

doi: 10.3788/gzxb20174607.0722002

基于 DMD 光谱可调的星模拟器光源光学系统设计

徐达¹, 张国玉^{1,2}, 孙高飞^{1,2}, 张宇³, 雷杰³, 马一原³

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

(3 航天系统仿真重点实验室, 北京 100000)

摘 要: 为满足在各种谱线分布下对星敏感器探测能力的高准确度标定, 提出了一种基于数字微镜器件的光谱可调星模拟器光源光学系统设计方法, 以解决星模拟器与星敏感器观星色温不匹配对星敏感器光信号定标准度产生的问题. 首先, 根据设计指标选取 Czerny-Turner 型光学系统为光源光学系统, 对 Czerny-Turner 型光学系统的彗差和象散进行分析, 选取消彗差的 Czerny-Turner 结构; 其次利用 MATLAB 程序求解 Czerny-Turner 型光学系统初始结构并应用 ZEMAX 对其进行优化; 最后对光学系统进行公差分析. 公差分析结果表明, 在 400~1 100 nm 的工作谱段范围内, 光学系统的光谱分辨率小于 2 nm, 设计结果满足要求, 有效降低了光谱不匹配带来的定标误差.

关键词: 星模拟器; 光谱匹配; 光学设计; 公差分析; 像差校正

中图分类号: V524.3; TH744

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0722002-7

Optical System Design of Star Simulator Light Source with Spectrum Adjustable Based on DMD

XU Da¹, ZHANG Guo-yu^{1,2}, SUN Gao-fei^{1,2}, ZHANG Yu³, LEI Jie³, MA Yi-yuan³

(1 School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun 130022, China)

(3 Key Laboratory of Space System Simulation, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to satisfy the high precision calibration of the detection ability of star sensor in different spectrum distribution, a design method of star simulator light source system with spectrum adjustable based on digital micro-mirror device was presented, which could solve the issue of star sensor optical signal calibration precision caused by the mismatch between star simulator's color temperature and star sensor's detecting color temperature. Firstly, according to the design technical specification, the Czerny-Turner optical system was selected as the light source optical system, two main aberrations of Czerny-Turner system, coma and astigmatism, were analyzed, and a coma-corrected Czerny-Turner structure was adopted. Secondly, the initial structure parameters of Czerny-Turner optical system was calculated by MATLAB and then optimized by ZEMAX. Finally, the tolerance analysis of the optical system was carried out. The result shows that the spectral resolution is less than 2 nm within the working spectrum range from 400 nm to 1 100 nm, which meets the requirements, and effectively diminishes the calibration error caused by spectral mismatch.

Key words: Star simulator; Spectrum matching; Optical design; Tolerance analysis; Aberration

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(No. 20160204008GX)、长春理工大学科技创新基金(No. XJLJG-2016-15)和国家级重点实验室基金(No. 61420020210162002)资助

第一作者: 徐达(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航天地面标定及仿真试验. Email: 418168115@qq.com

导师(通讯作者): 张国玉(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电检测与航天器设备模拟. Email: zh_guoyu@163.com

收稿日期: 2017-01-03; **录用日期:** 2017-03-04

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

correction

OCIS Codes: 220.2740; 220.3620; 220.4298; 120.6200; 350.6090

0 引言

星敏器作为一种准确度最高的空间姿态光学敏器,在空间领域得到了广泛应用.空间科学技术的不断发展对星敏器的测量准确度提出了越来越高的需求^[1-2],星敏器不仅要具有较高的姿态测量准确度,还要具有较强的恒星光谱探测能力^[3].当模拟恒星光谱信息的峰值波长与星敏器探测器的响应峰值波长相对应时,标定出的星敏器探测能力可能会很高,但当星敏器观星时拍摄同一恒星时,由于恒星光谱信息的峰值波长与星敏器探测器响应峰值波长相差较远,星敏器有可能探测不到该星点.同样,当模拟出来的星点谱线峰值波长位置与星敏器探测器响应峰值波长相差较远时,标定出的星敏器探测能力会偏低,这种光谱的不匹配会对星敏器的光信号标定产生一定的误差^[4-6].

