

甚高精度星敏感器测试用静态星模拟器设计

陈启梦¹, 张国玉^{1,2}, 王哲¹, 王凌云^{1,2}, 高玉军³

- (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;
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: 为了完成甚高精度星敏感器的地面测试任务, 设计高精度静态多星模拟器, 实现对星点位置的准确模拟。设计的准直光学系统光谱范围为 500~900 nm, 在 20℃ 时, 系统焦距为 150 mm, 全视场 7.2° 内畸变小于 0.02%, MTF 达到衍射极限。对于 -45℃~65℃ 的工作温度变化, 分别使用 Zemax 和 ANSYS 软件对模拟器光学系统、机械结构进行消热差和有限元分析。分析结果表明: 模拟器的光学系统消热良好, 机械结构变形及应变很小, 其整体抗离焦性能满足设计要求。对模拟器的精度进行理论计算, 用徕卡经纬仪测试指定星图, 计算结果显示实测的单星位置误差小于 3", 星对角距误差小于 5", 均优于对敏感器标定的精度指标要求。

关键词: 星模拟器; 光学系统设计; 热性能分析; 高精度

中图分类号: V249.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1830-06

Design of static star simulator based on testing of very high precision star sensor

Chen Qimeng¹, Zhang Guoyu^{1,2}, Wang Zhe¹, Wang Lingyun^{1,2}, Gao Yujun³

- (1. The School of Electro-optical Engineering Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun 130022, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to complete the testing of very high precision star sensor, a high precision static multi-star simulator which can achieve accurate simulation of star point was designed. The collimating optical system has wavelength range of 500-900 nm, at 20℃, the effective focal length of 150 mm, and distortion less than 0.02%, MTF reaches diffraction limit within the full field of view of 7.2°. For temperature changes from -45℃ to 65℃, used ZEMAX software to analyze athermal performance of the optical system, applied ANSYS software to complete finite element analysis of the mechanic structure. The results show that, athermal performance of the optical system is fine, shape change and deformation stress on mechanic structure are small, the anti-defocus performance of the simulator can meet the requirement of technique index. Calculate theoretical accuracy of the designed simulator and provided a group of

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国家“863”计划

作者简介: 陈启梦(1989-), 女, 博士生, 主要从事航天器地面标定方面的研究。Email: 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。Email: zh_guoyu@yahoo.com.cn

measured data. Depends on the measurement results, the error of position for single star $<3''$, the error of angular distance between stars $<10''$, are both better than required calibration accuracy of the star sensor.

Key words: star simulator; optical system design; thermal performance; high accuracy

0 引言

星敏传感器^[1]是航天器姿态敏传感器中最精确的敏传感器,可达到角秒量级。近年来,国内外纷纷开展了对甚高精度星敏传感器^[2]的研制,一方面对星敏传感器的测试精度提出了更高要求,另一方面,对其在大范围环境温度变化下工作的热性能也更加重视,因此研制能够满足甚高精度星敏传感器地面标定^[3]工作的配套设备已迫在眉睫。

星模拟器用于产生较大空间尺度的模拟星图,在实验室条件下作为大视场、高精度星敏传感器的目标源,以供其完成恒星识别^[4]、姿态确定等任务。温度可控的星模拟器也可在热循环环境试验条件下,对星敏传感器的性能进行测试。文中主要设计了一个具备准直精度高、能量集中、畸变小等特点的光学系统;对模拟器进行不同温度下光机结构的抗离焦性能分析,进而计算理论设计精度;结合应用该系统得到的测试结果,验证了静态星模拟器的可行性。

1 静态星模拟器工作原理

静态多星模拟器属于标定型星模拟器^[5],它对单星张角、星点位置误差的精度要求很高,但对星图变化没有实时性要求,通常只完成对一幅固定星图的模拟。可控温度的静态多星模拟器主要由准直物镜组件、星点分划板、滤光片、加热丝组件、光源和电源组成,如图1所示。

