

文章编号:1000-8055(2011)03-0622-06

动量轮维纳过程退化建模与寿命预测

厉海涛¹, 金光¹, 周经伦¹, 周忠宝², 吴春华³

(1. 国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073;

2. 湖南大学 工商管理学院, 长沙 410082;

3. 中国人民解放军 空军第五飞行学院 航空理论教研室, 武威 733003)

摘 要: 针对动量轮寿命预测无失效数据问题, 利用有漂移的维纳过程对其轴承温度建立性能退化模型, 同时, 考虑由于加工工艺、制造误差等因素所造成的不确定性, 利用随机变量来描述其漂移参数和扩散参数, 并结合自助法获取纠偏估计. 根据所建模型仿真了轴承温度维纳过程的样本路径, 最后, 对动量轮进行随机失效阈值情形的寿命预测和剩余寿命预测. 该模型为动量轮退化建模与寿命预测提供了一种方法, 理论与方法可推广用于类似的高可靠、长寿命产品的退化建模和寿命预测.

关 键 词: 寿命预测; 退化建模; 维纳过程; 动量轮; 轴承温度

中图分类号: V474

文献标识码: A

Momentum wheel Wiener process degradation modeling and life prediction

LI Hai-tao¹, JIN Guang¹, ZHOU Jing-lun¹,

ZHOU Zhong-bao², WU Chun-hua³

(1. College of Information Systems and Management,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Business Administration, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Aviation Theory Teaching and Research Section,

The 5th Air Force Flight Academy of the Chinese People's Liberation Army,

Wuwei 733003, China)

Abstract: For the problem that there is no failure data to use in momentum wheel's life prediction, a model of the degradation of momentum wheel's bearing temperature was established using Wiener process with drift. At the same time, considering of the uncertainty which was made by the process technics and manufacturing error, the drift and the diffusion parameters were described as stochastic variables, and the bias correction estimate was obtained using bootstrap method. And then, the sample path was simulated based on the established model. At last, the life prediction and residual life prediction were performed at the uncertain failure threshold. The model provides a method for the degradation modeling and life prediction of momentum wheel, and the theory and method can be generalized for the degradation modeling and life prediction of some similar high reliability and long life products.

收稿日期: 2010-02-26; 修订日期: 2010-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(70901024, 71071158); 湖南省优秀研究生创新基金;

国防科技大学优秀研究生创新基金(B090501)

作者简介: 厉海涛(1983—), 男, 河南通许人, 博士生, 主要研究方向为小子样可靠性分析、试验信息融合理论与方法.

Key words: life prediction; degradation modeling; Wiener process; momentum wheel; bear temperature

动量轮具有高可靠性、长寿命、无失效等特点,有效预测其寿命是航空航天领域关注的一个重要问题.然而由于试验费用和试验时间等因素的限制,动量轮失效数据极少甚至无失效数据,难以利用传统的寿命预测理论进行寿命预测.针对上述问题,研究人员提出基于失效物理的性能可靠性理论与方法,为动量轮的寿命预测提供了一条新途径.

性能退化是能够引起产品性能发生变化的物理或化学过程,如金属材料的磨损与腐蚀、金属材料的碎裂、绝缘材料的老化等,这些变化随时间逐渐深入,将最终导致产品的失效.相对于失效时间数据来说,性能退化数据包含更多的信息,能够更清晰地描述产品的失效和应力之间的关系,通过产品的性能退化数据进行寿命预测更加节省时间和费用.当前,很多学者对动量轮进行了性能可靠性方面的探索性研究,厉海涛等利用贝叶斯网络模型融合动量轮地面试验零部件失效数据和轴承温度、电流等性能数据建立了动量轮的寿命模型,并给出了动量轮在轨状态实时可靠性评估的方法^[1];刘强等利用 Bayes 方法融合动量轮地面试验的多种验前信息预测了动量轮寿命^[2],利用经验模态分析(EMD)方法对动量轮进行了性能可靠性的建模与分析^[3];金光提出了动量轮轴承组件供油系统退化建模与分析的一种 Bayes-bootstrap 方法^[4];樊幼温等对动量轮金属磨损、保持架磨损和润滑剂缺失等失效模式进行了分析,并给出了失效物理试验方案及试验分析方法^[5].

