

比例危险模型及其在产品竞争失效分析中的应用

吴进煌, 徐德民

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 利用比例危险模型分析了突发失效与退化量的关系, 给出了竞争失效的一般模型及模型的参数估计方法, 利用所给模型对强激光装置所用的金属化膜脉冲电容器进行了可靠性分析.

关键词: 可靠性; 比例危险模型; 竞争失效; 金属化膜脉冲电容器

中图分类号: TB114.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2008)03-0036-04

产品失效通常是其内在的失效机理与外部环境及工作条件综合作用而产生的, 这是一个复杂的过程, 但从产品丧失功能的形式来看, 失效可分成为两种类型: 若产品在工作或存储过程中一直保持或基本保持其所需的功能, 但在某一时刻, 这种功能突然完全丧失, 则称这种现象为突发型失效(硬失效); 若产品的功能随时间的延长而逐渐缓慢下降, 直至无法正常工作的状态(通常规定一个评判的临界值, 即退化失效标准), 则称此种现象为退化型失效(或称为软失效). 任何产品在使用过程中性能总是发生着退化, 该过程是必然的, 突发失效在使用过程中可能发生也可能不发生, 产品的失效是这两种失效竞争的结果. 退化数据中包含着大量的可靠性信息, 考虑产品退化失效与突发失效共存情况下的竞争失效问题, 充分利用产品性能退化信息研究产品的可靠性更具实际与理论意义. 实际上退化信息可以帮助工程人员找到合适的失效机理模型, 利用退化数据可以较早地对产品进行可靠性分析而不必等到其失效, 当失效数据很少或没有失效数据时, 也可以通过退化数据进行可靠性分析.

Yang 和 Xue^[1]使用正态随机过程来研究状态连续产品的可靠性, 该文对突发型失效与退化型失效共存的情况作了简单的分析; Zuo^[2]在总结 Yang 和 Xue 工作的基础上, 对其分析方法做出了改进, 使之能适用于非同时测量的情况, 并利用突发失效出现概率的形式给出了突发失效与退化失效共存时的可靠性模型, 但模型过于简化, 适用性不强; Huang^[3]分析了当突发型失效与退化型量无关时的情况, 并得出了一些结果. 另外, Crk^[4]采用多重多元

回归模型研究了退化失效的情况; Oliveira 和 Cobsimo^[5]利用退化数据对汽车轮胎进行了可靠性评估.

针对以上分析, 在考虑突发失效与退化量相关的情况下, 笔者利用比例危险模型来研究突发失效与退化量关系, 给出了突发失效与退化失效共存时的竞争失效一般模型及参数估计方法.

1 基于比例危险模型的竞争失效分析

不失一般性, 设产品性能退化量为 $x(t)$, 它是时间连续的随机变量, 退化失效阈值为 l 即当 $x(t) \geq l$ 时产品发生退化失效; 另外, 产品还具有一个突发失效模式, 突发失效可能受产品退化量的影响, 一般情况下, 某一时刻退化量越大, 突发失效出现的可能性也越大.

设 t 时刻退化量 x 的分布函数为 $G(x; t)$, 相应的密度函数为 $g(x; t)$, 发生退化失效时间记为 T_s , 根据退化型失效模式的失效判据, 仅考虑退化时产品在 t 时刻的失效概率为

$$F_s(x; t) = P(T_s \leq t) = P(x(t) \geq l) = 1 - G(l; t).$$

$\{G(x; t); t \geq 0\}$ 是一个带有时变参数的分布族, 设其未知时变参数为 $\Theta(t) = (\theta_1(t), \dots, \theta_k(t))$.

设突发失效时间为 T_h , 突发失效在某一时刻出现的概率受产品该时刻退化量 x 的影响, 因此突发失效时间 T_h 的危险函数可表示为 $l_h(t|x)$, 则其条件生存函数及条件失效分布函数为

$$R_h(t|x) = P\{T_h > t|x\} = e^{-\int_0^t l_h(u|x) du}, \quad (1)$$

$$F_h(t|x) = P\{T_h \leq t|x\} = 1 - R_h(t|x) = 1 - e^{-\int_0^t l_h(u|x) du}. \quad (2)$$

由于突发失效受产品性能退化量 x 的影响, 为

收稿日期: 2007-03-30

基金项目: 海军装备改革重点项目(2005-116)

作者简介: 吴进煌(1963-), 男, 研究员, 主要研究方向为导弹武器、可靠性工程.

