

大相对孔径宽光谱星敏传感器光学镜头设计

孟祥月¹, 王 洋^{1*}, 张 磊¹, 付跃刚¹, 顾志远²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 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: 为了提高星敏传感器相对孔径, 拓宽探测光谱范围, 文中通过探测器灵敏度模型的计算, 确定了星敏传感器光学系统的设计参数, 进而设计了一款基于卫星平台的星敏传感器光学镜头。该镜头由 7 片球面透镜组成, 光谱范围为 500~800 nm, 焦距为 50 mm, 相对孔径为 1/1.25, 视场角为 8.45°×8.45°(对角线视场角为 11.96°), 总长 83.33 mm。镜头采用像方远心光路, 减小了因像面离焦及其他因素引起的测量误差。优化后的镜头畸变小于 0.5%, 质心色偏差控制在 ±2 μm 内, 能量集中度(3×3 像元内)大于 80%, 最大倍率色差为 -0.073 μm, 轴外视场的弥散斑能量集中度和轴上视场基本一致。对比不同温度下的光学系统, 焦距变化量很小, 验证了无热化设计要求, 镜头的成像质量良好。

关键词: 光学设计; 星敏传感器; 大相对孔径; 宽光谱; 像方远心; 无热化

中图分类号: O439; V448 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0718005

Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range

Meng Xiangyue¹, Wang Yang^{1*}, Zhang Lei¹, Fu Yuegang¹, Gu Zhiyuan²

(1. School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the relative aperture of the star sensor and broaden the spectral range of the detection, the detector sensitivity calculation model was applied to determine the parameters of the optical lens in a star sensor, then an optical lens based on satellite platform was designed. The lens was composed of 7 spherical lenses, with the spectral region of 500–800 nm, the focal length of 50 mm, the relative aperture of 1/1.25, the field of view (FOV) of 8.45°×8.45°, and the total length was 83.33 mm. This lens used the telecentric structure in the image to reduce measurement errors caused by image defocus and other factors. After the optimization, the lens distortion was less than 0.5%, the center of mass color deviation was controlled within ±2 μm, and the diffraction encircled energy (within 3×3 pixel) was greater than 80%, the maximum magnification chromatic aberration was -0.073 μm, the dispersion spot energy concentration of all the fields of view was almost the same. In different temperature

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 吉林省科学技术厅大型科学仪器共享共用(20150623024TC); 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JKH20181113KJ); 吉林省科技发展计划项目优秀青年人才基金(20190103046JH)

作者简介: 孟祥月(1990-), 女, 硕士生, 主要从事光学设计和光学装调方面的研究。Email: mengxiangyue1314@163.com

导师简介: 王洋(1986-), 女, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学设计和光机结构设计等方面的研究。Email: wangyang11.17@163.com

environments, the small change in focal length of the system verified the athermalization. The optical lens had good image quality.

Key words: optical design; star sensor; large relative aperture; wide spectrum; telecentric in image space; athermalization

0 引言

星敏感器能够通过探测天体中恒星的位置来获取姿态信息,从而实现导航定位,精度能达到角秒量级^[1],所以星敏感器广泛应用于卫星、导弹、飞机、舰船等载体的定位测姿上^[2-3],随着星敏感器应用范围的扩展,其相关参数也亟待改善,如视场角、观测星等、通光孔径等,这就对星敏感器的光学设计提出了更高的要求。

