

引用格式: ZHENG Ru, LI Changyu, GAO Yue, et al. Design of Optical System of Infrared Star Simulator Uniform Radiation Under Specific Irradiance[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0428002

郑茹,李长余,高越,等.特定辐照度下均匀辐射的红外星模拟器光学系统设计[J].光子学报,2022,51(4):0428002

特定辐照度下均匀辐射的红外星模拟器光学系统设计

郑茹^{1,2},李长余¹,高越³,李光茜¹,刘博¹,孙阔¹

(1 长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

(2 高精度光电测量产业技术研发中心,长春 130022)

(3 中国中车长春轨道客车股份有限公司,长春 130062)

摘要:为实现星光定向仪地面标定工作,同时满足辐射均匀性、特定辐照度和光谱三项模拟要求,提出了特定辐照度下均匀辐射的红外星模拟器光学系统设计。根据辐照度模拟要求和均匀辐照要求,建立光源系统辐通量传递模型,设计了满足辐射光谱要求的均匀辐射光源系统。结合星光定向仪和红外星模拟器的对接要求,设计了具有高成像质量的透射式准直光学系统。结合设计结果,利用 Tracepro 软件对光学系统进行建模,仿真分析光源系统辐射面和光学系统出口处的辐照度和辐照均匀性,并利用辐照计对光源辐射面辐照度和均匀性进行实验测试,验证理论分析的准确性。实测结果表明,光源辐射面的辐照度达到指标要求,辐照不均匀度为 2.75%,满足红外星模拟器研制要求。

关键词:红外星模拟器;辐通量传递模型;Tracepro 软件;准直光学系统;辐照均匀性

中图分类号:V524.7;TH74

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225104.0428002

0 引言

随着军事领域和航天领域对导航系统的迫切需求,星光导航系统以其高精度、自主式、全天候的特点,得到了广泛关注^[1-3]。星光定向仪作为星光导航系统的关键设备,主要作用是获取自然星体的准确空间角位置,用于导弹、船载和空间卫星高精度姿态解算和导航定位,其性能在很大程度上决定了星光导航系统的性能^[4-6]。星模拟器用来模拟星图,为星光定向仪进行地面标定,所以研制高精度的星模拟器是研制高性能星光定向仪的重要保障^[7]。在可见光波段下,星光定向仪容易受到太阳散射在大气层中产生的背景辐射影响^[8],依据瑞利散射定律,红外波段相对可见光波段散射强度小,透过大气层的辐射能量强^[9],实践表明,在白天使用近红外波段实现导航定位比可见光波段效率高得多^[10-11]。因此研制高精度的红外星模拟器,实现红外星图模拟,成为提高星光导航效率与星点探测精度的新内容^[12]。

传统的星模拟器主要模拟可见光波段的固定星图,由于受到大气层辐射因素影响,使得星点星等(星星明暗程度的一种表示方法)和位置精度降低。同时,辐射均匀的光源可保证星图均匀出射,提高星光定向仪识别效率。2016 年长春理工大学孟遥等^[13]研制了基于液晶拼接的星模拟器,在光源后集成复眼透镜,其设计的光源系统实现了可见光波段且在相对星等(只实现相邻辐照度间能量像差 2.512 倍的关系,对具体照度值不做要求)下不均匀度为 7.3%;2020 年,中国科学院光电技术研究所代雨等^[14]采用复眼透镜阵列和像方远心照明方式,实现了在可见光波段下,光源系统不均匀度小于 6%。上述文献设计的光源和光学系统得到了良好的辐射均匀性,但是未应用到红外波段和特定辐照度要求下。因此结合红外光源的光谱范围、配光曲线、辐射特性等参数,实现特定辐照度下均匀红外辐射。本文针对红外光谱范围、辐照度要求和均匀度

基金项目:吉林省科技厅项目(No.20210201033GX)

第一作者(通讯作者):郑茹(1987-),女,讲师,博士,主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器和检测技术。Email:zhengru@cust.edu.cn

收稿日期:2021-10-13;录用日期:2022-01-26

<http://www.photon.ac.cn>

参数的研制要求,设计满足特定辐照度要求的均匀辐射光源系统,同时探索红外辐射能量传递模型,建立光学系统出射面辐照度与光源辐通量之间的关系,为特定辐照度下均匀模拟提供依据。同时,配合透射式红外波段准直光学系统,实现光学系统出口处辐照度模拟,并利用仿真软件和实验测试验证设计结果,实现红外星模拟器的指标要求。

