

# 舰船设备振动试验方法的探讨

朱宜生<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 陈中青<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶重工集团第七二三研究所, 江苏 扬州 225001  
2. 中国船舶工业电工电设备环境与可靠性试验检测中心, 江苏 扬州 225001)

**摘要:** **目的** 探讨舰船设备振动试验中的几个问题并提出解决方法。**方法** 分析GJB 150.16A, GJB 4.7—83和MIL—STD—167—1A等振动试验标准,找出其中存在的缺点。阐述实验室模拟与实际环境的差异,提出改进建议。**结果** GJB 150.16A中没有明确说明随机部分和正弦部分是单独试验还是叠加试验,GJB 4.7—83和MIL—STD—167—1A中没有给出随机振动的条件,只有正弦振动部分。**结论** 对于标准中存在的缺点,在每个轴向,首先进行一半的功能试验,再进行随机叠加正弦/随机振动,最后进行另一半功能试验。对于实验室模拟与实际环境存在差异的问题,通过采用力谱控制、采用模拟舰船结构的夹具、规定安装方式、对环境条件进行反复迭代等方法改进。

**关键词:** 舰船设备; 振动试验; 暴露量级

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.021

**中图分类号:** TJ83 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)01-0112-04

## Discussion on Vibration Test Methods for Shipborne Equipment

ZHU Yi-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Zhong-qing<sup>1,2</sup>

(1. The 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225001, China; 2. China Shipbuilding Industry Environment and Reliability Test Centre for Electric and Electronic Equipment, Yangzhou 225001, China)

**ABSTRACT: Objective** To discuss some problems in the vibration test of ship equipment and put forward the corresponding solutions. **Methods** The vibration test standards GJB 150.16A, GJB 4.7—83 and MIL—STD—167—1A were analyzed, finding out the shortcomings. The difference between the laboratory simulation and the real environment was expounded, and the improvement suggestions were put forward. **Results** It was not clearly described that the random part and the sine part was a separate test or overlay test in GJB 150.16A, while GJB 4.7—83 and MIL—STD—167—1A only gave the sine vibration part, not giving the condition of random vibration. **Conclusion** For the shortcomings of the standards, first half times of the function test for each axes were carried out, and then random superposition of sine/ random vibration test was carried out, and finally the residual function test was carried out. For

收稿日期: 2015-09-03; 修订日期: 2015-09-27

Received: 2015-09-03; Revised: 2015-09-27

作者简介: 朱宜生(1972—),男,江苏扬州人,高级工程师,主要研究方向为环境与可靠性试验、电磁兼容试验等。

**Biography:** ZHU Yi-sheng(1972—), Male, from Yangzhou, Jiangsu, Senior engineer, Research focus: reliability and environmental test, EMC test.

通讯作者: 陈中青(1986—),男,山东菏泽人,工程师,主要研究方向为环境与可靠性试验、振动冲击试验、模态试验等。

**Corresponding author:** CHEN Zhong-qing(1986—), Male, from Heze, Shandong, Engineer, Research focus: reliability and environmental test, vibration and impact test, modal test.

the difference between the laboratory simulation and the real environment, the improvement was achieved through using force spectrum control, test fixture for simulating ship's structure, prescribing the provisions of the installation and repeated iterative of environmental conditions and other methods.

**KEY WORDS:** shipborne equipment; vibration test; exposure order

根据 GJB 150.16A—2009 的规定,舰船振动暴露量级需要考虑船的振动是自然环境(海浪、风)激励、强迫激励(螺旋桨轴转速、往复机械和其他装备的运行等)、舰船结构、装备安装结构和装备响应的复杂函数,应根据实测数据确定其振动暴露条件<sup>[1]</sup>。

