

文章编号:1000-6788(2006)01-0060-05

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

赵建印,刘芳,孙权,周经伦

(国防科学技术大学信息系统与管理学院系统工程系,湖南长沙410073)

摘要: 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,该模型考虑了突发失效率与退化量的相关性.通过分析金属化膜脉冲电容器的退化失效机理,利用该竞争失效模型,对金属化膜脉冲电容器进行了可靠性分析,确定了该型电容器的可靠度函数.

关键词: 金属化膜脉冲电容器;退化失效;竞争失效;可靠性

中图分类号: TB114.3

文献标识码: A

Reliability Analysis of Metallized-film Pulse Capacitor under Competing Failure Modes

ZHAO Jian-yin, LIU Fang, SUN Quan, ZHOU Jing-lun

(School of Information System & Management, National University of Defense Technology, Hunan, Changsha 410073, China)

Abstract: Competing risk involving multiple failures are becoming increasingly common and important in practice. The paper investigates the modeling of competing risk problems involving both traumatic and degradation failures. Dependence of traumatic failure intensities on the degradation level are included into the models. Then, by analyzing degradation mechanism of metallized-film capacitor, this paper presents a life distribution model of metallized-film pulse capacitor using the models.

Key words: metallized-film pulse capacitor; degradation failure; competing failure; reliability

1 概述

产品失效通常是由产品内在的失效机理与产品的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.从产品丧失功能的形式来看,可将产品失效分成两种类型,若产品在以往的工作或存储过程之中,一直保持或基本保持所需的功能,但在某一时刻的瞬间,这种功能突然完全丧失,则称这种现象为突发型失效(或称为硬失效),如器件击穿、电路短路、材料断裂等;若产品在以往的工作或存储过程中,产品的功能随时间的延长而逐渐缓慢下降,直至达到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),如元器件电性能的衰退、机械元件磨损、药品效力的降低、绝缘材料老化等.显然,任何元件从一开始就不断发生着退化(所表现出来得仅是退化的快慢而已),产品性能退化是必然的,但不同产品个体的退化速度是不同的.突发型失效在产品的任务期内则可能发生也可能不发生,产品失效是这两种失效模式竞争的结果.

金属化膜脉冲电容器是一种高可靠性、长寿命的电子元件,由于它具有高储能密度、造价低、安全可靠等特性,已经被广泛地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)及国内的神光等,均采用的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.

金属化膜电容器元件是由两张单面蒸涂厚约20~100nm的薄金属(铝或铝合金)的有机膜绕卷而成的,电流的引出是由元件两端面喷以金属层来实现的,由于膜在生产过程中不可避免的存在带有杂质或缺陷的区域,从而使得这些区域的耐电强度较低,形成“电弱点”.在外施电压不断作用下,电弱点处薄膜会先

收稿日期:2004-06-03

资助项目:863高技术项目(2004AA845023)

作者简介:赵建印(1976-),男,博士,主要研究方向为可靠性工程与质量管理.

被击穿而形成放电通道,当薄膜被击穿的同时,电荷通过击穿点形成大电流,引起局部高温,击穿点处的薄金属层会迅速蒸发并向外扩散使绝缘恢复,这样,局部击穿不会影响到整个电容器,电容器仍然可以使用,这一过程称为“自愈”^[1],单次自愈过程所造成的仅是电容量极微小的损失^[2].在使用过程中电容器不断发生自愈,电容不断降低,当电容下降量超过预定阈值时电容器将发生退化型失效.对于工作在高场强下的金属化膜电容器来说,一般退化型失效模式的失效阈值取为 5%^[3].除了退化型失效外,电容器还可能被击穿(对外呈短路状态)以及电容器端部全部或部分喷出(对外呈开路状态)^[1],该失效模式是突发型的.

性能退化信息中包含着大量而又有用的产品的可靠性信息,近年来,通过产品的性能退化数据进行产品的可靠性分析逐渐引起了科技工作者的注意,并越来越受到重视. Carey and Koenig^[4]使用退化模型对一种电子元件进行了可靠性分析. Lu and Meeker^[5]和 Meeker, Escobar and Lu^[6]对一般的退化轨道模型进行研究. Yang and Xue^[7]使用随机过程模型分析产品的退化并对其可靠性进行了估计. 通过退化数据进行产品的可靠性分析不仅可以减少试验成本而且会使分析结果更为精确. 但目前大部分文献只针对产品的退化失效进行研究而不考虑突发失效,而大多数情况下产品的失效是这两种失效竞争的结果.

