

文章编号 1004-924X(2015)12-3357-07

静止轨道光学遥传感器的滤光轮机构

鲍 赫,李志来*,柴方茂,杨会生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:为实现静止轨道空间光学遥传感器的多谱段成像,研究了光学系统特定谱段的多光谱成像的方法。对两种滤光模式进行了对比,选择透射式滤光方案进行不同谱段光线的切换。结合本项目光学系统的特点,确定了在光学系统中光线集中度较高的焦平面附近设置滤光轮机构的方案。通过对多种转动机构特点的比较,设计了一种基于正五棱锥台基座的新滤光轮机构,该机构由滤光轮组件和滤光轮驱动机构两部分组成。介绍了滤光轮机构的组成和工作原理,最后,在环境模拟试验前后对滤光轮机构进行了综合性能测试。测试结果表明:该机构具有结构强度高、结构紧凑、精度高、稳定可靠等特点。试验前后滤光片面形精度 RMS 值均优于 $\lambda/30$,机构转动精度优于 $25''$,机构自锁性能良好,满足复杂空间环境下光学遥传感器多谱段成像的要求。

关键词:静止轨道;光学遥感器;滤光片;滤光轮机构;正五棱锥台

中图分类号:TP732 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3357

Filter wheel mechanism for optical remote sensor in geostationary orbit

BAO He, LI Zhi-lai, CHAI Fang-mao, YANG Hui-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: lizl2004@sohu.com

Abstract: To achieve the multispectral imaging of a space optical remote sensor in geostationary orbit, multispectral imaging methods of light filtering in the optical system were investigated. By comparing two kinds of filter modes, the transmissive filter program was selected to switch lights in different bands. Combining the characteristics of the optical system, a scheme was chosen to set a filter wheel mechanism in the vicinity of the focal plane where the degree of light concentration is higher. By comparing the characteristics of different rotating mechanisms, a new type of filter wheel mechanism consisting of a filter wheel assembly and a filter wheel driving mechanism was designed based on a regular five truncated pyramid. The composition and working principle of the mechanism were introduced. Then, the comprehensive performance on filter wheel mechanism was tested before and after the environmental simulation tests. The test results show that the Root Mean Square(RMS) value of filter surface accuracy before and after the tests is better than the average value of $\lambda/30$, the body rotation

收稿日期:2015-01-26;修订日期:2015-03-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

accuracy is better than $25''$. Moreover, the mechanism has good self-locking performance and meets the requirements of optical remote sensing multispectral imaging under complex space environments.

Key words: geostationary orbit; optical remote sensor; filter; filter wheel mechanism; regular five truncated pyramid

1 引言

随着空间光学遥感技术的迅猛发展,对空间光学遥感器的要求尤其是对空间分辨率和时间分辨率的要求也在不断提高。目前低轨道(LEO)空间光学遥感器的地面像元分辨率已经达到较高水平,美国的 WorldView-2 卫星运行在 770 km 的太阳同步轨道上,其采用推扫式成像,分辨率已达到 0.46 m,可实现近乎全球观测。但其轨道重访周期较长,无法实现对目标的高时间分辨率观测。静止轨道光学遥感卫星所处轨道与地球相对静止,可以对星下点约 $1/3$ 地球表面进行高频次的观测,在气象监测、农作物监测、森林火灾监视、灾害性地理特征监测、战场环境监视和大型海洋目标监视等方面具有重要意义。欧美强国都发展了自己的静止轨道空间计划,如美国的 GOES 系列、欧空局的 METEOSAT、日本的 GMS 等。这些静止轨道卫星均采用“凝视”模式进行全球监视和观测。但是,由于静止轨道高达 36 000 km,空间光学遥感器的分辨率较低^[1-4]。可见,低轨道空间光学遥感器和静止轨道空间光学遥感器都有其局限性。不过,上述数据也指出将静止轨道遥感卫星和低轨遥感卫星组网协同工作,有望实现对目标的高空间分辨率和高时间分辨率观测。

