

文章编号 1004-924X(2011)08-1730-06

## 甚高精度星模拟器设计

孙高飞<sup>1</sup>, 张国玉<sup>1\*</sup>, 姜会林<sup>1</sup>, 郝云彩<sup>2</sup>, 高玉军<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100190;  
3. 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:** 研制了一套星间角距精度优于 0.2 的甚高精度星模拟器系统对深空光学导航敏感器进行地面标定和精度测试。采用高精度大口径静态可变目标标准源作为甚高精度星模拟器的核心显示器件模拟星图, 同时研制了一种单点可控星图模拟矩阵式 LED 照明系统为其提供光源, 并设计了长焦距大视场投影光学系统使模拟星图成平行光出射, 在光学系统出瞳处产生星图, 从而完成小天体全视场甚高精度星图的模拟。最后, 提出甚高精度星光出射精度的检验方法, 理论分析其测量精度为 0.14。结果表明该模拟器可用于对光学导航敏感器的地面标定和精度测试。

**关键词:** 星模拟器; 地面标定; 星敏感器; 星光出射精度

中图分类号: V524; V448.2 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111908.1730

## Design of very high accuracy star simulator

SUN Gao-fei<sup>1</sup>, ZHANG Guo-yu<sup>1\*</sup>, JIANG Hui-lin<sup>1</sup>, HAO Yun-cai<sup>2</sup>, GAO Yu-jun<sup>3</sup>

( 1. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*  
2. *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)*  
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*  
\* *Corresponding author, E-mail: zh\_guoyu@yahoo.com.cn*

**Abstract:** A very high accuracy star simulator system with the simulation accuracy less than 0.2 was developed to implement the ground calibration and accuracy testing for an Optical Sensor of Autonomous Navigation (OSAN). The simulator utilizes a high-precision and large size star array target to simulate a star map on the focal plane, and takes a luminescence controllable LED array as the illumination system of the target. Furthermore, it uses a long focal length and large FOV collimator as the projection optical system to control the star map on the target to be alterable and to project from the collimator exit pupil in parallel. Finally, the very high accuracy star map is simulated successfully. A testing method of light projection accuracy is proposed, by which the accuracy level of theory analysis is better than 0.14. Obtained result indicates that the star simulator can satisfy the requirements of ground calibration and accuracy testing of the OSAN.

**Key words:** star simulator; ground calibration; star sensor; starlight projection precision

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2010-12-21.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

## 1 引言

伴随我国航天事业的迅猛发展, 深空探测任务逐渐深入, 国际上许多深空探测任务如美国 DS-1 火星探测器等都采用了光学导航敏感器进行自主导航, 这种导航敏感器主要功能是观测沿途小行星的角位置, 通过卡尔曼滤波方法估计确定航天器位置和速度。由于小行星距离航天器的距离比较远, 所以要求光学导航敏感器的测量精度优于 1, 而测试该敏感器的模拟器精度优于 0.2, 因此, 开展甚高精度星敏感器<sup>[2-3]</sup> 标定技术研究至关重要。

国内对星模拟器的研究是从 20 世纪 70 年代末开始, 进入 90 年代后, 国内相关的研究所和高校才对动态星模拟器进行探索性研究。进入 21 世纪后, 随着航天水平的提高, 对星模拟器的精度要求越来越高, 针对高精度星敏感器的标定方法的研究随之令人关注, 由此促进了星模拟器的迅猛发展。已报道的资料显示, 目前星模拟器的模拟星间角距精度在几十秒至十几秒不等, 仅能满足中等精度星敏感器的标定。国外对星模拟器的研究主要做标定型单星模拟器, 且在这方面的技术已相对比较成熟, 但对功能检测型星模拟器的研究较少。

星模拟器<sup>[4-5]</sup> 按工作方式不同可分为标定型星模拟器和功能检测型星模拟器。标定型星模拟器的实质是一个平行光管, 在焦面位置放置星点板, 经光源照射后, 星点板就可以通过平行光管成像到无穷远来模拟星图, 在光源前放置不同的中性滤光片可实现对不同星等的模拟, 放置带通滤光片实现对恒星光谱的模拟。这种星模拟器的结构简单, 没有实时性要求, 但对单星张角、星点位置和星等的模拟精度要求很高。功能检测型星模拟器的主要功能则是可以在地面上进行星图模拟, 产生的实时星图要和待测星敏感器的工作状态相匹配, 以便对星敏感器的星点提取和星图识别算法进行功能测试。这种星模拟器结构较为复杂, 对星图刷新率和模拟星图的星间角距精度要求极高, 其中作为星模拟器显示核心器件的光阀, 国内研制水平很低, 国外对我国有出口限制, 这些制约了我国星模拟器的发展。

