

文章编号: 1001-2486(2002)04-0029-04

可靠性强化试验与加速寿命试验综述*

陈 循, 陶俊勇, 张春华

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 介绍可靠性强化试验与加速寿命试验的基本概念, 并进一步综述强化试验与加速寿命试验的国内外研究现状, 最后对强化试验与加速寿命试验领域可能的研究方向进行归纳总结。

关键词: 可靠性试验; 可靠性强化试验; 加速寿命试验

中图分类号: TB114.3 文献标识码: A

Reliability Enhancement Testing and Accelerated Life Testing: An Introductory Review

CHEN Xun, TAO Jun-yong, ZHANG Chun-hua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Reliability enhancement testing (RET) and accelerated life testing (ALT) are the focus of attention in reliability testing research at present. The basic concepts about RET and ALT are discussed at first. The state-of-the-art in the research concerned is then briefly reviewed. The possible directions for further research in RET and ALT are summarized in the end.

Key words: reliability testing; reliability enhancement testing; accelerated life testing

作为可靠性试验领域的两个主要发展方向, 可靠性强化试验和加速寿命试验越来越受到国内外研究者的普遍重视, 并在实际工程应用中取得了明显的成效。虽然都采用加速应力环境进行试验, 但是可靠性强化试验与加速寿命试验在试验目的与试验方法上却存在着较大的差异。可靠性强化试验属于工程试验范畴, 而加速寿命试验则属于统计试验范畴。

可靠性强化试验采用激发应力环境(其应力水平可能远远超过正常使用环境)进行试验, 快速激发产品潜在缺陷, 使其以故障形式表现出来, 通过故障原因分析、失效模式分析和改进措施消除缺陷, 提高产品可靠性, 并大幅度提高试验效率、降低成本。目前, 该领域的研究和应用方兴未艾, 国内外有关这类试验的名称尚未统一, 如 RET、HALT、HASS、步进应力试验(Step Stress Testing)等。这些名称的不统一和内涵的含糊不清, 不利于该领域研究工作的顺利开展, 例如 HALT 和 HASS 容易和加速寿命试验(ALT)和环境应力筛选(ESS)相混淆。因此, 有必要规范这类试验的名称和概念内涵, 可靠性强化试验突出了这类试验的特点, 可以认为 RET 包括了 HALT 和 HASS 的内容, 作为这类试验技术的统称较为合理。

加速寿命试验的统一定义最早由美罗姆航展中心于 1967 年提出^[17], 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在超出正常应力水平的加速环境下获得的可靠性信息进行转换, 得到产品在额定应力水平下可靠性特征可复现的数值估计的一种试验方法。简言之, 加速寿命试验是在保持失效机理不变的条件下, 通过加大试验应力来缩短试验周期的一种寿命试验方法。加速寿命试验采用加速应力水平来进行产品的寿命试验, 从而缩短了试验时间, 提高了试验效率, 降低了试验成本。

* 收稿日期: 2002-01-09
基金项目: 国家部委项目资助(41319030101)
作者简介: 陈循(1964-), 男, 教授, 博士。

1 可靠性强化试验国内外研究现状

可靠性强化试验 (RET) 属于激发试验的范畴, 最早的激发试验是 20 世纪 50 年代的老化试验, 70 年代后发展成广义的环境应力筛选, 环境应力筛选主要是激发产品生产过程中引入的缺陷, 而对产品设计缺陷无能为力。因此, 从本质上讲环境应力筛选不能真正提高产品的固有可靠性, 而产品固有可靠性在产品最终的可靠性中起着决定作用。为了解决这一问题, 1988 年 Hobbs 博士提出了高加速寿命试验 (HALT) 和高加速应力筛选 (HASS)。前者用于产品的设计阶段, 目的是快速暴露产品的设计缺陷, 以便及时改进设计, 提高产品固有可靠性; 后者用于产品的生产阶段, 目的是快速暴露产品在生产过程中的各种制造缺陷, 为用户提供高可靠性的产品。

可靠性强化试验的理论依据是故障物理学 (Physics of failure), 把故障或失效当作研究的主要对象, 通过发现、研究和根治故障达到提高可靠性的目的。目前, 已经有多种试验技术, 如步进应力试验、HALT、HASS 等, 详细的试验过程介绍可参见相关文献^[1-7]。

国外自可靠性强化试验提出后, 相继在各工业部门推广应用, 产品可靠性得到很大提高。据 QualMark 公司 1995 年 5 月至 1996 年 3 月间的统计, 该公司先后为来自 19 个不同工业部门的 33 个公司的 47 种产品 (涉及电子产品和机电产品), 提供了可靠性强化试验服务^[5], 均获得了显著成效。目前, 国外从事该领域的主要机构有 QualMark 公司、Otis Elevator 公司、Hobbs Engineering 公司等。许多著名企业成立了专门的可靠性强化试验机构, 如 Boreing 公司、HP 公司等。

