

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905024

# 基于非球面的大相对孔径微型星敏感器镜头设计\*

杜康<sup>1,2</sup>, 刘春雨<sup>1</sup>, 谢运强<sup>1,2</sup>, 樊星皓<sup>1,2</sup>, 刘帅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**星敏感器是卫星上精度最高的姿态测量仪器,其通过对恒星成像与识别来确定卫星的三轴姿态,主要由光学系统、电子学系统和信息处理系统组成。传统卫星上高精度星敏感器的体积重量较大,难以满足蓬勃发展的微纳卫星的任务需求,成为限制微纳卫星定位精度的主要障碍。相对于电子学微型化、集成化和信息处理技术的飞速发展,光学系统成为星敏感器小型化的瓶颈。提出一种基于非球面大相对孔径微小型光学系统设计方法,仅用5片镜片,即可实现焦距25 mm,相对孔径1/1.3,17°全视场角,在奈奎斯特频率处MTF优于0.5,采用选取相对部分色散系数相同或接近、色散系数相差较大的玻璃组合的方法,有效校正了500~880 nm宽光谱色差,并实现了全视场畸变 $\leq 0.013\%$ 。引用此技术设计纳型星敏感器镜头焦距25 mm,重量仅为15 g,降低到国内纳型星敏感器镜头的1/5。结果表明,光学系统经测试畸变等指标,满足角秒级星点中心确定的要求,为高精度纳型星敏感器提供了核心保障。

**关键词:**星敏感器;微纳卫星;非球面;光学设计;大相对孔径;微小型

**中图分类号:** TH74      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 590.30

## Lens design of micro star sensor with large aperture based on aspheric surface

Du Kang<sup>1,2</sup>, Liu Chunyu<sup>1</sup>, Xie Yunqiang<sup>1,2</sup>, Fan Xinghao<sup>1,2</sup>, Liu Shuai<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The star sensor is the most accurate attitude measure instrument on the satellite. It determines the three-axis attitude of the satellite by imaging and recognizing stars. It is mainly consisted of optical system, electronic system and information processing system. Star sensor on the conventional satellite has large weight and volume, which is difficult to meet the mission requirements of the booming micro-nano satellite. It has become a major obstacle which limits the accuracy of micro-nano satellite positioning. Compared with the rapid development of electronic miniaturization, integration and information processing technology, the optical system has become the bottleneck of star sensor miniaturization. To solve this problem, this paper proposes a large relative aperture micro-small optical system based on aspherical 1/1.3, which can realize 17° full field of view with 5 lenses. MTF is better than 0.5 at the Nyquist frequency point. The glass combination with the same partial or close dispersion coefficient and large difference of dispersion coefficient is selected. It is effective to correct the wide spectral chromatic aberration from 500~880 nm, which can achieve full field distortion  $\leq 0.013\%$ . This technology can help design the nano-star sensor lens with a focal length of 25 mm. Its weight is 15 g, which is only 1/5 of the domestic nano-star sensor lens. Experimental results show that the optical system can meet the requirements determined by the angular second-level star point center after distortion and other indicators test. It provides one kind of core guarantee for realizing the high precision nano-star sensor.

**Keywords:** star sensor; micro-nano satellite; aspherical surface; optical design; large relative aperture; miniaturization

## 0 引言

近年来,随着计算机、新材料、微纳米、微电子机械、高密度能源及空间微推进技术的迅速发展,微纳卫星以一种全新的概念、崭新的设计思想成为航天领域最活跃的研究方向<sup>[1]</sup>。微纳卫星可以应用在卫星通信、卫星遥感、全球定位和导航、地面图像识别、天气预报及灾害监视等领域。特别是在军事上,微纳卫星的灵活性、分散性和生存能力强,能迅速适应战术需求。微纳卫星的发展是技术进步推动和应用需求牵引的结果,也是未来卫星的重要发展趋势。星敏感器是用来确定微纳卫星姿态的主要测量仪器,其通过测量不同位置的恒星的相对位置来确定姿态,进而确定微纳卫星在惯性坐标系中的三轴姿态,具有可连续测量且漂移小的优点<sup>[2]</sup>。因为微纳卫星重量、体积和功耗的严格制约,所以研制小体积、低重量、高精度、高可靠性的微型星敏感对进一步减轻整星的负担,提升姿态测量精度和控制精度,有着不可估量的推动作用。星敏感器主要由光学系统,图像处理系统,数据传输系统3个部分组成。相对于电子器件微型化、集成化飞速发展,光学系统的轻量化成为星敏感器小型化的桎梏,且光学系统自身参数直接决定星敏感器方位角的测量精度,光学系统的成像性能直接影响恒星星点提取精度和定位精度,进而影响星图识别的精度与载体的姿态计算。可见,优良的光学系统为高精度纳型星敏感器提供了核心保障。

