

一种基于性能退化建模的设备 最优监测时机确定方法*

张正新, 胡昌华, 周志杰, 张 昭
(第二炮兵工程大学 302 教研室, 西安 710025)

摘 要: 为了克服长寿命、高成本、高可靠性设备失效数据获取困难和监测维护策略不合理的缺点, 基于漂移布朗运动, 利用设备的周期性能监测数据, 对设备的退化失效过程进行建模, 评估设备服役期内的可靠性、剩余有效寿命, 并综合考虑设备的监测维护成本和可靠性的要求, 以单位时间期望监测维护成本最小为目标, 提出了确定最优监测间隔的方法。使用某型号惯性平台存储时月监测数据及提出的方法, 得到了其关键部件陀螺仪的可靠性和剩余有效寿命的评估结果, 以及最新监测点之后的最优监测间隔, 从而验证了所提方法的有效性。

关键词: 退化建模; 漂移布朗运动; 可靠性; 设备监测策略; 最优化

中图分类号: TP307 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4564-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.042

Performance degradation modeling based method for optimizing equipment inspection

ZHANG Zheng-xin, HU Chang-hua, ZHOU Zhi-jie, ZHANG Zhao
(Unite 302, Xi'an Institute of Hi-Tech, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at overcoming the difficulty of failure data acquisition and the reasonless of inspection and maintenance strategy of long-life, high-cost, high-reliability equipment, the degradation failure process was modeled, and the reliability, as well as residual useful life was evaluated by using the periodic inspection data on the basis of drift Brownian-movement. Moreover, when the inspection and maintenance cost and reliability requirement of a equipment are considered, this paper proposed a method for best inspection interval decision-making through minimizing the unit time expect inspection and maintenance cost. The reliability, residual useful life during the storage and the best inspection interval after the last inspection of the gyroscope in an inertial platform were gained using the menstrual inspection data. And the applicability of the proposed method is validated accordingly.

Key words: degradation modeling; drift Brownian movement; reliability; equipment inspection strategy; optimization

0 引言

大量高可靠性、长寿命、高成本系统的出现,致使传统的寿命实验、加速寿命实验等方法很难用可以接受的成本,在较短的时间内获取失效时间数据。此类设备的失效机理表现为性能的退化,且表征性能退化的特征量一般都能够通过监测直接或间接地获取,因此可对退化监测数据进行建模,评估设备的可靠性、剩余有效寿命,预测设备的退化过程。同时,对此类不合理的监测维护会造成生产成本的上升、设备可靠性的下降。利用设备的退化模型,综合考虑设备监测维护成本和性能要求,确定科学的监测维护策略已经受到国内外学者的广泛关注。

在性能退化建模方面,1969年 Gertsbackh 等人^[1]就通过对退化数据建模研究产品的可靠性价值。Meeker 等人^[2]也指出退化失效分析是工程应用实际与传统可靠性理论不适应问题的解决之道。陈亮等人^[3]提供了退化模型和相关推断方法

的回顾。因此,通过测试性能退化数据来进行可靠性评估和寿命预测,能够很好地解决对此类产品进行可靠性评估时失效监测量少或无失效的局限,是对产品可靠性进行评估的一种有效的新途径。研究表明,漂移布朗运动比较适合对设备的退化数据进行建模^[4]。

在基于性能退化监测维护方面,退化设备的优化监测与视情维护(CBM)克服传统的设备监测维护策略,即失效监测维护(设备达到使用寿命失效后进行维护)和定期监测维护(定期对设备进行监测维护)存在的诸多弊端^[5],得到了广泛的关注。Christer 和 Wang 等人^[6-9]在该领域做出了突出的贡献,为合理进行设备监测,减少设备停机时间、合理安排生产计划、降低生产成本提供了重要依据。然而,现有方法较少综合考虑设备的监测维护成本和可靠性要求,与实际情况不相符。

鉴于此,本文将漂移布朗运动用于设备退化数据建模,基于监测退化数据对设备的可靠性和剩余有效寿命进行评估,并

收稿日期: 2012-05-03; **修回日期:** 2012-06-06 **基金项目:** 国家杰出青年科学基金资助项目(61025014);陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ8007)