本文设计的甚高精度星模拟器将作为光学导

航敏感器甚高精度标定基准装置, 星图模拟的星间角距精度优于 0.2, 实现了基于高精度大口径静态可变目标标准源的静态显示, 同时通过单点可控星图模拟矩阵式 LED 照明系统控制高精度大口径静态可变目标标准源给定星点位置的 LED 发光, 可实现星图动态模拟, 由此解决了星敏感器的甚高精度标定难题。

## 2 星模拟器组成和工作原理

星模拟器<sup>[6]</sup> 主要由动态小天体全视场甚高精度模拟器和高精度大口径静态可变目标标准源两部分组成, 将标准源安装在光学系统焦平面上。前者提供小天体全视场可变星等目标, 后者将目标标准源以 0.2 的出射精度投射到光学导航敏感器入瞳位置, 在星敏感器焦面形成被模拟的星点分布图。

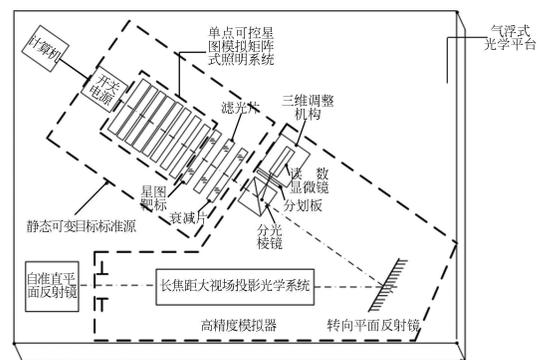


图 1 星模拟器结构示意图

Fig. 1 Schematic layout of star simulator

星模拟器的原理如图 1 所示, 在精度大口径静态可变目标标准源中, 由单点可控星图模拟矩阵式 LED 照明系统控制给定位置的 LED 发光 (各点亮度可控), 经星图靶标入射板照射到位于长焦距大视场投影光学系统焦平面上刻有若干透光微孔的星图靶标上, 由多个光点组合形成特定的星图, 其每个光点的亮度通过 LED 控制单元进行设定, 从而形成静态可变星等目标标准源; 该星图经过滤光片、衰减片、分光棱镜和长焦距大视场投影光学系统后成平行光出射, 在光学系统出瞳处产生星图, 完成小天体全视场甚高精度星图的模拟。利用自准直调焦装置可实现星图靶标的调焦; 利用衰减片实现对不同可视星等照度的模拟。

### 3 星模拟器的设计

#### 3.1 长焦距大视场投影光学系统的设计<sup>[7]</sup>

##### 3.1.1 长焦距大视场投影光学系统主要参数

根据星敏感器使用要求,设计了一个高成像质量的长焦距大视场光学系统,系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 准直物镜系统主要参数

Tab.1 Principal parameters of collimating objective system

系统参数	性能指标
全视场	1.2 1.2
焦距	(5 000 30) mm
有效孔径	200 mm
光谱范围	(0.5~ 0.8) $\mu\text{m}$
中心波长	0.65 $\mu\text{m}$
最大相对畸变	0.005%
波像差(均方值)	$\lambda/20$ (全视场内)

##### 3.1.2 长焦距大视场投影光学系统<sup>[8-9]</sup>结构选取

该系统为长焦距大视场结构,通常采用双胶合或三片式系统。因系统焦距较长,视场大,光阑外置,故轴外像差很难校正。为进一步提高成像质量,本文采用四片式分离系统;而为了便于校验像质,在系统后面附加了分光棱镜以达到分光观察的目的,系统结构如图 2 所示。

