

DOI: 10.3901/JME.2009.08.130

加速试验技术的研究、应用与发展*

陈 循 张春华

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

摘要: 高可靠长寿命已经成为装备发展,特别是重大装备和重大工程的发展目标和紧迫需求,对传统的可靠性技术提出了新的挑战。作为保障装备高可靠长寿命的有效手段,加速试验技术成为目前的研究热点。在加速试验应用需求分析的基础上,提出加速试验的技术体系,对目前加速试验的研究与应用现状进行综述和分析,最后对我国发展加速试验技术提出对策思考。

关键词: 高可靠长寿命 加速试验 可靠性强化试验 加速寿命试验 加速退化试验

中图分类号: TB114.3

Research, Application and Development of Accelerated Testing

CHEN Xun ZHANG Chunhua

(College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: High-reliability and long-lifespan issue has become the development goal and pressing requirement for equipment, especially for major equipment and project. The traditional reliability technique is facing a new challenge. As an effective means to ensure high reliability and long lifespan of equipment, the accelerated testing technology becomes a hot spot of research. Based on the analysis of the application requirements, a technical architecture of accelerated testing is brought forward, the current state of researches and applications of accelerated testing is summarized and analyzed, and the strategy for the further development of accelerated testing in China is discussed.

Key words: High-reliability and long-lifespan Accelerated testing Reliability enhancement testing Accelerated life testing Accelerated degradation testing

0 前言

高可靠长寿命已经成为装备发展,特别是重大装备和重大工程的发展目标和紧迫需求,对传统的可靠性技术提出了新的挑战。作为保障装备高可靠长寿命的有效手段,加速试验技术的发展目前备受关注。加速试验技术的研究与应用既能为当前高新装备研制的高可靠长寿命提供应对,也将在整体上促进我国可靠性共性技术的全面发展。

本文在需求分析的基础上,提出加速试验的技术体系,对加速试验国内外研究现状进行综述和分析,最后提出加速试验研究与应用的发展对策。

1 需求分析

1.1 高可靠长寿命已成为重大装备和重大工程的核心关键问题

高可靠工程是目前武器装备、航空航天等重大领域的关键技术问题。我国长征系列运载火箭可靠性已经达到国际先进水平,为了达到重大航天工程的系统要求,目前仍致力于星箭的高可靠工程。我国大飞机工程总体确定的关键技术中包括了长寿命高可靠技术。在探月工程中,为实现多次轨道机动和复杂环境下卫星的可靠运行,各升空系统的高可靠问题处于极端重要的地位。

由于高可靠性的进展,高可靠长寿命的验证与评价也成为迫切的工程需求。在导弹贮存定寿中,由于缺乏有效的长寿命预测技术,普遍采用保守预测结合延寿的方法。美国的“大力神 II”液体导弹

* 国家部委资助项目(203020102)。20080918 收到初稿,20090329 收到修改稿

的首次定寿为7年,贮存到期以后又延寿到19年^[1]。我国的装备定寿延寿与卫星在轨运行同样存在类似问题^[2-3]。

目前,高可靠长寿命有关课题的研究受到各领域的高度重视,国家863计划先进制造技术领域2007年度专门设立了重大产品和重大设施寿命预测技术专题,各相关部位“十一五”预研也进行了重点资助。

1.2 现代科技和工业水平为高可靠长寿命奠定了技术基础

现代科技的发展和工业水平的提高,为装备高可靠长寿命问题的解决提供了有利的技术条件。电子产品所用材料激活能通常以每年3%的速度增加,1975年激活能为0.6 eV,1995年增加到1.0 eV,激活能的增加使材料对应力的敏感性大大降低。1973年以来,半导体器件平均寿命每15个月翻一番,电子产品产生损耗的时间从20世纪50年代的5~10年发展到当前固态电子产品的50年。20世纪90年代我国电子产品的MTBF一般在100~200 h,目前已经发展到500~1 000 h,有的甚至达到2 000 h^[4]。

