

文章编号 1004-924X(2025)21-3343-09

大口径主焦点望远镜的滤光轮机构设计与试验

姜海波¹, 赵金字^{1*}, 郭 鹏¹, 贺昌龙¹, 邵 亮^{1,2}, 姜晰文¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为满足地基大口径主焦点式望远镜的多谱段观测需求,对比研究了滤光片切换机构的结构形式。针对传统形式滤光轮机构的缺点,设计了一种沿光轴圆周均布式的新型滤光轮机构,以实现将不同透过谱段的滤光片依次在光路中切入和切出。该滤光轮机构由驱动组件和滤光片组件组成,与传统形式滤光轮机构相比,该机构安装时无需与光轴偏置,充分利用了光轴圆周空间,能够减小对主镜的遮拦。首先,介绍了滤光轮机构的组成及工作原理,并对关键部件进行了选型计算。随后,对滤光轮机构进行了模态分析,其一阶固有频率为 108 Hz。最后,对滤光轮机构进行了切换精度测量、滤光片面形精度检测以及高低温试验。检测和试验结果表明,该滤光轮机构的滤光片切入后偏心误差最大为 0.1 mm,滤光片面形精度均方根(Root Mean Square, RMS)值均优于 $\lambda/30$,在系统的工作温度范围内切换顺畅无卡滞。该滤光轮机构能够满足大口径主焦点式望远镜的多谱段观测要求,为滤光轮设计提供了新思路。

关键词:滤光轮机构;主焦点;圆周均布;滤光片;高低温试验

中图分类号:TH751 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253321.3343

CSTR:32169.14.OPE.20253321.3343

Design and testing of filter wheel mechanism for large-aperture prime focus telescope

JIANG Haibo¹, ZHAO Jinyu^{1*}, GUO Peng¹, HE Changlong¹, SHAO Liang^{1,2}, JIANG Xiwen¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn

Abstract: To satisfy the multi-band observation requirements of ground-based large-aperture prime-focus telescopes, the structural configurations of filter-switching mechanisms were compared and analyzed. To overcome limitations of conventional filter wheels, a novel circumferentially distributed filter-wheel mechanism arranged along the optical axis was developed, permitting sequential insertion and retraction of filters with different transmission bands into the optical path. The mechanism comprises a drive assembly and a filter assembly. Relative to traditional designs, this configuration obviates the need for optical-axis offset during installation, makes full use of the circumferential space around the optical axis, and reduces primary-mirror obscuration. The composition and operating principle of the mechanism are described, followed

收稿日期:2025-04-29;修订日期:2025-06-18.

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 20240101309JC)

by component-selection calculations for critical parts. Modal analysis yields a first-order natural frequency of 108 Hz. The mechanism was further evaluated through switching-accuracy measurements, surface-figure accuracy tests of the filters, and high-low temperature environmental testing. Results show a maximum filter eccentricity error of 0.1 mm after insertion, root-mean-square surface-figure errors for all filters better than $\lambda/30$, and smooth, jam-free operation across the system's operational temperature range. These results demonstrate that the proposed filter-wheel mechanism meets the multi-band observation requirements of large-aperture prime-focus telescopes and offers a novel approach to filter-wheel design.

Key words: filter wheel mechanism; prime focus; circumferentially distributed; filter; high-low temperature environmental test

1 引言

随着深空探测领域的快速发展,对地基探测设备的性能要求越来越高,望远镜的通光口径也不断增大。不同于其他形式的地基观测系统,大视场望远镜的搜索效率高、探测能力强,属于普查型光电设备,是空间态势感知系统不可缺少的一部分。主焦点式光学系统是大视场望远镜常用的光学形式,具有系统遮拦小,能量利用率高,系统结构形式简单,以及相对易于建造等优点,在大规模巡天、碎片监测和暗物质探测等领域发挥着重要作用,成为近年来望远镜的主要形式之一^[1-3]。世界上著名的地基大口径主焦点望远镜有日本天文台的 8.2 m 口径 Subaru 望远镜^[4-5], 8.4 m 口径的大型巡天望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope, LSST)^[6-8]等,国内的有 2.5 m 口径的墨子巡天望远镜^[9-10]。这些望远镜的光学系统由一块或两块反射镜以及若干块透镜组成,目标发出的光线经过反射镜反射先进入透镜组,再进入探测器。

为实现多谱段观测,上述望远镜系统通常在透镜组和探测器之间设置若干个不同谱段的滤光片,对进入探测器的光线进行分波段滤除。滤光轮作为滤光片的承载机构,使滤光片能够稳定的安装并保持其面形精度,同时也是动作执行机构,能够将不同谱段的滤光片在光路中切入切出,并且保证滤光片在光路中的位置精度满足要求。由于滤光轮机构设置在透镜组和探测器之间,其尺寸通常受到严格限制,因此,设计一套合理可靠的滤光轮机构至关重要。Subaru 望远镜和 LSST 望远镜的滤光片尺寸非常大,切换机构也较为复杂。Subaru 望远镜滤光片切换机构采

