

大口径离轴反射式星模拟器光机结构设计

石宝领¹,王永宪²,朱俊清²,关英俊¹

(1. 长春工业大学 机电工程学院,吉林 长春 130012;2. 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:根据高精度星敏传感器地面测试任务中模拟无穷远处目标星体的实际应用需求,针对常规星模拟器体积庞大,装调及校准困难等实际问题,设计了一种大口径、长焦距、可实现自准直功能的离轴反射式星模拟器光机结构,用来模拟无穷远处的恒星所发出的平行光。采用离轴反射式光学设计,避免中心遮拦。采用光管焦面分光方式,通过半透半反式分光镜的反射与透射功能实现光路的传递,压缩了镜筒长度;通过探测器接收分光镜透射的光像可直接辨别光学系统的准直性能,便于装调,且方便后期使用与校准;采用顶丝调节姿态降低了装调难度。实际测试结果表明:光机系统的入瞳口径 $\phi 210$ mm,出瞳距离 2100 mm,整机的系统波像差(rms)测量值为 0.030λ ,可精确模拟0~7等星,工作波段500~800 nm,满足当前对高精度星敏感器的标定技术指标要求,为星模拟器的高效快速研制提供了一种设计方法。

关键词:星模拟器;光机结构;离轴反射;自准直

中图分类号:TP73;TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.019

Design of opto-mechanical structure of large aperture off-axis reflector star simulator

SHI Bao-ling¹, WANG Yong-xian², ZHU Jun-qing², GUAN Ying-jun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In this paper, based on the practical application requirements of simulating infinitely distant target stars in high-precision star sensor ground testing tasks, and in view of the practical problems of large volume, difficult installation and calibration of conventional star simulators, an opto-mechanical structure of off-axis reflector star simulator with large aperture, long focal length and self-collimation function is designed to simulate the parallel light emitted from stars at infinitely distant distances. The design adopts off-axis reflective optical design to avoid center blocking. By adopting the focal plane splitting method of the optical tube, the transmission of the optical path through the reflection and transmission function of the semi-transparent semi-trans spectroscopy is realized, and the length of the mirror tube is compressed. Collimation performance of the optical system can be directly distinguished by the detector receiving the light image transmitted by the beam splitter, which is easy to install and convenient for later use and calibration. And the use of the jackscrew to adjust the posture reduces the difficulty of mounting and adjusting. The actual test results show that the optical machine system has an inlet pupil aperture of $\phi 210$ mm and outlet pupil distance of 2100 mm, whose wave aberration (rms) of the whole optical machine system is 0.030λ , can accurately simulate 0~7 magnitude

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62175234)资助。

作者简介:石宝领(1996-),男,硕士研究生,主要从事星模拟器光机结构设计方面的研究。E-mail:630384823@qq.com

通讯作者:关英俊(1978-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间光机系统有限元分析及结构优化方面的研究。

E-mail:guanyingjun@ccut.edu.cn

收稿日期:2023-08-31;**修订日期:**2023-10-30

stars, and the working band is 500 ~ 800 nm. The design meets the requirement of calibration technical index for high-precision star sensor, and provides a design method for the efficient and rapid development of star simulator.

Keywords: star simulator; optical and mechanical structure; off-axis reflection; autocollimation

1 引言

星敏感器作为卫星姿态控制的三大核心器件,其不同阶段的验证及测试尤为重要。为了节约星敏感器的研制成本、降低研制过程的风险,对星敏感器地面测试标定设备开展应用研究具有重要意义^[1]。星模拟器作为星敏感器地面标定和性能检测的装置,可以通过模拟无穷远处恒星所发出的平行光来验证星敏感器的成像、星跟踪、星图辨别等性能,是航天器地面标定的热点研究方向^[2-3]。