作者简介: 张正新(1987-),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向为退化建模、视情维护等(mozhexiaohei@163.com);胡昌华(1966-),男,湖北罗田人,教授,博导,主要研究方向为控制系统自动检测与故障诊断、容错控制、可靠性工程等;周志杰(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为复杂系统建模、人工智能等;张昭(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为退化建模、可靠性工程等。

以单位时间期望维护成本最低为目标,综合考虑设备的可靠性,计算设备的最优监测间隔,改进设备的维护策略。最后将该方法应用于某型号陀螺仪实测退化数据中,获得了陀螺仪的可靠度、剩余有效寿命评估和最优监测间隔。

1 问题描述

1.1 退化建模问题描述

在工程实际中,通常只能通过监测设备某些关键参数来评估设备的性能。这里认为对设备的监测不会影响设备的性能。令 $y(t)$ 为 t 时刻表征系统性能的一维监测量。设备的监测都在离散时间点 $t_k = n_k \delta t$ 进行, δt 为任意单位时 1, 如年、月、日等,且先后两个监测点 t_k 和 t_{k+1} 之间退化量是平稳、独立的随机变量。获取监测量 $y(t)$ 后,根据其值所处范围的不同,确定设备所处的退化状态,并选择相应的维护措施。假设设备的退化状态 $S(t)$ 与监测量 $y(t)$ 关系如下:

$$S(t) = \begin{cases} s_1, y(t) < F_1 \\ s_2, F_1 \leq y(t) < F_2 \\ s_3, F_2 \leq y(t) < F_3 \\ s_4, y(t) \geq F_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中: s_1, s_2, s_3, s_4 分别表示设备状态为退化前期、退化中期、退化后期和失效。 F_1, F_2, F_3 的值可根据对设备的性能要求及专家历史经验确定。维护措施 $M(S(t))$ 与设备的退化状态 $S(t)$ 相对应:

$$M(s_i) = m_i \quad (2)$$

其中: $i = 1, 2, 3, 4$ 。 m_1 表示对继续按照当前方式使用设备, m_2 表示对设备进行必要的维护或改善设备的使用环境, m_3 表示为了避免失效带来的损失,对设备进行预防性更换, m_4 表示为设备失效后进行抢救性更换。

进行退化建模要解决的关键问题是利用截止 t_n 历史监测数据 $Y_{t_n} = \{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_{n-1}), y(t_n)\}$, 对设备的退化过程进行建模,评估设备的可靠度 $R(t)$ 和剩余有效寿命 $Rul(t)$ 。

1.2 最优监测问题描述

显然,不同的维护措施,成本不同,高成本的设备尤其如此,监测间隔亦会对设备的使用成本造成影响。因此,设备的最优监测问题可描述为综合考虑设备的可靠性、监测成本等因素及其与监测时间间隔的关系,选择合适的目标函数并进行优化,从而得到设备的最优监测间隔。利用文献[10~12]提出的思想,选择单位时间系统期望监测维护成本作为目标函数。

$$E(\Delta t_n | y(t_n)) = \frac{\sum_{i=1}^4 C_i P_{t_{n+1}}(m_i | y(t_n))}{\Delta t_n} \quad (3)$$

其中: C_i 表示 m_i 对应的成本,通常 $C_1 < C_2 \ll C_3 < C_4$, $P_{t_{n+1}}(m_i | y(t_n))$ 为 $y(t_n)$ 已知时,下一监测时刻 t_{n+1} 进行 m_1 维护的概率, Δt_n 为监测间隔。

因此,最优监测问题可表述为

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta t_n} E(\Delta t_n | y(t_n)) \\ \text{s. t. } & R(t) \geq R_\xi, t_n \leq t \leq t_{n+1} \end{aligned} \quad (4)$$

其中: R_ξ 为系统的最低可靠度。

最优监测需要解决的关键问题是在退化模型的基础上,计算不同监测间隔下设备的期望监测维护成本,并求解使之最小的监测间隔。

2 基于漂移布朗运动的设备退化建模方法

2.1 漂移布朗运动退化模型

一些设备退化过程表现出连续性和独立增量特性,这与布朗运动的性质相符合。漂移布朗运动是将布朗运动应用到退化模型中的一种常用方法,该方法假设布朗运动对退化过程具有可加性效应,如式(5)所示的线性形式在金融、可靠性预测等领域已经得到广泛研究。

$$y(t) = y_0 + ut + \sigma B(t) \quad (5)$$

其中: t 是采样时间点; y_0 为初始时刻 $y(t)$ 的值; $B(t)$ 为标准布朗运动,即 $B(t) \sim N(0, t)$, $N(0, t)$ 是均值为 0、方差为 t 的正态分布; u 为漂移系数,与产品所受应力有关; σ 为扩散系数,由产品本身的不一致性与不稳定性、测量设备测量误差及稳定性、测试过程中外部噪声等随机因素对产品和测试设备性能的影响等因素决定。

