

激光与光电子学进展

可调背景的星敏传感器性能测试系统设计

杨松洲^{1,2,3*}, 张国玉^{1,2,3}, 孙高飞^{1,2,3}, 刘石^{1,2,3}, 徐达^{1,2,3}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²光电测控与光电信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

³吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 为解决现有星模拟器无法模拟天空背景变化的问题,提出了一种用于测试星敏传感器工作性能的背景可调星模拟器。设计了离轴反射式准直光学系统,通过在主光路中引入半反半透镜产生两个共轭焦面,星点分划板和杂光光阑分别由恒星光源模拟器和背景光源模拟器中的两个积分球照亮。实时监测积分球出口辐照度并根据星点和背景亮度的需要控制光源的输出功率。两路光束合束后准直成像为平行光,最终被星敏传感器接收,从而实现具有可变星空背景且视星等可变的恒星模拟。测试结果表明,该系统的视星等在 $-2.00\sim 6.00$ 范围内连续可调,视星等模拟精度为 0.30 ,背景光源均匀性达到 97.3% 。该系统可较好地模拟星敏传感器运行时恒星的背景变化,有效提升星敏传感器的性能测试精度。

关键词 光学设计; 星模拟器; 恒星模拟; 背景模拟; 星敏传感器

中图分类号 V416.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2322001

Design of Performance Test System for Star Sensor with Adjustable Background

Yang Songzhou^{1,2,3*}, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Sun Gaofei^{1,2,3}, Liu Shi^{1,2,3}, Xu Da^{1,2,3}

¹College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun 130022, Jilin, China;

³Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In this paper, in order to solve the problem that the existing star simulators cannot simulate the sky background change, a star simulator with variable background is proposed to test the performance of the star sensor. Off-axis reflection collimating optical system is designed, by introducing a semi-inverse semi-lens in the main optical path to produce two conjugate focal planes, the star-point reticule and the stray diaphragm are illuminated by two integrating spheres in the stellar source simulator and the background source simulator, respectively. Real-time monitoring of the irradiance at the outlet of the integrating sphere, and the output power of the light source can be controlled according to the needs of star and background brightness. After the two beams merge, they become parallel light through the collimating optical system and are finally received by the star sensor, thus realizing the simulation of stars with variable starry sky background and apparent magnitude. The test results show that the apparent magnitude of the system can be adjusted continuously from $-2.00\sim 6.00$, the apparent magnitude simulation accuracy is 0.30 , and the uniformity of the background light source is 97.3% . The system can well simulate the background changes of stars when the star sensor is running, and can effectively improve the performance test accuracy of the star sensor.

Key words optical design; star simulator; stellar simulation; background simulation; star sensor

1 引言

航天器的导航与控制是航天领域的热点问题,随

着航天事业的蓬勃发展,在轨航天器数量不断增多,人们对航天器在轨自主生存能力提出了越来越高的要求^[1-3]。空间光学敏感器是卫星控制系统中姿态测量

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-09-23; 录用日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(62075019)

通信作者: *szhyang@cust.edu.cn

的关键部件,星敏传感器是一种以恒星为参照目标的空间光学敏传感器,也是目前精度最高的光学姿态敏传感器^[4-5]。星模拟器是星敏传感器地面试验的必备设备,也是确保卫星飞船等航天器在轨姿态测量与控制的前提与有效途径。

国外对星模拟器的研究较早,技术手段较为完善,研制出的产品测试性能与星敏传感器匹配度较高^[6]。德国蔡司公司研制的准直式光管星模拟器将 16 个大小相同的针孔分别放置在 4 个准直光管的焦面上,然后用光源照射产生星点像,通过微调光管位置模拟恒星的移动轨迹。美国伊斯曼-柯达公司研制的光纤星模拟器用 3 根光纤将 3 束具有典型恒星光谱的光导至光管的焦面,通过中性滤光片调整视星等,可实现 2.00~8.00 范围内视星等的模拟^[7-8]。国内的研究主要集中在高校和科研院所,如:成都光电所研制的拼接式星模拟器采用两片液晶光阀拼接,拼接后的视场可达 $6.5^{\circ} \times 5^{\circ}$,图像分辨率为 $960 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$;哈尔滨工业大学研制的长焦距小孔径星模拟器采用尺寸为 $193 \text{ mm} \times 145 \text{ mm}$ 的液晶光阀作为星图显示器件,模拟星图的视场可达 $6.74^{\circ} \times 5.06^{\circ}$;长春光机所研制的星模拟器采用薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)作为星图显示器件,模拟星图的视场可达 $10.5^{\circ} \times 7.5^{\circ}$,可实现 2.00~8.00 范围内视星等的模拟,图像分辨率可达 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,照度均匀度优于 90%;长春理工大学研制的星模拟器采用高对比度星图成像光学拼接和亚像素星点显示技术,对双片 LCOS 进行拼接实现星点位置的精确模拟,模拟星图的视场可达 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$,可实现 -1.00~6.00 范围内视星等的模拟^[9]。

上述星模拟器研究大多只关注星图模拟的精度,

忽略了星光背景变化产生的影响,而实际星敏传感器工作中的天空背景变化及杂散光干扰都会影响星点位置模拟精度^[10-12]。因此,本文设计了一种背景可调的星敏传感器性能测试系统,主要用于测试动态环境下星敏传感器对星体动态跟踪的性能与精度。该系统采用星模拟装置模拟无穷远恒星辐射及星际背景杂散光干扰,为天文导航设备测试提供内场仿真目标,具有模拟星等变化、背景光干扰等功能。测试结果表明,本系统可模拟的视星等范围为 -2.00~6.00,光谱模拟范围为 300~2000 nm,背景光辐照亮度调节范围为 $0 \sim 15000 \text{ cd/m}^2$,背景光均匀性为 97.3%,为星敏传感器性能的测试提供了技术支持。

