

基于步进加速退化试验的某型电连接器可靠性评估

王浩伟^a, 徐廷学^b, 张鑫^b

(海军航空工程学院, a. 研究生管理大队; b. 兵器科学与技术系, 山东烟台 264001)

摘要: 某导弹电连接器属于高可靠性、长寿命产品,在短时间内很难获取其失效数据。为了评估其可靠性,在分析其失效机理的基础上设计了步进应力加速退化试验,通过分析加速退化数据外推出产品在正常工作应力水平下的可靠度函数。试验中,以电连接器的接触电阻作为性能参量,选取温度作为加速应力。数据分析时利用 Wiener 随机过程对样品退化进行建模,为了提高模型参数的估计精度,采用极大似然法对所有性能退化数据进行整体统计推断。结果表明,提出的基于加速退化数据分析的方法实用、有效,实现了某导弹电连接器的可靠性评估并可为其他高可靠性产品的可靠性评估工作提供参考。

关键词: 可靠性评估; 电连接器; 步进加速退化试验; Wiener 过程

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0104-04

Reliability Assessment for a Certain Type of Electrical Connector Based on Step-Stress Accelerated Degradation Test

WANG Hao-wei^a, XU Ting-xue^b, ZHANG Xin^b

(Naval Aeronautical and Astronautical University, a. Graduate Students' Brigade;

b. Department of Ordnance Science and Technology, Yantai 264001, China)

Abstract: Since a certain type of missile electrical connector is a product with high reliability and long lifetime, it is difficult to obtain failure-to-time data in a short time. For assessing the reliability of the product, a step-stress accelerated degradation test was designed based on analysis to its failure mechanism. Then, the reliability function at the normal use stress level was extrapolated from the accelerated degradation data. In the test, the contact resistor was taken as the performance index and temperature was used as accelerated stress. When analyzing degradation data, Wiener process was adopted to model the degradation process. A maximum likelihood function integrating all the degradation data was established for improving the accuracy of estimation. The results show that the proposed approach based on analyzing accelerated degradation data is practical and effective, which can realize the reliability assessment of the missile electrical connector and can be extended to evaluate the reliability of other highly reliable products.

Key words: reliability assessment; electrical connector; step-stress accelerated degradation test; Wiener process

0 引言

近年来,越来越多的长寿命、高可靠性产品出现在军工、航空航天等领域,采用传统的基于失效时间数据的可靠性评估方法无法有效预测其寿命,但是一些高可靠性产品的某些性能指标会随着时间产生退化,对

这些性能退化量进行测量、分析,就可推测出产品的可靠性信息。某导弹电连接器的接触电阻在使用过程中有变大的趋势,当接触电阻退化量达到失效阈值时,电连接器发生失效,所以,可通过性能退化分析的途径研究产品性能退化与寿命之间的关系,通过退化数据对产品进行可靠性评估与寿命预测^[1-2]。然而对于某些高可靠性产品,也难以短时间在正常工作应力水平下获得足够的退化数据,为此加速退化试验的方法被采用。

由于产品退化具有随机性,适合采用随机过程对其退化过程进行建模。维纳过程(Wiener)是一种具有

收稿日期:2013-10-22

修回日期:2013-11-17

基金项目:国家自然科学基金(61273058)

作者简介:王浩伟(1981—),男,山东莱州人,博士生,研究方向为装备综合保障技术。

平稳、独立高斯增量的随机过程,已被广泛应用到产品性能退化建模领域^[3-4]。文献[5]使用具有时间尺度转换的 Wiener 过程对某电缆的性能退化过程进行了分析;文献[6]利用 Wiener 过程对航天机电产品进行可靠性建模,并进行了寿命预测;文献[7]利用 Wiener 模型对金属化膜电容器进行了性能退化分析,提出了剩余寿命的估计方法。