美国国家标准和技术研究院研制了一种使用大量发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的光谱分布可调积分球光源^[7];国内的朱继亦等提出一种改进 LED 光谱的光源模型^[8],由于可变电流驱动 LED 会引起半峰全宽的变化和峰值波长的漂移,降低光谱匹配算法的效率和准确度,因此一般只通过改变 LED 点亮个数来调整合成光谱,该光源在有些波段合成光谱的误差较大;英国国家物理实验室设计以溴钨灯为发光介质的光谱分布可调谐光源系统^[9];国内的刘洪兴等在此基础上采用溴钨灯和恒流驱动的 LED 混合光源作为积分球内部光源进行了光谱分布及匹配研究^[10],但由于有些波段 LED 难以配齐,因此光谱范围只有 570~640 nm;西安光学精密研究所李晓妮在此基础上设计的基于 LED 的星模拟器光源系统,光谱范围可扩展至 400~900 nm^[11].

针对以上问题,本文对具有恒星光谱模拟功能的星敏器地面标定系统进行了研究,提出了一种基于数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)光谱可调星模拟器光源光学系统设计方法,以实现星敏器宽光谱、高准确度的光谱探测能力的标定,解决星敏器在地面标定实验过程中光谱不匹配对星敏器光信号标定准确度产生的影响,并提高星敏器的定标准确度.

1 基于 DMD 的光源光学系统原理

1.1 系统组成和工作原理

基于 DMD 光谱可调星模拟器是一种星敏器光谱探测能力用地面标定系统,可以提供恒星的精确光谱信息和星间角距,能更好地模拟出星敏器在轨工作的实际工作状态,提高星敏器的地面标定准确度.它主要由光源、基于 DMD 的光谱模拟系统、输出光谱测试设备、高准确度准直光学系统、电源和安装支架、驱动电路以及计算机组成,总体结构如图 1.光源的作用是给光谱模拟系统提供一定光谱范围的入射光束;光谱模拟系统利用光栅的分光作用,将入射混合光束的各个谱段的光线分开,各个谱段的光线依次排列在数字微镜 DMD 上,通过控制数字微镜的偏折方向进行光谱曲线的调整,达到对模拟目标光谱曲线的连续可调节,最后将目标光谱曲线的光束投射到星模拟器.

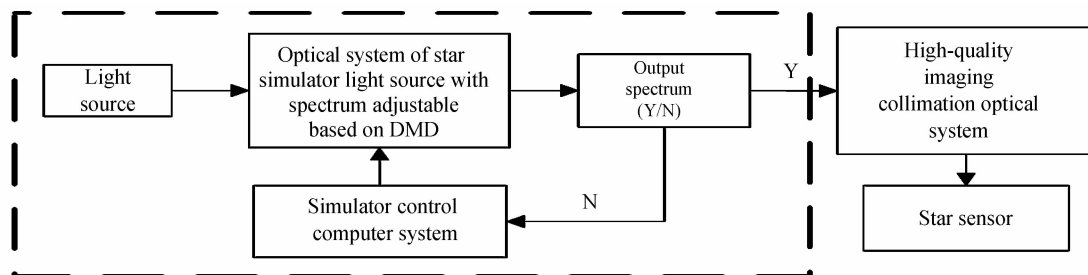


图 1 基于 DMD 光谱可调星模拟器总体结构
Fig. 1 Overall structure of star simulator based on DMD

1.2 主要技术指标

根据星敏器的使用要求,基于 DMD 光谱可调星模拟器光源光学系统主要技术指标如表 1.

表 1 光学系统主要技术指标
Table 1 Technical specification of optical system

Parameters	Value
Spectral range/nm	400~1 100
Spectral resolution/nm	<3
Spectral non-matching errors/%	<3
Detector array size	1 920×1 080
Detector pixel size/ μm	7.5