2 系统组成与工作原理

星敏传感器性能测试系统的工作原理如图 1 所示。在主光路的焦面放置杂光光阑,杂光光阑由背景光源积分球照亮,且在背景光源积分球出光口处放置分光光度计实时监测,由背景光源控制器根据需要使用需要控制氙灯和卤钨灯的工作功率,并传给积分球,从而实现不同背景光的模拟。在主光路共轭焦面的位置,放置单星星点分划板组件。星点分划板被单星星点积分球照亮,在单星星点积分球出光口处放置分光光度计实时监测,由单星星点控制器根据需要使用需要控制氙灯和卤钨灯的工作功率,从而实现不同星光的模拟。两路光束同时通过半反半透透镜后合为一束光并被大口径平行光管成像为平行光,最终被星敏传感器接收,从而实现具有可变星空背景且星等可变的星图模拟。星敏传感器固定在双轴速率转台上,用于模拟星敏传感器工作过程中的大气抖动和载体晃动,可调背景的星敏传感器性能测试系统仿真模型如图 2 所示。

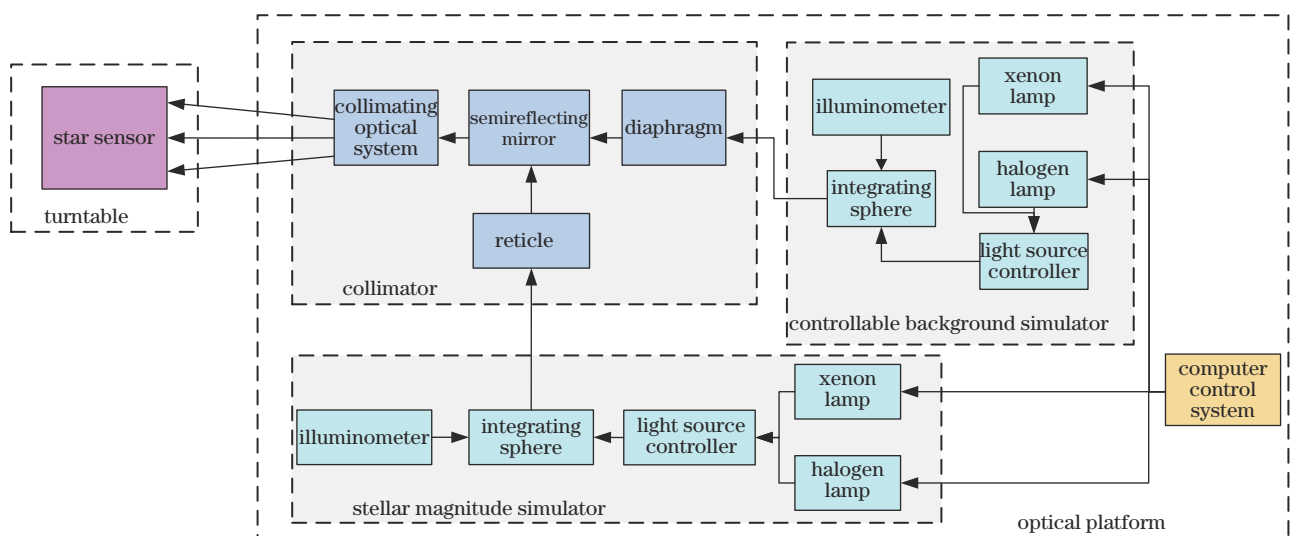


图 1 测试系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the test system

2.1 光源积分球出口辐照度分析

光源积分球是一个内部空心的金属球,将具有朗

伯漫射特性的材料多次均匀喷涂于球的内壁。积分球的辐照度主要由其内壁涂层反射率和开口比确定,合

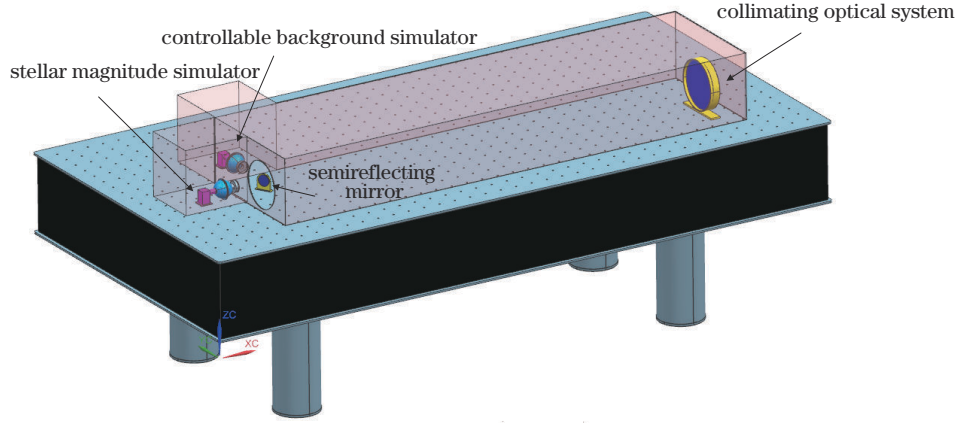


图2 可调背景的星敏器性能测试系统模型

Fig. 2 Model of star sensor performance test system with adjustable background

理的设计可显著提高光源积分球的辐照度水平和均匀性。积分球内壁任意一点的辐照度都是由其他各点多次漫反射累加得到,即积分球内各点在辐照度分析中是等效的,光源积分球最终的出口辐照度只取决于其开口比。

