

基于加速退化数据的某导电膜电阻贮存寿命预测方法

陈志军, 周 芳, 杨学印, 王 薇, 胡彦平, 张 涛

(中国运载火箭技术研究院北京强度环境研究所, 北京, 100076)

摘要 提出了一种基于加速退化数据的某导电膜电阻贮存寿命预测方法。首先对该导电膜电阻采用温度应力进行加速性能退化试验, 试验中将该导电膜电阻的总阻值作为反映其性能的指标判据, 在不同加速应力水平下得到在线测试和离线测试获取的加速性能退化数据; 然后通过引入温度因数去除在线测试数据的温漂效应, 再融合在线数据和离线数据进行退化轨迹模型参数辨识, 获得该导电膜电阻在各加速应力水平下的伪寿命; 然后结合经过修正的三参数温度加速模型评估得到该导电膜电阻在正常应力下的贮存寿命。最终以某导电膜电阻为例验证了所提方法的适用性和有效性。

关键词 加速退化数据; 贮存寿命; 温漂效应; 加速模型

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.04.007

中图分类号 TB114.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)04-0046-06

A Prediction Method for Storage Life of Conducting Film Resistor Based on Accelerated Degradation Data

CHEN Zhijun, ZHOU Fang, YANG Xueyin, WANG Wei, HU Yanping, ZHANG Tao

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering,
Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A Prediction method for storage life of conducting film resistor based on accelerated degradation data is proposed in this paper. First of all, the accelerated performance degradation test of the conducting film resistor is carried out by using the temperature stress. In the experiment, the total resistance of the conductive film is used as a criterion of the performance, and the accelerated performance degradation data tested by on-line and off-line testing are obtained under conditions of different accelerated stress; Secondly, the temperature drift effect of the on-line data is removed by introducing the temperature factor, and the on-line data is fused with the off-line data to identify the degenerate trajectory parameters, and the pseudo life of the conducting film resistor at each acceleration stress level is obtained; Then, the storage life of the conducting film resistor under normal stress is obtained by combining the modified three parameter temperature acceleration model; Finally, taking a conducting film resistor as an example, the applicability and effectiveness of the proposed method are verified.

Key words: accelerated degradation data; storage life; temperature drift effect; acceleration model

收稿日期: 2018-06-14

作者简介: 陈志军(1990—), 男, 安徽安庆人, 工程师, 主要从事高可靠长寿命产品寿命建模与评估、环境与可靠性试验研究。
E-mail: czj19900807@163.com

引用格式: 陈志军, 周芳, 杨学印, 等. 基于加速退化数据的某导电膜电阻贮存寿命预测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 46-51. CHEN Zhijun, ZHOU Fang, YANG Xueyin, et al. A Prediction Method for Storage Life of Conducting Film Resistor Based on Accelerated degradation data[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(4): 46-51.

随着产品寿命与可靠性水平的提高,产品贮存条件下的失效数据很难获取,几乎没有,使得传统的基于失效数据的寿命与可靠性评估方法模型已难以满足工程评定要求,为了解决此类问题,加速试验被引入到寿命与可靠性评估领域,通过提高产品所处环境应力水平,开展实验室模拟试验,获取高应力条件下产品的性能退化数据,然后借助轨迹拟合和加速模型外推正常应力条件下产品的寿命,成为解决高可靠、长寿命产品寿命预测与可靠性评估问题的重要途径^[1-3]。

赵建印等基于性能退化数据通过统计推断方法确定退化轨迹模型,提出了多种基于退化失效的产品可靠性分析方法^[4-9]。邓爱明等考虑到高可靠长寿命产品的无失效数据的特点,提出了基于退化轨迹与退化量分布的高可靠长寿命产品可靠性评估方法^[10-11]。

