

# 星敏感器光学系统的研制与性能测试

李 璟<sup>1</sup> 杨宝喜<sup>1\*</sup> 胡中华<sup>1,2</sup> 肖艳芬<sup>1</sup> 黄惠杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对星敏感器系统探测要求, 设计了像方远心光路的双高斯光学系统。该系统在满足弥散斑和能量集中度等要求的情况下, 具有相对孔径大、畸变小、色差小以及星点位置对离焦不敏感等特点。利用调制传递函数仪测量了星敏感器光学系统的光学性能, 测量结果表明各视场处的弥散斑 80% 的能量均集中在直径为 20  $\mu\text{m}$  的圆内。提出了采用一维精密气浮转台和单星模拟器对光学系统进行质心畸变测量的方法, 测试结果显示星点光斑的质心畸变小于 9"。

**关键词** 光学设计; 星敏感器; 单星模拟器; 质心畸变

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0522005

## Development and Performance Testing of Optical System for Star Sensor

Li Jing<sup>1</sup> Yang Baoxi<sup>1</sup> Hu Zhonghua<sup>1,2</sup> Xiao Yanfen<sup>1</sup> Huang Huijie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** According to detection requirements of the star sensor system, a double Gauss optical system with image side telecentricity is designed. This optical system, not only satisfies the special requirements of dispersed spot and energy centralized distribution, but also possesses large aperture, low distortion, small color deviation, and insensitivity to defocus. The optical performance of the star sensor is quantitatively measured by modulation transfer function (MTF) analyzer. 80% energy of dispersion spot for each field of view is concentrated in a circle with 20  $\mu\text{m}$  diameter. Meanwhile, a method using one-dimensional precision rotating platform and single star simulator to test the centroid distortion of optical system is proposed. The test results show that centroid distortion of the star point is better than 9 arc second.

**Key words** optical design; star sensor; single star simulator; centroid distortion

**OCIS codes** 220.2740; 080.2740; 220.3620

## 1 引 言

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, 它通过探测天体中不同位置的恒星来获取运载体姿态信息<sup>[1,2]</sup>。星敏感器所提供的姿态信息的精度能达到角秒量级, 因而成为导弹和航天器等空间姿态测量的首选设备。

随着航天事业的飞速发展, 星敏感器已经广泛应用于军事领域及各种民用场合。由于星敏感器的空间工作环境较为特殊, 温度变化尤为明显, 而环境温度的变化会导致光学系统焦面移动, 像质恶化, 进而影响其精度<sup>[3]</sup>。因此在光机系统设计阶段就需考虑星敏感器工作环境的特殊性, 从而使星敏感器能

收稿日期: 2012-12-18; 收到修改稿日期: 2013-02-01

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX02402-003)和国际科技合作项目(2011DFR10010)资助课题。

作者简介: 李 璟(1985—), 男, 硕士, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: lijing2006512@163.com

\* 通信联系人。E-mail: yangbx@siom.ac.cn

够承受环境温度的变化对像质的影响。另外,光学系统的性能直接影响到星敏感器的重要指标,如星图识别的成功率、姿态测量精度、星等探测灵敏度以及星空覆盖范围等。星敏感器的光学设计与一般成像物镜有所区别,成像物镜希望像面上的弥散斑越小越好,星敏感器光学系统要求各视场处的弥散斑分布在特定范围内<sup>[4]</sup>,且要求星点弥散的圆度和对称性良好,这决定了星敏感器光学设计的特殊性<sup>[5]</sup>。具有良好像质的大相对孔径、宽波段探测范围、低畸变以及适应于大范围温度变化的光学系统将为星敏感器捕获高极限星等的恒星打下坚实基础。

本文设计了一种大相对孔径星敏感器光学系统。该系统为像方远心结构,能够减少由于温度变化、高精度对心工艺要求和振动冲击等因素带来的离焦对星点质心位置的影响。利用调制传递函数测量仪检测系统的光学性能,测量结果表明焦距、畸变和能量集中度等均满足技术指标要求。同时提出了一种质心畸变测量方法,即采用一维精密气浮转台和单星模拟器,实现了对星敏感器光学系统质心畸变的测量。该方法测量精度高、原理简单、易于实现。

