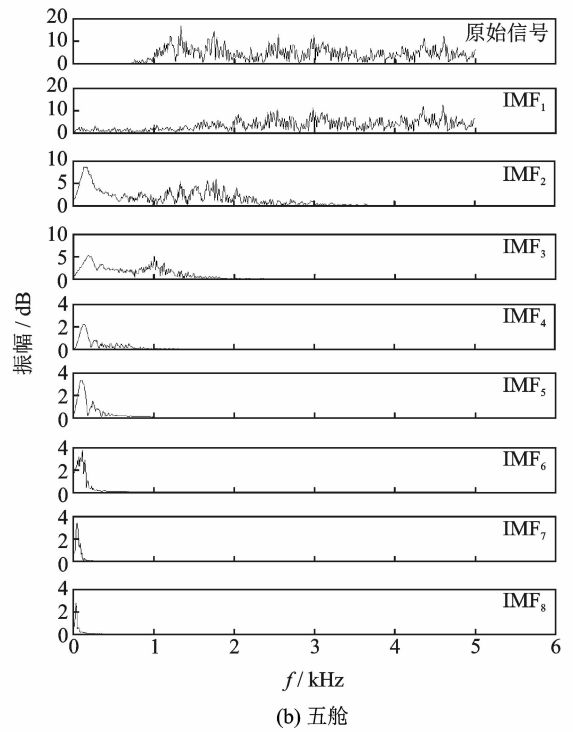
大于四舱;四舱在0~700 Hz范围能量较大,其中在300~700 Hz之间能量超过5舱;其他频带能量呈现出非周期窄带峰值,部分有重叠。

$y$ 轴向:四舱与五舱在0~270 Hz范围内,两个冲击能量相当,在整个分析频带内最大;270~900 Hz之间四舱能量明显大于五舱;900~3 500 Hz之间,两个舱段量值相当;3 500~5 000 Hz之间,五舱量值较四舱稍大。

$z$ 轴向:四舱与五舱在0~1 600 Hz范围内,两个冲击能量相当;1 600~3 500 Hz之间四舱能量明显大于五舱;3 500~5 000 Hz之间,两个舱段量值相当。



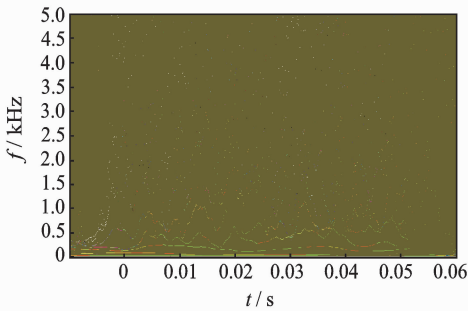
(a) The fourth compartment



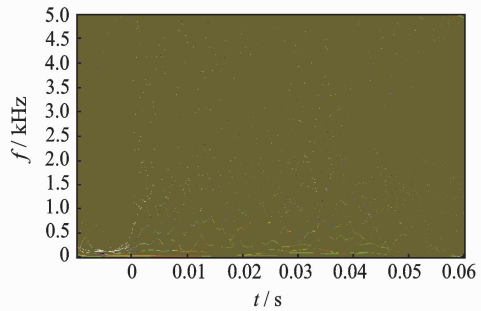
(b) The fifth compartment

图10 各层IMF的频谱图( $x$ 方向)

Fig. 10 The spectrums of IMFs ( $x$  direction)



(a) The fourth compartment



(b) The fifth compartment

图11 各层IMF的时频图( $x$ 方向)

Fig. 11 The frequency spectrums of IMFs ( $x$  direction)



