



(美) 哈利·W. 迈克莱恩 (Harry W. McLean) 著

光电控制技术重点实验室 译

高加速寿命试验、高加速应力筛选 和高加速应力审核诠释

——加速可靠性技术 (第2版)

HALT, HASS, AND HASA EXPLAINED
ACCELERATED RELIABILITY TECHNIQUES



航空工业出版社

高加速寿命试验、高加速 应力筛选和高加速 应力审核诠释

——加速可靠性技术

(第2版)

(美) 哈里·W. 迈克莱恩 (Harry W. McLean) 著
光电控制技术重点实验室 译

航空工业出版社

内 容 提 要

加速可靠性试验正在迅速取代低效、耗时和高成本的传统可靠性试验。本书诠释的 HALT、HASS 和 HASA,正是许多具有前瞻性发展眼光的研发和生产单位,近年来引进后大力推行并已取得辉煌成果的加速可靠性试验技术。HALT 适用于产品研制初期,其目的是在当前的技术能力极限条件下,获取产品所能经受应力的工作极限和破坏极限。HASS 适用于生产阶段产品的全数筛选,其中,析出筛选和检测筛选应力设计的依据,正是由上述 HALT 获取的破坏极限和工作极限。而 HASA 则适用于成熟期的大批量生产。HASA 是结合 HASS 剖面设计的一种统计系统,它通过对产品进行样本受控的抽样,使用户能够审核产品的出厂质量。加强产品生产过程和现场使用信息的统计控制是执行 HASA 的必要条件。

本书通俗易懂,工程适用性很强,既可作为高加速应力试验的经典教材,又可作为从事可靠性工作的工程设计和试验人员的重要参考资料。

“ 图书在版编目 (C I P) 数据

高加速寿命试验、高加速应力筛选和高加速应力审核
诠释:加速可靠性技术 / (美) 迈克莱恩
(McLean, H. W.) 著;光电控制技术重点实验室译. --北
京:航空工业出版社,2014.12

书名原文:HALT, HASS, and HASA explained:
accelerated reliability techniques

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0613 - 4

I. ①高… II. ①迈…②光… III. ①加速寿命试验
②加速度模拟—应力分析 IV. ①TB302②TB24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 276599 号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01 - 2014 - 2186

中国大陆,香港、澳门和台湾地区独家发行。

Exclusive Territories

China Mainland, Hong Kong, Macao, and Taiwan.

本书英文原版图书 (ISBN: 978 - 0 - 87389 - 766 - 2) 由 ASQ 出版,版权所有© 2009。

高加速寿命试验、高加速应力筛选和
高加速应力审核诠释——加速可靠性技术 (第 2 版)
Gaojiasu Shouming Shiyan、Gaojiasu Yingli Shaixuan he
Gaojiasu Yingli Shenhe Quanshi——Jiasu Kekaoxing Jishu (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话:010 - 84934379 010 - 84936343

北京地质印刷厂印刷

2014 年 12 月第 1 版

开本:787 × 1092 1/16

印数:1—3000

全国各地新华书店经售

2014 年 12 月第 1 次印刷

印张:8.25 字数:206 千字

定价:40.00 元

鸣 谢

作者感谢美国电话电报公司的所有雇员：可靠性工程师和技术小组的资深成员，约瑟夫·曼茨（Joseph Mantz）；可靠性工程师，博比·伊普（Bobbie Yip）；可靠性试验专家，道格拉斯·李（Douglas Ley）和统计学家迈克·布朗德（Mike Brand），以及早先在华盛顿州雷德蒙德市花费时间审查原始材料并提供宝贵建议的所有成员。迈克·布朗德还为编写本书第4章的部分内容做出了贡献。第5章“故障分析”的一部分内容取自约瑟夫·曼茨所写论文。

还要感谢福特·柯林斯公司先进能源部的所有成员：布莱恩·斯奥博达（Brian Svoboda）、李·弗蒙特（Lee Vermette）、特拉维斯·杰克逊（Travis Jackson）、蒙迪·梅菲尔德（Mandi Mayfield）和提姆·阿希（Tim Ash），以及迈克·希尔弗曼（Mike Silverman）和 OPS A La Carte（一家专业的、致力于提高全寿命期产品可靠性信心的可靠性工程咨询与培训公司，即 Ounce of Prevention Strategy（OPS）公司——译者）的全体职员。并极为赞赏他们在评审本书第2版初稿中所做的工作。并对克丽丝·汤普森在审查第2版中所做的工作深表谢意。

