

大相对孔径甚高精度星敏感器光学系统设计

闫佩佩^{1,2} 樊学武¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 甚高精度星敏感器是目前精度最高的姿态敏感器。结合星敏感器系统探测要求计算出光学系统参数, 在 Code V 平台上实现了具有良好像质的大相对孔径星敏感器光学系统。系统焦距为 90 mm, 相对孔径为 1/1.5, 视场角为 7°, 光谱范围为 0.45~0.85 μm。系统中高次非球面的使用提高了像质, 满足了对弥散斑、能量集中度、畸变、垂轴色差等像差的特殊要求。光学系统总长仅为 90.36 mm, 符合实际工程小型化、轻量化的需求。同时, 光学系统在要求温度范围内性能稳定, 消热差和抗离焦效果良好。

关键词 光学设计; 星敏感器; 非球面; 消热差; 抗离焦

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.092202

Design of Optical System of Very High Precision Star Sensor with Small F -Number

Yan Peipei^{1,2} Fan Xuewu¹

¹ Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The very high precision star sensor is the most accurate attitude sensor at present. According to the star sensor system detection requirements, the optical system parameters are figured out. A kind of optical structures of star sensor with small F -number and good imaging quality is realized on the stage of Code V software. The system has an effective focal length of 90 mm, an F -number of 1.5, a field of view of 7°, and a working wavelength range of 0.45~0.85 μm. The imaging quality is enhanced and special requirements of the spot, energy concentration, distortion, lateral color etc., are all satisfied. The total system length is only 90.36 mm, which meets the demand of miniaturization and light weight in engineering. Meanwhile, it works steadily with high optical quality in the required temperature range and has good athermal and anti-defocus performances.

Key words optical design; star sensor; aspheric surface; athermalization; anti-defocus

OCIS codes 220.4830; 080.3620; 120.4820

1 引言

星敏感器是一种高精度的航天器姿态测量仪器, 测量精度优于 1" 的星敏感器称为甚高精度星敏感器 (VHPSS)。荷兰在 20 世纪 80 年代末期已能制造精度达到 1.5" 的星敏感器^[1], 美国目前 AST-301 星敏感器精度已达 0.18" ^[2], 而国内星敏感器性能与国外先进水平差距较大。因此, 高精度的星敏感器研制是我国航天领域有待突破的技术之一。

星敏感器用于定位恒星。利用星敏感器将瞬间视场中的若干恒星成像于光电探测器上, 通过图像处理与已有图像比较, 得出飞行器在空间惯性坐标系的瞬间姿态误差, 完成飞行器在空间惯性坐标系的姿态测量。光学系统是星敏感器的重要组成部分, 它的性能制约着星敏感器的测量精度, 其设计难点就在于保证优良的恒星像质。国外有关星敏感器光学系统设计的文献较少, Clark 等^[3]报道了使用微镜的折反式星敏感

收稿日期: 2011-04-08; **收到修改稿日期**: 2011-04-22; **网络出版日期**: 2011-07-25

作者简介: 闫佩佩(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计、二元光学和杂散光分析等方面的研究。

E-mail: yppoptics@163.com

导师简介: 樊学武(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学设计, 光学检测和校准等方面的研究。

E-mail: 3076048309@sina.com

器光学系统,Ruocchi 等^[4]报道了采用两个平凸透镜组成的对称式星敏感器光学系统,但具体设计结果和系统参数都没有介绍。

本文针对实际工程需求,设计了一例大孔径星敏感器光学系统,在减小系统的长度、体积和重量的同时,可以获得较大的相对孔径和优良的成像质量,且消热差和抗离焦性能良好。

2 光学系统设计参数及评价指标

2.1 光学系统设计参数

星敏感器以太空中的恒星作为姿态测量的参考源,输出其在惯性参考系中的指向^[5]。其最终目的不是得到一个聚焦为点的光斑,而是需要所得光斑有一定的弥散半径以便计算其质心。要求在全视场范围内像面上弥散圆的直径分布在一个特定的范围内,各视场光斑尽可能地圆而且均匀,能量接近正态分布,且弥散圆质心的色偏差小。星敏感器光学系统与一般成像物镜的使用目的有较大差别,因而决定了其设计要求的特殊性。