为解决某导弹电连接器可靠性评估与寿命预测问题,首先在分析其失效机理的基础上设计了步进加速退化试验,试验中,以电连接器的接触电阻作为性能参量,选取温度作为加速应力;接着综合利用 Wiener 随机过程和 Arrhenius 反应率模型进行可靠性建模,为了提高模型参数的估计精度,采用极大似然法对所有性能退化数据进行整体统计推断;最后推导出产品的可靠度函数,对该导弹电连接器的可靠性做出了评估。

1 某导弹电连接器失效机理分析

某导弹电连接器的失效模式主要有接触电阻失效、机械失效和绝缘失效 3 种类型,其中,接触电阻失效是电连接器失效的主要原因。电连接器的寿命主要受温度应力影响,高温可促使插针表面氧化物加速生成,氧化物的堆积促使接触电阻不断增大最终导致电连接器失效^[8-9]。

对于表面镀金的铜基接触件,镀金层中会不可避免地出现一些裂纹、小孔。由于微观毛细作用,潮湿气体和腐蚀性气体渗入、接触到基体金属铜并沉积下来形成电解液。镀金层与铜基材料在电位差的作用下形成原电池,Cu⁺扩散到触点表面并发生氧化反应,从而形成氧化物膜层。由于存在隧道效应,随着氧化物膜层厚度的增加,隧道电阻率逐渐增大,从而接触电阻也不断增大。当膜层厚度小于 3 nm 时,隧道电阻率 ρ 与膜层厚度 h 之间为线性关系

$$\rho = \lambda \cdot h \quad (1)$$

式中, λ 为比例常数。

因此,接触电阻增量 ΔR 与膜层厚度 h 的关系满足

$$\Delta R = R - R_0 = \lambda(h - h_0)/S \quad (2)$$

式中: h_0 为膜层的初始厚度; S 为接触面积。

氧化物膜层的厚度直接反映了电连接器接触电阻的退化情况。随着膜层厚度的增加,Cu⁺通过氧化物膜层变得困难,膜层的增长速度因此降低。可认为氧化物膜层增长速度与厚度之间的关系满足 $h = \sqrt{\theta t}$,其中, θ 表示氧化物膜层的生长速率。当 $h_0 = 0$ 时,接触电阻增量可表示为

$$\Delta R = \gamma\sqrt{t} \quad (3)$$

式中, $\gamma = \lambda\sqrt{\theta}/S$, γ 表示接触电阻的增长率,可用 Wie-

ner 过程的漂移参数描述。考虑到触点氧化物膜层生长的不均匀性和每次测量的不确定度,实际测量的退化数据和理论值之间会存在一个差值 ε ,由于 ε 具有随机性,此处用 Wiener 过程的扩散参数描述。

2 加速退化试验设计

因为接触电阻失效是该电连接器失效的主要原因,故选取接触电阻为性能退化参数,而温度作为对试验对象寿命影响最大的应力,被确定为唯一的加速应力。目前应用比较成熟的加速试验方式有恒定应力、步进应力、序进应力 3 种,综合考虑到试验的效率和可操作性^[10],本试验选用步进应力加速方式获取产品的性能退化数据。

1) 随机抽取 10 个样品,根据摸底试验确定在 3 个温度应力下($T_1 = 70$ °C, $T_2 = 100$ °C, $T_3 = 125$ °C)依次进行加速试验。 $T_0 = 40$ °C 为产品正常工作应力水平。

2) 首先在试验开始前对 10 个样品进行测量得到初始退化量(y_{0k}, t_{0k}),其中, $k = 1, 2, \dots, 10, t_{0k} = 0$,然后在每个加速应力下对性能退化参数各进行 10 次测量。在 T_1 下的测量间隔为 48 h;在 T_2 下的测量间隔为 24 h;在 T_3 下的测量间隔为 12 h。

3) 在 T_0 下使用 Agilent 3458a 数字多用表对样品的退化量进行测量,要求样品在测量前冷却到 T_0 温度。根据该电连接器的技术文件规定,确定接触电阻的失效阈值为 5 m Ω 。

