

舰船装备的机械环境试验标准探析

樊薇薇, 吴世华, 王永玲, 李锡

(哈尔滨工业大学 威海校区, 山东 威海 264209)

摘要: **目的** 对比分析我国现有舰船机械环境试验与各国试验标准存在的差异,提出具体的改进措施。**方法** 综述现有舰船装备机械环境试验的相关标准,从倾斜、摇摆、振动与冲击四方面入手,分析舰船机械环境对不同类型装备的影响机理。**结果** 我国现行舰船装备的环境试验标准是在结合美、俄等国家的环境试验标准的基础上制定的,其内容较系统、结构较合理。但由于时间、经验不足等原因,仍处于发展完善阶段,存在一些需要改进的问题。**结论** 提出了我国现有舰船机械环境试验的相应改进意见,有利于进一步研究舰船机械环境试验标准的合理性与有效性。

关键词: 舰船装备; 机械环境; 试验标准

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.021

中图分类号: U665; U467.5⁺25 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)06-0098-07

Analysis of Mechanical Environment Test Standards for Ship Equipments

FAN Wei-wei, WU Shi-hua, WANG Yong-ling, LI Xi

(Harbin Institute of Technology in Weihai, Weihai 264209, China)

ABSTRACT: Objective To compare the differences of mechanical environment test standards between China and other countries, and to propose improvement measures. **Methods** Some major mechanical environment test standards of ship equipments were reviewed and compared. From the four aspects of inclination, rocking, vibration and impact, the influences of mechanical environment on ship equipments were analyzed. **Results** The existing mechanical environment test standards of ship equipments in China were set based on the standards of America, Russia etc. The contents were systemic and the structure was reasonable. Due to the lack of time and experiences, the standards still require some improvement and have some problems to be solved. **Conclusion** Some suggestions for improving the existing mechanical environment test standards of ship equipments in China were proposed in this paper. They are

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-04-15

Received: 2013-03-21; Revised: 2013-04-15

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金资助项目(ZR2011EEQ005)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2011EEQ005)

作者简介: 樊薇薇(1980—),女,山东人,博士,讲师,主要研究方向为舰船电器基本理论及应用技术。

Biography: FAN Wei-wei(1980—), Female, from Shandong, Ph.D., Lecturer, Research focus: basic theory and application technology of ship apparatus.

helpful for the further study on the rationality and validity for environment test standards of ship equipments.

KEY WORDS: ship equipments; mechanical environment; test standards

在舰船航行过程中,装载不平衡及操作不当等人为因素易造成船体倾斜;风浪等气候环境因素易引发船体摇摆,包括横摇、纵摇、艏摇等形式;涨潮、退潮等海洋环境因素易引起船体的低频振动,包括纵荡、横荡和垂荡等形式;发动机及螺旋桨的各类运行振动等易引发高频振动;触礁、抛锚以及武器发射、遭受攻击等突发性事件又会引起瞬时冲击^[1-2]。

可见舰船装备所受环境组成复杂,而不同型号的舰船上,安装于不同位置、具有不同用途的舰船装备所承受的机械环境应力情况亦有所不同。因此,合理考察舰船装备的机械环境适应性,即耐受恶劣机械环境的能力,是保证舰船整体质量与可靠性的重要环节。环境试验是检测装备机械环境适应性的最直接、最有效且最常见的方法^[3-4]。

通过分析倾斜、摇摆、振动及冲击等机械环境对舰船装备所造成的危害,对比了各国现有舰船装备的机械环境试验方法之间的差异,探求现有试验方法中存在的问题,给出了合理化改进建议。

