

文章编号: 1001-0920(2009)09-1281-07

## 基于退化建模的可靠性分析研究现状

陈 亮, 胡昌华

(第二炮兵工程学院 302 教研室, 西安 710025)

**摘 要:** 基于退化数据具有比失效时间数据更多的可靠性信息, 为高可靠、长寿命产品提供了一种有效的可靠性分析方法, 为此对退化建模领域的相关理论与工程实践作了阶段性的总结. 首先介绍了退化建模的概念和发展现状; 接着给出了退化模型与失效时间分布之间的关系; 然后按无应力因子和有应力因子两种情形对退化建模的相关研究进行了概述; 最后简要分析了退化建模领域中的热点问题, 并对下一步的研究进行了展望.

**关键词:** 退化建模; 可靠性预测; 寿命试验; 失效时间; 失效阈值

**中图分类号:** TB114.3      **文献标识码:** A

## Review of reliability analysis methods based on degradation modeling

CHEN Liang, HU Chang-hua

(Unit 302, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China. Correspondent: CHEN Liang, E-mail: upperchen@yahoo.com.cn)

**Abstract:** Degradation data provide an effective method for reliability analysis of high reliability and long life products, which has more information about reliability than time to failure data. A review of theory and engineering application in degradation modeling area is presented. Firstly, the conception and development of degradation modeling are introduced. The relationship between degradation model and time to failure distribution is presented. Then the related researches on degradation modeling with and without stress factors are summarized. Finally, some problems in the area of degradation modeling are analyzed briefly, and the future research is also presented.

**Key words:** Degradation modeling; Reliability prediction; Life test; Time to failure; Failure threshold

### 1 引 言

随着科学技术的发展, 电子工业、航空航天工业等领域出现了大量寿命长、可靠性高的产品. 对于这类高可靠产品, 传统的寿命试验甚至加速寿命试验都很难在相对较短的时间内获得失效时间数据. 高可靠、长寿命产品的失效机理最终能够追溯到产品潜在的性能退化过程, 可以认为性能退化最终导致了产品失效的产生. 因此人们提出了利用产品性能退化数据来估计其可靠性与寿命的思想.

近几年来, 越来越多的工程技术人员和统计工作者, 通过测量某性能参数的退化数据, 对产品的贮存可靠性进行预测, 从而开辟了一条不使用失效数据, 而只使用退化数据分析产品可靠性的新途径. Nelson 等<sup>[1-3]</sup> 提供了退化模型和相关推断方法的回顾.

基于退化建模的可靠性分析主要包括: 退化数据建模、失效准则、联系退化模型与失效时间分布、可靠性分析算法. 为了能够实现正常应力水平下的可靠性分析, 对于加速退化试验, 必须在退化模型中结合应力协变量.

本文首先介绍了退化建模的概念, 并指出退化失效分析的优缺点; 接着给出退化模型与失效时间分布之间的关系; 然后按无应力因子和有应力因子两种情形分析退化建模中的典型模型, 并指出各种建模方法的适用性; 进而讨论退化建模领域的国内外当前热点问题; 最后给出了全文总结并对该领域将来的研究方向进行了展望.

### 2 退化建模的发展及其优缺点

当失效观测量很少或无失效时, 基于退化建模的可靠性分析便成为一种估计高可靠性部件或系统

收稿日期: 2008-10-02; 修回日期: 2009-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736026); 国家教育部新世纪优秀人才支持计划项目.

作者简介: 陈亮(1979—), 男, 浙江富阳人, 工程师, 博士生, 从事控制系统测试与故障诊断、可靠性预测的研究;

胡昌华(1966—), 男, 湖北罗田人, 教授, 博士, 从事故障诊断与测试、容错控制等研究.

可靠性的有效方法.当重要性能参数逐渐退化到一个临界阈值水平时,系统及其部件被定义为退化失效.退化建模是基于失效机理退化轨迹的概率建模,投影分布对预定失效阈值进行比较<sup>[4]</sup>.

从20世纪70年代起,国外就陆续开始了退化模型方面的研究. Gertsbackh 等<sup>[5]</sup>首次指出了用性能退化数据评定产品可靠性的价值,并提出一种斜率和截距均为随机参数的简单线性模型.姚增起<sup>[6]</sup>研究了系统退化和系统可靠性的相关问题,指出系统退化以及利用退化的观点来研究系统可靠性是一个新课题,它可能会为系统可靠性研究开辟一条新的途径. Meeker 等<sup>[7]</sup>在研究高可靠产品的可靠性问题时也指出,退化失效分析可解决目前传统可靠性理论与工程应用的不适应问题. Nikulin 等<sup>[8]</sup>分析了常用的加速试验模型和退化模型.总之,退化建模在过去的30年得到了工程师、统计学家和生产设计人员的普遍重视和不断发展.

退化建模一个最重要的优点是能够记录总体中每个个体单元的多重退化量,因此不需等到出现失效来获取数据和分析数据.与传统的寿命试验相比,退化试验将产生更多有用的数据.对于高可靠、长寿命部件或系统,退化建模或许是唯一可行的方法.

