

·测试、试验与仿真·

电子设备可靠性的加速试验

张秋菊¹, 刘承禹²

(1. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2. 二炮研究院, 北京 100085)

摘要: 简要介绍了可靠性加速试验基本原理和一般流程, 以及可靠性试验技术形成和发展。提出了可靠性加速试验的实施规划, 并重点阐述了可靠性加速试验中的高加速寿命试验(HALT)和高加速应力筛选试验(HASS)的相关内容, 详细介绍了两者的区别和实施方式。针对试验应力类型选择、试验层次和试验条件的确定等方面进行了说明, 给出了基本应用原则。最后就开展可靠性加速试验中专业人员协同工作以及数据库建立给出了一些建议。

关键词: 可靠性加速试验; 高加速寿命试验; 高加速应力筛选试验

中图分类号: TN206; TB114.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)04-0081-05

Reliability Accelerated Testing(RAT) for Electronic Equipments

ZHANG Qiu-ju¹, LIU Cheng-yu²

(1. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China;

2. The Second Artillery Equipment Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The basic principle and general process of the reliability accelerated testing (RAT) are introduced, the formation and development of the reliability testing technique are also introduced. The implementation plan of the reliability accelerated testing is proposed. The highly accelerated life testing (HALT) and highly accelerated stress screening (HASS) are discussed, their differences and implementation methods are described. The testing stress type, level and condition are explained, and the basic principle of the application is given. Some advice is given to the cooperative staffs and the establishment of the database.

Key words: reliability accelerated testing; highly accelerated life testing; highly accelerated stress screening

随着电子技术的发展, 电子设备越来越复杂, 其可靠性验证问题越来越突出, 复杂电子设备的MTBF高达2 000~5 000 h, 最高可达到50 000 h。传统的环境模拟试验已经远远不能满足现代电子设备发展的要求, 对高可靠性电子设备如何验证和评价已经成为急待解决的问题^[1]。

而可靠性加速试验正是解决这一突出矛盾的根本方法, 解决了常规可靠性工程试验周期比较长, 消耗比较大的问题。目前, 加速可靠性试验技术领域的研究非常活跃, 是电子设备可靠性试验领域的重要研究方向。

1 可靠性试验技术的形成与发展

20世纪50年代至60年代, 电子设备的激发试验主要采用老化试验, 试验施加应力主要有高温、低温、温度循环和温度冲击等试验。20世纪70年代, 常规的电子设备的老化试验发展为环境应力筛选试验。环境应力筛选主要是排除产品生产过程中的缺陷, 而对产品的设计缺陷却无能为力。本质上环境应力筛选没有真正提高产品的固有可靠性。20世纪80年代末, 激发试验发展为可靠性加速试验。可靠性加速试验是一种先进的可靠性试验方法, 到了20世纪90年代得到了发展和应用。为了

收稿日期: 2011-06-23

作者简介: 张秋菊(1974-), 女, 山东临清人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为光电工程技术。

适应日益激烈的竞争环境,企业必须在最短的时间内研制并生产出高可靠性产品,以满足用户的需求。美国波音公司为了减少产品研制费用,在产品研制早期得到高可靠性产品,首次提出了可靠性加速试验概念,且应用效果最好^[2]。

目前,国外从事该领域的主要研究机构有Qual-Mark公司、Otis Elevator公司和Hobbs Engineering公司等。如Qual-Mark公司还生产了一系列可靠性加速试验设备。波音、惠普等公司成立了专门的可靠性加速试验机构。在理论与技术研究方面比较知名的专家学者在加速试验效率、试验理论、统计模型和数据分析等方面进行了大量研究。美国和俄罗斯两个国家在加速寿命试验的工程应用方面处于世界领先地位。加速寿命试验方法已广泛应用于通讯、电子、电脑、能源、汽车等工业部门。惠普、福特等国际知名企业已相继采用可靠性加速试验进行新产品研制的可靠性增长试验,并由此获得高可靠性,缩短了产品的研制周期,取得了明显的经济效益^[1]。

