

空间望远镜滤光片转轮机构寿命试验研究

郭伟^{1,2}, 许明明^{1,2}, 窦江培^{1,2}, 郭国强³, 任培强³, 何金凝^{1,2}, 孔令一^{1,2}, 张子豪^{1,2,4}

(1. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室, 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042;
3. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对国内外空间运动机构热真空加速寿命试验主要集中在组件上, 未能全面反映整机的长寿命性能。本文对空间环境下的巡天光学望远镜的长寿命滤光片转轮机构, 设计了一种关于空间环境的热真空寿命试验方案, 充分考虑了滤光片转轮在空间运行时面临的工况和严酷空间环境, 开展了滤光片转轮机构的真空加速寿命试验, 以验证固体润滑轴承组件、传动副固体润滑设计和整机性能是否满足在轨寿命要求。针对该滤光片在轨转动 8×10^4 次的寿命要求, 本文设计了详细的试验方案, 并搭建了热真空环境试验系统。试验结果显示: 寿命试验运行正常, 累积转动 1.6×10^5 次。试验后对轴承进行了摩擦力矩和启动力矩复测, 并对轴承组件进行了解剖分析。复测结果显示: 轴承摩擦力矩和启动力矩与试验前一致, 轴承润滑状态良好。试验后对蜗轮蜗杆副固体润滑进行高倍显微镜分析, 结果显示, 蜗轮蜗杆副润滑膜层均完好覆盖基底, 润滑状态良好。试验后开展滤光片转轮整机性能测试, 测试结果满足性能指标。加速热真空寿命试验结果验证了滤光片转轮寿命满足在轨长寿命任务要求, 同时为其他空间运动机构的长寿命设计提供了依据, 并为其他机构的寿命试验提供了参考思路。

关键词: 空间环境; 长寿命; 滤光片转轮; 固体润滑; 性能测试; 寿命试验

中图分类号: V 416

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2025.01.011

引用格式: 郭伟, 许明明, 窦江培, 等. 空间望远镜滤光片转轮机构寿命试验研究[J]. 上海航天(中英文), 2025, 42(1): 110-118.

Experimental Research on the Lifetime of the Filter Wheel Mechanism of a Space Telescope

GUO Wei^{1,2}, XU Mingming^{1,2}, DOU Jiangpei^{1,2}, GUO Guoqiang³, REN Peiqiang³,
HE Jinning^{1,2}, KONG Lingyi^{1,2}, ZHANG Zihao^{1,2,4}

(1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology of Chinese Academy of Sciences, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology of the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;
3. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The thermal vacuum accelerated life tests of space motion mechanisms at home and abroad are mainly focused on the components, which cannot fully reflect the long life performance of the whole machine. In this paper, a thermal vacuum life test scheme is designed for the long-life filter wheel mechanism of an optical survey telescope in space environment. The working conditions and complex environmental factors of the filter wheel mechanism during space operations are fully considered, and the vacuum accelerated life test of the filter wheel mechanism is carried out to verify whether the solid lubrication bearing assembly, the transmission pair solid lubrication design, and the performance

收稿日期: 2024-08-21; 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12103073, U2031210); 中国空间站工程资助项目(201906)

作者简介: 郭伟(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为空间运动机构设计和航天器力学仿真。

通信作者: 许明明(1981—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为空间高精度光学仪器结构总体设计。

of the whole machine can meet the requirements of on-orbit life. According to the life requirement of the filter wheel rotating 8×10^4 times in orbit, a specific test scheme is designed, and a thermal vacuum space environment test platform is built. The test results show that the life test runs normally and the cumulative rotation times is 1.6×10^5 . After the test, the bearing friction torque and starting torque are re-measured, and then the bearing assembly is dissected. The results show that the bearing friction torque and starting torque are the same as those before the test, and the bearing lubrication is good. After the test, the solid lubrication of the worm gear pair is analyzed by high power microscope. The results show that the worm gear pair base is covered by the lubrication film and the lubrication state is in good condition. After the test, the performance test of the filter wheel mechanism is carried out, and the test results meet the performance indices. The results of the accelerated thermal vacuum life test can verify that the life of the filter wheel can meet the requirements of the long-life mission in orbit, which can also provide a basis for the long-life design of other space motion mechanisms and provide a reference for the life tests of other mechanisms.

Key words: space environment; long-life; filter wheel; solid lubrication; performance test; life experiment

0 引言

系外行星成像星冕仪作为空间站光学舱后端成像探测模块,将专门对特定的目标-太阳系外行星进行高对比度成像探测和多波段测光研究,不受地面望远镜在成像对比度探测能力和观测波段的制约。星冕仪模块通过成像探测近邻恒星周围的系外行星,研究行星物理特性,为开展比较行星科学及搜寻类地行星奠定重要基础^[1]。

滤光片转轮机构作为空间星冕仪模块工作波长选择系统,是其主要空间运动机构。为保证多谱段的成像质量,空间星冕仪需要设计一种高精度、高稳定性的多谱段滤光片切换机构。通过电机驱动负载的旋转运动可实现不同谱段的滤光片的切换,从而实现工作波长选择。通过不同谱段滤光片的光将由科学相机进行成像。

