

DOI: 10.3901/JME.2010.24.156

综合应力加速寿命模型验证方法的研究*

钱 萍^{1,2} 陈文华² 马子魁¹ 卢献彪³ 高 亮¹

(1. 浙江大学流体传动与控制国家重点实验室 杭州 310027;

2. 浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018;

3. 中国航天科技集团公司九院八二五厂 杭州 310015)

摘要: 针对产品加速寿命模型适用性无法定量评估的问题, 将加速寿命模型转化成更具一般性的线性模型, 并从三维空间角度将加速寿命模型适用性的验证问题转化为空间数据点共面性的检验问题, 从加速寿命试验数据的统计检验角度出发, 对综合应力加速寿命模型进行多元线性回归拟合, 并以表征空间数据点和拟合值的垂直距离平方和与空间数据点本身的离差平方和相对大小的统计量作为检验指标, 提出定量评估加速寿命模型适用性的多元线性回归拟合检验的验证方法, 并对 Y11P 型航天电连接器基于失效分析得出的温度和振动综合作用下的广义 Eyring 模型进行验证, 验证结果表明广义 Eyring 模型能确切描述电连接器寿命特征在温度和振动综合应力作用下的变化规律。

关键词: 电连接器 综合应力 加速寿命模型 回归分析 模型验证

中图分类号: TB114.3 V442

Research of Multiple Stresses Accelerated Life Model Verification Method

QIAN Ping^{1,2} CHEN Wenhua² MA Zikui¹ LU Xianbiao³ GAO Liang¹

(1. The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. School of Mechanical and Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018;

3. Hangzhou Aerospace Electrical Technology Co. Ltd., Hangzhou 310015)

Abstract: For the problem that applicability of accelerated life model cannot be quantitatively assessed, by transforming accelerated life model into a more general linear model, meanwhile, by transforming the applicability validation problem of accelerated life model into the coplanarity test problem of spatial data points from the perspective of three-dimensional space, from the point of view of statistical test, accelerated life model under multiple stresses are fitted by multiple linear regression method. Taking the statistic as the test target, which characterizes the relative size of the sum of square of vertical distance between spatial data points and fitted values, and the sum of deviation square of spatial data, the verification method of multiple stresses accelerated life model by using constant stresses accelerated life test data is proposed, which can quantitatively assess the applicability of accelerated life model. After the verification of Y11P series aerospace electrical connectors' generalized Eyring model, the confidence level of model is quantitatively obtained. The verification result shows that the generalized Eyring model can preferably describe the nature of the electrical connectors' life characteristics variation under multiple stresses of temperature and vibration.

Key words: Electrical connector Multiple stresses Accelerated life model Regression analysis Model verification

0 前言

机电产品在使用过程中会受到各种环境应力的影响, 要快速评价产品在实际工作环境中的可靠

性水平, 就必须进行产品的综合应力加速寿命试验。在加速寿命试验中, 无论是加速试验方案的制定还是试验数据的统计分析, 都必须依据加速寿命模型, 即产品寿命与综合应力之间的数学关系。由于受到各种条件的限制, 产品的加速寿命模型一般是根据工程经验或失效机理分析推导而得, 为使得按此模型进行优化设计得到的产品加速寿命试验方案, 能取得较为准确的产品寿命估计值, 有必要对产品综

* 国家自然科学基金(50745040、50935002)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2007AA04Z409)、民用航天科技预研(B1220062302)、浙江理工大学科研启动基金(1003809-Y)和浙江省自然科学基金(Y1100777)资助项目。20091201 收到初稿, 20100521 收到修改稿

合应力加速寿命模型进行统计检验。对于加速寿命模型的检验,一般都是通过按此模型得到的指标估计值与实际观测值进行比较的方法粗略评价模型的正确性^[1-5],缺乏必要的理论依据和验证方法,无法定量评价模型的适用度。为此,本文基于加速试验数据的统计分析,提出了加速寿命模型的多元线性回归拟合验证方法,并对 Y11P 型航天电连接器基于失效机理分析得出的广义 Eyring 模型进行了验证。验证结果表明,该模型能确切地描述航天电连接器在温度和振动综合应力下寿命特征的变化规律。