加速寿命试验技术引起国内相关领域的广泛兴趣,国内相关学者紧跟国外加速寿命试验技术的发展,对试验的统计分析和优化设计进行了较为深入的研究,有关专家开始关注国外可靠性强化试验的研究与应用发展动态。在加速寿命试验的工程应用方面也开展了大量的工作,并取得了一批重要成果。应用范围涉及诸多领域,开始制定了相应的标准,并进行了相关的试验工作。

2 可靠性加速试验原理与流程

电子设备可靠性加速试验理论依据是故障物理学,它是根据对设备故障物理分析的结果,确定其关键故障模式和机理,制定相应的试验条件并试验,在较短的时间内评估可靠性水平的试验。可靠性加速试验采用加速应力的可靠性试验,通过施加步进应力,找出设备耐应力极限,包括工作应力极限和破坏应力极限,不断地加速激发设备的潜在缺陷,并进行改进和验证,使设备的可靠性不断提高,并使设备耐环境能力达到最高,直到现有的材料、工艺、技术和费用支撑能力无法作进一步改进为止。

可靠性加速试验是一种激发试验,它将强化环

境引入到试验中,解决了传统可靠性模拟试验时间长、效率低及费用大等问题。电子设备通过加速试验,可以获得更快的增长速度、更高的固有可靠性水平、更低的使用维护成本、更好的环境适应能力和更短的研制周期^[2]。

试验应力可以单一应力施加,也可以综合应力施加,二者要以一定的先后次序顺序施加。无论是单一应力施加还是综合应力施加过程中,均要以步进的方式逐步提高一个或几个应力。施加应力过程中一旦发现缺陷,均要立即进行设计改进,并验证改进的有效性。一旦某一应力下发现的缺陷得到改进,表明此产品已经具备承受这一应力的能力,下一步要进一步提高此应力强度,并重复上述过程,将产品应力极限推向更高。通过施加应力将潜在的或不可检测的缺陷变为明显的或可检测的缺陷。不可检测的潜在缺陷在应力激发下可转化为可检测的缺陷,可以使用温度循环应力,也可以是振动应力,或两者综合。同时开展具有高检测能力的检测系统,以检测潜在缺陷。

可靠性加速试验一般流程如图1所示。

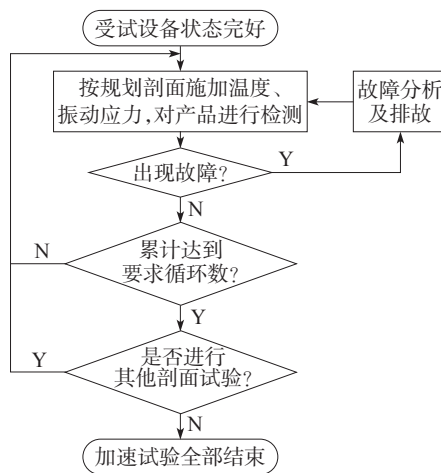


图1 可靠性加速试验一般流程

3 可靠性加速试验的实施

根据设备特点及专业技术的相关性,可靠性加速试验方案一般分4个实施阶段。即故障物理分析、制定试验条件、试验实施和可靠性评估。

3.1 故障物理分析

电子设备的可靠性加速试验是围绕故障模式

和故障机理进行的,可靠性加速试验必须满足下面的条件,其试验才是有效的,这一条件是:设备在加速试验环境条件下,在较短的时间里暴露出的故障,其故障模式与故障机理必须与设备在正常使用情况下,在较长的时间内暴露出的故障模式与故障机理完全一致。否则其验证的可靠性指标无意义,是不成功的,不能代表设备实际水平^[3]。

目前,进行故障物理分析的方法是可靠性仿真试验。可靠性仿真试验以设备的材料、结构、器件等信息作为输入,建立设备的数字样机,通过对该样机虚拟的施加各种环境条件,从而计算设备各种故障可能发生的时间。通过仿真试验,建立模型、进行大样本量的仿真计算,形成故障信息矩阵,为可靠性加速试验提供输入信息。