我想对原本在惠普公司温哥华分部的统计学家提姆·克雷姆博士（Tim Kramer, Ph. D）表示感谢。我极为赞赏他的工作。我还要感谢瓦莱丽·维尔德曼博士（Valerie Wildman）和伊莎贝尔·罗森布莉特（Isabel Rosenblitt）两位统计学家，他们的工作有助于经历最初的 HASA 过程之后建立有效的统计系统。这两人现已调往惠普公司。

最后我想表示对我的家庭的感谢，特别是帮助我校对了许多原始手稿的乔安妮（Joanne）。我还想谢谢我的孩子们：米歇尔（Michelle）、迈克尔（Michael）、戴安娜（Diana）和伊莉莎白（Elisabeth）——他们为我第2版的修改提供了许多灵感。

原 版 序

本书编写时既考虑了初学者的需求，也考虑了专家的需求。故其编写使得这两者均可从中找到信息，从而使他们在需要生产高可靠性产品时获得帮助，而不至于陷入数学方程式的困境中。HALT 是强化试制产品的一个过程，而 HASS 则是一旦在 HALT 中赋予试制产品以特性之后的产品筛选，这是本书的重点。本书内容还包括：供那些希望探求更先进课题的人使用的生产审核的第三种方式，即 HASA。这或许是大批量生产者，或希望审核整个生产过程而不希望筛选所有产品的生产者所感兴趣的。

HALT、HASS 和 HASA 均采用与多轴向气动振动系统综合在一起的高温变速率的温度试验箱。这些试验箱将使产品仅经受两种应力。本书也列举并讨论了其他应力。

我希望与你分享：我在帮助雇主和客户制造那些一经投入生产，其可靠性就远远超过预期规定的产品过程中获得的知识。使用这种技术的许多公司已经跻身于世界顶级电子和机电公司的行列。我也愿意与你分享一个非常重要的事实：这些技术只是受到希望应用这些技术的人的想象力的限制，而不是受到技术本身的限制。换句话说，让你的想象力自由奔驰吧。我还建议读者设法获得本书参考文献列出的文章副本作为参考资料。

过去多年中，许多公司应用这些技术已经取得了显著的成功。有一些公司已将其市场份额从排序最后几位，在短期内跃升到工业界领头羊的地位。其他一些公司还利用 HALT、HASS 和 HASA 技术将其产品保证期延长到了工业界常规保证期的 3 倍，并且降低了保证期总费用，同时大大提高了其市场份额，而此时，其他一些公司已经使用这些技术帮助它们赢得了所渴望的布德里奇 (Baldrige) 奖^①。这些技术是“潜藏的宝石”，而许多新手，甚至许多在传统的 ESS 领域有经验的公司，或许还没有认识到这一点。传统 ESS 仅仅是本书中提供的全部过程中的很小一部分或一个分支，而且本书所包括的技术也远远超出了传统 ESS 的范围。正如你可以从本书末尾参考文献中看到的，有一些客户已撰文报道了他们的成功，而其他一些公司则继续使用这些技术作为保持其竞争优势的手段，因而不希望公开这些技术。他们的决定，以及以前那些希望保

^① 布德里奇 (Baldrige) 奖是美国国家质量奖。——译者注

持匿名的客户，也受到了尊重。

我希望读者将本书作为一个资源性书籍，以及可以从中找到成功实施加速可靠性大纲所需全部内容的图书。多年来，本书提供的技术，对我的雇主、客户、朋友，以及我自己均多有助益，我也希望同样能对读者有所帮助。

本书中使用的所有参考资料均列于书末的参考文献中。

译者的话

本书介绍的高加速寿命试验 (HALT)、高加速应力筛选 (HASS) 和高加速应力审核 (HASA) 属于加速可靠性试验, 或加速应力试验。这些试验与可靠性增长试验, 以及可靠性鉴定和验证试验一类的传统可靠性试验的试验目的和试验条件完全不同。