大相对孔径和宽成像光谱范围可以提高星敏感器的探测灵敏度和信噪比,进而有利于缩短曝光时间,降低星像位移,提高质心定位精度。郭彦池等^[4]设计的星敏感器光学系统,焦距 50 mm,相对孔径为 1/1.8,相对孔径较小;王虎等^[5]设计的宽视场大相对孔径星敏感器,采用七组八片式结构,相对孔径为 1/1.1,视场角为 21°×21°,弥散斑最小尺寸为 19.8 μm,垂轴色差大于 2 μm,像质较差;这两种设计均应用了胶合透镜,胶合透镜易受环境影响,不利于航天环境的应用。巩盾等^[6]利用非球面技术设计的星敏感器,具有较大的相对孔径 1/1.165,和较小的视场角 2ω=6.5°,虽然小视场可以提高星敏感器单星测角精度,但是单视场内星点数量也随之减少,所以姿态测量精度也要随着降低^[7];而且此系统应用了非球面技术,不利于加工生产。Mohammad Asadnezhad 等^[8]设计的星敏感器,其焦距为 60 mm,相对孔径为 1/3.4,全视场 2ω=14°,其相对孔径较小、通光孔径较大,系统透光量少,能观测的星等会随之降低,视场角相对于现有的星敏感器设计也较低。

探测灵敏度决定了星敏感器能在一定视场内探测到多少恒星,影响着星敏感器的工作效率和测量精度。刘金国等^[9]通过对有源像元传感器(APS)的噪声模型计算,得出了以航天器作为载体的 APS 星敏感器的信噪比,并用信噪比阈值推导出 APS 星敏感器的探测灵敏度模型;佟帅等^[10]根据船用星敏感器的工作环境,考虑了夜空背景以及大气透射等外部因素的影响,推导出了船用星敏感器探测灵敏度的计算模型。通过探测灵敏度的计算与分析,可以根据用户提出的星敏感器性能要求,确定光学系统的参数。

文中基于卫星平台的星敏感器性能需求,建立了探测器灵敏度模型,分析计算了系统的信噪比,计算得到了符合星敏感器探测需求的光学镜头的相关参数,而设计了一款大相对孔径、宽光谱范围的星敏感器镜头,系统采用像方远心光路,*F* 数为 1.25,视场角可达到 8.45°×8.45°。优化后光学镜头在不同温度下焦距变化量很小,验证了无热化设计要求。设计结果表明系统成像质量良好,满足使用要求。

1 系统参数

1.1 设计要求

为了得到大相对孔径、宽光谱的星敏感器,文中对星敏感器的工作波段、观测的极限星等、视场、角分辨率等主要参数提出的功能需求如表 1 所示。该设计的星敏感器能够观测 7.5 等星,波长范围 500~800 nm,相比于以往的星敏感器光学镜头增加了设计的难度^[4-6,8,11-12]。

表 1 星敏感器功能需求

Tab.1 Star sensor functional requirements

Waveband/nm	Limiting magnitude	FOV	Angular resolution/μrad	Total length/mm	Distortion	Centroid color deviation/μm	Energy encircled concentration
500-800	<i>m</i> =7.5	≥8.4°×8.4°	Better than 150	<100	<0.5%	±2	>80%(in 3×3 pixel)

1.2 参数计算

1.2.1 探测器选择

由设计要求知系统的最小视场为 $8.4^\circ \times 8.4^\circ$, 角分辨率为 $150 \mu\text{rad}$, 得到探测器分辨的最小像元数为:

$$n = FOV/\alpha \quad (1)$$

式中: n 为探测器的像元数; FOV 为光学系统的视场角; α 为角分辨率, 计算得 $n=977$ 。

经过相关调研, 该设计选用安森美公司型号为 KAI-1020 的 CCD (Charge Coupled Device) 电荷耦合器件图像探测器, 其具体参数如表 2 所示。

表 2 CCD 主要参数

Tab.2 Main parameters of CCD

CCD detector pixel number	CCD detector pixel size	Quantum efficiency	Fill factor	Dark noise/ $e^- \cdot \text{rms}$
1 000 pixel \times 1 000 pixel	7.4 $\mu\text{m} \times$ 7.4 μm	33%	99.2%	50