3.2 制定试验条件

可靠性加速试验采用了加严的应力条件,对设备影响较大。因此,选择正确的应力类型和应力水平至关重要。选择应力类型和应力水平时一般遵循以下4条原则。第一,试验应力类型应基于设备主要故障模式和故障机理进行选择。选择能激发故障机理的环境应力和工作应力,可考虑单一应力、组合应力和综合应力。例如:对于大型插座等器件焊点的温度疲劳,仅选取温度应力进行加速。第二,试验应力水平不应使设备的故障机理发生偏移。应力水平越高,引发其他故障机理的可能性越大,因此,选择时应进行一些分析与权衡。例如,在温度振动综合应力试验时,FPGA多次故障,经分析其安装位置与其他部件距离过近,易磨损;电装工艺采用了倒置安装方式,对管脚进行了弯曲处理,2个原因都可能导致FPGA芯片管脚断裂,但是是由磨损和疲劳损伤2种不同的故障机理所致,因此,施加应力时应考虑应力水平对故障机理的影响。第三,考虑试验中要进行性能检测,试验应力范围应小于设备的工作应力极限。例如,设备的工作电压范围不应超出其技术规范规定的上、下限范围,如果超出范围,设备不能正常工作,就不了解设备状态,无法进行正常功能检测。第四,为缩短试验时间和保证加速速率,试验应力水平应该足够高。例如低温步进幅值,一般选择5℃,以提高激发速率,如果选择1℃,试验时间增加5倍,不能保证加速速率,因此,建议应力水平要适中。

3.2.1 确定加速应力类型

故障信息矩阵中包括故障位置、故障模式和故障机理等信息。根据故障信息矩阵,结合使用环境条件,确定主要故障机理模型,从而明确试验应力类型。与以往可靠性试验相比,不再沿用模拟实际环境条件的试验方法,不施加与主要故障模式无关的应力类型,使应力类型更具有针对性。例如,设备的故障经分析是由于振动引起的,与温度没有关系,则不在施加温度应力。

3.2.2 确定加速应力量值

影响加速应力水平的因素主要包括机理模型适用范围和应力极限。应力水平超出设备的主要机理模型阈值时,故障机理发生变化,出现了机理偏移现象,使得在加速试验中出现的故障信息与设备在实际使用中的故障信息不符,导致试验失败。试验应力水平应在工作应力范围内,保证正常运行,在试验中进行功能和性能检测。设备的复杂度是影响应力水平选取的一个重要因素,复杂设备在前期所作的故障物理分析的误差也相对较大,建议选取较低的加速应力水平进行试验,以免出现故障偏离和故障漂移,降低试验可信度。设备的工艺对应力水平影响较大。设备的生产、加工、组装等环节都不可避免的由于工艺波动而出现偏差,偏差是不能彻底消除的。当工艺波动较大时,建议选取较低的加速应力水平进行试验。

通过上面分析,加速应力水平不能超出设备主要故障机理模型应力范围,也不能超过工作应力范围,因此,在模型阈值和工作应力极限中选择最小值。加速应力水平计算公式: $S=k \times \min\{FL, OL\}$ 。其中: S 是加速应力水平; k 是可信度系数; FL 是主要故障机理模型应力范围; OL 是设备工作应力极限。

3.3 HALT和HASS试验实施

高加速寿命试验(HALT)和高加速应力筛选试验(HASS)是可靠性加速试验的2个主要试验。

3.3.1 HALT试验与HASS试验区别

HALT试验主要应用于电子设备研制阶段早期,是设计的重要组成部分,主要针对首件试验样件进行。通过对试验样件施加远超过规定环境的应力,应力施加过程中要以步进的方式逐步提高一个或几个应力,激发其缺陷变为故障,并通过改进设计提高设备耐应力强度,并进一步使用更高应力

再次激发故障,再次改进设计,逐步发现设备设计中的薄弱环节,并消除这些薄弱环节,从而将设备耐应力强度逐步推向更高,直到达到现有技术极限为止,这是一个反复的过程^[5]。通过HALT试验可使设备及相关工艺,在批产前就达到技术成熟程度,HALT试验是得到健壮产品的必要手段。HALT试验明确了工作极限和破坏极限,为制定设备的HASS试验方案、确定HASS试验应力量级提供依据。典型HALT试验只需3~5天时间。

