

# 舰面设备环境可靠性试验技术综述

胡恩来, 胡彦平, 陈津虎, 宫晓春, 褚亮

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** 首先介绍了舰面设备环境可靠性的早期发展情况, 其环境可靠性试验极不充分, 主要依据各种数据评估设备的可靠性。其次叙述了舰面设备环境可靠性试验的近年来的发展过程及现状, 其环境可靠性试验技术得到了长足的发展, 着重介绍了当前的单机级产品与系统级产品相结合的环境可靠性试验技术以及高可靠产品的加速可靠性试验技术。最后总结了当前舰面设备环境可靠性试验技术的不足之处, 并给出了相应的建议, 为舰面设备的后续环境可靠性试验工作提供参考。

**关键词:** 舰面设备; 环境可靠性试验; 单机级; 系统级

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.01.012

**中图分类号:** TJ01      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)01-0053-05

## Review on Reliability Test Techniques of Ship-deck Equipment

HU En-lai, HU Yan-ping, CHEN Jin-hu, GONG Xiao-chun, CHU Liang  
(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** Firstly, early development of reliability work of ship-deck equipment was introduced. Since the environmental reliability-tests were very inadequate, equipment reliability was mainly evaluated by different kinds of data. And then, development process and status of reliability test of ship-deck equipment development were described. Environmental reliability test technique also achieved significant development. It focused on both accelerated reliability test of high reliable equipment and the present reliability test program combined with key equipment and system. Finally, some inadequacies of reliability test technique of present ship-deck equipment development were concluded, and the corresponding advices were suggested to provide reference for reliability engineering of other ship-deck equipment.

**KEY WORDS:** ship-deck equipment; environmental reliability test; single level; system level

随着海军装备的发展, 舰载导弹的功能性能及可靠性水平不断提高, 导弹武器系统舰面设备的环境可靠性逐渐受到重视, 其环境可靠性要求也逐步提高, 环境可靠性水平逐渐成为影响导弹武器系统完成作战任务的重要因素。在环境可靠性试验方面, 对舰载设备虽然已经做了大量的工作, 奠定了坚实的基础, 但是面对海军部队的实战化作战需求还有一些不足。例如某些检验合格的舰面设备产品在海军部队实际使用过程中仍然存在环境适应性和可靠性方面的不足, 有的还可能会降低装备的可用性。为了弥补这些

实际存在的不足之处, 提升产品的环境可靠性水平, 需要针对舰面设备进行环境可靠性试验, 暴露产品的薄弱环节, 然后通过技术改进对产品设计和工艺进行优化, 从而提高其环境适应性和可靠性, 最终提升装备的实战化能力。

### 1 早期阶段

从 20 世纪 80 年代到 90 年代初, 国防科学技术工业委员会批准发布实施 GJB 4—83, GJB 150—86,

GJB 450—87, GJB 451—90, GJB 841—90, GJB 899—90, GJB 1060—91 等多个系列环境和可靠性方面的国军标以来,舰面设备的环境可靠性试验工作逐渐在研制过程中普及实施。GJB 4—83 主要依据国内舰船实测数据制定各种试验条件, GJB 150—86, GJB 899—90, GJB 1060—91 更多的是依据国外标准翻译<sup>[1-3]</sup>而成。20世纪90年代,我国海军装备因研制经费不充足和国外技术封锁,缺乏相应的环境可靠性试验设备和试验技术,装备的环境可靠性试验开展得极其不足<sup>[4]</sup>。很多舰面设备的可靠性试验均没有条件开展,可靠性指标无法验证,极大地限制了舰面设备可靠性水平的提高。舰面设备可靠性依据的是大量的数据评估结合少量的试验,仅对少数关键的单机产品开展可靠性增长或鉴定试验,对非关键的单机产品采用数据评估的方式获得可靠性。对于大型复杂设备,由于试验室设备能力的限制,也只能采用数据评估其可靠性。设备可靠性水平可采用各种摸底、验收或鉴定试验以及自然贮存试验的数据,按照统计理论对其进行评估。刘祥<sup>[5]</sup>针对舰上大型复杂电子产品的特点,提出了可靠性综合评定的方法。简述了可靠性评定的基础和评定程序,并以现役舰载作战指挥系统为例,给出了评定思路和主要环节,同时就信息收集、评定方法选取、评定结果分析等进行了探讨。马绍力等<sup>[6]</sup>分析了 MTBF 保证试验、可靠性增长试验、可靠性综合评定等方法的特点,结合舰上设备自身的产品特性,从单机级、系统级不同产品组成层级的角度,提出针对性的考核方法以验证其可靠性水平。

