0254-6124/2019/39(3)-388–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XU Jingbo, TAN Xueqian, WU Zhen, SUN Danfeng, JIANG Ningxiang, SUN Dan. Life prediction and analysis of momentum wheel based on wiener process degradation modeling (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(3): 388-398. DOI:10.11728/cjss2019.03.388

基于维纳过程退化模型的动量轮寿命预测与分析

徐敬勃 谭学谦 吴 珍
孙丹峰 姜宁翔 孙 丹

(上海航天控制技术研究所 上海 201109)

(上海惯性工程技术研究中心 上海 201109)

摘 要 动量轮作为卫星的关键执行部件, 其可靠性与寿命直接影响到卫星在轨任务的执行. 对于动量轮产品的寿命预估与分析, 受限于样本少、试验周期长、代价高等因素, 无法获取足够的寿命样本数据. 本文结合工程经验及已有的地面寿命试验数据, 采用维纳过程退化模型, 对动量轮产品的可靠性进行建模, 并对其寿命进行预估与分析. 该模型为动量轮寿命预测提供了一种有效方法, 适用于高可靠、长寿命产品的寿命预测与分析.

关键词 动量轮, 维纳过程, 退化模型, 可靠性, 寿命预测

中图分类号 V 524

Life Prediction and Analysis of Momentum Wheel Based on Wiener Process Degradation Modeling

XU Jingbo TAN Xueqian WU Zhen

SUN Danfeng JIANG Ningxiang SUN Dan

(*Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai* 201109)

(*Shanghai Engineering Research Center of Inertia, Shanghai* 201109)

Abstract Momentum wheel as a key actuator for satellites, its reliability and life span directly affect the success or failure of satellite missions in orbit. For the life prediction and analysis of momentum wheel products, due to the limited number of samples, long test cycle and high cost, it is impossible to obtain enough life sample data. Therefore, combined with engineering experience and existing ground life test data, the Wiener process degradation model is used to model the reliability of the momentum wheel product, and its life expectancy is estimated and analyzed. The results show that this model provides an effective method for predicting the life of a momentum wheel and

2018-04-20 收到原稿, 2018-10-10 收到修定稿

E-mail: xiaomuyuo@163.com

is suitable for life prediction and analysis of high reliability, long life products.

Key words Momentum wheel, Wiener process, Degradation modeling, Reliability, Life prediction

0 引言

目前, 卫星在轨运行寿命普遍要求达到 10 年以上, 这对星上各单机的在轨寿命与可靠性提出了同样的要求. 动量轮是卫星主要执行部件, 卫星姿轨控系统通过飞轮与星体进行动量交换, 消除干扰力矩对星体的扰动, 并对卫星姿态角偏差和角速率偏差实现精确控制. 卫星在轨飞行中, 动量轮处于长期运转状态, 存在加速机动、减速制动、稳速等工况, 动量轮内部包含电子线路和转动部件, 受空间环境、内部轴承摩擦阻力、电机组件及电子线路等因素的影响, 容易发生故障, 进而导致卫星姿态失控. 因此, 动量轮的在轨寿命对卫星系统至关重要.

本文主要从可靠性预估、等价寿命试验等方面对动量轮的寿命进行预测与分析, 总结出可有效评估动量轮寿命的方法, 进而指导动量轮产品的设计与改进. 动量轮长寿命目标的实现主要取决于其内部的转动部件, 包括电机组件、轴承组件等.

2000 年 Huang 等 [1] 对在提高环境温度和增加电机负载两种情况下的无刷直流电机加速寿命试验进行了验证与分析, 但所选取的加速因子不能如实反映系统寿命变化特性. 2000 年 Zang 等 [2] 对轴承预载荷 45 N 情况下的寿命进行分析, 得到轴承疲劳寿命达到 25 年, 磨损寿命达到 8 年的结论. 但其分析方法未完全考虑轴承组件装入飞轮后的寿命特性. 2010 年 Zhao[3] 对航天用 61900 型 MoS_2 润滑深沟球轴承进行加速寿命试验分析, 以轴承外圈温度、轴承振动、轴承摩擦力矩为寿命测试参数, 以状态量失衡作为轴承失效的依据, 试验后对轴承进行拆解分析, 得出循环应力造成的疲劳磨损引起轴承润滑失效的结论, 给出了轴承寿命计算公式, 但并未对其寿命进行详细预估. 2012 年 Dong[4] 提出了基于多步迭代的空间滚动轴承退化趋势预测方法, 实现了寿命的多步预测, 但对轴承的退化机理并未明确分析.

针对动量轮整机的寿命分析, 相关单位均进行了大量试验及研究工作, 在选取寿命试验样本的情况下, 采用性能退化数据进行寿命预测. 2009 年 Li 等 [5] 采用 Bayes 网络模型融合动量轮地面试验数据, 建立了动量轮寿命模型, 并给出可靠性评估方法, 但所建立的模型并不适用于动量轮在轨所有工况下的寿命预估. 2009 年 Liu 等 [6] 利用 Bayes 方法融合动量轮地面试验的多种验前信息对动量轮寿命进行了预测, 然而采用的随机模型未考虑轴承温度退化数据的时间不确定性. 2009 年 Fan[7] 以动量轮轴系作为试验模型, 对轴承金属磨损、保持架磨损和润滑剂缺失的失效模式进行了分析, 给出了失效物理试验方案和分析方法, 但未对动量轮轴系寿命进行预测分析. 2009 年 Li 等 [8] 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, 并进行了仿真, 给出了寿命预测方法, 但该方法选取的轴承温度无法完全解决不同轨道空间中环境温度不同带来的模型准确度问题. 2011 年 Liu 等 [9] 对 5 台动量轮寿命件子样进行了试验验证, 并对试验后的轴承组件的滚道、滚珠、保持架、润滑剂进行了拆解分析, 提出了基于失效物理性能的退化模型, 采用信息集成的可靠性评估方法对动量轮寿命进行了评估, 但所建立的性能退化模型的辨识精度、校正精度、耦合因素分析等方面仍有一定欠缺. 2015 年 Liu 等 [10] 提出了一种基于 Copula 函数族的多退化量下的寿命预测方法, 选择润滑剂剩余量和电流作为退化量, 对动量轮的剩余寿命进行了预测. 但由于动量轮轴承润滑剂剩余量经过多次拆解后难以精确测量, 进而对模型最终预测结果的精确性有一定的影响.

