

引用格式: LI Jian-lin, LEI Guang-zhi, BAI Yang, *et al.* Optical Path Design for Catadioptric Star Sensor with Large Aperture [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0611002

李建林,雷广智,白杨,等. 大口径折反式星敏传感器光学系统的光路设计[J].光子学报,2020,49(6):0611002

大口径折反式星敏传感器光学系统的光路设计

李建林^{1,2},雷广智¹,白杨²,文延¹,林上民¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学技术研究室, 西安 710119)

(2 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

摘要:为提高星敏传感器探测极限星等的能力,采用改进型卡塞格林系统、光阑校正球面透镜组和视场校正球面透镜组相结合的结构,设计了一种光谱范围为 450~950 nm、半视场为 1.4°、入瞳直径为 250 mm、焦距为 425 mm,且能够矫正像散、场曲和畸变的大口径折反式星敏传感器光学系统.基于像差理论的系统初始结构参数计算和 Zemax 软件光线追迹的优化设计,光学系统的次镜遮拦比为 0.43,成像点 80% 的能量集中在 30 μm 内,最大畸变为 0.081%,光学传递函数在奈奎斯特频率 34 lp/mm 处大于 0.75,最大倍率色差为 1.138 μm ,满足星敏传感器对成像的要求.对光学系统进行公差分析,在 20 次蒙特卡罗分析结果中,第 13 个结构的绩效函数最好,为 4.975 16 μm ,第 20 个结构的绩效函数最差,达到 7.799 57 μm .通过对 20 次蒙特卡罗结构的绩效函数分析,所选定的公差值能够很好地满足光学系统性能基本要求,为加工和安装过程中的误差提供依据.

关键词:星敏传感器;光学设计;大口径;折反式;Zemax

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204906.0611002

Optical Path Design for Catadioptric Star Sensor with Large Aperture

LI Jian-lin^{1,2}, LEI Guang-zhi¹, BAI Yang², WEN Yan¹, LIN Shang-min¹

(1 *Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China*)

(2 *Institute of Photonics and Photo-Technology, Northwest University, Xi'an, 710069, China*)

Abstract: In order to improve the ability of the star sensor to detect limited magnitude, a combination of the improved Cassegrain system, aperture-corrected spherical lens group and field-of-view corrected spherical lens group is adopted to design an optical system of a large aperture catadioptric star sensor capable of correcting astigmatism, field curvature and distortion, with the spectral range of 450 ~ 950 nm, the semifield of 1.4°, an entrance pupil diameter of 250 mm and the focal length of 425 mm. According to the calculation of the initial structure parameters of the system based on the aberration theory and the optimization design of Ray tracing in Zemax software, the blocking ratio of the secondary mirror of the optical system reaches 0.43, the energy concentration of the imaging point is 80% within 30 μm , and the maximum distortion is 0.081%. The modulation transfer function is greater than 0.75 at a Nyquist frequency of 34 lp/mm, and the maximum magnification chromatic aberration is 1.138 μm , which meets the imaging requirements of star sensor pairs. Through the tolerance analysis of optical system, in the 20 Monte Carlo analysis results, the best structure is the 13th structure with the performance function of 4.975 16 μm , the worst structure is the 20th structure with the performance

基金项目:陕西省教育厅服务地方专项计划项目(No. 19JC040),国家自然科学基金(No. 11803075)

第一作者:李建林(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计和杂散光分析. Email: 1241219619@qq.com

导师:白杨(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为激光技术及光学设计. Email: by@nwu.edu.cn

通讯作者:雷广智(1982-),男,高级工程师,主要研究方向为光学系统设计和杂散光分析. Email: 13022861093@163.com

收稿日期:2020-01-09;录用日期:2020-03-27

<http://www.photon.ac.cn>

function of $7.799\ 57\ \mu\text{m}$. Through the performance function analysis of 20 times Monte Carlo structure, the selected tolerance value can well meet the basic requirements of optical system performance, and provide the basis for the errors in the process of processing and installation.

