

# 基于性能退化数据的金属化膜电容器可靠性评估

赵建印, 刘 芳, 孙 权, 周经伦

(国防科学技术大学人文与管理学院系统工程研究所, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 在对激光惯性约束聚变试验装置所用金属化膜脉冲电容器进行可靠性分析时, 利用假设其寿命分布为 Weibull 分布的传统可靠性分析方法所得结果不能满足工程要求. 作者通过分析电容的退化机理, 给出了一个该型电容器的寿命分布模型, 模型的求解是利用电容器的退化数据进行的, 它具有比 Weibull 分布模型更为精确的特点, 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以大量的节约试验成本且结果精度更高.

**关键词:** 金属化膜电容器; 可靠性; 退化失效; 惯性约束聚变 (ICF) 激光装置

**中图分类号:** TB114. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 02-0378-04

## Reliability Estimate of Metallized-Film Pulse Capacitor from Degradation Data

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

(System Engineering Institute, National University of Defense Technology, Hunan, Changsha 410073, China)

**Abstract:** High energy density self-healing metallized-film pulse capacitor is the key component of inertial confinement laser fusion facility. Generally, the Weibull distribution model is adopted as lifetime distribution to analyze the capacitor reliability, but the results can not satisfy the demands and the cost of tests is very high. By analyzing degradation mechanism of metallized-film capacitor, this paper uses nonhomogeneous compound Poisson process to describe performance degradation process, and then presents a life distribution model of metallized-film pulse capacitor. Using this model, we can analyze the capacitor reliability through degradation data. This technique can not only assess and verify reliability level of the capacitors but also save tests cost.

**Key words:** metallized-film pulse capacitor; reliability; degradation failure; inertial confinement fusion laser facility

## 1 引言

在激光惯性约束核聚变 (ICF) 试验装置中, 是由数百台脉冲电容器并联来提供初始能量的<sup>[1]</sup>. ICF 使用的电容器具有以下共同特点: 数目大、高储能密度、高可靠性、高电压. 为满足以上要求, 如国外的 NIF/OMEGA 或国内的神光 III 等强激光装置的能源系统均采用的是金属化膜自愈式高储能密度脉冲电容器, 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非常重要的影响.

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. 如何建立电容器的寿命分布模型并获取寿命分布参数, 是进行电容器可靠性验收从而达到控制脉冲电容器可靠性水平前必须解决的问题. 由于金属化膜电容器的软失效特性, 在短时间内很难得到它的寿命数据, 国外的 ICF 激光装置 NIF/OMEGA 等在进行可靠性验收前均认为电容器的寿命分布为 WEIBULL 分布<sup>[2]</sup>, 通过电容器容值下降数据进行曲线拟合、外推而获得电容器的失效时间, 并由所得到的失效时间对电容器的寿命进行预计. 但这种处理方式所得到的结果精度较差, 可信度低, 与实际情况不相符, 这对于电

容器的高可靠性要求来说显然不合适.

鉴于以上问题, 作者在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时, 通过分析电容器的微观失效机理而确定电容器的寿命, 利用国内电容器厂家所提供的电容器的性能退化数据进行了可靠性分析. 利用退化信息进行可靠性分析, 对于高可靠性、长寿命器件来说是一个非常有效的方法, 它通过产品的微观退化机理来确定寿命模型, 同时不需要进行大量的产品的寿命试验, 从而可节约费用及时间.

## 2 金属化膜脉冲电容器损耗机理

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, 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”<sup>[3]</sup>。由于金属化膜脉冲电容器的这种自愈特性,介质击穿所造成的结果只是很微小的电容量损失,而不是击穿短路,因此将金属化膜电容器的这一特性称为“软失效”。电容器的电容量损失是许多次自愈的积累效果。除了电容器自愈会导致容值下降外,电容器元件两端面喷金层的恶化也会导致容值下降。由于金属薄膜中电弱点存在的随机性,因此在某段时间内电容器是否产生自愈可认为是随机的。随着充放电不断进行,介质逐渐损耗,薄膜则不断变薄,在相同的时间内电容器自愈的可能性会不断增大,相同时间段内的自愈次数也会增多。

随着电容器介质不断损耗,使用中不断发生自愈使电容器的容值逐渐下降。当容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<sup>[4]</sup>。

图 1 给出了从一批电容器随即抽取的 8 个电容器进行 10000 次正常工作条件下的充放电试验的容值退化情况。该试验是每充放电 1000 次记录一次容值的,图中横坐标为充放电次数,纵坐标为电容器容值。

