

环境及其效应

基于偏离程度的某机械陀螺环境敏感参数分析

张凯, 赵方超, 王艳艳, 黄波

(中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 明确某机械陀螺在贮存环境下的环境敏感参数。**方法** 以机械陀螺在热加速老化试验中的各项性能参数检测结果为基础, 依次对各参数检测数据进行能表征参数退化程度的无量纲转化, 分析参数相对于原始值的偏离程度以及环境敏感程度, 偏离度最大的参数即为陀螺的主要环境敏感参数。**结果** 解锁误差、接触起始角、垂直漂移、水平漂移参数的偏离程度分别为 1041.7、1248.3、1472.7、417.7。垂直漂移参数是该机械陀螺在贮存环境下的主要环境敏感参数。**结论** 提出的分析方法可有效用于多参数产品的环境敏感参数分析。

关键词: 机械陀螺; 环境敏感参数; 分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.018

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0112-04

Environment-sensitivity Parameter Analysis of Mechanical Gyroscope Based on Deviation Degree

ZHANG Kai, ZHAO Fang-chao, WANG Yan-yan, HUANG Bo

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to determine the environment-sensitive parameters of mechanical gyroscope in storage environment. Based on the test results of mechanical gyroscope in thermal accelerated aging test, each parameter was converted to a dimensionless parameter that can characterize its degree of degeneration, then the deviation degree of each parameter relative to the original value and the sensitivity of each parameter to the environment were analyzed. The parameter with the largest deviation was considered as the main environment-sensitive parameter of mechanical gyroscope. The deviation degrees of unlocking error, contact start angle, vertical drift and horizontal drift parameters were 1041.7, 1248.3, 1472.7 and 417.7 respectively. The vertical drift parameter was the main environment-sensitive parameter of mechanical gyroscope in storage environment. The method presented in this paper can be effectively used for environment-sensitive parameter analysis of multi-parameter products.

KEY WORDS: mechanical gyroscope; environment-sensitive parameter; analysis

某型机械陀螺是用于激光半主动末制导炮弹上的一个关键部件, 具有“长期贮存, 一次使用”的特点。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, 使炮弹能够顺利转入末端制导飞行阶段^[1-2]。为了掌握机械陀螺在贮存过程中易受贮存环境影响、对环境较敏感的性能参数, 进而支撑其性能退化规律研究和贮存寿命评估^[3-5], 文中提出了一种基于偏离程

收稿日期: 2019-03-24 订日期: 2020-04-03

Received: 2019-03-24; Revised: 2020-04-03

作者简介: 张凯(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境试验与评价。

Biography: ZHANG Kai (1986—), Male, Master, Engineer, Research focus: environmental test and evaluation.

度计算的多参数产品环境敏感参数分析方法,并以机械陀螺在模拟贮存环境下的恒温加速老化试验数据为依据,对陀螺的环境敏感参数进行了分析。

1 试验

1.1 方法

机械陀螺作为一种高可靠、长寿命惯性器件,其在正常贮存环境下的性能退化是非常缓慢的。为了在较短时间内获得陀螺的贮存性能退化数据,进而支撑敏感参数分析,需开展机械陀螺的加速退化试验。一般情况下,影响陀螺性能退化的环境因素通常有温度、湿度、盐雾、辐射、气压和大气污染等。由于该机械陀螺位于制导控制舱内部,随弹贮存,同时控制舱采取了密封防护措施,隔绝了湿度、辐照等环境因素,所以其在贮存过程中所能接触到的、对其性能有影响的环境因素主要是温度^[6-7]。基于此,文中设计了一组机械陀螺的恒定温度应力加速试验,根据陀螺中胶粘剂等高分子材料的耐温特性,将应力水平设定为 100 ℃。