Key words: Star sensor; Optical design; Large aperture; Catadioptric; Zemax

OCIS Codes: 110.2970; 110.1220; 120.4570

0 引言

星敏传感器是空间飞行器中广泛使用的一种高精密度空间姿态测量仪器,通过探测空间不同位置的恒星来获取空间飞行器的姿态信息^[1-3].光学系统是星敏传感器的核心部件,其成像质量直接影响着星敏传感器的探测能力^[4].为了提高星敏传感器的探测能力,要求其光学系统在具有更宽的谱段范围、更大的入瞳直径的基础上能够尽量减小畸变和色差.目前星敏传感器所使用的光学系统有透射式结构、反射式结构、折反式结构等.透射式光学系统是最常见的结构形式,但是存在光学系统口径小、较多的光学透镜数量导致二级光谱难以校正、整体质量大幅增加的缺点^[5-6].反射式光学系统具有系统口径大、光学透镜数量少、无色差的优点,但是其结构中光遮拦会造成空间光的能量利用率低、边缘视场的像差校正能力较弱、结构设计难度大等问题^[7, 8].折反系统采用反射镜和透镜相结合的方式,反射镜不会引起色差,透镜组能够对整个系统的像差进行校正并增大整个光学系统的视场.在整个折反光学系统中,像面的位移不会受到反射镜的影响,当反射镜和支架选择的材料膨胀系数相近时,可以降低整个系统对环境温度的敏感度^[9-11].2004年,苏州大学提出了一种Schwarzschild系统与非球面补偿透镜相结合的折反式星敏传感器光学系统^[12, 13],其主镜采用的小口径和凸非球面设计造成系统的入瞳直径过小;2016年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出了一种卡塞格林型的等晕系统(Ritchey-Chretien system, R-C system)和光阑校正球面透镜组相结合的折反式星敏传感器光学系统,其入瞳直径和半视场分别达到164 mm和 0.9° ^[14].

根据入瞳直径更大(250 mm)、半视场更宽(1.4°)、光谱宽度450~950 nm、焦距425 mm的星敏传感器光学系统的实际应用需求,本文提出了一种新的折反式星敏传感器光学系统,该系统采用改进型卡塞格林系统(R-C系统)、光阑校正球面透镜组和视场校正球面透镜组相结合的结构.其中R-C系统的主镜和次镜的通光面均为双曲面,可有效校正球差和彗差.在次镜前加入的光阑校正球面透镜组可校正系统残余的像散、场曲和畸变,在次镜与像面之间加入的视场校正球面透镜组进一步增大整个光学系统的视场.根据像差理论计算并确定了光学系统的初始结构参数,利用Zemax光学设计软件进行了光学系统的结构优化设计,并对设计结果进行分析与评价.

1 应用指标及光学系统主要技术参数设定

星敏传感器要求其光学系统在450~950 nm光谱范围内对恒星实施探测,并采用像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的CCD探测器对所探测的恒星进行成像,极限探测星等为15等星.成像的最终目的是在全视场范围内得到恒星在CCD探测器上具有一定光斑直径分布的像点弥散斑,并且像点弥散斑的能量分布均匀且接近

表1 星敏传感器光学设计指标

Parameter	Value
Focal length	425 mm
Entrance diameter	250 mm
Half field of view(diagonal)	1.4°
Spectral range	450~950 nm
Primary wavelength	600 nm
Pixel size of CCD detector	$15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$
Displacement of centroid	$<0.43\ \mu\text{m}$
Relative distortion	$<0.1\%$
Lateral color	$<2\ \mu\text{m}$
Modulation transfer function	$\geq 0.5@34\ \text{lp/mm}$
Spotradius encircled 80% energy	$<15\ \mu\text{m}$

高斯分布,以便计算其质心^[15, 16].星敏传感器光学系统与一般成像物镜的使用目的有较大差别,其结构设计应满足较小的像面弥散斑、较高的能量集中度和较大的传递函数值的设计需求^[17, 18],因此在光学系统结构设计前需要确定其技术参数,如焦距、入瞳直径、视场角、光谱范围、中心波长等,主要是由 CCD 的特性参数、需要探测的星等、在视场内出现的恒星数目、恒星的光谱分布规律以及后续算法对像质的要求决定^[19, 20].在 CCD 探测器和后续算法已经选定情况下,光学系统的入瞳直径越大,探测视场就越宽,进入 CCD 探测器的能量也越多,从而探测极限星等的能力越强.根据星敏传感器的结构设计要求,确定光学系统的最大入瞳直径为 250 mm,星敏传感器光学设计指标如表 1 所示.

2 光学系统的光路设计

根据表 1 列出的技术参数,考虑到在 450~950 nm 较宽的光谱范围内形成的像差会严重制约星敏传感器的测量精度^[21, 22],提出了一种新的 R-C 系统和球面透镜组相结合的折反式星敏传感器光学系统结构设计.R-C 系统的主镜和次镜的通光面均为双曲面,可有效校正初级球差和慧差.星敏传感器光学系统的半视场需要达到 1.4°.为此,在次镜前加入光阑校正球面透镜组可校正系统残余的像散、场曲和畸变.同时,在次镜与像面之间加入的视场校正球面透镜组用以增大整个光学系统的视场,从而提高光学系统的探测精度和星敏传感器的成像质量.

对于 R-C 系统,根据初级像差理论和共轴两反射镜面型系数计算公式得^[14, 23]

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta}R_1 \quad (1)$$

式中, $R_1=250$ mm 为主镜的顶点半径, R_2 为次镜的顶点半径, $\alpha=R_2/R_1$ 为次镜的遮拦比,反映了次镜的大小和位置, β 为次镜的放大倍数,反映次镜的放大率以及物像位置关系.