随着星敏感器的发展,对星模拟器的标定精度要求也越来越高,因此也就需要设计更大口径、更长焦距的星模拟器设备。这对于光机结构的设计与装调等技术提出了更高的要求。民德 Carl Zeiss 公司研制出由 4 个准直光管组成的多光管式结构的静态星模拟器,可用于验证星敏感器参数的稳定性和设计的合理性^[4],但该系统造价高,体积大不便于制造和应用。美国 Eastman Kodak 公司采用光纤传光模拟星点成像原理研制的静态星模拟器,可实现对太空中三个星象点的模拟,但该静态星模拟器体积较大,且不能实时闭环工作^[5]。意大利国家天体物理研究所和帕多瓦大学联合设计了一套基于多波段发光二极管的星模拟器,可模拟宽光谱、高发光强度的恒星,辐照度最大值为 1487 W/m²^[6],但该星模拟器造价较高不便于制造。中国科学院光电技术研究所研制的用于高精度静态星敏感器标定的单星模拟器,能够对星点的成像质量、星等范围、色温范围进行高质量模拟^[7],但该系统包括一台高精度二维转台,体积庞大。哈尔滨工业大学研制了一套可同时模拟星光和背景光变化的反射式静态星模拟器,该星模拟器可实现 0 ~ 5 Mv 范围的星光模拟,视场为 28',准直性优于 ±2",有效地实现对星敏感器的实验室检测^[8],该系统体积较小但加工及装调困难,制造成本较高。中国科学院西安光学精密机械研究所研制了一套可对 6 ~ 14 Mv 范围的星等模拟,模拟精度可达 ±0.05 Mv 的静态星模拟器,该星模拟器有效地实现了在地面实验室中对星敏感器的弱光标定,但系统体积较大装调较难^[9]。北京控制工程研究所和长春理工大学联合研制的用静态可变目标

准源来模拟星点的甚高精度静态星模拟器,光谱范围达到 0.5 ~ 0.8 μm,视场为 1.2° × 1.2°,星间焦距精度优于 0.2",可用于对星敏感器的地面标定^[10],该系统精度较高但光阑外置、采用四片式分离物镜方式极大的增加了装调难度。

目前,星模拟器的发展正在朝着低误差、轻质化、高稳定性、装调简单且造价低的目标不停地前进。为满足某高精度星敏感器的标定要求,亟需研制出一种大口径、长焦距、可实现自准直功能的星模拟器。本文结合星模拟器的发展趋势、轻质化思想,考虑提升装调效率、提高系统精度、方便后期维护的设计思想,对系统的光机结构进行了详细地设计与研究。

2 工作原理

星模拟器通过提供相对于被测物体无穷远的点光源作为模拟星,通过对其大小、光度(星等值)、光谱特性、色温类型等进行精确模拟,实现对星敏感器的探测能力、空间分辨率等性能的地面标定,其工作原理如图 1 所示。星模拟器仿真计算机通过给出卫星系统当前姿态和轨道运行数据确定系统的光轴指向,通过加载星表信息文件及计算读取每一颗用作导航星的经度、纬度、星等亮度和星等能量等数据,并对各恒星的经度、纬度进行一系列的坐标变换,将三维空间图转换为星敏感器的二维平面坐标图。再通过显示控制系统进入准直光学系统,由此模拟深空中来自无穷远处的目标天体^[11-12]。

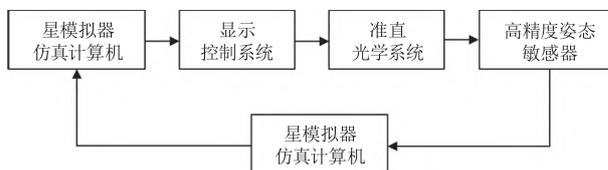


图 1 星模拟器工作原理

Fig. 1 Working principle of star simulator

3 星模拟器的设计

3.1 光学系统设计

3.1.1 光学系统主要参数

根据星模拟器的使用要求,设计了一个大口径、长焦距的星模拟器光学系统,系统的主要参数如表 1 所示。

表1 星模拟器技术指标

Tab. 1 Technical specifications of star simulator

序号	指标名称	指标要求
1	口径	不小于 200 mm
2	焦距	不小于 2000 mm, 带自准直相机, 带光轴指向, 光管焦点前后位置可调
3	系统波像差	优于 $\lambda/20$ (rms), $\lambda = 632.8 \text{ nm}$
4	星等模拟范围	0 Mv, 1 Mv, 2 Mv, 3 Mv, 4 Mv, 5 Mv, 6 Mv, 7 Mv 可设置
5	工作波段	500 ~ 800 nm

