

前言

建立一种新的规则总是漫长而艰辛的，不由的想到一个有名的故事里的一段话：

在接受的难度上、执行的艰险程度和成功的不确定度上没有什么比得上尝试引入一种新的概念更高的了 — 尼可罗·马基雅维里《君主论》

高加速寿命测试 (HALT) 和高加速应力筛选 (HASS) 都是通过运用高于环境中存在的应力来加快发现和改进产品设计和制造流程。在写这本书之前，作者和作者所咨询的许多公司已经运用这一方法有三十多年了。但即使到现在 1999 年，使用这一领先方法的公司没有公开他们的成功案例以免让他们的竞争对手了解其相对传统方法在财务和技术上所拥有的非凡优势。这里简单列举一下相对传统方法，加速测试方法的优势：

1. 产品开发时间上缩短了百万数量级
2. 产品投资回报率上提高到百万倍
3. 产品可靠度提高了几千倍以上

HASS 和 HALT 不是用于测量产品的可靠性比如 MTBF 测试，而是以一种积极的方式来改进产品。本书主要是阐述作者即本方法的发明者所应用的理论和方法。这种方法的积极性在于通过在 HALT 中运用超常规的应力来找到产品正式投产前存在的薄弱环节然后运用 HASS 高应力的方式快速筛选出生产中存在的缺陷。这个方法如果能够坚持完完全全的运用都会取得成功，如果不能按本书所说明的步骤进行，有可能所有的努力都毫无价值，我就看到这样一些例子：由于忽略了其中的一些关键步骤，造成产品无论在保修期还是其之后的故障率都惊人的提高了许多。所以在实际运用中那些声称他们也在运用 HALT 和 HASS 却没有按照本书方法做，他们所取得的成就就没有正确使用这一方法可能来得高了。HALT 和 HASS 并不是一个新的产品可靠性测试规范，而是一门如何积极努力达到产品设计和生产零缺陷又低成本的技术，是真正使产品达到所谓的永不失效的方法。

可以看到的是那些能够使产品无故障和客户满意的方法真能够带来利润提高的机会。相反的，从华盛顿技术研究项目组研究的结果来看，产品故障而使客户不满会严重影响产品的利润：

- 平均来看，每一个无法忍受而最终投诉的客户背后，还有 26 个客户选择了沉默
- 平均每个客户会将故障告诉 8 到 16 个人
- 91% 的客户将不会在采购他们讨厌的公司的产品
- 如果能够有效解决客户的投诉，大约 90% 的客户还会选择同一家公司
- 吸引一个新客户所需的代价是保持一个老客户的五倍

本书是整理自作者对 HALT 和 HASS 所做的演讲,演讲中包含了过去这么多年理论技术和设备的改进,第一次演讲追溯到 1981 年,到在写本书的时候,就分成两场演讲,一个是两天的理论基础演讲,另一个是一天的实验室实际操作,介绍如何正确使用测试设备。本书是希望能够全面介绍 HALT 和 HASS 的方法和理论,但在其它地方所提到如何正确使用 HALT 和 HASS 就不包括在本文中。章节包括了应力分析、动态分析和失效机理分析,这些章节都参考了许多文章,这些参考文章都会相应列举出来。

章节的顺序适合那些已经了解的物理失效模式和测试所用的设备,有利于他们加深理解。对此不熟悉的读者可以直接跳到第七章物理失效模式和第十章测试设备然后再看第二章 HALT。第一章只是做一个铺垫为后面章节做深入探讨做准备。需要注意的是 HALT 和 HASS 的方法还在迅速的发展,设备也同样在不断改进。第一章对 HALT 和 HASS 做总体介绍及讲述其发展历史,并在结尾列举一些成功运用这一技术的产品,同时还有许多成功的产品由于保密协议而无法列举出来,第一章也对物理失效模式做一点初步讨论,这样读者能够先对其有一个初步的概念。第二章就深入探讨 HALT,如何用 HALT 提高应力的方式在产品阶段来迅速找到产品的缺陷;为了找到 HALT 发现的缺陷常常需要筛选和故障模式激发,这就在第三章的 HASS 进行讨论,及如何运用 HALT 得到的信息来设定 HASS 测试规格。当规格确定下来,我们必须仔细验证这个测试规格不会大大缩短产品寿命,这是第四章的主要内容;第五章就会讨论 HASS 的优化,如何在确保成本最低的情况下得到同样有效的结果。

第六章会解释为什么在 HASS 中并不要求测试设备的测试条件完全一致和可以重复,本章中详细研究了在 HALT 和 HASS 中应力不完全一致性的情况下仍然给设计到生产的整个过程提速和节约成本的方法种种。第七章物理失效模式则重点解释为什么可以缩短时间即 HALT 和 HASS 如何作用,第八章讨论衡量产品设计和组装的测试系统测试能力,称为软件 HALT,因为他加快了软件走向成熟并拥有好的覆盖和分辨能力。它有别于通常所说的 HALT,而用作软件开发的工具。由于缺乏覆盖能力就会让我们发现许多市场退回的失效产品会“找不到故障”,“无法重现”或是“不能确认”,许多项目在对此还在做研究,但是由于由此带来的巨大技术和经济效益,领先者并不急于公布他们的成果。简单说,如果找不到问题的所在,就无法去解决问题。

第九章主要讨论 HALT 和 HASS 的测试设备以及设计这些特殊设备来测试的原因。第十章就举一个具体的例子来说明 HALT 和 HASS 的作用,其它一些应用 HALT 和 HASS 的例子也在此讨论,尽管许多应用还没有 NOVICE。当需要验证供应商的项目或是考虑收购一家公司,这些都非常必要。第十章还讨论包括外包对成本、质量和可靠性的影响。另外也对本书各章总结,得出一些结论并讨论作者到的一些常见的错误,特别建议目前还没有学习而正在运用这一技术读者参考这一章。

特别指出的是一些关于 HALT 和 HASS 研究的论文由于过多忽略了技术和设备的应用,可以想象其结果往往很差,尽管没有起到相反的作用。由于没有在这方面做很好的培训而做

HALT 和 HASS 时发生严重事故已经屡见不鲜。但是如果也只有如果能够正确使用，这个方法
是绝对安全的。

由于篇幅的关系其它文献提到的技术资料在此不作论述，但为了全面性本书会列出这些
作为参考。

要想彻底的理解 HALT 和 HASS 的方法需要对本书仔细阅读和理解。同时建议如果任何人
想很好利用 HALT 和 HASS，需要的不仅仅是对 HALT 和 HASS 了解，更需要对各方面达到精通。
正确使用 HALT 和 HASS 最终都会在技术和财务上得到回报。

享受 HALT 和 HASS 给你带来的成功吧，就像我一样。

格莱格. 霍布斯

维斯特明尼斯特

科罗拉多州

1999. 4

第一章 HALT 和 HASS 简介：新的质量和可靠性理论

伟大的思想总是受到传统陈旧思想的强烈抵触

— 爱因斯坦

1.1 简介

本章对高加速应力寿命实验（HALT）和高加速应力筛选（HASS）进行简单介绍和讨论，并列举一些成功的例子加以说明。在过去的三十多年间，作者、作者负责咨询的客户以及参加研讨会的公司已经运用这些技术并取得成功。这种方法给这些公司带来了巨大的经济利益和技术优势，所以大部分这些公司都不愿意公开他们的研究结果，相对传统的方法而言，它在效率和效益上已经不是一个级别。后面的章节将会对这些方法做更详细讨论，而本章做简单讨论为后面做铺垫。值得提醒的为了实现这些方法，测试方法和测试设备仍然迅速快速发展着。本章对这些方法做总体论述并指出其发展方向。

设计 HALT 和 HASS 的目的是提高产品的可靠性，而不是衡量产品可靠性的水平。与只是衡量产品可靠性水平而完全不能提高产品可靠性的可靠性验证（Reliability-Demonstration）和平均失效时间相比，这种方法更积极，这也是 HALT 和传统方法最主要的区别。

1.2 为何产品出故障

当产品的负载超过其本身强度的时候，产品就会出现故障，这个负载可以是电压、电流、力、温度或者其它变量，把负载分布曲线和强度分布曲线放在一起如图 1.1 所示。

只要负载超过强度，产品就发生故障。这种负载可以只是一次性也可能是多次作用在产品上，对前一种情况，就会引起过载故障；后一种情况就会导致疲劳损坏，其中相交的面积就代表出故障的产品。

