

# 加速贮存寿命试验及可靠性评估

姚军, 韩娜, 傅玲莉

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** **目的** 针对工程实际中设备在贮存期间遭受的环境应力种类繁多, 而常用的贮存加速寿命试验往往只考虑单应力, 不能反映产品真实环境应力问题, 提出综合应力下的步退应力加速贮存寿命试验方法。**方法** 设备级电子产品由于其组成结构复杂, 失效模式难以确定, 引入反映综合应力的可靠性增长理论, 对试验数据采用 Duane 模型进行增长趋势检验, 得到加速因子和加速模型, 进一步得出正常应力下的设备寿命。**结果** 综合环境下步退应力加速贮存寿命试验方法可综合考虑各环境应力对设备寿命的影响, 采用可靠性增长理论评估可有效评估失效模式复杂的设备寿命特征。**结论** 该方法可以综合考虑各环境应力对设备的影响, 更能反应设备的振动环境条件, 采用可靠性增长理论对加速试验进行评估可避免因失效模式不明确而无法评估的弊端。

**关键词:** 贮存寿命; 步退应力; 综合应力; 可靠性增长

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.015

**中图分类号:** TJ07

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)03-0071-05

## Accelerate Storage Life Test and Reliability Evaluation

YAO Jun, HAN Na, FU Ling-li

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

**ABSTRACT: Objective** To propose a step-back stress accelerated storage life test method under comprehensive stress in view of various environmental stress suffered by equipment during storage in engineering practice, and the commonly used accelerated storage life test only considers single stress and cannot reflect the real environmental stress of products. **Methods** Due to the complex composition and structure of equipment-level electronic products, it was difficult to determine the failure mode. The reliability growth theory reflecting comprehensive stress was introduced to test the growth trend of test data with the Duane model. The acceleration factor and acceleration model were obtained, and the equipment life under normal stress was further obtained. **Results** The step-back stress accelerated storage life test method could comprehensively consider influences of various environmental stresses on the equipment life, and the reliability growth theory could be used to evaluate the equipment life characteristics with complex failure modes effectively. **Conclusion** This method can comprehensively consider the impact of various environmental stresses on the equipment, and better reflect the environmental conditions caused by the vibration of the equipment. Evaluating the accelerated test with the reliability growth theory can avoid the disadvantages of not being able to evaluate due to the unclear failure mode.

**KEY WORDS:** storage life; step-down stress; comprehensive stress; reliability growth

常用的加速寿命试验有三类: 恒定应力加速寿命 试验、步进/步退应力加速寿命试验、序进应力加速

寿命试验<sup>[1-3]</sup>。相比于其他加速试验方法,步退应力试验因其所需样本量少、试验时间短等优点广泛受到关注。

目前,针对设备级电子产品加速贮存寿命试验,国内有文献以伺服系统为例,论述了整机设备的加速贮存寿命试验全过程,其核心思想是把设备级的加速贮存寿命试验转化为元器件级<sup>[4]</sup>。也有文献对弹上某型气压高度表进行了温度应力的加速贮存寿命试验,采用加速模型为阿伦尼兹模型的方法对设备寿命进行评估<sup>[5]</sup>。文献[6]介绍了整机产品加速贮存寿命试验的几种方法。目前国内的加速试验主要进行薄弱环节(材料和器件)的单应力加速试验技术。对设备级产品的寿命评估主要基于转化法,即分析其薄弱环节,并利用“短板理论”,认为薄弱环节的贮存寿命就是设备贮存寿命<sup>[7]</sup>,然后根据常用的基于失效物理的加速贮存寿命评估方法对其进行评估。这些加速寿命试验的理论研究和试验结果为整机产品的寿命评估提供了有效方法,但同时也存在一定问题。

1) 对产品进行分析时,若找不准或找不到薄弱环节,寿命评估会出现较大偏差。仅考虑单个薄弱环节的失效概率,可能会忽略其他组件对设备寿命的影响。工程实际中,在贮存期内也会对某些短寿件或故障件予以及时更换,设备却并不会因为这些短寿件到寿而报废。

2) 设备级电子产品在贮存期间的环境条件通常较为复杂,各环境因子对产品寿命的影响无法准确衡量,只考虑单应力水平的加速试验不能准确评估产品在贮存期内的寿命。

针对电子设备贮存时间长且故障发生率低的特点,避免采用基于加速模型的加速贮存寿命评估方法,提出基于步退应力的电子设备综合环境加速试验方法。步退应力加速试验从最高应力开始施加,能快速地激发产品失效,提高试验效率。针对设备级产品的失效模式复杂、无法准确获知失效机理的问题,利用步退应力加载方式加速试验与可靠性增长试验的等同性,采用基于可靠性增长的加速贮存寿命评估方法,对电子设备进行加速贮存寿命的评估。

