

温熙森 陈循 张春华 陶俊勇 著

可靠性强化试验 理论与应用



科学出版社

www.sciencep.com

可靠性强化试验 理论与应用

温熙森 陈 循 著
张春华 陶俊勇

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

可靠性强化试验是近年来发展起来的高效可靠性增长试验技术,通过加速试验高效暴露产品缺陷,改进设计,提高产品固有可靠性水平。本书较为系统地论述了可靠性强化试验的理论、方法和应用,主要内容包括全轴随机振动强化试验机理、可靠性强化试验方法的优化、典型应用案例以及频谱可控的超高斯随机振动环境模拟等。本书收入了近年来在可靠性强化试验技术领域的重要研究成果及对该技术的发展创新。

本书可为从事可靠性技术研究与应用的人员提供借鉴,也可对相关专业硕士研究生及高年级本科生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性强化试验理论与应用/温熙森等著. —北京:科学出版社, 2007
ISBN 978-7-03-019583-8

I. 可… II. 温… III. 可靠性试验—研究 IV. TB302

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第123693号

责任编辑: 鄢德平 张 静 于宏丽 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第 一 版 开本 B5(720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张 11 1/4

印数 1—2 000 字数 217 000

定价·36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

可靠性直接反映了系统的质量指标,关系到整个系统运转过程的成败。一个系统,无论其设计思想如何先进、性能指标如何优越、适用性如何强,如果其可靠性很差,实际上就失去了使用价值。以武器装备为例,可靠性已经成为与性能同等重要的研制目标,对武器装备的作战能力、部署机动能力、维修人力和使用保障费用等都具有重要的影响。

可靠性增长是保障产品研制可靠性水平的重要环节,通过这一过程达到改进设计和工艺、提高产品可靠性研制水平的目的。传统的可靠性增长方法主要依靠真实环境模拟试验来进行,存在试验周期长、缺陷残留多等问题。因此,如何实现高效可靠地增长是当前可靠性工程面临的重要研究课题。

1988年, G.K. Hobbs 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) 这两种方法。其中, HALT 主要应用于研制阶段,目的是快速暴露设计缺陷,以便及时改进设计,提高固有可靠性。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)。可靠性强化试验是一类激发试验,采用加速应力环境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,达到可靠性增长的目的。因此,如何实现对缺陷的高效激发便成为这一新型试验技术的关键问题。

该技术在国外工程应用中成绩斐然,从 20 世纪 90 年代开始便引起国内可靠性工程界的广泛关注。虽然国外对这一技术普遍采用 HALT 这一术语,但为了避免与目前可靠性工程中另外一类以可靠性评价为目标的加速寿命试验 (accelerated life testing, ALT) 技术相混淆,国内从引入之初便普遍采用可靠性强化试验这一术语,以突出其可靠性增长的特点。在引进相关设备的基础上,国防科技大学可靠性实验室等国内多家研究单位对这一新型试验技术展开了广泛深入的研究。

本书集中了近年来国防科技大学可靠性实验室在这一技术领域的重要研究成果,主要包括可靠性强化试验技术的理论、方法和工程应用的典型案例,希望能为读者揭示这一新型试验技术的研究与工程应用前景,推动可靠性强化试验技术的进一步研究与工程应用的深入开展。

全书共 6 章,分别讨论可靠性强化试验技术的理论、方法、工程应用和技术发展,其中:

第 1 章概论,介绍可靠性强化试验的提出背景、国内外研究现状、应用现状和

相关试验系统,总结可靠性强化试验的关键技术,介绍本书主要内容。

第2章全轴随机振动强化试验机理,介绍全轴随机振动环境的特性,推导非高斯随机应力的频域疲劳分析方法,并在理论推导基础上讨论全轴随机振动试验的强化机理。

第3章可靠性强化试验方法的优化,论述可靠性强化试验的优化方法,以及基线方案。

第4章可靠性强化试验的典型应用案例,介绍可靠性强化试验在星载铷原子频标与激光捷联惯导系统中的应用案例。

第5章频谱可控的超高斯随机振动环境模拟,针对可靠性强化试验的进一步需求发展了基于电动振动台的频谱可控的超高斯伪随机/真随机振动环境模拟与控制技术。

第6章发展展望,介绍可靠性强化试验技术以及试验系统等未来发展趋势。

就风格而言,本书力图理论联系实际,既注重对可靠性强化试验这一新型技术领域的基本理论进行诠释,也注重对其试验方法及工程应用进行剖析,并对这一技术的发展趋势进行预测,以开阔视野、启发思路。

