

倒立式三视场施密特望远镜关键技术研究

赖新华 李金鹏 彭润富 杨永兴 王鑫蕊 石旺舟

Research on key technologies of inverted 3-FOV Schmidt telescope

LAI Xinhua, LI Jinpeng, PENG Runfu, YANG Yongxing, WANG Xinrui, SHI Wangzhou

引用本文:

赖新华, 李金鹏, 彭润富, 等. 倒立式三视场施密特望远镜关键技术研究[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1286–1293. DOI: 10.5768/JAO202344.0601001

LAI Xinhua, LI Jinpeng, PENG Runfu, et al. Research on key technologies of inverted 3-FOV Schmidt telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1286–1293. DOI: 10.5768/JAO202344.0601001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0601001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拼接式望远镜主镜衍射效应研究

Research on diffraction effect of primary mirror in segmented telescope

应用光学. 2020, 41(3): 447–454 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301003>

大视场反射式施密特光学系统设计与检测

Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view

应用光学. 2020, 41(2): 265–269 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201005>

大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计

Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture

应用光学. 2021, 42(5): 767–774 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501002>

地平式望远镜跟踪机架结构设计与分析

Structure design and analysis of tracking frame for horizontal telescope

应用光学. 2020, 41(5): 885–890 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501002>

红外自适应系统中双波段望远镜与红外物镜设计

Design of dual-waveband telescope and infrared objective in infrared adaptive system

应用光学. 2017, 38(1): 19–23 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101004>

基于改进空间频率域采样的天文光干涉望远镜阵列优化

Astronomy optical interferometric telescope array optimization based on modified UV sampling method

应用光学. 2017, 38(4): 555–561 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1286-08

倒立式三视场施密特望远镜关键技术研究

赖新华^{1,2,3}, 李金鹏^{3,4}, 彭润富^{1,2,3}, 杨永兴^{3,4}, 王鑫蕊⁴, 石旺舟²

(1. 上海市星系与宇宙学半解析研究重点实验室, 上海 200234; 2. 上海师范大学数理学院, 上海 200234; 3. 中国科学院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042; 4. 中国科学技术大学南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042)

摘要: 研制了基于三分区镜的倒立式三视场施密特型望远镜, 对其关键技术进行了分析。利用正三棱锥的几何对称性, 推导了3个视场的视轴夹角与分区镜面夹角之间的关系式, 设计了用于实现多视场观测功能的三分区镜; 通过有限元法分析了倒立式施密特望远镜主镜重力形变对像质的影响, 阐述了检测光路关键参数对施密特修正镜加工误差的影响程度, 采用蒙特卡罗法对该光学系统的杂散光进行了分析。最后对整个光学系统进行了实验检测, 检测结果表明: 实际研制的三分区镜镜面之间的夹角为 133.08° , 可同时对相互垂直的3个视场进行观测; 该望远镜光学系统的 $PV = 0.614 \lambda$, $RMS = 0.105 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。该系统可用于地球空间姿态测量, 拓展了施密特望远镜的应用范围。

关键词: 施密特望远镜; 三分区镜; 重力形变; 施密特修正镜

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0601001

Research on key technologies of inverted 3-FOV Schmidt telescope

LAI Xinhua^{1,2,3}, LI Jinpeng^{3,4}, PENG Runfu^{1,2,3}, YANG Yongxing^{3,4}, WANG Xinrui⁴, SHI Wangzhou²

(1. Shanghai Key Lab for Astrophysics, Shanghai 200234, China; 2. Mathematics and Science College of Shanghai Normal University, Shanghai 200234; 3. CAS Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Nanjing 210042, China; 4. Nanjing Research Center of Astronomical Instruments, University of Science and Technology of China, Nanjing 210042, China)

Abstract: An inverted 3-FOV (field of view) Schmidt telescope based on 3-facet mirror was developed, and its key technical problems were studied. Based on the geometric symmetry of regular triangular pyramid, the relationship between the visual axis angle of 3 FOVs and the angle of facet mirror was derived, and a 3-facet mirror was designed to realize the multi-field observation function. The influence of the gravity deformation of primary mirror of inverted Schmidt telescope on the image quality was analyzed by finite element method. The influence of the key parameters of testing optical path on the processing error of Schmidt corrector was expounded. The stray light of optical system was studied by Monte Carlo method. Finally, the whole optical system was tested experimentally, and a 3-facet mirror was actually developed. Results show that the included angle between the mirrors is 133.08° , which can observe 3 FOVs perpendicular to each other at the same time. The test result of the telescope optical system is $PV = 0.614 \lambda$, $RMS = 0.105 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). The system can be used to measure the earth attitude in space, which expands the application of Schmidt telescope.

Key words: Schmidt telescope; 3-facet mirror; gravitational deformation; Schmidt corrector

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金 (12003067)

作者简介: 赖新华 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测研究。E-mail: 1000494964@smail.shnu.edu.cn

通信作者: 李金鹏 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光学检测研究。E-mail: lijinpeng@nairc.edu.cn

石旺舟 (1963—), 男, 教授, 主要从事光电功能薄膜材料与器件研究。E-mail: wzshi@shnu.edu.cn

引言

施密特望远镜在天文观测等领域具有广泛应用,因此国内外学者对施密特望远镜的关键技术进行了深入研究。李德培将云南天文台的施密特望远镜改装成水平结构,用于观测人造卫星及空间碎片^[1]。EGLITIS I 研究了直角坐标测定和测光方法,对巴尔顿天文台的施密特望远镜扫描仪进行了精度评估^[2]。俞金梅将一种缩焦器应用在一台施密特卡塞格林式望远镜上,缩短了焦距,从而可以使用 CCD 相机来代替照相底片^[3]。周志中采用 2 台步进电机取代复杂驱动系统,改进了北京天文台的施密特望远镜,实现了计算机控制^[4]。WILL-STROP R V 研究了具有 3 个反射面的 Mersenne-Schmidt 望远镜,采用了更为紧凑的设计,使得该望远镜有更大的相对口径和视场^[5]。左恒等人为装卸 LAMOST 的子镜专门设计了大型自动机械装卸装置,实现了大跨度、高精度自动定位,在望远镜的维护中发挥了重要的作用^[6]。董云芬等人推导了斜入射反射式施密特校正板方程,利用补偿器和干涉仪实现了面形的高精度检测,拓展了施密特望远镜在大视场、宽波段天文观测方面的研究^[7]。雷存栋等人设计了离轴全反式施密特光学系统,可应用于宽波段、高分辨率紫外成像系统^[8]。HRABOVSKY M 研究了有、无施密特校正板情况下的施密特望远镜系统,分析了具有 1m Rad 缺陷的系统三维能量分布^[9]。蒋兆基等人在北京天文台采用 Thomson CCD 进行 BVRI 四色测光,论证了 BAO-CCD 系统在施密特望远镜上测光的可行性^[10]。

以上对施密特望远镜的研究,工作方式大多是指向不同天顶角进行观测,直接获取天体信息。随着航天领域需求不断扩大,施密特望远镜的应用得以扩展。例如,倒立式施密特系统的提出,为同时观测多天区天体、测量自身空间姿态信息提供了一种新的思路。借助于倒立式施密特望远镜特有的大视场、多天区观测优势,可以不断提高搭载平台的姿态测量精度,扩大其应用范围。例如, DANIELE M 提出了一种三视场 Schmidt-Cassegrain 结构星敏感器,能够实现对 3 个天区同时观测,从而反演出搭载平台的姿态信息^[11]。WU Feng 对多个视场(FOV)的姿态计算方法进行了研究,为附近的飞行器可提供准确的导航信息^[12]。JOZEF C 使用地球传感器数据确定旋转轴姿态技术,用于航天器姿态的控制^[13]。还有学者聚焦于多

视场星敏感器的工作模式,提升卫星的空间姿态测量精度^[14-16]。

虽然倒立式三视场施密特望远镜已经有相应的科研成果,但更多关注的是在应用方面,对于其本身的关键技术研究较少。针对基于三分区镜的倒立式三视场施密特望远镜系统,本文研究了其中的关键技术。采用数学几何模型分解方法,对实现多天区观测功能的三分区镜设计方法进行了讨论;使用有限元法分析主镜重力形变,剖析其对光学系统像质的影响;利用光学设计软件对施密特修正镜加工误差进行仿真,进而探讨对像质的影响程度;应用蒙特卡罗法,研究了该系统的杂散光;最后,对望远镜光学系统进行了实验检测,验证了该倒立式施密特望远镜能够进行高精度成像。

1 基本原理

1.1 倒立式三视场施密特望远镜系统

本文研究的倒立式三视场施密特望远镜光路如图 1 所示。主镜为口径 300 mm 的球面镜,光学系统总长约为 1 920 mm,3 个视场的视轴夹角互为 90°。三条主光线同时从空间中不同视场入射,由三分区镜反射后互相平行。该平行光经过施密特修正镜组,再由主次镜反射聚焦于卡塞格林焦面上。最后在卡塞格林焦面上安装探测相机,由相机采集得到 3 个视场方向的叠加星图。

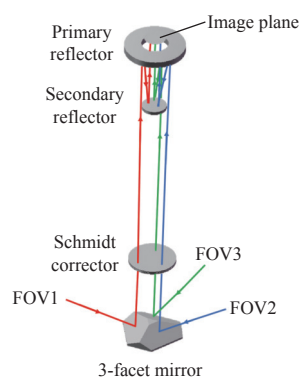


图 1 倒立式三视场施密特望远镜光路图

Fig. 1 Diagram of light path of inverted 3-FOV Schmidt telescope

1.2 三分区镜设计方法

三分区镜是该望远镜系统的重要组成部件,为了实现三视场观测,需要对其进行研究和设计。三分区镜光学理论模型如图 2 所示。图 2 中 3 条主光线同时入射三分区镜,分别交于 A、B、C 点,

且延长线交于O点,反射后平行进入光学系统。连接点O、A、B、C,建立三分区镜光反射数学模型,如图3(a)所示。图3中箭头指示光线行进方向。

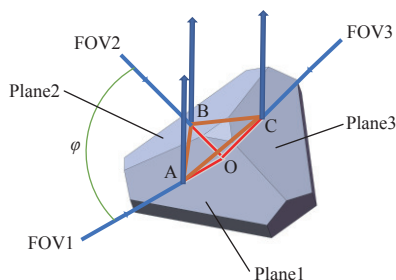


图2 三分区镜数学模型提取

Fig. 2 Mathematical model extraction of 3-facet mirror

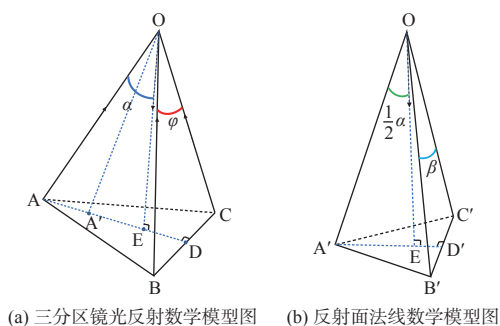


图3 三分区镜模型分解

Fig. 3 Model decomposition

由3条光轴的对称性可知,该数学模型为正三棱锥。设入射光之间夹角为 φ ,OE为高,OA'为 $\angle AOE$ 的角平分线, $\angle AOE = \alpha$ 。由反射定律可知,OA'为反射面1的法线。则有:

$$\sin \alpha = \frac{AE}{OA} \quad (1)$$

在 $\triangle OBC$ 中,有:

$$\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{BC}{2OC} \quad (2)$$

由(1)式、(2)式可得到 α 与 φ 之间的关系式为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{2\sqrt{3}}{3} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right) \quad (3)$$

类似地,作出角平分线OB'、OC',连接点A'、B'和C',得到由法线组成的新正三棱锥,如图3(b)所示。在新三棱锥中,令 $\angle B'OC' = \beta$ (即三分区镜3个平面间的夹角),同理有:

$$\beta = 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,可得:

$$\beta = 2\arcsin\left\{\frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left[\frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{2\sqrt{3}}{3} \sin \frac{\varphi}{2}\right)\right]\right\} \quad (5)$$

(5)式即是三视场视轴夹角与分区镜面夹角之间的代数关系式。

2 倒立式三视场施密特望远镜关键技术研究

2.1 主镜重力形变分析

望远镜主镜加工时镜面朝上,实际使用时镜面朝下,两者产生的重力形变不同,由此产生的面形差别是影响整个系统波像差的重要因素,因此,需要对主镜重力形变进行研究。主镜采用三点支撑^[17-18],材料是微晶玻璃,口径为300 mm,内径为80 mm,球面曲率半径为1 151.63 mm,边缘厚度为35 mm。使用有限元分析软件构建三维模型,如图4(a)所示,划分的有限元分析网格如图4(b)所示。

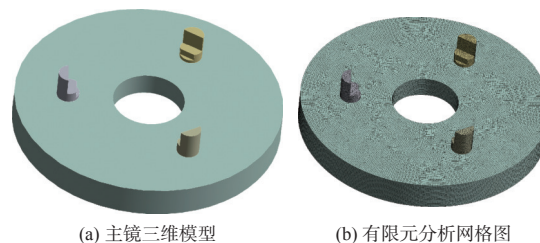


图4 有限元分析软件构建模型

Fig. 4 Finite element analysis software modeling

为求出合理的支撑半径,需要对不同支撑半径下的镜面形变进行研究。采用等间距划分方法,对不同支撑半径下镜面重力形变进行分析,最小支撑半径如图5(a)所示,最大支撑半径如图5(b)所示。所得面形RMS随支撑半径变化如图6(a)所示。由图6(a)可知,支撑半径为95 mm时面形改变最小,此时 $RMS = 3.80 \times 10^{-5}$ mm。考虑到实际加工和装调,实际选取的主镜支撑半径为90 mm,在该支撑半径下,主镜面形变化呈现三角状分布,如图6(b)所示。由图6(b)可知,离支撑点越远,形变量越大,最大形变量为 7.36×10^{-5} mm。

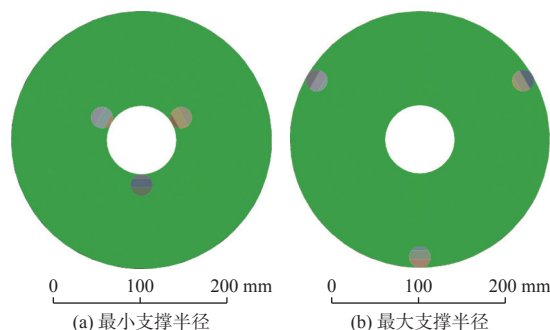


图5 支撑半径建模

Fig. 5 Support radius modeling

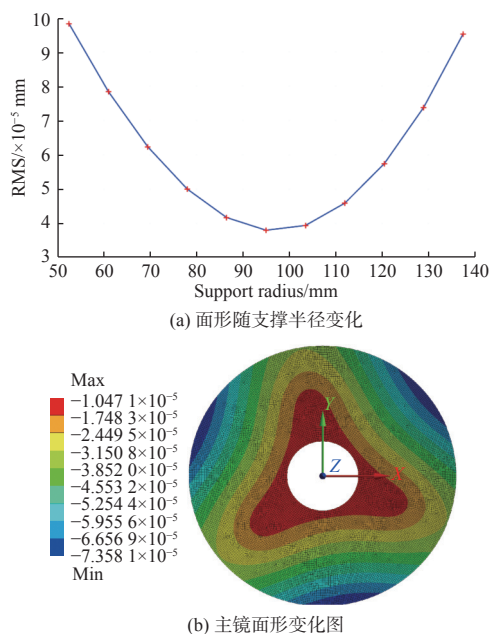


图6 支撑半径选择

Fig. 6 Support radius selection

将面形的重力形变数据导入 MATLAB 软件, 通过算法提取出前 66 项 Zernike 面形系数。使用光学设计软件建模, 通过高斯拟合分析点扩散函数 (PSF) 的半高全宽 (FWHM)^[19], 如图 7 所示, 分别展示了 X 方向导入 Zernike 系数前后的 PSF。导入 Zernike 系数后 FWHM 由 $2.46 \mu\text{m}$ 退化为 $2.48 \mu\text{m}$, 增大了 $0.02 \mu\text{m}$ 。同理, Y 方向也求得 FWHM 增大了 $0.02 \mu\text{m}$ 。由此表明, 该望远镜主镜受重力影响

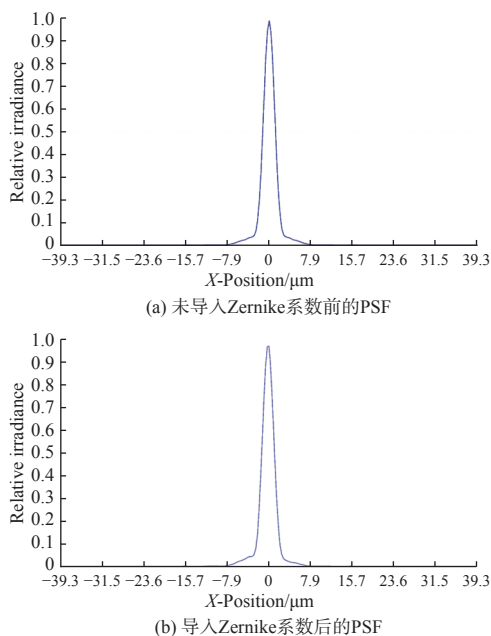
图7 X 方向的 PSF

Fig. 7 PSF in X direction

较小, 不影响光学系统高精度成像。

2.2 施密特修正镜的加工误差分析

施密特修正镜的加工精度将影响光学系统的成像质量, 因此, 需要对修正镜的加工误差进行研究。使用光学设计软件建立检测光路模型, 分析检测光路关键参数导致的修正镜加工偏差, 得到修正镜的误差范围。将修正镜的误差导入望远镜光学系统中, 分析得到其对望远镜像质的影响。

施密特修正镜检测光路如图 8 所示。干涉仪到补偿镜前表面的距离为 l , 补偿镜的厚度、前后表面的曲率半径分别为 t 、 r_1 和 r_2 , 补偿镜后表面到待测修正镜前表面的距离为 d , 待测修正镜后表面到球面检验镜的距离为 s , 且球面检验镜的曲率半径为 r_3 。检测过程中需要使用测量杆进行中心对准, 测量杆自身的长度精度为 0.02 mm , 此时对中心的偏差达到 mm 级别, 可将 d 和 s 的公差变化范围设为 $\pm 1 \text{ mm}$ 。镜片厚度在加工过程中通过千分表进行测量, 补偿镜厚度 t 的公差范围为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。根据实际加工能力, r_1 、 r_2 、 r_3 的公差范围可达到 $\pm 0.02\%$, 修正镜非球面曲率半径 R 的公差可达到 $\pm 0.03R/1000$ 。实际研制的施密特修正镜组由 2 个口径相同、接近平行平板的修正镜 1 和修正镜 2 组成, 其作用是扩大视场及补偿色差。考虑以上检测参数误差, 得到修正镜 4 阶和 6 阶非球面系数, 如表 1 所示。

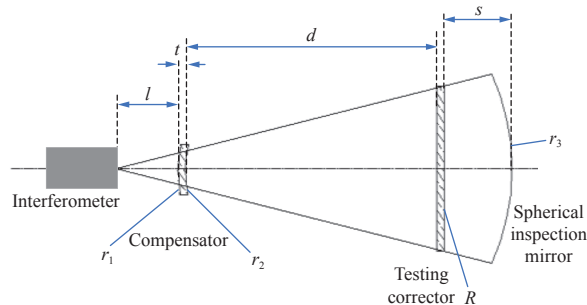


图8 施密特修正镜检测光路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of detecting optical path of Schmidt corrector

考虑到以上各种检测误差, 当修正镜 1 取 $R' = 5.19 \times 10^4 \text{ mm}$, $a'_4 = -2.25 \times 10^{-10}$, $a'_6 = 1.42 \times 10^{-17}$, 和修正镜 2 取 $R'' = -2.55 \times 10^4 \text{ mm}$, $a''_4 = 4.30 \times 10^{-10}$, $a''_6 = 2.80 \times 10^{-16}$ 时, 系统波像差最大, 望远镜系统波像差由 0.0067λ 退化到 0.039λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), FWHM 由 5.16 退化到 5.97 。通过分析施密特修正镜检测光路中镜间距、补偿镜曲率半径等参数误差,

表 1 加入检测公差后修正镜的非球面系数

Table 1 Aspheric coefficients of corrector after adding tolerance

参数	d/mm		s/mm		r_1 /mm		r_2 /mm		t/mm		r_3 /mm	
修正镜1		535.25	537.25	163.90	165.90	135.80	135.85	113.05	113.09	9.98	10.02	-840.73 -841.07
	a_4	-2.25E-10	-2.18E-10	-2.24E-10	-2.19E-10	-2.21E-10	-2.22E-10	-2.22E-10	-2.21E-10	-2.21E-10	-2.21E-10	-2.21E-10 -2.22E-10
	a_6	1.42E-17	1.44 E-17	1.44 E-17	2.71E-17	2.05 E-17	2.10 E-17	2.09 E-17	2.06 E-17	2.06E-17	2.10 E-17	2.19E-17 1.97E-17
修正镜2		521.68	523.68	163.90	165.90	—*	—	-95.48	-95.52	10.98	11.02	-840.73 -841.07
	a_4	4.44E-10	4.30E-10	4.41E-10	4.33E-10	—	—	4.37E-10	4.37E-10	4.37E-10	4.37E-10	4.36E-10 4.38E-10
	a_6	2.80E-16	2.41E-16	2.77E-16	2.43E-16	—	—	2.61E-16	2.59E-16	2.60E-16	2.60E-16	2.57E-16 2.63E-16

说明: 此处修正镜2的补偿镜面1为平面, 利用平面干涉仪可以实现高精度测量, 不需要再考虑曲率半径的偏差。

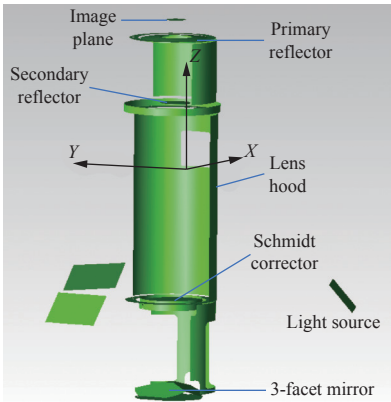
可知修正镜的加工误差不会对光学系统像质造成影响, 验证了检测方法的可靠性。

2.3 杂散光分析

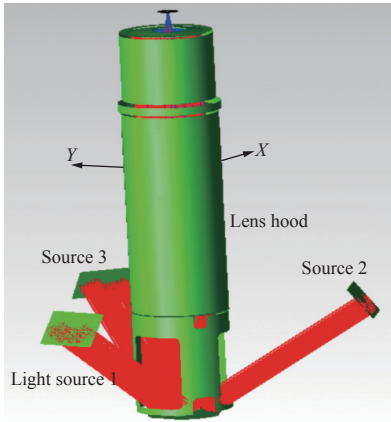
杂散光也会对望远镜成像质量有影响, 需要对倒立式三视场施密特望远系统进行杂散光分析。本文通过 TracePro 软件建模, 采用蒙特卡罗法对望远镜光学系统进行光线追迹^[20], 分析杂散光一次散射对像质的影响。遮光罩三维模型图如图 9(a) 所示。根据 Harvey-Shack (ABg) 散射分布模型, 分别

使用黑漆和镜面设定主镜、次镜和遮光镜筒等结构的双向反射分布函数(BRDF)参数。对不同离轴角度进行光线追迹, 图 9(b) 为离轴角 0° 的光线追迹图。

望远镜的点源透过率(PST)曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出, 随着离轴角的增大, PST 减小, 离轴角在 0°~1° 之间时 PST 下降得很缓慢; 离轴角 1.4°~1.5° 时, PST 急剧下降, 离轴角达到 1.5° 之后, PST 下降到 10⁻⁴ 量级; 随着轴外视场的继续增大, 在 2.5°~2.6° 附近又有小幅度的上升, 分析其原因, 可能是该角度下有较多杂散光由主次镜进入到探测器像面中。图 11 分别展示离轴角 $\theta=0^\circ$ 、0.2°、1.8° 和 2.8° 下像面照度图。从图 11 可以看出, 0°、0.2° 处于视场内, 主光线强度远大于杂散光, 光能量集中; 1.8° 和 2.8° 都是轴外视场角, 2.8° 轴外视场杂散光更少, 杂散光强度远远小于主光线强度。综上所述, 杂散光不影响本望远镜系统的高精度成像。



(a) 系统三维模型



(b) 0°离轴角光线追迹图

图 9 杂散光模型

Fig. 9 Stray light model

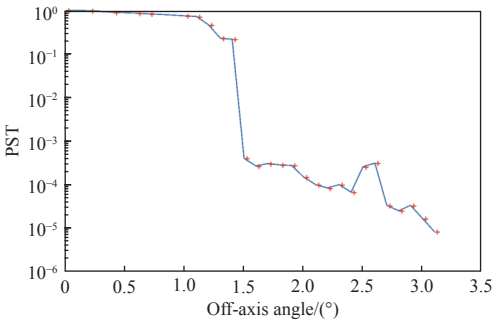


图 10 光学系统 PST 曲线

Fig. 10 PST curve of optical system

3 实验研究

3.1 三分区镜研制结果

实际使用的 3 个视场视轴间的夹角为 90°, 代

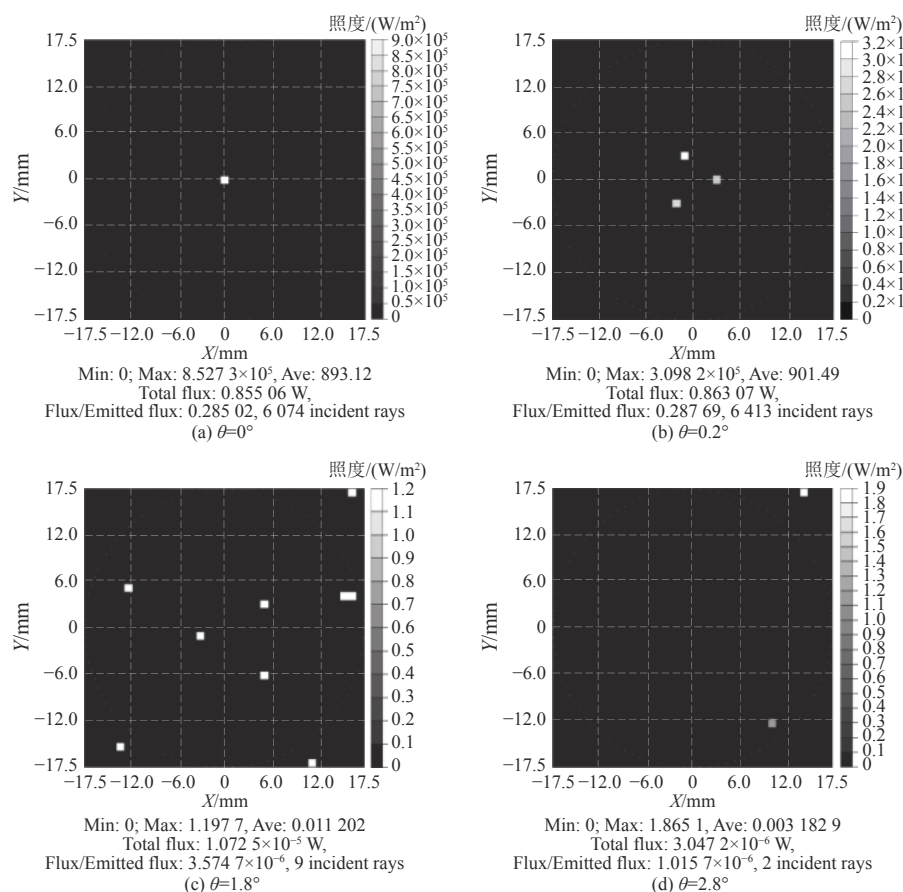


图 11 不同离轴角下像面照度图

Fig. 11 Irradiation diagrams of image plane at different off-axis angles

入式(5)可求得 $\beta = 46.92^\circ$, 即三分区镜面之间的夹角为 133.08° , 实际口径为 305.4 mm, 采用微晶玻璃镀铝膜, $0.45 \mu\text{m} \sim 0.85 \mu\text{m}$ 波段的平均反射率大于 90%。三分区镜实物和检测结果图如图 12 所示, 可以看出, 3 个面的 RMS 分别为 0.022λ , 0.023λ , 0.011λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

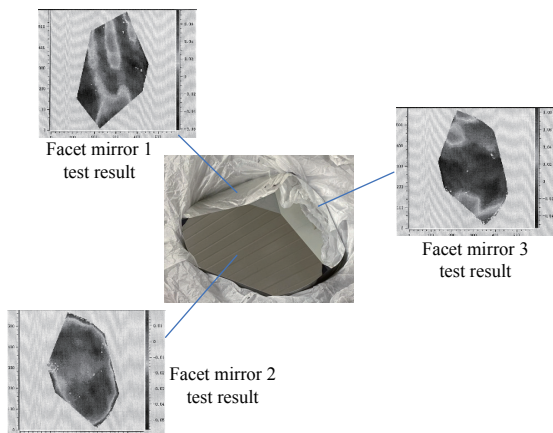


图 12 三分区镜实物及各面检测结果

Fig. 12 3-facet mirror and test results of each surface

3.2 倒立式施密特望远镜检测实验

实际研制了基于三分区镜的倒立式施密特望远镜, 主镜口径为 300 mm, 望远镜高约 1 920 mm, 如图 13(a) 所示。使用 4D 干涉仪对光学系统进行实验检测, 图 13(b) 为检测结果的波前图, 得到 $PV = 0.614 \lambda$, $RMS = 0.105 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。在该望远镜光学系统中, 三分区镜只起到改变光传播方向的作用, 且三分区镜面形较好, 对望远镜成像几乎没有影响。因此, 为了配合 4D 干涉仪的测量, 使用标准镜替换三分区镜, 可以仿真正常的工作状况。



(a) 检测现场

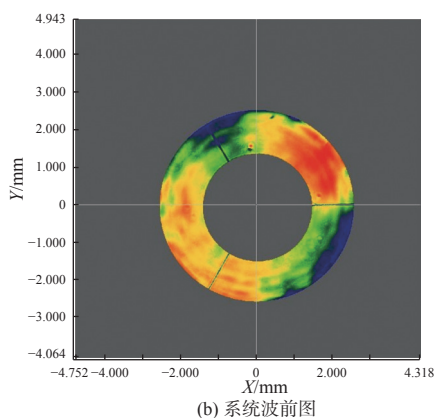


图 13 光学系统实验检测

Fig. 13 Optical system experiment

4 结论

本文主要研究了倒立式三视场施密特望远镜系统的光机关键技术。采用构建数学几何模型的方法对三分区镜的设计进行了研究,结果显示,当 3 个视场互相垂直时三分区镜面间夹角为 133.08° ,可用于多视场观测。利用有限元法对主镜重力形变进行了探究,分析了其对像质的影响,分析结果表明,主镜重力形变使得光学系统的 FWHM 增大了 $0.02\ \mu\text{m}$ 。针对施密特修正镜加工误差进行仿真分析,得出加工误差对系统像质影响最大时 $\text{RMS}=0.039\ \lambda$ 。使用蒙特卡罗法对系统杂散光进行探讨,由系统 PST 图可知杂散光不影响光学系统的高精度成像。对整个望远镜系统进行实验检测,得到 $\text{PV}=0.614\ \lambda$, $\text{RMS}=0.105\ \lambda$ 。该研究为倒立式多视场施密特望远镜系统光机关键技术提供了技术支撑,拓展了施密特望远镜的应用范围。

参考文献:

- [1] 李德培. “水平式”施密特(Schmidt)望远镜光学系统的调整方法与步骤[J]. *天文研究与技术*, 2009, 6(3): 215-219.
LI Depei. The adjustment methods of the optical systems of "level mounting" Schmidt telescopes[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2009, 6(3): 215-219.
- [2] EGLITIS I, ANDRUK V. Processing of digital plates 1.2 m of baldone observatory Schmidt telescope[J]. *Open Astronomy*, 2017, 26(1): 7-17.
- [3] 俞金梅. $\phi 30$ 公分施密特望远镜 CCD 缩焦器的设计[J]. *紫金山天文台台刊*, 1997(1): 41-44.
YU Jinmei. Design of a focal reducer for ccd camera of a $\phi 30$ cm Schmidt cassegrain telescope[J]. *Publications of Purple Mountain Observatory*, 1997(1): 41-44.
- [4] 周志中. 北京天文台施密特望远镜驱动系统的改进设计[J]. *云南天文台台刊*, 2000(3): 42-46.
ZHOU Zhizhong. Improvement of the dirve system of the Schmidt telescope at Beijing Astronomical Observatory[J]. *Publications of the Yunnan Observatoty*, 2000 (3): 42-46.
- [5] WILLSTROP R V. The Mersenne-Schmidt: a three-mirror survey telescope[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1984, 210(3): 597-609.
- [6] 左恒, 姜方华, 李国平, 等. 望远镜主镜装卸机械手的液压系统设计与研究[J]. *液压与气动*, 2018(8): 70-75.
ZUO Heng, JIANG Fanghua, LI Guoping, et al. Hydraulic system design for manipulator of large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(8): 70-75.
- [7] 董云芬, 王波, 张盈盈, 等. 大视场反射式施密特光学系统设计与检测[J]. *应用光学*, 2020, 41(2): 265-269.
DONG Yunfen, WANG Bo, ZHANG Yingying, et al. Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(2): 265-269.
- [8] 雷存栋, 郑列华, 车英. 离轴全反射施密特系统设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(11): 55-59.
LEI Cundong, ZHENG Liehua, CHE Ying. Optical design for off-axis all-reflective Schmidt system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 55-59.
- [9] HRABOVSKY M, PALATKA M, SCHOVANEK P, et al. The optical analysis of the proposed Schmidt camera design[R] //Auger Technical Memo GAP-99-025. Czechia: Palacky University, 1999.
- [10] 蒋兆基, 李泳, 陈建生. 施密特望远镜 CCD BVRI 测光系统的初步研究[J]. *天体物理学报*, 1992(1): 47-53.
JIANG Zhaoji, LI Yong, CHEN Jiansheng. BAO-CCD BVRI photometry[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1992(1): 47-53.
- [11] MORTARI D, ROMOLI A. StarNav III: a three fields of view star tracker[J]. *IEEE Aerospace Conference*, 2002, 1: 1-57.
- [12] WU F, ZHU X, XIANG R, et al. Image simulation for 3-FOV daytime star sensor based on ray tracing[J]. *Advances in Modelling & Analysis B*, 2017, 60(2): 493-504.
- [13] VAN Der HA J C, JANSSENS F L. Spin-axis attitude determination from earth chord-angle variations for geosta-

- tionary satellites[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(5): 1598-1608.
- [14] HUA J, ZHANG T, ZHU H, et al. A new method of star catalog optimization for multi-fov star sensor[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. NewYork: IEEE, 2014: 3529-3533.
- [15] 叶生龙, 魏新国, 樊巧云, 等. 多视场星敏感器工作模式设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010(10): 1244-1247.
YE Shenglong, WEI Xinguo, FAN Qiaoyun, et al. Operation mode design of multi-FOV star sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010(10): 1244-1247.
- [16] 丁亚雪, 王磊. 三视场星敏感器的研究[J]. *电子世界*, 2014(12): 213-213.
DING Yaxue, WANG Lei. Research on three field of view star sensors[J]. *Electronics World*, 2014(12): 213-213.
- [17] 武东城, 高松涛, 吴志会, 等. 高精度光学平板在三点支撑下自重变形的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 157-165.
WU Dongcheng, GAO Songtao, WU Zhihui, et al. Gravity deformation of high-precision optical flat under three-point support[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 157-165.
- [18] FABRIZIO M D, D'ARCO A, MOU S, et al. Performance evaluation of a THz pulsed imaging system: point spread function, broadband THz beam visualization and image reconstruction[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 562.
- [19] 邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 715-720.
DENG Chao. Analysis on stray light elimination for space solar telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 715-720.
- [20] 潘森, 许孝芳, 李金鹏, 等. 2 m环形地基太阳望远镜系统杂散光分析[J]. *光学仪器*, 2020, 42(3): 65-70.
PAN Sen, XU Xiaofang, LI Jinpeng, et al. The stray light analysis of 2 m ring ground-based solar telescope[J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(3): 65-70.