美国亚利桑那大学 Crk^[12]利用多元、多重回归分析方法对部件和系统的性能退化数据轨迹模型的相关参数进行辨识,提出了基于性能退化数据的部件和系统可靠性分析评估方法^[13]。Lu 和 Pantu-al^[14]针对某金属半导体性能退化数据建模分析时,利用最大似然估计方法对其退化轨迹模型进行辨识,并给出其寿命与可靠性评估结果。Huang 和 Duane^[15]通过对产品退化数据建模,利用最大似然估计方法给出了一个基于退化数据的分布参数最大似然估计值,并最终完成产品的寿命预测。

在前人研究的基础上,针对产品在温度应力影响下的加速性能退化试验中,采用有效的加速试验方法可以获得有效的试验数据,但获取的数据分为在线测试数据和离线测试数据,且在线测试数据获取较为便捷并不会影响试验的进程,而离线测试数据获取则需要暂停试验且恢复至常规环境进行离线测试,直接影响试验效率。因此,在试验方案设计阶段就会考虑尽可能少的中断试验进行离线测试,在试验过程中尽可能多的进行在线测试。但这样就存在一个问题:由于在线测试数据存在温漂效应,直接用于产品寿命预测是不合适的^[16],而仅仅通过离线测试数据进行产品寿命预测,又因为数据量少的问题导致预测结果存在一定误差。在这样一个背景下,本文提出一种融合在线数据和离线数据的产品寿命预测方法成为关键。

在贮存环境下,针对某导电膜电阻开展加速性能退化试验时,通过机理分析可确定温度应力是其贮存时的主要敏感应力。所以本文将对该导电膜电阻采用温度应力进行加速性能退化试验,试验中将采用该导电膜电阻的总阻值作为反映其性能的指标判据,在不同加速应力水平下得到其在线测试和离线测试获取的加速性能退化数据,提出一种融合在线数据和离线数据的某导电膜电阻贮存寿命预测方

法,通过引入温度因数将在线测试数据的温漂效应减去,从而补充得到更多可用于寿命预测的试验数据,更加准确的拟合得到退化轨迹模型的相关参数,然后获得该导电膜电阻在各加速应力水平下的伪寿命,并结合经过修正的三参数温度加速模型评估得到该导电膜电阻在正常应力下的贮存寿命。

1 某导电膜电阻贮存寿命预测方法

本文提出的基于加速退化数据的某导电膜电阻贮存寿命预测方法应包括以下3步:

1) 加速性能退化试验方案设计和试验数据获取。对该导电膜电阻设计4个水平的温度加速应力进行加速性能退化试验,试验中采用该导电膜电阻的总阻值作为反映其性能的指标判据,在不同加速应力水平下得到其在线测试和离线测试获取的加速性能退化数据。

2) 加速应力水平下退化轨迹拟合与伪寿命外推。通过引入温度因数去除在线测试数据的温漂效应,再融合在线数据和离线数据进行退化轨迹模型参数辨识,获得该导电膜电阻在各加速应力水平下的伪寿命。

3) 导电膜电阻贮存寿命预测。结合经过修正的三参数温度加速模型预测得到该导电膜电阻在正常应力下的贮存寿命。

2 导电膜电阻伪寿命估计

2.1 总阻值变化率退化模型

该导电膜电阻的总阻值变化率退化模型可表示为:

$$\rho = (kt)^\beta \quad (1)$$

式中: ρ 为时刻t下的总阻值变化率;t为退化时间;k为反应速率; β 为待定常数。

将式(1)进行对数变换得:

$$y = a + bx \quad (2)$$

式中: $y = \ln \rho$; $x = \ln t$; $a = \beta \ln k$; $b = \beta$

由此建立线性回归模型:

$$y = a + bx + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

式中: ε 是均值为零、方差为 σ^2 的正态随机变量。

2.2 在线测试数据的预处理

充分利用在线测试数据和离线测试数据,对得到的退化轨迹模型参数进行更精确的估计。根据离线测试时刻下的在线测试总阻值和离线测试总阻值,可以得到一系列离线测试时刻下的总阻值温度因数(基准温度为离线测试温度20℃)。第*i*次离线测试时刻*i*=1,2,...,*p_k*,*t_{ij}*(*j*=1,2,...,*m*)下的总

