

# 加速退化试验技术研究、应用与发展

郑德强, 张正平, 李海波, 吴建国, 徐静

(北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 长寿命、高可靠性已经成为工业领域产品的发展目标和要求,对传统的可靠性技术研究提出了新的挑战。加速退化试验技术为长寿命、高可靠产品的寿命和可靠性研究提供了一种有效的途径,成为目前研究的热点。在总结国内外的研究成果的基础上,对加速退化试验的研究背景、试验方法、加速退化模型、工程应用和优化设计等进行了综述和研究,最后分析了加速退化试验的研究现状并展望了后续的研究方向。

**关键词:** 寿命评估; 可靠性鉴定; 加速退化试验; 加速退化模型; 工程应用; 优化设计

**中图分类号:** TB114; V443      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)02-0100-05

## Research, Application and Development of Accelerated Degradation Test Technology

ZHENG De-qiang, ZHANG Zheng-ping, LI Hai-bo, WU Jian-guo, XU Jing

(Key Laboratory of National Defense Technology for Reliability and Environmental Engineering Technology, Beijing Institute of Structure and Environmental Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Long-lifespan and high-reliability has become the development goal and requirement of industrial products, which brings forwards a new challenge to traditional reliability technologies. Accelerated degradation test technology is an effective approach to evaluate the life and reliability of long-lifespan and high-reliability equipment, and becomes a hot spot of research. Based on analysis of domestic and abroad research achievements, the demand background, testing methods, accelerated degradation models, engineering applications and optimization of accelerated degradation testing were summarized and studied. The main research problems of accelerated degradation test were analyzed and the future development direction was prospected.

**Key words:** life evaluation; reliability assessment; accelerated degradation test; accelerated degradation model; engineering application; optimization and design

### 1 加速退化试验方法

随着科技的发展和工艺水平的提高,航空航天、

船舶和电子等工业领域出现了许多长寿命、高可靠的产品,对于许多由性能退化引起失效的长寿命、高可靠性产品,性能退化失效分析对产品寿命和可靠性的研究提供了新的方法,在长寿命、高可靠产品性

收稿日期: 2010-12-15

作者简介: 郑德强(1982—),男,山东潍坊人,硕士,工程师,主要从事可靠性和加速试验技术研究。

能退化比较缓慢的情况下,加速退化试验方法为产品寿命和可靠性验证、评估提供了一种有效途径<sup>[1-4]</sup>。加速退化试验方法在不改变产品失效机理的前提下,通过加大产品的敏感应力(如热应力、电应力或机械应力等)加快产品的性能退化,利用高应力水平下的性能退化数据,外推正常使用应力下产品的寿命和可靠性。20世纪80年代,Nelson最早对加速退化试验进行了研究,分析了绝缘材料的温度加速退化试验数据,获得了绝缘材料正常应力下的使用寿命<sup>[1]</sup>。多年来,Nelson,Meeker,Escobar和Tseng等在加速退化试验理论和应用方面进行了许多研究<sup>[1,2,5-11]</sup>。从20世纪90年代开始,国内在加速退化试验方面取得了一定的研究成果<sup>[3-4,12-13]</sup>。

进行加速退化试验前,要识别出能够表征产品功能退化和可靠性下降的性能值,以及引起产品发生性能退化的主要影响应力,如温度、电压或机械力等,进行该应力的加速退化试验。产品在使用过程中由性能值上升或下降造成的失效,都称为产品的性能退化。产品发生退化失效时的性能值标准,称为产品的失效阈值,失效阈值有绝对失效和相对失效2种标准形式<sup>[4]</sup>。

目前加速退化试验方法的研究主要有2种:恒定加速退化试验方法和步进加速退化试验方法。恒定加速退化试验为将试验产品分组,每组产品在某个确定加速应力水平下进行试验,直至试验结束。步进加速退化试验为全部试验产品依次在不断增大的加速应力水平下进行试验,直到所有应力的试验结束。试验中在固定时间间隔对产品的性能值进行测量,性能值的测量通常分为破坏性测量和非破坏性测量<sup>[1,3]</sup>。恒定加速退化试验实施和数据分析方法较简单,研究成果较多<sup>[1-8]</sup>;步进加速退化试验实施和数据分析方法较复杂,研究相对较少<sup>[9,12]</sup>。