1 红外星模拟器组成、工作原理及技术指标

1.1 红外星模拟器组成与工作原理

红外星模拟器主要由光源系统、星点板组件、准直光学系统、立式调整支架和电源控制系统等部件组成,其工作原理如图1,由LED红外光源系统发出的光线,经过双凸会聚透镜及毛玻璃后照亮位于准直光学系统焦平面处刻有透光微孔的星点分划板上。透过星点分划板的光线经准直光学系统后以平行光射出,在星光定向仪的入瞳处形成模拟星点。红外星模拟器实物图如图2。

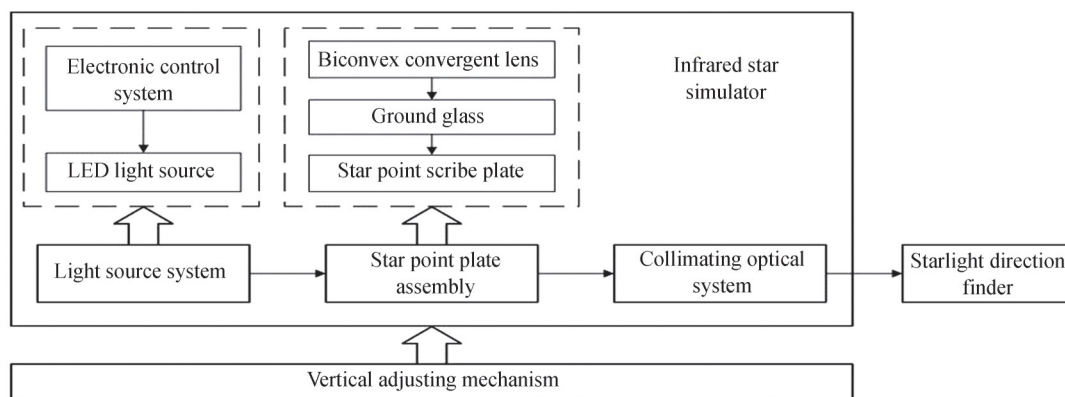


图1 红外星模拟器工作原理

Fig. 1 Working principle of infrared star simulator

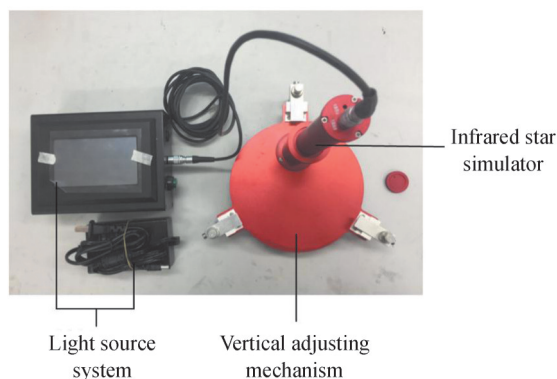


图2 红外星模拟器实物

Fig. 2 Infrared star simulator

1.2 红外星模拟器技术指标

红外星模拟器技术指标要求如表1所示。

表1 红外星模拟器技术指标

Table 1 Technical indicators of infrared star simulator

Main technical indicators	Indicator parameters
Spectral range/nm	900~1 700
Brightness adjustment range/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$1.2\times 10^{-5}\sim 1.2\times 10^{-4}$
Non-uniformity of lumination/%	<5
Field of view/($^{\circ}$)	2

2 光源系统设计

2.1 光源系统能量分析

红外星模拟器光源发出相应光谱范围的光线,经过双凸会聚透镜会聚和毛玻璃匀光,对星点分划板进行均匀照明。从物面到像面的传递过程中存在光能损失,且光能损失主要发生在三个位置:星点板前端(即朝向LED光源一侧)、星点板后端(即朝向光学系统一侧)和光学系统。其中,星点板前端与后端光亮度相同,且星点出射的辐通量由LED光源提供,星点板后端的光能经过光学系统后,光能损失较大,光能传输过程如图3。