随着时间过去，由于各种各样的原因产品就会变差，如图 1.2 所示产品老化。反过来说，可以通过强度曲线往左移（如图 1.2 所示）说明产品疲劳损伤趋势，一样的，如果加载的负载超过产品的强度，产品就会出现故障。不管如何，随着两曲线重叠面积的增加，产品发生故障也就越多。这也可以通过移动负载分布曲线往右移（如图 1.3）也得到同样结果，产品也同样出现强度降低时引发的故障，这也就是 HALT 所应用的方法：就是通过增加负载造成故障，从而找到产品薄弱环节。从图中也可以看出不管选取其中任何一种方式我们都可以得到相同的故障结果。这个最简单说明的还是相当正确的，读者可以通过详细的推算来证明，但这里就只做一个简单的说明。

1.2.1 浴盆曲线

产品到市场后出现的故障分布大概分为三种，产品出厂是就存在故障称为“婴儿期失效”，或是产品薄弱地方会出现故障；另一种是由于外部所施加的负载超过产品本身强度造成的，第三种即使没有任何缺陷产品也会逐渐的磨损老化。当把这三种类型故障放在一起形成一个分布，这个分布就叫做浴盆曲线，图 1.4 所示。

浴盆曲线在很大程度上会受到 HALT 和 HASS 的影响：

1. 产品筛选（HASS）可以消除由于生产的产品本身缺陷所造成早期失效来降低曲线的第一部分的早期失效率

2. 可靠性好的产品 (HALT) 可以降低曲线第二部分由于外来负载造成的故障率

3. HALT 也将磨损老化部分往右推移

以上将会在本章后面做详细讨论。

1.3 HALT 和 HASS 简述

HALT 是高加速寿命测试 (High Accelerated Life Test) 的英文缩写, 在 1998 年, 作者在使用了“强度设计”这个词多年之后选取了这一名称。HALT 这个词并不是什么商标或者服务名称, 所以鼓励大家在做 HALT 的时候使用这一名称, 它说明的是一种方法, 而且已经广泛的使用了, HASS 也是同样。HALT 是产品设计和制造工艺设计过程中, 在加速测试环境下对产品施加所有可能达到的应力以期找到设计和制造工艺中的薄弱环节。找到每一个薄弱的环境都提供了改进设计和制造工艺的机会, 从而达到缩短设计周期、提高可靠性和降低成本。HALT 缩短设计周期从而公司可以更早推出成熟的产品。研究表明如果可以提前六个月推出成熟的产品, 在产品整个生命周期内就可以提高 50% 的利润。

HALT 和 HASS 测试施加的应力并不是完全模拟产品使用过程中出现的应力, 而是通过小量样品在很短时间内挖掘产品设计和制造中存在的薄弱环节。施加的应力逐步升高并超过使用环境可以存在的应力范围, 直到产品强度达到技术能力所能 (第二章【1】和【3】)。要达到技术能力的极限就要求解决测试中所发现的问题, 即使问题出现在产品使用规格之外, 就是指在没有过分支出这一所谓的条件下, 只是解决在产品正常使用环境下可能出现的问题, 从而将产品做的尽可能的结实可靠。这需要很好的判断, 工程师很容易会做过头, 把产品设计的过于强壮或是在制造工艺花冤枉钱。HALT 发现的许多问题都比较简单而且解决成本不高, 比如:

1. 由于振动而从板子上飞下来的电容可以通过粘在板子上或者移动到振动无法起到作用的节点位置上。
2. 更改没有达到最合适参数条件的元件
3. 振动和热冲击造成松脱的螺丝可以用螺母固定住

自 1969 年以来, HALT 及其前身强度设计在很多案例中确实帮助降低产品的故障率、保修费用, 减少设计和投产后的投入, 缩短投入市场时间减少设计整体费用 50 到 100 倍, 在一些情况下更高。HALT 一个最主要的好处就是最小化验证设计所需的样品数。过去惠普公司使用的 STRIFE (应力+寿命测试) 也是 HALT 的一部分。HALT 的概念在 1969 年已经开始使用, 包括作者在内的许多人已经将它运用于不同领域的各种产品上, 部分使用的领域列出本章末尾的表 1.1 中。

作者第一次使用 HALT 是在 1969 年为地球资源科技卫星的望远镜做结构设计上。卫星系统中的望远镜是由位于加州 Goleta 的 Santa Barbara 研究中心制造的多普扫描仪。材料选用的是膨胀系数很低的 Invar 和 Fused silica, 光学组件是装在 tangent 杆上并可以不受太多压力而径向膨胀从而有效防止光学系统变形。望远镜直径是 9 英寸, 重 7 磅 (图 1.5)。镜片是只是通过粘胶固定。样品能够承受几个小时的 25GRMS 单轴随机振动, 温度变化在-70 度到 125 度的多个循环, 然后在高低温的 25GRMS 下也没有出现故障。几年后显示整个设计很成功, 可以承受在其工作时候改动一个镜片设计所造成的剧烈振动。由于尽早就完成了这个强度设计, 休斯航空公司才能够及时交出了价值一亿美元的太空飞船。

许多参加过作者讲座的人员已经将这一技术运用在上千个产品中去了,但是直到最近还没有将其公开,主要原因就是这项技术给他们在可靠性和成本上带来了巨大的效益。技术也在不断的改进,作者在 1991 年引入了激发和发现筛选方式来降低至少一个量级的筛选费用同时提高了几个数量级的效率。在 1996 年,作者引入了一种研究方法,可以帮助发现激发故障的能力提高至少一个数量级,即第三章讨论的激励模式。在 1998 年引入了软件 HALT 将在第八章讨论,在软件开发技术中,人们常碰到测试硬件和软件测试覆盖面不全的问题,可以由此来进行改善。软件 HALT 现在秘密掌握在几家公司手里,由于和提供咨询的公司有着保密协议所以作者看不到更多公开资料。计算出来的软件 HALT 投资报酬只需要几天,也就是说采购和进行测试所需的成本几天就可以收回来了。然后测试设备有可以运用于其他测试,又获得相当的回报,假设回报周期是两个星期,在这么一个设备一年就可以得到 26 次。即使没有提高回报速度,一年回报率高达 2600%,如此高的回报率,只要了解它的一定会乐于应用。这就是为什么少数先进的公司不愿意公开他们的结果从而泄露给对手信息使得他们也会运用这一技术。

HASS 是高加速应力筛选(High Accelerated Stress Screens)的简写,这也是作者使用“增强环境应力筛选”多年后在 1988 年重新选取的名称。这种筛选方式应用最大可能的应力(通常这个应力要超出产品验证的应力水平)从而缩短筛选所需的时间,需要了解的是如果应力使用得当,应力的的大小和造成产品失效之间是成指数关系(第七章),这就是可以缩短时间的原因所在。事实证明由于减少筛选时间降低设备投入,比如振动设备、温湿度测试设备及运作费用(电力和液氮)、测试监控系统及设备所需厂房,HASS 节约了巨大的筛选费用。缩短时间使通过应力激励筛选而获得的(第三章)。这种筛选必须通过 HASS 方法检验 Proof of HASS(第四章)来验证其所造成的累计疲劳损伤和产品寿命缩短时间是在可接受范围内。在设计 HASS 测试时候,HASS 安全性是一个非常关键的步骤,它验证重复筛选不会造成产品性能下降。只有得到完整的 HALT 结果情况下才可以制定 HASS。没有 HALT,产品设计的极限就限制了筛选可以最大程度使用的最高应力的水平而无法达到最快加速缺陷的出现和压缩时间,这情况可能在非常结实产品下出现。需要提醒的是如果产品不够结实,运用传统的筛选方式必然会缩短产品使用寿命,这在第五章会对此和其它有关有效筛选后产品寿命的课题做讨论。

1.4 HALT 和 HASS 的目的

在设计过程中使用加速应力条件主要目的就是要在有限时间内找到并改进设计和制造过程存在的薄弱环节从而在正式生产前有效解决。通常结实的产品的可靠性要比一般产品要高,因此通过 HALT 的增强产品强度获得高的 margin 使得产品可靠性要高一些,而为了使得生产的产品不存在任何隐含的缺陷或者至少在产品还没有出厂前找到并解决这些缺陷,HASS 就是通过加速应力方式以期在短时间内找到有缺陷的产品缩短纠正措施的周期并找到具有同样问题的产品。在 HALT 和 HASS 中找到的问题表示一个改善产品的机会。作者发现通过运用应力加速的方法达到快速提高产品设计的成熟(HALT)而获得的回报要远远高于 HASS。尽管如此,HASS 其本身还是有效的方式,进一步可以用抽样 HASS 或高速应力抽检(HASA)。应用 HASA 必须在要求产品的流程严格控制,因为出去的大部分产品都没有经过 HASA,而只是抽样检测的产品而已,这个会再后面章节给予讨论。

