

基于综合环境加速寿命试验的电子装备故障预测研究

贾占强, 蔡金燕, 梁玉英, 李 刚

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003)

摘 要: 对某型雷达天控系统的 20kHz 信号板进行均匀正交试验, 利用试验数据对试验结果进行了深层次的分析, 总结出温湿度条件下电子装备性能衰退的一般规律; 针对在故障预测中占有重要地位的电子装备可靠性预测问题, 提出了一种基于综合环境加速寿命试验的电子装备可靠性预测新方法, 该方法将性能退化理论拓展为加速性能退化理论, 将该理论与传统可靠性预测方法相结合, 有效地解决了加速寿命试验中无失效数据的处理问题, 最后通过具体的算例验证了该方法的有效性。

关键词: 温湿度试验; 金属腐蚀; 加速性能退化; 故障预测; 可靠性预测

中图分类号: TB114. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1277-06

Fault Prediction Research of Electronic Equipment Based on Composition Environmental ALT

JIA Zhan qiang, CAI Jin yan, LIANG Yu ying, LI Gang

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract: Make a uniformly orthogonal testing for 20 kHz signal PCB of radar, and use the testing data to analysis the testing results. Conclude the general rule of performance degradation of electronic equipment in the environment of temperature and humidity; Aiming at the electronic equipment reliability prediction problem, which play an important role in fault prediction, present an new method about electronic equipment reliability prediction based on Combine Environmental ALT. This method extends the performance degradation theory to accelerated performance degradation theory. The no failure data problem in ALT was resolved combining the theory and traditional reliability prediction. In the end, validity of this method was proved by an example.

Key words: temperature and humidity testing; metal cauterization; accelerated performance degradation testing (APDT); fault prediction; reliability prediction

1 引言

传统意义上的故障预测一般要求预测出装备将要发生故障的具体时间, 但是故障预测的作用和目的主要是为预防性维修提供技术支持, 因此我们可以把传统意义上的故障预测进行拓展, 将为预防性维修提供技术支持的可靠性预测、寿命预测、故障趋势预测和传统意义上的故障预测统称为故障预测^[1]。

对于在故障预测中占有重要地位的可靠性预测来说, 由于现代电子装备一般都包含有可靠性极高的元器件或功能模块, 这些产品在包括加速寿命试验方法在内的寿命试验中常只有少量失效或者没有失效出现, 传统的方法已经不再适用于高可靠长寿命电子装备的可靠

性预测。研究发现, 大部分产品的失效机理最终可以追溯到产品潜在的性能退化过程, 从某种意义上可以认为性能退化最终导致了产品失效(或故障)的出现。因此, 可以利用给定应力下的退化轨迹外推出产品的失效时间, 而后使用这些数据来对产品进行可靠性预测^[2~4]。

在工程技术领域已经出现了许多涉及退化数据的实际问题, 但这些研究多是在单应力条件下进行的^[5~8]。本文在温湿度综合环境应力作用下, 对电路板温湿度试验结果进行深层次的分析, 总结出湿热条件对电路板可靠性影响的一般性规律, 之后将性能退化理论引入到高可靠长寿命电子装备的故障趋势预测中, 设计出电子装备可靠性预测的方法及步骤, 最后利用某型雷达天控系统的 20kHz 信号板试验数据对该方法进行了验证。

2 试验分析

均匀正交试验已经广泛应用于社会生产的方方面面,采用该试验方法可以极大地减少试验次数,降低试验的费用^[9].为此,本文以均匀正交试验设计方案为基础,在温湿度共同作用下安排了四组试验:110℃-65%,80℃-55%,100℃-25%和90℃-85%,每组放置四个样品.

在连续进行1200多个小时试验后,得到全部监测数据.在此,截取了部分试验输出采样图,图1为电路板在正常环境条件下初始输出采样图,图2~4分别为各环境条件下样本后期输出采样波形.图中波形曲线是压缩了时间轴长度后的波形,在实际分析时将波形曲线拉长展开便可进行详细的观测与分析.与波形相对应的是1000个采样电压值,它们和波形以Excel文件的格式存储在计算机中.