3.1.2 光学系统结构选取

光学系统结构形式主要有折射式、反射式和折反式。折射式光学系统虽然具有无中心遮拦、透过率高和稳定性强等优点, 但受光学材料限制, 很难做到大口径及轻量化设计, 应用于多星大视场模拟^[13-14]; 反射式光学系统分为同轴反射式和离轴反射式, 两者均具有无色差、工作波段宽和无特殊材料限制等优点, 多应用于单星小视场模拟^[15], 同轴反射式由于视场无法做大, 且具有中心遮拦, 要想覆盖被测系统的全口径, 准直系统的口径至少要两倍以上。离轴反射式光学系统通过孔径离轴方式或视场离轴方式消除了中心遮拦, 提高了系统的光学性能^[16-17]。折反式光学系统既有反射式系统体积较小的优点, 又可以使用后继透镜组增大视场的特点, 但系统复杂、装调困难使得精度难以提高^[18]。

为避免中心遮拦, 方便后期使用和维护, 本文光学系统采用了离轴反射式光学设计, 如图 2 所示。为实现自准直功能且便于装调, 采用光管焦面分光方式, 分光镜为半透半反式, 光纤通过分光镜反射进入, 向外发射平面波, 经平面镜反射后, 回波经分光镜透射进入, 再经折叠镜反射进入探测器, 压缩筒长, 实现自准直像的捕获。

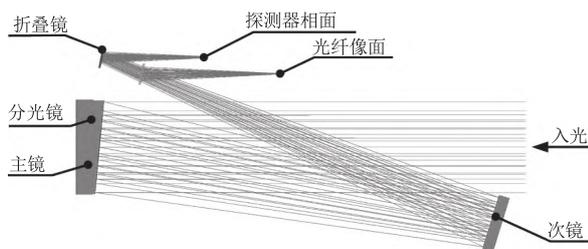


图2 星模拟器光路图

Fig. 2 Optical path diagram of the star simulator

光学设计结果参数为: 入瞳口径 $\phi 210 \text{ mm}$; 出瞳距离 2100 mm; 全视场内系统最大波像差 (rms) 小于 $\lambda/50$ 。

3.1.3 光学系统像质分析

依照上述内容对光学系统进行设计并对所设计系统进行像质评价, 优化后的光学传递函数与点列图分别如图 3、图 4 所示。由图 3 可知, 当截止频率 $v = 80 \text{ lp/mm}$ 时, $MTF > 0.3$, 由图 4 可知, 大部分光线的聚焦点都在艾里斑之内, 各视场点列图 RMS 半径均小于 $2 \mu\text{m}$, 星模拟器光学系统设计符合技术要求。

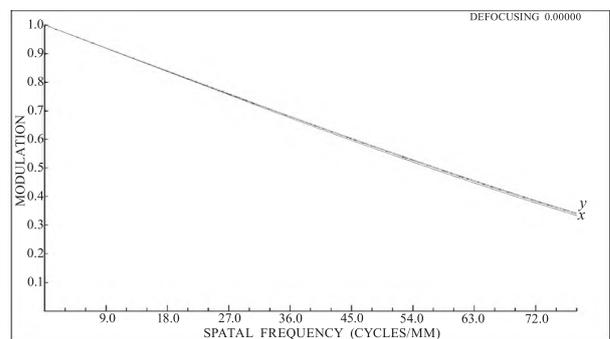


图3 光学传递函数

Fig. 3 MTF

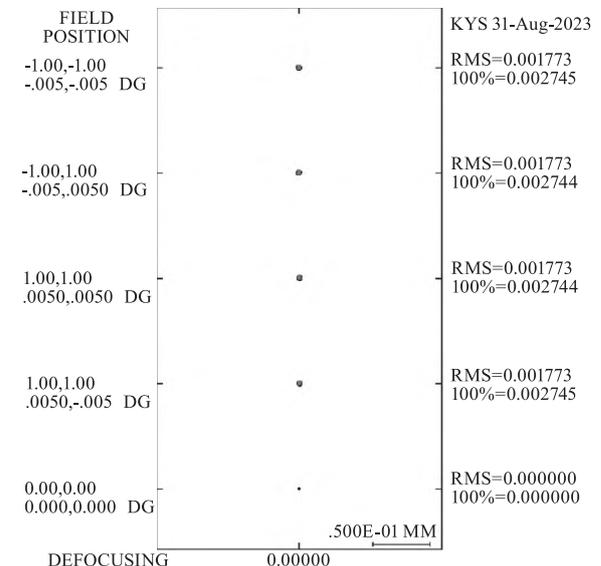


图4 点列图

Fig. 4 Point plot

3.2 机械结构设计

星模拟器的机械结构设计对光学系统成像质量至关重要, 设计时要重点考虑材料、机械结构的稳定性和装调的可行性。本文将主镜、次镜、分光镜、折叠镜、光纤与探测器分别安装在模拟器的底座上。为便