HALT 和 HASS 使用的应力不仅仅包括全轴同步振动,高速高温差循环,开关循环、电压和频率振荡、湿度,也包括任何可以发现设计和制造问题的应力,不仅仅是为了模拟产品使用环境而只是通过所有可能方式找到设计和制造过程中的缺陷。使用的应力程度一般都会比产品

使用环境存在的应力要高，这样可以缩短时间，缩短问题发现所需的时间。当找到产品的薄弱环节，关键的是故障模式和机理而并不存在和产品使用环境应力相互对应的关系，如图 1.6 所示，图中 λ 是某故障模式的瞬时失效率，两条曲线中一条表示了热应力和故障率的关系，另一条是振动和故障率的关系。垂直方向的两条线分别是产品使用环境和 HALT 测试下故障率。可以看得出来，在产品使用环境下温度造成得故障率和 HALT 下振动造成得比率比较相似。

通常情况下 HALT 下发现故障得应力和真正使用环境造成同一故障得应力往往不同，这也是为什么更应该关注故障模式和机理（mechanism）本身而不是应力超出使用环境得多少。

机理（mechanism）这里是指造成故障的条件诸如高温融化、超出正常负载或是超出最大强度，相应的故障模式可以是元件分离、失去弹性或是失去张力。用惯了传统测试方法的工程师常犯的错误的时考虑产品的 margin 而不是故障本身。在 HALT 和 HASS 中是使用极端的应力强度以最短的时间找到故障，通过这样可以找到正常使用环境下同样会出现故障，只是应力不同而已。比如说，洒水车公司发现在使用环境下每天温度循环可以找到某种缺陷，但是在 HALT 测试中的温度冲击循环并没有发现这一缺陷而是在全轴振动，当解决这个问题后，使用中的产品就再没有这个问题，这也就说明了全轴振动找到的缺陷是的确存在的缺陷。还有一个例子，当减少导体的横截面积时，就会造成机械应力的集中和电流密度提高，这个在 HALT 和 HASS 中可能会在温度循环或是振动找到这一缺陷而在产品使用时可能由于电子转移而引起的。不管哪一种，都需要解决由于横截面积减小这一薄弱环节。

除了应力之外，也可以通过其它参数来挖掘产品的薄弱环节，作者的经验是比如改变齿轮的直径、产品内部的液体 pH 值、流过血液分析仪液体的杂质含量、胶带的厚度，流体流速、试管或导管的尺寸、皮带侧面的负重、等等等等参数。其核心就是任何可以帮助找到所有可能提高产品强度减少产品受各种条件影响导致功能不稳或致命故障的可能性，任何可以帮助增加产品 margin 的参数都试用于 HALT，接受这种观念对于没有接受过 HALT-HASS 培训的大多数工程师来说由为困难。

关于在设计阶段使用 HALT，最好在产品设计最早阶段开始，这个阶段加入所有可以提高产品性能的方法，需要记住大部分 HALT 中找到的产品的薄弱环节如果没有改善毫无例外会在产品使用环境下出现。这已经被 HALT 的用户证明了上千次了。当然，工程师需要合理的决定在发现这么一个改善机会是否需要改进产品，这就需要验证故障模式及机理。但不要只是因为这一机会是由于产品非规定条件内使用而拒绝改善。好多例子也是由于产品非规定条件使用发现薄弱环境不做改善而是等到市场发现同样问题才做改进。如果在 HALT 找到问题，很可能就是的确就是一个问题。惠普公司过去几年里发表的报告，发现在 HALT 中发现的大部分缺陷没有及时解决，那每个故障会给公司造成将近一千万美金损失。强调注重故障模式和机理而不是发现故障的方式再多也不为过。只是关注 margin 通常会使大家允许已知的薄弱环节依然存在，并且最终导致市场也出现许多同样的问题，一直到采取措施改进为止。吸取他人的教训，不是专注于施加应力的的大小而是故障模式和机理。

HALT 和 HASS 并不只是适用于电子产品，也包括其它类型技术产品，本章结尾列举了一些类型的产品，包括各种类型的产品，比如吸震仪，口红、空气架、发动机、排放系统和电力控制系统等等。在深入探讨这门技术之前，让我们先了解与 HALT 和 HASS 同步发展的应力筛选技术发展史，传统的 ESS（增强应力筛选）关注产品生产中的问题而 HALT 关注的是产品设

计, HASS 用于寻找残留设计问题或是投产后生产引起的问题。

1.5 产品筛选的历史

许多在过去产品筛选犯的错误现在依然存在, 通过回顾历史我们从中吸取教训, 才能更好面向将来。上世纪 70 年代, 其实不止美国海军都疼痛于产品可靠性差的问题, 针对与此做了许多研究, 发现导致故障的许多产品缺陷都可以通过温度循环和随机振动筛选出来。因此美国海军发布了一个应力筛选指南, NAVMAT P-9492, 要求海军采购的项目按照该指南, 并将其写进了采购合同总。超出美国海军期望的是这份指南通常被当成是美国军标, 并在应用中给其带来了可靠性方面巨大成功, 在指南中要求要做热冲击和振动, 但并没有要求它们同时进行。后来研究的数据表明振动和热冲击的组合的效率可以提高十倍, 并且由于测试设备减少而使整个成本降低。作者发现工厂要使产品真正达到没有缺陷除非使用组合应力激发方式 (Modulated excitation), 这会在第三章讲述。

70 年代后期, 环境科学研究院 (IES) 开始就 ESS 举行年会并分别在 1981 年发布了组成品筛选指南和 1984 年的元器件筛选指南。调查发现存在的三的主要问题并公布如下【4, 5】:

1. 调查的大部分公司都是和美国海军签署合同, 许多都按照合同要求进行应力筛选但并没有清楚看到成果, 还有一些就完全没有效果。许多合同造成的结果只是让生产产品的合同商利润提高了, 即使产品的可靠性并没有提高, 因为合同商可以将生产的产品全部卖给海军, 并由于可靠性不高则需要准备大量备件及维修工厂来修理那些出问题的产品。明显的看到, 对现有技术水平生产的产品来说, 合同中列举的筛选方法已经不是最有效的方法了。
2. IES 选取供应商进行筛选然后公布结果说明种种筛选的效果而不是更准确说出什么比较好, 或该做哪项测试, 更多参考【6】。在该准则中犯了一个错误就是认为热冲击是最有效的筛选方式, 这一个错误的概念到目前还有很大的市场, 但是, 大量 HALT 结果显示全轴振动在许多产品中诸多类型的故障有效性上远远超过热冲击, 这只有使用六轴向振动才成立。
3. 该准则强调 100% 筛选而不是纠正措施, 最后允许筛选变成抽样的方式。有趣的是将筛选定为产线上 100% 检测以最大化设备, 人力和其它成本! 这给一些设备厂商提供机会也给供应商提高价格的理由。

上述 IES 筛选指南里三个问题导致许多新手在尝试这个方法, 都相对低效率和相当资金浪费, 加上供应商因此而提高的成本或是销售进行筛选的仪器。如果只是基于 IES 筛选指南, 就会导致许多在经济和技术方面不成功的案例。许多公司放弃这一方法回到老路上或者只是简单满足合同的要求而已。

但同时, 一些有效的筛选方法在不断开发、尝试、改善和再尝试。相对筛选指南而言这些方法取得巨大成功因此大部分使用这些方法的公司都不愿意将这一新技术公开, 即使有些公司开始公开少量资料也删掉许多关键信息, 不如找到的设计缺陷数量、包修退货率和投资回报率 (ROI) 等。参考第二章之前一些没有公开的 HALT 的数据和第三章 HASS 带来的成本节约上。但是, 由于必须遵循咨询的保密协议, 许多非常成功的案例仍然不能够公开, 同样由于运用 HALT 和 HASS 不当造成的巨大损失也无法公开。但只要运用得当, HALT 和 HASS 还是很值的。

随着技术不断提升, 执行这一方法的设备能力不断发展, 当设备能力提高后, 产品的进一步改善也就称为可能。这种设备和技术相互促进已经好几个循环了。在写本书的时候, 作者还没有看到其发展的尽头, 设备的能力还没有达到当今技术的极限。