1.3 加速试验技术成为保障装备高可靠长寿命的必然要求

装备研制的短周期和低成本目标对可靠性保障技术提出了高效性、经济性的要求,与高可靠长寿命目标构成矛盾,导致现有可靠性工程中的许多可靠性保障技术难以实施。同时,基于长时间效应的可靠性增长试验、可靠性验证试验应用难度进一步加大。

因此,在装备研制和激烈市场竞争的新形势下如何保障高可靠长寿命是目前可靠性工程领域亟待解决的重要问题。越来越多的部门已经认识到这一问题的重要性,开展了应对性的研究。从试验的角度出发,加速试验技术成为在时间和成本约束下保障装备高可靠长寿命的必然要求。

2 技术体系

2.1 从模拟试验到加速试验

从国外20世纪50年代初采用单应力模拟的研制试验与鉴定试验,到20世纪70年代开始采用综合应力模拟试验,模拟试验一直都是保障可靠性的主要试验手段。模拟试验通过模拟任务的真实环境来确保可靠性,其效率问题一直都是可靠性工程领域关注的焦点问题。

针对这一问题,1967年美罗姆航展中心提出了加速寿命试验方法(Accelerated life testing, ALT)^[5],

1988年美HOBBS^[6]提出了高加速寿命试验(Highly accelerated life testing, HALT)和高加速应力筛选(Highly accelerated stress screening, HASS)。这三项加速试验分别与常规的可靠性验证试验、可靠性增长试验、环境应力筛选相对应,如下图所示,形成了完整的加速试验的技术体系。高加速寿命试验与高加速应力筛选也称为激发试验,采用加速应力高效激发潜在缺陷,消除缺陷,提高可靠性,属于工程试验范畴;加速寿命试验则以评价可靠性为目的,属于统计试验范畴。

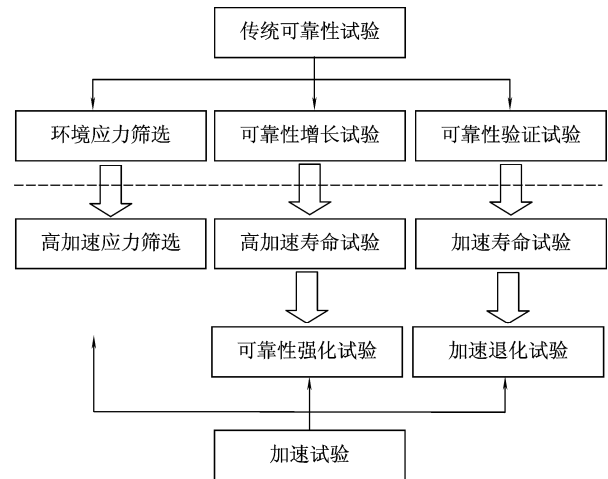


图 可靠性试验的模拟方法与加速方法

2.2 加速试验的基本组成

高加速应力筛选与传统的环境应力筛选(ESS)相对应,主要应用于生产阶段,快速暴露产品在生产过程中的各种制造缺陷,剔除存在早期缺陷的产品。由于常规的环境应力筛选本身就是一类激发试验,因此高加速应力筛选与环境应力筛选没有清晰的界线,两者在内涵上没有质的区别,因此其研究意义远远不如高加速寿命试验和加速寿命试验。

由于高加速寿命试验应用于研制阶段,实现高效可靠性增长,波音公司在应用该技术时称之为可靠性强化试验(Reliability enhancement testing, RET),目前国内广泛采用了这一术语。可靠性强化试验突出了这类试验的特点,与传统的可靠性增长对应,并且可以避免高加速寿命试验与加速寿命试验在术语上相混淆^[7]。可靠性强化试验为高可靠长寿命工程提供了高可靠的增长技术。