目前,星敏感器的研究在国外航天领域已经日趋成熟。许多国家都已经成功地将星敏感器应用于各种航天任务,美国、德国、英国、法国、比利时、荷兰、意大利和印度等国都有生产星敏感器的公司或者研究机构<sup>[3]</sup>,Ryerson大学研制的代号为ST-16的微型星敏感器,视场角为 $20^\circ \times 15^\circ$ , $5.9 \times 5.6 \times 3.25 \text{ cm}^3$ ,重量只有 $90 \text{ g}$ <sup>[4-5]</sup>。国内在微型星敏感器的研究方面与国外的研究机构所研制的微型星敏感器存在一定的差距。闫佩佩等<sup>[6]</sup>采用双高斯结构并利用高次非球面技术设计的星敏感器镜头,由4片透镜组成,相对孔径为 $1/1.5$ ,全视场角为 $7^\circ$ ,光学系统重 $461 \text{ g}$ ,系统重量较重、相对孔径较小。巩盾等<sup>[7]</sup>采用非球面技术设计的星敏感器镜头,相对孔径达到 $1/1.165$ ,全视场角为 $6.5^\circ$ ,视场角较小,全视场内捕获导航星数少,姿态测量精度不高。孟祥月等<sup>[8]</sup>设计的宽视场大相对孔径星敏感器由7片圆透镜、1片保护玻璃、1片滤光片组成,相对孔径 $1/1.25$ ,全视场角为 $16.9^\circ$ ,其系统结构复杂、重量较重,难以满足星敏感器日益小型化、轻量化的需求。

本文结合工程实际,设计了一例适用于微纳卫星的大相对孔径、大视场、宽光谱、轻小型星敏感器光学系统。

本文采用Petzval结构的改进型使系统拥有小于 $0.013\%$ 的超低畸变,选取相对部分色散系数相同或接近、色散系数相差较大的玻璃组合,有效校正了系统在较宽波段范围的色差;利用二次曲面减少了镜片数量,且系统成像质量得到提升,在满足星敏感器轻小型需求的同时保证了光学测量的精确性。

## 1 光学系统参数的确定

光学系统是星敏感器的成像系统的核心部分,直接影响星敏感器的测量精度<sup>[9]</sup>。光学系统参数指导了光学系统如何设计,并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确定。

### 1.1 视场角与焦距

星敏感器光学系统的视场角应满足局部天区星图识别、捕获3颗及3颗以上导航星或全天识别、捕获5颗以上导航星的概率接近 $100\%$ ,根据天球恒星分布服从泊松分布的规律<sup>[10]</sup>,如下,

$$\overline{N_{\text{FOV}}} = 6.57\eta \times e^{1.08 \times m} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \omega \quad (2)$$

$$P_N = 1 - \sum_{k=0}^{N-1} e^{-N_{\text{FOV}}} \times \overline{N_{\text{FOV}}}^k / k! \quad (3)$$

式中: $m$ 为恒星的视星等,取 $m=5.5$ ; $\eta$ 为全视场角为 $2\omega$ 的圆形视场覆盖的天空范围; $P_N$ 为探测到 $N$ 颗恒星的概率,则当 $N=4$ 时, $P_N > 99\%$ 时,则光学系统视场角 $2\omega \geq 17^\circ$ 。

光学系统焦距 $F$ 可由图像传感器有效边长 $X$ 、 $Y$ 与视场角 $2\omega$ 确定,如式(4)所示。

$$2\omega = 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{4F^2}} \quad (4)$$

当采用型号为cmv300的探测器时,探测器感光面积为 $6 \times 6 \text{ mm}$ ,像元尺寸为 $7.4 \mu\text{m}$ ,考虑后续加工和组装会产生一定的遮拦,取其感光面积为 $5.3 \times 5.3 \text{ mm}$ ,算得焦距为 $F=25 \text{ mm}$ 。

### 1.2 相对孔径

当焦距一定时,随着星敏感器的入瞳直径的增大,到达CCD像面的能量也越大,信噪比越高,测量更暗的星的概率越大<sup>[11]</sup>。为了正确提取像素内的信号,星敏感器的探测率应大于 $99\%$ ,同时为了降低假信号的影响,虚警率应小于 $1\%$ ,满足这两个条件的信噪比阈值 $v_{\text{th}}=5$ <sup>[12]</sup>。

假设背景辐射产生的光电子数为 $B$ (相当于10等星所辐射的能量在图像传感器上所产生的电子数),图像传感器噪声源引起的噪声为 $N$ ,光学系统透过率为 $T_l$ , $D$ 为

入瞳直径,成像光斑直径为 $d$ ,探测器像元尺寸为 $a$ ,探测器积分时间为 $T$ ,探测器量子效率为 $Q$ ,探测器填充因子为 $K$ ,单个光子能量为 $E_{ph}$ 。