## 2 加速退化试验数据分析方法

加速退化试验数据分析一般都基于如下的假定<sup>[1,7]</sup>:

- 1) 各加速应力水平下,产品的失效机理和失效模式不变;
- 2) 产品存在有规律的性能退化过程,且性能值的退化不可逆;
- 3) 各应力水平下,产品的退化过程服从同族的

过程。

加速退化模型是表明产品性能值(性能退化值)与试验时间的数学关系,以及性能值的特征值如平均值、对数均值等与加速应力之间的数学关系<sup>[4]</sup>。根据统计学概念,目前研究的加速退化试验模型主要分为参数模型、半参数模型、非参数模型和寿命数据模型,其中参数模型分析简单,应用比较广泛。加速退化模型参数估计方法主要有最大似然估计法、最小二乘法、矩估计法、偏似然估计法和核估计方法等。

### 2.1 参数模型分析方法

参数模型分析方法是建立产品性能值与时间的统计分析模型,主要有退化轨道和随机过程2种形式。退化轨道模型包括线性退化、幂律退化和指数退化等退化参数模型<sup>[1,4]</sup>,随机过程一般假定为Brown运动<sup>[12-13]</sup>等。性能值的特征值与应力之间一般假设为Arrhenius模型、逆幂律模型或Eyring模型<sup>[1,4]</sup>。

#### 2.1.1 退化轨道分析方法

假定在时刻 $t$ 时产品的性能值 $x(t)$ 是单调下降或单调上升的随机变量,一般假定服从正态分布、对数正态分布或Weibull分布,如图1所示。

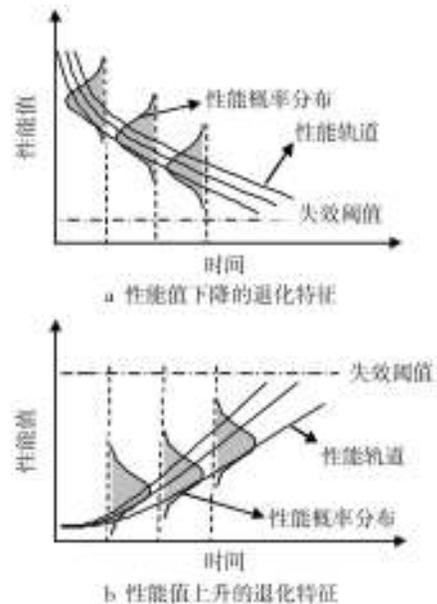


图1 产品性能值退化特征

Fig. 1 Characteristics of product performance degradation

根据退化失效定义,产品的寿命分布可以通过产品性能值的概率分布、失效阈值和性能退化轨道外推求得。

### 2.1.1.1 线性退化模型分析方法

线性退化模型一般假定性能值的特征值  $u(t)$  与时间  $t$  的关系式为:

$$u(t) = a - bt \tag{1}$$

式中:  $u(t)$  一般为性能值的均值、对数均值或 Weibull 分布尺度参数值;  $a$  为常数, 与加速应力无关;  $b$  为加速应力的函数, 函数关系一般假设为 Arrhenius 模型、逆幂律模型或 Eyring 模型等。

Nelson 利用性能值服从对数正态分布的线性退化模型对某绝缘材料的加速退化试验数据进行了统计分析<sup>[1]</sup>。Eghbali 利用 Weibull 分布的线性退化模型对某胶片的加速退化试验数据进行了统计分析<sup>[10]</sup>。

常用的一种线性退化模型称为随机系数模型, 性能值  $x(t)$  与试验时间  $t$  的关系为:

$$x(t) = c - dt \tag{2}$$

式中:  $c, d$  是服从二维正态分布的随机变量, 且相互独立。

Lu 和 Meeker 等对随机系数线性退化模型进行了研究<sup>[5]</sup>。庄东辰对加速退化试验数据的随机系数模型进行了研究, 提出了随机截距模型和随机斜率模型<sup>[3]</sup>。赵建印等利用正态分布随机系数法对某电容器加速退化试验数据进行了分析<sup>[4]</sup>。