星冕仪模块需在轨运行超过 10 年,在此期间,滤光片转轮机构需转动切换超过 8 万次。机构需要在轨全生命周期内频繁切换工作波长。而运动机构通常是设备中的单点失效环节,因此设计一种长寿命、高可靠性的滤光片切换机构是保障星冕仪在轨进行高对比度成像探测系外行星的前提。

对航天器而言,机构故障是导致整个航天器故障事故的重要原因。而绝大多数空间机构的故障是空间环境导致的。尤其是运动机构,空间环境对其能否正常运动至关重要。所以必须在飞行前,为了充分进行在轨测试考核,通常在地面开展热真空环境下的寿命试验。通过解决试验过程中暴露的薄弱环节,来提高空间运动机构的可靠性^[2-4]。

目前,国内外主要通过研究轴承等关键活动组件寿命来反映机构的长寿命可靠性。较少涉及运

动机构整机的寿命试验设计和整机性能分析等。关键组件的寿命试验不能全面覆盖整机全寿命周期的性能,无法全面为整机空间正常开机工作提供试验支撑^[5]。

本文对空间滤光片转轮机构整机进行寿命试验设计,试验后对轴承、蜗轮蜗杆副等组件状态进行检测,同时开展了整机性能测试,为空间正常工作提供试验依据。

1 加速寿命试验原理

寿命试验是为了评价产品在规定工作模式和工作环境下的寿命特征所进行的试验。运动机构一般都要求能够在轨数年甚至长达十几年运行,如果采用在轨正常工况进行等寿命的地面试验,高昂的试验费用是工程不能接受的,漫长的试验周期也是工程研制所不能允许的^[6]。因此,热真空加速寿命试验不仅能够充分验证全寿命周期内机构性能,同时对于降低空间机构试验费用、缩短试验时间,保证运动机构长寿命高可靠性具有重要意义^[6-9]。

加速寿命试验是在保持失效机理不变的条件下,用加大应力的方法使产品在更短时间失效。根据加速寿命试验数据,运用加速寿命曲线或加速方程来构架模型,根据模型来预测在正常工作条件或储存条件下的可靠性,该方法可以实现产品在正常工作模式下寿命的验证。根据加载方式的不同,可分为恒定应力试验、步进应力试验和序进应力加速寿命试验 3 种。这 3 种方法都是将产品做到失效为止^[1,4,10-30]。

由于空间机构的研制成本非常高,要一直做到机构失效将产生较大研制成本。一般都是以机构

满足在轨任务要求即可。当前更多的寿命试验要求以工作时间为结束依据,所以机构的加速寿命试验严格意义应为“准加速寿命试验”^[4]。

2 滤光片转轮机构寿命试验设计

2.1 近红外滤光片转轮结构构型及润滑方式

滤光片转轮机构主要包括宇航步进电机、滤光片转盘、蜗轮蜗杆减速器、柔性联轴器和霍尔器件。步进电机和蜗杆轴之间通过柔性联轴器连接。蜗杆两端是深沟球轴承 619/6 支撑,蜗轮两端是角接触球轴承 71900AC 支撑。滤光片转轮配备 8 个滤光片孔位。滤光片转轮构型如图 1 所示。

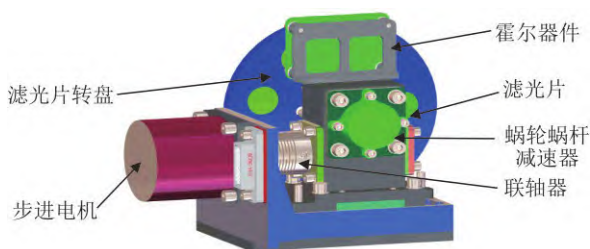


图 1 滤光片转轮构型设计

Fig.1 Configuration design of the filter wheel

为降低机构驱动组件摩擦系数,提高传动效率。机构需对具有相对运动的转动副接触面进行润滑设计。空间由于真空环境,如不进行润滑措施,轻则出现因摩擦磨损导致精度降低,重则出现机构“冷焊”导致无法正常运转。为避免空间冷焊现象出现,滤光片转轮中的蜗轮蜗杆副采取 MoS_2 固体润滑,其中蜗杆采取溅射 MoS_2 膜,蜗轮粘接 MoS_2 涂层。深沟球轴承和角接触球轴承采取固体润滑,轴承套圈沟道上溅射 MoS_2 固体膜与自润滑材料保持架相结合的方式。

2.2 滤光片转轮加速寿命试验设计

滤光片转轮在轨运行寿命预计 10 年以上,在此期间,滤光片转盘切换次数将达到 8×10^4 次。在轨成像观测一般视观测目标而定,每次工作时间不是一成不变。两次开机转动最短间隔时间可能几十秒,最长相隔可能数天。如果按在轨真实观测模式进行试验模拟,不仅试验时间长导致费用高,并且由于观测模式的不确定性,无法进行试验。经过对滤光片转轮机构传动链进行分析,认为运动副接触面固体润滑磨损程度与转数有关,间歇工作不改变