可靠性强化试验离不开理论与技术研究, 以及相关设备的支持。在理论与技术研究方面国际上比较知名的专家主要有: Gregg K. Hobbs、S. Smithson、Joseph Capitano、Wayne Nelson、Mike Silverman 和 David Rahe 等等。其中 Gregg K. Hobbs 在强化应力效率及试验理论与技术方面开展了大量研究; S. Smithson、Joseph Capitano 在强化温度应力及试验效率方面开展了研究; Wayne Nelson 在统计模型、试验剖面和数据采集与分析等方面开展研究工作; Mike Silverman 和 David Rahe 在强化试验的技术与应用方面开展了大量的工作。除此之外, Boeing 公司的 Robert W. Deppe 等在强化试验技术方面也进行了大量的研究与实践。在设备方面主要有: John Hanse 最先研制成功强化试验设备, 其采用气锤反复冲击式激振和液氮制冷方式, 可产生宽带全轴随机振动激励, 并具有大温变率试验能力, 满足了强化试验对设备提出的高要求, 但存在只能控制激振信号均方根值, 无法控制振动谱形等问题。针对该设备的不足, 1999 年 Entela 公司推出了一种新型强化试验设备 FMVT machine (FMVT: Failure Mode Verification Testing), 其全轴振动是可重复及可控的, 它能改变能量量级及低频带能量大小, 在某些情况下可控制频谱形状。此外, 美国 Envirotionics 公司、意大利 Angelantoni 公司、英国 Cape Engineerin 等公司也具有生产强化试验设备的能力。

国内可靠性强化试验技术与应用方面目前尚处于起步阶段, 主要局限于理论与技术的跟踪研究, 由于强化试验技术和设备等因素的限制, 还没有在实际中应用的报道。在设备研制方面国内尚处于探索阶段, 而国外对我国相关设备引进采取的限制措施, 阻碍了强化试验技术在我国的研究与应用。目前, 国防科技大学可靠性实验室在强化试验技术研究及应用方面开展了大量工作, 已经完成了某大型通讯设备公司新研产品的可靠性强化试验等工作。北京航空航天大学可靠性工程中心也在可靠性试验分析方面取得了一定成果, 目前尚未见到国内其他单位在可靠性强化试验领域的应用研究报道。

2 加速寿命试验国内外研究现状

加速寿命试验按照应力的施加方式不同可分为恒定应力试验、步进应力试验和序进应力试验, 其研究内容可以概括为: 试验前的最优设计和试验后的统计分析两大问题, 国内外许多研究者围绕这两个问题开展了大量的研究工作。

国外对加速寿命试验统计分析研究始于 20 世纪 60 年代, 首先发展起来的是恒定应力试验的统计分析方法。目前, 有关恒定应力试验统计分析主要围绕如何提高分析精度等问题展开。Mazzuchi 和

Hirose 等从统计分析模型的角度^[18,19], Watkions 和 Bugaighis 等从参数估计方法的角度^[20,21], McLinn、Wang 和 Kececioglu 等从分布参数约束的角度^[22,23]对恒定应力试验统计分析方法进行研究,都不同程度地达到了提高统计分析精度的目的。

由于恒定应力试验最低应力水平往往接近正常应力,试验时间较长且效率低,因此步进应力试验的研究与应用需求日益明显,最初的步进应力试验方法是机械耐久性试验中的阶跃载荷法。1961 年贝尔实验室的 Dodson 和 Howard 提出了半导体器件步进温度应力试验法。步进应力试验降低了对试样数量的要求,具有更高的加速效率,但如何从步进应力的失效数据中分离出完整的寿命信息,是步进应力试验统计分析的关键问题。Nelson、Bhattacharyya、Tang 和 Sun 等分别建立了累积失效模型^[24]、累积失效率模型^[25]和线性累积模型^[26]对这一问题进行研究。

序进应力试验的特点是加载到试样上的应力随时间不断连续上升,可以更快地激发试样失效,从而可进一步提高加速寿命试验效率。1958 年 Kimmel 在电子产品的可靠性研究中首先尝试了序进应力试验方法。由于序进应力试验的统计分析十分复杂,并且需要专门的应力控制设备,因此序进应力试验在国际上较多地应用于产品可靠性的对照试验,其应用受到了很大的限制。