针对以上分析,作者通过分析退化失效模式与突发失效模式共存时的一般竞争失效模型,对我国自主生产的神光 III 强激光装置所用金属化膜脉冲电容器进行可靠性研究. 文章的第二部分给出了竞争失效的一般模型;第三部分对该型电容器进行可靠性建模;第四部分给出了电容器可靠性模型的参数估计方法及结果;最后一部分对本文进行了总结.

2 一般模型

不失一般性,设产品具有一个退化型失效模式和一个突发型失效模式. 随着使用时间的增长,产品性能不断退化,当退化到一定程度时产品发生退化型失效,记 t 时刻产品退化量为 $x(t)$,失效阈值为 l ,即当 $x(t) \geq l$ 时,产品发生退化型失效;另外,产品在使用时有可能发生突发失效,当发生突发失效时产品功能完全丧失,突发型失效模式出现的概率可能受产品退化量 x 的影响,一般情况下,退化量越大产品发生突发失效的概率越大. 当退化型失效和突发型失效共存时,产品失效是这两种失效模式竞争的结果.

设 t 时刻退化量 x 的分布函数为 $G_s(x; t)$,相应的概率密度函数为 $g_s(x; t)$. T_s 为产品退化量超过失效阈值而导致产品退化失效的时间,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:

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

其中 x 表示 t 时刻 $x(t)$ 的取值,即 $x = x(t)$. 图 1 给出了不同时刻退化量概率密度曲线的示意图.

对于突发型失效,它的出现概率在不同的时刻是不同的,同时该概率可能还与产品在该时刻的性能退化量 x 有关,用 T_h 表示突发型失效(硬失效)模式导致产品失效的失效时间. 则 T_h 的条件生存函数为

$$R_h(t | x) = P(T_h > t | x) = e^{-\int_0^t h(s|x) ds},$$

其中 $h(s)$ 为 T_h 的危险函数.

由产品的退化量分布函数和 $R_h(t | x)$ 可得到 t 时刻产品的可靠度为:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = P(T_s > t, T_h > t) = P(x(t) < l, T_h > t) \\ &= \int_0^l R_h(t | x) dG_s(x; t) = \int_0^l e^{-\int_0^t h(s|x) ds} g_s(x; t) dx. \end{aligned} \tag{1}$$

产品的失效分布为

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_0^l R_h(t | x) g_s(x; t) dx.$$

下面我们研究由某一特定失效模式引起产品失效的概率,对于退化失效,则

$$T = \min(T_s, T_h) = T_s.$$

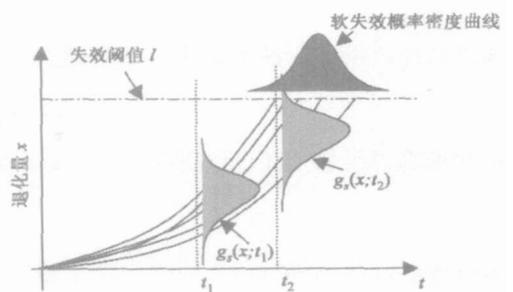


图 1 不同时刻对应的退化量分布密度函数 $g_s(x; t)$

由退化型失效模式导致产品失效的概率为

$$\begin{aligned} F^{(s)}(t) &= P(T \leq t) = P(T_s \leq t, T_h > t) \\ &= \int_0^l R_h(t|x) dG_s(x;t) = \int_0^l R_h(t|x) g_s(x;t) dx. \end{aligned} \quad (2)$$

由突发型失效模式导致产品失效时,有

$$\begin{aligned} T &= \min(T_s, T_h) = T_h, \\ F_h(t) &= P(T \leq t) = P(T_s > t; T_h \leq t) = P(x(t) < l, T_h \leq t) \\ &= \int_0^l (1 - R_h(t|x)) dG_s(x;t) = \int_0^l g_s(x;t) (1 - R_h(t|x)) dx. \end{aligned} \quad (3)$$

当产品的突发型失效与产品退化量无关时,以上结果可写为

$$R(t) = \int_0^l R_h(t) dG_s(x;t) = R_h(t) \int_0^l dG_s(x;t) = R_h(t) G_s(l;t); \quad (4)$$

$$F^{(s)}(t) = \int_0^l R_h(t) dG_s(x;t) = R_h(t) \int_0^l dG_s(x;t) = R_h(t) F_s(l,t); \quad (5)$$

$$F_h(t) = \int_0^l (1 - R_h(t)) dG_s(x;t) = G_s(l;t) (1 - R_h(t)). \quad (6)$$

设共有 n 个样品进行试验,试验进行到一定时间 T 就停止,试验中有 n_1 个样品仅发生性能退化而没有发生突发失效,其余 $n_2 = n - n_1$ 个样品在试验中发生了突发型失效.用 T_i 表示第 i 个样品突发失效的时间,用 $x_{ij} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots)$ 表示第 i 个样品的第 j 次测量所得到的退化量的测量值.