区别于低轨道光学遥感卫星的线阵推扫成像模式,静止轨道光学遥感卫星一般采用面阵凝视成像模式。对于面阵成像探测器,目前应用最为普遍的是 CCD 探测器和 CMOS 探测器,这两种探测器的结构及读出方式存在本质区别,在性能上各有优势。大面阵的 CCD 探测器一般采用全帧(Full-Frame)CCD,采用逐行沟道转移的读出方式,曝光时需要配置机械快门。而 CMOS 探测器采用电压逐行放大串行读出的方式,采用电子快门的方式曝光成像,不需要机械快门,可靠性大大提高,因此对于面阵凝视型空间光学遥感器,CMOS 探测器在工作模式上存在着先天优势^[5-6]。但是,这两种探测器均无法对特定谱段光

线进行选择成像。实验显示,在光学系统中设置滤光轮机构,在各谱段分别成像时进行滤光片的切换,对进入系统中的光线进行过滤,可实现静止轨道光学遥感器的多谱段凝视成像。具体实施时,让特定谱段的光线透过滤光片成像,而其它谱段的光线则被截止。

因此,静止轨道空间光学遥感器要实现多谱段成像,必须设计可靠的滤光轮机构来实现不同谱段光线的切换。也就是说,滤光轮机构是静止轨道光学遥感器的重要组成部分,是决定静止轨道光学遥感器实现多谱段成像的关键组件。

本文采用基于正五棱锥台基座的新型滤光轮机构,在环境模拟实验前后对滤光轮结构进行了综合性能测试。实验表明,该机构自锁性能良好,满足复杂空间环境下光学遥感器多谱段成像的要求。

2 滤光轮机构的结构形式

静止轨道光学遥感器成像任务要求对全色($0.43\ \mu\text{m}\sim 0.9\ \mu\text{m}$)、红($0.63\ \mu\text{m}\sim 0.69\ \mu\text{m}$)、绿($0.52\ \mu\text{m}\sim 0.60\ \mu\text{m}$)、蓝($0.43\ \mu\text{m}\sim 0.52\ \mu\text{m}$)和近红外($0.76\ \mu\text{m}\sim 0.90\ \mu\text{m}$)5 个谱段分别进行成像。因此,为实现各谱段单独成像就要设计出包含 5 片滤光片的滤光片切换机构。为保证光学遥感器成像质量,还要求其转动精度优于 $1'$ 。

对特定谱段成像时,需要将光学系统中某一横截面中的光线全部过滤,使特定谱段的光线透过滤光片,进入焦平面成像,其它谱段的光线被截止。因此,选择光学系统中光线横截面积小,光线集中度高的位置设置滤光机构可以有效地减小滤光机构的结构尺寸和重量。结合本项目的特点,光学系统的焦平面附近光线横截面较小,位于光学系统的末端,将滤光机构设置在此处对光学系统成像质量影响较小,且适于结构布局和接口设计。为保证不发生漏光情况,滤光片尺寸要大于焦平面附近通光截面尺寸,滤光片尺寸要达到 $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$;同时为保证成像质量,装配完成后滤光片面形精度均方根(RMS)值需优于

$\lambda/30(\lambda=632.8\text{ nm})^{[7]}$ 。

滤光片切换机构根据滤光片的类型分为透射式滤光轮和反射式滤光轮机构。在透射式滤光轮机构中光线透过滤光片在焦平面上进行成像,通常在近似圆盘形的滤光轮基座周边均匀安装透射式滤光片,圆盘形滤光轮基座中部安装驱动机构,机构驱动滤光轮绕圆盘形滤光轮基座轴线转动以实现各滤光片间的切换,如图 1 所示。透射式滤光轮机构缺点是结构尺寸大,在光机结构中易与其它结构发生干涉;结构强度低,刚度差,火箭发射段产生的冲击和振动易使结构产生破坏。在反射式滤光轮机构中光线入射到滤光片后反射到焦平面上进行成像,在近似正多棱柱体结构件外侧面安装反射式滤光片,正多棱柱体结构件轴线两端安装法兰与两侧的滤光轮驱动机构连接,机构驱动滤光轮绕正多棱柱体结构件轴线旋转以实现各滤光片间的切换,如图 2 所示。反射式滤光轮机构缺点是反射式滤光片制备工艺复杂,驱动机构转动精度要求高,滤光片装配精度要求高,结构件制造、装配难度大。结合本项目特点,综合考虑