### 2.1.1.2 指数退化模型分析方法

指数退化模型一般假定性能值的特征值  $u(t)$  与时间  $t$  的关系式为:

$$u(t) = a \exp(bt) \tag{3}$$

式中:  $a$  为常数, 与加速应力无关;  $b$  为加速应力  $S$  的函数。

Carey 和 Koenig 进行海底电缆组件加速退化试验数据分析时<sup>[6]</sup>, Meeker 和 Lu 进行印制电路板加速退化试验数据分析时<sup>[7-8]</sup>, Tseng 进行发光二极管加速退化试验数据分析时<sup>[9]</sup>, 都应用了指数退化模型。

### 2.1.1.3 幂律退化模型分析方法

幂律退化模型一般假定性能值的特征值  $u(t)$  与时间  $t$  的关系式为:

$$u(t) = at^b \tag{4}$$

式中:  $b$  为常数, 与加速应力无关;  $a$  为加速应力  $S$  的函数。

Wang 在利用幂律退化模型对感应电动机进行了加速退化试验的数据分析时, 假定性能值服从的 Weibull 分布尺度参数  $\eta$  与应力  $S$  和时间  $t$  的关系式

为  $\eta = aS^b t^{111}$ 。

### 2.1.1.4 Weibull退化模型分析方法

Weibull 退化模型是假定性能值的特征值  $u(t)$  与时间  $t$  的关系式为:

$$u(t) = \alpha \cdot \exp[-(t/\beta)^\gamma] + \delta \tag{5}$$

式中:  $\alpha, \gamma$  为常数;  $\beta$  为加速应力的函数。Tseng 在对发光二极管步进加速退化试验数据进行分析时, 使用了简单的 Weibull 退化模型<sup>[9]</sup>:

$$u(t) = \exp(-\beta t^\alpha) \tag{6}$$

式中:  $\alpha$  为常数;  $\beta$  与加速应力的关系假定符合 Arrhenius 模型。

### 2.1.2 Brown 运动分析方法

Brown 运动的分析方法假定性能值  $\{x(t); t \geq 0\}$  是一个随机过程, 表达式为:

$$x(t) = x_0 + \sigma B(t) + \mu(t - t_0) \tag{7}$$

式中:  $x_0$  为初始时刻产品的性能值;  $B(t)$  为标准的 Brown 运动;  $\mu$  为漂移系数, 与加速应力有关;  $\sigma$  为扩散系数, 与加速应力无关。

李晓阳利用 Brown 运动的分析方法, 对导引头微波电子产品步进加速退化试验数据进行了研究<sup>[12]</sup>。赵建印对某电容器加速退化试验数据进行分析时<sup>[13]</sup>, 利用了式(7)的简单形式:

$$x(t) = \mu t + \omega(t) \tag{8}$$

式中:  $\omega(t)$  为 Brown 运动;  $\mu$  为电压的幂律函数; 扩散系数  $\sigma$  为 1。

### 2.2 半参数模型分析方法

加速退化试验数据的半参数模型分析方法提出了一种比例危险率退化模型(Proportional Degradation Hazard Model, 简称 PHDM), 数学表达式为:

$$\lambda(x; t, S) = \lambda_0(x; t) \exp(\beta S) \tag{9}$$

式中:  $\lambda(x; t, S)$  为危险率函数;  $S$  为加速应力;  $\lambda_0(x; t)$  为基准危险率函数, 一般可假设为非参数形式;  $\beta$  为未知参数。

Eghbali 对 PHDM 模型进行了深入研究, 并利用该模型对发光二极管的加速退化试验数据进行了统计分析<sup>[10]</sup>。

### 2.3 非参数模型分析方法

加速退化试验数据的非参数模型分析方法是假定产品的性能退化值为非参数型的随机过程, 称为

时间尺度(time-scale)模型<sup>[14]</sup>,表达式为:

$$x_{ij}(t) = \mu_m(a_i t) + W_{ij}(t) \quad (10)$$

式中: $x_{ij}(t)$ 为第*i*( $i=1, 2, \dots, m$ )个加速应力下第*j*( $j=1, 2, \dots, n_i$ )个产品性能值的均值; $\mu_m(t)$ 是第*m*个加速应力下产品性能值的均值; $a_i$ 为第*i*个加速应力的加速因子尺度因子; $W_{ij}(t)$ 是均值为0的随机过程。

