

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102253242 A

(43) 申请公布日 2011. 11. 23

(21) 申请号 201110106975. 9

(22) 申请日 2011. 04. 27

(71) 申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 林逢春 马小兵 常士华 陈云霞

康锐

(74) 专利代理机构 北京慧泉知识产权代理有限

公司 11232

代理人 王顺荣 唐爱华

(51) Int. Cl.

G01P 21/00(2006. 01)

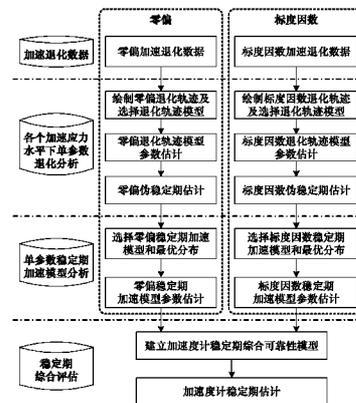
权利要求书 5 页 说明书 12 页 附图 5 页

(54) 发明名称

一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法

(57) 摘要

本发明给出了一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法。该方法假设加速度计零偏和标度因数共同退化且满足幂退化律,其高温加速退化试验满足失效机理一致性条件且加速模型为阿伦尼斯方程。该方法的具体步骤是: 1. 建立零偏和标度因数退化轨迹模型; 2. 估计零偏和标度因数的伪稳定期; 3. 建立零偏和标度因数的稳定期加速模型; 4. 建立加速度计稳定期的综合可靠性模型, 确定给定可靠度下的加速度计稳定期。本发明同时考虑了零偏退化和标度因数退化对加速度计稳定期的影响, 同时采用整体极大似然估计方法充分利用不同试验温度之间的横向信息, 能够更好的描述双参数共同退化情况下的加速度计稳定期情况, 并有效提高估计精度。



1. 一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法,其特征在于:该方法具体步骤如下:

步骤一:根据加速度计零偏和标度因数加速退化数据,建立不同试验温度下各个加速度计的零偏和标度因数退化轨迹模型,并进行退化轨迹模型参数辨识;

步骤二:在所建立的零偏和标度因数退化轨迹模型的基础上,根据给定的零偏和标度因数容许变化量即失效阈值,估计不同试验温度下各个加速度计零偏和标度因数的伪稳定期;

步骤三:建立加速度计零偏和标度因数的稳定期加速模型,根据零偏和标度因数的伪稳定期估计,采用整体极大似然估计方法即 Integral Maximum Likelihood Estimation IMLE,得到加速模型参数的点估计和协方差估计;

步骤四:根据零偏和标度因数的稳定期加速模型,得到零偏和标度因数共同退化情况下加速度计稳定期的综合可靠性模型,进而给出给定可靠度下加速度计稳定期的点估计和置信下限,从而达到了基于双参数加速退化数据确定加速度计稳定期的目的。

2. 根据权利要求1所述的一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法,其特征在于:在步骤一中所述的零偏和标度因数随退化时间的变化采用幂退化模型描述,其退化轨迹模型如下:

$$y = y_0 + \beta x + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_y^2) \quad (1)$$

式中: $x = t^\alpha$, ε 为均值为零、标准差为 σ_y 的正态随机变量,其中 α 可以根据工程经验或相关系数最大原则确定;退化轨迹模型(1)中的未知参数 y_0 和 β 可以通过线性回归分析确定。

3. 根据权利要求1所述的一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法,其特征在于:在步骤二中所述的零偏容许变化量即失效阈值 D_{f,K_0} 通常用绝对变化量表示,即:

$$D_{f,K_0} = |K_0 - K_{0,0}| \quad (2)$$

标度因数容许变化量即失效阈值 D_{f,K_1} 通常用相对变化量表示,即:

$$D_{f,K_1} = \left| \frac{K_1}{K_{1,0}} - 1 \right| \quad (3)$$

式中: K_0 和 K_1 分别为加速度计稳定期结束时的零偏和标度因数, $K_{0,0}$ 和 $K_{1,0}$ 分别为加速度计零偏和标度因数的初始值,根据零偏和标度因数的退化轨迹模型,零偏和标度因数的伪稳定期估计 \hat{t}_{K_0} 和 \hat{t}_{K_1} 分别为:

$$\hat{t}_{K_0} = \left(\frac{D_{f,K_0}}{|\hat{\beta}_{K_0}|} \right)^{1/\alpha_0} \quad (4)$$

$$\hat{t}_{K_1} = \left(\frac{D_{f,K_1} |\hat{y}_{0,K_1}|}{|\hat{\beta}_{K_1}|} \right)^{1/\alpha_1} \quad (5)$$

式中: $\hat{\beta}_{K_0}$ 和 $\hat{\beta}_{K_1}$ 分别为零偏和标度因数退化轨迹模型中退化速率的估计值, \hat{y}_{0,K_1} 为标度因数退化轨迹模型中标度因数初始值的估计值, α_0 和 α_1 分别为零偏和标度因数退化轨迹

模型中的修正系数。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法,其特征在於:在步骤三中零偏和标度因数的稳定期通常服从对数正态分布或者威布尔分布,这可以根据工程经验或通过分布拟合优度检验确定;当稳定期服从对数正态分布时,稳定期加速模型为:

$$\begin{cases} \mu(T) = a + \frac{b}{T} \\ t(T) \sim LN(\mu(T), \sigma^2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a = \ln C$, $b = E_a/k_B$, $\mu(T)$ 为温度 T 下稳定期的对数均值, σ 为与温度 T 无关的稳定期对数标准差,其中 a 、 b 和 σ 为待估的未知参数;当稳定期服从威布尔分布时,稳定期加速模型为:

$$\begin{cases} \ln \eta(T) = a + \frac{b}{T} \\ t(T) \sim Weibull(\eta(T), m) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\eta(T)$ 为温度 T 下稳定期的位置参数, m 为与温度 T 无关的稳定期形状参数,其中 a 、 b 和 m 为待估的未知参数;由此可以建立所有试验温度下稳定期的整体极大似然函数,进而得到稳定期加速模型参数 a 、 b 和 σ 或 m 的 IMLE 和协方差估计;

a. 当稳定期服从对数正态分布时,整体极大似然函数为:

$$L(a, b, \sigma) = \prod_{i=1}^p \prod_{j=1}^{q_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t_{ij}} \exp\left[-\frac{(\ln t_{ij} - a - bx_i)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

式中: t_{ij} 为加速应力水平 S_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 下第 j ($i = 1, 2, \dots, q_i$) 个加速度计参数伪稳定期, $x_i = 1/T_i$ 。令 $\partial \ln L / \partial a = 0$, $\partial \ln L / \partial b = 0$, $\partial \ln L / \partial \sigma = 0$, 得到 a 、 b 和 σ 的整体极大似然方程组:

$$\begin{cases} a + b\bar{x} = \bar{y} \\ a\bar{x} + b\bar{x}^2 = \overline{xy} \\ \sigma^2 = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} (\ln t_{ij} - a - bx_i)^2 \end{cases} \quad (9)$$

则 a 、 b 和 σ 的 IMLE 可由下式给出:

$$\begin{cases} \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} (\ln t_{ij} - a - bx_i)^2 \end{cases} \quad (10)$$

并且近似有

$$(\hat{a}, \hat{b}, \hat{\sigma})^T \sim N((a, b, \sigma)^T, \Sigma) \quad (11)$$

公式 (11) ~ (13) 中:

$$q = \sum_{i=1}^p q_i \quad (12)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p q_i x_i \quad (13)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \ln t_{ij} \quad (14)$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p q_i x_i^2 \quad (15)$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i \ln t_{ij} \quad (16)$$

$$\Sigma = F^{-1} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial \sigma} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial \sigma} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial \sigma} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial \sigma} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \sigma^2} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{\sigma^2}{q(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \begin{bmatrix} \overline{x^2} & -\bar{x} & 0 \\ -\bar{x} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(\overline{x^2} - \bar{x}^2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 t_{ij} 一般是未知的, 可以用其估计值 \hat{t}_{ij} 代替。

b. 当稳定期服从威布尔分布时, 整体极大似然函数为:

$$L(a, b, m) = \prod_{i=1}^p \prod_{j=1}^{q_i} m t_{ij}^{m-1} \exp[-m(a + b x_i)] \exp\{-t_{ij}^m \exp[-m(a + b x_i)]\} \quad (18)$$

