

大视场高精度静态星模拟器的光学系统设计

陈启梦¹ 张国玉^{1,2} 王哲¹ 张健¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 针对星敏感器系统的地面测试要求,设计一种大视场高精度静态星模拟器。根据静态星模拟器的工作原理,确定模拟器具有出瞳外置的准直光学系统。结合技术指标,在Zemax平台上优化设计了具有良好成像质量的光学系统,设计结果为:系统焦距99.988 mm,视场达到 $\Phi 39^\circ$,畸变小于0.1%,实现高精度静态星模拟器精确模拟星点。提出了依照光学系统像差确定星点板上各星点刻划位置的方法,避免多次刻划星点板的过程。对设计的系统进行测试,从测试结果看:设计的大视场星模拟器的成像精度达到 $15''$,可以满足对星敏感器地面标定的使用需要。

关键词 光学设计;星敏感器;星模拟器;星点板

中图分类号 V416.8 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.052202

Optical System Design of High-Precision Static Star Simulator with Large Field of View

Chen Qimeng¹ Zhang Guoyu^{1,2} Wang Zhe¹ Zhang Jian¹

¹College of Opto-electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

²Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to complete the calibration work of the star sensor, a high-precision collimating optical system with large field of view is designed. According to the static star simulator's working principle about cohesion between exit pupil of star simulator and entrance pupil of star sensor, the design principle and parameters of optical system is determined. The design results show that the field of view is $\Phi 39^\circ$, distortion is less than 0.1%. A method of making star point board in accordance with aberrations of the optical system is put forward, to avoid process of repeatedly engraving star point board. Finally, the design of the system is tested. According to the testing results: simulated accuracy of the whole system reaches $15''$, the data can meet the using requirement of high accuracy with large field static star simulator.

Key words optical design; star sensor; star simulator; star point board

OCIS words 220.2945; 220.3620; 080.1010; 080.3620

1 引言

空间飞行器在太空中运行时,利用空间姿态测量设备捕获和测量其飞行姿态信息。星敏感器是空间飞行器中广泛使用的一种高精度空间姿态测量仪器,它通过识别天球中不同位置的恒星来提取运载器姿态,精度可以达到角秒级^[1-2]。随着空间技术的发展和飞行器姿态定位要求的提高,对星敏感器的技术指标要求也愈来愈高。星模拟器作为星敏感器的地面标定设备也得到了越来越广泛的关注,研制能够满足星敏感器地面测试工作的大视场高精度星模拟器已迫在眉睫。

静态星模拟器是在地面上准确模拟天空中恒星位置的仪器,主要由驱动电路、光源、星点分划板、滤光

收稿日期: 2013-10-18; 收到修改稿日期: 2014-01-02; 网络出版日期: 2014-04-09

作者简介: 陈启梦(1989—),女,博士研究生,主要从事光学设计及航天器地面标定方面的研究。

E-mail: qmchen1989@163.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测与航天器模拟设备等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

片及光学系统五个部分组成。其中,光学系统的性能直接影响到星模拟器的技术指标,如模拟的星空范围、恒星位置模拟的精度等。对于星模拟器的光学系统,要求能够与星敏感器的光学系统对接良好,考虑星敏感器探测,星模拟器各视场的弥散斑应分布在特定范围内^[9],并具有较好的对称性^[4-5],这决定了星模拟器光学设计的特殊性。具有较高像质的宽波段范围、小畸变、平像场的光学系统将为星模拟提供精确的恒星星图模拟打下良好基础。

本文设计了一种大视场星模拟器光学系统,该系统通过失对称结构变化,能够降低畸变和减小倍率色差。设计结果表明焦距、畸变和能量集中度等均满足设计指标要求。提出了一种确定星点刻划位置的方法,最后结合应用于该系统所得到的实验结果,验证了系统应用的可行性。

2 星模拟器光学系统的设计原则与设计参数

2.1 设计原则

光学系统是静星模拟器的核心部分,其主要作用是出射平行光束,将位于系统焦面位置的星点分划板成像到无穷远处模拟恒星位置,同时通过严格的像差校正,保证模拟星点的能量均衡和位置准确,故光学系统设计要选用准直光学系统。准直光学系统设计的主要依据是保证全视场各星点发出的光对星敏感器的入瞳光通量相等,并且星模拟器出瞳口径与星敏感器入瞳口径参数相匹配,实现将星模拟器的所有星图信息都传递给星敏感器。由于星敏感器入瞳位于光学系统后侧,因此要求静态星模拟器光学系统出瞳外置;根据光瞳衔接原则,设计时需要保证星模拟器的出瞳位置与星敏感器的入瞳位置重合,如图1所示。