时间尺度模型的一个特殊形式为比例磨损模型,该模型的数学表达式为<sup>[15]</sup>:

$$x_{ij}(t) = a_i \mu_m(t) + W_{ij}(t) \quad (11)$$

Shiau 和 Ebrahem 分别利用时间尺度模型和比例磨损模型对发光二极管和金属磨损的加速退化试验数据进行了分析<sup>[14-15]</sup>。

### 2.4 寿命模型分析方法

加速退化试验数据的寿命模型分析是一种参数模型的分析方法,一般假定产品的性能值 $x_i(t)$ 与时间*t*的关系有3种:

$$x_i(t) = a_i + b_i t + \varepsilon_i \quad (12)$$

$$\ln x_i(t) = \bar{a}_i + \bar{b}_i t + \bar{\varepsilon}_i \quad (13)$$

$$\ln x_i(t) = \bar{a}_i + \bar{b}_i \ln t + \bar{\varepsilon}_i \quad (14)$$

式中: $a_i, b_i, \bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{\varepsilon}_i, \bar{\varepsilon}_i$ 为未知参数; $\varepsilon_i, \bar{\varepsilon}_i, \bar{\varepsilon}_i$ 为随机误差项。

从式(12)一式(14)中选择线性相关性最好的模型作为性能退化模型,利用线性最小二乘法和产品失效阈值,外推得到产品达到失效阈值的期望时间,称该时间为产品的伪失效寿命<sup>[16]</sup>,利用加速寿命试验数据的统计分析方法外推产品正常应力下的寿命和可靠性,邓爱民和 Chan 对该方法进行了研究<sup>[16-17]</sup>。

### 3 加速退化试验的工程应用

加速退化试验的工程应用主要集中在材料、发光二极管、电容、电源单元、集成逻辑系列、电源板和感应电动机等产品,试验方法为恒定和步进加速退化试验,试验应力主要包括温度、电流(电压)和机械应力等,部分实例见表1。

### 4 加速退化试验优化设计

加速退化试验优化设计主要是基于试验费用和统计分析精度等约束条件进行最优解计算。Tang 和

表1 加速退化试验工程应用部分实例

Table 1 Some engineering application examples of accelerated degradation test

序号	试验产品	试验方法性能参数	分析模型	研究结论	参考文献
1	绝缘材料	温度、恒定 击穿电压	指数退化模型 Arrhenius 加速模型	150 °C 下平均寿命为 600 a	[1]
2	集成逻辑系列	温度、恒定 最大传播延迟	指数退化模型 Arrhenius 加速模型	40 °C 下置信水平为 0.95 的传播延迟 变化量在 25 a 内最大不超过 2 ns	[6]
3	发光二极管	温度、步进 光密度	Weibull 退化模型 Arrhenius 加速模型	25 °C 下平均寿命为 27 200 h	[9]
4	感应电动机	负载力、恒定 轴心轨迹面积	幂律退化模型 逆幂律加速模型	偏心载荷为 0.1 盎司英寸工作下平 均寿命为 22 a	[11]
5	发光二极管	温度、恒定 标准光度	非参数尺度模型 局部线性回归	20 °C 下平均寿命为 5.96 a	[14]
6	电源单元	温度和电压 恒定 直流输出电压	线性退化模型 Eyring 加速模型	20 °C 和 120 V 下置信水平为 0.9, 可 靠性为 0.8 的平均寿命下限为 128 d	[18]
7	导引头微波 电子产品	温度、步进 功率增益	Brown 运动 Arrhenius 加速模型	自然贮存 8 a 的可靠性为 0.863	[12]
8	脉冲电容	电压、恒定 电容值	线性退化模型 逆幂律加速模型	23 kV 下进行 2 万次充放电的可靠性 为 0.972 4	[13]
9	雷达电源板	温度、恒定 电压输出值	线性退化模型 Arrhenius 加速模型	25 °C 下平均寿命估计为 $1.5 \times 10^6$ h	[19]