由布朗运动的正态性可知,设备性能退化的增量服从均值为 $u\Delta t$ 、方差为 $\sigma^2 \Delta t$ 的正态分布^[13],其概率密度分布函数为

$$f(\Delta y_{t_i}, \Delta t_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi \Delta t_i}} \exp\left(-\frac{(\Delta y_{t_i} - u\Delta t_i)^2}{2\sigma^2 \Delta t_i}\right) \quad (6)$$

其中: $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ 表示系统的监测间隔, $\Delta y_{t_i} = y(t_i) - y(t_{i-1})$ 为性能退化量的增量。当监测到的性能退化量首次超过某个阈值时(首达时间),设备即进入该阈值对应的状态。漂移布朗运动的首达时间 T_{Fi} 服从逆高斯分布^[14],其概率密度函数为

$$f(t; y_0, F_i) = \frac{F_i - y_0}{\sigma \sqrt{2\pi t^3}} \exp\left(-\frac{(F_i - y_0 - ut)^2}{2\sigma^2 t}\right) \quad (7)$$

设备的可靠度函数为

$$R(t) = \Phi\left(\frac{F_3 - y_0 - ut}{\sigma \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2u(F_3 - y_0)}{\sigma^2}\right) \Phi\left(-\frac{F_3 - y_0 + ut}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (8)$$

其中: Φ 为标准正态分布的累积概率分布函数。

2.2 模型参数的估计

利用设备的监测数据对式(5)(6)中的未知参数进行极大似然估计,即可对设备的可靠度和剩余有效使用寿命进行评估。假设同时对 m 台设备进行监测,第 j 台设备在 t_i 监测点的监测量为 y_{ij} ,监测数据截止监测点 t_n 。为方便计算,以相邻监测时刻设备性能的增量作为随机变量,似然函数为

$$L \propto \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n f(\Delta y_{ij}) \quad (9)$$

其中: $\Delta y_{ij} = y_{(i+1)j} - y_{ij}$ 表示监测量的增量。

将式(6)带入式(5)中可得

$$L \propto \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi \Delta t_i}} \exp\left(-\frac{(\Delta y_{ij} - u\Delta t_i)^2}{2\sigma^2 \Delta t_i}\right) \quad (10)$$

对式(10)取对数,可得其对数似然函数为

$$\ln L \propto -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[\ln(2\pi \Delta t_i) + \ln(\sigma^2) + \frac{(\Delta y_{ij} - u\Delta t_i)^2}{\sigma^2 \Delta t_i} \right] \quad (11)$$

式(11)对 u 和 σ^2 求偏导并令其为零,可求得布朗运动的漂移系数 u 和扩散系数 σ^2 分别为

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \Delta y_{ij}}{m \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (\Delta y_{ij} - u\Delta t_i)^2}{m \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (13)$$

2.3 基于漂移布朗运动的设备退化建模评估算法

利用漂移布朗运动对设备进行退化建模的方法可表述为:

- 根据截止第 n 次监测的历史数据 $\{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_{n-1}), y(t_n)\}$, 计算监测间隔 $\{\Delta t_i\}$ 与退化量增量 $\{\Delta y_i\}$ 。
- 将 $\{\Delta t_i\}$ 与 $\{\Delta y_i\}$ 代入式(12)(13)中, 计算 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$ 。
- 将 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$ 代入式(8)中, 计算设备的可靠度 $R(t_n)$ 。
- 令 $y_0 = y(t_n)$, 将 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$ 代入式(7)中, 计算剩余有效寿命 $Rul(t_n)$ 的分布。