利用性能退化数据进行可靠性分析的优点可以简单归纳如下:

- 1) 在期望是无失效或极少失效的应用中,退化数据能够比传统的截尾失效时间数据提供更多的可靠性信息;
- 2) 退化过程的直接观测将允许对引起失效机理的直接建模,为可靠性统计推断提供更可信和精确的估计值和坚实基础;
- 3) 退化是一些试验的自然响应,退化数据能够提供更好的退化过程信息,进而帮助找到合适的函数关系式;
- 4) 退化数据能够在失效时间之前更早地被分析;
- 5) 与失效时间数据相比,退化数据建模更加贴近于失效物理,推断将更加有效和可信.

然而,上述优点有一个潜在的前提,即退化量的获取是非破坏性的.实际上,一个单元的退化量常常要求破坏性的测量或具有改变退化过程的潜在分裂性量.当退化量被大量测量误差污染或与失效不是紧密相关时,退化数据的优点就会打折扣.因此,退化失效分析除了上面提到的优点,还存在一些不足:

- 1) 部件或子系统性能输出的退化建模将是有效的,但因为输出可能受到多个未知的物理(化学)过程的影响,建模可能更加复杂;

- 2) 退化数据可能很难或无法获取;
- 3) 获取退化数据可能影响产品将来的退化;
- 4) 测量误差可能消除退化数据中的信息;
- 5) 退化水平可能与失效关联不紧密.

### 3 退化模型与失效时间分布

部件失效与退化量之间的精确关系使得能够利用退化模型和数据对失效时间进行推断和预测.建立退化量  $X(t)$  与失效时间分布和可靠性函数  $R(t)$  之间的联系需要两个条件:描述潜在退化现象的模型和阈值水平  $D$ .已知阈值水平  $D$ ,退化越严重,性能越差,失效时间  $T$  可定义为

$$T = \inf_t \{t | X(t) > D\}, \quad (1)$$

通过退化率可表示为

$$T = \inf_t \left\{ t \mid X_0 + \int_0^t (\cdot) d > D \right\}. \quad (2)$$

根据不同的可靠性特征,可以用下列两种不同的方法定义单元的可靠性:

- 1) 对于单调递增退化过程,即对于任意  $t > T$  或  $P(\cdot > 0) = 1$ ,有  $P\{X(t) > D; t > T\} = 1$ .对于任意  $\tau > 0$ ,  $t$  时刻的可靠性函数为

$$R(t) = P(T > t) = P\{X(t) < D\}, \quad (3)$$

或

$$R(t) = P(T > t) = P\left\{ X_0 + \int_0^t (\cdot) d < D \right\}. \quad (4)$$

- 2) 对于非单调递增退化过程,即对于任意  $t > T$  或  $p(\cdot > 0) < 1$ ,有  $P\{X(t) > D; t > T\} < 1$ .对于任意  $\tau > 0$ ,  $t$  时刻的可靠性函数为

$$R(t) = P(T > t) = P\left( \sup_{[0,t]} \{X(t)\} < D \right) = P\left[ \sup_{[0,t]} \{X(t)\} < D \right] \cdot P\left[ X(t) < D \ \& \ \sup_{[0,t]} \{X(t)\} > D \right], \quad (5)$$

或

$$R(t) = P(T > t) = P\left( \sup_{[0,t]} \left\{ X_0 + \int_0^t (u) du \right\} < D \right) = P\left[ \sup_{[0,t]} \left\{ X_0 + \int_0^t (u) du \right\} < D \right] \cdot P\left[ X_0 + \int_0^t (\cdot) d < D \ \& \ \sup_{[0,t]} \left\{ X_0 + \int_0^t (\cdot) d \right\} > D \right]. \quad (6)$$

这两种方式均具有鲜明的差异,然而为了简便,式(3)和(4)在某些情形中近似于式(5)和(6).在本文中,不失一般性,假设潜在的退化过程是单调递增的,采用式(3)和(4)定义退化相关的可靠性.

### 4 典型的退化模型

现有的退化模型可分为正常退化模型和加速退化试验 (ADT) 模型两类:正常退化模型运用正常工作条件下获得的退化数据来估计可靠性;而 ADT 模型则利用加速时间或应力条件下获得的退化数据对正常条件下的可靠性作推断。

#### 4.1 正常退化模型

正常退化模型可分为两类:参数模型和非参数模型.在参数模型中,退化轨迹形式或退化量分布是被指定的;在非参数模型和退化估计中是未指定或部分指定的。

##### 4.1.1 参数正常退化模型

退化现象本质上是一种随机过程,它可以以多种方式模拟.例如,真实退化在时间上的观测定义了一组样本函数(退化轨迹);另一方面,真实退化量或退化率在具体时刻是一个随机变量.通常,现有参数正常退化模型利用下列方法估计可靠性:1) 退化轨迹法;2) 时间相关参数分布法;3) 具有独立增量的随机过程法.退化轨迹法利用具有随机系数的回归模型拟合退化观测;时间相关参数分布法利用具有时间相关参数的具体分布拟合每个观测时刻的退化量;具有独立增量的随机过程法模拟相邻退化量之间的增量并用参数分布拟合它们。