1 倾斜条件

舰船倾角较大、持续时间较长,其设备将长时间承受约自重0.4%~13.4%左右的虚功力(根据重力场分力计算得到)。该虚功力的存在,常引起以下

问题。

1) 影响装备可动部件的运行性能,如重力不平衡结构。可使传统电器中的转动部件作用力失衡等,从而诱发装备故障或失效。

2) 引起组装(安装)位置结构应力增加,从而导致装备破裂、脱落等。

3) 装备液态介质的液面位置变化或润滑条件恶化,易导致液体泄漏或润滑失效。

倾斜试验条件包括横倾和纵倾,是舰船及其装备使用前的第一类机械环境试验^[1,5]。

中日海军舰船装备所受倾斜试验条件均以美军标为蓝本,具体见表1^[6-8]。其中,日军标准与美军标准基本一致,而中国海军标准则在美军标准基础上,针对某些特殊舰船类型的装备倾斜条件提高了要求。如:潜艇在持续水面或通气管航行工况下的纵倾倾斜角度加大,从 $\pm 7^\circ$ 提高至 $\pm 10^\circ$;特殊型号的水面舰船纵倾倾斜角从 $\pm 5^\circ$ 提高至 $\pm 10^\circ$,横倾角度从 $\pm 15^\circ$ 提高至 $\pm 22.5^\circ$ 。

笔者认为倾斜试验条件可以略加改进。

1) 某些装备的性能与倾角的关系未必呈线性,即倾斜角度越大,装备性能不一定会变差。因此,分析选取对于装备危害最为严重的倾斜角度环境试验更有意义。

2) 倾斜试验有横倾与纵倾两种形式,实际上舰

表1 各国海军舰船装备所承受的倾斜条件

Table 1 Inclination requirements of ship equipments for several navy forces

舰船类型及运行工况		倾斜角度/($^\circ$)	持续时间/min
美国	水面舰船(含航空母舰)	纵倾 ± 5 、横倾 ± 15	
	潜艇 持续水面或通气管航行	纵倾 ± 7 、横倾 ± 15	≥ 30
	持续水下航行	纵倾 ± 30 、横倾 ± 15	
	驱逐舰、护卫舰	纵倾 ± 5 、横倾 ± 15	
	高速快艇、中型扫雷艇	纵倾 ± 5 、横倾 ± 10	≥ 30
日本	潜艇 持续水面或通气管航行	纵倾 ± 7 、横倾 ± 15	或 ≥ 15
	持续水下航行	纵倾 ± 30 、横倾 ± 15	
	水面舰船	纵倾 $\pm 5(\pm 10)$ 、横倾 $\pm 15(\pm 22.5)^*$	
中国	潜艇 持续水面或通气管航行	纵倾 ± 10 、横倾 ± 15	≥ 30
	水下航行	纵倾 ± 30 、横倾 ± 15	

注:*表示具体角度由产品规范规定。

船经常遭受的是横倾加纵倾两种机械应力的叠加。因此,应考虑适当增加横倾加纵倾的复合形式,具体取值方法可借助于各类试验设计手段,如均匀设计、正交设计等。

2 摇摆条件

由表2可知,摇摆环境的变动幅度更大($\pm 4^\circ \sim$

$\pm 60^\circ$),且周期较长(3~17 s),通常纵摇周期小于横摇周期。这说明舰船装备的可动部件遭遇摇摆环境时所受动力学效应更为明显,可能引发设备的可靠性问题。