星敏感器光学系统的设计指标是由所选用光电探测器的光谱响应、几何尺寸,所需探测的目标恒星,目标恒星的光谱分布以及后续拟合算法对像质的要求等诸多因素决定的^[6]。根据上述因素能够确定系统焦距、相对孔径、视场、光谱范围、中心设计波长、系统透过率、弥散元尺寸、后工作距以及工作温度。

甚高精度星敏感器要求测量精度为 $1''$,探测器单元尺寸 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$,得到整个光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1 光学设计指标
Table 1 Specifications of optical design

Focal length /mm	90
Aperture /mm	60
Field of view (diagonal)	$5^\circ\times 5^\circ(7^\circ)$
F number	1.5
Optical transmission	≥ 0.80
Spectral range / μm	0.45~0.85
Primary wavelength / μm	0.65
Back working length /mm	≥ 10
CCD detector pixel number /pixel	1024 \times 1024

2.2 光学系统评价指标

光学系统的像差影响星敏感器姿态测量精度,星敏感器光学系统设计评价指标主要包括点列图、能量集中度、畸变、垂轴色差、探测器星点质心偏移量等。

1) 点列图和光斑半径

依据点列图可以直观得到各个视场的光斑形状,根据星敏感器的计算要求,要求各视场光斑尽可能地圆而且均匀,这样有利于计算探测器上星点质心。各光斑不宜过小,需有一定的半径,由于探测器单元的尺寸为 $13\ \mu\text{m}$,光斑半径应该覆盖 2~3 个探测器像元,在 $15\sim 30\ \mu\text{m}$ 的范围为宜,不同视场的光斑半径差异不能过大。

2) 能量集中度曲线

能量集中度曲线描述了光斑能量分布情况,从光斑大小看,一般在小于 $30\ \mu\text{m}$ 的半径范围内集中 80% 以上的能量为宜。

3) 畸变

星敏感器允许畸变在一定的范围内存在。畸变过大,可以通过数字处理校正,但会增加软件处理的时间,降低数字更新速率。本文设计要求畸变不大于 1%。

4) 垂轴色差曲线

从垂轴色差曲线可以很容易地看出各波长光斑的偏离程度,依据计算要求,垂轴色差必须保持在 $2\ \mu\text{m}$ 以内。

5) 探测器星点质心偏移量

这是星敏感器灵敏度最重要的判别标准,要求探测器星点能量中心偏移量在 $1''$ 所对应的精度范围以内。经计算得 $\Delta=0.4635\ \mu\text{m}$ 。

3 光学系统设计

对于大相对孔径及结构复杂的光学系统,一般都从已有的技术资料 and 专利文献中选择其光学特性与自身要求相近的结构作为初始结构,这是一种比较实用又容易获得成功的方法^[7]。结合输入光学设计软件,如Code V、Zemax等,进行优化^[8]。选用一种相对孔径为 $1/1.38$ 的复杂化双高斯结构作为星敏感器光学系统的最初结构型式,在此基础上应用高次非球面来减少镜片数量,简化系统结构。同时选用高折射率材料来减少高级像差。

以图1中九片式复杂化双高斯型结构为基础,在Code V光学设计软件上进行优化设计,步骤如下:

1) 在改变原结构的相对孔径、视场角、谱段范围与设计要求的保持一致的基础上,以焦距 $90\ \text{mm}$ 、后工作距大于 $10\ \text{mm}$ 为特殊约束条件,进行优化,使初始结构满足系统要求的光学参数。