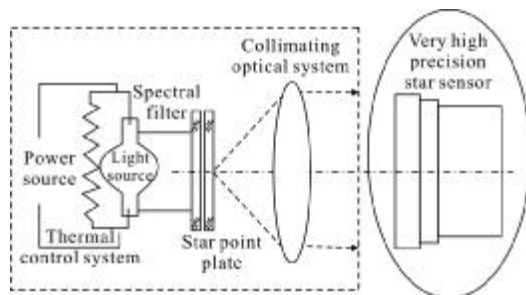


图1 静态星模拟器工作原理示意图

Fig.1 Schematic of thermal-controlled static star simulator composition

静态星模拟器的工作原理是将一块刻划了若干透光微孔的标准星点分划板放置在其准直光学系统的焦平面上,光源通过滤光片修正星光光谱,照亮星点分划板,形成模拟星点。由模拟星点透射的光线经过准直物镜组平行射出,在甚高精度星敏传感器的入瞳处形成一幅完整的星图,从而实现了对无穷远的恒星的模拟。系统工作时,电源对模拟器供电,通过调节光源的发光亮度来模拟星等;用加热丝组件进行闭环温度控制,不仅保证星模拟器的工作温度要求,也保证光源和电子元器件的正常工作。

2 准直光学系统设计

2.1 光学系统参数确定

为了匹配星敏传感器光学系统^[6]参数以及星模拟器安装特点,可以初步确定静态星模拟器光学系统的设计参数。如图2所示,星模拟器和星敏传感器的配合需要符合光瞳衔接原则,由于甚高精度星敏传感器的入瞳位于其光学系统后侧,因此要求星模拟器光学系统出瞳外置,为了确保二者在遮光罩内相对运动时不相碰,要求星模拟器出瞳距 $\geq 60\text{ mm}$;为了将星模拟器的所有星图信息都传递给星敏传感器并且避免能量损失,星模拟器的出瞳直径应该比星敏传感器的入瞳直径略大,满足 $\geq \Phi 18\text{ mm}$ 。考虑单星张角问题,星点直径太小可能导致星敏无法识别,选定系统焦距为 150 mm 左右;光学系统的畸变决定星点的位置精度,约束其畸变小于 0.02% 。由此得到光学系统的设计指标,如表1所示。

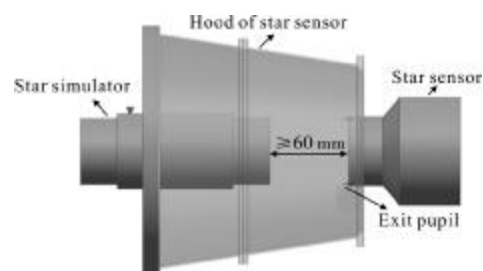


图2 星模拟器安装示意图

Fig.2 Diagram for installation of star simulator

表 1 光学系统的设计指标

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Target
Focal length	150 mm±1 mm
Field of view	7.2° (for circular)
Entrance pupil diameter	Φ20 mm
Entrance pupil distance	70 mm
Distortion	<0.05%

2.2 光学系统设计原则

多星模拟器的星点角位置模拟精度要求高,而光学系统的畸变直接影响星点角位置精度;另外,星敏感器的星图读取方式是捕捉星点的能量重心,因此,光学系统设计也应重点控制畸变以及星点能量重心与主光线位置偏差。

畸变^[7]是与视场有关的像差,畸变值只受视场影响,即不同视场的畸变值不同。初级畸变的表达式为:

$$\delta y_z' = -\frac{1}{2n_k' u_k'} \sum_1^k S_v \quad (1)$$

$$S_v = l_z u_z n_i (i_z - i_z') (i_z' - u_z) + J(u_z^2 - u_z'^2) \quad (2)$$

由公式(2)可知,产生畸变的原因包括光阑位置的正弦差和角倍率。所以,若要消除畸变,应同时满足:

$$\begin{aligned} n_y \sin U_z &= n' y_z' \sin U_z' \\ n_y \tan U_z &= n' y_z' \tan U_z' \end{aligned} \quad (3)$$

