

半球谐振陀螺工作寿命特性研究

周强^{1,2}, 李维志^{1,2}, 方海斌^{1,2}, 彭芹^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 401332; 2. 重庆市固态惯性技术工程实验室, 重庆 401332)

摘要:半球谐振陀螺仪(HRG)是一种高精度、高可靠、长寿命的新型固体振动陀螺仪,在宇航领域有广泛的应用前景。分析了影响半球谐振陀螺工作寿命的主要因素,采取措施以提高陀螺工作寿命,并持续开展陀螺寿命试验,验证了半球谐振陀螺主要指标的长期性能。结果表明,半球谐振陀螺在长期通电工作过程中,性能稳定,工作寿命可达20年,满足深空探测器等执行长期空间任务的应用需求。

关键词:半球谐振陀螺仪;长寿命特性;寿命验证试验

中图分类号:TN384;TP212 **文献标识码:**A

Working-Life Characteristic of the HRG

ZHOU Qiang^{1,2}, LI Weizhi^{1,2}, FANG Haibin^{1,2}, PENG Qin^{1,2}

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 401332, China;

2. Chongqing Engineering Laboratory of Solid Inertial Technology, Chongqing 401332, China)

Abstract: The hemispherical resonator gyro (HRG) is a new solid state vibrating gyro that offers high precision, high reliability, and a long life. It has broad application prospects in the aerospace field. This study analyzes the main factors affecting the working life of the HRG, proposes measures to improve the working life of gyroscopes, conducts long-term continuous gyroscope life tests, and verifies the long-term performance of the main indicators of the HRG. The results show that the HRG has a stable performance and a working life of as many as 20 years during long-term electrification, thus meeting the application requirements of long-term space missions, such as deep-space detectors.

Key words: hemispherical resonator gyro; long-life characteristic; life verification test

0 引言

半球谐振陀螺(HRG)是利用半球谐振子唇缘驻波进动的哥氏效应原理来感测基座旋转的一种新型振动陀螺。半球谐振陀螺因采用低热膨胀系数、高品质因数(Q)的熔融石英玻璃材料而具有极高的尺寸和振动稳定性,其半球形结构使振动部分具有较小的约束力,静电力控制方式对球壳振动的稳定性影响极小,是目前唯一能达到惯导级性能的振动陀螺,是未来高精度惯性器件主流之一。

半球谐振陀螺具有精度高、可靠性高、寿命长、抗辐射等优点^[1],可广泛应用于航空惯导系统、兵器惯导系统等,在空间领域的应用中更具显著优势。国际上具有代表性的产研机构包括美国 Northrop Grumman 公司、法国 Safran 公司及俄罗斯 SIE

Medicon 研究所等,美国的星用半球陀螺产品处于世界领先水平,精度达 $0.0015(^{\circ})/h$ 。在国内,中国电子科技集团公司第二十六研究所(简称“26所”)建立了由零部件到产品的半球谐振陀螺研制生产线,产品精度达 $0.003(^{\circ})/h$,已成功应用于多种型号卫星,填补了国内长寿命、高精度陀螺产业的空白,在卫星平台中具有广泛的应用前景^[2]。

随着现代国际竞争在航天领域的争夺愈加激烈,深空探测、战略航天器等空间任务对惯性器件的寿命提出了更高的要求。本文针对三件套半球谐振陀螺^[3]的工作寿命特性和长期寿命验证试验中的陀螺工作性能进行了分析研究,结果表明,半球谐振陀螺工作寿命可达20年。

1 半球谐振陀螺简介

半球谐振陀螺的基本工作原理是:基于轴对称

物体中的谐振驻波在旋转时的哥氏效应,处于2阶驻波振动状态的半球谐振子旋转时,谐振驻波将产生进动,进动角与输入角之比约为0.3。

半球谐振陀螺主要包括陀螺敏感表头、信号检测电路及控制电路3部分。以半球陀螺敏感表头内部结构来划分,根据半球谐振子驻波振动信号的读

出和激励电极是否共用,半球谐振陀螺可分为两件套(无激励罩,读出和激励共用基座电极)和三件套(有激励罩,读出电极在读出基座,激励电极在激励罩)。三件套半球陀螺包括熔融石英玻璃加工而成的激励罩、谐振子和读出基座3个部件,其结构如图1所示。