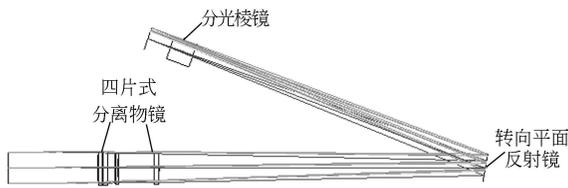


图 2 光学系统光路图

Fig.2 Layout of optical system

##### 3.1.3 长焦距大视场投影光学系统像质分析

优化后的系统场曲与畸变曲线、色差曲线、点列图和波像差分别如图 3,图 4,图 5,图 6 所示。由图 3 可知,系统相对畸变 0.002%;光学系统的倍率色差曲线如图 4 所示,倍率色差在全视场(1.2 1.2)内不大于 1.59  $\mu\text{m}$ ;光学系统的点列图如图 5 所示,由此可知在全视场内其能量中心与主光线误差< 0.89  $\mu\text{m}$ ;由图 6 可知,光学系统

的波像差曲线在 1.2 1.2 内最差,波像差均方值不大于  $\lambda/31.54$ ,满足波像差(均方值)在全视场内  $\lambda/20$  的要求,具有良好的像质,满足高质量成像系统的要求。

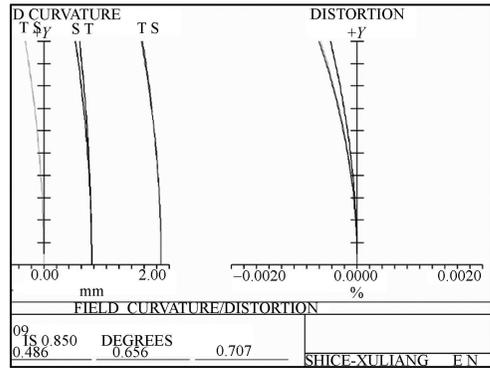


图 3 场曲相对畸变曲线

Fig.3 Field curvature and distortion

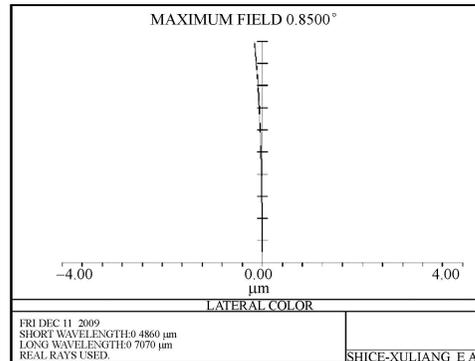


图 4 倍率色差曲线

Fig.4 Lateral chromatic aberration curve

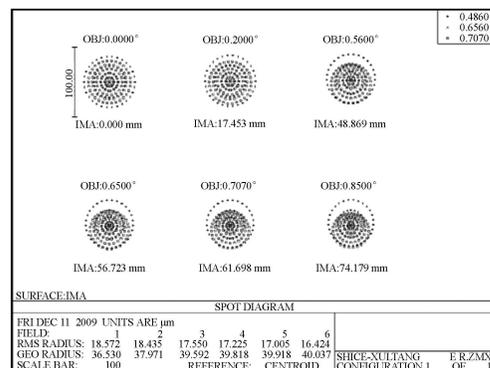


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

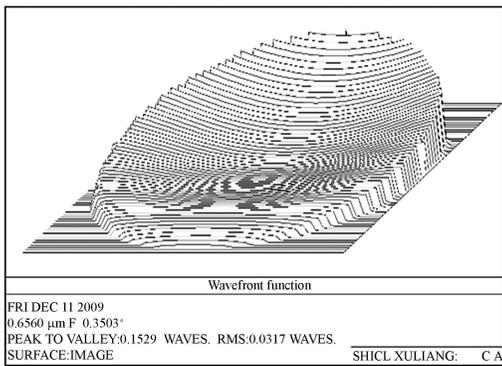


图 6 全视场波像差曲线

Fig. 6 Full field wave aberration curve

### 3.2 高精度大口径静态可变目标标准源

高精度大口径静态可变目标标准源主要由可变星相分布甚高精密度靶标和可变星等弱目标模拟照明系统<sup>[10-11]</sup>两部分组成。其总体布局如图 7 所示。

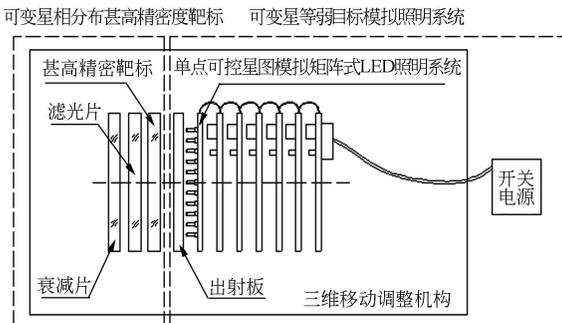


图 7 高精度大口径静态可变目标标准源总体布局图

Fig. 7 Overall layout of standard and static variable objective with high-precision, large-diameter