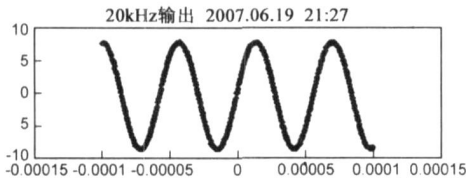


图1 电路板试验初始输出图

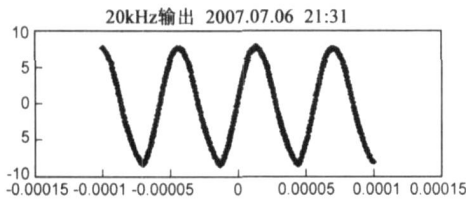


图2 电路板试验后期输出图(80℃-55%)

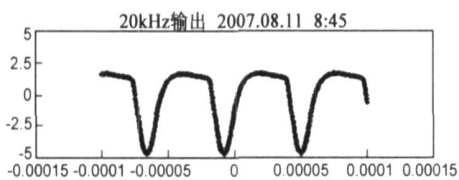


图3 电路板试验后期输出图(90℃-85%)

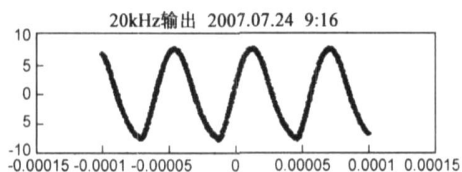


图4 电路板试验后期输出图(100℃-25%)

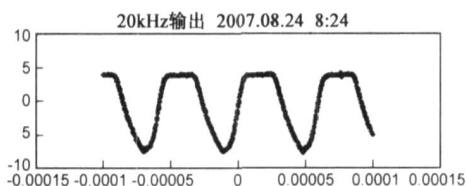


图5 电路板试验后期输出图(110℃-65%)

由图2~4可以看出在相对湿度较低时,随着温度的增加,样品的失效速度并不加快.当相对湿度大于65%时,样品的失效速度明显加快.经深入分析,主要是由“金属腐蚀”造成的.所谓“金属腐蚀”是指,当金属与周围介质接触时,由于发生化学作用或电化学作用而引起的金属破坏.金属腐蚀现象十分普遍,其中最常见的是大气腐蚀^[10].因为金属制品不论是在加工、运输、贮存、使用过程中,都难免与大气接触.

大气腐蚀就其本质而言,属于电化学腐蚀过程.大气腐蚀时,大气中的水分在金属表面凝结而形成电解池^[11].腐蚀系在金属表面上残留的一层电解液膜中进行.水膜必须达到一定厚度,金属才开始逐渐从防护层的薄弱部位(针孔、划伤、夹杂、磕碰等)进行腐蚀.通常把这种现象的相对湿度条件叫做金属的临界腐蚀湿度.如铁的临界湿度为70%,铜的临界湿度为60%,铝的临界湿度为76%等.这就是说在金属的临界湿度以上,水膜更易形成.当湿度为60%时,就有一分子层厚的水膜,相对湿度为90%时,就有两分子层厚的水膜.当金属上的水膜厚度小于10nm时,只能使金属有轻微腐蚀,这称之为“干腐蚀”.若水膜厚度增加到1μm时,腐蚀速度随水膜的厚度增加而急剧上升,这时,称之为“湿腐蚀”.此外,大气中的氧、二氧化碳等气体或尘埃、盐分等杂质的污染,会加剧产品的电化学腐蚀.

均匀正交试验数据表明,电子装备在日常使用过程中,相对湿度是影响其状态的一个非常重要的因素.在相对湿度较低时,随着温度的增加,腐蚀速度并不快.它们基本遵循如下关系式:

$$A = (H - 65) \times kT \quad (1)$$

式中: A —为腐蚀速度; H —为相对湿度(%); T —温度(K); k —常数.这与腐蚀速度随温湿度变化的经验关系式^[12]是一致的.按照关系式(1),当大气中相对湿度为65%以下时,电子装备的退化速度相对较慢;当大气湿度超过65%时,随着温度的增高电子装备的退化速度将会急剧增加.