结合以上动量轮寿命分析预测方法, 考虑到地面寿命试验中的动量轮轴温受外界空间环境影响较大, 若采用轴温进行寿命分析建模, 则模型的准确性难以保证. 采用动量轮润滑剂剩余量进行寿命分析建模, 需定期对动量轮轴系进行拆解, 并对油量进行测量, 由于轴系中润滑剂初始量仅为 4 g, 每天以 0.4 mg 的速率析出以实现对轴系的补充润滑, 多次拆解将破坏轴系内部的油膜状态, 且测量精度必须以 μg 计量, 否则会对建模精度及准确性造成很大影响.

某型动量轮总功耗等效数据为非单调退化数据, 适用于 Wiener 过程退化模型对其寿命进行退化建模. 因此, 本文以某型动量轮两台寿命件子样的寿命试验数据作为样本, 按照 1∶1 的试验原则模拟在轨

工况, 选用动量轮稳态和机动两类不同工况下的总功耗值作为性能退化量, 其包含电机电流及线路功耗等信息, 更能直观地反映动量轮的实际性能退化趋势, 以此对动量轮子样的剩余寿命进行预测分析.

1 试验方案

1.1 动量轮寿命件物理特性

某型动量轮设计在轨寿命大于 10 年, 可靠度大于 0.94. 动量轮产品的故障属于成败型故障模式, 为星上 C 类产品. 作为卫星姿态控制的关键执行机构, 动量轮寿命是卫星实现空间任务长寿命的关键之一. 某型动量轮寿命件的主要特性列于表 1.

1.2 动量轮寿命件工作特性

整个寿命试验过程中, 两台寿命件子样全程通电, 并按照图 1 所示工况进行试验. 图 1 所示寿命试验工况中, 动量轮以角动量标称值为中心值, 按照正弦规律变化, 周期 100 min, 变化幅度 ±5 N·m·s, 稳速段持续时间 1.5 h, 正弦波动段持续时间 24 h, 4 个转速段结束后进入下一个同样的工况循环.

1.3 动量轮寿命试验状态

某型动量轮寿命试验系统由测试设备、直流稳压电源、抽真空设备等组成, 各部分通过电缆连接, 形成一个完整的试验、测试、控制系统, 如图 2 所示.

由于动量轮寿命件壳体采用低温钎焊密封, 产品内压 $\leqslant$ 30 Pa, 为尽量模拟在轨状态, 将两台寿命件放入真空设备进行试验, 真空设备内压 $\leqslant$ 100 Pa 并长期保持, 试验间温度控制在 25±5°C.

2 动量轮失效机理分析

根据大量动量轮地面和在轨试验数据可知, 动量轮失效主要是由于自身的性能退化造成的, 其性能退化程度可在前期通过观测到的性能参数特征量预估分析. Fan 等 [7], Liu 等 [11], Jin 等 [12] 及 Qing 等 [13] 的研究认为, 动量轮失效主要集中在动量轮轴系的润滑系统失效, 并主要表现为金属磨损、保持架磨损和润滑剂缺失. 磨损的发生使金属摩擦副表面更加光洁, 有利于润滑膜的正常工作. 润滑剂达到润滑平衡状态时, 保持架磨损基本可以忽略. 在供油系统能够

表 1 动量轮寿命件主要特性

Table 1 Main features of momentum wheel life sample

部件名称	构成或特性	工作转速范围 /(r·min^{-1})	考核方式
驱动部件	无刷直流电机	0～±6000	检测电机电流
轴承	B7004CTN3/HVP4 (储油器)	0～±6000	检测电机电流、稳态功耗、启动摩擦力矩、损耗力矩
线路板	力矩控制模式, 运转控制双方向	0～±6000	检测线路功耗
密封外壳、插座及惯量轮体	壳体密封焊接, 轮体为整体扁平盘式结构	0～±6000	检测稳态功耗, 必要时可对内部气压进行检测

