微波电子产品贮存状态的 SSADT评估方法

李晓阳 姜同敏 黄 涛 李庚雨

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191) (北京遥感设备研究所, 北京 100854)

摘 要: 针对在贮存期内具有长寿命、高可靠性特点的系统级微波电子产品, 为了快速评估其贮存寿命与可靠性指标, 提出了使用步进应力加速退化试验 (SSADT, Step Stress Accelerated Degradation Testig)的试验方法. 首先给出 SSADT的基本假设. 基于该产品的故障模式影响及危害性分析和故障树分析结果, 为该产品确定了加速模型. 并结合线性漂移布朗运动的首达时 (first passage time)分布服从逆高斯分布的特点, 建立了 SSADT的可靠性评估模型. 其次, 根据线性漂移布朗运动的独立增量性, 给出了可靠性评估模型参数的极大似然法和最小二乘法相结合的评估方法. 为了剔除试验中为检测产品性能而引入的通断电对产品贮存寿命与可靠性评估带来的影响, 在借鉴可靠性相关标准的基础上, 提出了通断电因子退化率折合方法, 并得到了线性漂移布朗运动的通断电折合公式. 最终的实例证明, 采用提出的贮存寿命与可靠性方法能够得到合理的评估结果, 从而验证了该方法的正确性.

关 键 词: 贮存; 可靠性; 退化; 布朗运动; 寿命; 加速试验; 通断电

中图分类号: TB 114. 3

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008) 10-1135-04

Storage life and reliability evaluation of microwave electronical product by SSADT

Li Xiaoyang Jiang Tongmin

(Dept of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Huang Tao Li Gengyu

(Institute of Remote-Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: High storage reliability system requires the extremely high reliable assemblies over long periods of storage time. Within severe time and cost constraints, step stress accelerated degradation testing (SSADT) was utilized to evaluate storage reliability and life of microwave electronical assembly. Firstly, the assumptions of SSADT were given. On the basis of failure mode effect and criticality analysis(FMECA) and fault tree analysis(FTA) results of the microwave assembly, accelerated model was determined. Then, reliability evaluation model was generated combined with linear drift Brownian movement. By the independence increment property of linear drift Brownian movement, the maximum likelihood and regression analysis were used to evaluate the parameters of reliability model. In order to eliminate the effect of power cycle on storage reliability and life, degraded rate conversion method and converted function of linear drift Brownian movement was presented in light of GJB108-98. Engineering application validated that reasonable evaluated results could be obtained by the methodology proposed.

Key words: storage; reliability; degradation; Brown movement; life; accelerated testing; power cycle

收稿日期: 2007-09-27

基金项目: "十一五"预研项目 (51319030301)

作者简介: 李晓阳(1980-), 女, 贵州贵阳人, 讲师, leexy@ dse. buaa. edu. cn.

长期贮存一次使用的产品一般都是采取常规贮存、抽样、试验等方法进行评估. 这种采用长期贮存寿命试验的方法尽管比较真实, 但往往要经过很多年后才能了解产品贮存寿命, 且需投入大量的人力、物力、财力. 对于新研制的产品, 为及时了解其贮存寿命, 这种方法就很不适用. 为了快速对微波电子产品的贮存寿命与可靠性进行评价, 本文采用步进应力加速退化试验 (SSADT, Step Stress Accelerated Degradation Testing)技术评估产品的贮存寿命与可靠性.

加速退化试验中, 不必观测到故障的发生, 只需对预先确定的性能退化参数进行监控即可[1]. 通过这种方式, 可以在试验中得到产品性能退化的趋势, 从而评估产品的寿命和可靠性.

1 加速模型及可靠性模型

采用加速退化试验对产品进行寿命与可靠性评估之前, 首先要建立产品的寿命与应力间的数学关系, 即加速模型. 这样才能将产品在严酷应力水平下得到的试验结果外推到正常工作应力水平下. 然后, 通过基于加速性能退化的可靠性模型, 才能评估产品寿命与可靠性指标[1].

1.1 步进应力加速退化试验的假设

下面结合国内外相关研究[2-3], 提出本文所研究的 SSADT 假设:

假设 **1** 产品的性能退化过程具有单调性. 即性能发生的退化不可逆.

假设 **2** 系统性能随机变量在不同应力水平下均服从同一参数族分布, 即每个应力水平下产品的失效机理不变.

假设 **3** 产品的残余寿命仅依赖于当时已累积失效部分和当时应力水平, 而与累积方式无关.