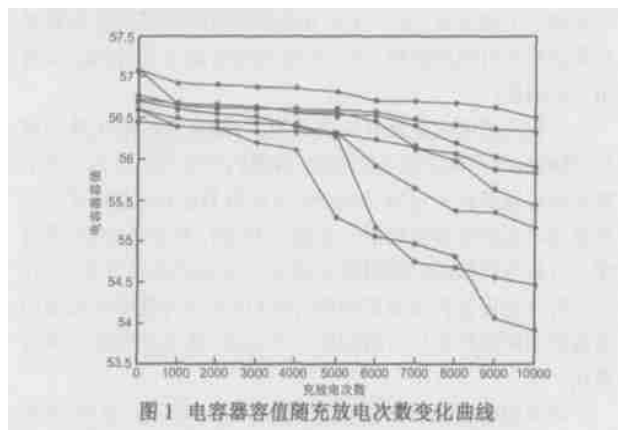


图 1 电容器容值随充放电次数变化曲线

### 3 基于电容器容值退化数据的可靠性分析

根据以上分析,我们认为在某一给定时间内电容器所产生的“自愈”次数是随机的,服从非齐次 Poisson 过程,强度函数  $\lambda(t) = \lambda \cdot t$ , 其中的  $\lambda$  为未知参数。

在某一给定时刻  $t$ , 假设电容器容值  $C(t)$  服从正态分布, 则电容器在时间的容值下降量  $C(t) = C_0 - C(t)$  ( $C_0$  为电容器的初始电容值) 也服从正态分布, 即

$$C(t) \sim N(\mu(t), \sigma^2(t)) \quad (1)$$

其中的  $\mu(t)$  和  $\sigma(t)$  为未知时变参数。

根据电容器失效的定义, 在  $t$  时刻, 电容器仍为正常的概率为

$$P\{\text{电容器正常}\} = P\{C(t) > 5\% \cdot C_0\} = P\{C(t) > C\} \quad (2)$$

其中  $C = 5\% \cdot C_0$ , 它为固定已知参数。

用  $F(t)$  表示在  $t$  时刻电容器的失效概率, 则

$$F(t) = P\{C(t) > 5\% \cdot C_0\} = 1 - P\left\{C(t) \leq 5\% \cdot C_0\right\} \\ = 1 - P\{C(t) \leq C\} = 1 - \left\{\frac{C - \mu(t)}{\sigma(t)}\right\} \quad (3)$$

其中

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2}$$

为求式(3), 只要求出电容下降量的均值  $\mu(t)$  和标准差  $\sigma(t)$  即可。

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

$$Y_i \sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2), i = 1, 2, \dots$$

其中  $Y_i$  表示电容器第  $i$  次自愈过程所造成的电容损失;  $\mu_Y$  和  $\sigma_Y$  为未知固定参数, 并记  $EY_i^2 = \sigma_Y^2$ ,  $\mu_Y$ 、 $\sigma_Y$  和  $\lambda$  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。

设在时刻电容器自愈次数为  $N(t)$ , 则  $\{N(t), t \geq 0\}$  为强度函数为  $\lambda(t)$  的非齐次 Poisson 过程, 且与  $\{Y_n, n \geq 0\}$  独立, 由此可知,  $t$  时刻电容损失量为

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

因此,  $\{C(t), t \geq 0\}$  为一个复合非齐次 Poisson 过程。

$$\text{记 } m(t) = \int_0^t \lambda(t) dt = \frac{1}{2} t^2 = t^2 \triangleq \lambda(t) \cdot t, \text{ 则}$$

$$P\{N(t) = n\} = \exp\{-m(t)\} \cdot m^n(t) / n! \\ = \exp\{-\lambda(t)t\} \cdot (\lambda(t) \cdot t)^n / n! \quad (4)$$