运动机构转动失效分布,因此寿命试验可进行持续开机模拟。考虑到地面装调测试需要。设定了滤光片转轮机构工作次数安全系数为 2^[31]。滤光片转轮工作次数和安全系数见表 1。

表 1 滤光片转轮机构工作次数和安全系数

Tab.1 Working time and safety factor of the filter wheel mechanism

工作类型	切换次数/转	安全系数
在轨工作	8×10^4	2

正常工作时,滤光片转轮的切换一圈为 50 s,考虑到实际的工作情况,在到达每一个位置停顿 5 s,再转动到下一个位置,因此滤光片转轮转动一圈停顿 8 个位置,共需要 90 s。对滤光片转轮进行加速寿命试验时,选择驱动电机的转动速度为加速应力,同时省去滤光片不切换工作时的时间,即:滤光片转轮的转速为 34 s/r,在到达每一个位置停顿 2 s,再转动到下一个位置,每一圈识别一次零位。共需要 50 s。

与单独的轴承寿命试验相比,滤光片转轮机构作为一个整机开展热真空寿命试验,是一个复杂的、集合光机电各种部件的机构。滤光片转轮机构对重复定精度、转动偏心误差均有要求,不仅仅局限于能够“转动”。需要在寿命试验中通过增加试验时间来考核各零件材料在高低温循环下的变形能否满足设计要求,滤光片转轮在轨工作安全系数为 2,因此本试验中时间裕度为 2^[31],即切换次数达 1.6×10^5 次。

3 滤光片转轮寿命试验

3.1 试验方案系统描述

热真空寿命试验系统组成如图 2 所示。试验时,滤光片转轮通过导热工装放置在真空罐的载物平台上,并根据要求布置温度控制传感器及穿舱电缆。在试验箱外部连接地检设备。

3.2 热真空加速寿命试验条件和状态

根据滤光片转轮集成在空间望远镜实际工作时面临的轨道环境,进行了试验温度设计和真空度设计等工作,试验条件如下。

- 1) 环境压力:优于 1.3×10^{-3} Pa;
- 2) 试验温度: $-20 \sim 50$ °C;

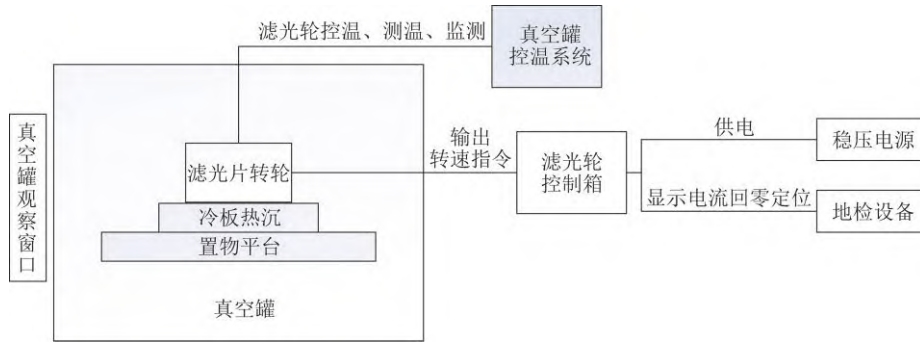


图 2 寿命试验系统组成

Fig.2 Composition block diagram of the life test system

- 3) 高、低温保持时间:4 h;
- 4) 试验时间:转盘切换次数 1.6×10^5 次。
- 5) 滤光片转轮工作状态:整机处于水平放置状态。

在滤光片转轮基座上安装 1 个控温传感器,在滤光片转轮电机端和霍尔器件处分别安装 2 个测温传感器进行温度采集,如图 3 所示。每个循环周期的温控剖面如图 4 所示。

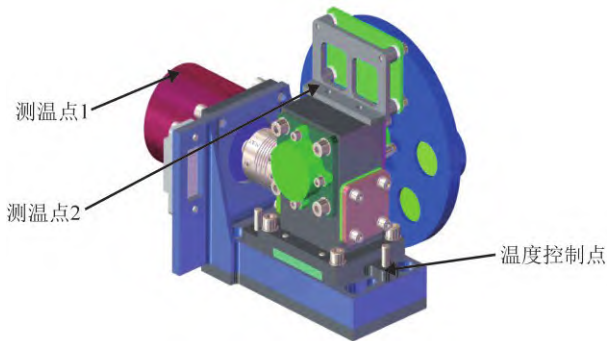


图 3 滤光片转轮测控温点位置

Fig.3 Positions of the temperature measurement and control points of the filter wheel