于装调,各组件均设有可微动调节的顶丝;为消除杂光(删除砸光),采用结构铝型材构成遮光罩框架,并在框架上安装遮光罩罩体,遮光罩罩体采用2 mm 铝合金板,且在遮光面板上设计有相应连接接口,遮光罩内部喷涂黑色消光漆。星模拟器整体结构如图 5 所示:图中 1 为主镜,2 为次镜,3 为分光镜,为减小整体机构尺寸,在光路中安装 4 折叠镜。考虑到安装使用的便捷性,将 5 探测器与 6 光纤均安装在具有五轴调节的底座上,7 为带万向地脚的底座,可调节平衡,8 为起到遮光挡灰作用的遮光罩。

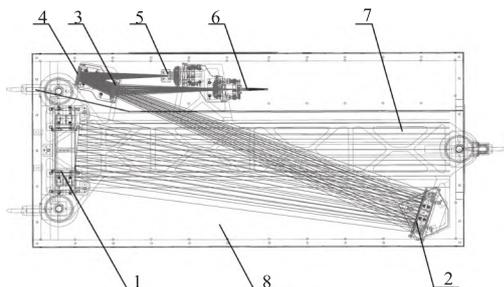


图 5 星模拟器机械结构

Fig. 5 Mechanical structure of star simulator

3.2.1 主镜组件结构设计

由于光学系统的主要组成均安装于星模拟器底座上,其整体不属于单一刚性结构,各镜组状态均为光轴水平且各镜为圆形,考虑到主镜对光机性能的影响最大,故以主镜为代表,设计分析主镜组件结构,然后对主镜进行重力分析,并计算重力作用下主镜的变形。

对比常用反射镜材料的性能参数,不难发现 SiC 的性能虽然最为优异,但其加工周期较长。这里选用低膨胀系数、硬度较高材质稳定的微晶玻璃。本文设计的各镜组件较多,考虑到设计、加工及装调难度,90°V 形安装结构形式简单,比较容易实现,可适用 100 ~ 760 mm 范围内的反射镜,故采用 90°V 形安装,对应的径向支撑是 ±45° 方向。主镜的边缘与两个水平放置的衬垫连接。其中,两个衬垫相对于中垂线对称分布。第三个衬垫设计在反射镜顶部的中心。由于反射镜镜体材料为微晶玻璃,为保证在温度变化过程中镜室的收缩不会对镜体产生应力破坏,不会影响到反射镜的面形精度,选用线膨胀系数与微晶玻璃相接近的殷钢材料作为反射镜的支撑衬垫。为避免反射镜受到撞击向前翻倒,采用黑尼龙材料的垫圈安装在反射镜的前面。主镜组件结构如图 6 所示。

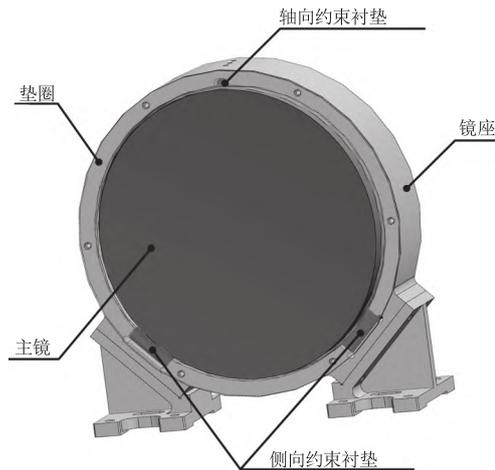


图 6 主镜组件结构

Fig. 6 Primary mirror assembly structure

对主镜组件进行有限元分析。基于殷钢支撑衬垫和尼龙弹性结构设计,主镜组件重点仿真分析重力对主镜的面形影响。如图 7 所示为主镜在重力作用下的变形,在光轴水平重力工况下,主镜组件的刚体位移为 1.94 μm,使用 matlab 自编软件对镜面节点数据进行处理,求出主镜重力工况下,RMS 值为 8.07 nm,符合单镜组件面形 RMS 优于 λ/50 的设计指标。

