

一种静态星模拟器的设计与星点位置修正方法

孙高飞¹ 张国玉¹ 姜会林¹ 杨孟飞² 王大轶² 郝云彩²

(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)

摘要 为了实现对高精度星传感器的地面标定,设计了一种大视场静态星模拟器,其星间角距精度要求优于 $20''$ 。采用星点分划板作为核心显示器件来模拟星图,通过设计大视场小畸变光学系统使模拟星图成平行光出射,在星传感器入瞳位置产生星图。为保证星点板的星图模拟精度,提出了一种星点位置的修正方法。实验结果表明,经过星点位置修正后的静态星模拟器可以给出星间角距精度优于 $12''$ 的模拟星图,该模拟器可用于高精度星传感器的地面标定。

关键词 静态星模拟器;星传感器;星间角距;标定

中图分类号 V554 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.091201

Design of Static Star Simulator and Proposes A Technique of Correction Method for the Position of Star

Sun Gaofei¹ Zhang Guoyu¹ Jiang Huilin¹ Yang Mengfei² Wang Dayi²
Hao Yuncai²

(¹ Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
(² Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract In order to achieve calibration of ground testing on the high accuracy star sensor, the design of a large static viewing field star simulator is described. The star simulator system need to be established, and the requirements of the system's measurement accuracy is less than $20''$. By using star reticle as the core display, a long-focus and large viewing field optical projection system is designed to simulate stars figure into the parallel light ejected, and star maps are produced at the pupil of the this optical system, then a technique of correction method is proposed by using the focus to modify the position of star on the star reticle. Experimental results show that the star simulator can simulate star chart after correcting the star position; the accuracy of angular distance between stars is less than $12''$. It can be completely used for the calibration of high-precision star sensor.

Key words static star simulator; star sensor; angular distance between stars; calibration

OCIS codes 120.4570; 230.0250; 220.4830; 220.1010

1 引言

星传感器^[1]作为高精度姿态测试元件,是通过观测恒星角距的观测获得空间飞行器的姿态。因此,对星传感器^[2,3]本身的精度标定也显得十分重要。但由于航天试验造价昂贵且繁杂,故星模拟器作为对星传感器进行地面标定的设备^[4,5],近年来得到了广泛而深入的研究和应用。星模拟器按照工作方式不同分为两类,即标定型星模拟器和功能检测型星模拟器。标定型星模拟器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^[6]。这种星模拟器的结构简单,没有实时性要

收稿日期: 2011-04-11; 收到修改稿日期: 2011-04-20; 网络出版日期: 2011-07-29

作者简介: 孙高飞(1985—),女,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: sungaofei1985516@163.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,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(通信联系人)

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则是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。但是,作为功能型星模拟器显示核心器件的光阀,国内研制水平很低,国外对我国的出口限制,因此制约了星模拟器的发展。

本文介绍的静态星模拟器属于标定型星模拟器,是卫星控制分系统地面测试设备的组成部分,用于对星敏感器的功能和性能进行测试,它用于模拟星对角距作为星敏感器的观测目标源,并且视场大、可靠性高,且体积小、重量轻。同时,针对准直光学系统存在的焦距测量误差,提出一种星点位置的修正方法,来保证星点板是根据实际焦距给出的星点位置。

2 静态星模拟器组成和工作原理

静态星模拟器是一种在地面模拟天空中星的位置和亮度,以完成对星敏感器及姿态识别系统进行功能测试的实验装置,主要由准直物镜组件、星点分划板组件、滤光片组件、光源(背光板)、电源和安装支架等组成。星等通过照明光源和调节光源的发光亮度来模拟;星光的光谱由滤光片进行修正;无穷远处星光的模拟由准直物镜来实现。

静态星模拟器的结构示意图如图1所示^[7]。由光源发出的亮度均匀光线,经过滤光片后照亮位于准直物镜焦平面上的星点分划板,其所模拟的星点经准直物镜后以平行光射出,在星敏感器的入瞳处形成一幅完整的星图,即实现了对星图的模拟。



图1 静态星模拟器的组成与工作原理

Fig. 1 Configuration and operating principle of static star simulator

3 光学系统设计

3.1 光学系统主要参数

根据星敏感器使用要求以及星模拟器自身要达到的精度要求,设计一个 $D/f' = 1/2.4$ 、宽谱段、大视场,出瞳外置的光学系统^[8,9],系统的主要参数如表1所示。

表1 准直物镜系统主要参数

Table 1 Principal parameters of collimating objective len system

Effective field / $^{\circ}$	20×20
Focal length /mm	(60 ± 1)
Effective aperture /mm	25
Spectral range / μm	$0.5 \sim 0.8$
Center wavelength / μm	0.65
Exit pupil distance /mm	20
Distortion	$< 0.1\%$