1.2.2 焦距

由光学系统的 CCD 像元大小及角分辨率可计算系统的焦距:

$$f = \frac{b}{\alpha} \quad (2)$$

式中: b 为探测器单个像元大小。

由表 1 和表 2 中数据可求得 $f=49.33 \text{ mm}$, 所以光学系统的焦距取 50 mm 。

1.2.3 视场角

根据所选探测器主要参数以及计算所得焦距, 最后确定星敏感器镜头的视场角为 $8.45^\circ \times 8.45^\circ$ 。在光学设计过程中, 镜头通常用对角线视场来表示, 计算得到对角线视场为 11.96° 。

1.2.4 通光孔径

星敏感器的探测灵敏度是指星敏感器能够探测到的最弱星等的的能力, 探测灵敏度的高低决定了视场内恒星的数量^[13]。星敏感器的探测灵敏度模型通过计算星光信号的信噪比(SNR), 建立与被探测星等的关系, 表示如下^[7]:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S+B+N_{\text{sensor}}^2}} \geq V_{th} \quad (3)$$

式中: S 为目标信号电子数; B 为背景噪声电子数; N_{sensor} 为探测器噪声电子数; V_{th} 为探测阈值。

目标信号电子数 S 计算公式为:

$$S = \frac{\pi}{100} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot T \cdot \Delta B \cdot \phi_m \cdot t \cdot QE \cdot K_{\text{fill}} C \quad (4)$$

式中: D 为系统的有效通光孔径, mm; T 为系统的透过率; ΔB 为光谱波段宽度; ϕ_m 为星等为 m 的恒星在地球大气外的光通量, 且 $\phi_m = 10^{(15-2 \cdot m)/5}$; t 为积分时间; QE 为 CCD 图像探测器的量子效率; K_{fill} 为填充

因子; C 为能量集中度。

由星敏感器的探测灵敏度模型可知, 影响探测灵敏度大小的因素主要包括光学系统的参数(透过率, 光学系统孔径和星点像光斑能量集中程度)、探测器的参数(量子效率、填充因子和噪声水平)、背景辐射、信噪比阈值和积分时间。所以, 当被探测恒星与探测器确定后, 即可计算得到光学系统的通光孔径 D 如下:

$$D \geq \sqrt{\frac{V_{th}^2 (a+b) \pm \sqrt{V_{th}^4 (a+b)^2 + 4 \cdot a^2 \cdot V_{th}^2 \cdot N_{\text{sensor}}^2}}{2 \cdot a^2}} \quad (5)$$

式中: $a = \frac{\pi}{400} \cdot T \cdot \Delta B \cdot \phi_{m=7.5} \cdot t \cdot QE \cdot K_{\text{fill}} \cdot C$; $b = \frac{\pi}{400} \cdot T \cdot \Delta B \cdot \phi_{m=10} \cdot t \cdot QE \cdot K_{\text{fill}} \cdot C$

要想实现最佳检测, 需在一定的条件下获取最大探测率和最小虚警率。文中取 95% 的探测率, 虚警率要求小于 5%, 则 $V_{th}=6^{[14]}$; 系统的透过率 T 文中取 0.7; 系统的能量集中度 C 的大小受质心算法的限制, 一般不超过 0.5, 文中最终取 0.4; CCD 的积分时间取 0.1 s; 背景噪声 B 相当于 10 等星所辐射的能量产生的电子数^[8], 为:

$$B = \frac{\pi}{100} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot T \cdot \Delta B \cdot$$

$$10^{(15-2 \cdot m)/5} \cdot t \cdot QE \cdot K_{\text{fill}} \cdot C = 86.39 \quad (6)$$

探测器噪声的存在影响了接收星点信号的精确程度, 文中忽略了影响小的噪声 n_{DC} 和可通过成像电子学补偿的噪声, 探测器噪声计算仅考虑暗电流噪声 n_{DC} 和读出噪声 $n_{\text{RN}}^{[8]}$ 。

探测器总噪声 N_{sensor} 可由下式计算:

$$N_{\text{sensor}} = \sqrt{n_{\text{DC}}^2 + n_{\text{RN}}^2} \quad (7)$$

此款探测器的读出噪声很小,可忽略。根据表2,计算得 $N_{\text{sensor}}=50 e^-$ 。结合所有相关参数,根据公式(5),计算得到星敏传感器光学镜头的通光孔径 $D=38.69 \text{ mm}$,所以本星敏传感器镜头的通光孔径取 40 mm 。