对于0视星等( $m=0$ )在 $1\text{ mm}^2$ 面积上辐射的总能量为 $2.96\times 10^{-14}\text{ W}$ 。其照度 $E_0=2.96\times 10^{-14}\text{ W/mm}^2$ ,则星敏感器系统星等探测灵敏度的数学评估模型:

$$m \leq -\log_{2.512} \left( \frac{v_{th}^2 + \sqrt{v_{th}^2 + 4v_{th}^2(B + N^2)}}{2T_l \cdot E_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot a^2 \cdot T \cdot \frac{1}{E_{ph}} \cdot Q \cdot K} \right) \quad (5)$$

由数学评估模型可知,光学系统透过率高,入瞳直径大,像元尺寸大,星点像光斑能量集中,积分时间长,量子效率高,填充因子高,背景辐射与噪声小,则系统的星等探测灵敏度就高。当取探测器积分时间 $T=0.04\text{ s}$ ,视星等 $m=6$ ,信噪比阈值 $v_{th}=5$ ,算得入瞳直径 $D=12.5\text{ mm}$ ,此时相对孔径为 $1/2$ 。为提高信噪比从而提高星敏感器捕获恒星的概率和测控精度,应尽量提高入瞳直径。根据探测性能,测控精度要求,信噪比需达到 $7.6$ 以上,算得入瞳直径 $D=19.2\text{ mm}$ ,相对孔径为 $1/1.3$ 。

### 1.3 光学谱段

光学系统的中心波长和光谱范围取决于选用探测器的光谱响应范围和谱段内的恒星发光光谱特性。根据恒星的峰值波长统计,恒星的发光光谱在紫外,可见光及红外等波段均有分布<sup>[9]</sup>。根据CMV 300的光谱响应特性曲线(横轴为波长,纵轴为探测器量子效率),选定光谱范围为 $500\sim 880\text{ nm}$ ,如图1所示。系统设计具体指标如表1所示。

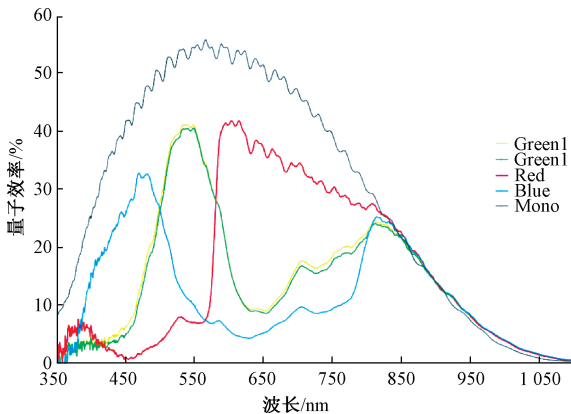


图1 CMV300的光谱响应特性曲线

Fig.1 Spectral response characteristic curve of CMV300

### 1.4 其他参数确定

单星测量精度是衡量星敏感器高精度测量的标准,直接确定姿态角测量精度。对于已选定的探测器和确

表1 光学系统设计指标

Table 1 Optical design index

设计参数	指标要求
视场角( $2\omega$ )	$17^\circ$
焦距	25 mm
相对孔径	$1/1.3$
光学谱段	500~880 nm

定的焦距,角分辨率也随之确定,采用星点重采样的方法可以提升星点定位精度<sup>[13]</sup>,星敏感器单星测量精度为

$$\varepsilon = \frac{2\omega}{n} \times \sigma_{\text{centroid}} = \delta \times \sigma_{\text{centroid}} \quad (6)$$

式中: $n$ 为探测器 $2\omega$ 视场对应的像元数; $\delta$ 为单像元空间分辨率这; $\sigma_{\text{centroid}}$ 为内插细分精度。表2所示为弥散斑大小对内插法求星象点的影响,则本系统在内插精度达到 $0.035$ 个像元数时的单星测量精度为 $2.14''$ 。

表2 弥散斑大小对内插精度的影响<sup>[12]</sup>

Table 2 The effect of speckle size on interpolatin accuracy

像点所占像元数	1×1	2×2	3×3
内插精度(像元数)	0.2	0.035	0.001

## 2 光学系统设计与优化

### 2.1 光学系统设计原则

星敏感器的光学系统是大视场的测量型光学系统,工作对象是无限远处的恒星。恒星在探测器上成点像,需保证星点像在CCD上有一定位置精度,故应先考虑校正引起像点中心位置偏移和像点能量扩散不对称的像差,即造成像点中心随波长不同而改变的倍率色差和造成像点中心偏移及几何失对称的畸变;同时星敏感器的星图读取方式是捕捉每个星点的能量中心,故也应重点控制光学系统的能量集中度与弥散斑尺寸<sup>[14]</sup>。