加速寿命试验是在进行合理工程及统计假设的基础上,利用与物理失效规律相关的统计模型对加速条件下获得的失效数据进行转换,得到试件在正常应力水平下可靠性特征的试验方法^[5]。采用加速寿命试验可以缩短试验时间,降低试验成本,进而使高可靠长寿命的验证与评价成为可能。

对于某些高可靠长寿命装备,即使采用加速寿命试验方法,有时也难于得到失效数据,使得基于失效数据分析的加速寿命试验方法得不到预期结果,因此基于故障退化模型的加速退化试验技术应运而生。加速退化试验(Accelerated degradation testing, ADT)通过提高应力水平来加速性能退化,搜集在高应力水平下的性能退化数据,利用这些数据来预测常规使用应力下的退化寿命^[8]。加速退化试验克服了加速寿命试验在零失效方面的应用困难,是目前新兴的长寿命预测方法,在高可靠长寿命研究中具有广阔的应用前景。一般认为,加速退化试验是加速寿命试验的一个发展分支。加速寿命试验和加速退化试验为高可靠长寿命工程提供了长寿命的预测与验证技术。

目前国内外对加速试验技术的研究与应用主要集中于可靠性强化试验、加速寿命试验和加速退化试验,分别应对了高可靠的长寿命与长寿命的评价需求,构成了加速试验技术的核心,也代表了可靠性试验技术的发展方向。

3 研究现状

3.1 可靠性强化试验

可靠性强化试验在国外已经开展了近 20 年的研究与应用工作,并形成了一些规范和指南,关于可靠性强化试验理论、技术与试验系统的学术交流也非常活跃,其中影响较大的是由IEEE/CPMT ASTR技术委员会和IEEE Reliability Society主办的Accelerated Stress Testing & Reliability(ASTR)会议,每年在美国不同地区举办,主题涉及可靠性强化试验理论、试验技术和试验系统等^[9]。此外,美国QualMark公司加速可靠性试验中心等研究机构还定期开设RET学术交流与技术讲座^[10]。

在可靠性强化试验指南与规范方面,美国各加速试验服务机构均有自己的规范,其中具有较高影响的主要有:美国波音公司故障防治策略大纲中关于可靠性强化试验的文件D6-57067,以及美国QualMark公司的HALT Guidelines和HASS Guidelines^[7]。

在可靠性强化试验设备方面,美国John Hanse最先研制了超高应力试验系统(Ultra high stress, UHS),采用气锤反复冲击式激振和液氮制冷方式实现振动与温度综合试验,但是其低频激励能量分布存在一定缺陷。针对上述缺点,美国QualMark公司从该类系统的气锤、振动台面和控制系统入手,设计了动态性能良好的QualMark ASX气锤,以多

孔型台面代替原有的实体台面,采用更加合理的控制策略,形成的新型高效振动试验设备主要有低频扩展系统(Extended low frequency, ELF)、全轴振动系统(Omni-axial vibration system, OVS)和全轴振动台面系统(Omni-axial vibration table top, OVTT)等^[11]。此外,Entla公司研制的失效模式确认试验系统(Failure mode verification testing, FMVT)和Screening Systems公司研制的移动振动筛选系统(Mobile vibration screening, MVS)等也取得了不同程度的成功。

从20世纪80年代末开始,美国在各工业部门开始推广应用可靠性强化试验技术,到目前已广泛地应用于通信、电子、电脑、医疗、能源、交通、航空、航天和军事等领域。目前,国外大多数为机械、电子工业提供设计、制造和试验服务的公司,已经把可靠性强化试验作为一项很重要的服务内容。据QualMark公司1995年5月至1996年3月间的统计,该公司为来自19个工业部门的33个公司的47种产品提供了可靠性强化试验服务^[12]。美国Garwood实验室为航空航天、军事工业所提供的一项重要服务就是可靠性强化试验,客户包括雷神飞机公司、波音公司、Northrop Grumman公司和Meggitt Safety Systems公司等。美国的Wyle实验室、美国的Telephonic公司和在欧洲最具实力的德国TUV Provide Service公司等都将RET作为一种重要的可靠性试验服务。