积分球的开口比可表示为

$$f = \frac{A_{in} + A_{out}}{A_{all}}, \quad (1)$$

式中: $A_{all} = 4\pi r^2$ 为积分球内壁总面积; r 为球的半径; A_{in} 为入射光的面积; A_{out} 为出射光的面积。去除开口后积分球的实际内部面积可表示为

$$A = A_{all} - (A_{in} + A_{out}) = (1-f)A_{all}. \quad (2)$$

积分球内壁上任意点 M 处的辐照度可表示为

$$E = \frac{\varphi\rho}{\pi A}, \quad (3)$$

式中: φ 为积分球入射光处的辐射通量; ρ 为内壁涂层的反射率。积分球内表面发生一次反射和二次反射后的光通量 φ_1 、 φ_2 可分别表示为

$$\varphi_1 = \left(\frac{A_{all} - A_{in} - A_{out}}{A_{all}} \right) \varphi\rho = (1-f)\varphi\rho, \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \varphi\rho^2(1-f)^2.$$

积分球总辐射通量 φ_{all} 为其内壁多次漫反射的光通量累加和,可表示为

$$\varphi_{all} = \varphi\rho(1-f) + \varphi\rho^2(1-f)^2 + \dots + \varphi\rho^n(1-f)^n = \varphi\rho(1-f) \frac{1 - [\rho(1-f)]^n}{1 - \rho(1-f)} = \frac{\varphi\rho(1-f)}{1 - \rho(1-f)}, \quad (5)$$

式中, $\rho(1-f) < 1$, $[\rho(1-f)]^n \ll 1$ 。可以发现,式(5)的等效性及积分球出射光的朗伯性均与入射光在积分球内壁的反射次数相关,反射次数越多,积分球的匀光效果越好。积分球出口处的辐照度 E_{out} 可表示为

$$E_{out} = \frac{\varphi\rho(1-f)}{1 - \rho(1-f)\pi A_{all}(1-f)} = \frac{\varphi}{\pi A_{all}} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)}, \quad (6)$$

式中, $\tau = \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)}$ 为积分球内壁的多次反射因

数。 τ 越大,表明积分球的辐照效率越高。仿真得到不同开口比下积分球内壁多次反射因数及内壁涂层反射率的关系如图3所示。可以发现,积分球的开口比与其内壁涂层反射率相互制约^[13]。积分球内壁涂层的反射率越大,开口比越小,其辐照效率越高。通常积分球内壁的多次反射因数范围为 $10 < \tau < 30$ 。实验设计的积分球通过控制开孔尺寸、数量和在内壁涂有对 $0.3 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段有较高反射率的反射涂料调整辐照效率,开口比 $f = 2\%$, 内壁涂层反射率 $\rho = 0.95$ 。

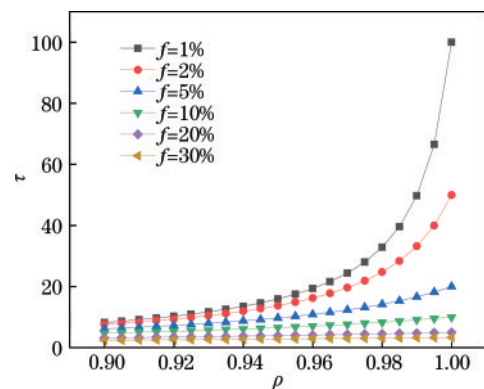


图3 积分球辐照效率曲线

Fig. 3 Irradiation efficiency curve of the integrating sphere

2.2 半反半透镜分析

在准直光学系统的光路中设置半反半透镜,利用半反半透镜产生两个共轭焦面并完成光束的分束与合束,从而实现具有天空背景亮度的恒星模拟。半反半透镜的基底材料为石英玻璃,表面镀金属膜。积分球

的辐照光路如图 4 所示。由于金属膜自身性质限制,无法实现透射比和反射比各为 50%。在反射光路中设置单星星点组件,经半反半透镜后的反射率约为 50%。在透射光路中设置杂光光阑组件,经过半反半透镜后被透射,透射率约为 40%,其余为损失率。经半反半透镜的合束作用后,形成具有天空背景的恒星图像,透射进入准直光学系统。

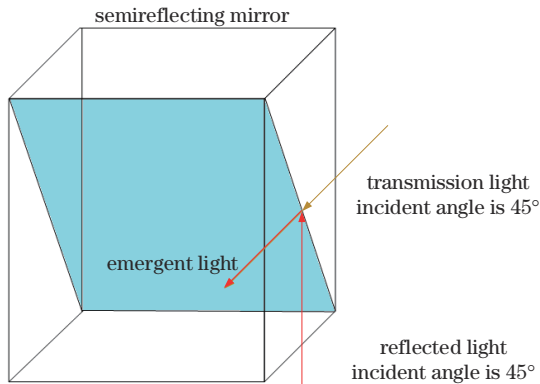


图 4 积分球的辐照光路

Fig. 4 Irradiation light path of the integrating sphere

3 分析与讨论

光学系统选择氙灯和卤钨灯作为光源,短弧氙灯覆盖的光谱范围为 200~2200 nm,卤钨灯覆盖的光谱范围为 300~2600 nm。光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光学系统的主要参数