### 2.2 光学系统设计

光学系统结构形式主要有反射式、折反射式、折射式3种结构形式。同轴反射式,折反式,光学系统视场角较小难以做大通常不大于 $3^\circ$ ,且存在中心遮拦问题,能量利用率小,不能满足视场要求。离轴反射式结构加工装调难度较大,光学系统体积较大,不适用于微小型星敏感器。折射式光学系统具有大视场,大相对孔径,能量利用率高,结构简单等优点,且经过优化后光学系统具有良好的成像质量,因此本文选择了折射式结构。

折射式结构可分为:双高斯型、Petzval型、远摄型等多种结构形式。双高斯结构孔径光阑位于光学系统中

间,引起前组镜片口径较大,厚度较厚,大大增加了光学系统的体积与质量,且不利于校正像散。远摄结构视场角较小,相对孔径难以做大,色差校正难度大。Petzval 结构透镜的口径大小较为一致,轴上轴外成像一致性较好,有利于减小畸变和倍率色差,但 Petzval 结构筒长较长,系统体积较大。

综合考虑各方面因素,最终将系统结构设计为改进型 Petzval 结构,将孔径光阑置于第一个面,在系统中间加入同心齐明透镜,增大系统的相对孔径。这种结构缩短了光学系统的长度,光学系统的体积与重量得到有效控制。系统轴上、轴外成像一致性良好,畸变小,可设计为像方远心光路,减小调焦对系统的测量精度影响。

在材料选择方面,星敏感器光学系统波段范围较宽,达到 500~880 nm,色差难以校正。为了增强系统的复消色差能力,采用正负透镜分离的办法校正场曲,并根据二级光谱理论,采用选取相对部分色散系数相同或接近、色散系数相差较大的玻璃组合的方法,并满足所选用的 3 种玻璃在部分色散系数  $P$  与阿贝数  $V$  的分布图上,所围的三角形有尽可能大的面积。对可见光玻璃材料数据库进行分析,玻璃材料在 500~880 nm 波段时,色散系数与相对部分色散系数(阿贝数)的分布如图 2 所示。在宽光谱段内,采用 ZK 系的重冕玻璃 ZK12 与 ZF 系的重火石 H-ZF71、D-ZF10 玻璃组合以消除色差(图 2 中绿点为采用的三种玻璃材料),从图中可以看出 3 种玻璃的相对部分色散系数非常接近,然而阿贝数又有较大的差异。并利用高折射率的镧系玻璃,使入射光束的入射角迅速减小,提高相对孔径,增大了玻璃的曲率半径,从而减小高级像差。

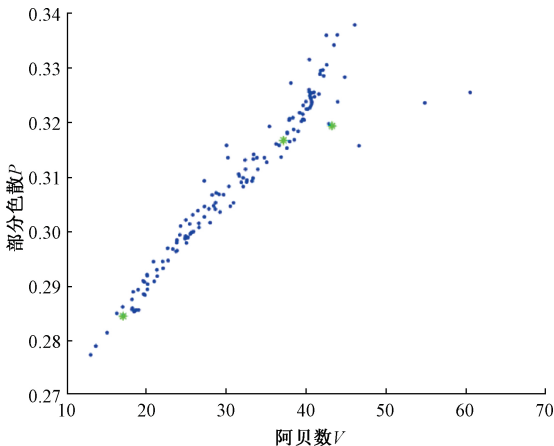


图 2 500~880 nm 玻璃材料的色散特性

Fig.2 Dispersion characteristics of glass chromatic dispersion from 500~880 nm

### 2.3 利用非球面镜,减少镜片数量

常规的透射式星敏感器,为了校正 500~880 nm

的宽光谱范围下的像差,普遍采用 7~9 片光学玻璃,镜片数量一直居高不下,结构臃肿,为星敏感器的小型化增加压力。为了实现星敏感器小型化,本文引入特殊表面,增加光学系统自由度,用特殊表面代替球面透镜,改善成像质量,简化光学系统结构,使得镜片数量减少到 5 片,光学系统重量得到有效减轻。特殊表面包含非球面,衍射面和自由曲面等多种类型,其中衍射面和自由曲面加工、检测手段尚不成熟、获取难度大、加工成本高,故选择加工,检测手段较成熟的二次曲面加入光学系统。

根据几何像差理论,像散和球差如下所示:

$$S_I'' = \frac{1}{8} S_I [(i + i')^2 + (i - u)^2 + (i + u)^2] \quad (7)$$

式中:  $S_I''$  为高级球差;  $S_I$  为高级像散;  $i$  为折射面入射角;  $i'$  为折射面的出射角;  $u$  为折射面的孔径角。高级像差与折射面的入射角和折射角有关,为了使光线流畅地通过折射面,不产生较大的偏折角,减小透镜产生的高级像差。需合理分配光学系统的光焦度。光学系统各个表面的光焦度如表 3 所示,光焦度绝对值越大,其镜面曲率越大,对总像差贡献程度越大,像差校正的敏感度越高,故选择在系统的第 6 面和第 9 面引入二次曲面(系统光路如图 3 所示,并规定光学系统从左到右依次是第 1~10 面),其面型参数如表 4 所示。