1.2 性能参数

该机械陀螺主要有四个性能参数,分别为解锁误差、接触起始角、垂直漂移和水平漂移,各参数的指标要求见表 1。试验过程中定期对各性能参数进行检测。

表 1 机械陀螺各参数指标要求
Tab.1 Index requirement of mechanical gyroscope

性能参数	解锁误差/(°)	接触 起始角/(°)	垂直 漂移/(°)	水平 漂移/(°)
指标要求	≤0.50	4.20~6.00	-1.90~-0.60	-0.90~0.16

2 结果与讨论

2.1 试验结果

在恒温试验过程中,机械陀螺解锁误差、接触起始角、垂直漂移和水平漂移参数与不同试验时间对应的检测结果见表 2。可以看出,解锁误差和垂直漂移参数随试验时间的延长表现出了一定的波动上升趋势,接触起始角和水平漂移参数随试验时间的延长表现出了一定的波动下降趋势。

2.2 环境敏感参数分析方法

2.2.1 方法原理

目前,多性能参数产品在某一环境下的环境敏感参数分析方法主要有定性分析和定量分析两种。前者由于没有考虑参数的退化特性,且要求分析人员

对产品有较深入的了解,因此分析结果具有一定的主观性^[8-11]。后者存在两个缺点:一是没有考虑参数的阈值,分析得出的参数可能是变化最大的参数,而不是退化程度最大的参数;二是该方法通过对比各参数在经历相同时间后的变化程度大小来确定参数对环境的敏感程度,不适用于各参数呈波动变化且趋势线相互之间存在交叉的情况^[12-14]。

表 2 主要性能参数检测结果

Tab.2 Test results of main performance parameters				
试验 时间/d	解锁 误差/(°)	接触 起始角/(°)	垂直 漂移/(°)	水平 漂移/(°)
0	0.1	5	-1.1	-0.3
15	0.2	4.9	-1.1	-0.3
30	0.2	5	-1.1	-0.3
45	0.2	4.8	-0.9	-0.3
60	0.3	4.9	-1	-0.4
75	0.2	4.9	-1	-0.5
90	0.2	4.6	-0.8	-0.5
120	0.2	4.6	-0.8	-0.6
150	0.2	4.6	-0.7	-0.5
180	0.3	4.4	-0.7	-0.7

针对上述方法的不足,提出了一种基于偏离程度的多参数产品环境敏感参数分析方法。首先通过对参数进行基于指标要求的无量纲转化^[15-16],使得转化后的数据能直接反映出参数的退化程度,同时也使得量纲和数量级各不相同的参数之间具备了可比性。其次,对于每个参数,通过对转化后的、与时间(试验时间或贮存时间)对应的一组无量纲数据进行相对于原始值的偏离程度统计分析,使得分析结果更能真实反映参数间的相对退化程度大小。根据参数相对退化程度大小,实现对环境敏感参数的识别。

2.2.2 分析流程

假设某一产品有 m 个性能参数,在某一环境条件下,每个参数均有 n 个与时间 t_1, t_2, \dots, t_n 对应的检测值 ($t_1 < t_2 < \dots < t_n$)。

首先根据参数指标要求,分别对各个参数的检测数据进行能表征参数退化程度的无量纲转化,使量纲和数量级各不相同的参数之间具备可比性,指标形式不同,计算方法也不同。

1) 单上限型指标参数的无量纲处理按式(1)进行。

$$x_i' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\text{upper}} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: x_i' 为转化后的无量纲数据; x_i 为参数第 i 次的检测数值; x_{\min} 为该参数所有检测值中的最小值; x_{upper} 为参数的合格指标上限值。

2) 单下限型指标参数的无量纲处理按式(2)

进行。

$$x'_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\text{lower}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： x_{\max} 为该参数所有检测值中的最大值； x_{lower} 为参数的合格指标下限值。

3) 区间型指标参数的无量纲处理按式(3)进行。

$$x'_i = \left| \frac{x_i - (x_{\text{lower}} + x_{\text{upper}}) / 2}{x_{\text{upper}} - (x_{\text{lower}} + x_{\text{upper}}) / 2} \right| \times 100\% \quad (3)$$

