

文章编号: 1001-4322(2005)07-1031-04

基于耗损失效模型的金属化膜 脉冲电容器可靠性评估*

赵建印¹, 刘 芳¹, 孙 权¹, 周经伦¹, 魏晓峰², 贺少勃²

(1. 国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 高储能密度金属化膜脉冲电容器是惯性约束聚变装置的关键元器件, 由于其“自愈”特性, 在短时间内很难得到它的失效数据。通过分析电容器的失效机理, 给出了金属化膜脉冲电容器的一个耗损失效模型, 推导了该模型的失效概率密度函数和分布函数, 并利用电容器的性能衰退数据对其进行了可靠性分析。所选的某型金属化膜脉冲电容器未知参数估计值为 0.000 119 4 和 0.006 7, 将该值代入失效分布函数和概率密度函数中, 从而确定电容器的失效模型, 由此模型求得该型电容器充放电 10 000 次的可靠度为 0.988 5, 预计寿命为 23 461 次充放电。在工程实践中使用该模型对该型电容器进行可靠性分析可节约大量的试验成本。

关键词: 耗损失效; 可靠性; 金属化膜脉冲电容器; 概率密度函数; 概率分布函数

中图分类号: TB114.3 **文献标识码:** A

目前, 国内外的激光惯性约束核聚变(ICF)实验装置均采用数百台电容器并联的方式提供初始能量, 如美国的 NIF(National Ignition Facility)^[1] 和国内的神光 III 等强激光装置的能源系统均采用的是自愈式高储能密度金属化膜脉冲电容器, 该型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重要的影响。

传统的可靠性分析方法分析的对象均为失效时间(time-to-failure), 通过对失效时间的统计分析确定失效分布并进一步进行可靠性分析。与普通箔式电容器相比, 金属化膜脉冲电容器具有“自愈”性, 在短时间内很难得到它的失效数据, 这就给传统的分析方法带来了困难。文献[2]通过分析金属化膜脉冲电容器的性能衰退数据, 给出了该型电容器的一种耗损失效模型。由于金属化膜脉冲电容器的主要失效模式是耗损失效, 其寿命终结也是以容值耗损量大小作为判据的, 通过分析该型电容器的性能退化轨道, 利用其性能耗损数据对其进行可靠性分析。利用产品的性能衰退数据进行可靠性分析已经引起了科技工作者的注意, 并越来越受到重视, 相关的工作可查阅文献[3]。

1 一般模型

在可靠性理论中, 将产品丧失所规定功能的现象称为失效, 产品在存储或工作一段时间后, 往往会出现失效的现象, 若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(通常规定一个评判临界值, 即退化失效), 则称这种现象为耗损性失效。产品性能在损耗过程中一般可看作是使用时间的函数, 我们称其为退化轨道, 不同产品的退化轨道可能不同, 图 1 给出了 3 种简单但非常重要的退化轨道形状。对于单元产品来说, 一般情况下其退化轨道是单调的。

设产品仅有一个性能参数, 用 $y=y(t)$ 表示 t 时刻产品性能衰退量, $y(0)=0$, 失效阈值为 L , 即当性能衰退量超过 L 时产品发生耗损性失效, 则产品的失效概率分布函数(CDF)为

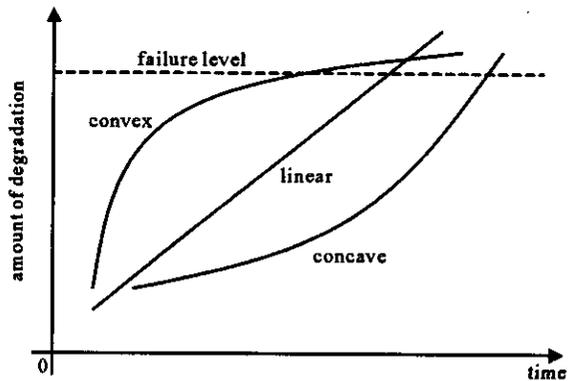


Fig. 1 Possible shapes for degradation curves

图 1 几种典型的退化轨道形状

* 收稿日期: 2004-10-13; 修订日期: 2005-01-21

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 赵建印(1976—), 男, 河北安平人, 博士生, 主要从事可靠性工程的相关研究; E-mail: zhaojianyin@sohu.com.