在加速寿命试验及统计分析方法蓬勃发展的基础上,加速寿命试验最优设计研究开始引起人们的关注,Chernoff、Meeker、Nelson、Khamis、Higgins、Yeo 和 Tang 等分别就恒定应力试验和步进应力试验的优化设计问题开展了相关研究工作^[27~31]。俄罗斯在加速寿命试验的工程应用方面处于世界领先地位,并且在相关研究中具有自己的特色。例如,在导弹贮存寿命研究中,研究人员对与导弹贮存相关的 20 多个腐蚀过程进行了模型描述,开发了加速贮存试验软件用于加速贮存试验方案设计。

20 世纪 70 年代初,加速寿命试验技术进入我国,引起相关领域的广泛兴趣,一直处于边研究边应用的状态。张志华、茆诗松从中间估计量之间的相关性考虑对恒定应力试验分析的估计方法进行了改进,提高了分析精度^[32]。葛广平等对步进应力试验的统计分析进行了研究,得到了相关的模型参数估计方法^[33]。王玲玲、费鹤良等在序进应力试验参数估计方法方面开展了大量的工作^[34~37]。此外,杨广宾、葛广平等分别研究了恒定应力和步进应力加速寿命试验最优设计问题^[38~41]。

虽然,目前加速寿命试验技术的研究仍存在许多需要进一步讨论和完善的地方,但是加速寿命试验技术已经在我国导弹、弹药、无线电引信、结构疲劳、发动机、轴承、齿轮、低压电机、He-Ne 激光器、电容、绝缘材料、继电器等寿命研究中得到了广泛应用,其应用范围涉及武器装备、航空航天、机械电子等诸多领域,并且我国于 1981 年颁布了恒定应力试验的 4 个国家标准^[42]。

3 发展与展望

可靠性强化试验作为一种新型的试验技术,效率高、成本低、可以从根本上提高产品固有可靠性,快速获得产品早期高可靠性,从而大大缩短产品研制时间,加快新产品投放市场,提高市场占有率。国内外许多具有远见的企业对该技术发展十分关注。目前,可靠性强化试验领域主要存在以下亟待解决的问题:① 强化环境失效机理与强化效率研究;② 强化环境选择与试验剖面确定技术;③ 应力加载与试验技术研究;④ 产品夹具设计、安装方式、信号监测与采集技术;⑤ 信息处理与试验评估技术;⑥ 强化试验指南与一般试验方法的制定与规范;⑦ 相关的试验设备与控制技术研究。

加速寿命试验适应长寿命高可靠产品寿命评估的需求,与可靠性强化试验一起成为可靠性试验领域的研究热点。目前,加速寿命试验领域主要存在以下亟待解决的问题:① 复杂系统的加速寿命试验建模技术;② 高精度的加速寿命试验统计分析技术;③ 高效的加速寿命试验方法;④ 加速寿命试验的鲁棒性最优设计技术;⑤ 加速寿命试验的计算机辅助设计与分析(ALT-CAE)技术。

参考文献:

- [1] Hobbs G K. HALT and HASS Seminar[C]. Detroit, MI, February 26, 1996. <http://www.hobbseng.com>.
- [2] Robert H, Gusciora. The Use of HALT to Improve Computer Reliability for Point-of-Sale Equipment[C]. 1998 Proceeding Annual Reliability

and Maintainability Symposium , 89 – 93 .

