

基于步进加速退化试验的航天电连接器接触可靠性评估

潘 骏¹ 刘红杰¹ 陈文华^{1,2} 钱 萍¹ 刘 娟²

1. 浙江理工大学,杭州,310018 2. 浙江大学,杭州,310027

摘要:航天电连接器具有寿命长、可靠性高的特点,为解决其接触可靠性的快速评定问题,分析了航天电连接器的接触失效机理,建立了温度应力下的加速退化模型,提出了基于伪失效寿命的步进加速退化试验数据统计分析方法。对某型航天电连接器步进加速退化试验和试验数据进行了统计分析,结果表明,所提出的步进加速退化试验方法与基于失效数据的加速寿命试验相比,试验时间大为缩短。

关键词:加速退化试验;伪失效寿命;航天电连接器;可靠性评估

中图分类号: TB114. 3; V442 **文章编号:** 1004—132X(2011)10—1197—04

Contact Reliability Assessment of Aerospace Electrical Connector Based on Step-up—stress Accelerated Degradation Testing

Pan Jun¹ Liu Hongjie¹ Chen Wenhua^{1,2} Qian Ping¹ Liu Juan²

1. Zhejiang Sci—Tech University, Hangzhou, 310018 2. Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: In order to evaluate the contact reliability for aerospace electrical connector with high reliability and long life quickly, this paper analyzed the failure mechanism of aerospace electrical connector, then established the corresponding accelerated degradation model. On this basis, a step—up—stress accelerated degradation reliability assessment algorithm based on pseudo—failure lifetime was proposed. Finally, the step—up—stress accelerated degradation testing for an aerospace electrical connector was completed. The experimental data shows that this method to achieve the reliability assessment is compared with the accelerated life test, step—up—stress accelerated degradation testing can decrease testing time.

Key words: accelerated degradation testing; pseudo—failure lifetime; aerospace electrical connector; reliability assessment

0 引言

科学技术的发展使得电子工业、航空航天等

领域出现大量高可靠、长寿命的产品,如用于实现电信号的传输和控制以及电子与电气设备之间连接的某型号航天电连接器,要求可靠度在 95% 以上的接触寿命能达到 15 年。针对这类产品的可靠性评定问题,若按照传统的寿命试验方法,甚至采用加速寿命试验方法都难以在可行的时间和许可的经费范围内获得失效数据。由于产品的失效

收稿日期:2010—07—22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50935002, 51075370); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z409); 民用航天科技预研项目(B1220062302); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1080762)

ponent Analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[10] 李舜酩,雷衍斌. 基于负熵的转子混叠振动信号盲识别[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 437-441.

[11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis [J]. Proceedings of the Royal of London Series A, 1998, 454: 903-995.

[12] 于德介,程军圣,杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert—Huang 变换方法[M]. 北京:科学出版社,2006.

[13] Cortes C, Vapnik V. Support Vector Networks[J].

Machine Learning, 1995, 20(2): 273-297.

[14] Suykens J A K, Vandewalle J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers [J]. Neural Processing Letters (S1370-4621), 1999, 9(3): 293-300.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 毋文峰,男,1978 年生。第二炮兵工程学院五系博士研究生。主要研究方向为机械设备故障诊断和智能信号处理。发表论文 10 篇。陈小虎,男,1972 年生。第二炮兵工程学院五系副教授。苏勋家,男,1965 年生。第二炮兵工程学院五系教授、博士研究生导师。姚春江,男,1979 年生。第二炮兵工程学院五系讲师。王旭平,男,1978 年生。第二炮兵工程学院五系讲师。

机理最终能够追溯到产品潜在的性能退化过程,因此性能退化数据能够提供比失效时间数据更多的信息。早在 1988 年,Nair^[1]就指出退化数据对可靠性评估来说是一个丰富的信息源。姚增起^[2]研究了系统退化和系统可靠性的相关问题,并指出利用退化的观点来研究系统可靠性是一个新课题。Carey 等^[3]使用加速退化模型估计了一种新一代海底电缆组件的可靠性,假设退化量和绝对温度之间的关系可以用 Arrhenius 模型来描述,并使用极大似然方法估计关系参数,然后预测产品在常温下工作的退化量。Meeker 等^[4]在研究高可靠性产品的可靠性问题时指出,退化失效分析可解决目前传统可靠性理论不适应工程应用的问题。

