

# 某机械陀螺长贮性能演变规律及性能退化模型研究

张世艳, 吴护林, 赵方超, 谭甜甜, 杨小奎

(西南技术工程研究所 弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 针对长期贮存后机械陀螺的性能退化会影响制导系统侧偏和射程的问题, 提出一种性能退化预测模型的建立方法, 用于掌握机械陀螺长贮性能退化规律。**方法** 首先, 针对机械陀螺结构特性和贮存环境, 确定敏感应力为温度, 加速模型为阿仑尼乌斯模型, 开展机械陀螺的加速贮存试验。其次, 对加速贮存试验过程中的机械陀螺进行周期性的参数检测, 分析各性能参数随试验时间的性能退化演变规律, 确定垂直漂移为其退化敏感参数。最后, 拟合垂直漂移参数在各温度应力下的性能退化曲线, 建立性能退化轨迹模型。**结果** 采用实际自然环境贮存 6、7、8、10 a 的性能数据对模型进行验证, 模型预测准确度分别为 86.70%、96.28%、91.53%、85.92%。**结论** 建立的性能退化模型评估准确度在 85% 以上, 该模型可应用于指定贮存时间下机械陀螺仪的性能退化行为预测。

**关键词:** 机械陀螺; 温度; 性能退化; 预测模型

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0015-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.03.002

## Performance Evolution Law and Degradation Model of Mechanical Gyroscope during Long-term Storage

ZHANG Shi-yan, WU Hu-lin, ZHAO Fang-chao, TAN Tian-tian, YANG Xiao-kui

(CSGC Key Laboratory of Ammunition Storage Environment Effects, Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a method for establishing a performance degradation prediction model aiming at the problem that the performance degradation of mechanical gyroscope will affect the sideslip and range of guidance system after long-term storage, so as to master the performance degradation law of mechanical gyroscope during long-term storage. Firstly, according to the structure characteristic and storage environment of the mechanical gyroscope, the sensitive parameter was determined as temperature, the acceleration model was Arrhenius equation model, and the accelerated storage test was carried out to mechanical gyroscope. Secondly, the parameters of the mechanical gyroscope were periodically detected during the accelerated storage test and the performance degradation evolution law of the mechanical gyroscope under each performance parameter with the test time was analyzed, thus determining vertical drift as the degradation sensitive parameter. Finally, the performance

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-08-15

Received: 2021-12-09; Revised: 2022-08-15

作者简介: 张世艳(1985—), 女, 硕士。

**Biography:** ZHANG Shi-yan (1985-), Female, Master.

引文格式: 张世艳, 吴护林, 赵方超, 等. 某机械陀螺长贮性能演变规律及性能退化模型研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 015-021.

ZHANG Shi-yan, WU Hu-lin, ZHAO Fang-chao, et al. Performance Evolution Law and Degradation Model of Mechanical Gyroscope during Long-term Storage[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 015-021.

degradation curves of vertical drift under various temperature stresses were fitted, and the performance degradation trajectory model was established. The model was verified by the performance data after storage for 6, 7, 8 and 10 years in the actual natural environment, with a prediction accuracy of 86.70%, 96.28%, 91.53% and 85.92%, respectively. The evaluation accuracy of the established performance degradation model is more than 85%, so the model can be applied to predict the performance degradation behavior of mechanical gyroscope for specified storage time.

**KEY WORDS:** mechanical gyroscope; temperature; performance degradation; prediction model

某型机械陀螺是用于某激光半主动末制导炮弹控制系统的关键部件,其主要作用是通过测量并输出弹丸的空间方位角信号,以保证弹丸在惯性制导阶段按照固定的下滑角飞行<sup>[1-2]</sup>,装配完成后即随弹长期贮存,一次使用。其水平漂移主要影响末制导炮弹的侧偏或侧偏散布,而垂直漂移则是影响弹道的射程<sup>[3]</sup>。随着贮存时间的增加,在温度等环境因素的影响下,关键性能指标退化<sup>[4-8]</sup>,直至超出指标要求范围。机械陀螺长期贮存后,漂移的退化直接影响着制导的侧偏和射程,最终影响装备作战效能的发挥。