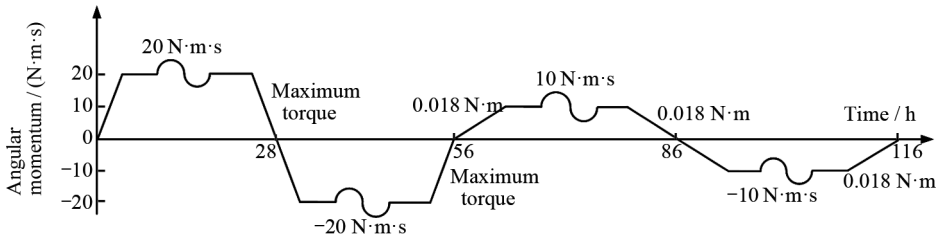

图 1 寿命件子样运行工况

Fig. 1 Run mode sketch of life sample

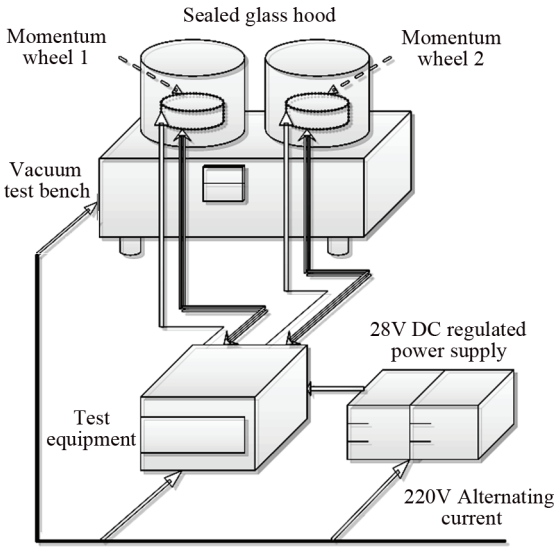

图 2 动量轮寿命试验系统

Fig. 2 System block diagram of momentum wheel life experiment

持续稳定供油的状态下, 不会发生保持架导致的失效. 若动量轮轴系供油系统不能供给足够的润滑剂弥补动量轮轴承运行中挥发和爬移造成的润滑剂缺失, 动量轮轴承会因缺油而发生强烈摩擦, 进而导致失效. Jones 等 [14] 指出, 动量轮轴承润滑系统不能正常工作并提供轴承系统所需弹性流体动力润滑条件是其失效的主要原因. Wang 等 [15] 针对航天运动部件的润滑失效, 对多孔储油器的润滑机理进行了分析, 通过控制多孔储油器的结构尺寸和储油量, 实现了对润滑油离心运输速度的控制. Liu[16] 提出了采用离心式微量供油器对轴承进行微量补充润滑. 该方式同样运用在某型动量轮寿命件子样中. Huang 等 [17] 和 Liu 等 [18] 通过加速退化试验, 获得了动量轮的性能退化数据, 进而实现了对动量轮的寿命预测建模与寿命评估.

某型动量轮轴承组件过度供油或者过度贫油情况下, 轴温都会持续升高, 电流遥测值持续增大, 飞轮转速闭环难以达到设定要求. 飞轮电机驱动线路故障, 驱动相电流波动同样会造成飞轮故障. 在寿命试验前期, 动量轮的轴承温度、电机电流、功耗能反映其工作状态的特征. 通过对特征参数的实时获取并进行退化特性建模, 可以达到对其寿命进行预估的目的. 在动量轮寿命件失效或在寿命试验累计时间达到设定值时, 可对寿命件子样的轴系进行解剖分析, 对润滑油的含量和特性以及滚道、滚珠特性进行定量分析, 达到对失效机理进行分析和剩余寿命进行预估的目的.

3 动量轮性能退化建模

3.1 Wiener 过程退化模型

Wiener 过程不具有严格单调性, 适合对具有波动单调的性能退化过程进行建模 [19]. 动量轮总功耗等效数据为非单调退化数据, 因此选用 Wiener 模型对其进行退化建模.

假设共有 n 个样品, 对样品 i, 初始时刻 t_{i0} 性能退化量为 $X_{i0}=0$, 在时刻 $t_{i1},\cdots,t_{im_i}$ 测量动量轮的性能退化量, 得到其测量值为 $X_{i1},\cdots,X_{im_i}$. 记

$$\Delta x_{ij}=X_{ij}-X_{i(j-1)}$$

是样品 i 在 $X_{i0}=0$ 时刻 $t_{i(j-1)}$, t_{ij} 之间的性能退化量. 由 Wiener 过程 [19] 的性质可得

$$\Delta x_{ij}\approx N(\mu\Delta t,\sigma^2\Delta t). \tag{1}$$

其中:

$$\Delta t_{ij}=t_{ij}-t_{i(j-1)};\quad i=1,2,\cdots,n;$$
$$j=1,2,\cdots,m_i;$$

μ 为漂移系数; σ 为扩散系数.

由性能退化数据得到的似然函数为

$$L(\mu,\sigma^2)=\prod_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{m_i}\frac{1}{\sqrt{2\sigma^2\pi\Delta t_{ij}}}\cdot$$
$$\exp\Big[-\frac{(\Delta x_{ij}-\mu\Delta t_{ij})^2}{2\sigma^2\Delta t_{ij}}\Big]. \tag{2}$$

参数 μ, σ^2 的极大似然估计为

$$\hat{\mu}=\frac{\sum_{i=1}^{n}X_{im_i}}{\sum_{i=1}^{n}t_{im_i}}. \tag{3}$$

$$\hat{\sigma}^2=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}m_i}\Bigg[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\frac{(\Delta x_{ij})^2}{\Delta t_{ij}}-$$
$$\frac{\Big(\sum_{i=1}^{n}X_{im_i}\Big)^2}{\sum_{i=1}^{n}t_{im_i}}\Bigg]. \tag{4}$$

某型动量轮寿命验证试验中寿命件子样 1 从 2013 年 3 月 5 日开始进行, 目前已连续运行超过 64

个月 1920 天, 寿命件子样 2 从 2014 年 11 月 7 日开始进行, 已连续运行超过 44 个月 1320 天. 两台寿命件子样状态良好, 对产品性能状态复测, 各项性能指标与试验初期相比并无明显增大情况.

以寿命件子样 1 试验期间的某个大循环数据作为一个样本数据, 结果如图 3 所示.