2) 上一步得到满足光学参数要求且像质较好的系统,在此基础上,去掉最后一块透镜,以其余透镜的半径和间隔作为变量进行优化,保持系统的焦距和后工作距约束条件同上。

3) 方法同步骤2,逐次去掉原结构中第8片、第7片透镜,并将新结构中的最后一个面设为偶次非球面,以其4、6级非球面系数作为变量,对系统进行优化。

非球面镜属于特殊镜面,它具有许多独特的性质,可以减少光学系统中的许多像差,如二次曲面在恰当的共轭位置可以使球差降为零,同时将非球面用于光学系统中可减少系统中光学元件的数量或提高成像质量^[9]。在非球面制造领域,可以依靠接触式轮廓仪抽查几根线上的轮廓误差,数据量小^[10]。

轴对称非球面可以是二次曲面,也可以是高次曲面^[11]。二次曲面方程一般表示为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (1)$$

坐标原点为曲面顶点, z 为曲面上各点沿光轴方向坐标, r 为归一化半径坐标, $c = 1/r_0$ 为非球面的基准面或辅助球面的曲率, $k = -e^2$ 为锥面度。而偶次非球面的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \dots, \quad (2)$$

式中 α_1 、 α_2 、 α_3 等为多次项系数,多数情况下 $\alpha_1 = 0$;为了减小成本易于加工一般只选取(2)式中的 r^2 、 r^4 、 r^6 项。在光学系统中引进高次非球面有利于校正除场曲外的各种单色像差,在光阑附近使用非球面可以校正各带的高级球差,在像面前或离光阑很远的地方用非球面可以校正像散和畸变,这在下面的设计结果性能分析里很好地表现出来。

4) 同步步骤3),逐次去掉原结构中的第3、4片透镜,并将新结构中的第1个面设为偶次非球面,以其4、6级高次非球面系数作为变量,进行优化。将像面前的系统第9面(光阑为第5面)设置为6次非球面,对像散和畸变进行了一定的校正。通过不断的优化改进,最终得到满足要求、像质优良的四片式结构。

在光焦度一定的情况下,高折射率玻璃可使透镜半径增大,降低高级像差。同时透镜厚度减薄,使得系统总长缩短,可以获得更加紧凑的结构,实现小型化。因此,设计中保留了原结构中的ZF6这种具有高折射率、高色散的玻璃材料。

4 设计结果

下面给出光学系统设计结果。图2为设计的星敏感器光学系统光路图,其中第1、9面为高次非球面,考虑

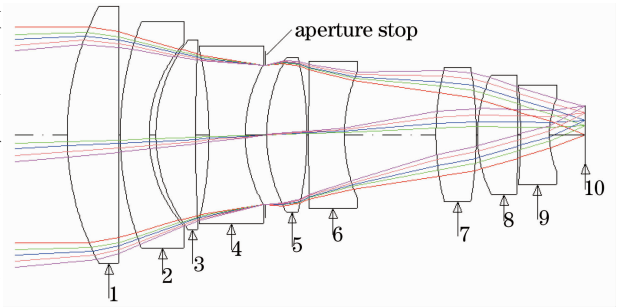


图1 光学设计初始结构

Fig.1 Preliminary structure of optical design

到加工难度,在设计时不使用非球面的二次曲面系数项,而是在球面的基础上高次化,只使用第4、6次项。第4次和第6次非球面系数分别为:第1面 -9.9235×10^{-8} 、 -9.1394×10^{-12} ,第9面 4.3232×10^{-6} 和 -3.9142×10^{-8} 。

对于星敏感器光学系统,需要考虑的成像质量包括点列图、能量集中度、畸变、垂轴色差、探测器星点质心偏移量等。下面的评价中,分别选取5个视场角和5个波长,即 $0.0^\circ, 1.00^\circ, 1.75^\circ, 2.5^\circ, 3.5^\circ$ 视场, $450, 550, 650, 750, 850$ nm 波长。

系统点列图如图3所示,各视场弥散斑均方根(RMS)直径和光斑对应探测器能量中心偏移量如表2所示。由图表可以看出,各视场的弥散斑圆度很好,大小较匀,最大直径为 $17.688 \mu\text{m}$;对于该系统, $1''$ 对应的精度为 $0.4635 \mu\text{m}$,由表2可以看出,探测器星点能量中心偏移量最大为 $0.311 \mu\text{m}$,在所要求的精度范围内,满足要求。