传统可靠性试验主要用于: 根据 20 世纪 60 年代由一些聪明人提出的电子产品的故障分布服从指数分布的假设, 通过相当长时间的试验定量给出: 在一定的置信度下产品可靠性参数 (MTBF 值) 的大致范围。这些试验的环境条件基本上是产品规范规定的正常使用条件。但是, 这些既费时又费力还费钱的试验结果, 也只是在心理层面上给予最终用户的一个看似大体可信, 但实际上不足为据的说法而已。

加速可靠性试验是一种以对产品施加超过其设计规范的应力为特征的过程, 当前, 这种试验已成为电子产品制造厂用于改进其产品现场可靠性的主要方式。所以加速可靠性试验 (ART) 又称为过应力试验, 或称加速应力试验 (AST)。本书所说的加速可靠性试验特指 HALT、HASS 和 HASA 三种高加速试验。

HALT 是以递增的步进方式对研制产品施加逐步加严的应力, 同时对产品进行连续监测, 以快速地将产品中的设计和工艺缺陷激发为故障, 加以定位和采取纠正措施的试验。通过 HALT, 使得产品的设计和制造工艺在投入批生产之前就达到成熟的程度, 从而使得最终用户获得在现场使用中几乎不会出现设计和工艺相关故障的产品, 而同时又能使设计和研制时间保持最短。这样, 既可提高用户的满意度, 又能将产品比竞争对手更早地投放市场。作为结果, 通过 HALT 获得的产品所能够经受的工作应力极限和破坏应力极限, 可作为产品投入批生产后设计 HASS 和 HASA 应力方案的依据。HALT 适用于产品研制阶段早期。

本书作者明确指出: 采用 4 个单元样本数量的 HALT 就能保证以很高的置信度发现产品的所有故障模式。另一方面, 因为产品的故障分布均呈以既往数据为基础的统计分布, 因而只进行一次 HALT 是不够的。也就是说, 为了验证通过 HALT 获得的产品裕度没有降低, 在产品已经通过 HALT 强化并投产以后, 适当地进行数次 HALT 还是必要的。作者的建议是: 定期 (通常为每 6 ~

9个月)重复进行HALT。

HASS旨在发现产品中的潜在缺陷。因为这些部位在故意加大的机械应力和热应力作用下,容易产生比完好部位大得多的集中应力,故而其经受应力的能力会大大降低,而它们的积累疲劳损伤在应力作用下也会迅速扩大,从而呈现明显故障,通过分析找出故障根源,采取纠正措施,达到剔除产品早期故障的目的。这样,产品最终用户就能得到在使用中不出现早期故障的产品。它与常规ESS不同的是,仅适用于研制阶段应用HALT技术进行过强化设计、找出了应力极限,并获得了很大的设计裕度的产品。HASS适用于产品批生产阶段。

作者还提出:在HASS阶段还要进行验证筛选(POS)与筛选调整(tuning)试验。验证筛选的目的是:通过HALT找出的工作应力极限值和破坏应力极限值,均具有一定的统计分布,最初对其分布情况及其准确度并不清楚,甚至一无所知。因此在确定HASS量值时,必须在这两个极限与HASS量级之间留有较大的裕度。此外,这些量值会由于生产过程及设计更改而随时间变化,因此人们有必要在通过HALT确定的HASS应力量值的基础上,对已确定的HASS方案再进行验证筛选。

而筛选调整的目的在于提高HASS的故障筛出率和筛出速度,使用筛选调整来改进应力方案并对它进行优化。在开始筛选调整之前的一段时间内,在已通过的应力方案的前几个循环内,都可能会发生故障。调整筛选的目标是使所有故障在第一循环发生。通常,这就必须提高各种应力量值,如振动、温度和电压等。同时,还要考虑在生产地点系统启动时可能发生的故障,以及在使用现场发生的故障,应设法通过筛选调整来优化筛选,以便检测出这些故障。

在HASS阶段,批生产阶段的产品可能面临的情况是:如果生产过程不能遵从统计控制,那么制造过程引入的潜在故障较多,且随机性很大,必须对批生产产品在出厂前进行100%的HASS,在大批量情况下,这样做还是需要占用相当多的试验测试设备、辅助设备、人力和时间,消耗液氮和大量电能,从而延长生产过程和增加成本,因此必然会提出另一目标,即能否不进行100%的HASS,而抽检批生产样本进行HASS。要想实现这一目标,必须实现对生产过程进行严格的统计控制,并达到一定的精度。完成这种HASS的方法称为HASA。