1 电连接器综合应力加速寿命模型

电连接器的失效模式概括起来有接触、绝缘和机械联接三种失效形式,现场使用和摸底试验表明,其主要的失效形式为接触失效^[6],文献[7]通过分析电连接器在温度和振动应力综合作用下的失效机理,从机理层面上推导出了电连接器的综合应力加速寿命模型为广义 Eyring 模型,即在不同的温度和振动应力的综合作用下,产品特征寿命 η 与两应力之间的关系满足^[7]

$$\eta = A\sigma^{-\alpha} \exp[\Delta E/k(\theta + 273.15)] \quad (1)$$

式中, ΔE 为激活能, k 为玻尔兹曼常数 (0.8617×10^{-4} eV/K), θ 为环境温度, σ 为随机振动应力, A 和 α 为待定系数。

对式(1)两边取对数,则可以转化为更具一般性的线性模型,即

$$\ln \eta = \mu(x, y) = \gamma_0 + \gamma_1 x + \gamma_2 y \quad (2)$$

式中, $\gamma_0 = \ln A$, $\gamma_1 = \Delta E/1000k$, $\gamma_2 = -\alpha$, $x = 1000/(\theta + 273.15)$, $y = \ln \sigma$ 。

2 综合应力加速寿命模型的多元线性回归拟合验证方法

加速寿命模型的验证,即验证该模型是否能确切描述产品寿命特征在试验应力下的变化规律。以航天电连接器为例,从电连接器失效机理分析得出的加速寿命模型,即式(2)若成立,那么其特征寿命 $\ln \eta$ 和温度应力 x 、振动应力 y 所构成的函数曲面在三维空间内应为一个平面。记 $D^{(2)}$ 为应力 x 和 y 组成的整个定义域, $D_i^{(2)}$ 为子域, Π 为平面。验证式(2)是否成立,可以表述为下面的假设检验问题。

H_0 : $D_i^{(2)}$ 中各点处的 $\ln \eta$ 在同一个平面。

H_1 : $D_i^{(2)}$ 中各点处的 $\ln \eta$ 不在同一个平面。

设 (x_j, y_j) ($j=1, 2, \dots, K$) 是在 $D_i^{(2)}$ 中的试验点,若 H_0 成立,则对 $\forall (x_j, y_j) \in D_i^{(2)}$, 相应的 $\ln \eta_j \in \Pi$; 如果对于点集 $\{(x_j, y_j) | (x_j, y_j) \in D_i^{(2)}\}$, $\{\ln \eta_j\}$ 不可视为在同一平面上,即否定 H_0 。因此验证 H_0 的问题就可以转化为验证 $D_i^{(2)}$ 中对应试验点集 $\{(x_j, y_j)\}$ 的 $\{\ln \eta_j\}$ 是否共面的问题,即式(2)表示的加速寿命模型的验证就是对加速试验区域内各点 (x_j, y_j) 对应的 $\{\ln \eta_j\}$ 共面性进行检验。

试验区域内各点 $\{\ln \eta_j\}$ 共面性检验,可通过加速寿命试验数据的统计分析,对式(2)进行回归拟合检验,通过各点 $\{\ln \eta_j\}$ 与基于式(2)构造的拟合平面上相应的拟合值 $\{\ln \hat{\eta}_j\}$ 之间的差异在统计意义上的大小来评定 $\{\ln \eta_j\}$ 共面性的可信程度。

2.1 综合应力加速寿命试验数据的形式

假定每组试验应力 (x_j, y_j) 下有 n_j 件产品进行定时测试加速寿命试验,测试时间为

$$t_{j0} < t_{j1} < t_{j2} < \dots < t_{jz_j} \quad j=1, 2, \dots, K$$

式中, K 为试验次数, z_j 为每组试验应力下的观测次数。

在每个测试周期 $(t_{j(i-1)}, t_{ji})$ ($i=1, 2, \dots, z_j$) 内观察到失效产品个数为 r_{ji} , 则可以得到区间数据为

$$\{(t_{j(i-1)}, t_{ji}), r_{ji}\} \quad (j=1, 2, \dots, K, i=1, 2, \dots, z_j)$$

2.2 加速寿命模型的多元线性回归拟合

利用第 2.1 节所示的试验数据对加速寿命模型进行回归拟合,步骤如下所述。

首先,根据式(2)建立二元线性回归模型

$$\mu_j = \gamma_0 + \gamma_1 x_j + \gamma_2 y_j + \varepsilon_j \quad j=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

