

航天电连接器步进应力加速寿命试验研究^{*}

潘 骏¹, 刘红杰¹, 陈文华^{1,2*}, 刘俊俊³, 许仕伟¹, 王小云¹

(1. 浙江理工大学 机械设计与制造研究所, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 机械设计研究所, 浙江 杭州 310027; 3. 杭州航天电子技术有限公司, 浙江 杭州 310015)

摘要: 航天电连接器具有可靠性高、寿命长的特点, 为解决其接触可靠性评估问题, 通过分析其接触失效机理, 指出在温度应力下的接触失效物理模型为 Arrhenius 方程, 接触寿命服从两参数的 Weibull 分布, 并在此基础上建立了接触可靠性统计模型; 研究了航天电连接器步进应力加速寿命试验方法, 利用极大似然估计和 Nelson 累积失效模型, 提出了试验数据的统计分析方法。通过对某型航天电连接器实施步进应力加速寿命试验, 得到了正常温度应力水平下接触可靠性特征参数估计值。研究结果表明, 提出的模型与方法是有效的。

关键词: 步进应力; 加速寿命试验; 航天电连接器; 可靠性评估; 统计分析

中图分类号: TH39; TB114.3; V442

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)02-0172-04

Research on step-up-stress accelerated life test of aerospace electrical connector

PAN Jun¹, LIU Hong-jie¹, CHEN Wen-hua^{1,2}, LIU Jun-jun³, XV Shi-wei¹, WANG Xiao-yun¹

(1. Institute of Mechanical Design and Manufacturing, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Institute of Mechanical Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Hangzhou Aerospace Electrical Technology Co., Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: In order to evaluate the contact-reliability of aerospace electrical connectors with high reliability and long life, the contact failure mechanism of aerospace electrical connectors was analyzed, the failure physics model was the Arrhenius relationship and the contact life follows Weibull distribution under the action of temperature stress were indicated. On this basis, the statistical analysis for step-up-stress accelerated life test data was established, which was derived from maximum likelihood estimation theory and Nelson failure model. Through step-up-stress accelerated life test and data statistical analysis the estimated value of the reliability character of one type of aerospace electrical connectors was yielded. The results indicate that the proposed model and the algorithm can obtain satisfactory solutions.

Key words: step-up-stress; accelerated life test; aerospace electrical connector; reliability assessment; statistical analysis

0 引言

航天电连接器作为一种机电元件, 用于实现电子与电气设备之间的电连接, 具有高可靠、长寿命的特点, 在航天领域被大量使用。为保证航天产品的可靠性, 用户大多对航天电连接器的可靠性指标提出了明

确要求, 如有的工程对航天电连接器的寿命要求达 20 年。如果采用常规的寿命试验方法, 难以在可行的时间和经费内完成, 因而必须采用加速寿命试验方法。加速寿命试验方法自 1967 年由美罗姆航展中心提出^[1]以来, 基于加速寿命试验的可靠性评估方法逐步完善且在工程实际中得到广泛应用^[2-5]。在目前常用

收稿日期: 2010-08-09

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

作者简介: 潘 骏(1974-), 男, 江西宁都人, 副教授, 主要从事可靠性试验方面的研究. E-mail: panjun@zstu.edu.cn

通信联系人: 陈文华, 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: chenwh@zstu.edu.cn

的3种加速寿命试验方法中,恒定应力加速寿命试验具有理论方法成熟、统计精度高等优点,但试验所需样本量大,试验时间长;步进应力加速寿命试验具有试验时间短,所需样本量少的优点,但对试验设备要求高,统计方法尚不成熟,相对应用较少^[6];步进应力加速寿命试验具有试验效率高,所需样本量较少的优点,统计方法亦较成熟^[7],被认为是加速寿命试验在工程实际应用中的发展方向。

本研究拟首先分析航天电连接器的接触失效机理,提出温度应力下的接触失效物理模型和接触寿命分布模型;然后研究航天电连接器步进应力加速寿命试验方法,并提出相应的试验数据统计处理方法;通过对某型航天电连接器实施步进应力加速寿命试验,得到在正常温度应力下的接触可靠性特征参数估计值,最后对上述模型、方法的正确性进行验证。