由图 3 可以看出, 总功耗变化与转速变化密切相关. 当动量轮进行加减速变换旋转方向, 即处于冲击状态时, 总功耗会出现大幅跳变, 如图 3 中红色圆圈所示, 此时的总功耗称为冲击总功耗; 在冲击过程中, 动量轮减速时总功耗会达到谷值, 随着转速下降总功耗随之下降, 随后动量轮变换旋转方向加速运行, 总功耗又随之增加并达到峰值; 随着转速进入稳态, 总功耗也进入稳态.

分离提取出同一转速状态下的数据, 对寿命试验全过程中的数据进行剥离, 用于后期分别进行退化建模. 对寿命件子样 1 寿命试验全过程均运用 Wiener 过程进行退化建模及参数估计, 结果列于表 2.

从表 2 可以看出, 第一和第二阶段时寿命件处于试验前期, 产品状态尚未完全建立稳态, 第三阶段时, 产品稳态时的性能数据相对稳定. 因此以第三阶段数据建立稳态总功耗 Wiener 过程退化模型, 而使用全阶段数据建立冲击状态总功耗 Wiener 过程退化模型.

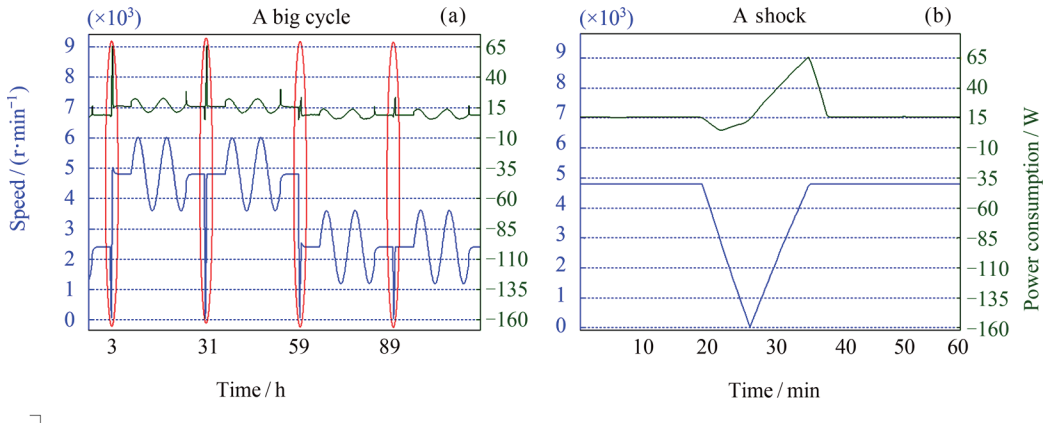

图 3 试验子样 1 总功耗与转速原始数据微观变化曲线

Fig. 3 Microcosmic change curve of total power consumption and speed data of sample 1

表 2 试验子样 1 各工况状态下退化模型参数估计结果

Table 2 Degeneration model parameter estimation results of sample 1 in all-run mode

状态	参数	全阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段
稳态 1	μ	0.0040	−0.0032	0.0070	0.0103
(4800 r·min^{-1})	σ	0.5324	0.4366	0.6355	0.5136
稳态 2	μ	0.0026	-9.7227×10^{-5}	0.0129	0.0162
(2400 r·min^{-1})	σ	0.9183	0.7140	1.0689	0.8170
冲击 1	μ	0.0111	2.7273×10^{-4}	0.0253	0.0203
(2400∼4800 r·min^{-1})	σ	0.4308	0.2934	0.5343	0.3940
冲击 2	μ	0.0129	0.0060	0.0116	0.0253
(4800∼4800 r·min^{-1})	σ	0.6232	0.6112	0.7146	0.5510
冲击 3	μ	0.0027	0.0046	5.6604×10^{-4}	0.0056
(4800∼2400 r·min^{-1})	σ	0.1927	0.1078	0.1856	0.2254
冲击 4	μ	0.0023	0.0025	-4.5283×10^{-4}	0.0034
(2400∼2400 r·min^{-1})	σ	0.1851	0.1605	0.2857	0.2020

表 3 两种稳态转速类型

Table 3 Two types of steady speed

转速类型	转速均值 $\Delta v/(\mathrm{r{\cdot}min^{-1}})$	转速幅值 $\bar{v}/(\mathrm{r{\cdot}min^{-1}})$	转速最大值 $v_{\max}/(\mathrm{r{\cdot}min^{-1}})$	运行状态
稳态 1	4800	1200	6000	正弦波动
稳态 2	2400	1200	3600	正弦波动

3.2 寿命试验加速模型

3.2.1 稳态加速模型

由于产品寿命试验时间较短, 寿命件子样少, 数据不充分, 为了更快获取产品可靠性信息, 选择合适的加速模型进行外推, 得到产品在额定工作应力下的性能退化趋势, 进而得到动量轮寿命信息. 动量轮寿命件子样的两种稳态类型列于表 3.

从表 3 可以看到, 转速的均值、幅值和最大值全面反映了动量轮的稳速状态. 针对动量轮稳态转速状态下总功耗 Wiener 过程退化模型中的参数, 建立如下加速方程:

$$\mu = a_1 \Delta v \cdot v_{\max}^{b_1}, \tag{5}$$

$$\sigma = a_2 \Delta v \cdot v_{\max}^{b_2}. \tag{6}$$

其中: μ 为稳态 Wiener 过程的漂移系数; σ 为稳态 Wiener 过程的扩散系数; Δv, $v_{\max}$ 分别为稳态时循环应力 (转速) 的变化幅值和最大值; a_1, a_2, b_1, b_2 为加速方程未知参数. 结合表 2 中的参数估计结果, 解得加速方程中的参数 (见表 4).