上面利用样本均匀正交试验数据就温湿度对电子装备可靠性的主要影响进行了分析,下面将就通用雷达装备板级可靠性预测与评估的一系列问题进行探讨.

3 性能退化的基本理论

针对现代电子产品可靠性预测的难点问题,本节将性能退化理论拓展为加速性能退化理论,并将该理论与传统可靠性预测方法相结合,用于解决加速寿命试验中无失效数据的处理问题.

3.1 加速性能退化的基本概念

退化是能够引起产品性能发生变化的一种物理或化学过程,这一变化随着时间逐渐发展,最终导致产品

失效. 如果产品在工作或储存过程中, 某种性能随时间的延长而逐渐缓慢的下降, 直至达到无法正常工作的状态(通常规定一个评判的临界值, 即退化失效标准或失效阈值, 则称此种现象为退化型失效, 如元器件电性能的衰退、机械元件磨损、绝缘材料的老化等. 产品性能参数随测试时间退化的数据, 称为退化数据(Degradation Data).

相对于失效时间数据来说, 产品的性能退化数据包含了更多的可靠性信息, 通过产品的性能退化信息进行可靠性分析可以更加节省试验时间和费用. 但是在很多实际问题中, 产品在其工作环境中的退化过程极其缓慢, 有时在很长的测量周期内, 退化量的变化微乎其微, 甚至这种微小的变化都比不上测量误差, 这种情况在长寿命高可靠产品中尤为显著, 此时参照加速寿命试验的思想将应力水平提高, 进而使退化加速, 这种方法称之为加速性能退化试验.

3.2 退化特征参数的选取

为了判断产品的退化失效情况, 通常选几项主要技术性能指标作为性能退化特性参数, 当这几项技术性能指标中一项或几项超出设计任务书规定的范围, 则产品出现退化失效. 因此, 性能退化失效特性参数必须具备两个条件: 一是必须有准确定义而且能够进行监测; 二是随着产品工作或试验时间的延长, 有明显的趋势性变化, 能客观反映产品的工作状态.

3.3 退化轨迹

设单个产品在不同应力条件作用下相对于时间的实际退化轨迹由 $D(t, S_q)$ 来描述, 实际上 $D(t, S_q)$ 的值可以在时间 t_1, t_2, \dots, t_m 监测得到, 第 i 个产品在应力 S_q 作用下 t_j 观测到的退化值为

$$y_{ij} = D\left(t_{ij}, S_q, \beta_{li}, \dots, \beta_{ni}\right) + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; q = 1, \dots, k$$

这里 $D(t, S_q)$ 为第 i 个产品在时间 t_{ij} 的实际轨迹, $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_\varepsilon)$ 为测量误差.

当产品的退化量达到某一临界水平(定义为失效阈值) D_f 时, 假设此时出现失效(软故障), 那么产品的故障时间 T 可以定义为产品实际退化轨迹 $D(t, S_q)$ 达到临界退化水平 D_f 的时间. 由于产品之间的退化轨迹是随机的, 因而达到退化水平的时间也将从一个产品到另一个产品随机出现, 这样我们就可以利用随机分布来描述产品间退化量的变化以建立模型. 产品失效时间分布可以通过描述 $D(t, S_q)$ 与 D_f 之间关系的退化数据模型推导得到.

3.4 进行加速性能退化分析的前提

试验是否具有加速性是进行加速性能退化试验的关键所在, 为保证加速退化试验能正常进行, 需做出以

下假定:

(1) 在各加速应力水平下, 产品失效机理(模式)保持不变;

(2) 存在有规律的加速过程;

(3) 在各加速应力水平下, 产品的退化过程服从同族随机过程, 即应力水平变化时, 产品退化随机过程保持不变, 改变的只是过程参数.