为评估机械陀螺贮存性能,常用的方法是开展加速退化试验与分析。加速退化试验是在失效机理不变的基础上,通过提高应力水平来加速产品性能退化,利用高应力水平下的性能退化数据来估计产品在正常使用应力下的性能退化特征<sup>[9-12]</sup>。目前,国内外对光纤陀螺<sup>[9,13]</sup>、MEMS陀螺<sup>[14-15]</sup>、谐振陀螺<sup>[16]</sup>、加速度计<sup>[17-19]</sup>等惯性器件的加速退化试验均有研究。为了掌握机械陀螺在贮存过程中性能退化规律及贮存寿命,本文开展了该机械陀螺的加速试验,建立了关键性能参数的性能退化轨迹模型,并以实际环境的长贮数据对模型的准确度进行了验证。

## 1 试验

为合理确定机械陀螺的加速应力水平,保证加速试验下产品的失效机理不变和失效模式不变<sup>[20]</sup>,需要通过试验对象结构分析、使用环境分析和摸底预试验来确定加速应力种类和应力水平<sup>[21]</sup>。

### 1.1 试验结构及使用环境分析

该型机械陀螺仪是一种内框架、外转子、弹簧发条驱动的三自由度机械式陀螺仪,由基座、转子组件、万向支架、加速机构、闭锁机构和修正与补偿线包组成。其中加速机构由发条、夹圈、拨杆座、轴承、拨杆轴和扭簧组成,用以驱动转子,使其在尽可能短的时间内达到规定转速。机械陀螺仪结构特点为全固态机械结构,内部使用了少许胶粘剂密封。机械陀螺仪转子轴和弹体纵轴重合安装,外环轴和内环轴与弹的横轴平行安装,一般位于制导控制舱内部,随弹贮存,其贮存温度范围为-50~65℃。

### 1.2 试验条件确定

根据机械陀螺仪试验样品的结构和使用环境可知,机械陀螺仪属于密封结构,且在弹体内部使用,主要受环境温度的影响,因此加速应力采用温度应力。根据使用环境适应性要求,加速试验需提升一定应力水平,因此最低试验温度设定为70℃。通过预试验可知,机械陀螺仪胶粘剂的热老化试验温度升高到110℃时,质量损失0.5%,其高温上限约为110℃,保留一定的裕度,确定最高加速应力水平为100℃。采用3个加速试验应力水平,因此,设计70、85、100℃等3个温度应力水平开展恒定温度应力试验。试验设备为检定合格的温度试验箱。为保证试验结果的预测精度,每个温度应力下采用5个样品。

### 1.3 性能检测

到达规定的检测周期后,将机械陀螺仪取出冷却至标准实验室温度。按照制造与验收规范要求,利用机械陀螺仪测试系统对机械陀螺解锁误差、漂移量、接触起始角等性能进行检测。机械陀螺仪各性能参数的指标要求见表1。

表1 机械陀螺仪性能参数指标要求  
Tab.1 Requirements for performance parameters of mechanical gyroscope

性能参数	指标要求
解锁误差	$\delta \leq 0.5^\circ$
漂移量	水平漂移 $\Delta x$ : $+0.16^\circ \sim -0.9^\circ$ 垂直漂移 $\Delta y$ : $-0.6^\circ \sim -1.9^\circ$
接触起始角	$4.2^\circ \sim 6.0^\circ$

## 2 结果与评论

### 2.1 机械陀螺仪加速贮存性能演变规律

机械陀螺仪在70、85、100℃加速试验后,其解锁误差值变化曲线如图1所示。总体而言,试验过程中,机械陀螺仪解锁误差无明显退化趋势,检测结果均满足 $\delta \leq 0.5^\circ$ 的指标要求。其中,样本13的解锁误差检测值达到 $0.6^\circ$ ,在后续试验的检测中又回复到指标要求范围内。

