

# 基于常规试验设备的HASS技术在航空电子产品上的应用

王凤金, 李晓阳, 姜同敏

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 高加速应力筛选(HASS)技术是一种新型的试验技术, 试验效率高, 能有效保障产品的可靠性。介绍了高加速应力筛选的基本原理和典型的HASS过程, 然后将HASS应用于某航空电子产品, 提出了一种基于常规试验设备的HASS方案。根据环境应力筛选(ESS)与基于强化试验设备的HASS技术, 给出了基于常规试验设备的HASS初始剖面制定过程, 并从理论上验证了该剖面的有效性, 筛选验证结果表明该剖面具有安全性。

**关键词:** 高加速应力筛选; 常规试验设备; HASS剖面

**中图分类号:** V216.5; V241.06      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2013)01-0086-05

## Application of HASS Based on Routine Test Equipment in Avionics

WANG Feng-jin, LI Xiao-yang, JIANG Tong-min

(School of Reliability and System Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Highly Accelerated Stress Screening (HASS) is an emerging reliability test technology. With high efficiency, HASS can effectively guarantee reliability of product. The fundamental principle and the typical process of HASS were introduced. A HASS scheme based on routine test equipment was proposed and applied to a certain avionics. According to the technologies of Environmental Stress Screening (ESS) and HASS based on enhancement test equipment, the HASS initial profile was designed, and the validity of the HASS initial profile was proved in theory. The validation result showed that the HASS initial profile is safe.

**Key words:** Highly Accelerated Stress Screening; routine test equipment; HASS profile

随着设计、制造水平的大幅度提高, 高可靠、长寿命产品在航空、航天、电子工业等领域的应用越来越广泛。由于传统可靠性试验通常需要相当长的试验周期, 试验效率低、试验成本高, 不能很好地

满足产品的实际使用需求, 因此加速试验技术作为保障产品高可靠、长寿命的有效手段, 目前备受关注。1988年Hobbs G K等人<sup>[1]</sup>提出了高加速寿命试验(Highly Accelerated Life Testing, HALT)和高加速

收稿日期: 2012-07-14

作者简介: 王凤金(1985—), 女, 河北冀州人, 硕士研究生, 主要研究方向为可靠性与环境试验技术。

应力筛选 (Highly Accelerated Stress Screening, HASS) 两种加速试验方法, 两者均使用远高于产品技术条件规定值的应力量级进行试验。通过快速激励并清除产品潜在缺陷, 达到提高产品可靠性的目的。国外多年的实践证明, HALT 与 HASS 过程的结合对暴露产品的潜在缺陷、改进产品的强度和可靠性非常有效。

高加速应力筛选是在传统的环境应力筛选 (Environmental Stress Screening, ESS) 基础上发展起来的。ESS 利用产品的技术要求应力值, 通过温度循环、振动等剔除产品生产过程中引入的缺陷。HASS 则利用 HALT 试验结果, 采用“极限”应力 (非破坏性质) 来进行高强度筛选。与 ESS 相比, HASS 能以更短的时间激励和排除产品在生产中引入的缺陷。例如, 一个复杂的电子产品进行一次 ESS 可能需要 80~120 h, 而 HASS 仅仅需要几个小时, 从而大大提高了生产效率, 缩减了产品的生产时间和生产成本。HASS 已经在国外得到广泛开展, 并取得了大量的研究成果<sup>[2]</sup>。在国内 HASS 仍然处于探索研究阶段。

HALT/HASS 一般使用基于三轴六自由度的气锤振动系统和液氮制冷强化试验设备<sup>[2]</sup>。由于强化试验设备台面载荷较小, 产品生产厂家一般没有此类设备, 因此 HASS 技术在生产实践中的应用尚未普及。考虑到 HASS 技术在保障产品可靠性方面的有效性, 参照 ESS 技术与基于强化试验设备的 HASS 技术, 以某航空电子产品为例对基于常规试验设备的 HASS 技术进行了探索研究, 给出了 HASS 方案、HASS 初始剖面制定及相应实施方法, 并对该剖面进行了初步验证。

## 1 HASS 技术

### 1.1 HASS 及其基本原理

HASS 是一个工艺过程, 用于产品的生产阶段, 目的是利用这种激发试验在尽可能短的时间内有效暴露和剔除产品的制造和工艺缺陷, 确保产品经过 HALT 方法获得高可靠性。HALT 用于产品研制阶段, 可以使产品设计缺陷逐步暴露, 在短期内通过设计、改进来有效提高产品的可靠性水平, 同时通过