## 1 步退应力贮存寿命加速试验

### 1.1 加速应力的确定

设备级电子产品在其整个贮存周期内经历的任务事件相对复杂,包括固定库房贮存、简易库房贮存、装卸、运输、定期检测、战备值班等。在这些任务阶段中,产品在库房贮存所经历的时间占全年的90%以上,其贮存期内将遭受多种环境应力,包括自然环境因素,如温度、湿度、大气压力、盐雾等;诱发环境因素如振动、冲击、加速度等。通过了解设备级产品的任务阶段,分析其产品特点,可获知该产品在贮存

期内的主要环境应力。

加速寿命试验应力等级的选取包括三部分:最高应力要求在不改变失效机理的前提下尽可能达到工作极限,可通过产品手册或可靠性摸底试验确定;最低加速试验应力要求大于正常应力;各阶段应力水平可根据等间隔(或倒数等间隔)取值来一一确定。

### 1.2 综合应力水平组合

综合应力加速贮存试验最需要解决的问题就是试验次数的确定及各应力水平如何搭配的问题<sup>[8]</sup>。若有 $n$ 个试验应力,每个应力均取 $k$ 个应力水平,按照所有的应力水平组合进行试验,需 $k^n$ 次试验。

电子设备通常具有“长贮存期、高可靠性”的特点,其贮存试验费用昂贵,且试验周期过长,试验次数过多,不切合实际。针对此问题,文中采用均匀正交设计理论对综合应力水平进行分配,因此加速贮存试验次数即为选取的应力水平数<sup>[9]</sup>。如对于3个试验应力、5个应力水平的加速贮存寿命试验,需进行5次加速试验,其最优应力组合方式见表1。其中, $T_1 < \dots < T_5$ ,  $R_1 < \dots < R_5$ ,  $S_1 < \dots < S_5$ 。

表1 均匀正交试验方案

试验次数	试验应力		
	温度应力	湿度应力	振动应力
1	$T_1$	$R_2$	$S_4$
2	$T_2$	$R_5$	$S_2$
3	$T_3$	$R_1$	$S_1$
4	$T_4$	$R_4$	$S_5$
5	$T_5$	$R_3$	$S_3$

### 1.3 剖面设计

相对于其他加速试验方法而言,步退应力加速试验首先按最高应力等级进行,能更快地激发出产品的失效,且试验件的累计损伤能加速下一应力台阶下的失效,从而更能节省试验时间。步退试验的应力加载首先从最高应力水平开始,在达到一定数量失效或退化时,将应力下降到下一水平,如此反复。针对多应力下的步退加速试验,可先预估各应力搭配组合的加速系数,按预估加速系数从大到小进行步退加载,其试验应力加载剖面如图1所示。

## 2 基于 Duane 模型的加速贮存寿命评估方法

基于 Duane 模型的步退应力加速贮存寿命评估首先是通过试验数据进行增长趋势检验和 Duane 模型增长趋势检验,然后通过 Duane 模型得到加速因子和理想加速模型。在此基础上,换算出正常应力下的试验时间。

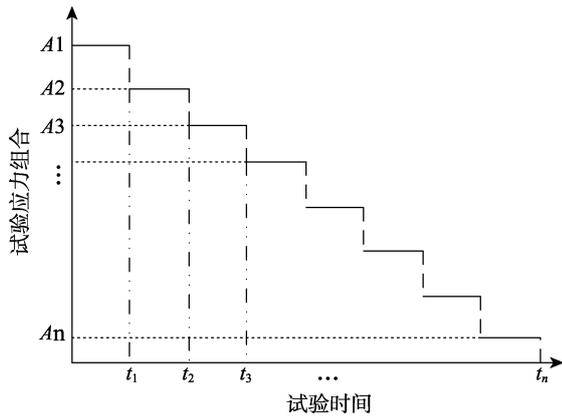


图 1 综合应力步退加速试验应力施加方式

### 2.1 Duane 模型的数学描述型

设可修产品的累计试验时间为  $t$ ，在开发期  $(0, t]$  内，产品的累计失效次数为  $N(t)$ 。设第一个应力级下的累计试验时间为  $t_1$ ，则最高应力级下的 MTBF 为  $M_1=t_1$ 。将最高应力等级下的 MTBF 以及试验时间纳入瞬时 MTBF，可以得到理想加速模型：

$$M(t) = \begin{cases} M_1 & 0 < t < t_1 \\ M_1 \left(\frac{t}{t_1}\right)^m (1-m)^{-1} & t_1 > t \end{cases} \quad (1)$$