3 可靠性建模

3.1 Wiener 过程

Wiener 过程是一种具有连续时间的随机过程,适用于对非严格单调的退化过程进行建模。Wiener 过程 $\{Y(t) = \mu \cdot \Lambda(t) + \sigma \cdot B(\Lambda(t))\}$ 的独立增量 $\Delta Y(t) = Y(t + \Delta t) - Y(t)$,服从如下形式的正态分布

$$\Delta Y(t) \sim N(\mu \cdot \Delta \Lambda(t), \sigma^2 \cdot \Delta \Lambda(t)) \quad (4)$$

式中: μ 为漂移参数; σ ($\sigma > 0$) 为扩散参数; $\Lambda(t)$ 为时间 t 的单调递增函数并且恒有 $\Lambda(0) = 0, \Delta \Lambda(t) = \Lambda(t + \Delta t) - \Lambda(t)$,为时间增量; $B(\cdot)$ 为标准布朗运动。

设样品的失效阈值 l 为一常量,当样品退化量 $Y(t)$ 首次达到失效阈值时定义为样品失效,样品寿命 ξ 满足 $\xi = \inf\{X(t) \geq l\}$ 。经证明,首次达到失效阈值的时间分布服从逆高斯分布^[11],经时间尺度转换 $\tau = \Lambda(t)$,概率密度函数为

$$f(\tau | \mu, \sigma, l) = \frac{l}{\sqrt{2\pi\sigma^2\tau^3}} \exp\left[-\frac{(l - \mu\tau)^2}{2\sigma^2\tau}\right] \quad (5)$$

可靠度函数为

$$R(\tau) = \Phi\left(\frac{l - \mu\tau}{\sigma\sqrt{\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2\mu l}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-l - \mu\tau}{\sigma\sqrt{\tau}}\right) \quad (6)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态函数。

3.2 反应率模型

产品在不同的应力水平下,退化率以某种规律发生变化。反应率模型正是对这种规律的数学建模,反映了产品退化率与应力水平之间的关系。目前加速试验中常用的加速应力有温度、湿度、电应力、振动等,常用的反应率模型有阿伦尼斯模型、逆幂率模型、艾林模型等。对于温度应力,可用阿伦尼斯方程描述退化模型参数与应力之间的关系^[12]。对于 Wiener 过程,广泛采用的假设是漂移参数 μ 与应力有关,而扩散参数 σ 与应力无关。据此, μ, σ 可表示为

$$\mu(T) = \exp\left(a - \frac{b}{T}\right), \quad \sigma(T) = \sigma \quad (7)$$

式中: a, b 为非负待定系数; T 为温度应力。

3.3 参数估计

假设 y_{jk} 为第 k 个样品在第 j 个加速应力下第 i 次的测量值, t_{ijk} 为第 k 个样品在第 j 个加速应力下进行第 i 次测量的时刻, $\Delta y_{ijk} = y_{ijk} - y_{i-1,jk}$, 为性能退化量的增量, $\Delta A(t_{ijk}) = A(t_{ijk}) - A(t_{i-1,jk})$, 为时间增量。根据 Wiener 过程的特性可知

$$\Delta y_{ijk} \sim N(\mu(T) \cdot \Delta A(t_{ijk}), \sigma^2 \cdot \Delta A(t_{ijk})) \quad (8)$$

可建立极大似然函数为

$$L(a, b, \sigma) = \prod_{i=1}^{10} \prod_{j=1}^3 \prod_{k=1}^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 \Delta A(t_{ijk})}} \cdot \exp\left[-\frac{(\Delta y_{ijk} - \exp(a - b/T_j) \Delta A(t_{ijk}))^2}{2\sigma^2 \Delta A(t_{ijk})}\right] \quad (9)$$

对于 $y_{0,j,k}, t_{0,j,k}$, 存在以下关系

$$\begin{cases} y_{0,1,k} = y_{0k}, t_{0,1,k} = 0, & j = 1 \\ y_{0,j,k} = y_{10,j-1,k}, t_{0,j,k} = 0, & j = 2, 3 \end{cases} \quad (10)$$