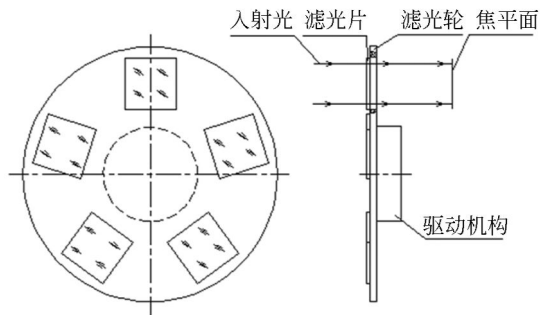


图 1 透射式滤光轮机构原理图

Fig. 1 Schematics of transmissive filter wheel mechanism

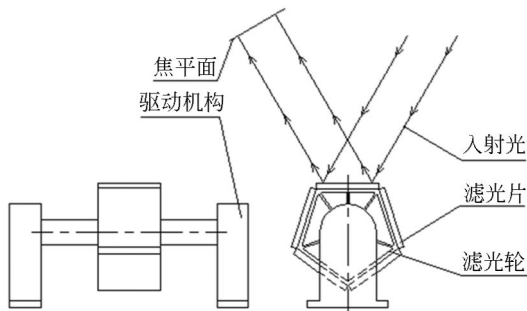


图 2 反射式滤光轮机构原理图

Fig. 2 Schematics of reflective filter wheel mechanism

透射式滤光轮机构和反射式滤光轮机构的优缺点,本文提出了一种新型透射式滤光轮机构方案。

3 滤光轮机构设计

受空间光学遥感器光机结构对滤光轮机构的重量和结构尺寸的严格限制,同时为了保证滤光轮结构具有较高的刚度,提出了一种基于正五棱锥台基座的新型滤光轮机构,如图 3 所示。滤光轮机构由滤光轮组件和滤光轮驱动机构两大部分组成。

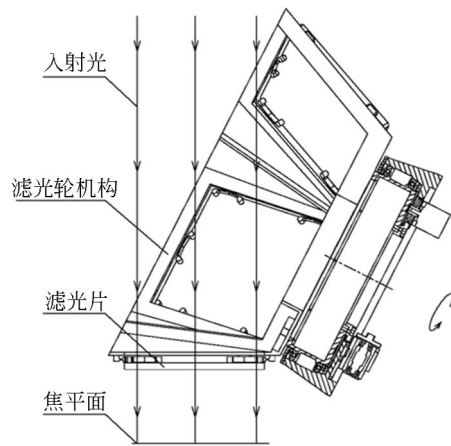


图 3 滤光轮机构工作原理图

Fig. 3 Schematics of filter wheel mechanism operating principle

3.1 滤光轮组件结构设计

常规的透射式滤光轮机构其基座结构为圆盘形,中间为驱动机构,四周为滤光片,滤光轮转轴与光轴平行,工作原理如图 1 所示。滤光片尺寸为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,采用熔石英材料制成,由 5 片滤光片组成的常规的圆盘形滤光轮组件在光轴径向方向尺寸会达到 $1\ 000\text{ mm}$ 以上,这在整个结构布局上几乎无法实现,如此大尺寸的单薄结构也无法经受火箭发射段的冲击和振动。

为满足滤光轮组件结构紧凑、强度和刚度高的设计要求,提出了基于正五棱锥台基座的滤光轮组件。滤光轮组件由正五棱锥台基座、5 片滤光片和 30 个滤光片保持架组成。每个滤光片与 6 个滤光片保持架用环氧树脂胶黏接在一起后,再分别与正五棱锥台基座的棱锥侧面螺接在一起,滤光轮组件如图 4 所示。