1 航天电连接器的可靠性统计模型

航天电连接器(样品如图1所示)由壳体、绝缘体和接触体三大基本单元组成,外壳用来支撑和保护绝缘体和接触体等电连接器内部元件,同时起插头插座连接作用。通过绝缘体、界面封严体和封线体,来提高航天连接器的绝缘和耐环境性能。接触体(插针和插孔)是航天电连接器的关键单元,多采用导电性能良好的弹性铜合金材料、表面镀金来达到接触电阻小及防腐的目的,这直接影响航天电连接器的寿命和可靠性。



图1 某型航天电连接器实物图

1.1 航天电连接器接触失效分析

航天电连接器主要有3种失效模式:接触失效、绝缘失效和机械联接失效,其中主要失效形式为接触失效,约占总失效数的45.1%^[8]。对于表面镀金的铜基接触件航天电连接器,由于镀金层结晶成网状结构,且镀金层很薄,镀金过程中不可避免地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。由于电化学反应主要发生在镀层表面(即接触表面),则接触表面生成一层电阻率较高的腐蚀氧化物膜层。随着接触表面氧化物膜层厚度的不断增长,能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少,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 的关系式为:

$$h^2 = Kt \quad (1)$$

式中: K —反应速度常数。

且 K 与时间无关,取决于温度的大小,与温度的关系满足方程^[9]:

$$K = A \exp(-\Delta E/kT) \quad (2)$$

式中: ΔE —激活能(eV), k —波尔兹曼常数, T —绝对温度(K), A —频率因子。

把式(2)代入式(1)可得:

$$t = h^2 A^{-1} \exp(\Delta E/kT) \quad (3)$$

当氧化物膜层厚度 h 堆积到厚度 H (即 $h=H$)时,接触对的接触电阻到达允许的阈值 Q ,接触性能不再满足要求,即发生接触失效^[9]。因此在温度应力作用下,航天电连接器的接触失效物理模型服从 Arrhenius 方程:

$$\eta = A \exp(\Delta E/kT) \quad (4)$$

式中: η —特征寿命, $A = H^2 A^{-1}$,为一常数。

对上式进行线性化处理,可得:

$$\ln \eta = \mu(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x \quad (5)$$

式中: $\gamma_0 = \ln A$, $\gamma_1 = \Delta E/k$, $x = 1/T$ 。

1.2 航天电连接器接触寿命分布模型

假定航天电连接器包含 n 对接触件,第 i 对接触件的接触寿命为 θ_i ($i=1,2,\dots,n$),每对接触件的接触寿命相互独立,而且分布均为 $F_e(t)$,可以看作是相互独立的串联系统,则航天电连接器的接触寿命 θ 由接触电阻最早到达失效阈值的接触件决定, $\theta = \min\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$,即航天电连接器的接触寿命分布 $F(t)$ 可由下式来确定:

$$F(t) = 1 - \Pr\{\theta > t\} = 1 - [1 - F_e(t)]^n \quad (6)$$

当 n 较大时,若 $F_e(t)$ 为对数正态分布,则 $F(t)$ 的渐进分布为两参数 Weibull 分布。为便于计算,可用 $F(t)$ 的渐进极小值分布代替严格极小值分布来表示航天电连接器的接触失效寿命分布,即航天电连接器的接触寿命服从两参数 Weibull 分布^[9]:

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^m] \quad (7)$$

式中: η —特征寿命, m —形状参数。

则航天电连接器的接触寿命的概率密度函数为:

$$f(t) = (m/\eta)(t/\eta)^{m-1} \exp[-(t/\eta)^m] \quad (8)$$

若令 $\delta = \ln t$, 则其概率密度函数就转化为表达式:

$$f(\delta) = \frac{1}{\delta} \exp[(\delta - \mu)/\sigma] \exp\{-\exp[(\delta - \mu)/\sigma]\} \quad (9)$$