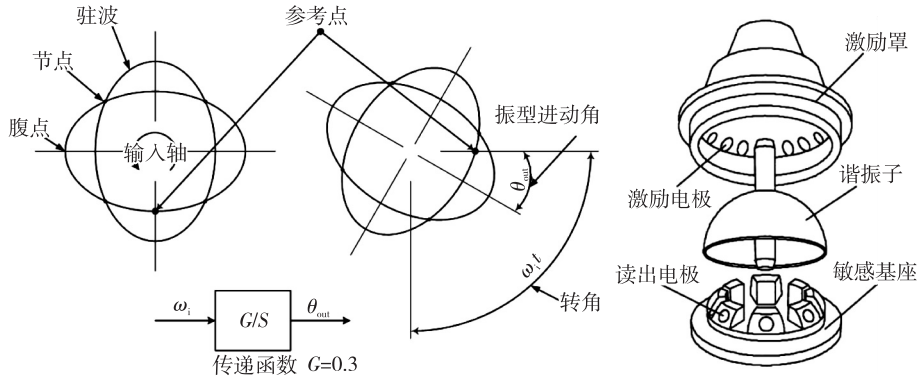


图1 三件套半球陀螺结构及工作原理

半球谐振子上、下均有芯轴,内、外均淀积有金属导电层,激励罩和读出基座表面进行金属镀膜处理,并采用激光分割工艺形成特定的读出或激励电极图形;上、下芯轴分别与激励罩和读出基座焊接在一起,读出基座和激励罩扣合后也焊接在一起,3个石英部件形成一个全固态的整体结构;焊接后的石英部件装入金属密封壳体中,读出和激励等电极通过引线引出,最后抽真空密封。因此,半球谐振陀螺没有传统意义上的运动部件。

半球陀螺敏感表头通过半球谐振子在驻波振动状态下的哥氏效应来敏感角度或角速率输入。如图2所示,陀螺的电路系统中,信号检测电路安装在陀螺敏感表头上,用于检测、提取微振动信号。控

制电路通过对信号的解算、处理,获得幅度、正交、速率各环路控制信号,输出相应的角度或角速率信息,并将激励信号反馈到陀螺敏感表头,实现对谐振子驻波振动状态的闭环控制。

2 半球谐振陀螺工作寿命特性分析

惯性器件的工作寿命(operating life)是指惯性传感器施加规定的连续和断续额定值而不改变其性能的最长时间。惯性器件的主要性能指标包括零偏、随机漂移和输出噪声,工作寿命指标属于可靠性指标范畴。工程实际中,可用寿命可靠性(规定寿命期的可靠度)、寿命期内的零偏、随机漂移和输出噪声来衡量惯性器件的工作寿命。

由图2可见,半球陀螺中,各主要组成部分(陀螺敏感表头、陀螺电路系统)为串联闭环结构,因此,半球陀螺的工作寿命 T 由敏感表头工作寿命 T_g 、信号检测电路工作寿命 T_s 、控制电路工作寿命 T_c 的最小值决定,即:

$$T = \min \{ T_g, T_s, T_c \} \quad (1)$$

T_g 主要与材料、结构、内部真空度有关, T_s 、 T_c 主要与电子元件本身和线路设计有关。

2.1 敏感表头工作寿命特性分析

半球陀螺敏感表头的材料特性、陀螺三件套的结构特点、陀螺内部真空度的维持是决定半球陀螺敏感表头工作寿命的重要因素。

陀螺敏感表头,尤其是半球谐振子直接决定陀

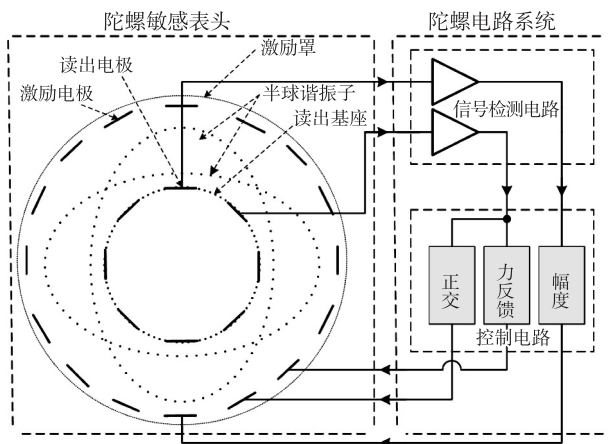


图2 半球陀螺敏感表头与电路系统组成框图

螺的性能。选择高强度、高稳定性的材料,对提高半球陀螺的性能稳定性、长期可靠性具有显著作用。石英三件套半球谐振陀螺采用特种熔融石英玻璃材料加工而成,该材料物理特性稳定,具有低阻尼、机械参数长期稳定性好、低热敏性、强度高等特点,加工而成的石英半球谐振子 Q 值可达 10^7 量级^[4],维持驻波振动的能量耗散极低,提高了陀螺表头的性能稳定性。为实现静电控制,组成陀螺敏感表头的石英三件套表面均进行了金属化镀膜,通过在金属膜层进行电极刻蚀,在半球谐振子、激励罩以及读出基座之间形成多个球面电极,用于信号读出和谐振子的静电激励。通过对多种金属镀膜技术的研究分析,确定采用 Cr-Au 复合材料磁控溅射镀膜法,所得金属镀膜层均匀性、附着力有极大提高,能够保证金属化膜层良好的稳定性和电导通性,有效提升了陀螺敏感表头性能^[5]。石英材料和金属膜层材料的长期稳定特性是半球陀螺长寿命的材料基础。

半球陀螺的具体结构组成方式也会影响陀螺寿命和性能。经过长期探索,26 所的三件套半球谐振陀螺确定了匹配 $\varnothing 25$ mm 谐振子的全套结构

参数,三件套球面圆度、轮廓度加工精度达到微米级,谐振子固有频率稳定在 4 800 Hz 左右,频差 ≤ 0.001 Hz。如图 1 所示,在激励罩和读出基座中,半球谐振子采用了两端钢焊的固定方式,在陀螺工作过程中,仅有谐振子薄壁球壳产生驻波振动,没有光源或高速转动部件。因此,理论上陀螺内部没有任何可衰减、损耗及磨损的因素;陀螺内部没有任何具有衰减、老化特征的零部件,谐振子的振动幅度为微米级,对结构不产生任何破坏和应力集中。通过对半球谐振子结构参数采用有限元分析法建模,进行谐振子结构参数的振动力学分析^[6-7],结果如图 3 所示。由图可见,半球谐振子驻波振动的最大应变为 $3.37 \mu\text{m}$,最大工作应力为 6.3×10^6 Pa。谐振子材料石英玻璃的抗压强度高于 1.1×10^9 Pa,抗拉强度超过 4.8×10^7 Pa,均远高于谐振子的最大工作应力。因此,从结构上来看,半球谐振子工作原理上不存在衰减和损耗,不断优化的结构参数和超高的加工精度使得谐振子的最大工作应力远小于其理论最大抗压抗拉强度,这是半球谐振陀螺敏感表头长寿命的理论基础。

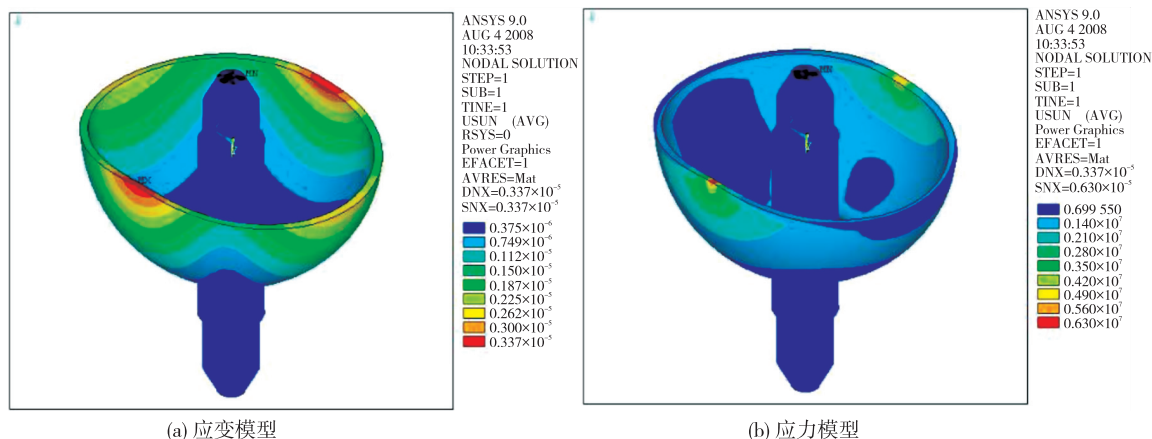


图3 谐振子应变及应力模型图(有限元法)