动量轮轴承温度是最能反映其工作状态的性能特征之一,在轨运行过程中能够实时获取,可以通过对轴承温度的退化特性建模与分析来预测动量轮寿命.而上述文献在此方面的研究甚少,其中采用的随机斜率模型^[3]未考虑轴承温度退化数据的时间不确定性.在此,本文将利用有漂移的维纳过程对动量轮的遥测轴承温度进行退化趋势建模,仿真其退化过程的样本路径,并给出了寿命和剩余寿命的预测方法.

1 动量轮退化过程建模

1.1 性能退化模型

动量轮是长寿命卫星姿控系统的关键机电部件,主要用来平衡由于重力梯度力矩、气动力矩、

太阳辐射力矩等环境力矩的干扰,消除姿态测量给出的实际姿态与期望姿态之间的偏差.动量轮主要有轴承组件、电机组件、壳体组件和轮体组件四大部分组成.樊幼温等进行了大量的试验^[5],通过对各种型号产品调机试验分析,发现其主要故障集中在轴承组件部分,其他部件故障的次数极少,并且都是微小故障,可以通过地面磨合试验来消除.轴承组件失效原因包括润滑剂不足或过多、保持架磨损等,而其失效的外在表象就是轴承温度的升高,因而可取轴承温度为其性能退化特征量,通过轴承温度的退化来预测动量轮的寿命.

在轨运行过程中,可由地面测控站实时获取动量轮轴承温度遥测数据,图1即为某在轨卫星动量轮某段时间内的遥测轴承温度数据.由图可知,动量轮轴承温度随时间有缓慢的波动上升趋势,轴承温度随时间上升反映了动量轮性能的退化.然而,由于太阳入射角、功耗、噪声干扰等某些随机不确定因素的影响,遥测数据在上升的同时也存在一定的波动.鉴于轴承温度的以上特性,本文用有漂移的维纳过程来对其进行建模^[6-7],数学表达式如式(1)所示.国防科学技术大学等利用 EMD 方法对在轨运行的某型号5个动量轮轴承温度数据的退化趋势进行拟合,其中趋势项为线性函数,所得的拟合优度均在0.92以上,因此本文利用线性函数描述其漂移特性是合适的.

$$Y(t) = a_0 + a_1 t + \sigma_w W(t) \quad (1)$$

式(1)中 a_0 为轴承温度遥测数据的初值, a_1 为轴承温度遥测值漂移参数, $W(t)$ 为标准的维纳过程, σ_w 为扩散参数.对某型号的同一批动量轮产品,由于加工工艺、设计误差、功能差异等因素将会造成不同个体性能方面的差异.动量轮的性能在不同的运行环境之下也会有所差别,而其在轨运行环境与设计运行环境总会有些出入,这些都造成了动量轮性能的不确定性,这所有的条件对动量轮性能的影响都在遥测数据上有体现,因而有必要对这种随机特性进行描述.在此,本文将取 a_0, a_1 为随机变量,即 $a_0 \sim N(\mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2)$, $a_1 \sim N(\mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2)$.

1.2 参数估计

本文根据所获取的几个动量轮在轨遥测轴承温度数据,估计所得每个动量轮退化模型的漂移

参数和扩散参数值,然后利用自助法来估计动量轮轴承温度退化模型中的参数。

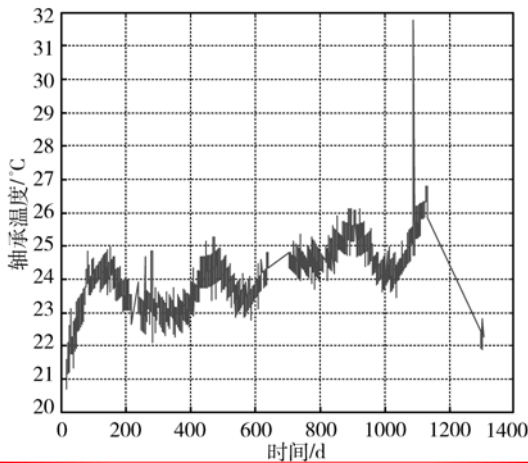


图1 某动量轮遥测轴承温度变化趋势

Fig.1 Changing trend of bearing temperature of some momentum wheel

对所获取的某动量轮轴承温度遥测数据抽样,以一定的间隔在动量轮轴承温度遥测数据中取 n_1+1 (n_1 为正整数) 个点 $(t_0, y_0), (t_1, y_1), \dots, (t_{n_1}, y_{n_1})$, 其中 $t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{n_1}$. 根据式(1)可得