确定 T_h 的条件生存函数 $R_h(t|x)$, 需要研究突发失效时间与伴随变量 x 之间的关系, 一种办法是通过回归模型来进行, 在回归模型中突发失效时间与退化量的相关性可明确表示. 当突发失效时间的危险函数在不同伴随变量 x_1 和 x_2 下的比 $l(t|x_1)/l(t|x_2)$ 不随时间 t 变化时, 可用比例危险模型^[6]来分析突发失效时间与退化量间的关系. 对于突发失效时间 T_h 来说, 如果其危险函数具有如上性质, 则其条件危险函数可写为

$$l_h(t|x) = l_{h0}(t)h(x), \tag{3}$$

式中: l_{h0} 和 h 都可能含未知参数. 此时, $R_h(t|x)$ 可表示为

$$R_h(t|x) = \exp(-\int_0^t l_h(t|x) dt) = (R_{h0}(t))^{h(x)}, \tag{4}$$

其中, $R_{h0}(t) = \exp(-\int_0^t l_{h0}(t) dt)$.

根据以上各式, t 时刻产品的可靠度为

$$R(t) = P(T > t) = R(T_s > t, T_h > t) = \int_0^t (R_{h0}(t))^{h(x)} g(x; t) dx \tag{5}$$

产品的失效分布为

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_0^t (R_{h0}(t))^{h(x)} g(x; t) dx \tag{6}$$

上面所给出的即为竞争失效的一般模型.

2 参数估计方法

试验中受试样本性能参数随时间不断退化, 退化量不断增加, 当退化量超过失效阈值 l 时, 产品发生退化失效; 在该过程中, 产品还有可能发生突发型失效, 发生突发失效后产品功能完全丧失. 设共有 m 个样本进行试验, 试验中对未发生突发失效的产品样本在多个时间点进行测量以获得其性能退化数据, 在某个时间点上不需要测量所有样本. 第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个产品的测量时间点为 $t_{i1} < t_{i2} < \dots < t_{in_i}$, 得到相应的性能退化数据为 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_i}$; 试验中如果第 i 个样本发生突发失效则退出试验, 同时得到突发失效时间和该时刻对应的性能退化量 (t_{hi}, x_{hi}). 下面分两部分给出模型中的未知参数的估计.

1) 退化量分布未知参数的估计

对于退化失效模型, 由于各产品样本所在的各测量时刻并不相同, 因此无法采用文献[1]中的方法去估计退化分布中的未知参数, 这里给出一种极大似然估计方法. 该方法同样适用于同时测量所有

样品的情况.

假设 t 时刻退化量分布密度函数为 $g(x, \Theta(t))$, 其中 $\Theta(t)$ 为时变参数向量, 它是时间 t 的函数:

$$\Theta(t) = (\theta_1(t), \dots, \theta_p(t)) = (f_1(t, c_1, c_2, \dots, c_r), \dots, f_p(t, c_1, c_2, \dots, c_r)), \tag{7}$$

其中: f_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 的形式已知, 参数向量 $C = (c_1, c_2, \dots, c_r)$ 未知. 将该次试验中的所有测量时间点按大小排序: $t_1 < t_1 < \dots < t_n$, 定义变量 r_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 为

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{在 } t_j \text{ 时刻对第 } i \text{ 个产品进行测量并} \\ & \text{获取了退化数据,} \\ 0 & \text{在 } t_j \text{ 时刻没有对第 } i \text{ 个产品进行测量.} \end{cases}$$

定义退化数据 x'_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 为

$$x'_{ij} = \begin{cases} \text{第 } i \text{ 个产品 } t_j \text{ 时刻的退化数据 } x_{ij} & \text{if } r_{ij} = 1 \\ 1 & \text{if } r_{ij} = 0 \end{cases}$$

则似然函数可表示为

$$L(c_1, c_2, \dots, c_r) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n [g(x'_{ij}, \Theta(t_j))]^{r_{ij}}. \tag{8}$$

利用式 (8) 可求得模型中的未知参数 $c_1, c_2, \dots, c_r$ 的极大似然估计 $\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_r$. 将该估计代入到式 (7) 即可确定退化量的分布.