使用该算法, 可根据截止当前的历史监测数据对设备的性能退化进行建模, 并对设备的可靠性和剩余有效寿命进行评估。

3 基于性能退化建模的最优监测算法

求解最优监测间隔的关键是计算不同监测间隔 Δt_n 单位时期期望监测维护成本 $E(\Delta t_n | y(t_n))$ 的值, 其核心是条件概率 $P_{n+1}(m_i | y(t_n))$ 的计算方法。利用截止 t_n 时刻监测数据获取模型的参数估计值 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$ 后, 第 $n+1$ 次监测后设备的退化状态与维护措施可按式(14)进行计算。

$$\begin{aligned} P_{n+1}(m_1 | y(t_n)) &= \Psi(F_1 - y(t_n), \Delta t_n) \\ P_{n+1}(m_2 | y(t_n)) &= \Psi(F_2 - y(t_n), \Delta t_n) - P_{n+1}(m_1 | y(t_n)) \\ P_{n+1}(m_3 | y(t_n)) &= \Psi(F_3 - y(t_n), \Delta t_n) - \\ &P_{n+1}(m_2 | y(t_n)) - P_{n+1}(m_1 | y(t_n)) \\ P_{n+1}(m_3 | y(t_n)) &= 1 - \Psi(F_3 - y(t_n), \Delta t_n) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{其中:} \quad \Psi(x, \Delta t) = \int_{-\infty}^x f(\Delta y, \Delta t) d\Delta y \quad (15)$$

在对监测量进行退化建模的基础上, 求解设备的最优监测问题的算法如下:

- 根据工程实际确定各维护措施的成本 C_i , 其中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。
- 利用 2.2 节描述的方法, 获取退化模型的参数 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$ 。
- 计算不等式 $R(t) \geq R_c, t_n \leq t \leq t_{n+1}$, 确定监测间隔的取值范围。
- 计算监测间隔范围内使得式(3)取得最大值的时间点, 即为最优监测点。
- 在最优监测点对设备进行检测, 重复步骤 a) ~ d), 求解下一最优监测点。

从步骤 e) 可知, 该算法能够根据最新的监测数据, 动态地确定设备的最优监测间隔, 具有一定的实时性。

4 实例分析

4.1 问题描述

陀螺仪是惯性导航系统的关键部件, 广泛应用于导弹武器系统中, 具有长期贮存、一次使用、退化失效、周期性监测的特点。在实际应用时, 其失效多表现为退化失效。为了保证使用性能, 出厂后通常定期(每月)对陀螺仪进行监测。漂移系数是反映陀螺仪性能的重要参数^[15], 故选择如图 1 所示某型号惯性平台 X 轴陀螺仪的一次项漂移系数 72 组月监测数据作为对象, 使用上文提出的方法进行建模, 评估陀螺仪的可靠性与剩余有效寿命, 并综合考虑维护成本与陀螺仪可靠性指标, 求解最优监测维护间隔。模型的维护阈值和维护成本如表 1 所示。

表 1 陀螺仪维护阈值与成本

参数	阈值/ $^{\circ}/(\text{hg}_0)$			成本/千元			
	F_1	F_2	F_3	C_I	C_R	C_P	C_C
数值	0.2	0.4	0.5	1	5	60	100

4.2 基于漂移布朗运动的陀螺仪退化数据建模

使用前 64 组数据对进行退化建模, 如图 2 所示。对监测数据增量的正态分布拟合结果显示正态分布能够较好地对监测数据增量进行建模。对模型的参数进行估计, 可得 $\hat{\mu} = 0.0044, \hat{\sigma}^2 = 7.7375 \times 10^{-5}$ 。以设备监测数据的增量为母体, 分别在母体上作假设 $H_{10}: \mu = 0.0044$ 和 $H_{20}: \sigma^2 = 7.7375 \times 10^{-5}$, 取显著水平 $\alpha = 10\%$, 利用后 8 组监测数据的增量作为样本, 对上述假设进行检验, 可求得 μ 和 σ^2 的置信区间分别是 $[-0.0019, 0.0089]$ 和 $[3.21 \times 10^{-5}, 2.09 \times 10^{-4}]$ 。样本计算的均值和方差分别为 0.0035 和 6.4588×10^{-5} 。显然, 在此显著水平下, 样本的均值、方差与假设值无显著差异。由此可证明模型的准确性。