阻值温度因数 $k=1,2,\dots,n$, C_{ij} 为:

$$C_{ij} = \frac{y_{ij-\text{online}}}{y_{ij-\text{offline}}} \quad (4)$$

式中: $y_{ij-\text{online}}$ 和 $y_{ij-\text{offline}}$ 分别为 t_{ij} 时刻下的在线测试总阻值和离线测试总阻值。

2.3 基于在线测试数据和离线测试数据的伪失效寿命估计方法

设温度 T 下导电膜电阻进行退化试验前的离线测试总阻值为 $R_{\text{offline},0}$, 试验时间 t_i 对应的离线测试总阻值为 $R_{\text{offline},i}$, $i=1,2,\dots,n$, 则离线测试总阻值变化率为:

$$\rho_i = \frac{R_{\text{offline},i} - R_{\text{offline},0}}{R_{\text{offline},0}} \quad (5)$$

通过将其变换为数据 (x_i, y_i) , 采用回归分析方法可以求得回归系数 a 和 b 的估计量, 得回归方程为:

$$\tilde{y} = \hat{a} + \hat{b}x \quad (6)$$

根据式(6)可知, 导电膜电阻的伪失效寿命估计为:

$$\hat{t} = \exp\left(\frac{\ln\rho - \hat{a}}{\hat{b}}\right) \quad (7)$$

3 导电膜电阻的贮存寿命预测

3.1 加速模型

由于加速退化试验的加速应力为温度, 且最高加速温度(140°C)与贮存温度(20°C)之间的跨度范围较大, 引入线性激活能理论, 选用修正的三参数 Arrhenius 方程作为加速模型, 如下:

$$t = AT^m \exp\left(\frac{E}{KT}\right) \quad (8)$$

式中: T 为绝对温度; A 为常数; E 为激活能; K 为玻尔兹曼常数; m 为修正系数。

同理, 通过对数变换式(8)可转化为:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (9)$$

由此建立线性回归模型

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (10)$$

3.2 加速模型参数估计方法

设在第 i 个温度 T_i 下进行加速退化试验, 得到 n_i 个样本的伪失效寿命 t_{ij} , 将其变换为数据 $(x_{1i}, x_{2i}, y_{ij}), i=1,2,\dots,q; j=1,2,\dots,n_i$ 。根据成组数据回归分析方法^[17-18]可以求得回归系数 a , b_1 和 b_2 的估计量, 则回归方程为:

$$\tilde{y} = \hat{a} + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 \quad (11)$$

且有:

$$\begin{aligned} \hat{y} &\sim N(a + b_1 x_1 + b_2 x_2, \\ &[\frac{1}{n} + \sum_{i,j=1}^2 w_{ij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)]\sigma^2) \end{aligned} \quad (12)$$

方差 σ^2 的估计量为:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \tilde{y}_{ij})^2 \quad (13)$$

且有:

$$\frac{(n-3)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-3) \quad (14)$$

3.3 贮存寿命预测方法

y 的预测值 \tilde{y} 可由式(17)给出, 其置信度为 $\gamma = 1 - \alpha$ 的单侧置信下限 y_L 和上限 y_U 为:

$$\begin{aligned} y_L &= \tilde{y} - t_a(n-3)\hat{\sigma} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \sum_{i,j=1}^2 w_{ij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)} \\ y_U &= \tilde{y} + t_a(n-3)\hat{\sigma} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \sum_{i,j=1}^2 w_{ij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)} \end{aligned} \quad (15)$$

区间 $[y_L, y_U]$ 为 y 的置信度为 $2\gamma - 1$ 的置信区间, 式中 $t_a(n-3)$ 为分布 $t(n-3)$ 的上 α 分位点。