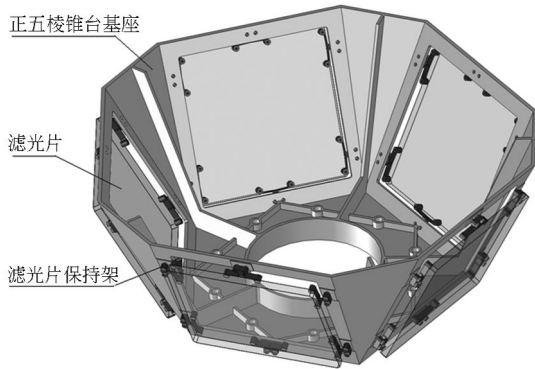


图 4 滤光轮组件模型图

Fig. 4 Diagram of filter wheel assembly model

正五棱锥台基座是滤光轮组件的核心构件,采用铸造钛合金材料制成,其结构形式近似正五棱锥台,正五棱锥台基座轴线与光轴间夹角为 63° 。这种设计既有效地提高了基座的刚度,又可以保证基座不出现光线遮拦的情况。五棱锥台基座的小棱台面是驱动机构的连接面;大棱台面为保证光线无遮拦采用开放镂空设计;5个棱锥侧面设计成中部开口形式以使光线穿过,四周为滤光片的连接接口。光线透过大棱台面、棱锥侧面和滤光片后进入焦平面成像。全新的正五棱锥台基座取代了传统的圆盘式基座,使滤光轮组件结构刚度提高了近4倍,光轴径向方向结构尺寸缩短一半以上。

在滤光轮组件装配过程中,正五棱锥台基座与滤光片保持架间存在的安装不平度会产生连接应力,不同材料间线膨胀系数差异在环境温度变化时会产生热应力,这两种应力的存在会使滤光片面形精度下降。为保证滤光片装配完成后面形

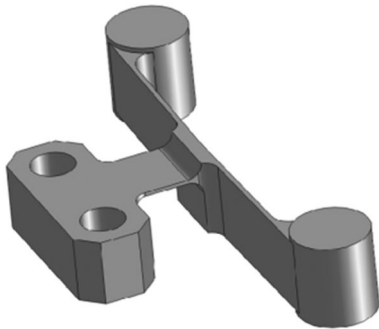


图 5 滤光片保持架模型图

Fig. 5 Diagram of filter holder model

精度 RMS 值优于 $\lambda/30$ 的设计要求,对滤光片保持架进行了柔性设计以消除这两种应力对滤光片面形精度的影响。滤光片保持架使用 50CrVA 的优质弹簧钢材料,设计时采用了轴向簧片结构与径向簧片结构相结合的方法,如图 5 所示。通过 2 个方向簧片的形变吸收连接应力和热应力,减小应力对滤光片面形精度的影响。通过对簧片厚度的多次迭代优化设计使滤光片的的面形精度和结构强度均满足设计要求。

3.2 滤光轮驱动机构设计

本机构特殊的使用环境要求其对空间微重力环境、空间热环境以及火箭发射段的冲击和振动具有良好的适应性。因此,滤光轮驱动机构应具有足够的结构刚度、强度和稳定性,足够高的精度、灵敏度,以及良好的温度适应性,自锁特性等。

常见的转动驱动机构有凸轮传动、连杆传动机构等。其中凸轮传动机构存在凸轮空间曲线加工难度大,凸轮副为高副,强度低易磨损,会导致产生机构空回,机构精度降低等缺点;连杆传动机构存在各运动副间有间隙,传递路径较长,易产生较大的累积误差,且结构刚度较低等缺点^[7-12]。结合项目的特点,设计了基于滚珠轴系的滤光轮驱动机构,其结构如图 6 所示。滤光轮驱动机构由电机组件、蜗轮蜗杆组件、滚珠轴系、编码器组件等组成。

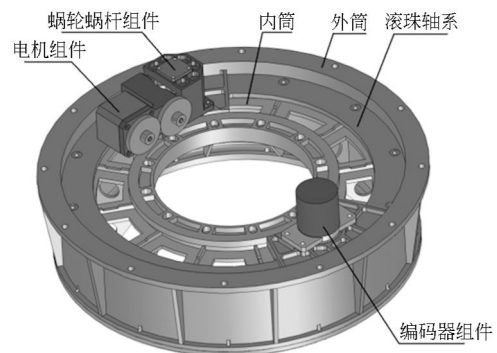


图 6 滤光轮驱动机构模型图

Fig. 6 Diagram of filter wheel driving mechanism model

滚珠轴系通过内筒、外筒和钢珠等进行预紧安装,实现内筒与外筒的相对转动。电机组件、蜗轮蜗杆组件、编码器组件等安装在滚珠轴系的外筒上,滤光轮组件安装在滚珠轴系的内筒上。机构转动时,电机通过速比为 1:1 的齿轮将力传递