Yang基于 $p$ 阶分位寿命估计相对均方差和试验费用等约束条件下,对步进加速退化试验的优化设计进行了研究,给出了样本数、测试数的最优值计算方法,并对发光二极管的两应力步进加速退化试验进行了优化设计<sup>[20]</sup>。Liao和Tseng等基于试验研究经费一定和中位寿命估计标准差估计等约束条件,利用搜索算法得到样本数、测量频率和每个应力下测试次数的最优值,分析了模型参数估计精度对优化设计的敏感度,并对发光二极管的加速退化试验进行了优化设计<sup>[21]</sup>。

## 5 加速退化试验现状与展望

在总结了加速退化试验方法、分析模型、工程应用和优化设计研究成果的基础上,加速退化试验技术研究现状和后续研究展望如下:1)整机级、系统级产品能否进行加速退化试验以及如何进行还有待研究;2)需要进行小样本加速退化试验理论和应用研究;3)研究退化失效和突发失效的竞争失效问题;4)建立更加符合实际工程的简单数学模型,进行多类型性能退化的加速退化试验研究。

### 参考文献:

- [1] NELSON W. Accelerated Testing: Statistical Methods, Test Plans, and Data Analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [2] MEEKER W Q, ESCOBAR L A. Statistical Methods for Reliability Data[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [3] 庄东辰. 退化失效模型及其统计分析[D]. 上海:华东师范大学, 1994.
- [4] 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.
- [5] LU C J, MEEKER W Q. Using Degradation Measures to Estimate a Time-to-failure Distribution[J]. Technometrics, 1993, 35(2): 161—174.
- [6] CAREY M B, KOENIG R H. Reliability Assessment Based on Accelerated Degradation: a Case Study [J]. IEEE Transaction on Reliability, 1991, 40(5): 499—506.
- [7] MEEKER W Q, LU VALLE M J. An Accelerated Life Test Based on Reliability Kinetics [J]. Technometrics, 1995(37): 133—146.
- [8] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU C J. Accelerated Degradation Test: Modeling and Analysis[J]. Technometrics, 1998 (40): 89—99.
- [9] TSENG S T, WEN Z C. Step-stress Accelerated Degradation Analysis for Highly Reliable Products [J]. Journal of Quality Technology, 2000, 32(3): 209—216.
- [10] EGHBALI G. Reliability Estimate using Accelerated Degradation Data[D]. New Brunswick: The State University of New Jersey, 2000.
- [11] WANG W D, DAN D D. Reliability Quantification of Induction Motors—accelerated Degradation Testing Approach [C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Seattle, USA, 2002: 325—331.(余不详)
- [12] 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.
- [13] 赵建印,孙权,周经伦,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.
- [14] SHIAU J J H, LIN H H. Analyzing Accelerated Degradation Data by Nonparametric Regression [J]. IEEE Transaction on Reliability, 1998, 48(2): 149—158.
- [15] EBRAHEM M A H, HIGGINS J J. Non-parametric Analysis of a Proportional Wearout Model for Accelerated Degradation Data [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006 (174): 365—371.
- [16] 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.
- [17] CHAN C K, BOULANGER M, TORTORELLA M. Analysis of Parameter-degradation Data using Life-data Analysis Programs [C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim, USA, 1994: 288—291.(余不详)
- [18] TANG L C, CHANG D S. Reliability Prediction using Non-destructive Accelerated-degradation Data: Case Study on Power Supplies [J]. IEEE Transaction on Reliability, 1995, 44(4): 562—566.
- [19] 王玉明,蔡金燕. 基于板级电路加速退化数据的可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(2): 9—12.
- [20] TANG L C, YANG G Y, XIE M. Planning of Step-stress Accelerated Degradation Test [C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Singapore, Los Angeles, USA, 2004: 287—292.(余不详)
- [21] LIAO C M, TSENG S T. Optimal Design for Step-stress Accelerated Degradation Tests[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2006, 55(1): 59—66.