HASA是结合HASS剖面设计的一种统计系统,它通过对产品进行样本受控的抽样,使用户能够审核产品的出厂质量。这种统计方法能使用户在故障发生时作出是否应发运产品的决定(带有某些风险)。另外,如果没有检测出故障(在裕度存在误差或风险的情况下),是否要检测已经出现了一个故障的系统?故障的检测是对已经失去控制的生产过程的模拟,而不是对通过生产试验的过程进行检测。HASA的目的是:发现是否会出现应力故障率的突然增加对

商业销售产生不利影响。给承制厂工程师连续提供所有缺陷类型的信息反馈，便于未来产品改进。使制造过程在总体上有一定的透明度，而不延长制造过程时间。根据生产过程控制的改进情况（在预期的抽样期内可检测的故障数是否多于5个），书中介绍了确定 HASA 抽样方案的近似的二项分布展开式和精确的二项分布展开式。HASA 统计过程具有的特性包括：样本量必须不受生产批量快速增长的影响，即随着生产能力的猛增，不必重新计算样本量，样本量不是出厂产品的固定百分比；统计过程易于适应可能出现的风险改变，若想减少对承制方或使用方造成的风险，只需简单地减少影响样本量的数值；当 HASA 或现场输出的故障率改变时，统计过程易于改变；在应力施加期间的故障数预期少于5个时，控制系统留有改进生产过程的余地。

HASS 与 HASA 的不同之处在于：HASS 是一个筛选程序，需要对产品进行 100% 的试验。而 HASA 是一个抽检或者抽样程序，无需 100% 地对产品进行试验，但加强产品生产过程的统计控制则是执行 HASA 的前提条件。

需要指出：上述 HALT、HASS 和 HASA，既适用于电子产品，也适用于机电产品。并且，它们均应采用与多轴向气动振动系统综合在一起的高温变率的温度试验箱。这些专用试验箱能使产品同时经受温度和振动两种加速应力。

无论国外还是国内，近 30 年来许多公司应用这些技术已经取得了显著的成功。有一些公司已将其市场份额从排序的最后几位，在短期内跃升到工业界领头羊的地位。其他一些公司还利用 HALT、HASS 和 HASA 技术将其产品保证期延长到了工业界常规保证期的 3 倍，并且降低了保证期总费用，同时可大大增加其市场份额。故而，有人将这些技术视作“潜藏的宝石”。

诚如作者哈里先生所言：本书是写给那些正在寻求有用信息，以帮助他们生产高可靠产品的新手和有经验的工程师看的。我们以为，也应包括设计和生产管理层的各级领导，他们可以在生产使用时不出故障的高可靠产品中获得帮助。若能如此，译者将不胜欣慰。

本书译稿由李明锁负责审定，丁全心、朱荣刚负责审校，由丁其伯、陈哨东、赵振宇、邹杰、冯星、段玉思、马慧鹏负责译校，对于他们的辛勤付出，在此一并表示深切的谢意。

光电控制技术重点实验室
2014 年 4 月于洛阳

前 言

过应力试验是一种以对产品施加超过其设计规范的应力为特征的过程，这种试验已成为电子产品制造厂用于改进其产品现场可靠性的主要方式。

过应力试验涉及到两种主要技术。第一种技术是生成故障，找出故障源，通过改进设计消除故障源。这一工作通常是在产品初始设计期间进行的；另一种技术是，一旦产品设计完成并开始生产和销售，产品的现场可靠性可以通过其交付前寻找并消除薄弱环节而得到改进。

这两种技术，除了使用过应力外，都不是什么新的技术。这些表面上看来不大的问题，如向产品施加多大的过应力，何时施加，用多少产品实施，已经导致召开了无数次技术研讨会和工作会议，甚至在诸如 IEEE 和 IEST 这样的技术协会中特别成立了新的技术分部。作为这门学科成熟度的最终量度，甚至一些缩写词也已经商标化了。