## 2 星敏感器光学系统设计

### 2.1 主要技术指标

光学系统是星敏感器的核心部分,直接影响星敏感器成像性能的好坏<sup>[6]</sup>。星敏感器光学系统参数的选择主要由探测的恒星等级、空间覆盖范围、探测星的数目、恒星光谱分布和图像传感器参数等因素决定。例如星敏感器的可探测极限星等与星点光斑的光强分布有密切的关系,星敏感器的相对孔径越大,进入其中的能量就越多,就能测量更暗的星<sup>[7]</sup>;视场角和相对孔径的增大可提高星敏感器捕获恒星的概率和测控精度。星敏感器光学系统设计指标如表 1 所示。

### 2.2 光学系统设计

光学系统的像差制约着星敏感器测量精度<sup>[8]</sup>,在光学设计中需要考虑:1)要保证探测到的星点具有很高的位置精度,畸变偏大会严重影响测量的准确性,故系统应校正畸变;2)光学系统并非只追求高的调制传递函数(MTF),希望轴外视场与轴上视场的弥散斑能量集中度与形状尽可能一致;3)成像面要适当弥散,并要保证 80%的能量集中在 20  $\mu\text{m}$  区域内,能量呈高斯分布,便于提高捕获星点的准确度;4)光学系统的非对称性像差会引起像点能量扩

散和星点亮度中心位置改变,需严格控制随波长改变而改变的倍率色差和随视场变化的彗差<sup>[9~11]</sup>。

表 1 星敏感器光学系统设计指标

Table 1 Performance index of star sensor optical system

Index	Value
Field of view / ( $^{\circ}$ )	$\geq 7 \times 7$
Focal length / mm	$50 \pm 0.5$
Stellar magnitude limit	$\geq 6.5$
CCD pixel size / $\mu\text{m}$	$6.45 \times 6.45$
Wavelength range / nm	450~700
Dispered spot	More than 80% of the energy is concentrated in the area of 20 $\mu\text{m}$
Relative distortion	$\leq 1/1000$
Lateral color / $\mu\text{m}$	$< 1.0$
Ambient temperature / $^{\circ}\text{C}$	-40~50

典型的双高斯物镜为对称型结构,这种结构可有效消减彗差、畸变和垂轴色差这几种垂轴像差。另外,选择合适的光阑位置可校正像散;经改进后其相对孔径可达到 1:1,视场可达到  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。以上分析表明,双高斯物镜基本可以满足星敏感器光学系统像差校正的要求。所设计星敏感器光学系统采用了六组七片双高斯物镜的结构形式,其中一组为胶合透镜,所用材料均为国产光学玻璃,光学系统结构如图 1 所示。该系统焦距为 49.98 mm(550 nm 波长处),相对孔径为 1:1.428,系统总长为 90.62 mm。星敏感器光学系统的边缘视场畸变最大,其值为 -0.042%,远优于指标要求。小畸变有利于提高星敏感器的测控精度,像散和场曲也较小。图 2 为光学系统的像质评价,可见各视场弥散斑大小比较一致,光斑直径的均方根(RMS)最大值为 12.022  $\mu\text{m}$  (20  $^{\circ}\text{C}$ )。由能量集中度曲线可知,各视场弥散斑 80%能量集中在 13~20  $\mu\text{m}$  区域内,能量集中度分布情况理想。所设计的星敏感器光学系统为像方远心系统,其主光线垂直于像面,当焦面移动时,星点的能量中心位置几乎不会发生变化。图 3 为系统在