本书由温熙森教授负责整体策划和审定,陈循教授负责统稿,第1章概论和3.2节由陶俊勇副教授撰写,第2章、3.3节、4.1节、第6章由张春华副教授撰写,第5章和3.1节由蒋瑜博士撰写,4.2节由任志乾讲师撰写。本书的出版是集体智慧的结晶,感谢蒋培、褚卫华、邓爱民等多位博士在读期间所做出的成效卓越的研究工作。相关课题研究得到了国家、军队相关主管部门领导以及可靠性共性技术专家组的大力支持。感谢陈奇妙研究员在课题研究初期提供的宝贵资料。感谢朱美娴研究员在相关课题研究过程中给予的指导与支持。

限于水平,书中难免有不妥之处,恳请读者指正。

作 者

2006年10月

于国防科技大学机电工程与自动化学院

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 可靠性强化试验的提出.....	1
1.2 国内外现状.....	2
1.3 关键技术.....	12
1.4 本书的主要内容.....	13
参考文献.....	13
第 2 章 全轴随机振动强化试验机理	15
2.1 全轴随机振动环境的特性.....	15
2.2 非高斯随机应力下的疲劳损伤频域分析方法.....	24
2.3 基于单轴向特性的强化机理.....	46
2.4 基于多轴向特性的强化机理.....	59
参考文献.....	65
第 3 章 可靠性强化试验方法的优化	67
3.1 全轴随机振动强化试验方法的优化.....	67
3.2 温度循环强化试验方法的优化.....	80
3.3 基线方案.....	97
参考文献.....	106
第 4 章 可靠性强化试验的典型应用案例	107
4.1 星载铷原子频标可靠性强化试验.....	107
4.2 激光捷联惯导系统可靠性强化试验.....	119
参考文献.....	130
第 5 章 频谱可控的超高斯随机振动环境模拟	132
5.1 频谱可控的超高斯伪随机振动环境模拟.....	133
5.2 频谱可控的超高斯真随机振动环境模拟.....	151
5.3 数值仿真和验证实验.....	165
参考文献.....	172
第 6 章 发展展望	174
英汉缩略语对照表	177

第1章 概 论

1.1 可靠性强化试验的提出

可靠性试验技术从诞生至今可归结为模拟试验和激发试验两大类方法。模拟试验通过对产品进行使用环境模拟来检验或鉴定可靠性程度。早在 20 世纪 40 年代,美国就开始采用单环境因素对产品进行研制试验与鉴定试验,以检验产品的设计可靠性;70 年代以后则开始采用综合环境因素的可靠性试验,并在试验中模拟任务剖面中的主要环境应力。随着可靠性模拟试验技术的不断发展,迄今为止已形成了一系列可靠性模拟试验标准和规范。如美军标 MIL-STD-781A~D、MIL-STD-1540 及其修订版,以及我国的 GJB899、GJB1407 等。由于采用了基于环境真实性模拟的试验方法,模拟试验存在周期长、效率低、耗费大的缺点。此外,完全真实地模拟产品的使用环境往往存在诸多困难,以至于在实际工程中难以实现,导致试验结果与产品的实际使用情况不相符。

为有效解决模拟试验存在的问题,从 20 世纪 80 年代后期开始^[1~10],可靠性试验技术领域逐渐形成了一项新的分支,即激发试验技术。激发试验不以环境的真实性模拟为目标,而是通过恶化环境(强化环境)来进行试验,以提高试验效率、降低消耗。最早的激发试验是 20 世纪 50 年代的老化试验,所施加的环境应力为高温、高低温循环和温度冲击等,70 年代后发展成广义的环境应力筛选。1979 年,美国海军颁布了生产筛选大纲 NAVMATP-9492,这使得环境应力筛选方法上了一个新台阶。1982 年,美国环境科学学会又颁发了指导性文件《电子产品环境应力筛选指南》,美国国防部还颁发了通用标准,如 MIL-STD-2164《电子产品环境应力筛选方法》和 MIL-HDBK-344《环境应力筛选手册》等,这些使得环境应力筛选进入一个更规范的发展阶段。环境应力筛选主要是剔除产品生产工艺过程缺陷,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性作用。

因此,1988 年 G.K. Hobbs 提出了高加速寿命试验 (highly accelerated life test, HALT) 和高加速应力筛选 (highly accelerated stress screen, HASS)^[11]。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,提高产品的固有可靠性;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。HALT 和 HASS 的核心是对产品施加大大超过设计规范的极限应力,一步一步地加,逐渐排除缺陷,故又称步进应力试

验方法,此外也被称为应力寿命试验 (STRIFE)、应力裕度和强壮试验 (SMART) 等。1994 年,波音公司在其故障防治策略大纲中,进一步将其用于产品设计阶段,以实现高效可靠性增长为目的 HALT 试验,其被命名为可靠性强化试验 (reliability enhancement test, RET),而被用于产品生产阶段,以实现高加速环境应力筛选的试验 (仍称为 HASS),这种命名进一步区分了产品寿命试验中加速寿命试验 (accelerated life test, ALT) 与 HALT 的区别,明晰了相关的概念与名称。