表 3 各个表面光焦度值

Table 3 The focal values of each surface

序号	光焦度
1	1/24
2	-1/194
3	1/23
4	-1/40
5	-1/95
6	-1/15
7	1/22
8	1/33
9	-1/18
10	1/62

表 4 非球面表面参数

Table 4 Aspheric surface parameters

表面序号	曲率半径	二次曲面系数	半口径
6	13.614	0.945	6.987
9	-9.663	-1.595	4.933

### 3 像质评价

系统焦距 25 mm, 相对孔径 1/1.3, 全视场 17°, 后截距 4 mm, 总长 31 mm, 光学重量 6 g, 最大畸变低于 0.013%, 成像质量良好。系统为准远心光路, 光线近似准直照射到像面, 有利于提高像面的相对照度, 结构如图 3 所示。

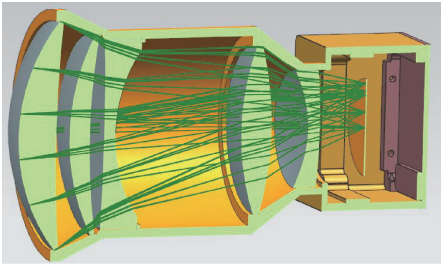


图3 光学系统结构

Fig.3 Structure diagram of optical system

#### 3.1 光学传递函数 (MTF)

调制传递函数是像质评价中最综合的评价指标, 能够较直观地反应出光学系统的优良。根据采用的 CCD 像元尺寸为 7.4 μm, 求得奈奎斯特频率为

$$N = 1/2a = 68l \text{ p/mm} \quad (8)$$

采用系统在奈奎斯特频率处的调制传递函数 MTF 进行评价, MTF 可表示为:

$$MIF = MTF_a \cdot MTF_e \cdot MTF_{\text{design}} \cdot MTF_s \quad (9)$$

式中:  $MTF_a$  表示加工和装调调制传递函数,  $MTF_a = 0.86$ ;  $MTF_e$  表示成像电路的调制传递函数,  $MTF_e = 0.9$ ;  $MTF_{\text{design}}$  代表光学系统设计值;  $MTF_s$  表示探测器采样过程的传递函数, 查询探测器手册为  $MTF_s = 0.65$ 。通常要求在奈奎斯特频率处的调制传递函数优于 0.2。根据式 (9) 可求得调制传递函数设计值需优于 0.4。

未加非球面和加入非球面的光学系统 MTF 曲线如图 4、5 所示, 可以看出非球面的加入大大提高了光学调制系统传递函数, 在奈奎斯特频率处传递函数值从 0.2 提升到接近 0.55, 满足 MTF 设计值优于 0.4 的要求。

#### 3.2 点列图

恒星在探测器上成点像, 点列图中弥散斑大小反映了恒星星体在 CCD 上的位置精度。如图 6 所示, 分别是 0°, 3°, 6.3°, 7°, 8.5° 视场下加入非球面后的光学系统点列图, 可以看全视场内弥散斑大小均匀、圆度较好、大小一致, 有利于质心的提取。