假设 **4** 产品性能退化过程能用线性漂移布朗运动描述.

假设 **5** 该漂移布朗运动中的扩散系数不随应力水平与时间而变化, 是一个常数.

1.2 加速模型

加速退化试验中必须保持产品在严酷应力条件下和正常贮存应力条件下的退化机理不变, 而本文研究的某微波电子产品在贮存状态中存在多种退化机理. 针对每一种退化机理进行加速退化试验显然是不可能的, 因此只能研究该微波产品中关键功能模块的关键退化机理.

本文结合该微波产品 FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) 和 FTA (Fault Tree Analysis)的关键退化机理分析结果, 采用 Arrhenius温度加速模型来描述其性能退化率随温度的变化规律:

$$L = A \cdot e^{\left(\frac{E_a}{kT}\right)} \tag{1}$$

其中, T 为绝对温度; k 为波尔兹曼常数 8.6171×10^{-5} eV/℃; E_a 为激活能, eV; A 为常数.

式 (1)中, 由于 k 已知, 因此通常令 $B = E_a/k$, 则有 $L = A \cdot e^{(-B/T)}$

1.3 基于加速性能退化的可靠性模型

由于加速退化试验中得到的信息并不是产品的失效数据, 而是产品性能在应力和时间影响下的退化数据. 因此, 需要基于产品的性能退化过程, 建立产品的可靠性模型.

根据假设 4, 本文首先采用线性漂移布朗运动拟合[2]该微波产品的性能退化过程:

$$Y(t) = Y_0 + \sigma B(t) + \mu \cdot (t - t_0) \tag{2}$$

其中, $Y(t)$ 为产品性能; Y_0 为产品性能在初始时刻 t_0 的初始值; $B(t)$ 为标准布朗运动, $B(t) \sim N(0, t)$; μ 为漂移系数, $\mu > 0$, σ 为扩散系数, $\sigma > 0$. 根据假设 5可知, σ 在整个加速退化试验中不随应力而改变.

在式 (2)中, 漂移系数 μ 是所关注的产品性能退化率, 它刻画了环境应力与系统性能变量变化之间的某种函数关系, 因此漂移系数与温度的关系即加速模型, 以下写作 $d(T)$, T 代表温度. 则有

$$d(T) = A \cdot e^{(-B/T)} \tag{3}$$

由于漂移布朗运动属于马尔科夫过程, 因此具有独立增量性, 在退化过程中表现为非重叠的时间间隔 Δt 内的退化增量相互独立. 而由于布朗运动本身属于一种正态过程, 因此退化增量 $(Y_i - Y_{i-1})$ 服从均值为 $d(T)\Delta t$, 方差为 $\sigma^2 \Delta t$ 的正态分布. 以退化率服从 Arrhenius模型为例, 其概率密度函数为

$$f_{i,i-1} = \frac{1}{\sigma \sqrt{\Delta t}} \phi\left(\frac{(Y_i - Y_{i-1}) - d(T)\Delta t}{\sigma \sqrt{\Delta t}}\right) \tag{4}$$

其中 ϕ 表示标准正态分布的概率密度函数.

产品性能退化到不能满足产品规范中规定的性能指标要求时, 则认为产品发生了退化失效. 其寿命就是产品性能从符合要求到不符合要求间的时间. 对照布朗运动来看, 产品性能的“超标”, 相当于做布朗运动的某质点首次穿越某预定值的时间 (first passage time, 首达时). 因此, 布朗运动的首达时分布就是产品的不可靠度函数. 漂移布朗

运动的首达时分布服从逆高斯分布, 其概率密度函数为

$$f(t; y_0, a) = \frac{a - y_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \cdot \exp\left\{ - \frac{[(a - y_0) - d(T) \cdot t]^2}{2\sigma^2 t} \right\} \quad (5)$$

其中 a 为性能临界值.

可靠度函数为

$$R(t) = \Phi\left[\frac{a - y_0 - d(T)t}{\sigma\sqrt{t}} \right] - \exp\left(\frac{2d(T)(a - y_0)}{\sigma^2} \right) \Phi\left[- \frac{a - y_0 + d(T)t}{\sigma\sqrt{t}} \right] \quad (6)$$

其中 Φ 表示标准正态分布的累积分布函数.

2　*SSADT* 的统计分析

由于本文采用 SSADT 的方法来对产品的贮存寿命与可靠性进行评价, 因此与一般评价工作寿命与可靠性的试验方法和统计分析有所不同.

