

海军战术导弹武器系统可靠性试验技术 分析及发展建议

张弛¹, 周芳², 胡绍华², 陈津虎², 胡彦平²

(1.海军驻南京地区航天机电系统军事代表室, 南京 210006;

2.北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 为深入完善海军战术导弹可靠性试验技术, 为新研型号研制定型提供借鉴参考。对近年来海军导弹武器产品的可靠性试验工作进行了总结。阐述了单机、舰面设备、全弹不同层级产品可靠性试验技术特点, 指出了当前可靠性试验工作中存在的不足之处, 最后为后续海军战术导弹武器系统可靠性试验技术发展提出建议。

关键词: 战术导弹; 武器系统; 可靠性试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.017

中图分类号: TJ760.6⁺1; V216.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)07-0083-04

Technical Analysis and Development Suggestion on Reliability Test of Naval Tactical Missile Weapon System

ZHANG Chi¹, ZHOU Fang², HU Shao-hua², CHEN Jin-hu², HU Yan-ping²

(1.Navy Representative Office of Aerospace Mechanical and Electrical System in Nanjing, Nanjing 210006, China;

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

ABSTRACT: The paper aims to improve reliability test technology of naval tactical missile and provide reference for development of new research and design. This paper summarized reliability tests of naval missile weapon in recent years, analyzed technical features of reliability test for all levels of single machine, on-board equipment and entire missile, and pointed out shortcomings in current reliability test. Finally, the paper gave suggestions on development of reliability test technology for the new tactical missile weapon system.

KEY WORDS: tactical missile; weapons system; reliability test

随着作战实战化要求的不断提高, 海军对战术导弹武器系统的可靠性格外重视。为了保证试验验证的充分性、试验技术的先进性、试验过程的规范性, 海军战术导弹武器可靠性试验采用第三方实验室管理模式, 即军方与研制单位、第三方试验机构一起策划提出导弹武器系统的可靠性试验方案体系, 由第三方专业机构提供技术支撑, 并管控、实施, 确保试验的规范化和公正性。近年来, 海军对多个新研战术导弹

武器在研制阶段开展了充分的可靠性试验工作, 从产品层级、考核指标、技术特点等方面而言均具有较好的覆盖性和先进性, 整个工作取得极为积极有益的效果。通过对暴露单机和系统产品的缺陷进行设计和工艺的改进, 从而实现了武器系统可靠性水平的切实提升^[1-2]。文中对近年来新研型号可靠性试验工作进行了分析总结, 指出其宝贵经验和不足之处, 提出后续技术发展建议, 为新研型号研制定型工作提供参考。

1 可靠性试验技术特点

经过长期的探索和发展,目前海军战术导弹武器系统采用单机可靠性试验与全弹可靠性试验相结合的思路,产品层级包括弹上单机、舰面设备和全弹。一般在研制初样阶段安排可靠性摸底试验,试样阶段开展可靠性增长试验,定型阶段开展可靠性鉴定试验。早期型号产品在可靠性试验中暴露大量故障,经过在设计和工艺上的改进后,产品可靠性水平的显著提高。当新研型号产品在设计和生产具有借鉴性和继承性时,可以考虑减少可靠性摸底试验,直接选择开展可靠性增长试验和可靠性鉴定试验。

1.1 弹上单机可靠性试验

单机可靠性试验,主要进行可靠性增长(摸底)试验和可靠性鉴定试验。可靠性增长试验是模拟产品实际使用环境下,激发产品故障,分析故障机理,采取纠正措施,提高产品固有可靠性的试验过程。可靠性鉴定试验通过准确模拟实际使用环境应力的试验方式,定量评估产品的可靠性^[3]。

可靠性增长试验主要供参考的有基于 GJB 1407—92 进行的可靠性增长试验方案^[4],基于无模型的可靠性增长试验方案,基于增长试验和预鉴定试验相结合的可靠性增长试验设计方案。目前航天产品故障数较小,GJB 1407—92 中的方法很难适用,型号弹上电子产品主要采用第三种方案,其主要特点是假设产品可靠性随时间的变化服从指数分布,采用指数分布的定时截尾试验方案,具体方法参考 QJ 3127—