舰面设备在海洋环境中工作,对海洋特殊环境适应性要求很高。要求设备具有抵抗高温、低温、湿热、水、太阳辐射、盐雾、霉菌等气候环境和抵抗振动、颠簸、倾斜和摇摆、冲击等力学环境的能力。通过各种环境试验能较短的试验时间内发现薄弱环节,再加以改进从而提高舰面设备的可靠性。早期发展阶段,舰面设备更多的是开展各种环境试验(而不是可靠性试验)来提高产品可靠性。张继源<sup>[7]</sup>提出了通过严酷环境应力的环境试验来提高雷达电子设备耐恶劣环境能力,研究耐受恶劣环境应力的防护方法,从而提高装备可靠性。结合舰上产品特点,制定了湿热、高温、低温、太阳辐射等环境应力的防护方法及具体实施方案。吴晗平<sup>[8]</sup>研究了温度、湿度、盐雾、霉菌等海洋气候环境对舰上电子产品的腐蚀作用,介绍了耐受恶劣海洋气候环境应力的防护总体方案,给出了几种常见材料及镀层的耐腐蚀性,并讨论了密封防护技术。

根据 GJB 4.7—83, GJB 150.16—86, GJB 1060.1—91, 早期的舰船振动试验只进行由螺旋桨叶片的扰动和螺旋桨轴系的不平衡力等引起的周期性正弦扫频振动和危险频率上的耐久定频振动,而不考

虑由舰船航速、航向、各种操作和海清等变化所引起的随机振动。

## 2 发展与现状

随着投入的增加和技术的进步,舰面设备可靠性也得到了长足的发展。近10年来,舰面设备在研制过程中细化了环境可靠性指标,提出了明确的环境可靠性要求,促使了环境可靠性试验在舰面设备系统及单机产品研制中得到大量开展,最终大幅提升舰面设备的环境可靠性。环境、可靠性标准方面,出现了一批 GJB 150A—2009, GJB 450A—2004, GJB 451A—2005, GJB 899A—2009 等新标准替代原有的老标准。尤其是随着舰船技术的进步和人们认识的提高,随机振动逐渐成为振动试验不可忽略的因素,在新的国军标中振动试验均考虑了随机振动<sup>[9-11]</sup>。莫昌瑜等<sup>[12]</sup>依据振动数据处理方法和工程经验,对舰上产品提出了基于实测数据的振动环境剖面全套制定方法。应用数理统计理论,对舰载设备振动环境实测数据进行参数假设检验,得到具有不同区域和不同状态的特征样本。采用修正后的容差上限法归纳特征样本的随机振动规范谱,确定试验量值,再根据任务剖面确定试验时间,得到舰载设备可靠性振动试验剖面。曹心宽<sup>[13-14]</sup>针对舰上电子武器系统样本量少、极度缺乏基础数据这一难点,将变环境可靠性数据分析方法应用于评估舰上电子产品系统级可靠性水平,并给出了工程上不同环境之间等效关系的计算方法,充分利用陆上联调、系泊航行等试验数据,对舰上电子产品系统可靠性进行综合评估,同时给出了该方法的典型应用案例。程林风等<sup>[15]</sup>针对舰船在运行、作战等环境下引起的振动导致舰载电子设备出现故障,舰载武器无法正常运转等问题,采用有限元分析方法对舰载电子机柜进行模态分析,依据有效模态质量和模态振型对舰载机柜的薄弱环节进行分析。提出了提高舰载机载抗振性能的几项措施并进行了仿真验证,提高了舰载武器系统工作的可靠性。此外,该方法可广泛用于舰载印制板、零部件等薄弱环节的研究,为后续的抗振优化提供可靠依据。王学孔等<sup>[16]</sup>分析了利用可靠性试验标准计算可靠性试验剖面的局限性,介绍了利用实测数据制定可靠性试验剖面的益处,总结了基于实测数据的可靠性试验剖面常用编制方法,对于今后可靠性试验剖面的制定具有一定的指导意义。