由于实际应用中缺少振动环境实测数据,因此 GJB 150.16A 给出的试验条件如下。

1) 随机部分:平直谱,频率范围为 1~100 Hz,加速度谱密度为 0.001 g/Hz,每轴向持续 2 h。

2) 正弦部分:每个轴向在规定频率范围内扫频 10 次后在危险频率上耐振 2 h。

标准没有给出舰船振动试验的详细程序,对于振动试验中的所遇到的一些细节问题没有充分说明,仅零星提出了一些需要考虑的问题,文中就舰船振动试验中可能会碰到的一些问题提出并展开探讨。

## 1 随机、正弦振动试验方法的使用

根据 GJB 150.16A,振动试验条件按如下确定:“随机部分量级见图 C.15,三个正交轴的每个轴向试验持续时间为 2 h;正弦部分的功能试验量级可按表 C.9,试验持续时间应在选定的试验频率范围内,以每分钟 1 个倍频程的速率进行 10 次扫频循环;对耐振试验,应在危险频率,若没有危险频率则在上限频率上,每个轴向试验持续时间至少 2 h<sup>[1]</sup>”。

GJB 150.16A 中没有明确说明随机部分和正弦部分是单独试验还是叠加试验,根据原文含义,大部分试验检测机构 and 装备研制生产单位选择单独完成随机部分和正弦部分的试验。这种方法可以接受,但是也存在几个缺点:

1) 加长试验时间,每个轴向多 2 h,三个方向 6 h,舰船电子装备系统组成常多达十多台设备分机,一个振动试验仅随机部分就多需要近 100 h。目前,各单位装备研制生产任务量都很大,交付节点紧,给任务安排带来较大的压力。

2) 随机振动部分是模拟海浪、风等自然环境激励的,正弦振动部分是模拟螺旋桨轴转速、往复机械和其他装备的运行等强迫激励的。从实际平台适用角度出发,这两种激励往往是同时存在的,单独进行随

机、正弦振动,并不能完全模拟实际情况。

GJB 4.7-83 和 MIL-STD-167-1A 中没有给出随机振动的条件,只有正弦振动部分。因此不存在正弦振动与随机振动进行叠加试验的问题。针对 GJB 150.16A 中存在的正弦振动与随机振动的问题建议采用如下方法解决。

1) 对于每个轴向,首先进行一半的功能试验,采用正弦扫频,在选定试验频率范围内以每分钟 1 个倍频程的速率进行 5 次扫频循环。

2) 进行随机叠加正弦/随机振动:标准规定的图 C.15 图谱作为背景随机振动,在随机图谱上于扫频确定的危险频率处叠加规定量值的正弦分量,当危险频率在一个频带内变化时也可叠加窄带随机<sup>[2]</sup>。

3) 最后再进行另一半功能试验。目前的振动控制系统大多具备随机叠加正弦/随机功能,即便缺少此功能,只要花费很少的费用就能升级,采用上述方法具有如下优点:减少试验时间;更能模拟实际情况;如果有多个危险频率,可同时叠加在随机背景振动图谱上。

## 2 舰船结构、装备安装结构响应的模拟

在试验室进行振动试验时,一般将装备固定在近似刚性的夹具上进行试验,从而将振动台的激励均匀地传递给装备。实际中,装备安装时并不完全是刚性安装在平台上,平台即舰船结构、装备安装结构等的差异会影响装备各阶振动模态的共振频率和阻尼,导致装备安装共振频率与试验室刚性安装所测得的共振频率不完全一样。

试验室振动试验所使用的振动台及台面和舰船平台相比,质量相差很大,所以装备和振动台之间的动力耦合与装备和平台相比,肯定存在明显的差异,这就会导致试验室模拟的振动试验并不能完全代表实际情况。解决方法考虑如下几个方面。

1) 采用力谱控制:在振动台/夹具和装备中间安装动态力传感器,振动台运动由力传感器的反馈来控制,以再现外场实测的界面力<sup>[3]</sup>,从而能保证在试验室振动台与装备的界面上输入正确的平台实际动态力,避免装备过试验或欠试验。

2) 采用模拟舰船结构的夹具:可参考 GJB

150.18—1986中舰船中量级冲击试验的标准夹具,按照规定的尺寸、材料和制造工艺设计制作垫轨和支撑槽钢,来模拟舰船上船体网格支撑结构<sup>[4]</sup>。装备安装在这些标准夹具上,振动台输出相应规定的激励。