2 光学系统设计

2.1 初始结构选取

常用的星敏传感器光学系统结构,常用折反射式系统和折射式系统。折反射式系统的结构相对简单且不用校正二级光谱,但是存在中心遮拦,并且反射面加工精度要求较高;折射式系统主要应用于可见光及红外光谱区域,易实现大视场、高像质的要求^[15]。文中光学系统选取折射式系统。

选取 CODE V 镜头专利库中编号为 JAPAN PATENT 45 35743 701114 的专利作为本设计的初始结构,该专利由 8 片透镜组成, F 数为 1.286,半视场角为 4° ,入瞳直径为 77.8 mm ,结构如图 1 所示。

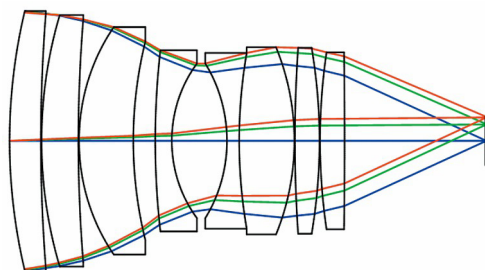


图 1 初始结构

Fig.1 Initial structure

2.2 材料的选择

对于材料的选择,首先考虑色差的校正。该设计选用正负透镜组合的形式,正负透镜材料阿贝数相差较大,易校正色差。

其次由于星敏传感器工作环境的温度变化会引起光学元件及机械组件参数变化,导致光学镜头像面位移,降低成像质量,因此还需考虑对光学镜头进行无热化设计。该设计采用光学被动式补偿的方式,通过匹配光学材料 dn/dt (玻璃材料的折射率 n 随温度 t 的变化值)、膨胀系数及机械材料的膨胀系数,使各因素影响产生的温度焦移相互补偿,减小温度对焦距、像面位置和像质的影响,实现系统的稳定成像^[16]。材料的热膨胀系数对系统焦距的影响较小,而

dn/dt 值影响正负透镜的光焦距,对光学系统的焦距影响较大^[17],因此设计时,需根据材料的 dn/dt 值,合理地选择透镜材料,使光学系统在不同温度下的焦距变化最小,从而确定系统的玻璃材料组合,后期结构设计镜筒采用与玻璃材料膨胀系数匹配的机械材料,可有效实现系统的无热化。

该设计根据无热化设计原理,对优化后的镜头材料进行验证。

2.3 优化

光学系统的具体优化过程如下:

(1) 焦距缩放。

(2) 由于星敏传感器是空间光学系统,所以避免使用胶合透镜,故将初始结构中的胶合透镜拆分。

(3) 镜头采用像方远心光路,以减小因像面离焦及其他因素引起的测量误差。

(4) 设定限制条件(视场角、 F 数、波长范围等),开始优化,优化之后点斑圆度不够,畸变过大。

(5) 替换透镜材料,优化之后结构如图 2 所示,其点列图如图 3 所示。从图 3 可知,当前镜头的点斑

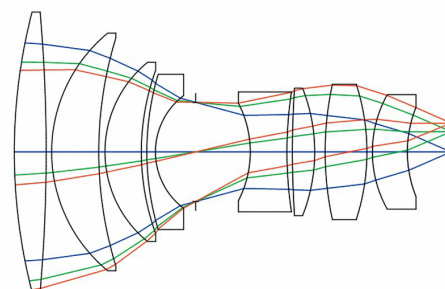
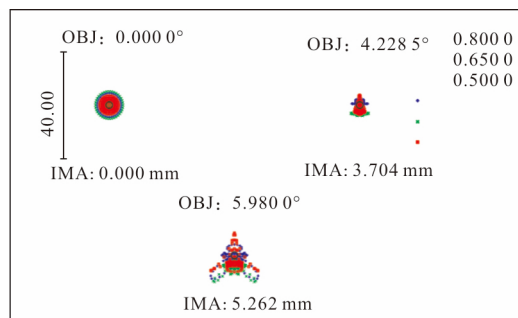