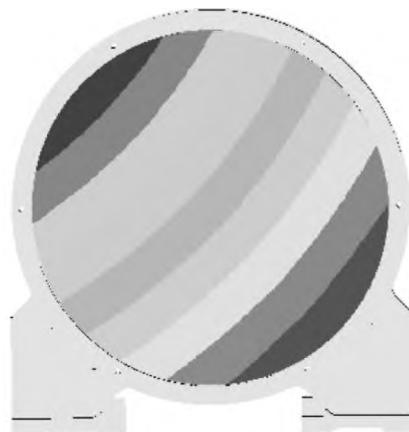


图 7 主镜自重载荷下的变形云图

Fig. 7 Primary mirror gravity analysis

3.2.2 目标光源结构设计

模拟器目标光源主要由积分球(主积分球和卫星球)、内置光源、衰减器、光纤光谱仪以及控制系统等组成,如图 8 所示。积分球的基本结构是由铝或塑料等做成的一个内部空心球。球内壁上均匀喷涂多层中性漫反射材料。球上开有多个开孔,作为入射光孔,用于安装探测器、光源等。为了保证探测器和出光孔无直射光,球内装有遮挡板,积分球上安装溴钨灯光源,主积分球上和卫星球上安装多组固

定的溴钨灯光源,可通过控制光源的开和关调整积分球的亮度。卫星球和主积分球之间安装电动可调光阑,通过调整光阑的开口大小改变卫星球进入主积分球内的能量,实现积分球出口处亮度的连续可调。

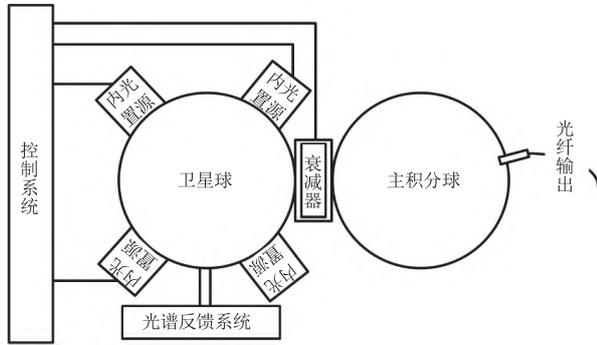


图8 目标光源设计

Fig. 8 Target light source design

4 装调与检测

4.1 星模拟器的装调

基于上述组件的优化设计,每个组件的精度得到了很好的保证。对比常规星模拟器,在该星模拟器系统装调时,通过探测器的光像可直接辨别光学系统的准直性能,通过关键节点的顶丝调节设计可对系统组装开展快速联调。首先将遮光罩罩壳底面安装,之后通过经纬仪将入光垂直面定为基准1,将主镜背部作为基准2,通过调节主镜顶丝使基准1与基准2呈现水平状态,确定主镜的位置与姿态。再根据理论设计依次将各组件放置。粗调时应注意各镜面的结构姿态,使各组件光轴面保持水平。粗调后打开目标光源,通过观察各组件上的光点及探测器的成像特点,调节各组件的顶丝,直到在探测器中心观察到清晰明亮的圆形光斑。然后安装遮光罩部分。装调完成后的星模拟器如图9所示。

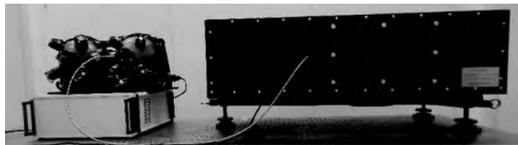


图9 星模拟器实物图

Fig. 9 Star simulator physical image

4.2 光学指标检测

4.2.1 整机面形检测

面形是光学制造中的重要精度指标之一,简单来说就是表面不平整度。面形的两个参数 PV 和 RMS

值, PV 是表示路面的最高处与最低处的差值,即波峰波谷值; RMS 值是全路段面高低的平均值,即均方根值。本文利用 ZYGO 干涉仪检测星模拟器系统的面形,测量结果如图10所示,系统 RMS 值为 0.030λ , 满足设计指标 $\lambda/20$ 要求。