$$\Delta y_i = a_1 \Delta t_i + \sigma_w \Delta W(t_i) \quad (2)$$

其中 $a_1 \Delta t_i = a_1 (t_i - t_{i-1})$, $\sigma_w \Delta W(t_i) = \sigma_w [W(t_i) - W(t_{i-1})]$, $\Delta y_i = y_i - y_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n_1$, 由维纳过程定义可知 $\Delta W(t_i) \sim N(0, \Delta t_i)$, 因而可得

$$\Delta y_i \sim N(a_1 \Delta t_i, \sigma_w^2 \Delta t_i) \quad (3)$$

由维纳过程平稳独立增量可得 $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_{n_1}$ 联合概率密度,即样本似然函数 $L(a_1, \sigma_w)$ 为

$$L(a_1, \sigma_w) = f(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_{n_1}) = f(\Delta y_1) f(\Delta y_2) \dots f(\Delta y_{n_1}) \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)对样本似然函数 $L(a_1, \sigma_w)$ 求常用对数,并分别对 a_1, σ_w 求偏微分可得

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\Delta y_i - a_1 \Delta t_i}{\sigma_w^2 \Delta t_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_w} = \sum_{i=1}^{n_1} -\frac{1}{\sigma_w} + \frac{(\Delta y_i - a_1 \Delta t_i)^2}{\sigma_w^3 \Delta t_i} = 0 \quad (6)$$

求解由式(5)和式(6)构成的方程组可得 a_1 的极大似然估计值 $\hat{a}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\Delta y_i}{\Delta t_i}$, 代入式(6)可得 σ_w 的极大似然估计值

$$\hat{\sigma}_w = \left[\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{(\Delta y_i - \hat{a}_1 \Delta t_i)^2}{\Delta t_i} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

针对有限样本情形利用自助纠偏估计法^[8]对 $\mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2, \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2$ 进行改进,来提高估计精度,扩散参数则可用各个样本估计值的均值来作为其估

计. 设所获取的动量轮样本个数为 n_2 , 各动量轮轴承温度的初值 $D_{a_0} = \{a_0(1), a_0(2), \dots, a_0(n_2)\}$, 用上述方法获取各自的漂移参数 $D_{a_1} = \{\hat{a}_1(1), \hat{a}_1(2), \dots, \hat{a}_1(n_2)\}$, 扩散参数 $D_{\sigma_w} = \{\hat{\sigma}_w(1), \hat{\sigma}_w(2), \dots, \hat{\sigma}_w(n_2)\}$. 根据 D_{a_0}, D_{a_1} , 可得 $\mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2, \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2$ 的极大似然估计值 $\hat{\mu}_{a_0} = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} a_0(j)$,

$$\hat{\sigma}_{a_0}^2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} [a_0(j) - \hat{\mu}_{a_0}]^2,$$

$$\hat{\mu}_{a_1} = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} \hat{a}_1(j), \quad \hat{\sigma}_{a_1}^2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} [\hat{a}_1(j) - \hat{\mu}_{a_1}]^2.$$

利用自助法^[9]可得 D_{a_0}, D_{a_1} 的 B 组自助样本 $D_{a_0}^{*1}, D_{a_0}^{*2}, \dots, D_{a_0}^{*B}$ 和 $D_{a_1}^{*1}, D_{a_1}^{*2}, \dots, D_{a_1}^{*B}$, 其中 $D_{a_0}^{*k} = \{a_0^{*k}(1), a_0^{*k}(2), \dots, a_0^{*k}(n_2)\}$, $D_{a_1}^{*k} = \{\hat{a}_1^{*k}(1), \hat{a}_1^{*k}(2), \dots, \hat{a}_1^{*k}(n_2)\}$, $1 \leq k \leq B$ 为正整数, 由第 k 组自助样本可得参数的估计值

$$\hat{\mu}_{a_0}^k = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} a_0^{*k}(j),$$

$$(\hat{\sigma}_{a_0}^k)^2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} [a_0^{*k}(j) - \hat{\mu}_{a_0}^k]^2,$$

$$\hat{\mu}_{a_1}^k = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} \hat{a}_1^{*k}(j),$$

$$(\hat{\sigma}_{a_1}^k)^2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} [\hat{a}_1^{*k}(j) - \hat{\mu}_{a_1}^k]^2.$$