Table 1 Main parameters of the optical system

| Technical index | Index requirement |
|--|-------------------|
| Apparent magnitude | -2.00-6.00 |
| Background intensity range / (cd·m ⁻²) | 0-15000 |
| Background light uniformity / % | 90 |
| Focal length f' / mm | 3000 |
| Field of view / (°) | 0.5 |
| Effective aperture Φ / mm | 250 |
| Spectral range / μm | 0.3-2.0 |

3.1 准直光学系统的分析

准直光学系统的设计特点是口径大、波段宽、像质高,且要求系统具有分光功能的半反半透镜,给光学系统的设计增加了一定难度。星模拟器光学系统的主要结构有反射式光学结构、透射式光学结构和折反射式光学结构^[14]。

1) 反射式光学系统

反射式光学系统常被用于制造直径达到几米的天文望远镜,其优点是不易产生色差且容易被制成大口径,适用于大口径宽光谱的光学系统。反射式光学系统中的反射镜面型可为双曲面、抛物面和

高次非球面,选取合适的反射面形可以很好地校正反射式光学系统的球差。但高次非球面的加工困难、费用昂贵,因此反射式光学系统多采用双曲面和抛物面。反射式光学结构的自由度较小:当系统的视场较大时,轴外像差会急剧增加,因此反射式光学结构只适用在小视场范围内;当系统的相对口径过大时,相对孔径的增加会导致反射镜产生较大的高级像差,降低成像质量,因此反射式光学结构只适于小相对口径。

2) 透射式光学系统

透射式光学系统的成像原理是光学材料的折射,常见的结构有双分离和双胶合结构。双分离物镜可以适应较大的相对口径,在更大的范围内选择玻璃材料,同时可以校正球差、色差。双胶合望远物镜也可以校正球差、色差,相对于双分离物镜,双胶合望远物镜的结构相对更简单些,且制造上更便捷,光能损失小。透射式光学系统的口径受玻璃材料尺寸限制,口径不能很大。当光学系统光谱范围较宽时,由于不同玻璃材料具有不同的色散系数,整个系统具有很大的色差,为了校正系统的色差,需要对光学系统进行复杂化或采用特种玻璃材料。而大尺寸的特种玻璃均需要定制,加工周期较长且价格昂贵。

3) 折反射式光学系统

折反射光学系统将球面反射镜作为基准,加入折射元件后能够很好地校正球差。但其折射元件受尺寸和材料的限制,且视场和相对口径同样不能设计得很大。反射式光学系统对轴外像差进行校正时会将中间的一部分光遮住,进行校正时会产生一定困难,且随着相对口径和视场的增大,成像质量也会逐渐降低,这种光能损失对于弱光光源系统及微光光源系统是非常严重的。

3.2 准直光学系统的设计

综上所述,实验设计的准直光学系统选择反射式光学结构。反射式光学系统分为同轴反射式和离轴反射式两种。其中:同轴反射式光学结构具有中心遮拦,像面的均匀性遭到破坏,但其反射镜光轴与准直光学系统的光轴重合,像质较高;离轴反射式光学结构消除了中心反射镜带来的中心遮拦问题,但反射镜的离轴使其具有更大的轴外像差,同时会引起高级像差量的增加,且难以进行校正^[15-16]。

1) 同轴准直光学系统的设计

同轴准直光学系统的光路图如图 5 所示。准直光学系统光路中加入半反半透镜,产生共轭焦面并实现光束的合束。

2) 离轴准直光学系统的设计

离轴准直光学系统的光路图如图 6 所示。准直光学系统光路中同样加入半反半透镜,产生共轭焦面并实现光束的合束。

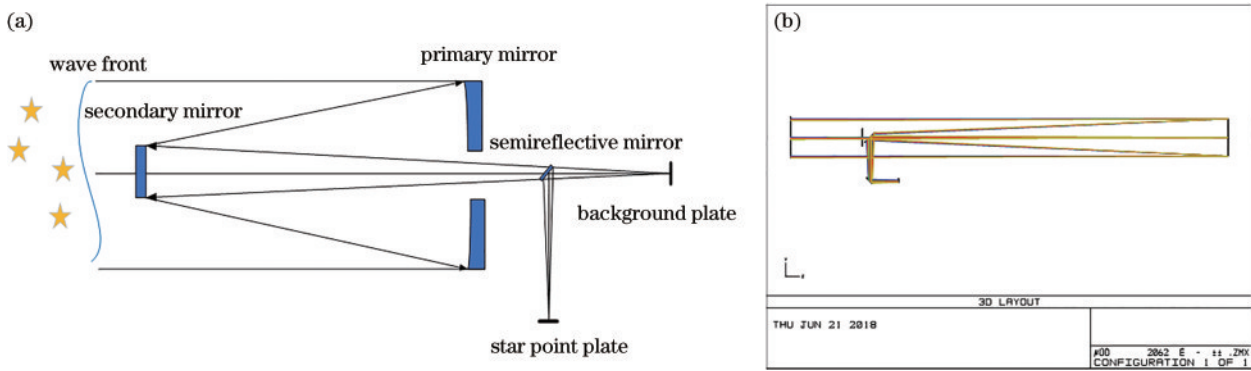


图 5 同轴准直光学系统的结构。(a)光学系统的结构;(b)光路图

Fig. 5 Structure of the coaxial collimating optical system. (a) Structure of the optical system; (b) optical path diagram