可靠性强化试验技术的理论依据是故障物理学,它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。可靠性强化试验通常采用人为施加的强化应力环境进行试验,快速激发产品的潜在缺陷使其以故障形式表现出来,通过故障模式分析、故障机理分析和改进措施消除缺陷提高产品可靠性。可靠性强化试验并不强调试验环境的真实性,而是在保证失效机理不变的情况下,强调试验的激发效率,实现研制过程中可靠性水平的快速增长。对于当今高技术和高复杂度的电子产品和机电产品,要发现潜在的故障较难,尤其是一些“潜伏”极深或不易根除的间歇故障,必须采用加大应力的方法使其暴露。自可靠性强化试验技术诞生至今,其相关研究与应用非常活跃,成为加速可靠性试验技术重要发展方向之一。

1.2 国内外现状

1.2.1 国外研究与应用现状

自 20 世纪 90 年代初美国、日本等发达国家系统地开展了可靠性强化试验技术与应用的研究,取得了显著的成果,并形成了一些规范和指南。在理论与技术研究方面,国际上比较知名的专家主要有: G. K. Hobbs、S. Smithson、Joseph Capitano、Wayne Nelson、Mike Silverman 和 David Rahe 等。其中, G. 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了研究工作; 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,波音公司的 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。国外关于可靠性强化试验理论、技术与试验系统的学术交流活动也非常活跃,其中,最为著名的是由 IEEE/CPMT ASTR 技术委员会和 IEEE Reliability Society 主办的 Accelerated Stress Testing & Reliability (ASTR) 会议,该主题会议每年在美国不同地区举办,会议涉及可靠性强化试验理论,针对不同产品的试验技术,以及可靠性强化试验系统设计技术等。此外,由各商家主办的 RET 学术会议与专题技术讲座也很多,其中,最为著名的是

美国 QualMark 加速可靠性试验中心定期开设的相关讲座。目前,国外在可靠性强化试验理论与技术方面的研究可归纳为以下几点。

1. 可靠性强化试验技术的基本原理

可靠性强化试验技术自 20 世纪 80 年代末诞生以来,经过近 20 年的发展已形成了相关规范和试验指南^[1~6]。

针对其基本原理,为研究可靠性强化试验的激发效率,G. K. Hobbs 曾设计了一种金属试件,就强化应力对疲劳寿命的影响效果进行了研究,发现当应力强度增加 1 倍时,疲劳寿命降低为原来的 1/1000。对于有缺陷的产品,缺陷处应力集中系数高达 2~3 倍,疲劳寿命就相应降低了好几个数量级,这样就使有缺陷元件和无缺陷元件在相同的强化应力作用下疲劳寿命拉大了档次,使有缺陷元件迅速暴露的同时无缺陷元件损伤甚小。这一试验结果也清楚地说明了 RET/HASS 试验技术的基本原理。另外,强化应力激发产品缺陷的有效性及其所激发出的缺陷与正常使用环境下导致产品失效的各类缺陷相关性也通过试验和实践得到了证实。

图 1.1 和图 1.2 是 1982 年美国休斯飞机公司研究高效率的 ESS 筛选方法时绘制的,其中,筛选强度是指发现产品所有潜在缺陷的可能性大小。从图 1.1 中可以看出,在振动应力量级较低时,筛选强度很小且随着时间的推移,增加非常缓慢;而当振动应力量级较高时,在相同的时间内筛选强度有很大的增加,且在很短的时间内达到 1(发现了产品的所有缺陷)甚至大于 1(出现了不相关故障)。图 1.2 描述了在温变率一定的情况下筛选强度随时间变化的关系,在相同的循环周期下高温

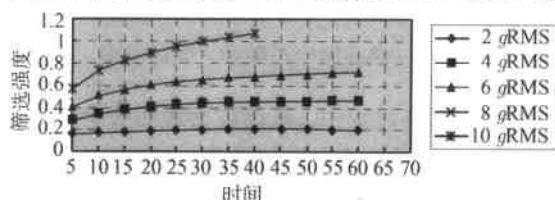


图 1.1 筛选强度与振动量级关系图

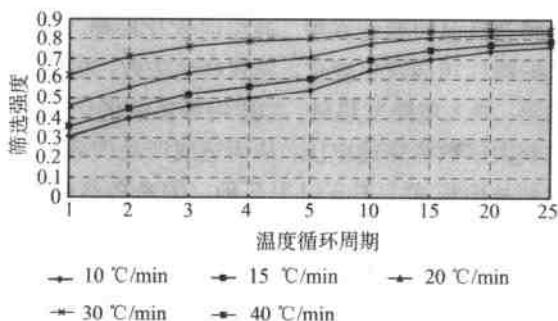


图 1.2 筛选强度与温变率关系图

变率比低温变率的筛选强度要高得多,这样就可以通过较少的循环周期获得很好的筛选效果。

可靠性强化试验技术正是基于这样的机理,在试验中对试件施加远远大于正常使用条件下的环境应力,快速激发出产品缺陷,从而提高试验效率。

2. 可靠性强化试验应力与诱发故障模式的关系

在 RET/HASS 试验中,电子产品没有哪一种缺陷对所有的环境应力的激励都敏感,在制定试验方案时要根据不同的试验目的选择相应的应力类型。图 1.3 是由 G.K.Hobbs 建立的缺陷/激励关系模型图,对激励类型与缺陷类型之间的关系做了直观说明,它表示电子产品缺陷和能把缺陷激出变为可观察缺陷的环境激励之间的关系。当然,这个模型只是概念上的,在可靠性试验中要选择有效的应力类型,还必须依靠经验和试验的验证。在综合环境试验中常施加的环境应力在一般情况下所能诱发的故障模式和故障机理如下:

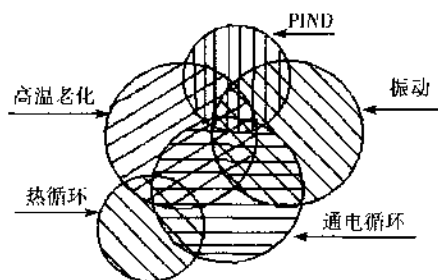


图 1.3 缺陷激出与激励之间的关系

(1) 温度循环。在温度循环过程中,高热应力和热疲劳交互作用在产品上,影响着产品的机械性能、物理化学性能和电气性能。在机械方面,由于产品由不同的材料组成,材料膨胀系数的差异产生机械应力,在承受高低温双向变化的热应力时,应力差变化在结合部产生有效作用,使缺陷暴露;在物理化学方面,产品中的橡胶和有机塑料材料在低温时变硬发脆,高温时软化松弛,超出使用温度范围时,其机械性能和抗减振特性均会发生变化,导致产品失效;在电气性能方面,高温能够导致电路发生温漂,增大电路发热量,加速绝缘体的老化甚至热击穿,影响半导体器件如三极管的放大倍数和穿透电压,从而造成产品失效。

温度循环诱发的故障模式主要有以下几种:①参数漂移与电路稳定性;②电路板开路、短路、分层等缺陷;③电路板腐蚀;④电路板裂纹、表面和过孔缺陷;⑤元器件缺陷;⑥元器件松动、装配不当或错装;⑦结击穿;⑧开焊、冷焊、焊料不足或没有焊料等焊接缺陷;⑨连线伸张或松脱以及电线掉头、连接不好等;⑩接触不良;⑪黏结不牢;⑫紧固件缺陷;⑬脆性断裂;⑭电迁移;⑮热匹配;⑯浪涌

电流;⑯金属化;⑰密封失效等。

(2) 振动。振动是直接用力激起产品内部的元器件及其结合部的谐振来达到暴露产品潜在缺陷的目的。振动的失效分为三种:①产品性能超差或失效。振动应力作用于产品时,一方面改变了产品中各元器件、部件之间的相对关系,使产品的结合部的相对位置发生变化,导致产品失效;另一方面,振动时产生干扰信号,干扰电流、电压太大,影响了电路的工作点或工作状态,使产品性能超差或混乱。②产品在振动应力反复作用下,造成产品的部分结构、引线松动或磨损甚至脱落。③振动使产品原来具有的微小缺陷和损伤经多次交变应力作用使其扩大,造成材料电气、机械性能发生变化或使产品的结构破坏。

振动诱发的主要故障模式有:①电路板开、短路;②元器件装配不当或松脱;③相邻元器件短路;④元器件管脚或导线断裂或有缺陷;⑤IC插座缺陷;⑥虚焊、开焊、冷焊、焊料不足或没有焊料等焊接缺陷;⑦黏结不牢;⑧连线松脱或连接不好;⑨硬件松脱;⑩紧固件或护垫松动;⑪晶体缺陷;⑫机械缺陷;⑬包装缺陷;⑭外来物等。