机械陀螺仪在70、85、100℃加速试验后,接触起始角值的变化曲线如图2所示。机械陀螺仪接触起

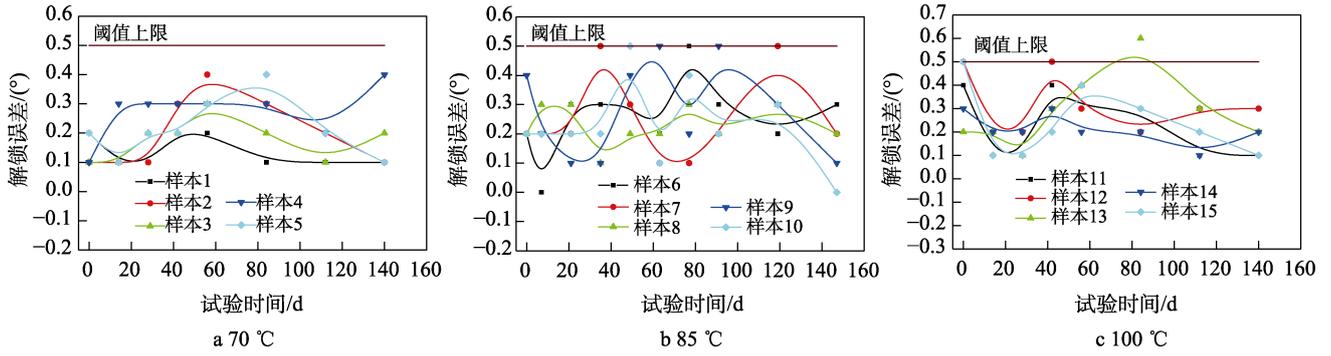


图 1 机械陀螺仪 70、85、100 °C 加速试验解锁误差随时间的变化

Fig.1 Variation of unlocking error of mechanical gyroscope with time in accelerated test at 70, 85 and 100 °C

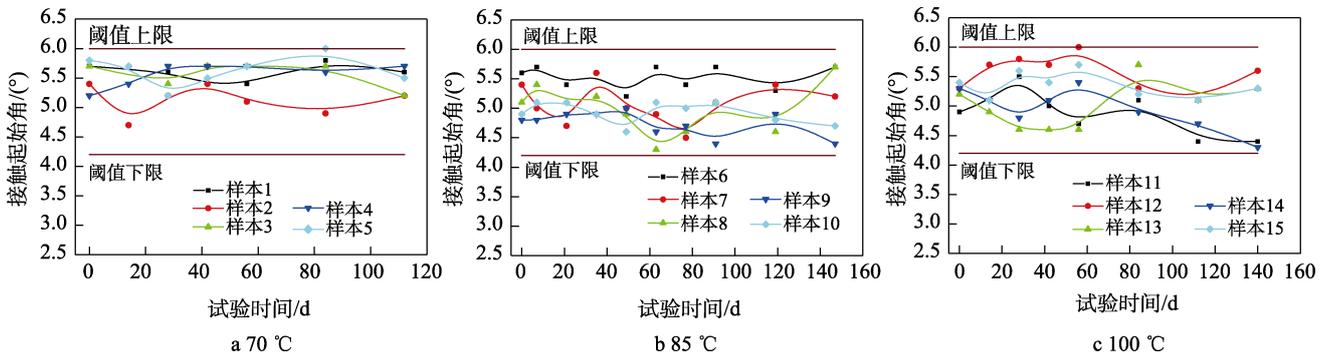


图 2 机械陀螺仪 70、85、100 °C 加速试验接触起始角随时间的变化

Fig.2 Variation of contact initiation angle of mechanical gyroscope with time in accelerated test at 70, 85 and 100 °C

始角值指标要求是 4.2°~6.0°,各温度条件下的接触起始角值呈现出微弱波动趋势,所有样本的检测值均在合格指标要求范围内。其中,样本 12 在试验 56 d 时接触起始角值达到 6.0°,在后续试验的检测中又回复到指标要求范围内。

机械陀螺仪在 70、85、100 °C 加速试验后,垂直漂移值的变化曲线如图 3 所示。垂直漂移的指标要求是 -0.6°~-1.9°,由图 3 可知,在 3 个恒温条件的加速试验下,机械陀螺仪垂直漂移值呈现出非线性上升趋势,直至超出垂直漂移指标要求范围。