记

$$t_i = \min(T_i, T), \quad i = \begin{cases} 1, & \text{if } T_i \leq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

下面我们采用两阶段法估计模型的未知参数:

第一步:首先利用产品的退化数据估计出产品退化量分布模型中的未知参数.

第二步:由于产品的突发失效概率可能与产品的退化量有关,因此利用已有的退化失效模型和产品的定时截尾试验中的失效数据得出产品的突发型失效模型中的未知参数,并最终确定产品失效模型.

当退化量为 x 时,记突发型失效模式导致产品失效概率密度函数为 $f_h(t|x)$,用危险函数可表示为

$$f_h(t|x) = h(t|x) e^{-\int_0^t h^{(1,x)} d}.$$

通过已经获得的产品的退化失效模型去掉突发失效中退化量 x 的影响:

$$h(t) = \int_0^l h(t|x) dG_s(x;t).$$

由此可求得函数 $R_h(t)$ 和密度函数 $f_h(t)$,则突发型失效模式下的似然函数为:

$$L = \prod_{j=1}^n f_h(t_j)^{j} R_h(t_j)^{j}.$$

通过似然函数可求得模型中未知参数的极大似然估计.

3 金属化膜脉冲电容器的失效分析

电容器在某次充放电过程中是否发生“自愈”是随机的,但随着电容器使用时间的增长,介质不断损耗,电容器发生“自愈”的可能性将越来越大.假设:

1) 在给定时间 $t(t > 0)$ 内电容器所产生的“自愈”次数 $N(t)$ 是随机的,服从非齐次 Poisson 过程,强度函数 $s(t) = s \cdot t$,其中的 s 为未知参数;

2) 电容器容值 $C(t) (t > 0)$ 服从正态分布.由此可知该台电容器在时间 t 的容值下降量 $x(t) = C_0 - C(t)$ (C_0 为电容器的初始电容值)也服从正态分布,即

$$x(t) \sim N(\mu(t), \sigma^2(t)).$$

其中的 $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 为未知时变参数.

3) 电容器每次自愈过程所造成的微小电容损失量 $Y_j (j = 1, 2, \dots)$ 服从正态分布, 即

$$Y_j \sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2), j = 1, 2, \dots,$$

其中 Y_j 表示该电容器的第 j 次自愈过程所造成的电容损失; μ_Y 和 σ_Y^2 为未知固定参数, 并记 $EY^2 = \sigma_Y^2$, μ_Y 、 σ_Y^2 和 σ_Y 与该批电容器额定工作电压、电容器介质材料以及制造工艺等因素有关. $\{Y_m, m = 0\}$ 与自愈次数 $\{N(t), t \geq 0\}$ 是相互独立的.

4) 电容器突发失效出现的概率与退化量有关, 当电容器容值退化量为 x 时, 设失效率函数为 $f_h(t|x)$ $= h + \lambda \cdot x$, 则 t 时刻电容器发生突发失效的概率分布函数为

$$F_h(t|x) = 1 - e^{-(h + \lambda x)t}, \tag{7}$$

其中 h 、 λ 为未知参数.

由条件 1)、3) 可知, t 时刻电容器的电容损失量为

$$x(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} Y_j.$$

那么 $\{x(t), t \geq 0\}$ 为一个复合非齐次 Poisson 过程.

利用 $x(t)$ 的矩母函数, 求得 $x(t)$ 的均值和标准差分别为

$$\begin{aligned} \mu(t) &= E[x(t)] = \frac{1}{2} \lambda t^2 \mu_Y, \\ \sigma^2(t) &= \text{Var}[x(t)] = \frac{1}{2} \lambda t^2 \sigma_Y^2. \end{aligned}$$

另记 $\sqrt{\frac{1}{2} \lambda} t = s$, 则

$$\mu(t) = \sigma_Y^2 \mu_Y \cdot s^2, \tag{8}$$

$$\sigma(t) = \sigma_Y \cdot s. \tag{9}$$

由此可得 t 时刻电容器容值退化量的分布函数为 $N(\sigma_Y^2 \mu_Y t^2, \sigma_Y t)$, 即

$$G_s(x;t) = \left[\frac{-x}{\sigma_Y t} - \frac{\mu_Y}{\sigma_Y} \right], \tag{10}$$

其中

$$f_s(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

μ_Y 和 σ_Y 为待估未知参数.

