



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109657937 A

(43)申请公布日 2019.04.19

(21)申请号 201811455684.9

(22)申请日 2018.11.30

(71)申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路2号西安电子科技大学

(72)发明人 冯海林 李秀秀 齐小刚

(74)专利代理机构 西安长和专利代理有限公司  
61227

代理人 黄伟洪

(51) Int. Cl.

G06Q 10/06(2012.01)

G06F 17/50(2006.01)

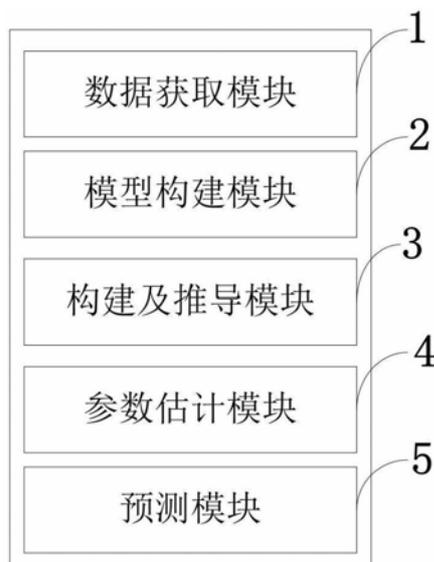
权利要求书3页 说明书9页 附图4页

### (54)发明名称

一种基于退化数据的产品可靠性评估与寿命预测方法

### (57)摘要

本发明属于工程设计与数据建模技术领域,公开了一种基于退化数据的产品可靠性评估方法、参数估计方法;建立基于随机效应的Wiener加速退化模型,其中漂移参数为服从正态分布的随机变量;根据加速退化模型构建剩余寿命预测模型,且推导出剩余寿命分布及剩余寿命的可靠度函数;根据应力状态下的性能退化数据,通过两步极大似然估计法,获得了模型未知参数估计值。本发明通过经典的Wiener模型构建了一种新的加速退化模型、剩余寿命预测模型,求得剩余寿命的估计值;采用两步极大似然估计法,估计了退化模型中的未知参数,弥补传统极大似然估计法的限制性,能更为精确地得到未知参数的最优值,模型能更准确的预测产品的剩余寿命,适用范围较广。



1. 一种产品可靠性评估方法,其特征在于,所述产品可靠性评估方法建立在一种基于随机效应的Wiener加速退化模型,其中漂移参数为服从正态分布的随机变量;根据加速退化模型构建剩余寿命预测模型,且推导出剩余寿命分布及剩余寿命的可靠度函数;根据应力状态下的性能退化数据,通过两步极大似然估计法,获得了模型未知参数估计值。

2. 如权利要求1所述的产品可靠性评估方法,其特征在于,所述产品可靠性评估方法包括以下步骤:

步骤一,收集性能加速退化数据,产品试样个数为 $m$ 个,施加的应力如温度是 $S_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ );在这 $m$ 个温度应力水平下,分别对产品试样进行 $n$ 次性能退化数据监测、记录; $t_i^k$ 表示第 $i$ 次对产品性能的测量时刻,产品所增加的温度应力为 $S_k$ ,测得的产品退化量为 $X(t_i^k)$ ,  $i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$ ;

步骤二,构建经典的加速退化模型,加速退化试验中,加速关系常指的是退化率与压力之间的相互作用,加速模型为:

$$\mu = \exp(a + b\varphi(S)) ;$$

其中 $a$ 、 $b$ 为系数, $\varphi(S)$ 表示以应力 $S$ 为自变量函数,采用Arrhenius模型表示,即 $\varphi(S) = 1/S$ ;温度应力下加速模型为:

$$\mu_k = a \exp(-b/S_k) ;$$

式中 $S_k$ 为第 $k$ 个应力; $\mu_k$ 为漂移系数, $a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$ ;

基于Wiener过程的应力加速退化数据建模:

$$X(t) = \mu_k t + \sigma B(t) ;$$

其中 $\mu_k \sim N(\mu_a \exp(-b/S_k), \sigma_a^2 \exp(-b/S_k))$ ;

步骤三,特定产品在时刻 $t_1$ 和 $t+t_1$ 的性能退化量为 $X(t_1)$ 和 $X(t+t_1)$ ,有:

$$X(t+t_1) = X(t_1) + \mu_k t + \sigma B(t) ;$$

其中 $\mu_k \sim N(\mu_a \exp(-b/S_k), \sigma_a^2 \exp(-b/S_k))$ ;

当前的退化量 $X(t_k)$ 和失效阈值 $\xi$ ,产品在时刻 $t_k$ 的剩余寿命 $t$ 表示为:

$$\begin{aligned} M &= \inf(t | X(t+t_l) \geq \xi, t > 0) \\ &= \inf(t | X(t+t_l) - X(t_l) \geq \xi - X(t_l), t > 0) ; \\ &= \inf(t | X(t) \geq \xi - X(t_l), t > 0) \end{aligned}$$

则产品的剩余寿命 $t$ 的PDF表示为:

$$f(t) = \frac{\xi - X(t_l)}{\sqrt{2\pi\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t^3}} * \exp\left(-\frac{(\xi - X(t_l) - \mu_a \exp(-b/S_k)t)^2}{2\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t}\right) ;$$

根据剩余寿命 $t$ 的定义,得到产品可靠度函数为:

$$\begin{aligned}
R(t) &= P(T - t_l > t) = 1 - \int_0^t f_M(t) dt \\
&= 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_a \exp(-b/S_k)t - (\xi - X(t_l))}{\sqrt{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t^3}}\right) \\
&\quad - \exp\left(\frac{2\mu_a \exp(-b/S_k)(\xi - X(t_l))}{\sigma_a^4 \exp 2(-b/S_k)}\right) ; \\
&\quad * \Phi\left(\frac{(\xi - X(t_l)) + \mu_a \exp(-b/S_k)t}{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)\sqrt{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t}}\right)
\end{aligned}$$