国内从20世纪90年代中后期开始进行可靠性强化试验的研究。在引进气动式强化试验设备的基础上,“十五”开始进行相关预研,针对可靠性强化试验的理论问题和关键技术开展了专项研究,在吸收国外方法的基础上形成了较为完整的应用方法,并针对某型卫星有效载荷、激光捷联定位定向系统、空空导弹飞控组件等开展了较为系统的应用^[11]。“十一五”开始开展强化试验系统关键技术的研究,在气动振动台优化方面进行探索,并在电动振动台上研究频谱可控的超高斯随机振动环境控制技术。可靠性强化试验在航空产品的高可靠性增长中也获得了应用。

3.2 加速寿命试验

加速寿命试验分为恒定应力试验、步进应力试验和序进应力试验。首先发展起来的是恒定应力试验方法,该方法把全部样品分成几组,每组样品都在某个恒定加速应力水平下进行试验。最初的步进应力试验方法是机械耐久性试验(如疲劳试验)中所应用的阶跃载荷法^[13],1961年贝尔实验室在电子产品的可靠性研究中提出了半导体器件的步进温度应

力试验法^[14]。步进应力试验把全部样品放在某个加速应力水平下进行试验,然后将试验应力步进增加到下一更高的应力水平下继续试验,如此进行直至结束试验。这种方法降低了对试样数量的要求,具有比恒定应力试验更高的加速效率。1958年开始在电子产品的可靠性研究中尝试了序进应力试验方法,由于序进应力试验的加载应力随时间连续不断地上升,可以更快地激发试样失效,从而进一步提高了试验效率。

国外对加速寿命试验的研究始于20世纪60年代,其研究主要包括统计分析方法、优化设计技术、工程应用三个层面。20世纪70年代初,加速寿命试验技术进入我国,立即引起了统计学界与可靠性工程界的广泛兴趣,一直处于边研究边应用的状态。目前有关恒定应力试验统计分析的研究主要围绕如何提高统计分析精度的问题大量开展^[15-20]。步进应力试验统计分析的关键问题则是如何从步进试验的失效数据中分离出每个加速应力水平下的寿命信息,常见的分析模型包括 Nelson 的 CEM 模型^[21],以及由此发展的其他模型^[22-23]。在步进应力试验的统计分析中,算法复杂性和非流程化是目前存在的主要问题,使得步进应力试验的工程应用难度增大。张春华等^[24-26]在加速寿命试验研究中提出了步降应力试验方法,可在对等条件下进一步提高步进应力试验的效率,并建立了流程化的统计分析方法。序进应力试验的加速效率在三种方法中是最高的,但是其统计分析最为复杂,其应用受到了很大的限制,并且需要专门的装置来产生符合要求的序进应力。加速寿命试验的优化设计是统计分析的逆问题,研究在给定条件(寿命先验、应力范围、试验代价等)下,如何进行试验以获得寿命的准确估计^[27-30]。针对目前解析优化方法存在的算法复杂、应用困难等问题,汪亚顺等^[31]提出了基于仿真的加速寿命试验优化设计方法,对加速寿命试验的优化设计研究提供了一种全新的思路。

加速寿命试验技术已经在武器装备、航空航天和民用机电产品等诸多领域的长寿命问题研究中获得成功应用。西方国家在进行导弹的定寿延寿时广泛应用了加速寿命试验技术。美国的“民兵导弹贮存计划”采用加速试验技术为导弹贮存寿命提供48个月的使用寿命预报^[32]。俄罗斯在导弹延寿中采用加速试验技术形成了“综合集成方法”,利用该方法对C-300防空导弹进行贮存寿命研究,只用6个月的加速试验即获得了贮存寿命10年的结论^[33]。目前加速寿命试验技术的应用对象涉及导弹、发动机、轴承、低压电动机和 He-Ne 激光器等^[2, 34-36]。随着