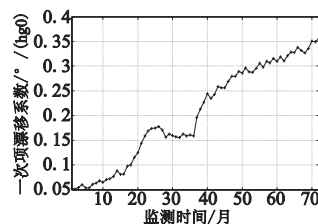


图1 某型号陀螺一次项漂移系数月监测数据

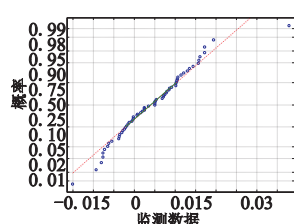


图2 监测数据增量的正态分布拟合结果

据此对设备的可靠度进行评估, 可得设备的可靠度曲线如图 3 所示。从图 3 可知, 第 48 个监测点之前陀螺仪的可靠度为 1, 设备的中位寿命为 100 个月, 特征寿命为 107 个月。

从第 64 ~ 72 个监测点陀螺仪的剩余有效寿命有效分布如图 4 所示, 剩余有效寿命均值的增量与监测时间的增量相等, 易知陀螺仪寿命的均值为 98 个月。

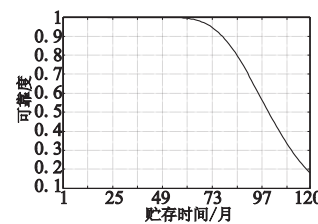


图3 陀螺仪的可靠度曲线

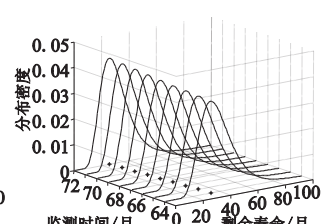


图4 陀螺仪剩余有效寿命分布

4.3 基于退化模型的陀螺仪最优监测时机的确定

取 $R_c = 0.5$, 假设现在已经获得第 64 个月的监测数据。如图 5 所示, 利用第 3 章提供的算法, 可计算出最优监测间隔为 11 个月, 即在第 75 个月时对陀螺仪进行监测, 可使设备单位时期期望成本最低。此时陀螺仪的可靠度为 $0.9294 > R_c$, 仍满足可靠性的要求。

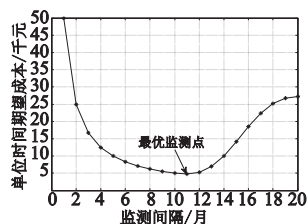


图5 陀螺仪的最优监测间隔

5 结束语

利用退化数据对设备可靠性和剩余有效(下转第 4583 页)

- 计算机仿真, 2004, 21(6):167-175.
- [9] 瞿毅臻, 李琦, 甘杰夫. 基于 Repast 平台的 SARS 传播仿真建模研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(2):286-288.
- [10] 龚建华, 周洁萍, 徐珊, 等. SARS 传播动力学模型及其多智能体模拟研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(6):829-835.
- [11] 刘涛, 黎夏, 刘萌伟. 传染病时空传播的多智能体仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18):5874-5877.
- [12] PENG Shuang-yan, YANG Kun, XU Quan-li, *et al.* A simulation study of H1N1 space-time epidemic based on agent-based modeling [C]//Proc of the 18th International Conference on Geoinformatics, GIScience in Change, Geoinformatics. [S.l.]: IEEE, 2010:1-4.
- [13] KING D. Organizations in disaster[J]. *Nat Hazards*, 2007, 40: 657-665.
- [14] 应桂英, 苏维, 荣荣生. 影响突发公共卫生事件决策的因素分析[J]. 中华医学杂志, 2006, 86(17):1161-1164.
- [15] QUILLINAN T B, BRAZIER F, ALDEWERELD H, *et al.* Developing agent-based organizational models for crisis management [C]//Proc of the 8th Internal Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2009:45-52.
- [16] BICOCCCHI N, ROSS W, ULIERU M. An agent-based approach for collaboratively modelling and simulating emergency-response organizations [C]//Proc of IEEE International Conference on Risks and Security of Internet and Systems. 2010.
- [17] CARLEY K, FRIDSMA D, CASMAN E, *et al.* BioWar: scalable multi-agent social and epidemiological simulation of bioterrorism events [C]//Proc of NAACSOS Conference. 2004.
- [18] EIDELSON B M, LUSTICK I. VIR-POX: an agent-based analysis of smallpox preparedness and response policy [EB/OL]. [2010-09-11]. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/3/6.html>.
- [19] 李璐, 宣慧玉. 多主体仿真在公共卫生事件应急管理中的应用——以一个传染病政策仿真系统为例[J]. 西安交通大学学报: 社会科学版, 2010, 30(99):57-63.
- [20] 张发, 宣慧玉, 赵巧霞. 复杂系统多主体仿真方法论[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8):2386-2390.
- [21] 罗批, 司光亚, 胡晓峰, 等. 基于 Agent 的复杂系统建模仿真方法研究进展[J]. 装备指挥技术学院学报, 2003, 14(1):78-82.
- [22] GILBERT N. Agent-based social simulation-dealing with complexity [EB/OL]. [2010-01-21]. <http://cress.soc.surrey.ac.uk/.../ABSS%20%20dealing%20with%20complexity-1-1.pdf>.
- [23] DROGOUL A, VANBERGUE D, MEURISSE T. Multi-agent based simulation: where are the agents [C]//Proc of the 3rd International Conference on Multi-agent based Simulation II. Berlin: Springer-Verlag, 2003:1-15.
- [24] ROCHE B, GUÉGAN J F, BOUSQUET F. Multi-agent systems in Epidemiology: a first step for computational biology in the study of vector-borne disease transmission [J]. *BMC Bioinformatics*, 2008, 9:435-443.
- [25] DASZAK P, CUNNINGHAM A A, HYATT A D. Emerging infectious diseases of wildlife-threats to biodiversity and human health [J]. *Science*, 2000, 287(5452):443-449.
- [26] 梅珊. 基于复杂 Agent 网络的病毒传播建模和仿真研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [27] 刘天印. 复杂网络上的 A(H1N1) 型流感传播模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(15):222-224.
- [28] 王路帮, 钱省三. 基于元胞自动机的组织内 H1N1 传播仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12):2998-3003.
- [29] World Health Organization. Influenza A (H1N1) guidance documents [EB/OL]. [2009-08-03]. <http://www.who.int/csr/disease/swineflu/en/index.html>.
- [30] 祖正虎, 郑涛, 许晴, 等. 动态社会接触网络上的 H1N1 控制仿真研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(9):3334-3337.