式中: t_{ij} 为加速应力水平 S_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 下第 j ($i = 1, 2, \dots, q_i$) 个加速度计参数伪稳定期, $x_i = 1/T_i$ 。令 $\partial \ln L / \partial a = 0$, $\partial \ln L / \partial b = 0$, $\partial \ln L / \partial m = 0$, 得到 a 、 b 和 m 的整体极大似然方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} t_{ij}^m \exp[-m(a + b x_i)] - q = 0 \\ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i t_{ij}^m \exp[-m(a + b)] - \sum_{i=1}^p q_i x_i = 0 \\ \frac{q}{m} + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \ln t_{ij} \{1 - t_{ij}^m \exp[-m(a + b x_i)]\} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

a 、 b 和 m 的 IMLE 可通过数值方法求解公式 (21) 给出的超越方程组得到, 并且近似有

$$(\hat{a}, \hat{b}, \hat{m})^T \sim N((a, b, m)^T, \Sigma) \quad (20)$$

公式 (21) 和 (22) 中:

$$q = \sum_{i=1}^p q_i \quad (21)$$

$$\Sigma = F^{-1} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial m^2} \end{bmatrix}^{-1} \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2} = -m^2 q \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b^2} = -m^2 \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i^2 t_{ij}^m \exp[-m(a + bx_i)] \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial m^2} = -\frac{q}{m^2} - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} t_{ij}^m (\ln t_{ij} - a - bx_i)^2 \exp[-m(a + bx_i)] \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} = -m^2 \sum_{i=1}^p q_i x_i \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m} = q(1 - ma) + m \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \ln t_{ij} - mb \sum_{i=1}^p q_i x_i \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m} = m \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i t_{ij}^m (\ln t_{ij} - a - bx_i) \exp[-m(a + bx_i)] \end{array} \right. \quad (23)$$

其中 t_{ij} 一般是未知的, 可以用其估计值 \hat{t}_{ij} 代替。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法, 其特征在于: 在步骤四中所述的零偏和标度因数共同退化情况下加速度计稳定期的综合可靠性模型是建立在零偏和标度因数退化独立假设的基础上的, 即:

$$R(t, \theta) = R_{K_0}(t, \theta_{K_0}) \cdot R_{K_1}(t, \theta_{K_1}) \quad (24)$$

式中: $R(t, \theta)$ 为 t 时刻下加速度计参数保持稳定的可靠度, $R_{K_0}(t, \theta_{K_0})$ 和 $R_{K_1}(t, \theta_{K_1})$ 分别为 t 时刻下零偏和标度因数未发生退化失效的可靠度, 其中 $\theta = (\theta_{K_0}^T, \theta_{K_1}^T)^T$, θ_{K_0} 和 θ_{K_1} 分别为零偏和标度因数稳定期加速模型未知参数组成的列向量; 当零偏和标度因数稳定期均服从对数正态分布时, 有 $\theta_{K_0} = (a_{K_0}, b_{K_0}, \sigma_{K_0})^T$, $\theta_{K_1} = (a_{K_1}, b_{K_1}, \sigma_{K_1})^T$; 那么, 给定可靠度 R 下加速度计稳定期 t_R 的点估计 \hat{t}_R 可由公式 (27) 计算得到

$$R(\hat{t}_R, \hat{\theta}) = R_{K_0}(\hat{t}_R, \hat{\theta}_{K_0}) \cdot R_{K_1}(\hat{t}_R, \hat{\theta}_{K_1}) = R \quad (25)$$

其中: $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_{K_0}^T, \hat{\theta}_{K_1}^T)^T$, $\hat{\theta}_{K_0}$ 和 $\hat{\theta}_{K_1}$ 分别为 θ_{K_0} 和 θ_{K_1} 的 IMLE; 而 t_R 置信水平为 $\gamma = 1 - \alpha$ 的单侧置信下限 $t_{RL, \gamma}$ 根据 IMLE 的正态近似性和可靠度置信限曲线等同原理计算得到, 具体过程如下:

a. 对可靠度 $R(t)$ 进行 Logit 变换, 得到:

$$S(t, \theta) = \ln \frac{R(t, \theta)}{1 - R(t, \theta)} \quad (26)$$

并且近似有:

$$S(t, \hat{\theta}) \sim N(S(t, \theta), \sigma_S^2(\hat{\theta})) \quad (27)$$

式中:

$$\sigma_S^2(\hat{\theta}) = \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_0}} \right)^T \Sigma_{K_0} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_0}} \right) + \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_1}} \right)^T \Sigma_{K_1} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_1}} \right) \quad (28)$$

其中: Σ_{K_0} 和 Σ_{K_1} 分别为 $\hat{\theta}_{K_0}$ 和 $\hat{\theta}_{K_1}$ 的近似协方差矩阵;

b. 由于 $S(t, \theta)$ 在 $(0, 1)$ 上为 R 的单调增函数, 所以可靠度 $R(t)$ 的单侧置信下限可由 $S(t, \theta)$ 的单侧置信下限反推得到, 即:

$$S_L = \ln \frac{R_L}{1-R_L} \quad (29)$$

在给定制信水平 γ 下, $S(t, \theta)$ 的单侧置信下限为:

$$S_L = \ln \frac{R(t, \hat{\theta})}{1-R(t, \hat{\theta})} - z_\alpha \sigma_s(\hat{\theta}) \quad (30)$$

那么, 可靠度 $R(t)$ 的单侧置信下限为:

$$R_{L,\gamma}(t) = \left\{ 1 + \frac{1-R(t, \hat{\theta})}{R(t, \hat{\theta})} \exp[z_\alpha \sigma_s(\hat{\theta})] \right\}^{-1} \quad (31)$$

其中: z_α 为标准正态分布的上 α 分位点;

c. 根据可靠度置信限曲线等同原理, 可靠度置信水平为 γ 的单侧置信下(上)限曲线同时也是具有该分布函数的母体百分位值的置信水平为 γ 的单侧置信下(上)限曲线, 那么, 给定可靠度 R 下加速度计稳定期的置信水平为 γ 的单侧置信下限 $t_{RL,\gamma}$ 可由公式 (34) 计算得到

$$R_{L,\gamma}(t_{RL,\gamma}) = R \quad (32)$$

式中: $R_{L,\gamma}(t)$ 为 t 时刻下加速度计参数保持稳定的可靠度的置信水平为 γ 的单侧置信下限。

一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法

技术领域

[0001] 本发明提供一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法,属于加速退化数据可靠性评估技术领域。

背景技术

[0002] 加速度计是惯性导航系统的关键组件之一,用于测量载体的线加速度,进而通过积分得到载体的运动轨迹(速度和距离),在航空、航天、舰船的惯性测量和制导方面具有广泛的应用。

[0003] 加速度计的测量精度主要由零偏和标度因数决定。但是,在长期贮存过程中,零偏和标度因数会随着加速度计材料、结构和环境条件的变化而改变,对加速度计的测量精度产生不良影响。正常贮存环境下加速度计参数能够保证规定测量精度的时间称为加速度计稳定期,而零偏和标度因数的稳定性正是其主要影响参数。零偏和标度因数的稳定性要求通常采用稳定期内的容许变化量表示。

[0004] 大量观测数据表明,加速度计零偏和标度因数均随贮存时间表现出退化特征。但是正常贮存环境下加速度计的稳定期通常长达数年,零偏和标度因数的退化速率均很低。为此,采用高温加速退化试验技术快速获取较高温下加速度计零偏和标度因数的参数退化信息,确定正常贮存环境下加速度计稳定期。然而,传统的加速退化试验评估方法通常先进行产品退化参数集的简化,即从众多具有退化特征的性能参数中选择影响较大、退化速率较快的某一个性能参数作为产品主要退化参数,再通过该性能参数的退化特征来描述产品的寿命特征,进而确定产品寿命。对于加速度计这种复杂产品,其零偏和标度因数同时均存在退化特征,并且对加速度计稳定期的影响程度和退化速率均相当,必须同时考虑零偏和标度因数退化对加速度计稳定期的影响进行合理的综合评定,传统加速退化试验评估方法显然无法满足这一要求。本发明正是针对这种情况,给出了一种基于零偏和标度因数加速退化数据的加速度计稳定期综合确定方法。

发明内容

[0005] (1) 本发明的目的:针对传统加速退化评估方法在双参数共同退化情况下难以进行有效综合评估的不足,本发明提供一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法。它首先根据高温加速退化试验的加速度计零偏和标度因数的退化数据估计不同温度下零偏和标度因数的伪稳定期估计,然后基于 Arrhenius 方程外推得到正常贮存环境下零偏和标度因数的稳定期分布,并建立加速度计稳定期的综合可靠性模型,综合确定加速度计的稳定期。

[0006] (2) 技术方案:

[0007] 本发明提出的加速度计加速退化试验的假设如下:

[0008] 假设 1 加速度计零偏和标度因数均具有可退化性。

[0009] 假设 2 加速度计零偏和标度因数的退化过程均具有规律性,且满足幂退化模型:

$$[0010] \quad y = y_0 + \beta t^\alpha \quad (1)$$

[0011] 式中： y 为加速度计性能参数（零偏 K_0 或标度因数 K_1 ）， y_0 为其初始值， t 为退化时间， β 为退化速率， α 为修正参数。其中 y_0 和 β 均为未知待估参数。

[0012] 假设 3 加速度计在进行高温加速退化试验过程中保持失效机理不变，且与正常贮存环境下的失效机理相同。

[0013] 假设 4 加速度计性能参数稳定期与温度之间的关系可以通过阿伦尼斯 (Arrhenius) 模型描述：

$$[0014] \quad t = A \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (2)$$

[0015] 式中： t 为加速度计性能参数稳定期， T 为绝对温度 (K)， A 为指前因子， E_a 为激活能 (eV)， k_B 为玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数， $k_B = 8.6171 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。其中 A 和 E_a 均为未知待估参数。

[0016] 基于上述假设，本发明提供一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法，该方法具体步骤如下：