步骤四,采用两步极大似然估计方法估计  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\} (j=1, 2, \dots, m)$ ; 对数极大似然估计函数如下:

$$\begin{aligned}
\ln L(\Theta) &= -\frac{n}{2}(\ln(2\pi) + \ln \sigma^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \ln(t_{i,k}^j - t_{i,k-1}^j) \\
&\quad - \frac{1}{2\sigma_k^2} \sum_{i=1}^n \{\Delta X(t_i^k) - a_k \exp(-b/S_k) \cdot \\
&\quad (t_i^k - t_{i-1}^k)\}^2 / (t_i^k - t_{i-1}^k) ;
\end{aligned}$$

式中:  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\} (j=1, 2, \dots, m)$  是未知参数的集合;  $\ln L(\Theta)$  表示利用 fminsearch 函数所求解得到的最大值;

$a_k, \sigma_k^2$  的偏导数为零:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial a_j} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial \sigma^2} = 0 \end{cases} ;$$

则:

$$\hat{a}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X(t_i^k) \exp(-b/S_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(-2b/S_k)(t_i^k - t_{i-1}^k)} \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{\Delta X(t_i^k) - \hat{a}_k \exp(-b/S_k) \cdot (t_i^k - t_{i-1}^k)\}^2 / (t_i^k - t_{i-1}^k) \quad (10)$$

根据可得到的数据组  $[t_i^k, X(t_i^k)]$  及本发明所建模型,模型中的未知的参数  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\}$ , 可利用两步极大似然估计法来求解,先估计  $\hat{b}$ , 再估计  $\hat{a}_k, \hat{\sigma}_k^2$ ; 步骤五: 得到加速应力下基于 Wiener 模型的剩余寿命预测的估计值; 采用两步极大似然估计方法得

到  $\hat{\Theta} = \{\hat{a}_k, \hat{b}, \hat{\sigma}_k^2\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

3. 一种实施权利要求1所述产品可靠性评估方法的产品可靠性评估系统, 其特征在于, 所述产品可靠性评估系统包括:

数据获取模块, 用于获取加速退化数据;

模型构建模块, 用于构建典型的加速退化模型;

构建及推导模块, 用于基于Wiener模型构建加速应力下的剩余寿命预测模型以及推导出函数表达式;

参数估计模块, 用于结合性能加速退化数据的特征给出模型未知参数的估计方法;

预测模块, 用于得到加速应力下基于Wiener模型的剩余寿命预测的估计值。

4. 一种实现权利要求1~2任意一项所述产品可靠性评估方法的计算机程序。

5. 一种实现权利要求1~2任意一项所述产品可靠性评估方法的信息数据处理终端。

6. 一种计算机可读存储介质, 包括指令, 当其在计算机上运行时, 使得计算机执行如权利要求1-2任意一项所述的产品可靠性评估方法。

## 一种基于退化数据的产品可靠性评估与寿命预测方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于工程设计于数据建模技术领域,尤其涉及一种基于退化数据的产品可靠性评估方法、模型参数估计方法。

### 背景技术

[0002] 目前,业内常用的现有技术是这样的:随着科学技术的不断进步和产品加工技艺的不断提高,越来越多的产品具有高可靠、长寿命的特点。但在相对短期内高长寿命产品几乎不可能失效,甚至会出现“零失效”现象,由此基于失效数据很难对产品可靠性进行评估,则预测其剩余寿命也增加了难度。加速退化试验(Accelerated Degradation Testing, ADT)是通过提高试验应力水平来使产品的性能加速退化,并利用搜集到的产品在高应力水平下的性能退化信息来预测产品在正常工作应力水平下产品的可靠性。因此,加速退化试验成为了评估产品可靠性的重要技术之一。加速退化数据是指在加速退化实验的过程中,通过人为施加应力造成产品性能退化时测量的数据,或者是产品在实际工作中受到外部环境因素(温度、湿度等)的影响导致产品的加速退化获得的退化数据。有很多研究工作是针对加速退化数据的可靠性评估。在这些研究工作中,基于Wiener过程的加速退化模型在很多领域有较为广泛的应用,电动机加速寿命研究、光伏组件可靠性评估、集成逻辑系统的可靠性评估等。Wiener过程的加速退化模型应用于“感应电动机加速退化试验”中时,模型的漂移系数与增加的载荷(可以看成一种应力)有关系,而其扩散系数与增加的载荷无关系。Wiener过程的加速退化模型应用于研究“随机参数逆高斯过程的加速退化建模方法”中时,漂移系数和扩散系数都受到综合应力水平的影响。Wiener过程的加速退化模型应用于研究“光伏组件的可靠性的加速寿命试验”时,通过引入应力并在达到阈值时确定寿命分布。Wiener过程的加速退化模型应用于研究“集成逻辑系统可靠性”时,最大退化量和应力之间的关系用Arrhenius关系描述。由此可以看到,Wiener过程的加速退化模型用于实际系统的可靠性或寿命分布研究时。模型中的漂移系数和扩散参数的随机性、相互关系等是建立模型的关键之一。另外,基于数据的模型参数的估计方法也是可靠性评估和寿命预测关键技术之一。

[0003] 综上所述,现有技术存在的问题是:

[0004] (1) 基于Wiener过程的退化模型中,模型中的两个重要参数的假设有些理想化,与实际数据情况不相符合。

[0005] (2) 基于Wiener过程的加速退化模型中,性能退化量与应力关系的描述较为单一,应力与模型参数关系如何建模仍然是技术难题。

[0006] (3) 基于Wiener过程的性能退化建模,需要设计更为可行的参数估计方法和算法,参数估计量的优良性需要进一步分析。

[0007] 解决上述技术问题的难度和意义:难度是如何确立基于Wiener过程加速退化建模中参数的随机性及其参数之间关系的描述;如何建立模型中加速应力和参数的约束关系;如何给出更为精确的模型参数估计算法。解决上述问题的意义在于能提供一种确立模型参