1) 引起具有非固态结构装备的故障,如使蓄电池液态介质的摇晃及飞溅,使气缸位置串动等。

2) 使惯性结构装备(电机)的间隙配合及润滑作用变差^[9]。

表2 各国海军舰船装备所承受的摇摆条件

Table 2 Rocking requirements of ship equipments for several navy forces

舰船类型及运行工况		角度/($^\circ$)	周期/s	持续时间
美国	水面舰船(含航空母舰)	纵摇 ± 10 (航母 ± 4) 横摇 ± 45 (航母 ± 30)	水面舰船和潜艇为: 横摇周期 3~14 纵摇周期 3.5~9	≥ 30 min
	持续水面航行	纵摇 ± 10 横摇 ± 60 (航速 10 级以上 ± 30)	航空母舰为: 横摇周期 12~17	
	潜艇	横摇 ± 30	纵摇周期 8~10	
	持续水下或通气管航行	纵摇 ± 10 横摇 ± 45		
	驱逐舰、护卫舰	纵摇 ± 10 横摇 ± 35		
	高速快艇、中型扫雷艇	纵摇 ± 10 横摇 ± 10	横摇周期为 6~11 纵摇周期为 4~6	
日本	持续水面航行	纵摇 ± 10 横摇 ± 60		
	潜艇	横摇 ± 30		
	持续水下或通气管航行	纵摇 ± 10 横摇 ± 45		
	水面舰艇	纵摇 ± 15 横摇 ± 45 或 ± 60	4~10 3~14	
中国	水上航行	纵摇 ± 15 横摇 ± 30	4~10 3~14	
	潜艇	横摇 ± 45 或 ± 60 横摇 ± 30	3~14 3~14	
	持续水下或通气管航行			

3) 影响转动、直动部件的平衡,从而降低接触部件的接触稳定性,甚至于疲劳、失效。

4) 产生杆臂效应,影响武器发射的打击精度^[10]。

我国摇摆试验条件与美日略有差异,如潜艇的纵摇角度从 $\pm 10^\circ$ 提高至 $\pm 15^\circ$,且各舰船的纵摇周期略长。

根据文献[11],中国海大部分海域的波周期在 3~5.5 s, SON (September, October, November) 和 DJF (December, January, February) 期间为 4.5~6.5 s。因此,摇摆环境试验可以结合我国海域特征确定,以保证近海航行的稳定性;再附加远洋运行时的摇摆试验条件,根据船型适当延长或缩减摇摆周期,调整摇摆幅度。

3 振动条件

舰船设备所受振动环境多为小幅(0.15~2.5 mm)、低频(110 Hz 以下)振动。振动容易引起的设备破坏形式大致分为两类:1)结构与工艺性破坏,如结构件的疲劳、断裂、磨损、连接件的松动、分离等;2)功能与性能破坏,包括工作失灵、性能降低等^[12]。

GJB 4.7—83 的制定主要参考 MIL-S-167-1,而与 MIL-S-167-1 的改进版本 MIL-S-167-1A 相比,我国现行设备振动试验 GJB 4.7—83 有以下几点不足之处^[13-14]:

1) 振动试验中规定为线性扫频,即单位时间内

扫过的频率点数(Hz/min)相同,故低频段上每频率点的振动次数少,高频段每频率点的振动次数多。而对数扫频是单位时间内扫过的倍频程数(OCT/min)相同,即低频段扫速慢,高频时扫速快,可实现在每个频率点上的振动次数近似相等,即高频段和低频段的振动次数大体相同。从累积损伤而言,对数扫频更合理。GJB 150—16即采用对数扫描方式,因此结合该标准更为合理^[15]。

2) 实际应用中某些设备受迫振动,不仅共振点响应极值超过允许范围,某些非极值点的响应量也会超标,影响设备的正常运行。因此,不应只确定共振频率,还应对于响应较大的非响应极值频率进行搜索检查。

3) 稳定性试验的振幅比共振检查的振幅大,对功能或结构要求有影响或破坏的频率更容易暴露出来。应多选择稳定性振动频率点,以提高检验效果。

4 冲击条件

舰船的冲击环境包括:水中非接触性爆炸、接触性爆炸、空中爆炸及武器发射所引起的各类冲击^[16]。冲击作用下,船体及其安装的装备产生脉冲性位移,由于以下原因而使设备失稳或失效:

- 1) 安装部位的瞬时过应力引起永久变形和断裂;
- 2) 零部件、装备与装备、装备与船体之间的剧烈碰撞、挤压和弹塑性变形;
- 3) 固、液、气态介质或作用力瞬间失衡或永久性破坏^[17—18]。