恒定应力试验方法的逐渐成熟,我国已于1981年颁布了恒定应力试验的4个国家标准(GB2689.1~4—1981)^[37-40]。

3.3 加速退化试验

加速退化试验的研究首先是从退化试验(Degradation testing, DT)开始的,利用正常条件下的退化数据进行故障建模研究,预测产品寿命。由于实际退化往往历程漫长,因此通过退化试验对长寿命问题进行研究在时间上往往不能承受。加速退化试验技术是退化试验与加速试验方法交叉融合的结果。

加速退化试验的研究始于20世纪80年代,同样也包括统计分析方法^[41-42]、优化设计技术^[43-44]与工程应用^[45-49]等方面。在加速退化试验研究中,目前常用的分析模型包括退化量分布模型^[50]、退化轨迹模型^[42, 47]、物理退化模型^[45, 51-52],其中退化轨迹模型应用较广,包括混合效应退化轨迹、随机扩散退化轨迹和非参数退化轨迹等^[42, 47]。与加速寿命试验类似,加速退化试验也存在优化设计的问题,研究如何设计优化的试验方案,实现约束条件下对性能退化的最优建模分析,也是统计分析的逆问题。与加速寿命试验相比,加速退化试验的统计分析模型更加复杂,因此解析优化的方法应用难度更大,因此基于仿真的优化设计方法对于加速退化试验具有更为重大的研究价值^[53]。

从总体上看,加速退化试验的理论和方法目前还处于探索阶段,研究时间不长,大多数的研究是针对具体应用问题提出的具体模型和方法,缺少一般性的指导理论和方法,应用研究也主要集中在发光二极管、逻辑集成电路、电源和绝缘体等元件和材料^[45-49]。随着理论、方法与应用研究的不断深入,加速退化试验对于解决高可靠长寿命的评价问题必将发挥重要的作用。

4 发展对策

针对当前的应用需求,结合当前的技术现状,加速试验技术在我国进一步发展应该关注以下问题。

4.1 结合应用需求开展研究

在加速寿命试验和加速退化试验的统计分析与优化设计研究中,算法的复杂性一直都是加速试验工程应用中的主要障碍。研究加速试验需要重视算法简化和可操作性问题,使加速试验技术便于高可靠长寿命工程的应用。同时,加速试验优化设计方法的鲁棒性也是应用的基本前提,以降低优化设

计对于先验信息的依赖程度。此外,加速试验 CAE 的研究也将有助于推动加速试验的工程应用。

4.2 以指南与规范推进应用

加速试验的深入发展和应用需要借助于指南与规范的支持。在深入研究与广泛验证的基础上,应该编撰有关加速试验的技术指南或规范,并通过相关职能部门正式发布实施,为加速试验应用于高可靠长寿命工程提供应用层面的指导,促进加速试验技术应用于工程实际。

4.3 以重大装备应用为重点开展应用

加速试验在重大装备中的应用工作在我国还有待深入。应该在更为广泛的层面开展针对重大装备的应用研究工作,特别是以当前急需解决的装备定延寿、卫星高可靠等应用为重点,建立一系列在各领域令人信服的典型应用案例,推进加速试验技术在装备高可靠长寿命工程中的应用普及。

4.4 发展支撑设备与控制技术

从长远发展来看,支撑设备与控制技术的研究对于加速试验的广泛应用将发挥重要支撑作用。目前可靠性强化试验广泛采用的强化设备存在诸多不足,针对性的优化研究工作势在必行,同时可以充分利用电动振动台的可控性,在电动台上实现频谱可控的超高斯随机振动环境模拟,弥补强化试验设备频谱不可控的不足,便于可靠性强化试验方法的推广与普及。随着加速寿命试验与加速退化试验的应用开展,用于支撑试验研究的各类加速平台也将是一个重要的研究内容。