数的数据处理方法;建立基于退化数据的更加准确和方便系统可靠性评估方法;提供有效的模型参数估计方法,为基于信息处理的系统可靠性评估提供一种可行的技术方案。

### 发明内容

[0008] 针对现有技术存在的问题,本发明提供了一种基于性能退化数据的产品可靠性评估方法、模型参数估计方法。

[0009] 本发明是这样实现的,一种产品可靠性评估方法,所述产品可靠性评估方法建立了一种基于随机效应的Wiener加速退化模型,其中漂移参数为服从正态分布的随机变量;根据加速退化模型构建剩余寿命预测模型,且推导出剩余寿命分布及剩余寿命的可靠度函数;根据应力状态下的性能退化数据,通过两步极大似然估计法,获得了模型未知参数估计值。

[0010] 进一步,所述产品可靠性评估方法包括以下步骤:

[0011] 步骤一,收集性能加速退化数据,产品试样个数为 $m$ 个,施加的温度应力是 $S_k$  ( $k=1,2,\dots,m$ );在这 $m$ 个温度应力水平下,分别对产品试样进行 $n$ 次性能退化数据监测、记录; $t_i^k$ 表示第 $i$ 次对产品性能的测量时刻,产品所增加的温度应力为 $S_k$ ,测得的产品退化量为 $X(t_i^k)$ , $i=1,2,\dots,n;k=1,2,\dots,m$ ;

[0012] 步骤二,构建经典的加速退化模型,加速退化试验中,加速关系常指的是退化率与压力之间的相互作用,加速模型为:

[0013]  $\mu = \exp(a + b\varphi(S))$  ;

[0014] 其中 $a$ 、 $b$ 为系数, $\varphi(S)$ 表示以应力 $S$ 为自变量函数,采用Arrhenius模型表示,即 $\varphi(S) = 1/S$ ;温度应力下加速模型为:

[0015]  $\mu_k = a \exp(-b/S_k)$  ;

[0016] 式中 $S_k$ 为第 $k$ 个应力; $\mu_k$ 为漂移系数, $a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$ ;

[0017] 基于Wiener过程的应力加速退化数据建模:

[0018]  $X(t) = \mu_k t + \sigma B(t)$  ;

[0019] 其中 $\mu_k \sim N(\mu_a \exp(-b/S_k), \sigma_a^2 \exp(-b/S_k))$ ;

[0020] 步骤三,特定产品在时刻 $t_1$ 和 $t+t_1$ 的性能退化量为 $X(t_1)$ 和 $X(t+t_1)$ ,有:

[0021]  $X(t+t_1) = X(t_1) + \mu_k t + \sigma B(t)$  ;

[0022] 其中 $\mu_k \sim N(\mu_a \exp(-b/S_k), \sigma_a^2 \exp(-b/S_k))$ ;

[0023] 当前的退化量 $X(t_k)$ 和失效阈值 $\xi$ ,产品在时刻 $t_k$ 的剩余寿命 $t$ 表示为:

$$M = \inf(t | X(t+t_l) \geq \xi, t > 0)$$

[0024]  $= \inf(t | X(t+t_l) - X(t_l) \geq \xi - X(t_l), t > 0)$  ;

$$= \inf(t | X(t) \geq \xi - X(t_l), t > 0)$$

[0025] 则产品的剩余寿命 $t$ 的PDF表示为:

$$[0026] \quad f(t) = \frac{\xi - X(t_l)}{\sqrt{2\pi\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t^3}} * \exp\left(-\frac{(\xi - X(t_l) - \mu_a \exp(-b/S_k)t)^2}{2\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t}\right);$$

[0027] 根据剩余寿命t的定义,得到产品可靠度函数为:

$$R(t) = P(T - t_l > t) = 1 - \int_0^t f_M(t) dt$$

$$= 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_a \exp(-b/S_k)t - (\xi - X(t_l))}{\sqrt{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t^3}}\right)$$

$$[0028] \quad - \exp\left(\frac{2\mu_a \exp(-b/S_k)(\xi - X(t_l))}{\sigma_a^4 \exp 2(-b/S_k)}\right) ;$$

$$* \Phi\left(\frac{(\xi - X(t_l)) + \mu_a \exp(-b/S_k)t}{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)\sqrt{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t}}\right)$$

[0029] 步骤四,采用两步极大似然估计方法估计  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\} (j=1,2,\dots,m)$ ;对数极大似然估计函数如下:

$$\ln L(\Theta) = -\frac{n}{2}(\ln(2\pi) + \ln \sigma^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \ln(t_{i,k}^j - t_{i,k-1}^j)$$

$$[0030] \quad - \frac{1}{2\sigma_k^2} \sum_{i=1}^n \left\{ \Delta X(t_i^k) - a_k \exp(-b/S_k) \cdot \right. ;$$

$$\left. (t_i^k - t_{i-1}^k) \right\}^2 / (t_i^k - t_{i-1}^k)$$

[0031] 式中:  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\} (j=1,2,\dots,m)$  是未知参数的集合;  $\ln L(\Theta)$  表示利用 fminsearch 函数所求解得到的最大值;

[0032]  $a_k, \sigma_k^2$  的偏导数为零:

$$[0033] \quad \begin{cases} \frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial a_j} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial \sigma^2} = 0 \end{cases} ;$$

[0034] 则:

$$[0035] \quad \hat{a}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X(t_i^k) \exp(-b/S_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(-2b/S_k)(t_i^k - t_{i-1}^k)} \quad (9)$$

$$[0036] \quad \hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \Delta X(t_i^k) - \hat{a}_k \exp(-b/S_k) \cdot \right. \quad (10)$$

$$\left. (t_i^k - t_{i-1}^k) \right\}^2 / (t_i^k - t_{i-1}^k)$$

[0037] 根据可得到的数据组 $[t_i^k, X(t_i^k)]$ 及本发明所建模型,模型中的未知的参数 $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\}$ ,可利用两步极大似然估计法来求解,先估计 $\hat{b}$ ,再估计 $\hat{a}_k, \hat{\sigma}_k^2$ ;

[0038] 步骤五:得到加速应力下基于Wiener模型的剩余寿命预测的估计值;采用两步极大似然估计方法得到 $\hat{\Theta} = \{\hat{a}_k, \hat{b}, \hat{\sigma}_k^2\}(j=1,2,\dots,m)$ 。