球差 S_1 为

$$S_1 = \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4}e_2^2 \right] - \frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2) \quad (2)$$

式中, e_1^2 、 e_2^2 分别表示主镜、次镜的面型参数,与主镜、次镜的加工公差有关.

慧差 S_2 为

$$S_2 = \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta}e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} \right] - \frac{1}{2} \quad (3)$$

像散 S_3 为

$$S_3 = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^2}e_2^2 \right] - \frac{(1-\alpha)(\beta+1)(\beta-1)}{\alpha\beta} - \frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha} \quad (4)$$

畸变 S_4 为

$$S_4 = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha} \quad (5)$$

场曲 S_5 为

$$S_5 = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^3 \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^3}e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^3} \right] - \frac{3(1-\alpha)^2(1-\beta)(1+\beta)}{2\alpha^2\beta^2} - \frac{2(1-\alpha)(1+\beta)}{\alpha^2\beta} \quad (6)$$

当 $S_1=S_2=0$,可得

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2} \quad (7)$$

$$e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1-\alpha} + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \quad (8)$$

根据 250 mm 的光学系统入瞳直径并考虑到次镜座和次镜支撑杆的遮拦,次镜的顶点半径最大值为 107.5 mm,因此,次镜的遮拦比 α 不超过 0.43.将 α 的最大值代入式(7)和(8)中,得到系统的二次曲面系数 e_1^2 、 e_2^2 随 β 的变化曲线,如图 1 所示. e_1^2 随 β 值的变化不大,说明 β 值的大小对主镜的加工公差影响不明显.而 e_2^2 明显随 β 值的增大而增大,说明 β 值的大小对次镜的加工公差影响较大.由于 e_2^2 值越小,次镜的加工

公差要求就越严格,因此,在综合考虑公差要求、设计难度和设计经验的基础上,取 $\beta = -5$,然后将 α 、 β 代入到式(7)和(8)中,求解得到 $e_1^2 = 1.0604$, $e_2^2 = 2.5241$,确定 R-C 光学系统主镜和次镜的面型,主镜与次镜之间的初始间距设 $l = 140$ mm,则确定 R-C 系统初始结构如图 2(a)所示.