本书作者是这门新学科的主要贡献者，在该学科出现后的 30 年中，他大多数时间一直在为此工作。作者向我们详细展示了惠普（Hewlett - Packard）公司开发该技术的历程。我们很少能有机会看到这样一个大公司的内部工作，特别是像这样一个具有“实用技术诀窍”的学科。本书每一章都充满了通常在别处无法得到的技术指导和“经验法则”。诚如作者所说，本书是写给那些正在寻求有用信息，以帮助他们生产高可靠产品的新手和有经验的工程师看的。

本书最有价值之处并不在于对问题给出的答案，因为问题本身以及获得答案的方法才是最有价值的。人们必须始终记住蒙蒂·派森（Monty Python）的名言：“你必须自己去寻找答案”。

埃德蒙·凯泽（Edmond L. Kyser）博士
思科系统公司

目 录

第 1 章 高可靠产品在市场进入中的重要性——为何和如何进行 HALT	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 HALT 的综述	(2)
1.3 产品有无 HALT 的比较	(5)
1.4 HALT 过程	(7)
1.4.1 冷、热步进应力	(9)
1.4.2 快速温度转换	(10)
1.4.3 振动步进应力	(11)
1.4.4 HALT 中的综合应力	(12)
1.4.5 其他 HALT 应力和特殊情况	(13)
1.5 HALT 验证	(13)
1.6 对作为 HALT 的结果而实施的纠正措施的透视	(13)
1.6.1 对 HALT 极限和问题的管理建议	(14)
1.6.2 该过程的使用	(14)
1.6.3 振动	(17)
1.6.4 与不同振动台有关的评论	(18)
1.7 结论	(18)
1.8 HALT 汇总	(18)
1.9 HALT 价值的说明	(20)
1.10 在 HALT 前与强化产品有关的一些想法	(21)
1.11 记录故障和纠正措施	(23)
1.12 在应力条件下发现并排除产品故障	(24)
1.13 结论	(24)
第 2 章 高加速应力筛选——HASS	(26)
2.1 引言	(26)
2.2 构建健壮产品初步	(26)
2.3 生产产品应力筛选——HASS	(27)
2.4 为什么要开展 HASS 工作?	(28)
2.5 振动	(29)
2.6 温度变化率	(29)
2.7 多大的应力量值是适当的?	(30)

2.8	析出筛选和检测筛选	(31)
2.8.1	析出筛选	(32)
2.8.2	检测筛选	(32)
2.8.3	有关 HASS 剖面或筛选的评论	(33)
2.9	筛选验证	(34)
2.9.1	夹具特性	(34)
2.9.2	HASS 剖面	(36)
2.9.3	缺陷检测	(36)
2.9.4	筛选验证中的寿命确定	(36)
2.10	筛选调整	(39)
2.11	用于 HASS 的电缆	(40)
2.12	HASS 总结	(40)
2.13	HASS 的一些成功的案例	(41)
2.14	忠告	(42)
2.15	结论	(42)
第3章	超出环境应力筛选的范例——HASA 的使用	(43)
3.1	引言	(43)
3.2	背景	(43)
3.3	统计过程综述	(45)
3.4	统计学——系统	(46)
3.4.1	情况 1	(48)
3.4.2	情况 2	(48)
3.5	HASA 过程控制图	(49)
3.6	监控系统问题	(49)
3.7	通过 HASA 暴露的问题	(50)
3.8	使用式 (3-1) 时的观察	(51)
3.9	结论	(52)
第4章	对高加速应力审核的改进	(53)
4.1	引言	(53)
4.2	背景和假设	(54)
4.3	统计学的应用	(54)
4.4	检测缺陷水平变化的图形工具	(57)
4.5	结论	(60)
4.6	改进 HASA 过程入门	(60)
4.7	HASA 过程流程	(61)
4.8	典型批接收抽样方案	(61)
4.9	HASA 接收抽样方案	(63)