HALT 得到的产品工作和破坏极限可作为确定 HASS 量值的依据, HALT 是进行 HASS 的前提。

HASS 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, 通过激发、研究和根治产品缺陷达到提高可靠性的目的。由于产品中有缺陷部位应力容易集中, 在机械应力和热应力的作用下, 容易产生比完好部位大得多的应力而迅速积累起疲劳损伤和破坏, 从而使产品内有缺陷与无缺陷的元器件在相同应力下拉开疲劳寿命的档次, 在缺陷迅速暴露的同时, 无缺陷部位的损伤较小。HASS 技术正是基于这样的机理, 利用了应力会在产品缺陷处集中导致破坏随应力成指数级增加的原理, 在试验中对试件施加远远大于正常使用条件的环境应力, 快速激发出产品缺陷, 从而提高试验效率<sup>[3]</sup>。

### 1.2 典型的 HASS 过程

典型的 HASS 过程包括初始剖面制定、筛选验证、实施 3 个阶段。HASS 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。应力量级一般是根据 HALT 得到的产品应力极限结果来制定的。初始剖面制定完成后, 需要利用筛选验证技术对其进行验证<sup>[4]</sup>。

1) 有效性验证: HASS 筛选过程中, 所使用的各种应力、应力量级和作用时间能够快速、经济、有效地激发出正常使用环境下可能导致产品失效的各类缺陷, 满足缺陷激发能力的要求。

2) 安全性验证: HASS 筛选过程不会损坏好的产品或使产品产生新的缺陷, 不过量消耗产品的有效寿命。

基于验证结果对剖面进行修正, 最终可以获得合理的 HASS 剖面, 以达到比传统的筛选方法更快速、经济、有效地析出生产过程中引入的潜在缺陷又不过多消耗产品完好部分使用寿命的目的, 实现最佳效费比。HASS 初始剖面制定和筛选验证的目的是提供一种最快、最有效的筛选方法, 用于产品 HASS 的实施。

## 2 试验设备

强化试验设备与常规试验设备的对比见表 1。

由表 1 可知, 两类试验设备的振动激励原理、特

表1 强化试验设备与常规试验设备

Table 1 Enhancement test equipment and routine test equipment

技术指标	强化试验设备	常规试验设备
激励方向	六轴激励,3个线性,3个旋转	单轴激励
激振方式	气锤连续冲击多向激励技术	电动激振
控制方式	均方根值控制,频谱不可控、低频能量小、位移小	功率谱控制,频谱可控、在给定带宽下能量可控、位移较大
频率范围	2 Hz~10 kHz	5 Hz~2 kHz(小激振器可达5 kHz)
台面载荷	推力较小,载荷轻	载荷相对较大
冷却方式	液氮制冷	机械或机械+液氮制冷
温度 温变速率	60 °C/min,甚至更高	一般机械制冷不超过15 °C/min,机械+液氮制冷可达30 °C/min

点以及温变速率有明显差异,所以基于常规试验设备的HASS剖面不能简单地采用基于强化试验设备的HASS剖面来制定。ESS通常在常规试验设备上,经过筛选后产品中的缺陷析出量为 $F, F=D_{IN} \times SS \times DE$ ,其中 $D_{IN}$ 为产品中引入的缺陷密度, $SS$ 为筛选度, $DE$ 为检测效率<sup>[5]</sup>。筛选度越高,暴露的缺陷越多。因此可以在参考基于强化试验设备HASS剖面的基础上,利用ESS剖面及筛选度公式等内容,对基于常规试验设备的HASS剖面的各应力量值进行调整及理论验证,从而形成基于常规试验设备的HASS初始剖面,在筛选验证结果进行修正后,可将该剖面用于产品HASS的实施。

### 3 在某航空电子产品上的应用

某产品是飞机刹车控制系统中的一个单元,用于接收刹车指令信号和飞机信号进行刹车控制,接收机轮速度信号进行防滑刹车控制,同时可以完成正常刹车控制单元与备用刹车控制单元之间的输出信号切换。该产品在HALT和HASS试验过程中均使用基于电磁振动台和温度、湿度振动三综合试验箱的常规试验设备。

#### 3.1 HASS方案

为了制定出合理的HASS剖面,首先要对产品实施HALT,以摸清产品的应力极限。以HALT结果为基础制定HASS初始剖面,并参照GJB 1032<sup>[6]</sup>与GJB/Z 34<sup>[5]</sup>的ESS剖面、筛选度公式等内容对HASS初始剖面的各应力量值进行调整及理论验证,从理论上验

证HASS和ESS筛选效果等效。

其次,采用制定的HASS初始剖面对产品进行HASS安全性验证。根据产品失效的情况,预测产品HASS后的残余有效寿命。

最后,将通过安全性验证的HASS剖面应用于产品的批生产过程。在批生产过程中分别采用HASS和ESS,通过与ESS对比,从统计上验证HASS剖面的有效性,获得合理的HASS剖面。HASS方案制定流程如图1所示。