简单的线性回归模型和非线性回归模型常常用于退化轨迹建模中.线性退化出现在一些简单的磨损过程中,在一些工程应用中,退化量  $X(t)$  可以用经过简单变换后的线性时间函数表示.在线性回归模型中,最简单的模型是假设模型的截距为常数. Lu 等<sup>[9]</sup> 提出一种具有随机截距和斜率的线性退化轨迹模型,截距和斜率服从正态分布且相关.而对于重复的退化数据,包含一个具有非常值标准差的误差项.而退化轨迹常常是非线性时间函数,有时线性化是不可行的,因此发展了非线性回归方法. Lu 等<sup>[10]</sup> 提出了一般非线性混合效应模型和两步法来估计模型参数,模型参数服从多元正态分布,还提出参数 Bootstrap 法来获取失效时间分布的点置信区间. Wu 等<sup>[11]</sup> 研究了退化量在非线性混合效应模型下的最小二乘估计的渐近特性。

在一般非线性混合效应模型中,第  $i$  个单元在  $t_j$  时刻的样本轨迹为

$$y_{ij} = x_{ij} + \epsilon_{ij} = x(t_{ij}; \phi, \alpha_i) + \epsilon_{ij}.$$

其中  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m_i; x_{ij}$  是第  $i$  个单元在  $t_j$  时刻的真实轨迹,  $y_{ij}$  是其测量值;  $\phi$  是固定影响参数向量;  $\alpha_i$  是从具有参数  $\alpha$  的总体选择第  $i$  个单元的随机影响参数向量,服从多元正态分布  $MVN(\mu, \Sigma)$ ;  $\epsilon_{ij}$  是独立同分布的测量误差,服从具

有常值方差  $\sigma^2$  的正态分布  $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $\alpha_i$  与  $\epsilon_{ij}$  独立;  $n$  是单元的数量,  $m_i$  是第  $i$  个单元的总测量次数. 给定阈值水平  $D$ , 失效时间分布定义为

$$P(T < t) = F_T(t; \phi, \alpha, D, X) = 1 - P(X(t) < D).$$

利用两步法可以估计模型参数  $\phi$  和  $\alpha$ . 将估计的参数  $\hat{\phi}, \hat{\alpha}$  和  $\hat{\alpha}$  代入失效时间分布  $F_T(t) = F_T(t; \hat{\phi}, \hat{\alpha}, D, X)$  中,得到  $F_T(t)$  的封闭形式估计. 如果无法获取  $F_T(t)$  的封闭形式表达式, 则可以利用 Monte Carlo 仿真法。

变换的似然比检验可以用于估计失效时间分布  $F_T(t)$  的置信区间, 且当  $F_T(t)$  的形式已知且样本容量较大时, 常常使用  $F_T(t)$  的渐近正态近似. 如果  $F_T(t)$  没有封闭形式表达式, 则参数 Bootstrap 法可以作为一种替代方法。

退化轨迹模型的基本思路是限制退化过程的样本空间, 并假设所有样本函数容许相同的函数形式, 但具有不同的参数. 然而, 一些样本退化轨迹与其他轨迹不一致, 这可能是由个体单元中的固有可变性所引起的, 因此该假设是有限制性的. 基于最优模糊聚类, Wu 等<sup>[12]</sup> 估计模型参数时, 对特殊单元为“野值”的情况分配更小的权值. 该方法较两步法为失效时间分布提供了更加紧密的置信区间。

时间相关参数分布法的出现是因为退化量是随机变量, 其分布是时间函数. 在该方法中, 必须采集某一时刻的多重退化数据, 并将其处理为无方向的散布点。

假设  $t$  时刻的退化量服从双参数威布尔分布, 具有常值形状参数  $b$  和时间相关尺度参数  $a$ , 即

$$f(t) = b \exp(-at)^{b-1},$$

其中  $a$  和  $b$  是常数. 然后, 对于一个给定的阈值水平  $D$ , 可靠性函数为

$$R(t) = P(T > t) = P(X(t) > D) = \exp\left(\frac{-D}{b \exp(-at)}\right).$$

Yang 等<sup>[13]</sup> 基于具有时间相关参数的正态分布模拟退化数据, 并用回归分析估计模型参数. Zuo 等<sup>[14]</sup> 拓展此思路到具有一般分布的过程, 并对具有各种不同数据格式的情形发展了其他方法。

作为一般性方法, 时间相关参数分布法能够灵活地用于估计可靠性而不需对退化轨迹作假设. 然而, 此方法忽略了退化数据的方向性, 且要求多重测量, 不适合于预测个体单元的剩余寿命。

具有独立增量的随机过程模型分为两类: 累积损伤模型和连续时间模型. 前者描述了受到离散应力的退化过程的累积损伤理论, 有时需假设过程的



状态是离散的. 此模型将损伤增量及它们的到达时间区间或增量在一个时间区间中的出现概率作为建模对象. 后者适用于模拟显示出可变性的连续退化过程.