将 $\Delta y_{ijk}, \Delta A(t_{ijk}), T_j$ 代入式(9), 可求得未知参数的极大似然估计值。

4 可靠性评估

通过步进加速退化试验得到 10 个样品相对于初始退化量的退化增量, 如图 1 所示。

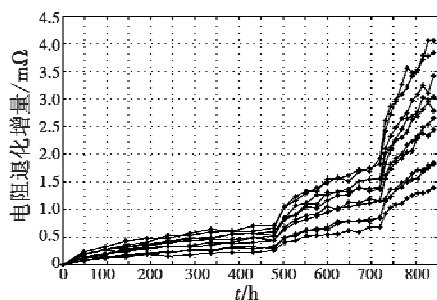


图1 各样品接触电阻值的退化增量

Fig. 1 Degradation increments of contact resistance

为了计算与表示方便,在接下来的计算过程中测量时间单位使用千小时。通过之前的失效机理分析可知,样品的接触电阻增量与测量时间的关系为 $\Delta R = \gamma\sqrt{t}$, 故设 $A(t) = \sqrt{t}$, 此时, $A(t)$ 是参数固定为 0.5 的幂率函数。为了评价通过失效机理分析得出的退化模型是否合理,同时设 $A(t) = t^c$, c 为待估系数,可通过式(9)得出极大似然估计值。通过比较两种情况下极大似然估计的 AIC (Akaike Information Criterion) 值,判断两种情况下退化模型与实测退化数据的拟合情况。可计算得出 AIC 值为

$$R_{AIC} = -2 \times (\max l) + 2m \quad (11)$$

式中: $\max l$ 表示对数似然函数的最大值; m 表示待估参数的个数。

AIC 值越小,说明模型与数据拟合得越好,未知参数的极大似然估计值和 AIC 值如表 1 所示。

表1 参数的极大似然估计值

Table 1 Maximum likelihood estimates of parameters

模型	极大似然估计值				AIC 值
	\hat{a}	\hat{b}	\hat{c}	$\hat{\sigma}^2$	
$A(t) = t^{0.5}$	14.953	4988.137	-	0.176	-620.954
$A(t) = t^c$	14.819	4944.085	0.489	0.175	-619.092

从表中可知,当 $A(t) = t^c$ 时利用加速退化数据估计得 $\hat{c} = 0.489$, 这与经失效机理分析得出的 $c = 0.5$ 相差不大,而且两种情况下 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{\sigma}^2$ 的估计值较为接近,可证明之前的失效机理分析是合理且较为准确的。对 AIC 值进行比较可知, $A(t) = t^{0.5}$ 时退化模型与测量数据拟合得更好,故接下来根据 $A(t) = t^{0.5}$ 进行可靠性评估。

根据式(7),可外推出在 T_0 下的漂移参数的估计值为 $\hat{\mu}_0 = 0.377$ 。由式(5)可得产品在 T_0 下的失效密度函数为

$$f(t) = \frac{4.758}{t^{0.75}} \exp\left[-\frac{(5 - 0.377 \cdot t^{0.5})^2}{0.352 \cdot t^{0.5}}\right] \quad (12)$$

由式(6)可得产品在 T_0 下的可靠度函数为

$$R(t) = \Phi\left(\frac{5 - 0.377 \cdot t^{0.5}}{0.419 \cdot t^{0.25}}\right) - 2.051 \times 10^9 \cdot \Phi\left(\frac{-5 - 0.377 \cdot t^{0.5}}{0.419 \cdot t^{0.25}}\right) \quad (13)$$