对 B 组自助样本的估计值求均值可得其自助估计值如下:

$$\hat{\mu}_{a_0}^* = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B \hat{\mu}_{a_0}^k, \quad (\hat{\sigma}_{a_0}^*)^2 = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B (\hat{\sigma}_{a_0}^k)^2,$$

$$\hat{\mu}_{a_1}^* = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B \hat{\mu}_{a_1}^k, \quad (\hat{\sigma}_{a_1}^*)^2 = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B (\hat{\sigma}_{a_1}^k)^2$$

利用自助法的纠偏估计可得参数 $\mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2, \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2$ 的最终估计值^[8]

$$\tilde{\mu}_{a_0} = 2\hat{\mu}_{a_0} - \hat{\mu}_{a_0}^*, \quad \tilde{\sigma}_{a_0}^2 = 2\hat{\sigma}_{a_0}^2 - (\hat{\sigma}_{a_0}^*)^2,$$

$$\tilde{\mu}_{a_1} = 2\hat{\mu}_{a_1} - \hat{\mu}_{a_1}^*, \quad \tilde{\sigma}_{a_1}^2 = 2\hat{\sigma}_{a_1}^2 - (\hat{\sigma}_{a_1}^*)^2.$$

2 动量轮寿命预测

多数产品物理失效和性能失效都是在性能首次超过失效阈值时,即一旦产品的劣化过程 $Y(t)$ 达到某个特定的水平 ζ 时产品失效,因而,失效可定义为产品性能退化的样本路径 $Y(t)$ 超过 ζ ^[10-11]. 数学描述如公式(7)所示.

$$T \equiv \inf\{Y(t) \geq \zeta\} = \{t \mid Y(t) \geq \zeta\},$$

$$Y(s) \leq \zeta, \quad 0 \leq s \leq t \quad (7)$$

动量轮轴承温度性能退化过程 $Y(t)$ 是维纳过程,

给定 a_0, a_1, σ_w 值时, 动量轮的寿命分布概率密度, 即首次击中失效阈值的时间为逆高斯分布, 数学描述为^[12]

$$f(t|a_0, a_1, \zeta) = \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2 t^3}} e^{-(\zeta - a_0 - a_1 t)^2 / 2\sigma_w^2 t} \quad (8)$$

因而, 针对动量轮轴承温度退化模型中 a_0, a_1 都是随机变量的情形, 可得确定失效阈值情形动量轮寿命分布的概率密度函数为

计算过程如下:

$$\begin{aligned} f(t|\zeta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2 t^3}} e^{-(\zeta - a_0 - a_1 t)^2 / 2\sigma_w^2 t} \cdot \varphi(a_0, a_1) da_0 da_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2 t^3}} e^{-(\zeta - a_0 - a_1 t)^2 / 2\sigma_w^2 t} \cdot N(a_0 | \mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2) \cdot N(a_1 | \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2) da_0 da_1 = \\ &= \frac{\zeta}{t} \int_{-\infty}^{\infty} N(a_1 | \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2) da_1 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2 t}} e^{-(\zeta - a_0 - a_1 t)^2 / 2\sigma_w^2 t} N(a_0 | \mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2) da_0 = \\ &= \frac{\zeta}{t} \int_{-\infty}^{\infty} N(a_1 | \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2) da_1 \int_{-\infty}^{\infty} N(a_0 | \zeta - a_1 t, \sigma_w^2 t) N(a_0 | \mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2) da_0 = \\ &= \frac{\zeta}{t} \int_{-\infty}^{\infty} N(a_1 | \zeta - \mu_{a_0}, \sigma_w^2 t + \sigma_{a_0}^2) N(a_1 | \mu_{a_1} t, \sigma_{a_1}^2 t^2) da_1 = \\ &= \frac{\zeta}{t} N(\zeta | \mu_{a_0} + \mu_{a_1} t, \sigma_w^2 t + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{a_1}^2 t^2) = \\ &= \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi(\sigma_w^2 t + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{a_1}^2 t^2)}} e^{-(\zeta - \mu_{a_0} - \mu_{a_1} t)^2 / 2(\sigma_w^2 t + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{a_1}^2 t^2)} \end{aligned}$$