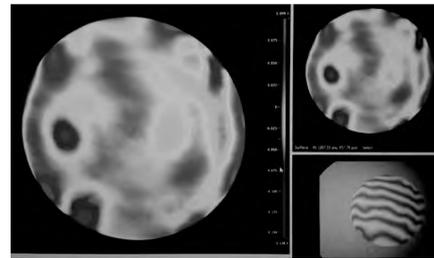


图10 整机 RMS 值

Fig. 10 The system RMS value

4.2.2 工作波段检测

打开模拟器光源,待光源稳定 3 min 后,采用 PR745 光谱辐射计端对端对准星模拟器光源,测量星模拟器光源的光谱辐亮度。测量原理如图11所示。光源的出光光谱分布实测结果如图12所示,光谱范围覆盖 500 ~ 900 nm, 满足指标要求。

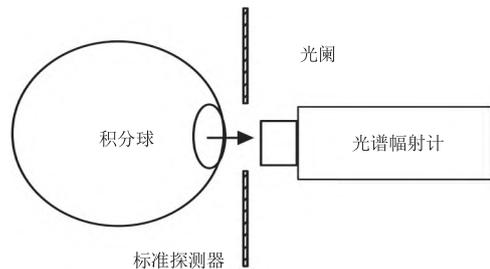


图11 工作波段检测原理

Fig. 11 Working band detection principle

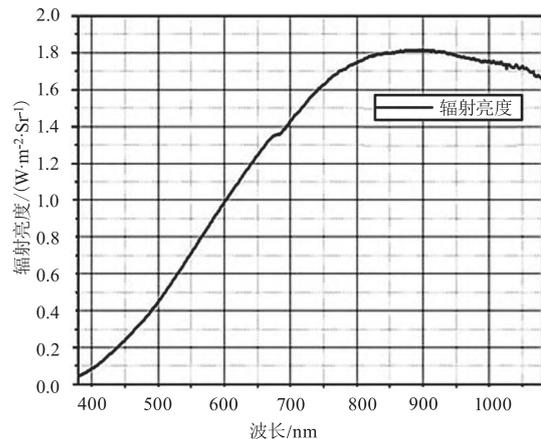


图12 光谱分布检测结果

Fig. 12 Spectral distribution detection results

4.2.3 星等测试

标定方法如图13所示,微光照度计放置在星模拟器出光口,在 0 Mv 下可将照度基准溯源至模拟器

光源自带的标准探测器,基于探测器的响应线性特性即可实现0~7 mV范围内的监测和测试。

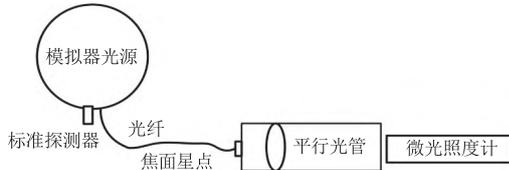


图 13 星等标定方法

Fig. 13 Magnitude calibration method

国际上零等星的照度规定为 $2.54 \times e^{-6} \text{lx}$, 星等与照度之间的数学关系式:

$$m - n = -2.512 \times \lg \frac{E_m}{E_n} \quad (1)$$

式中, E_m 表示 m 等星照射至地球表面的辐照度; E_n 分别表示 n 等星照射至地球表面的辐照度。由此计算出 7 等星的照度为 $4.026 \times e^{-9} \text{lx}$ 。

采用微光照度计将量值溯源至标准探测器后,标准探测器的辐射监视范围覆盖 0~7 等星,而且模拟器光源可连续可调,因此可实现 0 等到 7 等星任意星等的模拟,其中 0 等星的模拟效果如图 14 所示,7 等星的模拟效果如图 15 所示。



图 14 0 等星模拟效果

Fig. 14 0 Magnitude star simulation effect

5 总结

本文针对目前已有的星模拟器的局限性,设计了一款大口径、长焦距离轴反射式的星模拟器光机结构。该结构利用自准直原理,通过探测器成像可直接检测星模拟器的准直性能;通过顶丝微调减小(删除的)装调难度。在光路传递过程中通过半透半反式分光镜与折叠镜压缩镜筒长度,减小的系统的尺寸。目前,该设备已经装调完成。