4 建模方法及算法说明

在可靠性试验中, 连续监测产品性能的退化过程是非常困难的, 因此可以在试验过程中定时测试产品的性能特征. 记录到的性能退化量(退化数据)就包含了大量的关于产品性能劣化及可靠性的有用信息^[7].

对于某些性能退化特征明显的产品来说, 退化机理容易理解, 因此可以利用退化特征量与时间的关系(即产品性能退化轨迹)来直接推导产品的可靠性. 对于性能退化特征不明显的产品, 退化模型的定量关系不能直接表述出来, 需要用到诸如回归分析之类的分析方法与技术. 在很多情况下, 产品的退化轨迹模型常常是参数的非线性函数, 估计这类模型的参数时往往计算量巨大.

对于大多数具有软故障(即性能退化)的产品来说, 尤其是电子组件, 退化轨迹一般可以利用以下几种线性模型来进行有效的拟合^[7, 8].

$$y = \alpha_t + \beta_t \quad (3)$$

$$\log(y_i) = \alpha_t + \beta_t t \quad (4)$$

$$\log(y_i) = \alpha_t + \beta_t \log(t) \quad (5)$$

上面各式中 y_i 为产品的性能参数指标, i 为某一应力水平 S_q 作用下的受试样本数, t 为试验时间, α_t, β_t 为未知参数, 其值可以通过退化数据估计获得, $\log(\cdot)$ 为自然对数或常用对数. 退化轨迹曲线是单个试验样本在某一应力水平作用下性能退化相对时间的轨迹. 对于 m 个试验产品, 存在表现退化过程的 m 个退化轨迹曲线.

假设样本的退化轨迹满足上述的几组退化模型, 那么可以外推求出不同样本在某一应力作用下达到阈值的时间. 由于这些时间并不是样本的实际失效时间, 但又要用它们来评估产品可靠度, 因此称其为伪失效寿命时间(Pseudo Failure Lifetime). 而后对每个样本的寿命时间进行寿命分布检验, 即可得到产品的寿命分布.

假设在 k 个应力水平下进行加速退化试验, 随机抽取 n 个受试样本, 将这些受试样本分为 k 组, 每组样本数为 $n_j (j = 1, 2, \dots, k)$, 则有 $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$. 对每个样本的性能退化量进行记录, 共测 m 次, 测试时间记为: t_1, t_2, \dots, t_m ; 第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个样本的退化量用 y_i 表示.

基于加速退化轨迹的可靠性预测算法如下:

Step1 收集试验样品在时间 t_1, t_2, \dots, t_m 的性能退化数据, 根据性能退化曲线趋势, 选择适当的退化模型;

Step2 根据记录的性能退化数据估计各个样本性能退化模型的参数, 即为式 (2) 中 $D \left(t_{ij}, S_{qj}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{ni} \right)$ 的 $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \dots, \beta_{ni}$ 的估计值;

Step3 假设失效阈值为 D_f , 根据求得的样本退化模型, 求出对应应力作用条件下的伪失效寿命 T_1, T_2, \dots, T_n ;

Step4 对伪失效寿命数据进行分布假设检验, 选择伪失效寿命数据可能服从的分布, 高可靠长寿命产品的失效寿命一般服从 Weibull 分布、对数正态分布或正态分布;

Step5 将上面得到的伪失效寿命数据视为完全寿命数据, 根据选定的寿命分布利用传统的可靠性预测方法对电子装备进行可靠性预测.

5 基于加速性能退化试验的可靠性预测

5.1 退化模型的选择

前面已经对应用加速性能退化试验进行可靠性预测的理论和进行了阐述, 本节以某雷达天控系统的 20kHz 信号板为研究对象, 将其峰峰值作为退化特征参数进行监测.

在得到监测数据后, 利用 Matlab 数理统计分析模块对试验数据进行拟合分析得出: 峰峰值的对数呈直线退化的拟合度最高(见图 6, 以 $100^\circ\text{C}-25\%$ 为例), 故选择方程(4)作为该温湿度环境下电路板的退化模型.