显然对于畸变的校正非常困难的,只能尽量使其值较小达到设计指标的要求。

星点弥散圆能量中心与主光线位置偏差也是造成星点位置误差的一个主要原因。实际光学系统中由于像差的存在,导致一个物点发出的光线不再与像面上的理想像点重合,而是在该点附近形成一个弥散的光斑,即成像点的能量中心不再与主光线重合,因此设计中应尽量减小星点弥散圆能量中心与主光线的偏差值。

星模拟器光谱范围是 500~900 nm,中心波长为 650 nm,色散对近红外光谱的影响较为明显,由各种色光的折射率不同而产生的倍率色差会破坏了轴外成像点的清晰度。如果倍率色差校正的不好,星模拟器的星点模拟精度也会受到影响,故选择合适的材

料也是设计中要考虑的。

为了实现对星敏感器性能的测试,星模拟器在 -45°C~65°C 温度范围内必须具有较好的一致性。折射透镜的光热膨胀系数^[8]反映温度变化时系统焦距的归一化变化,计算公式为:

$$x_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = a_g - \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dT} - \frac{1}{n} \frac{dn_i}{dT} \right) \quad (4)$$

式中: a_g 为材料的热膨胀系数; n 为材料折射率; dn/dT 为材料折射率变化相对于像空间折射率的变化; n_i 为系统所在介质的折射率。通常透镜的这些影响很小,但是对于星模拟器极高的精度要求,材料的光热特性不能被忽略。

3 光学系统设计结果

典型的柯克三片式^[9-10]采用外边两片正的冕牌透镜,中间一片负的火石透镜的对称结构,可见光波段内全视场 10°的 f/6 柯克三片式可能达到合理的性能水平。反向设计时,出瞳作为孔径光阑,不再设在负透镜上,主光线位置偏向镜头边缘,破坏了系统的对称性,使彗差、畸变、垂轴色差会明显变大。设计时负透镜选择色散较大的材料并分裂成两片分裂,增加与后边正透镜的距离,调整光焦度分配,利于垂轴像差像差的抵消。适当增加后边正透镜的厚度,平衡系统剩余场曲。经过优化设计后,系统达到了很好的像质,准直物镜光学系统光路如图 3 所示。

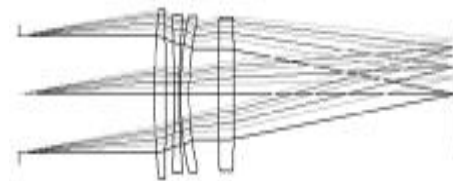


图 3 准直物镜光学系统光路图

Fig.3 Layout of optimized structure

MTF 是所有光学系统性能判据中最全面的判据,套样板后的系统 MTF 曲线如图 4 所示,在尼奎斯特频率为 60 lp/mm 时,全视场的 MTF 达到衍射极限。图 5 所示为套样板后的系统点列图,弥散斑的 RMS 直径均小于 2.5 μm (衍射斑半径为 6.223 μm)。由于系统接近衍射极限,这里用离主光线的距离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,如图 6 所示,从曲线可以看出,静态星模拟器

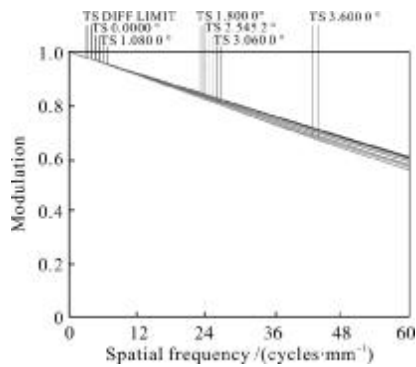


图 4 调制传递函数曲线(衍射极限)