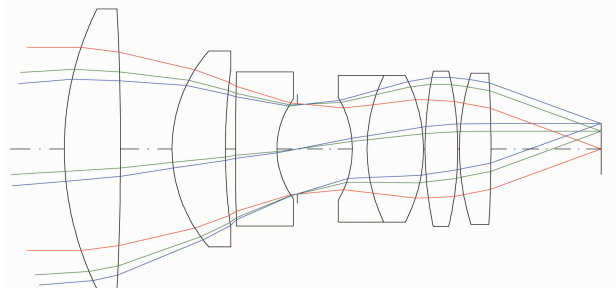


图 1 星敏感器光学系统

Fig. 1 Optical system of the star sensor

-40 ℃和 50 ℃时的点列图:在-40 ℃时,光学系统零视场下光斑直径的 RMS 值最大,其值为 14.116 μm;在不同参考温度下,光学系统视场光斑都比较均匀,满足成像均匀性的要求。因此,温度变

化带来的焦面移动对星点质心位置的影响很小。不同波长处的倍率色差如表 2 所示,在 7°圆视场范围内其值小于 1 μm。

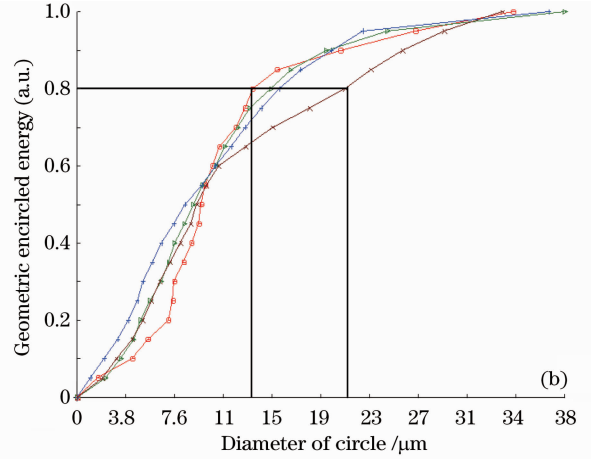
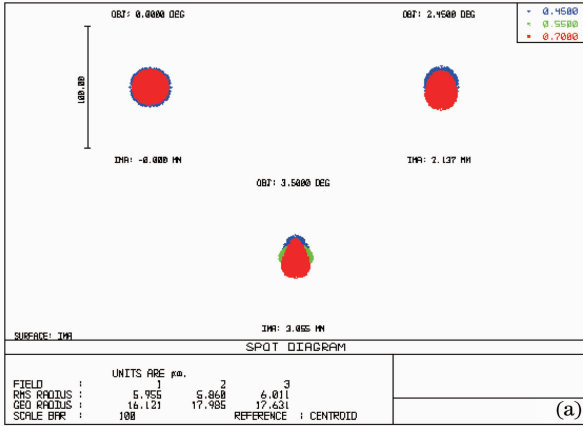


图 2 光学系统像质评价。(a)点列图(20 ℃);(b)能量集中度曲线

Fig. 2 Image quality evaluation of optical system. (a) Spot diagram (20 ℃); (b) curves of encircled energy