HASS试验主要用于设备批产阶段,在生产过程中通过HASS试验来剔除生产制造潜在缺陷,使设备能快速达到高的可靠性,对批产设备要进行100%筛选。它与常规环境应力筛选(ESS)不同的是仅适用于研制阶段。根据HALT试验确定的极限制定HASS试验的试验应力方案,因此,HASS试验仅适用于在研制阶段经过了HALT试验的设备^[6]。HASS试验应力同样远高于规定环境的最高应力,通过HASS试验,设备的可靠性水平大幅度提高,大大降低维修和售后服务费用。使用高应力可使HASS试验时间缩短到1~2 h内^[4-5]。

3.3.2 HALT试验实施

HALT采用步进应力剖面,典型HALT试验过程为:低温步进试验、高温步进试验、温度循环试验、振动步进试验、温度与振动综合试验。

HALT试验实施包括以下阶段:(1)施加步进应力,直到设备失效为止;(2)暂停试验,对失效进行原因分析,改进设计或工艺,修复设备;(3)应用步进应力,从暂停处继续试验,直到设备再次失效为止,再进行失效分析,找出失效原因,再改进设计或工艺,修复设备;(4)重复试验、失效、失效分析、改进并维修、再试验过程;(5)找出设备的工作极限与破坏极限,确定设备的工作裕度与破坏裕度。

故障原因分析和实施改进纠正措施是HALT试验的核心内容。在实施过程中不能放过任何一个被激发的故障,确定是设计问题还是工艺问题,通过改进设计或工艺实施纠正措施。

在试验实施中需注意,第一,HALT试验不是模拟试验,而是将设备设计和工艺缺陷激发和检测出来的激发试验。因此,任何能用于暴露设计或工艺缺陷的应力都可作为HALT的应力,如温度应力、振动应力、温度循环应力和电应力等。第二,HALT试验中应用的应力应是步进施加的,起始应力一般

略低于或等于设备设计规范所规定的规范应力,最终一步一步地提高到远远超出规范应力水平的量值^[6]。

3.3.3 HASS试验实施

HASS试验是利用高机械应力和高温变率来实现高加速的。典型HASS试验过程包括HASS设计、筛选验证和对设备实施HASS 3个阶段。HASS筛选验证的目的是能快速发现设备中的缺陷而又不会严重影响设备的寿命。

HASS筛选剖面包括应力类型(振动、温度、电应力等)、应力量级、驻留时间、试验顺序等。每个应力的极限值都应基于样件HALT试验结果。一般情况下,加速筛选极限值介于工作极限与破坏极限之间,检测筛选极限值介于设备设计所规定的极限与工作极限值之间。设计HASS试验应力剖面后,须对其进行验证,以确定筛选不会引入额外缺陷或严重影响设备寿命。验证后就可对设备进行筛选,筛选中应对整个筛选过程进行监控,并且筛选剖面也应根据生产过程和实际现场使用得到的数据进行适当调整。

3.4 可靠性评价

收集设备从研制到试验积累的各类数据,对其进行可靠性评估和验证,包括每一阶段横向多类信息综合,以及各阶段纵向同类信息综合,从而能够较准确地评价设备的可靠性水平。

4 试验实施中需注意的问题

可靠性加速试验通过人为施加环境应力、加速激发产品潜在缺陷以清除产品潜在缺陷,从而提高可靠性。可靠性试验不是考核设备是否通过试验,而是激发潜在缺陷越彻底越好,提高激发效率为目标,因此,在试验实施中要充分利用现有资源,重点关注试验应力类型、试验层次的选择,步进幅值和时间的确定,提高试验有效性。

(1) 试验应力类型的选择和应力步进幅值及试验时间的确定

应力的选择不能脱离设备实际使用环境,只能在分析设备使用环境中所承受的应力基础上,选择最容易使设备失效的一个或多个应力,同时还要兼顾设备的能力。应力选择合理,设备越容易失效,

试验效率也越高。应力步进幅值和试验时间也是影响设备失效的2个重要因素。应力步进幅值的选择应在分析设备正常工作条件下的环境应力以及工作极限的基础上进行。试验时间的选择应考虑设备的工作时间,每一级应力试验时间不应超过其工作时间^[7]。