依据实验结果来看,本文所研究的星模拟器体积相对较小,精度高,装调简单,满足星模拟器的设计指标要求,为大口径、长焦距星模拟器的研制提供了一种设计方法。



图 15 7 等星模拟效果

Fig. 15 7 Magnitude star simulation effect

参考文献:

- [1] Jin Jie, Xie Junfeng, Li Xiang. A multi-FOV star recognition method based on multi-master stars model [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7): 962-968. (in Chinese) 金杰, 谢俊峰, 李响. 一种多主星模型的多视场星图识别方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(7): 962-968.
- [2] Li Huang, Wang Chunyan, Wang Zhiqiang, et al. Design of off-axis paraboloid reflection optical system of color temperature star simulator [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(3): 9. (in Chinese) 刘欢, 王春艳, 王志强, 等. 色温星模拟器用抛物面离轴反射光学系统设计[J]. 兵工学报, 2021, 42(3): 9.
- [3] Zhang Xiaojuan, Yang Junjie, Zhang Jian, et al. Research on multiple star magnitude simulation of star simulator [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 735-743. (in Chinese) 张晓娟, 杨俊杰, 张健, 等. 星模拟器多色温模拟技术研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(6): 735-743.
- [4] Rao G N, Alex T K, Bhat M S. Incremental-angle and angular velocity estimation using a star sensor [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2002, 25(3): 433-441.
- [5] Chen X, Sun R, Wang F, et al. Two-stage unscented kalman filter algorithm for fault estimation in spacecraft attitude control system [J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(13).

- [6] Trivellin N, Barbisan D, Ferretti M, et al. Adaptive multi-wavelength LED star simulator for space life studies [C]// International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [7] Li Yahui. Study on single-star simulation technology with adjustable color temperature [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
李亚慧. 色温可调弱星等单星模拟技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [8] Hao Guannan. Research on high dynamic starlight simulation technology with large field of view [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
郝冠男. 大视场高动态星光模拟技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [9] Feng Guangjun, Ma Zhen, Li Yingcai. Design and performance analysis of standard starlight simulator [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 39–42. (in Chinese)
冯广军, 马臻, 李英才. 一种高星等标准星光模拟器的设计与性能分析 [J]. 应用光学, 2010, 31(1): 39–42.
- [10] Dai Yu. Design and research of optical system for large field of view dynamic star simulator [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
代雨. 大视场高动态星模拟器光学系统的设计与研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2020.
- [11] Li Manli. Research on simulation technology of large field of view multi-star simulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
李曼丽. 大视场多星模拟器标定技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [12] Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Zhang Jian, et al. High-precision dynamic celestial simulator with sub-pixel display technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1037–1045. (in Chinese)
陈启梦, 张国玉, 张健, 等. 高精度亚像素显示技术动态天体模拟器 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1037–1045.
- [13] Huang Chenxu, Liu Xin, Pan Zhifeng, et al. Design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view based on free-form surface [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 325–328. (in Chinese)
黄辰旭, 刘欣, 潘枝峰, 等. 基于自由曲面的大视场离轴四反光学系统设计 [J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 325–328.
- [14] Ming Ming, Yang Fei, Zhao Jinyu, et al. Catadioptric optical system with large aperture, widefield of view and broad waveband [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 149–154. (in Chinese)
明明, 杨飞, 赵金宇, 等. 折反式大口径、大视场、宽光谱光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 149–154.
- [15] Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hai. Research of broad width off-axis three mirror optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 272–276. (in Chinese)
林晶, 崔庆丰, 朱浩. 宽幅离轴三反光学系统研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(7): 272–276.
- [16] Li Ronggang, Zhang Xingjie, Sun Changfeng, et al. Development and analysis of off-axis reflection optical system [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 128–131. (in Chinese)
李荣刚, 张兴德, 孙昌锋, 等. 离轴反射式光学系统的研究进展与技术探讨 [J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 128–131.
- [17] Cao Chao, Liao Sheng, Liao Zhiyuan, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 31–39. (in Chinese)
操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 31–39.
- [18] Hu Mingyong, Yu Jun, Mu Yongji, et al. Optical design of refracting collimator with large aperture and wide spectrum [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(5): 530–535. (in Chinese)
胡明勇, 余俊, 穆永吉, 等. 大口径宽光谱折射平行光管系统设计 [J]. 量子电子学报, 2013, 30(5): 530–535.