舰面设备的可靠性工作由原来的只有少量关键的单机产品进行可靠性试验逐渐发展为几乎全部的单机产品均进行可靠性试验。2010年以前,受限于试验设备的能力,舰面设备进行的可靠性摸底或验证试验主要是针对单机级产品,对系统级产品的可靠性主要是以综合评估为主。随着可靠性水平的不断提

高, 舰面设备的可靠性指标也越来越高, 舰面设备可靠性试验时间也越来越长。单机设备的可靠性试验时间更是大幅增加, 有的甚至达到了几万小时。这么长的试验时间无论是从研制经费还是从研制周期考虑, 均难以接受。于是, 工程实践上出现了舰面设备可靠性试验加速方案, 同时还可以利用其他各种摸底、验收或鉴定试验以及自然贮存试验的数据减少可靠性试验时间。加速可靠性试验通常先依据相关文献资料<sup>[17]</sup>和工程经验确定综合环境应力的加速因子, 然后制定加速可靠性试验方案, 最后根据方案进行加速可靠性试验。张宏峰等<sup>[18]</sup>对加速可靠性试验技术的目的、原理、试验应力选取方法和注意事项进行了阐述, 结合某型伺服系统加速可靠性增长试验方案设计实例, 对传统可靠性增长试验方案和加速可靠性增长试验方案进行了比较, 为加速可靠性试验技术在伺服系统后续工程研制中的应用提供了研究思路和经验借鉴。

仅仅开展单机级设备的环境可靠性试验还远远不够, 单机级设备的环境可靠性试验考核覆盖不了系统级可靠性, 有些系统级可靠性问题在单机考核的情况下往往不出现, 而在系统考核的情况下才出现, 因此必须进行系统级环境可靠性试验考核。系统级设备的环境可靠性试验虽然规模庞大, 但是其载荷响应和边界条件均更接近真实, 试验所暴露的故障模式和故障机理与实际更为一致, 试验结果更为可信, 能更为有效地反映装备的真实可靠性水平。随着技术的发展, 综合环境试验箱、振动台、控制仪等试验仪器设备能力和系统级环境可靠性试验技术均得到大幅提高, 对舰面设备实施系统级环境可靠性试验考核已经具备条件。魏永杰等<sup>[19]</sup>分析了系统级可靠性试验的必要性和意义, 研究了系统级可靠性试验技术, 讨论了系统级可靠性试验的主要问题及解决方法。最后用列举实例对系统级可靠性试验的实用性与有效性进行了验证。

近几年来, 得益于环境可靠性试验系统能力的提高和试验技术的进步, 舰面设备系统级产品环境可靠性试验也具备了实施的条件, 通过舰面设备系统级可靠性试验能直接验证舰面设备系统可靠性, 而不是仅仅依靠单机级设备的环境可靠性试验、联调试验和其他试验数据来评估系统可靠性。系统级可靠性试验不仅能考核各个单机, 还能考核各个单机的连接部位以及整个系统。工程实践表明, 系统级可靠性试验能发现一些单机可靠性试验发现不了的问题。单机设备可靠性试验和系统级可靠性试验各有优缺点, 不能简单地替代。为了更好地考核舰面设备可靠性, 不能仅仅开展单机设备可靠性试验而不开展系统级可靠性试验, 或者仅仅开展系统级可靠性试验而不开展单机设备可靠性试验, 应该既开展单机设备可靠性试验又开展

系统级可靠性试验。考虑到研制经费和研制周期, 可采用关键单机和系统相结合的方式开展舰面设备可靠性试验, 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。朱曦全<sup>[20]</sup>研究了近年来航天设备可靠性试验的工程案例, 总结了单机级设备和系统级设备可靠性试验方法的特点, 讨论了不同层级设备可靠性试验之间的相互关系, 并列举了可靠性试验实施过程需要关注的问题。