[0017] 步骤一：根据加速度计零偏和标度因数加速退化数据，建立不同试验温度下各个加速度计的零偏和标度因数退化轨迹模型，并进行退化轨迹模型参数辨识。

[0018] 步骤二：在所建立的零偏和标度因数退化轨迹模型的基础上，根据给定的零偏和标度因数容许变化量（失效阈值），估计不同试验温度下各个加速度计零偏和标度因数的伪稳定期。

[0019] 步骤三：建立加速度计零偏和标度因数的稳定期加速模型，根据零偏和标度因数的伪稳定期估计，采用整体极大似然估计方法 (Integral Maximum Likelihood Estimation, IMLE) 得到加速模型参数的点估计和协方差估计。

[0020] 步骤四：根据零偏和标度因数的稳定期加速模型，得到零偏和标度因数共同退化情况下加速度计稳定期的综合可靠性模型，进而给出给定可靠度下加速度计稳定期的点估计和置信下限。

[0021] 通过以上四个步骤，达到了基于双参数加速退化数据确定加速度计稳定期的目的。

[0022] 其中，在步骤一中所所述的零偏和标度因数随退化时间的变化采用幂退化模型描述，其退化轨迹模型如下：

$$[0023] \quad y = y_0 + \beta x + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_y^2) \quad (3)$$

[0024] 式中： $x = t^\alpha$ ， ε 为均值为零、标准差为 σ_y 的正态随机变量，其中 α 可以根据工程经验或相关系数最大原则确定。退化轨迹模型 (3) 中的未知参数 y_0 和 β 可以通过线性回归分析确定。

[0025] 其中，在步骤二中所所述的零偏容许变化量（失效阈值） D_{f,K_0} 通常用绝对变化量表示，即：

$$[0026] \quad D_{f,K_0} = |K_0 - K_{0,0}| \quad (4)$$

[0027] 标度因数容许变化量（失效阈值） D_{f,K_1} 通常用相对变化量表示，即：

$$[0028] \quad D_{f,K_1} = \left| \frac{K_1}{K_{1,0}} - 1 \right| \quad (5)$$

[0029] 式中： K_0 和 K_1 分别为加速度计稳定期结束时的零偏和标度因数， $K_{0,0}$ 和 $K_{1,0}$ 分别为加速度计零偏和标度因数的初始值。根据零偏和标度因数的退化轨迹模型，零偏和标度因数的伪稳定期估计 \hat{t}_{K_0} 和 \hat{t}_{K_1} 分别为：

$$[0030] \quad \hat{t}_{K_0} = \left(\frac{D_{f,K_0}}{|\hat{\beta}_{K_0}|} \right)^{1/\alpha_0} \quad (6)$$

$$[0031] \quad \hat{t}_{K_1} = \left(\frac{D_{f,K_1} |\hat{y}_{0,K_1}|}{|\hat{\beta}_{K_1}|} \right)^{1/\alpha_1} \quad (7)$$

[0032] 式中： $\hat{\beta}_{K_0}$ 和 $\hat{\beta}_{K_1}$ 分别为零偏和标度因数退化轨迹模型中退化速率的估计值， \hat{y}_{0,K_1} 为标度因数退化轨迹模型中标度因数初始值的估计值， α_0 和 α_1 分别为零偏和标度因数退化轨迹模型中的修正系数。

[0033] 其中，在步骤三中零偏和标度因数的稳定期通常服从对数正态分布或者威布尔分布，这可以根据工程经验或通过分布拟合优度检验确定。当稳定期服从对数正态分布时，稳定期加速模型为：

$$[0034] \quad \begin{cases} \mu(T) = a + \frac{b}{T} \\ t(T) \sim LN(\mu(T), \sigma^2) \end{cases} \quad (8)$$

[0035] 式中： $a = \ln C$ ， $b = E_a/k_B$ ， $\mu(T)$ 为温度 T 下稳定期的对数均值， σ 为与温度 T 无关的稳定期对数标准差，其中 a 、 b 和 σ 为待估的未知参数。当稳定期服从威布尔分布时，稳定期加速模型为：

$$[0036] \quad \begin{cases} \ln \eta(T) = a + \frac{b}{T} \\ t(T) \sim Weibull(\eta(T), m) \end{cases} \quad (9)$$

[0037] 式中： $\eta(T)$ 为温度 T 下稳定期的位置参数， m 为与温度 T 无关的稳定期形状参数，其中 a 、 b 和 m 为待估的未知参数。由此可以建立所有试验温度下稳定期的整体极大似然函数，进而得到稳定期加速模型参数 a 、 b 和 σ （或 m ）的 IMLE 和协方差估计。

[0038] a. 当稳定期服从对数正态分布时，整体极大似然函数为：

$$[0039] \quad L(a, b, \sigma) = \prod_{i=1}^p \prod_{j=1}^{q_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t_{ij}} \exp \left[-\frac{(\ln t_{ij} - a - bx_i)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (10)$$

[0040] 式中： t_{ij} 为加速应力水平 S_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 下第 j ($i = 1, 2, \dots, q_i$) 个加速度计参数伪稳定期， $x_i = 1/T_i$ 。令 $\partial \ln L / \partial a = 0$ ， $\partial \ln L / \partial b = 0$ ， $\partial \ln L / \partial \sigma = 0$ ，得到 a 、 b 和 σ 的整体极大似然方程组：

$$[0041] \quad \begin{cases} a + b\bar{x} = \bar{y} \\ a\bar{x} + b\bar{x}^2 = \overline{xy} \\ \sigma^2 = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} (\ln t_{ij} - a - bx_i)^2 \end{cases} \quad (11)$$

[0042] 则 a、b 和 σ 的 IMLE 可由下式给出：

$$[0043] \quad \begin{cases} \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} (\ln t_{ij} - a - bx_i)^2 \end{cases} \quad (12)$$

[0044] 并且近似有

$$[0045] \quad (\hat{a}, \hat{b}, \hat{\sigma})^T \sim N((a, b, \sigma)^T, \Sigma) \quad (13)$$

[0046] 公式 (11) ~ (13) 中：

$$[0047] \quad q = \sum_{i=1}^p q_i \quad (14)$$

$$[0048] \quad \bar{x} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p q_i x_i \quad (15)$$

$$[0049] \quad \bar{y} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \ln t_{ij} \quad (16)$$

$$[0050] \quad \overline{x^2} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p q_i x_i^2 \quad (17)$$

$$[0051] \quad \overline{xy} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i \ln t_{ij} \quad (18)$$

[0052]

$$\Sigma = F^{-1} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial \sigma} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial \sigma} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial \sigma} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial \sigma} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \sigma^2} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{\sigma^2}{q(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \begin{bmatrix} \overline{x^2} & -\bar{x} & 0 \\ -\bar{x} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(\overline{x^2} - \bar{x}^2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

[0053] 其中 t_{ij} 一般是未知的, 可以用其估计值 \hat{t}_{ij} 代替。

[0054] b. 当稳定期服从威布尔分布时, 整体极大似然函数为：

$$[0055] \quad L(a, b, m) = \prod_{i=1}^p \prod_{j=1}^{q_i} m t_{ij}^{m-1} \exp[-m(a + bx_i)] \exp\{-t_{ij}^m \exp[-m(a + bx_i)]\} \quad (20)$$

[0056] 式中： t_{ij} 为加速应力水平 S_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 下第 j ($i = 1, 2, \dots, q_i$) 个加速度计参数伪稳定期, $x_i = 1/T_i$ 。令 $\partial \ln L / \partial a = 0$, $\partial \ln L / \partial b = 0$, $\partial \ln L / \partial m = 0$, 得到 a、b 和 m 的整体极大似然方程组：

$$[0057] \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} t_{ij}^m \exp[-m(a + bx_i)] - q = 0 \\ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i t_{ij}^m \exp[-m(a + b)] - \sum_{i=1}^p q_i x_i = 0 \\ \frac{q}{m} + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \ln t_{ij} \{1 - t_{ij}^m \exp[-m(a + bx_i)]\} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

[0058] a、b 和 m 的 IMLE 可通过数值方法求解公式 (21) 给出的超越方程组得到。并且近似有

$$[0059] \quad (\hat{a}, \hat{b}, \hat{m})^T \sim N((a, b, m)^T, \Sigma) \quad (22)$$

[0060] 公式 (21) 和 (22) 中：

$$[0061] \quad q = \sum_{i=1}^p q_i \quad (23)$$

$$[0062] \quad \Sigma = \mathbf{F}^{-1} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial m^2} \end{bmatrix}^{-1} \quad (24)$$

$$[0063] \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2} = -m^2 q \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b^2} = -m^2 \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i^2 t_{ij}^m \exp[-m(a + bx_i)] \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial m^2} = -\frac{q}{m^2} - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} t_{ij}^m (\ln t_{ij} - a - bx_i)^2 \exp[-m(a + bx_i)] \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b} = -m^2 \sum_{i=1}^p q_i x_i \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m} = q(1 - ma) + m \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \ln t_{ij} - mb \sum_{i=1}^p q_i x_i \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m} = m \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} x_i t_{ij}^m (\ln t_{ij} - a - bx_i) \exp[-m(a + bx_i)] \end{cases} \quad (25)$$