(3) 湿度。在可靠性试验中,湿度一般施加在高温段,在对湿度诱发的故障机理分析的同时要考虑到高温及后期的低温的综合作用。在机械特性方面,湿气侵入材料的表面和内部,会使材料的强度、硬度、弹性等物理特性发生变化,在同时施加的高温 and 后期的低温作用下,会导致产品的机械强度变坏,甚至会造成机械失效;在物理化学方面,湿气能加速金属腐蚀,改变介电特性,促进材料分解、长霉及形变等。如果和高温同时作用,绝缘材料的吸湿加快,甚至会产生吸附、扩散及吸收现象和呼吸作用,使材料表面肿胀、变形、起泡、变粗,还会使活动部件摩擦增加甚至卡死;在电气方面,由于潮湿,在温度变化时容易产生凝露现象,从而造成电气短路。潮湿引起的有机材料的表面劣化也会导致电性能的劣化。同时在高温下潮湿还会导致接触部件的触点污染,使触点接触不良。

湿度诱发的主要故障模式有:①电气短路;②活动元器件卡死;③电路板腐蚀;④表层损坏;⑤绝缘材料性能降低等。

(4) 电压循环。电压的高低循环可以诱发那些对电压变化比较敏感的部件的故障。一般情况下,这种应力仅影响电子产品中的稳压器件。对于非调整性器件,在电压的高低循环过程中,高压有利于暴露二极管、晶体管的缺陷,低压有利于暴露继电器以及其他开关器件和电路的故障(特别是在低温情况下)。

电压循环诱发的主要故障模式有:①间歇失效;②冷却回火;③半导体性能减弱;④导线搭接;⑤电路误动作;⑥电气短路;⑦绝缘极限等。

另外,对于其他类型的环境应力和所能激发的故障类型也有一定的对应关系。如低温应力能激发的缺陷类型有元器件参数漂移、电路稳定性、PCB上过孔缺陷、冷焊等;高温应力能激发的缺陷类型有黏结不牢、电容泄露、化学腐蚀、器件固定

不紧、器件参数漂移、绝缘部分出现裂纹、电路稳定性、机械缺陷、氧化缺陷、基板裂纹、基板安装缺陷、冷焊、焊料不足或没有焊料等，还能查找绝缘极限。

在产品可靠性试验中施加综合应力比施加单一应力更能有效地激发产品的缺陷，因为某一种环境因素对产品的影响会在另一种环境因素诱发下得到加强并导致失效。这就要求，在对具体产品进行 RET 时，必须深入分析各类型应力对产品各类型缺陷作用的机理，确定 RET 中各种应力的最优综合方式。

3. 可靠性强化试验技术特点与指南现状

美国等发达国家通过近 20 年的研究与应用，目前已基本形成了可靠性强化试验方法，由于可靠性强化试验是故障防治策略中的关键环节，与应力筛选针对生产缺陷不同，它的目标主要针对设计缺陷或设计薄弱环节，呈现出以下独特的技术特点：

(1) RET 更关注产品的设计极限以及工作极限、破坏极限等定量参数。针对某一产品其应力极限如图 1.4 所示。



图 1.4 产品各种应力极限定义

其中，技术规范极限：由产品使用者或制造者规定的应力极限，产品预期在该极限内工作。

设计极限：设计该产品在该极限内工作不会失效。技术极限与设计极限之差为设计余量。

工作极限：在用以确定相关应力对可靠性影响加速试验过程中，施加于产品的工作应力极限。加速寿命试验通常在该极限内进行。

破坏极限：产品能在其范围内工作而不出现不可逆失效的应力极限。破坏极限可以通过可靠性强化试验测定。

HASS 极限：在交付最终产品前的一个筛选极限。HASS 极限可通过可靠性强化试验确定，而且通常处于工作极限之内。

RET 极限：其作为一种试验进程而确定，一般不超过破坏极限。

(2) RET 一般采用步进应力试验的方式进行，图 1.5 是广义步进应力示意图。

广义应力为 S_1 、 S_2 、 S_3 ，且相互垂直，可为环境应力，如振动、温度、湿度、盐雾等，也可为工作应力，如电压、功率等，且所有可能的产生失效的应力都应考虑在内。

图 1.5 中的小立方体表示技术规范极限，立方体的外角表示这些应力极限内最恶劣的应力状态。大立方体代表超出技术规范应力极限的一种应力组合。向量 T 表示从技术规范极限立方体的外角到试验极限立方体的外角，描述了应力组合以步进方式增加时通过的路径。