根据对动量轮的失效物理分析, 工程上通常认为动量轮轴承温度超过一定水平则轴承工作状态不能满足要求, 或者不能保证轴承能够继续满足使用要求. 本文参考了国内外相关文献, 取动量轮的失效阈值为 $\zeta = 75^\circ\text{C}$. 然而, 由于动量轮设计误差、使用环境的不确定性、功耗的变化等情况, 采用随机失效阈值更符合实际情况. 因而, 参考动量轮的设计要求和工程经验, 动量轮失效阈值以 75°C 为中心存在波动, 而基本上其值 95% 都会在 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间. 因此, 可以假设动量轮失效阈值近似服从 $\mu_\zeta = 75^\circ\text{C}$, $\sigma_\zeta = 3^\circ\text{C}$ 的正态分布 $\zeta \sim N(75, 3^2)$. 因而可得随机失效阈值情形, 寿命分布概率密度函数为

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} N(\zeta | 75, 2.5^2) f(t|\zeta) d\zeta \quad (11)$$

剩余寿命即产品在使用一段时间 $s(Y(s) \leq \zeta)$ 之后, 产品的退化性能达到失效阈值 ζ 所需的时间 t' , 设动量轮剩余寿命分布函数的数学形式描述如下:

$$f(t|\zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2 t^3}} e^{-(\zeta - a_0 - a_1 t)^2 / 2\sigma_w^2 t} \cdot \varphi(a_0, a_1) da_0 da_1 \quad (9)$$

其中 $\varphi(a_0, a_1) = N(a_0 | \mu_{a_0}, \sigma_{a_0}^2) \cdot N(a_1 | \mu_{a_1}, \sigma_{a_1}^2)$, 对式(9)进行积分计算可得

$$f(t|\zeta) = \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi(\sigma_w^2 t + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{a_1}^2 t^2)}} e^{-(\zeta - \mu_{a_0} - \mu_{a_1} t)^2 / 2(\sigma_w^2 t + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{a_1}^2 t^2)} \quad (10)$$

$$R(t'|\zeta, s) = \frac{R(s+t'|\zeta)}{R(s|\zeta)} \quad (12)$$

随机失效阈值情形下其可靠度函数为

$$R'(t'|s) = \int_{-\infty}^{\infty} N(\zeta; 75, 2.5^2) R(t'|\zeta, s) d\zeta \quad (13)$$

3 某卫星动量轮实例分析

本文以某型号 5 个动量轮产品的轴承温度遥测数据为例进行实例分析. 上文图 1 即为该型号动量轮其中一个产品的轴承温度遥测数据. 由遥测数据可知, 5 个动量轮轴承温度初值分别为 $a_0(1) = 20.17^\circ\text{C}$, $a_0(2) = 20.31^\circ\text{C}$, $a_0(3) = 18.52^\circ\text{C}$, $a_0(4) = 18.06^\circ\text{C}$, $a_0(5) = 19.50^\circ\text{C}$, 利用文中方法结合遥测轴承温度数据, 计算可得 5 个动量轮的 $\hat{a}_1$ 和 $\hat{\sigma}_w$, 分别为 $\hat{a}_1(1) = 0.005694$, $\hat{a}_1(2) = 0.003261$, $\hat{a}_1(3) = 0.004679$, $\hat{a}_1(4) = 0.001883$, $\hat{a}_1(5) = 0.004082$, $\hat{\sigma}_w(1) = 0.4125$, $\hat{\sigma}_w(2) = 0.3942$, $\hat{\sigma}_w(3) = 0.4331$, $\hat{\sigma}_w(4) = 0.4362$, $\hat{\sigma}_w(5) = 0.4452$. 利用自助法估计可得 $\hat{\mu}_{a_0} = 19.3235$, $\hat{\sigma}_{a_0}^2 = 1.1805$,

$\hat{\mu}_{a_1} = 3.9 \times 10^{-3}$, $\hat{\sigma}_{a_1}^2 = 2.4968 \times 10^{-6}$, 对 5 个动量轮的 σ_w 取均值可得 $\hat{\sigma}_w = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \hat{\sigma}_w(i) = 0.4242$. 利用所得参数对动量轮有漂移的维纳过程模型进行仿真, 可得其 10 条样本路径, 如图 2 所示.