[0064] 其中 t_{ij} 一般是未知的, 可以用其估计值 \hat{t}_{ij} 代替。

[0065] 其中, 在步骤四中所述的零偏和标度因数共同退化情况下加速度计稳定期的综合可靠性模型是建立在零偏和标度因数退化独立假设的基础上的, 即：

$$[0066] \quad R(t, \theta) = R_{K_0}(t, \theta_{K_0}) \cdot R_{K_1}(t, \theta_{K_1}) \quad (26)$$

[0067] 式中： $R(t, \theta)$ 为 t 时刻下加速度计参数保持稳定的可靠度, $R_{K_0}(t, \theta_{K_0})$ 和 $R_{K_1}(t, \theta_{K_1})$ 分别为 t 时刻下零偏和标度因数未发生退化失效的可靠度, 其中 $\theta = (\theta_{K_0}^T, \theta_{K_1}^T)^T$, θ_{K_0} 和 θ_{K_1} 分别为零偏和标度因数稳定期加速模型未知参数组成的列向量。例如, 当零偏和标度因数稳定期均服从对数正态分布时, 有 $\theta_{K_0} = (a_{K_0}, b_{K_0}, \sigma_{K_0})^T$, $\theta_{K_1} = (a_{K_1}, b_{K_1}, \sigma_{K_1})^T$ 。那么, 给定可靠度 R

下加速度计稳定期 t_R 的点估计 \hat{t}_R 可由公式 (27) 计算得到。

$$[0068] \quad R(\hat{t}_R, \hat{\theta}) = R_{K_0}(\hat{t}_R, \hat{\theta}_{K_0}) \cdot R_{K_1}(\hat{t}_R, \hat{\theta}_{K_1}) = R \quad (27)$$

[0069] 其中： $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_{K_0}^T, \hat{\theta}_{K_1}^T)^T$ ， $\hat{\theta}_{K_0}$ 和 $\hat{\theta}_{K_1}$ 分别为 θ_{K_0} 和 θ_{K_1} 的 IMLE。而 t_R 置信水平为 $\gamma = 1 - \alpha$ 的单侧置信下限 $t_{RL, \gamma}$ 可以根据 IMLE 的正态近似性和可靠度置信限曲线等同原理计算得到，具体步骤如下：

[0070] a. 对可靠度 $R(t)$ 进行 Logit 变换，得到：

$$[0071] \quad S(t, \theta) = \ln \frac{R(t, \theta)}{1 - R(t, \theta)} \quad (28)$$

[0072] 并且近似有：

$$[0073] \quad S(t, \hat{\theta}) \sim N(S(t, \theta), \sigma_s^2(\hat{\theta})) \quad (29)$$

[0074] 式中：

$$[0075] \quad \sigma_s^2(\hat{\theta}) = \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_0}} \right)^T \Sigma_{K_0} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_0}} \right) + \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_1}} \right)^T \Sigma_{K_1} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_1}} \right) \quad (30)$$

[0076] 其中： Σ_{K_0} 和 Σ_{K_1} 分别为 $\hat{\theta}_{K_0}$ 和 $\hat{\theta}_{K_1}$ 的近似协方差矩阵。

[0077] b. 由于 $S(t, \theta)$ 在 $(0, 1)$ 上为 R 的单调增函数，所以可靠度 $R(t)$ 的单侧置信下限可由 $S(t, \theta)$ 的单侧置信下限反推得到，即：

$$[0078] \quad S_L = \ln \frac{R_L}{1 - R_L} \quad (31)$$

[0079] 在给定置信水平 γ 下， $S(t, \theta)$ 的单侧置信下限为：

$$[0080] \quad S_L = \ln \frac{R(t, \hat{\theta})}{1 - R(t, \hat{\theta})} - z_\alpha \sigma_s(\hat{\theta}) \quad (32)$$

[0081] 那么，可靠度 $R(t)$ 的单侧置信下限为：

$$[0082] \quad R_{L, \gamma}(t) = \left\{ 1 + \frac{1 - R(t, \hat{\theta})}{R(t, \hat{\theta})} \exp[z_\alpha \sigma_s(\hat{\theta})] \right\}^{-1} \quad (33)$$

[0083] 其中： z_α 为标准正态分布的上 α 分位点。

[0084] c. 根据可靠度置信限曲线等同原理，可靠度置信水平为 γ 的单侧置信下（上）限曲线同时也是具有该分布函数的母体百分位值的置信水平为 γ 的单侧置信下（上）限曲线。那么，给定可靠度 R 下加速度计稳定期的置信水平为 γ 的单侧置信下限 $t_{RL, \gamma}$ 可由公式 (34) 计算得到。

$$[0085] \quad R_{L, \gamma}(t_{RL, \gamma}) = R \quad (34)$$

[0086] 式中： $R_{L, \gamma}(t)$ 为 t 时刻下加速度计参数保持稳定的可靠度的置信水平为 γ 的单侧置信下限。

[0087] (3) 优点和功效：本发明一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法，其优点是：

[0088] ①本发明在加速度计稳定期主要影响参数——零偏和标度因数的稳定期加速模型的基础上，建立了加速度计稳定期综合可靠性模型，与传统的单参数加速退化试验分析方法相比，同时考虑了零偏退化和标度因数退化对加速度计稳定期的影响，能够更好的描

述双参数共同退化情况下的加速度计稳定期情况。

[0089] ②本发明采用的加速退化试验技术可以有效缩短试验时间、减少试验费用,实现加速度计稳定期的快速评定。

[0090] ③本发明采用的 IMLE 方法利用了性能参数稳定期不同试验温度之间的横向信息,增加了可用的信息量,可以有效提高加速度计稳定期的估计精度。

附图说明

[0091] 图 1 是本发明方法流程图。

[0092] 图 2a 是 60°C 下零偏的增量曲线

[0093] 图 2b 是 60°C 下标度因数的增量曲线

[0094] 图 3a 是 70°C 下零偏的增量曲线

[0095] 图 3b 是 70°C 下标度因数的增量曲线

[0096] 图 4a 是 80°C 下零偏的增量曲线

[0097] 图 4b 是 80°C 下标度因数的增量曲线。

[0098] 图 5 是零偏稳定期的对数正态分布概率图。

[0099] 图 6 是标度因数稳定期的威布尔分布概率图。

具体实施方式

[0100] 下面将结合附图和实施例对本发明做进一步详细说明。

[0101] 以下实施例是按照如图 1 所示的流程进行实施的,主要包括绘制零偏/标度因数退化轨迹及选择退化轨迹模型、零偏/标度因数退化轨迹模型参数估计、零偏/标度因数伪稳定期估计、选择零偏/标度因数稳定期加速模型和最优分布、零偏/标度因数稳定期加速模型参数估计、建立加速度计稳定期综合可靠性模型、加速度计稳定期估计。

[0102] 本发明一种基于双参数加速退化数据的加速度计稳定期确定方法,该方法具体步骤如下:

[0103] 步骤一:根据加速度计零偏和标度因数加速退化数据,建立不同试验温度下各个加速度计的零偏和标度因数退化轨迹模型,并进行退化轨迹模型参数辨识,其中加速试验温度有 60°C、70°C、80°C 共计三个。具体实现过程如下:

[0104] a 鉴于加速度计零偏和标度因数的特定时刻个体之间的分散性远远大于特定个体稳定期内的变化值,绘制加速度计零偏和标度因数的增量曲线,如图 2a、b ~ 图 4a、b 所示。其中,零偏增量为 $\Delta K_{0,t} = K_{0,t} - K_{0,0}$,标度因数增量为 $\Delta K_{1,t} = K_{1,t} - K_{1,0}$, $K_{0,t}$ 和 $K_{1,t}$ 分别为 t 时刻加速度计的零偏和标度因数, $K_{0,0}$ 和 $K_{1,0}$ 为其初始值。

[0105] 从中可见,加速度计零偏和标度因数随时间的变化均可采用幂退化模型描述,据此建立退化轨迹模型如下:

$$[0106] \quad y = y_0 + \beta x + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_y^2) \quad (35)$$

[0107] 式中: $x = t^a$, ε 为均值为零、标准差为 σ_y 的正态随机变量。结合工程经验确定零偏退化轨迹模型的修正参数 $\alpha_0 = 0.6$,标度因数退化轨迹模型的修正参数 $\alpha_1 = 0.25$ 。

[0108] b 采用线性回归分析确定零偏和标度因数退化轨迹模型参数。具体做法如下:

[0109] 设在第 i 个温度 T_i 下进行 q_i 个加速度计的退化试验, $y_{i,jk}$ 为温度 T_i 下第 j 个加速

度计在第 k 个测试时刻 t_{ijk} 得到的参数值, $i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q_i, k = 1, 2, \dots, n_{ij}$ 。