用可折叠式机构,LSST 望远镜的滤光片切换机构由一个转盘、六个滤镜和一套复杂的机械系统组成。而在其他形式的望远镜系统中,滤光轮机构多为轮盘式结构。鲍赫等设计了一种基于五棱锥台基座的滤光轮机构,该机构与光路成一定夹角放置,5 片滤光片在驱动机构作用下绕五棱锥台基座的轴线旋转实现滤光片切换^[11]。贾慧丽等设计了一种基于大尺寸薄壁轴承的滤光轮机构,该机构采用周边支撑方案,驱动电机安装在外圆周上,提高了机构的刚度^[12]。这两种滤光轮机构的滤光片围绕其旋转轴均布安装,滤光轮机构的中心即旋转轴,要相对光轴有一定偏心,这样加大了在光轴径向方向的尺寸,在主焦点望远镜系统中会增加对主镜的遮拦,减弱系统探测能力。

鉴于上述问题,本文针对某 1.2 m 口径主焦点望远镜,设计了一种沿光轴圆周均布式的滤光轮机构,并对其进行了定位精度检测、面形检测以及高低温试验。结果表明,该机构能满足大口径主焦点望远镜多谱段观测的要求。

2 滤光轮机构设计与分析

本望远镜系统要求对 450~800, 550~800, 500~700 nm 3 个谱段进行探测,因此需要对三档滤光片进行切换。常用的滤光轮机构为轮盘结构,轮盘上需要安装一定数量的滤光片,在电机驱动下轮盘绕自身中心轴旋转,实现了不同档位滤光片在光路中的切换。这种轮盘式的滤光轮机构安装到系统中时,其旋转轴需要与光轴错开一定距离,当滤光片通光口径较大时,这种机构的边缘往往会超出要求的尺寸限制,对主镜产

生额外的遮拦。本望远镜系统相机靶面大,校正镜组通光口径大,滤光片通光口径达到 126 mm,按照传统形式对滤光轮机构进行设计。此滤光轮机构由步进电机通过齿轮副进行驱动,由电位计进行位置反馈。滤光轮机构在望远镜上安装示意图如图 1 所示,为避免对光路产生遮挡,滤光轮转轴距离光路中心 89 mm,滤光轮边缘距离滤光轮转轴 156.5 mm。当滤光轮转动时,其距离光路中心的最大回转半径为 245.5 mm,明显超出了规定的 220 mm,因此,这种传统形式的滤光轮机构会对望远镜主镜产生额外的遮拦,影响系统探测能力。

针对此问题,本文设计了一种新型滤光轮机构,该机构可充分利用光轴圆周上的空间,三档滤光片沿光轴均布,安装时与光轴同轴,最大外径尺寸为 425 mm,满足尺寸限制要求,其总体结构和安装示意图如图 2 所示。

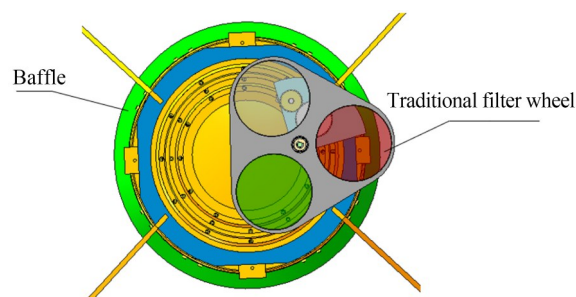


图 1 传统滤光轮机构及安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional filter wheel mechanism and installation

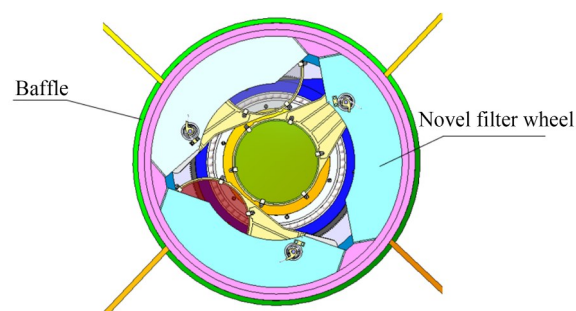


图 2 新型滤光轮机构及安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of novel filter wheel mechanism and installation

2.1 滤光轮结构组成及工作原理

滤光轮机构主要包括基座、驱动组件和 3 个滤光片组件。其中,3 个滤光片组件沿圆周均布,安装在基座上。该组件结构相同,只是滤光片波段不同,滤光片组件上的滤光片可在驱动组件的驱动下绕各自的转轴进行旋转,实现在光路中的切入切出,滤光轮结构组成如图 3 所示。滤光片组件包括托架、滤光片、滤光片座、扭簧、转轴、轴承、配重块、滚轮,如图 4 所示。滤光片座通过转轴与轴承连接,转轴上方装有扭簧,滚轮安装在滤光片座上,滤光片采用径向三点顶丝支撑,轴向采用法兰加弹性压片支撑。滤光片组件与基座采用螺钉连接,可单独进行安装与拆卸,便于对扭簧、滤光片等进行维护。

