

文章编号: 1001-4322(2006)09-1495-04

基于加速退化数据的金属化膜 脉冲电容器可靠性分析*

赵建印¹, 孙 权¹, 周经伦¹, 贺少勃², 魏晓峰²

(1. 国防科学技术大学 信息系统与管理学院 系统工程系, 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: 基于金属化膜脉冲电容器的失效机理, 研究了基于加速退化数据的金属化膜脉冲电容器可靠性评估问题, 给出了一个该型电容器的加速退化失效模型和参数统计推断方法。基于试验数据可求得该型电容器可靠性模型中未知参数的估计值分别为 9.0669×10^{-8} 和 0.022 1, 将该值代入失效分布函数即可确定电容器的失效模型, 由此模型求得该型电容器充放电 20 000 次的可靠度为 0.972 4。使用这种分析方式对金属化膜脉冲电容器进行可靠性分析将更能节省试验时间和费用。

关键词: 金属化膜脉冲电容器; 激光装置; 可靠性; 加速试验

中图分类号: TB114.3 **文献标识码:** A

金属化膜脉冲电容器是一种高可靠性、长寿命的器件, 目前的许多激光惯性约束聚变(ICF)试验装置(如美国的 NIF, OMEGA 等强激光装置)均是由数百台金属化膜自愈式高储能密度脉冲电容器来提供能量的^[1-2], 该型电容器的可靠性水平将对装置本身的可靠性水平和维护费用产生非常重要的影响。

传统的电容器可靠性分析是基于 Weibull 分布进行的^[3-4], 采用电容器的失效数据估计分布的未知参数并进一步对其进行可靠性评估, 但是与普通箔式电容器相比, 金属化膜电容器具有高可靠性、长寿命、软失效等特点, 在短时间内很难得到它的寿命数据, 这就给传统的可靠性分析方法带来了困难。文献[6]研究了正常应力情况下电容器的耗损失效, 给出了该型电容器的一种耗损失效模型。加应力试验常用于高可靠性、长寿命产品的可靠性分析中, 通过加应力试验可以快速地获取试验数据, 从而可以在较短的时间内对高可靠性长寿命产品进行可靠性评定。采用加大应力(如热应力、电应力、机械应力等)而又不改变产品的失效机理的方式, 使产品退化过程加速, 这样的试验称为加速退化试验。本文研究基于加速应力退化数据的金属化膜脉冲电容器的可靠性评估问题, 采用这种方式对电容器进行可靠性分析将比其它方法更能节约试验成本。

1 金属化膜电容器退化失效分析

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, 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”。在外施电压不断作用下, 电弱点处薄膜会先被击穿而形成放电通道, 在薄膜被击穿的同时, 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”^[5-7]。单次自愈过程所造成的仅是电容量极微小的损失, 数千次的自愈才会造成电容量明显下降。在使用过程中电容器不断发生自愈, 电容量不断降低, 当电容量下降量超过预定阈值时电容器将发生退化失效。

随着使用时间的增长, 电容器的容值逐渐下降。当电容量下降量处于一定的界限内时, 电容器的性能还是稳定的, 但一旦超过该界限, 电容器的性能便急剧恶化, 介质损耗迅速上升, 电容量也迅速衰减。对于工作在高场强下的储能金属化膜脉冲电容器, 当电容量损失超过 5% 时, 每次充放电造成的电容量损失会大大上升, 使得电容器的性能不再可靠, 因此以 5% 的电容量损失为金属化膜脉冲电容器工作寿命终止的指标^[6-7]。

2 加速退化失效模型

在充放电过程中, 金属化膜脉冲电容器是否发生自愈是随机的, 到 t 时刻某电容器发生的自愈次数记为

* 收稿日期 2005-09-19; 修订日期 2006-04-20

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 赵建印(1976—), 男, 博士, 讲师, 主要从事可靠性工程的相关研究; zhaojianyin@sohu.com。