[0110] 温度 T_i 下第 j 个加速度计参数退化轨迹模型的 y_{0ij} 和 $\hat{\beta}_{ij}$ 的点估计可由下述诸式确定:

$$[0111] \quad \hat{y}_{0ij} = \bar{y}_{ij} - \hat{\beta}_{ij} \bar{x}_{ij} \quad (36)$$

$$[0112] \quad \hat{\beta}_{ij} = \frac{l_{xyij}}{l_{xxij}} \quad (37)$$

[0113] 相关系数为:

$$[0114] \quad r_{ij} = \frac{l_{xyij}}{\sqrt{l_{xxij} l_{yyij}}} \quad (38)$$

[0115] 式中:

$$[0116] \quad x_{ijk} = t_{ijk}^\alpha \quad (39)$$

$$[0117] \quad \bar{x}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} x_{ijk} \quad (40)$$

$$[0118] \quad \bar{y}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} y_{ijk} \quad (41)$$

$$[0119] \quad l_{xxij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (42)$$

$$[0120] \quad l_{xyij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})(y_{ijk} - \bar{y}_{ij}) \quad (43)$$

$$[0121] \quad l_{yyij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2 \quad (44)$$

[0122] 根据公式 (36) ~ (44), 得到 60℃、70℃、80℃ 下各个加速度计零偏和标度因数退化轨迹模型参数的估计值, 如表 1 所示。

[0123] 表 1 零偏和标度因数退化轨迹模型参数的估计值

[0124]

试验温度 (°C)	加速度计 编号	零偏		标度因数	
		\hat{y}_{0,K_0}	$\hat{\beta}_{K_0} (\times 10^{-3})$	\hat{y}_{0,K_1}	$\hat{\beta}_{K_1} (\times 10^{-6})$
60	A-1	-0.282053	1.340	1.067606759	-45.131
	A-2	-2.714244	0.806	1.065272610	-40.055
	A-3	-2.364805	1.825	1.127258812	-58.696
	A-4	-3.273241	0.386	1.135303771	-33.966
	A-5	—		1.114908976	-57.673
70	B-1	-2.300960	5.443	—	
	B-2	-1.999477	8.694	1.083417424	-43.608
	B-3	-2.047884	6.684	1.101076953	-44.635
	B-4	-0.715518	3.002	1.090082660	-48.254
	B-5	-0.357139	2.912	1.078144115	-38.818
80	C-1	-3.698894	5.100	1.103501143	-44.812
	C-2	-1.452897	5.755	1.165962152	-45.904
	C-3	2.773080	-3.230	1.097407835	-50.618
	C-4	-0.471231	4.843	—	
	C-5	1.793402	3.571	1.108195557	-46.397

[0125] 步骤二：该型加速度计规定稳定期内零偏变化量不超过 $500 \mu g$ ，标度因数变化量不超过 1000ppm ，即零偏和标度因数的失效阈值分别为： $D_{f,K_0} = 0.5 \text{ mg}$ ， $D_{f,K_1} = 0.001$ 。根据步骤一所建立的零偏和标度因数的退化轨迹模型，温度 T_i 下第 j 个加速度计零偏和标度因数的伪稳定期估计 $\hat{t}_{K_0,i,j}$ 和 $\hat{t}_{K_1,i,j}$ 可分别由以下两式计算：

$$[0126] \quad \hat{t}_{K_0,i,j} = \left(\frac{0.5}{|\hat{\beta}_{K_0,i,j}|} \right)^{1/0.5} \quad (45)$$

$$[0127] \quad \hat{t}_{K_1} = \left(\frac{0.001 |\hat{y}_{0,K_1,i,j}|}{|\hat{\beta}_{K_1,i,j}|} \right)^{1/0.3} \quad (46)$$

[0128] 式中： $\hat{\beta}_{K_0,i,j}$ 为温度 T_i 下第 j 个加速度计零偏退化轨迹模型中退化速率的估计值， $\hat{\beta}_{K_0,i,j}$ 和 $\hat{y}_{0,K_1,i,j}$ 分别为温度 T_i 下第 j 个加速度计标度因数退化轨迹模型中退化速率和标度因数初始值的估计值。

[0129] 根据公式 (45) 和 (46)，得到 60°C 、 70°C 、 80°C 下各个加速度计零偏和标度因数伪稳定期的估计值，如表 2 所示。

[0130] 表 2 零偏和标度因数伪稳定期估计

试验温度 (°C)	加速度计编号	\hat{t}_{K_0} (h)	\hat{t}_{K_1} (h)
60	A-1	19334.77	313139.71
	A-2	45089.02	500295.69
	A-3	11554.67	136038.31
	A-4	153923.85	1248151.48
	A-5	—	139662.08
70	B-1	1870.00	—
	B-2	856.84	381003.05
	B-3	1328.02	370316.12
	B-4	5042.89	260428.86
	B-5	5303.65	595049.36
80	C-1	2084.27	367720.54
	C-2	1704.23	416226.16
	C-3	4462.00	220933.22
	C-4	2272.19	—
	C-5	3775.35	325465.73

[0132] 步骤三：建立加速度计零偏和标度因数的稳定期加速模型，根据零偏和标度因数的伪稳定期估计，采用 IMLE 方法得到加速模型参数的点估计和协方差估计。具体实现过程如下：

[0133] a. 零偏和标度因数稳定期加速模型均采用 Arrhenius 方程，经检验确定零偏和标度因数稳定期的最优分布分别为对数正态分布和威布尔分布，零偏和标度因数稳定期的分布概率图分别见图 5 和图 6。由此建立零偏稳定期加速模型如下：

$$[0134] \begin{cases} \mu_{K_0}(T) = a_{K_0} + \frac{b_{K_0}}{T} \\ t_{K_0}(T) \sim LN(\mu_{K_0}(T), \sigma_{K_0}^2) \end{cases} \quad (47)$$

[0135] 标度因数稳定期加速模型如下：

$$[0136] \begin{cases} \ln \eta_{K_1}(T) = a_{K_1} + \frac{b_{K_1}}{T} \\ t_{K_1}(T) \sim Weibull(\eta_{K_1}(T), m_{K_1}) \end{cases} \quad (48)$$

[0137] b. 采用 IMLE 方法得到零偏稳定期加速模型参数的点估计及协方差矩阵估计为：

$$[0138] (\hat{a}_{K_0}, \hat{b}_{K_0}, \hat{\sigma}_{K_0}) = (-34.150, 14674.047, 0.988) \quad (49)$$

[0139]

$$\hat{\Sigma}_{K_0} = \begin{bmatrix} 128.392 & -44082.416 & 0 \\ -44082.416 & 15143550 & 0 \\ 0 & 0 & \square \end{bmatrix} \quad (50)$$

[0140] 标度因数加速模型参数的点估计及协方差矩阵估计为：

$$[\hat{a}_{K_1}, \hat{b}_{K_1}, \hat{m}_{K_1}] = (2.666, 3545.504, 1.958) \quad (51)$$

$$\hat{\Sigma}_{K_1} = \begin{bmatrix} 35.461 & -12148.811 & -0.691915 \\ -12148.811 & 4164780.630 & 243.982157 \\ -0.691915 & 243.982157 & 0.187892 \end{bmatrix} \quad (40)$$

[0143] 步骤四：根据零偏和标度因数的稳定期加速模型，得到零偏和标度因数共同退化情况下加速度计稳定期的综合可靠性模型，进而给出给定可靠度下加速度计稳定期的点估计和置信下限。具体做法如下：

[0144] a. 建立加速度计稳定期综合可靠性模型。t时刻下加速度计参数保持稳定的可靠度 $R(t, \theta)$ 为：

$$R(t, \theta) = R_{K_0}(t, \theta_{K_0}) \cdot R_{K_1}(t, \theta_{K_1}) \quad (52)$$

[0146] 式中：

$$R_{K_0}(t, \theta_{K_0}) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln t - a_{K_0} - b_{K_0}/T}{\sigma_{K_0}} \right] \quad (53)$$

$$R_{K_1}(t, \theta_{K_1}) = \exp \left\{ -t^{m_{K_1}} \exp[-m_{K_1}(a_{K_1} + b_{K_1}/T)] \right\} \quad (54)$$

[0149] 其中： $\theta = (\theta_{K_0}^T, \theta_{K_1}^T)^T$ ， $\theta_{K_0} = (a_{K_0}, b_{K_0}, \sigma_{K_0})^T$ ， $\theta_{K_1} = (a_{K_1}, b_{K_1}, m_{K_1})^T$ 。

[0150] b. 当 $T = 25^\circ\text{C}$ 时，给定可靠度 $R = 0.95$ 下加速度计稳定期 $t_{0.95}$ 的点估计 $\hat{t}_{0.95}$ 可由公式 (55) 计算得到。

$$R(\hat{t}_{0.95}, \hat{\theta}) = 0.95 \quad (55)$$

[0152] 通过数值求解，得到：

$$\hat{t}_{0.95} = 452849.192(\text{h}) = 51.695 \text{ (a)} \quad (56)$$

[0154] c. 当 $T = 25^\circ\text{C}$ 时， $t_{0.95}$ 置信水平为 $\gamma = 0.9$ 的单侧置信下限 $t_{0.95L, 0.9}$ 可由公式 (57) 计算得到。

$$R_{L, 0.9}(t_{0.95L, 0.9}) = 0.95 \quad (57)$$

[0156] 式中： $R_{L, 0.9}(t)$ 为 t 时刻下加速度计参数保持稳定的可靠度的置信水平为 $\gamma = 0.9$ 的单侧置信下限，由公式 (58) 给出。

$$R_{L, 0.9}(t) = \left\{ 1 + \frac{1 - R(t, \hat{\theta})}{R(t, \hat{\theta})} \exp[z_{0.1} \sigma_S(\hat{\theta})] \right\}^{-1} \quad (58)$$