第 5 章 实施有效加速可靠性试验所需的设备	(66)
5.1 概述	(66)
5.2 系统方块图	(66)
5.3 温度	(67)
5.4 紊流	(68)
5.5 加热	(68)
5.6 冷却	(68)
5.7 用于 HALT 和 HASS 的液氮系统与压缩机系统的比较	(68)
5.8 振动	(70)
5.9 控制系统	(72)
5.10 试验箱.....	(72)
5.10.1 产品可达性.....	(72)
5.10.2 管道空气.....	(72)
5.10.3 工作区的音频噪声水平.....	(73)
5.10.4 可用性.....	(73)
5.10.5 服务.....	(73)
5.10.6 系统最大能力.....	(73)
5.10.7 售后保障.....	(73)
5.11 辅助设备、操作人员安全性和 ESD	(73)
5.12 故障分析实验室.....	(74)
5.12.1 为什么要开发单位内部的故障分析能力?	(75)
5.12.2 初步分析.....	(76)
5.12.3 金相样本制备.....	(76)
5.12.4 先进的技术.....	(78)
5.12.5 故障分析结论.....	(79)
5.12.6 结论.....	(79)
第 6 章 如何向管理层推销新理念	(81)
6.1 引言	(81)
6.2 概述	(81)
6.3 当前情况	(81)
6.4 推荐的大纲	(83)
6.5 指出潜在的管理问题	(85)
6.6 开支节省	(86)
6.7 结论	(89)
第 7 章 常见问题及解答	(90)
7.1 如何比较 ESS 和 HASS?	(90)
7.2 简单说, HALT 是什么?	(91)

7.3	如何比较产品鉴定方法和 HALT?	(91)
7.4	HALT 是用于质量改进还是打算取代 RGT 和 MTBF 试验?	(92)
7.5	使产品经受远超过其设计规范的应力有何好处?	(92)
7.6	产品特定应力和通用应力是什么?	(93)
7.7	既然 HALT 和 HASS 的作用如此之大, 为什么不是每个人都采用 HALT 和 HASS 呢?	(93)
7.8	做一次 HALT 够吗?	(94)
7.9	HALT 应在哪个产品等级进行?	(94)
7.10	参与加速可靠性大纲的人有哪些?	(94)
7.11	HALT 实际上应在何处进行?	(95)
7.12	HALT 需要多少个单元? HALT 结束后还可用它们做什么?	(95)
7.13	要成功地进行 HALT 为何可能要求理念更新?	(96)
7.14	能用传统的试验箱和振动台做 HALT 吗?	(99)
7.15	所有 6 自由度振动台都相同吗?	(99)
7.16	对产品施加 $\geq 60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温变率有无任何已知的问题?	(99)
7.17	执行序贯应力模式比综合应力模式更具优势吗?	(100)
7.18	HALT 和 HASS 只能暴露电子产品缺陷吗?	(100)
7.19	HASS 能取消产品的恒温、高温老化吗?	(100)
7.20	在多大的温度和振动量值下, 才能够认为产品是健壮的?	(100)
7.21	现场寿命很短时, 你能够如何证明 HALT 对产品有效呢?	(101)
7.22	HALT 试验箱的年度维修成本是多少?	(101)
7.23	HALT 的结果能够用于精准估算现场寿命吗?	(102)
附录		(103)
名词术语和缩略词		(105)
参考文献		(112)
参考文献增补		(114)
商标和服务标志		(115)
作者简介		(116)

第 1 章 高可靠产品在市场进入中的重要性 ——为何和如何进行 HALT

探索新方法的真理是：只有在尝试过许多其他方法之后，最好方法才会被认识。

狄妮·黛德丽 (Deni Didreau)

在最近几年，高加速寿命试验 (HALT) 和高加速应力筛选 (HASS) 变得越来越引人注目了。HALT 放在这两个方法的前面，是因为可用它得到极其健壮、在现场不会产生故障的产品。HALT 是老的环境应力筛选 (ESS) 的直接产物，使用不同的名称是因为采用不同的工作环境。有一些人称它为可靠性强化试验 (RET)，另一些人称它为寿命筛选 (STRIFE^N)，还有一些人称它为加速可靠性试验 (ART)，而另外一些人则称它为加速应力试验 (AST)，更有人称它为 HALT。有关缩略词变化的一些原则，严格说来是属于文化的范畴。从管理和技术上的一致性出发，使用已有的或已经熟悉的名称会更妥当些。本章中提到的其他缩略词或许类似于 HALT，但实际上并不能认为它们就真的是 HALT。例如，STRIFE 可以使用、也可以不使用温度和振动的综合试验箱，因此可能并不一定要使用综合环境应力。在这种情况下，STRIFE 就不是 HALT。