式中: $\mu = \ln \eta$, $\sigma = 1/m$ 。

1.3 航天电连接器接触寿命的可靠统计模型

若在不同温度应力作用下, 航天电连接器的接触失效机理保持不变, 联立式(4)和式(7)得其接触寿命可靠性统计模型:

$$\begin{cases} \eta = A \exp(\Delta E/kT) \\ F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^m] \end{cases} \quad (10)$$

具体表述如下:

(1) 产品接触寿命在统计上相互独立且均服从二参数 Weibull 分布;

(2) 在不同的温度应力下, 接触寿命分布的形状参数 m 保持不变;

(3) 产品特征寿命 η 与温度应力之间满足 Arrhenius 方程。

航天电连接器的接触寿命可靠性统计模型亦可通过联立式(5)和式(9)得到:

$$\begin{cases} \ln \eta = \mu(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x \\ f(\delta) = \frac{1}{\delta} \exp[(\delta - \mu)/\sigma] \cdot \exp\{-\exp[(\delta - \mu)/\sigma]\} \end{cases} \quad (11)$$

根据上述接触寿命分布模型 $F(t)$, 可得其接触寿命的可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp[-(t/\eta)^m] \quad (12)$$

2 航天电连接器步进应力加速寿命试验

2.1 步进应力加速寿命试验

步进应力加速寿命试验选择样本量为 N , 应力水平数取 K , 应力水平取 $T_i (i=1, 2, \dots, K)$, $T_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_K$, 其中 T_0 为正常应力水平(也可用上述式(5)中的转化应力 x 来表示加速应力, 即 $x_0 > x_1 > x_2 > \dots > x_K$, 其中 x_0 为正常应力水平), 试验采用定时检测方法, 即在应力水平 x_i 下, 确定对试样接触电阻进行检测的次数 c_i 以及相应的检测时刻 $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ic_i}$ 。试验开始, 把全部试样置于应力水平 x_1 下, 经过时间 τ_1 后, 将未发生接触失效的试验投入应力水平 x_2 下继续进行试验, 如此进行下去, 直到全部试样都发生接触失效为止。最后得到不同应力水平 x_i 下, 每个检测时刻

$t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ic_i}$, 试样累积失效数 r_{ic_i} , 记作 (t_{ic_i}, r_{ic_i}) 。

2.2 航天电连接器接触寿命折算方法

在步进应力加速寿命试验中, 试样在应力水平 x_q (除 $q=1$ 外) 下的接触寿命数据应包含 x_q 以前所有应力水平的累积试验时间。根据 Nelson 累积失效模型, 即在应力水平 x_q 下工作 t_q 时间相当于在应力水平 x_j 下工作 t_j 时间。由于产品寿命在统计上相互独立且均服从两参数 Weibull 分布, 可得:

$$1 - \exp[-(t_q/\eta_q)^m] = 1 - \exp[-(t_j/\eta_j)^m] \quad (13)$$

由于在不同的温度应力水平下, 寿命分布的形状参数 m 保持不变, 故:

$$t_q = (\eta_q/\eta_j) t_j \quad (14)$$

利用式(14)和式(5)可得:

$$t_q = \exp[\gamma_1(x_q - x_j)] t_j \quad (15)$$

对于上述步进应力加速寿命试验, 若某个试样在应力水平 x_q 下发生接触失效, 失效时间为 t_q , 那么将该试样在前 $q-1$ 个应力水平所经受的试验时间 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{q-1}$ 补偿到第 q 个应力水平, 就可以得到该试样在应力水平 x_q 下的真实寿命, 即:

$$t_q^* = \sum_{i=1}^{q-1} \exp[\gamma_1(x_q - x_i)] \tau_i + t_q \quad (16)$$

2.3 步进应力加速寿命试验数据统计分析方法

按照均匀插值法^[10]可得各试样在某一应力水平下的具体失效时间。根据线性一极值统计模型可知, 对于第 r 个试样, 若在第 q 个应力水平发生接触失效, 且失效时间为 x_q , 利用式(9)得其似然函数为:

$$L'_r = \ln f(\theta_r^*) = -\ln \sigma + (\theta_r^* - \mu)/\sigma - \exp[(\theta_r^* - \mu)/\sigma] \quad (17)$$

$$\text{式中: } \theta_r^* = \ln \left\{ \sum_{i=1}^{q-1} \exp[\gamma_1(x_i - x_i)] \tau_i + \exp[\gamma_1(x_1 - x_q)] t_q \right\}。$$

