

# 舰面设备可靠性试验工程实践

刘杨<sup>1</sup>, 胡恩来<sup>2</sup>, 胡彦平<sup>2</sup>, 陈津虎<sup>2</sup>, 宫晓春<sup>2</sup>

(1.海军驻上海地区航天系统军事代表室, 上海 201109; 2.北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:**目的 开展舰面设备可靠性试验工程实践。方法 在舰面设备研制阶段, 策划提出关键单机与系统相结合的可靠性试验方案。结果 快速提高舰面设备的系统可靠性。结论 近几年多个型号舰面设备的可靠性试验工程实践, 有效促进了海军导弹武器系统的整体可靠性水平的提高, 为其他舰面设备的可靠性工程提供参考。

**关键词:** 舰面设备; 关键单机; 可靠性试验

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.01.020

**中图分类号:** TJ07      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)01-0087-04

## Engineering Practice on Reliability Test of Ship-deck Equipment

LIU Yang<sup>1</sup>, HU En-lai<sup>2</sup>, HU Yan-ping<sup>2</sup>, CHEN Jin-hu<sup>2</sup>, GONG Xiao-chun<sup>2</sup>

(1. Military Representatives Office of Navy in Shanghai Aerospace System, Shanghai 201109, China;

2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT: Objective** To carry out practices on reliability test of ship-deck equipments. **Methods** A reliability test program combined with key equipment and system was proposed during the development phase of ship-deck equipments. **Results** The system reliability of ship-deck equipment was improved rapidly. **Conclusion** Engineering practices on reliability test of multi-projects ship-deck equipment in recent years effectively enhances the integral reliability of navy missile weapon systems, and provides references for reliability engineering of other ship-deck equipment.

**KEY WORDS:** ship-deck equipment; key equipment; reliability test

随着海军装备作战需求的不断提高, 不仅导弹的性能和可靠性越来越受到重视, 导弹武器系统舰面设备的可靠性要求也越来越高。舰面设备的可靠性水平是导弹武器系统任务成功性的重要环节。通过调研发现舰船装备在环境可靠性方面已经做了一定的工作, 打下了初步基础, 但离部队的实际使用要求还有一定的差距。这主要表现在验收合格交付部队使用的装备仍存在一些环境可靠性问题, 严重的甚至影响使用<sup>[1]</sup>。为解决这些实际问题, 进一步提高舰面设备使用可靠性, 提高实战化能力, 对于新研型号, 在研制阶段专门策划开展了舰面设备的可

靠性试验, 以暴露潜在缺陷进而改进设计, 最终提高舰面设备的可靠性。与以往不同的是, 本次舰面设备可靠性使用采用单机与系统相结合的方式进行, 在初样、试样阶段开展单机、系统的可靠性增长试验, 暴露故障, 改进设计, 并对可靠性进行摸底。在定型阶段开展系统级可靠性鉴定试验, 以多个分系统联调的状态开展试验, 保证边界条件真实, 测试覆盖全面, 技术状态准确。舰面设备可靠性试验工程实践结果表明, 舰面设备的这种单机与系统相结合的可靠性试验能更真实地反映其可靠性水平。

## 1 舰面设备可靠性试验策划

2010年以前,由于试验设备能力的限制,舰面设备在研制阶段,主要是对单机设备开展可靠性试验,对系统级设备可靠性的回答主要以综合评估为主。仅仅开展单机的环境可靠性试验还不够,单机的环境可靠性试验不能考核到产品在系统中的全部工作功能和工作模式,系统工作时发生系统性可靠性问题的可能,这种问题往往在单机工作情况下并不能体现,故还需要对系统整体可靠性进行考核。对系统级产品进行的可靠性试验往往规模较大,但由于其边界条件、载荷施加、结构响应更为真实,试验过程中所体现出的故障模式也更加真实可信,能够有效地反应产品的实际可靠性水平。随着试验箱、振动台等试验设备能力的提升,舰面设备系统级可靠性试验的开展已经成为可能。并且单机与系统相结合的可靠性试验技术已经在其他产品上得到了成功的应用<sup>[2]</sup>。