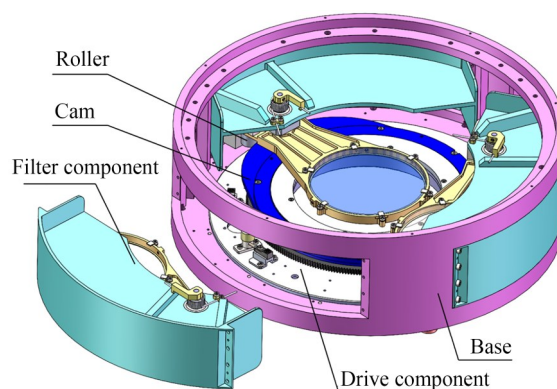


图 3 滤光轮结构组成

Fig. 3 Structural composition of filter wheel

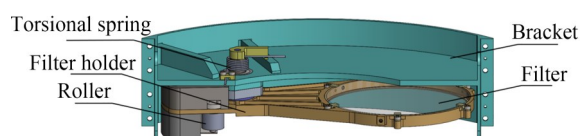


图 4 滤光片组件结构

Fig. 4 Structural diagram of filter component

驱动组件包括大齿轮、小齿轮 1、小齿轮 2、大轴承、轴承座、凸轮、电位计、光电开关和减速电机等,如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。其中,大齿轮与大轴承外圈连接,凸轮与大齿轮连接,减速电机与小齿轮 1 连接,小齿轮 1 与大齿轮啮合,小齿轮 2 与大齿轮啮合,并通过一连接轴与电位计相连,驱动组件整体通过轴承座与基座采用螺钉连接,滤光轮组装后凸轮与 3 个滤光片组件中

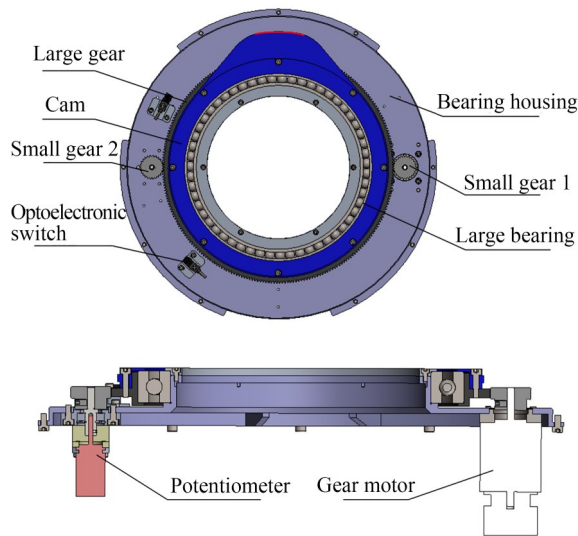


图 5 驱动组件结构

Fig. 5 Structural diagram of drive component

的滚轮接触构成凸轮配合(见图 3),滚轮在扭簧力的作用下始终与凸轮紧密贴合。

工作时,减速电机通过小齿轮 1 驱动大齿轮,大齿轮带动凸轮转动,在凸轮配合作用下,滤光片座绕其转轴转动。大齿轮带动小齿轮 2 转动,进而带动电位计轴转动,根据电位计输出信号实现滤光片位置反馈。当图 5 中凸轮红色表面与滚轮接触时,滤光片即与滤光轮中心轴同轴,且理论上在凸轮红色表面与滚轮接触这一范围内,滤光片位置不变且始终与滤光轮中心轴同轴,记录红色表面与滚轮开始接触时和分开时对应的电位计的码值,即可认为电位计的码值在此范围内时,该滤光片已切入到光路中,从而为电控系统留有较大裕量。当凸轮转过此滤光片座后,滤光片座在扭簧作用下复位,凸轮继续转动,带动下一个滤光片座转动,实现滤光片的切换。在凸轮转动极限位置处安装有光电开关,用来限制凸轮转动范围。滤光轮机构结构紧凑,采用凸轮传动机构,利用扭簧复位,实现用一个电机驱动 3 个滤光片依次切入切出。

2.2 扭簧及电机选型

扭簧作用在滤光片组件的转轴上,使滚轮始终紧靠在凸轮的外圈上,实现滤光片位置固定。扭簧的扭矩过大将导致电机负载过大而转动困难,扭簧扭矩过小将导致滤光片无法复位及固定,因此,需对扭簧进行选型计算,选择合适的产