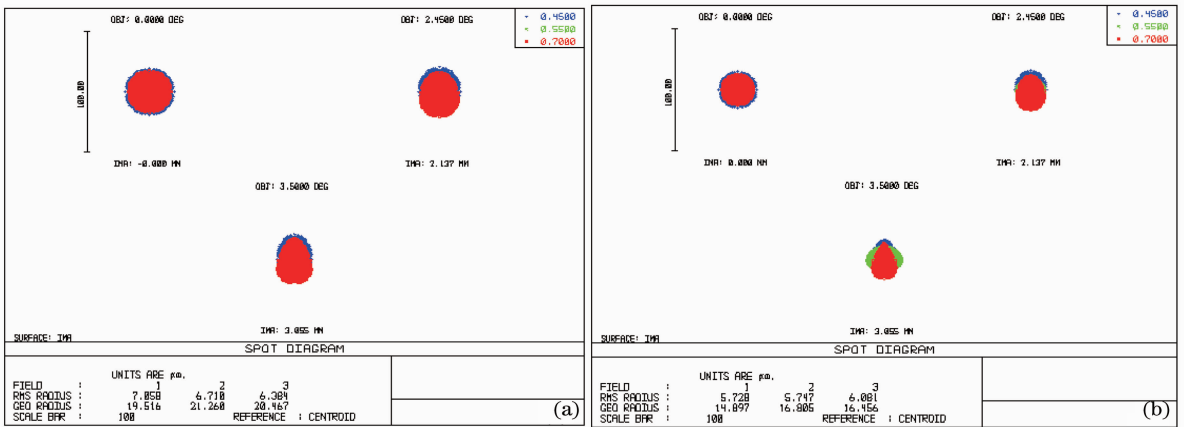


图 3 不同温度下的点列图。(a) -40 ℃; (b) 50 ℃

Fig. 3 Spot diagram for different temperatures. (a) -40 ℃; (b) 50 ℃

表 2 光学系统倍率色差

Table 2 Optical system of lateral color

Half field / (°)	Lateral color / μm					
	λ=0.45 μm	λ=0.5 μm	λ=0.55 μm	λ=0.6 μm	λ=0.65 μm	λ=0.7 μm
0	0	0	0	0	0	0
0.5	-0.091	0.067	0	-0.016	-0.050	-0.065
1.0	-0.165	0.139	0	-0.028	-0.104	-0.139
1.5	-0.241	0.214	0	-0.043	-0.160	-0.217
2.0	-0.319	0.278	0	-0.076	-0.241	-0.327
2.5	-0.414	0.360	0	-0.100	-0.308	-0.414
3.0	-0.510	0.444	0	-0.142	-0.405	-0.543
3.5	-0.643	0.539	0	-0.186	-0.506	-0.676
4.0	-0.805	0.653	0	-0.236	-0.621	-0.833
4.5	-0.993	0.779	0	-0.297	-0.768	-1.042
5.0	-1.140	0.987	0	-0.306	-0.896	-1.279

### 3 星敏感器光学系统性能测试

调制传递函数测量仪可以客观评价被测光学系统的成像质量,定性判断被测系统可能存在影响像质的因素。分别用 656、546、488 nm 三种波长对所设计的星敏感器光学系统进行测量。另外,测量星敏感器光学系统的不同特性参数时,所选取的测试目标有所不同,圆孔用于测量被测光学系统不同视场处弥散斑能量分布情况,“十”字夹缝用于测量焦距、畸变和子午与弧矢方向的 MTF。

光学系统的成像质量反映了像差的校正情况以及设计结果是否达到指标要求。本文对星敏感器光学系统性能的检测,主要考察弥散斑的能量集中度、畸变和焦距。表 3 为星敏感器光学系统在不同视场和波长下集中 80% 能量的弥散斑直径,结果都在 20 μm 以内。表 4 为星敏感器光学系统的弥散斑实际测试结果,弥散斑的圆度良好。图 4 为星敏感器

光学系统的焦距与畸变测量数据,在 ±3.5° 视场内波长为 546 nm 时,焦距变化范围为 49.995~50.016 mm,最大畸变为 0.0419%。表 5 为星敏感器光学系统在三种波长下测得的 MTF 值。