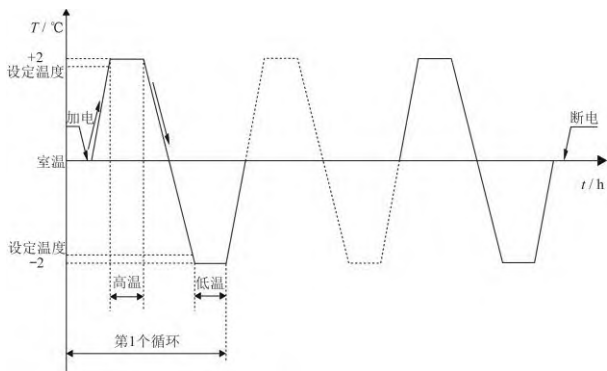


图 4 每个循环周期的剖面

Fig.4 Profile of each cycle

3.3 滤光片转轮寿命试验合格判据

当滤光片转轮机构在寿命试验考核过程中,由滤光轮机构卡滞、蜗轮蜗杆传动副卡死、蜗轮蜗杆副接触面润滑膜磨损与脱落、转动副基底外漏、轴承磨损严重、机构冷焊、步进电机驱动电流急速增加和转动噪声异响等情况,导致滤光片转轮机构不能正常转动或其他故障情况时,滤光片转轮失效。滤光片转轮寿命试验真空罐内状态,如图 5 所示。滤光片转轮寿命试验判据逻辑框如图 6 所示。

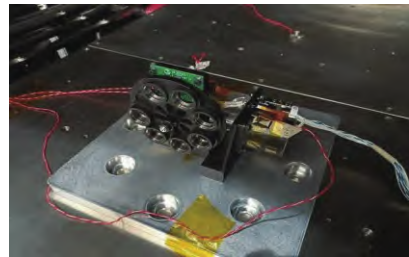


图 5 滤光片转轮寿命试验真空罐内状态

Fig.5 Life test state of the filter wheel in the vacuum tank

4 滤光片转轮寿命试验结果分析

滤光片转轮机构根据 3.2 节中试验条件完成了热真空寿命试验,滤光片转轮总计完成了 1.6×10^5 次切换,并对试验过程中温度、真空度数据进行记录,如图 7 所示。试验后对整机性能进行测试,并拆机对蜗轮蜗杆和轴承状态进行分析。

4.1 轴承状态分析

滤光片转轮机构中磨损程度最为严重的部件主要是蜗轮蜗杆啮合传动副和轴承组件。试验结束后,对蜗杆和蜗轮两端转动支撑的轴承组件进行了性能检测,主要包括外观形貌和转动灵活性检查、摩擦力矩测试以及分解后显微分析。具体分析流程如图 8 所示。