3) 规定安装方式,在试验大纲中应明确装备试验时应采用的安装结构、安装方式及相应安装参数,包括安装频率及紧固螺钉安装力矩要求等。

4) 对环境条件进行反复迭代,将试验条件逐步接近真实环境条件<sup>[5]</sup>。

### 3 耐振试验频点及试验时间的选择

GJB 150.16A—2009与GJB 4.7—83中均规定耐振试验在确定的危险频率上进行,如果没有危险频率,应在上限频率上进行。结构件危险频率在共振状态下局部会产生大位移,引起局部弯折变形,进而产生疲劳损坏,这样能迅速评估装备的结构强度和缺陷<sup>[6]</sup>。没有危险频率则在上限频率进行耐振的原因更多的是考虑一定的试验裕量,因为在上限频率处的振动次数最多,累积结构疲劳更大,降低装备寿命和功能振动适应性验证的风险。

在上限频率进行耐振也有不合理之处,也不完全符合舰船平台的实际情况,属于一种平台环境的粗糙模拟。MIL-STD-167-1A不仅规定了在危险频率上进行共振试验,同时也规定了对影响设备功能和结构完整性的非极值频率进行耐振试验,因此美军标MIL-STD-167-1A的规定更符合实际情况。

针对GJB 150.16A和GJB4.7中耐振试验的问题,建议耐振频率的选择参考直升机振动试验条件,当有危险频率时在危险频率进行耐振试验;当没有危险频率时,根据装备在舰船上位置的不同,在螺旋桨或往复机械的基频(多个)及其谐波上进行耐振试验,应对每一规定频率和轴线的组合进行合理次数的应力循环<sup>[7]</sup>。

由于螺旋桨、往复机械、旋转结构或舰船结构产生的振动环境具有准周期激励特征,进一步改进是采用窄带随机进行耐振试验,窄带带宽应涵盖代表上述环境激励变动或装备共振频率变化的频带,也可在频率范围内循环扫描<sup>[8]</sup>。

### 4 利用专用倾斜夹具模拟船体倾斜状态下振动

飞行器在机动转弯等动作会产生过载,同时有温度、振动、冲击等共同作用的复合环境,需要考虑离心

复合试验<sup>[9]</sup>。对于舰船装备,舰船在实际航行过程中受到海浪及风的影响,会发生倾斜,在倾斜的状态下,装备各阶振动模态的频率和阻尼会受到影响。如对于设计有隔振器的装备,隔振器在船体倾斜时因装备重力原因导致其质心与弹性中心存在偏心,振动就会出现耦合,对装备的隔振作用也会发生变化<sup>[10]</sup>。因此可能需要考虑倾斜复合试验。

在试验室试验时,随机部分的振动只是模拟海浪及风等的环境激励,试验时装备处于垂直安装状态,并不能模拟实际倾斜的情况。装备在倾斜摇摆条件下的适应性可通过倾斜摇摆试验来验证,关于倾斜状态下的振动模拟,可考虑采用专用倾斜夹具,试验时从耐振试验持续时间中截取一部分作为倾斜状态下的振动持续时间。夹具的设计应考虑结构刚度、自身的共振与反共振对振动台的影响<sup>[11]</sup>、倾斜角度等,倾斜角度可参考GJB 150.23A<sup>[12]</sup>,给出一个倾斜夹具供参考,如图1所示。



图1 倾斜试验夹具

Fig.1 倾斜试验夹具

### 5 结语

以上主要是结合实际工作对GJB 150.16A, GJB 4.7—83和MIL-STD-167-1A等振动试验标准提出的几点思考,并试着提出相应的解决方法。因缺少相应的舰船平台实测数据支撑未开展进一步研究,欢迎各位同行对相关问题进一步探讨、研究。