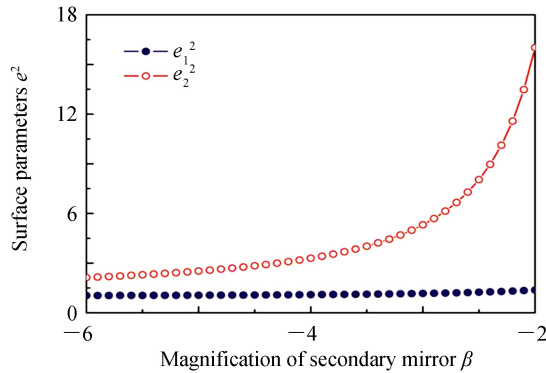


图 1 e_1^2 和 e_2^2 随 β 的变化曲线

Fig.1 Curves of e_1^2 and e_2^2 versus β

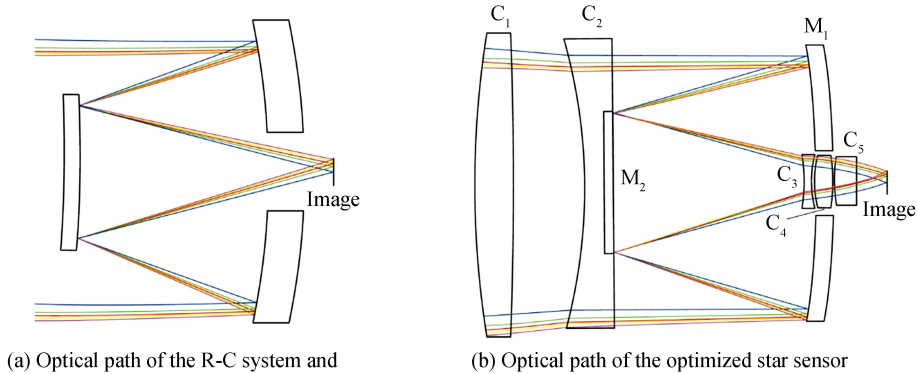


图 2 光学系统光路的优化设计

Fig.2 Optimal design of optical path of optical system

由于所设计的星敏传感器光学系统口径较大,初始光学系统在优化过程中可设置的有限可变参数造成畸变等像差不能够得到完全的校正,从而达不到成像质量的要求.因此,考虑在 R-C 系统的次镜 M_2 前加入一对正负球面透镜(C_1 、 C_2)作为光阑校正球面透镜组来矫正光学系统的像散、场曲和畸变,在 R-C 系统的次镜 M_2 与像面之间加入一组同轴球面透镜(C_3 、 C_4 、 C_5)作为视场校正球面透镜组来扩大光学系统的视场,同时利用正负透镜相结合的方法来减小 $C_1 \sim C_5$ 各球面补偿透镜所引入的色差.像面前未加入 CCD 探测器的盖板玻璃,主要原因是盖板玻璃对于光学系统的影响主要体现在 CCD 探测器焦面的大小和盖板玻璃的厚度,当焦面较大、盖板玻璃较厚时通常要考虑其对象质的影响,而焦面较小且盖板玻璃较薄时,通常不会考虑盖板玻璃对于光学系统的影响.本文选择的 CCD 探测器的盖板玻璃较薄,约 1 mm,它对能量系统的影响主要是对离焦的影响,而对像质的影响很小,所以没有考虑盖板玻璃对于光学系统像质的影响.设计的星敏传感器光学系统的光路如图 2(b)所示.将初始结构参数,如主镜的顶点半径 $R_1 = 250$ mm、次镜的顶点半径 $R_2 = 107.5$ mm、主镜面型参数 $e_1^2 = 1.0604$ 、次镜面型参数 $e_2^2 = 2.5241$ 和主、次镜初始间距 $l = 140$ mm 置入光学设计软件 Zemax,通过 Zemax 软件的操作数对光学系统结构进行优化设计,最终达到成像质量的要求.其中 Zemax 软件根据入瞳直径 250 mm 的设定确定各个透镜及反射镜的直径 d ,采用 EFL 操作数控制光学系统整体焦距达到 425 mm,采用 TTHI 操作数控制 $C_1 \sim C_5$ 五个球面镜和 M_1 、 M_2 两个反射镜的通光面曲率半径 r_{ij} 、厚度 T 以及相邻两个球面镜的间隔 L ;采用操作数 AXCL 控制光学系统整体的倍率色差.主镜 M_1 为空心反射镜,空心直径与 C_3 、 C_4 、 C_5 的直径一致.次镜 M_2 为实心反射镜,镶嵌在 C_2 右侧的光线出射面上, M_2 的通光面曲率半径均与 C_2 的光线出射面曲率半径一致,镶嵌深度与 M_2 的厚度一致.优化设计后的星敏传感器光学系统各透镜参数如表 2 所示,所设计的系统总长为 339 mm,质量为 1.45 kg.表 3 给出了国内外不同型号的星敏传感器的指标^[24],能够看出,相较于国内外大多数星敏传感器,本文设计的星敏传感器在探测星等和质量等技术指标上都有一定的提高.

表 2 光学系统各透镜参数
Table 2 Optical lens parameters

Lens	Radius of curvature r_{ij}/mm	Lens thickness T/mm	Diameter d/mm	Air thickness L/mm	Glass
C ₁	791.965	37.000	285.3	65.0	SILICA
	-4 921.341				
C ₂	-659.988	28.000	269.3	189.0	SILICA
	-10 500				
M ₁	-849.753	15.875	257.2	-189.0	Mirror
	-849.753				
M ₂	-10 500	8.750	132.9	178.0	Mirror
	-10 500				
C ₃	-146.253	7.000	49.5	1.9	H-LAF2
	107.419				
C ₄	107.982	17.500	48.4	0.6	H-LAK10
	-132.483				
C ₅	138.007	22.000	45.3	28.0	H-LAK10
	722.838				

表 3 国内外星敏器性能指标与本文设计指标对比

Table 3 Comparison between the performance indexes of star sensors at home and abroad and the proposed design indexes

Country	Index	Detectable stellar magnitude/Mv	Quality/kg
Germany	ASTRO5	6	1.5
U.S.A	HD 1003S	6	3.2
U.K.	altair-HB	7.5	1.8
China	Beijing observatory	6.5	4
China	This system	15	1.45

3 光学系统像质评价

星敏器光学系统的成像质量评价标准包括点列图、畸变曲线、能量集中度曲线、倍率色差曲线等。在 450~950 nm 光谱范围内, 0.0° 中心视场、0.7° 视场、1° 视场、1.2° 视场、1.4° 视场的点列图如图 3 所示, 各视场