$N(t) \{N(t) \geq 0\}$ 是一个计数过程, 我们用强度为 λ 的齐次 Poisson 过程来描述电容器的自愈过程。单次自愈仅会造成电容量的微小损失, 记第 $i(i=1, 2, \dots)$ 次自愈造成的微小电容损失量为 y_i 。根据文献 [8-9] y_i 的大小受自愈时电弱点处吸收能量 E 影响, 而电弱点吸收能量与电极厚度 d 的幂和工作电压 V 的幂成正比, 即

$$E \propto d^\alpha V^\beta \tag{1}$$

由于 d 是电容器的固有特性, 因此当在某一固定电压工作时, 可认为 $y_i(i=1, 2, \dots)$ 为独立同分布或正态分布 $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ 。 σ_y^2 反映了各次自愈能量间的差异, 一般可假设 σ_y^2 不受工作电压的影响。根据(1)式, 不同电压下, 显然 μ_y 是不同的, 它是电压 V 的函数, 可设

$$\mu_{y,V} = aV^b \tag{2}$$

到 t 时刻, 电容器的自愈次数为 $N(t)$, 它服从强度为 λ 的 Poisson 分布, 我们用其期望 $E[N(t)] = \lambda t$ 表示电容器自愈规律, 因此在某一电压 V 下, 到 t 时刻电容器的容值退化量可表示为

$$x_V(t) = \sum_{i=1}^{E[N(t)]} y_{i,V} = \sum_{i=1}^{\lambda t} y_{i,V} \tag{3}$$

由于 $y_{i,V}$ 服从正态分布, 因此 t 时刻的容值退化量 $x_V(t)$ 也服从正态分布 $N[\mu_V(t), \sigma_V^2(t)]$, 其均值和方差函数分别为

$$\mu_V(t) = E[x_V(t)] = \lambda t E[y_{i,V}] = a\lambda V^b t \tag{4}$$

$$\sigma_V^2(t) = \text{Var}[x_V(t)] = \lambda t \text{Var}[y_{i,V}] = \sigma_y^2 \lambda t \tag{5}$$

其中 $\text{Var}[\cdot]$ 表示方差函数。从(4)(5)式中可知 $x_V(t)$ 的方差函数与电压无关, 即 $\sigma_V^2(t) = \sigma^2(t)$ 。另记

$$k_1 = a\lambda, \quad k_2 = \sigma_y^2 \lambda \tag{6}$$

则容值退化量 $x_V(t) \sim N(k_1 V^b t, k_2 t)$ 。

当容值退化量达到电容初始值的 5% 时电容器发生退化失效, 记 $l = 0.05C_0$, 为失效阈值, C_0 表示电容器初始容值, 一般是一个已知量。则 t 时刻金属化膜脉冲电容器的失效概率为

$$F_V(t) = P\{x_V(t) \geq l\} = 1 - P\{x_V(t) < l\} = 1 - \Phi\left[\frac{l - \mu_V(t)}{\sigma(t)}\right] = \Phi\left(\frac{k_1}{\sqrt{k_2}} V^b t^{1/2} - \frac{l}{\sqrt{k_2}} t^{-1/2}\right) \tag{7}$$

式中 k_1, k_2, b 为未知参数, l 为电容器退化失效阈值, 为已知参数。当(7)式中的电压为正常工作电压时, 该模型即为电容器在正常工作条件下的失效模型。

3 基于加速退化数据的可靠性统计推断

加速退化分析的目的是利用高电压水平下的性能退化数据来推断正常应力水平下的电容器的失效模型, 下面我们对金属化膜脉冲电容器的加速退化数据进行统计分析。图 1 是强激光装置所用某型金属化膜脉冲电容器的加速退化数据示意图, 该型电容器的额定工作电压为 23 kV, 电容器退化失效阈值 $l = 2.8 \mu\text{F}$, 试验中取两种加速电压应力, 分别为 $V_1 = 30 \text{ kV}$ 和 $V_2 = 35 \text{ kV}$, 每种电压水平下各有 4 台电容器作容值退化试验, 电容器每 1 000 次充放电作 1 次容值测量以获取退化数据, 共进行 10 次测量, 试验数据形式为