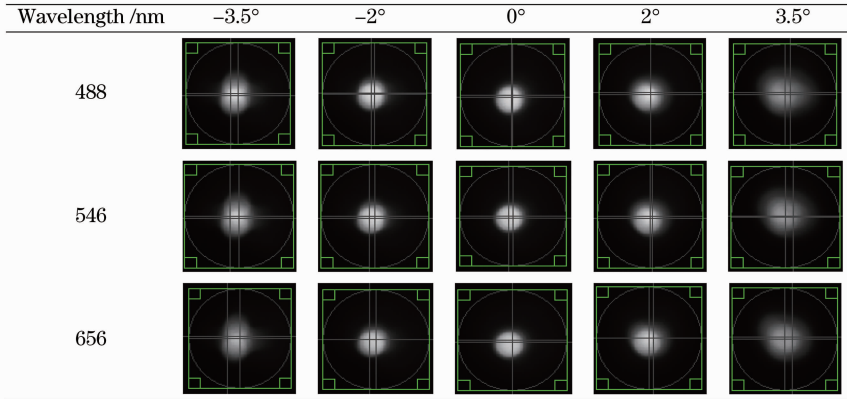
表 3 包含 80% 能量的弥散斑直径

Table 3 Diameter of spot including 80% of energy

Field / (°)	Diameter / μm		
	λ=488 nm	λ=546 nm	λ=656 nm
-3.5	13.5	10.6	11.5
-3.0	14.6	11.6	12.7
-2.0	16.6	13.3	15.1
-1.0	18.0	15.3	15.9
0	19.6	17.7	18.8
1.0	19.4	17.4	13.3
2.0	16.2	12.5	9.3
3.0	11.5	9.1	9.3
3.5	14.2	12.2	9.5

表 4 星敏感器光学系统弥散斑图像

Table 4 Image of dispersion spot of star sensor optical system



(a)

Theta (deg)	Height (mm)	EFL (mm)	FIT (mm)	D%
-3.500	3.059	50.016	50.016	0.0419
-3.000	2.621	50.012	50.012	0.0353
-2.500	2.183	50.008	50.008	0.0272
-2.000	1.746	50.005	50.004	0.0188
-1.500	1.309	50.000	50.000	0.0112
-1.000	0.873	49.997	49.997	0.0052
-0.500	0.436	49.995	49.995	0.0013
0.000			49.995	0.0000
0.500	-0.436	49.995	49.995	0.0013
1.000	-0.873	49.997	49.997	0.0052
1.500	-1.309	50.000	50.000	0.0112
2.000	-1.746	50.005	50.004	0.0188
2.500	-2.183	50.008	50.008	0.0272
3.000	-2.621	50.012	50.012	0.0353
3.500	-3.059	50.016	50.016	0.0419

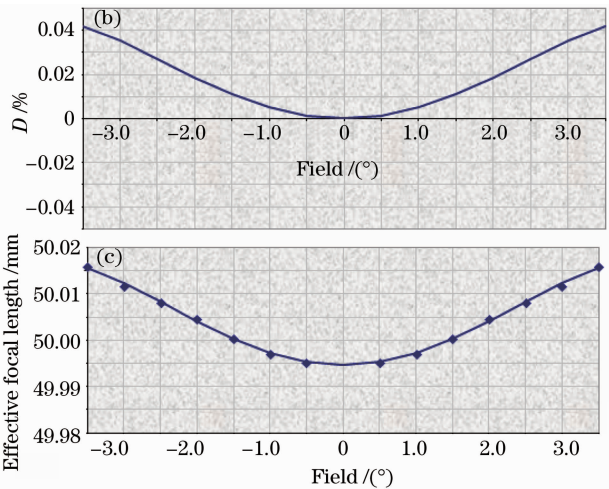


图 4 (a) 焦距与畸变测量数据 (546 nm); (b) 畸变随视场的变化曲线; (c) 有效焦距随视场的变化曲线

Fig. 4 (a) Test data of focal length and distortion (546 nm); (b) curves of variation of distortion with field;

(c) curves of variation of effective focal length with field

表 5 星敏器光学系统调制传递函数

Table 5 MTF of star sensor optical system

Field / (°)	Spatial frequency / (lp/mm)	MTF values					
		$\lambda=656\text{ nm}$		$\lambda=546\text{ nm}$		$\lambda=488\text{ nm}$	
		Meridional direction	Sagittal direction	Meridional direction	Sagittal direction	Meridional direction	Sagittal direction
-3.5	20	0.721	0.820	0.713	0.806	0.670	0.778
-3.5	40	0.583	0.580	0.569	0.594	0.520	0.590
-3.5	60	0.474	0.383	0.469	0.439	0.433	0.464
-2.0	20	0.736	0.816	0.707	0.778	0.641	0.724
-2.0	40	0.596	0.644	0.563	0.619	0.490	0.580
-2.0	60	0.495	0.550	0.473	0.546	0.419	0.512
0	20	0.800	0.812	0.773	0.775	0.690	0.706
0	40	0.643	0.646	0.621	0.615	0.544	0.558
0	60	0.555	0.567	0.540	0.547	0.473	0.493
2.0	20	0.865	0.850	0.844	0.819	0.786	0.763
2.0	40	0.674	0.674	0.653	0.650	0.603	0.608
2.0	60	0.517	0.551	0.527	0.552	0.507	0.528
3.5	20	0.864	0.850	0.859	0.846	0.840	0.827
3.5	40	0.601	0.584	0.582	0.599	0.549	0.602
3.5	60	0.341	0.323	0.322	0.369	0.304	0.413