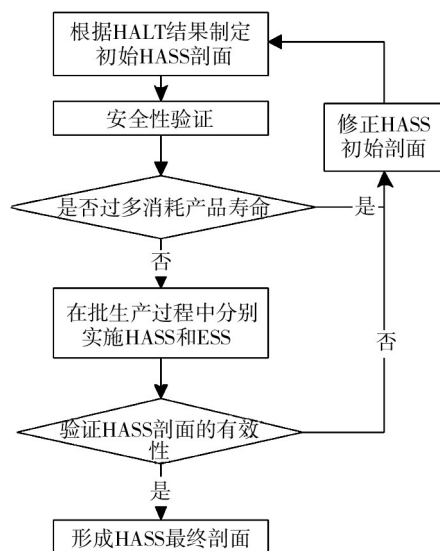


图1 HASS方案制定流程

Fig. 1 Flow chart of HASS scheme

#### 3.2 初始筛选剖面的制定

##### 3.2.1 HASS温度循环参数的选取

温度循环高低温极限值的选取应按照一定的原

则。当工作极限的80%处于技术规范极限以外时,温度循环高低温极限值选择产品高、低温工作极限值的80%;当工作极限的80%处于技术规范极限以内时,温度循环高低温极限值选择产品技术规范极限与工作极限的中间值。综合考虑受试产品的技术规范极限以及由HALT得到的产品工作极限,最终确定温度循环的高、低温极限值分别为80,-60℃。温度循环的筛选度公式见式(1)<sup>[5]</sup>。

$$SS=1-\exp\{-0.0017(R+0.6)^{0.6}[\ln(e+v)]^3 \cdot N\} \quad (1)$$

式中: $R$ 为温度变化范围; $v$ 为温度变化速率; $N$ 为循环次数。通过计算,可以得到ESS与HASS剖面中温度循环的筛选度,计算结果见表2。

表2 温度循环筛选度

Table 2 Screen strength of thermal-cycle

筛选类型	$N$	$v$	$R$	$SS$
ESS	10	5	125	0.928
	20	5	125	0.995
HASS	2	25	140	0.911
	2	30	140	0.940

从HASS和ESS筛选效果等效的角度考虑,选取 $N=2, v=30\text{℃/min}$ 。

### 3.2.2 HASS随机振动参数的选取

随机振动的筛选度公式见式(2)<sup>[5]</sup>。

$$SS=1-\exp[-0.0046(g_{rms})^{1.71}t] \quad (2)$$

式中: $t$ 为振动时间,min; $g_{rms}$ 为加速度均方根值。

ESS与HASS过程中采用的随机振动谱形如图2所示。

通过计算,可以得到ESS与HASS剖面中随机振动的筛选度,计算结果见表3。

从HASS和ESS筛选效果等效的角度考虑,选取 $g_{rms}=7.411, t=20\text{min}$ 。

### 3.2.3 基于常规试验设备的HASS综合剖面

根据基于强化试验设备的HASS标准剖面制定方法<sup>[7]</sup>,对温度循环和随机振动进行综合,制定的HASS初始剖面如图3所示。HASS初始剖面由两个温度循环构成,在第一个温度循环中,降温过程加振5 min,低温极限值保持1 h后加振5 min;在第二个温度循环中,升温过程加振5 min,高温极限值保持1 h后加振5 min。

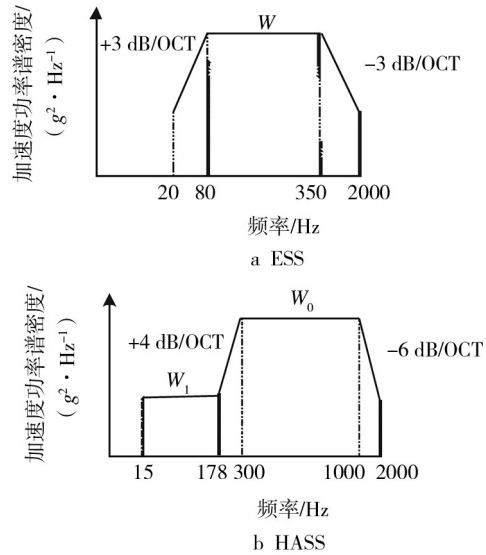


图2 随机振动谱形

Fig. 2 Random vibration spectrum

表3 随机振动筛选度

Table 3 Screen strength of random vibration

筛选类型	$g_{rms}$	功率谱密度/( $g^2 \cdot Hz^{-1}$ )		$t/\text{min}$	$SS$
		$W_1$	$W_0$		
ESS	6.06	0.04		15	0.777
	6.06	0.04		20	0.865
HASS	6.06	0.014	0.029	20	0.865
	7.411	0.02	0.04	20	0.941