Fig.4 MTF with spatial frequency of system

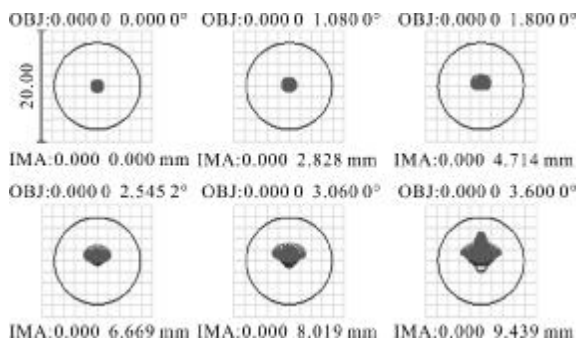


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

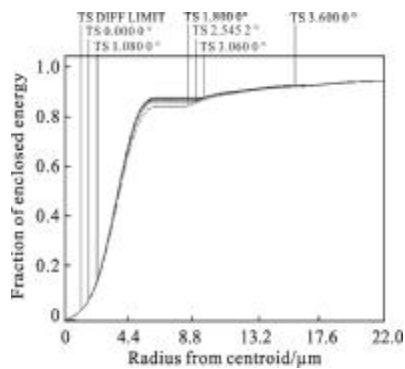


图 6 径向能量分布曲线

Fig.6 Diffraction encircled energy

星点板上每个 $20\ \mu\text{m}$ 的透光微孔内能量集中度达到 95% 以上。图 7 所示为规划后的系统的场曲和相对畸变曲线, 全视场内中心波长最大相对畸变误差为 0.015%。最大畸变量为 $0.0014\ \text{mm}$ 。弥散圆能量中心与主光线偏差影响星模拟器星光出射精度, 从系统的点扩散函数看出经过光学系统的衍射像的光强分布集中程度很高, 根据设计结果计算出星点弥散圆能量中心与主光线位置偏差及产生的角度误差如表 2 所示。

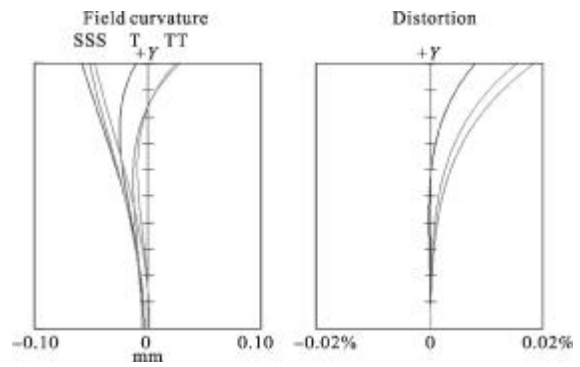


图 7 场曲和畸变曲线

Fig.7 Field curvature and distortion

表 2 能量重心与主光线位置偏差及产生的角度误差

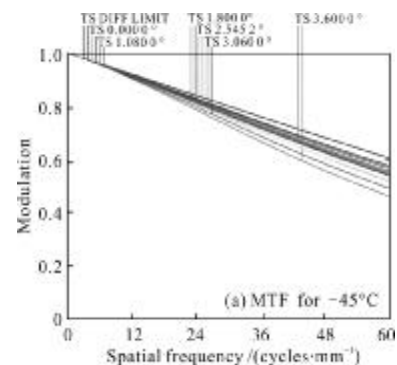
Tab.2 Deviation between center of energy and center of chirf ray

Normalized field	Distance error/ μm	Anglar error/($''$)
0	0	0
0.3	0.020 3	0.03
0.5	0.038 4	0.05
0.707	0.201 2	0.28
0.85	0.287 9	0.40
1	0.348 5	0.48

4 星模拟器热稳定性和抗离焦性能分析

4.1 光学系统的消热性能分析

随着温度的变化, 光学系统的参数会发生改变^[11]而引起其性能的下降, 焦面会漂移产生离焦。不同温度下调制传递函数相对于参考温度的变化是评价系统热性能的一个重要指标。图 8(a)、(b)是系统在 -45°C 和 65°C 时的 MTF, $60\ \text{lp/mm}$ 处均接近衍射极限, 其值接近 0.6, 与参考温度相比几乎无变化, 温度连续变化过程中光线通过透光微孔的能量集中度