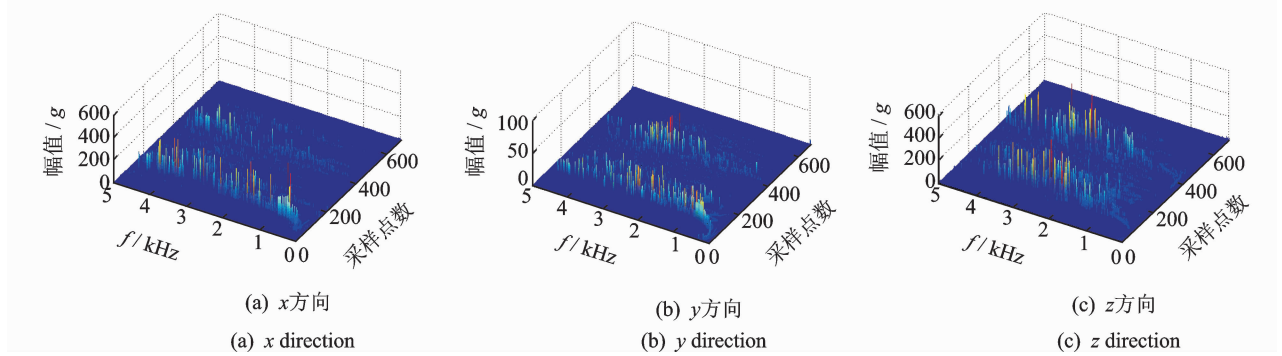


图 12 四舱的希尔伯特谱

Fig. 12 Hilbert spectrum in the fourth compartment

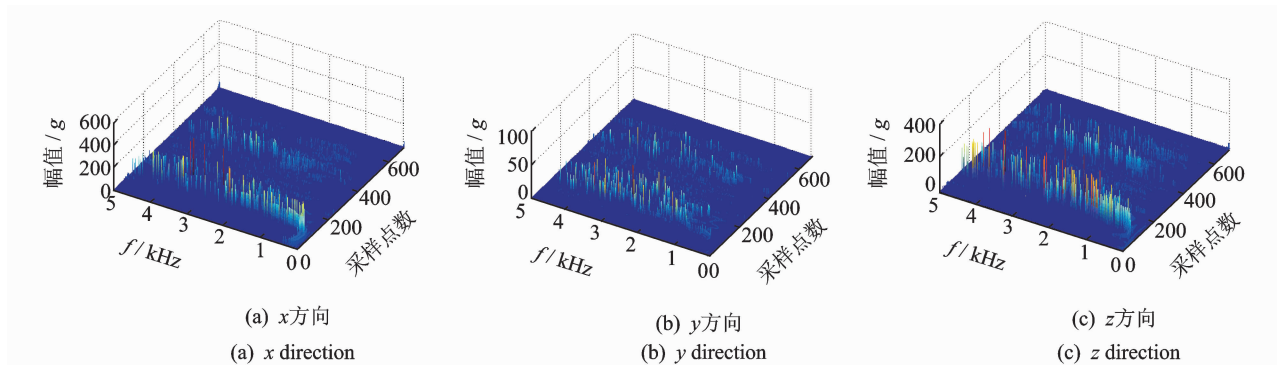


图 13 五舱的希尔伯特谱

Fig. 13 Hilbert spectrum in the fifth compartment

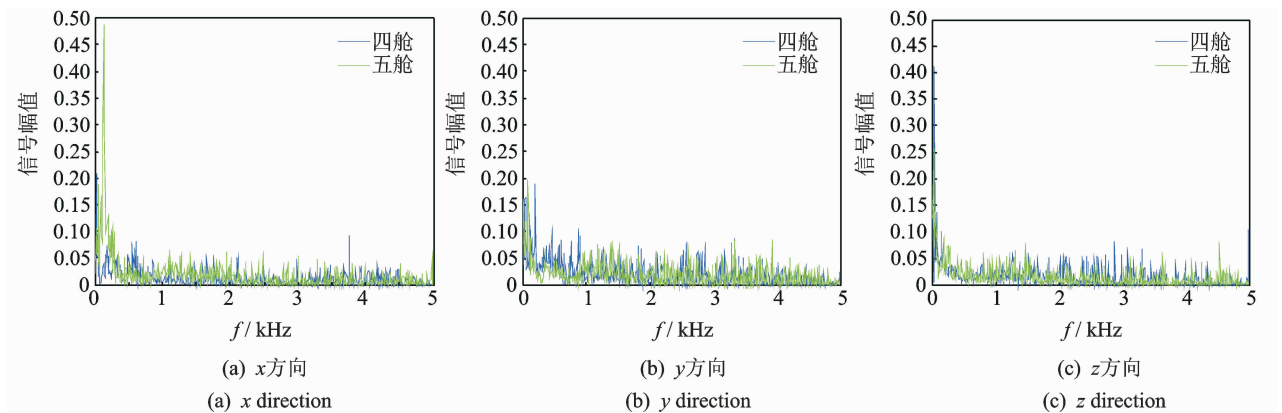


图 14 四舱、五舱边缘谱对比

Fig. 14 The comparison of margin spectrum of the fourth and fifth compartment

## 5 结 论

1) 导弹在发射过程中产生一系列冲击信号,发射发动机点火冲击信号能量最大值约为 500g,持续时间约为 50 ms。整体上五舱的冲击量值大于四舱,y,z 方向的量值大于 x 轴向,爆炸冲击没有方向性。

2) 导弹两个舱段 x 方向的冲击信号经 EEMD 得到各 IMF 模态分量。其中:IFM<sub>1</sub>~IFM<sub>4</sub> 高频分量是冲击信号的主要成分,频率最高的 IFM<sub>1</sub> 所占

的冲击能量最大,低频成分 IFM<sub>5</sub>~IFM<sub>8</sub> 占比较小,各 IMF 分量在传递过程中具有相关性,频率越低,相关性越高,y 和 z 方向无此特性。

3) 由 Hilbert 时频谱可知冲击信号频率成分复杂,第 1 次冲击信号频率在 0~5 000 Hz 之间均匀分布,幅值较大;第 2 次冲击信号主要为高频 1 000~3 000 Hz 之间,幅值较小。

4) x 轴向低频段(小于 300 Hz)五舱的冲击能量明显大于四舱,在 300~700 Hz 四舱能量明显大于五舱;y 轴向在 270~900 Hz 之间四舱能量显著大于五舱,3 500~5 000 Hz 之间,五舱量值较四舱稍大;z 轴

向在 3 500~5 000 Hz 之间,五舱量值较四舱稍大;其他频带同一方向两个舱段的冲击能量相当。

### 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): 953-957.  
YUAN Mingsong, FENG Jianwei, HUANG Yun, et al. Transient impact response analysis of loitering attack missile imaging infrared seeker [J]. Infrared Technology, 2014, 36(12): 953-957. (in Chinese)
- [2] 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 Hongjie, JIANG Tongmin. Analysis and treatment of measured pyrotechnic shock data [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(1): 72-74. (in Chinese)
- [3] HUANG N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non stationary-time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454 (1971): 903-995.
- [4] RATO R T, ORTIGUEIRA M D, BATISTA A G. On the HHT, its problems, and solutions [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(6): 1374-1394.
- [5] 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,2003, 31(6): 637-640.  
LUO Qifeng, SHI Chunxiang. Hilbert-Huang transform and several problems in its calculation method [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(6): 637-640. (in Chinese)
- [6] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1 (1): 1-41.
- [7] 吴建源,龙源,纪冲,等. 基于希尔伯特黄变换的高压输气管道爆裂振动信号时频特性分析[J]. 振动与冲击,2018, 37(8): 113-119.  
WU Jianyuan, LONG Yuan, JI Chong, et al. Time-frequency analysis of vibration signals generated by high-pressure gas pipeline bursting based on the Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 113-119. (in Chinese)
- [8] 汪国元,徐洋,胡晓楠,等. 基于集总平均经验模态分解法(EEMD)的星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 Guoyuan, XU Yang, HU Xiaonan, 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. (in Chinese)
- [9] AMIRAT Y, BENBOUZID M, WANG T Z, et al. Performance analysis of an EEMD-based Huang transform as a bearings failure detector in wind turbines [C]//Green Energy. [S.l.]:IEEE, 2014.
- [10] 石春香,罗奇峰,施卫星. 基于 Hilbert-Huang 变换方法的 结构损伤诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 16-20.  
SHI Chunxiang, LUO Qifeng, SHI Weixing. Hilbert-Huang transform based approach for structural damage detection [J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2005,33(1):16-20. (in Chinese)
- [11] Huang N E, WU Z. A review on Hilbert-Huang transform; method and its applications to geophysical studies [J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 1-23.
- [12] HUANG N E, SHEN S S F. 希尔伯特-黄变换及其应用[M]. 张海勇,韩东,王芳,等译. 2版. 北京:国防工业出版社,2017: 5-25.
- [13] HUANG N E, WU M L C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459 (2037): 2317-2345.
- [14] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 11(2): 112-114.
- [15] 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 Youtao, LIU Guoxiang. Analysis of track irregularity time-frequency characteristics based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 733-740. (in Chinese)



**第一作者简介:**封雷,男,1987年6月生,工程师。主要研究方向为振动冲击测试与数据分析和可靠性设计与评估等。曾发表《A combined prediction method for the life of product based on PSO with immunity algorithms》(《2014 Reliability and Maintainability Symposium》, Colorado: Springs, 2014.)等论文。  
E-mail:fenglei3714@hotmail.com

**通信作者简介:**卫炜,男,1980年9月生,高级工程师。主要研究方向为可靠性设计、评估与试验等。  
E-mail:52690970@qq.com

