

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107730

# 基于加速应力试验的钽电容性能退化分析与建模研究<sup>\*</sup>

赵靖英<sup>1,2</sup>, 张珂<sup>1,2</sup>, 刘建猛<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130; 2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130; 3. 国网北京房山供电公司 北京 100000)

**摘要:**针对以3,4-乙烯二氧噻吩(PEDOT)导电聚合物的固体钽电容,本文以温度和湿度为加速试验应力,采用变间隔测量法搭建4种应力85℃/85%RH、95℃/70%RH、95℃/85%RH、110℃/85%RH水平下的钽电容恒定应力加速退化试验平台,获取性能退化参量电容量和损耗因数的退化数据。针对在温湿度加速应力下钽电容退化参数的非单一变化趋势,利用有序聚类算法进行退化区间划分;基于误差函数斜率的变化率确定最佳分类数,获得钽电容的稳定退化区间;基于数据重构和维纳过程对电容量和损耗因数进行拟合,拟合精度分别达到97%和95%,验证维纳过程建模的有效性;结合Copula函数建立基于随机效应维纳过程的钽电容二元加速退化模型,进行钽电容可靠性评估,推导正常应力水平下产品寿命,符合寿命12~15年的规定。结果表明二元加速退化模型能够进行钽电容的退化性能分析和寿命预测。

**关键词:** 钽电容;加速应力试验;有序聚类;Wiener过程;Copula函数

**中图分类号:** TH183.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Performance degradation analysis and modeling of tantalum capacitor based on accelerated stress test

Zhao Jingying<sup>1,2</sup>, Zhang Ke<sup>1,2</sup>, Liu Jianmeng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. State Grid Beijing Fangshan Power Supply Company, Beijing 100000, China)

**Abstract:** For solid tantalum capacitors with 3,4-ethylenedioxythiophene (PEDOT) conductive polymer, temperature and humidity are used as accelerated test stresses in this paper. Variable interval measurement method is used to build a constant stress accelerated degradation test platform for tantalum capacitors under four stress levels, which are 85℃/85%RH, 95℃/70%RH, 95℃/85%RH, 110℃/85%RH. Degradation data of the performance degradation parameters capacitance and loss factor are obtained. Aiming at the non-single change trend of the degradation parameters of tantalum capacitor under accelerated stress of temperature and humidity, ordered clustering algorithm is used to divide the degradation interval. Optimal classification number is determined by the change rate of error function slope, and the stable degradation interval of tantalum capacitor is obtained. Based on data reconstruction and Wiener process, the capacitance and the dissipation factor are fitted and the fitting accuracy reaches 97% and 95%, respectively. As a result, the effectiveness of Wiener process model is verified. Combined with Copula function, a binary accelerated degradation model of tantalum capacitor based on random effect Wiener process is established. Reliability evaluation method is researched and the product life under normal stress level which meets the product life requirement of 12~15 years is deduced. Results show that the binary accelerated degradation model can finish degradation performance analysis and life prediction of tantalum capacitor.

**Keywords:** tantalum capacitor; accelerated stress test; ordered clustering analysis; Wiener process; Copula function

收稿日期:2021-04-08 Received Date: 2021-04-08

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(51777057)、国家自然科学基金(51377044)、河北省自然科学基金(E2019202481)项目资助

0 引 言

钽电容器由于其在温度和频率范围内的稳定性、高可靠性以及高容积效率而广泛应用于现代电子产品。为进一步降低电子设备的故障率、提高使用寿命,钽电容的可靠性问题逐渐被重视<sup>[1]</sup>。

传统以二氧化锰( $\text{MnO}_2$ )为阴极的固体钽电容当加热超过  $380^\circ\text{C}$  时会释放氧气并改变材料结构还原为  $\text{MnO}_3$ ,同时被释放的氧气与钽基体相结合容易产生持续的放热反应甚至着火。基于 PEDOT 导电聚合物的钽电解电容由于没有足够的氧气存在于电介质周围,有效的解决了传统钽电解电容的持续放热反应<sup>[2]</sup>。但 PEDOT 在高温、高湿条件下容易发生降解,其导电率随着温度逐渐降低,原因被认为与氧化有关<sup>[3]</sup>;同时 PEDOT 在高湿情况下由原位聚合形成的薄膜电阻显著增加<sup>[4]</sup>。电容量和损耗因数是体现钽电容退化性能的重要参数,国内外研究学者进行了长期监测。Kim 等<sup>[5]</sup>给出了不同电压和温度下电容量的变化趋势和变化速率,将容量的变化分为老化区、电容急剧下降区和稳定电容退化区。Tarekegn 等<sup>[6]</sup>对不同环境条件下的聚合物钽电容器稳定性进行了研究,研究结果表明潮湿环境下相比于干燥环境电介质厚度随着频率的增加而降低的更迅速。Virkki 等<sup>[7]</sup>在不同温度下对钽电容进行了短期循环测试,实验结果表明电容器在进行电压步进测试时没有发生故障,但是其温度循环会随电压的增大而加速。Young 等<sup>[8]</sup>对高温下的聚合物钽电容进行研究,结果表明超过  $85^\circ\text{C}$  时会对电容器的损耗因数和等效串联电阻(ESR)产生较大影响。因此,有必要对高温高湿下导电聚合物钽电容进行性能退化分析。

针对性能退化的建模方法可归纳为基于回归分析模型和基于随机过程模型两大类<sup>[9]</sup>。近年来,基于随机过程模型受到了众多学者的关注。随机过程相对于回归分析的退化建模具有较高的精度<sup>[10]</sup>。Doksom 等<sup>[11]</sup>最先将维纳(Wiener)过程应用在产品的可靠性评估中。赵建印<sup>[12]</sup>提出了基于 Wiener-Einstein 过程和 Gamma 过程的退化失效分析方法,给出了一种基于扩散过程的退化失效分析方法。袁莉芬等<sup>[13]</sup>基于 Coplua 函数对光纤陀螺贮存进行了可靠性评估,有效解决了产品多参数可靠性评估的困难问题。孙曙光等<sup>[14]</sup>基于 Wiener 过程建立了万能式断路器的性能退化模型,基于首达时间的概念建立了剩余寿命预测模型。Tang 等<sup>[15]</sup>考虑产品的个体差异,以 Wiener 过程的漂移参数是应力相关的函数,扩散参数是固定值为假设,建立了基于随机效应的 Wiener 退化模型。夏新涛等<sup>[16]</sup>以时间序列表征滚动轴承的性能状况,基于泊松过程建立滚动轴承可靠度函数。以上学

者的研究均以单一的性能退化参数为指标建立了性能退化模型,往往无法满足可靠性建模的精度要求。虽然有学者提出将各性能退化参数处理为独立参数或假设其为正态分布,并在此基础上建立了相应的性能退化模型<sup>[17-20]</sup>。但是此方法精确度仍然不足。

针对此问题,本文以 PEDOT 导电聚合物的固体钽电容为研究对象,建立电容量和损耗因数二元退化模型。首先在实验室条件下搭建温湿度 4 种应力水平下的加速退化试验平台,获取主要退化参数电容量和损耗因数的试验数据;其次,采用有序聚类算法研究退化区间的划分方法;最后,结合 Copula 函数建立二元相关退化过程模型,完成钽电容可靠性评估,推导正常应力水平下的产品寿命,验证方法的可行性。

1 钽电容加速退化试验

本文选取某公司生产的钽电容为研究对象,其主要参数如表 1 所示。容量和损耗因数是钽电容性能退化的外在参数表征。针对钽电容长寿命的特点,根据主要退化参数,设计了 4 种应力水平  $85^\circ\text{C}/85\% \text{RH}$ 、 $95^\circ\text{C}/70\% \text{RH}$ 、 $95^\circ\text{C}/85\% \text{RH}$ 、 $110^\circ\text{C}/85\% \text{RH}$  下的加速退化试验方案,搭建了试验平台,设计的试验原理图如图 1 所示。

表 1 钽电容主要参数

| Table 1 Main parameters of tantalum capacitance |            |                     |     |
|-------------------------------------------------|------------|---------------------|-----|
| 参数                                              | 数值         | 参数                  | 数值  |
| 额定电压/V                                          | 6.3        | 最大损耗因数/%            | 10  |
| 额定容量/ $\mu\text{F}$                             | 330        | 失效容量/ $\mu\text{F}$ | 264 |
| 工作湿度/%RH                                        | 0 ~ 85     |                     |     |
| 工作温度/ $^\circ\text{C}$                          | -55 ~ +125 |                     |     |

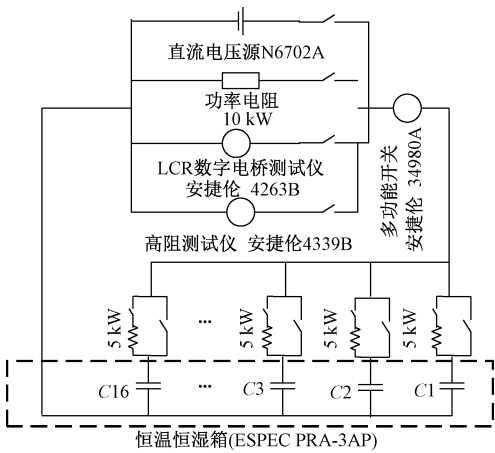


图 1 试验原理图

Fig. 1 Experimental principle diagram

由图1可知,Agilent N6702A 为电容提供 6.3 V 稳定直流电压;Agilent 4263B LCR 测量电容量和损耗正切值;将样品放入恒温恒湿箱 ESPEC PRA-3AP 中,设置相应的温度与湿度;采用 Agilent 34980A 进行样品与电源的

切换操作。

为了提高试验效率,尽可能缩短试验时间,加速试验采用变测量周期方法获取退化数据,各应力下退化数据采集间隔如表2所示,4组试验应力与样品数量如表3所示。

表2 各应力下退化数据采集时刻

Table 2 Degeneration data acquisition time under different stresses

| 试验应力水平         | 数据测量时刻/h                                                                                                                             |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 85 °C/85 % RH  | 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 200, 1 400, 1 600, 1 800, 2 000, 2 200, 2 400, 2 600, 2 800, 3 000 |
| 95 °C/70 % RH  | 0, 50, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200, 1 400, 1 600, 1 800, 2 000, 2 200, 2 500, 2 800, 3 200                            |
| 95 °C/85 % RH  | 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 200                                                                |
| 110 °C/85 % RH | 0, 12, 25, 37, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200, 1 300, 1 500, 1 700, 1 800             |

表3 试验应力与样品数量

Table 3 Experiment stresses and number of samples

| 试验应力水平         | 试验样品数量 |
|----------------|--------|
| 85 °C /85 % RH | 20     |
| 95 °C/70 % RH  | 11     |
| 95 °C/85 % RH  | 15     |
| 110 °C/85 % RH | 20     |

为了防止测量线路上的电流过大,保证钽电容测试过程中不会因电流过大而损坏。在测试过程中,被测电容分别与 10 k $\Omega$  的电阻串联。在每次暂停试验进行测量时,保持湿度不变的前提下将环境温度降到 25 °C,并且每个电容通过 5 k $\Omega$  电阻充分放电。4组应力水平下测量的电容量与损耗因数退化量如图2、3所示。

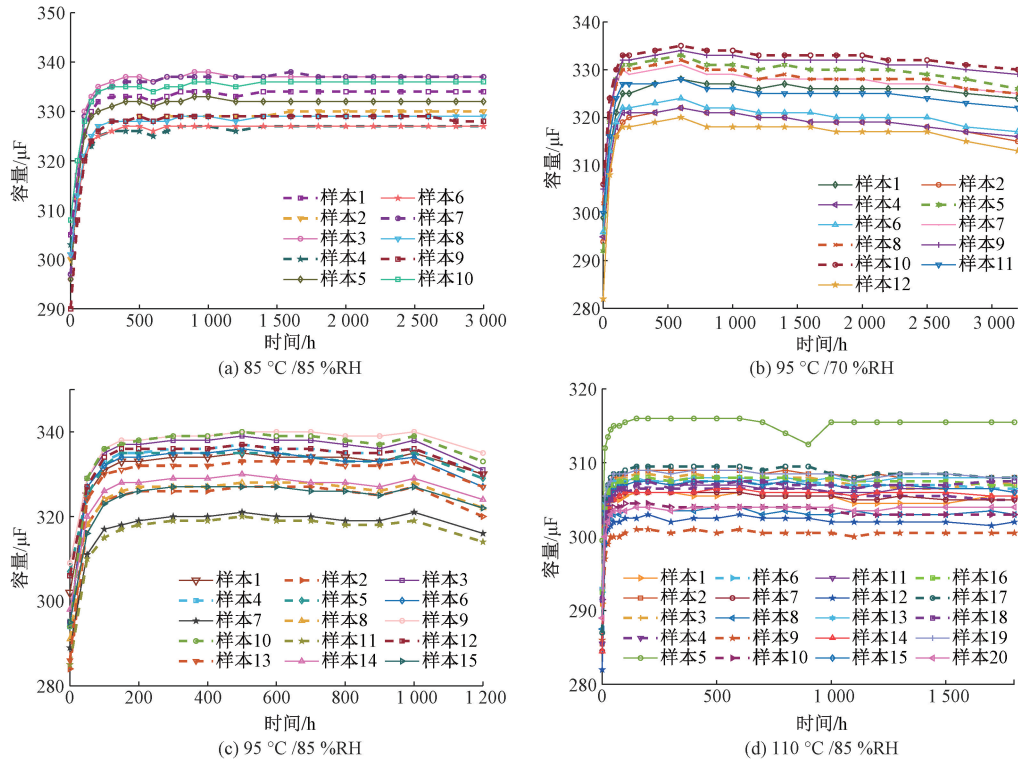


图2 4种应力下的容量退化数据

Fig. 2 Capacitance degradation under four stresses

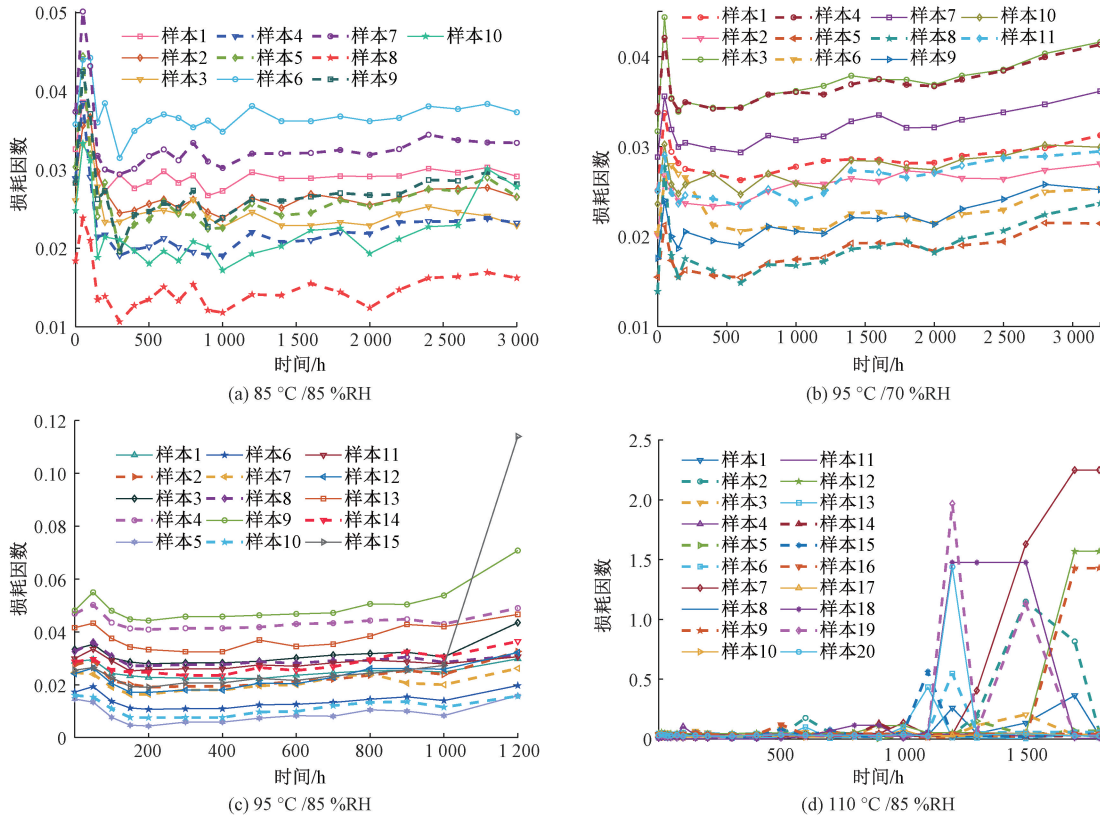


图3 4种应力下的损耗因数退化数据

Fig. 3 Dissipation factor degradation under four stresses

## 2 钽电容性能退化聚类方法

通过试验测量某一应力水平下  $n$  个钽电容样品, 设  $x_1, x_2, \dots, x_m$  为钽电容退化参数的  $m$  个测点, 则应力水平  $S$  下某一参数退化数据的有序矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

受湿度影响, 容量和损耗因数在试验前期快速增大, 在计算类直径时会导致精度降低, 为了降低计算误差的影响, 保证分类结果的可靠性, 将式(1)中的样本标准化, 标准化处理后数据变为  $w_{ij}$ :

$$w_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq j \leq m} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq j \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq j \leq m} \{x_{ij}\}} \quad (2)$$

其中,  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

标准化后有序样本矩阵为:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $w_{ij}$  为第  $i$  个被测钽电容在第  $j$  个测点的值。

有序聚类的基本原则是使同类之间的类直径(离差平方和)达到最小, 故首先要计算应力  $S$  下获得的  $n$  个钽电容退化数据的类直径。设  $\{w_{pi}, w_{p(i+1)}, \dots, w_{pj}\}$  为某个钽电容  $p$  退化参数分类后的子区间, 其中  $1 \leq i \leq j \leq m$ , 则某个钽电容  $p$  的类内数据均值  $w_{pij}$  为:

$$w_{pij} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{i=1}^j w_{pi} \quad (4)$$

式中:  $1 \leq i \leq j \leq m$ 。

为了简化表示, 将样本  $w_j$  记为  $I$ 。若把  $m$  个测点分成  $k$  类, 其中一种分法可表示为  $p(m, k): \{I_1 = 1, I_{1+1}, \dots, I_{2-1}\}; \{I_2 = 1, I_{2+1}, \dots, I_{3-1}\}; \dots; \{I_k = 1, I_{k+1}, \dots, m\}$ 。其中  $I_1 < I_2 < \dots < I_k < m$ , 此分割方式的误差函数  $\delta[p(m, k)]_a$  为:

$$\delta[p(m, k)]_a = \sum_{j=1}^k D(I_j, I_{j+1} - 1) \quad (5)$$

式中:  $D(I_j, I_{j+1} - 1)$  表示某个子类的类直径。

首先进行一次有序聚类, 根据最优分类算法, 由归纳法得到。

当  $k=2$  时, 最佳分类为:

$$\delta[p(m, 2)] = \min_{2 \leq j \leq m} \{D(1, j-1) + D(j, m)\} \quad (6)$$

当  $k=m$  时, 最佳分类为:

$$\delta[p(m, k)] = \min_{k \leq j \leq m} \{D(j-1, k-1) + D(j, m)\} \quad (7)$$

式(7)将  $m$  个测点分为  $k$  类时,根据式(6)可认为存在  $\{1, 2, \dots, j-1\}$  和  $\{j, j+1, \dots, m\}$  两大类,  $\{j, j+1, \dots, m\}$  单独成一类,再将  $\{1, 2, \dots, j-1\}$  分为  $k-1$  类;最后选择一个最优  $j$  可得到  $m$  个测点的最优分段方式。

应力水平为  $95^\circ\text{C}/70\%\text{RH}$  时,容量退化数据的最优分段结果见表4所示。表中最优分段结果1~18分别代表0~3 200 h的18个测点,并将每一类的最后一个测点设为数据退化曲线的分段点。

在确定最佳分类数时,本文利用误差函数  $\delta[p(m, k)]$  斜率  $\beta(k)$  的变化率  $\alpha(k)$ 。 $k$  和  $k+1$  次分割对应的误差函数斜率为:

$$\beta(k) = p(m, k+1) - p(m, k) \quad (8)$$

则第  $k$  次分割的斜率变化率为:

$$\alpha(k) = \left| \frac{\beta(k) - \beta(k-1)}{\beta(k) - \beta(k+1)} \right| \quad (9)$$

当  $\alpha(k)$  最大时,其最佳分类数为  $k$ 。

表4 应力水平为  $95^\circ\text{C}/70\%\text{RH}$  时容量最优分段结果

Table 4 Clustering optimization of capacitance at  $95^\circ\text{C}/70\%\text{RH}$

| 分类数      | 误差 $\delta$ | 最优分割结果                                                        |
|----------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| 1        | 0.896 0     | 1~18                                                          |
| 2        | 0.134 4     | 1, 2~18                                                       |
| $\vdots$ | $\vdots$    | $\vdots$                                                      |
| 17       | 0           | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15~16, 17, 18  |
| 18       | 0           | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 |

由表4可知,当钽电容的分类数  $k=2$  时,根据式(11),  $\alpha(k)$  达到最大为17.07,即容量退化0~50 h分为一类,50~100 h分为一类,100~3 200 h分为一类。由图2(b)可知,100 h容量还未达到最大值,钽电容内部水分还未达到平衡,不能确定退化起点,所以引入二次有序聚类方法,即对100~3 200 h的测点继续应用有序聚类算法,分类结果见表5,其中最优分段结果1~16分别代表100~3 200 h的16个测点。

表5 容量二次有序聚类分割结果

Table 5 Two-step optimal clustering results of capacitance at  $95^\circ\text{C}/70\%\text{RH}$

| 分类数      | 误差函数     | 最优分割结果                                               |
|----------|----------|------------------------------------------------------|
| 1        | 2.459 1  | 1~16                                                 |
| 2        | 1.061 7  | 1~7, 8~16                                            |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                                             |
| 14       | 0.002 2  | 1, 2~3, 4, 5, 6~7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16  |
| 15       | 0.000 1  | 1, 2~3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 |

由表5可知,当分类数  $k=2$  时,  $\alpha(k)$  达到最大为22.67,即100~1 200 h一类,1 200~3 200 h一类。综上,将容量的退化分为4个阶段,容量均值退化趋势和分段如图4所示。

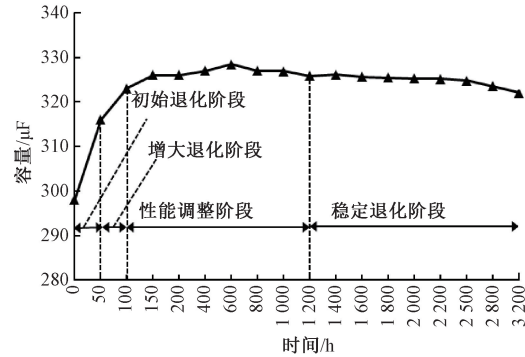


图4 应力水平为  $95^\circ\text{C}/70\%\text{RH}$  容量的退化区间划分

Fig. 4 Degradation regime division of capacitance at  $95^\circ\text{C}$  and  $70\%\text{RH}$

当分类数  $k=4$  时,  $\alpha(k)$  达到最大为41.83,即损耗因数的退化0~50 h、50~100 h、100~1 200 h、1 200~3 200 h共分为4类,损耗因数均值的退化区间如图5所示。

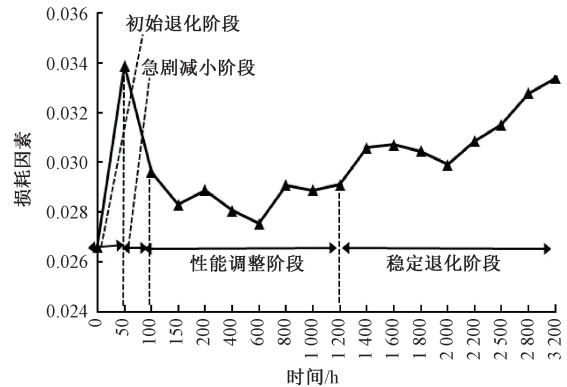


图5 应力水平为  $95^\circ\text{C}/70\%\text{RH}$  损耗因数的退化趋势和分段

Fig. 5 Degradation regime division of dissipation factor at  $95^\circ\text{C}$  and  $70\%\text{RH}$

同理,根据本方法得到应力水平为  $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$  分类结果:容量的变化可分为0~100 h、100~1 000 h、1 000~3 000 h 3个阶段;损耗因数的变化可分为0~50 h、50~150 h、150~900 h、900~3 000 h 4个阶段;应力水平为  $95^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$  时的分段结果:容量的变化可分为0~50 h、50~400 h、400~1 200 h 3个阶段,损耗因数的变化可分为0~50 h、50~150 h、150~400 h、400~1 200 h 4个阶段;应力水平为  $110^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$  时的分段结果:容量的变化可分为0~25 h、25~150 h、150~1 800 h 3个阶段,损耗因数的变化可分为0~12 h、12~150 h、150~1 800 h 3个阶段。

### 3 基于双参数的钽电容性能退化建模

#### 3.1 基于随机效应 Wiener 过程的钽电容加速退化模型的建立方法

##### 1) 钽电容 Wiener 退化过程

设  $X(t)$  为钽电容在  $t$  时刻的性能参数退化量,其性能参数退化的增长规律可用  $X(t)$  的均值函数  $E[X(t)]$  表示,钽电容的性能参数在环境应力下缓慢退化,在某时刻  $t_i$  其性能退化量为  $X(t_i)$ 。在连续的时间内受环境应力而引起的钽电容退化的微小增量  $h$  可以看做是一个随机变量,在时间  $[0, t_i]$  内,性能退化增量  $\Delta X(t)$  可看做无数个微小退化增量  $h_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的和,设微小增量  $h_i$  的分布均值是  $\mu$ , 方差是  $\sigma^2$ 。

则当  $n$  很大时,根据中心极限定理,随机变量  $\sum (h_i - n\mu) / \sqrt{n}\sigma$  的分布收敛于标准的正态分布,即钽电容的退化量  $X(t)$  的均值函数为  $E[X(t)] = \mu t$ 。

钽电容的退化过程具有动态特性和随机特性,样本的个体差异可通过将 Wiener 过程模型参数设为随机参数来描述,钽电容的 Wiener 退化过程可表示为:

$$X_{ij}(t) = x_{ij} + \mu_{ij}\lambda(t) + \sigma_{ij}B(\lambda(t)) \quad (10)$$

其中,  $X_{ij}$  为钽电容在应力水平为  $S_i (i = 1, 2, \dots, r)$  下第  $j (j = 1, 2, \dots, n_i)$  个样本的容量或损耗因数在时刻  $t_k$  的退化量;  $x_{ij}$  为应力  $S_i (i = 1, 2, \dots, r)$  下第  $j (j = 1, 2, \dots, n)$  个样本的容量或损耗因数的初始退化量;  $\lambda(t)$  表示钽电容每个性能参数的时间变换函数,描述了容量和损耗因数是非线性退化的;  $\mu_{ij}$  为钽电容在应力水平  $S_i$  下第  $j$  个样本的漂移参数,描述了其退化速率;  $\sigma_{ij}(m)$  为钽电容在应力水平  $S_i$  下第  $j$  个样本的扩散参数,描述了随机因素对其的影响。

设钽电容失效阈值为  $D$ , 此刻表示容量或损耗因数首次达到的时间,则其寿命  $T$  可定义为:

$$T = \inf\{t | X(t) \geq D\} \quad (11)$$

其中,寿命  $T$  服从逆高斯分布,所以其概率分布函数和概率密度函数可表示为:

$$F_T(t) = f\left(\frac{\mu\lambda(t)-D}{\sigma\sqrt{\lambda(t)}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu D}{\sigma}\right) \phi\left(\frac{-D-\mu\lambda(t)}{\sigma\sqrt{\lambda(t)}}\right) \quad (12)$$

$$f_T(t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}(\sigma)^2\lambda(t)^3} \exp\left[-\frac{(D-\mu)^2}{2(\mu)^2\lambda(t)}\right] \quad (13)$$

其中,  $\phi(\cdot)$  为标准正态分布。

钽电容可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - F_T(t) \quad (14)$$

##### 2) 基于 Wiener 过程的参数估计

为了精确估计加速退化模型中的相关未知参数与

Wiener 过程中的随机参数,需对每个样品的漂移参数、扩散参数和时间变换参数进行估计。

由 Wiener 过程的性质可知,性能退化增量为  $\Delta X_{ijk} \sim (\mu_{ij}\Delta\lambda(t_{ijk}), \sigma_{ij}^2\Delta\lambda(t_{ijk}))$ , 则似然函数为:

$$L(\mu_{ij}, \sigma_{ij}, \gamma_{ij}) = \prod_{k=1}^p \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ij}^2\Delta\lambda(t_{ijk})}} \exp \times \left( -\frac{\Delta X_{ijk} - \mu_{ij}\Delta\lambda(t_{ijk})}{2\sigma_{ij}^2\Delta\lambda(t_{ijk})} \right) \quad (15)$$

其中,  $\Delta\lambda(t_{ijk}) = \lambda(t_{ijk}) - \Delta\lambda(t_{ijk-1}) = t_{ijk}^{\gamma_{ij}} - t_{ijk-1}^{\gamma_{ij}}$ 。

##### 3) 加速退化模型

为了描述不同钽电容性能退化的个体差异,将漂移参数  $\mu$  设为随机参数,假设在应力  $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$  下性能参数的漂移参数  $\mu_i$  服从正态分布,即  $\mu_i \sim N(\theta_i, \eta_i)$ 。在加速应力试验条件下,钽电容分别在 4 种不同温湿度的应力下进行退化试验,为了准确描述加速应力与钽电容性能退化的关系, Wiener 过程漂移参数  $\mu$  应为试验应力  $S_i$  的函数,表示为:

$$\mu_{ij} = \mu(S_i, \varphi_j) \quad (16)$$

其中,  $\varphi_j$  为函数未知参数向量,不同的加速模型,未知参数的数量不同。

本试验涉及温度和湿度两个应力,因此采用 Peck 加速模型,在应力  $S_i$  下第  $j$  个样本性能参数的漂移参数,即 Peck 加速退化模型中的退化速率  $\mu_{ij}$  表示为:

$$\mu_{ij} = a_j(H_i)^{-b} \exp\left(\frac{c}{T_i}\right) \quad (17)$$

其中,  $a_i, b_i, c_i$  为应力  $S_i$  下的 3 个未知参数;  $H_i$  为相对湿度;  $T_i$  为绝对温度。

式(17)分为两部分来考虑,将  $(H_i)^{-b} \exp\left(\frac{c}{T_i}\right)$  看做加速应力对漂移参数的影响,将  $a_j$  看做是不同钽电容样品对漂移参数的影响,设其服从正态分布  $a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$ , 则漂移参数  $\mu_i$  服从的正态分布为:

$$\mu_i \sim N\left[\mu_a(H_i)^{-b} \exp\left(\frac{c}{T_i}\right), \sigma_a^2(H_i)^{-2b} \exp\left(\frac{2c}{T_i}\right)\right] \quad (18)$$

设定漂移参数、扩散参数为随机性参数,进一步采用最大似然估计作为其估计值,其对数似然函数:

$$\begin{aligned} \ln L(\mu_a, \sigma_a, b, c) = & \sum_{i=1}^r \left[ \left( -\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (\hat{\mu}_{ij}) - \mu_a(H_i)^{-b} \exp\left(\frac{c}{T_i}\right)}{2(\sigma_a)^2(H_i)^{-2b} \exp\left(\frac{2c}{T_i}\right)} \right) - \right. \\ & \left. \frac{n_i}{2} \ln(2\pi) - \frac{n_i}{2} \ln(\sigma_a) + \frac{n_i c}{2T_i} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

为了通过加速模型获得任意应力下钽电容的可靠性指标,设某一应力水平下的时间变换参数为 $\lambda_0(t)$ ,漂移参数 $\mu_0 \sim N(\theta_0, \eta_0)$ ,即

$$\mu_0 \sim N\left(\mu_a(H_0)^{-b} \exp \frac{c}{T_0}, \sigma_a^2(H_0)^{-b} \exp \frac{2c}{T_0}\right) \quad (20)$$

根据式(15)、(22),由连续型随机变量的全概率公式可得任意应力水平下的寿命概率密度函数

$$f_T(t) = \int_0^\infty \frac{D}{\sqrt{2\pi\sigma^2\lambda(t)^3}} \exp\left[-\frac{(D-\mu)^2}{2\mu^2\lambda(t)}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\eta_0^2}} \exp\left(-\frac{(\mu_0 - \theta_0)^2}{2\eta_0^2}\right) d\mu_0 = \frac{D}{\sqrt{2\pi\eta_0\lambda(t)^2 + \sqrt{2\pi\lambda t^3}\sigma}} \exp\left(-\frac{(D - \theta_0\lambda(t))^2}{2\eta_0^2\lambda(t)^2 + 2\sigma^2\lambda(t)}\right) \quad (21)$$

根据式(12)可得任意应力下钽电容寿命的分布函数 $F_T$ :

$$F_T(t) = \Phi\left(\frac{\theta_0\lambda(t) - D}{\sqrt{\eta_0^2 + \sigma^2\lambda(t)}}\right) + \exp\left(\frac{2\theta_0 D}{\sigma^2} + \frac{2\eta_0^2 D^2}{\sigma^4}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{2\eta_0 D\lambda(t) + \sigma^2(\theta_0 + D)}{\sigma^2\sqrt{\eta_0^2\lambda(t) + \sigma^2\lambda(t)}}\right) \quad (22)$$

根据 Wiener 退化过程的性质求解电容量与损耗因数的退化增量在 $[t_{k-1}, t_k]$ 上的分布函数,其中退化量增量为:

$$\Delta X_{ij}(t_k) = X_{ij}(t_k) - X_{ij}(t_{k-1}) \quad (23)$$

当 $\mu$ 一定时,则根据正态分布概率密度函数可得 $\Delta X_{ij}(t_k)$ 的概率密度函数为:

$$f(\Delta X_{ij}(t_k) | \mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta\lambda(t_k)}} \cdot \exp\left(-\frac{(\Delta X_{ij}(t_k) - \mu_i\Delta\lambda(t_k))^2}{2\sigma^2\Delta\lambda(t_k)}\right) \quad (24)$$

设 $g(\mu_i)$ 为漂移参数 $\mu_i$ 的概率密度函数,得到 $\Delta X_{ij}(t_k)$ 的概率密度函数为:

$$f(\Delta X_{ij}(t_k)) = \int_0^{+\infty} f(\Delta X_{ij}(t_k) | \mu) \cdot g(\mu_i) d\mu_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta\lambda\sigma^2 + \sigma_a^2(H_i)^{-2b} \exp\left(\frac{2c}{T_i}\Delta\lambda\right)}} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\Delta X_{ij}(t_k) - \mu_a(H_i)^{-b} \exp\left(\frac{c}{T_i}\right)\right)^2}{2\left(\sigma^2 + \sigma_a^2(H_i)^{-2b} \exp\left(\frac{2c}{T_i}\right)\Delta\lambda\right)\Delta\lambda}\right) \quad (25)$$

则 $\Delta X_{ij}(t_k)$ 的分布函数为:

$$F(\Delta X_{ij}(t_k)) =$$

$$\Phi\left(\frac{\Delta X_{ij}(t_k) - \mu_a(H_i)^{-b} \exp\left(\frac{c}{T_i}\right)\Delta\lambda}{\sqrt{\Delta\lambda(\sigma^2 + \sigma_a^2(H_i)^{-2b} \exp\left(\frac{2c}{T_i}\right)\Delta\lambda)}}\right) \quad (26)$$

### 3.2 基于 Copula 函数的钽电容二元加速退化模型

Copula 函数可以描述钽电容不同性能退化参数的边缘分布函数的相关性,形成多维联合分布函数。因此在 Wiener 退化过程的基础上,建立加速应力下基于 Copula 函数的钽电容二元退化模型。

电容量和损耗因数在不同退化区间不具有相关性,则电容量和损耗因数的退化量增量 $\Delta X_{ij}^{(m)}(t_k)$ 上的边缘分布函数 $F_m(\Delta X_{ij}^{(m)}(t_k))$ 可由式(26)求得, $m=1,2$ ,分别代表容量和损耗因数。根据 Copula 函数定义,两个性能参数的退化量增量的联合分布函数可表示为:

$$H(\Delta X_{ij}^{(1)}(t_k), \Delta X_{ij}^{(2)}(t_k)) = C(F(X_{ij}^{(1)}(t_k)), F(X_{ij}^{(2)}(t_k)), \beta) \quad (27)$$

其中 $\beta$ 为 Copula 函数的未知参数。

针对钽电容退化性能的可靠性评估,建模过程选用 Frank Copula 函数,两个性能参数的退化量增量的联合分布函数可表示为:

$$H(\Delta X_{ij}^{(1)}(t_k), \Delta X_{ij}^{(2)}(t_k)) = -\frac{1}{\beta} \ln\left(1 + \frac{(e^{-\beta\Delta X_{ij}^{(1)}(t_k)} - 1)(e^{-\beta\Delta X_{ij}^{(2)}(t_k)} - 1)}{e^{-\beta} - 1}\right) \quad (28)$$

在随机 Wiener 退化过程的基础上,建立的基于 Copula 函数钽电容退化过程模型可表示为式(17)、(18)、(26)和(28)组成的方程组。

本模型包含的未知参数由两部分组成,一部分是 Wiener 退化过程中的未知参数 $\omega = (\mu_a^{(1)}, \sigma_a^{(1)}, b^{(1)}, c^{(1)}, \mu_a^{(2)}, \sigma_a^{(2)}, b^{(2)}, c^{(2)})$ ,一部分是 Copula 函数未知参数 $\beta$ ,则求解退化模型的似然函数可表示为:

$$\ln L(\omega, \beta) = \sum_{m=1}^2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^U \ln f_m(\Delta X_{ij}^{(m)}(t_k)) + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^U [\ln H(\Delta X_{ij}^{(1)}(t_k), \Delta X_{ij}^{(2)}(t_k)) + C(F(X_{ij}^{(1)}(t_k)), F(X_{ij}^{(2)}(t_k)), \beta)] \quad (29)$$

利用极大似然估计先对第一部分 $\omega = (\mu_a^{(1)}, \sigma_a^{(1)}, b^{(1)}, c^{(1)}, \mu_a^{(2)}, \sigma_a^{(2)}, b^{(2)}, c^{(2)})$ 进行求解,得到的估计值 $\hat{\omega}$ 代入第2部分再对 $\beta$ 进行求解。

## 4 钽电容退化性能的可靠性评估方法

从图2可以看出,电容量在四种应力水平下的加速试验时间内未出现失效,而从图3观察到损耗因数出现突然失效和退化失效两种退化模式。钽电容退化失

效分析中最为关键的是针对可预测的退化失效建立合理的退化失效模型,并在退化模型的基础上可靠性评估,因此本文选择未失效钽电容的稳定退化区间进行可靠性评估。

Wiener 过程模型需要以相同时间间隔的退化量增量为参量进行建模,因此需要对图 2、3 的退化失效数据进行等间隔处理,重构样本。将 85℃/85% RH、95℃/70%RH 应力水平下的退化时间间隔设置为 200 h,95℃/85% RH、110℃/85% RH 应力水平下的时间间隔设置为 100 h,采用三次插值拟合方法重构电容量和损耗因数的样本数据,并计算实验数据退化增量,如图 6 和 7 所示。

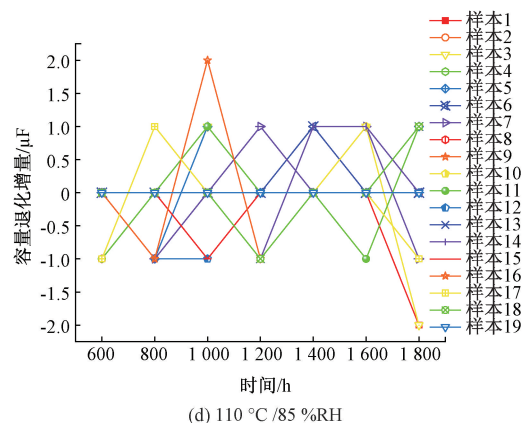
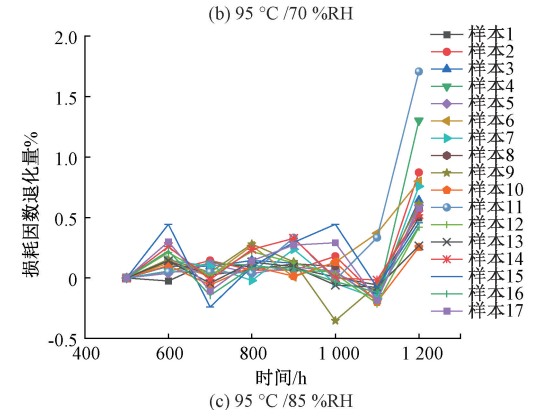
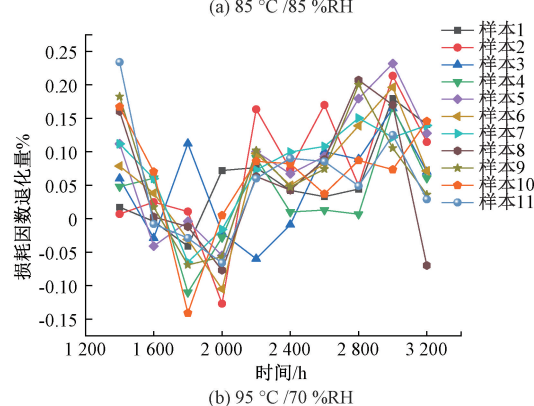
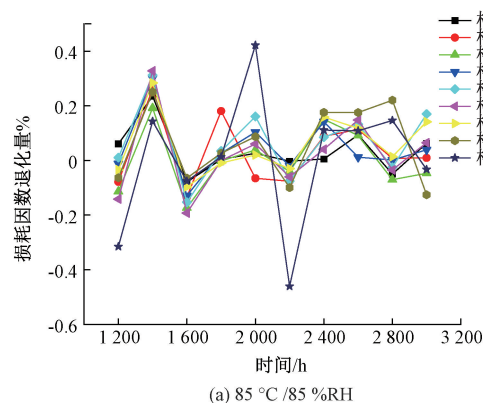
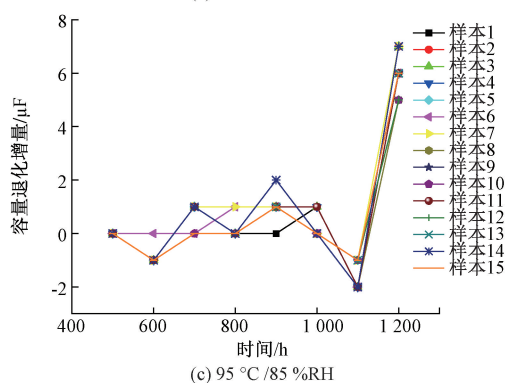
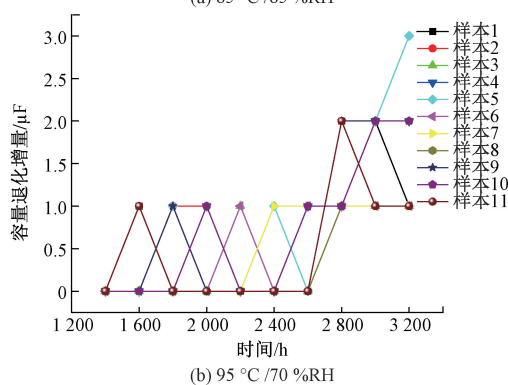
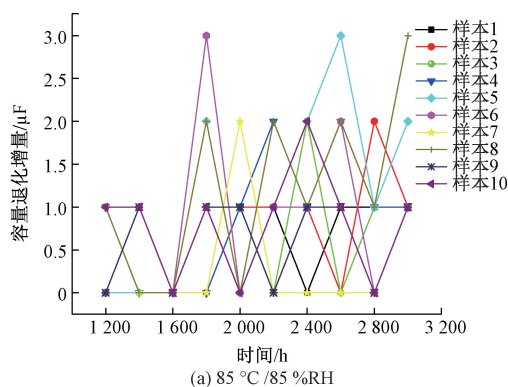


图 6 4 种应力下的容量的退化增量

Fig. 6 Degradation increment of capacitance under four stresses



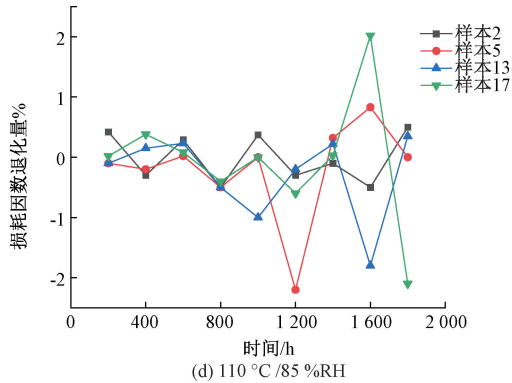


图 7 4 种应力下的损耗因数的退化增量

Fig. 7 Degradation increment of dissipation factor under four stresses

电容量和损耗因数的退化增量呈现随机特性,根据式(29),进行 4 种加速应力水平下退化稳定阶段不同监测时刻电容量漂移参数  $\bar{\mu}_a^{(1)}$  和扩散参数  $\bar{\sigma}_a^{(1)}$  与损耗因数漂移参数  $\bar{\mu}_a^{(2)}$  和扩散参数  $\bar{\sigma}_a^{(2)}$  的估计均值计算,如表 6 所示。

表 6 稳定退化阶段不同检测点的模型参数估计均值

Table 6 Estimated mean value of model parameters at different detection points in stable degradation stage

| 时间/h  | 模型参数                |                        |                     |                        |
|-------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
|       | $\bar{\mu}_a^{(1)}$ | $\bar{\sigma}_a^{(1)}$ | $\bar{\mu}_a^{(2)}$ | $\bar{\sigma}_a^{(2)}$ |
| 1 200 | 0.027 1             | 0.142 1                | 0.022 5             | 0.167 6                |
| 1 400 | 0.011 5             | 0.148 3                | 0.014 8             | 0.194 5                |
| 1 600 | 0.025 5             | 0.286 0                | 0.028 6             | 0.128 9                |
| 1 800 | 0.021 88            | 0.224 7                | 0.025 67            | 0.288 9                |
| 2 000 | 0.021 53            | 0.226 5                | 0.012 9             | 0.176 0                |
| 2 200 | 0.023 9             | 0.011 5                | 0.187 4             | 0.156 6                |
| 2 400 | 0.023 9             | 0.187 4                | 0.011 5             | 0.156 6                |
| 2 600 | 0.024 8             | 0.123 0                | 0.124 7             | 0.241 6                |
| 2 800 | 0.020 9             | 0.294 6                | 0.013 5             | 0.142 1                |
| 3 000 | 0.028 2             | 0.121 5                | 0.011 5             | 0.255 9                |
| 3 200 | 0.288 9             | 0.242 8                | 0.027 4             | 0.184 2                |

根据表 6 计算的均值和式(10),电容量和损耗因数的维纳过程拟合如图 8 和 9 所示,拟合精度分别达到 97% 与 95%。利用重构样本进行电容量和损耗因数的维纳过程拟合与试验数据计算的退化增量趋势基本一致,验证了重构样本方法和维纳过程建模的有效性。

由于每种应力下钽电容的退化速率不同,时间变换参数可表示为湿度与温度的函数  $\gamma_i = \chi(T_i, H_i)$ , 根据表 6 中加速应力水平下退化模型参数的均值,由式(15)获取时间变换参数与温度、湿度的关系,如图 10 所示。

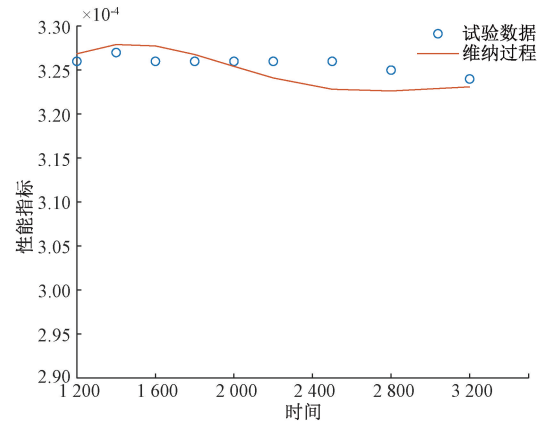


图 8 电容量的维纳过程拟合

Fig. 8 Wiener process fitting curve of Capacitance

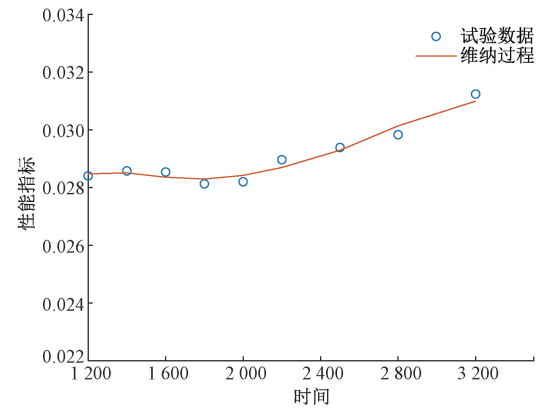


图 9 损耗因数的维纳过程拟合

Fig. 9 Wiener process fitting curve of dissipation factor

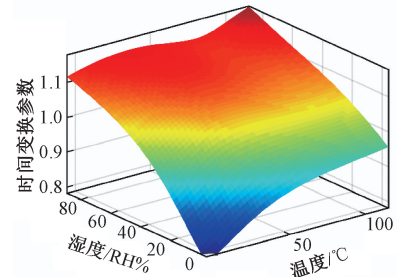
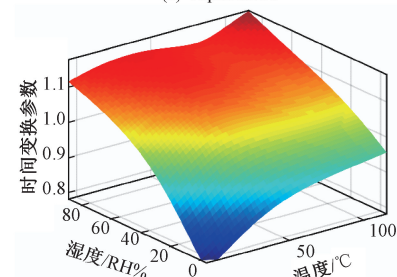
(a) 电容量  
(a) Capacitance(b) 损耗因数  
(b) Dissipation factor

图 10 时间变换参数与温度、湿度的关系拟合

Fig. 10 Relationship between time transformation parameter and temperature and humidity

由表 1 可知当电容量小于 264  $\mu\text{F}$  或损耗因数大于 10% 钽电容即为失效,则电容量和损耗因数的退化增量失效阈值为  $D(1)=64\mu\text{F}$ 、 $D(2)=7.9\%$ 。根据失效阈值和表 6 中不同应力水平下的模型参数,由式 (19) 获

取单参数退化模型参数,由式 (29) 得到基于 Copula 函数的钽电容二元退化模型参数,由式 (20) 进一步得到正常应力 25℃/25% RH 下的参数  $\gamma_0$ , 分别如表 7 和 8 所示。

表 7 随机效应 Wiener 过程的单参数退化模型参数  
Table 7 Model parameters of the random effect Wiener process

| 性能参数 | 模型参数         |                 |      |        |          |            |          |            |
|------|--------------|-----------------|------|--------|----------|------------|----------|------------|
|      | $\mu_\alpha$ | $\sigma_\alpha$ | $b$  | $c$    | $\sigma$ | $\theta_0$ | $\eta_0$ | $\gamma_0$ |
| 容量   | 0.021 3      | 0.993           | 9.28 | 17 407 | 0.002    | 0.054      | 0.006    | 1.03       |
| 损耗因数 | 0.021 9      | 0.991           | 4.55 | 13 926 | 0.161    | 0.742      | 0.543    | 1.12       |

表 8 基于 Copula 函数的钽电容二元退化模型参数  
Table 8 Parameters of binary degradation model of tantalum capacitor based on Copula function

| 性能参数 | 模型参数         |                 |       |        |          |            |          |         |
|------|--------------|-----------------|-------|--------|----------|------------|----------|---------|
|      | $\mu_\alpha$ | $\sigma_\alpha$ | $b$   | $c$    | $\sigma$ | $\theta_0$ | $\eta_0$ | $\beta$ |
| 容量   | 0.027 8      | 0.099           | 10.25 | 17 911 | 0.001    | 0.026      | 0.007    | 3.13    |
| 损耗因数 | 0.026 2      | 0.099           | 3.30  | 15 639 | 0.154    | 0.628      | 0.687    | 3.13    |

根据模型参数,应力为 25℃/25% RH 时,钽电容基于 Wiener 过程的单参数退化模型和基于 Copula 函数的钽电容二元退化模型的可靠度曲线如图 11。正常应力水平下,电容量和损耗因数的双参数建模预测的产品平均寿命为 127 491 h,即 14.5 年,符合产品使用说明规定的 12~15 年。

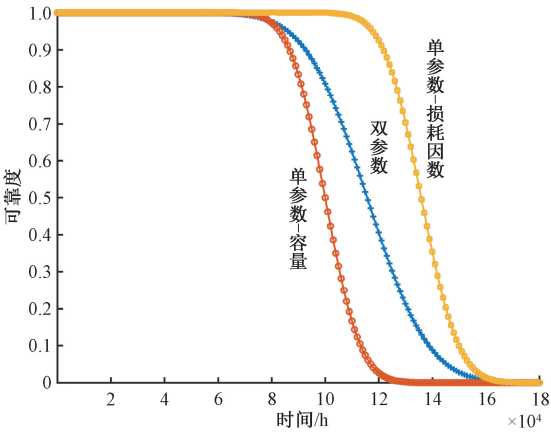


图 11 钽电容的可靠度曲线  
Fig. 11 Reliability curve of tantalum capacitor

从图 11 的分析可知,同时考虑容量和损耗因数的双参数评估钽电容可靠性高于仅考虑容量时产品的可靠性,而低于仅考虑损耗因数时产品可靠性。钽电容在实际应用中受多因素的影响,会在不同退化参数上有所体现。双参数退化建模时钽电容可靠性随运行时间下降缓慢,说明钽电容失效的概率是缓慢增加的,寿命的不一致性变大,这与实际情况相吻合。

5 结 论

针对钽电容长寿命的特点,本文搭建了钽电容加速退化试验平台,获取了钽电容在四种应力水平 85℃/85% RH、95℃/70% RH、95℃/85% RH、110℃/85% RH 下的电容量和损耗因数的加速退化试验数据。基于退化数据分析,针对电容量的退化趋势确定了两次有序聚类方法,针对损耗因数的退化趋势确定了一次有序聚类方法,并提出了利用误差函数斜率的变化率来确定退化数据的最佳分类数的方法。针对不同钽电容性能退化的个体差异,分别推导了随机效应 Wiener 过程的钽电容寿命分布函数和参数退化增量的分布函数;结合 Frank Copula 函数,建立了基于双参数的钽电容二元退化模型,研究了模型参数  $\mu_\alpha$ 、 $\sigma_\alpha$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\theta_0$ 、 $\eta_0$  的获取方法,进行了产品退化性能的可靠性评估,利用可靠度函数推导了正常应力水平下的产品寿命,并进行了验证分析,结果表明了钽电容二元退化模型的有效性。

参考文献

[ 1 ] 舒展,程思萌,杨越,等. 一种基于交流侧功率解耦的无电解电容光伏逆变器研究[ J ]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 87-94.  
SHU ZH, CHENG S M, YANG Y, et al. Research on photovoltaic inverter with non-electrolytic capacitor based on AC side power decoupling [ J ]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 87-94.

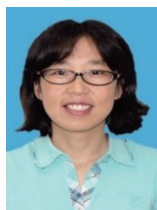
- [2] CHACKO A P, CHEN J, STOLARSKI C, et al. Development of high temperature tantalum polymer capacitors [C]. International Symposium on Microelectronics. International Microelectronics Assembly and Packaging Society, 2018(1): 000647-000651.
- [3] JIN Y, CHEN Q, LESSNER P. Thermal stability investigation of PEDOT films from chemical oxidation and prepolymerized dispersion [J]. Electrochemistry 2013, 81(10), 801-803.
- [4] CHACKO A P, JIN Y, SHI Y, et al. Advances in reliability of conducting polymers and conducting polymer based capacitors in high humidity environment [J]. ECS Transactions, 2018, 85(13): 115.
- [5] KIM Y T, KIM K B, HYUN Y E, et al. Simulation study on the lifetime of electrochemical capacitors using the accelerated degradation test under temperature and voltage stresses [J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(12): 2712-2720.
- [6] TAREKEGN E N, HARRELL W R, LUZINOV I, et al. Environmental stability of polymer tantalum capacitors [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020, 9(8): 083005.
- [7] VIRKKI J, SEPPALA T, FRISK L, et al. Accelerated testing for failures of tantalum capacitors [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(2): 217-219.
- [8] YOUNG J, QAZI J. Polymer tantalum capacitors for automotive applications [J]. CARTS International, 2014: 297-311.
- [9] 何汪飞, 钟元旭, 阮毅. AC-DC LED 驱动电源消除电解电容技术综述 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 176-185.
- HE W F, ZHONG Y X, RUAN Y. A review of eliminating electrolytic capacitor in AC-DC light-emitting diode drivers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 176-185.
- [10] 张也, 曹楠, 章彬, 等. 一种新的三绕组自耦变压器的非线性建模 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 51-57.
- ZHANG Y, CAO N, ZHANG B, et al. A new nonlinear model of three-winding autotransformer [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 51-57.
- [11] DOKSUM K A, HBYLAND A. Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener processes and the inverse gaussian distribution [J]. Technometrics, 1992, 34(1): 74-82.
- [12] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- ZHAO J Y. Study on reliability modeling and applications based on performance degradation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [13] 袁莉芬, 朋张胜, 何怡刚. 基于 Copula 函数的光纤陀螺贮存可靠性评估 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 58-65.
- YUAN L F, PENG ZH SH, HE Y G. Evaluation of storage reliability of fiber optic gyroscope based on Copula function [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 58-65.
- [14] 孙曙光, 王佳兴, 王景芹, 等. 基于 Wiener 过程的万能式断路器附件剩余寿命预测 [J]. 仪器仪表学报, 2019, (2): 26-37.
- SUN SH G, WANG J X, WANG J Q, et al. Residual life assessment method of transformer oil-paper insulation residual life prediction of universal circuit breaker accessories based on Wiener process [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 26-37.
- [15] TANG S, GUO X, YU C, et al. Accelerated degradation tests modeling based on the nonlinear wiener process with random effects [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014-2015.
- [16] 夏新涛, 常振, 叶亮, 等. 滚动轴承性能稳定性及可靠性分析 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1421-1431.
- XIA X T, CHANG ZH, YE L, et al. Performance stability and reliability analysis of rolling bearing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1421-1431.
- [17] BABDONAVIUS A. Analysis of joint multiple failure mode and linear degradation data with renewals [J]. Journal of Statistical Planning & Inference, 2007, 137(7): 2191-2207.
- [18] WANG P, COIT D W. Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple degradation measures [C]. Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-rans: IEEE, 2004: 302-307.
- [19] 孙曙光, 纪学玲, 杜太行, 等. 机械振动下交流接触器电寿命预测失效特征量提取 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 114-125.
- SUN SH G, JI X L, DU T X, et al. Extraction of failure

characteristics of AC contactor electrical life prediction under mechanical vibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 114-125.

- [20] 周月阁, 叶雪荣, 翟国富. 基于性能退化和 Monte-Carlo 仿真的系统性能可靠性评估[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1185-1191.

ZHOU Y G, YE X R, ZHAI G F. System performance reliability evaluation based on performance degradation and Monte Carlo simulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1185-1191.

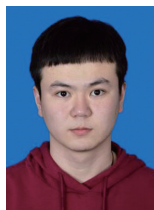
### 作者简介



**赵靖英**, 1997 年于河北工业大学获得学士学位, 2000 年于河北工业大学获得硕士学位, 2004 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学教授, 主要研究方向为电器可靠性及检测技术。

E-mail: zhao\_team@163.com

**Zhao Jingying** received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 1997, 2000, and 2004, respectively. She is currently a professor at Hebei University of Technology. Her main research interests include electrical reliability and detection technology, and wireless power transfer.



**张珂** (通信作者), 2019 年于山东科技大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电器可靠性及检测技术。

E-mail: 18000388868@163.com

**Zhang Ke** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His research interests include electrical reliability and detection technology.



**刘建猛**, 2017 年于石家庄学院获得学士学位, 2020 年于河北工业大学获得硕士学位, 现为国网北京市电力公司助理工程师, 主要研究方向为电器可靠性及检测技术。

E-mail: ljm\_789@163.com

**Liu Jianmeng** received his B. Sc. degree from Shijiazhuang University in 2017, and received his M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2020. He is currently an assistant engineer at State Grid Beijing Electric Power Company Co., Ltd. China. His research interests include electrical reliability and detection technology.