为计算  $C(t)$  的均值和标准差, 我们首先计算它的矩母函数:

$$\begin{aligned} \varphi_C(u) &= E[\exp\{u \cdot C(t)\}] \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E[\exp\{u \cdot C(t)\} | N(t) = n] P\{N(t) = n\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} E[\exp\{u(Y_1 + \dots + Y_n)\} | N(t) = n] P\{N(t) = n\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_{Y_1}(u) \cdot e^{-\lambda(t)t} \cdot (\lambda(t)t)^n / n! \\ &= \exp\{\lambda(t)t(\varphi_{Y_1}(u) - 1)\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\varphi_{Y_1}(\mu)$  为  $Y_1$  的矩母函数, 上式对  $\mu$  微分, 得

$$E[C(t)] = \varphi_C'(0) = \lambda(t)t EY_1 = t^2 \mu_Y \\ \text{Var}[C(t)] = \varphi_C''(0) - (\varphi_C'(0))^2 = t^2 \sigma_Y^2$$

另记  $\sqrt{\lambda(t)} = \lambda$ , 则

$$\mu(t) = t^2 \mu_Y \cdot \lambda^2 \quad (6)$$

$$\sigma(t) = \sigma_Y \cdot t \cdot \lambda \quad (7)$$

将式(6)、式(7)代入式(3)可以得到金属化膜电容器的寿命分布函数

$$F(t) = 1 - \left\{ \frac{C - \mu(t)}{\sigma(t)} \right\} = 1 - \left\{ \frac{C - t^2 \mu_Y \cdot \lambda^2}{\sigma_Y \cdot t \cdot \lambda} \right\} \\ = 1 - \left\{ \frac{C}{\sigma_Y \cdot t \cdot \lambda} - \frac{\mu_Y}{\sigma_Y} \right\} = \left\{ \frac{\mu_Y}{\sigma_Y} - \frac{C}{\sigma_Y \cdot t \cdot \lambda} \right\} \quad (8)$$

其中  $\mu_Y$  和  $\sigma_Y$  为待估未知参数,  $C = 5\% \cdot C_0$  为已知参数。

### 4 模型参数估计及求解

为求的金属化膜电容器的寿命分布函数, 需估计出式(8)

中的三个未知参数.

假设  $n$  个电容器做充放电试验, 每 1000 次记录一次容值变化, 共测量  $m$  次, 数据形式如下:

$$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}$$

$$x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m}$$

$$\dots \dots$$

$$x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nm}$$

$x_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots$ ) 表示第  $i$  个电容器在第  $j$  次测量所得到的数据, 用  $x_{i0}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 表示第  $i$  个电容器的初始电容值. 从如上数据可得到各时刻电容器容值下降量:

$$\begin{aligned} x_{11} - x_{10}, x_{12} - x_{10}, \dots, x_{1m} - x_{10} \\ x_{21} - x_{20}, x_{22} - x_{20}, \dots, x_{2m} - x_{20} \\ \dots \dots \\ x_{n1} - x_{n0}, x_{n2} - x_{n0}, \dots, x_{nm} - x_{n0} \end{aligned} \quad (9)$$

由此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

$$\begin{aligned} \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m \\ \hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \dots, \hat{\mu}_m \end{aligned} \quad (10)$$

由这些数据, 采用最小二乘法, 进一步求得电容器容值退化量的均值  $^2\mu_y$  和标准差  $^2\sigma_y$  的系数的估计值, 即

$$\begin{aligned} ^2\mu_y = \hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i^2 \mu_i}{\sum_{i=1}^m t_i^4} \\ ^2\sigma_y = \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i^4 \mu_i}{\sum_{i=1}^m t_i^4} \end{aligned}$$

其中  $t_i$  表示第  $i$  次测量时电容器的充放电次数, 则可得

$$\frac{\mu_y}{y} = \frac{^2\mu_y}{y} = \frac{\hat{a}}{\hat{b}} \quad (11)$$

由此, 可求得金属化膜电容器寿命分布为

$$F(t) = \left[ \frac{\mu_y}{y} t - \frac{C}{y} t^{-1} \right] = \left[ \frac{\hat{a}}{\hat{b}} t - \frac{C}{\hat{b}} t^{-1} \right] \quad (12)$$

根据以上各式, 将 8 台电容器的试验数据进行分析处理, 可求得

$$\begin{aligned} \hat{a} &= 1.4744 \times 10^{-8} \\ \hat{b} &= 7.3796 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

图 2、图 3 分别给出了该型电容器寿命分布曲线和寿命分布概率密度曲线. 根据电容器的寿命分布函数, 可求的电容器平均寿命为 14005 次充放电; 第 10000 次充放电时电容器可靠的概率为.

