

含多规格接触对的电连接器贮存寿命评估

王友维¹, 钱萍¹, 王哲², 姚华军³, 林敏¹

¹浙江理工大学, 机电产品可靠性分析与测试国家地方联合工程研究中心, 浙江 杭州

²北京控制与电子技术研究所, 北京

³杭州航天电子技术有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年1月19日; 录用日期: 2023年2月24日; 发布日期: 2023年3月7日

摘要

针对含多种规格接触对电连接器的贮存可靠性问题, 以某型电连接器为例, 在分析其失效机理的基础上设计了加速退化试验获取性能退化数据, 提出了加速应力下含多种规格接触对的电连接器可靠性评估方法。首先通过分析其失效机理, 得到了产品的性能退化模型, 并且以温度作为加速应力设计了加速退化试验, 同时以低应力水平为例计算两种规格接触对的退化模型参数以及寿命模型参数, 其次结合加速模型, 推导出两种规格接触对在正常应力下的可靠度函数, 最后根据串联模型计算得到某型电连接器在正常应力下的可靠寿命。结果表明, 提出的含多种规格接触对的可靠性评估方法实用、有效, 实现了某多规格接触对电连接器的可靠性评估并且为其他含多规格接触对电连接器产品可靠性评估工作提供借鉴和参考。

关键词

可靠性评估, 电连接器, 多规格接触对, 加速退化试验

Evaluation of Storage Life of Electrical Connectors with Multi-Specification Contact Pairs

Youwei Wang¹, Ping Qian¹, Zhe Wang², Huajun Yao³, Min Lin¹

¹National and Local Joint Engineering Research Center of Reliability Analysis and Testing for Mechanical and Electrical Products, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

²Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing

³Hangzhou Aerospace Electronic Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Jan. 19th, 2023; accepted: Feb. 24th, 2023; published: Mar. 7th, 2023

Abstract

In order to solve the storage reliability problem of contact pairs with various specifications, an accelerated degradation test was designed to obtain the performance degradation data based on the analysis of the failure mechanism of a certain type of electrical connector, and a reliability evaluation method of electrical connectors with multiple specifications contact pairs under accelerated stress was proposed. Firstly, the performance degradation model of the product was obtained by analyzing its failure mechanism, and the accelerated degradation test was designed by taking temperature as the accelerating stress. Meanwhile, the degradation model parameters and life model parameters of the contact pair of two specifications were calculated by taking the low stress level as an example. Secondly, the reliability function of the contact pair of two specifications under normal stress was deduced by combining the acceleration model. Finally, the reliable life of a certain type of electrical connector under normal stress is calculated by series model. The results show that the proposed reliability evaluation method with multi-specification contact pairs is practical and effective. It realizes the reliability evaluation of a certain multi-specification contact pair electrical connector and provides a reference for the reliability evaluation of other electrical connector products with multi-specification contact pairs.

Keywords

Reliability Assessment, Electrical Connector, Multi-Specification Contact Pair, Accelerated Degradation Testing

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

电连接器主要由接触件、绝缘件和壳体三部分组成，核心部件是接触件，作为系统电气连接和信号传递的重要部件，电连接器被广泛应用在武器装备和各类电子系统中。根据接触件尺寸规格的差异，电连接器可分为单规格接触对电连接器与多规格接触对电连接器。其中多规格接触对电连接器由多组尺寸规格不同的接触对组成，根据接触对的尺寸规格的差异，电连接器的适用场合也不同。大规格的接触对能适用于较大电流的传递场合，小规格的接触对可以节约材料，缩小电连接器的结构尺寸[1]。通常电连接器内部具有不同的电气环境，故分布于不同位置的各规格接触对所受环境应力的影响也有所差异，性能退化情况和对电连接器可靠度影响程度也不同。