2 基于 DMD 的光源光学系统设计

2.1 系统初始结构的计算

基于 DMD 光谱可调的星模拟器光源系统采用 Czerny-Turner 结构,传统的 Czerny-Turner 结构主要存在三种像差,即球差、彗差和像散.其中球差会使谱线宽度对称扩展,谱线宽度的变大会严重影响 Czerny-Turner 结构的光谱分辨率;彗差会使谱线产生单边扩散效应,降低光谱分辨率,也容易造成假谱线^[12],因此必须校正到合理的范围,是 Czerny-Turner 光学系统必须校正的像差;像散会使狭缝像沿狭缝高度方向上被扩展到几毫米甚至更大.由于本文提出的基于 DMD 光谱可调的星模拟器光源系统需要在面阵探测器 DMD 上获得沿子午方向排列的细长光谱条纹,因此只需考虑光学系统球差和彗差的校正,而不需要考虑像散的影响. Czerny-Turner 光路结构如图 2,其中 α_1 为主光线在准直反射镜上的离轴角, α_2 为主光线在聚焦反射镜上的离轴角, i 为主光线在光栅上的入射角, θ 为中心波长的衍射角, σ 为像面法线与中心波长主光线的夹角, L_{CD} 为准直反射镜到光栅的距离, L_{GF} 为光栅到聚焦反射镜的距离.

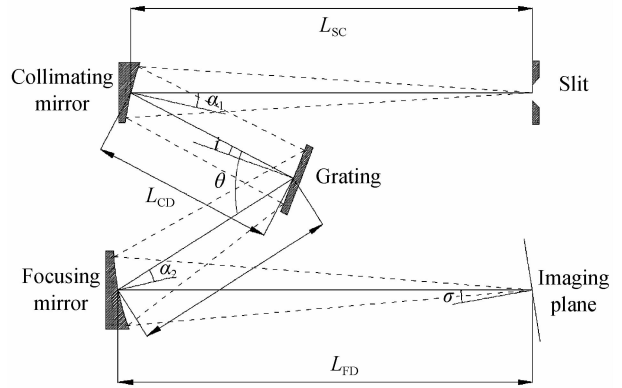


图 2 Czerny-Turner 系统光路结构
Fig. 2 Schematic of Czerny-Turner optical system

球差对 Czerny-Turner 光学系统的影响分别在空间维和光谱维上,在空间维上球差会降低光学系统的空间分辨率,而在光谱维上球差会使光谱谱线扩散,导致边缘成像模糊,因此要把球差控制在像差容限以内.由于球差使谱线宽度对称扩展,当准直反射镜采用凹球面反射镜时,必须把球差控制在合理的范围内,尽可能地提高光学系统的分辨率.根据瑞利判据知,由球差所产生的波像差应小于 $\lambda/4$ ^[13],即

$$W_s = h^4 / 8r^3 \leq \lambda/4 \quad (1)$$

式中, W_s 为由球差产生的波像差, r 为准直反射镜的曲率半径, h 为准直反射镜通光口径的一半.由式(1)可得准直反射镜的焦距 f 与许可的相对口径 $F(F=f/D)$ 之间的关系,即

$$f \leq 256 \cdot \lambda \cdot F^4 \quad (2)$$

$$D \leq 256 \cdot \lambda \cdot F^3 \quad (3)$$

在 Czerny-Turner 结构中,如图 2,由于准直反射镜和聚焦反射镜均是在离轴条件下使用,因此这种光线的离轴入射会带来比较大的轴外像差,这是 Czerny-Turner 光学系统中存在较大彗差的主要原因.由于彗差在空间上会影响光学系统的空间分辨率,而在成像上使光谱线单边扩散,造成光谱谱线一边清晰另一边模糊,从而导致光学系统光谱分辨率的下降,彗差过大时还会产生假谱线,因此 Czerny-Turner 结构必须校正彗差.

根据 Beulter 光程函数理论和费马原理^[14-16]可知, Czerny-Turner 光学系统的彗差可以分为两部分,分别是准直反射镜的离轴反射和聚焦镜的离轴反射,由于准直镜的离轴反射而在聚焦镜焦面上产生的彗差宽度可以表示为

$$\epsilon_1 = (r_2/2) \cos \alpha_2 \delta\theta = \frac{3W^2 r_2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos^3 i}{8r_1^2 \cos^3 \alpha_1 \cos \theta} \quad (4)$$

式中, r_1 为准直镜半径, r_2 为聚焦镜半径, W 为光栅宽度, α_2 为聚焦镜的离轴角.由于聚焦镜的离轴反射在聚

聚焦焦面上产生的彗差宽度可表示为

$$\epsilon_2 = (r_2/2) \cos \alpha_2 \left(\frac{\partial F}{\partial w} \right) = \frac{3W^2 \cos^2 \theta \sin \alpha_2}{8r_2 \cos^2 \alpha_2} \quad (5)$$