品。在滤光片组件中,转动部分为滤光片、滤光片座、转轴、配重块、扭簧挡块和滚轮,其总质量约为 1 kg,相对转轴的转动惯量为 $0.0068 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,相对转轴的偏心距离取为 5 mm,则对应的偏心力矩为 $0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。扭簧为滤光片提供复位力矩,同时在初始位置时,为了避免滤光片在重力或外部震动作用下发生转动,应对扭簧施加一定预紧力矩,取为 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$,此为扭簧的最小工作扭矩为 T_1 。单个滤光片从完全切出到完全切入到光路中时需要转动 60° ,此时扭簧扭矩为最大工作扭矩 T_2 ,综合考虑扭簧的工作转角范围及步进电机的额定转矩范围,取扭簧的最大工作扭矩为 $0.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。扭簧条件参数如表 1 所示。

表 1 扭簧条件参数

Tab. 1 Condition parameter of torsional spring

Order	Index	Parameters
1	Minimum working torque T_1	$0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$
2	Maximum working torque T_2	$0.6 \text{ N}\cdot\text{m}$
3	Angle of torsion φ	60°
4	Spring category	II

扭簧材料选用琴钢丝,初步假设钢丝直径为 1.8~2.3 mm,对应抗拉极限强度为 $\sigma_b=1765\sim 1883 \text{ MPa}$,取 $\sigma_b=1800 \text{ MPa}$,则许用弯曲应力为:

$$\sigma_{bp}=0.6\sigma_b=0.6\times 1800=1080 \text{ MPa}. \quad (1)$$

初选旋绕比 $C=6$,则曲度系数为:

$$K_1=\frac{4C-1}{4C-4}=1.15. \quad (2)$$

计算钢丝直径 d :

$$d=\sqrt[3]{\frac{32T_2K_1}{\pi\sigma_{bp}}}=1.87 \text{ mm}. \quad (3)$$

取 $d=2 \text{ mm}$,则 $\sigma_b=1814 \text{ MPa}$,大于原暂定值,故安全。

弹簧中径为:

$$D=C\times d=6\times 2=12 \text{ mm}. \quad (4)$$

计算弹簧圈数如下:

$$n=\frac{Ed^4\varphi}{3667D(T_2-T_1)}=11.2. \quad (5)$$

这里取整数值 $n=11$ 。

则弹簧刚度 T' 为:

$$T' = \frac{Ed^4}{3667Dn} = 6.81(\text{N}\cdot\text{mm}/(^{\circ})). \quad (6)$$

最大工作扭矩时的扭转角为:

$$\varphi_2 = \frac{T_2}{T'} = \frac{600}{6.81} = 88.1^{\circ}. \quad (7)$$

最小工作扭矩时的扭转角为:

$$\varphi_1 = \varphi_2 - \varphi = 88.1 - 60 = 28.1^{\circ}. \quad (8)$$

实际最小工作扭矩 T_1 为:

$$T_1 = T'\varphi_1 = 0.19(\text{N}\cdot\text{m}). \quad (9)$$

切换过程中转动部分转动惯量很小,其所需驱动力矩相对扭簧最大工作力矩来说很小,可忽略。根据结构设计可知,凸轮对滚轮的作用力相对滤光片组件转轴的最小力臂为 15 mm,滚轮对凸轮的作用力相对凸轮旋转轴的最大力臂为 80 mm,则当扭簧为最大工作扭矩时,凸轮所需驱动力矩为:

$$T_3 = \frac{T_2 \times 80}{15} = \frac{0.6 \times 80}{15} = 3.2(\text{N}\cdot\text{m}). \quad (10)$$

大齿轮齿数为 264,小齿轮 1 齿数为 26,齿轮传动效率为 0.98,并考虑 1.5 倍安全系数,则所需电机驱动转矩为:

$$T_4 = \frac{T_3 \times 26 \times 1.5}{264 \times 0.98} = 0.48(\text{N}\cdot\text{m}). \quad (11)$$

选用一能机电的 42 系列步进减速电机,其步进电机步距角为 1.8° ,电机力矩为 0.19 N·m,减速器减速比为 1:10,能够满足驱动力矩要求。

2.3 滤光轮模态分析

为了研究滤光轮机构的动力学特性,利用有限元方法对滤光轮机构进行模态分析,模态分析能够确定系统固有频率和振型,进而指导设计防止发生共振。为了简化分析模型,将质量较轻的电位计、光电开关等组件忽略,用质量点代替减速电机,3 组滤光片组件只考虑一组,轴承采用有限元分析软件中的轴承接头代替,建立的网格模型如图 6 所示。计算得出前 3 阶结果如表 2 所示,其中第 1 阶固有频率为 108 Hz,振型为滤光片座沿光轴方向摆动,如图 7 所示,能够满足使用要求。