1.6 故障现象种类

在筛选过程中常包括几种现象，其中有机械疲劳损伤、磨损、电子迁移、化学反应等等。这些都建立不同数学模型并对不同激励或作用反应不同。化学反应和其它一些迁移效应从发生到结束都是根据 Arrhenius 模型或是其近似。应用筛选法时有些错误的认为 Arrhenius 模型总是正确的模型，也就是说温度越高故障率也会越高，但是这是不正确的，第七章会对此做更进一步深入讨论正确及错误运用 Arrhenius 模型。MIL-HDBK-217 电子器件可靠性估计只是根据这些概念而没有从科学角度出发，因此它并不正确并且完全起到误导的作用，特别用在提高可靠性方面，它要求降低温度即使降低温度也不能够减少产品故障率甚至相反有时会提高，比如说增加除了风扇外的降温手段，这就会带来新的故障模式并且没能改变已有的故障率。在【8】中对此指出有些电子元件在温度低于 150C 后就对温度不在敏感。

电子器件许多故障是自然的机械损伤：焊点老损，元件引脚老化，压合结故障及其它类似的故障。机械应力诸如温度、温度变化率、振动和其组合引起的机械疲劳损伤可以通过多种数学模型表示，最简单的是 Miner 标准模型，它指出了疲劳损伤是可以累加并且不可以回复，累加是以一种简单线性累加，也就是说：在不同应力造成损伤程度可以累加在一起，当达到 1 的时候，那么达到产品的疲劳寿命，故障也就出现了。对不同的材料，通过 S-N 关系（应力强度和故障所需循环次数关系）得到寿命疲劳损伤程度，一般的关系式如 Miner 标准模型所示：

其中：

D 是指累积的损伤程度，一般为 1

N 是应力循环次数

S 是施加的应力（如磅每平方英寸）

β 是应力的指数，一般在 8-12 之间。

设计和流程中的缺陷最后造成故障通常（不是所有）是由于应力集中到缺陷，这也是造成早期失效的原因。为了简单说明，我们假设由于焊点存在异物或空隙缺陷的应力要比其它地方高一倍，根据上面公式假设 β 为 10，那么缺陷地方累加的疲劳损伤就要比其它没有类似缺陷正常应力的地方（也就是指负载相同但没有集中应力）要快 1000 倍。那就意味着有缺陷的地方会疲劳损坏，但在其它没有缺陷的地方的寿命还有 99.9%。所有在环境应力筛选的目的就是在可能的最短和最经济条件下使产品的缺陷达到疲劳损伤。正确使用 HALT 可以使得设计产品到达几倍，或更长的产品寿命这样在随后的 HASS 会减少一部分寿命，这个当然需要通过安全 HASS 测试来验证（第四章对此会做详细讨论）。要了解的是“HASS 之后产品的寿命还有多少？”而不是“HASS 导致产品寿命减少了多少？”。同时要知道所有的应力筛选都会减少产品的寿命。这是一个很基本的概念，但是如果不熟悉筛选的确切概念常常会发生误解。正确使用 HALT 和 HASS 可以保证产品还有足够寿命并且由此能够大大减少这个项目的成本。

其它类型的缺陷的应力和疲劳损伤关系式也会不同，但是看起来都会由于应力的些许增加会得到很高的时间压缩因子。这就是 HALT 和 HASS 如何起作用的确切原因，第七章将做进一步讨论。

1.7 设备要求

第九章会全面阐述设备的要求，在这里先做一个简单的解释，这样读者可以在没有看第九章前也可以了解本书内容。如果不是不可能，那么使用最新设计的环境测试设备如全轴向振动和组合快速温度变化冲击（60C/min 或更高）设备，本书所讲述的技术就得到很大的加强。全轴向振动指的是三个轴向和三个旋转方向。

单轴和单频振动台只是激励一个特定轴向振动模式及其相邻频域，而扫频振动也是激励一个轴向的所有模式。而单轴随机振动只是同时激励单一轴向所有模式。而全轴向振动台同时激励振动频带内所有方向的所有模式。如果所有模式没有能够同时激励，那就会不能发现许多缺陷。显然，全轴向振动台最能够符合 HALT 和 HASS，因为它们要求尽快找到尽可能多的缺陷。在很早前增强设计（HALT 的前身），设备会加在高强度单轴向振动台测试。这方面在【10】做详细报道。因此，在生产产品上，使用最初的全轴向振动台就很快同时发现了三个设计方面的问题，而这些在单轴向振动中没法看到的。作者从这个实验的结果得出不同系统的有效性上也不同，所以这以后，全轴向振动成了不二选择。

其它类型的应力或参数也可以运用在 HALT 上，那么，就需要其它类型的应力设备。如果想研究变速箱的能力，可以使用含杂质的油、不合乎规格的齿轮或者是加载静态或动态的张力在变速箱上。如果研究的是 end piece crimping designs on power steering hoses, 可以同时使用温度、振动和油压的组合。这已经通过实践的检验，效果很好，可以在几分钟内找到设计的漏洞。为了研究机身在增压下的强度，那整个外壳浸泡在水里，快速做压力循环。这是在某些飞机制造厂目前的做法，水作为受压的介质，而其本身几乎不会压缩，所以当出现破裂的时候，压力就很快下降，避免出现爆炸出现的故障，而在空气中，这个问题就没法避免。那么寿命模拟上千个循环就可以在几天内可以实现。

注意，在 HALT 和 HASS 中，如果希望尽可能快找到疲劳损伤，越快可以完成，就可以越快结束，这样就减少测试所需设备时间，所以不是不可能通过运用正确的应力和加速技术降低设备成本。这适用于不只是振动的所有环境激励。在后面第七章讨论的例子说明可以将费用从 2200 万美金减少到 5 万美金，这只是使用温度冲击设备，将温度变化从 5 度/分钟提高到 40 度/分钟（不考虑电力损耗、相关振动设备、监控设备和人力）！在【11】中给出基本比较数据。另一个例子是增加 RMS 的振动水平 1.4 倍，那么就可以将振动系统费用从 1000 万美金减少到 10 万美金而到达相同效果。这些例子都很清楚说明运用现代先进筛选技术设计的设备的 HALT 和 HASS 测试可以很大程度提升成本有效性。

以下会列举在设计和生产中运用 HALT 和 HASS 所得的结果，其中一些是很早前的成果已经发表在一些刊物上，通常是一些公司的技术演讲上。后面一些使用最新技术和设备的例子在很大程度上还没有公布。当然最新的结果会更好，但早前的结果已经足够说明问题，虽然相对使用今天更新的技术和设备，它们到达的效果要低一些。

1.8 HALT 成功案例

1. 1984 年，随着 HALT 的应用，机电产品的打印机的 MTBF 提高了 838 倍，通过几次的 HALT 测试后，找到总共 340 个改进设计和流程的机会，然后在产品投产前采取相应的措施，结果产品最初的 MTBF，通过市场检验，是 55 年！产品尺寸是 10 英寸 x 18 英寸 x 27 英寸，重 75 磅。有趣的是产品的 MTBF 不会比开始投产时候的要高，随着一些问题失去控制的出现，它逐渐变差。而失去控制的可以通过 5% 的抽样 HASS（高加速应力抽样检查）来发现。为什么产品可靠性在投产之后不可能提高的原因是 HALT 使得产品已经在投产前很成熟了，这也是

HALT 的一个主要目标，这只有也只有改进任何发现的问题才可能到达。

2. 一个到 1983 年已经生产了四年的电源,通过传统的低速率,小范围的热应力筛选发现“即插即用”可靠性为 94% (即有 6%的不良)。通过 HALT 和 HASS,运用全轴向振动台和 20 度/分钟速率,四个月内的即插即用可靠性提高到 99.6% (即只有 0.4%不良),提高了 15 倍。随后一个电源在设计阶段得益 HALT 和 HASS,在投产后两个月内的即插即用可靠性提高到 99.7%! 公司同时报道进行可靠性证明的费用降低了 70 倍,主要是由于 HALT 已经发现所以与之相关的不良。随着 HALT 的使用,7 个产品在做可靠性验证时没有出现一个不良 (1986 年是作者得到该公司的最后数据),在 1986 年后即插即用可靠性到达 100%。