某型号舰面设备研制过程中开展的可靠性增长试验, 先后暴露了某分系统的5个潜在缺陷<sup>[21]</sup>。通过故障分析和设计改进, 大幅提高了该系统的可靠性。然后, 在定型阶段, 该舰面设备无故障通过了可靠性鉴定试验的考核。在某型号舰面设备的环境鉴定试验过程中, 也引入了系统级考核方案。对于气候环境试验, 系统的所有产品均同时参加试验, 以系统的形式考核; 对于力学环境试验, 产品以单机的形式开展试验, 同时系统的其他产品均进行陪试, 以系统的形式考核。系统级环境试验发现了单机环境试验未发现的问题, 提高了系统的可靠性。

### 3 可靠性试验方法

当前的舰面设备可靠性试验方法主要是针对关键的单机级产品和与系统级产品, 进行单机和系统结合的可靠性试验<sup>[22-25]</sup>。首先分析确定舰面设备系统的关重件单机、薄弱环节单机和新研单机等关键的单机级产品, 再针对关键的单机级产品进行可靠性试验, 通过单机级可靠性试验验证和提高单机产品的可靠性。然后针对舰面设备系统进行可靠性试验验证和提高系统的可靠性。可靠性试验的指标参数可依据可靠性设计要求文件的相关规定确定; 可靠性试验条件依据环境条件和试验要求的相关规定确定; 可靠性试验的试验方案依据研制任务书和 GJB 899A—2009 确定; 最后综合制定舰面设备的可靠性试验方案。

#### 3.1 可靠性增长试验方案

1) 对于电子产品, 其寿命和可靠性通常服从指数分布, 采用指数分布的零故障定时截尾可靠性试验方案。可靠性试验总时间为:

$$t_{\text{MTBF}_L} = -\frac{t}{n \cdot \ln R_L} \quad (1)$$

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

式中:  $t_{\text{MTBF}_L}$  为平均无故障工作时间;  $R_L$  为可靠度置信下限;  $T$  为总试验时间;  $\beta$  为使用方风险;  $t$  为任务时间;  $n$  为样本量。

2) 对于复杂的机电产品, 其寿命和可靠性一般通常服从威布尔分布, 采用威布尔分布的零故障定时

截尾可靠性试验方案。可靠性试验总时间为：

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

式中： $\gamma$  为置信度； $m$  为形状参数。

3) 对于电子和机电一体化产品，当可靠性增长模型未知时，其试验时间一般采用指数分布无模型定时截尾可靠性试验方案确定。

对于可靠性增长试验，其试验剖面相对来说较为简单，如图 1 所示。一般包括低温和高温两个阶段，每个阶段又分贮存和工作两种状态，共四个温度段。其中贮存状态产品不通电、不加振动；工作阶段，产品通电、加振动。此外，高温阶段要施加较高的相对湿度。可靠性试验的温度、湿度、振动和电应力环境条件均来自研制任务书和研制技术条件，或者根据实测的环境数据制定相应的环境条件。

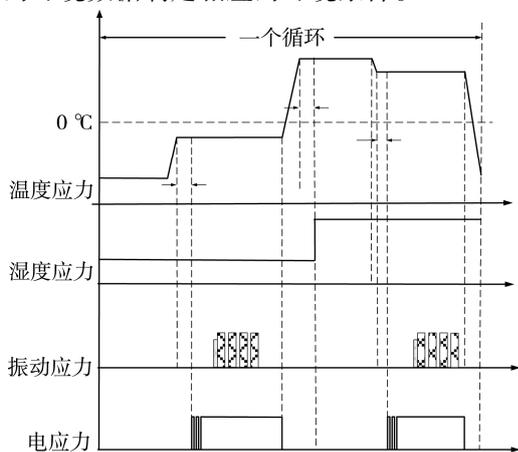


图 1 可靠性增长试验剖面

### 3.2 可靠性鉴定试验方案

可靠性鉴定试验方案一般是按照研制任务书规定的 GJB 899A—2009 中的统计方案号所对应的系数计算可靠性试验时间。对于可靠性鉴定试验或采用鉴定试验方案的可靠性增长试验，其试验剖面一般是结合研制任务书和研制技术条件的相关规定或实际测得的数据对 GJB 899A—2009 中舰面设备的试验剖面进行适当的剪裁。可靠性鉴定试验的典型试验剖面如图 2 所示。