图 2 优化后结构

Fig.2 Structure after optimization



Surface: IMA Units are μm
 Field: 1 2 3
 RMS radius: 2.677 2.335 4.982
 GEO radius: 5.053 4.460 12.287
 Airy diam: 2.451 Reference: chief ray

图 3 优化后点列图

Fig.3 Spot diagram after optimization

尺寸较小、圆度较好,符合设计要求。对于现有的制造装调水平,其公差余量富足,故考虑减少透镜的数量,降低成本。

(6) 减少一片透镜,选用常用玻璃材料以降低成本,并且满足无热化设计要求,优化之后彗差较大,添加操作数调整。

(7) 在系统前加一片熔石英材料的保护玻璃,起到耐辐射的作用;在探测器前加一片 H-K9L 材料的滤光片。

2.4 设计结果

光学系统在 20℃环境温度下设计,优化后的星敏感器结构如图 4 所示,系统由 7 片球面透镜、1 片保护玻璃、1 片滤光片组成,光学系统总长为 83.33 mm。

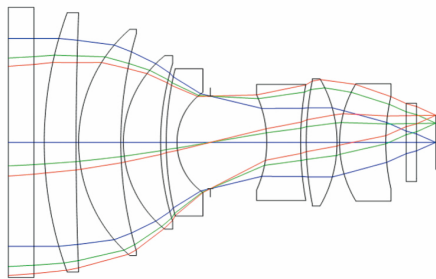


图 4 星敏感器结构

Fig.4 Structure of star sensor

能量集中度曲线反映了星象点能量的扩散情况,为了保证系统成像质量良好,星敏感器的轴外视场的弥散斑能量集中度和轴上视场需保持基本一致。图 5 为光学系统的能量集中度曲线图,可以看出,能量集中度(3×3 pixel)大于 90%。

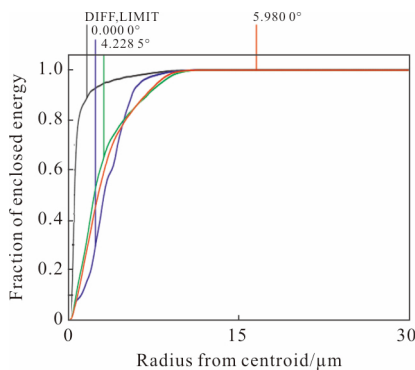
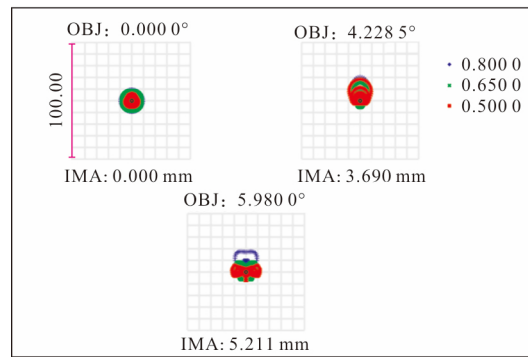


图 5 能量集中度

Fig.5 Diffraction encircled energy

星敏感器的光学系统属于大残余像差系统,星敏感器成像要求各个视场的弥散斑形状近似为圆

形,大小一致;弥散斑的质心色偏差控制在±2 μm 内。图 6 为点列图,反映了星体的成像的状况,点斑尺寸均小于 5.5 μm,满足成像要求,轴上视场和 0.7 视场点斑近似为圆,全视场处 0.8 μm 波长的光有少许偏离,整体圆度较好,成像均匀。为了更好地反映弥散斑圆度,各个视场的点扩散函数如图 7 所示。