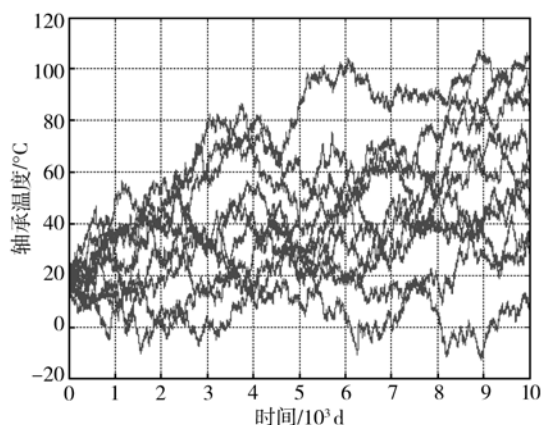


图2 样本路径仿真图

Fig. 2 Simulation graph of sample path

3.1 寿命预测

根据估计所得该型号动量轮轴承温度维纳过程参数, 利用数值方法得到随机失效阈值情形寿命概率密度曲线和累计分布函数曲线如图 3、图 4 所示. 同时, 计算可得其对应某些时间点(单位: d)的可靠度如表 1 所示, 由所得图表可知, 对动量轮在运行 5 年(约 1800 d)后的可靠度进行预计, 可得可靠度为 0.99338, 运行 8 年(约 2800 d)的可靠度为 0.9571, 可见, 动量轮运行了 8 年之后仍能满足最低可靠度为 0.94 的设计要求, 能够保证在寿命周期内姿控系统的正常工作.

3.2 剩余寿命预测

迄今为止, 该型号动量轮已经在轨运行了近 3 年(约 1000 d), 因而, 根据剩余寿命预测的理论与方法, 可得该型号动量轮运行 1000 d 之后的一

些时间点的可靠度, 如表 2 所示. 由表可见, 动量轮在运行 1000 d 后, 再运行 1000 d 的可靠度为 0.98896, 运行 2000 d 之后的可靠度为 0.94631, 仍然具有很高的可靠性, 能够满足寿命周期正常运行的要求.

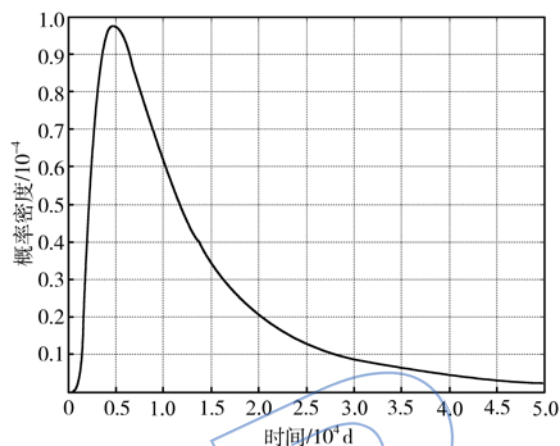


图3 动量轮寿命概率密度曲线

Fig. 3 Probability density curve of momentum wheel's life

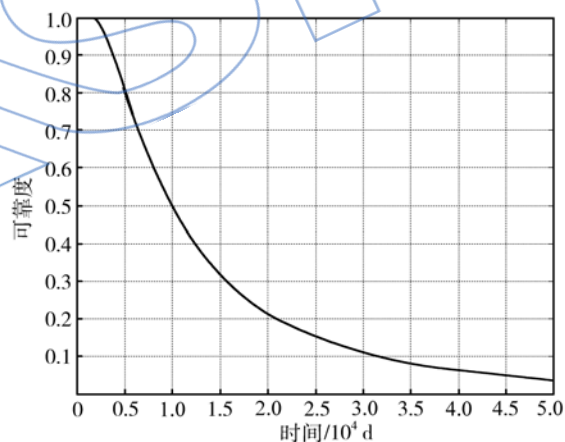


图4 动量轮可靠度随时间变化曲线

Fig. 4 Changing curve of the momentum wheel's reliability along with time

表1 动量轮可靠度随时间变化趋势

Table 1 Time changing trend of the momentum wheel's reliability

时间 t/d	200	400	600	800	1000	1200	1400
可靠度 R	1	0.99999	0.99999	0.99999	0.99989	0.9995	0.99849
时间 t/d	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
可靠度 R	0.99654	0.99338	0.98885	0.98291	0.97558	0.96693	0.9571
时间 t/d	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200
可靠度 R	0.94621	0.93441	0.92184	0.90864	0.89492	0.8808	0.86174