2 1　统计分析与评估

设有 n 个 iid 微波产品, 进行 K 水平的温度 SSADT. 为了评估产品的贮存寿命与可靠性, SSADT 中每间隔 Δt(常数)对产品通电一次, 并进行性能参数检测. 每个应力水平的性能检测次数为 M_k, 共检测 M 次, 即 $\sum_{k=1}^{K} M_k = M$. 则每个应力水平的试验时间为 $M_k \Delta t$ 总试验时间为 $M \Delta t$ 每次检测的时间为 t_{ikj} ($j = 1, \cdots, n \quad k = 1, \cdots, K \quad j = 1, \cdots, M$), 检测到的性能值为 y_{ikj}. 根据式(4)及假设 3 得到基于线性漂移布朗运动的 SSADT 的极大似然函数为

$$L \propto \prod_{i=1}^{n} \prod_{k=1}^{K} \prod_{j=1}^{M_k} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 \Delta t}} \cdot \exp\{ - [(y_{ikj} - y_{ik(j-1)}) - d(T_1) \cdot \Delta t \cdot d(T_k)/d(T_1)]^2 \setminus (2\sigma^2 \Delta t) \} \right\} \quad (7)$$

其对数似然函数为

$$\ln L \propto - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{M_k} \left\{ [\ln(2\pi\Delta t) + \ln(\sigma^2)] + \frac{[\Delta D_{ikj} - A \exp(-B/T_k) \cdot \Delta t]^2}{\sigma^2 \Delta t} \right\} \quad (8)$$

通过对式(8)各参数求偏导数且令其等于零, 并结合文献[4]的加速模型参数求解方法, 则可以求得每个参数的估计值.

2 2　考虑通断电影响的 *SSADT* 评估

通过加速退化试验评价产品贮存寿命与可靠性时, 必须在试验过程中定时通电检测, 才能获得有效的产品性能退化数据. 从而为产品引入了电应力. 但通过这样的试验数据来评估贮存期内本不进行通电检测的微波产品的贮存寿命和可靠性, 会降低评估结果的指导意义. 为此, 必须考虑去除电应力的影响.

目前, 还没有查阅到有关于如何去除电应力对电子产品贮存寿命与可靠性影响的相关文献和报道, 因此本论文提出借鉴 GJB108-98《电子设备非工作状态可靠性预计手册》中对通断电因子的计算, 初步排除试验过程中通断电对微波产品贮存寿命与可靠性的影响.

在 GJB108-98中, 通断电对元器件的影响是通过通断电因子来刻画的, 它通过乘积效应影响元器件的非工作失效率. 由于失效率和退化率都在某种程度上刻画了产品失效发生的快慢, 因此可以将该因子借鉴到产品的退化率中来. 即通断电因子 π_{CYC} 通过乘积效应影响了通断电状态下的产品性能退化率. 那么为了得到产品没有通断电影响的退化率, 则式(2)修正为

$$Y(t) = Y_0 + \sigma B(t) + \frac{d(T)(t - t_0)}{\pi_{CYC}} \quad (9)$$

其中 π_{CYC} 是通断电因子. 然而, GJB108-98并没有针对该微波产品的通断电因子, 而是针对每一种元器件, 给出相应的通断电因子计算方法. 因此对于组件级产品而言, 不能直接使用. 由式(9)可知, 通断电因子越小, 同样时间内的退化就越剧烈, 则对产品寿命的评估结果就越保守. 本论文从保守的角度出发, 选择对通断电影响最小的一类通断电因子来对该微波产品的性能退化过程进行通断电影响的去除.

3　*SSADT* 及其结果分析

本文选择 3 套微波产品进行贮存状态的 SSADT, 试验参数见表 1.

表 1　**SSADT** 试验参数

试验参数	参数取值	试验参数	参数取值
T_1	55℃	M_1	247
T_2	70℃	M_2	174
T_3	80℃	M_3	155
T_4	85℃	M_4	144
Δt	2 h		

试验结果见图 1.