4.5 重视与仿真技术的交叉研究

仿真技术在可靠性试验中的应用已经成为一个重要趋势,对于加速试验的研究具有重要的促进作用。首先,在缺乏失效模型的情况下,仿真手段及其与试验研究的结合将有可能成为有效的加速试验应用途径;其次,将蒙特卡罗仿真引入加速寿命试验和加速退化试验的优化设计,可建立方便应用的优化设计方法;此外,将有限元仿真引入可靠性强化试验,利用仿真手段实现可靠性强化试验的思想,可构建虚拟可靠性强化试验平台。

5 结 论

(1) 高可靠长寿命已经成为当前可靠性共性技术领域的热点问题,在当前重大装备和重大工程中的应用需求突出。

(2) 加速试验技术的研究与应用既能为当前高新武器装备研制的高可靠长寿命提供应对,也将在整体上促进我国可靠性共性技术的全面发展。

参 考 文 献

- [1] 刘松,温世经,侯希久,等. 如何确定导弹的贮存寿命[J]. 质量与可靠性,1998(5): 15-18.
LIU Song, WEN Shijing, HOU Xijiu, et al. How to determine the storage life of missile[J]. Quality and Reliability, 1998(5): 15-18.
- [2] 周堃,罗天元,张伦武. 弹箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程,2005,2(2): 6-11.
ZHOU Kun, LUO Tianyuan, ZHANG Lunwu. Overview of storage life prediction technology on rocket and missile[J]. Environment Engineering, 2005, 2(2): 6-11.
- [3] 王凭慧,范本尧,傅惠民. 卫星推力器可靠性评估和寿命预测[J]. 航空动力学报,2004,19(6): 745-748.
WANG Pinghui, FAN Benyao, FU Huimin. Reliability assessment and life prediction of satellite propeller[J]. Chinese Journal of Aerospace Dynamics, 2004, 19(6): 745-748.
- [4] 邓爱民. 高可靠长寿命产品可靠性技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学,2006.
DENG Aimin. Research on reliability technology of high-reliability and long-life product[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [5] YURKOWSKY W, SCHAFFER R E, FINKELSTEIN J M. Accelerated testing technology[R]. Technical Report NO. RADC-TR-67-420. Rome Air Development Center, 1967.
- [6] HOBBS G K. Accelerated reliability engineering: HALT and HASS[M]. New York: Wiley, 2001.
- [7] 陈循,陶俊勇,张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报,2002,24(4): 29-32.
CHEN Xun, TAO Junyong, ZHANG Chunhua. Overview of reliability enhancement testing and accelerated life testing[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(4): 29-32.
- [8] MEEKER W Q, HAMADA M. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(4): 187-198.
- [9] FELKINS C. HALT-HASS tutorial[C]// Proceedings of the 43rd Annual Technical Meeting Institute of Environmental Sciences, Los Angeles, USA, May 4-8, 1997.
- [10] SILVERMAN M. Summary of HALT and HASS results at an accelerated reliability test center[C]// Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim, USA, January 19-22, 1998: 30-36.