本书将集中描述 HALT、HASS 和 HASA (高加速应力审核)，因为它们已在世界的各个不同公司获得了成功的应用。1982 年 11 月，后来作为惠普公司共同创办人的大卫·帕卡德 (David Packard) 在《质量杂志》(Quality Magazine) 中指出：“通过遵循详细规范并不能实现可靠性。通过公式和分析也不能实现可靠性。这些东西在某种程度上或许会有所帮助，但只能是通往可靠性的道路之一，建立、试验并改进某些导致错误的事项。重复这一过程直到达到所希望的可靠性。这是一个反馈过程，并且别无他途……”

1.1 引言

从 20 世纪 90 年代至 21 世纪，一些制造商在改善产品质量方面取得了可观的进展；但是，可靠性的显著提高又使许多公司感到困惑。那些已经找到新的方法使产品可靠性获得重大改进的公司，常常很少公开甚至根本不公开他们的方法。幸运的是，一些成功的公司已表示有意与大家分享它的成果。本章讨论了由这些公司使用的所谓的 HALT 方法。本章还讨论了诸如 HALT 原理与其管理的合理性，以及 HALT 将把你的公司引向何处等所有问题。

1.2 HALT 的综述

如前文所述，已知 HALT 有许多名称（如 STRIFE、RET、ART 和 AST 等）。为了一致性起见，我们将检查 HALT 究竟是什么以及 HALT 是如何工作的。HALT 是可追溯到 20 世纪 60 年代的对产品施加环境应力筛选（ESS）应力的演变结果。而这种演变又是揭示传统的方法不能将潜在（隐藏的）缺陷变为明显（活动的和可检测的）缺陷的结果。许多早期的、几乎很少起改进作用的施加应力的方法今天仍在使用，哪怕元器件的故障率已经有了几个数量值的改进。仅这一事实就应引起人们的怀疑：在当今元器件故障率极低的情况下，产品老化试验方法是否还像多年以前那样有效。此处的老化试验定义为恒定量值的高温浸泡，或者产品保持预定的时间周期。

当 HALT 作用于产品时，它由包括用于揭示缺陷的单一应力和多种应力组成。分析这些缺陷，找出它们的根本原因，并采取纠正措施。产品的健壮性是坚持 HALT 过程的结果。在 HALT 过程中，为满足办公室温和环境而设计的产品，可能要经受比最初规定要满足的应力至少严酷两倍的应力^[3]。将 HALT 期间揭示的每一个缺陷及其所有相关信息，例如：发生日期、故障描述以及故障源等记入数据库（或电子数据表）^[1]。当与早先产品比较时，这些信息可用于确定产品的健壮性。这些数据还能够在投入生产前用于估量产品的成熟度。

HALT 有三个不同的阶段。

①HALT 前：在该阶段，试验工程师和设计师准备执行 HALT。配套试验设施（软件）、夹具、电缆、数据采集（和格式），以及资源配置等，都是应该考虑的项目。典型情况下，应安排召开一次或多次会议来讨论进度并确定 HALT 的开始日期。还应该为每次 HALT 安排试验样本（通常为 4 个）。利用小于 4 个的样本数量进行 HALT 也是可能的，但作为揭示产品故障概率的统计置信度将大大降低。随后将会对此进行更详细的讨论。

②HALT 中：在该阶段，按照 HALT 前会议上制订的计划实施 HALT。

③HALT 后：在提交 HALT 报告后的几天内，与 HALT 前会议相同人员组成的小组应再次开会并讨论 HALT 期间发现的问题。要将每个问题分配给相关责任人。他稍后要负责把每个问题的形成原因，以及需要采取的纠正措施报告给 HALT 小组，以便安排后续 HALT 的计划。强烈建议要制订全面的或局部的 HALT 计划，以验证纠正措施，因为或许纠正了一个问题，但还会出现新的问题。

为什么要进行 HALT？HALT 有哪些优缺点？为什么要对好的硬件施加如此极端的应力？对哪一类产品组合——是低价/大批量产品还是高价/小批量产品——进行 HALT 更有意义？下面让我们逐个讨论。