3. 1998 年,一个机电产品在四个月里面跑了四次的 HALT 测试。HALT 每次只需要两个星期。在这些测试当中,在全轴向振动、温度循环、开关循环和电压变化发现了总共 39 个缺陷,在每次 HALT 之后都对产品进行了改进,然后制作一个新的样品再通过 HALT 测试。而设计人员拒绝做任何改动除非再寿命测试中能够重现,为此进行了加强的寿命测试:十六个产品跑 12 个星期,每天 24 小时,并需要 3 个操作员轮流进行操作,结果发现了总共 40 个缺陷,其它 39 个缺陷和 HALT 先前发现的一样。而 HALT 没有发现的是由于润滑油变差模式而只有是再很强的运作才可能发现。在对 HALT 数据进行分析的时候发现这个导致这个缺陷的线索,但没有导致最终的故障的原因是一个技术员帮倒忙,每个晚上给螺丝重新加油 (没有通知作者),因此他知道这个故障但之前他不了解 HALT 的真正目的,所以故障没有出现。他的好心导致重要的故障模式没法发现。作者现在都把没有进行测试的 HALT 的产品锁好,防止好心的员工的“帮忙”。产品 HALT 测试为全轴向 20GRMS 振动,温度为-100 度到+127 度,及电子超过负载 $\pm 50\%$ 。而产品规格为振动 1GRMS 和温度范围 0—40 度。

4. 在 1991 年 2 月波音商用飞机的查尔斯.莱昂那多和作者的非正式讨论中,莱昂那多先生提到收到两份对一个电子箱两种不同假设条件下的报价,第一种用通常的 MIL—SPEC 方法,尔第二种使用“最佳实践方式”或 HALT 和 HASS 的方法。第二种显示价钱从 1100 美金减到 80 美金,重量减少了 30%,尺寸缩小了 30%,但可靠性证明有很大的提高。显然第二种方式被选中了。

5. 在 1992 年,作者做了关于 HALT 的三个小时的展示,展示中,作者将三个第一次接触的产品放入 HALT 当中,每个产品在一个小时内各发现一个已知的缺陷。而产品已经在市场上卖了好多年而且有许多客户故障的报告。所有报告的故障的三个小时的 HALT 测试展示中都可以找到。这就说明只需要每个产品一个小时,就可以找到大部分市场反馈的故障。而制造商没有办法通过传统的模拟用户环境的方式重现这些故障,因此无法了解故障的模式而无法找到合理的解决方案,而只有等到 HALT 出现。其中三个中的两个故障模式是在超过规格边缘发现,一个在高温,另一个在低温,而第三个是在四倍于规格的 GRMS 的全轴向振动十分钟后看到。

6. 【9】波音飞机公司报道实验室中 HALT 发现的故障和市场记录下来的故障在很大程度上相对应。振动看起来是找到缺陷的最有效方式,特别是当和温度冲击组合一起的时候。而 777 是第一架在开始服务就获得扩展双引擎工作认证 (ETOPS) 的商用飞机,很大的程度上,成功来源于由于使用增强应力测试和有效的改进从而达到电子设备极低的故障率。在 1995 年冬和查尔斯.莱昂那多会谈时,莱昂那多先生指出波音 777 飞机在服务的两个月内的可靠性问题要好于六年后下一个最好的商用客机。

7. 【13】北电报道与类似数量的通过烤机测试的 PCBA 电路板而言,通过 HASS 筛选的 PCBA

电路板的市场退货率要下降了 19 倍。

8. 1997 年, 汽车尾灯组件运用 HALT 的成本为 “X”, 改善后的产品通过 MTBF 测试费用时 10 倍 “X”, 测量出来的 MTBF 时车寿命的 55 倍。无疑 HALT 给公司带来的好处要远远高于 MTBF 测试, 而费用要低很多。如果运行 HALT 得当, 这个结果时相当普遍的一个结果, 但必须要包括采取必要的改进措施。【12】包括了此案例分析。这个在作者后面的一次讲座上特邀的拉里·爱德森也提到。

9. 1998 年, 奥迪斯电梯在其网站上报道: “过去通常需要花三个月时间测试的实验现在只需要不到三个月的时间。HALT 用来验证电梯零部件在头 15 个月已经为奥迪斯电梯节省了将近 750 万美金。在和作者讨论中, 奥迪斯提到在一个电路板上发现一个特别的问题, 在一个产品上做了改进, 而在另外一个没有做。在没有做改进的电路板, 在迈阿米使用六个月之后发现和 HALT 相同的故障。作者就此开玩笑说在 HALT 的两天相当于迈阿米的六个月!

1. 9 HALT 和 HASS 的一般评论

成功实施 HALT 和 HASS 需要完成几步, 按顺序时: 激励, 发现, 故障分析, 改进, 加以验证最后记录在数据库里。前面的五步必须要完成才能达到效果, 第六步时为了未来产品提高做准备。

1. 激励是指将隐藏潜在的无法发现的缺陷变成可以发现的缺陷。焊接不好就是一个这样的例子, 当其隐藏时候, 除非很差, 否则是无法发现, 而激励过程就是将这一缺陷变为可以发现, 比如说裂掉。裂掉在一些特定条件下就可以发现, 不如说组合激发测试, 比如振动加上温度循环或是电子应力。激励通常可以通过 HALT 实现或者在其它激励筛选模式。

2. 发现是指确定故障存在。通过任何激励手段, 可能就显现出来可以发现。显现出来并不表示一定可以发现, 首先它要被放到一个可以发现的状态下, 也许需要组合激发, 然后它才能够真正发现得到。假设我们将故障放到一个可以发现的状态下, 然后通过烧机和其它外部测试发现这个缺陷, 我们才能够进入到最困难的一步, 那就是故障分析。

3. 故障分析是指确定故障发生的原因。就拿焊点的问题来说, 我们需要确定为什么焊接会不良。如果做 HALT, 不良可能是由设计造成的, 也就是说, 可能是在振动时候焊点受到过大应力或者是热膨胀系数不相匹配。如果在做 HASS 的时候发现, 假设设计已经成熟 (如果有设计变动就不一定了), 那么可能焊点本身就有问题。在什么方式下发生故障以及为什么发生故障进行详细说明, 这样就可以到下一步如何改进上了。

4. 改进措施是指合理改变设计或制造流程使得故障不在发生。如果成功实施, 这步绝对的重要。事实上改进措施也是进行 HALT 和 HASS 的最主要目的。

5. 加以验证是指通过测试确定产品的问题是否已经得到解决, 造成故障的缺陷已经不复存在了。解决方案有时不一定有效或者造成其它问题的原因很特别还没有能够解决。另外, 产品运作时候引起的问题可能必须通过重复先前的条件才能确定问题是否解决。需要提醒的是在常态下没有应力通常无法发现问题。一个验证 HALT 发现故障的改进措施的测试方法是再做一次 HALT 从而确定产品是不是和先前一样强壮, 或应该更好一些。如果是在 HASS 阶段, 那么在对产品做一次 HASS。如果问题已经能够得到有效的解决, 同样的问题就不应该再出现。

为成功提高产品可靠性完成前面这五步是尤为重要。如果其中任何一个步骤没有正确完成，那么就没有起到提高作用而导致产品的可靠性还是保持在一个比较低的水平。

6. 最后一步是将学到的经验放进数据库里，当发生类似的问题就可以从中获取有价值的知识。正确使用 HALT 和保持良好的数据库记录的公司很快就设计和制造结实的可靠性高的产品。它们同样在 HASS 方面取得很大成功，从而进一步到 HASA，HASS 的抽样检验模式。

HALT 和 HASS 与传统方式之间的比较如表 1.1 所示。HALT 和 HASS 是一种主动的方式去寻找提高产品的可靠性，而大部分的传统方式只是测量产品的可靠性而不是提高。

1.10 总结

在今天，在越来越多的商用和军用产品要求做 HALT 和 HASS。许多领先的商业公司已经成功运用宽频域全轴向振动和高速温变系统的 HALT 和 HASS。但是，由于由此带来的质量和可靠性的大幅提高和成本下降，大部分公司限制公布它们的结果。太空署和军方在接受这一方法要慢一些，主要是运用高于环境中的应力 HALT 和 HASS 对他们来说还比较陌生，而且很难用在合同具体规定和解释。最近几年，军方项目已经转向 HALT 和 HASS，已经不在继续事由 MIL—SPEC 做环境测试，而是加如了很长的保修期限，一般在 15 到 20 年之间。

为了到达最高产品质量而采用 HALT 和 HASS，必须要进行企业观念的改变。最基本的观念，简单来讲就是“不论以何种方式找到产品薄弱环节，并将其作为提高产品的一个契机”。这是一个全新理念。

有一些合同，在军方和政府中，错误要求使用 MIL-HDBK-217 或类似的可靠性估计方法，因此导致项目运用错误和误导的 MTBF 估计。【7】对此做了很好的讨论。HALT 和 HASS 关注提高产品可靠性，而不是测量可靠性。

最好测量产品真正可靠性的方法就是在用户使用环境下测试无数的产品很长时间可以得到。那这将毫无疑问延误产品投入市场并且太晚提供可靠性数据因此没有时间采取纠正措施。通过去掉只是带来很小机械疲劳损伤的低应力测试而代以高应力测试就可以很大程度压缩时间。这样可以将测试时间从几年到几个月。而 HALT 和 HASS 方法更进一步提高应力水平超过产品规格允许范围从而减少故障发生时间到几天，几小时甚至几秒。

后面的章节会做更进一步详细解释 HALT 和 HASS 的各种特性。一些成功运用了 HALT 和 HASS 的产品在表 1.2 中列出。由于保密协议这表中没有列出所有的产品。

第七章 物理失效模式 (PoF: Physics of Failure)

7.1 简介

对于产品如何失效的分析称为失效模式分析。在第一章中已经对其中一个失效模式做了简单的分析，本章会做进一步的分析。需要了解的是导致的结构疲劳磨损的振动、开关循环或热冲击等测试使用的应力和产品实际使用中存在的承受应力之间具体的联系，实践证明在许多进行 HALT 和 HASS 的产品普遍存在这么一种联系。另外在整个失效模式分析领域里也存在着许许多多的其它类型的联系。例如在马里兰州大学的 CALCE 电子产品封装研究中心就有上百个学生在他们的硕士和博士研究课题对此进行研究。本章只是对这些进行简单的介绍，如果读者有兴趣进行更深入的研究，可以参考本章结尾列出的参考文献。

普遍来说存在两种失效模式，一种是由于瞬时超载，另一种是自然疲劳。例如进行拉伸实验，如果负载迅速增加所导致过应力，即超过材料自身能够恢复的最高强度；如果是相对低的负载，来回作用一定的次数最终也会造成疲劳损伤，即使是相对强度而言很小负载。又比如通过线路的电流，如果电流非常高，线路温度就随即升高，然后像保险丝一样熔断；但在低电流下，随着电子转移携带走足够的材质本身最终也会电流汇聚导致线路出现故障，也像保险丝一样，随着线路截面减小和电流密度增加而像保险丝一样。

在进行失效模式分析过程中，人们常常希望通过建立数学模型来描述产品的失效模式，从而可以对各种各样的应力进行分析，这样就能够将产品设计更牢固或用来计算产品寿命。需要提醒的是这类模型不可以用来计算 MTBF，因为 MTBF 要求的是固定的失效率，这个失效率不是由于磨损而是由产品缺陷造成的。尽管如果愿意，对这两者进行研究也是可以的。以作者的观点来看，根据所给的假设所作的工作缺乏建设性。如果工程师已经知道产品的缺陷而想计算对 MTBF 的影响，除非他知道确切产品具体使用的环境也许可行，但往往这种情况是达不到的。

在 PoF 中一个最关键问题是运用科学的加速转换公式来合理的描述 HALT 和 HASS 的结果与具体产品使用可靠性之间的关系。在本章的其它地方，用“时间压缩因子”来取代“加速转换因子”。在 HALT 和 HASS 中，发现产品中存在的薄弱环节然后进行失效模式分析，进而找到改进薄弱环节的方法。如果不想通过 HALT 和 HASS 而进行失效模式分析，那就需要对产品各个方面而不仅仅是薄弱环节进行研究，那将会花大量的时间。这就体现了做 HALT 测试的优势，也就是减少不必要的失效模式分析。如果工程师已经拥有类似产品的经验并且知道如何对产品进行改善，那就可以省略失效模式分析。作者本人听说有人想通过模式分析来虚拟 HALT，这一般不会成功，主要原因有三：

- 1) 由于不了解，设计和制造中的缺陷没法考虑进去
- 2) 由于要对所有可能的故障模式进行非常仔细的分析，需要大量的时间和投入。

3) 产品是根据它可能设计制造的方式而不是它实际设计制造方式

例如工程师为了对随机振动损伤进行量化,就需要了解所关注点所受的变形和加速应力的历史数据,如果只是拿到应力加载状况而没有更进一步信息,就很难用频率分布图来计算疲劳损伤。必须了解的是通常很难拿到那些历史数据,所以不能用一般的方法进行故障模式分析,除非是先假设加载在产品上的应力,但这样也只能是找到产品的最薄弱环节而并不能获得产品寿命信息。

7.2 机械疲劳损伤 — HALT 和 HASS 的如何实现

HALT 是用来寻找产品设计和制造中存在的薄弱环节,而 HASS 是发现零部件和组装中存在的缺陷并加以改正。事实证明有缺陷的零部件通常其应力要高于没有缺陷的零部件,这正是导致零件失效的原因。比如说焊点中有气泡或者零件引脚弯得太过了,又或是运送不当造成扭曲变形,那么那里的应力会比其它地方的要高。

最根本的是许多类型的应力所引起故障失效加速因子并不是和应力成等比例增加,大部分情况下是成指数级增加的,其解释如下:

最基本的失效模式是由振动、热冲击、湿度或开关循环等应力所引起的机械疲劳损伤,它们之间的关系是:

D

其中, D 是米勒累积疲劳损伤函数

N 是应力循环的次数

S 是单位面积施加的应力

β 是材料特性



图 7.1 中的应力和失效所需循环次数(S-N)图来自斯坦博格[3],通过对样品进行张力疲劳拉伸得出的拉伸力和循环次数间是一个指数分布,从而验证等式 7.1 的存在。参数 β 是曲线的斜率,通常在高应力下大部分材料是在 $8 \sim 12$ 之间,那么在低应力下,所需的循环次数就增加很多。

对图 7.1 进行分析(7075-T6 型铝),我们可以得到在施加不同压力下所需要的循环次数:

1. 在 40KSI(千帕)下需要 2,000,000 个循环
2. 在 80KSI(千帕)下需要 2,000 个循环

由此看出,尽管应力只是增加了一倍,但寿命就减少了 1,000 倍。这种加速模型在机械引起的疲劳损伤和其它类型故障模式都通用。注意的是每个循环施加的应力对疲劳损伤是累加而不可逆的,除非是材料融掉重新铸造。高应力下所造成的疲劳损伤其实和低应力多循环所造成的损伤是一样的,这也就是 HALT 和 HASS 工作的原理。

等式 7.1 说明了增加应力可以达到加速筛选原因,假设振动的 RMS 增加一倍,再假设 β 为 10,那么疲劳损伤累积的速度就要加快 1000 倍,这就意味这可以缩短 1000 倍,这样就可以大大提高筛选的经济效益了。本例中,热冲击的循环次数可以减少 1000 倍或者是振动时间可以缩短 1000 倍,相对的,HALT 和 HASS 的设备费用就相对减少,施加高应力减少测试时

间就可以达到减少成本的目的，这也是使用加速方法的基本原理。

零部件在使用过程中出现非老化性损伤通常是由于其本身存在缺陷导致其应力增加所致。一个小小的缺陷往往导致应力集中 2 到 3 倍，这就是说它所承受的应力就 2~3 倍于没有缺陷的零部件，由此可以看出，一个小小的缺陷会指数倍速缩短疲劳损伤时间。例如如果应力集中了三倍， β 为 10，那么加速因子大概为 6 千万倍，应力集中了 3 倍是相当的高但在 V 型缺口出和设计很小的倒角中是存在的。

7.3 振动的例子

假设加载在产品上的应力是振动，而引起产品疲劳损伤的主频率是 1000Hz（这个假设的频率不会影响讨论的结果，因为循环次数的比和假设无关），那么样品在 40,000 帕斯卡的应力作用下 33 分钟会失效（20,000 循环/1000 循环每秒/60 分每秒=33.3 分），而在 8,000 帕斯卡的应力作用下只是需要 2,000 个循环即不到 2 秒钟。

从例子中可以看出运用可以达到最高水平的振动会给产品施加最大的应力。振动 GRMS 水平翻倍则应力也翻倍（如果线性），那么所需的振动时间就可以减少 1000 倍！这就是为什么用 6 轴振动如此有效找到缺陷而且是通常比其它应力的要多。