由此可知, 在贮存温度 T^* 下导电膜电阻的贮存期 t 的点估计 \hat{t} 及其置信度为 γ 的单侧置信下限 t_L 和上限 t_U 分别为

$$\hat{t} = \exp(\tilde{y}) \quad (17)$$

$$t_L = \exp(y_L) \quad (18)$$

$$t_U = \exp(y_U) \quad (19)$$

区间 $[t_L, t_U]$ 为 t 置信度为 $2\gamma - 1$ 的置信区间。

4 案例分析

以某导电膜电阻为例, 以电阻总阻值作为测试指标, 以总阻值变化率是否超过失效阈值为失效判据。试验采用恒定应力施加方式, 试验应力类型采用温度单应力。

本次加速退化试验共设计 4 组加速应力水平: 60°C 、 85°C 、 110°C 、 140°C , 且 60°C 应力水平下共投入 8 个样本进行试验, 总试验时间为 400 h, 早期、中期和后期离线测试间隔时间分别为 4 h、8 h 和 20 h; 85°C 应力水平下共投入 5 个样本进行试验, 总试验时间为 400 h, 早期、中期和后期离线测试间隔时间分别为 4 h、8 h 和 20 h; 110°C 应力水平下共投入 4 个样本进行试验, 总试验时间为 256 h, 早期、中期和后期离线测试间隔时间分别为 4 h、8 h 和 12 h; 140°C 应力水平下共投入 4 个样本进行试验, 总试验时间为 40 h, 离线测试间隔时间为 4 h; 各个温度下最大离线测试时间间隔相对总试验时间均不超过 $1/10$, 110°C 、 85°C 和 60°C 仅为 $1/20$ 左右, 可以认为各个离线测试时间间隔内的总阻值温度因数相同。本文中统一采用各离线测试时刻的总阻值温度因数作为该次与前次离线测试时刻之间的总阻值温度因数。