可变星相分布甚高精密度靶标主要由靶标、光学滤光片、光学衰减片、靶标三维移动调整机构等组成, 其中靶标用于模拟星空星点相对位置。选取靶标尺寸为 120 mm × 3 mm, 根据计算结果, 靶标成像区域尺寸为 70 mm × 70 mm, 在此范围内刻制星点, 要求星点间距位置精度优于 1 μm, 光学滤光片用于实现甚高精度星敏传感器要求的 0.5~ 0.8 μm 光谱区, 光学衰减片实现对不同可视星等照度的控制。

可变星等弱目标模拟照明系统主要由单点可控星图模拟矩阵式 LED 照明系统、星图模拟计算机控制系统(包括硬件与软件)和开关电源等组成。为实现靶标星等可变、亮度均匀与星图可变的照明要求, 采用单点可控星图模拟矩阵式 LED

照明系统发出亮度可调光, 经星图靶标入射板照射到靶标的刻划星点上, 形成亮度均匀星图, 即其中单点可控星图模拟矩阵式 LED 照明系统和星图靶标配合使用作为标准目标源。

## 4 星光出射精度的检测装置

星光出射精度检测装置主要由自准直平面反射镜、分光棱镜、分划板、读数显微镜以及三维调整机构组成, 如图 8 所示。

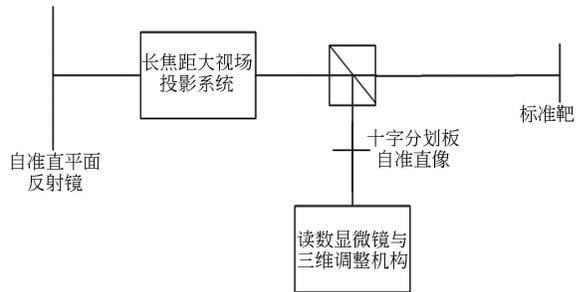


图 8 星光出射精度检测装置与原理图

Fig. 8 Detective device and principle of starlight detector for projection precision

### 4.1 星光出射精度检测方法

以一块特制的标准靶标为基准来标定星光的出射精度, 将标准靶标位置调整到长焦距大视场投影光学系统焦平面上, 其后用光源照明, 标准靶标中的图案经长焦距大视场投影光学系统、自准直平面反射镜、分光棱镜返回后在十字分划板上形成标准靶标的自准直像, 通过读数显微镜(用于瞄准)及三维调整机构(用于测量位移)测量出标准靶标图案自准直像各像点的位置, 并与标准靶标上已知图案位置相比较, 利用这种自准直检测的方法可将检测精度提高一倍。

### 4.2 检测装置精度分析

利用 4.1 节中提到的星光出射精度检验方法, 对影响检测装置精度的误差源进行了分析, 主要包括以下几个方面:

(1) 标准靶标刻线位置误差对检测精度的影响。

由于标准靶标的刻线定位精度为 0.2~ 0.5 μm, 由此产生的测量误差为:

当刻线定位精度为 0.2 μm 时:

$$\frac{0.2 \times 10^{-3}}{5\ 000} \times \frac{3\ 600}{3.14} \times 180 = 0.008\ 3$$

当刻线定位精度为 0.5 μm 时:

$$\frac{0.5 \times 10^{-3}}{5000} \frac{3600}{3.14} \times 180 = 0.0206 \text{ .}$$

即由于标准靶标的刻线定位精度影响造成的测量误差为 0.0083~0.0206。

(2) 三维调整结构位移测量误差对检测精度的影响。

显微镜的三维调整结构的位移测量精度为 1 μm, 考虑到两方向移动, 测量误差应在一维基础上增大 $\sqrt{2}$ 倍, 由此产生的测量误差为:

$$\frac{1 \times 10^{-3}}{5000} \frac{3600}{3.14} \times 180 \times \sqrt{2} = 0.0584 \text{ .}$$

(3) 显微镜瞄准误差对检测精度的影响。

读数显微镜采用夹线对准方式, 考虑到自准像质与照度等, 取其对准误差为 30', 选取读数显微镜的放大率为 50, 则对应的线值误差为:

$$\frac{0.073}{50} \frac{30}{60} = 0.36 \text{ μm .}$$

由此产生的测量误差为:

$$\frac{0.36 \times 10^{-3}}{5000} \frac{3600}{3.14} \times 180 = 0.0149 \text{ .}$$