最后,从完善舰船振动试验角度出发提出如下建议。

1) 相关总体单位在舰船平台上对振动响应进行实测,实测数据共享,从而指导舰船装备振动暴露条件的确定。

2) 在各舰型及其代表位置上开展数据实测,取得数据并进行分析后形成不同舰型及位置的振动试验通用条件。

3) 根据舰船装备的特点,适时推广力谱振动控制及实际采样时域信号控制。

4) 加强数据成果的应用和推广,推动数据资源向工程应用转化<sup>[13]</sup>。

5) 试验部门加强对试验人员培训及实验室质量管理<sup>[14]</sup>,从试验条件控制、试验顺序、夹具、安装及记录上进一步规范,利于追溯。

#### 参考文献:

- [1] GJB 150.16A—2009,军用装备实验室环境试验方法 第16部分:振动试验[S].  
GJB 150.16A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 16: Vibration Test[S].
- [2] GB/T 2424.26—2008,电工电子产品环境试验 第3部分:支持文件和导则 振动试验选择[S].  
GB/T 2424.26—2008, Environmental Testing for Electronic Products—Part 3: Supporting Documentation and Guidance—Selecting Amongst Vibration Tests[S].
- [3] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [4] GJB 150.18—1986,军用设备环境试验方法 第18部分:冲击试验[S].  
GJB 150.18—1986, Environmental Test Methods for Military Equipments—Part 18: Shock Test[S].
- [5] 郭小曦,张仁群.机载设备振动条件确定方法的研究[J].环境技术,2013,31(5):6—8.  
GUO Xiao-xi, ZHANG Ren-qun. Study on the Method of Vibration Condition of the Aviation-carried Equipment[J]. Environmental Technology, 2013, 31(5): 6—8.
- [6] 陈励.正弦振动试验中的共振利用[J].装备环境工程,2013,10(2):48—51.  
CHEN Li. Application of Resonance in Sine Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 48—51.
- [7] GB/T 2423.10—2008,电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验Fc:振动(正弦)[S].  
GB/T 2423.10—2008, Environmental Testing for Electronic Products—Part 2: Tests Methods Test Fc: Vibration (Sinusoidal)[S].
- [8] GB/T 2423.58—2008,电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验Fi:振动(混合模式)[S].  
GB/T 2423.58—2008, Environmental Testing for Electronic Products—Part 2: Tests Methods Test Fi: Vibration (Mixed Mode)[S].
- [9] 赵保平,孙建亮,蔡骏文,等.航天动力学环境的最新进展与技术展望[J].装备环境工程,2015,12(3):8—13.  
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, CAI Jun-wen, et al. Recent Development and Prospect of Astrodynamical Environmental Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(3): 8—13.
- [10] 李晓波,吴斌,董程,等.捷联惯导减振系统的耦合振动研究[J].装备环境工程,2014,11(2):43—49.  
LI Xiao-bo, WU Bin, DONG Cheng, et al. Research on Coupled Vibration of Strapdown INS Damping System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 43—49.
- [11] 刘青林,朱学旺,张思箭.考虑试件与夹具动力学特性的随机振动试验推力估算[J].装备环境工程,2013,10(2):52—55.  
LIU Qing-lin, ZHU Xue-wang, ZHANG Si-jian. Pushing Force Estimation of Random Vibration Test Considering Dynamic Characteristics of Test Specimen and Fixture[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 52—55.
- [12] GJB 150.23A—2009,军用装备实验室环境试验方法 第16部分:倾斜摇摆试验[S].  
GJB 150.23A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 23: Motions and Inclinations Test[S].
- [13] 唐平,黄晓霞.环境试验数据资源建设的思考[J].装备环境工程,2014,11(6):140—145.  
TANG Ping, HUANG Xiao-xia. Consideration of Environment Test Data Resource Construction[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 140—145.
- [14] 颜东升,王一飞,王元帅.振动试验操作技术探讨[J].装备环境工程,2012,9(6):131—134.  
YAN Dong-sheng, WANG Yi-fei, WANG Yuan-shuai. Discussion on Operation Technology of Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 131—134.