通过线性化推导, 得到稳态转速时动量轮性能退化加速方程如下:

$$\mu = 2.8287 \times 10^{-8} \Delta v \cdot v_{\max}^{0.5762}, \tag{7}$$

$$\sigma = 5.0339 \times 10^{-10} \Delta v \cdot v_{\max}^{1.4440}. \tag{8}$$

3.2.2 冲击加速模型

每一次冲击动量轮转速都要经历从前一个稳态减速到零, 这个减速幅值记为 v_-; 再从零加速到下一个稳态的过程, 这个加速的幅值记为 v_+. 在加速过程中总功耗到达一个最大值. 表 5 描述了 4 类冲击的基本特征.

针对动量轮冲击转速状态下总功耗 Wiener 过程退化模型中的参数, 建立如下加速方程:

$$\mu = a_1 v_-^{b1} v_+^{c1}, \tag{9}$$

表 4 稳态加速方程参数

Table 4 Parameter of steady speed accelerating formula

系数类型	加速方程参数	估计值
μ	a_1	2.8287×10^{-8}
	b_1	0.5762
σ	a_2	5.0339×10^{-10}
	b_2	1.4440

表 5 4 类冲击转速类型

Table 5 Four types of impulse speed

转速类型	减速幅度 $v_-/(\mathrm{r{\cdot}min^{-1}})$	加速幅度 $v_+/(\mathrm{r{\cdot}min^{-1}})$
冲击 1	2400	4800
冲击 2	4800	4800
冲击 3	4800	2400
冲击 4	2400	2400

表 6 冲击加速方程参数

Table 6 Parameter of impulse accelerating formula

系数类型	待定加速方程参数	估计值
μ	a_1	8.9946×10^{-12}
	b_1	0.2241
	c_1	2.2636
σ	a_2	2.0477×10^{-7}
	b_2	0.2979
	c_2	1.4535

$$\sigma = a_2 v_-^{b2} v_+^{c2}. \tag{10}$$

其中: μ 为冲击 Wiener 过程的漂移系数; σ 为冲击 Wiener 过程的扩散系数; v_- 为冲击中减速的最大幅度; v_+ 为冲击中加速的最大幅度; a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2 为加速方程未知参数.

结合表 2 中的参数估计结果, 采用最小二乘方法解得加速方程中的参数, 如表 6 所示.

通过线性化推导, 得到冲击转速类型下动量轮性能退化加速方程:

$$\mu = 8.9946 \times 10^{-12} v_{-}^{0.2241} v_{+}^{2.2636}, \tag{11}$$

$$\sigma = 2.0477 \times 10^{-7} v_{-}^{0.2979} v_{+}^{1.4535}. \tag{12}$$

4 动量轮寿命预测

4.1 Wiener 过程寿命预测方法

如果动量轮的性能退化过程为一元 Wiener 过程且失效阈值为 $D_{\rm f}$ ($D_{\rm f} > 0$), 其寿命 T 是性能退化量首次达到失效阈值的时间, 即

$$T = \inf\{t | X(t) = D_{\rm f}, \quad t \geqslant 0\}. \tag{13}$$

对于一元 Wiener 过程, 其漂移参数 μ 为任意实数. 采用其对产品进行性能退化过程建模时, 由于产品最终都会失效, 为了保证 $X(t)$ 最终一定能够达到失效阈值 $D_{\rm f}$, 要求漂移参数 $\mu > 0$.

由式 (13) 推导得到寿命 T 的分布为逆高斯分布, 其分布函数和概率密度函数分别为

$$F(t) = \Phi\Big(\frac{\mu t - D_{\rm f}}{\sigma\sqrt{t}}\Big) + \exp\Big(\frac{2\mu D_{\rm f}}{\sigma^2}\Big)\Phi\Big(\frac{-D_{\rm f} - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\Big), \tag{14}$$

$$f(t) = \frac{D_{\rm f}}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\Big[-\frac{(D_{\rm f} - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\Big]. \tag{15}$$

寿命 T 的期望和方差分别为

$$E(T) = \frac{D_{\rm f}}{\mu}, \tag{16}$$

$$V(T) = \frac{D_{\rm f}\sigma^2}{\mu^3}. \tag{17}$$

参数估计得到 $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}^2$ 后, 可得任务时间 t 的产品可靠度点估计为

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi\Big(\frac{D_{\rm f} - \hat{\mu} t}{\hat{\sigma}\sqrt{t}}\Big) - \exp\Big(\frac{2\hat{\mu} D_{\rm f}}{\hat{\sigma}^2}\Big)\Phi\Big(\frac{-D_{\rm f} - \hat{\mu} t}{\hat{\sigma}\sqrt{t}}\Big). \tag{18}$$

其中, $D_{\rm f}$ 表示总功耗最大上升阈值, μ 为功耗上升过程的漂移系数, σ 为功耗上升过程的扩散系数.

4.2 总功耗阈值

动量轮处于稳速运行时, 所消耗的功率为稳态功耗. 当动量轮以最大力矩进行加减速运行时, 所消耗的功率为最大功耗. 动量轮在 6 种工况下总功耗的初值以及各工况下动量轮总功耗所允许的最大上升幅度 (阈值) 列于表 7.

4.3 动量轮在轨稳态工况寿命预测

虽然动量轮在轨时绝大部分时间处于稳态工况, 但是也存在冲击工况. 根据姿控系统的控制要求, 动量轮实际转速以 $4800\,{\rm r\cdot min^{-1}}$ 为中心值正弦波动. 波动幅值的不同导致预测结果不同, 选取波动幅值 $\Delta v = 100$, 将参数带入式 (7) 和式 (8) 得到 Wiener 退化模型的漂移系数和扩散系数.

