

折反射式大入瞳星敏感器光学系统设计

吕 博^{1,2} 刘伟奇¹ 张大亮¹ 姜 珊^{1,2} 康玉思¹ 冯 睿¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高可探测极限星等能力,观测到更多较暗较远恒星作为深空探测飞船导航定姿的参考星,设计了采用改进的卡塞格林结构与三片球面补偿镜组相结合的折反射式星敏感器光学系统。其中,改进的卡塞格林结构有利于轴外消球差及彗差,同时生成系统焦距及大尺寸入瞳;靠近像面的补偿镜组校正反射结构的残余像差,同时补偿镜组像方远心的设计保证了系统全视场照度的均匀性,也降低了系统离焦对像面安装的敏感性。本系统焦距 180 mm,像方 F 数 2,全视场 2ω 为 $3^\circ \times 3^\circ$,有效入瞳面积 5106 mm^2 ,在 $450 \sim 800 \text{ nm}$ 的宽光谱范围内质心偏差优于 $2.5 \mu\text{m}$ 、垂轴色差小于 $3.5 \mu\text{m}$,80% 弥散斑能量集中在 $3 \times 3 \text{ pixel}$ 内,传递函数接近衍射极限。采用主次反射镜遮光罩及两级外镜筒遮光设计,并在 Lighttools 软件中对光机系统杂散光模拟分析,设计结果表明在 $2^\circ \sim 40^\circ$ 杂光源成像视场范围内,点源透过率在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 量级,该系统设计方案及结果可为用于深空任务的星敏感器系统的参考依据。

关键词 光学设计; 折反射; 星敏感器; 遮光罩; 杂光分析

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0716002

Optical System Design of Large Entrance Pupil Catadioptric Star Sensor

Lü Bo^{1,2} Liu Weiqi¹ Zhang Daliang¹ Jiang Shan^{1,2} Kang Yusi¹ Feng Rui¹

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,*
Changchun, Jilin 130033, China
²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract To develop the detection ability of ultimate stars, and use more dark stars as referenced stars of deep space aircraft navigation, a catadioptric star sensor with a proved Cassegrain configuration with three pieces of emending lens optical system is designed. In this system, the proved Cassegrain configuration is used to reduce the spherical aberration and coma out of optical axis and bring the focus and large size of entrance pupil at the same time; emending lens close to the image plane is mainly eliminating the remaining aberrations of catoptric configuration, the telecentric image plane design among the emending configuration is also benefit to the irradiance unification in full of field and decrease the sensitivity of image sensor setting. This system has a 180 mm focal length and F -number is 2, view of field is $3^\circ \times 3^\circ$, the effective pupil area is 5106 mm^2 , energy centroid aberration is smaller than $2.5 \mu\text{m}$, lateral color is better than $3.5 \mu\text{m}$ among $450 \sim 800 \text{ nm}$ spectrum, over 80% energy of spot in less than $3 \times 3 \text{ pixel}$, and modulation transfer function (MTF) is approaching to diffraction limit. The inner baffles of reflected lens and outer two-group baffles are introduced, through modeling and analyzing the stray light of system in the Lighttools, the designed result shows that in the range of 2° to 40° incident angle of stray light, the point resource transmittance is between 10^{-6} to 10^{-4} . These results can provide a good reference for further star sensors with deep space catadioptric configuration star sensor.

Key words optical design; catadioptric; star sensor; baffle; stray light analysis

OCIS codes 010.0280; 080.3620; 100.2960; 220.3630

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2014-01-18

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701)

作者简介: 吕 博(1986—),男,博士研究生,主要从事精密光学系统设计方面的研究。E-mail: jllvbo@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光显示技术、图像显示技术以及空间目标成像与瞄准技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

1 引言

作为空间飞行器在轨飞行姿态测量的重要仪器^[1-4],星敏感器的测姿精度能达到角秒量级,长时间工作性能稳定,已经成功应用于导弹、船只和飞机等军事及民用场合。其中,光学系统作为星敏感器的关键部分,对恒星成像的质量将影响星敏感器整机的测量精度。