#### 3.3 能量集中度

图 7 所示为光学镜头衍射能量集中度曲线图, 横坐标为包围框到像点质心距离, 最大值取 1 个像元尺寸, 即

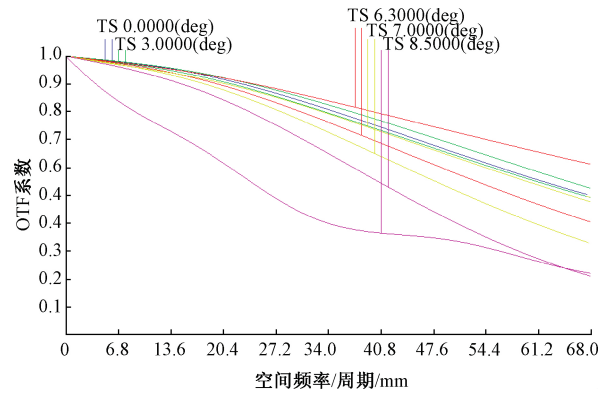


图4 未引入非球面的 MTF

Fig.4 MTF without the aspheric surface

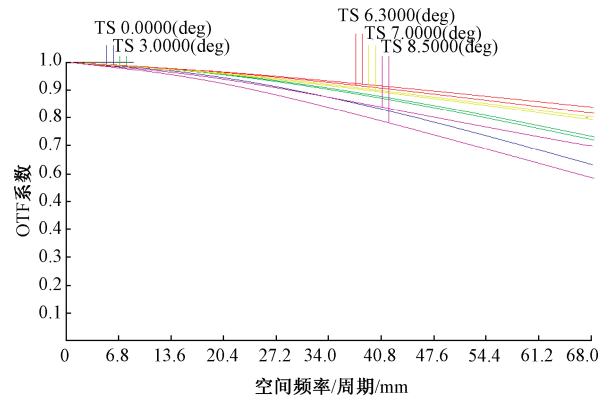


图5 引入非球面的 MTF

Fig.5 MTF with the aspheric surface

7.4 μm, 纵坐标表示横坐标数值确定的半径内能量所占的比例。能量分布接近高斯正态分布, 便于提高捕获星点的准确度<sup>[15-16]</sup>, 图中不同颜色曲线表示不同视场的情况。可见, 所有视场的衍射能量集中度在 2×2 像元包围框内达到 90%, 能量分布接近正态分布, 符合设计要求。

#### 3.4 畸变及倍率色差

畸变造成几何失对称从而会影响星点像在 CCD 上的位置精度, 根据高精度星敏感器的要求, 系统测角误差需小于 10", 最大畸变量由式 (8) 计算。

$$\sigma = \frac{DIS \times H_p}{F} \times 3600 \times \frac{180}{\pi} \leq 10'' \quad (10)$$

式中:  $H_p$  为最大半视场像高;  $\sigma$  为畸变引起的测角误差;  $F$  表示所提出光学镜头的焦距。计算得畸变  $DIS \leq 0.04\%$ 。由图 8 可知, 成像最大畸变  $\leq 0.013\%$ , 场曲  $\leq 0.05 \text{ mm}$ , 系统具有超低的畸变, 测角误差得到有效控制, 满足高精度星敏感器要求。