该产品规定的退化失效阈值为 $\rho = 10\%$, 最终用于该导电膜电阻贮存寿命预测的数据见图 1~4。

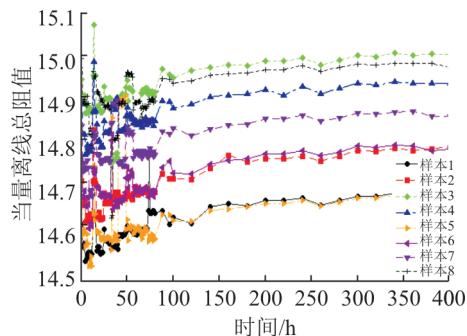


图 1 60 °C下导电膜电阻总阻值退化轨迹

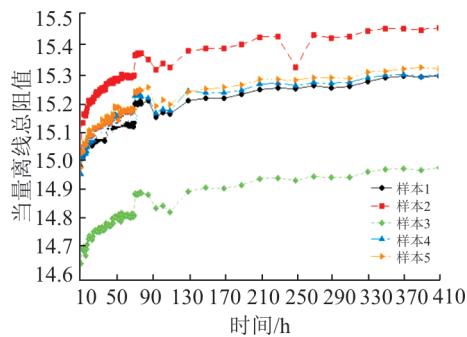


图 2 85 °C下导电膜电阻总阻值退化轨迹

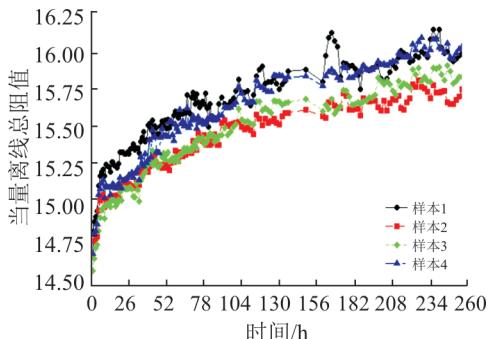


图 3 110 °C下导电膜电阻总阻值退化轨迹

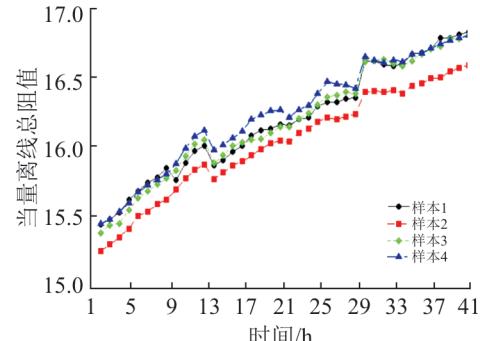


图 4 140 °C下导电膜电阻总阻值退化轨迹

4.1 导电膜电阻伪失效寿命估计

该导电膜电阻加速退化试验截止时刻的总阻值变化率见表 1。其中 140 °C 下有 2 个样本达到失效阈值, 另外 2 个样本的离线总阻值变化率分别为 9.93% 和 9.95%, 基本达到失效阈值; 110 °C 下有 2 个样本达到失效阈值, 另外 2 个样本的离线总阻值变化率分

别为 8.83% 和 8.03%, 距离失效阈值较近; 85 °C 下所有样本的离线总阻值变化率最大值仅为 3.21%, 距离失效阈值较远; 60 °C 下所有样本的离线总阻值变化率最大值仅为 1.66%, 距离失效阈值最远。由上可见, 大部分样本均需通过外推估计其伪失效寿命。

表 1 导电膜电阻总阻值变化率

样本编号	温度/°C	试验时间/h	总阻值变化率/%
1			1.66
2			1.44
3			1.29
4			1.57
5	60	400	1.02
6			1.54
7			1.35
8			1.29
1			2.51
2			3.21
3	85	400	2.79
4			2.75
5			2.58
1			8.83
2			8.03
3	110	256	10.05
4			10.02
1			9.93
2			9.95
3	140	40	10.08
4			10.02

4.1.1 失效样本的伪失效寿命估计

对于失效样本, 直接通过插值计算其伪失效寿命 \hat{t} , 计算公式如下:

$$\hat{t} = \exp \left[\ln t_1 + \left(\frac{\ln \rho - \ln \rho_1}{\ln \rho_2 - \ln \rho_1} \right) (\ln t_2 - \ln t_1) \right], \quad i=1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中: t_1 和 t_2 ($t_1 < t_2$) 为包含失效时刻的离线测试时刻; ρ_1 和 ρ_2 分别为 t_1 和 t_2 时刻下的离线总阻值变化率; ρ 为总阻值变化率失效阈值。根据式(20)估计各失效样本的伪失效寿命, 列于表 2。

表 2 加速退化试验失效样本的伪寿命估计

样本编号	温度/°C	伪寿命估计 \hat{t}/h
3		252.167
4	110	255.217
3		39.489
4	40	39.868

4.1.2 未失效样本的伪失效寿命估计

对于未失效样本, 采用回归分析方法对其总阻值测试数据进行分析, 得到其伪失效寿命估计, 见表 3。从中可见, 采用式(1)给出的模型对各个样本的总阻值变化率数据进行拟合, 相关系数基本在 0.9 以上, 均不低于 0.85。而各样本退化轨迹拟合所用的数据量最小值为 54, 回归效果显著, 表明式(1)能够很好地描述导电膜电阻总阻值变化率的退化规律。

表3 加速退化试验未失效样本的伪寿命估计

试样编号 j	温度 $T_i/^\circ\text{C}$	数据量 n	\hat{a}	\hat{b}	相关系数 r	伪寿命估计 \hat{t}_{ij}/h
1	60	73	-5.889 3	0.311 6	0.936 7	99 771.549
2		81	-7.066 1	0.498 1	0.923 5	14 233.742
3		60	-6.631 8	0.398 9	0.946 7	51 682.923
4		67	-6.101 0	0.342 8	0.946 0	64 897.015
5		67	-7.325 4	0.475 0	0.868 6	39 118.359
6		67	-6.173 2	0.347 5	0.871 3	68 765.687
7		55	-6.420 2	0.371 3	0.929 0	65 494.735
8		54	-6.247 3	0.330 8	0.902 0	150 960.425
1	85	86	-5.651 8	0.345 6	0.964 4	16 171.656
2		85	-4.900 9	0.261 7	0.976 0	20 508.631
3		86	-5.349 2	0.316 3	0.963 6	15 245.537
4		85	-5.198 2	0.291 1	0.962 0	20 892.561
5		85	-5.496 8	0.329 6	0.962 1	16 174.416
1	110	164	-4.132 8	0.314 2	0.973 6	338.661
2		157	-4.489 2	0.359 1	0.985 0	441.048
1	140	58	-5.264 5	0.795 4	0.988 1	41.422
2		58	-4.916 8	0.716 5	0.994 9	38.420