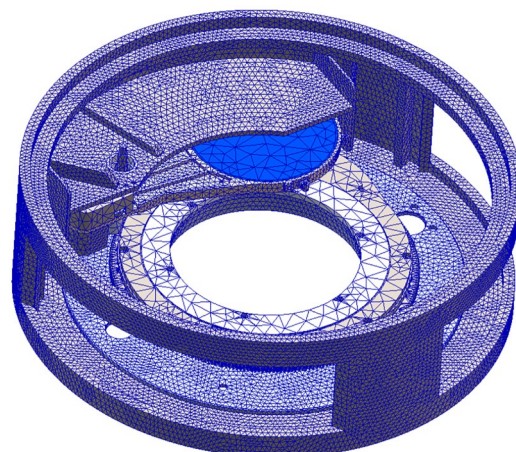


图 6 滤光轮有限元网格模型

Fig. 6 Finite element mesh model of filter wheel

表 2 模态分析结果

Tab. 2 Modal analysis results

Order	Frequency /Hz	Vibration mode
1	108	Filter holder swings along the optic axis
2	177.5	Roller rotates around its shaft
3	216.2	Filter holder rotates around its shaft

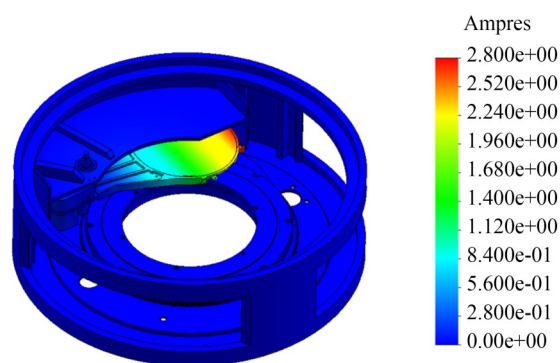


图 7 一阶模态振型

Fig. 7 First mode vibration

3 滤光轮机构检测与试验

滤光轮定位精度、滤光片面形精度以及机构的环境适应性是滤光轮机构使用过程中的重要指标,也是验证滤光轮机构设计合理的重要依据。

3.1 滤光轮精度检测

滤光片为平面镜,滤光轮定位精度主要体现在滤光片相对于光轴的偏心误差,偏心误差过大

会遮挡光路。本滤光轮机构通过基座上的止口配合安装在望远镜上,在设计上,三档滤光片切入光路后滤光片的中心轴应与基座中心轴同轴。然而,本机构的滤光片靠凸轮定位,其位置很大程度上受零件加工和装配误差的影响,如凸轮外圆尺寸误差、滚轮外圆尺寸误差、滤光片转轴相对凸轮回转轴的位置误差等,因此,需对滤光片的偏心误差进行检测。

检测方案如图 8 所示,将滤光轮机构放在一个转台上,先将千分表探头抵在滤光轮基座内圈,转动转台,根据千分表读数来调整滤光轮组件位置,使滤光轮基座的机械轴与转台转轴基本同轴,转动凸轮使滤光片组件 1 切入;然后,将千分表探头抵在滤光片座的内圈(未安装滤光片),再转动转轴,记录千分表读数,随后将千分表读数进行处理,即可分析出滤光片座内圈的机械轴与转台转轴的偏心量。依次切入滤光片组件 2、3,采用相同的方法步骤,即可测出三档滤光片组件与转台转轴之间的偏心量。

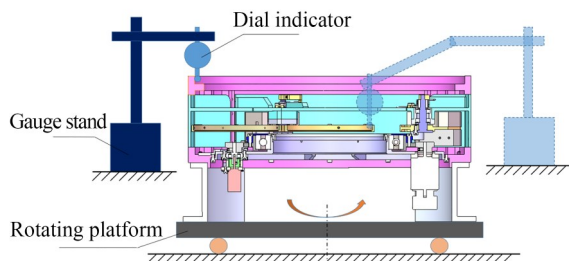


图 8 滤光轮偏心检测原理

Fig. 8 Principle diagram of eccentricity detection for filter wheel

将滤光轮机构放在转台上,千分表的表座通过工装件固定在转台旁,先将千分表探头抵在滤光轮基座内圈,在滤光轮基座上有 16 个标记点,转动转台,记录 16 个标记点处的千分表读数,调整滤光轮机构在转台上的位置,使 16 个标记点处的读数最大与最小值的差值小于 0.02 mm。然后切入滤光片 1,将千分表表头抵在滤光片 1 的安装座的内壁上,转动转台,记录对应 16 个标记点处千分表读数。随后分别将滤光片 2、3 切入,测量并记录数据,测量过程如图 9 所示。