$$\{x_{ijk} \mid j = 1, 2; i = 1, 2, 3, 4; k = 1, 2, \dots, 10\}$$

记加速应力水平数为 q 。

记 $k_1 V_1^b = r_1, k_1 V_2^b = r_2$, 则在两种加速电压下, 容值退化量 $x(t)$ 的均值函数分别为

$$\mu_1(t) = k_1 V_1^b t = r_1 t, \quad \mu_2(t) = k_1 V_2^b t = r_2 t \tag{8}$$

$x(t)$ 的方差函数 $\sigma^2(t) = k_2 t$ 与应力无关, 它们均是时间 t 的一次函数。首先对于固定的 $i(i=1, 2)$, 利用数据 $\{x_{ijk} \mid j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n\}$, 可求得每个测量时刻 t_k 时退化量的均值和方差的估计值

$$\hat{\mu}_{i,k} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ijk}, \quad \hat{\sigma}_{i,k}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ijk} - \hat{\mu}_{i,k})^2, \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{9}$$

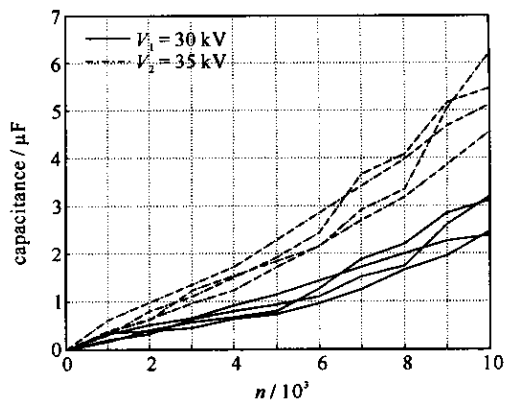


Fig. 1 Accelerated degradation of the metallized film capacitors
图 1 金属化膜脉冲电容器加速退化数据曲线

由于退化量均值函数和方差函数均为时间 t 的线性形式,因此由数据 $\{(\hat{\mu}_{i,k}, \hat{\sigma}_{i,k}^2) | k=1, 2, \dots, n; i=1, 2\}$ 可求得参数 r_1, r_2 的最小二乘估计值 $\hat{r}_1=0.2421, \hat{r}_2=0.4734$, 以及 k_2 在两种应力水平数据下的估计值 $\hat{k}_{2,i} (i=1, 2)$ k_2 与应力无关, 则进一步有

$$\hat{k}_2 = \frac{(\hat{k}_{2,1} + \hat{k}_{2,2})}{2} = 0.0221 \tag{10}$$

由
$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^b, \quad r_1 = k_1 V_1^b \tag{11}$$

可得

$$\hat{b} = \frac{\ln(\hat{r}_2/\hat{r}_1)}{\ln(V_2/V_1)} = 4.3507 \tag{12}$$

$$\hat{k}_1 = \frac{\hat{r}_1}{V_1^b} = 9.0669 \times 10^{-8} \tag{13}$$

因此在正常电压水平 $V_0 = 23 \text{ kV}$ 下,电容器退化量均值函数为 $\mu_0(t) = \hat{k}_1 V_0^b t$, 方差函数为 $\sigma_0^2(t) = \hat{k}_2 t$ 。将以上结果代入到(7)式中, 可得该型金属化膜脉冲电容器正常应力水平下的失效概率函数为

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\hat{k}_1 V_0^b t^{1/2}}{\sqrt{\hat{k}_2}} - \frac{l}{\sqrt{\hat{k}_2}} t^{-1/2}\right) = \Phi(0.5120 t^{1/2} - 18.8152 t^{-1/2}) \tag{14}$$

图 2 给出了该型电容器正常应力水平下的失效概率曲线。由其失效分布函数, 可求得 20 000 次充放电时电容器的可靠度为 $R(20\,000) = 1 - F(20\,000) = 0.9724$ 。