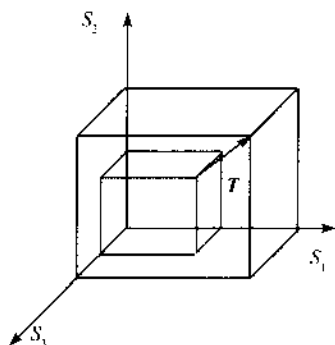


图 1.5 广义步进应力

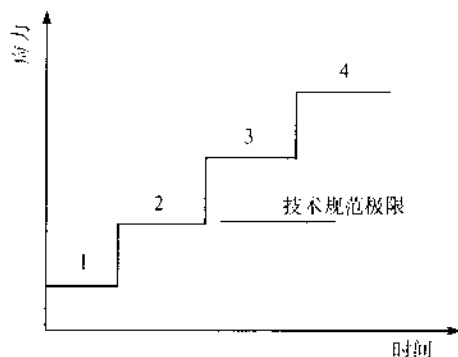


图 1.6 步进应力试验

图 1.6 是步进应力试验方法示意图中的应力单位，是被选择进行试验的组合或综合应力增量。这些台阶相当于持续时间，可以小到几分钟，一般不超过 24h；不同形式的应力 S_1 、 S_2 和 S_3 可以同时施加或顺序施加；第一步或第二步通常处于或低于技术规范应力极限，这一步完成后将失效的部件拆除并进行分析；继续进行试验之前，在这一步上可以分析并修正设计误差或其他缺陷；逐步增大应力量级，重复这一过程，直到出现以下 3 种情况之一：①全部部件失效；②应力等级已经达到远远超过了为验证耐用产品设计所要求的水平；③随着以更高的应力等级进行试验引入新的失效机理，出现使用中不可能出现的不相关失效，如焊点熔化等。

在可靠性强化试验指南与规范方面，美国各专业加速可靠性试验服务机构均有自己的规范，其中，得到普遍公认并具有相当影响的主要有：美国波音公司的故障防治策略大纲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。

如图 1.7 所示，D6-57067 中规定：可靠性强化试验用于设备投产前消除设计和制造的薄弱环节，对于全部新研制的设备和服役中可靠性低或需大修和重新鉴定的现有设备必须做 RET，认为 RET 能降低寿命周期成本和消除设计缺陷。

美国 QualMark 公司的 HALT Guidelines 和 HASS Guidelines 详细给出了可靠性强化试验的目的、适用范围、基本术语定义、参数人员要求与组成、设备要求、

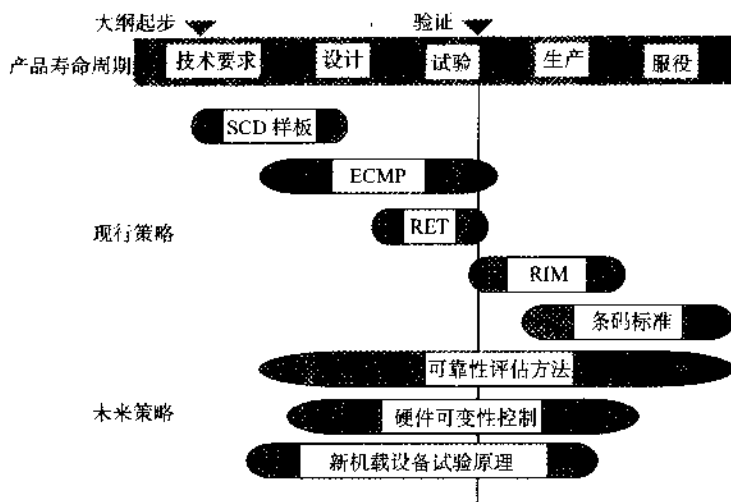


图 1.7 波音公司故障防治策略大纲示意图

试验样品要求、样品试验期间的功能测试要求、试验报告和文件要求、详细的试验步骤、剖面制定技术，如图 1.8 为美国 QualMark 公司 HALT Guidelines 中的综合应力试验剖面，以及试验后的结果分析与改进措施要求等。其在进行综合应力试验时有如下规定：