- [11] 温熙森, 陈循, 张春华, 等. 可靠性强化试验理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
WEN Xisen, CHEN Xun, ZHANG Chunhua, et al. Reliability enhancement testing theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] ANDERSON J A, POLKINGHOME M N. Application of HALT and HASS techniques in an advanced factory[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Factory, Cambridge, UK, April 2-4, 1997: 223-228.
- [13] 盐见弘. 失效物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
SHIOMI Hiroshi. Physical foundation of failure[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [14] DODSON G A, HOWARD B T. High stress aging to failure of semiconductor device[C]// Proceedings of 7th National Symposium on Reliability and Quality Control, Philadelphia, USA, January 9-11, 1961.
- [15] WANG W, KECECIOGLU D B. Fitting the weibull log linear model to accelerated life test data[J]. IEEE Trans. on Reliability, 2000, 49(3): 217-223.
- [16] MAZZUCHI T A, SOYER R. Dynamic models for statistical inference from accelerated life tests[C]// IEEE Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles, USA, January 23-25, 1990: 67-70.
- [17] HIROSE H. Estimation of threshold stress in accelerated life testing[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1993, 42(4): 650-657.
- [18] WATKINS, A J. Review: Likelihood method for fitting weibull log-linear models to accelerated life-test data[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(3): 361-365.
- [19] BUGAIGHIS M M. Exchange of censorship types and its Impact on the estimation of parameter of a weibull regression model[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(3): 496-499.
- [20] MCLINN J A. New analysis methods of multilevel accelerated life tests[C]// IEEE Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Washington DC, USA, January 18-21, 1999: 38-42.
- [21] NELSON W. Accelerated life testing—step stress models and data analysis[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [22] BHATTACHARGGA G K, SOEJOETI Z A. A tampered failure rate model for step stress accelerated life test [J]. Communications in Statistics Theory & Method, 1989, 18(5): 1 627-1 643.
- [23] TYOSKIN O I, KRIVOLAPOV S Y. Nonparametric model for step stress accelerated life testing[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1996, 45(2): 346-350.
- [24] 张春华, 陈循, 温熙森. 步降应力加速寿命试验(上篇)——方法篇[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 661-665.
ZHANG Chunhua, CHEN Xun, WEN Xisen. Step down stress accelerated life testing: Methodology[J]. ACTA Armamentari, 2005, 26(5): 661-665.
- [25] 张春华, 陈循, 温熙森. 步降应力加速寿命试验(下篇)——统计分析篇[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 666-669.
ZHANG Chunhua, CHEN Xun, WEN Xisen. Step down stress accelerated life testing: Statistical analysis[J]. ACTA Armamentari, 2005, 26(5): 666-669.
- [26] 汪亚顺, 张春华, 陈循. 步降应力加速寿命试验(续篇)——优化设计篇[J]. 兵工学报, 2007, 28(6): 686-691.
WANG Yashun, ZHANG Chunhua, CHEN Xun. Step down stress accelerated life testing: Optimal design [J]. ACTA Armamentari, 2007, 28(6): 686-691.
- [27] CHERNOFF H. Optimal accelerated life designs for estimation[J]. Technometrics, 1962 (4): 381-408.
- [28] MEEKER W Q, NELSON W. Optimum accelerated life tests for the weibull and extreme value distributions[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1975, 24(6): 321-332.
- [29] YANG G. Optimum constant stress accelerated life test plans[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(4): 575-581.
- [30] YEO K P. Planning step stress life test with a target acceleration factor[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48 (1): 61-67.
- [31] 汪亚顺, 张春华, 陈循. 仿真基加速寿命试验优化设计方法研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(4): 755-760.
WANG Yashun, ZHANG Chunhua, CHEN Xun. Study of simulation based optimal designs for accelerated life testing[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(4): 755-760.
- [32] 李久祥. 导弹贮存试验获取最佳效益的途径[J]. 质量与可靠性, 2002(2): 34-36.
LI Jiuxiang. Approach of gaining the best benefit from missile storage test[J]. Quality and Reliability, 2002(2): 34-36.
- [33] 侯希久. 国外导弹贮存可靠性技术概述[J]. 质量与可靠性, 1997(4): 44-46.
HOU Xijiu. Summary of foreign missile storage reliability techniques[J]. Quality and Reliability, 1997(4): 44-46.
- [34] 杨之昌, 马秀芳. 气体激光器的可靠性和可靠试验[J]. 激光技术, 1998, 22(3): 179-184.
YANG Zhichang, MA Xiufang. Reliability and reliability tests of gas laser apparatus[J]. Laser Technology, 1998, 22(3): 179-184.
- [35] 王坚永, 庄中华. 滚动轴承可靠性加速寿命试验研究[J]. 轴承, 1996(9): 23-28.
WANG Jianyong, ZHUANG Zhonghua. Study on