对此,各国均制定了船舶及其装备的水面或水下冲击试验标准^[19—21]。我国常用标准为GJB 4.9和GJB 150,其中GJB 4.9规定船载电子设备的耐冲击试验分为3个等级^[22]:1级(战斗舰艇)要求在0.3,0.9,1.5 m高度每轴冲击1次;2级(军辅船)要求在0.3,0.9 m高度每轴冲击1次;3级(普通船)要求在0.3 m高度每轴冲击1次。而GJB 150则要求轻量级设备(120 kg以下)每轴冲击数为3次;中量级设备(120~2.7 t)每轴冲击次数为2次,而重量级设备(2.7~13.4 t)则需采用浮动冲击平台加水下爆炸试验的方法测试^[23]。其中,轻量级与中量级设备的冲击动力源主要靠冲击机的冲击锤的重力势能实现。我国现阶段所用到的冲击机还

停留在BV043/73和MIL-S-S901B的水平上,单向冲击波的最大冲击速度为3.4 m/s,距离国际上较为先进的标准MIL-S-901D和BV0430/85的抗冲击速度要求5 m/s距离很大^[24—25]。

另外,北约标准BV0430/85中,冲击环境以设计冲击谱形式给出,进行冲击试验时转换成正负波形,法国、美国等亦采用此标准建立相应独立标准及执行文件。而我国现有试验多数仍以半正弦冲击波形作为输入,难以保证舰船设备冲击试验环境的设计有效性。

针对重量级设备,美国在大量实船水下爆炸试验和舰艇水下爆炸冲击环境理论计算方法的研究基础上,逐步建立和完善了冲击环境预报标准程序USA(Underwater Shock Analysis)。我国亦有相关研究,但尚未形成标准规范^[26—27]。

笔者认为我国舰船设备冲击试验可在如下方面改进:

1) 深入研究舰船特点,给出更为合理的冲击谱作为试验内容,而不是简单的高度跌落或摆动冲击。这一点可以借鉴航天装备的冲击谱研究方法及成果^[28—29]。

2) 加快进行冲击试验机的更新换代,使冲击输入不只是简单的半正弦、梯形、后峰锯齿波形,而是三折线冲击谱^[30]。

3) 搭建大型数字化冲击试验仿真试验平台,将难以实现试验测试或试验测试费用较高的项目采用虚拟测试的形式替代^[31—32]。

5 结语

由于我国现行舰船装备的环境试验标准是在结合美、俄等国家的环境试验标准的基础上制定的,其内容较系统、结构较合理。但是由于时间、经验不足等原因,仍处于发展完善阶段,存在一些需要改进的问题。因此,笔者针对现有标准进行了初步探析,提出了相应改进意见,有利于促进舰船机械环境试验标准的合理性与有效性的提高。

参考文献:

- [1] 施建荣,施诗,张燕.论舰船装备倾斜和摇摆环境适应性与试验[J].装备环境工程,2011,8(4):41—44.