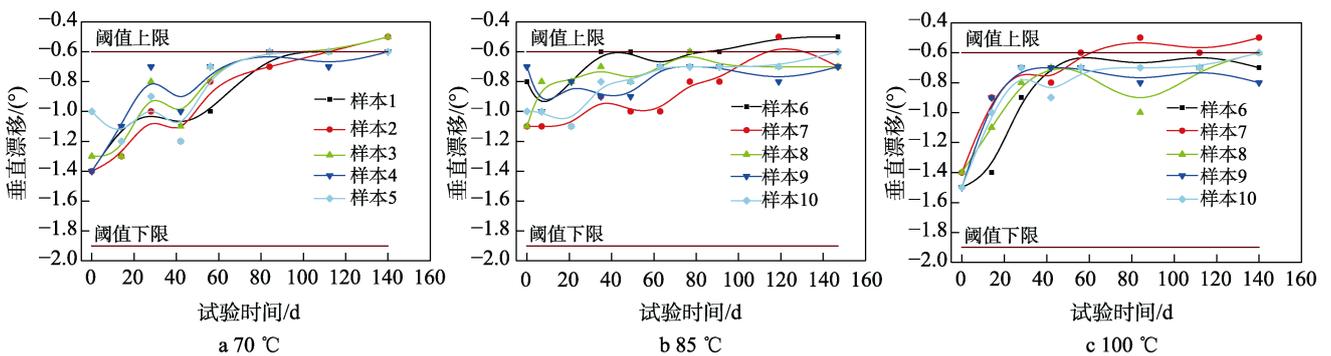


图 3 机械陀螺仪 70、85、100 °C 加速试验垂直漂移随时间的变化

Fig.3 Variation of vertical drift of mechanical gyroscope with time in accelerated test at 70, 85 and 100 °C

机械陀螺仪在 70、85、100 °C 加速试验后,水平漂移值的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,在 70 °C 加速试验过程中,机械陀螺仪水平漂移值在指标要求范围内,基本处于平稳趋势。在 85 °C 加速试验过程中,水平漂移值呈“震荡”变化趋势。样本 9 在试验 63 d 时,水平漂移值达到 0.2°,在后续试验的检测中又回复到指标要求范围内;样本 10 试验 91 d 时水平漂移

值达到 -1.2°,后续检测均已超过指标要求 0.16°~-0.9°;其余 3 个样品水平漂移值均在指标范围内微弱“震荡”变化。试验温度为 100 °C 时,样本 11 在试验 42 d 时超出指标 0.2°,在后续试验的检测中又回复到指标要求范围内;其余 4 个样品的水平漂移值均在指标范围内呈现出微弱上升趋势。

由图 1-4 可知,机械陀螺仪的各项参数在恒

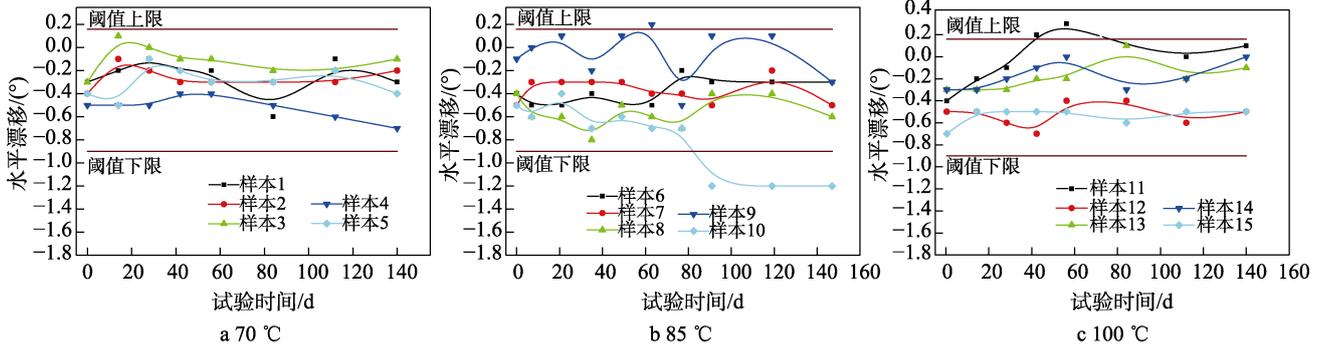


图4 机械陀螺仪 70、85、100 °C 试验水平漂移随时间的变化

Fig.4 Variation of horizontal drift of mechanical gyroscope with time in accelerated test at 70, 85 and 100 °C