3.2 光学系统结构选取

星模拟器作为高精度星敏感器的标定设备,光学系统要保证星像点具有较高的位置精度,同时,为了保证星模拟器的所有星图信息都能传递给星敏感器,星敏感器和星模拟器的光轴应一致,并且星模拟器的出瞳应该与星敏感器的入瞳重合,符合光瞳衔接原则。本系统类似于目镜系统,由于视场较大且出瞳外置的特点,导致轴外像差,即彗差、像散、场曲、畸变、倍率色差都难以校正;同时本系统为高精度的测试系统,畸变过高会严重影响测试精度,故系统应满足消畸变性能;并且,本系统的孔径较大,球差和轴向色差也应加以考虑。综上所述,本系统为消畸变、平像场、消色差的成像系统。可选择消畸变目镜作为初始结构。消畸变目镜是由一个平凸的接目镜和一组三胶合的透镜组构成的。

在三胶合透镜组里,第一个半径与接目镜组合起来,几乎承担了目镜的全部光焦度,这样的设计有利于

场曲。两个胶合面主要用来校正像散、彗差及垂轴色差。接目镜所成的像刚好落在三胶合透镜组第一个球面的球心和齐明点之间,使之产生正像散和正彗差,用来补偿整个目镜的像差。消畸变目镜的相对畸变为 $2\% \sim 4\%$,远不能满足测试需求,为进一步消除畸变,将系统复杂化处理。将三胶合透镜变为三分离透镜,最后一面透镜光焦度由三片透镜共同承担,为进一步消除场曲,在系统最后一面透镜光焦度由三片透镜共同承担,并在系统最后置负透镜,设计的光学系统结构图如图2所示。

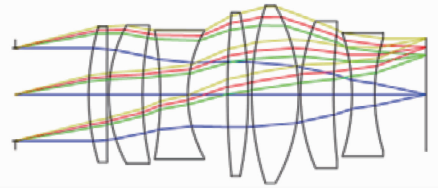


图2 光学系统结构图

Fig. 2 Layout of optical system

3.3 像质分析

优化后的系统像差曲线如图3~5所示。图3为球差和轴向色差曲线图,可知在 0 视场到 0.5 视场的较大范围内,主光线的球差几乎为零,在全视场球差最大,系统已校正球差。在 0.88 带对波长为 $0.5 \mu\text{m}$ 的光和波长为 $0.7 \mu\text{m}$ 的光校正了色差,但两色光的交点与主光线球差曲线并不相交,即系统存在二级光谱。二级光谱与焦深进行比较,本系统的焦深为 $15 \mu\text{m}$,二级光谱大约为 $10 \mu\text{m}$,可知二级光谱在焦深范围之内,则满足使用要求。由图4可以看出场曲和畸变值都很小,畸变的最大值为 0.079% ,满足畸变小于 0.1% 的设计要求。图5为调制传递函数(MTF)曲线图,可知在 40 mm/lp 时, 0 视场的MTF值高于 0.7 ,全视场的MTF值高于 0.5 ,表明系统具有较高的成像质量。