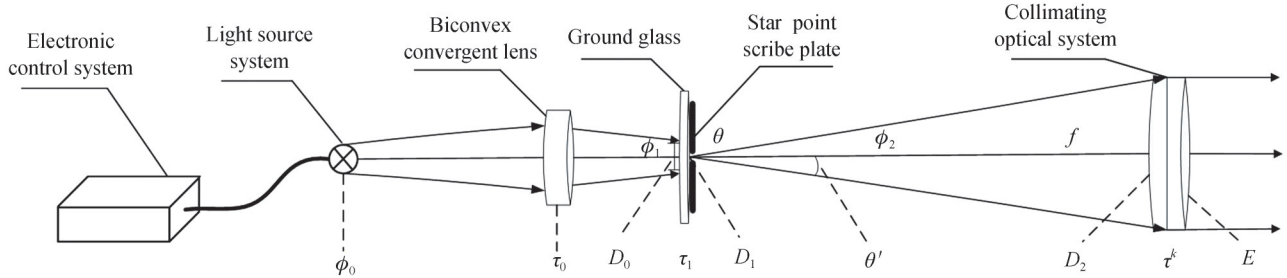


图3 光能损失过程及相关参数示意

Fig. 3 Light energy loss process and related parameter diagram

2.1.1 光学系统辐照度分析

准直光学系统将位于焦平面处的星点板上的中心星点以准直方式投射到星光定向仪的入瞳处,用来模拟无穷远处的星点。光学系统的出射面位于星模拟器的出瞳处,故出射面的辐照度即为整个系统所要求的辐照度。从光学系统出射面所需要的辐照度出发,反推光源应当具有的辐通量值。光学系统中的光能损失主要由透射面的反射损失和材料内部的吸收损失造成的。入射光每次通过与空气接触的折射面后就会产生一定的光能损失,若整个系统中玻璃与空气接触的折射面总数为 k 个,则整个系统的透射率为 τ^k ;另外,光学材料不可能完全透明,当光束通过时,一部分光能被材料吸收,其吸收率为 α ,一部分光能因材料内部杂质、气泡等使光束散射而损失。若穿过玻璃的总厚度为 d cm,则系统的透明率为 $(1-\alpha)d$ 。通常,辐通量定义为光在某一点或面发出光的总量,所以由星点板后端发出到达光学系统的光的辐通量 φ_2 与出射面辐照度之间的关系如式(1)。

$$\varphi_2 = \frac{\pi D_2^2 E}{4\tau^k(1-\alpha)d} \quad (1)$$

式中, E 为光学系统出射面的照度值, D_2 为光学系统的入瞳直径, τ^k 为整个光学系统的透过率, $(1-\alpha)d$ 为系统的透明率。

2.1.2 星点板辐通量分析

红外星模拟器光源发出的光经过双凸会聚透镜整形、毛玻璃匀光后,在星点板上的透光微孔出射,以实现无穷远星点的模拟。其中星点板发出光的发散角的大小会影响星点的光强,进而影响能量的损失程度,发散角由式(2)表示。星点板前端发出光的辐通量 φ_1 与发散角之间的关系由式(3)表示。

$$\cos \theta = \frac{f}{\sqrt{f^2 + \frac{D_2^2}{4}}} \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_2(1 - \cos \theta')}{(1 - \cos \theta)} \quad (3)$$

式中, f 为光学系统的焦距, θ 为星点板后端到光学系统发出光的发散角, θ' 为星点板前端到星点板后端发出光的发散角,因为光束是透过毛玻璃入射到星点板,可以认为从星点板出射的光是发散角为 $2\theta' = 180^\circ$ 的均匀点光源,近似认为光经过毛玻璃后出射形式为各个方向光强相同。

2.1.3 光源辐通量分析

为使LED光源发出的光更均匀的会聚到星点板上,在光源和星点板之间设计了一片双凸透镜对光线进行整形。双凸透镜除了对光线进行会聚之外,还作为光源系统的滤光片,分别在透镜的前后表面镀带通膜,用真空镀膜方法进行制备,实现900 nm至1 700 nm带通光谱辐照。由单透镜物像关系可以计算,LED光源发出的光经过双凸透镜会聚、毛玻璃匀光后,在星点板后端微孔出射,作为后面光学系统的光源。已知光每经过一次透镜就会产生一定的能量损失,光源系统的透明率可忽略不计,故光源发出的辐通量 φ_0 由式(4)表示。

$$\varphi_0 = \frac{\varphi_1 D_0^2}{\tau_0 \tau_1 D_1^2} \quad (4)$$

式中, τ_0 为双凸会聚透镜透射率, τ_1 为毛玻璃透射率, D_0 为光照射到毛玻璃的光斑直径, D_1 为星点板直径。

综上所述,可得到红外星模拟器光源所需的辐通量与目标辐照度的关系式,表示为

$$\varphi_0 = \frac{\pi E D_0^2 D_2^2 (1 - \cos \theta')}{4 \tau_0 \tau_1 \tau^k D_1^2 d (1 - \alpha) (1 - \cos \theta)} \quad (5)$$