产品的退化是由老化和 / 或持久应力所引起的. 在基于应力持久性的模型中, 著名的有累积损伤 (CD) 模型. 最早的 CD 模型是确定性的, 而目前的 CD 模型是概率模型, 例如复合泊松过程. 到  $t$  时刻为止的累积损伤  $X(t)$  定义为

$$X(t) = \sum_{i=0}^{N(t)} Z_i. \quad (7)$$

其中:  $N(t)$  记录了时间区间  $[0, t]$  中损伤增量的数量;  $Z_i$  是在该区间中的第  $i$  个损伤增量, 通常是一个独立同分布的随机变量, 具有累积分布函数  $F(z)$ . 由于累积损伤为一个递增的随机过程, 相应的可靠性函数服从式 (3) 或 (4), 给定失效阈值水平  $D$ , 可按式计算可靠性函数:

$$R(t) = P\left(\sum_{i=0}^{N(t)} Z_i \leq D\right) = \sum_{k=0}^{N(t)} P(N(t) = k) \tilde{F}_k(D), \quad (8)$$

其中  $\tilde{F}_k(z) = P(Z_1 + \dots + Z_k \leq z)$  表示  $Z_1, \dots, Z_k$  的卷积分布.

基于广义模型 (8), 关于  $N(t)$  和  $F(z)$  的不同分布假设, 可以得到不同的 CD 模型, 一些相关的发展可以参考文献 [15].

在某些应用中, 当单元  $i$  老化时, 由应力暴露引起的累积随机增量自然地建立了退化轨迹. 在此情形中, 整个母体的退化轨迹不需要具有相同的函数形式, 因此, CD 模型比退化轨迹法更加合适和灵活, 有助于现场应力条件下的退化过程建模.

布朗运动和 Gamma 过程与 CD 模型不同, 经常用于描述连续的退化, 通过将每个退化轨迹看成潜在的连续时间随机过程, 实现连续时间模型. 特别地, 标准布朗运动  $W(t)$  定义为具有如下性质的随机过程 [3]:

$$1) W(0) = 0, W(t) \sim N(0, t).$$

2)  $\{W(t), t \geq 0\}$  是一个具有平稳独立增量的连续过程, 即对于任意非重叠的时间区间  $(t_i, t_i + \tau_i)$  和  $(t_j, t_j + \tau_j)$ , 随机变量  $W(t_i + \tau_i) - W(t_i)$  与  $W(t_j + \tau_j) - W(t_j)$  独立正态分布.

3) 对于任意  $t > 0$ ,  $W(t)$  服从正态分布, 具有零均值和方差  $t$ .

当退化量显示出连续性和独立增量特性时, 布朗运动模型是一种合适的选择. 将布朗运动引入到退化模型的最常用方法是, 假设布朗运动对退化过

程具有一个可加性效应, 即

$$X(t) = X_0 + a(t) + W(t). \quad (9)$$

其中:  $X_0$  是初始退化值,  $a(t)$  是漂移项,  $\sigma^2$  是常值扩散参数. 由于每个增量不必为正, 相应的可靠性函数定义为式 (5) 或 (6) 的形式. 模型 (9) 的线性形式已在可靠性领域中得到了广泛研究.

#### 4.1.2 非参数正常退化模型

利用非参数回归技术模拟退化轨迹, 无需假设其形式是直观的. 然而, 由于非参数回归的局部化特性使得长期外推是不合适的, 这限制了非参数回归退化模型的发展. 一种替换方法是以非参数形式利用时间相关参数分布法. Eghbali [16] 提出了一种基于此概念的退化危害法, 该方法放宽了选择退化轨迹形式的要求, 并容易被扩展到 ADT 模型.

假设退化量  $X(t)$  在  $t$  时刻的分布具有概率密度函数  $f(x; t)$  和累积分布函数  $F(x; t)$ ,  $t$  时刻的退化危害函数为

$$s(x; t) = \frac{f(x; t)}{1 - F(x; t)}.$$

根据观测可以计算它的值为

$$s(x; t) = \frac{f(x; t)}{1 - F(x; t)} = \frac{f(x; t) \cdot x}{(1 - F(x; t)) \cdot x} = \frac{P(x < X < x + \Delta x)}{P(X > x) \cdot \Delta x} = \frac{n(x; t)}{m(x; t) \cdot \Delta x}.$$

其中:  $n(x; t)$  是  $t$  时刻退化量  $X$  在区间  $[x, x + \Delta x]$  中的试验单元数,  $m(x; t)$  是  $t$  时刻退化量  $X$  超过  $x$  的试验单元数.

