

综 述

高过载条件下弹载控制系统贮存寿命研究展望

穆希辉¹, 牛跃听¹, 马小兵²

(1. 总装备部军械技术研究所, 石家庄 050000; 2. 北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要: 研究弹载控制系统长周期贮存、高过载发射、使用可靠性难以确定、缺乏寿命评估方法等问题。弹载控制系统长期贮存后,其控制系统能否承受高达20 000G的发射过载,这直接影响其制导精度和作战效能。通过研究弹载控制系统的结构原理、材料特性、工艺技术,以及其寿命与环境应力的复杂关联性,开展高过载条件下控制系统的应力分析、动态性能检测、失效机理分析、退化模型和加速模型统一形式,以及基于多维动态序列的系统级产品可靠性研究。确定其贮存薄弱环节,创建其在高过载冲击条件下的可靠性评估理论体系,突破长期贮存后弹载控制系统在高过载条件下寿命评估的技术瓶颈,拓宽弹药贮存寿命评估技术的研究范围,为其科学定寿和维修延寿奠定基础。

关键词: 弹载控制系统; 高过载; 寿命评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.022

中图分类号: TJ410 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0115-06

Prospection on Storage Life of Missile-borne Control System under High Overload

MU Xi-hui¹, NIU Yue-ting¹, MA Xiao-bing²

(1. Ordnance Technological Research Institute, Shijiazhuang 050000, China;

2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: This paper studied the long-period storage, the high overload launch, the difficulty to determine the operational reliability, the lack of life assessment methods and other issues of the missile-borne control system. After long-term storage, whether the missile-borne control system can withstand up to 20 000G launch overload directly affects its guidance accuracy and operational efficiency. By studying the structure principle, material properties, process technology of the missile-borne control system and the complex relevance of the life and environmental stress, the stress analysis was carried out of the control system under the condition of high overload, as well as the test of dynamic performance, failure mechanism analysis, the unified form of degradation model and acceleration model, and the

收稿日期: 2015-01-16; 修订日期: 2015-02-10

Received: 2015-01-16; Revised: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471385); 中国博士后科学基金资助项目(2013M532181)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(61471385); The National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (2013M532181)

作者简介: 穆希辉(1950—),男,河北人,博士,主要研究方向为信息化弹药寿命评估与延寿技术。

Biography: MU Xi-hui(1950—), Male, from Hebei, Ph.D., Research focus: information technology and life extension technology ammunition life Assessment.

reliability analysis of system-level products based on multi-dimensional dynamic sequences. To determine the storage weaknesses, a systematic reliability assessment theory was established under the condition of high impact overload, which broke through technical bottlenecks of life assessment of missile-borne control system under the condition of high overload after long-term storage, broadened the scope of ammunition storage life assessment technology of artillery missile and laid the foundation for scientific life assessment and repairmen to prolonging life.

KEY WORDS: missile-borne control system; high overload; life assessment

炮射导弹具有发射过载高、长期贮存、一次使用的鲜明特点,它有发射药筒,初速大、转速大、发射过载高、炮口横向自振频率高。由于其发射过载高,它采取了大量减震措施使其具有很强的抗过载能力。其制导控制系统是其“大脑和中枢神经”,一般由激光接收机、电子装置、陀螺坐标仪、舵机舱等组成。现阶段,研制单位给出的弹载控制系统寿命期指标是一个具有统计意义的指标,是一个经验预估值,尚缺乏自然环境贮存的长期监测数据、加速寿命试验数据、使用数据等支撑,导致给出的预期寿命不够准确。

长期贮存后,弹载控制系统(特别是超出给定质保期的弹载控制系统)的质量变化规律尚不明确,这导致以下亟需解决的问题:一方面,弹载控制系统虽然在设计时都采用了加固措施,但长期贮存后加固材料等性能退化,控制系统中的光电元器件也发生退变,能否承受发射时高达20 000g的过载,这是其战时能否可靠使用的重大战备问题,也是其有别于通用弹药和导弹的一个新问题;另一方面,超出给定质保期的弹载控制系统平时能否安全贮存,其在质量监控、贮存勤务、作业搬运等方面需要采取哪些科学举措,这都需要依据其寿命评估和质量变化规律研究的结果。

1 存在的问题

弹载控制系统在使用可靠性方面存在以下诸多问题。

1) 部组件互因失效问题。相对于常规单体机电设备而言,弹载控制系统集成了自动驾驶仪、激光接收机、陀螺坐标仪、加速度计、舵机放大器等高精密设备,系统构成复杂,并且各功能部件之间相互交联、相互影响,失效模式难于判断。