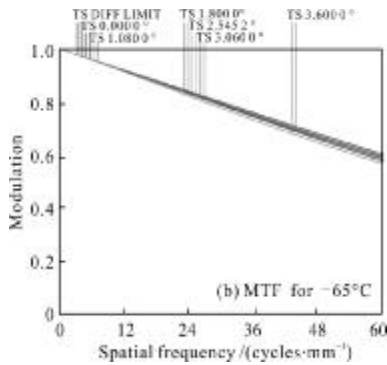


图 8 系统在不同温度下的传递函数
Fig.8 MTF for different temperatures

始终高于 95%，系统在工作温度范围内热稳定性较好。

4.2 光机结构抗离焦性能分析

在对静态多星模拟器进行抗离焦性能分析时，不仅光学系统各组元的光热膨胀系数会对计算结果有影响，机械结构变形也会对结果产生影响。根据静态星模拟器精度要求，在考虑镜筒变形的情况下，系统前后离焦量不能超过 0.1 mm，焦面变化引起的能量重心偏移不大于 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 并且各视场能量重心与主光线位置偏差引起的角度误差最大不超过 1"。星模拟器使用硬铝作为镜筒、压圈和透镜间隔圈的材料，用 ANSYS 软件对星模拟器机械结构进行温度变形分析，图 9 所示为 $-45^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C}$ 时机械结构的变形和应变分析结果，结合 Zemax 软件的计算结果得到温度变化对准直物镜光机结构的影响见表 3。

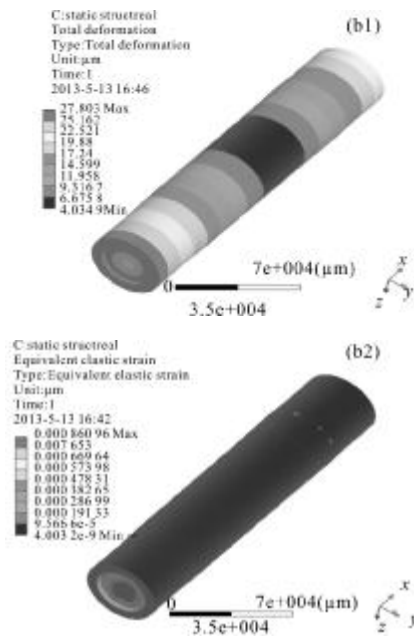


图 9 光机结构温度变化产生的变形和应变分析结果
Fig.9 Influence on mechanical structure along with temperature

表 3 温度变化对准直物镜光机结构的影响
Tab.3 Influence of changes in temperature on the optical system

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Focal length/mm	Back focal length/mm	Maximum shape change/ μm	Centroid offset/ μm	Anglar error caused by centroid and chifray
-45	149.958	114.263	44	0.37	0.51"
20	150.001	114.277	-	-	0.48"
65	150.026	114.289	28	0.32	0.49"

从表 3 中看出，因温度变化使光学系统后截距的变化量为：由 20°C 变到 -45°C 时后截距减小 0.014 mm，由 20°C 变到 65°C 时后截距增加 0.012 mm。机械结构变形引起的离焦与光学系统变化趋势一致，不超过 0.05 mm，最大离焦量引起的能量重心偏移最大值为 $0.37 \mu\text{m}$ ，最大角度偏差为 0.51"，符合设计约束条件。

5 静态星模拟器精度计算及测试结果

5.1 精度计算

星点位置误差主要由能量重心与主光线偏差产生的角度误差、光学系统的准直精度、光学系统畸变校正残差引起的星点位置度误差和星模拟器安装调试误差产生。

(1) 根据表 2 可知，全视场能量重心与主光线位

置偏差产生的角度误差为 $\Delta\alpha_1 \leq 0.48''$,

(2) 根据系统的设计结果计算像面处不同视场的准直精度计算结果可知 $\Delta\alpha_2 \leq 0.67''$;