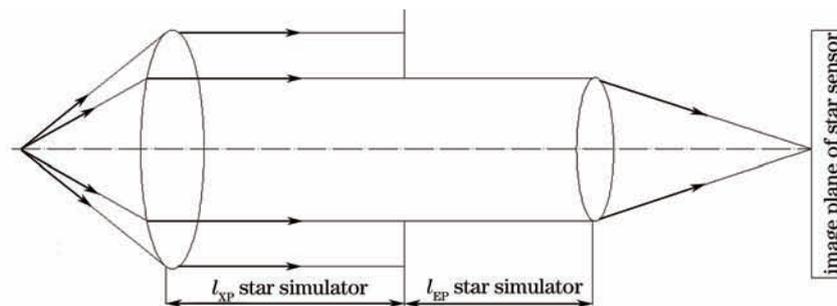


图1 星模拟器出瞳与星敏感器入瞳的衔接图

Fig.1 Cohesion graph between exit pupil of star simulator and entrance pupil of star sensor

2.2 设计参数

根据星敏感器地面标定要求,得到大视场高精度静态星模拟器光学系统的设计指标,如表1所示。

表1 光学系统的设计指标

Table 1 Technology parameter table of optical system

Parameter	Target
Focal length /mm	100±1
Field of view /($^{\circ}$)	$\geq \Phi 37^{\circ}$
Entrance pupil diameter /mm	$\geq \Phi 18$ mm
Entrance pupil distance / mm	≥ 70
Wavelength range / μ m	0.5 ~ 0.8

3 光学系统的设计与像质评价

3.1 光学系统结构选择

光学系统的像差直接影响着星模拟器的精度^[6],在光学设计中主要考虑四个方面:1)要保证模拟的恒星星点具有很高的成像位置精度,成像位置精度主要取决于系统的畸变,故根据大视场星模拟器的精度要求,要严格校正光学系统相对畸变不大于0.1%;2)能量中心与主光线偏差也是造成星点位置误差的一个主要原因,点列图中点的分布情况可以近似表示能量的分布情况,同时这些点的集中程度也可以确定成像点的能量中心,故应尽量减小系统能量中心与主光线偏差,便于提高出射平行光的准确度;3)星模拟器的光学系统

用调制传递函数(MTF)曲线衡量准直性的好坏,结合系统平像场的设计要求,设计结果并非只追求高的MTF,而是保证各视场的弥散斑几何半径相差不大;4)光学系统的垂轴像差会由于大出瞳距离而增大,需严格控制随主光线投射高度改变而改变的彗差、像散和倍率色差。

根据上述分析结果,选取一种目镜系统作为光学系统的初始结构,如图2所示。该目镜由一个平凸透镜和一组三胶合透镜组成,系统入瞳外置于平凸透镜的前方,根据单透镜像差特点可知平凸透镜将产生彗差和像散,它的像差通过后面的三胶合镜组校正。在三胶合透镜组中,第一个曲率产生的光焦度和平凸透镜组合起来与目镜的总光焦度相等,于是整个目镜的光焦度由像面的两个密接正薄透镜负担,这样有利于减小场曲和增大出瞳距离,最后一个曲率相当于场镜,用来调整目镜的光瞳位置^[7-8]。

3.2 系统设计结果

在设计过程中,为校正畸变和场区,将三胶合镜组分离,增加设计中的自由度。由于出瞳距离较大,改变透镜的曲率、厚度和空气间隔仍然无法有效平衡剩余像差,故加入一片透镜进行补偿,引入一片负透镜消除场曲;选择H-FK61和H-ZF62的正负透镜组合消除球差和轴向色差。根据技术指标要求,设计完成后系统焦距为99.988 mm,出瞳口径为20 mm,出瞳距离为80 mm。规划后的系统光路如图3所示。