指标要求光学系统出射面的辐照度范围为 $1.2 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$,故选择辐照度最大值 $E_2 = 1.2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 进行光能计算。经式(5)计算得出,选取的LED光源辐通量不小于0.315 8 W即可满足星模拟器指标中出射面辐照度最大值的要求,所以本文红外星模拟器的光源选用Epitex公司的SMBB-1050-1100型高功率贴片式LED光源。

3 光学系统设计

红外星模拟器用于模拟无穷远处的恒星,结合后期与星光定向仪的测试条件,相比于反射式光学系统,透射式准直光学系统更具优势。受红外光谱和能量透过率的双重制约下,设计时需要充分考虑光学材料的透过率^[15-16],设计结果如图4。



图4 光学系统光路
Fig. 4 Optical system light path

准直光学系统的成像质量会影响星模拟器的辐照均匀性,进而影响星图模拟精度,对光学系统成像质量进行分析,图5~6分别为光学系统的MTF曲线图和点列图。从图中可以看出,系统的MTF已经接近衍射极限,其弥散斑均在艾里斑内部,整体像差很小,在全视场范围内能量分布集中,有利于提高光学系统的辐照均匀性,该光学系统成像质量良好,达到红外星模拟器指标要求。

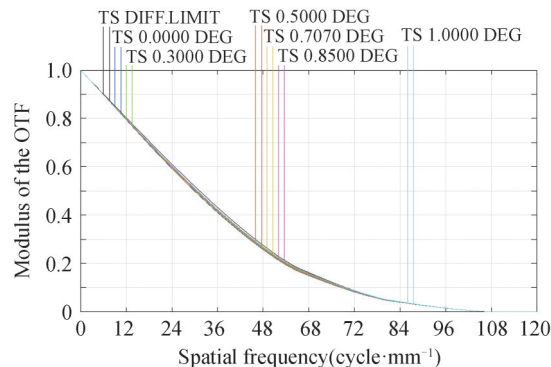


图5 MTF 频率曲线
Fig. 5 MTF frequency curve

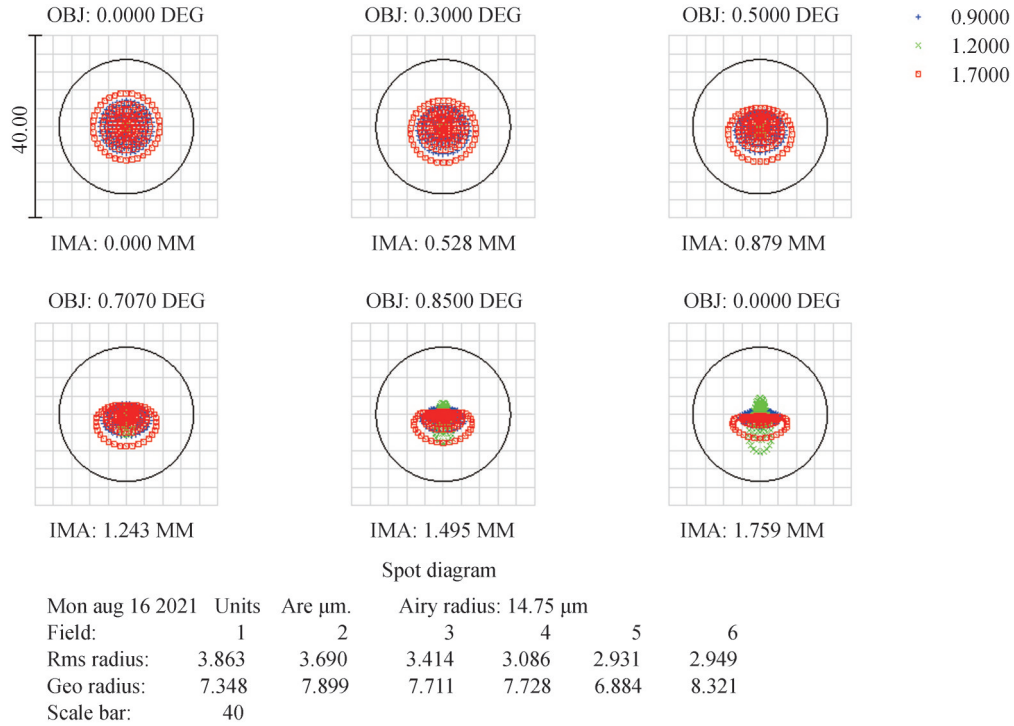


图6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

4 仿真结果分析

4.1 光学系统参数确定