(4) 光学系统成像质量对检测精度的影响。

由光学系统成像质量产生的测量误差约为 0.124。

(5) 误差合成。

检测装置的测量误差为:

$$\sqrt{0.0206^2 + 0.0584^2 + 0.0149^2 + 0.124^2} = 0.1394 \text{ .}$$

由此可见, 该星光出射检测装置可满足 0.2 测量精度的要求。

## 5 结 论

本文从光学导航敏感器地面标定设备的要求出发, 设计了一种精度优于 0.2 的星模拟器装置。介绍了甚高精度星模拟器的组成和工作原理; 研究了长焦距准直光学系统的设计方法, 使用 zemax 软件设计了光学系统, 基于单点可控星图模拟矩阵式 LED 照明技术, 实现了可变星等的星图模拟。利用配置有标准靶标(高精度网格板)的自准直调焦装置, 实现了星光出射精度的测试, 精度优于 0.2。由此建立了一套光学导航敏感器甚高精度标定装置, 为光学导航敏感器研究奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 李杰. APS 星敏感器关键技术的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.  
LI J. Study the key technology of APS star tracker [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [2] 欧阳桦. 基于 CCD 星敏感器的星图模拟和导航星提取的方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.  
OU Y H. Research on Star Image Simulation and Star Extraction Method for CCD's Star Tracker [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [3] 魏新国, 张广军, 江洁. 星敏感器中星图图像的细分定位方法研究[J]. 航天航空大学学报, 2003, 29(9): 812-815.  
WEI X G, ZHANG G J, JIANG J. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. Journal of University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812-815. (in Chinese)
- [4] 赵晨光, 谭久彬, 刘俭, 等. 用于天文导航设备检测的星模拟装置[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6):

1326-1332.

ZHAO CH G, TAN J B, LIU J, et al. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. Opt. Precision Eng., 2010, 18(6): 1326-1332. (in Chinese)

[5] 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, 10(35): 24-28.

LIU Y P, LI J, ZHANG H. Design and calibration of star simulator [J]. Infrared and Laser Engineering, 1995, 16(4): 24-28. (in Chinese)

[6] 刘一武, 陈义庆. 星敏感器测量模型及其在卫星姿态确定系统中的应用[J]. 宇航学报, 2003, 24(2): 162-167.

LIU Y W, CHEN Y Q. Star-sensor measurement model and its application to the spacecraft attitude determination system [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(2): 162-167. (in Chinese)

[7] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.

LI ZH L, XU D L, ZH X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical

- system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2548-2490. (in Chinese)
- [ 8 ] 苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1648-1653.  
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W, *et al.*. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1648-1653. (in Chinese)
- [ 9 ] 张华, 李晓峰, 杨文淑. 星载激光通信光学反射镜镜面热变形及其对光学系统影响的研究[J]. *红外*, 2008, 4: 28-34.  
ZHANG H, LI X F, YANG W SH. Study on auto focusing algorithm for automatic microscope [J]. *Infrared*, 2008, 4: 396-401. (in Chinese)
- [ 10 ] 陈焯, 张文明. 面向星模拟器的可调准色温光源[J]. *光电工程*, 2010, 27(8): 50-53.  
CHEN Y, ZHANG W M. Tunable color temperature light source for star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 27(8): 50-53. (in Chinese)
- [ 11 ] 胡宜, 巩岩. 星模拟器星光颜色模拟的初步研究[J]. *光电工程*, 2010, 37(8): 65-73.  
HU Y, GONG Y. Preliminary research on color simulation of stars in a star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(8): 65-73. (in Chinese)

## 作者简介:



孙高飞(1985-), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事航空地面标定及仿真试验方面的研究。E-mail: sun-gaofei1985516@163.com



姜会林(1945-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学系统设计、光学CAD技术、医用光学仪器、光电仿真技术、光电检测技术等方面的研究。



郝云彩(1966-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学与遥感, 航天器姿态测量传感器与自主导航技术的研究。e-mail: hyc502cast@163.com



高玉军(1963-), 女, 工程师, 主要从事光学仪器设计方面的研究。

## 导师简介:



张国玉(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。E-mail: zh\_guoyu@yahoo.com.cn