[0039] 本发明的另一目的在于提供一种实施所述产品可靠性评估方法的产品可靠性评估系统,所述产品可靠性评估系统包括:

[0040] 数据获取模块,用于获取加速退化数据;

[0041] 模型构建模块,用于构建典型的加速退化模型;

[0042] 构建及推导模块,用于基于Wiener模型构建加速应力下的剩余寿命预测模型以及推导出函数表达式;

[0043] 参数估计模块,用于结合性能加速退化数据的特征给出模型未知参数的估计方法;

[0044] 预测模块,用于得到加速应力下基于Wiener模型的剩余寿命预测的估计值。

[0045] 本发明的另一目的在于提供一种实现所述产品可靠性评估方法的计算机程序。

[0046] 本发明的另一目的在于提供一种实现所述产品可靠性评估方法的信息数据处理终端。

[0047] 本发明的另一目的在于提供一种计算机可读存储介质,包括指令,当其在计算机上运行时,使得计算机执行所述的产品可靠性评估方法。

[0048] 综上所述,本发明的优点及积极效果为:本发明通过构建经典的加速退化模型,以及构建基于Wiener模型加速应力下的剩余寿命预测模型,并求得剩余寿命的估计值。并采用两步极大似然估计法,对Wiener过程退化模型中未知参数进行估计,可以更好地弥补传统极大似然估计法的限制性,更加精确地求解未知参数的最优值,说明该模型适用范围较广,且更加准确的预测了产品的剩余寿命。

[0049] 表2是在四种温度应力下分别求出的模型未知参数的结果。从图3中可以知道, $\hat{a}_k$ 和 $\hat{\sigma}_k^2$ 都随着135°C、150°C、165°C、180°C温度的增加依次增大, $\hat{b}$ 相对 $\hat{a}_k$ 和 $\hat{\sigma}_k^2$ 来说变化不大,说明Wiener退化模型的 $\hat{a}_k$ 和 $\hat{\sigma}_k^2$ 都受温度应力的影响,而 $\hat{b}$ 所受影响较小。

[0050] 表3是依照建立的Wiener退化模型和已有的两种模型,分别求出的模型未知参数 $\mu, \sigma^2$ 以及产品寿命置信度为95%的区间估计CI值,三种模型的AIC值,三种模型的TMSN值。由图可以看出,对于三种模型的各种参数值的对比,本发明中的模型的CI值,AIC值,TMSN值都是最小的。说明本发明中的模型比比其它两种模型的拟合性要好,也说明本发明的模型精确度高,更加的符合实际情况。

[0051] 表4是分别取1000h、1500h和2000h的时间点时对电缆剩余寿命预测,得到的剩余寿命均值。本发明的模型在每个时刻预测的剩余寿命结果都是最接近真实值的,反映了本发明的模型比较好,更贴近样本的实际退化情况。另外两种模型与真实值相差比较大,这是因为没有考虑应力以及个体差异性对退化过程的影响。剩余寿命预测的结果也就与实际剩余寿命有偏差。

## 附图说明

[0052] 图1是本发明实施例提供的产品可靠性评估系统结构示意图；

[0053] 图中：1、数据获取模块；2、模型构建模块；3、构建及推导模块；4、参数估计模块；5、预测模块。

[0054] 图2是本发明实施例提供的产品可靠性评估方法流程图。

[0055] 图3是本发明实施例提供的产品可靠性评估方法实现流程图。

[0056] 图4是本发明实施例提供的四种应力下伸长率保留率与时间的关系曲线图；

[0057] 图中：(a) 135℃时裂伸长率保留率与时间的关系曲线；(b) 150℃时裂伸长率保留率与时间的关系曲线；(c) 165℃时裂伸长率保留率与时间的关系曲线；(d) 180℃时裂伸长率保留率与时间的关系曲线。

## 具体实施方式

[0058] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0059] 本发明通过构建经典的加速退化模型，以及构建基于Wiener模型加速应力下的剩余寿命预测模型，并求得剩余寿命的估计值。

[0060] 下面结合附图对本发明的应用原理作详细的描述。

[0061] 如图1所示，本发明实施例提供的产品可靠性评估系统包括：

[0062] 数据获取模块1，用于获取加速退化数据；

[0063] 模型构建模块2，用于构建典型的加速退化模型；

[0064] 构建及推导模块3，用于基于Wiener模型构建加速应力下的剩余寿命预测模型以及推导出函数表达式；

[0065] 参数估计模块4，用于结合性能加速退化数据的特征给出模型未知参数的估计方法。

[0066] 预测模块5，用于得到加速应力下基于Wiener模型的剩余寿命预测的估计值。

[0067] 如图2所示，本发明实施例提供的产品可靠性评估方法包括以下步骤：

[0068] S201：获取加速退化数据；

[0069] S202：构建典型的加速退化模型；

[0070] S203：基于Wiener模型构建加速应力下的剩余寿命预测模型以及推导出函数表达式；

[0071] S204：结合性能加速退化数据的特征给出模型未知参数的估计方法；

[0072] S205：得到加速应力下基于Wiener模型的剩余寿命预测的估计值。

[0073] 下面结合附图对本发明的应用原理作进一步的描述。

[0074] 如图3所示，本发明实施例提供的产品可靠性评估方法具体包括以下步骤：

[0075] 步骤一，收集性能加速退化数据。试验时产品试样个数为 $m$ 个，其施加的温度应力是 $S_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ )。在这 $m$ 个温度应力水平下，分别对产品试样进行 $n$ 次性能退化数据监测、记录。设 $t_i^k$ 表示第 $i$ 次对产品性能的测量时刻，这时产品所增加的温度应力为 $S_k$ ，测得的

产品退化量为  $X(t_i^k)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$ 。

[0076] 步骤二, 构建经典的加速退化模型, 加速退化试验中, 加速关系常指的是退化率与压力之间的相互作用, 一般用来表示这种关系的加速模型形式为:

$$[0077] \quad \mu = \exp(a + b\varphi(S)) \quad (1)$$

[0078] 其中  $a, b$  为系数,  $\varphi(S)$  表示一种以应力  $S$  为自变量函数, 现有文献中用来描述温度应力的模型, 一般采用 Arrhenius 模型来表示, 即  $\varphi(S) = 1/S$ 。