半球敏感表头采用真空密封封装。陀螺内部各种材料放气和真空封装微泄露是造成陀螺内部真空度下降的主要原因。真空度下降使得半球谐振子的振动阻尼增大, Q 值下降,引起谐振子振动状态改变,从而导致半球陀螺性能下降直至失效。在陀螺内部放置金属吸气剂能有效吸收陀螺真空封装微泄露的气体和材料表面释放的少量气体,维持陀螺内部极高的真空度。陀螺内部真空度的维持与金属吸气剂的吸气能力、材料放气率、真空微

漏率等参数有关,当吸气剂吸气总量大于材料放气和真空漏气的气体总量时,可认为真空度 Z 不会下降,即:

$$Z = Q_{\text{放}} - Q_{\text{吸}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{放}} = F_{\text{放}} \times S \times T_{\text{放}} + L_{\text{漏}} \times T_{\text{漏}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{吸}} = \sum Q_{\text{吸}i} = \sum (F_{\text{吸}i} \times T_{\text{吸}i}) \quad (4)$$

$(i = 1, 2, 3, \dots)$

式中: $Q_{\text{放}}$ 为放气和漏气的气体总量; $Q_{\text{吸}}$ 为吸气剂吸收气体总量; $F_{\text{放}}$ 为材料放气速率; S 为放气面

积; $T_{\text{放}}$ 为放气持续时间; $L_{\text{漏}}$ 为真空漏气速率; $T_{\text{漏}}$ 为漏气持续时间; $Q_{\text{吸}i}$ 为 i 阶段可吸气量; $F_{\text{吸}i}$ 为 i 阶段吸气速率; $T_{\text{吸}i}$ 为 i 阶段吸气时间。 $Z < 0$ 表示真空度维持, $Z > 0$ 表示真空度下降。

半球谐振陀螺仪按地面工作 5 年、空间工作 15 年, 合计工作寿命 20 年计算。地面工作时, $F_{\text{放}}$ 和 $L_{\text{漏}}$ 同时存在作用, 空间工作时, 由于环境为真空, $L_{\text{漏}} = 0$, 仅考虑 $F_{\text{放}}$ 作用。

某型半球陀螺的石英三件套镀金表面积 $S_1 = 189.432 \text{ cm}^2$, 不锈钢金属封装壳内表面积 $S_2 = 190 \text{ cm}^2$; 经 100°C 、48 h 真空处理后, 石英镀金表面放气率 $F_{\text{放}1} \leq 1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 不锈钢金属表面放气率 $F_{\text{放}2} \leq 1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$; 陀螺内部真空漏率 $L_{\text{漏}} \leq 2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$ 。代入式(2)计算可得, 工作 20 年, 陀螺内部材料放气和真空漏气的气体总量为

$$Q_{\text{放}} = F_{\text{放}} \times S \times T_{\text{放}} + L_{\text{漏}} \times T_{\text{漏}} = F_{\text{放}1} \times S_1 + F_{\text{放}2} \times S_2 + L_{\text{漏}} \times T_{\text{漏}} \leq 1.33 \times 10^{-10} \times (189.432 + 190) \times (20 \times 365 \times 24 \times 3600) + 2 \times 10^{-8} \times (5 \times 365 \times 24 \times 3600) = 31.79 + 3.16 = 34.95 (\text{Pa} \cdot \text{L}) \quad (5)$$

金属吸气剂由金属材料通过粉末冶金烧结而成, 在激活后可以通过表面吸附作用和内部扩散作用有效吸收真空封装内部的残余气体, 其吸气能力 $Q_{\text{吸}}$ 随吸收气体体积和持续时间递减。由式(4)可得, 金属吸气剂的吸气能力为

$$Q_{\text{吸}i} = F_{\text{吸}i} \times T_{\text{吸}i} = m \cdot P \cdot V_i \cdot T_{\text{吸}i} \quad (6)$$