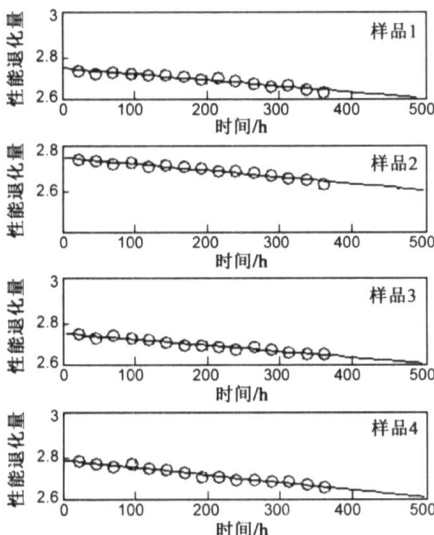


图6 电路板性能退化轨迹($100^\circ\text{C}-25\%$)

5.2 退化模型参数的估计与伪失效寿命数据计算

由 5.1 中分析可知, 利用最小二乘法对每一个样本

的退化模型参数进行估计, 得到各样本退化轨迹模型分别为(仍以 $100^\circ\text{C}-25\%$ 为例):

$$\begin{aligned} \log(y_1) &= -0.00067343x + 2.7992 \\ \log(y_2) &= -0.00018178x + 2.7281 \\ \log(y_3) &= -0.00027476x + 2.7505 \\ \log(y_4) &= -0.00029933x + 2.7831 \end{aligned} \quad (6)$$

同理可以得到另外三组试验条件下电路板退化拟合轨迹.

根据装备实测获得该电路板输出信号的峰峰值为 18.0V, 在该型雷达技术勤务手册中未查到其失效标准, 为此根据经验将失效阈值设为实测值的 80%~120%, 即样本的失效阈值为 14.4V 和 21.6V. 由于各试验条件下样本的拟合轨迹单调递减, 因此判定失效阈值为 14.4V. 将其代入样本的拟合轨迹, 外推得到各样本的伪失效寿命, 如表 1 所示.

表 1 各样本失效寿命数据

温湿度条件	寿命数据(h)			
$80^\circ\text{C}-55\%$	427.745	585.098	964.912	972.106
$100^\circ\text{C}-25\%$	195.977	303.081	334.822	387.015
$90^\circ\text{C}-85\%$	40.000	44.000	52.000	66.500
$110^\circ\text{C}-65\%$	44.750	47.670	105.858	116.086

5.3 分布的拟合优度检验与参数估计

得到产品的失效寿命数据后, 利用文献[13]中的可靠性数据处理软件对表 1 数据进行拟合优度检验, 结果表明寿命试验数据基本符合对数正态分布(如图 7 所示), 表征分布拟合优劣的参数——相关系数 r 的值如表 2 所示, 其中 r 越趋近于 1 表明拟合度越高. 通过对失效寿命进行, 还可以求出对数正态分布的参数 μ 和 σ 进行估计, 其估计值表 2 所示.

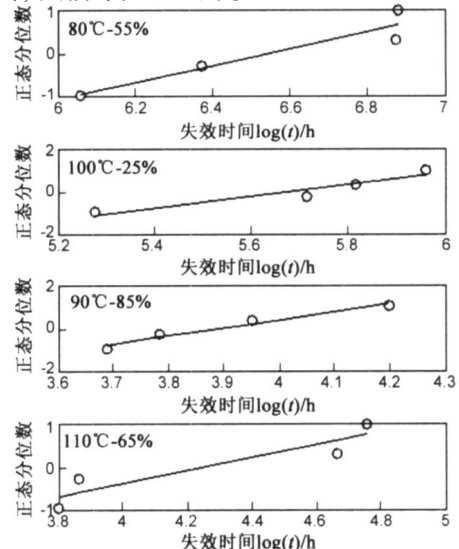


图7 伪失效寿命数据拟合优度检验图

按照对数正态寿命数据统计分析时的基本假定, 必须保证在各应力条件下对数标准差相同, 即

$\sigma_0 = \sigma_1 = \dots = \sigma_k$. 但在实际试验中求得 σ 不一定相同 (这是由于试验误差及分析误差造成的, 同时与样本量较小有关系), 为此需要对对数标准差 σ 的相等性进行检验. 在此用巴特利特检验四组对数方差 σ_i^2 相等性, 采用文献[14]中的公式(4.16)计算 B^2 和 C .