- accelerated life testing of ball bearing[J]. *Bearing*, 1996(9): 23-28.
- [36] 杨士特, 杨惠敏, 茆诗松, 等. 低压电机快速试验的统计分析[J]. *应用概率统计*, 1990, 6(1): 108-112.
YANG Shite, YANG Huimin, MAO Shisong, et al. Statistical analysis of low-pressure motor speedy testing[J]. *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics*, 1990, 6(1): 108-112.
- [37] GB2689.1—1981. 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.
GB2689.1—1981. General principles of constant-stress life testing and accelerated life testing[S]. Beijing: Standards Press of China, 1981.
- [38] GB2689.2—1981. 寿命试验和加速寿命试验的图估计法(用于威布尔分布)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.
GB2689.2—1981. Graphical analysis of constant-stress life testing and accelerated life testing (for Weibull distribution)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1981.
- [39] GB2689.3—1981. 寿命试验和加速寿命试验的简单线性无偏估计法(用于威布尔分布)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.
GB2689.3—1981. Good linear unbiased estimation of constant-stress life testing and accelerated life testing (for Weibull distribution)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1981.
- [40] GB2689.4—1981. 寿命试验和加速寿命试验的最好线性无偏估计法(用于威布尔分布)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.
GB2689.4—1981. Best linear unbiased estimation of constant-stress life testing and accelerated life testing (for weibull distribution)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1981.
- [41] NELSON W. Accelerated testing: Statistical methods, test plans, and data analysis[M]. New York: John Wiley Press, 1990.
- [42] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU J C. Accelerated degradation tests: Modeling and analysis[J]. *Technometrics*, 1998, 40(2): 89-99.
- [43] BOULANGER M, ESCOBAR L A. Experimental design for a class of accelerated degradation tests[J]. *Technometrics*, 1994, 36(4): 260-272.
- [44] TANG L C, XIE M. Planning of step-stress accelerated degradation test[C]// *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Los Angeles, USA, January 26-29, 2004: 287-292.
- [45] CHUANG S L, ISHIBASHI A, KIJIMA S, et al. Kinetic model for degradation of light emitting diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(6): 970-979.
- [46] TANG L C, CHANG D S. Reliability prediction using nondestructive accelerated-degradation data: Case study on power supplies[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1995, 44(4): 562-566.
- [47] SHIAU J J, LIN H H. Analyzing accelerated degradation data by nonparametric regression[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1999, 48(2): 149-158.
- [48] TSENG Sheng-tsaing, YU Hong-fwu. A termination rule for degradation experiments[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1997, 46(1): 130-133.
- [49] 李海昌, 郭芳筠, 雷彬. 某型引信压电陶瓷加速老化试验[J]. *机械工程学院学报*, 1997, 9(4): 33-38.
LI Haichang, GUO Fangjun, LEI Bin. Accelerated aging testing on piezoelectric ceramics of some fuze[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 1997, 9(4): 33-38.
- [50] YANG G B, YANG K. Accelerated degradation tests with tightened critical values[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2002, 51(4): 463-468.
- [51] NELSON W. Analysis of performance-degradation data from accelerated tests[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1981, 30(2): 149-154.
- [52] CAREY M B, KOENIG R H. Reliability assessment based on accelerated degradation: A case study[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1991, 40(5): 499-506.
- [53] 汪亚顺, 张春华, 陈循. 仿真基退化试验优化设计方法研究[J]. *宇航学报*, 2008, 29(1): 380-384.
WANG Yashun, ZHANG Chunhua, CHEN Xun. Study of simulation based optimal design for degradation test[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 380-384.

作者简介: 陈循, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为可靠性理论、技术与应用。

E-mail: chenxun@nudt.edu.cn

张春华, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为可靠性理论、技术与应用。

E-mail: chzhang@nudt.edu.cn