Units are μm Airy radius: 1.221 μm
Legend items refer to wavelengths
Field: 1 2 3
RMS radius: 4.663 5.405 5.244
GEO radius: 9.304 20.158 18.457
Scale bar: 100 Reference: centroid

图 6 点列图

Fig.6 Spot diagram

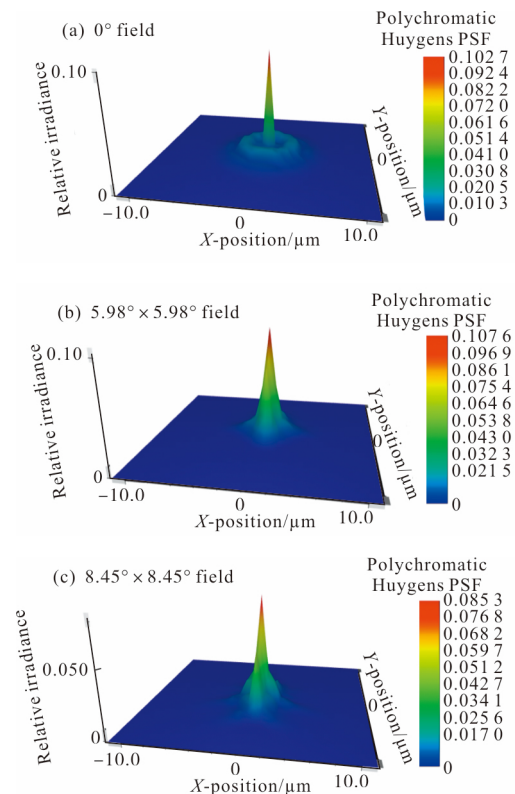


图 7 惠更斯点扩散函数

Fig.7 Huygens PSF

优化后材料如表 3 所示，第一列代表透镜玻璃型号；第二列代表相应玻璃折射率；第三列代表相应玻璃阿贝数；第四列代表相应玻璃热膨胀系数。不同温度下系统的焦距如表 4 所示，可以看出，系统的焦距变化量很小。优化后的系统符合无热化设计要求，材料选择合理。对比不同温度下的光学系统成像效果，结果如图 8、9 所示。在 15°、25°情况下，3×3 像元内系统的能量集中度均在 90% 以上，弥散斑变化很小，无热化效果较好。

表 3 材料表

Tab.3 Material list

Glass	Nd	Vd	$\alpha(10^{-7}/K)$
K6	1.51	60.54	85
H-LAK4L	1.64	60.21	60
ZK12	1.66	54.61	93
H-ZF6	1.75	27.55	87
ZF12	1.76	26.56	75
H-ZLAF69	1.82	46.57	64
H-ZLAF68B	1.88	40.81	68