没有使用 HALT 是所需成本曲高。比如说，如果总体上振动水平降低一倍，那么就需要 1000 倍的振动台来做筛选。如果一个振动台在给定的振动水平下完成产品筛选需要费用为 10 万美金，那当振动水平下降一倍时振动台费用就要增加到 1 亿美金！这还没有包括每台所需的测试工装夹具、操作人员以及厂房空间，还有同时运行 1000 台振动台引起电力系统的不稳定性。

很明显，当考虑到花费如此巨额资金情况下需要选择更有效的方法，这也就解释为什么许多公司想用普通方法但最后受挫被迫放弃的原因，由于花费巨大或者当他们缩短筛选时间由数小时到数分钟却发现由于有效性降低而很少找到问题。在这种情况下，由于部分缩短了筛选的时间，有可能本应在使用五年后才出现的故障在几个星期就已经出现了，这可是大家不想看到的。任和其中一种方法都无法在今天这种商业竞争环境中获得成功，需要的是采取任何一种提高筛选强度缩短时间到达快速有效的方式。

7.4 温度变化的例子

另一个例子是来自[4]，在其文章中，斯米特森 Smithson 举了一个通过热冲击循环来发现三极管分层问题的实验。将 40 万个三极管样品分成四组，每组 10 万个然后通过不同的热冲击循环，热冲击温度变化速度从 5C/min 到 25C/min，循环直到所有的不良品都失效约 10% 为止。直到最后一个失效所需的循环次数画在双对数线性图上如图 7.2 所示的温度变化率和不良所需循环次数，直线形式符合 7.1 的公式。由图所示在 5C/min 需要 400 个循环而在 25C/min 只需要 4 个循环，作者推导在 40C/min 是只需要一个循环，也在图中显示出来。实验的结果只是针对某一种具体的故障并不是完全适合于任何一种故障形式。

图 7.2 可以计算出筛选时间和温度变化率的关系，在两端是：

1、5C/min 需要的筛选时间是 440 小时

2、40C/min 需要的筛选时间是 0.1 小时

由此看到相差 4400 倍！这就意外着运行在 40C/min 的热冲击实验设备测试所得的结果在 5C/min 需要 4400 个同样设备才能达到！如果一个热冲击设备费用为 5 万美金，那么费用就会从五万飙升到 2.2 亿美金！同样，这还没有包括每台所需的测试工装夹具、操作人员以及厂房空间，电力需求。还要注意的，由于减少在设备内壁热传递量和在短时间测试内壁温度延迟的原因，温变速度在 60 度/分消耗的液氮要少于 25 度/分。如果需要给测试产品吹制冷风的话，其效果更明显。

上述的例子是基于产品缺陷对温度变化比较敏感，当并不是所有的产品缺陷都敏感于温度变化。如果缺陷是敏感于循环次数和高低温度差的话，那么就需要选取最大的温度差得到所需循环的最少次数，筛选所需的时间就是循环次数和最高温差的线性关系而不再是指数关系，在此，筛选成本和温差范围成大概反比的关系。在当前技术下，由于产品的温度而不是测试腔温度是可以控制，驻留时间就可以省略。同时注意到现在领先的厂家使用的筛选方法是同步施加几种应力从而达到测试设备最少化，同时在几种应力同时作用下发掘和找到比单个应力更多的缺陷。

目前为止，我们讨论了由于机械疲劳损坏的故障模式，这也是电子产品可能最常见到的问题也是我们为什么加于讨论的原因。失效机理领域是一个很广的领域也有许多这方面讨论的很好的书籍和论文。在此讨论的内容还远远没有覆盖足够广的内容，所有列出了一长串的参考文献供有兴趣的读者参考，得到更多。

参考【5】埃迪.哈基姆讨论了许多微电子故障模式值得推荐一读，其它列出的参考文献也是如此。

7.5 使用何种应力

HALT 和 HASS 的初学者常常会问：到底用什么应力好？正确的答案是：所有。如果没有对此做详细的讨论很难对此答案真正理解，主要是很多的文章都说烤机(burn-in)和热冲击就可以解决所有问题。通常这是完全错误的，没有一种应力可以找到所有问题。同样有些缺陷是只有在多应力组合情况下才会找到。在某些情况，需要用应力组合找到潜藏的缺陷而其它或其它组合找到特定的缺陷。在此对一些主要的应力做简要的讨论：

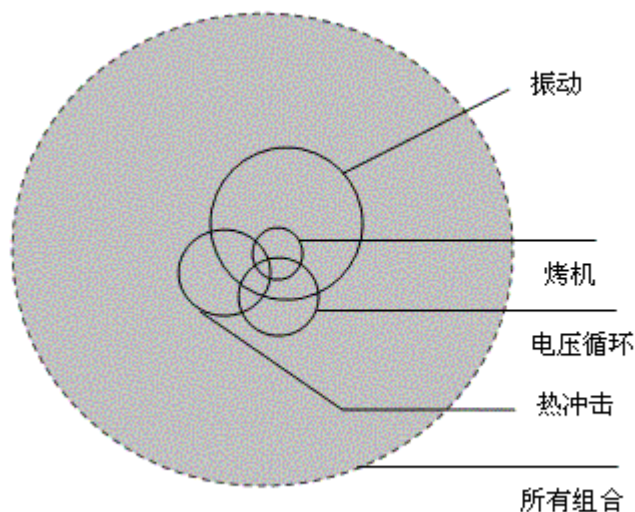
1. 烧机：工作温度的升高，通常还伴着电压和方向电流等。升高温度会激发化学反应造成电子漂移，这些都在阿尔恩尼尔斯等式(Arrhenius)讨论。烤机发现的缺陷主要包括：硅扩散，裂口出氧化以及时钟响应太过敏感。其它缺陷就很难通过烤机来发现了。
2. 时钟漂移可以找到时钟响应太过敏感的问题
3. 开关循环：循环对产品开机关机操作。这会造成电流冲击和对焊接点快速加温，激发热-机械缺陷及设计不足之处，开关循环也可以加速电子转移。开关循环非常适用于电源测试，特别是同时施加 6 轴振动和快速温变热冲击，因为这种组合产生很高的应力。一种电源 HASS 的组合方式为 6 轴振动、低温和开关电源。这种组合对发现电源中的缺陷有着超一般的效率。
4. 温度循环：造成不同零部件子系统的不同的热膨胀和温差，前一种对温度变化速度不敏感，但后一种就不同。这两种效果可以同时存在和相互影响。高温和低温也可以找到产

品设计的一些边界所在。可以发现的一些缺陷包括：内部连接问题、不良焊点、线路及球型节点缺陷、时钟响应太过敏感及对变化敏感的缺陷。调节激发（modulated excitation）在和温度循环同时使用时特别有效，温度循环通常造成裂缝，但必须需要振动来找到这一裂缝。因此，调节激发是 HALT 递增应力测试的一部分。

5. 电压变动：找到设计边界问题，也找到在边沿工作的元器件。也许是由于温度变化造成元件值变化的原因，所以当和高温和低温界限组合一起是，电压变动对找到边界状况相当有效。
6. 振动：通常可以找到机械设计中的问题，比如对大器件固定不够，由于某些原因无法锁紧，或是在设计的时间没有考虑到绕线等问题。但焊接元件到电路板上的焊点问题也可以通过振动发现，特别是和温度循环组合一起的时候。
7. HAST 是高加速应力测试，其中包含高压、高温和高湿。通过增加气压可以避免湿度提高时造成凝露现象。湿度可以找到接地和绝缘不良和其它一些问题。通常这个测试用在全自动工厂测试那些被掩盖焊接的元件，有时会在实验前洒上盐水以加速腐蚀。
8. 湿度通常在高温下使用以加快腐蚀问题，这个测试如果在 HALT 测试之后再跑是一个不错的选择，因为有些裂了的元件只有在时间和湿度长期作用下才会显现出来。建议所有通过 HALT 的产品都去过 HAST，由此确定是否元件有裂缝。
9. 静电放电（ESD）通常衡量设计是否恰当，因为和其它应力缺乏共同效应，通常只是单独使用。在测试时，高电压作用在产品上验证产品是否对 ESD 敏感。可出货的产品通常不会做 ESD，而只是在 HALT 中做 ESD 测试
10. EMI 通常时用来验证设计的冗余度是否足够，通常在常温下进行。测试在其它温度可以找到在常温下无法看到的泄漏通道。