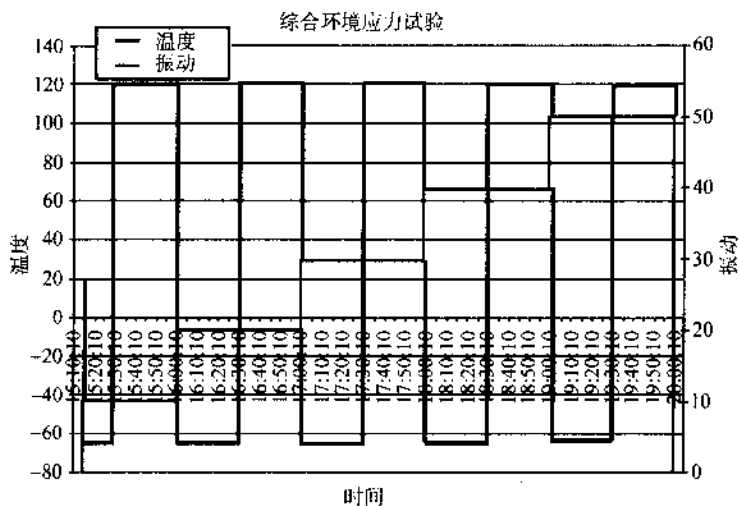


图 1.8 美国 QualMark 公司 HALT Guidelines 中的综合应力试验剖面

(1) 在终止本阶段试验前，如果没有遇到破坏性失效则至少进行五次综合环境循环。

(2) 综合环境试验的温度剖面是在温度工作极限之间的循环。每一温度极限上的最小保持时间为 10min。

(3) 所要求的五次循环的初始振动量级由振动步进应力试验施加的最大振动量级除以 5 得出。在接下来的每次温度循环中, 振动量级以相同量值增长。例如, 若样品在振动步进应力为 35gRMS 时发生了破坏性失效, 则第一试验循环从 7gRMS 的振动量级开始, 在每次温度循环完成后增加 7gRMS, 即循环 1: 振动量级为 7gRMS; 循环 2: 振动量级为 14gRMS; 循环 3: 振动量级为 21gRMS; 循环 4: 振动量级为 28gRMS; 循环 5: 振动量级为 35 gRMS。如果振动步进应力试验没有达到破坏极限, 则将得到的最大振动量级除以 5, 振动的初始量级和量级增量的确定方法如前所述。

4. 可靠性强化试验设备现状

可靠性强化试验技术需要相关试验设备的支持, 在可靠性强化试验设备研发方面美国 John Hanse 最先研制成功强化试验设备, 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应力试验, 如图 1.9 所示。该类设备能够提供全轴宽带伪随机振动(该类设备的主要特点)、大温变率温度循环和湿度环境应力。其中, 就振动应力环境而言, 早期的强化设备具有以下特点:

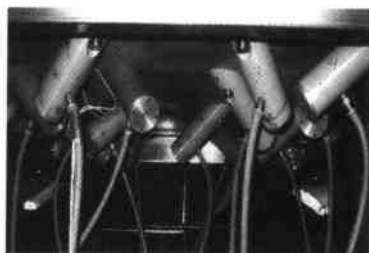


图 1.9 气动式强化试验系统

- (1) 能够为部分电子产品提供合适的振动量级。
- (2) 能够提供三轴六自由度宽带伪随机激励应力。
- (3) 在宽频带内对受试产品进行激励, 特别能够提供 1kHz 以上的高频激励, 具有高的平均激励能量。
- (4) 低频激励能量分布存在严重缺陷, 特别是 500Hz 以下的低频激励能量较差, 导致不能有效激发产品的某些缺陷。
- (5) 拖尾效应可产生频率间隙, 将导致不能在受试产品的各个部分产生适当的应力。

(6) 由于激振器(气锤)的磨损, 激励频谱可能会随时间的变化而变化。另外, 如果气锤设计不合理或者不能正常工作, 将严重影响振动台台面的响应谱。

针对早期气动式振动台的上述缺点, 美国 QualMark 公司从该类系统的关键部分(气锤、振动台面和控制系统)入手, 研发了一系列新型高效全轴随机振动试验设备。如在激振器设计方面, 在原有气锤的基础上, 设计和制造了结构简单合理、便于安装与维修、动态性能良好的 QualMark ASX 气锤, 大大改善了气锤击

打频率随机化特性;在振动台面设计方面,以多孔型台面代替原有的实体台面,大大改善了振动台面的响应特性;在控制系统方面,采用更加合理的控制策略,使得控制谱型更稳定。该公司的主要新型高效振动试验设备有 ELF(extended low frequency)、OVS(omni-axial vibration system) 和 OVTT(omni vibration table top unit) 等。

ELF 具有良好的低频能量分布,该性能在大量电子、机电产品潜在缺陷的激发方面效果非常好,尤其对表面贴装型电子器件以及焊点的振动试验效果最为明显。QualMark 公司还将早期的强化振动台和 ELF 的振动特性进行了对比,发现 ELF 在整个试验过程中具有较高的低频激励能量,且始终保持一个较好的控制频谱。OVS 的设计思想特别简单,即通过气锤对试件施加一个宽频激励,使试件在宽带激励下因共振而失效,该系统能够提供三轴六自由度激励,并且激励频带远远超过试件在使用环境中的频宽,有利于有效激发产品的薄弱环节。OVTT 是目前第一种轻便的单机反复冲击振动系统,便于在移动和在临时场所应用。