2) 突发失效回归模型未知参数估计

对于突发失效条件生存函数的参数估计, 可依据数据的特点采用参数回归模型的最小二乘估计或极大似然估计方法进行求解, 文献[6]给出了一些估计方法, 这里对该过程不再赘述.

3 金属化膜脉冲电容器可靠性分析

金属化膜脉冲电容器具有高储能密度、造价低、软失效等特性, 它已经被广泛应用于脉冲功率领域. 强激光惯性约束聚变 (ICF) 试验装置中, 如美国的国家点火装置 (NIF)、国内的神光 II 等, 采用的均是由数百台金属化膜电容器并联来提供初始能量, 电容器的可靠性水平将对强激光装置能源系统及装置本身的可靠性水平和维护费用产生非常重要的影响. 该型电容器具有“自愈”特性, 在外施电压不断作用下, 其电容值不断下降, 当超过初始容值的 5% 时, 电容器容值不再满足要求, 发生退化失效^[7]; 除了退化型失效外, 电容器还可能被击穿 (对外呈短路状态)^[8], 该失效模式是突发型的. 图 1 为某型电容器的部分试验数据示意图, 图中纵坐标为容值退化量, 图中有两台电容器 (星线) 在试验停止前发生了突发失效.

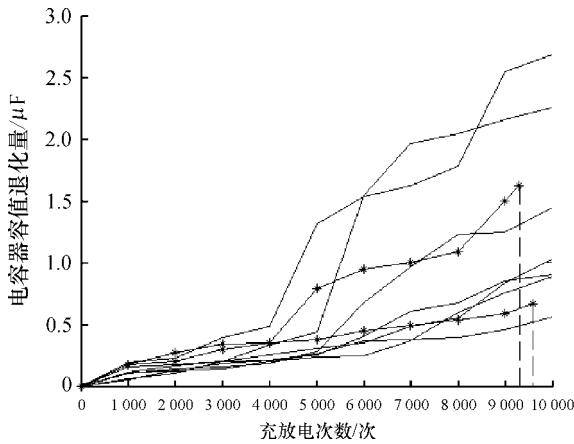


图 1 电容器容值退化量随时间变化情况

假设在某一时刻电容器容值退化量服从正态分布(该假设可通过实际数据检验其合理性),其均值和方差均为时间的函数,密度函数为

$$g(x; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)} e^{-\frac{(x-\mu(t))^2}{2(\sigma(t))^2}}.$$

文献[9]认为金属化膜脉冲电容器容值退化是直线型的,因此取其均值函数为

$$\mu(t) = \alpha t$$

方差函数为

$$\sigma^2(t) = \beta t$$

记电容器初始值为 C_0 ,它是已知的,当电容器容值退化量超过初始值的 5% 时,电容器发生退化失效,即失效阈值 $l = C_0 \times 5\%$. 采用上面所给的极大似然方法,通过计算可得 α, β 的 MLE 估计值为 $\alpha = 1.152 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 2.932 \times 10^{-5}$,将估计值代入到退化量分布中即可得到退化量分布函数。

给定退化量 x 时,假设电容器突发失效概率分布为指数分布, T_h 的条件概率密度函数为

$$f(t|x) = \frac{1}{\theta_x} \exp\left(-\frac{t}{\theta_x}\right),$$

取 $l_{h_0}(t) = 5 h(x) = e^{-(y_0 + y_1 x)}$, 则

$$l_h(t|x) = t/e^{(y_0 + y_1 x)}.$$

即 $\theta_x = e^{(y_0 + y_1 x)}$,该模型对许多问题是自然和充分灵活的^[6].