定温度应力加速试验下，垂直漂移随试验时间的增加而增加，呈现出非线性退化趋势，直至超出指标要求范围，解锁误差、接触起始角和水平漂移随试验时间的增加表现较平稳。因此，本文选取垂直漂移作为机械陀螺仪的关键特征性能参数，进行性能退化建模。

### 2.2 性能退化轨迹模型建立

针对具有非线性退化趋势的加速退化数据，常见的线性模型会导致评估结果不准确，可采用基于非线性混合效应的退化轨迹模型。该模型中，参数分为反映整体特征的固定效应参数和反映个体分散性的随机效应参数<sup>[22-24]</sup>。

针对垂直漂移这一性能参数，采用性能退化轨迹模型进行建模分析：

$$Y(t) = \lambda\gamma A(t) + \varepsilon \quad (1)$$

式中： $Y(t)$ 为  $t$  时刻下的垂直漂移值； $\lambda$  为折合系数，表示样本间差异性； $\gamma$  为协变量参数，表示环境应力对产品退化速率的影响； $A(t)$  为非线性函数，表示性能退化的总体趋势； $\varepsilon$  为误差项， $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ ，表示退化过程在趋势变化的同时具有随机行为。

由于机械陀螺仪的加速试验是在温度加速应力下完成的，因此采用常用的阿伦尼乌斯模型对协变量参数进行建模，即  $\gamma = \exp\left(-\frac{\eta}{KT}\right)$ ，则式（1）变为：

$$Y(t) = \lambda \exp\left(-\frac{\eta}{KT}\right) A(t) + \varepsilon \quad (2)$$

由  $\varepsilon_1 \sim N(0, \sigma^2)$  可知，在任一时刻  $t$ ， $Y(t) \sim N\left[\lambda \exp\left(-\frac{\eta}{KT}\right) A(t), \sigma^2\right]$ ，设其概率密度函数为  $f_Y(y)$ ，则有：

$$f_Y(y; \lambda, \sigma, \eta, \beta) = \frac{1}{\sigma} \varphi\left[\frac{y - \lambda \exp\left(-\frac{\eta}{KT}\right) A(t)}{\sigma}\right] \quad (3)$$

式中： $\varphi(\cdot)$  为标准正态分布的概率密度函数； $\beta$  为  $A(t)$  中的未知参数。

在同一温度应力下， $E[Y(t)] \propto A(t)$ ，因此通过对单一应力下的所有 5 个样本退化数据的平均值进行回归分析，可以初步判断  $A(t)$  的基本形式。以线性函数、指数函数和幂函数 3 种形式作为备选模型进行分析，结果见表 2 和图 5，发现幂函数的拟合效果较好，因此这里选用  $A(t) = t^\beta$ 。

表2 不同拟合函数下垂直漂移退化数据平均值的相关系数  $R^2$

Tab.2 Correlation coefficient  $R^2$  of average value of vertical drift degradation data under different fitting functions

温度/°C	线性函数	指数函数	幂函数
70	0.716 3	0.620 8	0.870 2
85	0.676 1	0.604 9	0.905 0
100	0.521 5	0.356 0	0.892 1

在确定了  $A(t)$  的基本形式后，就可以利用极大似然估计方法对退化模型中的未知参数进行估计，其极大似然函数为：

$$L = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^{n_k} \prod_{j=1}^{m_i} \left[ f_Y(y_{i,j,k}; \lambda, \sigma, \eta, \beta) \right] = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^{n_k} \prod_{j=1}^{m_i} \left\{ \frac{1}{\sigma} \varphi\left[\frac{y_{i,j,k} - \lambda \exp\left(-\frac{\eta}{KT}\right) A(t_{i,j,k})}{\sigma}\right] \right\} \quad (4)$$