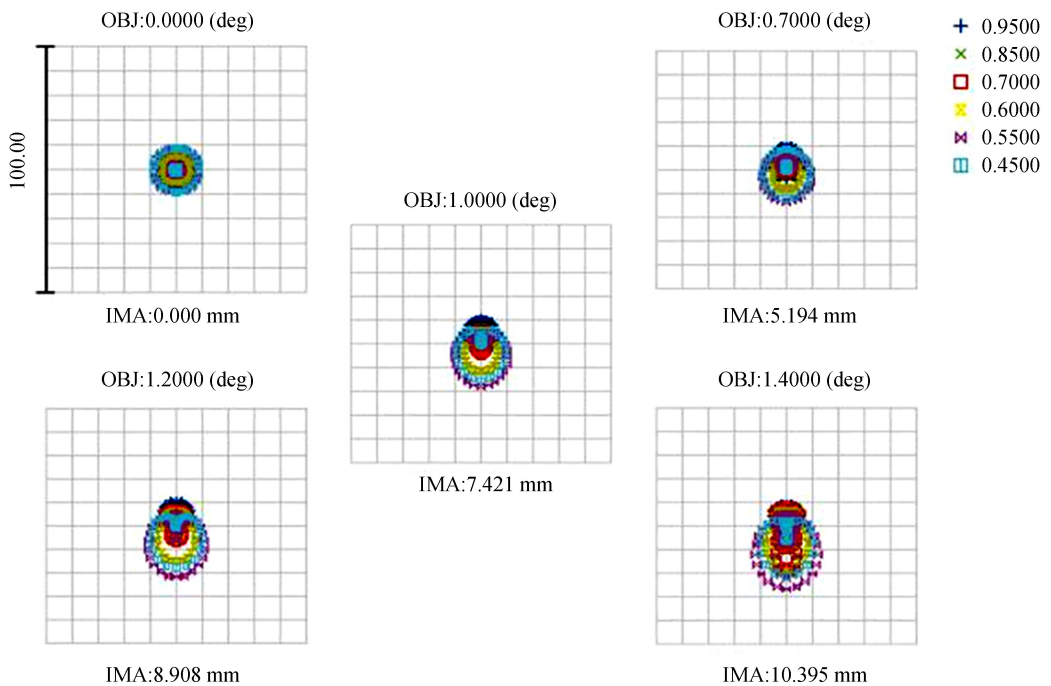


图 3 光学系统点列图
Fig.3 Spot diagram of optical system

表 4 不同视场下弥散斑直径大小及能量中心偏移量

Table 4 Diameter and energy center deviation of the diffuse spot in different field of view

Field/(°)	Spot diameter / μm	Displacement of centroid / μm
0.0	8.054	0.000
0.7	9.964	0.039
1.0	11.75	0.027
1.2	13.258	0.009
1.4	15.03	0.001

的弥散斑圆度很好,弥散斑大小比较均匀.各视场弥散圆的直径大小和能量中心偏移量如表 4 所示,弥散斑的直径随着视场角的增加而增大,0.0°中心视场的弥散斑直径始终小于其它各视场的弥散斑直径.1.4°视场的弥散斑直径最大,达到 15.03 μm .0.7°视场和 1°视场的能量中心偏移量最大,分别为 0.039 μm 和 0.027 μm ,完全满足能量中心偏移量小于 0.43 μm 的指标.

星敏感器光学系统的相对畸变曲线如图 4 所示,相对畸变越小,越有利于提高星敏感器的测量精度.通过优化设计,从-1.4°至+1.4°的全视场范围内的最大相对畸变为 0.081%,完全满足相对畸变小于 0.1%的设计指标.图 5 表示星敏感器光学系统的倍率色差曲线,图 5(a)代表各视场短波和长波之间的倍率色差曲线,图 5(b)代表不同波长与中心波长之间的倍率色差曲线,表 5 分别给出了短波-长波、短波-中心波长和长