近十年来,许多学者在这方面开展研究并取得成效。Sun 等^[5]通过对金属化膜脉冲电容器的退化数据进行分析,给出了一种 Guass-Poisson 联合分布模型。Huang 等^[6]用截断 Weibull 分布表示退化量的分布,给出一个基于退化数据的分布参数极大似然估计方法。李晓阳等^[7]针对在贮存期内具有长寿命、高可靠特点的系统级微波电子产品,使用加速退化试验,结合线性漂移布朗运动的首达时分布服从逆高斯分布的特点,建立其可靠性评估模型。钟强晖等^[8]提出不假定退化轨道模型的评估方法,利用试验得到产品的退化信息,进而获得产品在各检测时刻的可靠度,并用具有保证参数的分布族对寿命变量分布进行假设,通过分布拟合获得参数的估计值进行可靠性评估。Yang^[9]把试验费用作为样本量和试验时间的函数,根据试验费用最少的原则,对样本量和试验截止时间进行了优化。

为实现航天电连接器接触可靠性的快速评定,本文在前期航天电连接器接触失效机理与温度应力加速寿命试验方法研究^[10-12]的基础上,探讨基于性能退化数据的航天电连接器步进加速退化试验方法,并通过试验进行了应用验证。

1 航天电连接器接触失效机理与退化模型

航天电连接器(图 1)的失效模式主要有接触失效、绝缘失效和机械连接失效三种,其中接触失效约占总失效数的 45.1%。航天电连接器的接触寿命主要受环境温度影响,环境温度的作用引起插针表面腐蚀物加速生成,接触对表面腐蚀物的堆积促使接触电阻不断增大,最终导致接触失效。

对于表面镀金的铜基接触件航天电连接器,

由于镀金层结晶呈网状结构,且镀金层很薄,镀金过程中不可避免会在镀金层中出现一些微孔和裂纹,大气中的潮湿气体通过镀金层的微观毛细作用进入并接触到基体金属铜,沉积下来形成电解液。金和铜间的电位差使镀金层与铜基材料界面形成微电池,并发生氧化反应。



图 1 航天电连接器实物

由于电化学反应主要发生在镀层表面(即接触表面),故接触表面生成一层电阻非常高的腐蚀氧化物膜层。根据膜层生长机理,表面镀金的铜基接触件表面氧化膜的生长速度不仅与 Cu^+ 向镀金层表面扩散的速度有关,还取决于 Cu^+ 与 O_2 反应的速度。根据 Holm 电接触理论,流过这种氧化物膜层的电流通过隧道效应生成,氧化物腐蚀物膜层厚度的增加使得隧道电阻率逐渐增大,从而导致接触电阻增大,膜层的隧道电阻率 ρ 随膜层厚度 h 的增加基本呈线性增加,即

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

式中, λ 为比例常数。

接触电阻 R 可表示为

$$R = \rho / S \quad (2)$$

式中, S 为接触面面积。

因此接触电阻增量(性能退化量) x_t 与膜层厚度的关系满足

$$x_t = \lambda(h - h_0) / S \quad (3)$$

式中, h_0 为氧化膜层的初始厚度。

由此可知,航天电连接器接触性能退化主要是由接触表面氧化物的生长和堆积引起的,氧化物的生长速度直接反映了航天电连接器接触性能的退化情况。温度是影响机电元件贮存可靠性的最主要环境因素,当氧化物的堆积致使接触对的接触电阻超过允许的阈值时,接触性能不再满足要求,即发生失效。在此假设初始时刻腐蚀氧化物膜层厚度 $h_0 = 0$,则随着接触表面氧化物厚度的不断增长,通过氧化物膜层的离子越来越少,氧化物的生长速度也随之减小,膜层生长速度与膜层厚度间呈反比关系,膜层厚度 h 与时间 t 的关系^[13] 为

$$h = \sqrt{Kt} \quad (4)$$

其中, K 为反应系数,与温度的关系满足阿伦尼乌斯方程:

$$K = A\exp(-\Delta E/(kT)) \tag{5}$$

式中, ΔE 为激活能, eV; k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度, K; A 为频率因子。