给速比为 1 : 30 的蜗轮蜗杆组件,再通过一对速比为 1 : 5 的内啮合齿轮将力传递给滚珠轴系的内筒,实现滤光轮组件的平稳转动。编码器组件通过另一组速比为 1 : 5 的内啮合齿轮监测滤光轮组件的瞬时位置,进行整个机构的闭环控制,简图如图 7 所示。滤光轮驱动机构的驱动公式为:

$$\theta = n \times 360^\circ / 150 N \quad n \in (0, 150 N), \quad (1)$$

式中: θ 为滤光轮组件转动角度, n 为步进电机运动步数, N 为步进电机转动一圈的总步数。

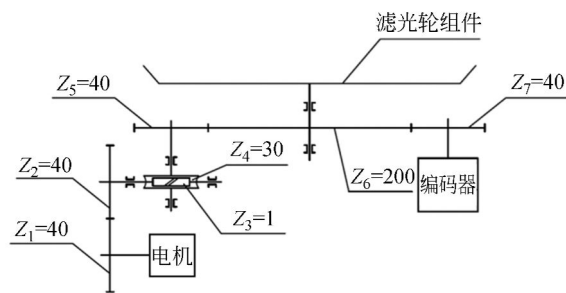


图 7 滤光轮驱动机构工作简图

Fig. 7 Sketch of filter wheel driving mechanism

滤光轮机构在太空的真空环境下工作,易出现冷焊现象,导致机构运动阻力增大,甚至出现卡死现象。为保证机构能够正常工作,在其运动副间均采用 MoS₂ 的固体自润滑,以达到放冷焊的目的。

滤光轮机构中的步进电机选用 4 相 8 拍的工作方式,步进角为 0.9°,转动 1 圈为 400 步,由此可计算出滤光轮机构的理论转动精度为 21.6"。编码器选用检测精度为 80"的航天级 16 位多圈编码器,由于编码器与滤光轮组件间存在 5 倍的速比,因此,编码器对滤光轮机构转动的检测精度为 16",优于滤光轮机构本身的转动精度,可以对滤光轮机构的转动精度进行有效控制。

4 滤光轮机构精度测试

滤光轮机构精度测试是其研制过程中的重要环节,在环境模拟试验前后对滤光轮机构进行精度测试是验证其机构是否满足设计要求的重要依据。滤光轮机构的环境模拟试验包括力学试验和热试验,其中力学试验包括 X、Y、Z3 个方向最大值为 7g 的正弦振动试验和总均方根值为 5.8 g

(RMS)的随机振动试验;热试验为 3.5 个循环,为温度在 0~40 °C 的热真空试验。滤光轮机构精度测试包含滤光片面形精度测试、转动定位精度测试、自锁特性测试 3 个方面内容。

4.1 滤光片面形精度测试

光学遥感器成像过程中光线都要透过滤光片后成像,为保证光学系统的成像质量要求滤光片面形精度 RMS 值优于 $\lambda/30$ 。利用大口径干涉仪和高精度平面镜就可实现滤光片面形精度的检测,干涉仪发出的平面波穿过滤光片后,经过平面镜的反射再回到干涉仪中,实现自准检测,测试装置如图 8 所示。滤光片在环境模拟试验前后的面形精度 RMS 值检测结果如表 1 所示。从表 1 可以看出环境模拟试验前滤光片中面形精度最大值为 0.031 λ ,环境模拟试验后滤光片中面形精度最大值为 0.033 λ 。试验结果表明:环境试验前后滤光片面形精度 RMS 值均优于 $\lambda/30$,稳定性良好,满足光学设计要求。



图 8 滤光片面形精度测试

Fig. 8 Test of filter surface figure error

表 1 试验前后滤光片面形精度值

Tab. 1 Filter surface figure errors before and after tests

测试状态	滤光片 1	滤光片 2	滤光片 3	滤光片 4	滤光片 5
试验前	0.030 λ	0.031 λ	0.029 λ	0.031 λ	0.031 λ
试验后	0.032 λ	0.031 λ	0.030 λ	0.033 λ	0.030 λ