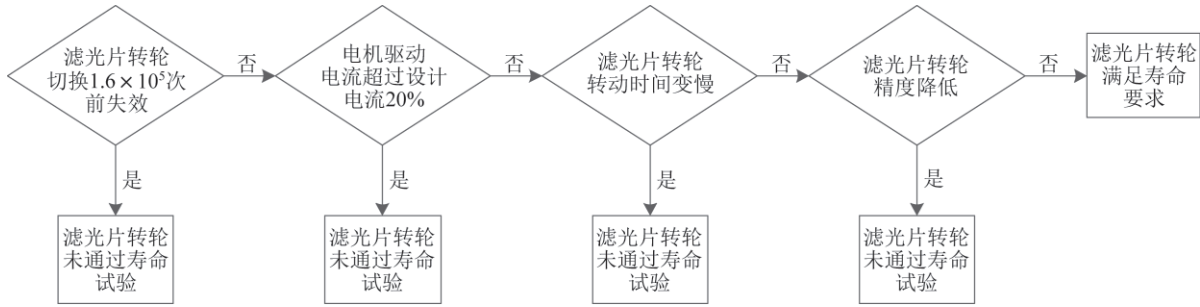


图 6 滤光片转轮失效逻辑框
Fig.6 Failure logic block diagram of the filter wheel

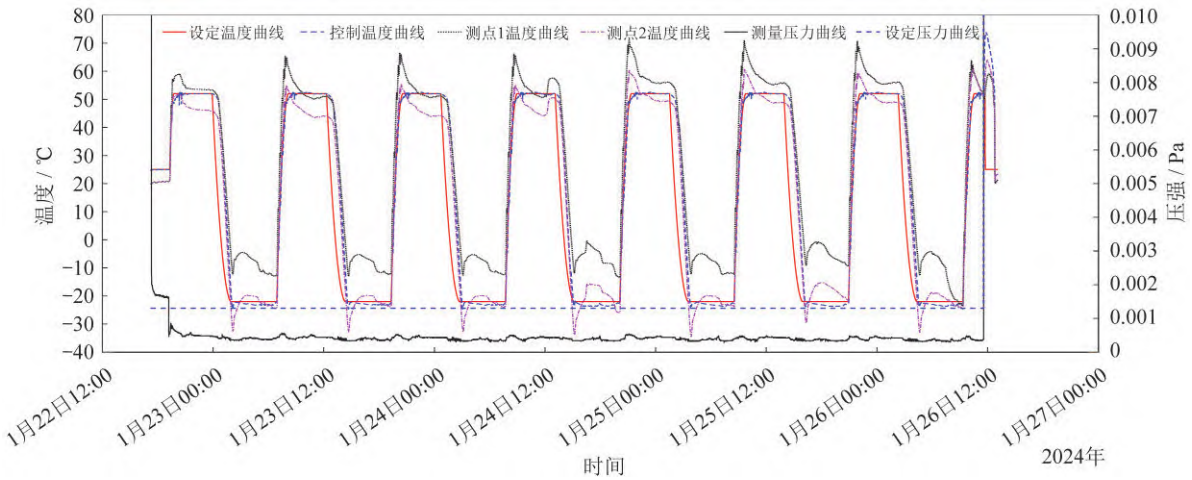


图 7 寿命试验过程中温度和真空度曲线
Fig.7 Temperature and vacuum curves during the life test

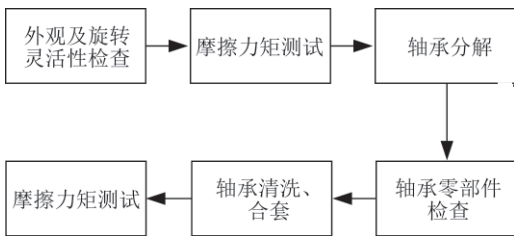


图 8 寿命试验后轴承分析流程
Fig.8 Bearing analysis flow after the life test

对深沟球轴承 619/6 和角接触球轴承 71900AC 开展转动测试。均能运转灵活,均未出现突然停顿的现象。

4.1.1 轴承摩擦力矩测试

分别测试了轴承交付装机前、寿命试验后和清洗合套后的摩擦力矩,对不同阶段的摩擦力矩进行对比,见表 2。

表 2 不同阶段的轴承摩擦力矩对比

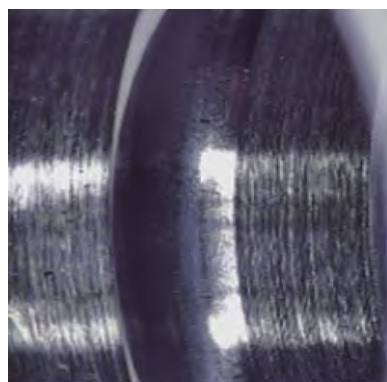
Tab.2 Comparison of the bearing friction torques at different stages

轴承型号	状态	运转摩擦力矩/(N·m)			启动力矩/(N·m)
		平均值	最大值	峰峰值	
619/6/HVP4	交付时	2.31×10^{-5}	1.556×10^{-4}	2.255×10^{-4}	1.848×10^{-4}
	试验后	1.349×10^{-4}	7.746×10^{-4}	1.033×10^{-3}	6.465×10^{-4}
	清洗后	2.31×10^{-5}	2.003×10^{-4}	3.334×10^{-4}	1.901×10^{-4}
71900AC/HVP4	交付时	5.82×10^{-5}	2.145×10^{-4}	3.340×10^{-4}	1.055×10^{-4}
	试验后	2.645×10^{-4}	1.544×10^{-3}	1.575×10^{-3}	6.652×10^{-4}
	清洗后	3.91×10^{-5}	1.454×10^{-4}	1.473×10^{-4}	2.239×10^{-4}

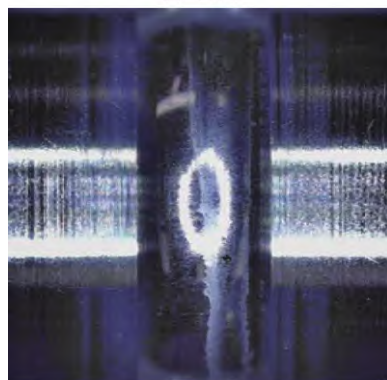
测试结果显示,所有轴承在试验后的摩擦力矩和交付时相比,均有较明显的增加,该情况为固体润滑轴承的正常使用现象。轴承清洗并重新装配合套后的摩擦力矩测试值与轴承交付时的水平相当,说明试验过程对轴承的损伤较小,轴承润滑状态良好。

4.1.2 轴承分解显微分析

通过高倍显微镜对轴承的内、外圈沟道进行观察。观察结果显示,轴承磨损带均匀,未发现异常磨损,所有轴承沟道内的膜层完整,未发生镀层失效现象。深沟球轴承 619/6 和角接触球轴承 71900AC 在高倍显微镜下的轴承内、外圈膜层分别如图 9 和图 10 所示。



(a) 内圈

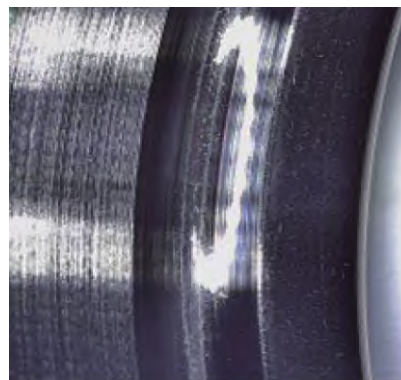


(b) 外圈

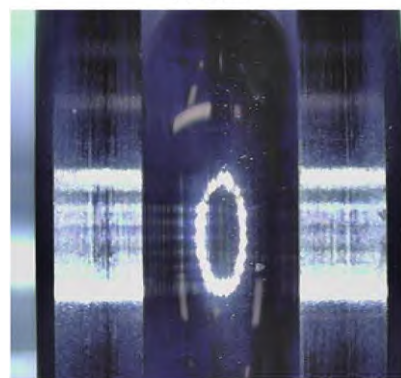
图 9 619/6/HVP4 轴承分解后零件状态

Fig.9 State of the 619/6/HVP4 bearing parts after decomposition

轴承的测试和拆解分析结果显示,在完成了 16 万次切换运行的寿命工作之后,轴承内圈、外圈沟道内仍然保有 MoS_2 膜层。试验后轴承摩擦力矩和装机前相比,未出现明显增大。因此轴承状态良好且仍然有效。