[0079] 则温度应力下加速模型为:

$$[0080] \quad \mu_k = a \exp(-b/S_k) \quad (2)$$

[0081] 式中  $S_k$  为第  $k$  个应力;  $\mu_k$  为漂移系数,  $a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$ 。

[0082] 进一步, 基于 Wiener 过程的应力加速退化数据建模如下:

$$[0083] \quad X(t) = \mu_k t + \sigma B(t) \quad (3)$$

[0084] 其中  $\mu_k \sim N(\mu_a \exp(-b/S_k), \sigma_a^2 \exp(-b/S_k))$ 。

[0085] 步骤三, 基于 Wiener 模型构建加速应力下的剩余寿命预测模型以及推导出函数表达式: 为预测应力下产品的剩余寿命, 需要建立此应力下产品剩余寿命的预测模型。假定特定产品在时刻  $t_1$  和  $t+t_1$  的性能退化量为  $X(t_1)$  和  $X(t+t_1)$ , 有:

$$[0086] \quad X(t+t_1) = X(t_1) + \mu_k t + \sigma B(t) \quad (4)$$

[0087] 其中  $\mu_k \sim N(\mu_a \exp(-b/S_k), \sigma_a^2 \exp(-b/S_k))$ 。

[0088] 已知当前的退化量  $X(t_k)$  和失效阈值  $\xi$ , 产品在时刻  $t_k$  的剩余寿命  $t$  可表示为:

$$M = \inf(t | X(t+t_l) \geq \xi, t > 0)$$

$$[0089] \quad = \inf(t | X(t+t_l) - X(t_l) \geq \xi - X(t_l), t > 0) \quad (5)$$

$$= \inf(t | X(t) \geq \xi - X(t_l), t > 0)$$

[0090] 则产品的剩余寿命  $t$  的 PDF 表示为:

[0091]

$$f(t) = \frac{\xi - X(t_l)}{\sqrt{2\pi\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)} t^3} * \exp\left(-\frac{(\xi - X(t_l) - \mu_a \exp(-b/S_k)t)^2}{2\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)t}\right) \quad (6)$$

[0092] 根据剩余寿命  $t$  的定义, 得到产品可靠度函数为:

$$R(t) = P(T - t_l > t) = 1 - \int_0^t f_M(t) dt$$

$$= 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_a \exp(-b/S_k)t - (\xi - X(t_l))}{\sqrt{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)} t^3}\right)$$

[0093]

$$- \exp\left(\frac{2\mu_a \exp(-b/S_k)(\xi - X(t_l))}{\sigma_a^4 \exp 2(-b/S_k)}\right) \quad (7)$$

$$* \Phi\left(\frac{(\xi - X(t_l)) + \mu_a \exp(-b/S_k)t}{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k) \sqrt{\sigma_a^2 \exp(-b/S_k)} t}\right)$$

[0094] 步骤四,结合性能加速退化数据的特征给出模型未知参数的估计方法。采用两步极大似然估计方法估计  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\} (j=1, 2, \dots, m)$ 。对数极大似然估计函数如下:

$$\ln L(\Theta) = -\frac{n}{2}(\ln(2\pi) + \ln \sigma^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \ln(t_{i,k}^j - t_{i,k-1}^j) - \frac{1}{2\sigma_k^2} \sum_{i=1}^n \{\Delta X(t_i^k) - a_k \exp(-b/S_k) \cdot (t_i^k - t_{i-1}^k)\}^2 / (t_i^k - t_{i-1}^k) \quad (8)$$

[0096] 式中:  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\} (j=1, 2, \dots, m)$  是未知参数的集合。 $\ln L(\Theta)$  表示利用 fminsearch 函数所求解得到的最大值。

[0097] 分别令式 (8) 于  $a_k, \sigma_k^2$  的偏导数为零, 即:

$$[0098] \begin{cases} \frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial a_j} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial \sigma^2} = 0 \end{cases};$$

[0099] 则:

$$[0100] \hat{a}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X(t_i^k) \exp(-b/S_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(-2b/S_k) (t_i^k - t_{i-1}^k)} \quad (9)$$

$$[0101] \hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{\Delta X(t_i^k) - \hat{a}_k \exp(-b/S_k) \cdot (t_i^k - t_{i-1}^k)\}^2 / (t_i^k - t_{i-1}^k) \quad (10)$$

[0102] 根据可得到的数据组  $[t_i^k, X(t_i^k)]$  及本发明所建模型, 可以计算式 (9)、式 (10) 求出  $\hat{a}_k, \hat{\sigma}_k^2$ 。式 (9)、式 (10) 的求解, 与 b 的赋值有关。因此, 模型中的未知的参数  $\Theta = \{a_k, b, \sigma_k^2\}$ , 可利用两步极大似然估计法来求解, 先估计  $\hat{b}$ , 再估计  $\hat{a}_k, \hat{\sigma}_k^2$ 。

[0103] 步骤五: 得到加速应力下基于 Wiener 模型的剩余寿命预测的估计值。采用两步极大似然估计方法得到  $\hat{\Theta} = \{\hat{a}_k, \hat{b}, \hat{\sigma}_k^2\} (j=1, 2, \dots, m)$ 。

[0104] 下面结合仿真对本发明的应用效果作详细的描述。

[0105] 1. 仿真条件

[0106] 本发明通过对温度应力下的电缆断裂伸长率的试验数据的实验仿真来说明该算法的有效性。仿真实验是在一台 4G 内存, ENVISION 双核 3.20GHz, 32 位 win7 操作系统下, 使用 matlab2016b 进行的。