2) 弹载控制系统常规静态测试获取的参数指标与其可靠性的关联程度尚不够明确,这导致静态测试显示设备正常而高过载条件下却发射失败的现象时有发生(不出膛、脱靶等)。依据以往的故障分析理论又难以准确查找原因,只能“定性”为长期贮存过程中环境应力可能对高过载下控制系统的使用可靠性产

生了影响。

3) 弹载控制系统在高过载条件下的测试问题。在定性分析之后,需要抽取不同贮存年份的弹载控制系统进行高过载条件下的动态性能参数测试,以获取科学的评估数据。高过载条件下的测试技术是面临的一个关键技术瓶颈,这是因为:一方面,定型的弹载控制系统没有预留高过载条件下动态测试接口,需要对其进行改装;另一方面,高过载条件下的测试装置要满足抗高过载、微型化、高可靠性等诸多苛刻条件;再者,弹载控制系统处于高过载状态的时间历程很短,测试捕捉其多参数的电信号难度大。

4) 变环境、异批次小子样贮存寿命评估问题。获取的高过载条件下弹载控制系统性能数据只是评估其贮存可靠性的数据来源之一,除此之外还有例行维护检测数据、定型阶段试验数据、同类产品数据等。这些数据来源于不同的贮存环境、生产批次,而且弹载控制系统可靠性高,性能试验可能出现零失效数据。如何在小样本的前提下融合上述数据和加速寿命试验数据来科学评估其贮存可靠性是项目研究面临的难题。

鉴于以上诸多有待于解决的问题,现有的技术还不能够科学评估弹载控制系统的贮存可靠性。

2 国外研究现状与发展趋势

由于炮射导弹是一种特殊的导弹,和导弹控制系统的共同之处是:结构上均由光、机、电部件组成,使其具有精确制导能力。不同之处是:炮射导弹控制系统需要经受住20 000g的高过载,其远高于普通导弹发射过载。基于此,弹载控制系统中的部组件在设计上采取了减震技术、抗高过载组装互连技术、封装技术、工艺材料抗高过载技术等。因此,在高过载弹载控制系统贮存可靠性研究方面,它与导弹贮存可靠性研究既有联系又有所差异。

2.1 导弹贮存可靠性研究现状

美军导弹司令部于20世纪60年代,开始组织实施导弹装备贮存可靠性计划(the Storage Reliability of

Missile Materiel Program, SRMMP)和贮存可靠性研究计划(the Storage Reliability Research Program, SRRP)^[1-5],这2项计划的实施,使美军对导弹电子装置、机电装置、气动液压部件、光学部件、火工品等的贮存可靠性有了全面的掌握,但是美军也指出了现场贮存寿命评估方法的不足:采用元器件、材料的数据逐级向上评估整机、分系统、系统的贮存可靠性,精度不高;突发型失效产品的失效数据难以获得,而退化型失效产品的性能退化缓慢,需要经历漫长时间才能获得满足统计要求的数据量;导弹质量监测统计数据庞大,人为造成的统计错误难免干扰贮存寿命评估的结果。

20世纪80年代,美国罗姆航空发展中心发表了多份贮存可靠性研究报告,其中,RADC-TR-85-91^[6]建立了预测贮存周期对装备可靠性影响的定量分析方法,并给出了元器件、材料的贮存失效率评估模型及相应的基础数据。美军监测手段先进,开展了“远程监测计划”^[7],依托微型传感器、卫星等远程监测导弹的温度、湿度、振动、冲击,一旦监测数据超出允许的数值,立即将失效数据上传到数据中心报警。

20世纪90年代以后,由于现场贮存监测计划经费开支大、时间跨度长、导弹更新换代快的原因,美军开始采用加速试验与现场贮存相结合的方法开展导弹贮存寿命研究。

俄罗斯在导弹贮存可靠性研究领域公开的信息较少。据报道,俄罗斯以C-300整弹为研究对象,通过6个月的加速试验评估C-300导弹贮存寿命为10年。其采用的技术途径是现场贮存寿命试验和加速寿命试验相结合的方法。图1对导弹贮存可靠性评估发展进行了归纳^[8]:

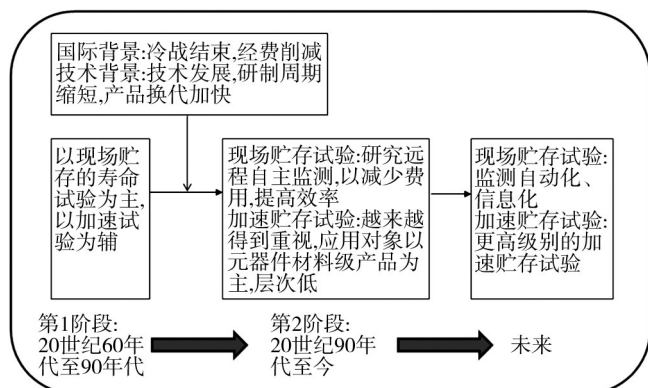


图1 导弹贮存可靠性评估发展历程

Fig.1 Development process of reliability assessment of missile storage

2.2 高过载条件下控制系统的可靠性研究

2.2.1 抗高过载技术及测试装置的研究

寿命数据是可靠性评估的基础和前提,高过载条件下的测试数据是其中重要的组成部分。因此,高过载条件下的测试技术和测试装置作为获取寿命数据的重要手段,在可靠性研究中占有重要地位。

炮射导弹发射瞬间的载荷高达20 000g,其控制系统的机电设备承受很大的过载^[9]。研制阶段,针对弹载控制系统的复杂机电设备在设计、材料、工艺、试验等不同领域开展了大量关于抗高过载技术的研究。如:中国科学技术大学国家同步辐射实验室设计了由橡胶垫和碟簧组合的复合减振装置,通过改善连接关系、对关键器件采取封装固化等措施,从结构设计上提高了弹载设备的抗高过载能力^[10];西南交通大学研究了弹载数据存储模块在高过载冲击条件下基于复合缓冲模块的防护技术,对保护装置的复合缓冲结构的缓冲机理从能量角度进行了探讨和研究,得到了复合缓冲结构的缓冲效果^[11];国防科技大学对弹体姿态测量系统的抗高过载性能进行了Ansys 软件仿真、马歇特试验以及实弹飞行试验,给出的抗高过载方案在降低高过载对弹体姿态测量系统的影响方面,可以发挥良好的作用^[12];北京理工大学以空气炮和火药模拟火炮为过载发生装置,采用弹载数据采集存储系统采集的数据对GPS接收机抗高过载进行了试验研究^[13];中北大学、北京理工大学、南京理工大学在弹载数据采集存储系统方面进行了深入研究,并将之应用到高过载弹药的数据采集试验^[14-17]。

值得强调的是:上述研究多是在弹载控制系统定型阶段进行的,其在测试手段、测试空间等方面有诸多便利条件(定型阶段数据可以作为可靠性评估的先验信息)。针对长期贮存后弹载控制系统在高过载条件下的测试,是面临的一个关键技术瓶颈,需要研制特定的数据采集装置,并需要对导弹进行改装,导致该方面的研究工作、科技文献很少。这是由于我国乃至世界其他国家弹药研发部门和后期维护保障部门相对独立所造成的。

2.2.2 可靠性研究

驻二〇九所军事代表室在某激光探测器研制过程中,对其在高过载冲击时的失效进行了分析研究。经解剖及测试分析,发现失效探测器主要表现为:玻璃光窗出现微裂纹或破碎、电容和管芯支架脱落,其失效模式均为机械失效导致的电功能失效。激光探测器的失效导致炮射导弹基本丧失命中目标

的能力^[18-19]。

弹载控制系统从出厂到最终使用,往往经历了在不同环境贮存数年的时间,其性能参数一般会在长期的贮存环境中发生退化,一旦承受高过载发射条件,失效现象时有发生。目前的现状是:有达到耐过载指标要求的弹载控制系统,但是目前还不掌握其高过载条件下的失效机理,且没有长期贮存后其性能状态、可靠性评估的有效方法。

总之,目前针对“由普通机电设备构成的导弹控制系统”的可靠性评估问题,已经有了一套比较完整的评估方法。针对高过载条件下(发射瞬间过载达到20 000g)长期贮存后的弹载控制系统的可靠性研究,至今鲜有研究文献报道,尚需进一步深入研究。

3 亟待解决的关键技术问题

3.1 高过载试验中控制系统性能参数的动态测试技术

针对长期贮存后的弹载控制系统,实弹靶试的高过载试验方法获取的控制系统性能数据最为真实可信。需要研制“微型弹载多参数采集存储装置”(如图2所示)。该装置既要满足紧凑设计条件下微型化的要求,又要承受高温、高压、强冲击振动、高过载等恶劣环境。