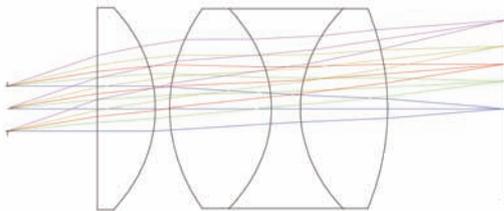


图2 光学系统初始结构图

Fig.2 Initial structure of optical system

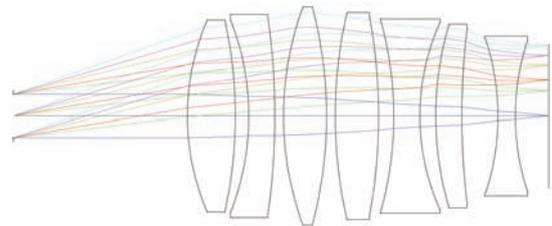


图3 规划后的光学系统结构图

Fig.3 Optimized structure of optical system

3.3 系统设计像质评价

如图4(a)~(f)所示分别是规划后的系统相对畸变曲线、MTF曲线、点列图、倍率色差曲线以及径向能量分布图。结果显示:全视场内中心波长最大相对畸变为0.58%;系统MTF曲线在尼奎斯特频率为60 lp/mm时,全视场的MTF优于0.5,接近衍射极限,达到技术指标的要求;规划后的系统点列图反映像面具有一定弥散性并且对称性较好,弥散斑的方均根值直径均小于 $2\ \mu\text{m}$ (衍射斑半径为 $3.961\ \mu\text{m}$),能量中心与主光线位

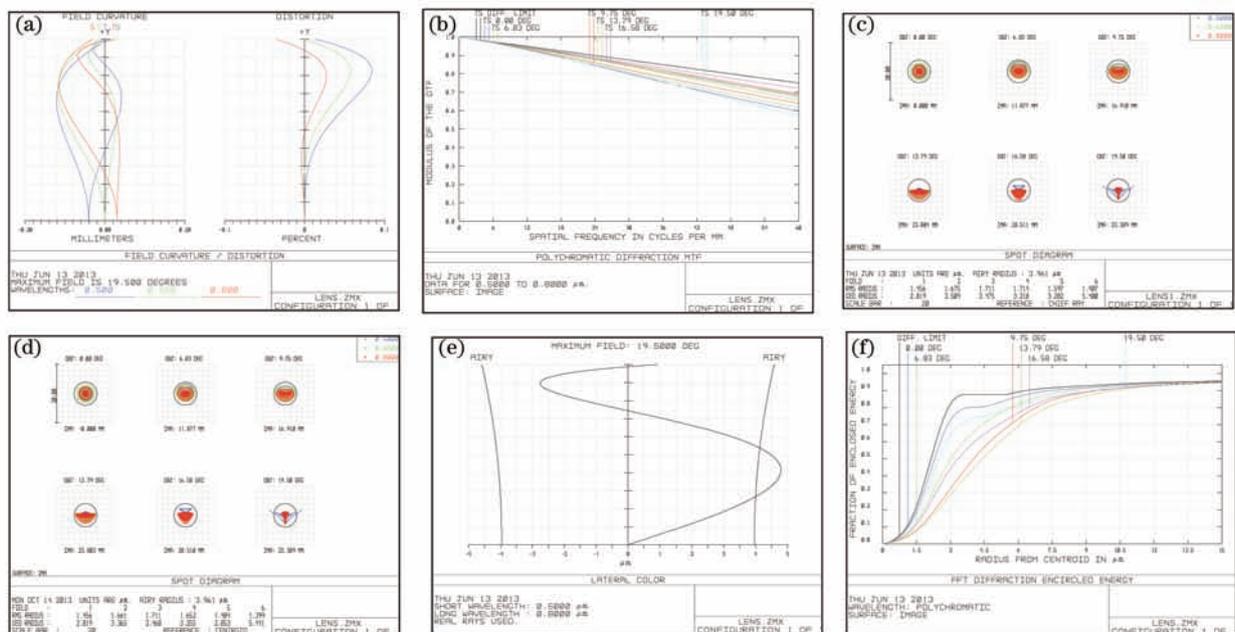


图4 规划后的光学系统。(a)畸变曲线;(b)MTF曲线;(c)主光束点列图;(d)质心点列图;(e)倍率色差;(f)径向能量分布
Fig.4 Optimized optical system. (a) Distortion curves; (b) MTF curves; (c) spot diagram refer to chief ray; (d) spot diagram refer to centroid; (e) lateral color; (f) diffraction encircled energy