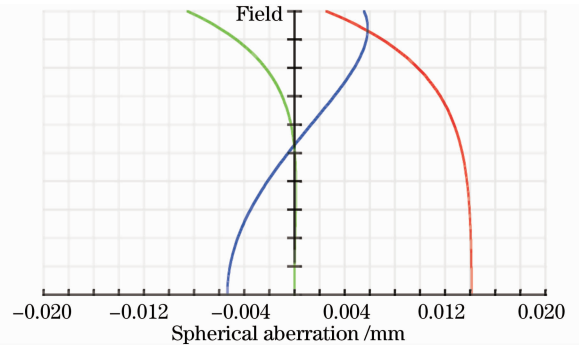


图3 球差和轴向色差曲线图

Fig. 3 Sphere aberration and longitudinal aberration

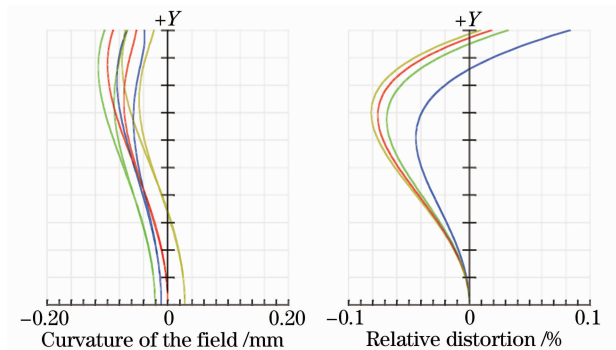


图4 场曲和畸变曲线图

Fig. 4 Field curvature and distortion

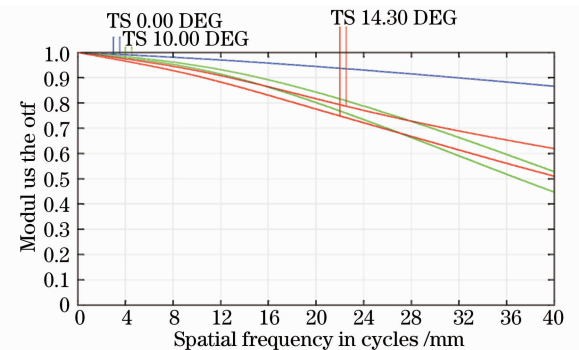


图5 MTF曲线

Fig. 5 MTF curve

3.4 星点分划板的设计指标

据有效视场 $20^\circ \times 20^\circ$ 和焦距 $f = 60 \text{ mm}$ 的参数要求,求得星点板的有效尺寸为 $H = 2 \times 60 \text{ mm} \times \tan(20^\circ/2) = 21.16 \text{ mm}$ 。分划板的对角线尺寸为 $L = \sqrt{21.16^2 + 21.16^2} \text{ mm} = 29.92 \text{ mm}$;星点分划板上的星点图案形状为圆形,为了保证星点位置的准确性,星点刻划直径为 $\phi 10 \mu\text{m}$ 。采用激光直写技术对星点分划板进行加工,星点的定位精度优于 $0.5 \mu\text{m}$ 。

4 星点位置修正方法与结果分析

静态星模拟器的核心显示器件是星点分划板,星点分划板上星点位置及其刻划精度决定了模拟星图的星间角距精度。星间角距作为星敏感器对模拟星图的识别手段,也是评价静态星模拟器的精度指标。

如图6所示,对于任意两个星点 $A(x_a, y_a)$ 和 $B(x_b, y_b)$ 之间的理论星间角距 γ 的关系为

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{2ab}, \quad (1)$$

式中

$$a = \sqrt{(x_b - x_o)^2 + (y_b - y_o)^2 + f^2},$$

$$b = \sqrt{(x_a - x_o)^2 + (y_a - y_o)^2 + f^2},$$

$$c = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2},$$

f 为准直物镜的焦距。 $O(x_o, y_o)$ 为视轴与星点板中心的交点。

对于星间角距实际值 θ 的测量,目前是通过经纬仪(莱卡 TM5100,测角精度为 $0.5''$)观测星点板上任意两点的方位值和俯仰值,得到 $A(\alpha_1, \beta_1), B(\alpha_2, \beta_2)$,可计算求得

$$\theta = \arccos[\cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \delta_1 \sin \delta_2], \quad (2)$$

式中 $\delta_1 = 90^\circ - \beta_1, \delta_2 = 90^\circ - \beta_2$ 。

利用上述方法,在准直光学系统的装配焦距给定 $f = 59.376 \text{ mm}$ 时,对所设计静态星模拟器的星间角距进行测量,与理论值相比的误差如表 2 所示。

表 2 不同焦距下的星间角距误差

Table 2 Error of angular distance between stars at different focus length

Number	$\gamma / (^\circ)$	Error / ($''$)	
		$f = 59.376 \text{ mm}$	$f = 58.474 \text{ mm}$
1	1.7348	-21.0560	0.9498
2	6.3909	-83.9430	-6.7121
3	6.9137	-75.3972	-1.2620
4	9.3581	-110.9064	-5.8561
5	6.6318	-77.6870	0.4195
6	9.3166	-101.8362	-0.5085
7	11.8640	-131.9689	-7.4558
8	4.9493	-55.9806	1.3548
9	4.1994	-49.8717	0.0063
10	10.0240	-90.4739	7.9391
11	12.4130	-134.4273	11.0519

从测量结果可以看出,在装配焦距下的实际星间角距和理论星间角距之差高达 $100''$ 以上。在考虑过经纬仪读数误差、瞄准误差以及畸变造成的误差之后,这部分误差可能是由于对准直光学系统焦距的测量误差造成的。

准直光学系统的焦距测量误差直接导致星点位置误差,若星点位置没有按实际焦距计算,则准直光学系统的成像质量再好,刻划精度再高,静态星模拟器也无法给出符合精度要求的星间角距,故对星点位置的修正是以得到精准实际焦距为前提的。对星点位置修正的方法^[10~12]主要分为三步:首先,测量星点板视轴中心附近点,由测得星间角距值和星点位置在星点板上的线距离,通过计算选定拟采用的实际焦距,这是多次测量,反复计算求估计值的过程;然后,根据拟采用的实际焦距,通过修正星点位置公式

$$\begin{cases} \frac{f_1}{f_2} = \frac{r_1}{r_2}, \\ x = r_2 \cdot \cos \varphi, \\ y = r_2 \cdot \sin \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

