

文章编号: 1001-4322(2009)08-1271-05

综合多种信息的金属化膜电容器可靠性评估^{*}

彭宝华, 周经伦, 金 光

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘 要: 金属化膜电容器是惯性约束聚变激光装置能源系统最重要的元器件之一,其可靠性水平对整个装置的可靠性和运行维护费用有着重要的影响。在分析金属化膜电容器失效机理的基础上,采用 Wiener 过程对其性能退化过程进行建模,得到了其寿命分布。在此基础上,提出了一种综合性能退化数据和寿命数据的可靠性评估方法。给出了一种评估精度的分析方法,对综合评估方法和基于性能退化数据评估方法的精度进行了分析,结果表明,综合评估方法的评估精度高于基于性能退化数据的评估方法的评估精度。

关键词: 金属化膜电容器; 惯性约束聚变; 可靠性评估; 性能退化数据; 寿命数据; Bootstrap 方法; Wiener 过程

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

惯性约束聚变(ICF)激光装置是在实验室条件下以强激光作为驱动源来实现热核聚变的装置,是当代重大研究课题,受到国际科学界普遍重视^[1-2]。能源系统是 ICF 激光装置的关键技术之一,一般由数千台金属化膜自愈式高储能密度脉冲电容器为其提供能量。金属化膜电容器的可靠性水平对能源系统及强激光装置本身的可靠性水平和运行维护费用有着重要的影响。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。但是与普通电容器相比,金属化膜电容器具有高可靠性、长寿命等特点,在短时间内很难得到足够的寿命数据,这给传统的可靠性分析方法带来了困难。与寿命数据相比,其性能退化数据更容易获取,近来一些学者提出基于性能退化数据的方法对其进行可靠性评估^[5-7]。在装置的研制和运行初期,基于性能退化数据的方法能够较好地解决金属化膜电容器可靠性评估的问题。然而,随着激光装置的运行,仍然能够得到电容器的少量寿命数据。两类数据都包含电容器的可靠性信息,而基于性能退化数据的评估方法没有利用寿命数据的可靠性信息。针对这一问题,基于信息融合的思想,提出了一种综合性能退化数据和寿命数据的可靠性评估方法。

本文在对金属化膜电容器的失效机理和性能退化过程进行分析的基础上,采用 Wiener 过程对其性能退化过程进行建模,得到了电容器的寿命分布。在此寿命分布的基础上给出了综合性能退化数据和寿命数据的金属化膜电容器的可靠性评估过程。为了分析所提出的综合评估方法的精度,定义评估精度为一定任务时间下可靠度区间估计的区间长度,采用 Bootstrap 方法得到了任务时间为 10 000 次和 20 000 次充放电的精度,对综合评估方法和基于性能退化数据评估方法的精度分析结果进行了比较。

1 金属化膜电容器的失效机理与性能退化过程

金属化膜脉冲电容器是由两张单面蒸涂厚 20~100 nm 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,从而使得这些区域的耐电强度较低,形成“电弱点”^[8-9]。金属化膜电容器在工作过程中首先外加电压充电,然后瞬间放电为能源系统提供能量。在充放电的过程中,由于外加电压不断作用,电弱点处薄膜会先被击穿而形成放电通道;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”^[8-9]。单次自愈过程所造成的仅是电容量极微小的损失,数千次的自愈才导致电容量明显减少。

随着电容器充放电次数的增加,电容器的容值逐渐下降。当电容器的容值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,导致电容器失效。对于工作在高场强下的储能金属化膜脉冲电容器,当电容量损失超过初始容值 5% 时,

^{*} 收稿日期:2008-09-11; 修订日期:2009-03-02

基金项目:国家高技术发展计划项目;国家自然科学基金项目(60701006)

作者简介:彭宝华(1981—),男,博士研究生,从事装备系统工程方面的研究;darkbluesss@163.com。

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^[9],其工作时间指的是充放电次数,工作寿命指其容值下降量小于 5% 时的充放电次数。