$$B^2 = \sum_{i=1}^4 (4-1) \left\{ \ln \left[\sum_{i=1}^4 (4-1) \sigma_i^2 \right] - \ln \left[\sum_{i=1}^4 (4-1) \right] \right\} - \sum_{i=1}^4 (4-1) \ln \sigma_i^2 = 2.5323$$

$$C = 1 + \frac{1}{3 \times 4} \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{1}{4-1} - \left[\sum_{i=1}^4 \frac{1}{4-1} \right]^{-1} \right\} = 1.1389$$

$$B^2/C = 2.2235$$

取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 查文献[14]的附表 2 知 $\chi_{0.05}^2(3) = 7.815$, 由于

$$B^2/C < \chi_{0.05}^2(3)$$

因此, 可以认为四个应力组合水平下对数方差是相等的, σ_s^2 的估计为

$$\hat{\sigma}_s^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 = 0.2210$$

5.4 可靠性预测

(1) 加速模型的确定

加速寿命试验的基本思想是利用高应力水平下的寿命特征去外推正常应力水平下的寿命特征. 实现这个基本思想的关键在于建立寿命特征与应力水平之间的关系, 借用这个关系才能实现外推的目的.

研究发现, 湿度对产品的影响基本符合如下模型:

$$\xi_H = A e^{\frac{b}{H}} \quad (7)$$

其中, ξ 是某特征寿命, 如中位寿命, 平均寿命等; A 是一个常数, 且 $A > 0$; H 是相对湿度(单位%). 该模型表明, 寿命特征随着温度的上升而按指数下降. 对此模型两边取对数, 可得

$$\ln \xi_H = a + b/H \quad (8)$$

其中, a, b 均为待定参数.

此外, 根据阿伦尼斯(Arrhenius)模型可知

$$\ln \xi_T = a + b/T \quad (9)$$

其中, a, b 均为待定参数, T 为温度(单位K).

对于双应力作用的加速模型, 假设产品的平均寿命 ξ 与两个加速应力水平 S_1^i 和 S_2^j 之间的加速模型为

$$\ln \xi_y = \beta_0 + \beta_1 \varphi_1(S_1^i) + \beta_2 \varphi_2(S_2^j) \quad (10)$$

其中, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 都是待估参数. 函数 φ_1, φ_2 为已知函数. 按照这一假设, 将温度与湿度的模型假定为

$$\mu_y = \ln \xi_y = \beta_0 + \beta_1/T_i + \beta_2/H_j \quad (11)$$

(2) 加速模型中的参数估计

样品的对数均值参数 μ 已经在 5.3 中求出, 见表 2. 按照双应力条件下对数正态分布参数的 BLUE 对模型参数进行估计, 求得相应的参数分别为

$$\beta_0 = -19.6, \beta_1 = 8610.3, \beta_2 = 60.7$$

将其代入式(11)得到模型

$$\mu_y = -19.6 + 8610.3/T + 60.7/H \quad (12)$$

取温度 T 为 293K (20°C), 湿度取 50% (根据 2004 中国统计年鉴华北主要城市平均湿度状况) 时 $\mu_{TH} = 11.0007$ (平均寿命 $T = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} = 6.691 \times 10^4$ h), 从而可以得到该温度湿度条件下的可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - \Phi((\ln t - 11.0007)/0.4701)$$

图 8 给出该信号板在正常温湿度条件下的可靠度曲线.