电连接器的可靠性评估与寿命预测一直受到很多学者的关注，并且取得了一定的成果。但目前大多数的研究都局限于传统的单规格接触对电连接器，比如潘骏等[2]提出了电连接器基于伪失效寿命的步进加速退化试验数据统计分析方法，结果表明与基于失效数据的加速寿命试验相比，试验时间大为缩短。王浩伟等[3]为了评估某导弹电连接器的可靠性，采用 Wiener 模型对接触电阻进行建模，并且预测其可靠寿命。姜普涛等[4]利用 Wiener 过程拟合湿热环境下电连接器性能退化轨迹，预测弹用电连接器的可靠寿命。徐廷学等[5]提出了一种基于 Gamma 过程的电连接器可靠性建模方法，并且通过广义艾林模型预测了电连接器在各温度、湿度下的平均寿命。

对于多规格接触对电连接器，对其进行寿命评估时，因不同规格、材料接触对的性能退化趋势并不

相同,若忽视其接触对尺寸之间的差异,仍然采用相同规格接触对电连接器的可靠性模型进行评估,难免造成评估结果的不准确,因此有必要对多规格电连接器的贮存可靠性进行研究。本文综合考量电连接器的失效机理,得到产品的性能退化模型,并且以温度作为恒定加速应力,利用阿伦尼斯方程推导出各规格接触对在正常温度应力下的模型参数,最后根据串联模型推导出电连接器在正常温度应力下的可靠度函数,实现对某多规格接触对电连接器的寿命预测。

2. 电连接器失效机理分析

电连接器主要失效模式有接触失效、绝缘失效和机械连接失效三种类型,其中接触失效是电连接器失效最主要原因。接触失效主要是由于接触对发生电化学腐蚀导致接触电阻不断增大导致。某型电连接器接触件共有两种规格,分别为开槽收口接触对和线簧孔接触对,其中开槽收口接触对基底材料为锡青铜,线簧孔接触对基底材料为铍青铜。

从微观上看,电连接器接触界面电信号的连通是通过若干凹凸不平的“接触斑点”的互相接触来实现的,这些起电导通作用的接触斑点一般称为“导电斑点”,当电流通过接触件界面时,导电斑点附近电流线发生收缩,此时接触界面出现局部的附加电阻,称为“收缩电阻”。

同时电连接器在环境应力作用下,受氧化、腐蚀、空气尘埃等影响,一般接触件表面会形成氧化膜、腐蚀膜以及沉积膜等“界面膜”。当电流通过覆盖界面膜的导电斑点时,据“隧道效应”理论,会产生一种通常被叫作“膜层电阻”的附加电阻。电连接器的接触电阻主要由材料的体电阻、接触斑点的膜层电阻和收缩电阻组成。

为了保护基底材料不被氧化,接触件表面都会镀一层薄金。但受工艺的影响,镀金层表面并非完全密闭,也会存在孔隙和裂纹等,在长期的贮存过程中,湿气通过镀金层表面的孔隙凝结在铜与镀金层之间,形成电解液构成原电池,处于低电位的Cu被腐蚀形成氧化铜Cu₂O。



随着上述反应的不进行,生成的Cu₂O会逐渐地将孔隙填满,并逐步蔓延至镀金层表面,镀金层表面会形成一定厚度的氧化膜层,同时温度会显著影响膜层的生长速度,温度升高,Cu⁺的内能增大,会快速、大量的扩散至镀金层表面。根据反应论理论,温度升高会加快氧化反应的速率,加快氧化膜层的生长,氧化膜层的厚度会随着反应的进行不断增加,导致膜层隧道电阻率不断增大,从而使得膜层电阻不断增长,接触电阻不断增加。