经调研，现有的舰面设备可靠性试验剖面形式主要有两种类型，一种是严格按照 GJB 899A—2009 的试验剖面形式或者将 GJB 899A—2009 的试验剖面形式拆分成多个试验剖面再组合的形式。某发射系统可靠性试验剖面是严格按照 GJB 899A—2009 的试验剖面形式；组件可靠性鉴定试验剖面是将 GJB 899A—2009 的试验剖面形式简化为冷天剖面-标准天剖面-热天剖面组合。

另一种是将复杂 GJB 899A—2009 的试验剖面简

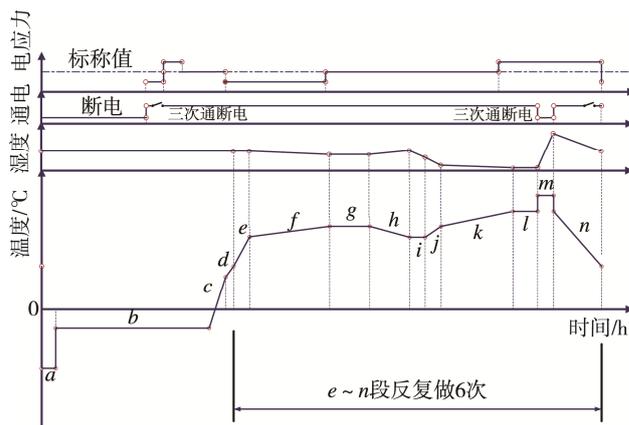


图 2 可靠性鉴定试验剖面

化为类似可靠性增长剖面的几个温度段组合的剖面形式。某型号舰面设备可靠性鉴定试验的剖面是在 GJB 899A—2009 中舰船设备舱外设备剖面和无温控舱内设备剖面的基础上进行了加速简化处理，简化为冷天-标准天-热天-热天-标准天-冷天的温度剖面，如图 3 所示。某发射箱可靠性鉴定试验的剖面是在 GJB 899A—2009 中舰船舱外设备剖面的基础上进行了简化处理，简化为冷天-标准天-热天剖面，如图 4 所示。

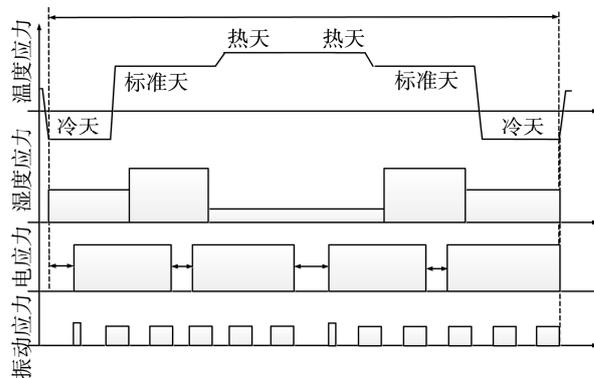


图 3 某舰面设备加速可靠性鉴定试验剖面

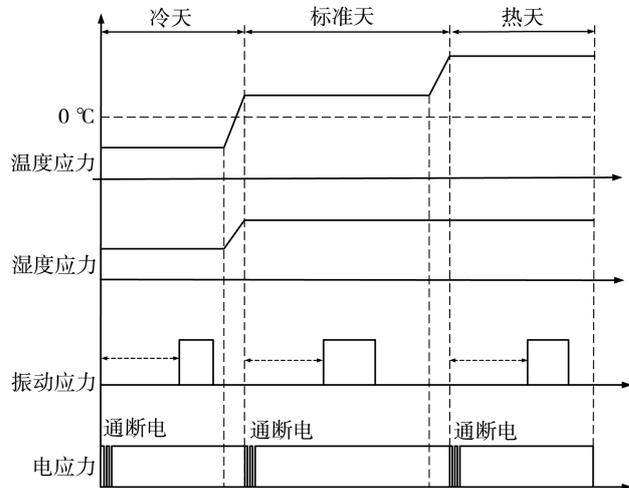


图 4 某发射箱可靠性鉴定试验剖面

### 3.3 加速可靠性试验方案

对于某些舰面设备, 由于任务时间长, 其可靠性试验时间很长。受限于研制周期和研制经费, 可靠性试验很难采用常规的方案(不加速)开展。这种情况下, 只能进行加速可靠性试验。一般先依据相关文献资料和工程经验确定综合环境应力的折算环境因子, 再由环境因子折算出加速可靠性试验时间。然后按照加速试验方案<sup>[26]</sup>开展可靠性试验。