因此系统的总彗差为 $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$, 令 $\epsilon = 0$ 可得彗差校正条件为

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \left(\frac{\cos i}{\cos \theta} \right)^3 \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \right)^3 \quad (6)$$

由彗差的校正过程知, 可以对 Czerny-Turner 结构先选定 α_1, r_1, r_2, i 和 θ , 通过优化聚焦镜的离轴角 α_2 来校正彗差. 由式(6)也可看出, 只有非交叉的 Czerny-Turner 结构才能满足消像散条件, 而交叉的 Czerny-Turner 结构不能满足. 由于光栅的衍射作用, 不同波长的光线具有不同的衍射角, 聚焦镜对不同波长的光线的离轴角 α_2 不同, 这是影响宽波段 Czerny-Turner 结构彗差同时校正的关键因素.

2.2 系统设计

根据对 Czerny-Turner 系统校正像差原理和方法的分析, 通过 MATLAB 程序计算 Czerny-Turner 系统初始结构参量, 然后用光学设计软件 ZEMAX 对初始结构进行光线追迹和优化设计.

通过 MATLAB 软件编写满足消彗差条件的 Czerny-Turner 光学系统的初始结构参量计算程序, 程序框图如图 3. 先确定准直反射镜的离轴角 α_1 、准直反射镜曲率半径 r_1 、聚焦反射镜的曲率半径 r_2 、入射光束与光栅表面法线的夹角(入射角) i 以及中心波长的衍射角 θ , 然后根据彗差的校正条件式(12)求出聚焦反射镜的离轴角 α_2 , 此时光学系统只对中心波长校正彗差, 由于光栅的衍射作用, 聚焦反射镜对不同波长光线的离轴角 α_2 不同, 因此通过对 $\epsilon_{\lambda 1}$ 和 $\epsilon_{\lambda 2}$ 的分析, 计算出使 $\epsilon_{\lambda 1}$ 和 $\epsilon_{\lambda 2}$ 尽可能小的离轴角 α_2 , 此时聚焦反射镜对不同波长光线的离轴角近似相同.

光学系统初始结构参量和优化后的结构参量如表 2, 由于数字微镜 DMD 的电路板结构尺寸比较大, 对入射狭缝处的机械结构优化后的 Czerny-

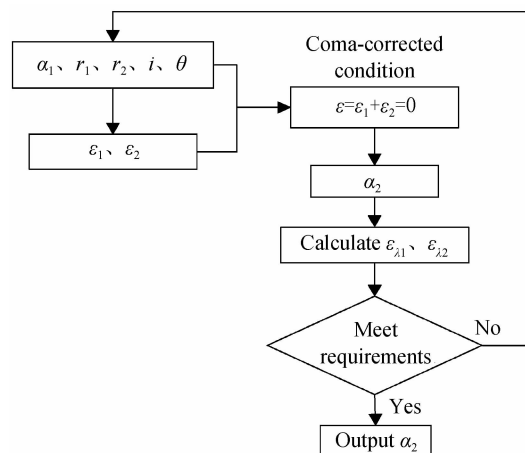


图 3 满足消彗差条件的 Czerny-Turner 初始结构参量计算程序框图

Fig. 3 Program diagram for initial structure parameters of coma-corrected Czerny-Turner structure

表 2 光学系统结构参量

Table 2 Parameters of optical system

Parameters	Initial structure parameters	Optimized structure parameters
$\alpha_1 / (^\circ)$	6	6
$\alpha_2 / (^\circ)$	12.1	13.3
r_1 / mm	84.5	84.5
r_2 / mm	120.2	123.097
$i / (^\circ)$	7	7
$\theta / (^\circ) (\lambda = 750 \text{ nm})$	20.296	20.296
L_{SC} / mm	42.25	42.835
L_{FD} / mm	42.25	42.25
L_{GC} / mm	42.25	42.25
L_{GF} / mm	59.211	56.4
$\sigma / (^\circ)$	14.45	12.5

Turner 光学系统光路图如图 4, 其中为了获得沿弧矢方向的细长条纹, 聚光反射镜采用柱面镜.