MTBF 累计纳入可以得到其理想加速模型为<sup>[10-11]</sup>：

$$M_{\Sigma}(t) = \begin{cases} M_1 & 0 < t < t_1 \\ M_1 \left(\frac{t}{t_1}\right)^m & t_1 > t \end{cases} \quad (2)$$

然后基于 Duane 模型计算加速系数，设  $T$  为试验结束时的累计试验时间，根据上述基于 Duane 模型下的理想加速模型可得：

$$N(t) = \int \frac{t_1^m (1-m)}{M_1 t^m} = \frac{t_1^m}{M_1} t^{1-m} \quad (3)$$

将  $t_i=t$  以及  $M_1=t_1$  带入式 (3)，可以得到<sup>[11]</sup>：

$$t_i = N(t_i)^{\frac{1}{1-m}} t_1 \quad (4)$$

基于 Duane 模型的加速系数可以使用正常应力等级下与不同应力等级下 MTBF 的比值得到加速应力水平相对于正常应力水平的加速系数，可得 Duane 模型下的加速系数：

$$\alpha = \begin{cases} \frac{M_T}{M_1} = N(t_N)^{\frac{m}{1-m}} (1-m)^{-1}, S_1 \text{ 下的加速系数} \\ \frac{M_T}{M_i} = [N(t_N) / N(t_i)]^{\frac{m}{1-m}}, S_i \text{ 下的加速系数}, i > 1 \end{cases} \quad (5)$$

假设根据试验数据外推出正常应力下的累计失效次数为  $N(t_0)$ ，由式 (4) 可得到正常应力下的累计试验时间  $t_0$ ，然后可得到得到正常应力下的  $\theta$ ：

$$\hat{\theta} = M(t_0) \quad (6)$$

代入指数分布可靠度函数得：

$$R(t) = \exp(-\hat{\lambda}t) = \exp\left(-\frac{1}{\hat{\theta}}t\right) \quad (7)$$

即可得到正常应力下的可靠度曲线。

### 2.2 失效时间折算

基于 Duane 模型的加速贮存寿命评估方法，先用杜安模型绘制计划增长曲线。为了求得可靠性步退加速试验曲线，通常需三个以上的点，否则置信度太低，故建议步退加速试验模型至少是三步。步退加速试验等同于增长试验，但它同时也是加速试验的一种。对于失效时间相隔较小的情况，直接将失效数据套用 Duane 模型相关公式所得的可靠性增长率为负值，因而所外推的值也不符合实际情况。通常情况下，初始试验时间越长，外推寿命对应也应该越长。由于试验是在步退条件下进行的，因此需要把累计效应考虑进去，将所给的试验数据折算成对应台阶下正常的失效试验数据，使得数据能满足杜安模型要求。

假设已知需要验证的正常应力下的 MTBF 值为  $M_0$ ，根据试验数据外推得到正常应力下的失效数为  $N(t_0)$ ，以及最高应力等级下的累计试验时间  $t_1$ 。由式 (5) 得到：

$$\frac{M_0}{M_1} = N(t_0)^{\frac{m}{1-m}} (1-m)^{-1} \quad (8)$$

式中： $M_1=t_1$ 。

由式 (8) 得到预估计  $m$  值，结合式 (5)，可得到预估计应力水平  $S_i$  相对于应力水平  $S_{i+1}$  的加速因子：

$$\begin{cases} \alpha_{S_i-S_{i-H}} = N(t_2)^{\frac{m}{1-m}} (1-m)^{-1}, i = 1 \\ \alpha_{S_i-S_{i-H}} = [N(t_{i+1}) / N(t_i)]^{\frac{m}{1-m}}, i > 1 \end{cases} \quad (9)$$

假设产品步退加速贮存试验时，在加速应力  $S_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ ) 进行定数截尾试验，各加速应力下的失效数均为 1，失效时间为  $t_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ )，将各组失效时间通过累计效应折算为产品在各组应力下对应的失效时间为  $t'_i$ ，则有：

$$\begin{cases} t'_1 = t_1 \\ t'_2 = t_2 - t_1 + t'_1 \cdot \alpha_{S_1-S_2} \\ \vdots \\ t'_k = t_k - t_{k-1} + t'_{k-1} \cdot \alpha_{S_{k-1}-S_k} \end{cases} \quad (10)$$