置偏差不大;规划后的系统倍率色差弯曲稍大,有剩余高级色差,但是最大视场倍率色差在艾里斑之内;由于系统已经接近衍射极限,用与主光线的距离作为函数的包围圆能量占总能量的百分比显示径向能量分布,从曲线可以看出,静态星模拟器星点板上每个 $15\ \mu\text{m}$ 的透光微孔内能量集中度达到 95% 以上。表 2 是规划后的系统能量中心与主光线位置偏差及产生的角度误差。

表 2 能量中心与主光线位置偏差及产生的角度误差

Table 2 Position deviation of energy center and the chief ray and the induced angle error

Normalized field	Distance deviation / μm	Anglar error /($''$)
0	0.0	0
0.3	0.2152	0.44
0.5	0.0291	0.06
0.71	0.3541	0.73
0.85	0.3896	0.80
1	0.1492	0.31

结合各像差曲线,所设计的光学系统最大剩余畸变在 0.85 视场,畸变值为 $0.0085\ \text{mm}$,系统由于畸变而产生的误差 $\delta_1 = \arctan\left(\frac{0.0085}{99.998}\right) \times 3600 = 17.53''$;系统各视场能量中心与主光线偏差造成的最大角度误差也出现在 0.85 视场,其值为 $\delta_2 = 0.80''$;按照光学系统最佳像面的极限离焦位置与理想相面计算准直性误差 $\delta_3 = 0.42''$ 。最后,对各误差因素进行合成,得到系统星间角距理论精度为

$$\delta = \sqrt{2} \times \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = \sqrt{2} \times \sqrt{17.53^2 + 0.8^2 + 0.42^2} = 24.82'', \quad (1)$$

4 星点位置确定与实验结果

4.1 星点位置确定方法

星模拟器的模拟精度以星间角距误差衡量,对于静态星模拟器,星间角距主要取决于星点分划板上的星点刻划位置。建立的星间角距测试模型如图 5 所示。

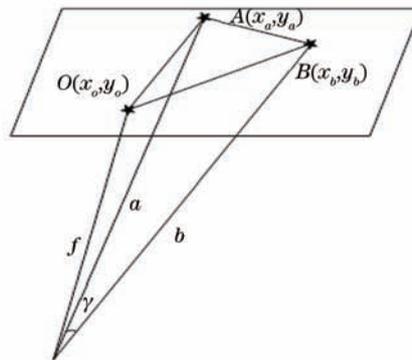


图 5 星间角距测试模型

Fig.5 Diagram of angle error between stars for testing

利用(2)式计算星间角距理论值,其中 (x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) 表示任意两点对星点分划板中心的坐标。

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} = \frac{x_b^2 + y_b^2 + f^2 + x_a^2 + y_a^2 + f^2 - (x_a - x_b)^2 - (y_a - y_b)^2}{2\sqrt{x_b^2 + y_b^2 + f^2} \times \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + f^2}}. \quad (2)$$

从(2)式中看出,一般的星点位置确定方法是已知恒星的单星位置角,根据星模拟器光学系统的设计焦距 f' ,计算每个恒星星点在星点板上的平面直角坐标 (x_i, y_i) ,再按照每个恒星星点对应的坐标值刻划星点板。这种方法通常会由于星模拟器光学系统装调后实际焦面偏差造成测试结果超出精度指标要求,而需要反复测量星模拟器实际焦面推算新的星点位置重新制作星点板,又由于在每次推算星点位置时忽略了光学系统畸变的影响,很难进一步提高模拟器精度。因此提出结合准直光学系统的畸变和前后离焦到极限时像点位置的变化,对星点分划板上各星点沿半径方向位置按照归一化的视场及对应的畸变进行拟合,拟合的