(上接第 4566 页)寿命等进行评估,并基于此制定科学合理的监测策略,已经得到了国内外专家学者的广泛关注和深入研究。本文将线性漂移布朗运动应用到退化数据建模和设备的可靠性、剩余有效寿命及最优监测间隔评估中,其有效性通过在某型号陀螺仪中的应用得到了验证,为保证设备的可靠性,降低设备的维护成本提供了依据。在未来的工作中,应考虑监测本身对设备性能的影响及多维监测量的情况,对模型进行完善。

参考文献:

- [1] GERTSBACH I B, KORDONSKIY K B. Models of failure [M]. New York: Springer-Verlag, 1969.
- [2] MEEKER W Q, HAMADA M. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products [J]. *IEEE Trans on Reliability*, 1995, 44(2):187-198.
- [3] 陈亮. 基于退化建模的陀螺仪可靠性预测方法研究[D]. 西安:第二炮兵工程学院, 2010.
- [4] 马静, 苑丹丹, 晁代宏, 等. 基于漂移布朗运动的光纤陀螺加速贮存寿命评估[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(6):756-760.
- [5] WANG Hong-zhou. A survey of maintenance policies of deteriorating systems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 139(3):469-489.
- [6] CHRISTER A H, WALLER W M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1984, 35(5):401-406.
- [7] WANG W. Modeling condition monitoring intervals: a hybrid of simulation and analytical approaches [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2003, 54(3):273-282.
- [8] CHRISTER A H, WANG W. A simple condition monitoring model for a direct monitoring process [J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 82(2):258-269.
- [9] WANG Wen-bin. An inspection model for a process with two types of inspections and repairs [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(2):526-533.
- [10] CASTANIER B, BERENGUER C, GRALL A. A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear [J]. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2003, 19(4):327-347.
- [11] WANG W, SCARF P A, SMITH MAJ. On the application of a model of condition-based maintenance [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51(11):1218-1227.
- [12] ZHOU Xiao-jun, XI Li-feng, LEE J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92(4):530-534.
- [13] 李晓阳. 多态退化系统加速试验技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2007.
- [14] 李晓阳, 姜敏. 基于加速退化模型的卫星组件寿命与可靠性评估 [J]. *航空学报*, 2007, 28(S):100-103.
- [15] 胡昌华, 马清亮, 郑建飞. 导弹测试与发射控制技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010.