4 结束语

金属化膜脉冲电容器是一种高可靠性、长寿命器件, 在相对较短的时间内很难得到它的失效数据, 因此无法采用传统的基于失效数据的可靠性分析技术对其进行可靠性评估。本文研究了该型电容器基于加速退化数据的可靠性评估问题, 给出了该型电容器的加速退化失效模型和模型的参数估计方法并基于该模型得出了可靠性评估结果, 采用加速退化试验对其进行可靠性分析更能节省试验时间。

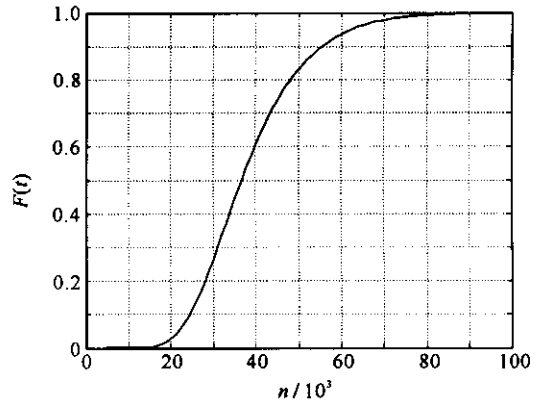


Fig. 2 Cumulative distribution function of the capacitors failure
图 2 金属化膜脉冲电容器正常应力水平下的失效概率曲线

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[C]//Proc of 12th IEEE International Pulsed Power Conference. 1999 :118-121.

[2] 周丕璋, 郭良福, 陈德怀, 等. 激光聚变主放大器能源系统述评[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(4) :346-351. (Zhou P Z , Guo L F , Chen D H , et al. Overview of main amplifier power conditioning for the laser fusion. *High Power Laser and Particle Beams* , 2003 , **15**(4) :346-351)

[3] Larson D W , MacDougall F W , Hardy P , et al. The impact of high energy density capacitors with metallized electrode in large capacitor banks for nuclear fusion application[C]//Proc of 9th IEEE International Pulsed Power Conference. 1993 :735-742.

[4] Merritt B T , Whitham K. Performance and cost analysis of large capacitor banks using Weibull statistics and MTBF[C]//Proc of 3rd IEEE International Pulsed Power Conference. 1981.

[5] 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 metallized film pulse capacitors under high electric stress. *High Electric Technology* , 2000 , **26**(5) :27-29)

[6] 孙权, 钟征, 周经伦, 等. 自愈式金属化膜脉冲电容器损耗失效模型[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)

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

[8] 代新, 林福昌, 姚宗干, 等. 高场强下金属化膜脉冲电容器特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2000, **26**(2) :17-19. (Dai X , Lin F C , Yao Z G , et al. Test and research on properties of metallized film pulsed capacitors under high electric stress. *High Electric Technology* , 2000 , **26**(2) :17-19)

- [9] 胡仲霞,母发清. 金属化有机薄膜电容器的自愈机理及可靠性设计 [J]. 电子元件与材料 ,1998 ,17(4) :17-18.(Hu Z H , Mu F Q. Self-healing mechanism and improvement of reliability of metallized film capacitors. *Electronic Components and Materials* ,1998 ,17(4) :17-18)

Failure analysis of metallized film pulse capacitors based on accelerated degradation data

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

(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 high energy density self-healing metallized film pulse capacitor has been applied to all kinds of laser facilities for their power conditioning systems , whose reliability and expense are straightforwardly affected by the reliability level of capacitors. Reliability analysis of highly reliable devices , such as metallized film capacitors , is a challenge due to cost and time restriction. Accelerated degradation testing provides a way to predict its life cost and time effectively. A model and analysis based on accelerated degradation data of metallized film capacitors are described. Also described is a method for estimating the distribution of time to failure. The estimation values of the unknown parameters in this model are 9.0669×10^{-8} and 0.0221 , 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 that survive to 20 000 shots is 0.9724.

Key words : Metallized film pulse capacitor ; Laser facility ; Reliability ; Accelerated tests