表 4 不同温度下系统焦距

Tab.4 System focal length at different temperatures

$t/^\circ\text{C}$	f/mm
15	49.997 9
20	50.000 0
25	50.002 2

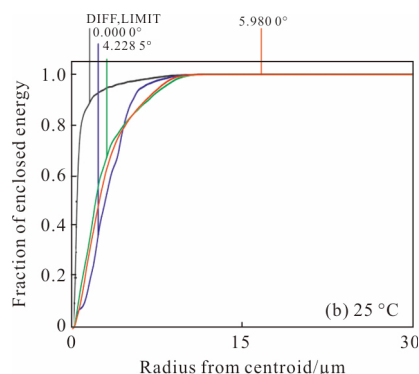
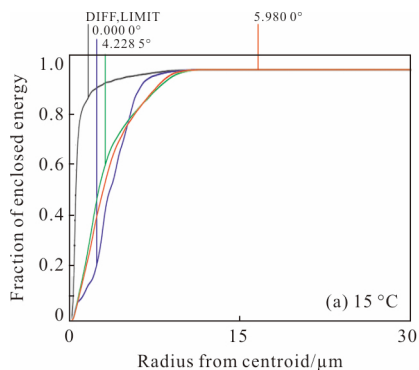
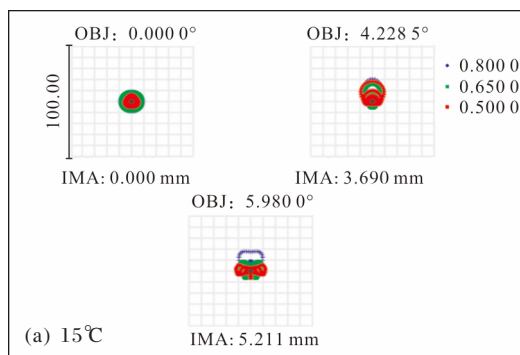
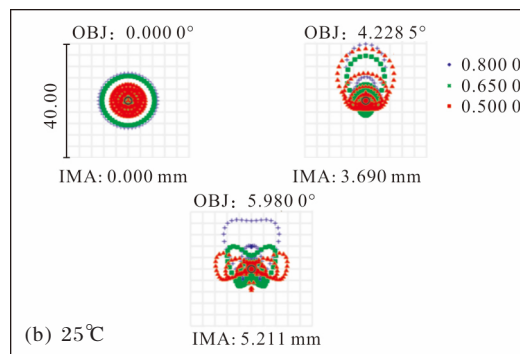


图 8 15 °C 和 25 °C 能量集中度

Fig.8 Diffraction encircled energy at 15 °C and 25 °C



Units are μm Airy radius: 1.221 μm
 Legend items refer to wavelengths
 Field: 1 2 3
 RMS radius: 4.668 5.485 5.323
 GEO radius: 9.097 20.480 18.777
 Scale bar: 100 Reference: centroid



Units are μm Airy radius: 1.221 μm
 Legend items refer to wavelengths
 Field: 1 2 3
 RMS radius: 4.663 5.329 5.171
 GEO radius: 9.510 19.838 18.127
 Scale bar: 40 Reference: centroid

图 9 15 °C 和 25 °C 点列图

Fig.9 Spot diagram at 15 °C and 25 °C

如图 10 所示，为光学系统的场曲和畸变图。畸变要求小于 0.5%，符合要求。

由于非对称性像差引起的像点能量扩散和星点亮度中心位置改变，导致星敏感器光学系统的倍率

色差随波长改变而改变。如图 11 所示,为此系统倍率色差。横坐标为倍率色差值,纵坐标表示视场,全视场范围内最大倍率色差值 $-0.073\ \mu\text{m}$ ^[18]。

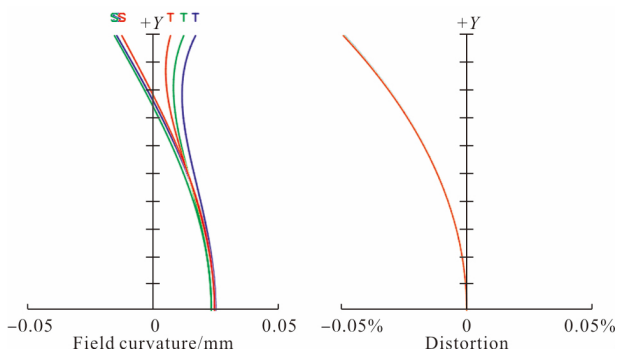


图 10 场曲和畸变

Fig.10 Field curvature and distortion

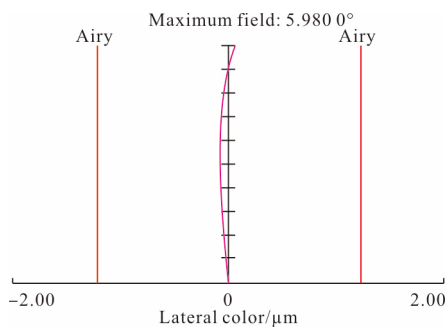


图 11 倍率色差

Fig.11 Lateral color

3 公差分析

加工、装调时的误差会影响实际光学系统的成像,故光学系统在设计成型之后,还需制定合理的公差。利用 Zemax 软件公差分析功能,将系统的点斑大小值作为公差敏感度,得到公差分析结果见表 5。