由折算后的失效数据  $t'_i$  求出折算后的增长率  $m$ ，再求出正常应力水平下的寿命特征值<sup>[13]</sup>。

完成计算后，对结果进行评估，Duane 模型拟合结果的优劣用拟合优度来表示，即：

$$\hat{\rho} = l_{xy} / \sqrt{l_{xx}l_{yy}} \quad (11)$$

式中：

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n \ln N_i \ln t_i - \left( \sum_{i=1}^n \ln N_i \right) \left( \sum_{i=1}^n \ln t_i \right) / n$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2 / n \quad (12)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n (\ln N_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln N_i \right)^2 / n$$

查询相关统计表, 可得到与样本量  $n$ 、显著性水平  $\alpha$  相应的理论相关系数,  $\rho=0$  的经验相关系数  $\hat{\rho}$  的临界值  $\hat{\rho}_\alpha$ 。若  $|\rho| \geq \hat{\rho}_\alpha$ , 则接受试验信息符合 Duane 模型的假设; 反之, 若  $|\rho| < \hat{\rho}_\alpha$ , 则认为试验信息与 Duane 模型不符。

### 3 仿真算例

假设某设备寿命服从指数分布,  $\theta=10\ 000$  h, 样本量为 6, 温度为加速应力, 湿度为恒定应力。步退应力加速试验可视为可靠性增长试验, 其第一步的数据, 即对应最高量级, 就是增长试验的初始值, 初始加速应力  $T_1$  可以用预实验方法找到工作极限后确定。假设  $T_1=378$  K, 试验中每步只出现一个故障即转到下一个温度阶梯。根据工程经验, 以 10 K 等间隔为一阶梯。由以上条件, 采用蒙特卡罗方法, 生成步退应力失效数据见表 2。

表 2 仿真试验数据及累计试验时间数据

$t_i$ 时刻的累计失效数	应力大小/K	失效时间/h	累计试验时间/h
1	378	66	396
2	368	174	936
3	358	383	1772
4	348	795	3008

结合表 1 中数据可知,  $M_1=t_1=396$  h。由第一列和第二列数据外推得到正常应力下的累计失效次数  $N(t_0)=9$ , 需要验证的正常应力下的 MTBF:  $M_0=10\ 000$  h。将其带入式 (8), 可得到预估计  $m=0.5297$ 。

结合式 (9) 和式 (10), 得到经失效时间折算后的试验时间和累计试验时间, 见表 3。

对折算后试验数据采用图估计法进行增长趋势检验。从图 2 可以看出, 曲线向上凸, 此时相邻的失效时间间隔逐渐增大, 表明产品的贮存寿命逐渐增长。

表 3 折算后的试验数据及累计试验时间数据

$t_i$ 时刻的累计失效数	应力大小/K	折算后失效时间/h	折算后累计试验时间/h
1	378	66	396
2	368	414.3	2377.9
3	358	863.1	4590.2
4	348	1605.4	7582.7

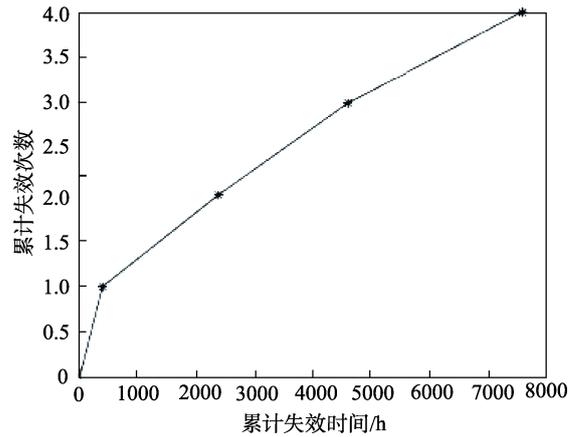


图 2 趋势检验

折算后的试验数据通过式 (11) 和 (12) 进行拟合优度检验, 经计算得到:  $\hat{\rho} = 0.9933$ 。查询相关系数表, 令  $\alpha=0.1$ , 得  $\hat{\rho}_\alpha = 0.9000$ 。  $\hat{\rho} > \hat{\rho}_\alpha$ , 符合 Duane 模型假设。

结合表 2 中数据可知,  $M_1=t_1=396$  h。将折算后累计失效数和累计试验时间代入式 (4), 计算可得 Duane 模型增长率  $m=0.5304$ 。将其带入式 (1) 和式 (2), 可得到瞬时步退加速模型和累计步退加速模型:

$$M(t) = \begin{cases} 397 & 0 < t < 396 \\ 843.31 \left( \frac{t}{396} \right)^{0.5304} & t \geq 396 \end{cases} \quad (13)$$

$$M_\Sigma(t) = \begin{cases} 397 & 0 < t < 396 \\ 396 \left( \frac{t}{396} \right)^{0.5304} & t \geq 396 \end{cases} \quad (14)$$