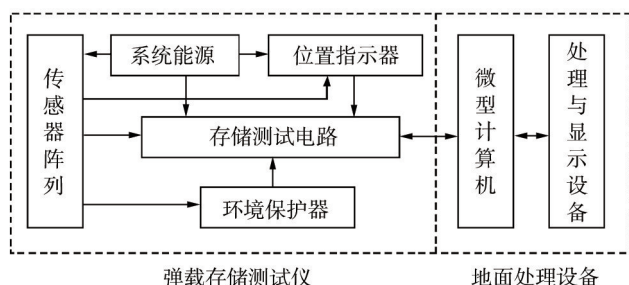


图2 微型弹载多参数采集存储装置结构

Fig.2 Micro onboard multi-parameter acquisition structure of the storage device

它包含下列基本要素:根据抗高过载测试要求,选用或专门设计体积小、功耗低、性能稳定的传感器组合(传感器阵列);存储测试电路系统完成信号调理、采集、编码、存储以及向地面处理设备输出测试结果;系统能源保障存储装置的能源供应;与计算机交换信息的接口电路;保证电路系统正常工作的抗高过载环境保护器;方便回收的位置指示器。

然后,对炮射导弹进行改装:将“微型弹载多参数

采集存储装置”替换战斗部,使其独立自动完成控制系统动态数据的采集和存储记忆。高过载条件下的测试技术是面临的一个关键技术瓶颈。

3.2 高可靠、长寿命控制系统的小子样加速寿命试验优化设计

由于炮射导弹发射过载高,其控制系统在设计、生产时就满足高可靠、长寿命的要求。随之而来的是寿命试验时间长、无法获得足够失效数据,这与其高精度的可靠性评估要求之间存在很大的矛盾。

另一方面,由于控制系统的高可靠性,有可能得到无失效加速寿命试验数据,其通常不包含寿命分散的正确信息。因此,如何建立不同应力水平间寿命分布的关系,解决无失效加速寿命试验数据处理的难题,对高可靠、长寿命、小子样控制系统进行加速寿命试验优化设计研究,这是可靠性领域亟待解决的一个关键科学问题^[20]。

3.3 部组件互因失效条件下多性能参数退化问题

单元相互独立是系统最常见的可靠性结构形式,但弹载控制系统具有多种失效模式以及多个性能退化参数,每种失效模式可能与1个或者多个性能参数相关,因而出现单元级产品性能退化失效模式相关的情况。由此,建立部组件互因失效情况下性能退化模型为难点问题。

3.4 针对性能退化失效和突发失效控制系统的可靠性建模

弹载控制系统退化失效与突发失效并存,针对其性能退化失效模式^[21],首先建立各退化失效模式下的部组件状态余量方程,然后根据部组件的可靠性结构建立控制系统参数的多维相关系数平稳序列模型,并在模型参数相关性辨识的基础上据此对控制系统的可靠性做出评估。突发故障在失效机理上与性能参数的退化失效存在较大差别,拟将该系统状态余量方程中的广义强度变量随机化,用以解决系统随机失效阈值的可靠性评估问题。基于退化数据序列的弹载控制系统可靠性建模与分析如图3所示。