采用 Tracepro 软件对红外星模拟器进行建模,即对所选取 LED 光源、双凸会聚透镜、毛玻璃、星点板以及设计的准直光学系统进行建模^[17-18]。红外 LED 光源建模对其光源辐通量、发散角、发光尺寸和配光曲线进行设定。双凸会聚透镜、星点板和准直光学系统分别对曲率半径,透镜口径,光学材料和空气间隔进行设定。实现星模拟器光学系统均匀辐射的关键是毛玻璃的散射模型的确定,采用透射式 ABg 散射模型来实现匀光效果,这里选取光线朗伯漫反射,使出射光线更均匀。

4.2 光学系统均匀性仿真分析

红外星模拟器模拟的是无穷远处的恒星,从光源发出的光经过聚光、匀光后照在星点板上,再从星点板微孔中出射到星光定向仪入瞳处形成星点。星点的亮度大多以星等来表示,本文根据工程需要,利用特定辐照度来表示星点亮度范围,在红外星模拟器中,透过星点板微孔的光能十分微弱,在利用辐通量传递模型得出光源最大辐通量后,电源控制系统通过对 LED 辐射功率的调节,进而实现对特定出射辐照度的调节。星点板与毛玻璃相对距离是影响星点板均匀性和光能的关键因素,所以在达到系统均匀性要求的前提下,减小星点板与毛玻璃的相对距离,实现特定目标辐照度,并通过仿真分析光学系统辐照度及辐照均匀性,验证设计结果。结合星模拟器的外形尺寸构造,完成红外星模拟器光学系统建模,选取 100 000 条光线进行重点取样追迹,其光学系统追迹图如图 7。设置两个探测面,分别位于光学系统出射面和毛玻璃出射面,光学系统出射面照度图如图 8。

在探测面上选取 5 个点来测量辐照度值,所选取点统一记为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 ,辐照不均匀度计算表达式为^[19-20]

$$\epsilon = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, ϵ 为辐照不均匀度, E_{\max} 为探测面辐照度最大值, E_{\min} 为探测面辐照度最小值。