光学系统设计结果如图 5~7. 图 5 为光学系统点列图, 由图可以看出, 整个光谱范围内彗差校正良好, 并且光学系统全谱段的光谱分辨率优于 1 nm; 由图 6 光学系统 RMS 半径随波长的变化曲线可以看出, 在整个谱段范围内, 沿 y 方向的光斑大小均小于 $6 \mu\text{m}$, 满足设计要求; 由图 7 可知, 在 $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ 处, 光谱分辨率为 0.5 nm, 中心光谱 $\lambda_2 = 750 \text{ nm}$ 附近的光谱分辨率可以达到 0.2 nm, 整个谱段的上限 $\lambda_3 = 1100 \text{ nm}$ 附

近的光谱分辨率为 1 nm.

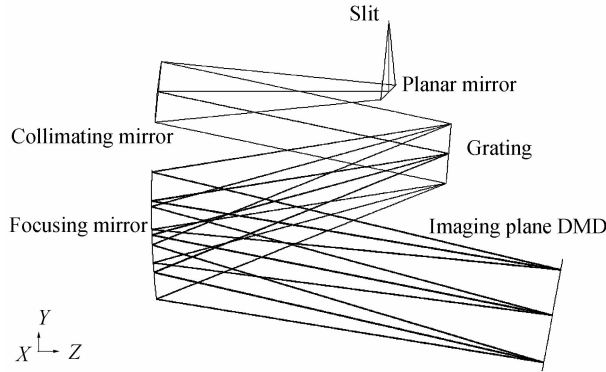


图 4 优化后的 Czerny-Turner 光学系统光路
Fig. 4 Layout of optimized Czerny-Turner optical system

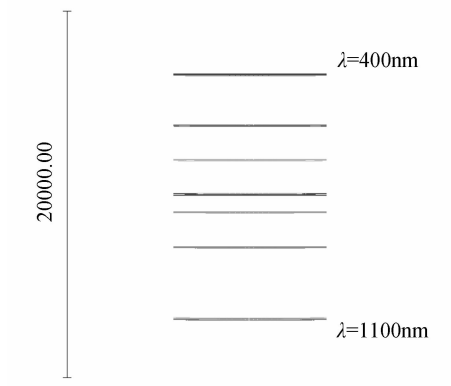


图 5 光学系统点列图
Fig. 5 Spot diagram of optical system

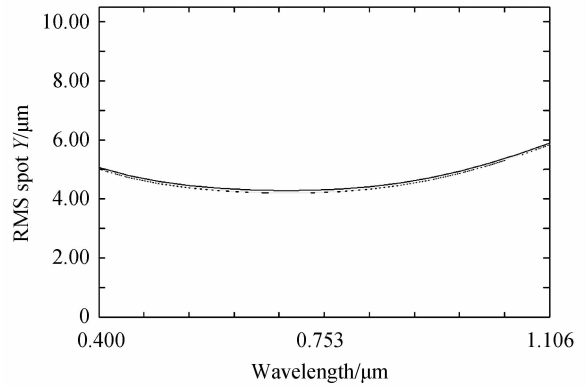
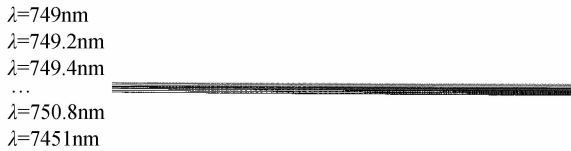
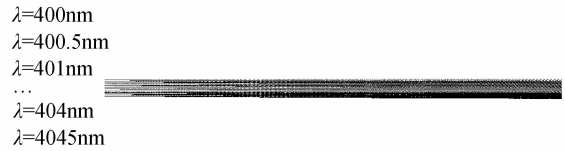


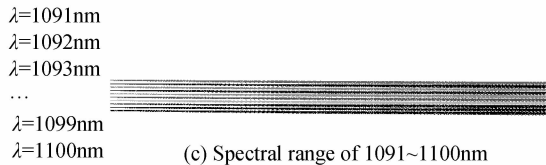
图 6 光学系统 RMS 半径随波长的变化
Fig. 6 Change of optical system RMS with wavelength



(a) Spectral range of 749~751nm



(b) Spectral range of 400~404.5nm



(c) Spectral range of 1091~1100nm

图 7 光谱分辨率
Fig. 7 Spectral resolution

3 光学系统公差分析

光学系统实际的性能好与坏不仅与光学系统的设计结果有关,还与现有的加工技术和装配技术有关.对 Czerny-Turner 光学系统进行公差分析,公差数据如表 3.