- [3] David Rahe. The HASS Development Process [C]. 2000 Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium , 389 – 394 .
- [4] Silverman M. HASS Development Methods : Screen Development , change schedule , and re – prove schedule [C]. 2000 Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium , 245 – 247 .
- [5] Silverman M. Summary of HALT and HASS Results at an Accelerated Reliability Test Center [C]. 1998 Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium , 30 – 36 .
- [6] Robert W D. Reliability Enhancement Testing (RET) [C]. 1994 Proc. Annual Reliability and Maintainability Sym , 91 – 98 .
- [7] Charles Felkins. Halt – hass tutorial on equipment , Fixtures , Processes & Implementation [R]. Storage Technology Corp. Louisville CO , 80028 – 4142 .
- [8] Mike Hicks. Papers on halt , HASS & Accelerated stress testing [R]. mhicks@thermotron. com .
- [9] Anderson J A , Polkinghome M N. Application of HALT and HASS Techniques in an Advanced Factory [C]. 1997 5th International Conference on FACTORY 2000 , 223 – 228 .
- [10] Kevin Granlund. A Method of Reliability Improvement Using Accelerated Testing Methodologies [R]. EMC Corp .
- [11] Clifton J , Seusy. Achieving Phenomenal Reliability Growth [R]. Hewlett – Packard Company .
- [12] Neil Doertenbach. Highly Accelerated Life Testing – – – Testing With a Different Purpose [C]. IEST , 2000 proceedings .
- [13] Harry Mclean. Highly Accelerated Stressing of Products With Very Low Failure Rates [R]. Hewlett – Packard Company .
- [14] 朱美娴. 高加速寿命试验 (HALT) 与高加速应力筛选 (HASS) [J]. 装备质量 , 2001 (3) .
- [15] 姜同敏. 可靠性强化试验 [J]. 环境技术 , 2000 (01)
- [16] 陈奇妙主编. 国外可靠性强化试验技术文集 [C]. 国防科工委质量与可靠性研究中心 , 1998 , 3 .
- [17] Yurkowsky W , Schafer R E , Finkelstein J M. Accelerated Testing Technology [R]. Technical Report NO. RADC – TR – 67 – 420 , Rome Air Development Center , 1967 .
- [18] Mazzuchi T A , Soyer R. Dynamic Models for Statistical Inference from Accelerated Life Tests [C]. IEEE Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium , 1990 .
- [19] Hirose H. Estimation of Threshold Stress in Accelerated Life – Testing [J]. IEEE Transactions on Reliability , 42 (4) , 1993 . 12 .
- [20] Watkins A J. Review : Likelihood Method for Fitting Weibull Log – Linear Models to Accelerated Life – Test Data [J]. IEEE Transactions on Reliability , 43 (3) , 1994 . 9 .
- [21] 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 , 44 (3) , 1995 . 9 .
- [22] McLinn J A. New Analysis Methods of Multilevel Accelerated Life Tests [C]. IEEE Ann. Reliability and Maintainability Sym , 1999 .
- [23] Wang W , Kececioglu D B. Fitting the Weibull Log – Linear Model to Accelerated Life – Test Data [J]. IEEE Trans. on Reliability , 49 (2) , 2000 . 6 .
- [24] Nelson W. Accelerated Life Testing—Step – stress Models and Data Analysis [J]. IEEE Trans. on Reliability , (R29) 2 , 1980 .
- [25] Bhattachargga G K , Soejoeti Z A. A Tampered Failure Rate Model for Step – Stress Accelerated Life Test [J]. Communications in Statistics – Theory & Method , (18) 5 , 1989 .
- [26] Tang L C , Sun Y S. Analysis of Step – Stress Accelerated – Life – Test Data : A New Approach [J]. IEEE Transactions on Reliability , 45 (1) , 1996 .
- [27] Chernoff H. Optimal Accelerated Life Designs for Estimation [J]. Technometrics , (4) 3 , 1962 .
- [28] Meeker W Q , Nelson W. Optimum Accelerated Life Tests for the Weibull and Extreme Value Distributions [J]. IEEE Transactions on Reliability , (R – 24) 6 , 1975 .
- [29] Yan Guangbin. Optimum Constant – stress Accelerated Life Test Plans [J]. IEEE Transactions on Reliability , (R – 43) 4 , 1994 .
- [30] Khamis I H , Higgins J J. Optimum 3 – Step Step – Stress Tests [J]. IEEE Transactions on Reliability , 45 (2) , 1996 .
- [31] Yeo K P. Planning Step – Stress Life – Test with a Target Acceleration – Factor [J]. IEEE Trans. on Reliability 48 (1) , 1999 .
- [32] 张志华 , 茆诗松. 恒定应力试验简单线性估计的改进 [J]. 高校应用数学学报 , (12A) 4 , 1997 . 12
- [33] 葛广平 , 马海训. Weibull 分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析 [J]. 数理统计与应用概率 , (7) 2 , 1992
- [34] Yin Xiangkang. Some Aspects of Accelerated Life Testing by Progressive Stress [J]. IEEE Trans. on Reliability , (R – 36) 1 , 1987 .
- [35] 马海训 , 葛广平. 对数正态分布场合序进应力加速寿命试验数据的统计分析 [J]. 河北师范大学学报 , 1991 (2)
- [36] 王玲玲 , 王炳兴. 对数正态分布下序进应力加速寿命试验的统计分析 [J]. 华东师范大学学报 , 1995 (4)
- [37] 徐晓岭 , 费鹤良. 威布尔分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析 [J]. 运筹学学报 , 3 (3) , 1999 .
- [38] Yan Guangbin. Optimum Constant – stress Accelerated Life Test Plans [J]. IEEE Transactions on Reliability , (R – 43) 4 , 1994 .
- [39] 陈文华 , 程耀东. 威布尔分布下恒定应力加速寿命试验方案的优化设计 [J]. 浙江大学学报 (工学版) , 33 (4) , 1999 .
- [40] 程依明. 步进应力加速寿命试验的最优设计 , 应用概率统计 [J]. (10) 1 , 1994 .
- [41] 施方 , 葛广平. Weibull 分布场合下简单步进应力加速寿命试验的最优设计 [J]. 上海大学学报 , (4) 3 , 1998 .
- [42] 中华人民共和国国家标准. GB2689. 1 – 4 – 81. 1981 .