$$F(t) = P(T \leq t) = P(y \geq L) \quad (1)$$

设产品性能衰退量增长规律可用 $\eta(t, \Theta)$ 来表示,它是时间 t 的单调递增函数, Θ 为参数向量。由于使用环境及个体特性的差异,产品实际衰退情况与衰退规律是存在一定差异的,一般来说,随着使用时间的增长,各产品个体间性能值差距会越来越大,呈喇叭口状,因此在表示产品衰退时,我们用 $\eta(t, \Theta)$ 与 Wiener 随机过程 $w(t), t \geq 0$ 的叠加来表示,则产品在 t 时刻的性能衰退量可表示为

$$y(t) = \eta(t, \Theta) + w(t) \quad (2)$$

式中: $w(t)$ 具有平稳的独立增量且 $E[w(t)] = 0, t \geq 0$ 。 $w(t) - w(s)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2(t-s)), t > s \geq 0$, 有 $w(0) = 0$, 其中 σ 为未知参数。

根据退化失效的定义,产品的失效时间为性能衰退量首次达到失效阈值的时刻,即

$$T = \inf\{t \mid y(t) \geq L, t \geq 0\} \quad (3)$$

则失效时间的概率分布函数为

$$F(t) = P(T \leq t) = P(y(t) \geq L) = F(t, \Theta, \sigma, \eta, L) \quad (4)$$

当产品的性能衰退量达到失效阈值时产品失效,我们可以用衰退量的数学期望值到达失效阈值的时刻作为产品寿命的预计值,由于 $E[w(t)] = 0 (t \geq 0)$, 则 $E[y(t)] = \eta(t)$, 寿命预计值为

$$t_r = \{t \mid \eta(t, \Theta) = L\} \quad (5)$$

2 金属化膜电容器耗损失效分析

金属化膜电容器元件是由两张单面蒸涂厚 20~100 nm 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地存在带有杂质或缺陷的区域,这些区域的耐电强度较低,形成“电弱点”。在外施电压作用下,“电弱点”处薄膜会先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”^[6,7]。单次“自愈”过程所造成的电容量损失是极其微小的。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耗损型失效。对于工作在高场强下的金属化膜电容器来说,一般耗损型失效模式的失效阈值取为 5%^[6,8]。

美国 NIF 装置的能源系统所使用的电容器由 Maxwell 公司提供,他们认为金属化膜脉冲电容器的容值衰退是直线型的^[1],据此,我们取(2)式中 $\eta(t, \Theta)$ 为一直线,显然 $t=0$ 时刻,容值衰退量为 0,即 $\eta(t) = \mu t$, 其中 $\mu > 0$ 为未知参数。则电容器在 t 时刻退化量大小为

$$y(t) = \mu t + w(t) \quad (6)$$

电容器初始容值 C_0 已知,根据电容器失效定义,其失效阈值 $L = C_0/20$,下面首先求解该电容器的失效密度和失效分布函数。

设失效时间 T 的概率密度函数(PDF)为 $f(t)$,根据失效时间定义式(3), T 为 $y(t)$ 首次达到 L 的时刻,因此有

$$y(0) = 0, \quad y(t) < L \quad (0 \leq t < T), \quad y(T) = L \quad (7)$$

设 t 时刻 y 的分布密度为 $g_y(y, t)$, 则

$$P(y(\tau) < L, \quad y(t) \leq x) = \int_{-\infty}^x g_y(y, t); \quad (0 \leq \tau < t) \quad (8)$$

由于

$$f(t) = -\frac{\partial}{\partial t} P(T \geq t) = -\frac{\partial}{\partial t} P(y(\tau) < L, \quad y(t) \leq L) = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^L g_y(y, t) dy; \quad (0 \leq \tau < t) \quad (9)$$

为求 $f(t)$,关键是求出 $g_y(y, t)$ 。由于 $y(t)$ 是 μt 与一个 Wiener 过程的叠加,且考虑条件式(7),它实际上是一个具有吸收栏(absorbing barriers)及位移 $\mu > 0$ 和散度常量为 δ 的 Wiener 过程,通过在 $y=L$ 处定义一个吸收栏,利用 Kolmogorov 前向方程可求出 $g_y(y, t)$,详细求解过程可见文献[9], $g_y(y, t)$ 为

$$g_y(y, t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(y-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] - \exp\left[\frac{2\mu L}{\sigma^2} - \frac{(y-2L-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \right\} \quad (10)$$