2000《航天产品可靠性增长试验指南》^[5]。可靠性鉴定试验则严格按照 GJB 899A—2009 中的方法进行^[6]。对于某些指标极高,试验时间过长的产品,则采用加速试验的方法以缩短时间。

采用指数分布的零故障定时截尾试验方案,试验时间由式(1)和式(2)确定:

$$MTBF = -t \frac{1}{\ln R} \tag{1}$$

$$T = t \frac{\ln \beta}{n \ln R} \tag{2}$$

式中: T 为总试验时间; t 为任务时间; β 为使用方风险; R 为可靠性增长目标值; n 为参试产品数。

进行加速试验时,采用如下加速公式缩短试验时间:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1/n} \tag{3}$$

式中: W_1 为加速前功率谱密度值; W_2 为加速后功率谱密度值; T_1 为加速前试验时间; T_2 为加速后试验时间; n 为加速模型幂指数,取值参考 GJB 150.16A—2009 振动试验中提供的振动应力加速方法^[7-9]。

对于电子、机电产品,试验应力采用温、湿、振、电四综合应力,对于机械产品主要采用工作应力。弹上产品试验剖面的制定在相关标准基础上,还要结合产品自身特点,依据任务剖面、寿命剖面最终确定。例如力学环境除飞行振动应力外,还逐渐增加舰载运输振动应力。舰空导弹任务时间短,飞行振动应力即为全程任务的振动条件,舰舰导弹任务时间长,飞行振动应力会根据不同工作阶段进一步细分为多种条件。气候环境则全面覆盖各种可能出现的温度、湿度应力,有些产品还增加了气动热环境的模拟。

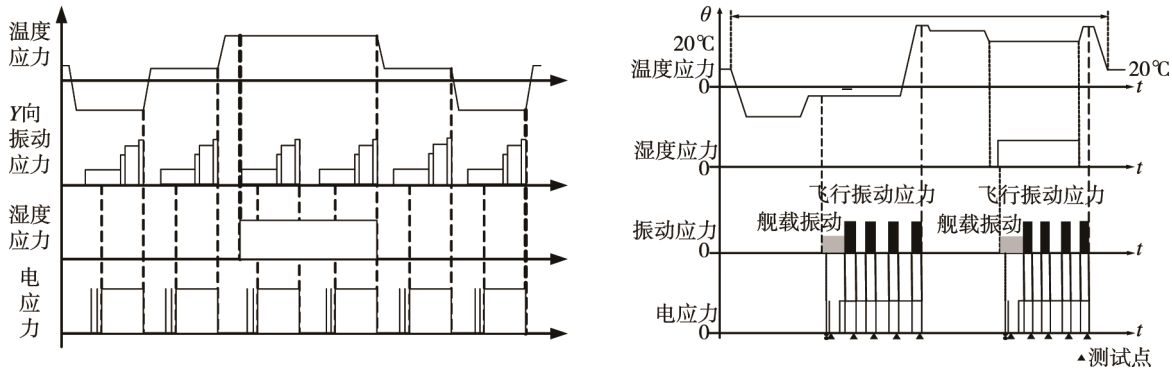


图1 典型舰载武器单机可靠性试验剖面

1.2 舰面设备可靠性试验

舰面设备是武器系统重要的组成部分,是导弹的装载、控制、发射平台,负责完成发射任务,是武器系统任务成功性的重要保障。以前受试验能力限制及认识不足,型号研制中“重弹上轻地面”,使弹上产品的可靠性得到了普遍的重视,而舰面设备可靠性一直未受到足够的重视,以致部队使用过程中问题较多。如果舰面设备可靠性低,在作战中将直接影响整个武器的战备完

好性和实战能力^[11]。为解决这些实际问题,海军在新研型号中,专门策划开展了舰面设备的可靠性试验,依然采用单机与系统相结合的方式,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。