4.2 滤光轮机构转动定位精度测试

滤光轮机构为一维转动机构,其功能是分别将滤光片转动到成像位置进行特定谱段成像,理论上各片滤光片转动到预期位置时镜面是平行的。因此,滤光轮机构的转动定位精度就是 5 片滤光片转动到预期成像位置的定位精度。利用经

经纬仪瞄准滤光片 1,再用地检设备驱动滤光轮机构转动至滤光片 2 的成像位置,然后用经纬仪瞄准滤光片 2,以此类推,2 次瞄准的角度值最大差值即为滤光轮机构的转动定位精度,检测装置如图 9 所示。



图 9 滤光轮驱动机构精度测试

Fig. 9 Accuracy test of filter wheel drive mechanism

5 片滤光片均匀地安装在正五棱锥台基座上,因此,滤光轮机构每转动 72° 即为下一片滤光片的成像位置。环境模拟试验前后分别进行了 2 次转动定位精度测试,测试结果如表 2、3 所示。从表中可以看出,测试中以滤光片 1 为基准值,经纬仪俯仰角最大偏差为 $25''$,扭摆角最大偏差为 $17''$ 。测试结果表明:环境试验前后滤光轮转动精度均优于 $1'$,机构运动平稳,满足设计要求。

表 2 试验前滤光轮机构转动定位精度

Tab. 2 Rotating positioning accuracy of filter wheel mechanism before test

期望角度值	试验前第一次测试		试验前第二次测试	
	俯仰值	扭摆值	俯仰值	扭摆值
滤光片 1(0°)	$62^\circ 58' 26''$	$0^\circ 0' 0''$	$62^\circ 55' 15''$	$0^\circ 0' 0''$
滤光片 2(72°)	$62^\circ 58' 50''$	$0^\circ 0' 10''$	$62^\circ 55' 2''$	$0^\circ 0' 4''$
滤光片 3(144°)	$62^\circ 58' 43''$	$0^\circ 0' 8''$	$62^\circ 55' 20''$	$359^\circ 59' 53''$
滤光片 4(216°)	$62^\circ 58' 21''$	$0^\circ 0' 20''$	$62^\circ 55' 29''$	$0^\circ 0' 16''$
滤光片 5(288°)	$62^\circ 58' 30''$	$359^\circ 59' 45''$	$62^\circ 54' 39''$	$359^\circ 59' 48''$

参考文献:

- [1] 郭玲华,邓峥,陶家生,等.国外地球同步轨道遥感卫星发展初步研究[J].航天返回与遥感,2010,6

表 3 试验后滤光轮机构转动定位精度

Tab. 3 Rotating positioning accuracy of filter wheel mechanism after test

期望角度值	试验后第一次测试		试验后第二次测试	
	俯仰值	扭摆值	俯仰值	扭摆值
滤光片 1(0°)	$63^\circ 15' 36''$	$0^\circ 0' 0''$	$63^\circ 10' 17''$	$0^\circ 0' 0''$
滤光片 2(72°)	$63^\circ 15' 25''$	$359^\circ 59' 55''$	$63^\circ 10' 18''$	$0^\circ 0' 9''$
滤光片 3(144°)	$63^\circ 15' 56''$	$0^\circ 0' 12''$	$63^\circ 10' 31''$	$359^\circ 59' 58''$
滤光片 4(216°)	$63^\circ 15' 11''$	$0^\circ 0' 17''$	$63^\circ 10' 08''$	$359^\circ 59' 43''$
滤光片 5(288°)	$63^\circ 15' 38''$	$359^\circ 59' 43''$	$63^\circ 10' 03''$	$0^\circ 0' 11''$

4.3 滤光轮机构自锁性能检测

通过监测滤光轮机构在环境模拟试验前后编码器数值变化情况可以检测出机构的转动量,进而判断机构的自锁特性,滤光轮机构在环境模拟试验前后的编码器码值如表 4 所示。环境模拟试验前后编码器码值的变化量为 $80''$,由于滤光轮机构与编码器间存在 5 倍速比,因此,核算到滤光轮机构的角度变化为 $16''$,小于其转动精度优于 $1'$ 的设计要求,滤光轮机构的自锁性能良好。