式中 f_1 为装配焦距, f_2 为实际焦距, φ 为极坐标方向角, r_1 为装配焦距 f_1 下的极坐标矢径; r_2 为实际焦距 f_2 下的极坐标矢径。得到新的星点位置,并利用理论星间角距和焦距以及星点位置的关系(1)式验证结果是否正确;最后,以新的星点位置刻画星点板,通过测量设备得到实际星间角距。对于测得的实际星间角距,若符合精度要求,则修正完成;若不符合精度要求,则重复上述步骤。

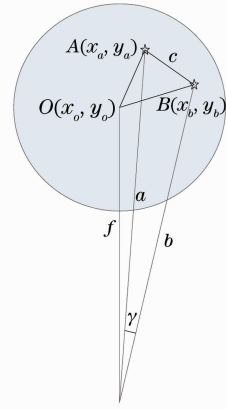


图 6 星间角距计算原理图

Fig. 6 Calculation diagram of angular distance between star

按上述方法对准直光学系统的焦距重新测量并计算后,得到实际 $f=58.474$ mm。利用(3)式得到新的星点位置,重新刻划星点板。图7为修正前后星点位置的对比图。

利用经纬仪测量星间角距,发现实际星间角距与理论星间角距的偏差得到良好改善,与理论值相比的误差值如表2所示。显然,利用上述修正方法有效地抵消了焦距误差带来的星点位置误差。

5 结 论

从星传感器地面标定设备的要求出发,设计了一种视场为 $20^\circ \times 20^\circ$ 的静态星模拟器。通过 Zemax 软件设计出的准直光学系统,其畸变满足小于 0.1% 的要求;提出了一种星点位置的修正方法,应用于本模拟器后发现该方法对星点位置的修正效果良好,使静态星模拟器可以给出星间角距精度优于 $12''$ 的模拟星图。

参 考 文 献

- 1 Tu Shancheng. Attitude Dynamics and Control of Satellite(3)[M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2003. 122~183
屠善澄. 卫星姿态动力学与控制(3)[M]. 北京: 宇航出版社, 2003. 122~183
- 2 Li Jie. Study the key technology of APS star tracher [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005
李 杰. APS 星传感器关键技术的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005
- 3 Liu Yiwu, Chen Yiqing. Star-sensor measurement model and its application to the spacecraft attitude determination system [J]. *J. Astronautics*, 2003, **24**(2): 162~167
刘一武, 陈义庆. 星传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
- 4 Zhao Chenguang, Tan Jiubin, Liu Jian *et al.*. Star simulator for testing celestial navigation equipment[J]. *Optics Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1326~1332
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
- 5 Li Chenyan, Li Huaifeng, Sun Caihong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Optics Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 558~563
李春艳, 李怀锋, 孙才红. 高精度星传感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(4): 558~563
- 6 Hu Yi, Gong Yan. Preliminary research on color simulation of stars in a star simulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(8): 65~73
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
- 7 Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1995, **35**(z1): 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**(z1): 331~334
- 8 Li Zhilai, Xue Donglin, Zhang Xuejun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system[J]. *Optics Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2548~2490
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
- 9 Miao Jianyu, Zhang Liping, Wu Qinwen *et al.*. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera[J]. *Optics Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1648~1653
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
- 10 Li Xuekui, Tan Haishu, Li Jie. New calibration method of principal distance of star sensors through diagonal distance[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(5): 755~759
李学夔, 谭海曙, 李 杰. 利用星角距对星传感器主距进行标定的新方法[J]. 半导体光电, 2009, **30**(5): 755~759
- 11 Zhang Hui, Tian Hong, Yuan Jiahu. Parameter calibration anerror compensation of star sensor [J]. *Opto-Electron Engineering*, 2005, **32**(9): 1~4
张 辉, 田 宏, 袁家虎. 星传感器参数标定及误差补偿[J]. 光电工程, 2005, **32**(9): 1~4
- 12 Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1343~1348
钟红军, 杨孟飞, 卢 欣. 星传感器标定方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1343~1348

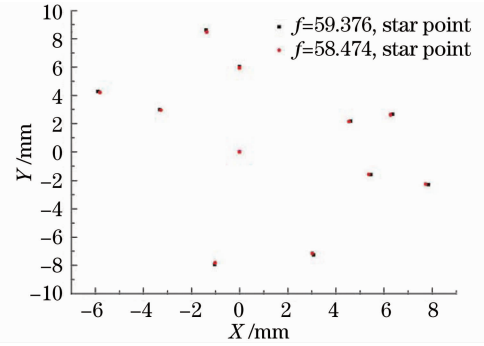


图7 不同焦距下星点位置对比图

Fig. 7 Star point comparison of different focal length