式中, $\mu_j = \ln \eta_j$, ε_j 为随机误差项。

其次,利用定时测试下的极大似然估计理论,对每组试验应力下的试验数据进行统计分析,求出式(3)中 μ_j 的极大似然估计值 $\mu_j^* = \ln \eta_j^*$, 将其作为试验区域内各点 (x_j, y_j) 对应的 $\{\ln \eta_j^*\}$ 。以航天电连接器为例,求取 μ_j^* 的具体方法如下所述。

航天电连接器寿命服从威布尔分布^[7], 在第 j ($j=1, 2, \dots, K$) 组试验应力下,其概率分布函数为

$$F_j(t) = 1 - \exp\left[-\left(t/\eta_j\right)^m\right] \quad t > 0$$

式中, m 为形状参数,在不同试验应力下保持不变^[7]; η_j 为第 j 组试验应力下的特征寿命。单个产品在 $(t_{j(i-1)}, t_{ji})$ 内失效的概率为

$$p_{ji} = P[t_{j(i-1)} < t < t_{ji}] = F_j(t_{ji}) - F_j(t_{j(i-1)}) = \exp[-(t_{j(i-1)}/\eta_j)^m] - \exp[-(t_{ji}/\eta_j)^m]$$

式中, $i=1,2,\dots,z_j$, $j=1,2,\dots,K$ 。

那么在测试区间 $(t_{j(i-1)}, t_{ji})$ 内失效 r_{ji} 个的概率为 $p_{ji}^{r_{ji}}$, 第 j 组试验应力下对应的似然函数为

$$L_j = \frac{n_j!}{z_j \prod_{i=1}^{z_j} r_{ji}!} \prod_{i=1}^{z_j} p_{ji}^{r_{ji}} = \frac{n_j!}{z_j \prod_{i=1}^{z_j} r_{ji}!} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{t_{j(i-1)}}{\eta_j}\right)^m\right] - \exp\left[-\left(\frac{t_{ji}}{\eta_j}\right)^m\right] \right\}^{r_{ji}}$$

通过求取上述似然函数的极大值, 得到第 j 组试验应力下对数特征寿命 μ_j 的极大似然估计值 μ_j^* 。

然后, 利用数据 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 对式(3)进行最小二乘回归拟合, 求出未知参数 γ_0 、 γ_1 、 γ_2 的估计值 $(\hat{\gamma}_0, \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2)$ 。这样, 就可得到各应力水平组合点 (x_j, y_j) 上对数特征寿命的拟合值 $\hat{\mu}_j = \ln \hat{\eta}_j$ 。

2.3 加速寿命模型的检验理论

经上述分析, 检验空间各点 $\{\ln \eta_j\}$ 共面, 相当于各组试验应力下对数特征寿命的极大似然估计值 $\{\ln \eta_j^*\}$ 的共面性检验。若空间各点 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 共面, 则各点 $\{\ln \eta_j^*\}$ 距离拟合平面 $\hat{\mu} = \ln \hat{\eta} = \hat{\gamma}_0 + \hat{\gamma}_1 x + \hat{\gamma}_2 y$ 垂直距离的平方和, 即残差平方和, 应比各点的离差平方和越小越好。因此构造表征残差平方和与离差平方和相对大小的检验统计量

$$F_H = \frac{(S_S - S_{SE})/p}{S_{SE}/(K-p-1)} \quad (4)$$

式中, 残差平方和 $S_{SE} = \sum_{j=1}^K (\ln \eta_j^* - \ln \hat{\eta}_j)^2$; 各点

$\{\ln \eta_j^*\}$ 的离差平方和 $S_S = \sum_{j=1}^K (\ln \eta_j^* - \ln \bar{\eta}_j)^2$,

$\ln \bar{\eta}_j = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \ln \eta_j^*$, p 为应力种数。

假定式(3)所示的二元线性回归模型中随机误差项 ε_j 满足正态性假设和 Gauss-Markov 假设^[8], 即

$$\begin{cases} \varepsilon_j \sim N(0, \sigma^2) \\ \text{Cov}(\varepsilon_j, \varepsilon_k) = 0 \quad j \neq k \end{cases} \quad (5)$$

则检验统计量 F_H 服从自由度为 $(p, K-p-1)$ 的 F 分布。

若 F_H 大于在给定的显著性水平 β 下 F 分布的统计临界值 $F_{\beta}(p, K-p-1)$, 则可以认为空间各点 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 共面, 即式(2)所示的加速寿命模型能准确描述产品寿命特征在试验应力下的变化规律。