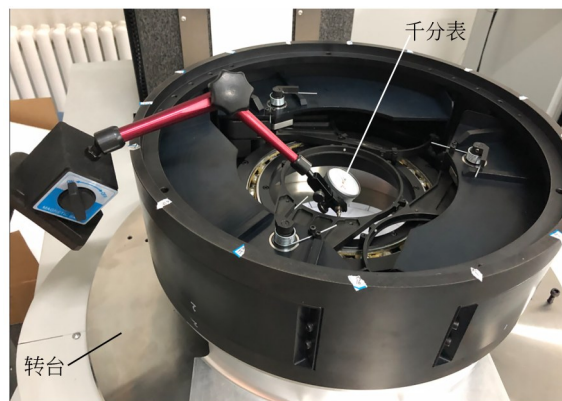


图 9 滤光片偏心误差检测过程

Fig. 9 Measurement process of filter eccentricity deviation

采用谐波分析的方法对数据进行处理,谐波分析源于傅里叶级数展开,即通过使用不同频率的简谐波来拟合一个比较复杂的周期运动^[13]。傅里叶级数展开式如下:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} (a_k \cos kx_i + b_k \sin kx_i). \quad (12)$$

将实测数据使用傅里叶级数展开后,以 2π 为周期的部分就是偏心误差,其幅值即为相对于转台转轴的最大偏心误差。将滤光轮基座的测量数据进行傅里叶谐波分析,数据处理结果如图 10 所示。可以看出,原始数据中含有较明显的一次谐波成分,即滤光轮基座与转台转轴间存在偏心,计算得出一次谐波项系数为 13.8,即滤光轮基座与转台转轴的偏心误差为 0.014 mm。

采用同样方法对滤光片 1、滤光片 2、滤光片 3 的测量数据进行处理,结果如图 11 所示。可以

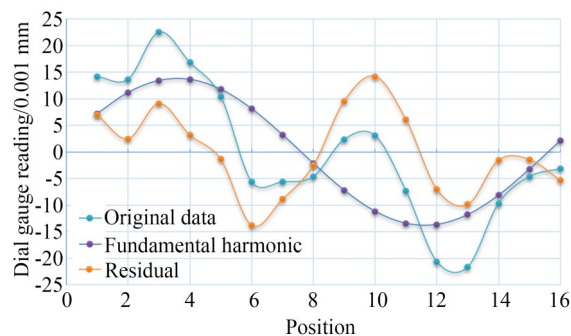


图 10 滤光轮基座相对转轴偏心数据

Fig. 10 Eccentricity data of filter wheel base relative to axis of rotation

看出,三档滤光片都与转轴间存在明显的偏心,经计算得出偏心量分别为 0.046,0.086,0.013 mm。滤光轮基座相对转台转轴的偏心误差为 0.014 mm,保守计算,将滤光轮基座相对转台转轴的偏心误差分别和三档滤光片相对转台转轴

的偏心误差相加即可得到三档滤光片相对滤光轮基座的偏心误差,即为 0.06,0.1,0.027 mm。滤光片在设计时留有单边 2.5 mm 的通光口径余量,因此,三档滤光片的偏心误差不会对系统光路产生遮挡。

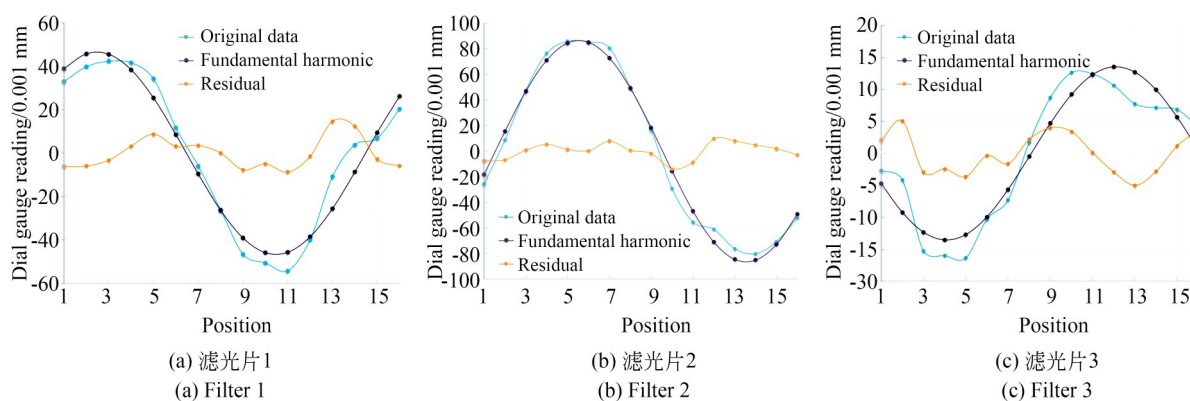


图 11 滤光片偏心误差检测结果

Fig. 11 Detection results of eccentricity error of filters

3.2 滤光片面形精度检测

由于目标光线需经过滤光片后进入探测器,因此,滤光片的面形精度对光学系统成像质量影响也需重点考虑,光学设计要求滤光片透射波前误差优于 $\lambda/20$ 。滤光片组件装配好后,利用干涉仪对滤光片的面形精度进行检测,检测时将滤光片组件放置在干涉仪出光口和标准平面镜之间,如图 12 所示。通过干涉仪出来的光穿过滤光片后经标准平面反射镜反射后再穿过滤光片后进入干涉仪形成干涉条纹,即可测出滤光片的透射波前误差,经检测,3 档滤光片的透射波前误差 RMS 值分别为 0.02λ , 0.022λ , 0.024λ , 如图 13 所示。该数据说明滤光片支撑结构合理,能够满足