2 性能退化过程建模与寿命分布的推导

假设在工作时间 $t_0, t(t_0 < t)$ 电容器的容值分别为 $X(t_0), X(t)$, 则在时间段 $\Delta t = t - t_0$ 内容值的退化量为 $\Delta x = X(t) - X(t_0)$ 。根据电容器容值的退化过程,是很多次“自愈”造成的微小损失的和,而每一次“自愈”所造成的损失可以看成是相互独立的很小的随机量,因而 Δx 是很多相互独立的随机量的和。由中心极限定理, Δx 服从正态分布,即

$$\Delta x \sim N(\mu_{\Delta x}, \sigma_{\Delta x}^2) \quad (1)$$

由于工作时间 Δt 越长,容值退化量越大,因而 $\mu_{\Delta x}$ 和 $\sigma_{\Delta x}^2$ 应该与 Δt 有关。图 1 给出了 8 个电容器容值的随充放电次数的退化情况。由图 1 可以看出,容值退化量基本上随充放电次数线性增长,可以认为

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

即金属化膜电容器的容值退化过程为 Wiener 过程 $X(t; \mu, \sigma^2) = \mu t + \sigma W(t)$, 其中 $W(t)$ 为标准布朗运动方程, μ, σ^2 为未知参数。

根据金属化膜退化失效的定义,其失效时间(即寿命)为容值退化量首次达到失效阈值 D 的时刻,即

$$T = \inf\{t \mid \Delta x(t) \geq D, t \geq 0\}$$

文献[10]给出的失效时间 T 的分布为逆高斯分布

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\mu t - D}{\sigma \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu D}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-D - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (3)$$

式中: $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$ 是标准正态分布函数。概率密度函数为

$$f(t) = \sqrt{\frac{D^2}{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(D - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \quad (4)$$

3 综合性能退化数据和寿命数据的可靠性评估

共有 8 个电容器进行性能退化试验,电容器的试验环境(电压、温度等)与装置运行时电容器的环境相同。对每一个电容器,在第 0, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 6 000, 7 000, 8 000, 9 000, 10 000 次充放电后进行测量。即电容器数量 $N=8$, 每个电容器进行的容值测量次数 $n_i=11, i=1, 2, 3, 4$ 。

对第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个电容器,记其在时间 $\Delta t_{ij}(\Delta t_{ij}=t_{i(j+1)} - t_{ij})$ 内的退化量为 Δx_{ij} , 则有

$$\Delta x_{ij} = X_{i(j+1)} - X_{ij}$$

式中: X_{ij} 为电容器 i 在第 j 次测量时的容值, $j=0, 1, 2, \dots, 10$ 。

由式(2)得

$$\Delta x_{ij} \sim N(\mu \Delta t_{ij}, \sigma^2 \Delta t_{ij}) \quad (5)$$

得到基于性能退化数据的似然函数

$$L_1(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{n_i-1} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi \Delta t_{ij}}} \exp\left[-\frac{(\Delta x_{ij} - \mu \Delta t_{ij})^2}{2\sigma^2 \Delta t_{ij}}\right] \quad (6)$$

在装置的运行过程中,共有 $M=4$ 个电容器失效,其失效时间 $T_i(i=1, 2, \dots, M)$ 分别为第 23 674, 19 862, 30 125, 27 397 次。由寿命数据得到似然函数为

$$L_2(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^M \sqrt{\frac{D^2}{2\pi\sigma^2 T_i^3}} \exp\left[-\frac{(D - \mu T_i)^2}{2\sigma^2 T_i}\right] \quad (7)$$