倍率色差可以直观反映出各种波长光斑的偏离程度, 是能量中心偏移的原因之一。图 9 所示为加入非球面系统后, 相对于中心波长 690 nm 的垂轴色差曲线, 可

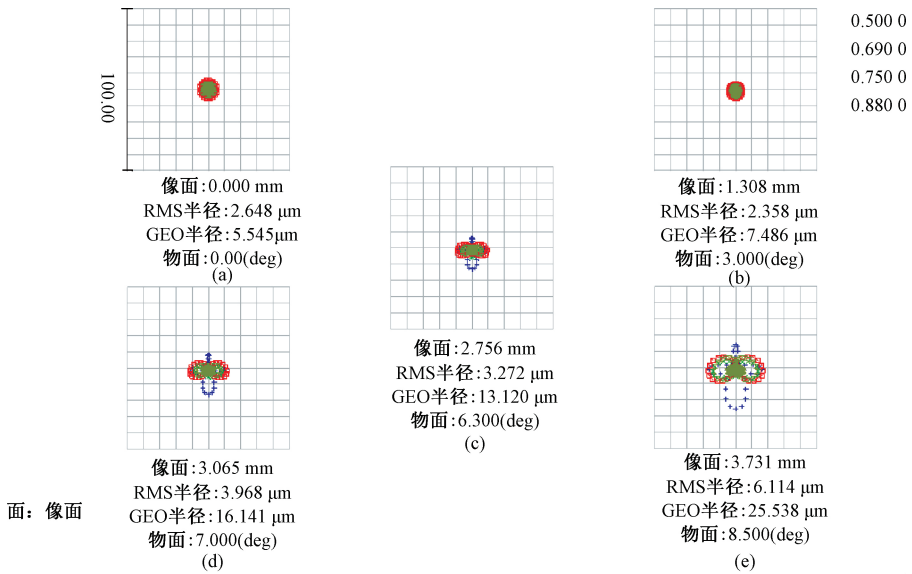


图 6 光学系统点列

Fig.6 Spot diagram of optical system

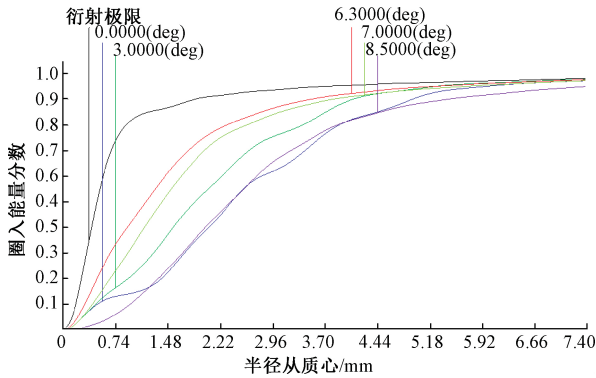


图 7 系统能量集中度曲线

Fig.7 Energy concentration diagram

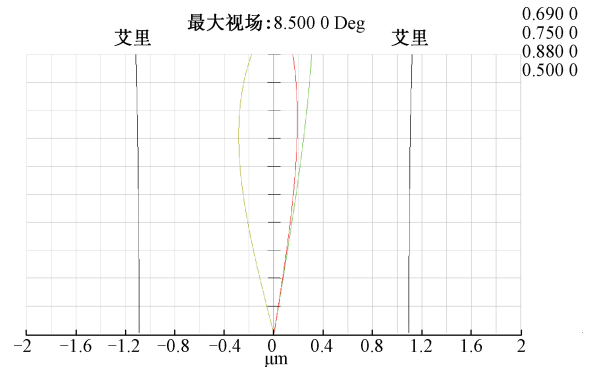


图 9 加入非球面的倍率色差曲线

Fig.9 Lateral color with aspheric surface

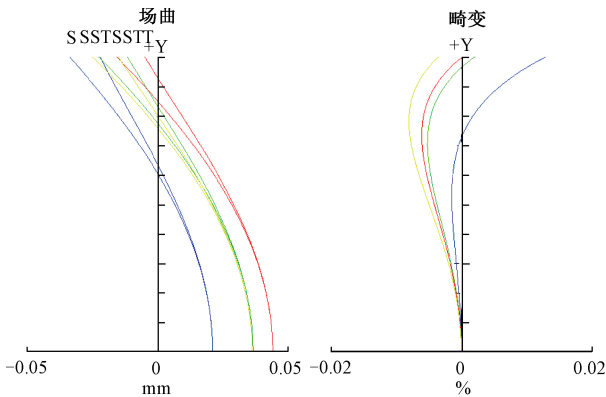


图 8 系统场曲及畸变

Fig.8 Field curvature and distortion

高了星敏感器的测量精度。

### 4 光学系统检测

目前,星敏传感器光学系统完成了加工及装配,如图 10 所示。采用单星模拟器进行星点探测性能的测试,光学系统对视星等  $m = 6$  的恒星进行星点成像如图 11 所示,星点弥散斑分布在  $3 \times 3$  像元范围,有利于后续的电子学细分处理,符合高精度星敏传感器的应用需求。

利用 Zygo 干涉仪检测星敏传感器光学镜头,检测系统由激光器、针孔、棱镜、3 个透镜、标准镜和相机组成。检测结果如图 12 所示,成像波像差均方根值 (RMS) 为  $0.033\lambda$ ,峰值值 (PV) 为  $0.285\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),成像质量良好。

由于系统畸变很小,需采用亚像素精度测量手段,对

可以看出,色差取值范围小于等于爱里斑,表明轴上与轴外各视场的成像质量基本一致,系统垂轴色差校正良好,提



图10 实物

Fig.10 Picture of products

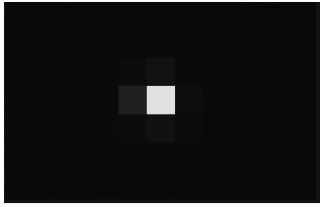


图11 实拍星点

Fig.11 Picture of star

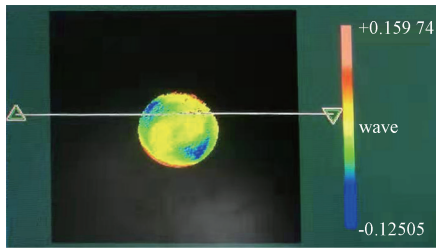


图12 Zygo 干涉仪检测

Fig.12 Zygo interferometer detection diagram

相对畸变进行测量,测量系统由平行光管、焦面分划板、高精度网格、光源和监视器组成。测量结果如表5所示。可以看出测量结果与理论结果基本吻合,满足高精度星敏感器的应用需求。

表5 各视场相对畸变

Table 5 Measured relative distortions of every filed

视场	0.3	0.7	1
畸变/%	-0.008	-0.015	-0.012

## 5 结 论

针对星敏感器小型化,确保测量的精确性、可靠性,本文设计了一款改进型 Petzval 星敏感器光学系统,它有相对口径大、视场大、光谱范围宽、畸变极小等特点。国外某微纳卫星星敏感器成像镜头,焦距 16 mm,相对孔径

1/1.2,入瞳直径为 13 mm,重 11 g,测量精度  $5.5''^{[3]}$ ,本文设计的星敏感器成像镜头,焦距达到 25 mm,相对孔径为 1/1.3,入瞳直径为 19.2 mm,重 15 g,单星测量精度达到  $2.14''$ 。对比可以看出,本文设计的光学系统,在小型化的同时,有焦距长和入瞳直径大的特点,长焦距使捕获恒星的概率和测控精度大大提高。大的入瞳直径,提高了像面照度,使更多的能量进入光学系统,从而保证系统能够探测到更暗的星等,确保了星敏感器定位姿态的精确性、可靠性。本设计具有超低的畸变,全视场畸变量  $\leq 0.035\%$ ,降低了测角误差,系统弥散斑 90% 能量集中度在  $2 \times 2$  个像元内,为后期的加工装调留有较大的公差余量,各视场弥散斑近似为圆,有利于进行质心的提取,提高了定位精度。并且本文设计利用非球面提升了光学系统的成像质量,减少了镜片数量,重量大大下降,满足了纳型星敏感器轻量化的需求。