研制过程中先安排开展舰面设备关键单机及系统可靠性增长试验,暴露设计和制造缺陷,通过设计更改切实提高可靠性,之后再安排开展舰面设备关键单机及系统可靠性鉴定试验。可靠性增长试验也可采用预鉴定的试验方案。海军某舰面设备按照策划先后开展关键单机可靠性试验以及系统可靠性试验后,其可靠性水平得到显著提高,在后续的飞行试验和部队使用中均有所体现。

## 2 可靠性试验方案

开展可靠性试验<sup>[3-4]</sup>需要先确定试验采取的方案,再根据相关标准、研制要求和实际使用状态制定出适合舰面设备的试验剖面,然后按照试验剖面施加各种环境应力并依据标准规定的方案完成可靠性试验。

### 2.1 试验方案

1) 可靠性增长试验方案<sup>[5-7]</sup>。对于电子设备,其可靠性服从指数分布,一般采用指数分布零故障定时截尾试验方案。试验时间按式(1)和式(2)计算。

$$MTBF = -\frac{t}{n \cdot \ln R} \quad (1)$$

$$T = MTBF \times \ln \left( \frac{1}{\beta} \right) \quad (2)$$

式中:  $R_L$  为可靠性置信下限;  $t$  为任务时间;  $MTBF_L$  为平均无故障工作时间;  $T$  为总试验时间;  $n$  为样本数;  $\beta$  为使用方风险。

对于复杂机电产品,其可靠性服从威布尔分布,一般采用威布尔分布零故障定时截尾试验方案。试验

时间为:

$$T = t \cdot \left[ \frac{\ln(1-\gamma)}{n \cdot \ln R} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

式中:  $t$  为任务时间;  $\gamma$  为置信度;  $R_L$  为可靠性置信下限;  $n$  为样本量;  $m$  为形状参数。

对于电子产品和机电一体产品,当增长模型未知时,其总试验时间的确定,通常采用指数分布的无模型定时截尾方案,如式(1)、(2)所示。

2) 对于可靠性鉴定试验或者采用预鉴定的试验方案的可靠性增长试验,试验时间按照 GJB 899A—2009 中的相应方案执行。

3) 对于试验时间很长的可靠性试验,由于研制周期和研制经费的限制,可靠性试验很难按照通常的方案(不加速)进行。这种情况下,一般先根据相关标准、文献<sup>[8-9]</sup>和工程经验制定加速试验方案,然后按照加速试验方案开展可靠性试验。

### 2.2 试验剖面制定

由于各个设备的研制要求和实际使用状态的环境条件不尽相同,有些环境条件甚至与标准中的试验剖面条件相冲突。因此舰面设备可靠性试验剖面<sup>[10]</sup>的制定不能简单地直接引用标准条件,要结合舰面设备的研制要求和实际使用状态的环境条件对相关标准进行适当的剪裁,获得更加符合舰面设备的试验剖面。可靠性试验剖面一般采用四综合环境条件,包括温度、湿度、振动和电应力,有效试验时间通常是综合环境应力试验时间。对于温度、湿度、电应力,其对舰面设备的影响相对较小,一般是结合研制要求和相关标准确定。对于振动应力,不同的标准对振动的规定不一致,应根据研制要求和实际海域相关海况的实测数据确定采用的标准,见表1。对于鉴定试验或增长代鉴定试验,一般选用 GJB 899A—2009。对于实际测量的振动数据,海况较好时,其振动量级很小,且炮击时的舰船振动与无炮击时的振动量级相差较大;海况不好时,舰船的振动较大,且还受到海浪的冲击作用。有条件时应根据多种不同海况的实测数据包络制定舰船振动的试验条件。若实测数据中有较大的冲击响应,剖面中应考虑加入舰船冲击。