舰面设备可靠性试验主要采用 GJB 899A—2009 中规定的舰船设备可靠性试验方法,试验时间、试验剖面、试验量级都规定的比较明确^[12]。其主要技术难

点在于综合环境应力下的系统联合试验，舰面设备体积大，设备多，舱内舱外设备分别同时施加各自的试验应力，需要在大型综合环境可靠性试验设备中进行。通过设计专用工装模拟每套产品的实际边界条件，往往采用多振动台同时施加激励，所有设备组成完整的系统，试验中进行系统全流程考核。典型舰面设备可靠性试验状态和剖面如图2和图3所示。目前海军已经完成多个型号的舰面设备可靠性试验，均暴露出了薄弱环节，通过设计改进提高了产品可靠性，取得了良好的试验效果。

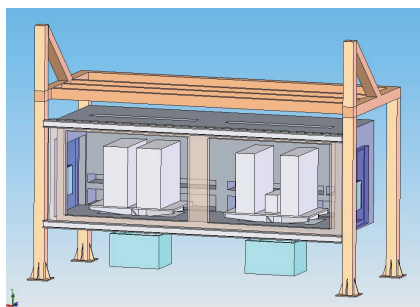


图2 典型舰面设备可靠性试验状态

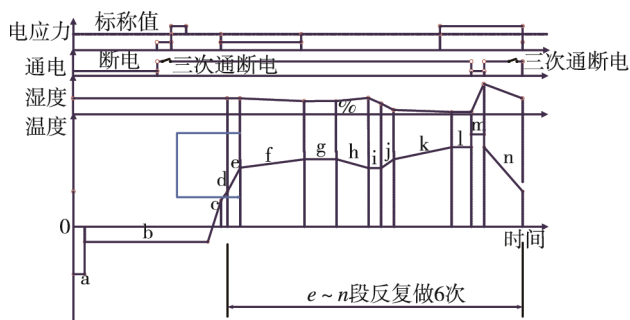


图3 典型舰面设备可靠性试验剖面

1.3 全弹可靠性试验

单机产品可靠性增长试验的目的是提高产品的可靠性基础，系统级或全弹产品可靠性增长试验的目的则是提高和考核系统内产品匹配协调关系的可靠性。和单机试验相比，系统级试验具有产品边界模拟更加真实、结构更加真实、载荷模拟更加真实的特点，因此产品的响应也更加真实，能够暴露单机试验不能暴露的高层次问题。海军战术导弹较早地开展了全弹综合环境可靠性试验技术的研究及工程实施。

全弹试验状态出于安全考虑，发动机等火工品采用工艺件代替，其他均为真实产品。试验时间计算方案、试验剖面的构成均与单机可靠性试验相类似，但在环境条件方面应尽量根据飞行实测数据来制定，因导弹的细长体特性，不同位置试验条件往往不同，依据飞行遥测数据可以更加准确地制定不同舱段的试验条件，使应力加载更加真实。同时，全弹试验应增加产品冷透、热透时间确保整个系统温度达到要求。试验过程中采用双振动台并激的方式施加振动应力，双台并激既可以保证足够的振动推力，更能实现两个

不同条件的施加，但是对振动控制方式要求较高，必须制定合理的振动控制方案以确保试验加载合理，不出现过、欠试验现象。综合环境试验箱施加气候应力，同时需对试验箱进行改造增加相关的特殊防护和测试设备，以实现全弹各种特殊的测试要求。全弹综合环境可靠性试验是非常必要的，在开展全弹试验的多个型号中，均激发了系统级的故障，这些故障是单机级产品试验中没有暴露的，通过全弹试验更加充分地对系统整体功能性进行了考核和验证。