利用极大似然估计方法估计上式中的未知参数,利用试验数据,采用 Newton-Raphson 迭代法可求得两个参数的极大似然估计为 $\gamma = 10.408$ 、 $\gamma = 0.3322$,将估计值代回到模型中即可得到突发失效时间的条件概率生存函数为

$$R_h(x|x) = \exp\left[-\frac{t}{e^{10.408 + 0.3322x}}\right],$$

因此该型电容器的可靠度函数为

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{2.932 \times 10^{-5} t} \times \exp\left[-\frac{(x - 1.152 \times 10^{-4} t)^2}{5.864 \times 10^{-5}} - \frac{t}{e^{10.408 + 0.3322x}}\right] dt, \quad (9)$$

其在 10 000 发打靶时的可靠度为

$$R(10\,000) = 0.7986$$

4 结束语

产品在使用过程中性能不断发生着退化,当该退化量超过某一失效阈值时,发生退化型失效.除此之外,产品还可能发生突发失效,即产品在某一瞬间功能完全丧失.由于产品的性能退化数据中包含着大量而又非常有用的可靠性信息,因此通过退化数据进行产品的可靠性分析越来越受到科技工作者的注意,但目前的研究大部分仅限于产品的退化型失效,对两种失效共存的情况考虑得较少,而这种情况是普遍存在的.本文研究了突发失效与退化量相关的情况下的竞争失效问题,在突发失效具有比例危险函数时,使用比例危险模型分析了突发失效时间与退化量之间的关系,并基于此给出了竞争失效的一般模型及其参数估计方法.文章最后利用所给模型对某型强激光装置所用的金属化膜脉冲电容器进行了可靠性评估分析。

参考文献:

- [1] Yang K, Xue J. Continuous state reliability analysis[C]// [s.l]: Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1996: 251-257.
- [2] Zuo M J, Jiang R, Yan R C M. Approaches for reliability modeling of continuous state device[J]. IEEE Trans On Rel, 1999, 48(1): 9-18.
- [3] Huang W. Reliability analysis considering product performance degradation[D]. Arizona: The University of Arizona, 2002.
- [4] Crk V. Reliability assessment from degradation data[C]// [s.l]: Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000: 155-161.
- [5] Oliveira V R B, Colosimo E A. Comparison of methods to estimate the time to failure distribution in degradation tests[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2004, 20: 363-373.
- [6] Lawless J F. 寿命数据中的统计模型与方法[M]. 茆诗松,译. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [7] 郭大德. 金属化膜电容器的损耗分析与损耗机理[J]. 电力电容器, 1995(2): 12-15.

[8] 代新, 林福昌, 李 劲, 等. 高场强下金属化膜脉冲电容器失效的原因 [J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 27-29.

ing pulse capacitors for the national ignition facility (NIF) [C]// IEEE Pulsed Power Conference Monterey [s n], 1999: 114.

[9] Ennis J B, Macdougall F W, Cooper R A, et al SelfHeat

PHM and Its Application in Reliability Analysis of Competing Failure Modes

W u Jin-huang Xu Dem in

(College of Marine Engineering Northwestem Pbytechnical University, Xi an 710072 China)

Abstract The dependence of catastrophic failure on degradation failure is analyzed by proportional hazard model and a general model of competing failure and a method of estimating parameters are presented The methodology is demonstrated and validated in the reliability analysis of metallized film pulse capacitors

Key words reliability; proportional hazard model(PHM); competing failure; metallized-film pulse capacitor

(上接第 27页)

A Study of the Preparation and Properties of Edible Film s of Chitosan

Li N i n j Wu Guo-jie Dong Fen-qiang He Chun-li Wu We-r liang Lin Long-shui

(Faculty of Chemical Engineering and Light Industry Guangdong University of Technology Guangzhou 510006 China)

Abstract Compound film s of ch itosan / gelatin / G lucono-D elta-Lactone w ith glycerol as plasticizer w ere prepared to assay the elongation properties, water vapor permeability and gas barrier properties of these film s The results show that G lucono-D elta-Lactone, gelatin cooperating w ith glycerol can improve the elongation properties of film s, the water vapor permeability of film s increases as w ith the increase of the gelatin and glycerol Compound film s made from 1% ch itosan solution, 0. 2% gelatin, 0. 8% G lucono-D elta-Lactone, 0. 6% glycerol have the best properties of preventing oil and gas

Key words edible film s, ch itosan, gelatin, glucono-delta-lactone