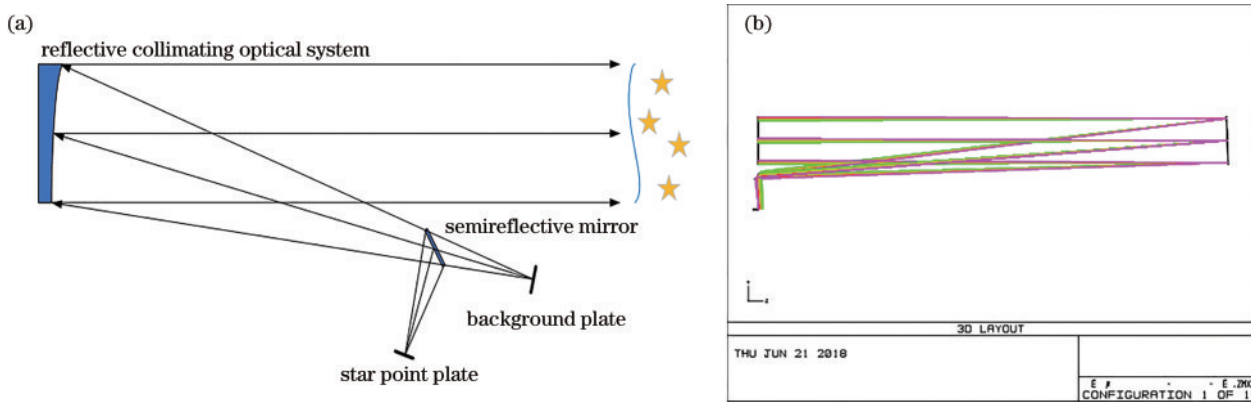


图 6 离轴准直光学系统的结构。(a)光学系统的结构;(b)光路图

Fig. 6 Structure of the off-axis collimation optical system. (a) Structure of the optical system; (b) optical path diagram

同轴及离轴准直光学系统的调制传递函数 (MTF) 曲线、点列图、垂轴像差、波像差以及场曲和畸变曲线分别如图 7~图 11 所示。根据同轴准直光学系统的像差曲线可知, 整个系统成像质量良好, MTF 曲线在 30 线对处大于 0.4, 且各视场的 MTF 曲线基本接近衍射极限, MTF 曲线的拐点是由系统的中心遮拦导致。由准直光学系统点列图可知, 全视场的均方根 (RMS) 半径小于 $10.3 \mu\text{m}$, 全视场波像差小于 $\lambda/12$, 系

统场曲小于 0.1 mm , 系统畸变优于 0.002% 。由离轴准直光学系统像差曲线可知, 整个系统成像质量良好, 边缘 MTF 曲线在 30 线对处大于 0.2, 中心 MTF 曲线在 30 线对处大于 0.5, 且基本接近衍射极限。由准直光学系统点列图可知, 全视场的 RMS 半径小于 $17.5 \mu\text{m}$, 中心视场波像差小于 $\lambda/16$, 系统场曲小于 0.5 mm , 系统畸变优于 0.002% 。

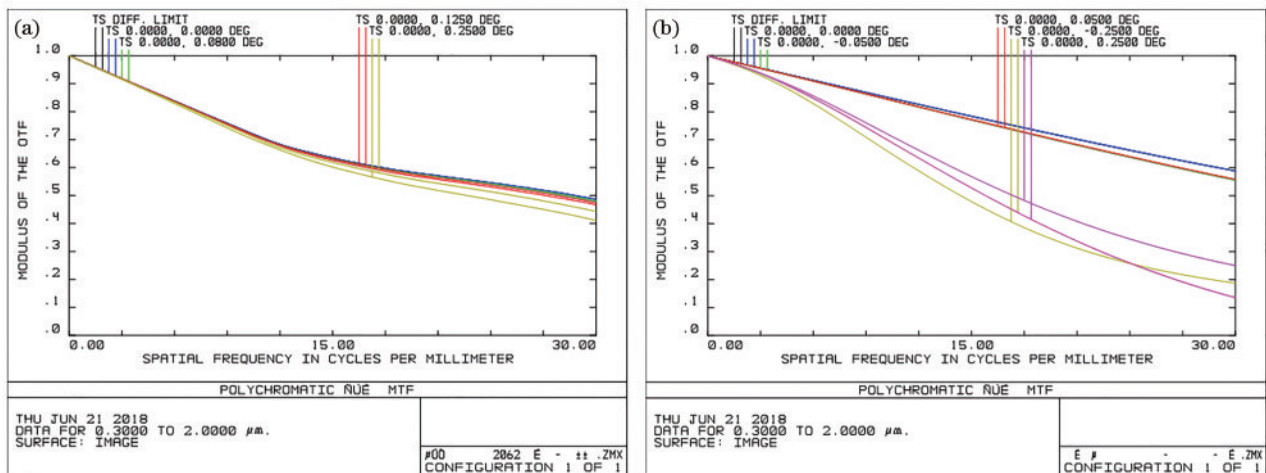


图 7 MTF 曲线。(a)同轴准直光学系统;(b)离轴准直光学系统

Fig. 7 MTF curve. (a) Coaxial collimation optical system; (b) off-axis collimation optical system