波动幅值 $\Delta v = 100$ 时, 稳态工况及退化参数列于表 8, 可靠度评估结果列于表 9, 可靠寿命列于表 10, 可靠度曲线如图 4 所示.

表 7 6 种工况状态下总功耗的初值和阈值

Table 7 Initial and threshold value of total power consumption in six modes

状态类型	性能退化量/W	技术指标	初值	阈值
稳态 1 ($4800\,{\rm r\cdot min^{-1}}$)	总功耗均值	20	15	5
稳态 2 ($2400\,{\rm r\cdot min^{-1}}$)	总功耗均值	20	8	12
冲击 1 ($2400\sim4800\,{\rm r\cdot min^{-1}}$)	总功耗最大值	90	65	25
冲击 2 ($4800\sim4800\,{\rm r\cdot min^{-1}}$)	总功耗最大值	90	65	25
冲击 3 ($4800\sim2400\,{\rm r\cdot min^{-1}}$)	总功耗最大值	90	23	67
冲击 4 ($2400\sim2400\,{\rm r\cdot min^{-1}}$)	总功耗最大值	90	23	67

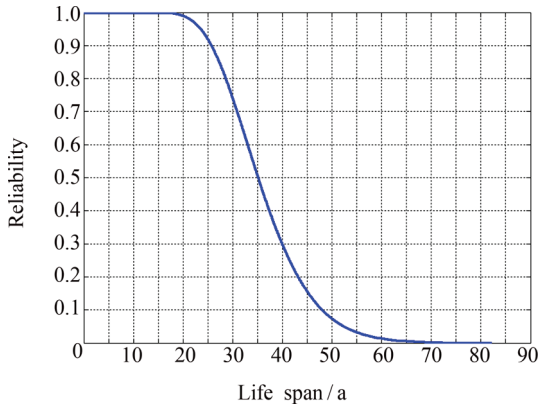

图 4 动量轮波动幅值 $\Delta v = 100$ 时稳态工况可靠度曲线

Fig. 4 Reliability curve of steady state mode of momentum wheel as $\Delta v = 100$

4.4 动量轮在轨冲击工况寿命预测

动量轮进行加减速运行时处于冲击状态, 冲击的减速幅度、加速幅度以及年冲击次数是影响退化程度的关键因素. 动量轮寿命件子样运行时, 减速幅度和加速幅度是固定的, 冲击次数存在变化.

以地面寿命试验冲击工况状态参数表征动量轮在轨冲击工况时, 对漂移系数和扩散系数进行转换, 即

$$\mu_{\rm on} = \frac{\mu n}{365}, \tag{19}$$

$$\sigma_{\rm on}^2 = \frac{\sigma^2 n}{365}. \tag{20}$$

其中, μ 为由加速方程式 (11) 计算所得结果, σ 为由

表 8 动量轮波动幅值 $\Delta v = 100$ 时稳态工况及退化参数

Table 8 Steady state mode and degeneration parameter of momentum wheel as $\Delta v = 100$

动量轮波动/(r·min^{-1})			漂移系数	扩散系数	阈值	可靠寿命
均值	幅值	最大值				
4800	100	4900	3.7819×10^{-4}	0.0107	5 W	8795 d (约 24 年)

表 9 动量轮波动幅值 $\Delta v = 100$ 时稳态工况可靠度

Table 9 Reliability of steady state mode of momentum wheel as $\Delta v = 100$

寿命/a	5	10	15	20	25	30	35
可靠度	1.0000	1.0000	0.9998	0.9904	0.9194	0.7418	0.5073

表 10 动量轮波动幅值 $\Delta v = 100$ 时稳态工况可靠寿命

Table 10 Lifetime of steady state mode of momentum wheel as $\Delta v = 100$

可靠度	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90
寿命/a	14.05	20.07	21.40	22.29	22.99	23.58	24.10	24.56	24.98	25.37	25.73

表 11 动量轮年冲击次数 $n = 10$ 时冲击工况及退化参数

Table 11 Degeneration parameter of momentum wheel as impact frequency per year $n = 10$

年冲击次数	减速幅度 v_-/(r·min^{-1})	加速幅度 v_+/(r·min^{-1})	漂移系数 $\mu_{\rm on}$	扩散系数 $\sigma_{\rm on}$	阈值 $D_{\rm f}$	可靠寿命 $T_{R=0.94}$
10	4800	4800	3.5442×10^{-4}	0.0949	25	13648 d (约 37 年)

加速方程式 (12) 计算所得结果, n 为动量轮年发生冲击次数. 选取年冲击次数 $n=10$, 某型动量轮冲击工况及退化参数列于表 11, 可靠度评估结果列于表 12, 可靠寿命列于表 13, 可靠度曲线如图 5 所示.