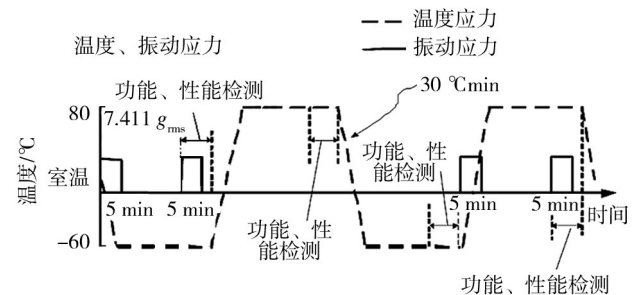


图3 某航空电子产品HASS初始剖面

Fig. 3 HASS initial profile of a certain avionics

根据上述筛选度计算结果,从理论上可以初步验证在温度循环和随机振动这两种应力分别施加的情况下,HASS初始剖面与ESS筛选效果等效。由于HASS初始剖面综合施加两种应力,因此实际的筛选

效果可能会高于ESS。

### 3.3 剖面安全性验证

安全性验证的一般方法是按照HASS剖面的要求将产品重复试验多次,观察是否有失效现象发生,然后从导致失效发生的筛选剖面重复次数可以推断出所选HASS剖面对受试产品有效寿命的损伤程度。

将受试产品安装在常规试验设备振动台上,采用制定的HASS初始剖面进行了10次HASS。试验期间受试产品功能、性能检测结果均正常,没有失效发生,这表明该产品在实际生产过程中进行1次HASS后,至少还剩余90%以上的有效寿命。因此,采用上述方法制定的HASS初始剖面没有过量消耗产品的有效寿命,具有安全性,不需要对该剖面所选择的应力量级进行修正。

## 4 结论

1) 产品进行一次ESS可能需要80~120 h,而进行一次基于常规试验设备的HASS仅需5 h左右,试验效率高,试验成本低。尤其是对于批生产过程,基于常规试验设备的HASS可以大大节约生产时间,提高生产效率,缩减生产成本,能更好地满足产品的实际使用需求。

2) 通过计算ESS和HASS中温度循环和随机振动在不同参数取值下的筛选度,从筛选效果等效的角度确定了HASS剖面各应力量级,并根据HASS标准剖面制定方法,综合得到了某航空电子产品基于常规试验设备的HASS初始剖面。筛选度计算结果

也从理论上初步验证了该剖面具有一定的有效性;采用该剖面对受试产品进行的安全性验证结果表明,产品进行一次HASS后,至少还剩余90%以上的有效寿命,该剖面没有过量消耗产品的有效寿命,具有安全性。文中提出的方法具有一定的工程应用价值,为HASS在生产实践中的应用提供了一种可行的方法。

3) 制定的HASS初始剖面在产品实际筛选中是否有效,还有待在批生产中对该HASS剖面与ESS筛选效果进行对比,从统计上进一步验证。

### 参考文献:

- [1] HOBBS G K. Accelerated Reliability Engineering: HALT and HASS[M]. New York: Wiley-interscience Publication, 2000:1—5.
- [2] HOBBS G K. Handbook of Performability Engineering[K]. London:Springer London, 2008:559—578.
- [3] 樊强. 高加速寿命试验和高加速应力筛选试验技术综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011, 29(4):58—62.
- [4] 孙玉玉,王凤车. 高加速应力筛选剖面验证技术分析[J]. 环境技术, 2010(5):5—7.
- [5] GJB/Z 34—1993, 电子产品定量环境应力筛选指南[S].
- [6] GJB 1032—1990, 电子产品环境应力筛选方法[S].
- [7] RACHE D. The HASS Development Process[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000.(余不详)
- [8] 吴轶钢. 零阶能量有限元方法及其在船舶结构声辐射中的应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008:19—31.
- [9] 金立明. 损伤梁的波动特性与振动功率流分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2005:1—11.
- [10] PAIPETISS A, DIMAROGONAS A D. Analytical Methods in Rotor Dynamics[M]. London: Elsevier Applied Science, 1986:16—45.
- [11] 王丹生. 基于反共振频率和压电阻抗的结构损伤检测[D]. 武汉:华中科技大学, 2006:20—50.
- [12] VLAHOPOULOS Nickolas, WU Kuang-cheng, MEDY-ANIK Sergey. Energy Finite Element Analysis for Structural-acoustic Design of Naval Vehicles[J]. Journal of Ship Production and Design, 2012, 28 (1) : 42—48.
- [13] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2002:32—61.
- [14] 孙丽萍. 能量有限元法及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2004:13—28.

(上接第78页)