由于导弹飞行过程中实际是受多维振动的，既受到发动机点火、工作时的轴向激励，也受到气动噪声的脉动激励。根据战斧导弹的飞行遥测数据分析，其轴向振动量级是需要关注的，在很多测点和纵向振动达到同等数量级；另一方面，其他型号工程实践证明，轴向平推也是暴露导弹薄弱环节的重要手段。因此，海军在现有双台单维全弹可靠性试验基础上，研究并实现了全弹多维综合环境可靠性试验技术^[14]，如图4所示。在保留弹身刚度较大的部位施加了垂向振动应力的同时，对导弹施加了轴向振动。多轴振动的同时施加，既较真实地模拟了产品实际飞行时的应力状态，又使结构的振动合成为空间向量，能够实现多维振动对结构的激励，能够激发产品不同的故障模式。

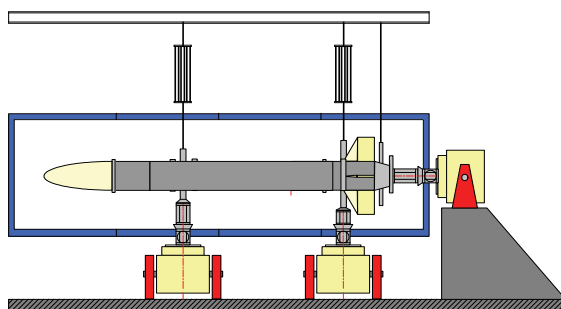


图4 全弹多轴综合环境可靠性试验

2 存在的问题

当前海军战术导弹武器系统可靠性试验体系已经较为完善，试验策划与设计贯穿研制阶段，覆盖层级从单机到系统，尽可能地确保地面试验的充分性。多个型号经过大量可靠性试验后，在研制阶段暴露出大量薄弱环节，通过对设计的改进，切实提高了可靠性，在实战打靶和部队使用中取得了很好的效果。在分析各型号可靠性试验的具体过程中，主要还存在以下一些问题。

1) 可靠性试验中有效试验时间不统一。有效试验时间是可靠性试验中的重要参数，只有有效试验时间才会会计入可靠性评估中。当前主要存在两种情况，一种是以温、湿、振、电综合应力时间作为有效时间，另一种是以温、湿度应力时间作为有效时间。有效试验时间定义的不同直接影响到试验方案和剖面的制定，温、湿、振、电综合应力时间作为有效试验时间时，振

动应力根据任务时间和可靠度指标计算得到,试验时间明确;温、湿度应力时间作为有效试验时间时,振动应力根据任务剖面要求施加,受主观因素影响较大^[15]。此外,不同应力方式作为任务时间时,由于产品的工作状态不同,其寿命分布模型也不相同。对于舵机、伺服机构等有带载工作要求的产品而言,其实际飞行任务中是温度、湿度、振动、电应力同时存在的综合环境,工作失效模式属于典型的耗损型失效,采用 Weibull 分布进行可靠性试验方案设计与评估更加合适。结合海军战术导弹可靠性试验工程实践经验,笔者认为弹上产品根据其真实工作环境状态,采用温、湿、振、电综合应力作为有效试验时间更加规范、合理。

2) 某些产品工作应力加载不充分。对于电子产品,其工作应力为电应力,环境应力为温度、湿度、振动等。可靠性试验条件可以很好地模拟其工作情况。有些产品如舵机、伺服机构等,其实际工况需要带负载工作,飞行中的负载应力很大,负载应力的施加与否对产品可靠性考核影响很大。试验中也已经表明不带负载下产品很容易通过试验,但施加负载应力后产品会暴露出问题。目前,有些型号通过专用工装设计实现了负载应力的施加,有些型号因种种原因负载应力考核不充分^[16]。这是后续相似产品可靠性试验中应进一步完善解决的地方。

3) 特殊产品可靠性试验开展不充分。当前电子、机电产品可靠性试验方法比较完善,过程管理相对规范。对于特殊产品如发动机、战斗部、电池、弹体结构、发射筒、火工品、折叠舵等含能类、火工类、复杂机电一体化类产品。各类型产品组成复杂,工作模式特殊,还没有成熟的可靠性试验方法。目前主要结合研制阶段开展的专项试验以及研制数据折算,在定型时进行可靠性评估,产品真实的可靠性水平还很难通过地面试验方式进行充分考核与验证。