4.5 基于串联系统的动量轮在轨寿命预测

串联系统的所有单元中任一单元故障均会导致整个系统的故障. 由 n 个单元组成的串联系统可靠度为

$$R_{\rm s}(t)=\prod_{i=1}^{n}R_i(t). \tag{21}$$

动量轮在轨工作时存在稳态工况和冲击工况两种转速状态. 动量轮在任何一种工况状态下工作失效都认为动量轮失效, 因此可以认为动量轮的两种转速工作状态构成了一个串联系统. 利用式 (21) 预测某型动量轮的在轨寿命, 选取 $\Delta V=100$ 和 $n=10$ 的情况进行预测, 对应的可靠度函数分别为 $R_{\rm st}$ 和 $R_{\rm sh}$, 有

$$\begin{aligned}R_{\rm st}(t)=&\Phi\Big(\frac{5-3.7819\times10^{-4}t}{0.0107\sqrt{t}}\Big)\cdot\\&\exp\Big(\frac{2\times3.7819\times10^{-4}\times5}{0.0107^2}\Big)-\\&\Phi\Big(\frac{-5-3.7819\times10^{-4}t}{0.0107\sqrt{t}}\Big),\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}R_{\rm sh}(t)=&\Phi\Big(\frac{25-3.5442\times10^{-4}t}{0.0949\sqrt{t}}\Big)\cdot\\&\exp\Big(\frac{2\times3.5442\times10^{-4}\times25}{0.0949^2}\Big)-\\&\Phi\Big(\frac{-25-3.5442\times10^{-4}t}{0.0949\sqrt{t}}\Big).\end{aligned} \tag{23}$$

进而得到某型动量轮在轨可靠度函数 $R_{\rm on}$ 为

$$R_{\rm on}=R_{\rm st}\times R_{\rm sh}. \tag{24}$$

表 14 为串联计算后某型动量轮的在轨可靠度, 表 15 为在轨可靠寿命, 图 6 为相应的可靠度曲线. 可靠度 $R=0.94$ 时, 某型动量轮在轨寿命为 8590 天 (约 23 年).

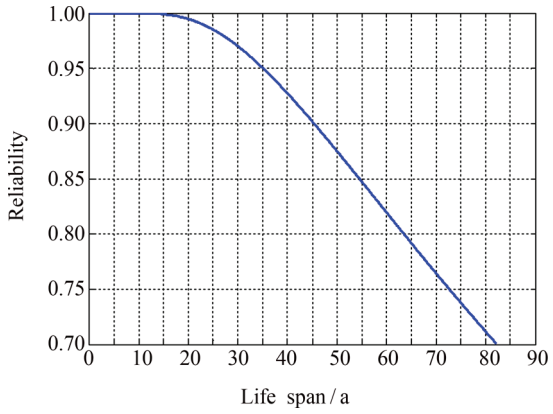

图 5 动量轮年冲击次数 $n=10$ 时冲击工况可靠度曲线

Fig. 5 Reliability curve of momentum wheel as impact frequency per year $n=10$

表 12 动量轮年冲击次数 $n=10$ 时稳态工况可靠度

Table 12 Reliability of momentum wheel as impact frequency per year $n=10$

寿命/a	5	10	15	20	25	30	35
可靠度	1.0000	1.0000	0.9990	0.9947	0.9852	0.9702	0.9506

表 13 动量轮年冲击次数 $n=10$ 时稳态工况可靠寿命

Table 13 Lifetime of momentum wheel as impact frequency per year $n=10$

可靠度	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90
寿命/a	10.40	22.87	26.95	30.07	32.75	35.15	37.39	39.51	41.54	43.50	45.41

表 14 动量轮在轨可靠度

Table 14 Reliability of momentum wheel in-orbit

寿命/a	5	10	15	20	25	30	35
可靠度	1.0000	1.0000	0.9989	0.9851	0.9058	0.7197	0.4822

表 15 动量轮在轨可靠寿命

Table 15 Lifetime of momentum wheel in-orbit

可靠度	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.85	0.80
寿命/a	19.17	20.67	21.64	22.38	23.00	23.53	24.01	24.44	24.84	25.21	26.81	26.83

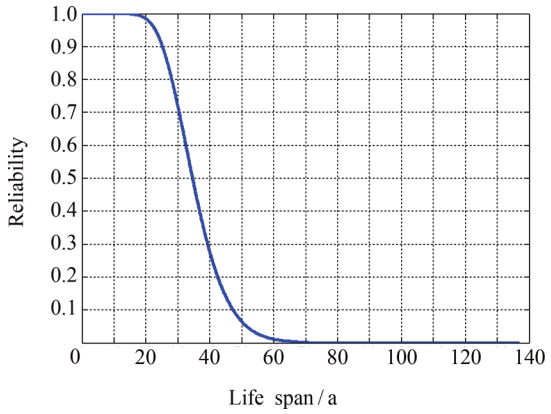

图 6 动量轮在轨工作可靠度曲线

Fig. 6 Reliability curve of momentum wheel in orbit

5 结论

基于维纳过程退化模型的寿命预测理论, 对某型动量轮的工作原理及失效机理进行分析, 确定了表征动量轮性能退化的特征参数. 根据动量轮在轨工作状态计算其在轨退化参数, 预测了动量轮在轨寿命.

结合寿命件子样的地面试验数据及动量轮失效机理, 考虑飞轮地面寿命试验期间, 其轴温受外界影响较大, 轴温变化状态不能真实反映寿命件子样的性能变化趋势, 这里选取总功耗作为表征某型动量轮性能退化的关键特征量.

采用以转速为应力的循环应力加速试验方式, 以总功耗为退化特征量, 以 Wiener 过程为理论基础, 对寿命件子样进行了退化建模和寿命建模. 运用建立的加速方程分别得到动量轮在轨时稳态工况和冲击工况下的退化参数, 运用串联系统寿命预测模型得到了动量轮的在轨寿命.

由于动量轮寿命件子样较少, 寿命试验中后期的数据积累较少, 没有足够的在轨卫星动量轮失效数据. 因此, 后续可综合考虑足够多的样本数据及失重、轴承润滑油逐渐消耗等因素, 对动量轮的在轨寿命进行全面评估.