产品在 T_0 下的概率密度曲线和可靠度曲线分别如图 2、图 3 所示。

根据可靠度函数,可进一步对产品的寿命信息进行推断。产品的平均寿命为 176.036 kh,可计算得出

$$\bar{\xi} = A^{-1}(\bar{\tau}) = (L/\hat{\mu}_0)^2 \quad (14)$$

产品的可靠寿命可为产品定寿、制定预防性维修策略等提供重要的参考。根据可靠度函数,可计算出几个重要的可靠寿命值,如表 2 所示。

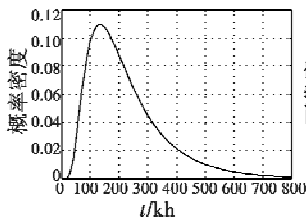


图2 产品的概率密度曲线
Fig.2 Probability density curve of product

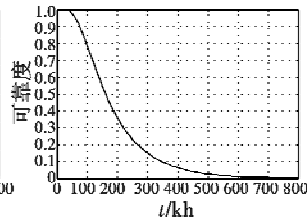


图3 产品的可靠度曲线
Fig.3 Reliability curve of product

表2 产品的可靠寿命

Table 2 Q-precentile life of product

可靠度/%	99	95	90
可靠寿命值/kh	40.888	60.477	74.836

5 结束语

基于性能退化分析的方法解决了一些高可靠性长寿命产品难以实现可靠性评估的难题,为产品可靠性评估与寿命预测提供了一种有效手段。本文以某导弹电连接器为研究对象,介绍了基于性能退化分析方法的关键步骤,包含失效机理分析、退化试验设计、可靠性建模、参数估计和可靠性评估。

1) 本文针对某电连接器最主要的故障模式和失效机理进行分析,需进一步综合考虑多种故障模式和失效机理开展可靠性研究。

2) 相对于恒定应力加速退化试验,步进应力加速退化试验在保证可操作性的同时提高了试验效率,并且没有增加可靠性建模与评估的难度。

3) Wiener过程是一种连续时间随机过程,适合描述非单调递增的退化过程。本文中通过时间转换实现了其对非线性退化过程的建模。

参考文献

[1] NELSON W B. A bibliography of accelerated test plans [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2):194-197.
 [2] XIA X T. Forecasting method for product reliability along with performance data[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(5):532-540.
 [3] WANG X. Wiener processes with random effects for degradation data [J]. Journal of Multivariate Analysis, 2010, 101

(2):340-351.
 [4] SI X S, WANG W B, HU C H, et al. A Wiener-process-based degradation model with a recursive filter algorithm for remaining useful life estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2):219-237.
 [5] WHITMORE G A. Estimating degradation by a Wiener diffusion process subject to measurement error[J]. Lifetime Data Analysis, 1995, 1(3):307-319.
 [6] 周经伦,厉海涛,刘学敏,等.维纳过程寿命预测的一种自助法[J].系统工程理论与实践,2011,31(8):1588-1592.
 ZHOU J L, LI H T, LIU X M, et al. A bootstrap method of life prediction based on Wiener process [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2011, 31(8):1588-1592.
 [7] 王小林,程志君,郭波.基于维纳过程金属化膜电容器的剩余寿命预测[J].国防科学技术大学学报,2011,33(4):146-151.
 WANG X L, CHENG Z J, GUO B. Residual life forecasting of metalized film capacitor based on Wiener process [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4):146-151.
 [8] 林思达,潘骏,陈文华,等.电连接器可靠性研究述评[J].机电元件,2009,29(4):52-56.
 LIN S D, PAN J, CHEN W H, et al. An introductory review on reliability research of electrical connectors [J]. Electro-Mechanical Components, 2009, 29(4):52-56.
 [9] 杨奋为.军用电连接器创新发展研讨[J].机电元件,2012,32(4):52-61.
 YANG F W. Talk about innovation and development of military electrical connectors[J]. Electromechanical Components, 2012, 32(4):52-61.
 [10] TSENG S T, WEN Z C. Step-stress accelerated degradation analysis for highly reliable products [J]. Journal of Quality Technology, 2000, 32:209-216.
 [11] SESHADRI V. The inverse Gaussian distribution; A case study in exponential families [M]. Oxford: Clarendon Press, 1993.
 [12] 赵宇.可靠性数据分析[M].北京:国防工业出版社,2011.
 ZHAO Y. Data analysis of reliability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

欢迎投稿 网址: <http://www.dgykz.com>