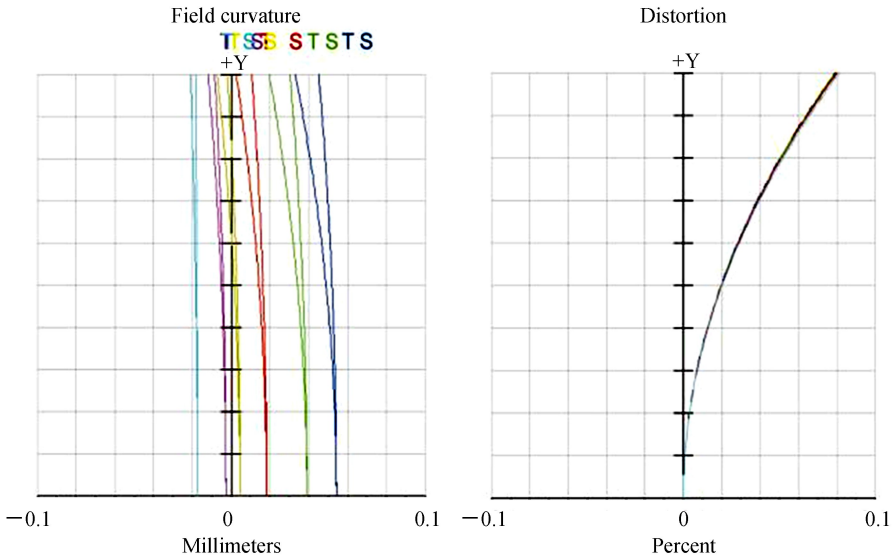


图 4 相对畸变曲线
Fig.4 Relative distortion curves

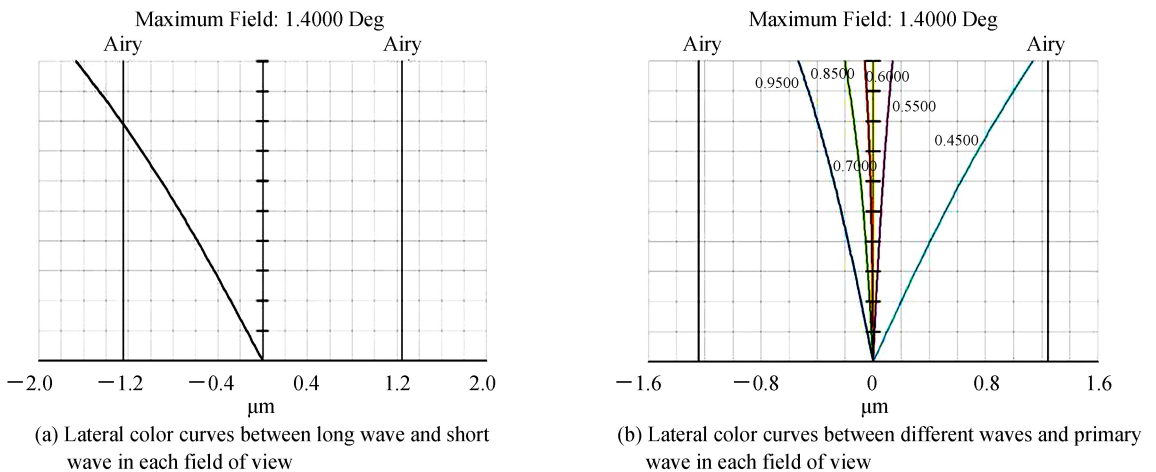


图 5 星敏感器光学系统的倍率色差曲线
Fig.5 The lateral aberration curve of the optical system of star sensor

表 5 倍率色差值
Table 5 Lateral color value

Field / (°)	Short-long wave/ μm	Short-primary wave/ μm	Long-primary wave/ μm
0	0	0	0
0.7	-0.741	0.514	-0.228
1	-1.1	0.756	-0.342
1.2	-1.38	0.946	-0.435
1.4	-1.67	1.138	-0.532

波-中心波长的倍率色差值.从结果可以看出,最大倍率色差为 $1.138 \mu\text{m}$,完全满足倍率色差小于 $2 \mu\text{m}$ 的设计指标.图 6 为光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,在奈奎斯特频率 34 lp/mm 处的 MTF 大于 0.75,满足 MTF 大于 0.5 的设计指标.图 7 为能量集中度曲线,从图中能够看出,能量分布更为均匀,能量集中度的分布情况理想,能量集中度在 80% 以上的弥散斑直径均在 $15 \mu\text{m}$ 以内,同时弥散斑直径在 $30 \mu\text{m}$ 以内的能量集中度均超过 95%,因此较小的弥散斑直径能够精准地补偿加工公差.

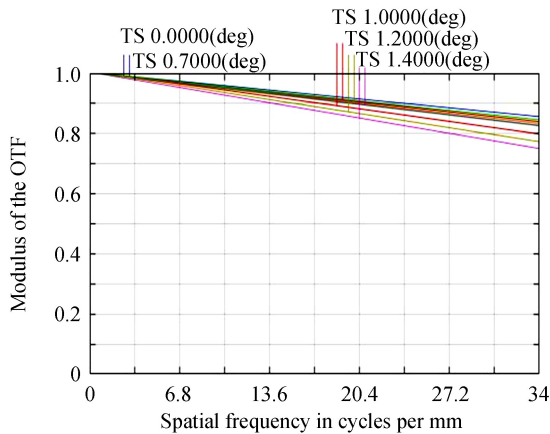


图 6 星敏感器光学传递函数曲线
Fig.6 MTF curves of the star sensor

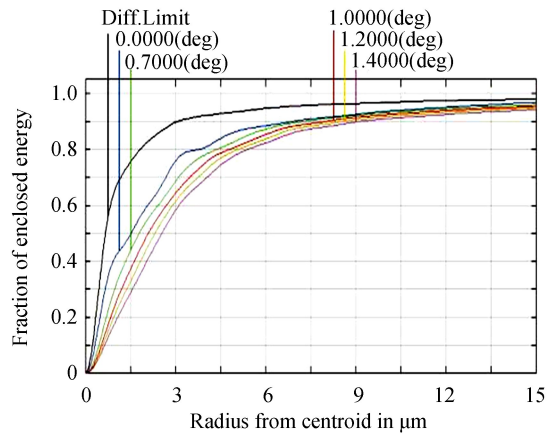


图 7 能量集中度曲线
Fig.7 Curves of the encircled energy

4 光学系统公差分析

星敏感器光学系统是一种高成像质量的光学系统,在设计阶段,不仅要进行光学系统像质评价,还要对光学镜头加工和装调过程中影响成像的误差进行分析,即公差分析.对每个光学系统镜头进行合理的公差分配,最终达到实际成像质量的指标要求,不合理的公差分配将会影响星敏感器的加工、装调的难度,并延长研制周期.