式中： $(t_{i,j,k}, y_{i,j,k})$  为第  $k$  个应力下，第  $i$  个样本在第  $j$  次测量时的时间点及垂直漂移量； $K$  为总应力个数； $n_k$  为第  $k$  个应力下的样本数； $m_i$  为第  $i$  个样本的测量次数。

采用遗传算法对上述极大似然函数求最大值，得到各个参数的估计值见表 3。

由此可知，陀螺在  $t$  时刻垂直漂移的性能退化模型为：

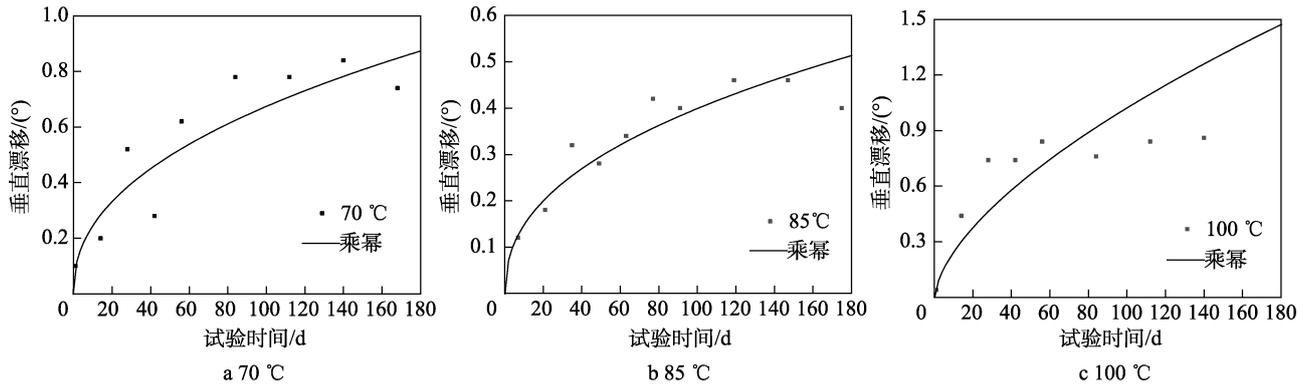


图 5 幂函数拟合下的垂直漂移退化数据  
Fig.5 Vertical drift degradation data under power function fitting

表 3 垂直漂移退化模型参数估计  
Tab.3 Parameter estimation of vertical drift degradation model

参数	$\lambda$	$\sigma$	$\eta$	$\beta$
估计值	6.479 7	0.220 7	0.103 5	0.167 5

$$Y(t) = 6.479 7 \times \exp\left(-\frac{0.103 5}{KT}\right) t^{0.167 5} + \varepsilon,$$

$$\varepsilon \sim N(0, 0.220 7^2) \quad (5)$$

经调研获得机械陀螺仪在库房 1 贮存 7、8、9 a 的试验数据和在库房 2 贮存 10 a 的试验数据, 可选

取该数据来验证模型评估准确度。库房 1 所在地区平均温度为 15.4 °C, 贮存 7 a 后的机械陀螺仪垂直漂移实测值为  $Y_{\text{实测}1}(7 \text{ a}, 15.4 \text{ °C}) = -1.62$ 。通过模型 (5) 预测在 15.4 °C 下贮存 7 a 的垂直漂移平均值为 -1.404 6, 与自然贮存 7 a 试验结果相比, 模型的评估准确度为 86.70%。

同理, 可通过其他实测数据进行模型预测结果计算, 验证模型准确度, 计算结果见表 4。由表 4 可知, 模型评估准确度分别为 86.70%、96.28%、91.53%、85.92%。

表 4 模型预测结果情况  
Tab.4 Prediction results of model

贮存环境	贮存时间/a	垂直漂移实测值/(°)	模型预测值/(°)	模型预测准确度/%
库房 1, 15.4 °C	7	-1.62	-1.404 6	86.70
	8	-1.45	-1.396 1	96.28
	9	-1.28	-1.388 5	91.53
库房 2, 25.7 °C	10	-0.9	-0.773 3	85.92