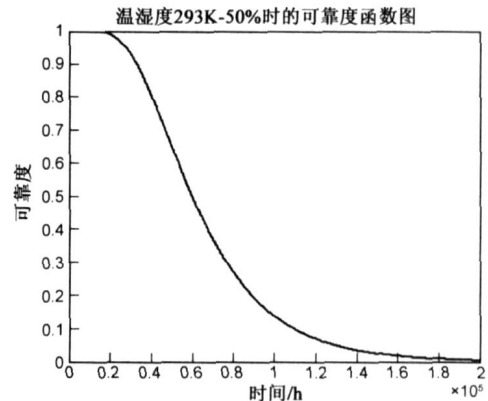


图8 可靠度曲线

当 $t = 20000$ h 时的可靠度 $R(20000) = 0.9902$, 这表明该信号板中有超过 99% 的样品寿命要超过 20000h, 其他参数的估计可以参考文献[14].

另外, 根据 2000 年通过鉴定的“通用雷达装备故障分析与仿真系统”对该电路板的可靠性分析预计, 得出其平均寿命为 6.9371×10^5 h, 这与利用本文方法所求得特征寿命参数存在一定的误差. 经深入分析, 误差主要来源于以下三方面: (1) 本文试验中所选用的器件均为民用级, 在质量上与军品级存在 1~2 个数量级的差距; (2) 该分析仿真系统只是考虑了温度的影响因素, 而未考虑湿度对电路板可靠性的影响; (3) 试验的随机性.

6 小结

该信号板共进行了近 1200 多个小时的加速试验, 通过对试验数据的分析处理, 可以知道在高温高湿下,

信号板性能衰退主要由“金属腐蚀”引起, 这为装备环境防护提供了重要的参考依据. 最后对温湿度作用下该电路板的可靠性模型进行了研究, 并对其关键可靠性指标进行了预计. 最后的各项指标表明, 基于失效数据可靠性评估及加速性能退化试验数据的故障趋势预测方法应用于无失效样本的可靠性预测是可行有效的.

参考文献:

- [1] 李刚. 基于多源信息融合的电子装备故障预测方法研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2006. 76– 85.
Li Gang. Fault prediction research of electronic equipment based on multi source information fusion technique [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2006. (in Chinese)
- [2] Zehua Chen, hurong Zheng. Lifetime distribution based degradation analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54 (1): 3– 10.
- [3] Jayaram J S R, Girish T. Reliability prediction through degradation data modeling using a quasi likelihood approach [A]. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. 193– 199.
- [4] Di Xu, Wenbiao Zhao. Reliability prediction using multivariate degradation data [A]. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. 337– 341.
- [5] Vladimir Crk. Reliability assessment from degradation data [A]. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. 155– 161.
- [6] Lu J C, Meeker W Q. Using degradation measures to estimation a time to failure distribution [J]. Technometrics, 1993, 35 (2): 161– 174.
- [7] Lu J C, Jinho Park, Qing Yang. Statistical inference of a time to failure distribution derived from linear degradation data [J]. Technometrics, 1997, 39 (4): 391– 400.
- [8] Meeker M Q, Escobar L A. Statistical Methods for Reliability Data [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998. 48– 66.
- [9] 朱海峰. 环境应力作用下航天电连接器可靠性试验方案研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003. 50– 51.
Zhu Hai feng. Research on electrical connector reliability test plan under environment stresses [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. 50– 51. (in Chinese)
- [10] 姚立真. 可靠性物理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 135– 155.
- [11] 陶遵光等. 谈湿热试验结果与长期贮存的相关性 [J]. 表面技术, 2000 (4): 31– 33.
- [12] 卢昆祥. 电子产品可靠性试验 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1987. 98– 100.
- [13] 贾占强. 通用雷达装备板级可靠性评估与试验研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008. 52– 57.
Jia Zhan qiang. Reliability estimation and test research of PCB for general radar equipment [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2008. 52– 57. (in Chinese)
- [14] 郭诗松, 王玲玲. 加速寿命试验 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 26– 84.

作者简介:



贾占强 男, 1982 年生于河北石家庄. 中国人民解放军军械工程学院光学与电子工程系博士研究生. 研究方向为武器系统性能监测与故障诊断. Email: xyg11982@126.com



蔡金燕 女, 1961 年生于天津. 教授, 博士生导师. 研究方向为武器系统性能监测与故障诊断.