(2) 加速试验层次的选择要综合考虑费效比

HALT试验步进应力的最终值是在试验逐步进行中确定的,需要现阶段设计和工艺技术水平极限,以及进行HALT试验所允许的时间和经费来做支撑。理论上HALT试验可在从模块至整机的每一个组装等级上进行,但在实际应用中,需根据产品特点进行分析判断,决定HALT试验在哪一个层次上进行更为有效,且节省成本。大型产品失效模式较多,全部进行试验,会影响HALT试验的效率,因此,为达到最佳的费效比,HALT试验一般选择对产品功能影响危害程度大、故障率较高的部件或关键单元进行加速试验。

如果改进设计后其可靠性指标增加幅度不大,而研制费用却成倍增加,这种措施费效比较低,因此,建议不要采用通过增加单一部件的冗余来提高产品可靠性的方法。可考虑在保持单个部件可靠性不变的情况下,在设计中进行并联设计,以提高产品可靠性。试验层次的选择要经过周密分析,要综合权衡可靠性、经费和时间之间的关系。

(3) 充分利用现有设备开展加速试验研究,同时大力开展试验设备研制

要充分利用现有试验设备开展加速试验工作。例如,对由随机振动激发的产品缺陷,可考虑采用单轴向随机振动试验设备进行考核,试验效率低的缺陷可通过修改加速试验条件来提高。在试验设备无法进行多应力综合激发情况下,可优先考虑选择主要失效应力进行加速试验。

要实施加速试验必须投入试验设备,传统的试验设备由于大多温度箱的温变率偏低,振动台多是单轴向台,试验时需调整方向,无法满足多应力试验要求。从提高设备可靠性、缩短研制周期、节约研制经费角度出发,要加快研制能进行综合环境应力加速试验设备,包括高温变率温度箱和全轴向六自由度振动台等试验设备。在做好跟踪、吸收国外该领域最新成果的同时,也应加强对一些关键技术、相关设备研制、试验数据统计分析和研究^[8-9]。

5 结束语

电子设备可靠性加速试验是一种新型的试验技术,突破了传统环境模拟试验技术的思路,涉及相关技术较多,能够快速评估电子设备在各设计状态下的可靠性水平,已成为保证和提高产品固有可靠性的重要手段之一。HALT试验和HASS试验缩短了试验周期,使产品进入市场的周期大大缩短,提高了试验效率,加速了研制生产过程,同时大大降低了研制生产成本和维修保障费用。

可靠性加速试验要求各专业人员要协同作业。可靠性加速试验是在试验中施加应力,并连续进行检测以找出故障,进行故障定位,并对缺陷进行分析和采取改进措施,试验过程中设备设计人员、试验人员、故障分析人员和管理人员要联合协同作业,技术人员和管理人员之间必须密切配合,才能使试验高效进行。

在试验过程中,要记录各类数据和信息,并将得到的信息和经验纳入数据库进行管理并共享信息。试验数据信息对开展试验分析、以及同类设备研制可以起到借鉴作用。当再次发生同类故障时,或开展其他设备研制时,可从数据库中获取宝贵的数据。

参考文献

- [1] 范志锋,齐杏林,雷彬.加速可靠性试验综述[J].装备环境工程,2008,5(2):37-40.
- [2] 王德言,张建国,钟琼华,等.环境试验与可靠性试验技术的发展[J].装备环境工程,2005,2(5):10-13.
- [3] 李超,尹霞,陈琨.可靠性强化试验技术现状及展望[J].质量与可靠性,2006(2):25-29.
- [4] GREGG K Hobbs. Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [5] MIL-HDBK-338B, ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN HANDBOOKS[S], 1998.
- [6] 王宏,陈晓.可靠性强化试验及其在雷达研制生产中的应用[J].现代雷达,2008,30(4):28-32.
- [7] 任志乾.激光捷联惯导系统的可靠性强化试验技术[J].电子产品可靠性与环境试验,2008,26(1):34-39.
- [8] 安长暖.随机振动试验前的参数估算[J].光电技术应用,2009,24(4):44-46.
- [9] 祝耀昌,王宇宏.高加速应力试验及其与传统试验的比较[J].装备环境工程,2006,3(4):16-19.