2.4 加速寿命模型的验证方法

现从加速寿命试验数据出发, 应用多元线性回归拟合分析方法, 基于第 2.3 节所述的加速寿命模型的检验理论对产品综合应力加速寿命模型进行验证。

首先, 必须得检验随机误差项是否满足式(5)所示的假设, 即误差项的不相关假设、正态分布假设及等方差假设。具体方法如下所述。

(1) 按照第 2.2 节所述的多元线性回归拟合法, 利用第 2.1 节中的加速寿命试验数据, 求出回归模型参数 γ_0 、 γ_1 、 γ_2 估计值 $(\hat{\gamma}_0, \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2)$ 。

(2) 误差项的不相关假设检验。从试验数据的收集过程判断误差项的不相关性。若试验样品从同批产品中随机抽取, 且每组试验分批进行, 则可以认为每组试验应力下的随机误差项 ε_j 是相互独立的。

(3) 误差项正态分布的检验。由于残差 e_j 是误差项 ε_j 的“估计量”, 记为 $e_j = \ln \eta_j^* - \ln \hat{\eta}_j$, 考察误差项 ε_j 是否满足正态分布的假设, 可通过检验残差 e_j 的正态性来实现。其中 $e_{(j)}$ 为残差 e_j 的升序排列。针对应力水平数较少的情况, 采用以升序排列残差 $e_{(j)}$ ($j=1,2,\dots,K$) 为纵坐标, 以 $e_{(j)}$ 的期望值 $E(e_{(j)})$ 为横坐标的正态概率图检验误差项是否服从正态分布较为合适。可以证明, 若误差项服从正态分布, 则点 $(E(e_{(j)}), e_{(j)})$ 在概率图上应在一条直线上^[8]。计算 $e_{(j)}$ 和 $E(e_{(j)})$ ($j=1,2,\dots,K$) 之间的相关系数

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^K e_{(j)} E(e_{(j)})}{\sqrt{\sum_{j=1}^K e_{(j)}^2 \sum_{j=1}^K E^2(e_{(j)})}}$$

来判断它们之间的线性关系的强弱, 若 ρ 接近于 1, 则表明 $e_{(j)}$ 和 $E(e_{(j)})$ 线性关系强, 可以认为点 $(E(e_{(j)}), e_{(j)})$ 在一条直线上, 则误差项服从正态分布。

(4) 误差项等方差的检验。由于残差图提供了误差项的全部信息, 若误差项不等方差, 则残差图会出现弯曲或逐步增大或倾斜的趋势, 见图 1b~1d, 其中纵轴代表残差, 横轴代表拟合值; 若各残差图呈带状分布, 如图 1a 所示, 那么误差项等方差的假定成立^[8]。

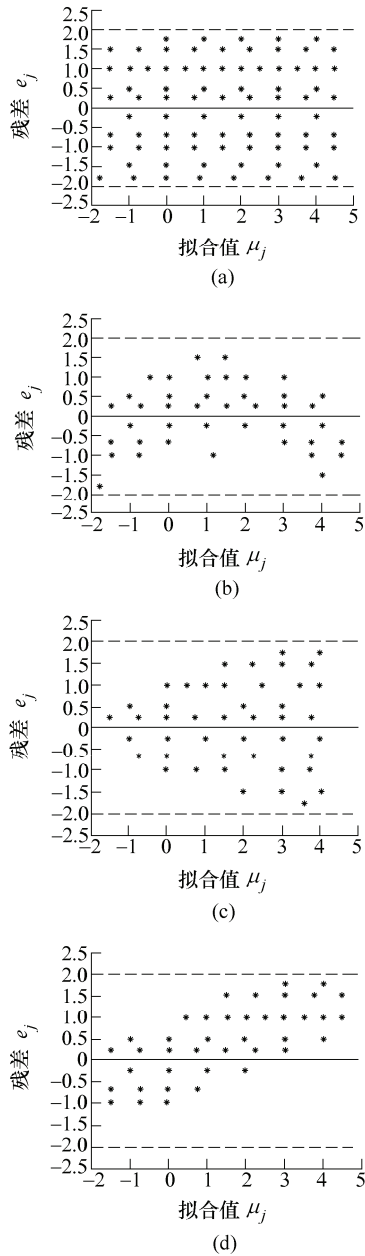


图 1 残差形态图

(5) 当随机误差项满足上述假定后，利用式(4)所示的检验统计量定量检验空间点 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 的共面性。利用方差分析计算统计量 F_H 的值，若 $F_H > F_{\beta}(p, K - p - 1)$ ，则认为在显著性水平 β 下各点 $\{\ln \eta_j^*\}$ 共面，采用式(2)描述电连接器特征寿命变化规律是合适的；否则，拒绝空间点 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 共面的假定。