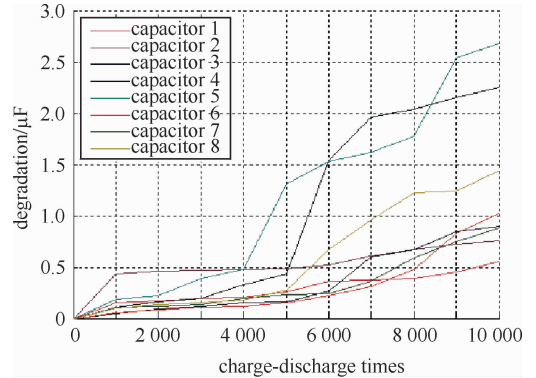


Fig. 1 Capacitance degradation curve

图 1 电容器容值退化曲线

式中：失效阈值 $D=2.75 \mu\text{F}$ 。综合寿命数据和性能退化数据的似然函数为

$$L(\mu, \sigma) = L_1(\mu, \sigma)L_2(\mu, \sigma) \tag{8}$$

解方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(\mu, \sigma)}{\partial \mu} = \frac{\partial \ln L_1(\mu, \sigma)}{\partial \mu} + \frac{\partial \ln L_2(\mu, \sigma)}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\mu, \sigma)}{\partial \sigma} = \frac{\partial \ln L_1(\mu, \sigma)}{\partial \sigma} + \frac{\partial \ln L_2(\mu, \sigma)}{\partial \sigma} = 0 \end{cases} \tag{9}$$

得到 μ, σ 的极大似然估计 $\hat{\mu}=0.000\ 113\ 6, \hat{\sigma}=0.007\ 7$ 。另外，为了对比，我们给出仅使用性能退化数据的评估结果。由性能退化数据和式(6)得到仅使用性能退化数据时 $\hat{\mu}'=0.000\ 119\ 5, \hat{\sigma}'=0.005\ 7$ 。

4 评估精度分析

本文定义评估精度为任务时间 τ 下电容器可靠度 R_τ 的置信区间的长度(置信水平为 $1-\alpha$)，将采用 Bootstrap 方法分别给出基于性能退化数据评估方法的精度分析方案和综合评估方法的精度分析方案，并对两者的精度分析结果进行比较。

4.1 基于性能退化数据评估方法的精度分析

记电容器性能退化原始数据为 $\Delta x = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N]$ ，其中 Δx_i 表示电容器 $i (i=1, 2, \dots, N)$ 的性能退化数据。从原始数据中抽取 B 组样本，每组样本容量为 N ，记为

$$\begin{aligned} \Delta x^{*(1)} &= [\Delta x_1^{*(1)}, \Delta x_2^{*(1)}, \dots, \Delta x_N^{*(1)}] \\ \Delta x^{*(2)} &= [\Delta x_1^{*(2)}, \Delta x_2^{*(2)}, \dots, \Delta x_N^{*(2)}] \\ &\vdots \\ \Delta x^{*(B)} &= [\Delta x_1^{*(B)}, \Delta x_2^{*(B)}, \dots, \Delta x_N^{*(B)}] \end{aligned}$$

对第 $b(b=1, 2, \dots, B)$ 组自助性能退化样本，对式(6)的似然函数分别对参数 μ, σ 求偏导并令偏导为 0 构造方程组，得到 μ, σ 的自助估计 $\hat{\mu}^{*(b)}, \hat{\sigma}^{*(b)}$ ，从而得到电容器的寿命分布和额定任务时间 τ 下的可靠度的自助估计 $R_\tau^{(b)}$ 。将 $R_\tau^{(b)}, b=1, 2, \dots, B$ 从小到大排序，则用百分位法得到 R_τ 的在置信水平为 $1-\alpha$ 下的双侧置信区间为 $[R_\tau^{(L)}, R_\tau^{(U)}]$ ，其中 $R_\tau^{(L)}$ 为 $\{R_\tau^{(b)}, b=1, 2, \dots, B\}$ 从小到大排序后第 $B\alpha/2$ 个数， $R_\tau^{(U)}$ 为 $\{R_\tau^{(b)}, b=1, 2, \dots, B\}$ 从小到大排序后第 $(1-\alpha/2)B$ 个数。评估精度为置信区间长度 $R_\tau^{(U)} - R_\tau^{(L)}$ 。