### 3 结论

开展了机械陀螺仪在 70、85、100 °C 下的恒定温度应力加速试验, 在各检测周期下, 对机械陀螺的解锁误差、水平漂移、垂直漂移、接触起始角进行了检测分析。针对随时间呈非线性退化的垂直漂移建立性能退化轨迹模型, 采用贮存一定年限的机械陀螺的检测数据对该性能退化轨迹模型进行验证, 模型评估准确度在 85% 以上。该模型可用于机械陀螺仪的性能退化行为预测, 在给定失效阈值的情况下, 即可获得机械陀螺的长期贮存寿命。

#### 参考文献:

[1] 张凯, 赵方超, 王艳艳, 等. 基于偏离程度的某机械陀螺环境敏感参数分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 112-115.

ZHANG Kai, ZHAO Fang-chao, WANG Yan-yan, et al. Environment-Sensitivity Parameter Analysis of Mechanical Gyroscope Based on Deviation Degree[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 112-115.

[2] 褚进, 陈瑞军, 张宝. 激光末制导炮弹高原弹道特性研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(9): 182-186.

CHU Jin, CHEN Rui-jun, ZHANG Bao. Research on Plateau Ballistic Features of Laser Terminal Guidance Projectile[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(9): 182-186.

[3] 宋卫东, 张进忠. 惯导陀螺零漂对末制导炮弹弹道性能的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 161-165.

SONG Wei-dong, ZHANG Jin-zhong. Influence of Zero Drift of Inertial Guide Gyro on Trajectory Characteristics of Terminal Guide Shell[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 34(2): 161-165.