#### 4 星敏器质心畸变测量

星点测量精度是表征星敏器精度的一个重要指标,它是星敏器整体精度的基础。由于星敏器质心定位误差严重影响到测量的准确度,因此需对光斑能量质心进行标定,这是实现星敏器准确测量不可或缺的环节<sup>[12]</sup>。质心定位误差主要由光学系统的质心畸变引起,质心畸变由径向畸变和切向畸变组成。经过计算,本文光学系统切向畸变很小,可以忽略,径向畸变最大为  $2\ \mu\text{m}$ ,径向畸变随视场变化如图 5 所示。

表征星敏器测量精度的参数主要是单星测量精度。因此采用单星模拟器,结合一维高精密气浮

转台,获取星敏器光学系统不同视场下的星点光斑,并通过星像质心算法,可测量出质心畸变。设计的星敏器光学系统质心畸变测量平台如图 6 所示,该测量平台主要由光源、平行光管、一维高精精密气浮转台、角编码器、CCD、计算机、调整架和待测量的星敏器光学系统组成。单星模拟器是一个平行光管,在其焦面有一针孔。光源照射针孔,星敏器对准平行光管就可以接收到其发射出的单星模拟光。为了获得清晰的单星成像,减小测量误差,需选择合适的光源强度,并且经星敏器光学系统成像到 CCD 上的星点像能量最好控制在  $3\ \text{pixel} \times 3\ \text{pixel}$  内,便于计算确定质心坐标。另外,在仪器测量过程中不可避免地引入诸多误差,如星敏器的安装误差、星敏器与单星模拟器的对准误差以及杂光参与星敏器光学系统成像的影响,因此在测量中尽量减少各种不稳定因素的影响。具体测量步骤如下:

1) 确定星敏器光学系统中心视场:使用内调焦望远镜对准星敏器光学系统的光轴,CCD 采集到内调焦望远镜的“十”字分划,通过图像处理可确定“十”字分划交叉点在 CCD 靶面上的位置坐标,该位置即为星敏器光学系统中心视场坐标  $(x_0, y_0)$ 。