表 4 环境试验前后滤光轮机构自锁特性

Tab. 4 Self-locking features of filter wheel mechanism before and after environmental tests

检测状态	编码器数值
试验前	4th $105^\circ 25' 40''$
试验后	4th $105^\circ 24' 20''$

5 结 论

为实现静止轨道光学遥感器多谱段成像的任务要求,对实现光学系统特定谱段成像的方法进行了研究,设计了基于正五棱台基座的新型滤光轮机构。该机构具有结构强度高、结构紧凑、精度高、稳定可靠等特点。在环境模拟试验前后对其进行了精度测试,测试结果表明:各滤光片面形精度 RMS 值优于 $\lambda/30$,机构转动定位精度优于 $25''$,自锁性能良好,满足复杂空间环境下光学遥感器多谱段成像的要求。

(31):23-30.

GUO L H, DENG ZH, TAO J SH, *et al.*. Preliminary research on development of foreign GEO remote sensing satellites [J]. *Spacecraft Recovery &*

- Remote Sensing*, 2010,6(31):23-30. (in Chinese)
- [2] 梁斌,徐文福,李成,等.地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势[J].宇航学报,2010,31(1):1-13.
LIANG B, XU W F, LI CH, *et al.*. The status and prospect of orbital servicing in the geostationary orbit[J]. *Journal of Astronautics*, 2010,31(1):1-13. (in Chinese)
- [3] 吴玮,秦其明,杨思全,等.面向减灾应用的光学成像静止卫星能力分析[J].遥感技术与应用,2013,28(6):984-993.
WU W, QIN Q M, YANG S Q, *et al.*. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(6): 984-993. (in Chinese)
- [4] 陶家生,孙治国,孙英华,等.静止轨道高分辨率光学遥感探索[J].光电工程,2012,39(6):1-6.
TAO J SH, SUN ZH G, SUN Y H, *et al.*. Exploration of high resolution optical remote sensing of the geostationary orbit[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6): 1-6. (in Chinese)
- [5] 陶小平,罗霄,薛栋林.地球静止轨道面阵凝视成像系统分时积分抑振技术[J].光学精密工程,2013,21(8):2170-2179.
TAO X P, LUO X, XUE D L. Vibration suppression based on multiple integration for staring imaging system in geostationary orbit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(8):2170-2179. (in Chinese)
- [6] 李豫东,汪波,郭旗,等.CCD与CMOS图像传感器辐射效应测试系统[J].光学精密工程,2013,21(11):2778-2784.
LI Y D, WANG B, GUO Q, *et al.*. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2778-2784. (in Chinese)
- [7] 韩昌元.高分辨力空间相机的光学系统研究[J].光学精密工程,2008,16(11):2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2164-2172. (in Chinese)
- [8] 杨会生,张银鹤,柴方茂,等.离轴三反空间相机调焦机构设计[J].光学精密工程,2013,21(4):948-954.
YANG H SH, ZHANG Y H, CHAI F M, *et al.*. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [9] 刘磊,曹国华.大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构[J].光学精密工程,2012,20(9):1939-1944.
LIU L, CAO G H. Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1939-1944. (in Chinese)
- [10] 吕世良,刘金国,贾平,等.离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计[J].光学精密工程,2013,21(8):2154-2160.
LV SH L, LIU J G, JIA P, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(8): 2154-2160. (in Chinese)
- [11] 鲍赫,杨利伟,姜肖楠,等.空间光学相机调偏流机构设计[J].光电工程,2012,39(6):22-28.
BAO H, YANG L W, JIANG X N, *et al.*. Design of draft adjusting mechanism for space optical camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6): 22-28. (in Chinese)
- [12] 陈洪达,陈永和,史婷婷,等.空间相机调焦机构误差分析[J].光学精密工程,2013,21(5):1350-1356.
CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al.*. Error analysis for focusing mechanism of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1350-1356. (in Chinese)

作者简介:



鲍 赫(1980—),男,黑龙江省齐齐哈尔人,硕士,副研究员,2008年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构方面的研究。
E-mail: baohe2000@163.com



李志来(1965—),男,汉族,吉林镇赉人,研究员,1986年于吉林工学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究。
E-mail: lizl2004@sohu.com