将电容器退化量分布函数 $G_s(x;t)$ 及突发失效概率函数 $F_h(t|x)$ 代入公式(1), 可求得 t 时刻电容器的可靠度函数为

$$R(t; \mu_Y, \sigma_Y, h, \lambda) = \int_0^l e^{-(h + \lambda x)t} f_s(x,t) dx, \tag{11}$$

其中的 $\mu_Y, \sigma_Y, h, \lambda$ 为未知参数, 失效阈值 $l = 5\% \cdot C_0$ 为已知参数.

4 电容器可靠性模型求解

在电容器的充放电试验中, 一部分电容器可能在容值退化的过程中发生突发性失效, 图 2 为部分某型电容器的试验数据示意图, 图中有两台电容器(图中的星线)在试验停止前发生了突发性失效. 根据以上模型, 我们首先使用电容器的容值退化数据估计出电容器退化失效模型中的未知参数, 然后再给出突发失效模型的参数估计值, 并由这些结果最终得到电容器的失效分布及相关可靠性参数.

对于 n_1 台仅发生性能退化的电容器, 通过各电容器容值退化量的测量值可求得该批电容器容值退化量在各测量时刻的均值与标准差的估计值

$$\begin{aligned} \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k \\ \hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \dots, \hat{\sigma}_k \end{aligned}$$

根据均值与标准差的估计值, 采用最小二乘法, 进一步求得电容器容值退化量的均值 $\sigma_Y^2 \mu_Y t^2$ 和标准

差 y_i 函数的系数的估计值,即

$$\hat{\mu}_y = \hat{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i^2 y_i}{\sum_{i=1}^k t_i^4}, \quad (12)$$

$$\hat{y} = \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i^4 y_i}{\sum_{i=1}^k t_i^6}. \quad (13)$$

其中 t_i 表示第 i 次测量时电容器的充放电次数. 可得电容器容值退化量的分布为

$$N(\mu(t), \sigma^2(t)) = N(\hat{\alpha}t^2, (\hat{b}t)^2).$$

电容器突发失效的失效率函数为 $h(t|x) = h_0 +$

图2 电容器容值变化情况

λx , 利用前文所给的参数估计方法, 可求得 h_0 和 λ 的极大似然估计为

$$\hat{h}_0 = 1.7100 \times 10^{-5},$$

$$\hat{\lambda} = 2.9006 \times 10^{-6}.$$

将所得的参数估计值 $\hat{\alpha}, \hat{b}, \hat{h}_0, \hat{\lambda}$ 的值代入(11)式可求得该型电容器的可靠度函数:

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{7.3796 \times 10^{-5} \times t} e^{-\frac{(x-1.4744 \times 10^{-8} \times t^2)^2}{2(7.3796 \times 10^{-5} \times t)^2} - (1.71 \times 10^{-5} + 2.9006 \times 10^{-6} \times x)t} dx. \quad (14)$$

其在 10000 发打靶时的可靠度为

$$R(10000) = 0.7798.$$

5 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, 则发生退化型失效, 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的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的较少, 而这种情况是普遍存在的.

金属化膜脉冲电容器是一种高可靠性、长寿命的电子元件, 该型电容器失效是突发失效与退化失效的竞争的结果, 本文对该型电容器进行可靠性研究时, 给出了两种失效共存时的一般竞争失效模型及其参数估计方法, 并利用该模型给出了该型电容器的可靠度函数.

参考文献:

[1] 代新, 林福昌, 李劲, 姚宗干. 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.
Xin D, Fuchang L, Jin L, Ganzong Y. Failure mechanism of metalied film pulse capacitors under high electric stress[J]. High Electric Technology, 2000, 26(5): 27 - 29.

[2] Ennis J B, MacDougall F W, Cooper R A, Bates J. Repetitive pulse application of self-healing high voltage capacitors[A]. International Power Modulator Conference[C]. Hollywood, California, 2002.

[3] 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.
Guo D D. Wear analysis and degradation mechanism of film metallized capacitor[J]. Power Capacitor (China), 1995, 2: 12 - 15.

[4] Carey M B, Koenig R H. Reliability assessment based on accelerated degradation: A case study[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1991, 40: 499 - 506.

[5] Lu C J, Meeker W Q. Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution[J]. Technometrics, 1993, 35: 161 - 174.

[6] Meeker W Q, Escobar L A, Lu C J. Accelerated degradation tests: Modeling and analysis[J]. Technometrics, 1998, 40: 89 - 99.

[7] Yang K, Xue J. Continuous state reliability analysis[A]. Proc. Annual Reliability and Maintainability Symp, 1996, 251 - 257.