表2 点列图的RMS直径和光斑对应探测器

能量中心偏移量

Table 2 RMS spot diameter and displacement of centroid

Field / ($^\circ$)	RMS spot diameter / μm	Displacement of centroid / μm
0	16.199	0
1.00	16.556	0.253
1.75	17.253	0.311
2.50	17.688	0.199
3.50	15.946	-0.172

图4为系统能量集中度曲线。横坐标是离点列图质心的距离,单位为mm,纵坐标是横坐标数值确定半径内所占能量比例,能量分布接近高斯正态分布,能量集中度的分布情况理想,在直径 $30 \mu\text{m}$ 区域内,上述视场的能量集中度均在85%以上,为制造公差留有较宽的余地。

图5为系统垂轴色差曲线,横坐标为垂轴色差,纵坐标代表视场。表3给出短波-长波及短波-参考波的垂轴色差值。从所得结果看,垂轴色差值最大为 $0.460 \mu\text{m}$,完全满足垂轴色差在 $2 \mu\text{m}$ 以内的要求。

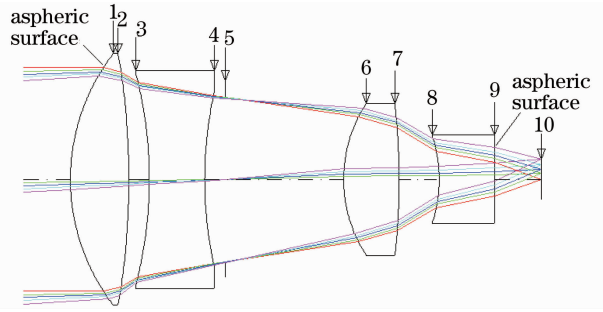


图2 系统光路图

Fig. 2 2D layout of optical system

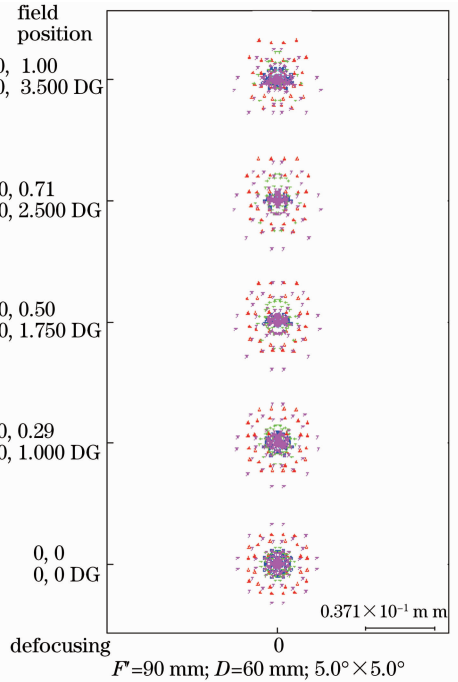


图3 系统点列图

Fig. 3 Spot diagram of optical system

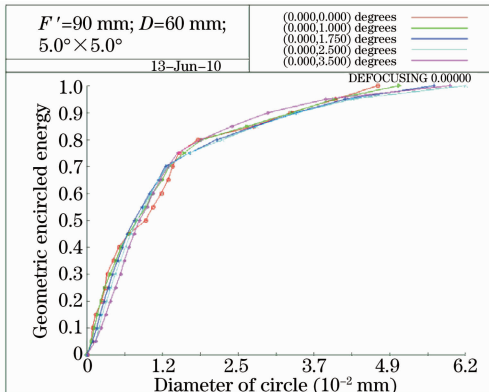


图4 能量集中度曲线