退化危害函数依据不同的退化轨迹具有不同的解释. 对于单调递减退化过程, 退化危害函数为

$$s(x; t) = \frac{d}{dx} \int_0^t h(x; x) dx.$$

给定阈值水平  $D$ ,  $t$  时刻的可靠性函数可以表示为

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^D s(u; t) du\right).$$

对于单调递增退化过程, 退化危害函数为

$$s(x; t) = \frac{d}{dx} \left( \int_0^x h(x; x) dx + \ln(\exp(-\int_0^x s(u; t) du) - 1) \right).$$

给定阈值水平  $D$ ,  $t$  时刻的可靠性函数  $R(t)$  可以表示为

$$R(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^D s(u; t) du\right).$$

#### 4.2 加速退化试验 (ADT) 模型

Nelson [11] 简要研究了各种退化产品和材料的退化行为、ADT 模型和推断方法, 并给出了常应力下的基本加速退化模型. Meeker 等 [12] 回顾了一些描述

ADT 模型应用的参考文献. 他们提出了分析 ADT 数据的数学模型并估计失效时间分布、分布分位数和置信区间的方法. 邓爱民等<sup>[17]</sup>对现有的 ADT 模型作了简要回顾, 并对下一步发展作了展望. Elsayed<sup>[18]</sup>简要回顾了退化模型, 并将 ADT 模型分为两类: 基于物理-统计学的模型和基于统计学的模型. 下面将根据这种分类介绍相关的 ADT 模型.

#### 4.2.1 基于物理学-统计学模型

Nelson<sup>[19]</sup>分析了绝缘材料在不同应力水平下的退化. 他假设温度是随时间退化的唯一加速因子, 并给出了绝对温度、中位击穿电压和时间之间的关系; 然后, 基于性能退化模型估计寿命分布. Whitmore 等<sup>[20]</sup>用一种具有时间尺度变换的布朗运动模拟加速退化过程. 模型结合阿伦尼斯律用于高应力试验, 提出了基于 ADT 数据的模型参数推断方法. Meeker 等<sup>[21]</sup>利用 Arrhenius 律描述温度对简单一阶化学反应率的影响, 获得了一种尺度加速失效时间模型, 并通过仿真获得了失效时间分布的置信区间.

#### 4.2.2 基于统计学的模型

基于统计学的模型包括参数模型和非参数模型. 参数模型假设单元的退化轨迹服从一个具有随机参数的具体函数形式, 或者退化量服从一个具有时间相关参数的假设分布; 非参数模型比参数模型具有更大的灵活性, 但可能没有清晰的物理意义.

##### (1) 参数模型

Crk<sup>[22]</sup>基于退化轨迹, 拓展一般退化轨迹法的思路, 发展了函数参数关于外加应力的多元多重回归分析. Tang 等<sup>[23]</sup>模拟非破坏性加速退化数据为一组参数依赖于应力水平的随机过程. 假设时间区间  $t$  内的退化增量为具有均值  $\mu_i t$  和方差  $\sigma_i^2 t$  的独立同分布随机变量,  $\mu_i$  和  $\sigma_i^2$  是第  $i$  个应力水平下的参数, 通过线性回归法联系外加应力. 真实退化轨迹是这些增量的总和, 当  $D \gg \mu_i t$  时, 到达阈值水平  $D$  的首达时间服从 Birnbaum-Saunders 分布.

在利用布朗运动的退化建模方法中, Doksum 等<sup>[24]</sup>讨论了变应力情况的 ADT 模型, 基于累积衰退概念介绍了一类灵活的模型. 考虑了简单步进应力、多步进应力和序进应力, 提出的模型是一种时间变换的具有漂移的布朗运动模型.

##### (2) 非参数模型

Shiau 等<sup>[25]</sup>提出了一种非参数回归加速寿命应力 (NPRALS) 模型, 用于加速退化曲线. 假设不同的应力水平仅影响退化率, 而不影响退化曲线的形状, 提出了一种估计 NPRALS 分量的算法. 通过研究加速因子和应力水平之间的关系, 获得了产品在

正常条件下的平均失效时间估计.

与参数模型相比, 如果参数建模中假设的轨迹函数远离于真实的轨迹, 非参数模型比参数模型表现得更好. 然而, 非参数模型的效率相对较低, 而且为了利用非参数回归模型, 退化曲线在正常条件下的取值范围必须被经过时间换算的加速退化数据的取值范围所涵盖, ADT 必须实施到试验单元失效为止.

另一种非参数模型是利用退化危害函数. Eghbali<sup>[16]</sup>提出比例退化危害模型 (PDHM), 假设退化危害的对数是应力协变量  $z$  的线性函数, 即

$$s(x; t, z) = s_0(x; t) \exp(-z),$$

其中  $s_0(x; t) = g_0(x) \varphi_0(t)$  可以分别表示为退化量和时间的两个正函数  $g_0(x)$  和  $\varphi_0(t)$ . MLE 用于估计模型参数, 模型根据发光二极管的 ADT 数据来预测正常工作条件下的可靠性.

### 5 当前研究热点和难点

在当今的工业和航空航天应用领域中, 基于产品性能退化数据的可靠性分析已变得越来越重要. 虽然关于产品性能退化的可靠性分析得到了良好的发展, 但仍然有很多时机成熟的领域有待于研究. 一些重要的领域如下.