## 5 与传统求解方式的比较

这里我们采用如国外强激光装置 NIF、OMEGA 等强激光装置进行金

属化膜电容器的可靠性评估时所使用的求解, 然后与前面的结果进行比较. 国外在对该型电容器进行可靠性分析时均假设该电容器服从 Weibull 分布, 利用性能退化数据外推获得伪寿命数据进而进行电容器的可靠性分析. Weibull 分布函数及其密度函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} \quad (13)$$

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m} \quad (14)$$

将 8 台电容器的电容值退化数据采用曲线拟合后外推到其电容值下将超过初始值 5% 时的充放电次数, 即通过外推获得 8 台电容器的伪寿命数据为 (17058, 47142, 10671, 13807, 17725, 10155, 15630, 31388), 将这些伪寿命数据作为定数结尾数据对电容器的 Weibull 寿命分布的参数进行估计, 可得

$$= 23250.3926, m = 1.8868$$

根据这两个参数可以计算出电容器在 10000 次充放电时保持正常的概率为  $R(10000) = 0.81585$ . 图 4 给出了两种模型下的寿命曲线对比.

## 6 结束语

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, 对该类型电容器进行可靠性分析时如果采用传统的研究方法则一方面分析结果与实际偏差较大而不能满足工程需要, 另一方面为获取该型电容器的寿命数据必需进行长时间的试验, 这就不可避免的造成了时间以及费用上的消耗.

金属化膜电容器具有软失效模式, 随着充放电次数的增加, 其电容值不断下降. 该类型电容器的失效与否以其电容下降是否超过其初始电容值的 5% 来进行判断的, 因此可以考虑使用电容器电容值的退化数据对其进行可靠性分析, 通过深入分析电容器的失效机理来确定电容器的寿命分布, 这样不仅可以使得分析结果更精确, 同时也不必为获取电容器的寿命数据而进行很长时间的破坏性试验, 既节省时间又节省费用.

该类型电容器的电容值不断退化是由其不断“自愈”所导致的, 金属膜的电弱点是由于制造过程中不可避免的带有杂质、薄膜厚度不均匀等因素造成的, 可认为电容器的自愈过程是随机的. 本文将电容器在给定时刻的自愈次数假设为服从非齐次 Poisson 分布而获得了电容器的寿命分布函数, 并通过计算该批电容器电容值下降量的均值与方差的值估计出了所

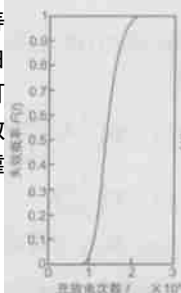


图 2 电容器寿命分布曲线



图 3 电容器寿命分布概率密度曲线

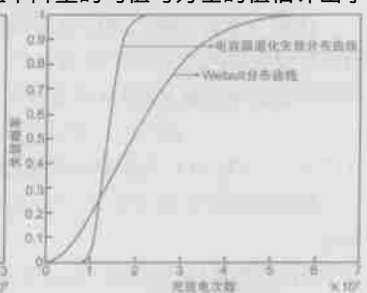


图 4 两种求解方式所得寿命分布的比较

得寿命分布函数中的未知参数,论文的最后还将所得的结果与传统的金属化膜电容器可靠性分析方法所得到的结果进行了比较。

#### 参考文献:

- [ 1 ] J B Ennis et al. Self-healing pulse capacitors for the national ignition facility(NIF) [ A ]. Proceeding of 12th IEEE International Pulsed Power Conference [ C ]. Monterey (USA) ,1999. 118.
- [ 2 ] D Larson ,F W MacDougall ,P Hardy et al. The impact of high energy density capacitors with metallized electrode in large capacitor banks for nuclear fusion application [ A ]. The 9th IEEE Pulsed Power Conference [ C ]. Albuquerque ,NM ,USA ,1993.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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.

#### 作者简介:



赵建印 男,1976 年 3 月生于河北安平,1999 年毕业于国防科学技术大学系统工程与应用数学系,1999 年 9 月到 2002 年 3 月期间在国防科学技术大学人文与管理学院管理科学与工程专业攻读硕士学位,并获管理学硕士,2002 年 4 月考入国防科学技术大学系统工程研究所攻读博士学位,主要研究方向为可靠性工程与质量管理. E-mail :zhaojianyin @sohu. com.

刘 芳 女,1978 年 6 月生于山东蓬莱,2000 年毕业于北京航空航天大学,2000 年 9 月考入长沙国防科学技术大学人文与管理学院,现攻读博士学位(硕博连读生),主要研究方向为系统管理与综合集成.

www.cnki.net