综上所述,在长期贮存环境下,造成某型电连接器接触失效的主要原因是接触件表面膜层生长,主要环境因素为温度。

3. 电连接器性能退化模型

3.1. 开槽收口接触对接触电阻表达式

由于接触电阻主要是由体电阻、所有接触斑点的收缩电阻和膜层电阻并联值构成,同时可将接触表面凹凸不平的接触斑点视为曲率半径为R_z的旋转抛物体,同时结合“隧道效应”理论,可以得到开槽收口接触对的接触电阻表达式为[6]

$$r = r_v + \frac{\rho}{2.2\varphi(FR_z/E)^{1/3}} + \frac{2k_1\bar{\chi}^c}{F/H} \quad (1)$$

式中,r_v为体电阻,φ为校正系数,E为基底材料弹性模量,ρ为插针电阻率,F为接触力,k₁、c为待定系数,χ̄为平均膜层厚度,H为镀层材料表面硬度。

由前文失效机理可知, 接触电阻增大主要是因为环境温度升高加快了接触件表面氧化物的生成, 氧化物堆积使膜层电阻不断增大而导致电连接器失效, 因此材料的体电阻和接触斑点的收缩电阻可视为定值, 归入到接触电阻初值中, 即:

$$r = r_0 + \frac{2k_1\bar{\chi}^c}{F/H} \quad (2)$$

式中, r_0 为接触电阻初值。

同时文献[7] [8]指出, 平均膜层厚度 $\bar{\chi}$ 与镀金层厚度 d 有关, 并且与还与温度成正比。假设所有生成氧化物都从孔隙向外渗透覆盖在接触件表面上, 则 t 时刻接触斑点上氧化膜平均厚度为

$$\bar{\chi} = \varepsilon d^{-\zeta} [(\eta+1)\Lambda]^{\frac{1}{\eta+1}} \exp\left(-\frac{\Delta E}{(\eta+1)kT}\right)^{\eta+1} \sqrt{t} \quad (3)$$

式中, ε 和 ζ 为与镀金工艺、过程以及材料有关的参数, η 为待定系数, Λ 为频率因子, ΔE 为激活能, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度($^{\circ}\text{K}$)。

同时当材料和工艺确定后, ε 、 d 、 ζ 、 η 、 k_1 和 c 都为定值, Λ 和 ΔE 与温度有关, 为了方便后续求解令

$$\alpha = \frac{2k_1}{F/H} \left\{ \varepsilon d^{-\zeta} [(\eta+1)\Lambda]^{\frac{1}{\eta+1}} \exp\left[-\frac{\Delta E}{(\eta+1)k} \left(\frac{1}{T}\right)\right] \right\}^c,$$

$$\beta = c/(\eta+1)$$

因此式(2)最终可转化为

$$r_i = r_0 + \alpha_i t^\beta \quad (4)$$

式中, α_i 为接触电阻退化率, 表示开槽收口接触对结构参数和环境温度对接触对电阻的影响, β 为与接触性能退化机理相关的常数。

3.2. 线簧孔接触对接触电阻表达式

对于线簧孔式接触对来说, 接触对是由 n 根线簧丝与插针组成, 因此单个接触对之间的收缩电阻和膜层电阻由 n 根线簧丝与插针之间的收缩电阻和膜层电阻并联而成, 线簧孔接触对电阻可用式(6)表示[9] [10]。

$$r = r_v + \frac{\rho_1 + \rho_2}{4n} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} + \frac{2k_1\bar{\chi}^c}{nF/H} \quad (5)$$

式中, ρ_1 为插针的电阻率 ρ_2 为线簧孔的电阻率, n 为线簧丝根数。

当接触对设计参数、材料和工艺确定后, 并且忽略蠕变和线簧丝的应力松弛, 式(6)也可以转化为

$$r_i = r_0 + \alpha_2 t^\beta \quad (6)$$

式中, $\alpha_2 = \frac{2k_1}{nF/H} \left\{ \varepsilon d^{-\zeta} [(\eta+1)\Lambda]^{\frac{1}{\eta+1}} \exp\left[-\frac{\Delta E}{(\eta+1)k} \left(\frac{1}{T}\right)\right] \right\}^c$, 表示线簧孔接触对结构参数和环境温度对接触对电阻的影响。

式(5)和(7)即为开槽收口接触对和线簧孔接触对的接触电阻随时间变化关系, 对其两边取对数可得

$$\ln(r_i - r_0) = \ln \alpha_i + \beta \ln t \quad (7)$$

因此后续只要根据不同时刻 t_i 的接触电阻值 r_i 即可求得 α_i 和 β 的估计值, 再通过失效阈值即可求得接触电阻伪寿命 t_i 。

4. 加速退化试验设计

由于电连接器的寿命主要受温度应力影响, 因此试验中选取温度作为加速应力, 并采用恒定应力加速退化试验方法对电连接器进行性能退化研究。根据以往的试验经验同时综合考虑试验成本, 最终确定 3 个应力水平, 同时根据 GB2689.1 规定各水平应力间隔根据下式确定:

$$\begin{cases} 1/T_2 = 1/T_1 - \Delta \\ \Delta = (1/T_1 - 1/T_3)/(3-1) \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_1 、 T_2 、 T_3 分别为第 1、2、3 个应力水平的绝对温度。

试验应力提高的前提为不改变产品在正常工作下的失效机理。根据摸底试验[10] [11] [12] [13]以及设备所能提供的应力范围确定最低温度应力水平为 $T_1 = 120^\circ\text{C}$, 最高温度应力水平 $T_3 = 158^\circ\text{C}$, 同时为了保证试验数据统计分析的精度, 每个应力水平下样本量不能少于 5 个, 综合考虑到试验成本, 最终确定各应力水平分别为 120°C 、 140°C 和 158°C , 每个应力下样本量都为 7 个。测试间隔按照低应力水平, 长测试间隔; 高应力水平, 短测试间隔的原则, 各应力水平下测试间隔定为 72 h、36 h 和 12 h。同时本文研究对象某型电连接器接触对共有开槽收口和线簧孔两种规格, 每组规格接触对个数也不同, 根据该电连接器的技术文件规定, 确定开槽收口接触对和线簧孔接触对这两种规格接触对失效阈值分别为 4.5 m Ω 和 15 m Ω 。

5. 开槽收口接触对参数估计

多规格接触对电连接器可将相同规格的接触对视为一个子系统, 由于电连接器的接触可靠性寿命取决于其寿命最短的子系统, 而该子系统的寿命又取决于最先超过失效阈值的接触对的寿命。因此可以先分别求出每个子系统的可靠度函数, 最后根据串联系统模型可以评估出整个系统的可靠寿命。

5.1. 性能退化模型参数及伪寿命

对于开槽收口接触对以 120°C 应力水平为例计算其模型参数, 其它应力水平参数按照相同方法计算。首先对通过加速试验所得性能退化数据根据退化模型即式(5)进行拟合, 利用最小二乘法求出参数 α_1 和 β , 再进一步根据失效阈值求出各个接触对的伪寿命 t_1 , 具体结果如表 1 所示。

Table 1. Slotted closing contact pair degenerate trajectory parameters and pseudo lifetime

表 1. 开槽收口接触对退化轨迹参数与伪寿命

序号	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\beta}$	t_1
1	0.0074	0.85	1148.26
2	0.0032	0.87	2579.40
3	0.0041	0.83	2695.71
...
27	0.0036	0.73	9475.16
28	0.0043	0.70	10893.35

5.2. 寿命分布检验

对该接触对计算所得的所有伪寿命使用 Anderson-Darling [14]进行最优拟合分布分析,从常用的正态分布、对数正态分布和威布尔分布中选择其分布族类型。120℃应力水平下开槽收口接触对伪寿命最优分布检验结果如表 2 所示。

Table 2. Pseudo life distribution test results

表 2. 伪寿命分布检验结果

分布	AD	P
正态	0.247	0.732
对数正态	0.407	0.327
Weibull	0.182	>0.250

根据检验结果表明 120℃下开槽收口接触对寿命分布最优服从威布尔分布,同理其它应力水平也采用相同方法进行求解和检验,结果表明都服从威布尔分布。因此后续利用威布尔分布对开槽收口接触对可靠寿命进行求解。

5.3. 寿命分布模型参数估计

威布尔分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right], (t > 0) \quad (9)$$

式中, η 为特征寿命, m 为形状参数。

以 $\ln t_i$ 为横坐标, $\ln \ln\left[\frac{1}{1-F(t_i)}\right]$ 为纵坐标,在 MATLAB 中利用最小二乘即可得到威布尔分布的特征寿命估计值 $\hat{\eta}$ 以及形状参数 \hat{m} 。其中, $F(t)$ 可通过中位秩公式求解:

$$F(t) = (j - 0.3)/(n + 0.4) \quad (10)$$

式中, j 为是样本数据按增序排列后的序号, n 是样本总数。

通过计算得到 120℃应力水平下开槽收口接触对寿命分布参数的估计值: $\hat{m} = 2.60$, $\hat{\eta} = 6405.33$ 。其它应力水平下开槽收口接触对的参数估计值采用相同方法求解,具体结果如表 3 所示。

Table 3. Parameter estimates of slotted closing contact pair at different stress levels

表 3. 不同应力水平下开槽收口接触对参数估计值

应力水平	参数	
	\hat{m}	$\hat{\eta}$
120℃	2.60	6405.33
140℃	2.56	3252.68
158℃	3.09	1315.11

将各温度应力水平下寿命数据放入威布尔概率图纸中,如图 1 所示。通过图中可以看出,各温度应力水平下寿命分布的直线大致平行,对于威布尔分布来讲,也就是形状参数大致相等,而不同温度应力水平下形状参数估计值之所以不完全相等,是由于试验误差和分析误差造成的。

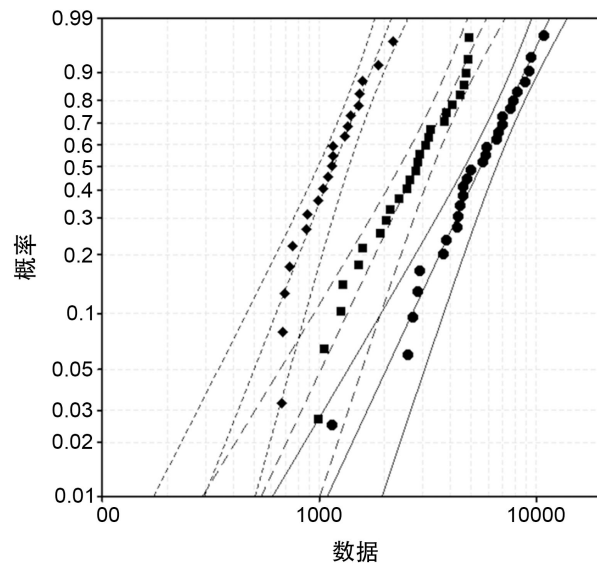


Figure 1. Weibull probability diagram
图 1. 威布尔概率图

5.4. 正常应力水平下参数估计

根据试验情况，可做如下假设：

- 1) 开槽收口接触对在温度水平 120℃，140℃和 158℃的加速条件下，其寿命分布类型都与正常温度应力水平条件下的寿命分布类型相同，即都属于威布尔分布类型；
- 2) 各温度水平下的威布尔分布的形状参数与温度变化无关，共同的形状参数 m 可以通过加权平均得到[11]，即

$$\hat{m} = \frac{n_1 \hat{m}_1 + n_2 \hat{m}_2 + n_3 \hat{m}_3}{n_1 + n_2 + n_3} = 2.75 \quad (11)$$

- 3) 各应力水平下的特征寿命 η 与温度符合阿伦尼斯方程，即

$$\eta = A \cdot e^{B/(T+273.15)} \quad (12)$$

采用最小二乘法即可外推出正常应力水平下的寿命特征值，求得 $A = 1.24 \times 10^{-4}$ ， $B = 7006.2$ ， $\hat{\eta} = 1.98 \times 10^6$ ，因此，开槽收口接触对在正常应力水平下的特征寿命为 1.98×10^6 h。

6. 线簧孔接触对参数估计

6.1. 性能退化模型参数及伪寿命

线簧孔接触对同样以 120℃应力水平为例计算其模型参数，其它应力水平参数按照相同方法计算。通过式(7)对加速退化试验所得线簧孔接触对数据进行拟合，再带入失效阈值求出伪寿命 t_2 ，性能退化模型参数及伪寿命结果如表 4 所示。

6.2. 寿命分布检验

同样对该接触对计算所得的所有伪寿命使用 Anderson-Darling [14]进行最优拟合分布分析，120℃应力水平下线簧孔接触对伪寿命最优分布检验结果如表 5 所示。

Table 4. Wire spring-hole contact pair degenerate trajectory parameters and pseudo life
表 4. 线簧孔接触对退化轨迹参数与伪寿命

序号	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}$	t_2
1	0.027	0.83	455.00
2	0.041	0.76	504.61
3	0.060	0.70	507.76
...
279	0.021	0.75	1546.54
280	0.014	0.78	1550.98

Table 5. Pseudo life distribution test results
表 5. 伪寿命分布检验结果

分布	AD	P
正态	1.638	<0.005
对数正态	0.668	0.080
Weibull	1.524	<0.010

根据检验结果表明 120℃下线簧孔接触对寿命分布服从对数正态分布, 同理其它应力水平也采用相同方法进行求解和检验, 结果表明都服从对数正态分布。因此后续利用对数正态分布对线簧孔接触对寿命进行求解。

6.3. 寿命分布模型参数估计

对数正态分布函数为

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (13)$$

式中, μ 为对数均值, σ 为对数标准差。

对式(14)进行标准化, 可得标准正态分布为

$$\begin{cases} F(t) = \int_0^{\frac{\ln t - \mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \Phi(z) \\ z = \frac{1}{\sigma} \ln t - \frac{\mu}{\sigma} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $F(t)$ 可通过中位秩式(11)求解。

随机变量 $\ln t$ 与标准正态分布的随机变量 z 之间存在着线性关系, 每给定一个 z 值, 就有相应的函数值 $\Phi(z)$ 与之对应, 标准正态分布表就是一个 z 与 $\Phi(z)$ 一一对应的关系表, 具体关系如表 6 所示。

结合 $\Phi(z) = F(t)$ 的对应关系和 $\ln t$ 与 z 的线性关系, 再通过最小二乘估计, 即可得到 μ 和 σ 的估计值。通过计算得到 120℃应力水平下线簧孔接触对寿命分布参数的估计值: $\hat{\mu} = 6.74$, $\hat{\sigma} = 0.35$ 。同理采取相同方法可以得到线簧孔接触对其它应力水平下的参数估计值, 具体结果如表 7 所示。

Table 6. Cumulative failure probability and z relationship table
表 6. 累计失效概率与 z 关系表

序号	$\ln t$	$F(t)$	z
1	6.12	0.25%	-2.81
2	6.22	0.60%	-2.51
3	6.23	0.96%	-2.35
...
279	7.34	99.39%	2.51
280	7.35	99.75%	2.81

Table 7. Estimation of the parameters of wire spring-hole contact pair at different stress levels
表 7. 不同应力水平下线簧孔接触对参数估计值

应力水平	参数	
	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
120°C	6.74	0.34
140°C	5.86	0.30
158°C	4.76	0.29

6.4. 失效机理检验

为了验证各温度应力水平下线簧孔接触对失效机理是否发生改变，即各样本所代表的总体方差是否存在显著差异，采用巴特利特(Bartlett)检验法对其进行检验，检验步骤如下：

1) 对样本量分别为 n_i 的共 m 个样本：

$$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im} \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

2) 建立原假设： H_0 ：这 m 个样本所代表的总体方差相同。

3) 计算统计量：

$$B^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) \ln s^2 - \sum_{i=1}^m (n_i - 1) \ln s_i^2}{C} \right] \quad (15)$$

式中， s_i^2 为每组总体样本方差，各统计量通过式(18)计算。

$$\begin{cases} s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ s^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)} \\ C = 1 + \frac{1}{3(m-1)} \left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)} \right] \end{cases} \quad (16)$$

计算检验统计量 B^2 ， B^2 近似为自由度为 $m-1$ 的 χ^2 分布，给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，通过查 χ^2 分布表得分位数 $\chi_{\alpha}^2(m-1)$ ，若 $B^2 < \chi_{\alpha}^2(m-1)$ 则接受原假设 H_0 。

经 MATLAB 编程计算可得检验结果 $B^2 = 3.593$ ，查表知 $\chi_{0.05}^2(2) = 5.991$ ，因此 $B^2 < \chi_{0.05}^2(2)$ ，即接

受原假设，认为这 m 个样本的总体方差相同，失效机理未发生改变。

6.5. 正常应力水平下参数估计

同意根据试验情况，做如下假设：

1) 线簧孔接触对在温度水平 120°C ， 140°C 和 158°C 的加速条件下，其寿命分布类型都与正常温度应力水平条件下的寿命分布类型相同，即都属于对数正态分布类型；

2) 各温度水平下的对数正态分布的对数标准差与温度的变化无关，根据方差检验结果也表明对数标准差不随温度变化，因此对表 7 中对数标准差 $\hat{\sigma}$ 取平均值即可得线簧孔接触对在正常温度应力水平下的对数标准差为：

$$\hat{\sigma} = (\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_3 + \hat{\sigma}_4) / 3 = 0.31 \tag{17}$$

3) 各温度水平下的对数正态分布的对数均值 μ 与温度的关系符合阿伦尼斯方程，即

$$\mu = a/T + b \tag{18}$$

式中， T 为绝对温度， a 、 b 为待估参数。

利用最小二乘即可求得线簧孔接触对在正常温度应力水平下的对数均值为：

$$\hat{\mu} = -15.51 + \frac{8771.6}{25 + 273.15} = 13.91 \tag{19}$$

7. 可靠性评估

根据某型电连接器两种规格接触对组退化模型参数的估计值，便可求得各规格接触对在正常应力水平下的接触可靠度函数为

$$\begin{cases} R_1(t) = \left\{ \exp[-(t/\hat{\eta})^m] \right\}^{g_1} \\ R_2(t) = \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) \right\}^{g_2} \end{cases} \tag{20}$$

式中， $R_1(t)$ 为开槽收口接触对可靠度函数， $R_2(t)$ 为线簧孔接触对可靠度函数， g_1 和 g_2 分别表示两种规格接触对个数，分别为 4 和 40。

由于多规格接触对电连接器可以看成是不同规格接触对组所组成的一个串联系统，其寿命取决于寿命最短的接触对系统，因此根据串联系统可靠性模型[15]即可得某型电连接器可靠度函数为

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = R_1(t) * R_2(t) \tag{21}$$

利用式(23)即可评估某型电连接器在正常应力下的可靠寿命，具体结果如表 8 所示，可靠度曲线如图 2 所示。

根据图 2 可以发现，开槽收口接触对与线簧孔接触对的可靠度曲线相距较远，并且基本没有重叠部分，因此可以认为不同规格、材料接触对的性能退化趋势并不相同，对电连接器可靠度影响程度也不同，并且通过图 2 观察可以发现本文研究的某型电连接器的接触可靠度主要由线簧孔接触对可靠度决定。