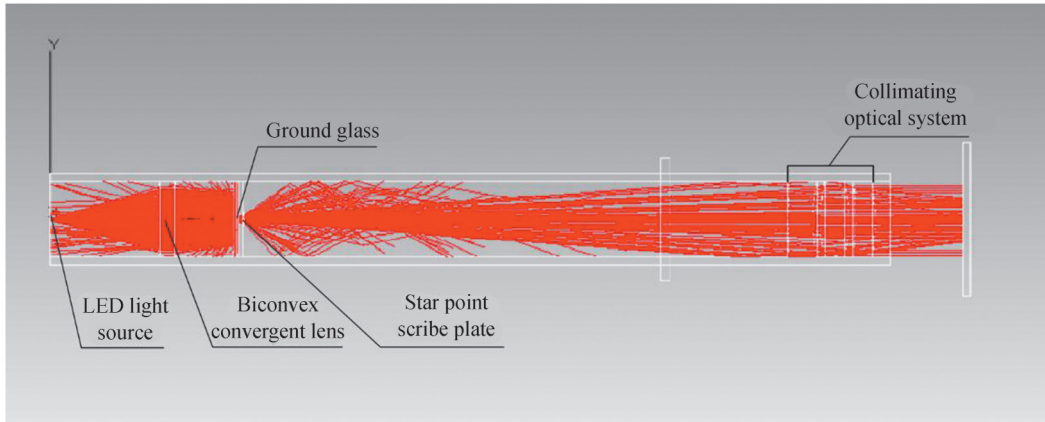


图7 光学系统追迹图
Fig. 7 Tracing diagram of optical system

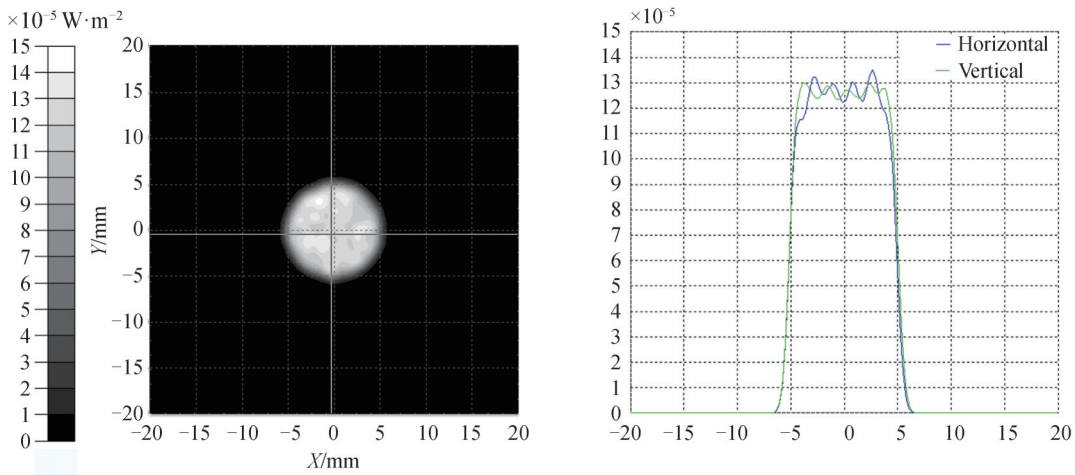


图8 光学系统出射面照度图
Fig. 8 Illumination diagram of exit surface of optical system

将探测面上的照度图的圆形区域选取5个点,每个选取点的照度值如表2所示。根据不均匀度的计算

表2 照度值仿真数据
Table 2 Illuminance value simulation data

Selected point	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Illuminance value/ $(W \cdot m^{-2})$	1.23×10^{-4}	1.26×10^{-4}	1.21×10^{-4}	1.29×10^{-4}	1.25×10^{-4}

式(6)可得光学系统仿真模拟所得到的不均匀度为3.2%,满足辐照不均匀度小于5%的要求。

实际中,由于光学系统出射面的目标辐照度数值小,辐射能量弱,目前所使用的FZ-A型辐照计精度为 $1 \times 10^{-4} mW/cm^2$,难以测量得到准确的结果,所以对光斑透过毛玻璃后发出的光进行探测,其光源系统照度图如图9。

同样在探测面上的照度图的圆形区域选取5个点,各点的照度值如表3所示。根据不均匀度的计算式(6)可得光源光路仿真模拟所得到的不均匀度为2.25%,满足辐照不均匀度小于5%的要求。

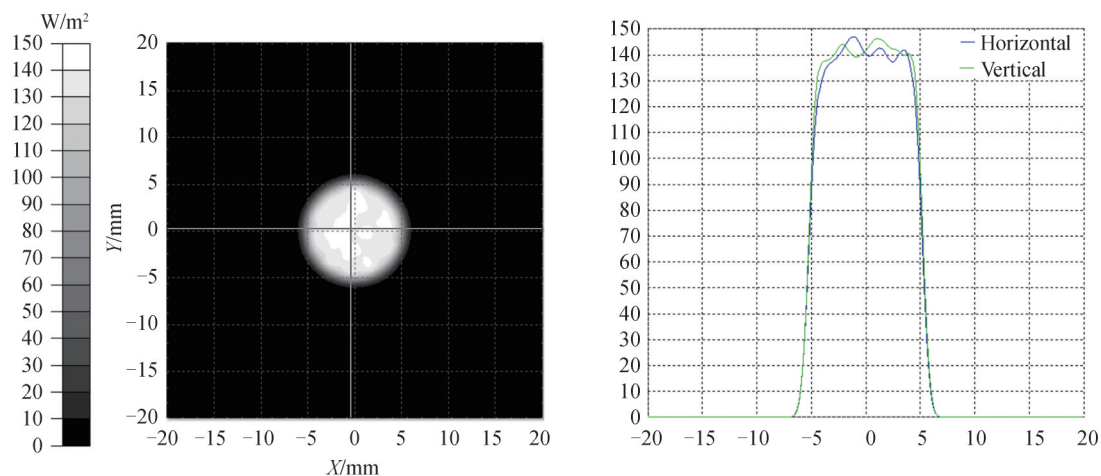


图9 光源系统照度图

Fig. 9 Illuminance diagram of light source system

表3 照度值仿真数据

Table 3 Illuminance value simulation data

Selected point	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Illuminance value/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	144.66	141.51	138.29	141.65	142.12