表 5 公差分析结果

Tab.5 Tolerance analysis

Tolerance	Range
Radius (fringes)	± 2
Thickness/mm	± 0.02
Decenter/mm	± 0.02
Tilt/(°)	± 0.01
Index	0.000 5
Abbe	0.5%

利用蒙特卡罗分析法,通过设定 500 组随机误

差数,结果如表 6 所示。

表 6 蒙特卡洛分析结果

Tab.6 Monte Carlo analysis results

Sampling probability	RMS spot radius/mm
98%	0.009 28
90%	0.007 73
80%	0.007 00
50%	0.005 70
20%	0.004 76
10%	0.004 39

4 结论

文中在现有的星敏感器光学系统设计的基础上,结合星敏感器的功能需求选取探测器,通过探测器灵敏度模型计算出光学镜头设计参数,设计出一款大相对孔径、宽光谱的星敏感器光学镜头。该镜头由 7 片透镜、1 片保护玻璃及 1 片滤光片组成,均采用球面设计,具体参数为光谱范围 500~800 nm,焦距为 50 mm,相对孔径为 1/1.25,视场角为 $8.45^\circ \times 8.45^\circ$ (对角线视场角为 11.96°),总长 83.33 mm,畸变小于 0.5%,质心色偏差小于 $\pm 2\ \mu\text{m}$,最大倍率色差为 $-0.073\ \mu\text{m}$,能量集中度(3×3 像元内)大于 80%。镜头采用像方远心光路,减小了因像面离焦引起的测量误差,提高了质心的定位精度。优化后光学镜头在不同温度下焦距变化量很小,验证了无热化设计要求,结构合理。此款镜头具有实际应用价值,符合当今发展需要。

参考文献:

[1] Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, et al. Development and performance testing of optical system for star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005. (in Chinese)

[2] Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 254-260. (in Chinese)

[3] Zhong Xing, Ji Jiqiang, Jin Guang, et al. Detecting performance and overall design of airborne daytime star sensor for navigation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2900-2906. (in Chinese)

[4] Guo Yanchi, Xu Xiping, Qiao Yang, et al. Optical system

- design of star sensor with wide field of view and wide spectra range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3969–3972. (in Chinese)
- [5] Wang Hu, Miao Xinghua, Wen Desheng, et al. Optical system design of star sensor with wide-view field and small F -number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1822–1824. (in Chinese)
- [6] Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 196–201. (in Chinese)
- [7] 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+230. (in Chinese)
- [8] Mohammad Asadnezhad, Abdollah Eslamimajd, Hassan Hajghassem. Optical system design of star sensor and stray light analysis [J]. *Journal of the European Optical Society–Rapid Publications*, 2018, 14: 9.
- [9] Liu Jinguo, Li Jie, Hao Zhihang. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 553–557. (in Chinese)
- [10] Tong Shuai, Li Hui, Wang Anguo. Calculation and analysis of detection ability for shipboard star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 48–54. (in Chinese)
- [11] Han Long, Fu Qiang, Wang Chao, et al. Design of optical system of star sensor with wide spectrum and larger relative aperture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 012202. (in Chinese)
- [12] He Lingna, Cui Weixin, Pei Yuntian. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS [J]. *Opo–Electronic Engineering*, 2007 (11): 24–30. (in Chinese)
- [13] Li Xiao, Zhao Hong, Lu Xin. Study on detection sensitivity of star sensor in dynamic state [J]. *Aerispace Control and Application*, 2010, 36(1): 37–41. (in Chinese)
- [14] Radio Company(USA). Electrooptics Manual[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978. (in Chinese)
- [15] Zhao Yang. Dissertation for the master degree in engineering [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [16] 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, 230. (in Chinese)
- [17] Sun Xiaoling. Research design athermalisation of TV seeker zoom optical system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 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)