令准直反射镜和聚光反射镜的半径与样板的半径偏差为 0.1 mm,各光学元件之间的间隔误差为 ±0.02 mm.由于 Czerny-Turner 光学系统的各个

表 3 光学系统公差
Table 3 Tolerances of optical system

Parameters	Value
y axis eccentricity/mm	±0.01
x axis eccentricity/mm	±0.01
y axis tilt/(°)	±0.1
x axis tilt/(°)	±0.1
Thickness/mm	±0.02
Radius/mm	0.2

光学元件均为反射镜,故对系统进行倾斜和偏心分析时只需考虑元件的倾斜误差和偏心误差,无需单独设置反射面的倾斜和偏心误差.为保证光学系统的成像质量,元件的偏心误差设为 ± 0.01 mm,倾斜误差设为 $\pm 0.1^\circ$.使用 Merit Function 作为光学系统误差分析的评价函数,通过对 Merit Function 变化量的分析就可大致了解该光谱模拟系统的工作质量.通过 ZEMAX 对光学系统进行了公差分析后,ZEMAX 公差数据给出了对系统成像质量影响最大的 10 种像差,分析结果如表 4.由表 4 可以看出,对光学系统影响比较大的公差分别为准直反射镜和聚焦反射镜的倾斜误差,因此在设计准直反射镜和聚焦反射镜固定件时,要充分考虑准直反射镜和聚焦反射镜水平与垂直两方向上的可调性.

考虑给定的公差后,光学系统光谱分辨率仍能达到 2nm,各谱段沿 y 方向的光斑尺寸均小于 $7.5 \mu\text{m}$,即小于 DMD 单像元尺寸,最后对基于 DMD 光谱可调星模拟器光源系统进行测试,由 Czerny-Turner 光学系统可知光谱分辨率的大小取决于入射狭缝的宽度,考虑到光谱分辨率、光通量以及光谱模拟准确度之间的关系,通过更换不同的狭缝,分别对不同光谱分辨率下的三种色温 $T=3\ 900$ K、 $T=4\ 800$ K 和 $T=6\ 500$ K 的模拟光谱曲线进行实测,结果表明光谱分辨率为 2 nm、10 nm 和 20 nm 时,光谱曲线模拟准确度分别为 0.21%、1.87% 和 4.92%,满足星模拟器色温模拟准确度,公差分配合理.

表 4 对光学系统影响最大的公差
Table 4 Worst offenders of optical system

Parameters	Position	Value	Change
TETX	Collimating mirror	0.1	0.00018
TETX	Focusing mirror	0.1	0.00010
TETY	Focusing mirror	0.1	8.66×10^{-5}
TETY	Focusing mirror	-0.1	8.65×10^{-5}
TETX	Focusing mirror	-0.1	8.09×10^{-5}
TETX	Planar mirror	-0.1	7.34×10^{-5}
TETX	Collimating mirror	-0.1	7.01×10^{-5}
TTHI	L_{sp}	-0.02	5.18×10^{-5}
TETY	Collimating mirror	0.1	4.53×10^{-5}
TETY	Collimating mirror	-0.1	4.53×10^{-5}

4 结论

本文提出了一种基于 DMD 光谱可调星模拟器光源光学系统的设计方法,解决了由星模拟器与星敏感器观星的色温不匹配对星敏感器光信号定标准度产生的问题,可以有效降低光谱不匹配带来的定标误差.通过 MATLAB 编程求取了消彗差 Czerny-Turner 系统初始结构,应用 ZEMAX 软件对初始结构进行优化设计,设计结果表明光学系统像差校正良好,在整个光谱范围内光谱分辨率均优于 1 nm,中心谱段范围光谱分辨率达到 0.2 nm,系统各波长沿 y 方向的 RMS 值均小于 $6 \mu\text{m}$.公差分析后光学系统光谱分辨率仍可达到 2 nm,各谱段沿 y 方向的光斑尺寸均小于 $7.5 \mu\text{m}$,满足成像质量要求.对基于 DMD 光谱可调星模拟器的测试结果表明光谱分辨率为 2 nm、10 nm 和 20 nm 时,光谱曲线模拟准确度分别为 0.21%、1.87% 和 4.92%,达到了对恒星光谱的高准确度模拟和连续可调,提高了星敏感器的定标准度,为后续的研究提供了理论依据和研究方法.