3 发展建议

海军非常重视导弹武器系统的可靠性工作,多年来采用第三方实验室管理模式,进行了较为充分的地面验证试验。文中对多个新研型号可靠性试验工作进行分析总结,阐述了单机、分系统、全弹不同层级产品可靠性试验技术特点,提出了当前可靠性试验工作中存在的一些问题,最后为后续海军战术导弹武器系统可靠性试验技术发展提出如下建议。

1) 需要进一步开展特殊产品可靠性试验方法研究。特殊产品主要为发动机、战斗部、贮运发射筒、电池等复杂含能产品,技术特点复杂,工况严酷,对导弹整体功能的实现又有着重要影响,需要设计特定的试验方法,选择专用的试验设备和场地,以在地面试验中充分考核。

2) 需要开展远海值班任务可靠性研究与验证^[19]。

随着我国海军远洋战略的要求,舰载战术导弹面临长期舰上值班的任务需求,航母舰载机挂载导弹面临长期值班与挂飞任务需求^[21]。在复杂恶劣的海洋环境中长期值班后,导弹武器的可靠性如何考核验证需要在后续进一步解决。

3) 完善全弹系统综合环境可靠性试验方法。当前海军已经实践了全弹综合环境可靠性试验技术,取得了有益效果。在真实飞行任务中,导弹受到发动机脉动推力和气动噪声的影响,实际是多维振动和热应力复合的形式,此外还会受到出筒、分离的冲击作用,舵系统承受负载应力,这些问题都需要在后续解决完善。

参考文献:

- [1] 谭汉清,王在铎. 海军战术导弹可靠性试验工程实践[J]. 强度与环境, 2015, 29(5): 49—53.
- [2] 田义宏,邱杰. 第三方可靠性试验与评估的尝试及探讨[J]. 强度与环境, 2007, 34(5): 57—61.
- [3] 朱曦全. 航天产品的可靠性增长试验方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(1): 58—61.
- [4] GJB 1407—92, 可靠性增长试验[S].
- [5] QJ 3127—2000, 航天产品可靠性增长试验指南[S].
- [6] GJB 899A—2009, 可靠性鉴定和验收试验[S].
- [7] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [8] MIL-HDBK-781A, Handbook for Reliability Test Methods, Plans, And Envi-Ronments for Engineering, Development Qualification, and Production[S].
- [9] 张绍伟,史松伟,张昶,等. 防空导弹可靠性增长试验加速方法的工程探索[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 29(5): 6—9.
- [10] 薛鲁强,褚政,李绅政. 基于任务的舰空导弹武器系统可靠性试验设计[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(4): 120—123.
- [11] 莫昌瑜,袁宏杰. 舰载设备可靠性振动试验剖面设计方法研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(4): 442—448.
- [12] 程家军,李春枝,陈颖. 舰载环境振动摇摆特性测试分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 114—119.
- [13] 蔡健平,张萌,赵婉. 装备典型舰载平台振动环境严酷度分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 87—92.
- [14] 王梦魁. 多维振动环境试验的实践[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 22—25.
- [15] 胡彦平,张正平,李海波. 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.
- [16] 张宏峰,王晓林,邢文忠. 伺服系统加速可靠性增长试验应用与探讨[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 82—85.
- [17] 曲凯,邢耀国,张旭东. 摇摆载荷作用下舰载固体火箭发动机药柱疲劳损伤[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2636—2640.
- [18] 徐金洲,贾东明. 舰上导弹固体火箭发动机贮存寿命的分析方法研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(3): 271—273.
- [19] 唐嘉钰,赵建印. 基于随机截尾的导弹值班可靠性分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(2): 173—177.
- [20] 曲晓燕,邓力. 舰载武器海洋环境适应性分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 138—140.
- [21] 郁立勇,马晓东,方平. 面向实战的机载武器加速可靠性增长试验方法[J]. 强度与环境, 2015, 42(3): 58—64.