## 参考文献

- [1] 马定坤,匡银,杨新权.微纳卫星发展现状与趋势[J].空间电子技术,2017,14(3):42-45,79.  
MA D K, KUANG Y, YANG X Q. Development actual state and trends of nano-satellite [J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(3):42-45,79.
- [2] 易敏,邢飞,孙婷,等.高精度星敏感器标定方法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(9):2154-2160.  
YI M, XING F, SUN T, et al. Calibration method of high-accuracy star sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9):2154-2160.
- [3] 曹阳.纳型星敏感器新技术研究[D].北京:中国科学院国家空间科学中心,2016.  
CAO Y. Innovative technique research on nano star tracker [D]. Beijing: National Space Science Center, CAS University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [4] ENRIGHT J, SINCLAIR D, GRANT C, et al. Towards star tracker only attitude estimation [C]. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2010: SSC10-X-3.
- [5] DZAMBA T, ENRIGHT J, SINCLAIR D, et al. Success by 1000 improvements: flight qualification of the ST-16 star tracker [C/OL]. 28<sup>th</sup> Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014. <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/YearReview/1/>.
- [6] 闫佩佩,樊学武.大相对口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,2011,49(9):116-123.  
YAN P P, FAN X W. Design of optical system of very high Precision star sensor with small F-number [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 49(9):116-123.
- [7] 巩盾,田铁印,王红.含有非球面的宽波段大相对孔径

- 星敏感器光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 196-201.
- GONG D, TIAN T Y, WANG H. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 196-201.
- [8] 孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 大相对孔径宽光谱星敏感器光学镜头设计[J/OL]. 红外与激光工程: 1-9. [2019-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20190322.0919.004.html>.
- MENG X Y, WANG Y, ZHANG L, et al. Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range[J/OL]. Infrared and Laser Engineering: 1-9. [2019-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20190322.0919.004.html>.
- [9] 朱杨, 张新, 伍雁雄, 等. 紫外星敏感器光学系统设计及其鬼像分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 127-132.
- ZHU Y, ZHANG X, WU Y X, et al. Optical system design and ghost analysis for ultraviolet star sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 127-132.
- [10] 张欢, 吴玲玲. 星敏感器光学系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 61-64.
- ZHANG H, WU L L. Design of optical system of star sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(12): 61-64.
- [11] 潘越, 王虎, 荆楠, 等. 全天时星敏感器光学系统参量选择与光学设计[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 157-163.
- PAN Y, WANG H, JING N, et al. Parameter selection and optical design of all-day star sensor [J]. ACTA Photonica Sinica, 2016, 45(1): 157-163.
- [12] 赵超. 星敏感器光学系统设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- ZHAO CH. Optical system design of star sensor [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [13] 曹阳, 李保权, 李海涛, 等. 基于星点像重采样的星敏感器高精度质心算法[J/OL]. 光学学报: 1-16 [2019-06-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20190402.1513.052.html>.
- CAO Y, LI B Q, LI H T, et al. A star sensor high accuracy centroid algorithm based on star image resampling[J/OL]. Acta Optica Sinica: 1-16 [2019-06-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20190402.1513.052.html>.
- [14] 魏明, 王超, 付强, 等. 大相对孔径轻小型星敏感器光机系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 23-26.
- WEI M, WANG CH, FU Q, et al. Opto-mechanical system design of light and compact star sensor with large relative aperture[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(1): 23-26.
- [15] 吕博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 折反射式大入瞳星敏感器光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 276-283.
- LYU B, LIU W Q, ZHANG D L, et al. Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 276-283.
- [16] 陈启梦, 张国玉, 孙向阳, 等. 高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 284-290.
- CHEN Q M, ZHANG G Y, SUN X Y, et al. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 284-290.

### 作者简介



杜康, 2017年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位, 主要研究方向为光学设计。

E-mail: 444526477@qq.com

Du Kang received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2017. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Changchun Institute of Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is the optical design.



刘春雨(通信作者), 2005年于吉林大学获学士学位, 2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位。现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博导、研究员, 主要从事光学系统设计、光电系统总体设计等方面研究。

E-mail: mmliucy@163.com

Liu Chunyu (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Jilin University in 2005 and received her Ph. D. degree from Changchun Institute of Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2011. She is currently a researcher and Ph. D. supervisor at Changchun Institute of Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include optical design and overall design of photoelectric system.