(a) 内圈



(b) 外圈

图 10 71900/HVP4 轴承分解后零件状态

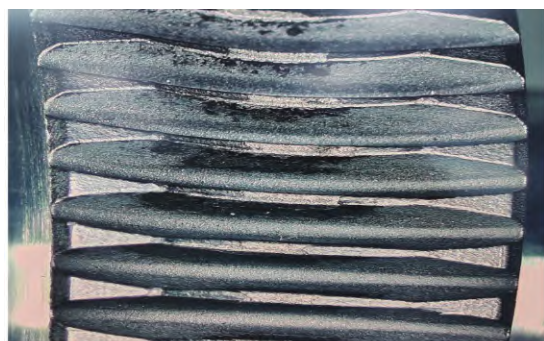
Fig.10 State of the 71900/HVP4 bearing parts after decomposition

4.2 蜗轮蜗杆副状态分析

滤光片转轮机构传动机构为蜗轮蜗杆副,整个滤光片转轮通过蜗轮蜗杆自锁来保持发射时的锁紧,蜗杆采用 9Cr18 合金钢材料,蜗轮采用 7A04 材料。为了保证在空间环境中的正常工作,对蜗轮采用喷涂 MoS_2 、蜗杆溅射 MoS_2 涂层的方法在金属基体中渗入 MoS_2 以实现自润滑处理,避免出现“冷焊”现象。

在长寿命试验中,蜗轮蜗杆啮合传动磨损不仅仅将产生固体润滑膜层脱落、机构冷焊,机构堵转等风险。同时啮合面点蚀或者塑性变形也会导致传动精度降低,整机性能不满足要求。通过高倍显微镜对蜗轮和蜗杆进行观察分析,检查零件表面状态,如图 11 和图 12 所示。

检查蜗轮和蜗杆表面润滑膜层状态,发现蜗轮表面膜层有轻微磨损痕迹,蜗杆表面膜层磨损痕迹不明显,两个零件的润滑膜层均完好覆盖基底,未发生漏基底的现象,说明试验后的蜗轮蜗杆表面润滑状态良好,未发生润滑失效现象。



(a) 蜗轮啮合齿表面



(b) 蜗轮啮合齿表面

图 11 蜗轮表面膜层状态

Fig.11 State of the worm gear surface film layer

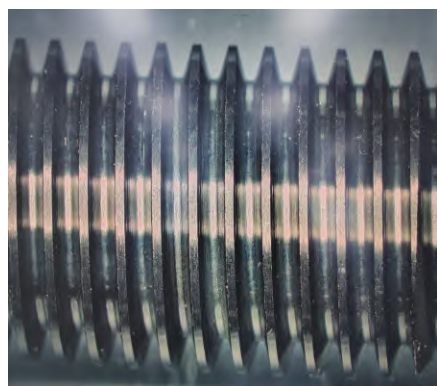


图 12 蜗杆表面膜层状态

Fig.12 State of the worm surface film layer

4.3 寿命试验前后滤光片转轮机构精度分析

在寿命试验前、后对滤光轮进行精度测试。精度测试分为偏心误差检测和重复定位精度检测 2 个部分。测试光学系统原理如图 13 所示,激光器发射出的点光源经准直透镜准直为平行光并入射待测滤光轮,随后为了平行光可以全部入射到电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)的靶面上,经过待检测滤光轮反射后的平行光通过由 2 个焦距分别为 f 和 $3f$ 组合透镜,将像缩小 3 倍后入射到 CCD 上。测试中所用的激光光源为 633 nm 的点光源,准直镜

的焦距为 300 mm,可见光相机(Visible light CCD)的型号为 imprecx GEV-B610M,分辨率为 $1\ 620 \times 1\ 220$,像元大小为 $7.4\ \mu\text{m}$ 。

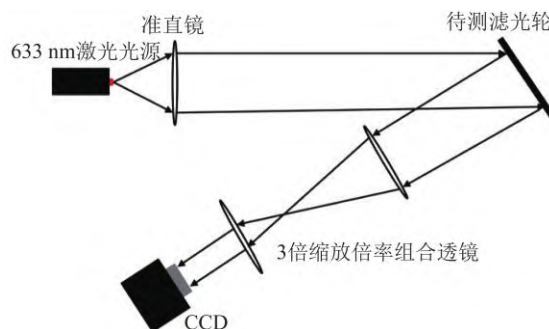


图 13 滤光片转轮机构精度测试光学系统原理

Fig.13 Principle diagram of the optical system for the accuracy test of the filter wheel mechanism