- SHI Jian-rong, SHI Shi, ZHANG Yan. On Environmental Worthiness and Test of Ship Equipments in Inclination and Swing Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(4): 41—44.
- [2] SAE J1777/HIR 1063B General Environmental Considerations for Marine Vehicles[S].
- [3] 袁顺才, 王喜臣. 制订船舶专业系列标准提高船用电子设备质量[J]. 环境条件与试验, 1984(3): 27—29.
- YUAN Shun-cai, WANG Xi-chen. Develop Professional Ship Series Standard and Improve the Quality of Ship Electronic Equipment[J]. Environmental Condition and Test, 1984(3): 27—29.
- [4] 章新瑞, 史伟. 环境试验在产品全寿命周期的应用[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 65—69.
- ZHANF Xin-rui, SHI Wei. Application of Environmental Test in Product Full Life Cycle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 65—69.
- [5] CB/T 3035—2005 船舶倾斜试验[S].
- CB/T 3035—2005 Ship's Inclining Experiment [S].
- [6] MIL-STD-1399(NAVY), Ship Motion and Attitude[S].
- [7] NDS F 8002, 舰船用电气机器试验方法[S].
- NDS F 8002, Test Method for Ship Electrical Machine [S].
- [8] GJB 150.23A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第23部分: 倾斜和摇摆试验[S].
- GJB 150.23A—2009, Laboratory Environmental Test Methods of Military Equipments Part 23: Inclination and Rocking Test[S].
- [9] 曾金荣, 曾劲松. 船摇扰动和雷达天线两轴稳定系统[J]. 雷达与对抗, 1995(2): 28—32.
- ZENG Jin-rong, ZENG Jin-song. Two Axis Radar Antenna Stabilization System for Ship Rocking Disturbance[J]. RADAR & ECM, 1995(2): 28—32.
- [10] 朱利锋, 鲍其莲, 张炎华, 等. 船载炮的射击误差分析及消除方法[J]. 中国造船, 2006, 47(3): 70—76.
- ZHU Li-feng, BAO Qi-lian, ZHANG Yan-hua, et al. Analysis and Elimination of Errors for Ship-based Cannon Firing[J]. Ship Building of China, 2006, 47(3): 70—76.
- [11] 李训强, 郑崇伟, 苏勤, 等. 1988—2009年中国海波候、风候统计分析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(增刊): 1—9.
- LI Xun-qiang, ZHENG Chong-wei, SUN Qin, et al. Wave Climate and Wind Climate Analysis in the China Sea from 1988 to 2009[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(Supplementary Issue): 1—9.
- [12] 吴毅萍. 电子设备振动分析与抗振设计[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(5): 88—91.
- WU Yi-ping. Vibration Analysis and Anti-vibration Design for Electronic Devices[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(5): 88—91.
- [13] MIL-STD-167-1A, Department of Defense Test Method Standard[S].
- [14] GJB 4.7, 电子设备振动试验标准[S].
- GJB 4.7, Electronic Equipment Vibration Test Standard [S].
- [15] 唐文杰. GJB 4.7.83 舰船电子设备环境试验振动试验和 MIL-STD-167-1A“舰船设备的机械振动(I类—环境振动)”的分析与对比[J]. 环境技术, 2009(4): 45—48.
- TANG Wen-jie. Analysis and Comparison between GJB 4.7-83 Environmental Test of Shipboard Electronic Equipment Vibration Test and MIL-STD-167-1A Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (Type I environmental Vibration) [J]. Environmental Technology, 2009(4): 45—48.
- [16] 吴静波, 吕襄波, 汪玉, 等. 舰船设备抗冲击性能校核评估系统概念设计[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 130—133.
- WU Jing-bo, LV Xiang-bo, WANG Yu, et al. The Conception Design of the Evaluation System of Naval Vessels Equipment Anti-Shock[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(3): 130—133.
- [17] 程素秋, 樊宝顺, 高春生. 舰船抗冲击试验测点优化布置方法[J]. 兵工学报, 2010, 31(增1): 199—203.
- CHENG Su-qiu, FAN Bao-shun, GAO Chun-sheng. Optimization of Measurement Point Layout in Ship Anti-shock Trials[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(Supplementary Issue 1): 199—203.
- [18] 张晓阳, 刘建湖, 潘建强, 等. 各主要海军国家设备抗冲击标准之评述[J]. 船舶力学, 2011, 15(11): 1322—1334.
- ZHANG Xiao-yang, LIU Jian-hu, PAN Jian-qiang, et al. Review on Anti-Shock Criteria for Equipments in Some Primary Navy Countries[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(11): 1322—1334.
- [19] NATO STANAG-4141, Shock Testing of Equipment for Surface Ships[S].
- [20] NATO STANAG-4142, Shock Resistance Analysis of Equipment for Surface Ships[S].
- [21] NDS F 8005B, 舰船用机器高冲击检查方法[S].
- NDS F8005B, High Impact Test Method for Ship Equipment [S].
- [22] GJB 4.9, 舰船电子设备环境试验 冲击试验 [S].
- GJB 4.9, Environmental Test of Shipboard Electronic

- Equipment Impact Test[S].
- [23] GJB 150 军用设备环境试验方法 冲击试验[S].
GJB 150 Military Equipment Environmental Test Methods Impact Test[S].
- [24] MIL-S-901D, High-impact Shipboard Machinery Equipment, and Systems, Requirements for Shock Tests[S].
- [25] BV 043-85. Germany Defense Naval Ship Construction Specification for Shock and Safety[S].
- [26] 冯麟涵. 舰船系统抗冲击性能全局优化方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
FENG Lin-han. Research on Global Optimum Design Method for Shock Resistance of Ship Systems[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [27] 肖泽, 李亚政, 张军涛. 国外海军舰船装备环境试验军用标准分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 46—48, 52.
XIAO Ze, LI Ya-zheng, ZHANG Jun-tao. Analysis of Foreign Military Environmental Test Standards for Warship Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 46—48, 52.
- [28] RAJENDRAN R. Linear Elastic Shock Response of Plane Plates Subjected to Underwater Explosion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 493—506.
- [29] YOUNG S. Shin Ship Shock Modeling and Simulation for Far-field under Water Explosion[J]. Computers and Structures, 2004, 82: 2211—2219.
- [30] 王贡献, 褚德英, 张磊, 等. 舰船设备冲击试验机研究进展[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 152—159, 183.
WANG Gong-xian, ZHU De-ying, ZHANG Lei, et al. Advances in Shock Test Facilities for Shipboard Equipments[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2): 152—159, 183.
- [31] 王雁涛. 仿真技术在舰船电子设备抗强冲击设计中的应用[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 51—56.
WANG Yan-tao. Application of Simulation Technology in High Anti-Shock Design of Naval Vessel's Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(2): 51—56.
- [32] 贾宪振, 胡毅婷, 董明荣, 等. 水下爆炸冲击波作用下平板塑性动力响应的数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(6): 41—44.
JIA Xian-zhen, HU Yi-ting, DONG Ming-rong, et al. Numerical Simulation of Dynamic Plastic Response of Flat Plates Subjected to Underwater Explosion Shock Waves[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(6): 41—44.

(上接第 64 页)

- ZHANG Hui-xia, QI Xia, DENG Chun-long, et al. Study on Corrosion Rust Layers of Low Alloy Steel in Different Simulated Seawater Environment Using Raman Spectroscopy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 30—34.
- [25] 安闻迅, 邓春龙, 杜敏, 等. 低合金钢实海腐蚀电化学阻抗谱研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 17—20.
AN Wen-xun, DENG Chun-long, DU Min, et al. Study of Marine Corrosion of Low Alloy Steel with Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 17—20.
- [26] 吴荫顺. 金属腐蚀研究方法[M]. 冶金工业出版社, 1993: 40.
WU Yin-shun. Metal Corrosion Research Methods[M]. Metallurgical Industry Press, 1993: 40.
- [27] 王力伟, 李晓刚, 杜翠薇, 等. 微区电化学测量技术进展及在腐蚀领域的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 30(6): 498—503.
- WANG Li-wei, LI Xiao-gang, DU Cui-wei, et al. Recent Advances in Local Electrochemical Measurement Techniques and Applications in Corrosion Research[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection, 2010, 30(6): 498—503.
- [28] 赵卫民, 薛锦. 焊接接头微区电位测试装置的研制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 182—184.
ZHAO Wei-min, XUE Jin. AN Apparatus for Eval Uating Corrosion Tendency of Welded Joints[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(3): 182—184.
- [29] ZHANG G A, CHENG Y F. Micro-electrochemical Characterization and Mott-Schottky Analysis of Corrosion of Welded X70 Pipeline Steel in Carbonate/bicarbonate Solution[J]. Electrochimica Acta, 2009, 55(1): 316—324.