#### (1) 具有竞争硬失效模式和软失效模式的产品可靠性分析

对于某些产品而言, 在产品功能随时间变化而不断发生退化的过程中, 产品既会出现退化失效 (软失效), 也会出现突发失效 (硬失效). 产品失效是这两种失效模式竞争的结果, 对该类型产品进行可靠性分析则需要同时考虑这两种失效.

姚增起<sup>[6]</sup>利用退化量分布密度函数与突发失效出现概率相结合的方式, 给出了一个两种失效模式并存的混合式退化数学表达式. Huang 等<sup>[26]</sup>在假设两种失效模式相互独立的情况下, 研究了包含性能退化的竞争失效问题. Zhao 等<sup>[27]</sup>在假设不同失效模式间相互独立的情况下, 研究了一种加速应力情况下的竞争失效问题. Li 等<sup>[28]</sup>研究了多失效模式及随机冲击下多状态退化系统的可靠性建模问题, 但仍假设了各失效模式间是相互独立的. Bagdonavicius 等<sup>[29,30]</sup>研究了多失效模式下线性退化数据和一般退化轨迹模型的统计推断问题. 赵建印等<sup>[31]</sup>在确定产品性能退化量分布模型的基础上, 给出了突发型与退化型失效的竞争失效的一般模型, 对金属化膜脉冲电容器进行了可靠性分析. Singpurwalla<sup>[32]</sup>利用“危害潜能”概念说明了寿命之间的相依性原因, 研究了动态环境下具有多相关风险的失效问题.



在本领域中,焦点是研究相应于每种失效模式分布参数的技术.这些技术应基于复合的性能老化退化数据和寿命试验数据.另外,对于复杂环境中的工作对象,还应该考虑各失效模式之间的相关性.

#### (2) 现场工作条件下基于退化的可靠性分析

对于在实验室或其他可控环境中实施加速退化试验,确定性和静态应力下的退化模型的效果较好.对于随机的或多变化应力明显影响退化过程的情形,需要一种新的建模方法来适应它.

Tseng 等<sup>[33]</sup>研究了高可靠产品在步进应力下的加速退化失效问题.Wang 等<sup>[34]</sup>使用累积损伤模型结合多种变化应力拓展了 Eghbali 等提出的比例退化危害方法,研究了变应力下基于退化数据的系统可靠性预测问题,但没有给出解析方法.Elsayed 等<sup>[35]</sup>提出了一种几何布朗运动退化率模型,利用近似法模拟现场工作条件下的可变性.Park 等<sup>[36]</sup>研究了多步进应力情形下的随机退化模型.Chan 等<sup>[37,38]</sup>研究了高度变化环境下的退化建模问题,提出了能够结合多个变化环境应力的一般退化轨迹模型,但仅给出了单个变化环境应力作用下的退化模型分析.

#### (3) 基于小样本破坏性退化试验数据的可靠性分析

寿命数据分析的小样本问题主要为失效样品少,而性能退化分析的小样本问题表现在测量时点和样品数两个方面,测量时点少直接影响对性能退化个体规律的研究,而样品少则不利于研究产品总体的性能退化规律.国内外目前涉及小样本条件下性能退化可靠性分析的文献较少,性能退化轨迹模型结合小样本技术,将是解决性能退化数据统计分析小样本问题的有效途径<sup>[39]</sup>,国内已有一些学者对此问题展开了探索性的研究<sup>[40,41]</sup>.

#### (4) 基于性能退化数据的实时可靠性分析

工程上,对于运行系统中的重要部件,常常通过监测其性能参数掌握部件或部件所提供功能的健康状况.在维修决策判定中,实时状态监测和可靠性预测正成为一种重要的工具<sup>[42]</sup>.目前用于实时可靠性分析的方法主要有回归分析和时序分析.Chinnam<sup>[43,44]</sup>利用回归模型和神经网络分别研究了基于退化信号的实时可靠性评估问题.Lu 等<sup>[45]</sup>利用时序建模方法对实时可靠性建模,以反映单一部件的实时可靠性.Gebraeel<sup>[42,46-48]</sup>利用神经网络和 Bayesian 对基于退化信号的实时状态监测和单个单元的剩余寿命预测展开了一系列卓有成效的研究.国内虽然起步较晚,但已有不少学者对此问题展开了研究<sup>[49-51]</sup>.

总之,基于性能退化建模的可靠性研究正不断地得到重视和发展,而且在越来越多的工程领域中得到了广泛应用.关于此研究方向的进一步发展必将对国民经济和技术发展提供有力支持.

## 6 结 论

基于退化建模的可靠性分析是一种估计高可靠部件或系统可靠性的有效方法.本文对退化建模领域的相关理论研究和工程实践作了阶段性的总结.首先介绍了退化建模的概念并指出退化失效分析的优缺点;接着给出了退化模型与失效时间分布之间的关系;然后按无应力因子和有应力因子两种情形分析了退化建模中的典型模型,并指出各种建模方法的适用性;最后讨论了退化建模领域的国内外当前热点问题,对该领域将来的研究方向进行了展望.