4.2 导电膜电阻加速退化模型验证

本文用 60 ℃下样本 6~8 用于加速退化模型的验证。采用 140 ℃、110 ℃ 和 85 ℃下全部样本以及 60 ℃下样本 1~5 的伪失效寿命数据进行分析, 得到回归方程:

$$\tilde{y} = 1053.645 - 44874.175x_1 - 156.322x_2 \quad (21)$$

方差 σ^2 的估计为 0.611 4, 相关系数 r 为 $\sqrt{0.9541} = 0.9768$, 根据式(21)得到 60 ℃下的失效寿命估计结果见表 4。

表4 60 ℃下的失效寿命估计结果 h

点估计值	75%的置信下限	75%的置信上限
56 765.9	20 436.1	157 679.9

60 ℃下用于加速模型验证的样本 6~8 的伪失效寿命均落入上述置信区间^[19-20]内, 可见所选用的加速模型能够较好地反映温度对加速退化过程的加速作用。

4.3 导电膜电阻贮存寿命预测

采用所有样本的伪失效寿命数据进行分析, 得到回归方程为:

$$\tilde{y} = 941.445 - 38645.040x_1 - 140.197x_2 \quad (22)$$

方差 σ^2 的估计为 0.554 1, 相关系数 r 为 $\sqrt{0.9650} = 0.9824$, 根据式(22)到贮存温度 $T^* = 20$ ℃下的贮存寿命 t 的点估计 \hat{t} 及其置信度为 $\gamma = 75\%$ 的单侧置信下限 t_L 见表 5。

表5 20 ℃下的贮存寿命估计结果 a

点估计值	75%的置信下限
61.97	17.85

5 结论

本文通过引入温度因数去除在线测试数据的温漂效应, 在融合在线数据和离线数据进行退化轨迹模型参数辨识, 充分利用了试验获取的有用数据信息, 且模型参数拟合得到的相关系数基本在 0.9 以上。提高了基于数据驱动的寿命建模分析的准确性。

考虑到试验设计的最高加速温度和实际贮存温度之间的跨度较大, 因此用修正 Arrhenius 模型描述该导电膜电阻贮存期与温度之间的加速关系, 通过伪寿命数据对模型参数拟合得到的相关系数为 0.9824, 效果很好。

通过本文方法预测得到该导电膜电阻 20 ℃下的贮存寿命点估计为 61.97 a, 其置信度为 75%的单侧置信下限为 17.85 a, 能够满足 17 a 的贮存要求。本文方法理论正确、案例验证有效, 工程实用性强。

参考文献(References):

- [1] 邓爱民. 高可靠长寿命产品可靠性技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- DENG A M. Research on Reliability Technology of High Reliability and Long Life Product[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 加速退化试验技术综述[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 1002-1007.
- DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. A Comprehensive Review of Accelerated Degradation Testing[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(8): 1002-1007. (in Chinese)
- [3] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究