7.6 饼图

在假设一个特定的产品，其缺陷与应力激发关系可以通过饼图 7.3 表示。不同的产品会有些不同。为清晰描述，并没有包括所有的应力。图 7.3 所示的是通过应力将潜在的缺陷暴露出来【6】。如本假设的产品，有许多潜在的缺陷并不能够由单一的应力激发出来，比如说焊锡锡珠溅在线路上，并连在线路上，但是烤机和电压循环并不能够使其断落，但是振动就可能使其调落，热冲击也有一些可能可以使焊锡松动下来。另外，为了能够发现这个缺陷，这个锡珠要能够看到或者是听到（比如小颗粒噪音检测器）或者是电路或是结构功能检测出某些变化。需要提醒的是一些缺陷只有在应力激发情况下可以观察到而在一般环境测试无法发现的。已经有许多案例中看到有些缺陷只有在特定的应力环境下比如低温、6 轴向振动才会发现。另外一个例子是化学特性的潜在缺陷在高温下发生化学反应是缺陷才会显现出来，而通过振动、机械冲击或者是离心力等对发现这样一种缺陷完全没辙。所以必须选取应力来激发潜在缺陷成为可以在施加应力和撤去应力后还能够发现的故障。



请注意，这个饼图随着岁月变化而变化，在 1981 年画的图中，烤机是一个很大的圆，这是由于元件不如今天那么可靠。今天标准元件的故障率至少比 1980 年时候的元件低了四个数量级以上。烤机还是和以前一样有效，但是在电路板或高度集成的组装的所有缺陷中能够被烤机发现的就少了四个数量级别。今天还有一些产品由于误导和歪曲要加强烤机，而不是因为它发现的缺陷和所需成本可以接受。在电路板或高度集成的组装中，其它筛选方式比如全轴向振动和高速热冲击比烤机发现缺陷更有效率。因此，许多领先的公司都抛弃烤机方式而钟情更有效的筛选方式。一个人必须要不断问这么一个问题：“我应该如何激发缺陷，如何发现它们？”用了不对的应力不管测试多长的时间和多贵都会毫无结果。

在做了不下 100 个不同产品的 HALT 和 HASS 之后，作者发现，全轴振动可以发现比其它在单一应力上更多的缺陷。如果只可以使用一种应力，那么它是不二之选。但是需要说明的是没有一种应力可以称为最有效的。必须考虑到每种缺陷类型以及什么样的应力能够激发，什么样的应力组合和测试可以发现缺陷。通常需要同时使用几种应力以提高筛选的效率。不仅仅是因为组合应力比按顺序施加应力有效，同时组合应力运用现代最先进的设备可以大大降低成本。

同样注意到全轴振动和高速温变热冲击组合同时使用时能够激发和发现比它们单独使用更过缺陷。在疲劳累积损伤方面有一些例子显示单独使用某些应力会比组合应力的效果更好一些，特别时对一些 SMT 元件的焊点疲劳，在某种程度温度循环和振动单独使用时会更快一些，当然组合应力也可以到达这样目的，只是要还的时间相对要长。

图 7.3 在虚线包含内但在实线外的面积表示的是只有组合应力才能发现。这个面积是相当大的，因为许多缺陷只有在组合应力的激发下才会显现出来（参考第三章关于组合激发的例子）。在 19 个不同的领域的 33 家公司的 47 个产品 HALT 的结果在参考文献【7】有所论述，不同应力发现缺陷的比例如表 7.1 所示，其中列举的顺序也是施加应力的顺序，这个顺序尤为重要。

表 7.1 每种应力发现缺陷的比率

应力	比率
----	----

低温	14
高温	17
快速温变循环	4
全轴振动	45
温度和振动组合	20

注意到尽管全轴振动在快速温变循环后面才做，但是它发现缺陷的比率比其还是要高。这个结果在一定程度上是每个应力发现缺陷的数量，而不管它是什么时候被激发出来的。如此说来，如果在完成了快速温变循环就结束 HALT，那么只是找到了所有缺陷的 35% 而已。这就再次说明了应用应力组合的必要性，同时从广义角度来看快速温变循环并不是最有小的筛选方式。

在一家公司没有正式公开的论文中，大卫·杰德热哲斯基 (Dave Jedrzejewski) 和矩阵科技公司给出了应用在大型电路系统中的不同应力发现缺陷的比率。

表 7.2 应力与缺陷的比率

应力	比率
快速温变冲击	12
极限高温	13
极限低温	29
快速温变循环温度和振动组合	46

一个有趣现象是低温发现的问题要多过高温发现的问题，这在现今机械电子系统非常典型。同样如果没有温度和全轴向振动的组合，46% 的故障将无法发现。

7.7 结论

本章就故障失效模式分析做了初步解释，简要说明了不同应力和暴露在不同应力下缺陷之间的关系。全面运用故障失效模式分析能够提供恰当的加速转换模式【1】同时也帮助验证提高产品寿命不同方法。作者认为在如何选择设计没有经验经验的时候，失效故障模式分析无疑非常有益，但设计者有了这样一个基础知道如何设计，他也就不一定需要做失效故障模式分析了。HALT 是找到产品最薄弱环节的强有力工具，很大程度上减轻或甚至不需要做失效故障模式分析。看起来最佳的方式是将 HALT 和 PoF 组合起来使用，在大部分领域，最有效的方法是工程师能够运用所有可能的工具和技术来帮助设计和制造。

中国可靠性网：<http://www.kekaoxing.com>

参考文献：

1. Upadhyayla, K. and Dasguptak, A., Guidelines for physics-of-failure based
中国可靠性网 <http://www.kekaoxing.com> 邮箱: admin@kekaoxing.com

- accelerated stress testing, Proceedings of the 1998 Annual Reliability and Maintainability Symposium. This paper has many references of interest to PoF. These are all listed below for the convenience of the reader.
2. Miner, M. A., Cumulative damages in fatigue, Journal of Applied Mechanics, 12, (1945)
 3. Steinberg, D., Vibration analysis for electronic equipment, John Wiley&Sons, New York(1988).
 4. Smithson, S.A., Effectiveness and economics—Yardsticks for ESS decisions, 1990 Proceedings of the IES.
 5. Hakim, E.B., Microelectronic reliability/temperature independence, Quality and Reliability Engineering International, 7, pp.215-220
 6. Hobbs, G.K., Flaw stimulus relationships, Sound and Vibration, April 1986
 7. Silverman, M. A., Summary of HALT and HASS results at an accelerated reliability test center, Proceedings of the 998 Annual Reliability and Maintainability Symposium.
 8. Barker, D. B., Vodzak, J., Dasgupta, A., and Pecht, M., Combined vibrational and thermal solder joint fatigue - a generalized strain versus life approach, Transactions of ASME, Journal of Electronic Packaging, 112, pp.129-134, June 1990
 9. Caruso, H., Hidden assumptions in temperature and vibration test time compression models used for durability testing, Proceedings of the 1994 IES Annual Technical Meeting, pp.107-115
 10. Cluff, K.J., Barker, D., Robbins, D., and Edwards, T., Characterizing the Commercial Avionics Thermal Environment for Field Reliability Assessment, Proceedings of the 1996 IES Annual Technical meeting, pp.50-57
 11. Cushing, M. J., Mortin, D. E., Stadterrnan, T.J., and Malhotra, A., Comparison of electronics-reliability assessment approaches, IEEE Transactions on Reliability, 42, December 1993
 12. Dasgupta, A., et al. Material Failure Mechanisms and Damage Models, -A tutorial series containing 14 articles in IEEE Transactions on Reliability, lead article appeared in 40, (1), pp. 531(1991)
 13. Dasgupta, A., Oyan, C., Barker, D., and Pecht, M., Solder creep-fatigue analysis by an energy-partitioning approach”, Transations of the ASME, Journal of Electronic Packaging, 144, pp.152-160(1992).
 14. Dujari, P., Upadhyayula, K., Dasgupta, A., and Balachandran, B., Applications of wavelets for cost-effective vibration response of electronic circuit card assemblies, Experimental/numerical mechanics in electronic packaging, 1997

Spring Conference of the Society of Experimental Mechanics.

15. Hu, J.M., Barker, D., Dasgupta, A., and Arora, A., The role of failure mechanism identification in accelerated testing, Journal of the IES, pp.19-4, July 1993.
16. Jensen, F., Electronic component reliability, John Wiley&Sons, New York(1994)
17. Jensen, F., and Petersen, N.E., Burn-in: Engineering approach to the design and analysis of burn-in procedures, John Wiley &Sons, New York(1982)