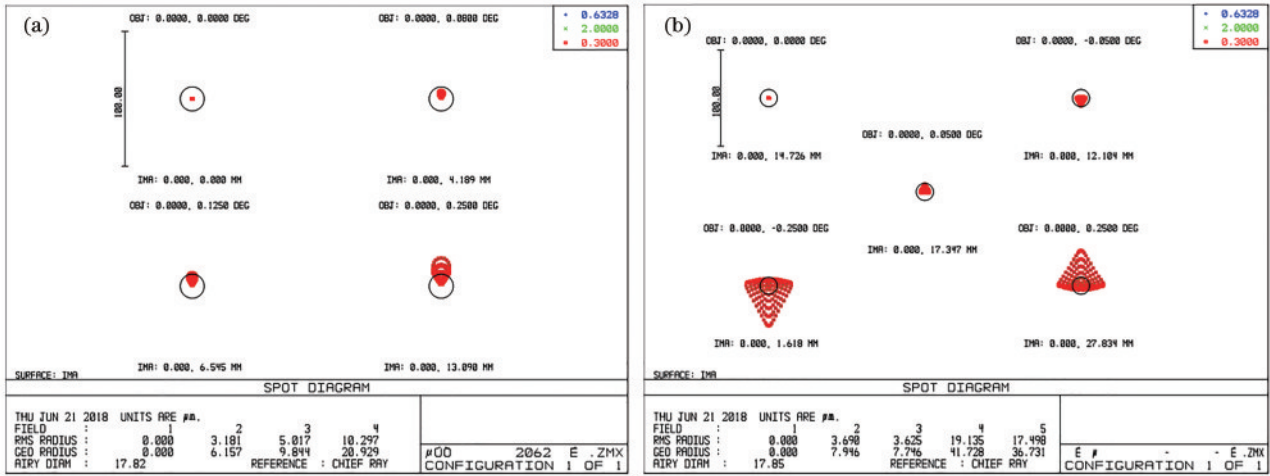


图 8 点列图。(a)同轴准直光学系统;(b)离轴准直光学系统

Fig. 8 Spot diagram. (a) Coaxial collimation optical system; (b) off-axis collimation optical system

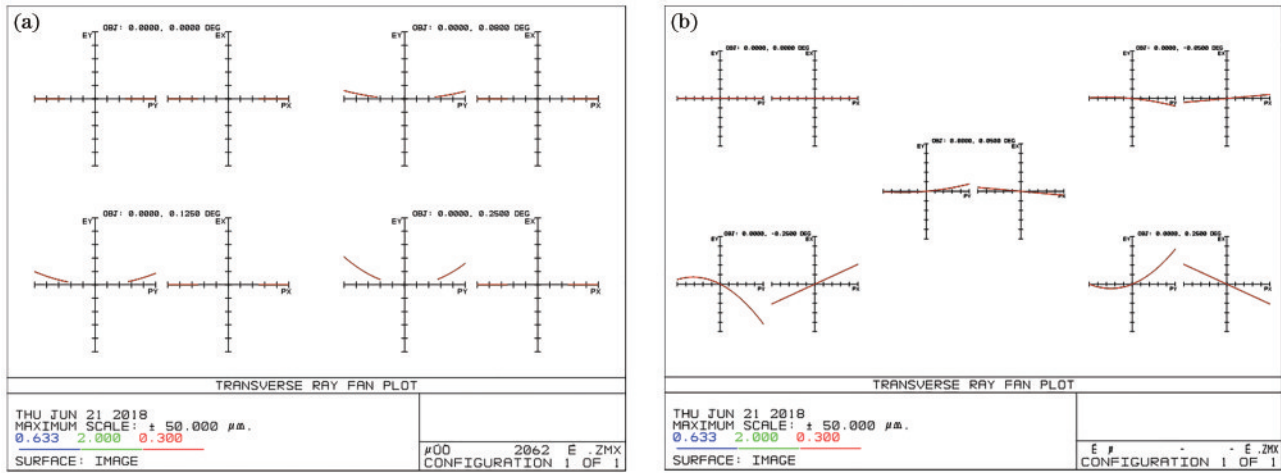


图 9 横向(垂轴)像差曲线。(a)同轴准直光学系统;(b)离轴准直光学系统

Fig. 9 Lateral (vertical) aberration curve. (a) Coaxial collimation optical system; (b) off-axis collimation optical system

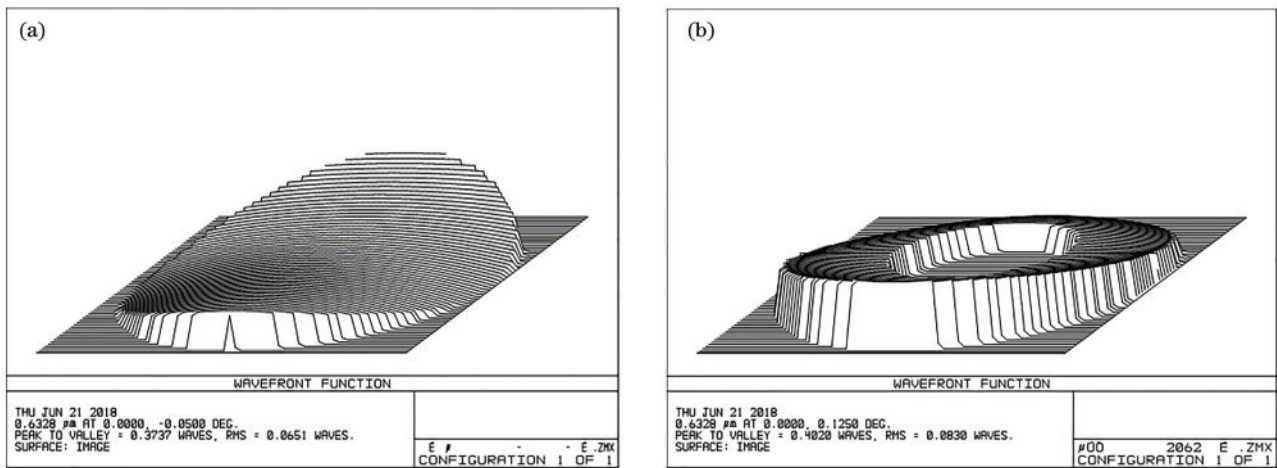


图 10 全视场波像差图。(a)同轴准直光学系统;(b)离轴准直光学系统

Fig. 10 Full field wave aberration. (a) Coaxial collimation optical system; (b) off-axis collimation optical system