根据光学元件加工标准,给出了公差设置数据如图 8 所示,设置公差后,公差数据编辑器包括 107 项,在 ZEMAX 公差分析中,模式选择“Sensitivity”,蒙特卡罗分析值设置为 20,其他则选择默认状态,根据公差灵敏度分析,微小的均方根 (Root-Mean-Square, RMS) 光斑半径为 $4.683\ 97 \mu\text{m}$,估计该变量为 $3.130\ 62 \mu\text{m}$,估算的 RMS 光斑半径为 $7.814\ 60 \mu\text{m}$,整个光斑保持在 2×2 个像素的范围内,且光斑变化不大,公差设置基本合理.

通常情况下,经过加工装调后的光学系统成像弥散斑半径小于指标值的蒙特卡罗概率应控制在 50% 以上.从表 6 展示的所设计星敏感器光学系统的 20 次蒙特卡罗统计分析结果可以看出,当蒙特卡罗概率为 50% 时,其弥散斑半径小于 $6.310\ 13 \mu\text{m}$;当蒙特卡罗概率为 90% 时,其弥散斑半径小于 $7.509\ 63 \mu\text{m}$,完全满足光学系统弥散斑半径小于 $15 \mu\text{m}$ 的指标要求,为加工和安装过程中的误差提供依据.通过公差分析,按照所设定的公差要求进行光学元件的加工和装调,从而能够减小加工、装调过程中各种误差对光学系统像质的影响.

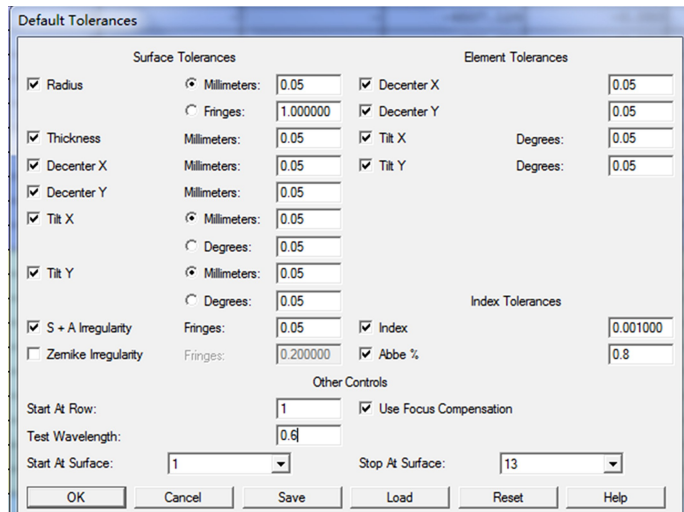


图 8 光学镜头公差设置
Fig.8 Optical lens tolerance setting

表 6 20 次蒙特卡罗统计分析结果
Table 6 20 Monte Carlo statistical analysis results

Parameter	Value				
Percentage of Monte Carlo/%	90	80	50	20	10
Structural number	18	16	10	4	2
RMS spot radius/ μm	7.509 63	7.303 33	6.310 13	5.389 58	5.136 95

5 结论

本文基于 R-C 系统、光阑校正球面透镜组和视场校正球面透镜组相结合的结构,设计了一种入瞳直径为 250 mm、半视场为 1.4° 、光谱范围为 450~950 nm、焦距为 425 mm 且能够矫正像散、色差和畸变的大口径折反式星敏感器光学系统.该光学系统的次镜遮拦为 0.43,80% 的能量集中在 $30 \mu\text{m}$ 内,最大畸变为 0.081%,光学传递函数 MTF 在奈奎斯特频率 33.3 lp/mm 处大于 0.75,最大倍率色差为 $1.138 \mu\text{m}$.最终设计结果表明,整个光学系统的像质良好,各视场弥散斑均匀,圆度良好,弥散斑的大小控制在指标要求范围内,满足星敏感器对恒星探测的成像指标要求.通过公差分析可知,选定的公差值能够很好地满足光学系统性能基本要求,20 次蒙特卡罗结构的绩效函数中,绩效函数小于等于 $7.509 63 \mu\text{m}$ 的结构有 90%,绩效函数小于等于 $7.303 33 \mu\text{m}$ 的结构有 80%,绩效函数小于等于 $6.310 13 \mu\text{m}$ 的结构有 50%,绩效函数小于等于 $5.389 58 \mu\text{m}$ 的结构有 20%,绩效函数小于等于 $5.136 95 \mu\text{m}$ 的结构有 10%,通过改变背焦对公差进行补偿,背焦改变范围为 $-0.32 \sim 0.17 \text{ mm}$.