曲线如图6所示。

图7所示是对一幅星图修正星点位置的示意图,其中五角星代表按照设计焦距计算的星点刻画位置,圆圈代表按照拟合曲线计算的星点刻划位置。

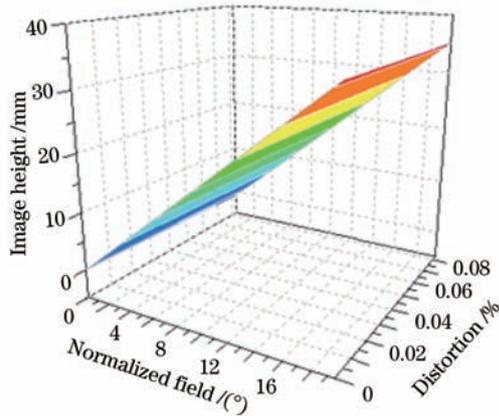


图6 星点位置拟合曲线

Fig.6 Coefficient fitting curve of star position

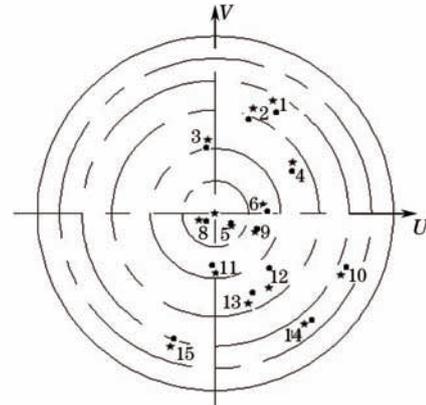


图7 恒星星图

Fig.7 Schematic diagram of star chart

4.2 实验结果

安装星点分划板后,应用所设计的准直光学系统对图7所示星图进行星点位置测试。测试设备选用Leica 5100A型经纬仪,精度为 $0.5''$,测试时分别读取被测星点的方位角 α_i 和俯仰角 β_i ,则实测的星间角距值和星间角距误差值为

$$\gamma_{\text{measure}} = \arccos[\cos\beta_i \cos\beta_j \cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin\beta_i \sin\beta_j], \quad (3)$$

$$\Delta = (\gamma_{\text{measure}} - \gamma_{\text{theory}}) \times 3600''. \quad (4)$$

图8所示是15个测试星点105组星间角距误差分布图。结果表明:所有星点星间角距误差小于 $15''$,提高了依照光学系统设计对星间角距误差的计算结果,达到模拟器的精度指标要求。

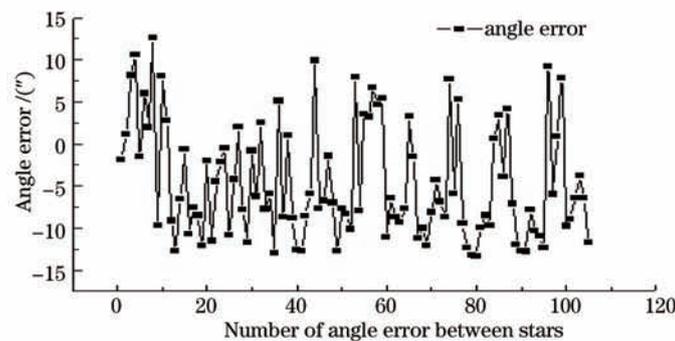


图8 星点位置误差图

Fig.8 Test results of star's positional accuracy

5 结 论

针对星敏感器的地面标定工作要求,利用ZEMAX软件设计了一种大出瞳距离的准直光学系统,应用于高精度静态星模拟器。该系统具有大视场、宽光谱、小畸变等优点,系统结构紧凑、透镜使用传统面型和常用光学材料,易于加工及应用。提出了先修正星点位置制作星点分划板的方法,用所设计的星模拟器对一幅星图进行了实际测试,得到了较好的结果,所有星点星间角距误差小于 $15''$,满足星敏感器进行地面标定的工作要求。

参 考 文 献

- 1 Li Xuexie, Hao Zhihang, Li Jie, *et al.*. The research on the method of the star's position determination of the star sensor [J]. Chinese J Electron Devices, 2004, 27(4): 571-574.

- 李学夔, 郝志航, 李 杰, 等. 星敏感器的星点定位方法研究 [J]. 电子器件, 2004, 27(4): 571-574.
- 2 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005.
- 李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏感器光学系统的研制与性能测试 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
- 3 Carl Christian Liebe. Accuracy performance of star trackers- a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2002, 38(2): 587-599.
- 4 Wang Hu, Miao Xinghua, Wen Desheng, *et al.*. Design optical system of the star sensor of wide field and large relative aperture [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1822-1824.
- 王 虎, 苗兴华, 汶德胜, 等. 宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计 [J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1822-1824.
- 5 Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical syetem of very high precision star sensor with small F -number [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092202.
- 闫佩佩, 樊学武. 大相对孔径甚高精度星敏感器光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 092202.
- 6 Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(s1): 331-334.
- 刘亚平, 李 娟, 张 宏. 星模拟器的设计与标定 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s1): 331-334.
- 7 Li Shixian, Zheng Lenian. *Handbook of Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.
- 李士贤, 郑乐年. 光学设计手册 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- 8 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2657-2660.
- 李旭阳, 李英才, 马 臻, 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计 [J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2657-2660.