[0107] 2. 仿真内容

[0108] 采用温度应力下的电缆断裂伸长率的试验数据进行仿真。在仿真过程中, 取 4 个电

缆样本,分别在135℃、150℃、165℃、180℃的温度应力下,进行加速退化试验。每个应力下采集了10组数据,且每组数据的采集时间是不确定的。其中,580%是断裂伸长率的原始值,电缆正常工作时的温度是90℃。从而根据这些试验数据计算得出  $\hat{\Theta} = \{\hat{a}_k, \hat{b}, \hat{\sigma}_k^2\} (j = 1, 2, \dots, m)$  的估计值以及剩余寿命的预测值。

[0109] 表1和图3是在四种温度应力下电缆断裂伸长率以及电缆断裂伸长率保留率与时间的关系曲线图。

[0110] 表2是在四种温度应力下分别求出的模型未知参数的结果。从图3中可以知道,  $\hat{a}_k$  和  $\hat{\sigma}_k^2$  都随着135℃、150℃、165℃、180℃温度的增加依次增大,  $\hat{b}$  相对  $\hat{a}_k$  和  $\hat{\sigma}_k^2$  来说变化不大,说明Wiener退化模型的  $\hat{a}_k$  和  $\hat{\sigma}_k^2$  都受温度应力的影响,而  $\hat{b}$  所受影响较小。

[0111] 表3是依照建立的Wiener退化模型和已有的两种模型,分别求出的模型未知参数  $\mu$ 、 $\sigma^2$  以及产品寿命置信度为95%的区间估计CI值,三种模型的AIC值,三种模型的TMSN值。由图可以看出,对于三种模型的各种参数值的对比,本发明中的模型的CI值,AIC值,TMSN值都是最小的。说明本发明中的模型比比其它两种模型的拟合性要好,也说明本发明的模型精确度高,更加的符合实际情况。

[0112] 表4是分别取1000h、1500h和2000h的时间点时对电缆剩余寿命预测,得到的剩余寿命均值。本发明的模型在每个时刻预测的剩余寿命结果都是最接近真实值的,反映了本发明的模型比较好,更贴近样本的实际退化情况。另外两种模型与真实值相差比较大,这是因为没有考虑应力以及个体差异性对退化过程的影响。剩余寿命预测的结果也就与实际剩余寿命有偏差。

[0113] 表1烯烃绝缘电缆在不同老化温度下的测试结果表

[0114]

135°C		150°C		165°C		180°C	
时间	断裂伸长率	时间	断裂伸长率	时间	断裂伸长率	时间	断裂伸长率

[0115]

960	575	336	570	96	570	24	560
2296	555	960	540	288	530	48	525
3736	530	1320	490	432	510	139	400
4936	480	1776	440	576	470	487	430
5896	420	2136	400	720	430	211	395
6496	375	2496	370	842	390	235	370
7072	335	2796	320	984	340	243	350
7552	300	2876	290	1136	310	251	300
7912	280	2996	240	1226	260	259	215
8272	260	3120	120	1320	105	283	80

[0116] 表2不同温度应力下的模型参数估计结果表

[0117]

温度应力	$\hat{a}_k$	$b$	$\hat{\sigma}_k^2$
135°C	0.000382	2548.191	$4.94 \times 10^{-9}$
150°C	0.000361	2556.33	$7.68 \times 10^{-8}$
165°C	0.000466	2460.609	$9.23 \times 10^{-7}$
180°C	0.000467	2358.375	$1.83 \times 10^{-5}$

[0118] 表3三种方法的估计结果表

[0119]

	$\mu/10^{-4}$	$\sigma^2/10^{-6}$	CI(95%)	AIC	TMSN
$M_1$	3.94	4.82	(0.218,0.7451)	-114.6	2276
$M_2$	3.22	5.16	(0.4381,0.8369)	-80.3	5978
$M_3$	2.842	2.926	(0.4366,0.7589)	-93.7	4729

[0120] 表4三种方法的剩余寿命预测对比表

[0121]

模型	1000h	1500h	2000h
$M_1$	1275.8	1653.1	2434.6
$M_2$	1485.2	2055.7	2924.5
$M_3$	1064.5	1465.4	2278.5
真实值	1203.5	1587.6	2398.3

[0122] 在上述实施例中,可以全部或部分地通过软件、硬件、固件或者其任意组合来实现。当使用全部或部分地以计算机程序产品的形式实现,所述计算机程序产品包括一个或多个计算机指令。在计算机上加载或执行所述计算机程序指令时,全部或部分地产生按照本发明实施例所述的流程或功能。所述计算机可以是通用计算机、专用计算机、计算机网络、或者其他可编程装置。所述计算机指令可以存储在计算机可读存储介质中,或者从一个计算机可读存储介质向另一个计算机可读存储介质传输,例如,所述计算机指令可以从一个网站站点、计算机、服务器或数据中心通过有线(例如同轴电缆、光纤、数字用户线(DSL)或无线(例如红外、无线、微波等)方式向另一个网站站点、计算机、服务器或数据中心进行传输)。所述计算机可读存储介质可以是计算机能够存取的任何可用介质或者是包含一个或多个可用介质集成的服务器、数据中心等数据存储设备。所述可用介质可以是磁性介质,(例如,软盘、硬盘、磁带)、光介质(例如,DVD)、或者半导体介质(例如固态硬盘Solid State Disk(SSD))等。