参考文献

[1] HUANG Hongjian, LIN Ruiguang. Accelerated life tests of BLDCM [J]. *S M Elec. Mach.*, 2000, **27**(6): 43-47 (黄洪剑, 林瑞光. 无刷直流电机加速寿命试验 [J]. 中小型电机, 2000, **27**(6): 43-47)

[2] ZANG Wentong, LI Jianhua. Supported load condition and life analysis for momentum flywheel bearing [J]. *Bearing*, 2000(4): 32-34 (臧稳通, 李建华. 动量飞轮轴承的受载情况及寿命分析 [J]. 轴承, 2000(4): 32-34)

[3] ZHAO Qing. Fatigue Life Test and Failure Behavior Analysis of Bearing in Space Motor[D]. Haerbin: Haerbin Institute of Technology, 2010: 43-45 (赵庆. 航天电机用轴承的疲劳寿命试验及失效行为分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 43-45)

[4] DONG Shaojiang. Research on Space Bearing Life Prediction Method Based on Optimized Support Vector Machine [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 93-104 (董绍江. 基于优化支持向量机的空间滚动轴承寿命预测方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 93-104)

[5] LI Haitao, JIN Guang, ZHOU Jinglun, *et al.* Bayesian network reliability modeling and assessment of momentum wheel on orbit [J]. *Acta Aeron. Astron. Sinica,* 2009, **30**(6): 1084-1089 (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)

[6] LIU Qiang, ZHOU Jinglun, JIN Guang, *et al.* Bayesian reliability estimation for momentum wheel based on credibility [J]. *J. Astron.,* 2009, **30**(1): 382-386 (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)

[7] FAN Youwen, YANG Xiaoli, LI Chunwei, *et al.* Experimental research on the momentum wheel failure physical model [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1): 78-86 (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)

[8] LI Haitao, JIN Guang, ZHOU Jinglun, *et al.* Momentum wheel Wiener process degradation modeling and life prediction [J]. *J. Aeros. Power*, 2011, **26**(3): 622-627 (厉海涛, 金光, 周经伦, 等. 动量轮维纳过程退化建模与寿命预测 [J]. 航空动力学报, 2011, **26**(3): 622-627)

[9] LIU Qiang. Research on the Performance Reliability Technology and the Application Based on Physics of Failure [D]. Changsha: National University of Defense Tech-

nology, 2011: 120-124 (刘强. 基于失效物理的性能与可靠性技术及应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 120-124)

[10] LIU Shengnan, LU Ningyun, CHENG Yuehua, *et al.* Remaining lifetime prediction for momentum wheel based on multiple degradation parameters [J]. *J. Nanjing Univ. Aeron. Astron.*, 2015, **47**(3): 360-366. (刘胜南, 陆宁云, 程月华, 等. 基于多退化量的动量轮剩余寿命预测方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, **47**(3): 360-366)

[11] LIU Qiang, ZHOU Jinglun, JIN Guang, *et al.* The reliability estimation of the momentum wheel based on the stochastic threshold Gauss-Brown failure-physics model [J]. *J. Astron.*, 2009, **30**(5): 2109-2115 (刘强, 周经伦, 金光, 等. 基于随机阈值的 Gauss-Brown 失效物理模型的动量轮可靠性评估 [J]. 宇航学报, 2009, **30**(5): 2109-2115)

[12] JIN Guang, LIU Qiang. Momentum wheel reliability modeling and assessment based on performance degradation [J]. *Math. Prac. Theor.*, 2009, **39**(15): 67-72 (金光, 刘强. 基于性能退化的动量轮可靠性建模与评估 [J]. 数学的实践与认识, 2009, **39**(15): 67-72)

[13] QING Tao, ZHOU Ningning, ZHOU Gang, *et al.* Application research status and development of space tribology in shafting of satellite moving parts [J]. *Lub. Eng.*, 2015, **40**(2): 100-108,115 (卿涛, 周宁宁, 周刚, 等. 空间摩擦学在卫星活动部件轴系的应用研究现状及发展 [J]. 润滑与密封, 2015, **40**(2): 100-108,115)

[14] JONES Jr William R, JANSEN Mark J, Lubrication for space applications [R]. Washington DC: NASA, 2005: 91-120

[15] WANG Yang, LIU Qiusheng, YAN Jiaping. Characteristic study on the porous reservoir of liquid lubricant in space [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(6): 592-596 (汪洋, 刘秋生, 阎嘉坪. 空间液体润滑多孔储油器特性研究 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(6): 592-596)

[16] LIU Shengzhong. Life test and life evaluation for long-life flywheels on satellite [J]. *Nav. Contr.*, 2012.02, **11**(1): 52-56 (刘胜忠. 卫星飞轮产品长寿命地面验证与评估 [J]. 导航与控制, 2012, **11**(1): 52-56)

[17] HUANG Aimei, GUO Yuee, YU Jianfei. Research on residual life prediction technique of hydraulic pump based on accelerated degradation data [J]. *Mach. Des. Man.*, 2011: 154-155 (黄爱梅, 郭月娥, 虞健飞. 基于加速退化数据的航空液压泵剩余寿命预测技术研究 [J]. 机械设计与制造, 2011: 154-155)

[18] LIU Zhiquan, LI Xinli, YU Jin. Methods of accelerated life tests for long-life spacecraft mechanisms [J]. *Chin. Space Sci. Techn.*, 2008, **28**(4): 65-71. (刘志全, 李新立, 遇今. 长寿命航天器机构的加速寿命试验方法 [J]. 中国空间科学技术, 2008, **28**(4): 65-71)

[19] PENG Baohua. Research on Reliability Modeling Methods Based on Wiener Process [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 15-17 (彭宝华. 基于 Wiener 过程的可靠性建模方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 15-17)