式中: P 为压强; m 为吸气剂质量; V_i 为每秒吸气速率, 随作用时间递减。当 $m = 1 \text{ g}$, $P = 2.7 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 金属吸气剂的吸气能力为(以下 V_i 数据由吸气剂厂家提供)

$$1) 0 \leq T_{\text{吸}1} \leq 1 \text{ h}, V_1 \gg 0.7 \text{ L/s}, Q_{\text{吸}1} \geq 1 \text{ Pa} \cdot \text{L}。$$

$$2) 1 \text{ h} < T_{\text{吸}2} \leq 100 \text{ h}, 0.5 \text{ L/s} \leq V_2 < 0.7 \text{ L/s}, Q_{\text{吸}2} \geq 0.5 \times 2.7 \times 10^{-4} \times 100 \times 3600 \geq 48.6 (\text{Pa} \cdot \text{L})。$$

$$3) 100 \text{ h} < T_{\text{吸}3} \leq 300 \text{ h}, 0.12 \text{ L/s} \leq V_3 < 0.5 \text{ L/s}, Q_{\text{吸}3} \geq 0.12 \times 2.7 \times 10^{-4} \times 200 \times 3600 \geq 23.328 (\text{Pa} \cdot \text{L})。$$

$$4) 300 \text{ h} < T_{\text{吸}4}, V_4 < V_0 \times 5\%, Q_{\text{吸}4} \text{ 忽略。}$$

半球陀螺敏感表头内部实际使用 1 支金属吸气剂($m = 0.5 \text{ g}$), 总吸气能力可估算为

$$Q_{\text{吸}} > 0.5 + 24.3 + 12.664 = 37.464 (\text{Pa} \cdot \text{L}) \quad (7)$$

由式(2)、(5)、(7)可得:

$$Z = Q_{\text{放}} - Q_{\text{吸}} = 34.95 - 37.464 = -2.514 (\text{Pa} \cdot \text{L}) < 0 \quad (8)$$

即在工作 20 年(地面 5 年, 空间 15 年)的情况下, 半球谐振陀螺敏感表头内金属吸气剂的吸气能力($37.464 \text{ Pa} \cdot \text{L}$)大于总放气量($34.95 \text{ Pa} \cdot \text{L}$), 可以保证表头内部真空度不会下降。

在半球陀螺敏感表头中, 采用石英和金属膜层材料提高了敏感表头的长期稳定特性, 采用三件套结构参数设计在结构上消除了衰减及损耗, 采用超精密加工获得了高抗压抗拉强度, 采用金属吸气剂持续维持表头内部真空度, 以上措施有效提升了半球谐振陀螺敏感表头的性能稳定性, 并保证了其 20 年工作寿命。

2.2 电路系统工作寿命特性分析

在半球谐振陀螺电路系统中, 信号检测电路和控制电路使用的电子电路元件主要包括电阻、电容、二极管、三极管、集成电路、电连接器等。电子电路元件自身的可靠性和电路系统的线路设计是影响电路系统工作寿命的主要因素。

针对半球谐振陀螺的空间应用环境和 20 年工作寿命的高要求, 陀螺电路系统中的各功能电路单元全部按照空间应用标准选用高可靠、高精密度电子元件, 并制定质保方案进行二次筛选, 所有电子电路元件都满足 I 级降额设计要求、环境适应性要求和抗辐照要求, 具有极高的可靠性。

在线路设计上, 对电路系统进行热功耗设计、抗电磁兼容特性(EMC)设计, 有效避免热功耗和 EMC 干扰给电路带来的影响; 同时, 在电路系统的信号处理端优化电路结构, 采用串并联阻容网络用于限流、冗余和故障隔离; 针对空间应用环境的充放电效应, 合理排布地线网络, 形成电荷泄放通道, 消除空间电荷积累风险。

以上措施有效提升了半球谐振陀螺电路系统的可靠性, 使陀螺电路系统满足 20 年工作寿命的使用需求。

2.3 半球谐振陀螺工作寿命可靠性预测

对半球谐振陀螺各部分的工作寿命进行可靠性预测, 可以更清楚地表征陀螺的工作寿命特性, 常用计算关系式如下:

$$\lambda_p = \lambda_b \times \pi_e \times \pi_Q \times \pi_C \quad (9)$$

$$\lambda = \sum \lambda_{pi} \quad (10)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