[0123] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。



图1

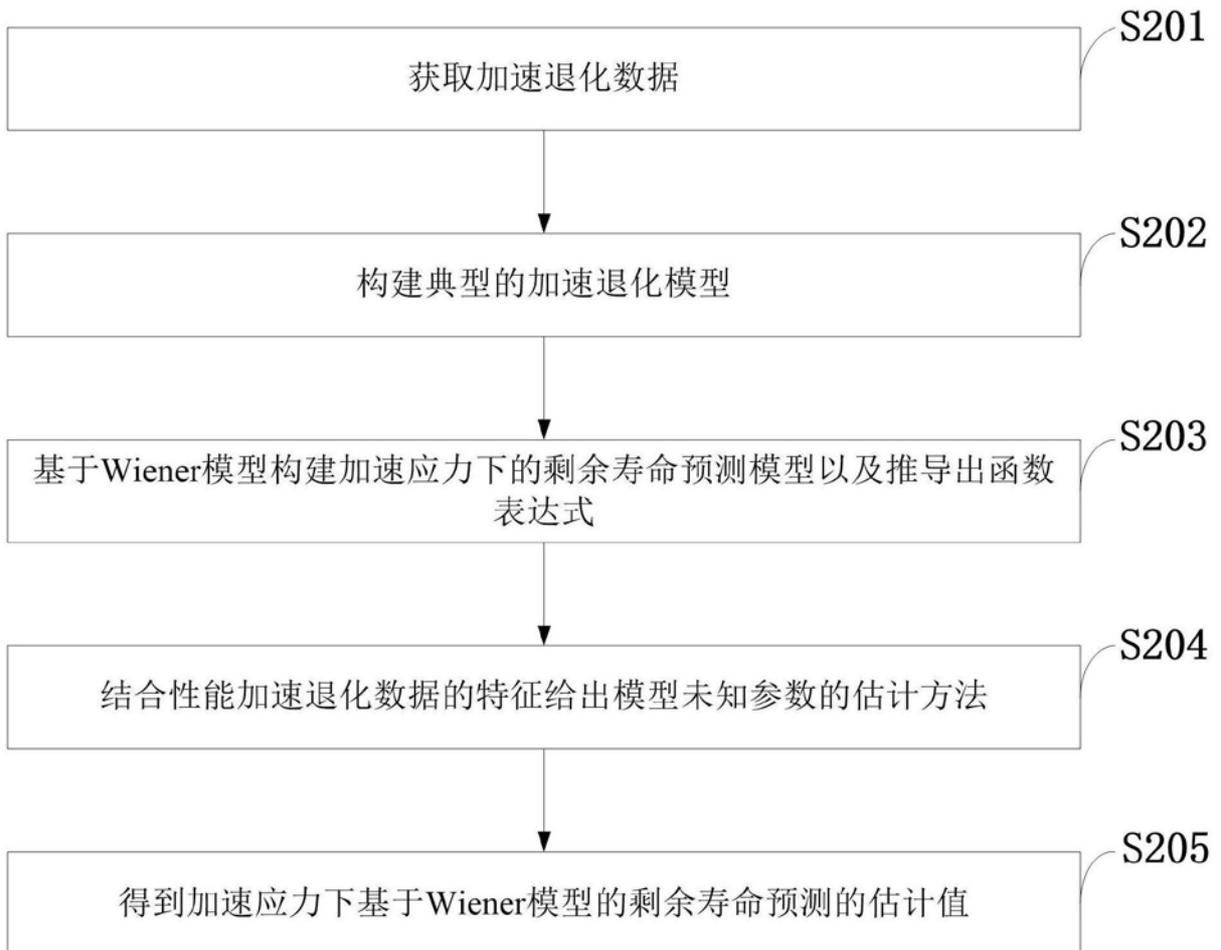


图2

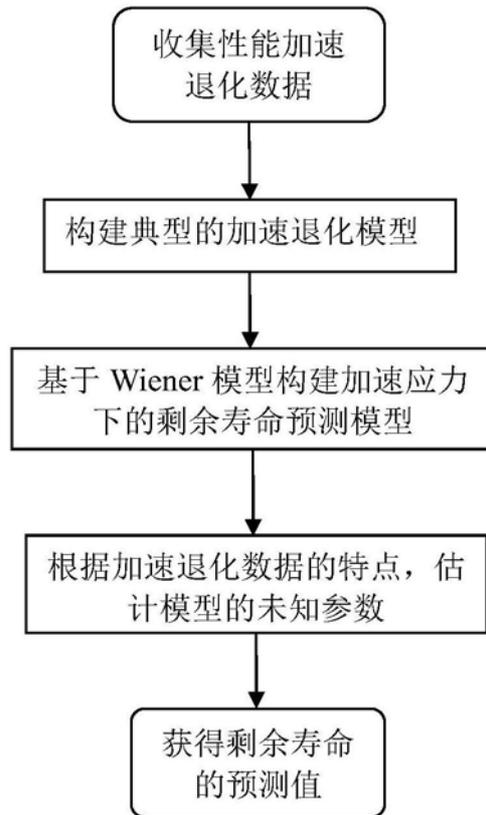
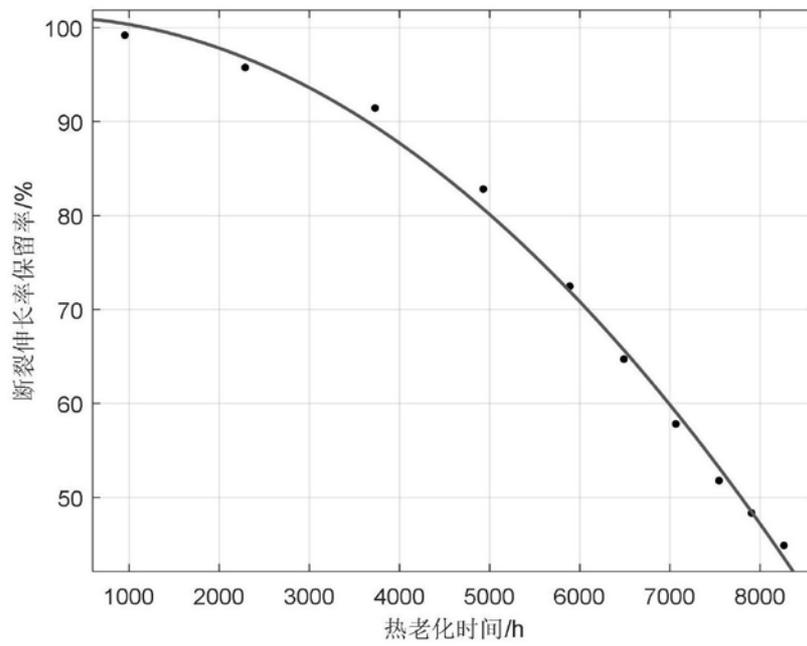
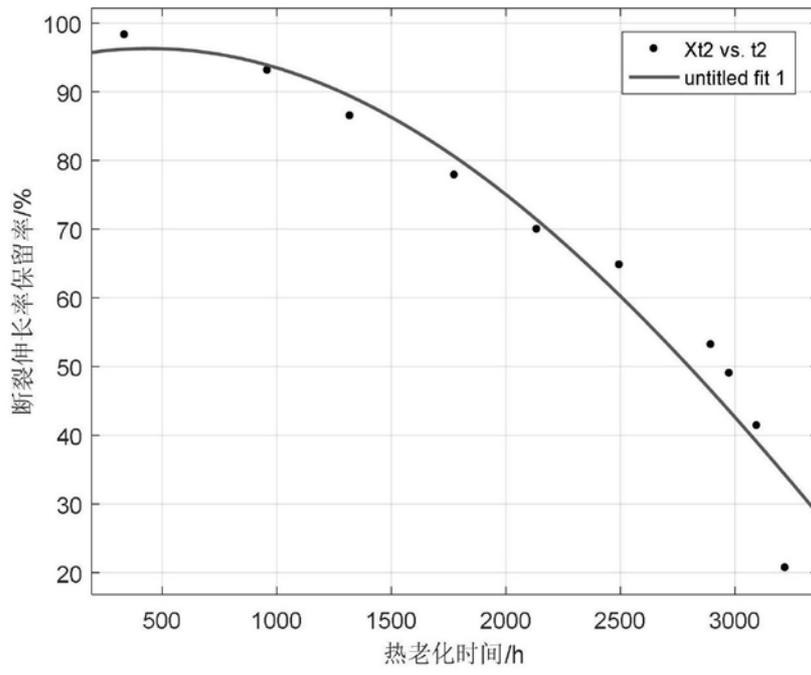