## 参考文献(References)

- [1] Nelson W. Accelerated testing: Statistical methods, test plans and data analysis[M]. New York, 1990.
- [2] Meeker W Q, Escobar L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York, 1998.
- [3] Couallier V. Some recent results on joint degradation and failure time modeling [C]. Probability, Statistics and Modeling in Public Health. New York: Springer, 2006: 73-89.
- [4] Peng Wang, David W Coit. Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple degradation measures[C]. Proc of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles, 2004: 302-307.
- [5] Gertsbackh IB, Kordonskiy KB. Models of failure[Z]. New York: Springer-Verlag, 1969.
- [6] 姚增起. 系统退化和系统可靠性研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 1988.  
(Yao Z Q. Study on degradation and reliability of system[D]. Beijing: Institute of Automation Chinese Academic of Science, 1988.)
- [7] Meeker W Q, Hamada M. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products [J]. IEEE Trans on Reliability, 1995, 44(2): 187-198.
- [8] Nikulin M, Commenges D, Huber C. Probability, statistics and modeling in public health[M]. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [9] Lu J C, Park J, Yang Q. Statistical inference of a time-to-failure distribution derived from linear degradation data[J]. Technometrics, 1997, 39(4): 391-400.
- [10] Lu C J, Meeker W Q. Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution [J]. Technometrics, 1993, 35(2): 161-174.
- [11] Wu S J, Shao J. Reliability analysis using the least-square method in nonlinear mixed-effect degradation

- models[J]. *Statistica Sinica*, 1999, 9(3): 855-877.
- [12] Wu S J, Tsai T R. Estimation of time-to-failure distribution derived from a degradation model using fuzzy clustering [J]. *Quality and Reliability Engineering Int*, 2000, 16(4): 261-267.
- [13] Yang K, Xue J. Continuous state reliability analysis [C]. *Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Las Vegas, 1996: 251-257.
- [14] Zuo M J, Jiang R Y, Yam R C M. Approaches for reliability modeling of continuous-state devices [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1999, 48(1): 9-18.
- [15] Yuan X X, Pandey M D. A nonlinear mixed-effects model for degradation data obtained from in-service inspections [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(2): 509-519.
- [16] Eghbali G. Reliability estimate using accelerated degradation data [D]. New Jersey: Rutgers University, 2000.
- [17] 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.)
- [18] Elsayed E A. Reliability engineering[M]. New York: Addison Wesley Longman, 1996.
- [19] Nelson W. Analysis of performance-degradation data from accelerated tests[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1981, 30: 149-155.
- [20] Whitmore G A, Schenkelberg F. Modeling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation [J]. *Lifetime Data Analysis*, 1997, 3(1): 27-45.
- [21] Meeker W, Escobar L, Lu L. Accelerated degradation tests: Modeling and analysis [J]. *Technometrics*, 1998, 40(2): 89-99.
- [22] Crk V. Reliability assessment from degradation data [C]. *Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Los Angeles, 2000: 155-161.
- [23] Tang L C, Chang D S. Reliability prediction using nondestructive accelerated-degradation data: Case study on power supplies [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1995, 44(4): 562-566.
- [24] Doksum K A, Hoyland A. Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener process and the inverse Gaussian distribution [J]. *Technometrics*, 1992, 34(1): 74-82.
- [25] Shiau J J H, Lin H H. Analyzing accelerated degradation data by nonparametric regression [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1999, 48(2): 149-158.
- [26] Huang W, Aslkin R G. Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation [J]. *Quality and Reliability Engineering Int*, 2003, 19(3): 241-254.
- [27] Zhao W, Elsayed E A. An accelerated life testing under competing failure modes [C]. *Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Los Angeles, 2004.
- [28] Li W J, Hoang Pham. Reliability modeling of multi-state degraded systems with multi-competing failures and random shocks [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2005, 54(2): 297-303.
- [29] Bagdonavicius V, Algimantas B, Vytutas K. Statistical analysis of linear degradation and failure time data with multiple failure modes [J]. *Lifetime Data Analysis*, 2004, 10(1): 65-81.
- [30] Vilijandas B, Firoozeh H, Mikhail N. Statistical analysis of general degradation path model and failure time data with multiple failure modes [J]. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 2005, 34(8): 1771-1791.
- [31] 赵建印, 刘芳, 孙权, 等. 基于竞争失效模型的金属化膜脉冲电容器产品可靠性研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(1): 60-64.  
(Zhao J Y, Liu F, Sun Q, et al. Reliability analysis of metallized-film pulse capacitor under competing failure modes[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2006, 26(1): 60-64.)
- [32] Nozer D Singpurwalla. On competing risk and degradation processes [J]. *IMS Lecture Notes-monograph Series 2nd Lehmann Symposium-optimality*, 2006, 49: 229-240.
- [33] Tseng S T, Wen Z C. Step-stress accelerated degradation analysis for highly reliable products[J]. *J of Quality Technology*, 2000, 32(3): 209-216.
- [34] Wang P. System reliability prediction based on degradation modeling considering field-operating stress scenarios [D]. New Brunswick Rutgers: State University of New Jersey, 2003.
- [35] Elsayed E A, Liao H T. A geometric Brownian motion model for field degradation data [J]. *Int J Mater Product Technology*, 2004, 20(1): 51-72.
- [36] Chanseok Park, William J Padgett. Stochastic degradation models with several accelerating variables [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2006, 55(2): 379-390.
- [37] Victor Chan. Estimation of degradation-based reliability in outdoor environments [D]. Iowa: Iowa State University, 2001.