Fig. 4 Geometric encircled energy

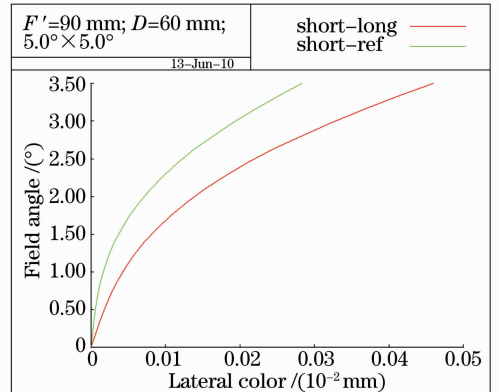


图5 垂轴色差曲线

Fig. 5 Lateral color curve

表 3 垂轴色差值
Table 3 Lateral color value

Field / (°)	Short-long wave / μm	Short-reference wave / μm
0	0	0
1.00	0.045	0.018
1.75	0.107	0.052
2.50	0.211	0.117
3.50	0.460	0.283

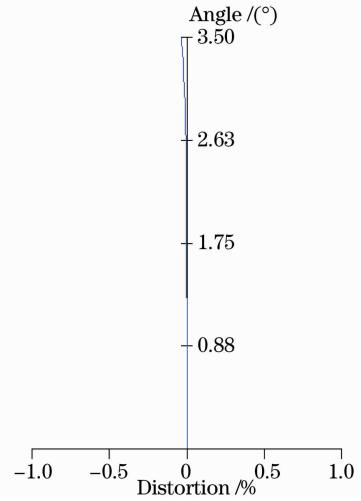


图 6 畸变曲线

Fig. 6 Distortion curve

图 6 为系统畸变曲线,畸变最大为-0.34%,远优于指标值,畸变小有利于提高星敏感器的测控精度。

5 系统消热差和抗离焦性能分析

光学系统的结构参数会随着其所处环境温度的不同而发生变化,从而引起其性能的降低。对于空间用光学仪器,消除光学系统的热差是要着重考虑的问题之一。在环境温度变化和结构变化等外部条件下,焦平面产生漂移形成离焦。离焦会导致星敏感器光斑能量中心偏移量增大,为满足甚高精度星敏感器的精度要求,需要对光斑偏移量进行控制。

进行无热化设计时必须满足光焦度、校正色差和消热差的要求。设计中采用 ZF6 和 LanK11 两种玻璃材料,阿贝数相差较大,利用不同色散值的玻璃组合的形式,更容易校正色差;同时,也满足依据光焦度对相近材料进行选择的要求。机械材料选择钢材,使用简单的结构实现整个系统像面位移的自动温度补偿,提高

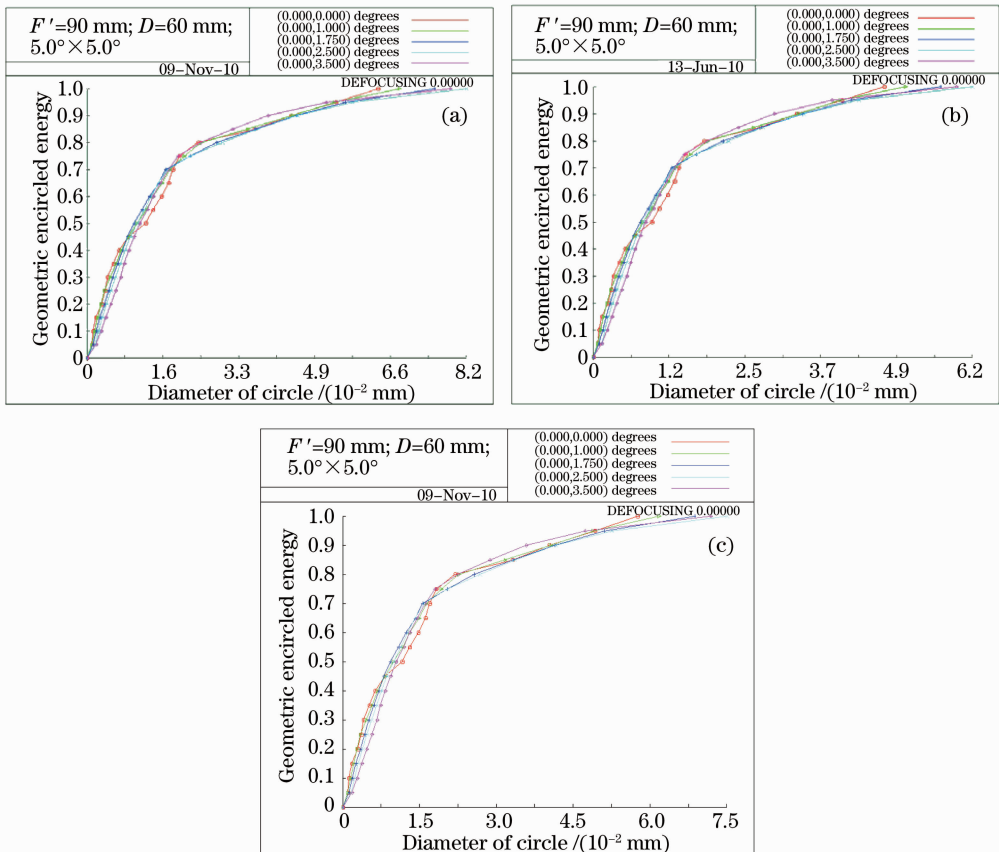


图 7 各温度下径向能量集中度曲线。(a) -10 °C ;(b) 20 °C ;(c) 30 °C

Fig. 7 Energy curves for different temperatures. (a) -10 °C ;(b) 20 °C ;(c) 30 °C

星传感器光学系统消热差、抗离焦的性能。

5.1 系统消热差性能分析

消热以后的光学系统应当在各温度下满足系统对光斑尺寸和能量集中度的要求,图 7 给出系统在一 10 ℃, 20 ℃, 30 ℃ 时径向能量集中度曲线,表 4 给出不同温度、不同视场下,对应于 80% 能量处的光斑直径 D 。

表 4 各温度下不同视场 80% 能量对应的半斑直径集中度 (mm)

Table 4 Energy diameter for different temperatures (mm)

TEM (°C)	(0°, 0°)	(0°, 1.75°)	(0°, 2.45°)	(0°, 2.8°)	(0, 3°.5°)
-10	0.02396	0.02481	0.02806	0.02930	0.02458
20	0.01797	0.01861	0.02104	0.02197	0.01843
30	0.02186	0.02264	0.02560	0.02674	0.02242

分析以上数据,该消热系统在各参考温度下,各视场光斑都比较均匀,可以满足成像均匀性的要求。评价系统无热化程度的另一个重要指标就是在各温度下系统传递函数 f_{MTF} 相对于参考温度的变化情况^[12]。没有消热的星传感器光学系统在温度变化时,其传递函数下降极快,经无热化处理以后,各温度下传递函数应与参考温度基本一致。图 8 给出系统的 f_{MTF} 曲线作为参考。可以看到在各温度下,各视场在 40 lp/mm 处 f_{MTF} 值均高于 0.3,传递函数曲线基本一致。综合分析以上结果,认为该系统在工作温度范围内实现良好消热。

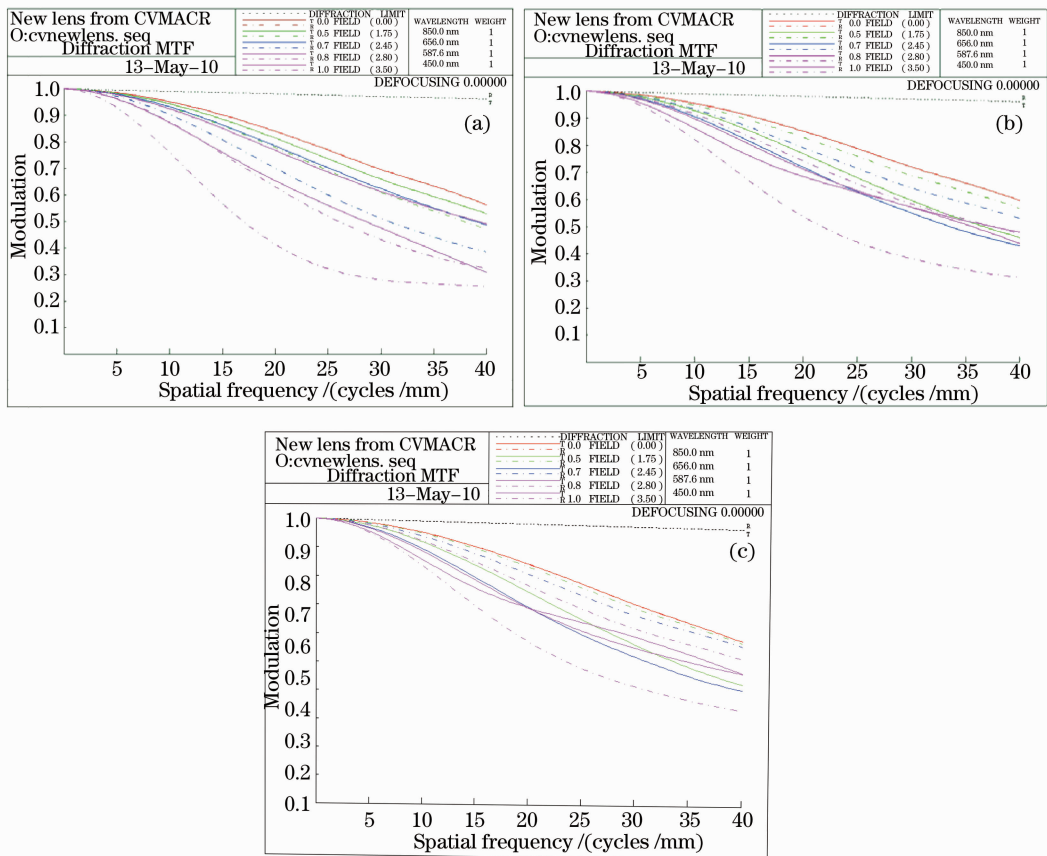


图 8 各温度下系统 f_{MTF} 曲线。(a) -10 ℃; (b) 20 ℃; (c) 30 ℃

Fig. 8 MTF curves for different temperatures. (a) -10 ℃; (b) 20 ℃; (c) 30 ℃

5.2 系统抗离焦性能分析

根据指标要求,抗离焦光学系统设计在焦平面前后离焦 0.05 mm 时应保证星点能量中心位置偏离不超过 $1 \pm 0.5 \mu\text{m}$;且轴向温度梯度为 -10 ℃ ~ 30 ℃ 均匀变化条件下,光学系统热离焦量小于 0.05 mm。

1) 离焦情况下星点质心偏移评价

依据离焦情况下各视场光斑能量中心偏移量表,在前后离焦 0.05 mm 时,各温度、各视场星点能量中心偏移如表 5、表 6 所示。

表5 负向离焦 0.05 mm 时各温度、各视场星点质心偏移量(mm)

Table 5 Centroid offsets for different temperatures and fields under 0.05 mm negative defocus (mm)

	(0°,0°)	(0°,1.75°)	(0°,2.45°)	(0°,2.8°)	(0°,3.5°)
Zoom1 (-10 °C)	0	-0.39585×10^{-3}	-0.33473×10^{-3}	-0.19485×10^{-3}	0.34325×10^{-3}
Zoom2 (20 °C)	0	-0.40152×10^{-3}	-0.32423×10^{-3}	-0.18362×10^{-3}	0.36551×10^{-3}
Zoom3 (30 °C)	0	-0.38672×10^{-3}	-0.31171×10^{-3}	-0.17170×10^{-3}	0.37422×10^{-3}

表6 正向离焦 0.05 mm 时各温度、各视场星点质心偏移量(mm)