2) 采集星点像和记录转台旋转角度:将星敏器光学系统固定到高精精密气浮转台上,用平行光管

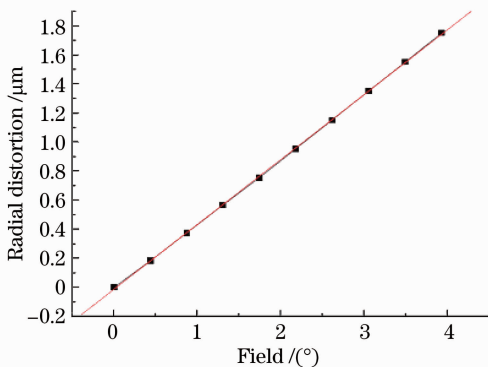


图 5 径向畸变随视场的变化

Fig. 5 Radial distortion versus field

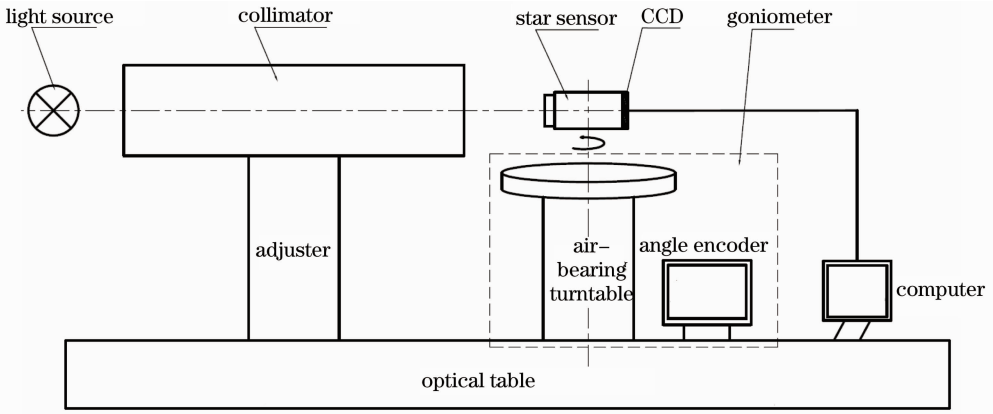


图 6 星敏感器光学系统测量平台

Fig. 6 Measurement platform of the star sensor optical system

对准星敏感器光学系统,打开光源,模拟单星将通过星敏感器光学系统成像到 CCD 上,形成一个星点光斑;通过调整架调节平行光管,使星点光斑位于第一步中确定的中心视场坐标 $(x_0, y_0)$ 处;按照一定的角度多次旋转高精密气浮转台,记录角编码器上高精精密气浮转台的旋转角度,同时采集与之对应的星点光斑图。

3) 星点质心坐标计算:根据 CCD 采集到的星点光斑,通过计算,获得星点能量分布与质心位置坐标 $(x', y')$ ,星点能量分布如图 7 所示。

4) 数据处理:建立高精精密气浮转台旋转角度 $\omega$ 和星点像的质心位置坐标 $(x', y')$ 的数学关系:

$$\Delta\theta = c \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} - 3600\omega, (1)$$