其瞬时步退加速曲线和累计步退加速曲线如图 3 所示。步退加速曲线延长线和 MTBF 验证值的交点对应的横坐标值为预计试验时间。

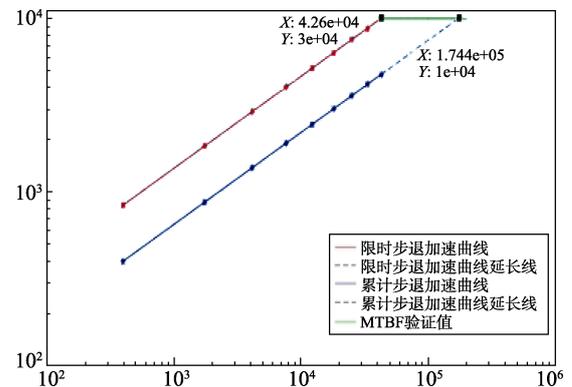


图 3 基于 Duane 模型评估步退试验数据的加速曲线

结合表 2 数据, 外推出正常应力水平下 ( $T_0=298$  K) 的累计失效数  $N(t)=9$ 。结合式 (4), 外推出正常应力水平下的累计试验时间  $t=42631$  h。结合式 (11), 得到正常应力水平下的瞬时 MTBF 为 9979.7 h。

结合指数分布, 进一步得到正常应力下的失效率

$\lambda_0 = 1.002 \times 10^{-4}$ 。从图2可以看出, 求出的正常应力下的瞬时MTBF接近于MTBF目标验证值。

进一步通过式(9)求得各加速应力台阶下的加速系数见表4。

表4 基于Duane模型评估步退试验数据加速系数

序号	加速应力/°C	加速系数
1	105	4.64
2	95	1.58
3	85	1.38
4	75	1.29

## 4 结语

文中利用步退加速贮存试验类似于可靠性增长试验的特点, 研究了基于可靠性增长的加速贮存评估方法, 通过引入Duane模型为评估贮存寿命提供了新思路。基于可靠性增长模型的加速贮存评估方法将可靠性增长理念用到了步退应力加速贮存评估中, 避免了加速模型的选择, 针对电子设备“失效机理难以研究, 加速模型难以确定”的特点较为适用。

1) 针对电子产品在贮存过程中受到的环境应力的复杂性及现阶段主要应用单应力开展加速贮存试验的现状, 提出步退综合应力加速贮存剖面设计方案, 为解决复杂弹上产品的综合应力加速贮存试验提供了思路。在此基础上, 得到了一种结合均匀正交设计理论的步退综合应力加速贮存试验方案的优化设计方法。该优化方法极大程度地减少了综合应力下试验所需样本量, 并能对应力水平数、应力大小、失效数或截尾时间进行优化。

2) 基于可靠性增长理论的步退加速贮存数据评估方法, 避免了传统基于加速模型的数据评估方法加速模型选取困难、加速模型参数难以确定等困难。提

出的方法新颖、科学合理, 为加速贮存试验数据的评估提供了新的思路。

## 参考文献:

- [1] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 和阳, 王蓉华, 徐晓岭. 累计损伤下Lomax分布产品序进应力加速试验分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(5): 42-48.
- [3] 和阳, 王蓉华, 徐晓岭. 累计损伤模型下Lomax分布产品序进-恒定加速试验分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(6): 53-57.
- [4] 李久祥. 整机加速贮存寿命试验研究[J]. 质量与可靠性, 2004(4): 14-17.
- [5] 申争光, 苑景春, 董静宇, 等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1948-1952.
- [6] 林震, 李宪嫻, 姜同敏, 等. 整机产品加速贮存寿命试验研究思路探讨[J]. 航空标准化与质量, 2006(4): 37-41.
- [7] BARRY T M. Accelerated Reliability Testing Utilizing Design of Experiments[R]. New York: Rome Lab, 1993.
- [8] 陈文华, 冯红艺, 钱萍, 等. 综合应力加速寿命试验方案优化设计理论与方法[J]. 机械工程学报, 2006(12): 101-105.
- [9] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 梅文华. 可靠性增长试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [11] GJB 1407—1992, 可靠性增长试验[S].
- [12] GJB/Z 77—1995, 可靠性增长管理手册[S].
- [13] JOHN F V. Reliability Growth and Its Application to Dormant Reliability[R]. New York: Rome Lab, 1981.