(3) 光学系统最大畸变引起的星点位置误差为 $\arctan(0.001 \ 4/150.001) \times 3 \ 600 = 1.93''$, 取畸变校正残差 $\Delta\alpha_3 \leq 1.93''$;

(4) 考虑星模拟器安装调整误差, 取其值 $\Delta\alpha_4 \leq 2''$;

(5) 星点位置度误差综合偏差 e_p 等于上述四项误差平方和的算术平方根, 即 $|e_p| = 2.89''$ 。

用上述公式也可以计算星模拟器在 -45°C 和 65°C 时的单星位置误差分别为 $2.91''$ 和 $2.89''$ 。考虑到星对为两个点, 星对角距误差应比星点位置度误差增大 $\sqrt{2}$ 倍, 由此星模拟器在 -45°C ~ 65°C 产生的星对角距误差不超过 $4.5''$ 。理论计算的结果满足星模拟器单星位置误差不大于 $5''$ 、星间角距误差不大于 $9''$ 的精度要求。

5.2 测试结果

星模拟器装调好后, 对有一幅 12 颗星(中心星点为 8 号星点)的星图进行测试, 得到各星点相对于中心星点的单星位置误差如图 10 所示, 最大值为 $2.683 \ 7''$; 根据测试结果, 也可以计算 12 个星点的星对角距误差值, 55 对星间角距误差中最大的为 $4.888 \ 7''$, 实测结果符合理论计算且满足技术指标对模拟器精度的要求。

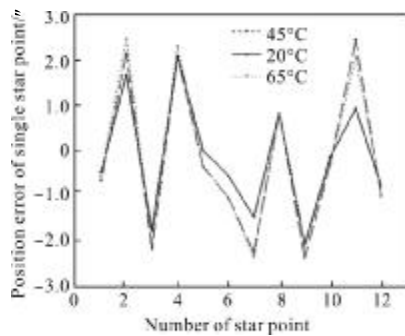


图 10 单星位置误差图

Fig.10 Position error of single star point at different temperatures

6 结论

文中从甚高精度星敏感器地面测试工作的需要出发, 设计了一种高精度静态多星模拟器。其准直光

学系统结构简单, 成像质量高, 大范围温度变化下, 光机械结构抗离焦性能良好。经过理论计算和实际测试, 验证了星模拟器的单星位置误差优于 $3''$, 星间角距误差优于 $5''$, 可以作为甚高精度星敏感器测试用的检测装置。

参考文献:

- [1] Li Baohua, Ma Yanyu, Liu Rui, et al. Obtaining method for star locations in local region of star image for star sensor [J]. Opt Precision Eng, 2009, 15(9): 1428-1431. (In Chinese)
- [2] Clark N, Forth P. Intelligent star tracker [C]//Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2000: 1430-1433.
- [3] Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (s): 331-334. (in Chinese)
- [4] Yang Haoming, Wang Lingjie, Weng Zhicheng, et al. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 151-154. (in Chinese)
- [5] Gong Yan, Hu Yining, Zhao Yang. Design of mini star simulator based on digital optical processing [J]. Opt Precision Eng, 2007, 15(11): 1698-1704. (in Chinese)
- [6] Lu Xin. Optical design of CCD star sensor [J]. Engineering Cybernetics, 1993, (5): 9-17. (in Chinese)
- [7] Wang Zhijiang. Optical Technique Handbook [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. (in Chinese)
- [8] Herzig H P. Micro -Optics: Elements, Systems, and Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [9] Li Shixian, Zheng Lenian. Handbook of Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 115-118. (in Chinese)
- [10] Fischer R E. Optical System Design [M]. Bellingham: SPIE Press, 2008: 135-136.
- [11] Yan Peipei, Fan Xuewu, He Jianwei. Design of hybrid refractive-diffractive star sensor optical system with small F-number [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2458-2464. (in Chinese)