3 航天电连接器综合应力加速寿命模型的验证

为对航天电连接器在温度和振动综合应力作用下的广义 Eyring 模型进行验证，现投入 40 只

Y11P-1419 型航天电连接器，分 5 组进行定时测试定时截尾恒定综合应力加速寿命试验，取截尾时间 $\tau = 40$ h。试样在截尾时间之前全部因接触电阻超标而造成接触失效。各组试验的测试时间及对应的累积失效数如表 1 所示。

表 1 各应力水平下的测试时间及累积失效数

第①组		第②组		第③组	
$\theta=135.9\text{ }^{\circ}\text{C}$		$\theta=146.7\text{ }^{\circ}\text{C}$		$\theta=116\text{ }^{\circ}\text{C}$	
$\sigma=0.316\text{ g}^2/\text{Hz}$		$\sigma=0.1\text{ g}^2/\text{Hz}$		$\sigma=0.178\text{ g}^2/\text{Hz}$	
试样数 $n_1=8$		试样数 $n_2=8$		试样数 $n_3=8$	
测试时间	累积	测试时间	累积	测试时间	累积
t/h	失效数 n_s /个	t/h	失效数 n_s /个	t/h	失效数 n_s /个
1	0	7	0	7	0
3	1	12	1	8	1
4	2	18	2	9	2
5	3	20	3	12	2
6	4	22	4	13	3
6.5	4	24	5	13.5	4
7.5	6	25	5	14	4
8.0	7	27	6	14.5	5
9.0	8	29	6	17	5
—	—	32	7	18	6
—	—	36	8	20	7
—	—	—	—	23	8
第④组		第⑤组			
$\theta=125.7\text{ }^{\circ}\text{C}$		$\theta=158\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\sigma=1.0\text{ g}^2/\text{Hz}$		$\sigma=0.562\text{ g}^2/\text{Hz}$			
试样数 $n_4=8$		试样数 $n_5=8$			
测试时间 t/h	累积失效数 n_s /个	测试时间 t/h	累积失效数 n_s /个		
0.5	0	1.0	0		
1.0	2	4/3	1		
4/3	4	5/3	3		
5/3	6	2.0	5		
2.0	7	2.5	6		
3.0	8	3.0	7		
—	—	4.0	8		

按照上述加速寿命模型验证的方法，利用表 1 中的数据对式(2)进行验证，从试验数据的收集过程知，随机误差项 ε_j 相互独立。

首先根据多元线性回归拟合获得式(3)中模型参数 γ_0 、 γ_1 和 γ_2 的估计值

$$\hat{\gamma}_0 = -4.0446 \quad \hat{\gamma}_1 = 1.7803 \quad \hat{\gamma}_2 = -1.3088$$

然后，对误差项进行正态分布假设和等方差假设检验，得到 $e_{(j)}$ 与 $E(e_{(j)})$ 的正态概率图和残差图，分别如图 2 和图 3 所示。

计算图 2 中 $e_{(j)}$ 和 $E(e_{(j)})$ 相关系数 $\rho = 0.9337$ ，接近于 1，说明点 $(E(e_{(j)}), e_{(j)})$ 线性关系很强，从而证明误差项服从正态分布。