3.5 小子样弹载控制系统多源信息融合可靠性评估技术

弹载控制系统价值高,可供试验研究的样本少。在考虑零失效试验检测数据(弹载控制系统可

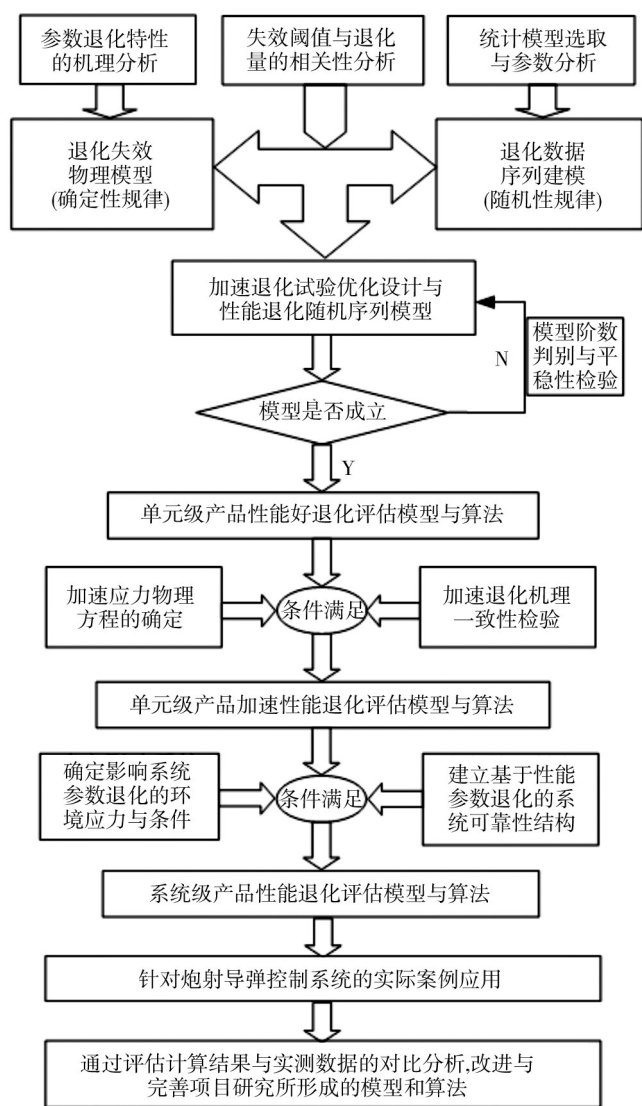


图3 基于退化数据序列的弹载控制系统可靠性建模与分析

Fig.3 Modeling and analysis of reliability of missile-borne control system based on the degradation data sequence

可靠性高,控制系统性能测试中往往出现零失效现象)、不同环境下所得到的试验数据(弹载控制系统储存分布于我国各地)的基础上,运用Bayes验前分布理论中收缩估计的融合方法和权系数融合方法,合理地融合利用诸多验前信息和加速退化寿命试验数据,进而建立其多源信息融合储存可靠性评定数学模型。这是涉及到弹载控制系统寿命评估准确性和可信度的关键问题。

4 展望

围绕高过载条件下弹载控制系统贮存寿命评估方法的研究,旨在确定影响其控制系统贮存寿命的环境应力类型,以及应力水平的作用结果,准确定位影

响控制系统贮存质量的薄弱环节,为提高弹载控制系统设计、生产水平与固有质量提供参考。掌握长期贮存弹载控制系统关键部组件的寿命规律,以及控制系统整体的质量变化规律,获得其可靠寿命指标,为弹载控制系统延寿维修决策提供技术支撑。创建长期贮存弹载控制系统在经受高过载冲击后的可靠性及储存寿命评估理论体系,拓宽弹药贮存寿命评估技术的研究范围。

随着时间的推移,我国将有价值数亿元的炮射导弹陆续达到出厂指标寿命,其控制系统储存质量变化规律、寿命评估问题日益突出,急需关注和解决。因此,科学评估其贮存可靠性不但具有巨大经济效益,而且事关国家战备。

参考文献

- [1] Raytheon Company. Storage Reliability of Missile Materiel Program[R]. LC-76-1, 1976.
- [2] Raytheon Company. Storage Reliability Summary Report[R]. LC-76-2, 1976.
- [3] Raytheon Company. Missile Materiel Reliability Prediction Handbook-part Count Prediction[R]. LC-78-1, 1978.
- [4] Raytheon Company. Missile Storage Reliability Analysis Summary Report[R]. LC-78-2, 1978.
- [5] Rom Air Development Center. An Approach for Assessing Missile System Dormant Reliability[R]. AD- A107519, 1981.
- [6] Rom Air Development Center. Impact of Nonoperating Periods on Equipment Reliability[R]. RADC-TR- 85-91, 1985.
- [7] Rom Air Development Center. Nonoperating Reliability Databook[R]. NONOP-1, 1987.
- [8] 陈循,张春华,汪亚顺,等.加速寿命试验技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2013.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated Life Testing Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [9] 牛跃听,穆希辉.信息化弹药储存寿命评估研究展望[J].装备环境工程,2013,10(5):94—97,101.
NIU Yue-ting, MU Xi-hui. Estimation of Ammunition Storage Life of Information Research Projects[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 94—97, 101.
- [10] 钱立志.弹载任务设备抗高过载方法研究[J].兵工学报,2007,28(8):1017—1020.
QIAN Li-zhi. Study on Anti High Overload Method of Missile Borne Mission Equipment[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(8): 1017—1020.
- [11] 姬永强,李映辉,聂飞.弹载数据存储模块抗高过载防护技术研究[J].振动与冲击,2012,31(18):104—106.
JI Yong-qiang, LI Ying-hui, NIE Fei. Protection Technology