[4] SUN Fu-qiang, GUO Hong-xuan, LIU Jing-cheng. Reli-

- ability Modeling of the Bivariate Deteriorating Product with both Monotonic and Non-Monotonic Degradation Paths[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2021, 32(4): 971-983.
- [5] 牛跃听, 穆希辉, 姜志保. 某型火箭弹控制舱环境适应性研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(1): 86-92.  
NIU Yue-ting, MU Xi-hui, JIANG Zhi-bao. Research on Environmental Adaptability of a Guided Rocket[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(1): 86-92.
- [6] 王长安, 牛跃听, 穆希辉, 等. 某型陀螺仪自然贮存寿命评估与加速寿命试验时间预估[J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(5): 683-687.  
WANG Chang-an, NIU Yue-ting, MU Xi-hui, et al. Prediction of Storage Life and Accelerated-Life-Testing Time for Gyroscope[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(5): 683-687.
- [7] 张世艳, 刘俊, 黄波, 等. 惯性器件加速贮存环境性能变化规律及失效机理[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 76-80.  
ZHANG Shi-yan, LIU Jun, HUANG Bo, et al. Performance Change Law and Failure Mechanism of Inertial Devices in Accelerated Storage Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 76-80.
- [8] 王永南, 穆希辉, 牛跃听, 等. 某型加速度计变环境检测数据修正与寿命评估[J]. *中国测试*, 2016, 42(4): 125-131.  
WANG Yong-nan, MU Xi-hui, NIU Yue-ting, et al. Varied Environment Data Amendment and Life Assessment of a Certain Type of Accelerometer[J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(4): 125-131.
- [9] 袁慧铮, 李瑞珍, 李星善, 等. 基于加速退化原理的光纤陀螺性能保持期评估方法研究[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(4): 94-101.  
YUAN Hui-zheng, LI Rui-zhen, LI Xing-shan, et al. Study on Performance Retention Period Evaluation Method of FOG Based on Accelerated Degradation Principle[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(4): 94-101.
- [10] ANANDA R G, NARAYANASWAMY V, ARUNACHALAM U, et al. Finite Element Analysis of the Influence of Ambient Temperature Variations on the Performance of Fiber Optic Gyroscope Sensing Coils[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2017, 51(1): 16-22.
- [11] 陈源, 朱蕾, 朱启举, 等. 惯性器件加速试验环境谱编制与数据处理方法研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(1): 86-90.  
CHEN Yuan, ZHU Lei, ZHU Qi-ju, et al. Accelerated Test Environmental Spectra and Data Processing Method of Inertial Components[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(1): 86-90.
- [12] 张正新, 胡昌华, 周志杰, 等. 一种基于性能退化建模的设备最优监测时机确定方法[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(12): 4564-4566.  
ZHANG Zheng-xin, HU Chang-hua, ZHOU Zhi-jie, et al. Performance Degradation Modeling Based Method for Optimizing Equipment Inspection[J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(12): 4564-4566.
- [13] WANG Yue-ze, YU Hong-yu, WU Xiao-le, et al. Reliability Evaluation of High Precision Fiber Optic Gyroscope Based on Temperature and Humidity Dual Stress Peck Model[C]//Proc SPIE 11340, AOPC 2019: Optical Fiber Sensors and Communication, 2019, 11340: 115-119.
- [14] ÖNEN A S, GÜNHAN Y. Accelerated Aging Test for MEMS Inertial Measurement Units Using Temperature Cycling[C]//2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Monterey: IEEE, 2018.
- [15] LIU Yao, WANG Ya-shun, FAN Zheng-wei, et al. Lifetime Prediction Method for MEMS Gyroscope Based on Accelerated Degradation Test and Acceleration Factor Model[J]. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2020, 22(2): 221-231.
- [16] 穆阳阳, 李擎, 田少欣. 热应力试验预测谐振陀螺寿命的研究[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(9): 25-27.  
MU Yang-yang, LI Qing, TIAN Shao-xin. Research on Thermal Stress Test for Prediction Life of Resonant Gyro[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(9): 25-27.
- [17] 李瑞, 汪立新, 刘刚, 等. 基于加速退化模型的加速度计非线性特征分析及贮存寿命预测[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(1): 125-130.  
LI Rui, WANG Li-xin, LIU Gang, et al. Nonlinear Characteristic Analysis and Storage Life Forecast for Accelerometer Based on Accelerate Degradation Model[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(1): 125-130.
- [18] 滕飞, 王浩伟, 陈瑜, 等. 加速度计加速退化数据统计分析方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2017, 25(2): 275-280.  
TENG Fei, WANG Hao-wei, CHEN Yu, et al. Statistical Analysis Method for Accelerated Degradation Data of Accelerometers[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(2): 275-280.
- [19] 潘广泽, 黄创绵, 李小兵, 等. 石英挠性加速度计贮存寿命评价方法研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2016, 34(1): 11-15.  
PAN Guang-ze, HUANG Chuang-mian, LI Xiao-bing, et al. Research on Storage Life Evaluation Method of Quartz Flexible Accelerometer[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2016, 34(1): 11-15.
- [20] 于丽霞, 秦丽, 王淑英, 等. 温度应力下微陀螺仪的加速寿命评估[J]. *探测与控制学报*, 2015, 37(3): 78-81.  
YU Li-xia, QIN Li, WANG Shu-ying, et al. Accelerated Life Evaluation of Micro-Gyro under Temperature Stress[J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(3): 78-81.
- [21] 黄琛, 穆希辉, 牛跃听, 等. 基于加速寿命试验的陀螺仪贮存寿命评估概述[J]. *飞航导弹*, 2017(10): 62-66.  
HUANG Chen, MU Xi-hui, NIU Yue-ting, et al. Over-

- view of Gyroscope Storage Life Evaluation Based on Accelerated Life Test[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(10): 62-66.
- [22] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU C J. Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis[J]. Technometrics, 1998, 40(2): 89-99.
- [23] 刘震宇. 多性能参数相依情形下的可靠性建模与评估方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
- LIU Zhen-yu. Reliability Modeling and Assessment Method for Dependent Systems with Multiple Performance Characteristics [D]. Beijing: Beihang University, 2014.
- [24] 董金龙, 汪立新, 盛立昊, 等. 一种基于 Wiener 过程加速度计寿命预测自助方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(29): 8729-8733.
- DONG Jin-long, WANG Li-xin, SHENG Li-hao, et al. A Bootstrap Method of Accelerometer Life Prediction Based on Wiener Process[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(29): 8729-8733.

责任编辑: 刘世忠