若在试验总截尾时间 τ_s 尚未发生接触失效, 则似然函数为:

$$L''_r = \ln R(\zeta_r^*) = \ln[1 - F(\zeta_r^*)] = -\exp[(\zeta_r^* - \mu)/\sigma] \quad (18)$$

$$\text{式中: } \zeta_r^* = \ln \left\{ \sum_{i=1}^K \exp[\gamma_1(x_i - x_i)] \tau_i \right\}。$$

当 $\theta_r^* \leq \zeta_r^*$ 时, 令 $I_r = 1$; 否则, 令 $I_r = 0$, 那么第 r 个试样的似然函数为:

$$L_r = I_r \ln f(\theta_r^*) + (1 - I_r) \ln R(\zeta_r^*) \quad (19)$$

若令:

$$\begin{cases} z_r = (\theta_r^* - \mu) / \sigma = (\theta_r^* - \gamma_0 - \gamma_1 x_1) / \sigma \\ \xi_r = (\zeta_r^* - \mu) / \sigma = (\zeta_r^* - \gamma_0 - \gamma_1 x_1) / \sigma \end{cases}$$

试验投入样本量为 N , 似然函数为:

$$L = \sum_{r=1}^N L_r = \sum_{r=1}^N \{ I_r [-\ln \sigma + z_r - \exp(z_r)] + (1 - I_r) [-\exp(\xi_r)] \} \quad (20)$$

解似然方程组:

$$\begin{cases} \partial L / \partial \gamma_0 = 0 \\ \partial L / \partial \gamma_1 = 0 \\ \partial L / \partial \sigma = 0 \end{cases} \quad (21)$$

就可得参数估计值 $\hat{\gamma}_0$, $\hat{\gamma}_1$ 和 $\hat{\sigma}$ 。

然后可得在温度应力作用下产品接触寿命分布的形状参数估计 $\hat{m} = 1/\hat{\sigma}$ 和正常应力水平 x_0 下的特征寿命 $\hat{\eta} = \exp(\hat{\gamma}_0 + \hat{\gamma}_1 x_0)$, 最后得其接触可靠度函数:

$$R(t) = \exp[-(t/\hat{\eta})^{\hat{m}}] \quad (22)$$

3 某型航天电连接器加速寿命试验及数据处理

以某型航天电连接器为研究对象, 根据步进应力加速寿命试验方案优化设计理论与方法优化设计结果^[11], 选择样本量 $N = 25$, 步进温度应力水平数 $K = 4$, 温度应力分别为 $\theta_1 = 111^\circ\text{C}$ 、 $\theta_2 = 126^\circ\text{C}$ 、 $\theta_3 = 141^\circ\text{C}$ 和 $\theta_4 = 158^\circ\text{C}$, 对应的试验时间分别为 $\tau_1 = 953\text{ h}$ 、 $\tau_2 = 294\text{ h}$ 、 $\tau_3 = 125\text{ h}$ 和 $\tau_4 = 108\text{ h}$, 接触失效阈值 $Q = 5\text{ m}\Omega$ 。试验过程中采用定时测试, 接触电阻测量装置如图2所示。



图2 接触电阻测量装置

1—PA15A 直流数字电压表; 2—PZ114 直流电流表; 3—某型航天电连接器

已知航天电连接器正常温度应力 $\theta_0 = 45^\circ\text{C}$, 根据上述统计分析方法得参数估计 $(\hat{\gamma}_0, \hat{\gamma}_1, \hat{\sigma}) = (20.1001, 10.6634, 0.3339)$, 形状参数 $\hat{m} = 2.99$ 和特征寿命 $\hat{\eta}_0 = 671177.9\text{ h}$ 。该型航天电连接器在正常温度应力下的接触可靠度函数为:

$$R(t) = \exp[-(t/671177.9)^{2.99}] \quad (23)$$

为进一步检验该型航天电连接器的接触寿命模

型, 按上述接触寿命折算方法将不同温度应力下的接触失效寿命数据折算为在最低阶应力水平下的接触失效寿命数据, 该数据集可被视为来自最低阶应力水平下的接触寿命分布模型的一个样本。最低阶应力水平下的接触寿命分布模型为:

$$F_1(t) = 1 - \exp[-(t/\eta_1)^m] \quad (24)$$

然后以 $\ln t$ 为横坐标、以 $\ln \ln \{ 1/[1 - F_1(t)] \}$ 为纵坐标, 将结果点画到 Weibull 概率纸上, 如图3所示, 数据点基本分布在一条直线上, 可以认为该型航天电连接器的接触寿命服从同一个两参数 Weibull 分布。

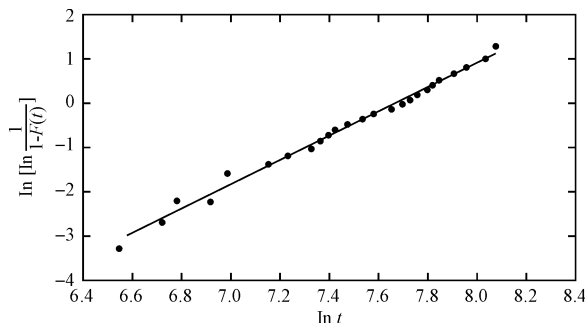


图3 Weibull 分布概率图检验

4 结束语

(1) 本研究通过分析航天电连接器接触失效机理, 指出其在温度应力下的接触失效物理模型为 Arrhenius 方程, 接触寿命分布服从两参数 Weibull 模型, 并在此基础上建立了接触可靠性统计模型。

(2) 针对步进应力加速寿命试验方法, 利用 Nelson 累积失效理论对接触寿命折算问题进行研究, 并利用极大似然估计提出了相应的试验数据统计处理和模型参数估计方法。

(3) 通过对某型航天电连接器实施步进应力加速寿命试验, 得到了其在正常温度应力下的接触可靠性特征参数估计值。

最后对其接触寿命分布模型进行了 Weibull 概率值检验, 验证了上述方法的正确性。

参考文献 (References):

- [1] YURKOWSKY W, SCHAFER R E, FINKELSTEIN J M. Accelerated Testing Technology[R]. Technical Report NO. RADC-TR-67-420. Rome Air Development Center, 1967.
- [2] NELSON W B. Accelerated Testing: Statistical Methods, Test Plans, and Data Analysis[M]. New York: John Wiley Press, 1990: 1-2.
- [3] 李晓阳, 姜同敏, 李梅珺. 可修产品的步进应力加速寿命试验统计分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 459-462.

(下转第 183 页)

表4 纵向压缩率约为20%时O形圈的最大接触压应力

序号	燕尾槽槽底中径 /mm	O型圈原始截面直径 /mm	O形圈内径 /mm	O形圈拉伸率 /(%)	O形圈纵向压缩率 /(%)	有限元分析得到的最大接触 压应力/MPa
1	805	10	735	8.1	20.1	4.25
2	745	10	675	8.8	19.7	4.25
3	513	8	462	9.2	20	4.38
4	655	10	570	12.9	16.9	3.61

根据O形圈在笔者团队研制的设备上的使用经验可知,当密封槽采用燕尾槽时,O形圈的拉伸率可以取10%左右,纵向压缩率可以取20%左右。当选用的O形圈规格初步确定之后,燕尾槽的尺寸也可以相应确定(燕尾槽槽底中径取初步选用的O形圈内径与原始截面直径之和),然后根据O形圈的截面直径、燕尾槽的尺寸和纵向压缩率20%等参数(因为纵向压缩率对密封效果影响较大,故采用纵向压缩率),实际采用的O形圈的内径可以由下面公式确定,然后在这个数值附近选取:

$$d_1 = 3 \times d_2 \times d_3 / (7d_2 - 5H)$$
$$d_4 = d_1 - d_2$$

(3)

式中: d_1 —O形圈的内径与O形圈原始的截面直径之和, d_2 —O形圈原始的截面直径, d_3 —燕尾槽槽底中径, d_4 —O形圈内径, H —燕尾槽的槽深^[13]。

其中, d_2 、 d_3 、 H 已知。

4 结束语

从本研究有限元分析得到的O形圈的变形状态可知:

- (1) 对于O形圈密封,采用的密封槽为燕尾槽时,起密封作用的主要是法兰的上下表面,燕尾槽的侧面几乎不起密封作用。所以在加工燕尾槽时,应该保证法兰上下表面的粗糙度,对于燕尾槽侧面没有要求。
- (2) 在一般的O形圈密封中,密封槽的槽口倒角半径决定O形圈的剪切应力,当密封槽倒角半径 r 大于0.5 mm时,剪切应力达到稳定。但是,对于本研究的O形圈密封而言,O形圈在工作的时候不跟槽口边

缘接触,所以不存在剪切应力,不需要对槽口进行倒角。但是,从安装O形圈的角度出发,为了避免锋利的槽口划伤O形圈,槽口还是应该倒角,取 r 为0.5 mm。

参考文献(References):

[1] SHAO Xin-jie, ZHANG Jian-bin, TAN Bao-lai. A Study on the Test of Influence of Compression Rate to Leakage Rate of O-Ring in Space Station[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Test and Measurement. Shenzhen: [s, n.], 2003: 2743-2746.

[2] 王建军,高新陵. O形橡胶密封圈尺寸公差对密封性能的影响[J]. 机电产品开发与创新, 2008(5): 79-80.

[3] 陈占清,詹永麒,朱昌明. 压缩率对O形橡胶密封圈密封性能的影响[J]. 流体传动与控制, 2007(21): 46-48.

[4] 魏 龙,张红光. 密封技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.

[5] HOU M, SU M, LIU Yong-wen, et al. Analysis of a dove-tail O-ring groove performance[J]. **Sealing Technology**, 2010(8): 9-12.

[6] 达道安,邱家稳,肖祥正,等. 真空设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.

[7] 国家标准化管理委员会. GB/T 3452.3-2005 液压气动用O形橡胶密封圈 沟槽尺寸[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.

[8] 任全彬,蔡体敏,王荣桥,等. 橡胶“O”形密封圈结构参数和失效准则研究[J]. 固体火箭技术, 2006(1): 9-14.

[9] 王 杰,谢禹钧. 关于橡胶O形密封圈的ANSYS分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2008(4): 48-50.

[10] CHARLTON D J, YANG J. A review of methods to characterize rubber elastic behavior for use in finite element analysis[J]. **Rubber Chemical and Technology**, 1994, 67(3): 481-503.

[11] FARHAD T. Elastic stability of rubber products[J]. **Rubber Chemical and Technology**, 1987, 60(5): 957-965.

[12] 陈汝训. 固体发动机的密封问题[J]. 强度与环境, 1995(4): 1-5.

[13] 何惠湘. 基于PLC的食品真空快速冷却机监控系统改进[J]. 轻工机械, 2008(6): 65-68. [编辑:张 翔]

(上接第175页)

[4] YEO K P. Planning step stress life test with a target acceleration factor[J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 1999, 48(1): 61-67.

[5] 陈 循,张春华. 加速试验技术的研究、应用与发展[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 130-136.

[6] 付志慧. 混合加速寿命试验模型以及双应力交叉步进应力加速寿命试验的统计分析[D]. 长春:吉林大学数学研究所, 2003: 5-7.

[7] 张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙:

国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2002: 6-13.

[8] 盐见弘. 失效物理基础[M]. 北京:科学出版社, 1982.

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

[10] 李玉华,孟凡兵. 温度均匀插值法冷却数的计算[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(3): 66-70.

[11] 陈文华,刘俊俊,潘 骏,等. 步进应力加速寿命试验方案优化设计理论与方法[J]. 机械工程学报, 2009, 46(10): 182-187. [编辑:柴福莉]