- for Onboard Data Storage Module Against High Overload[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18): 04—106.
- [12] 王星来, 岳凤英, 孙笠森. 弹载惯性测量系统抗高过载技术[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(4): 165—168.
- WANG Xing-lai, YUE Feng-ying, SUN Li-sen. Study on Anti-high-g Technology of Missile Body Attitude Measurement System[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(4): 165—168.
- [13] 李怀建, 刘莉. GPS接收机抗高过载技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(12): 1033—1036.
- LI Huai-jian, LIU Li. Study on Resist Overload for GPS Receivers[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(12): 1033—1036.
- [14] 尤文斌, 丁永红, 祖静, 等. 弹底过载存储记录仪[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5): 145—151.
- YOU Wen-bin, DING Yong-hong, ZU Jing, et al. Projectile Breech Overload Recorder[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(5): 145—151.
- [15] 赵小珍. 电子记录系统的抗高过载设计及应用[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- ZHAO Xiao-zhen. Anti-high-overload Design and Application for Electronic Recording System[D]. Taiyuan: North University of China, 2008.
- [16] 邹华. 高过载硅微加速度计的动态响应[J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 100—106.
- ZOU Hua. Dynamic Response of High-g MEME Accelerometer[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(1): 100—106.
- [17] 乔建忠. 过载记录器的设计及数据处理分析[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- QIAO Jian-zhong. The Design and Data Processing Analysis of Over-load Recorder[D]. Taiyuan: North University of China, 2009.
- [18] 何恩山, 李栋, 姬广振. 炮射导弹武器系统环境适应性要求与分析[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 102—104.
- HE En-shan, LI Dong, JI Guang-zhen. Environmental Workability Requirement and Analysis of Gunshot Missile Weapon System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 102—104.
- [19] 王玮, 蔡瑞娇, 焦清介. 制导弹药可靠性评定方法的研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(7): 800—803.
- WANG Wei, CAI Rui-jiao, JIAO Qing-jie. Study on Reliability Evaluation Methods of Guided Ammunition[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(7): 800—803.
- [20] 张勇波. 极小子样加速寿命试验设计与可靠性评估方法研究[R]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- ZHANG Yong-bo. A Very Small Sample of Accelerated Life Test Design and Reliability Evaluation Method Research[R]. Beijing: Beihang University, 2013.
- [21] 袁宏杰, 李楼德, 段刚, 等. 加速度计贮存寿命与可靠性的步进应力加速退化试验评估方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 113—116.
- YUAN Hong-jie, LI Lou-de, DUAN Gang, et al. Storage Life and Reliability Evaluation of Accelerometer by Step Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(1): 113—116.
-
- (上接第 105 页)
- [15] CAO Jing-yi, XIONG Jin-ping, LI Shui-bing, et al. Evaluation of Protective Performance of Organic Coatings by EIS Parameters at High Frequency Zone[J]. Journal of Chemical Industry and Engineer, 2008, 59(11): 2851—2856.
- [16] HIRAYAMA R, HARUYAMA S. Electrochemical Impedance for Degraded Coated Steel Having Pores[J]. Corrosion, 1991, 47: 952—958.
- [17] ZUBIELEWICZ M, GNOT W. Mechanisms of Non-toxic Anticorrosive Pigments in Organic Waterborne Coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 49(4): 358—371.
- [18] MAHDAVIAN M, ATTAR M M. Investigation on Zinc Phosphate Effectiveness at Different Pigment Volume Concentrations Via Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(24): 4645—4648.
- [19] LI Wei. EIS Studies on Degradation of Epoxy Heavy-duty Corrosion Protection Coating Systems[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007.
- [20] 李晓琳, 淡婷, 邓丽芬, 等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢球头表面腐蚀原因分析[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(5): 271—274.
- LI Xiao-lin, DAN Ting, DENG Li-fen, et al. Causes for Surface Corrosion of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel globe[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(5): 271—274.
- [21] 陈朝轶, 杨京, 李军旗, 等. 模拟海洋大气环境下 Cl⁻ 质量分数对 3003 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 116—121.
- CHEN Chao-yi, YANG Jing, LI Jun-qi, ZHANG Xiang-qian. Effect of Chloride Ion Concentration on Corrosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 116—121.
- [22] LIU Xu-wen, XIONG Jin-ping, CAO Jing-yi, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Three Coating Systems by EIS [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(3): 659—664.
- [23] YANG Li-hong, LIU Fu-chun, HAN En-hou. Anti-corrosion Performance Studies of the Nano-ZnO Polyurethane Coatings [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2006, 20(4): 355—361.