对比同轴准直光学结构和离轴准直光学结构可知,由于同轴准直光学结构具有较大的中心遮拦,需要多次折转光路才可避免星点光源和背景光源对准

直系统光路的遮挡,整个系统的装调困难,且中心遮拦会影响星点和背景光均匀性,因此选择离轴准直光学结构。

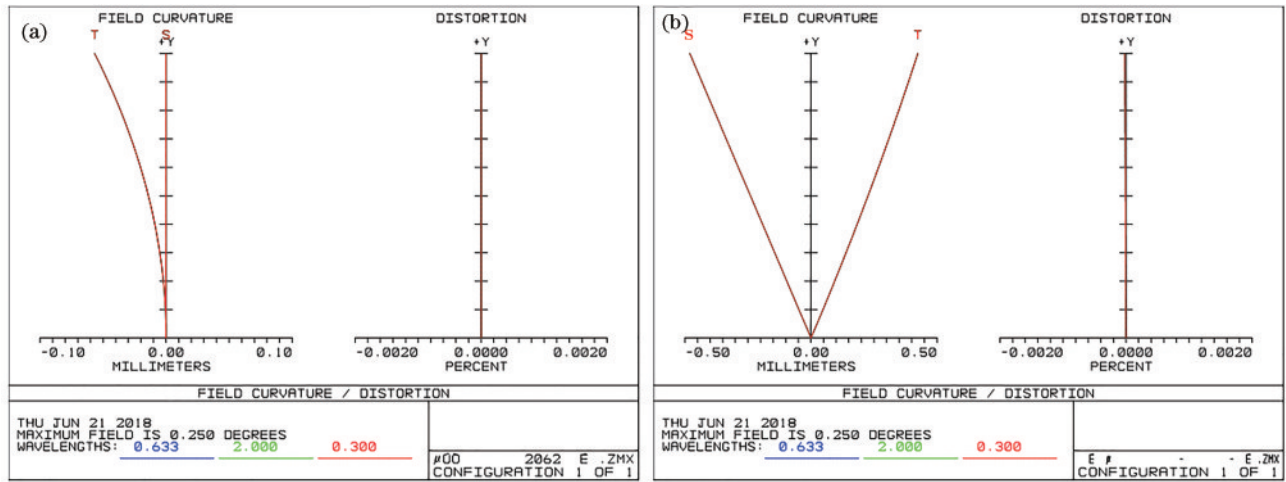


图 11 场曲和畸变像差曲线。(a)同轴准直光学系统;(b)离轴准直光学系统

Fig. 11 Field curvature and aberration curves. (a) Coaxial collimation optical system; (b) off-axis collimation optical system

4 实验设置与分析

实验设计的大口径、宽波段、高像质离轴准直光学系统,并研制可调背景的星敏器性能测试系统。为模拟星敏器实际在轨运行的空间光学环境,将测试系统放置在消光环境系统暗室中。加工装调完成后的测试系统主体如图 12 所示。



图 12 可调背景的星敏器性能测试系统

Fig. 12 Star sensor performance test system with adjustable background

4.1 视星等模拟精度测试

利用宽量程微弱光照度计对模拟视星等范围进行测试,在暗室条件下,将微弱光照度计置于大口径平行光管出口处,通过调节可调恒星光源控制器中的电源电流与可变光阑开口大小改变射入大口径平行光管的光通量,从而实现视星等的调节,测量模拟星点照度^[17]。测试采用的宽量程微弱光照度计如图 13 所示。该照度计的照度测量范围为 $10^{-9} \sim 10^3$ lx,测量准确度为 $\pm 5\%$ 。测试结果如表 2 所示。可以发现,可调恒星



图 13 宽量程微弱光照度计的实物图

Fig. 13 Physical map of wide-range weak light meter

表 2 视星等模拟精度的测试结果

Table 2 Test results of apparent magnitude simulation accuracy

| Theoretical apparent magnitude | Theoretical irradiance /lx | Measured irradiance /lx | Measured apparent magnitude | Error of apparent magnitude |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| -2.00 | 1.67×10^{-5} | 1.43×10^{-5} | -1.83 | -0.17 |
| -1.00 | 6.66×10^{-6} | 6.86×10^{-6} | -1.03 | +0.03 |
| 0.00 | 2.65×10^{-6} | 2.54×10^{-6} | +0.05 | -0.05 |
| 1.00 | 1.05×10^{-6} | 9.87×10^{-7} | +1.07 | -0.07 |
| 2.00 | 4.20×10^{-7} | 3.18×10^{-7} | +2.30 | -0.30 |
| 3.00 | 1.67×10^{-7} | 1.76×10^{-7} | +2.94 | +0.06 |
| 4.00 | 6.66×10^{-8} | 6.43×10^{-8} | +4.04 | -0.04 |
| 5.00 | 2.65×10^{-8} | 2.49×10^{-8} | +5.07 | -0.07 |
| 6.00 | 1.05×10^{-8} | 8.73×10^{-9} | +6.21 | -0.21 |