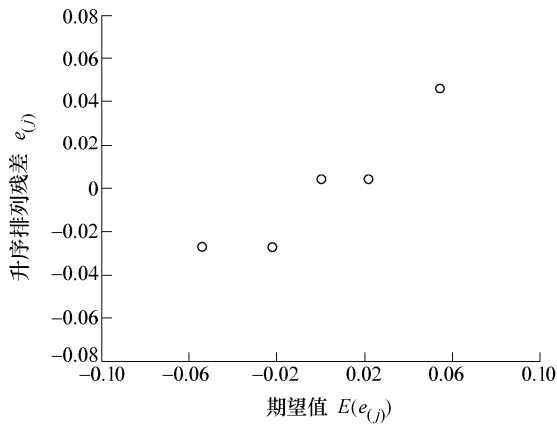


图 2 残差的正态概率图

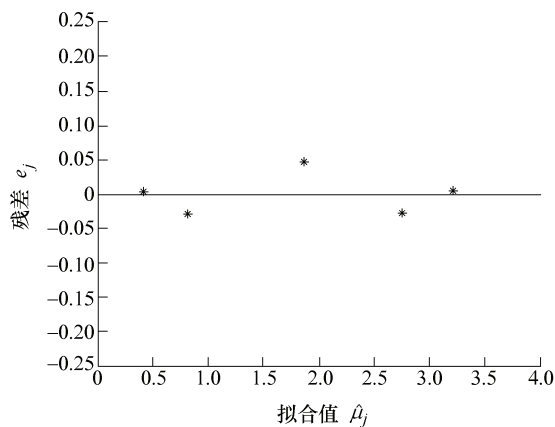


图 3 加速寿命模型的残差图

图 3 中以残差 e_j 为纵轴, 以拟合值 $\hat{\mu}_j$ 为横轴的残差图呈现带状, 说明误差项没有出现明显的增大或减小趋势, 可以认为误差项满足等方差假定。

由上述分析知, 误差项满足式(5)的假设, 因此可利用式(4)所示的统计量检验空间点 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 是否共面。经方差分析得到残差平方和及离差平方和, 如表 2 所示。

表 2 二元线性回归模型的方差分析表

方差来源	自由度 m	平方和 S_e	方差 σ	F_H
残差 e_j	2	0.003 6	0.001 8	159.15
离差 e_l	4	5.798 8	1.449 7	

在显著性水平 $\beta = 0.01$ 下, 查 F 分布表得 $F_{0.01}(2, 2) = 99.00$, $F_H > F_{0.01}(2, 2)$, 因此可以认为在显著性水平为 0.01 下空间点 $(x_j, y_j, \ln \eta_j^*)$ 共面。

综上所述, 利用提出的综合应力加速寿命模型验证方法对航天电连接器在温度和振动综合应力下的广义 Eyring 模型进行验证, 结果表明广义 Eyring 模型在 0.01 的显著性水平下成立, 即该模型能确切描述电连接器寿命在温度和振动综合应力下的变化规律。

4 结论

(1) 本文通过恒定综合应力加速寿命试验数据的统计分析, 基于加速寿命模型的检验理论, 提出了定量评估综合应力加速寿命模型适用性的多元线性回归拟合检验的验证方法。

(2) 对从失效机理推导出的 Y11P 型电连接器在温度和振动应力作用下的广义 Eyring 模型进行验证, 验证结果认为该模型在显著性水平为 0.01 下成立, 表明广义 Eyring 模型能确切描述电连接器寿命特征在温度和振动综合应力下的变化规律。

参 考 文 献

- [1] BACH H, MAUSER W. Modeling and model verification of the spectral reflectance of soils under varying moisture conditions[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994, 4: 2354-2356.
- [2] CHRISTOPHER C B. SEC proton prediction model: Verification and analysis[J]. Radiation Measurement, 1999(30): 231-250.
- [3] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 II——模型验证与应用[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 691-695.
YU Hongfa, SUN Wei, MA Haiyan, et al. Study on prediction of concrete service life II - model's examination and application[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(6): 691-695.
- [4] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究—模型的验证[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2 679-2 685.
ZHANG Wen, HUANG Yao, ZHENG Xunhua, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model validation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2679-2685.
- [5] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 染污绝缘子串直流污闪放电模型及验证[J]. 电工技术学报, 2009(4): 36-41.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin, et al. DC pollution flashover model and its validation of polluted insulator strings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009(4): 36-41.
- [6] 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.
CHEN Wenhua, CHENG Yaodong, LI Pingzhen, et al. Reliability mathematics model of aerospace electrical connector[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(6): 732-734.

- [7] 陈文华, 李红石, 连文志, 等. 航天电连接器环境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.

CHEN Wenhua, LI Hongshi, LIAN Wenzhi, et al. Accelerated life test and statistical analysis of aerospace electrical connectors under multiple environmental stresses[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(2): 348-351.