参考文献

- [1] TRIVELLIN N, BARBISAN D, FERRETTI M, *et al.* Adaptive multi-wavelength LED star simulator for space life studies[C]. SPIE, 2016: 976815.
- [2] UMAMAHESWARAN S, NAGENDRA S. Microcontroller based multi-star using controller area network(CAN)[C]. IEEE, 2009: 139-145.
- [3] SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, LIU Shi, *et al.* Star position correction of dynamic star simulator based on distortion effect[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(6): 887-893.
孙高飞, 张国玉, 刘石, 等. 星敏感器光谱探测能力用地面模拟测试系统设计[J]. *空间科学学报*, 2014, **34**(6): 887-893.
- [4] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, LIU Ze-xun, *et al.* LED-based single star simulator with multi-color-temperatue and multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 179-186.
刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器[J]. *光学学报*, 2015, **35**(2): 179-186.

- [5] CHEN Feng, ZHENG Xiao-bing. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(3): 415-419.
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标准确度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(3): 415-419.
- [6] WAN Zhi, LI Bao-yong, LI Xiang-sheng, *et al.* Influence of integrating sphere source's distribution temperature on broadband optical remote sensor's absolute radiometric calibration and correcting methods[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **33**(8): 863-868.
万志, 李葆勇, 李宪圣, 等. 积分球光源分布温度对宽波段光学遥感绝对辐射定标的影响及其校正[J]. 发光学报, 2010, **33**(8): 863-868.
- [7] FRCY I, BROWN S W. Led-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(11): 111309.
- [8] ZHU Ji-yi, REN Jian-wei, LI Bao-yong, *et al.* Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(6): 882-887.
朱继亦, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于 LED 的光谱可调光源的光谱分布合成[J]. 发光学报, 2010, **31**(6): 882-887.
- [9] WALL C F, HANSON A R, TAYLOR J A F. Construction of a programmable light source for use as a display calibration artifact[C]. SPIE, 2001, **4295**: 259-266.
- [10] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, LI Bao-yong, *et al.* Spectrum-tunable distribution and spectral matching for integrating sphere light source based on bromine tungsten lamps and LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(10): 1074-1080.
刘洪兴, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于溴钨灯和 LED 积分球光源的可调谐光谱分布及光谱匹配[J]. 发光学报, 2011, **32**(10): 1074-1080.
- [11] LI Xiao-ni, WU Cui-gang, ZHAO Xin, *et al.* The research of the light source for star simulator with automatic calibration and adjustable spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0522003.
李晓妮, 吴璀璨, 赵昕, 等. 自动标定型光谱可调星模拟器光源系统[J]. 光子学报, 2015, **44**(5): 0522003.
- [12] TANG Yi, ZHANG Zhi-ge, CHEN Ting-ai, *et al.* Design of visible-ultraviolet cylinder mirror imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0330004.
唐义, 张止戈, 陈廷爱, 等. 一种基于柱面反射镜的紫外/可见光成像光谱仪[J]. 光学学报, 2013, **33**(3): 0330004.
- [13] LIU Jian-peng, TANG Yi, HUANG Gang, *et al.* Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322007.
刘健鹏, 唐义, 黄刚, 等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0322007.
- [14] BEUTLER H G. The theory of concave grating [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1945, **35**: 331-350.
- [15] BLARRE L, OUAKNINE J, ODDOS-MARCEL L, *et al.* High accuracy sodern star trackers: recent improvements proposed on SED36 and HYDRA star trackers[J]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **6046**: 132-138.
- [16] WALL C F, HANSON A R, TAYLOR J A F. Construction of a programmable light source for use as a display calibration artifact[C]. SPIE, 2001, **4295**: 259-266.