①为什么要进行 HALT？进行 HALT 的目的是使产品和制造产品的过程，在产品投产之前就达到成熟的程度（如可能的话，至少要使可靠性增长得以保持），同时又使设计和研制时间保持最短。成熟的产品设计意味着客户满意度更大、保证期的缩短和服务成本的降低，并保持竞争优势。详细讨论将在本章后面几节进行。

②HALT 有哪些优缺点？除了提高可靠性以外，HALT 还能提供大量的成本节省和很

大的竞争优势。保障工程师对新投产的产品的注意力仅需集中在其应用上，而不是忙于应付投产问题（这些问题可能涉及到产品研发（R&D）、生产、工艺和材料（采购）工程师）。可以想象，如果一个产品在投产时已经成熟的话，你的研发工程师们就可以回到他们的工作台旁去设计新的产品。一个有效的 HALT 大纲另一个可能的好处是，产品比预期更早地投放市场^[4,10]。

那些在竞争形成前就投产其产品的幸运公司，通常会获取较大的市场份额（当然，前提是既做了适当的广告，其产品又存在市场）。它们通常可以确定价格，其他人将不得不服从这一定价。公司可以挑衅性地规定以一个低廉的定价进入市场（当然，也要有足够的利润）。这样，就会迫使竞争对手以比它应想的更低的价格（对他们来说，利润率较小甚至微乎其微）投放产品，或者甚至放弃投放他们的产品^[10]。

早期成熟的产品引入市场的额外好处是：当今市场机遇窗口通常很窄，如果产品引入市场推迟，会失去这种窗口甚或进不了市场。

唯一的缺点是从使用传统技术变为使用 HALT 和 HASS 涉及很大的投资。这些问题将在第 6 章中详细介绍。

③为什么要对好的硬件施加如此极端的应力？在良好的环境条件下，产品可以令人满意地工作，但当产品在你的装运码头与最终用户之间，可能会遇到也可能不会遇到所有其他的环境应力（例如：高速碰撞、道路坑洼，极端温度和热冲击）时，工作情况会怎么样呢？在汽车发动机罩下面和喷气发动机中极易产生超过 $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温度变化率^[9]，而且不应忘记还有振动。那么，人们现在该怎么说？室内产品从未遇到的这些应力是什么样的应力？现在考虑在大热天或大冷天将产品放在卡车或汽车后尾箱里运输，然后再将它放在室内立即工作。在这种简单活动中就有许多热冲击。

在图 1-1~图 1-3 中，从图形上展示了取自刚才描述的问题的思路。在图 1-1 中，我们看到：产品开发的总成本均来自正常的产品设计、鉴定和投产。当有一个准备投入试验的产品时，先使产品经受某种验证试验，纠正所发现的问题。最后我们认为：产品已无缺陷地投入生产。在投产（MR）时，由于认为开发活动已结束，耗费率下降。（请注意：紧接在 MR 之后的扰动（bump）通常不是单一出现的事件，纠正广泛分布的缺陷需要的费用可能、且通常确实也会超过产品开发的总成本）。这种情况通常是由于产品鉴定试验期间没有发现。这是因为鉴定试验可能过于温和，或研制期间已经看到但并未了解的设计和工艺问题造成的。这就需要工程师和其他人员努力纠正这些问题。当然，其最终影响是延误其他大纲（因为资源分配）的进度，同时也会使用户不满并损失利润。

我们从如图 1-1 所示同一费用比开始。当产品准备像图 1-1 中那样进行设计验证试验（DVT）时，我们开始一个 HALT 的剧烈周期。这个阶段可以包括多次 HALT。在此期间，我们的设计师，试验工程师、专家，故障分析师和任何其他专家，均介入了 HALT，这一工作的最终成果是获得一个成熟的产品。图 1-2 中的这种工作是通过逐步增加的费用比（在时间段 7~9 之间）描绘的。注意：投产后并未出现与图 1-1 中产品关联的异常情况。在图 1-2 中，研发工程师已从这个产品的设计活动中解脱出来，并允许其去开发新的产品。当然，这样做有助于产品生命线的维系。虽然没有说明，用户的满意度能够始终很高。