以处理后的表征参数退化程度的无量纲数据为基础，按照式(4)分别对每个参数进行相对于原始值的偏离程度计算。

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 \quad (4)$$

式中： δ 为偏离程度； n 为参数在试验过程中的检测次数； x_0 为参数在试验前的原始值经过无量纲化处理后的值。

以偏离程度计算结果作为衡量参数对环境敏感程度大小的依据。若某一参数的偏离程度计算数值均大于其他参数的计算值，则表明该参数的综合退化程度最大，其即为产品在该特定环境下的环境敏感参数。

2.3 机械陀螺贮存环境敏感参数分析

2.3.1 性能参数无量纲转化

由表1可知，解锁误差参数的指标为单上限型，其余三个参数的指标为区间型。因此，按照式(3)和式(5)分别对表2中所列机械陀螺各参数进行能表征参数退化程度的无量纲转化，结果见表3。

表3 各参数随试验时间的退化程度计算结果

Tab.3 Degeneration degree of each parameter related to test time

试验时间/d	解锁误差 /%	接触起始角/%	垂直漂移 /%	水平漂移/%
0	0	11.1	23.1	13.2
15	25	22.2	23.1	13.2
30	25	11.1	23.1	13.2
45	25	33.3	53.8	13.2
60	50	22.2	38.5	5.6
75	25	22.2	38.5	24.5
90	25	55.6	69.2	24.5
120	25	55.6	69.2	43.4
150	25	55.6	84.6	24.5
180	50	77.8	84.6	62.3

2.3.2 偏离程度计算

为了找出机械陀螺在试验过程中退化程度最大的参数，按照式(5)分别对表3中各参数偏离其原始值的程度大小进行计算。

经计算，解锁误差、接触起始角、垂直漂移、水平漂移参数的偏离程度分别为 1041.7、1248.3、1472.7、417.7。由于垂直漂移参数的偏离程度计算值远大于其余三个参数，说明机械陀螺在库房贮存过程中，其垂直漂移参数是受温度影响最大的环境敏感参数。

对在万宁库房随弹贮存 10 年的同型号机械陀螺的各性能参数进行检测，结果见表 4。可以看出，陀螺垂直漂移参数和接触起始角相比其他参数均表现出了较大程度的退化，这与通过加速贮存试验分析所得的结果相吻合。

表4 机械陀螺万宁库房贮存性能检测结果

Tab.4 Test results of storage performance of mechanical gyroscope in Wanning Warehouse (°)

	解锁误差	水平漂移	垂直漂移	接触起始角
检测结果	0.3	-0.5	-0.7	4.3
指标要求	≤0.5	-0.9~0.16	-1.9~-0.6	4.2~6.0

3 结语

文中提出了一种针对多性能参数产品的环境敏感参数分析方法，该分析方法通过对参数进行基于参数指标的无量纲转化，使得转化结果同时可以反映出参数的退化程度。通过引入偏离程度的概念，实现了对不同参数间退化程度相对大小的综合定量表征。利用该方法对某激光末制导炮弹用机械陀螺的贮存环境敏感参数进行了分析，结果表明，垂直漂移参数是机械陀螺在贮存环境下的主要环境敏感参数，在对该机械陀螺进行性能退化规律分析和寿命评估时，应重点关注垂直漂移参数。

参考文献：

[1] 刘建平. 激光末制导炮弹故障分析[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(5): 125-127.
LIU Jian-ping. Failure Analyses for Laser Terminal Guided Projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(5): 125-127.

[2] 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, 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 Naming University of Science and Technology, 2010, 34(2): 161-165.

[3] 王长安, 牛跃听, 穆希辉. 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. Prediction of Storage Life and Accelerated-life-testing Time for Gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(5): 683-687.