则

$$f(t) = -\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^L g_y(y,t) dy = -\frac{d}{dt} \left[\Phi\left(\frac{L-\mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\mu L}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-L-\mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) \right]$$

$$= \varphi\left(\frac{\mu t - L}{\sigma\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu L}{\sigma^2}\right) \varphi\left(\frac{-L-\mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right); t > 0 \tag{11}$$

式中 $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-y^2/2} dy$, 为标准正态分布函数; $\varphi(x)$ 为其密度函数。相应的失效概率分布函数(CDF)为

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\mu t - L}{\sigma\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu L}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-L-\mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right); t > 0 \tag{12}$$

我们利用电容器的容值衰退数据估计电容器失效模型中的未知参数 μ 与 σ 。假设 n 个电容器做充放电试验, 每 1 000 次记录一次容值变化, 共测量 m 次, 测量时刻为 t_1, t_2, \dots, t_m , 得到电容器的容值衰退量为

$$\begin{pmatrix} y_{11}, & y_{12}, & \dots, & y_{1m} \\ y_{21}, & y_{22}, & \dots, & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1}, & y_{n2}, & \dots, & y_{nm} \end{pmatrix} \tag{13}$$

y_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 表示第 i 个电容器在第 j 次测量所得到的容值衰退量。由此可求得该批电容器容值衰退量在各测量时刻的均值与标准差的估计值

$$\begin{pmatrix} \hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \dots, \hat{\mu}_m \\ \hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \dots, \hat{\sigma}_m \end{pmatrix} \tag{14}$$

由于 $E[y(t)] = \mu t$, $w(t)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2 t)$, 采用最小二乘估计方法, 由(14)可求得 μ 和 σ 的估计值

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^m \hat{\mu}_i t_i}{\sum_{i=1}^m t_i^2}, \quad \hat{\sigma} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \hat{\sigma}_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i^2} \right)^{1/2} \tag{15}$$

将估计值代入式(11)中即可得到电容器的失效分布概率密度函数。

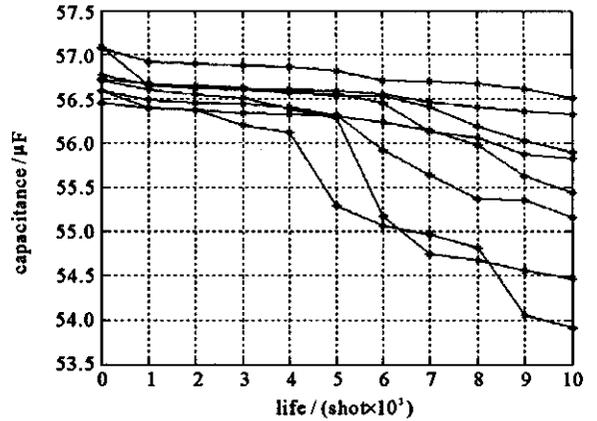


Fig. 2 Performance degradation of the metallized film capacitors
图 2 电容器容值随充放电次数的变化曲线

3 实际数据分析

图 2 给出了强激光装置所用的 8 台某型金属化膜脉冲电容器容值随充放电次数的变化情况, 在试验中每进行 1 000 次充放电对电容器的容值做一次测量, 共进行了 10 000 次充放电, 图中横坐标为充放电次数, 纵坐标为电容器容值。

根据试验数据及以上模型, 求得模型的两个未知参数的估计值分别为 $\hat{\mu} = 0.000\ 119\ 4$, $\hat{\sigma} = 0.006\ 7$, 将所得到的估计值代入到电容器的失效分布和失效概率分布函数即可得到电容器的失效模型。由其失效模型可求得该型电容器充放电 10 000 次的可靠度为 $R(10\ 000) = 1 - F(10\ 000) = 0.988\ 5$ 。根据式(5)可求得该型电容器