- [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
- ZHAO J Y. Research on Reliabilitynodeling and Application Based on Performance Degradation Data[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [4] 赵建印, 刘芳, 孙权, 等. 基于性能退化数据的金属化膜电容器可靠性评估[J]. 电子学报, 2006, 33(2):378-361.
- ZHAO J Y, LIU F, SUN Q, et al. Reliability Estimate of Metallized-Film Pulse Capacitor From Degradation data [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 378-361. (in Chinese)
- [5] 赵建印, 孙权, 周径伦, 等. 基于加速退化数据的金属化膜脉冲电容器可靠性分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9):1495-1498.
- ZHAO J Y, SUN Q, ZHOU J L et al. Failure Analysis of Metallized Film Pulse Capacitors Based on Accelerated Degradation Data [J]. High Power Laser And Particle Beams, 2006, 18(9):1495-1498. (in Chinese)
- [6] 赵建印, 彭宝华, 孙权, 等. 金属化膜脉冲电容器退化失效分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(3):62-64.
- ZHAO J Y, PENG B H, SUN Q, et al. Degradation Failure Analysis of Metallized Film Pulse Capacitors [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3):62-64. (in Chinese)
- [7] 赵建印, 刘芳, 奚文骏, 等. 加速退化试验下金属化膜脉冲电容器可靠性评估[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6):1701-1704.
- ZHAO J Y, LIU F, XI W J, et al. Reliability Assessment for Metallized Film Pulse Capacitors with Accelerated Degradation Test [J]. High Power Laser And Particle Beams, 2011, 23(6):1701-1704. (in Chinese)
- [8] 刘芳, 赵建印, 彭绍雄. 基于参数回归分析的金属化膜脉冲电容器竞争失效分析[J]. 电子器件, 2011, 34(2): 137-140.
- LIU F, ZHAO J Y, PENG S X. Reliability Analysis of Metallized Film Pulse Capacitors under Competing Failure Modes Based on Regression Analysis [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2011, 34(2): 137-140. (in Chinese)
- [9] 赵建印, 刘芳. 加速退化失效产品可靠性评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10):1669-1671.
- ZHAO J Y, LIU F. Reliability Assessment from Accelerated Performance Degradation Tests[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40 (10): 1669-1671. (in Chinese)
- [10] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3):546-552.
- DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27 (3): 546-552. (in Chinese)
- [11] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于加速退化数据的可靠性评估[J]. 弹箭与制导学报, 2006, (S8):808-815.
- DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability Assessment Based on Accelerated Degradation Data [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006(S8):808-815. (in Chinese)
- [12] CRK V. Component and System Reliability Assessment from Degradation Data[D]. Tucson: University of Arizona, 1998.
- [13] CRK V. Reliability Assessment from Degradation Data [C]. //Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000.
- [14] LU J C, PANTULA S G. A Repeated-Measurements Model for Over-Stressed Degradation Data[R]. Raleigh: University of North Carolina State, 1989.
- [15] HUANG W, DIETRICH D L. An Alternative Degradation Reliability Modeling Approach Using Maximum Likelihood estimation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 310-317.
- [16] 柏任流, 董泽华, 郭兴蓬, 等. 基于温度补偿的电阻探针腐蚀监测原理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(5):338-341.
- BAI R L, DONG Z H, GUO X P, et al. Study on Principle of Electrical Resistance Probe Based on Temperature Compensation for Corrosion Monitoring[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19 (5):338-341. (in Chinese)
- [17] 傅惠明, 岳晓蕊. 混合数据回归分析方法[J]. 机械强度, 2010, 32(6):922-927.
- FU H M, YUE X R. Regression Analysis Method for Mixed Data [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(6):922-927. (in Chinese)
- [18] 傅惠明, 吴琼. 双方差回归分析方法[J]. 机械强度, 2011, 33(1):77-81.
- FU H M, WU Q. Two-Variance Regression Analysis Method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33 (1):77-81. (in Chinese)
- [19] 许丹, 陈志军, 王前程, 等. 基于空间相似性和波动阈值的退化模型一致性检验方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(2):455-459.
- XU D, CHEN Z J, WANG Q C, et al. A Method of Consistency Check of Degradation Model Based on the Spatial Similarity and Fluctuation Threshold[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37 (2): 455-459. (in Chinese)
- [20] 陈志军, 许丹, 陈云霞, 等. 基于概率与物理特征相结合的退化模型一致检验方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(26):159-163,175.
- CHEN Z J, XU D, CHEN Y X, et al. A Method for Testing the Consistency of Degradation Model Based on a Combination of Probability and Physical Characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(26):159-163,175. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)