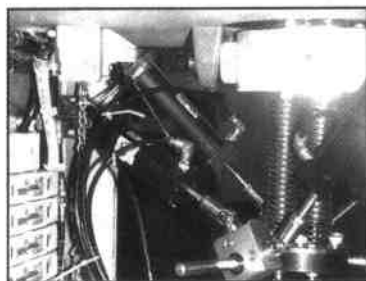


图 1.10 FMVT

国外其他一些专业公司在新型高效强化试验设备的研发方面也取得了不同程度的成功。例如,Entla 公司研制的可用于不同电子机械产品的失效模式确认测试系统 FMVT(failure mode verification testing),如图 1.10 所示。该系统通过三对气缸分别与三个移动 HUB 相连,三个移动 HUB 与中心 HUB 相连,中心 HUB 与振动台面固联,通过控制气缸的运动带动移动 HBU 运动,移动 HUB 带动中心 HUB 产生全轴随机

振动。此外,还有 Screening Systems 公司研制的移动振动筛选系统 (mobile vibration screening, MVS) 等。

目前,国外许多专业公司具有研发和生产可靠性强化试验设备的能力。如美国 C. Hanse Industries Inc.、Screening Systems Inc.、Theromotron Industries、Entela Inc.、Tenney Environmental、Hobbs Engineering Corporation、QualMark Corporation、Envirotronics, 意大利 Angelantoni Industrie s.p.a., 英国 Cape Engineering Corporation 等。

5. 可靠性强化试验技术的应用

可靠性强化试验技术能高度压缩试验时间,使产品的潜在缺陷在设计和制造阶段得以暴露,为能根治设计和制造薄弱环节提供确切的改进信息,大大减少产品研制的费用和周期,缩短产品上市时间,使得上市的第一件产品就具有“成熟的可靠性”,并大大降低产品维修和使用的总费用,为制造商赢得良好的信誉。因此,从

20 世纪 80 年代末到 90 年代初,国外特别是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、计算机、医疗、能源、交通、航空、航天和军事等领域,呈现出蓬勃发展的趋势,取得了巨大的成功。

首先,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 RET 作为一项很重要的服务内容。据 QualMark 公司在 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^[7],均获得了显著成效。美国为航空航天、军事工业和一般民用工业提供试验服务的 Garwood Laboratories 公司,所提供的一项重要服务就是产品的可靠性试验,其主要内容是 RET 和环境应力筛选(environment stress screen, ESS)。Garwood Laboratories 公司的客户在军事工业方面包括雷神飞机公司、波音公司、Northrop Grumman 公司、Meggitt Safety Systems 公司等;交通方面包括 TRW、GMATV、Breed 等;航天方面包括 AECABLE、Tecstar、JPL 等;医疗方面包括 Baxter、Allergan、Alpha Therapeutic 等;其他方面的客户还有 SONY、TEAC、AAI、OEA Aerospace 等。再例如,美国的一大主要电子加工服务供应商 MCMS 公司,专门为复杂印制电路板集成系统、存储模块及系统提供设计、工艺设计、质量保证、试验工程等服务,其中,ESS、HTOL(high temperature operating life)、RET 都是试验工程中重要的试验内容。另外,还有美国的 Wyle Laboratories 公司、美国的 Telephonic 公司和在欧洲最具实力的跨国性集团认证公司德国的 TUV Provide Service 公司等都将 RET 作为一种重要的可靠性保障服务提供给各个工业部门的客户。

另一方面,国外机械、通信、交通运输、航空航天、国防等行业的设备特别是电子产品的供应商们,已经高度认识到 RET 在其产品质量和可靠性保障方面的重要性,把 RET 作为改进和优化产品,加快新产品研制步伐,提高产品质量,赢得用户和市场的重要技术手段。例如,以擅长制造高可靠嵌入式系统计算机和外围设备而著称的美国 AMPRO 公司,现在所开发和生产的新产品如核心模块 CoreModule/4GE 和 Little Board/486e CPU 等都要经过严格的 RET 试验来保障质量;再如在数据获取与转换元器件、DC/DC 转换器、数字面板伏特计、计算机模拟 I/O 板产品中占据世界主导地位的 DATEL 跨国电子制造公司,在产品设计和早期加工阶段,反复采用 RET 技术,查找产品在电子和机械方面的潜在缺陷,使产品在尽可能短的时间内成为成熟和可靠的产品。另外,世界著名的 Compaq 公司、Motorola 公司、美国的 MSL 公司、美国的 TNAC 公司、美国的 Parker Hannifin 公司、美国的 VICOR 公司,以及有名的福特汽车和惠普公司都使用 RET 获得产品的高可靠性和实现产品快速更新换代。在航空、航天方面 RET 试验技术近几年来应用越来越多,发展也快,波音公司已于 1994 年在波音 -777 飞机上成功采用强化试验方法,并在波音 -737 改型上也得到应用。