系统成像要求。

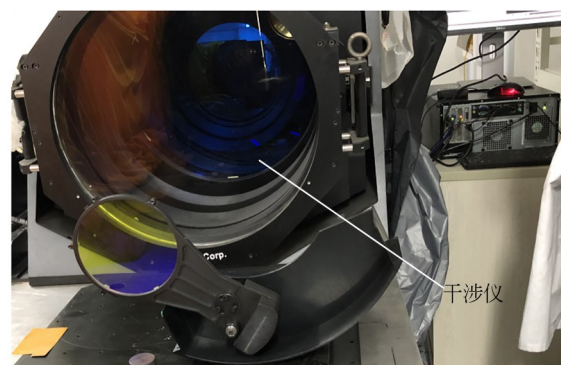


图 12 滤光片面形精度检测装置

Fig. 12 Accuracy detection setup of filter surface shape

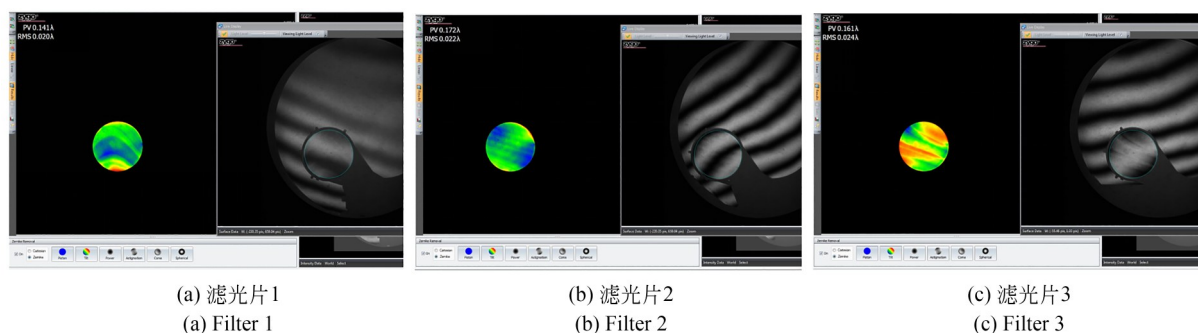


图 13 滤光片透射波前检测结果

Fig. 13 Detection results of transmitted wavefront through filters

3.3 滤光轮机构高低温试验

作为地基观测设备,望远镜要求的工作温度为 $-35\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$,滤光轮机构作为动作执行组件,在环境温度变化下必须避免出现卡滞,因此有必要对滤光轮机构进行高低温试验。用同等质量和外形尺寸的铝板代替滤光片装配到滤光片安装座上,滤光轮转动过程中的负载主要是切换过程中扭簧的扭矩、传动机构的摩擦力矩以及各转动轴上部件质心相对轴心的偏心所引起的偏心力矩。其中,扭簧的扭矩和传动机构的摩擦力矩不受重力方向影响,而偏心力矩与重力方向有关,光轴水平时偏心力矩最大。因此,整个试验过程中滤光轮机构处于竖直状态,如图 14 所示。



图 14 高低温试验箱内的滤光轮机构

Fig. 14 Filter wheel mechanism in high and low temperature test chamber

将滤光轮机构竖直放置在高低温试验箱内,驱动电机的线缆通过高低温试验箱的通风口与外部的控制器连接,然后用橡胶塞堵住通风口。滤光轮所用减速电机的电流大小为 1.2 A ,输出转速为 0.3 rad/s 。将高低温试验箱设置不同的温度来模拟望远镜的使用环境温度,先进行降温测试,具体先将温度设置为 $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$,滤光轮机构静置 5 h 后驱动滤光轮,滤光轮机构能够正常切

换。然后将温度设置为 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$,滤光轮机构再静置 5 h 后驱动滤光轮,滤光轮机构能够正常切换。按此步骤每降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并静置 5 h 后驱动滤光轮,最后一次将温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 设置成 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并静置 5 h 后再驱动滤光轮。随后再将温度依次升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,并静置 5 h 后驱动滤光轮,直到温度升至 $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并静置 5 h 后驱动滤光轮。整个测试过程中,滤光轮均能够正常切换无卡滞,验证了滤光轮机构能够适应望远镜系统的工作温度变化。

测试过程中如果出现卡滞,可能是由于温度变化造成不同材料的零部件热胀冷缩程度不同,运动副之间间隙过小而出现卡滞。这种情况应更换零部件材料,尽量使用同种材料或热膨胀系数低的材料,或在条件允许的情况下更换力矩更大的电机。