[0158] 其中： $z_{0.1} = 1.282$ 为标准正态分布的上 0.1 分位点， $\sigma_S(\hat{\theta})$ 为 $S(t, \hat{\theta}) = \ln R(t, \hat{\theta}) - \ln[1 - R(t, \hat{\theta})]$ 的近似标准差，由公式 (59) 给出。

$$\sigma_S^2(\hat{\theta}) = \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_0}} \right)^T \Sigma_{K_0} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_0}} \right) + \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_1}} \right)^T \Sigma_{K_1} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta_{K_1}} \right) \quad (59)$$

[0160] 通过数值求解，当 $T = 25^\circ\text{C}$ 时， $t_{0.95}$ 置信水平为 $\gamma = 0.9$ 的单侧置信下限 $t_{0.95L, 0.9}$

为：

$$[0161] \quad \hat{t}_{0.95} = 97442.123(\text{h}) = 11.124(\text{a}) \quad (60)$$

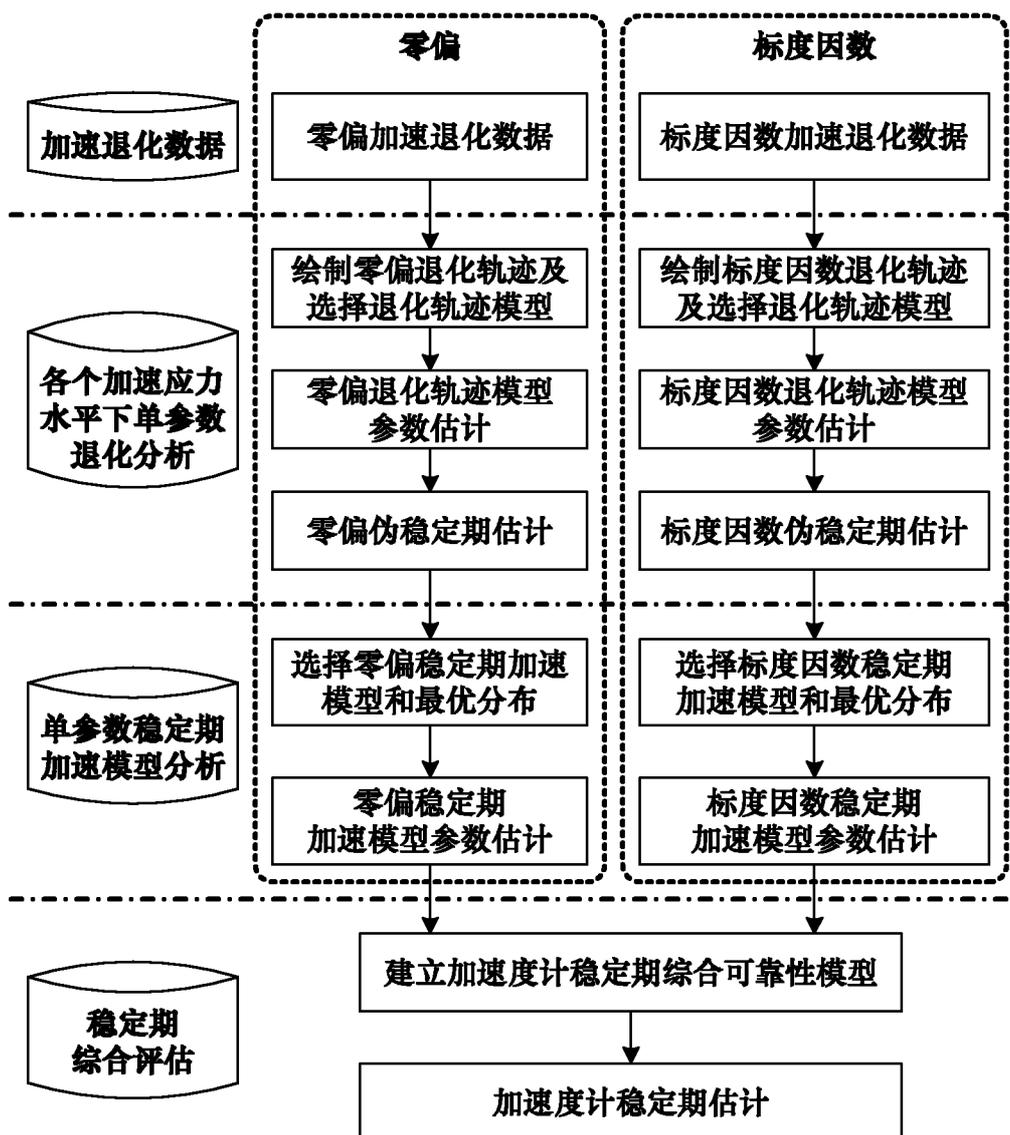


图 1