$$k = 1 - \lambda \cdot T \quad (12)$$

$$K = \prod k_i \quad (13)$$

式中: λ_p 为工作失效率; λ_b 为基础失效率; π_E 为环境系数; π_Q 为质量系数; π_C 为温度系数; λ 为总失

效率; $MTBF$ 为平均无故障工作时间; k 为可靠度; T 为工作时间; K 为总可靠度。

在执行空间任务(宇宙飞行)(π_E), 宇航级(π_Q), $C=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (π_C), 连续工作 20 年(T)的情况下, 参照国军标等文件体系对各类元器件基础失效率(λ_b)的规定, 可计算出半球谐振陀螺各部分 20 年工作寿命可靠度, 可靠性预测分析结果如表 1 所示。

表 1 半球陀螺可靠性预测结果

部件名称	节点类型	任务时间/h	$\lambda/(10^{-6} \cdot \text{h}^{-1})$	$MTBF/\text{h}$	20 年寿命可靠度
陀螺敏感表头	单一	175 200	0.014 4	69 261 670	0.997 48
信号检测电路	单一	175 200	0.029 7	33 636 058	0.994 80
陀螺控制电路	单一	175 200	0.131 8	7 474 456	0.976 91

由式(13)可得, 半球谐振陀螺 20 年工作寿命可靠度 $K=0.997\ 48 \times 0.994\ 80 \times 0.976\ 91=0.969\ 18$ 。由此可见, 长时间空间任务情况下的半球谐振陀螺具有极高的可靠性, 20 年工作寿命可靠度 >0.965 。

3 半球谐振陀螺长期性能分析

研究表明, 26 所的半球谐振陀螺已具备高可靠、长寿命的显著优点, 为了提供更可信的陀螺实际工作寿命数据和长期性能数据, 进一步明确陀螺的寿命特征、失效规律, 验证陀螺长寿命特性, 建立陀螺寿命模型, 26 所从 2006 年起陆续投入陀螺试验子样开展寿命验证试验(见图 4), 先后建立 2 个试验平台, 持续对陀螺工作寿命进行 1:1 的考核, 并对试验数据进行记录、分析。

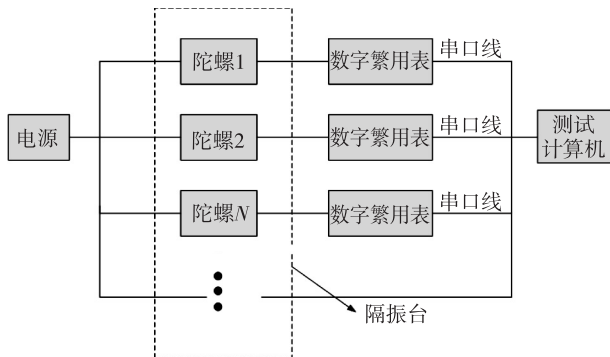


图 4 半球谐振陀螺寿命试验框图

寿命试验平台 1 建于 2006 年 1 月, 共投入 8 只半球谐振陀螺(1#-8#)进行寿命考核验证试验, 试验结果以功能考核为主^[8]。如表 2 所示, 截止 2021 年 11 月, 该试验平台累计运行超 101×10^4 h, 最长工

作时间大于 15 年($>131\ 400$ h), 陀螺无失效。

表 2 半球陀螺寿命试验运行时间统计表

陀螺序号	启动日期	运行时间/h
1#	2006-01	136 713
2#	2007-06	131 673
3#	2007-06	131 673
4#	2007-06	131 673
5#	2007-12	127 353
6#	2007-12	127 353
7#	2009-04	115 833
8#	2009-04	115 833
累计	—	1 018 104

2023 年 4 月, 对 8 只寿命试验陀螺进行了性能复测, 包括静态测试及 Q 值测试, 8 只陀螺均工作正常, 输出噪声变化量最大值 $\leq 3\ (^{\circ})/\text{h}$, 经 16~18 年的地面贮存和寿命试验后, 陀螺 Q 值为 $(2 \sim 6) \times 10^6$ 。2023 年 4 月的测试结果与 2012 年 3 月的测试结果相比, Q 值的绝对变化量为 $(0.04 \sim 0.62) \times 10^6$ 。试验数据如图 5 和表 3 所示。