进行偏心误差检测时,保持待测滤光轮在光学系统中位置不变,转动滤光轮,使平行光按顺序通过滤光轮的 $1^\# \sim 7^\#$ 孔位,分别记录平行光经过不同孔位时可见光相机的图像,利于计算 $2^\# \sim 6^\#$ 孔位的图像与孔位 $1^\#$ 图像的像素偏移量,最后利用下式计算两幅图像的位置偏移量从而完成滤光轮的偏心误差检测。

$$\Delta x = \Delta p \times \mu \times \gamma \quad (1)$$

式中: Δx 为位置偏移量; Δp 为像素偏移量; μ 为可见光相机像元大小; γ 为缩放倍率。

进行重复定位精度检测时,保持待测滤光轮在光学系统中位置不变,以 $1^\#$ 孔位为初始基准,首先使平行光通过 $1^\#$ 孔位并记录可见光相机的图像,顺时针转动滤光轮,使平行光再次通过 $1^\#$ 孔位并记录可见光相机的图像,计算平行光两次经过 $1^\#$ 孔位图像的像素偏移量。最后利用公式计算 $1^\#$ 孔位重复定位精度检测。依此方法完成 $2^\# \sim 7^\#$ 孔位的重复定位精度检测。

滤光片转轮机构精度测试如图 14 所示,寿命试验前后分别进行了滤光轮精度测试,测试结果见表 3 和表 4。由表 3 可知,偏心误差测试中以滤光片孔 $1^\#$ 为零位基准滤光片,最大偏差为 0.174 mm。由表 4 可知,重复定位精度最大偏差为 0.078 mm。测试结果表明:寿命试验前后滤光轮转动偏心误差均优于 $\pm 0.5\ \text{mm}$,重复定位精度均 $< \pm 0.1\ \text{mm}$ 。机构运动平稳,满足寿命要求。

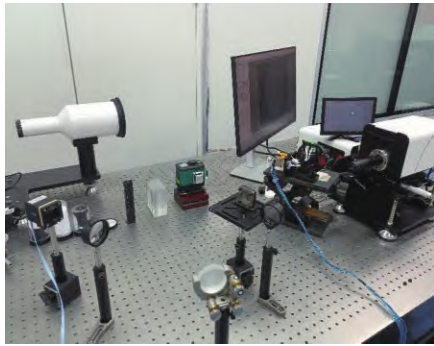


图 14 滤光片转轮机构精度测试

Fig.14 Accuracy test of the filter wheel mechanism

表 3 滤光片转轮机构偏心误差测试结果

Tab.3 Test results of the eccentricity error of the filter wheel mechanism

滤光片孔位	技术要求 指标/mm	试验前 精度/mm	试验后 精度/mm
孔位 2 [#] 相对孔位 1 [#]	<±0.5	0.058	0.097
孔位 3 [#] 相对孔位 1 [#]	<±0.5	0.096	0.116
孔位 4 [#] 相对孔位 1 [#]	<±0.5	0.116	0.154
孔位 5 [#] 相对孔位 1 [#]	<±0.5	0.096	0.174
孔位 6 [#] 相对孔位 1 [#]	<±0.5	0.116	0.154
孔位 7 [#] 相对孔位 1 [#]	<±0.5	0.097	0.135

表 4 滤光片转轮机构重复定位精度误差测试结果

Tab.4 Test results of the repeated positioning accuracy error of the filter wheel mechanism

滤光片孔位	试验前精度/mm	试验后精度/mm
孔位 1 [#] 相对孔位 1 [#]	0.058	0.078
孔位 2 [#] 相对孔位 2 [#]	0.078	0.039
孔位 3 [#] 相对孔位 3 [#]	0.038	0.039
孔位 4 [#] 相对孔位 4 [#]	0.058	0.058
孔位 5 [#] 相对孔位 5 [#]	0.038	0.039
孔位 6 [#] 相对孔位 6 [#]	0.058	0.058
孔位 7 [#] 相对孔位 7 [#]	0.078	0.078

5 结束语

针对空间站巡天望远镜系外行星成像星冕仪的滤光片转轮机构开展了热真空环境下的长寿命试验。该试验充分考虑了滤光片转轮在轨运行时的各项复杂空间环境因素,为其模拟了极为真实的在轨条件。试验结果如下。