5 实验结果分析

利用FZ-A型辐照计对光源经毛玻璃匀光后发出的光辐照度进行测量,其选取点的辐照度值如表4所示。实测结果表明,红外星模拟器光学系统的辐照不均匀度为2.75%,满足辐照不均匀度小于5%的要求。

表4 照度值实测数据

Table 4 Illuminance value measured data

Selected point	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Illuminance value/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	147.22	144.86	139.34	143.41	140.27

6 结论

依据红外星模拟器的指标要求,建立了光源能量传递模型,提出了一种特定辐照度要求下,光源辐通量分析方法,设计了具有良好均匀性的红外光源系统。利用ZEMAX设计了一种小视场、设计简单的透射式红外准直光学系统。通过对光学系统光路进行仿真和利用辐照计对光源系统出射面照度值进行实测,得到所设计光源系统的辐照不均匀度的仿真值和实测值分别为2.25%和2.75%,实现了在光谱、特定辐照度和辐照均匀性三重限定条件下的光学系统设计,为特定辐照度下红外星模拟器均匀光源系统设计提供了理论依据。

参考文献

- [1] MA Linli, SUN Yao. Star field recognition for ship's navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(3): 34-38.
马林立,孙尧.舰船导航用星体自动识别技术研究[J].中国惯性技术学报,2005,13(3):34-38.
- [2] YANG Bo, WANG Yuegang, SHAN Bin, et al. Research and simulation on high accuracy integrated navigation method under long-endurance environment [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(5): 1054-1059.
杨波,王跃钢,单斌,等.长航时环境下高精度组合导航方法研究与仿真[J].宇航学报,2011,32(5):1054-1059.
- [3] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination[J].IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1995, 10(6): 10-16.
- [4] LIU Bingqi, WEI Shihui, SU Guohua, et al. Key techniques and current research status of INS/CNS integrated navigation on intermediate-range missile[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2019, 39(5): 1351-1362.
刘炳琪,魏诗卉,苏国华,等.中远程导弹惯性/星光组合导航关键技术及研究现状[J].系统工程理论与实践,2019,39

- (5):1351-1362.
- [5] LIU Lei, ZHANG Lu, ZHENG Xin, et al. Current situation and development trends of star sensor technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, (S2):529-533.
刘垒, 张路, 郑辛, 等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2007, (S2):529-533.
- [6] ALEXANDER C D, SWIFT W R, GHOSH K, et al. Design of a day/night star camera system[C]. SPIE, 1999.
- [7] XU B T, LV J H, ZHOU X L, et al. Design and analysis of a star simulator suitable for confined space [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 504(1):012088.
- [8] YANG Bo, ZHU Xueyan. Influence of atmospheric turbulence on starlight transmission during satellite celestial navigation in stratosphere[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(4):359-366.
杨博, 朱雪妍. 大气湍流对平流层星光导航中星光传输的影响[J]. 宇航学报, 2017, 38(4):359-366.
- [9] HE Xingwei, HAN Qi, FENG Xiaohu, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared bands of FY-3B MERIS[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18):178-187.
何兴伟, 韩琦, 冯小虎, 等. FY-3B 卫星 MERIS 可见光近红外波段定标精度评估[J]. 光学学报, 2020, 40(18):178-187.
- [10] XIA Mengqi, LU Xin, ZHANG Chunming, et al. Daytime star detection algorithm for an infrared shipboard star sensor [J]. Aerospace Control and Application, 2018, 44(3):67-72.
夏梦琦, 卢欣, 张春明, 等. 基于红外波段船载星光定向仪白昼恒星探测技术[J]. 空间控制技术与应用, 2018, 44(3):67-72.
- [11] LIANG Juan. Optical system design of the SWIR daylight star imager[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(2):35-38.
梁娟. 短波红外昼光恒星成像光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(2):35-38.
- [12] QIAN Yulong, WANG Zhile, ZHANG Chengbiao. Domestic and international developing status of the dual-band IR target simulator[J]. Aero Weaponry, 2014(5):23-27+36.
钱育龙, 王治乐, 张成标. 红外双波段目标模拟器的国内外发展现状[J]. 航空兵器, 2014(5):23-27+36.
- [13] MENG Yao, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(3):511-520.
孟遥, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3):511-520.
- [14] DAI Yu, CHENG Xin, ZHANG Wenming, 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.
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.
- [15] MENG Yao, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Optimal design of optical engine for star simulators based on LCOS splicing[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3):0312002.
孟遥, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于 LCoS 拼接技术的动态星模拟器光学引擎的优化设计[J]. 光子学报, 2017, 46(3):0312002.
- [16] XU Da, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Optical system design of star simulator light source with spectrum adjustable based on DMD[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7):0722002.
徐达, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于 DMD 光谱可调的星模拟器光源光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(7):0722002.
- [17] JING Lei, WANG Yao, ZHAO Huifu, et al. Optical design and fabrication of palm/fingerprint uniform illumination system with a high-power near-infrared light-emitting diode[J]. Applied Optics, 2017, 56(17):4961-4966.
- [18] SUN Chengming, ZHAO Fei, ZHANG Ze. Modeling and simulation of the optical scattering properties of space target based on TracePro[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(11):60-64.
孙成明, 赵飞, 张泽. 基于 TracePro 的空间目标光学散射特性建模与仿真[J]. 光子学报, 2014, 43(11):60-64.
- [19] GONG Jinghu, WANG Chenglong, GONG Chenyang, et al. Study on the uniformity of high concentration photovoltaic system with array algorithm[J]. Solar Energy, 2017, 153:181-187.
- [20] WANG Chenglong, GONG Jinghu, YAN Jiajie, et al. Theoretical and experimental study on the uniformity of reflective high concentration photovoltaic system with light funnel[J]. Renewable Energy, 2019, 133:893-900.