对于可靠性增长试验,试验剖面一般可根据研制要求规定的环境条件或者任务剖面内的实际环境条件制定,环境剖面也相对简单。图1所示的可靠性增长试验剖面包括低温贮存、低温工作、高温贮存、高温工作四个温度段,四个温度段的环境条件均来自研制要求。对于可靠性鉴定试验<sup>[11-12]</sup>或者采用预鉴定方案的可靠性增长试验,试验剖面一般是在 GJB 899A—2009 中舰面设备的试验剖面<sup>[13]</sup>基础上,结合研制要求的相关条件规定或充分的实测数据进行适

当的剪裁。可靠性鉴定试验典型剖面如图 2 所示。

表 1 舰船振动条件

GJB 1060.1—91 (正弦扫描)				GJB 899A—2009 (随机)		
分区	频率/Hz	位移幅值/mm	加速度幅值/g	频率范围/Hz	功率谱密度	总均方根加速度/g
舰船主体区	1~16	1	/	10~20	+3dB/oct	1g
	16~60	/	1	20~50	0.01 g <sup>2</sup> /Hz	
舰船桅杆区	2~10	2.5	/	50~200	-3dB/oct	
	10~16	1.0	/			
	16~50	/	1			

GJB 150.16A—2009 (正弦扫描+随机)				
分区	频率/Hz	频率/Hz	位移幅值/mm	加速度幅值/g
舰船主体区	1~16	1~16	1	/
	16~60	16~60	/	1
舰船桅杆区	2~10	2~10	2.5	/
	10~16	10~16	1.0	/
	16~50	16~50	/	1

频率范围/Hz	功率谱密度	功率谱密度	总均方根加速度
1~100	0.001 g <sup>2</sup> /Hz	0.001 g <sup>2</sup> /Hz	0.315 g

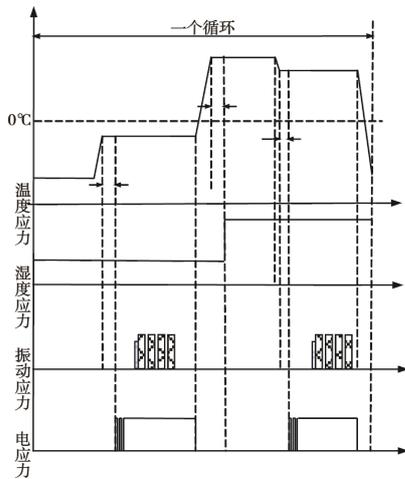


图 1 可靠性增长试验剖面

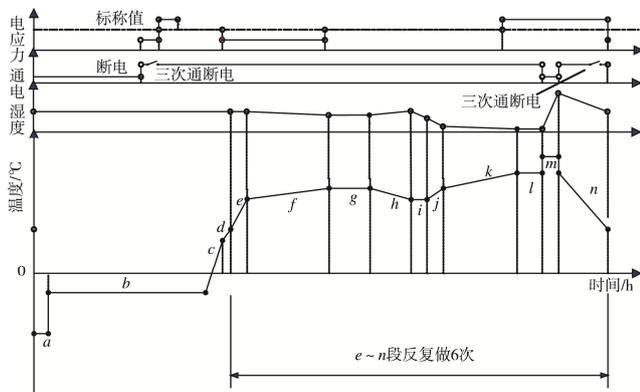


图 2 可靠性鉴定试验剖面

### 3 可靠性试验

采用关键单机与系统相结合的思路,对舰面设备开展关键单机及系统的可靠性试验<sup>[14-15]</sup>,首先通过分析选取舰面设备各分系统的关键单机或新研单机开展单机级可靠性试验,之后再以分系统的形式开展系统级可靠性试验。

先通过关键单机可靠性试验暴露单机设备潜在缺陷进而改进设计,提高关键单机的可靠性,从而达到提高舰面设备系统可靠性的目的。再通过系统及可靠性试验暴露系统潜在缺陷进而改进设计,最终提高舰面设备的系统可靠性。