根据式(3)和式(4), 接触性能退化量 x_t 与时间 t 的关系可表示为

$$x_t = \lambda \sqrt{Kt}/S \tag{6}$$

把式(5)代入式(6), 得

$$x_t = (\lambda \sqrt{A\exp(-\Delta E/(kT))}/S) \sqrt{t} \tag{7}$$

简化式(7), 得

$$x_t = \exp(\alpha + \beta/T) \sqrt{t} \tag{8}$$

式中, α 、 β 为与时间和温度无关的常数。

式(8)两边同取对数, 得

$$\ln x_t = (\alpha + \beta/T) + 0.5 \ln t \tag{9}$$

此式反映了接触性能退化量与时间和温度的关系, 即为航天电连接器接触性能加速退化模型。

2 步进加速退化试验与试验数据统计分析方法

步进加速退化试验是一种把样本依次投入步进应力水平下, 在对应试验周期内监测其性能退化数据的试验方法。其步骤如下:

(1) 抽取 N 个样本, 选择在 w 个应力水平 $T_1, T_2, \dots, T_w$ 下进行试验, 设 T_0 为正常应力水平, 且 $T_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_w$ 。

(2) 在应力水平 T_i 下, 选定 P_i 个测量时间点, 依次记录各样本的接触性能退化量 $x_{t_{ijn}}$, 其中, $i=1, 2, \dots, w; j=1, 2, \dots, P_i; n=1, 2, \dots, N$ 。

通过分析航天电连接器的接触失效机理, 确定其加速退化模型并利用各种应力水平下的性能退化数据和最小二乘方法估计接触性能退化参数, 然后通过航天电连接器接触性能退化模型推断正常应力水平下的伪失效寿命值, 最后利用寿命试验数据的统计分析方法进行航天电连接器在温度应力下的接触可靠性评估, 具体步骤如下:

(1) 在分析航天电连接器接触性能退化模型的基础上, 根据样本 n 在不同温度应力水平 T_i 下记录的退化量 $(t_{ijn}, x_{t_{ijn}})$, 利用

$$\ln x_{t_{ijn}} = (\alpha_n + \beta_n/T_i) + 0.5 \ln t_{ijn} \tag{10}$$

估计接触性能退化参数值 $(\hat{\alpha}_n + \hat{\beta}_n/T_i)$ 。

(2) 根据样本 n 在不同温度应力水平 T_i 下对应的估计值 $(\hat{\alpha}_n + \hat{\beta}_n/T_i)$ 可得样本相应参数估计值 $\hat{\alpha}_n$ 和 $\hat{\beta}_n$, 则在正常使用温度 T_0 条件下, 样本 n 的接触性能退化量与时间和温度的关系为

$$\ln x_t = (\hat{\alpha}_n + \hat{\beta}_n/T_0) + 0.5 \ln t \tag{11}$$

(3) 通过接触失效阈值可得到各样本在正常

温度条件下的伪失效寿命估计值 $\hat{T}_n$ 。

(4) 航天电连接器接触失效寿命服从两参数 Weibull 分布^[10]:

$$F(t) = 1 - \exp(-(t/\eta)^m) \tag{12}$$

以 $\ln \hat{T}_n$ 为横坐标, 以 $\ln \ln(1/(1 - F(\hat{T}_n)))$ 为纵坐标, 在 MATLAB 环境下利用最小二乘估计即得 Weibull 分布形状参数 $\hat{m}_0$ 与特征寿命估计值 $\hat{\eta}_0$ 。其中, $F(\hat{T}_n)$ 为中位秩公式:

$$F(\hat{T}_n) = (n - 0.3)/(N + 0.4) \tag{13}$$

(5) 通过航天电连接器的寿命分布函数的参数估计值 $\hat{m}_0$ 和 $\hat{\eta}_0$ 确定其可靠度函数 $R(t)$:

$$R(t) = \exp[-(t/\hat{\eta}_0)^{\hat{m}_0}] \tag{14}$$

3 实例

步进加速退化试验以某型号航天电连接器为试验对象, 选择样本 $N=6$, 温度应力水平分别为 384.16K、399.16K 和 414.16K, 对应应力水平下的试验时间分别为 600h、200h 和 50h, 对应监测值记录次数分别为 $P_1=10$ 、 $P_2=10$ 和 $P_3=8$ 。试验过程中监测值为 $(t_{ijn}, x_{t_{ijn}})$, 6 个样本的退化轨迹如图 2 所示。

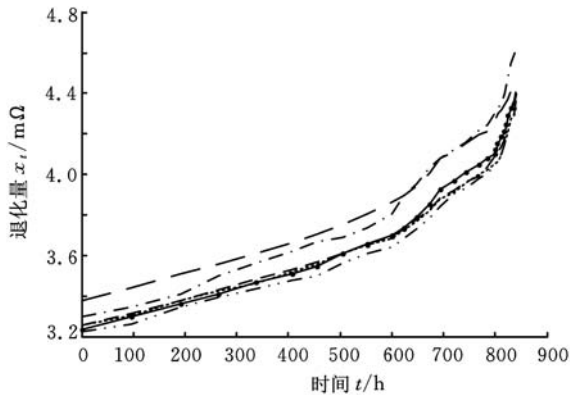


图 2 接触电阻随应力和时间变化曲线(6 个样本)

把试验数据转化为 $(t_{ijn}, \ln x_{t_{ijn}})$ 形式, 然后利用式(10)得在不同应力水平下 $\hat{\alpha}_n + \hat{\beta}_n/T_i$ 的估计值, 如表 1 所示。然后利用最小二乘估计得各样本退化模型参数估计值 $\hat{\alpha}_n$ 和 $\hat{\beta}_n$ 。

表 1 $\hat{\alpha}_n + \hat{\beta}_n/T_i$ 在不同应力水平下的估计值

样本 编号	$\hat{\alpha}_n + \hat{\beta}_n/T_i$		
	$T_1 = 384.16\text{K}$	$T_2 = 399.16\text{K}$	$T_3 = 414.16\text{K}$
1	-4.34	-4.02	-3.73
2	-4.20	-3.95	-3.62
3	-4.44	-4.09	-3.82
4	-4.37	-3.99	-3.76
5	-4.30	-3.89	-3.65
6	-4.33	-4.06	-3.79

已知该航天电池连接器正常工作环境温度
为 45℃,失效阈值 $R_c=5\text{m}\Omega$,可得各样本在正常
温度应力下的伪失效寿命估计值 $\hat{T}_n$,结果如表 2
所示。

样本编号	$\hat{\alpha}_n$	$\hat{\beta}_n$	$\hat{T}_n(\text{h})$
1	4.06	-3228.23	572 165.25
2	3.81	-3086.81	406 700.63
3	4.10	-3279.45	744 564.97
4	4.03	-3221.46	599 121.85
5	4.75	-3472.27	644 100.71
6	3.14	-2875.93	344 475.33