- [8] 梅长林, 周家良. 实用统计方法[M]. 北京: 科学出版

社, 2002.

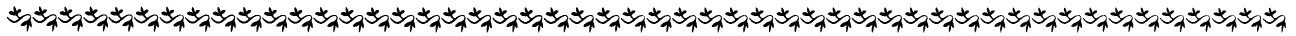
MEI Changlin, ZHOU Jialiang. Applied statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2002.

作者简介: 钱萍, 女, 1983 年出生, 博士, 讲师。从事可靠性试验与统计分析的研究。

E-mail: hustchampion@hotmail.com

陈文华(通信作者), 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。从事可靠性试验与统计分析的研究。

E-mail: chenwh8@zju.edu.cn



《机械工程学报》被 EI 收录论文目次 (2010 年第 8 期)

- 基于激光光源的钢轨表面缺陷三维检测方法 徐 科 杨朝霖 周 鹏等 (1)
- 机体飞行载荷疲劳试验中的声发射特性分析 冯剑飞 耿荣生 郭冠华等 (6)
- 光栅平动式光调制器的残余应力自测量方法和试验 张智海 黄尚廉 张 浩等 (12)
- 基于时间反转的管道导波缺陷参数辨识方法 邓 菲 吴 斌 何存富 (18)
- 锻造钩尾框新型斜弯曲模结构的参数 周 杰 李 路 胡振志等 (25)
- 盒形件智能化拉深变压边力控制规律及其预测 马 瑞 赵 军 屈晓阳 (32)
- 耦合温度和应变率的铝合金板成形极限预测方法 于忠奇 侯 波 李淑慧等 (37)
- 帽形件弯曲及其弹复影响因素的定量解析 苏春建 赵 军 官英平 (42)
- 相对厚度对锥形零件拉深成形的影响 任运来 吕亚臣 彭加耕等 (51)
- 离心式压缩机齿轮的快速深层等离子渗氮 王春光 邓德伟 刘 丹等 (56)
- 基于光谱的激光—MAG 复合焊耦合机理分析 李志勇 王 威 王旭友等 (62)
- 不锈钢 AA-TIG 焊接法 黄 勇 樊 丁 林 涛等 (68)
- 弧焊机器人焊枪姿态的简便示教 周 律 蔡锦达 钱 炜等 (73)
- 脉冲熔化极气体保护焊焊接电源—电弧系统建模与仿真 华学明 宋 政 李 芳等 (78)
- 基于相似理论解决水轮机转轮数值分析困难的方法 姬书得 张利国 刘雪松等 (83)
- 基于电磁耦合无级变速器的混合动力车传动控制 罗玉涛 张桂连 旷 鹏等 (88)
- 基于板料网格变形的翻边工序修边线确定方法 刘迪辉 申光举 李光耀等 (98)
- 全路面多用途自走式电源车研制 李水良 杨新红 徐锐良等 (103)
- 基于多孔微热沉的大功率 LED 冷却技术研究 万忠民 陈 敏 刘 伟等 (109)
- 基于微机电系统技术的微型热电致冷器研究进展 任大海 卢 凯 戴震宇等 (114)
- 超临界汽轮机再热主汽阀门卡涩分析 徐 东 鲍劲松 金 焯 (121)
- 水下拖曳升沉补偿系统设计及其内模鲁棒控制 王海波 王庆丰 (128)
- 基于 CFD 的螺旋桨敞水性能数值分析与验证 高富东 潘存云 蔡汶珊等 (133)
- 水辅助注射成型充模流动的仿真与分析 张增猛 周 华 高院安等 (140)
- FBM 湍流模型在云状空化流动数值计算中的应用与评价 黄 彪 王国玉 张 博等 (147)
- 基于剪式陀螺系统的空间飞行器非线性姿态控制 范继祥 周 荻 (154)
- 基于非线性反馈的轧机主传动机电耦联扭转系统的分岔控制 刘 彬 刘 爽 张业宽等 (160)
- 新型永磁偏置轴向磁轴承的磁力特性 刘 虎 房建成 (167)
- 基于线性状态空间模型的多工位尺寸偏差流建模与分析 苗 瑞 应杨箭 杨 东等 (175)
- 面向过程的工业设计知识地图构建 刘 征 孙凌云 鲁 娜 (181)
- 多媒体演示仪的人机安全设计 楚 杰 楚良海 邱晓利 (188)