式中 $\Delta\theta$ 为被测星敏感器光学系统的径向质心畸变(单位:角秒), $\omega$ 为星敏感器光学系统的视场角, $c$ 为常数。

5) 各方向质心畸变的测量:星敏感器光学系统绕光轴旋转一定角度,按照 2)、3)、4)进行不同方向上质心畸变的测量。

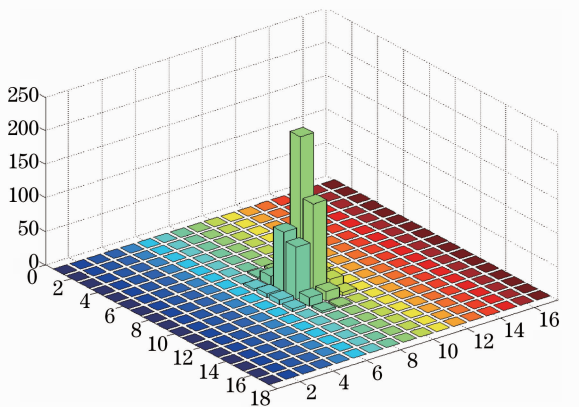


图 7 星点能量分布

Fig. 7 Energy distribution of position of star

按照图 8 所示的扫描轨迹,在四个不同方向,对星敏感器光学系统进行了测量,质心畸变测量结果如图 9 所示,质心畸变小于 $9''$ 。

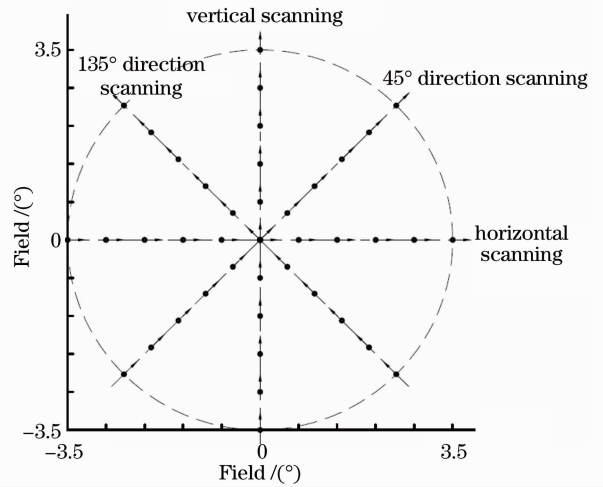


图 8 扫描轨迹

Fig. 8 Scanning tracks

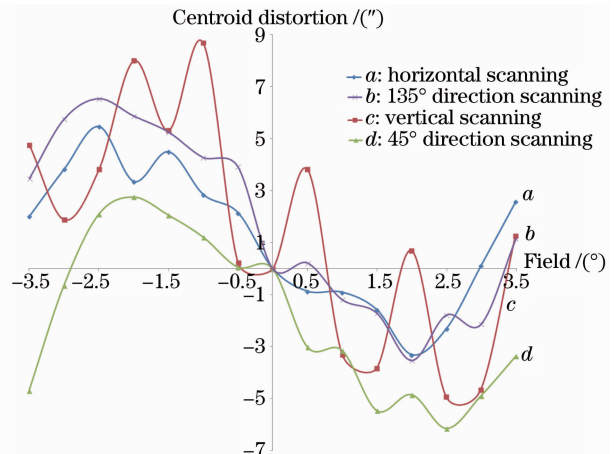


图 9 质心畸变

Fig. 9 Centroid distortion

## 5 结 论

针对实际工程需求,为了确保星传感器测量的精确性和可靠性,设计了像方远心的大相对孔径光学系统。该系统具有像质良好,离焦对星点质心定位精度影响较小,视场内能量分布比较一致,以及能量集中度高、结构紧凑和重量轻等优点,为星传感器姿态测量提供了精度保障。同时,提出了单星模拟器结合一维高精密气浮转台的静态测试方法来测量星传感器的质心畸变,这种测量方法测量精度高,无实时性要求,操作简单。

## 参 考 文 献

- Li Xuekui, 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. 星传感器的星点定位方法研究[J]. *电子器件*, 2004, **27**(4): 571~574
- Guo Qiang. Tradeoff design analysis for defocused imaging of star sensor on space-to-earth platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1488~1494  
郭强. 对地观测平台恒星传感器离焦成像折中设计分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1488~1494
- Liu Jian, Hao Yuncai, Chang Jun *et al.*. Athermalization of star tracker system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, **30**(2): 223~230  
刘健, 郝云彩, 常军等. 无热化星传感器光学系统设计[J]. *北京理工大学学报*, 2010, **30**(2): 223~230
- Carl Christian Liebe. Accuracy performance of star trackers- a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 587~599
- 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传感器光学系统设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1822~1824
- He Lingna, Cui Weixin, Pei Yuntian. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 24~29  
何灵娜, 崔维鑫, 裴云天. 基于 CMOS APS 的星传感器光学系统结构与优化[J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 24~29
- Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122001  
樊巧云, 李小娟. 全天时星传感器光学系统设计参数选择[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122001
- Liu Haibo, Tan Jichun, Shen Benjian *et al.*. Aberrations effect on position accuracy of star sensor [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 471~473  
刘海波, 谭吉春, 沈本剑等. 像差对星传感器星点定位精度的影响[J]. *光学技术*, 2009, **35**(3): 471~473
- Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system 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传感器光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 092202
- Zhou Yan, Zhao Jianke, Chang Ming *et al.*. Measurement of dispersed spot for star sensor optics [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(3): 454~456  
周艳, 赵建科, 昌明等. 星传感器光学系统弥散斑测试方法[J]. *应用光学*, 2009, **30**(3): 454~456
- Tang Tianjin. Optical system design of light star tracker with low F-number[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, **32**(3): 36~41  
汤天瑾. 无热化大相对孔径星传感器光学系统设计[J]. *航天返回与遥感*, 2011, **32**(3): 36~41
- Li Chunyan, Xie Hua, Li Huafeng *et al.*. Centroiding algorithm for high-accuracy star tracker [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(2): 41~44  
李春艳, 谢华, 李怀锋等. 高精度星传感器星点光斑质心算法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(2): 41~44

栏目编辑: 张 腾