1) 寿命试验后轴承摩擦力矩和启动力矩与试验前相比未出现明显变化。沟道内外圈膜层状态

良好。机构所配的深沟球轴承和角接触球轴承寿命均满足空间长寿命任务要求。

2) 试验后蜗轮蜗杆副润滑膜层均完好覆盖基底,未发生漏基底的现象。寿命试验后润滑有效。

3) 寿命试验后,滤光片转轮整机转动偏心误差和重复定位精度均满足要求,试验前后性能未出现明显异常变化。滤光轮整机性能满足在轨长寿命使用工况要求。

4) 试验结果表明,该试验方法很好地完成了滤光片转轮机构整机寿命试验,并为其他空间运动机构的长寿命设计提供了依据和参考思路。

参考文献

- [1] 窦江培,朱永田,任德清.太阳系外行星的研究现状[J].自然杂志,2014,36(2):124-128.
- [2] 赵波.空间环境下高可靠长寿命快门技术研究[D].北京:中国科学院大学,2021.
- [3] 邓容,袁海涛,胡亭亮,等.空间相机扫描机构固体润滑轴承组件的寿命试验[J].光学精密工程,2016,24(6):1407-1412.
- [4] 周明辉.空间相机快门装置加速寿命试验方法研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [5] 上官爱红,张昊苏,王晨洁,等.空间二维运动机构的热真空准加速寿命试验设计[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(1):186-192.
- [6] 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.
- [7] 赵波,梁伟,蒋仁奎.空间望远镜大尺寸快门寿命试验研究[J].半导体光电,2021,42(4):574-578,584.
- [8] 李新立,刘志全,遇今.航天器机构固体润滑球轴承的加速寿命试验方法[J].航天器工程,2008,17(5):82-87.
- [9] 上官爱红,穆猷,李治国,等.空间环境对MoS₂固体润滑运动部件寿命的影响[J].光学精密工程,2014,22(12):3264-3271.
- [10] 于新战,万小平,王辉,等.天线指向微调机构寿命分析与试验验证[J].航天器环境工程,2012,29(3):308-311.
- [11] 中华人民共和国四机部标准化研究所.恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则:GB/T2689.1—1981[S].北京:国家标准总局,1981.
- [12] 黄首清,郭振伟,刘庆海,等.加速寿命试验设计与评估软件ALT511及其应用(一)[J].航天器环境工程,2023,40(5):541-549.
- [13] 朱炜.航天产品可靠性评估方法[M].北京:中国宇航

- 出版社,2022:64-68.
- [14] 陈循,陶俊勇,张春华.可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J].国防科技大学学报,2002,24(4):29-32.
- [15] 吴松,吕晶晶,李小康.可靠性加速寿命试验综述[J].电子产品可靠性与环境试验,2021,39(1):94-100.
- [16] 张兆霖,杨勇,黄首清,等.空间站电动工具开关按钮性能退化特性加速寿命试验与可靠性评估[J].航天器环境工程,2024,41(2):234-243.
- [17] 刘云帆,林亮行,马国政,等.基于CNN和LSTM的航天用涂层型自润滑关节轴承寿命预测及可靠性评估[J].航天器环境工程,2023,40(5):531-540.
- [18] 叶田园,刘鑫,崔赫曼,等.空间挠性作动器的可靠性验证试验方法[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(2):118-124.
- [19] 叶田园,庞贺伟,周元子,等.巡天任务复杂工况下超静平台作动器疲劳寿命评估[J].宇航学报,2022,43(10):1378-1388.
- [20] 魏澳博.空间苛刻环境对涂层型自润滑关节轴承寿命影响研究[D].河北:河北工业大学,2022.
- [21] 黄文斌,周绍辉,刘通,等.M5型微波离子推力器10 000 h寿命试验[J].飞控与探测,2022,5(4):30-34.
- [22] 童军,王鹏辉,黄佳,等.典型封装结构热疲劳寿命评估及试验技术[J].导弹与航天运载技术,2021(1):110-114.
- [23] 魏彦江,周祎,杨光,等.星载无源微波器件加速寿命试验方法研究[J].装备环境工程,2021,18(10):45-51.
- [24] 姚泽民,郭佳诚,王浩,等.航天器用固态功率放大器加速寿命试验方法研究[J].航天器环境工程,2017,34(5):543-548.
- [25] 刘志全.航天器机构的可靠性试验方法[J].中国空间科学技术,2007,27(3):39-45.
- [26] 王勇,夏昌福,郭茂.基于加速退化模型的加速度开关贮存寿命评估[J].压电与声光,2023,45(3):484-488.
- [27] 茆诗松.加速寿命试验的加速模型[J].质量与可靠性,2003(2):15-17.
- [28] 刘晓娣,韩建立,李田科,等.综合环境下两阶段加速寿命试验优化设计[EB/OL].(2024-07-15)[2024-08-21].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=94FxnJrPFCunE6d7iEwYyOpD_PaZFzrd0pfyoEB28Ji-4Gu0DRP68sHMhybBbcVQ7cTKX_oyiKJnDhKOyH8QC1AaGV61hRtGUh68iCoJG6SdmnD84Olt1ra7AA26v9rnq3FubKOQM-eS0P2a0wL64WddeW0hhVVPyQXjVQvDUNCQtTsIZyDS59tZ3PYIt-B1&.uniplatform=NZKPT&.language=CHS.
- [29] 翟广泉,杨懿静,胡学良,等.空间机械制冷机环境与可靠性试验方法研究[J].航天返回与遥感,2023,44(3):154-163.
- [30] 黄首清,代巍,姚泽民,等.两种工程化的航天器用滚动轴承加速寿命试验方法[J].航天器环境工程,2021,38(4):413-419.
- [31] 中国科学院空间科学与应用总体部.空间应用系统产品设计和建造规范 第16部分:产品环境试验要求:Z/K-E0.1-04—2014[S].北京:中国科学院空间科学与应用总体部,2015.