## 4 不足之处

目前关键单机与系统相结合的可靠性试验方案在舰面设备上仅仅得到初步应用, 虽然应用很成功, 但还没有得到广泛应用。同时海军舰面设备的环境可靠性试验的试验条件往往是来自于标准, 这些条件可能与实际环境条件不完全相符, 有些条件可能过于严酷, 有些条件可能过于宽松, 还需要加强研究从而制定更合理的试验条件。此外, 舰面设备加速可靠性试验的准确度还需进一步研究。远洋任务需求下,  $t_{MTBF}$  会大大提高, 现在的可靠性试验考核时间远远不够, 可靠性试验综合应力未考虑盐雾应力, 舱外设备也没有考虑太阳辐射应力。

## 5 结语

舰面设备环境可靠性工程是一个试验、改进、再试验、再改进的逐渐优化的过程, 同时试验技术也在持续改进, 逐渐模拟出与真实环境条件一致的环境应力。先进的环境可靠性试验技术能最大程度地评估和验证舰面设备的环境可靠性水平, 更有效地提高舰面设备的环境可靠性, 增强海军部队的战斗力。舰面设备多个型号的工程实践表明, 单机与系统相结合的环境可靠性试验方案能快速实现舰面设备环境可靠性的评估、验证及提高。

针对舰面设备环境可靠性工作的现状, 提出以下建议: 进一步推广其他型号舰面设备应用关键单机与系统相结合的环境可靠性试验方案; 开展舰面设备实际环境应力测量和数据收集, 制定更接近实际的环境可靠性试验条件, 实现更有效的环境可靠性评估与验证; 收集大量的值班数据或试验数据来验证或修正加速可靠性试验加速因子的准确性, 并开展大量的试验对比验证; 建立更加充分的综合应力试验方法, 同时考核设备在温度、湿度、振动、盐雾和太阳辐射综合环境应力下的可靠性。

### 参考文献:

- [1] MIL-STD-810D, Environmental Test Methods and Engineering Guidelines[S].
- [2] MIL-STD-781D, Reliability Testing for Engineering Development, Qualification, and Production[S].
- [3] MIL-HDBK-781, Handbook for Reliability Testing Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production [S].
- [4] 魏兰. 海军武器装备质量可靠性工程发展状态综述[J]. 船舶电子工程, 1999(2): 45-52.
- [5] 刘祥. 舰载大型复杂电子设备的可靠性评定工作[J]. 船舶电子工程, 1999(4): 50-54.
- [6] 马绍力, 王青. 舰船装备可靠性指标验证方法[J]. 船舶工程, 2002(4): 62-65.
- [7] 张继源. 舰载雷达系统装备环境试验与可靠性技术应用[J]. 雷达与对抗, 2005(4): 60-63.
- [8] 吴晗平. 舰载电子设备可靠性与环境防护技术[J]. 装备环境工程, 2004, 1(2): 64-68.
- [9] MIL-STD-810F, Environment Engineering Consideration and Laboratory Tests[S].
- [10] MIL-STD-810G, Environment Engineering Consideration and Laboratory Tests[S].
- [11] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [12] 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.
- [13] 曹心宽. 舰载电子武器系统可靠性评估方法[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 74-77.
- [14] 马建杨. 移动电话机产品的可靠性和可靠性检验[J]. 科技信息, 2011(29): 501-503.
- [15] 程林凤, 王敏毅, 黄朝学. 基于 ANSYS 的舰载电子机柜振动可靠性研究[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(1): 115-118.
- [16] 王学孔, 江露, 张钟文, 等. 利用实测数据制定可靠性试验剖面综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(3): 72-75.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 魏永杰, 王晓红. 系统级可靠性试验技术探讨[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 71-74.
- [20] 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, 29(4): 32-36.
- [21] 刘扬, 胡恩来, 胡彦平, 等. 舰面设备可靠性试验工程实践[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 87-90.
- [22] 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.
- [23] GJB 1407—1992, 可靠性增长试验[S].
- [24] QJ 3127—2000, 航天产品可靠性增长试验指南[S].
- [25] GJB 899A—2009, 可靠性鉴定与验收试验[S].
- [26] 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.