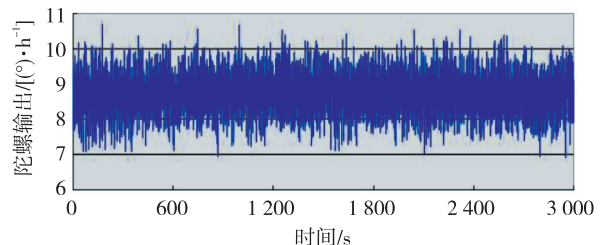


图 5 寿命试验陀螺输出噪声图

表 3 寿命试验陀螺 Q 值变化统计表

陀螺序号	Q/10 ⁶			变化率/%
	2012 年 3 月测试	2023 年 4 月测试	变化量	
1 #	4.05	3.43	−0.62	−15.3
2 #	5.65	5.77	0.12	2.12
3 #	2.54	2.04	−0.50	−19.7
4 #	3.66	3.34	−0.32	−8.74
5 #	3.24	3.41	0.17	5.25
6 #	2.37	2.41	0.04	1.69
7 #	2.93	2.34	−0.59	−20.1
8 #	2.66	2.24	−0.42	−15.8

由于寿命试验平台 1 的陀螺研制年份较早,其性能、结构、工艺、装配可靠性、电装可靠性与现在的陀螺有一定差距,其寿命试验结果以功能考核为主,附带部分性能考核。2019 年,按在轨陀螺技术状态搭建了寿命试验平台 2,投入 2 只半球谐振陀螺(9 #、10 #)开展新的寿命考核验证试验。将试验陀螺子样放置于隔振平台,使用专用数据采集软件每日定时记录、储存陀螺零偏输出数据。到 2024 年 5 月,该平台已稳定运行 5 年,后续仍将持续运行。试验陀螺的长期零偏输出、长期输出噪声、随机漂移(1 h)测试、Q 值测试数据如图 6-7、表 4-5 所示。

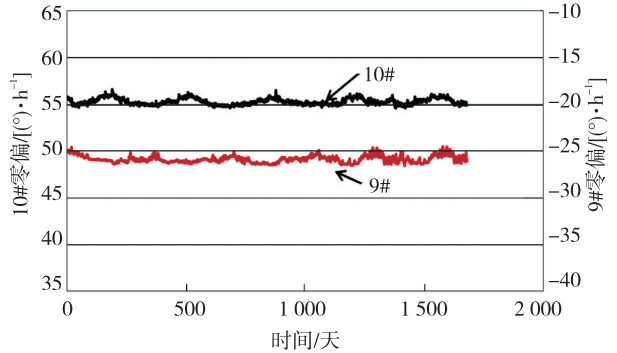


图 6 寿命试验陀螺长期零偏输出(>1 600 天)

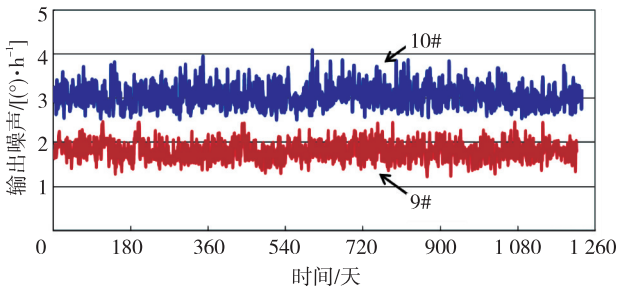


图 7 寿命试验陀螺长期输出噪声(>1 100 天)

表 4 寿命试验陀螺随机漂移(1 h)测试结果

测试日期	随机漂移/[(°) · h ⁻¹]	
	陀螺 9 #	陀螺 10 #
2019-07-12	0.040	0.030
2019-12-15	0.030	0.020
2020-06-15	0.030	0.031
2020-12-15	0.043	0.019
2021-06-15	0.034	0.023
2021-12-15	0.026	0.026
2022-06-15	0.037	0.025
2022-12-15	0.030	0.024
2023-03-05	0.031	0.026
2024-03-14	0.030	0.025

注:Agilent 34401A 采样测试结果比实际随机漂移值大

表 5 寿命试验陀螺输出、噪声、Q 值测试结果

测试日期	陀螺输出/[(°) · h ⁻¹]		噪声最大值/[(°) · h ⁻¹]		Q 值/10 ⁶	
	9 #	10 #	9 #	10 #	9 #	10 #
2019-07-13	−24.747	55.770	3.317	1.805	6.34	4.88
2020-05-15	−25.274	55.354	3.188	1.833	6.08	4.66
2021-06-19	−26.761	54.807	3.244	1.701	6.06	4.64
2023-07-12	−26.163	54.381	3.437	1.775	5.39	4.18
2024-03-14	−26.542	54.636	3.332	1.811	5.38	4.15