光源模拟器可实现 $-2.00 \sim 6.00$ 范围内视星等的调节, 视星等模拟精度为 0.30。

4.2 背景光辐照均匀度测试

利用照度计对背景辐照均匀度进行测试, 将可调背景光源控制器调节到设定的背景辐照值, 将照度计探测器置于背景积分球辐照面上, 感光面正对系统主光路, 在有效直径内 25 个不同位置依次进行快速测量, 辐照均匀度测试方法示意图、测试使用的 TES-1339 型

照度计及背景光辐照均匀度测试结果如图 14 所示。

根据气象太阳模拟器国家标准 GB/T 33707—2017, 背景光辐照均匀度^[18-19]可表示为

$$\epsilon = 1 - \left| \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right| \times 100\%, \quad (7)$$

式中: E_{\max} 为各测试点辐照度最大值; E_{\min} 为各测试点辐照度最小值。根据实际测试数据计算得到背景光辐照均匀度为 97.3%。



图 14 背景光辐照均匀度的测试。(a)测试方法;(b)测试设备;(c)测试结果

Fig. 14 Test of background light irradiance uniformity. (a) Test method; (b) test equipment; (c) test results

5 结 论

根据星敏传感器全天候工作中遇到的背景光干扰问题, 研制了一种可调背景的星敏传感器性能测试系统。可调恒星光源模拟器和可调背景光源模拟器分别提供恒星星等和可改变的天空背景, 两路光束通过半反半透镜合束后由大口径平行光管成像为平行光, 通过改变光源的功率和光阑孔径的大小可以实现视星等和背景辐照度的精确调节。实验结果表明, 该系统可实现 $-2.00 \sim 6.00$ 范围内视星等的精确模拟, 模拟精度优于 0.30, 背景辐照均匀度优于 97.3%, 实现了可变天空背景下恒星图像的精确模拟, 增加了恒星模拟的真实性, 这对提高星敏传感器地面性能测试精度具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 胡宜宁, 巩岩. 动态星图显示算法的设计与实现[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 849-853.
Hu Y N, Gong Y. Design and realization of a dynamic display algorithm for star map[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(3): 849-853.
- [2] 孙高飞. 甚高精度星模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
Sun G F. Study on key technique of very high-precision star simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [3] 张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于混合光源的星模拟器光谱研究[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0222001.
Zhang X J, Zhang G Y, Sun G F, et al. Spectral study for star simulator on hybrid light source[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0222001.
- [4] 徐卿, 赵春晖, 李晓. 白昼星敏感器的研究现状及关键技术[J]. 光学技术, 2016, 42(6): 523-528.
Xu Q, Zhao C H, Li X. Current situation and key technologies of daytime star sensor[J]. Optical Technique, 2016, 42(6): 523-528.
- [5] 胡晓东, 丁小昆. 一种基于快速反射镜的星敏传感器图像稳定系统(英文)[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(1): 47-52.
Hu X D, Ding X K. A fast-steering mirror based image stabilization system for star sensor[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(1): 47-52.
- [6] 代雨, 程欣, 张文明, 等. 基于DMD的大视场长出瞳距星模拟器光学系统设计[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 891-897.
Dai Y, Cheng X, Zhang W M, et al. Design of optical system based on DMD for simulator with large field of view and long exit pupil distance[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 891-897.
- [7] Wu L H, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of optical engines for stellar simulation systems with low extinction ratios[J]. Optics Communications, 2020, 463: 125453.
- [8] Meng Y, Zhong X, Liu Y, et al. Optical system of a micro-nano high-precision star sensor based on combined stray light suppression technology[J]. Applied Optics, 2021, 60(3): 697-704.
- [9] 孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1730-1735.
Sun G F, Zhang G Y, Jiang H L, et al. Design of very high accuracy star simulator[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1730-1735.
- [10] Li Y Y, Wei X G, Li J, et al. Imaging modeling and error analysis of the star sensor under rolling shutter exposure

- mode[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15478-15496.
- [11] 刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 具有均匀天空背景的高精度静态星模拟器设计(英文)[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 1222002.
- Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of high-precision static star simulator with uniform sky background [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1222002.
- [12] Zhao B C, Huang R Y, Lü G. Micro-projection dynamic backlight for multi-view 3D display[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 092201.
- [13] 谢臣瑜, 李健军, 庞伟伟, 等. 双通道热红外标准辐亮度计定标方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0404002.
- Xie C Y, Li J J, Pang W W, et al. Research on calibration method of double-channel thermal-infrared standard radiometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404002.
- [14] Park J C, Brady D J, Zheng G A, et al. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(4): 044001.
- [15] Feng Z X, Cheng D W, Wang Y T. Iterative freeform lens design for optical field control[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(9): 1775-1783.
- [16] Cheng D W, Chen H L, Yang T, et al. Optical design of a compact and high-transmittance compressive sensing imaging system enabled by freeform optics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 112202.
- [17] 刘尚阔, 薛勋, 李坤, 等. 弱光单星模拟器的设计与标定[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1012001.
- Liu S K, Xue X, Li K, et al. Design and calibration of weak-light single star simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012001.
- [18] 苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208001.
- Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0208001.
- [19] 张国玉, 吕文华, 贺晓雷, 等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(1): 41-45.
- Zhang G Y, Lü W H, He X L, et al. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1): 41-45.