Design of Optical System of Infrared Star Simulator Uniform Radiation Under Specific Irradiance

ZHENG Ru^{1,2}, LI Changyu¹, GAO Yue³, LI Guangxi¹, LIU Bo¹, SUN Kuo¹

(1 *College of Opto-electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(2 *Science and Technology High-precision Photoelectric Measurements Industry Technology Research and Development Center of Changchun City, Changchun 130022, China*)

(3 *Changchun Railway Vehicles Co., LTD., Changchun 130062, China*)

Abstract: As the key equipment of the starlight navigation system, the starlight direction finder is mainly used to obtain the accurate spatial angular position of natural stars, which is used for high-precision attitude calculation and navigation and positioning of missiles, ships and space satellites. Its performance largely determines the performance of the starlight navigation system. In the visible light band, the starlight direction finder is easily affected by the background radiation generated by the sun scattering in the atmosphere. According to Rayleigh scattering theory, the infrared band has a smaller scattering intensity than the visible light band, and the radiation energy transmitted through the atmosphere is strong. Practice shows that it is much more efficient to use the near-infrared band to measure stars in daytime than the visible light band to realize navigation and positioning. Therefore, developing high-precision infrared star simulator and realizing infrared star map simulation has become a new content to improve the efficiency of starlight navigation and the accuracy of star point detection. In order to realize the ground calibration of starlight director and meet the three simulation requirements of radiation uniformity, specific irradiance and spectrum, this paper proposes an optical system design scheme of infrared star simulator with uniform radiation under specific irradiance. According to the requirements of irradiance simulation and uniform irradiation, the radiation flux transfer model of light source system is established, and a uniform radiation light source system is designed to meet the requirements of radiation spectrum. According to the docking requirements of starlight direction finder and infrared star simulator, a transmission collimating optical system with high imaging quality is designed. Combined with the design results, Tracepro software is used to model the optical system, and the irradiance and uniformity of the radiation surface of the light source system and the exit of the optical system are simulated and analyzed. The irradiance and uniformity of the radiation surface of the light source are tested experimentally with an irradiance meter to verify the accuracy of the theoretical analysis. The measured results show that the irradiance of the radiation surface of the light source meets the index requirements, and the irradiance unevenness is 2.75%, which meets the development requirements of the infrared star simulator.

Key words: Infrared star simulator; Radiation flux transfer model; Tracepro software; Collimating optical system; Irradiation uniformity

OCIS Codes: 120.4570; 120.4800; 120.4820; 220.2740; 220.3620