舰面设备关键单机可靠性试验状态如图 3 所示,系统可靠性试验状态如图 4 所示。

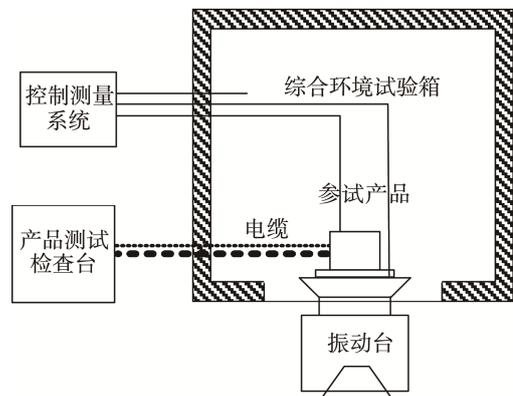


图 3 舰面设备单机可靠性试验

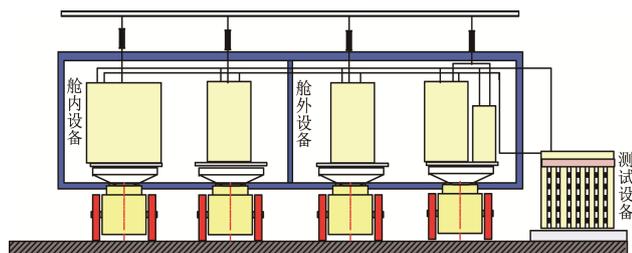


图4 舰面设备系统可靠性试验

在某舰面设备型号研制过程中进行的可靠性增长试验过程中,某分系统先后出现了近5个故障。通过改进设计,大幅提高了系统可靠性。在随后的可靠性鉴定试验中,该舰面设备未出现故障,顺利的通过了可靠性鉴定试验。

## 4 结语

海军舰面设备的可靠性试验工程实践是一个不断进步的过程,不断采用先进的可靠性试验技术和方案,可不断提高舰面设备的可靠性和实战化水平。经过近几年多个型号舰面设备的可靠性工程实践,结果表明,开展关键单机与系统相结合的可靠性试验,能较好地实现舰面设备系统可靠性的快速增长。然而,舰面设备当前的可靠性试验条件均来自于标准,有些条件可能过于严酷,后续应充分收集或者采集实测数据,进而包络出更加真实的试验条件,最终更真实地评估舰面设备的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 杨万均,肖敏,张燕,等.舰面电子设备机柜防护失效分析与对策研究[J].装备环境工程,2012,9(6):83—87.
- [2] 朱曦全.单机和系统级航天产品综合环境可靠性试验技术的工程应用[J].导弹与航天运载技术,2007(4):32—36.
- [3] 祝耀昌.可靠性试验及其发展综述[J].航空标准化与质量,2005,24(5):32—35.
- [4] 赵莹雪,刘晖.装备研制(改造)中加强环境试验与可靠性试验[J].装备环境工程,2014,10(2):75—78.
- [5] 胡彦平,张正平,李海波,等.航天产品可靠性增长试验指南应用探讨[J].强度与环境,2011,38(2):44—48.
- [6] GJB 1407—1992,可靠性增长试验[S].
- [7] QJ 3127—2000,航天产品可靠性增长试验指南[S].
- [8] 宁建法,李文钊.弹上电子产品起飞前工作时间折算研究[J].强度与环境,2010,37(3):41—44.
- [9] 李海波,张正平,胡彦平.加速寿命试验方法及其在航天产品中的应用[J].强度与环境,2007,34(1):2—10.
- [10] 杨喜存,单军勇.从某正样机的鉴定试验谈可靠性试验设计[J].装备环境工程,2015,12(1):93—96.
- [11] 王春晖,邱述斌.可靠性鉴定试验受试样品的软硬件联合测试技术[J].装备环境工程,2014,11(2):64—68.
- [12] GJB 899A—2009,可靠性鉴定与验收试验[S].
- [13] 蔡健平,张萌,赵婉.舰载导弹武器全寿命期环境剖面确定方法[J].装备环境工程,2014,11(5):92—96.
- [14] GJB 150A—2009,军用装备实验室环境试验方法[S].
- [15] 陈永祥,李宪珊.基于AMSAA模型评估不可修复的威布尔分布产品可靠性[J].强度与环境,2013,40(2):51—55.