表2 动量轮运行1000 d后可靠度随时间变化趋势

Table 2 Time changing trend of the momentum wheel's reliability after 1000 days running

时间 t/d	200	400	600	800	1000	1200	1400
可靠度 R	0.99961	0.9986	0.99665	0.99349	0.98896	0.98302	0.97569
时间 t/d	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
可靠度 R	0.96704	0.95721	0.94631	0.93451	0.92194	0.90874	0.89502
时间 t/d	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200
可靠度 R	0.8809	0.86183	0.84987	0.83516	0.82038	0.8056	0.79087

注:该表为已经运行1000 d之后的剩余寿命时间点可靠度。

4 结 论

针对动量轮高可靠性、长寿命、费用昂贵、可用试验数据少等特点,利用维纳过程对其轴承温度性能进行了退化趋势建模,并预测了动量轮寿命和剩余寿命,为工程上解决动量轮可靠性评估和寿命预测提供了一种新方法。该模型利用随机变量刻画动量轮轴承温度初值、轴承温度退化速率、失效阈值等特征变量,通过自助法解决了小子样条件下随机变量分布参数估计问题,给出了这些变量正态分布情形的概率密度函数。本文方法充分考虑了动量轮设计误差、工艺偏差、运行环境不确定等,在一定程度上提高了动量轮寿命预测的精度。

参考文献:

- [1] 厉海涛,金光,周经伦,等. 动量轮在轨状态可靠性贝叶斯网络建模与评估[J]. 航空学报,2009,30(6):1084-1089.
LI Haitao, JIN Guang, ZHOU Jinglun, et al. Bayesian network reliability modeling and assessment of momentum wheel on orbit[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6):1084-1089. (in Chinese)
- [2] 刘强,周经伦,金光,等. 基于可信度的动量轮 Bayes 可靠性评估[J]. 宇航学报,2009,30(1):382-386.
LIU Qiang, ZHOU Jinglun, JIN Guang, et al. Bayesian reliability estimation for momentum wheel based on credibility[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(1):382-386. (in Chinese)
- [3] 刘强,金光,周经伦. 基于 EMD 的卫星动量轮性能可靠性建模[J]. 计算机仿真,2007,24(11):32-35.
LIU Qiang, JIN Guang, ZHOU Jinglun. A modeling method of performance reliability of momentum wheel based on

EMD[J]. Computer Simulation, 2007, 24(11):32-35. (in Chinese)

- [4] 金光. 一种综合性能与寿命数据的 Bayes-bootstrap 方法[J]. 宇航学报,2007,28(3):731-735.
JIN Guang. A Bayes-bootstrap method synthesizing performance and life data[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(3):731-735. (in Chinese)
- [5] 樊幼温,杨晓丽,李春伟,等. 动量轮失效物理模型试验方案研究[J]. 空间科学学报,2009,29(1):78-86.
FAN Youwen, YANG Xiaoli, LI Chunwei, et al. Experimental research on the momentum wheel failure physical model[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(1):78-86. (in Chinese)
- [6] Whitmore G A. Estimating degradation by a Wiener diffusion process subject to measurement error[J]. Lifetime Data Analysis, 1995, 1(3):307-319.
- [7] Whitmore G A, Schenkelberg F. Modelling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a scale transformation[J]. Lifetime Data Analysis, 1997, 3(1):27-45.
- [8] Efron B, Tibshirani R. An introduction to the bootstrap [M]. New York:Chapman & Hall, 1993.
- [9] Efron B. More efficient bootstrap computations[J]. J. Am Statist. Assoc., 1990, 85(409):79-89.
- [10] YUAN Xianxun. Stochastic modeling of deterioration in nuclear power plant components[D]. Ontario, Canada: University of Waterloo, 2007.
- [11] Lee M LT, Whitmore G A. Threshold regression for survival analysis; modeling event times by a stochastic process reaching a boundary[J]. Statistical Science, 2006, 21(4):501-513.
- [12] Balka J, Desmond A F, McNicholas P D. Review and implementation of cure models based on first hitting times for Wiener processes [J]. Lifetime Data Analysis, 2009, 15(12):147-176.