- [4] 毛端海, 董金龙. 基于多元性能退化量光纤陀螺贮存寿命综合评估[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(2): 446-449.
MAO Duan-hai, DONG Jin-long. Comprehensive Assessment of FOG Storage Life Based on Multivariate Degradation Data[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(2): 446-449.
- [5] 潘广泽, 黄创绵, 李小兵. 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): 11-14.
PAN Guang-ze, HUANG Chuang-mian, LI Xiao-bing. Research on Storage Life Evaluation Method of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(1): 11-14.
- [6] 赵铁山, 齐杏林, 郑波. 某制导弹药电子延时器长贮退化原因探析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 32(1): 41-45.
ZHAO Tie-shan, QI Xing-lin, ZHENG Bo. Long-term-storage Degradation Causes of Guided Munition's Electronic Delayer[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2014, 32(1): 41-45.
- [7] 刘朝阳, 赵晓利, 杨岩峰. 制导弹药火工品单应力水平加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 29-31.
LIU Chao-yang, ZHAO Xiao-li, YANG Yan-feng. Study on Single Stress Level Accelerated Life Test of Guided Ammunition Initiating Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 29-31.
- [8] 晁代宏, 马静, 陈淑英. 基于性能退化的卫星用光纤陀螺可靠性评估[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1763-1767.
CHAO Dai-hong, MA Jing, CHEN Shu-ying. Reliability Assessment of FOGs Used for Satellite from Degradation Data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1763-1767.
- [9] 上官芝, 付桂翠, 万博. 基于加速性能退化的元器件贮存寿命预测[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(5): 32-36.
SHANGGUAN Zhi, FU Gui-cui, WAN Bo. Component Storage Life Prediction Based on Accelerated Performance Degradation[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(5): 32-36.
- [10] 杨立峰, 吕卫民, 肖阳. 基于故障机理和伪失效寿命的电子产品剩余寿命预测[J]. 海军工程学院学报, 2017, 32(2): 246-249.
YANG Li-feng, LYU Wei-min, XIAO Yang. Residual Life Prediction for Electronic Products Based on Fault Mechanism and Pseudo-Failure Date[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(2): 246-249.
- [11] 吴祎, 王友仁, 姜媛媛. 基于特征参数退化的 DC/DC 变换器故障预测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1380-1385.
WU Yi, WANG You-ren, JIANG Yuan-yuan. Fault Prediction Method of DC/DC Converter Based on Characteristic Parameter Degradation[J]. China Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1380-1385.
- [12] 吴英伟, 齐杏林, 王洪岩. 典型电容近炸引信存储性能退化分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 63-67.
WU Ying-wei, QI Xing-lin, WANG Hong-yan. Storage Performance Degradation of Typical Capacitance Proximity Fuse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 63-67.
- [13] 潘广泽, 黄创绵, 李小兵. 石英挠性加速度计贮存寿命评估方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(1): 11-14.
PAN Guang-ze, HUANG Chuang-mian, LI Xiao-bing. Research on Storage Life Evaluation Method of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(1): 11-14.
- [14] 王静, 杨晋勇, 冯静. 基于关键性能参数退化的伺服系统贮存寿命评估[J]. 强度与环境, 2017, 44(4): 50-54.
WANG Jing, YANG Jin-yong, FENG Jing. Storage Life Evaluation of Servo System Based on Critical Parameter Degradation[J]. Structure & Environment Engineering, 2017, 44(4): 50-54.
- [15] 范志锋, 崔平, 文健, 吕静. 基于退化敏感参数的弹药控制系统储存寿命评估[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 109-111.
FAN Zhi-feng, CUI Ping, WEN Jian, LYU Jing. Estimation of Ammunition Control System Storage Life Based on Degradation Sensitive Parameters[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(5): 109-111.
- [16] 江文奇. 无量纲化方法对属性权重影响的敏感性和方案保序性[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 12(34): 2520-2523.
JIANG Wen-qi. Sensibility and alternative COP Panalysis of Dimensionless Methods on Effect of Attribute Weight[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 12(34): 2520-2523.