Table 6 Centroid offsets for different temperatures and fields under 0.05 mm positive defocus (mm)

	(0°,0°)	(0°,1.75°)	(0°,2.45°)	(0°,2.8°)	(0°,3.5°)
Zoom1 (-10 °C)	0	-0.35478×10^{-3}	-0.19421×10^{-3}	-0.46952×10^{-3}	0.47150×10^{-3}
Zoom2 (20 °C)	0	-0.35817×10^{-3}	-0.18562×10^{-3}	-0.35475×10^{-3}	0.43231×10^{-3}
Zoom3 (30 °C)	0	-0.34565×10^{-3}	-0.17123×10^{-3}	-0.21791×10^{-3}	0.44652×10^{-3}

依据上述数据可知,在离焦 0.05 mm 的情况下,各温度、各视场星点质心偏移量最大值为 0.47 μm ,满足技术要求。

2) 热离焦量评价

给出在各参考温度下系统最后一面到像面距离如表 7 所示。

表7 各温度下最后一面到像面距离

Table 7 Distance from the last surface to the imaging surface for different temperatures

Temperature / °C	-10	20	30
Distance / mm	12.7152	12.7140	12.7141

由上表可以看出,在不同温度下,最后一面到像面距离发生漂移,最大值为 0.0012 mm,小于 0.5 mm,满足系统技术要求。

6 结 论

设计了一种星敏感器光学系统,该系统具有大相对孔径、宽谱段、很小的垂轴色差、高成像质量等优点。系统结构简单,仅用两种玻璃材料,长度约 90 mm,重量约 461.338 g,同时具有良好的消热差和抗离焦性能,适应现代光学系统重量轻、体积小、成像质量高的发展方向。

参 考 文 献

- 1 Yuan Jiahu. A Study on Technology of Navigation Star Sensor[D]. Chengdu: Sichuan University, 1999
袁家虎. 导航星敏感器技术研究[D]. 成都: 四川大学, 1999
- 2 B. R. Van, D. Swanson, P. Boyle *et al.*. Flight performance of the spitzer space telescope AST-301 autonomous star tracker[C]. 28th Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, 2005. 447~466
- 3 N. Clark, P. Forth. Intelligent star tracker[C]. Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2000, **3**: 1430~1433
- 4 C. Ruocchi, D. Accardo, G. Rufino *et al.*. Development and testing of a fully autonomous star tracker[C]. 2nd IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, 1999. 285~288
- 5 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. 星敏感器标定方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1343~1348
- 6 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
杨皓明, 王灵杰, 翁志成等. 大孔径大视场轻小型星敏感器光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 151~154
- 7 Zhang Dengchen, Yu Daoyin. Practical Optical Design Method and Modern Optical System[M]. Beijing: China Machine Press, 1995. 1~3
张登臣, 郁道银. 实用光学设计方法与现代光学系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 1~3
- 8 Yan Peipei, Fan Xuewu, Zou Gangyi *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive apochromatic telephoto lens used in visible spectra[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 092201

- 闫佩佩, 樊学武, 邹刚毅 等. 用于可见光波段的折/衍混合复消色差长焦物镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(9): 092201
- 9 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
- 朱勇建, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(1): 011202
- 10 Wang Xiaopeng, Gao Zhishan, Ma Jun *et al.*. Investigation of measurement uncertainty of aspheric surface based on null-computer-generated holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112003
- 王小鹏, 高志山, 马 骏 等. 非球面测量中零位计算全息测量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112003
- 11 Shi Guanghui. Optical design of Cassagrain system with three aspherical surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2): 238~241
- 史光辉. 含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计[J]. 光学学报, 1998, **18**(2): 238~241
- 12 Liu Jian, Hao Yuncai, Chang Jun *et al.*. Athermalization of star tracker system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, **30**(2): 223~225
- 刘 健, 郝云彩, 常 军 等. 无热化星敏传感器光学系统设计[J]. 北京理工大学学报, 2010, **30**(2): 223~225