以 $\ln\hat{T}_n$ 为横坐标,以 $\ln\ln(1/(1-F(\hat{T}_n)))$
为纵坐标并结合式 (13),对计算结果在
MATLAB 环境下进行 Weibull 分布拟合,结果如
图 3 所示,伪失效寿命值基本分布在一条直线上,
并得 Weibull 分布形状参数与特征寿命估计值分
别为

$$\hat{m}_0 = 2 \quad \hat{\eta}_0 = 662\,809\text{h}$$

代入式 (14) 得产品在 t 时刻的可靠度函数为

$$R(t) = \exp(-(t/662\,809)^2)$$

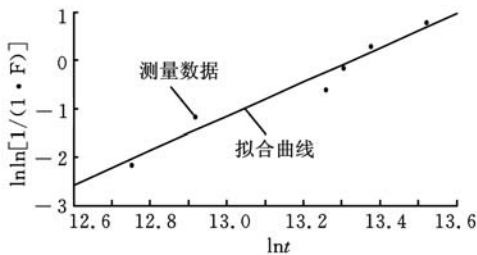


图 3 Weibull 分布概率图检验

正常温度应力下电连接器的可靠度如图 4
所示。

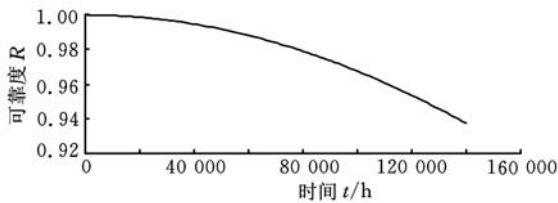


图 4 正常温度应力下电连接器的可靠度曲线

4 结束语

本文在分析航天电连接器接触失效机理的基
础上建立了航天电连接器的退化模型,并提出基
于伪失效寿命的步进加速退化试验数据统计分析
方法。利用该方法对某型航天电连接器进行步进
加速退化试验,得到该型航天电连接器在温度应
力下随时间变化的可靠度预测曲线,与传统加速
寿命试验相比,试验时间大为缩短。因此,基于步
进加速退化试验的可靠性评估方法为航天电连接
器接触可靠性的快速评定提供了一条有效途径。

参考文献:

[1] Nair V N. Discussion: Estimation of Reliability in Field Performance Studies [J]. Technometrics, 1988,30(4):379-383.

[2] 姚增起. 系统退化和系统可靠性研究[D]. 北京:中国科学院自动化研究所,1988.

[3] Carey M B, Koenig R H. Reliability Assessment Based on Accelerated Degradation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991,40(5):499-506.

[4] Meeker W Q, Hamada M. Statistical Tools of the Rapid Development & Evaluation of High-reliability Products[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995,44(2):187-198.

[5] Sun Quan, Zhou Jinglun, Zhong Zheng, et al. Guass-Poisson Joint Distribution Model for Degradation Failure [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004,32(5):1864-1868.

[6] Huang Wei, Duane L. An Alternative Degradation Reliability Modeling Approach Using Mximum Likelihood Estimation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005,54(2):310-317.

[7] 李晓阳,姜同敏,黄涛,等. 微波电子产品贮存状态的 SSADT 评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008,34(10):1135-1138.

[8] 钟强晖,张志华,吴和声. 基于退化数据的可靠性评估方法探讨[J]. 系统工程与电子技术, 2009,31(9):2280-2284.

[9] Yang Guangbin. Reliability Demonstration through Degradation Bogey Testing[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009,58(4):604-610.

[10] 陈文华,李平真. 航天电连接器的可靠性数学模型 [J]. 航空学报,1997,18(6):732-734.

[11] 陈文华,崔杰,潘骏,等. 威布尔分布下失效率的 Bayes 验证试验方法[J]. 机械工程学报, 2005,41(12):118-121.

[12] 陈文华,李红石,连文志,等. 航天电连接器综合应力加速寿命试验与统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006,40(2):348-351.

[13] 程礼椿. 电接触理论及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:潘 骏,男,1974 年生。浙江理工大学机械设计与制造研究所副教授。主要研究方向为机械可靠性工程。发表论文 15 篇。刘红杰,男,1983 年生。浙江理工大学机械设计与制造研究所硕士研究生。陈文华,男,1963 年生。浙江理工大学机械设计与制造研究所教授、博士研究生导师,浙江大学机械设计研究所兼职教授。钱 萍,女,1983 年生。浙江理工大学机械设计与制造研究所讲师。刘 娟,女,1982 年生。浙江大学机械设计研究所博士研究生。