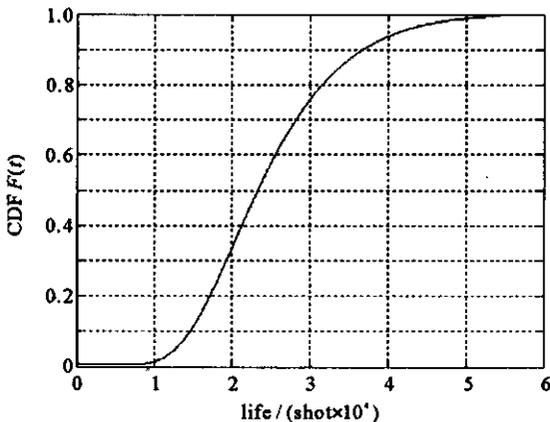


Fig. 3 CDF of the capacitors degradation failure

图 3 电容器失效概率曲线

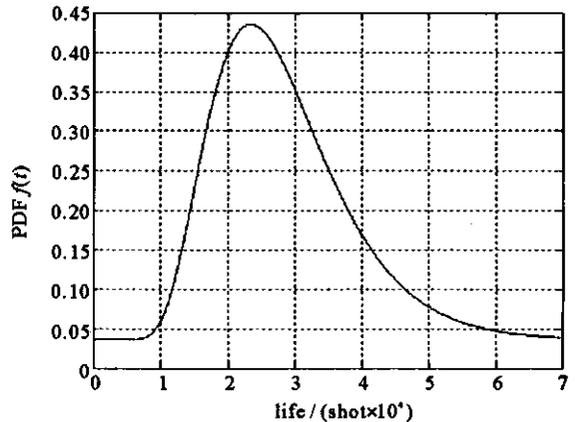


Fig. 4 PDF of the capacitors degradation failure

图 4 电容器失效概率密度曲线

的预计寿命为 $t_r = 23\ 461$ 次充放电。图 3 和图 4 分别给出了该型电容器的失效概率分布曲线和失效概率密度曲线,从图中也可以看出,在电容器的前 10 000 次充放电中电容器是相当可靠的,而后随着使用次数的增加,其失效概率不断增大。

4 结束语

由于电容器具有“自愈”性,在短时间内很难得到它的失效数据,因此不宜采用传统的失效数据分析方法来评估其可靠性水平。本文根据金属化膜脉冲电容器的主要失效特点,采用了耗损失效模型分析了金属化膜脉冲电容器的可靠性问题,给出了该型电容器的失效分布函数和相应的概率密度并由此求得了电容器的相应的可靠性参数。由于不必等到电容器失效即可利用其性能衰退数据进行可靠性分析,因此该方式可以节省试验时间及费用。

参考文献:

- [1] Ennis J B, MacDougall F W, Cooper R A, et al. Self-healing pulse capacitors for the National Ignition Facility(NIF)[A]. Proc of 12th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. CA, USA, 1999:118—121.
- [2] 孙权, 钟征, 周经伦, 等. 自愈式金属化膜脉冲电容器耗损失效模型[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8):1000—1004. (Sun Q, Zhong Z, Zhou J L, et al. Degradation failure model of self-healing metallized film pulse capacitor. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(8):1000—1004)
- [3] Meeker W Q, Escobar L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York:Wiley, 1998.
- [4] Lu C J, Meeker W Q. Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution[J]. *Technometrics*, 1993, 35(2):161—174.
- [5] Yang K, Xue J. Continuous state reliability analysis[A]. Proc Annual Reliability and Maintainability Symp[C]. 1996. 251—257.
- [6] Sarieant W J, Zirnheld J, Macdougall F W. Capacitors[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, 26(5):1368—1392.
- [7] 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. (Dai X, Lin F C, Li J, et al. Failure mechanism of metalized film pulse capacitors under high electric stress. *High Electric Technology*, 2000, 26(5):27—29)
- [8] 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. *Power Capacitor*, 1995, 2:12—15)
- [9] Cox D R, Miller H D. The theory of stochastic processes[M]. Methuen & CO LTD 11 New Fetter Lane, London, 1965.

Reliability assessment of metallized film capacitors using degradation failure model

ZHAO Jian-yin¹, LIU Fang¹, SUN Quan¹, ZHOU Jing-lun¹, WEI Xiao-feng², HE Shao-bo²

- (1. School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: The metallized film pulse capacitor is a key component of the inertial confinement laser fusion facility. For the high reliability capacitors, it is difficult to assess the reliability by using the traditional time-to-failure analysis method. By analyzing degradation mechanism of the metallized film capacitor, this paper presents a degradation failure model in which parameters can be estimated from the performance degradation measures of the capacitor. The estimation values of the unknown parameters in this model are 0.000 119 4 and 0.006 7, respectively. Both the failure probability density function (PDF) and the cumulative distribution function (CDF) can be presented by this degradation failure model. Based on these estimation values and the PDF/CDF, the reliability model of the metallized film capacitors is obtained. According to the reliability model, the probability of the capacitors to survive 10 000 shot is 0.988 5, the predicted lifetime of the capacitors is 23 461 (shot).

Key words: Degradation failure; Reliability; Metallized film capacitors; Probability density function(PDF); Cumulative distribution function (CDF)