4 结 论

为了满足大口径主焦点望远镜多谱段观测的要求,本文设计了一种沿光轴圆周均布式的滤光轮机构,与传统形式的滤光轮机构相比,该机构充分利用光轴圆周空间,能够减小对主镜的遮拦。对滤光轮机构进行了模态分析,其一阶固有频率为 108 Hz ;对滤光轮机构的切换精度即偏心误差进行了测量,最大偏心误差为 0.1 mm ;滤光片面形检测结果表明,各滤光片透射波前误差 RMS 值均优于 $\lambda/30$,滤光轮机构在望远镜工作温度 $-35\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内均能正常切换无卡滞,满足大口径主焦点望远镜多谱段观测的要求。

作者贡献声明:

姜海波:结构设计,试验设计及数据分析,论文构思和撰写;

赵金宇:测量试验指导,研究活动的管理和协调;

郭鹏:论文审核与编辑写作;

贺昌龙、邵亮:试验数据分析;

姜晰文:初稿撰写。

参考文献:

- [1] 曹玉岩,王建立,初宏亮,等. 大口径光学透镜的双级柔性支撑结构设计[J]. 光学精密工程,

2021, 29(8): 1867-1880.

CAO Y Y, WANG J L, CHU H L, *et al.* Design and analysis of bi-flexible mounting structure for

- large optical lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1867-1880. (in Chinese)
- [2] 姜晰文, 赵金字, 吕天宇, 等. 大口径主焦点式光学系统的设计与装调[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(23): 2987-2994.
- JIANG X W, ZHAO J Y, LÜ T Y, *et al.* Design and alignment of large-aperture prime focus optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 2987-2994. (in Chinese)
- [3] 刘昌华. 主焦点式大口径大视场光学校正镜及拼接探测器关键技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2023.
- LIU CH H. *Key Technologies of Corrector Lens and Mosaic Sensors for Large Aperture and Wide-Field Telescope*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [4] DOI Y, NAKAYA H, KAMATA Y, *et al.* HyperSuprime: mechanics [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2006: 62693J.
- [5] MIYAZAKI S, KOMIYAMA Y, NAKAYA H, *et al.* HyperSuprime: project overview [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2006: 62690B.
- [6] NORDBY M, BOWDEN G, FOSS M, *et al.* Mechanical design of the LSST camera[C]. *Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation*. Marseille, France. SPIE, 2008: 70182H.
- [7] SEBAG J, ANDREW J, ANGELI G, *et al.* LSST telescope modeling overview [J]. *SPIE*, 2016, 9911: 99112E-1-99112E-9.
- [8] GRESSLER W J. LSST telescope and site status [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VI*. Edinburgh, United Kingdom. SPIE, 2016: 99060J.
- [9] 芮道满, 张程, 李文茹, 等. 大型高精度消像旋机构的设计与验证[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(12): 1849-1856.
- RUI D M, ZHANG CH, LI W R, *et al.* Design and verification of large high precision derotator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(12): 1849-1856. (in Chinese)
- [10] 孔旭, 杨戟, 郑宪忠, 等. 中国科学技术大学-中国科学院紫金山天文台 2.5 米大视场巡天望远镜(墨子巡天望远镜)[J]. *青海科技*, 2024, 31(1): 10-24.
- KONG X, YANG J, ZHENG X ZH, *et al.* The university of science and technology of China-purple Mountain observatory 2.5 m wide field survey telescope [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2024, 31(1): 10-24. (in Chinese)
- [11] 鲍赫, 李志来, 柴方茂, 等. 静止轨道光学遥感器的滤光轮机构[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3357-3363.
- BAO H, LI ZH L, CHAI F M, *et al.* Filter wheel mechanism for optical remote sensor in geostationary orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3357-3363. (in Chinese)
- [12] 贾慧丽, 王跃, 王庆颖, 等. 大尺寸薄壁轴承滤光轮机构的设计与试验[J]. *航天器环境工程*, 2018, 35(05): 493-499.
- JIA H L, WANG Y, WANG Q Y, *et al.* Design and test of filter wheel mechanism based on large thin-wall bearing [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(5): 493-499. (in Chinese)
- [13] 苏燕芹, 张景旭, 陈宝刚, 等. 谐波分析方法在提高精密转台回转精度中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 274-278.
- SU Y Q, ZHANG J X, CHEN B G, *et al.* Harmonic analysis application in accuracy improvement of precise turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 274-278. (in Chinese)

作者简介:



姜海波(1991—),男,辽宁北镇人,硕士,助理研究员,2014年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事地基大型光学望远镜光机结构设计方面的研究。E-mail: hitjhb@126.com

通讯作者:



赵金字(1977—),男,内蒙古赤峰人,博士生导师,研究员,2006年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事数字图像信号处理软硬件技术、图像跟踪与目标识别、图像恢复等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn