# 装备典型舰载平台振动环境严酷度分析

# 蔡健平,张萌,赵婉

(中国航天标准化研究所,北京 100071)

摘要:目的为了正确识别舰载环境。方法采用INV3062T2数据采集系统,在典型舰载平台上实测了装备在舱室内的振动环境。结果数据表明,舱室内各方向上的振动加速度是一个正态随机变量,得到了各方向加速度峰值和振动加速度谱密度。结论分析表明,舱室内典型振动环境属于I型,是一类长期存在但量值较小的振动环境。 关键词:导弹装备;振动环境;严酷度 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2015.01.017 中图分类号:TJ06 文献标识码:A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0087-06

### Severity Analysis of Typical Shipboard Vibration Environment for Materiel

CAI Jian-ping, ZHANG Meng, ZHAO Wan

(China Astronautics Standards Institute, Beijing 100071, China)

**ABSTRACT: Objective** To correctly recognize the shipboard environment. **Methods** The vibration environment of the materiel in the cabinet was measured on a typical shipboard platform using the INV3062T2 data collecting system. **Results** The vibration data showed that the vibration accelerated velocity in all directions of the cabinet was a normal random variable, and the peak accelerated velocities as well as the accelerated spectral densities in all directions were also obtained. **Conclusion** The analysis showed that the cabinet vibration environment belonged to type I vibration, which is a low-value and long-term vibration environment.

致的舰船平台诱发力学(如振动、冲击、摇摆)环境

对武器装备产生作用,从而对武器装备振动环境敏

感的薄弱环节的有很大的影响[1-3]。例如仿真结果

表明[2-3]:由于舰载诱发的力学环境长期作用下导

KEY WORDS: missile materiel; vibration environment; severity

在满足我军实战化要求和建设海洋强国的背景下,当前各种舰载武器装备正在从过去经常近海 待命和库房贮存的状态转变为长期在海上待机、值 班和备战的状态,由于海风、海浪以及发动机等导

**收稿日期:**2014-09-13;修订日期:2014-10-17

作者简介:蔡健平(1969—),男,山西蒲县人,博士,高级工程师,主要研究方向为导弹武器产品环境适应性、环境试验、表面工程等。

**Biography:** CAI Jian-ping (1969—), Male, from Puxian, Shanxi, Ph.D., Senior Engineering, Research focus: environmental worthiness of missile materiel, environmental test, surface engineering.

**Received:** 2014–09–13; **Revised:** 2014–10–17

基金项目:国防科工局技术基础项目(H32013Y001)

Fund: Supported by the State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence(H32013Y001).

致的累积损伤,使固体发动机粘接面在海上战备1 年的寿命比仓库贮存至少降低8.62%,而导弹的舰 载贮存寿命只相当于库房寿命的15%。另外试验 和分析也表明<sup>14-51</sup>:振动或者热导致的疲劳对发动 机药柱和推进剂会造成累积损伤,影响其寿命;另 外振动环境也会影响电子产品其可靠性,从而影响 装备的使用<sup>17]</sup>。为了评价舰载装备例如发动机的贮 存寿命,需要通过实验模拟舰载振动环境的作用<sup>17]</sup>, 或者以实际的振动环境为依据设计振动耐久性试 验<sup>18]</sup>。这就需要正确识别舰载环境条件,文中实测 了装备舰载典型测点的振动环境,并对其环境严酷 度进行了评估,从而为相关武器装备贮存试验和寿 命评估提供依据。

# 1 实验和研究方法

### 1.1 典型舰载平台选取

考虑到实测和搜集数据的可行性以及便利性, 要求选择常年在南海航行的补给船代表装备实测舰 载平台。该舰共有4层甲板,包括主甲板、二甲板、 艇甲板及驾驶和罗径甲板,发动机主机频率为750~ 720 r/min。该舰正常工作航速较为稳定,并主要在 1~4级的海况下航行,因此该舰提供了一种长期的、 典型的舰载平台环境,而非极端的力学环境。

## 1.2 舰载平台振动环境数据采集设备

采用定制的INV3062T2数据采集系统(如图1所示),配合ICP加速度传感器进行振动环境测量。数据采集分析系统具有下列技术指标:频率范围为0.5~8kHz;量程为50g;安装谐振频率>25kHz;分辨率为0.002m/s<sup>2</sup>。



图 1 INV3062T2数据采集系统 Fig.1 INV3062T2 data collecting system

## 1.3 舰载平台振动环境采集和分析方法

选取装备服役的典型部位如舱室进行振动环境 采集,采用ICP加速度传感器同时采集船运动方向、 船侧向和竖直方向的加速度数据,采集频率为12.8 kHz。考虑到时间和成本,经过初测后,选取振动环 境较为恶劣的点进行测量,以便于进行严酷度评 价。这些点每次测量持续10 min或10 min以上,共 进行5次测量。获得振动数据后,先剔除异常值,再 参照相关振动分析的方法和标准进行下列分析<sup>[9-11]</sup>。

 1)振动数据的时域分析。对振动数据进行时 域分析时,将测得的加速度数据按照时间进行绘制, 就得到时域曲线,由于舰载振动环境基本上接近稳 态,因此不需要进行特殊处理,直接观察时域曲线, 就可以对数据的特性进行判断。

2) 振动数据的频域分析。振动数据的频域分 析采用快速傅立叶变换(FFT)进行分析。FFT的基 本思想就是,将1个长序列依次分解为2个短序列来 进行离散傅里叶变换(DFT)。这里采样频率为12.8 KHz,分析频率为6400 Hz,FFT点数取1024点,谱线 条数512,采用 Hanning窗,采用线性平均分析,分析 主要通过DASP专业分析软件完成。

3) 概率分析<sup>[12-13]</sup>。分析不同加速度值出现的概 率密度和概率。对在某范围内的加速度,其概率密 度为:

$$P_{|d_1-d_2|} = \frac{k_{|d_1-d_2|}}{K}$$
(1)

式中: $P_{[d_1-d_2]}$ 为 $d_1$ 到 $d_2$ 范围内加速度出现的概 率密度; $k_{[d_1-d_2]}$ 为 $d_1$ 到 $d_2$ 范围内加速度出现的个数; K为总的加速度个数。

同理,小于某加速度的概率为:

$$P_{1-\infty-d1} = \frac{k_{1-\infty-d1}}{K}$$
(2)

式中: $P_{1-\infty-d}$ 为小于d的加速度出现的概率密度; $k_{1-\infty-d}$ 为小于d的加速度出现的个数;K为总的加速度个数。

进行概率分析时,读取所有的时域数据,在 Matlab环境按照(1),(2)进行计算。

4)随机振动的加速度频谱密度(ASD)。其定义为:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \to 0} \frac{\alpha_{\text{r.m.s}}^2 \cdot \Delta f}{\Delta f}$$
(3)

式中: $\alpha_{rms}$ · $\Delta f$ 是 $\Delta f$ 频率范围内加速度均方根

值。

## 1.4 舰载环境严酷度评价方法

参照针对电子产品和机械产品的严酷度分级方法<sup>[14—15]</sup>,主要以GB/T 14091《机械产品环境参数分类 及其严酷度分级》进行振动环境评级分类。对于随 机振动可分成两类:I类——有显著的低频量,频率 范围为10~2000 Hz;II类——有较平坦分布的振动 能量,频率范围为20~2000 Hz。

随机振动的典型加速度频谱分类见表1。

#### 表1 随机振动的典型频谱分类

Table 1 Classification of typical frequency spectra of stochastic vibrations

频谱	加速度谱密度/((m·s <sup>-2</sup> ) <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )		
类型	频率低于200 Hz	频率高于200 Hz	
Ι	1	0.3	
Ι	3	1	
Ι	10	3	
Ι	30	10	
II	0.3	0.3	
II	1	1	
II	3	3	
II	10	10	
II	30	30	

# 2 结果和讨论

## 2.1 船向振动采集和分析结果

典型的船向上的振动时域曲线如图2所示,从 45 ms的振动时域曲线可见,船向上的振动曲线是光 滑过渡的,没有尖刺或者较大的突变,因此测得的时 域曲线是可信的随机振动曲线。

经过FFT分析得到的船向振动频域曲线如图3 所示,对该图中的频率峰进行进一步分析,得到表 2。从图3和表2可见,船向振动的加速度主峰大约 在50Hz左右,加速度峰值约为0.412 72 m/s<sup>2</sup>,而在 562.5 Hz和1112.5 Hz下各出现一个频率峰,其加速 度分别为0.152 34 m/s<sup>2</sup>和0.100 8 m/s<sup>2</sup>。

50 Hz的加速度主峰与交流电频率一致,但在非舰载条件下,测量系统本身未见这个量级的加速度信号,可排除该处信号完全由测量系统的电源干扰引起,可能与测点附近使用的交流电的工作装置如电机有关。562.5 Hz和1112.5 Hz的频率与船上的旋



#### 图2 船向振动时域曲线





图3 船向振动频域曲线



表2 船向振动频域分布

Table 2 Frequency domain distribution in the ship direction

频率/Hz 加速度峰值/(m•s <sup>-2</sup> )		频率/Hz 加	]速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )
37.5	0.335 41	562.5	0.248 75
50	0.412 72	575	0.152 34
62.5	0.210 65	1112.5	0.100 8
550	0.168 72		

转装置如油水分离器、转轴等相关。

船向振动加速度概率统计结果如图4所示,从 图4中可见,船向振动加速度接近正态分布,其数学 期望或者均值为:

$$\mu = \sum_{i} x_{i} p(x_{i}) \tag{4}$$

式中:x<sub>i</sub>为第*i*个加速度值;p(x<sub>i</sub>)为x<sub>i</sub>出现的概率。 正态分布的方差为:

$$\sigma^2 = \sum_i x_2 i p(x_i) - \left[\sum_i x_i p(x_i)\right]^2$$
(5)

从公式(4),(5)计算得到船向振动加速度数学 期望为0.045 56 m/s<sup>2</sup>,方差为0.267 57(m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>。因此 船向振动加速度是一个正态随机变量 $N(\mu, \sigma^2)$ ,其 概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} = 0.842 e^{-1.869(x-0.0456)^2}$$

为确定某x值的概率。可通过下列公式标准化 为N(0,1)的标准正态分布后,查正态分布表即可:



图4 船向振动加速度概率统计

Fig.4 Statistics of vibration acceleration in the ship direction

船向振动加速度谱密度如图 5 所示,船向振动 加速度谱密度峰值情况见表 3。可以看出,船向振 动加速度谱密度峰值主要集中在 50 Hz 和 562.5 Hz。其中 50 Hz 的振动加速度谱密度为 4.53 × 10<sup>-3</sup> (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz,562.5 Hz 的振动加速度谱密度为 1.64 × 10<sup>-3</sup>(m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz。



图5 船向振动加速度谱密度

Fig.5 Spectral density of vibration acceleration in the ship direction

## 2.2 横向振动

采用2.1同样的分析方法对横向上的振动进行

频域和加速度谱密度分析,得到的结果见表4、表 5。从表4和表5可见,横向振动的加速度主峰在 562.5 Hz,加速度峰值约为0.812 m/s<sup>2</sup>,而在横向主峰 50 Hz处的加速度峰值较小,小于0.1 m/s<sup>2</sup>,1112.5 Hz 频率处的加速度很小。这和船向振动的峰值也有不 同,因此可以看出,在振动在船向和横向上有一定的 择优性。另外在487.5 Hz到587.5 Hz区间还有其他 小的频率峰出现,和船向的频率峰相比,这些频率峰 的量值与船向的频率峰大致相当。

#### 表3 船向振动加速度谱密度峰值情况

 
 Table 3 Acceleration spectral density peaks of vibration in the ship direction

频率/	加速度谱密度峰值/	频率/	加速度谱密度峰值/
Hz	$(10^{-3}(m \cdot s^{-2})^2 \cdot Hz^{-1})$	Hz	$(10^{-3}(m \cdot s^{-2})^2 \cdot Hz^{-1})$
37.5	2.99	100	0.85
50	4.53	550	0.76
62.5	1.18	562.5	1.64
75	0.57	575	0.62
87.5	0.99		

#### 表4 横向振动频域分布

Table 4 Frequency domain distribution in the transverse direction

频率/Hz 加速度峰值/(m•s <sup>-2</sup> )		频率/Hz 加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	
487.5	0.201	550	0.574
500	0.291	562.5	0.812
512.5	0.321	575	0.585
525	0.264	587.5	0.216
537.5	0.256		

#### 表5 横向振动加速度谱密度峰值情况

 
 Table 5
 Acceleration spectral density peaks of vibration in the transverse direction

频率/	加速度谱密度峰值/	频率/	加速度谱密度峰值/
Hz	$(10^{-3}(m \cdot s^{-2})^2 \cdot Hz^{-1})$	Hz	$(10^{3}(\text{m}\!\cdot\!\text{s}^{2})^2\!\cdot\!\text{Hz}^{1})$
487.5	1.07	550	8.8
500	2.26	562.5	17.59
512.5	2.75	575	9.12
525	1.86	587.5	1.24
537.5	1.75	612.5	1.01

根据方程(4),(5)得到横向振动加速度,其概率 密度函数为:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} = 0.436 e^{-0.597(x-0.01544)^2}$$

表5中,562.5Hz的振动加速度谱密度为17.59×10<sup>-3</sup>(m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz,大约是船向数值的10倍。

#### 2.3 垂直方向振动

采用2.1同样的分析方法对横向上的振动进行 频域和加速度谱密度分析,得到的结果见表6、表 7。从表6和表7可见,垂直振动的加速度主峰在 562.5 Hz,其加速度峰值约为1.560 24 m/s<sup>2</sup>,而在625, 550,275,125,50 Hz下各有小的频率峰,同横向和船 向的相比,562.5 Hz 主峰的加速度量值最大。垂直 振动加速度谱密度峰值主要集中在562.5 Hz,其振 动加速度谱密度为97.37×10<sup>-3</sup>(m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz,这个数值 是横向、船向数值中最大的。

表6 垂直方向振动频域分布

Table 6 Frequency domain distribution in the vertical direction

频率/Hz 加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )		频率/Hz 加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	
50	0.121 23	550	0.556 22
125	0.183 65	562.5	1.560 24
275	0.153 38	625	0.192 76

表7 垂直振动加速度谱密度峰值情况

 Table 7 Acceleration spectral density peaks of vibration in the vertical direction

频率/	加速度谱密度峰值/	频率/	加速度谱密度峰值/
Hz	$(10^{-3}(m \cdot s^{-2})^2 \cdot Hz^{-1})$	Hz	$(10^{-3}(m \cdot s^{-2})^2 \cdot Hz^{-1})$
500	1.33	562.5	97.37
512.5	6.18	575	18.23
525	3.8	587.5	3.2
537.5	2.6	600	1.28
550	12.37	625	1.48

根据方程(4),(5)得到垂直振动加速度概率密 度函数为:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} = 0.076 e^{-0.239(x+36.747)^2}$$

## 2.4 振动环境严酷度评价

舱室振动环境的船向、横向和垂直向的加速度 谱密度、频率分布均有较大差别,在垂直方向上主峰 的加速度量值和加速度谱密度均大于船向、横向上的 相关数值。在舱室振动环境的船向、横向和垂直向上 小于200 Hz下,其加速度谱密度均小于1(m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz, 而200 Hz以上的加速度谱密度均小于0.3(m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>· Hz。因此舱室在三个方向上典型振动环境属于I 型。由于垂直方向上加速度量值和加速度谱密度较 大,所以考虑舰载平台振动环境时,应把垂直方向作 为考虑的重点。

# 3 结论

1) 文中采用 INV3062T2 数据采集分析系统, 配合 ICP 加速度传感器对舰载平台舱室的振动环境进行了测量。

2) 舱室内测得的振动曲线是光滑过渡的,没有 尖刺或者较大的突变,是可信的随机振动曲线。各 方向上的振动加速度是一个正态随机变量,并得到 了各个方向上振动加速度的概率密度函数。

3)船向振动的加速度主峰大约在50 Hz 左右, 加速度峰值约为0.412 72 m/s<sup>2</sup>,而在562.5 Hz 和 1112.5 Hz 下各出现1个频率峰;横向振动的加速度 主峰在562.5 Hz,加速度峰值约为0.812 m/s<sup>2</sup>;垂直振 动的加速度主峰在562.5 Hz,其加速度峰值约为 1.560 24 m/s<sup>2</sup>,而在625,550,275,125,50 Hz 下各有 小的频率峰。在垂直方向上的主峰的加速度量值和 加速度谱密度均大于船向、横向上的相关数值。

4) 舱室在三个方向上典型振动环境属于I型。 由于垂直方向上加速度量值和加速度谱密度较大, 所以考虑舰载平台振动环境时,应把垂直方向作为 考虑的重点。

#### 参考文献:

- 方书甲.海洋环境对海军装备性能的影响分析[J]. 舰船 科学技术,2004,26(2):5—10.
   FANG Shu-jia. Analysis of the Ocean Environment Influence on the Performance of the Navy Equipment[J]. Ship Science and Technology,2004,26(2):5—10.
- [2] 曲凯,张杰,张旭东. 舰船运动队固体发动机粘接面疲劳 损伤研究[J]. 兵工学报,2012,33(8):986—990.
  QU Kai, ZHANG Jie, ZHANG Xu-dong. Research on Effects of Ship Motion on Interface Fatigue Damage of Solid Rocket Motor[J]. ACTA Armamentarii, 2012, 33(8):986— 990
- [3] 刑耀国,曲凯,许俊松,等. 舰船摇摆条件下固体发动机 舰载寿命预估[J]. 推进技术,2011,32(1):32—35.
  XING Yao-guo, QU Kai, XU Jun-song, et al. Life Prediction of Shipboard Solid Rocket Motor under the Ship Swing Motion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1): 32—35.

[4] 刘著卿,李高春,丁彪,等. 定应力幅值往复拉伸过程中 推进剂的损伤扩展[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26
(3):309—313.

LIU Zhu-qing, LI Gao-chun, DING Biao, et al. Damage Characteristics of Propellant in the Process of Cyclic Tension under Certain Stress Amplitude[J]. Journal of Navy Aeronautical University, 2011, 26(3): 309—313.

[5] 曲凯,刑耀国,张旭东.摇摆载荷作用下舰载固体发动机 药柱疲劳损伤[J]. 航空动力学报,2011,26(1):2636— 2640.

QU Kai, XING Yao-guo, ZHANG Xu-dong. Fatigue Damage of Shipborne Solid Rocket Motor Propollent under Loading[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 2636-2640.

- [6] 靳哲峰.环境综合应力作用下航天电连接器可靠性分析 和建模[D].杭州:浙江大学,2003.
   JIN Zhe-feng. Failure Analysis and Reliability Modeling for Electrical Connector under Action of Combined Environmental Stresses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [7] 徐金洲,贾耀明. 舰上导弹固体发动机贮存寿命分析方法研究[J]. 固体火箭技术,2009,32(3):271—273
  XU Jin-zhou, JIA Yao-ming. Research of Analysis Method for Storage Life of SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2009,32(3):271—273
- [8] GJB 150A,军用装备实验室环境试验方法,第16部分:振动试验[S].
   GJB 150A, Laboratory Environmental Test Method for Military Materiel-Part 16: Vibration Test[S].
- [9] 王孚懋,任勇生,韩宝坤,等.机械振动与噪声分析基础

[M].北京:国防工业出版社,2009.

WANG Fu-mao, REN Yong-sheng, HAN Bao-kun, et al. Mechanical Vibration and Noise Analysis[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2009.

[10] 徐天成,谷亚林,钱玲.信号与系统[M].北京:电子工业出版社,2012.

XU Tian-cheng, GU Ya-lin, QIAN Ling. Signal and System [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.

[11] GJB 10593.3,电工电子产品环境参数测量方法——振动数据处理与归纳[S].
 GJB 10593.3, Methods of Measuring Environmental Param-

eters for Electrical and Electronic Products, Treatment and Induction for Vibration Data[S].

[12] 吴赣昌. 概率论和数理统计[M]. 北京:中国人民大学出版 社,2011.

WU Gan-chang. Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing:Press of Renmin University, 2011.

[13] 峁诗松,汤银才,王玲玲.可靠性统计[M].北京:高等教育 出版社,2008.

MAO Shi-song, TANG Yin-cai, WANG Ling-ling. Reliability Statistics[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2008.

- [14] GB/T 14091,机械产品环境参数分类及其严酷度分级[S]. GB/T 14091, Classification and Severity of Mechanical Product Environmental Factors[S].
- [15] GB/T 4769,电子电工产品环境条件分类[S].GB/T 4769, Classification of Environmental Conditions of

GB/T 4769, Classification of Environmental Conditions of Electric and Electronic Products[S].

(上接第19页)

ZHENG Lu, CHANG Xin-long, WANG Bin. Effect for Temperature and Humidity Change on SRM Adhint Interface[J]. China Adhesives, 2007, 16(6):16—18.

[14] 原渭兰,李军伟.固体火箭发动机对交变环境温度瞬态 响应的研究[J].海军航空工程学院学报,2008,23(5): 521-523.

YUAN Wei-lan, LI Jun-wei. Research on the Respond of the Solid Propellant Motor to the Alternating Environmental Temperature[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(5):521—523.

[15] 李九天,雷勇军,唐国金,等.固体火箭发动机药柱表面

裂纹分析[J]. 固体火箭技术,2008,31(5):471-474.

LI Jiu-tian, LEI Yong-jun, TANG Guo-jin, et al. Analysis on Surface Crack of Solid Rocket Motor Grain[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(5):471-474.

[16] 袁端才,雷勇军,唐国金,等.长期贮存的固体发动机药
 柱脱粘界面裂纹分析[J].国防科技大学学报,2006,28
 (3):19-23.

YUAN Duan-cai, LEI Yong-jun, TANG Guo-jin, et al. Analysis of the Interfacial Crack in Debonded Layer of Long Term Storage Solid Motor Grain[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(3): 19-23.