4.2 综合性能退化数据与寿命数据评估方法的精度分析

记电容器性能的原退化数据和寿命数据为 $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N, Q_{N+1}, \dots, Q_{N+M}] = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N, T_1, \dots, T_M]$ 。其中 Δx_i 表示电容器 $i (i=1, 2, \dots, N)$ 的性能退化数据， T_j 表示电容器 $j (j=1, 2, \dots, M)$ 的寿命。从原始综合数据中抽取 B 组样本，每组样本容量为 $N+M$ ，记为

$$\begin{aligned} Q^{*(1)} &= [Q_1^{*(1)}, Q_2^{*(1)}, \dots, Q_{N+M}^{*(1)}] \\ Q^{*(2)} &= [Q_1^{*(2)}, Q_2^{*(2)}, \dots, Q_{N+M}^{*(2)}] \\ &\vdots \\ Q^{*(B)} &= [Q_1^{*(B)}, Q_2^{*(B)}, \dots, Q_{N+M}^{*(B)}] \end{aligned}$$

第 $b(b=1, 2, \dots, B)$ 组综合数据中， $Q_k^{*(b)}$ 可能是电容器的性能退化数据，也可能是寿命数据，因而 Bootstrap 样本 $Q^{*(b)} = [Q_1^{*(b)}, Q_2^{*(b)}, \dots, Q_{N+M}^{*(b)}]$ 可能全部是性能退化数据，也可能全部是寿命数据。对 $Q^{*(b)}$ ，解方程(9)得到参数 μ 和 σ 的自助估计 $\hat{\mu}^{*(b)}, \hat{\sigma}^{*(b)}$ ，从而得到电容器的寿命分布和额定任务时间 τ 下的可靠度的自助估计 $R_\tau^{(b)}$ 。

同样，将 $R_\tau^{(b)}, b=1, 2, \dots, B$ 从小到大排序，则用百分位法得到 R_τ 的在置信水平为 $1-\alpha$ 下的双侧置信区间为 $[R_\tau^{(L)}, R_\tau^{(U)}]$ 。其中 $R_\tau^{(L)}$ 为 $\{R_\tau^{(b)}, b=1, 2, \dots, B\}$ 从小到大排序后第 $B\alpha/2$ 个数， $R_\tau^{(U)}$ 为 $\{R_\tau^{(b)}, b=1, 2, \dots, B\}$ 从小到大排序后第 $(1-\alpha/2)B$ 个数。评估精度为置信区间长度 $R_\tau^{(U)} - R_\tau^{(L)}$ 。

表 1 和表 2 给出了 Bootstrap 样本量 $B=1\ 000$ ，任务时间分别为 $\tau=10\ 000$ 和 $\tau=20\ 000$ 时，分别采用两种方法得到的电容器可靠度 R_τ 的点估计和区间估计。由表 1 和表 2 可以看出，在相同的任务时间和相同的置信水平下，综合评估方法得到的置信区间长度明显小于基于性能退化数据评估方法得到的置信区间长度，因而即综合评估方法的评估精度比基于性能退化数据评估方法的要高。

表 1 任务时间为 10 000 次的精度分析结果

Table 1 Results of precision analysis with a required charge-discharge times of 10 000

reliability assessment method	point estimate	confidence interval/length of interval	
		$1-\alpha=0.9$	$1-\alpha=0.8$
degradation data based method	0.995 6	[0.912 1,1]/0.087 9	[0.929 1,1]/0.070 9
method combining multiple information sources	0.997 2	[0.969 3,1]/0.030 7	[0.978 7,0.999 9]/0.021 3

表 2 任务时间为 20 000 次的精度分析结果

Table 2 Results of precision analysis with a required charge-discharge times of 20 000

reliability assessment method	point estimate	confidence interval/length of interval	
		$1-\alpha=0.9$	$1-\alpha=0.8$
degradation data based method	0.618 1	[0.227 7,0.999]/0.771 3	[0.284 9,0.978 4]/0.693 5
method combining multiple information sources	0.677 3	[0.356 6,0.883 4]/0.526 8	[0.421 4,0.863 0]/0.441 6