(下转第 1293 页)

## 参考文献(References)

- [1] Bastos L S, Gamerman D. Dynamic survival models with spatial frailty[J]. *Lifetime Data Analysis*, 2006, 17(4): 441-460.
- [2] Klein J P. Moeschberger M L. *Survival analysis*[M]. New York:Spring-Verlag, 2003.
- [3] Aris Perperoglou, Saskia Cessie, Hans C. A fast routine for fitting cox models with time varying effects of the covariates[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2006, 8(1): 154-161.
- [4] Cox D R. Regression models and life-tables[J]. *J of Royal Statistical Society*, 1972, 10(3): 187-220.
- [5] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[C]. *Proc 1st European Conf on Artificial Life*. France, 1992.
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1996, 26(1): 29-41.
- [7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colonies for the traveling salesman problem[J]. *BioSystems*, 1997, 109(1): 73-81.
- [8] Marco Dorigo, Luca Maria Gambardella. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [9] Marco Dorigo, Thomas St üzle. *Ant colony optimization*[M]. London: The MIT Press, 2004.
- [10] Koehler A B. Time series analysis and forecasting with applications of SAS and SPSS[J]. *Int J of Forecasting*, 2001, 43(2): 301-302.
- [11] SPSS Inc. *SPSS regression models TM 10.0*[M]. Chicago: SPSS Inc, 1999.
- [12] SPSS Inc. *SPSS base 10.0 user's guide*[M]. Chicago: SPSS Inc, 1999: 431-434.
- (上接第 1287 页)
- [38] Meeker W Q, Escobar L A, Chan V. Using accelerated tests to predict service life in highly variable environments[C]. *Service Life Prediction: Methodologies and Metrologies*. Washington: American Chemical Society, 2001.
- [39] 张永强, 刘琦, 周经伦. 基于性能退化数据的可靠性评定方法研究[J]. *飞行器测控学报*, 2005, 24(5): 54-58.  
(Zhang Y Q, Liu Q, Zhou J L. Reliability evaluation based on performance degradation data[J]. *J of Spacecraft TT & C Technology*, 2005, 24(5): 54-58.)
- [40] 张永强, 刘琦, 周经伦. 小子样条件下基于 Normal-Poisson 过程的性能可靠性评定[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(3): 128-132.  
(Zhang Y Q, Liu Q, Zhou J L. Reliability evaluation based on normal-poisson process on condition of small sampling test[J]. *J of National University of Defense Technology*, 2006, 28(3): 128-132.)
- [41] 冯静. 小子样复杂系统可靠性信息融合方法与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.  
(Feng J. Research on methods and applications of reliability information fusion for complex system with small samplertest[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.)
- [42] Nagi Z G, Mark A L, Rong L, et al. Residual-life distributions from component degradation signals: A Bayesian approach[J]. *IIE Trans on Reliability*, 2005, 37(6): 543-557.
- [43] Chinnam R B. On-line reliability estimation of individual components, using degradation signals[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1999, 48(4): 403-412.
- [44] Chinnam Ratna Babu, Mohan Pankaj. Online reliability estimation of physical systems using neural networks and wavelets[J]. *Int J of Smart Engineering System Design*, 2002, 4(4): 253-264.
- [45] Lu Huitian, Kolarik William J, Lu S S. Real-time performance reliability prediction[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2001, 50(4): 353-357.
- [46] Gebraeel N. Sensory-based degradation models for components with exponential degradation patterns[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2006, 3(4): 382-393.
- [47] Nagi Gebraeel, Mark Lawley, Liu R, et al. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: A neural network approach[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2004, 51(3): 694-700.
- [48] Nagi Z G, Mark A L. A neural network degradation model for computing and updating residual life distributions[J]. *IEEE Trans on Automations Science and Engineering*, 2008, 5(1): 154-163.
- [49] 徐正国, 周东华. 基于马尔可夫链蒙特卡罗的实时可靠性预测方法研究[J]. *机械强度*, 2007, 29(5): 765-768.  
(Xu Z G, Zhou D H. Real-time reliability prediction method based on Markov chain monte carlo[J]. *J of Mechanical Strength*, 2007, 29(5): 765-768.)
- [50] Xu Z G, Ji Y D, Zhou D H. Real-time reliability prediction for a dynamic system based on the hidden degradation process identification[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2008, 57(2): 230-242.)
- [51] 赵熠, 董豆豆, 周经伦, 等. 基于贝叶斯方法的退化失效型产品实时可靠性评估[J]. *国防科技大学学报*, 2007, 29(6): 116-120.  
(Zhao Z, Dong D D, Zhou J L, et al. Real-time reliability evaluation for degradation failure product based on Bayesian method[J]. *J of National University of Defense Technology*, 2007, 29(6): 116-120.)