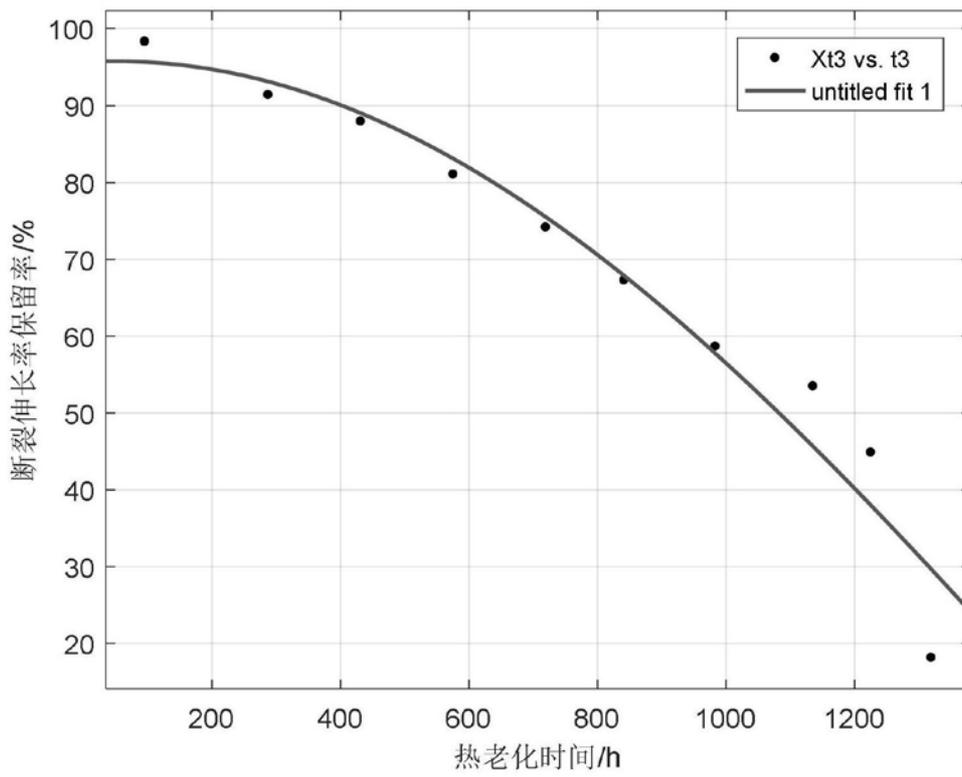
图3



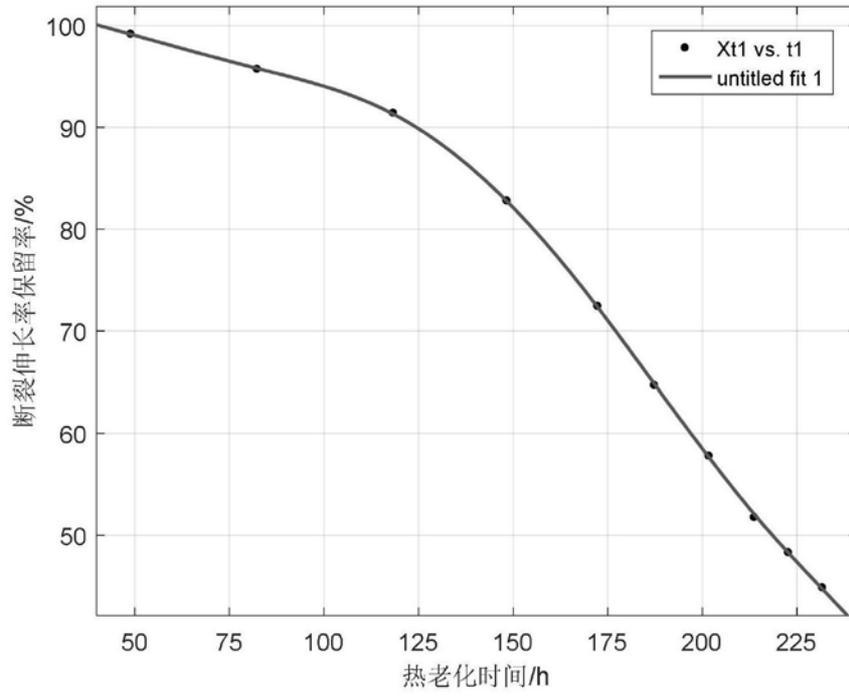
(a)



(b)



(c)



(d)

图4