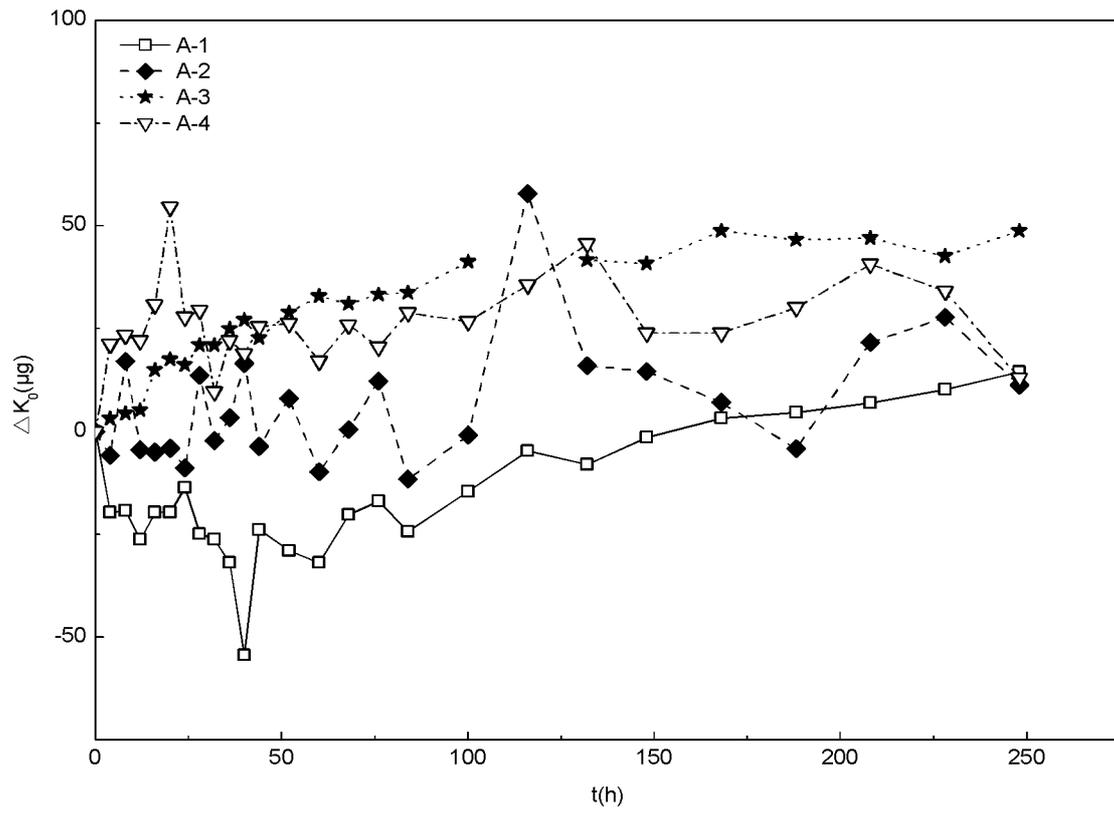


图 2a

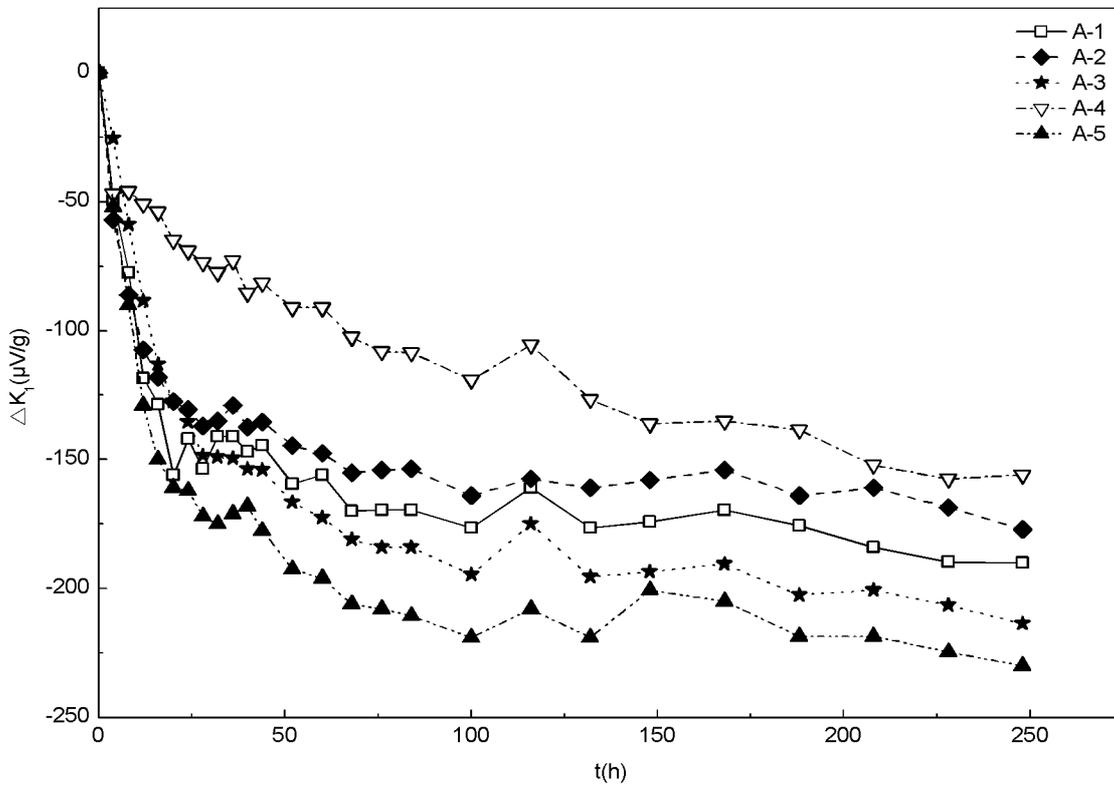


图 2b

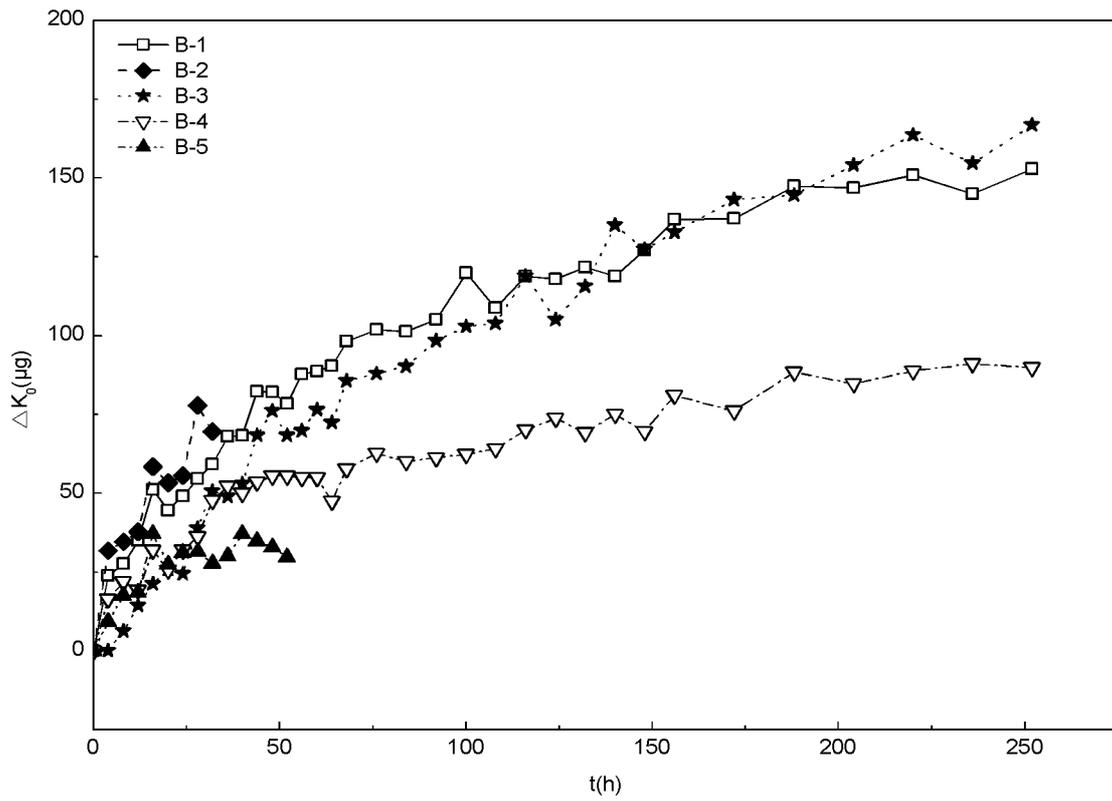


图 3a

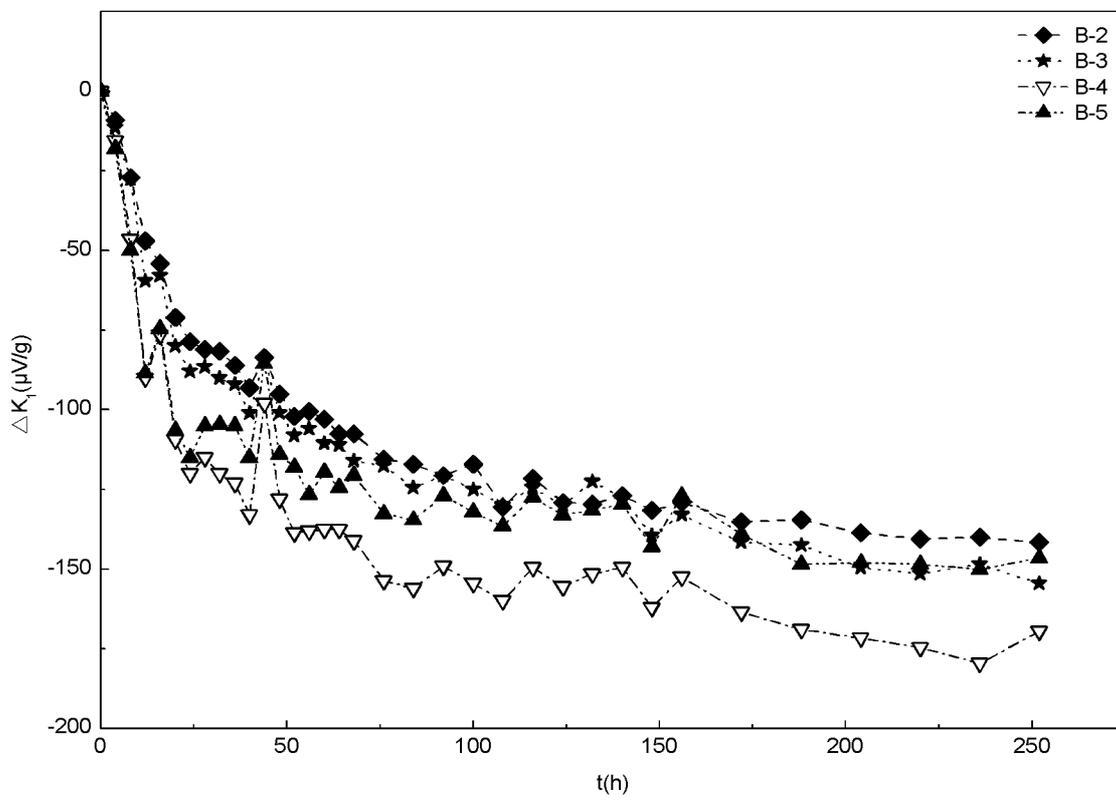


图 3b

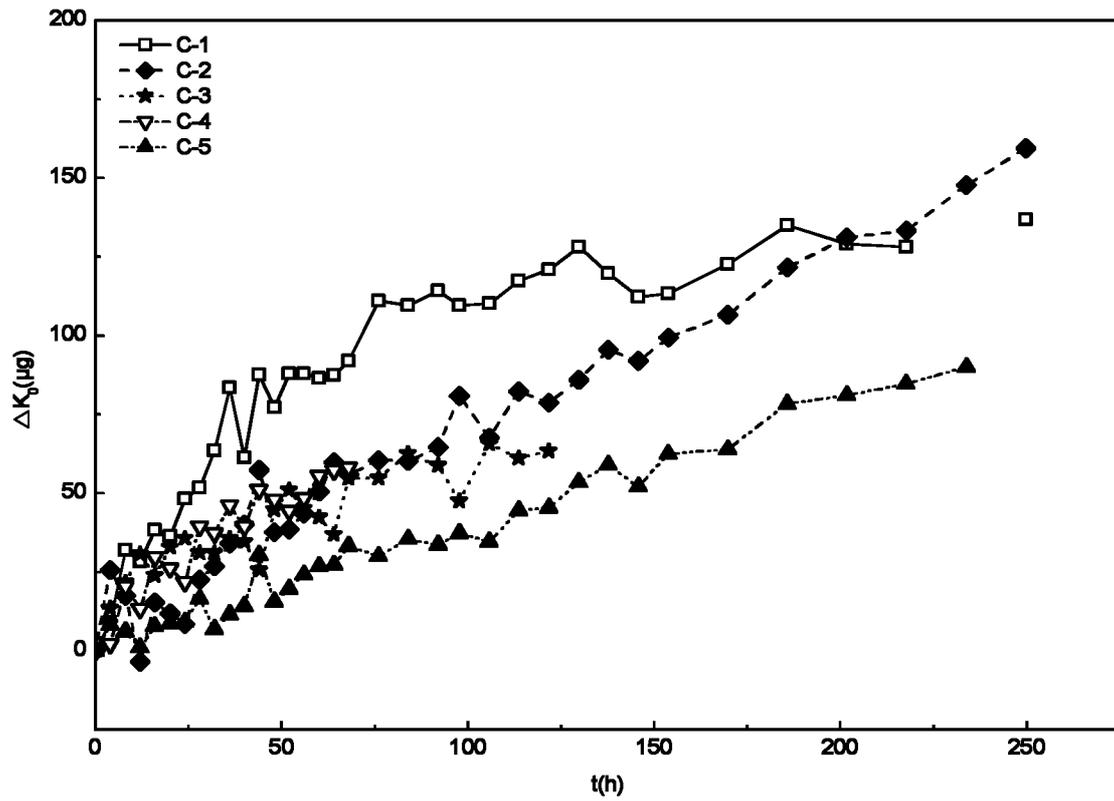


图 4a

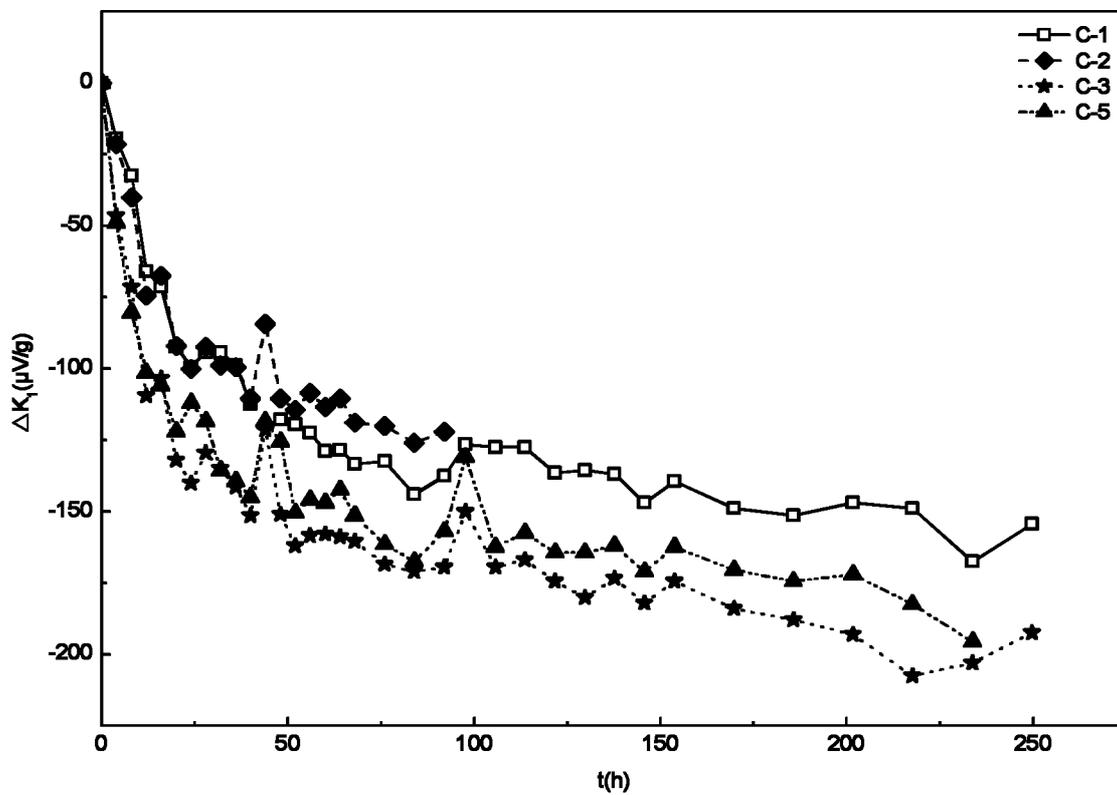


图 4b

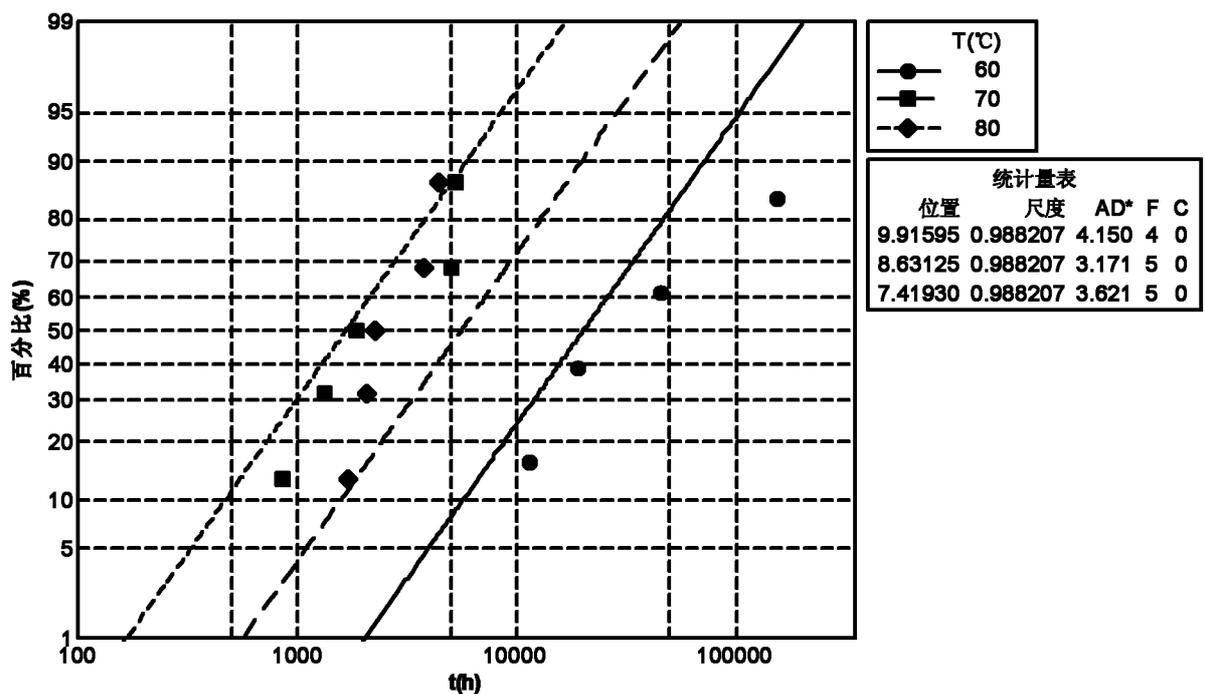


图 5

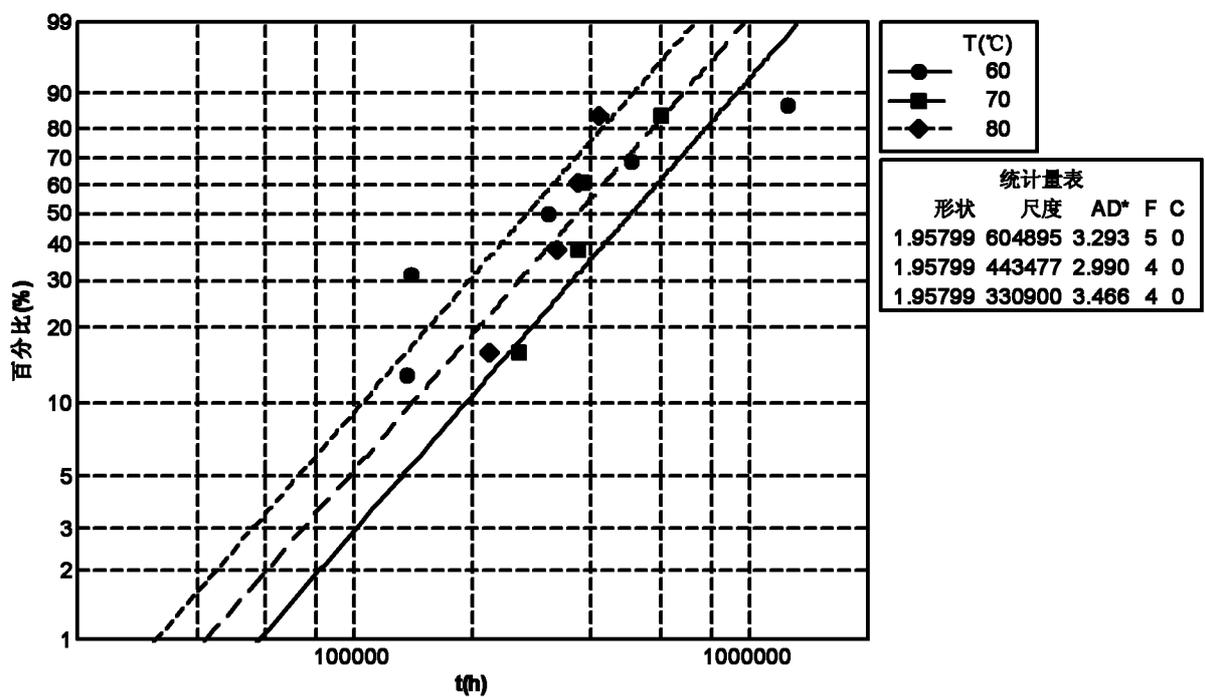


图 6