由于微波产品存在温漂, 因此功率增益存在阶梯变化. 去除温漂特性并将各应力水平的功率增益退化数据折合到同一水平[3], 结果见图 2

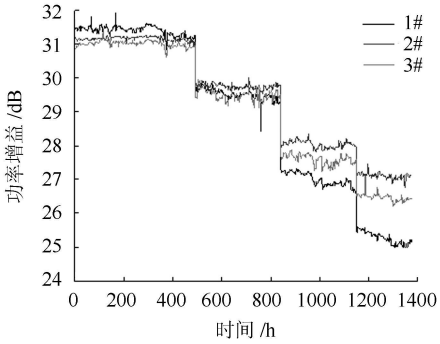

图 1 微波产品功率增益 *SSADT* 试验数据

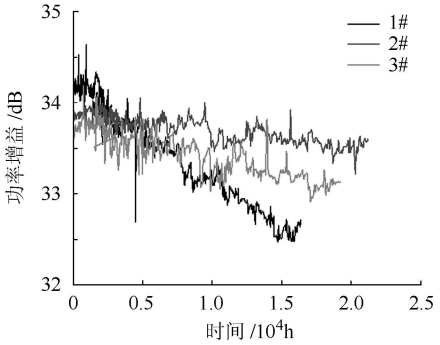

图 2 折合后结果

若将该微波产品的功率增益小于 29 dB 作为失效判据, 则采用本文 2.1节的统计分析方法处理上述结果后, 可得各参数的估计值分别为, $\hat{A}$ = 2.254, $\hat{B}$ = 5.904 75, $\hat{\sigma}$ = 0.057 3.

本试验中, 使用的仅是产品近 1 400 h 的数据, 但外推的却是产品在 80 000 h 后的状态, 外推程度相当大. 而漂移布朗运动可靠性评估模型对样本方差的依赖性较大, 即如果退化数据的样本方差越大, 则评估结果就越保守, 产品可靠度就越低. 所以即使是目前数据的一个小小变化, 也会引起远期数据的大幅波动. 而可靠度本身就是一个概率, 某种程度上刻画了结果的不确定性. 为此, 本文在排除了测试设备的测量不确定性 σ_m = 0.04后, 确定 $\hat{\sigma}$ = 0.017 3.

此外, 本文采用 2.2节的方法, 剔除通断电影响. 通过查阅 GJB108-98, 本文选择半导体模拟集成电路的通断电因子: $\pi_{CYC} = 1 + 0.03N$. 由于 N 为每 1 000 h 的通断电次数, 因此根据本试验实际通断电为 2 h一次, 则 N = 500, π_{CYC} = 16.5.

综上, 本文得到了该微波产品的贮存寿命与可靠性指标, 其可靠度函数如图 3所示.

其中, 产品在 70 080 h(8年)的可靠度为 0.863.

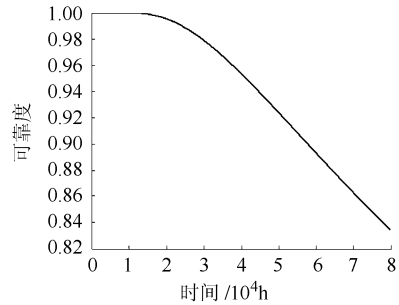

图 3 微波产品的贮存可靠度曲线

4 结 论

1) 本文对某导弹的关键微波电子产品采用加速退化试验方法, 考察了其在温度影响下, 功率增益的贮存寿命和可靠性;

2) 为了剔除试验过程中, 由于通电测试带来的电应力对产品的影响, 本文基于 GJB108-98, 提出了通断电对性能退化影响的计量方法;

3) 由于漂移布朗运动可靠性评估模型严重依赖于样本方差, 因此需要严格把握受试产品的质量一致性和控制试验过程中, 产品测量环节的系统误差以及一些外界随机因素.

参考文献 (**References**)

[1] Meeker William G, Escobar Luis A. Accelerated degradation tests: modeling and analysis [J]. Technometrics, 1998, 40 (2): 89-99

[2] Zhao Wenbiao, Elsayed E A. An accelerated life testing model involving performance degradation [C] //Norman Butler Annual Reliability and Maintainability symposium. Los Angeles: IEEE, 2004: 324-329

[3] 李晓阳. 多态退化系统加速试验技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学工程系统工程系, 2007
Li Xiaoyang. Study on accelerated testing of multi-state degraded system [D]. Beijing: Dept of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

[4] 李晓阳, 姜同敏. 基于加速退化模型的卫星组件寿命与可靠性评估方法[J]. 航空学报, 2007, 28(增刊): S100-103
Li Xiaoyang, Jiang Tongmin. Constant-stress accelerated degradation testing of satellite assemblies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(Sup): S100-103(in Chinese)

(责任编辑: 娄 嘉)