由图 6-7、表 4-5 可见,试验平台 2 的 2 只陀螺自 2019 年投入寿命试验以来,其零偏输出、随机漂移、输出噪声性能指标保持稳定。由图 6 可见,2 只陀螺的零偏输出呈现出一定的周期性变化,从时间轴分析,可判定为年内季节性室内均温变化对陀螺零偏的影响,陀螺零偏整体保持稳定,年均最大变化量 $\leq 1 (^{\circ})/\text{h}$ 。由图 7 可见,2 只陀螺的输出噪声稳定值约为 $1 (^{\circ})/\text{h}$,最大变化量 $\leq 2 (^{\circ})/\text{h}$ 。由表 4 可见,陀螺 5 年来的随机漂移(1 h)测试结果稳定,保持在 $0.03 \pm 0.01 (^{\circ})/\text{h}$;陀螺的 Q 值略有下降,但对陀螺性能无显著影响。

虽然投入寿命试验平台 1、2 的验证用半球陀螺并不能完全覆盖表征半球谐振陀螺性能的各项指标,但试验累积的陀螺长期性能数据分析结果已经充分证明,半球谐振陀螺长期工作性能指标稳定,是一种长寿命、高可靠的惯导级惯性仪表。

4 结束语

本文对影响三件套半球谐振陀螺工作寿命的主要因素(材料组成、结构参数、真空度维持方法、电路系统设计等)进行了研究分析,将陀螺的工作寿命提高至 20 年以上,寿命可靠度 >0.965 ;并通过开展陀螺长期寿命验证试验,充分验证了陀螺性能指标的长期稳定性。研究表明,三件套半球谐振陀螺可满足空间任务对惯性器件工作寿命的要求,能有效提高我国空间探索的持续能力。继续深入研究多种结构和不同工作模式下半球谐振陀螺的工作寿命特性,进一步提高陀螺的工作寿命和寿命期内的性能稳定性,必将为我国的深空探索、星座维持等提供更有力的技术支撑。

参考文献:

[1] LYNCH D D. HRG development at delco, litton, and

- notthorp grumman[C]//[S. l.]:Proceedings of Anniversary Workshop on Solid-State Gyroscopy, 2008: 19-21.
- [2] 彭慧,方针,谭文跃,等.半球谐振陀螺发展的技术特征[J].导航定位与授时,2019,6(4):108-114.
- [3] SCOSTT W B. Delco makes low-cost gyro prototype[J]. Aviation Week,1982,117:64-72.
- [4] 彭凯,方针,徐思宇,等.熔融石英半球谐振子精密磨削工艺研究[J].压电与声光,2021,43(2):294-298.
- PENG Kai, FANG Zhen, XU Siyu, et al. Research on precision grinding process of fused silica hemispherical resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2021,43(2):294-298.
- [5] 张挺,徐思宇,冒继明,等.半球陀螺谐振子的金属化镀膜工艺技术研究[J].压电与声光,2006,28(5):538-600.
- ZHANG Ting, XU Siyu, MAO Jiming, et al. Study on metallic coating technique of the hemispherical resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2006,28(5):538-600.
- [6] 谭品恒,方针,方仲祺,等.基于工程应用的半球谐振陀螺结构设计研究[J].压电与声光,2021,43(2):265-269.
- TAN Pinheng, FANG Zhen, FANG Zhongqi, et al. Research on structure design of hemispherical resonator gyro based on engineering applications[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2021,43(2):265-269.
- [7] 余波,方针,蒋春桥.基于有限元法的半球谐振陀螺谐振子分析[J].压电与声光,2015,37(4):561-564.
- YU Bo, FANG Zhen, JIANG Chunqiao. Finite element analysis based on optimized HRG resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(4):561-564.
- [8] 李建朋,武志忠,何刚,等.长寿命半球谐振陀螺惯性姿态敏感器设计与在轨应用[C]//哈尔滨:惯性技术发展动态发展方向研讨会文集,2023:315-326.