Table 8. Reliable life of a certain type of electrical connector

表 8. 某型电连接器可靠寿命

可靠度	0.5	0.9	0.99	0.999
可靠寿命/h	452,026	228,856	97,381	42,085

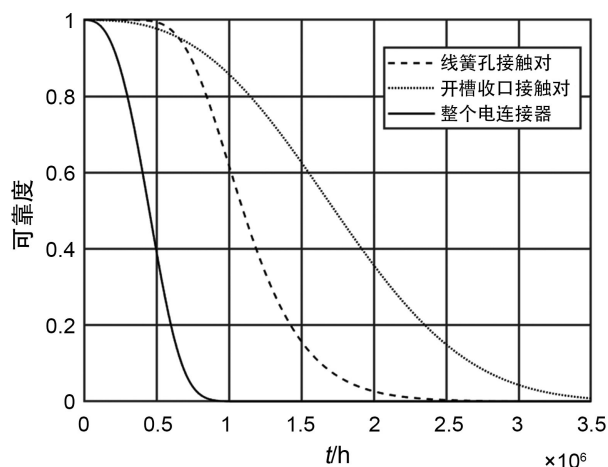


Figure 2. Reliability curve of a type of electrical connector
图 2. 某型电连接器可靠度曲线

8. 结论

本文提出的含多规格接触对电连接器的可靠性评估方法为多规格接触对电连接器产品的可靠性评估与寿命预测提供了一种有效手段。本文以某型电连接器为研究对象，介绍了含多规格接触对电连接器贮存寿命评估的关键步骤，包含失效机理分析、性能退化建模、加速退化试验设计、参数估计、可靠性评估，得到如下结论：

- 1) 本文针对某型电连接器最主要失效模式和失效机理分析，可以进一步综合考虑多种失效模式和失效机理展开研究。
- 2) 恒定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，并且加速退化试验下所得的寿命分布与正常温度应力水平下寿命分布属于相同分布类型。
- 3) 多规格接触对电连接器可将相同规格的接触对视为一个子系统，最后可根据串联系统模型评估出整个系统的可靠寿命。
- 4) 不同规格、材料接触对的性能退化趋势并不相同，对电连接器可靠度影响程度也不同。

基金项目

浙江省重点研发计划项目(项目号：2021C01133)。

参考文献

- [1] 张通. 电连接器不同孔径差异对接触可靠性影响规律的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [2] 潘骏, 刘红杰, 陈文华, 等. 基于步进加速退化试验的航天电连接器接触可靠性评估[J]. 中国机械工程, 2011, 22(10): 1197-1200.
- [3] 王浩伟, 徐廷学, 张鑫. 基于步进加速退化试验的某型电连接器可靠性评估[J]. 电光与控制, 2014, 21(9): 104-107.
- [4] 姜普涛, 韩建立, 马俊慧, 等. 弹用电连接器湿热环境下寿命预测[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 13-20.
- [5] 徐廷学, 王浩伟, 张鑫. 步进加速试验中基于 Gamma 过程的可靠性建模方法[J]. 现代防御技术, 2015, 43(1): 124-128+134.
- [6] 刘娟. 电连接器步进应力加速退化试验技术的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [7] 王世娇. 耐环境小圆形电连接器接触可靠性设计与试验评价的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.

- [8] 王世娇, 陈文华, 钱萍, 等. 航天电连接器的可靠性设计建模[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 180-186.
- [9] 钱永旺. 线簧孔式电连接器的接触可靠性优化设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [10] 魏宇杰. 线簧孔式电连接器接触可靠性设计建模与试验评估[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [11] 陈文华. 航天电连接器可靠性试验和分析的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1997.
- [12] 刘俊俊. 电连接器贮存可靠性加速寿命试验的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.
- [13] 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]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [14] Thas, O. and Ottoy, J.P. (2003) Some Generalizations of the Anderson-Darling Statistic. *Statistics & Probability Letters*, **64**, 255-261.
- [15] Elsayed A. Elsayed. 可靠性工程[M]. 杨舟, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.