参考文献

- [1] SECROUN A, LAMPTON M, LEVI M. A high-accuracy, small field of view star guider with application to SNAP[J]. *Experimental Astronomy*, 2001, **12**(2): 69-85.
- [2] ZHANG S, XING F, SUN T, *et al.* Novel approach to improve the attitude update rate of a star tracker[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(5): 5164-5181.
- [3] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers-a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 587-599.
- [4] HE Ling-na, CUI Wei-xin, PEI Yun-tian. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 24-30.
何灵娜,崔维鑫,裴云天.基于 CMOS APS 的星敏感器光学系统结构与优化[J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 24-30.
- [5] GONG Dun, TIAN Tie-yin, 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.
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.
- [6] YANG Hao-ming, WANG Ling-jie, WENG Zhi-cheng, *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.大口径大视场轻小型星敏传感器光学系统[J].光学精密工程,2007,15(2):151-154.
- [7] TAN L Y, YU J J, MA J, *et al.* Approach to improve beam quality of inter-satellite optical communication system based on diffractive optical elements[J]. *Optics Express*, 2009, 17(8):6311-6319.
- [8] WEI L, ZHANG, L, GONG X, *et al.* Design and optimization for main support structure of a large-area off-axis three-mirror space camera[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1094-1100.
- [9] HUI Bin, LI Jing-zhen, PEI Yun-tian, *et al.* Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7): 1117-1120.
- 惠彬,李景镇,裴云天,等.大口径折反式光学系统的光机结合分析[J].光子学报,2006,35(7):1117-1120.
- [10] TAJIMA K, NAKAMURA Y, YAMAGUCHI K, *et al.* Optimization design for improving resolution of lensless imaging with Fresnel zone aperture[J]. *Optical Review*, 2019, 3(4): 1-5.
- [11] ZHAO Yu-shi, FU Yue-gang, OU-YANG ming-zhao, *et al.* Optical analysis of a star sensor optical system design and miscellaneous[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 5(39): 30-34.
- 赵雨时,付跃刚,欧阳名钊,等.一种星敏传感器光机系统结构与杂光分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2016,5(39):30-34.
- [12] WU Feng, SHEN Wei-min. Design of catadioptric system for star sensors with wide field of view [J]. *Optical Technology*, 2004, 30(2): 142-145.
- 吴峰,沈为民.折反式大视场星敏传感器光学系统设计[J].光学技术,2004,30(2):142-145.
- [13] WU Feng. Design of catadioptric system for star sensors with wide field of view[D]. Suzhou: Soochow University, 2004.
- 吴峰.折反式大视场星敏传感器光学系统的设计[D].苏州:苏州大学,2004.
- [14] XUE Qing-sheng. Optical design and stray light analysis for large aperture catadioptric star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 179-185
- 薛庆生.折反式大口径星敏传感器光学设计及杂散光分析[J].光学学报,2016,36(2):179-185.
- [15] LUO L Y, XU L P, ZHANG H. Improved centroid extraction algorithm for autonomous star sensor[J]. *IET Image Processing*, 2015, 9(10): 901-907.
- [16] MING Ming, YANG Fei, ZHAO Jin-yu, *et al.* Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 149-154.
- 明名,杨飞,赵金宇,等.折反式大口径、大视场、宽光谱光学系统[J].红外与激光工程,2012,41(1):149-154.
- [17] GUO Yan-chi. XU Xi-ping, 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.
- 郭彦池,徐熙平,乔杨,等.大视场宽谱段星敏传感器光学系统设计[J].红外与激光工程,2014,43(12):3969-3972.
- [18] ZHU Yang, ZHANG Xin, WU Yan-xiong. Optical system design and ghost analysis for ultraviolet star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 127-132.
- 朱杨,张新,伍雁雄.紫外星敏传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.
- [19] WANG Hai-yong, FEI Zheng-hong, WANG Xin-long. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1672-1677.
- 王海涌,费峥红,王新龙.基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J].光学精密工程,2009,17(7):1672-1677.
- [20] MENG Xiang-yue, WANG Yang, ZHANG Lei, *et al.* Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 190-197.
- 孟祥月,王洋,张磊,等.大相对孔径宽光谱星敏传感器光学镜头设计[J].红外与激光工程,2019,48(7):190-197.
- [21] FAN Qiao-yun, LI Xiao-juan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 254-260.
- 樊巧云,李小娟.全天时星敏传感器光学系统设计参数选择[J].光学学报,2011,31(11):254-260.
- [22] ZHAO J J, ZHAO Q W, LI Z H, *et al.* An improved weighted centroid localization algorithm based on difference of estimated distances for wireless sensor networks[J]. *Telecommunication System*, 2013, 53(1): 25-31.
- [23] HAO Pei-ming, KONG Xiang-lei. Research of beam expander with a two-mirror system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(2): 179-183.
- 郝沛明,孔祥蕾.两镜系统扩束器的研究[J].量子电子学报,2001,18(2):179-183.
- [24] ZHENG Wan-bo. Fully autonomous layered star identification algorithm research based-on star sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics of CAS, 2003.
- 郑万波.基于星敏传感器的全天自主分层星识别算法研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2003.