5 结 论

金属化膜电容器是惯性约束聚变装置能源系统最重要的元器件之一,其可靠性水平对整个装置的可靠性运行维护费用有着重要的影响,对其进行可靠性评估具有重要意义。由于金属化膜电容器高可靠性、长寿命的特点,在短时间内难以获得足够的寿命数据,基于 Weibull 模型的经典可靠性评估方法难以适用。与寿命数据相比,金属化膜电容器的性能退化数据更容易获取,在装置的研制和运行初期,基于性能退化数据的方法较好地解决了电容器的可靠性评估问题。然而,随着装置的运行,仍然能够得到少量寿命数据。两类数据都包含可靠性信息,而基于性能退化数据的评估方法没有利用寿命数据中可靠性信息。针对这一问题,基于信息融合的思想,提出了一种综合性能退化数据和寿命数据的可靠性评估方法。为了验证综合评估方法是否提高了评估精度,给出了一种精度分析方法,并对综合评估方法和基于性能退化数据评估方法的精度进行对比。

本文中对电容器进行可靠性评估时,仅有 4 个电容器失效,由精度分析的结果可以看出综合性能退化数据和寿命数据的评估结果有效地提高了可靠性评估精度。随着激光装置的运行,将会得到更多电容器寿命数据,采用综合评估方法能够进一步提高可靠性评估精度。本文所提出的综合评估方法也可为其它高可靠性、长寿命产品的可靠性评估提供参考。

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) [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 Pizhang, Guo Liangfu, Chen Dehuai, 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 3rd of IEEE International Pulsed Power Conference. 1981.
- [5] 赵建印, 刘芳, 孙权, 等. 基于性能退化数据的金属化膜电容器可靠性评估[J]. 电子学报, 2005, **33**(2):378-381. (Zhao Jianyin, Liu Fang, Sun Quan, et al. Reliability estimate of metallized-film pulse capacitor from degradation data. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **33**(2):378-381)
- [6] Sun Quan, Zhou Jinglun, Zhong Zheng, et al. Gauss-Poisson joint distribution model for degradation failure[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2004, **32**(5):1864-1868.
- [7] Zhao Jianyin, Liu Fang. Reliability assessment of the metallized film capacitors from degradation data[J]. *Microelectronic Reliability*, 2007, **47**(2-3):434-436.
- [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. (Dai Xin, Lin Fuchang, Li Jin, et al. Failure mechanism of metalized film pulse capacitors under high electric stress. *High Voltage Engineering*, 2000, **26**(5):27-29)
- [9] 郭大得. 金属化膜电容器的损耗分析与损坏机理[J]. 电力电容器, 1995, **2**:12-15. (Guo Dade. Degradation analysis and failure mechanism of metallized film capacitor. *Power Capacitor*, 1995, **2**:12-15)
- [10] Chikkara R S, Folks J L. The inverse Gaussian distribution[M]. New York: Marcell Dekker, 1989.
- [11] Gopikrishnan A. Reliability inference based on degradation and time to failure data: some models, methods and efficiency comparisons[D]. Michigan: University of Michigan, 2004.

- [12] Whitmore G A. Estimating degradation by a Wiener diffusion process subject to measure error[J]. *Lifetime Data Analysis*, 1995, **1**:307-319.
- [13] Sarieant W J, Zimheld J, Macdougall F W. Capacitors[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, **26**(5):1368-1392.
- [14] Efron B, Tibshirani R J. An introduction to the bootstrap[M]. New York: Chapman and Hall, 1993.
- [15] Cherbick M R. Bootstrap methods: a practitioner's guide[M]. Chichester: Wiley, 1999.

Reliability assessment of metallized film capacitor using multiple reliability information sources

Peng Baohua, Zhou Jinglun, Jin Guang

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The metallized film capacitor is one of the most important components of the inertial confinement fusion(ICF) facility. The reliability of the capacitor greatly influences the reliability and operational cost of the whole facility. Based on the analysis of the failure mechanism of the capacitor, we model the degradation process with Wiener process. The time-to-failure distribution is derived. A reliability assessment method combining performance degradation data and lifetime data is proposed. A precision analysis is made for both the proposed method and degradation data based reliability assessment method, using the precision analysis approach given in this paper. Results show that the proposed method has a better precision compared with the degradation data based method.

Key words: metallized film capacitor; ICF; reliability assessment; performance degradation data; lifetime data; Bootstrap method; Wiener process