当星敏感器的参考恒星发光弱、距离远时,光学系统需要具有大孔径、高透过率和低杂光系数等特点,以此来发现视场内更多的暗星作为飞船定姿的参考星。传统的星敏感器设计多为全折射式透镜系统,采用复杂的双高斯物镜作为初始结构^[5-6],但随着视场及入瞳直径的增大,为了校正系统像差尤其是轴外视场畸变及像散,所用透镜的片数也随之增多,不仅会造成系统体积重量的增大,后期在公差分配中也会由于镜片数量的增多而难以处理、各项公差过于严格。最近几年出现了采用纯反射结构的星敏感器^[7],但采用三非球面设计的结构存在两次系统遮拦,系统能量利用率受到了限制。此外由于系统中设计自由度较少,边缘视场的畸变、彗差、初级像散校正能力有限,造成全视场下的弥散圆呈扁椭圆状、能量集中度不高,这对后期软件处理能量质心位置造成严重影响。折反射式星敏感器是进近年来新兴的结构^[8-9],目前较多的是采用逆卡塞格林结构作为系统主镜,辅以靠近像面的校正镜组,但由于此结构的主镜位于次镜后方(靠近像面),尺寸较小,造成了系统入瞳直径过小,与纯透射式结构20~40 mm的入瞳直径相比没有明显优势。同时边缘视场的能量质心偏差过大(超过0.1 mm),系统相对畸变过大(接近2%)。此外系统靠近像面的校正镜组中含有六次非球面,又增加了加工和检测的难度。

为解决上述系统设计所存在的问题,本文设计了一种新型折反式星敏感器光学系统。利用两双曲反射镜作为改进的卡塞格林结构^[10]主镜,使得系统初级球差和彗差为零,残余较大的轴外视场像散、场曲及畸变由靠近像面的三片式校正透镜组加以校正。采用全局优化设计使系统具有像方远心性,能有效降低由于太空环境温度变化大、地面安装误差等造成像面离焦对能量质心位置计算的影响,并提高全视场像面照度的统一性和弥散圆能力集中度。并为该折反射星敏感器设计了主次反射镜遮光罩、两级外镜筒和挡光环,较好地抑制了非成像光线对像面对比层次感和信噪比的影响。

2 折反式星敏感器光学系统设计

2.1 光学参数与技术指标

星敏感器对无穷远恒星成像,像面探测器能接收并识别作为参考星的恒星像。除了与成像恒星星等、积分时间和图像探测器参数等有关外,星敏感器自身的光学参数也很大程度上决定着探测器的可探测恒星的数目与成像性能^[11-12]。其中,在图像探测器一定时,星敏感器光学系统的入瞳面积越大、光学传递函数(MTF)越高、系统透过率越高,可探测的恒星星等就越高。此外,星敏感器光学系统高质量的成像指标如畸变、倍率色差、离焦后光学特性、温度适应性也将影响后续电学部分弥散斑能量质心计算精度与系统空间工作可靠性。考虑现有国内光学元件加工检测、机械装调能力,结合星敏感器使用要求与光学特性,对星敏感器光学系统提出具体参数与技术指标要求如表1所示。

表1 星敏感器光学系统参数与设计指标

Table 1 Parameters and performance index of star sensor optical system

Parameter and performance index	Value
Focal length /mm	180
Entrance pupil diameter/mm	90
Field of view /($^{\circ}$)	3×3
Wavelength range /nm	450~800
Absolute distortion / μm	≤ 2.5
Lateral color / μm	≤ 3.5
Defocus range/mm	-0.05~0.05
Spot encircled energy	More than 80% of the energy is concentrated in the area of less than 30 μm and less than 40 μm in defocus status
MTF	≥ 0.7 @ 18 lp/mm (focal plane) ≥ 0.3 @ 18 lp/mm (defocus plane)
Vignetting and cemented doublet	No
Environment temperature / $^{\circ}\text{C}$	-44~55
Point source transmittance /%	< 0.1

2.2 折反射结构设计及优化

星敏感器对于成像弥散斑形状虽然没有明确定义,但彗差小、像散小、基本呈圆对称的弥散斑更有利于后期图像处理计算弥散斑能量质心位置。当卡

塞格林结构主反射镜为凹双曲面时,初级球差和彗差同时为零,在较大视场内可以对目标得到基本呈点状的弥散斑图,对于星体位置的定位和计算都十分有利。

根据初级像差理论及共轴两反射镜面型系数计算公式,当初级球差及彗差为零时,主次反射镜二次曲面系数为

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

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

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta}R_1. \quad (3)$$

选择次镜遮拦比 α 为 0.444,副镜放大倍率 β 为 -3 代入(1)、(2)式中,得到主次反射镜面型二次曲面系数 e_1^2 、 e_2^2 分别为 1.177、5.349。主反射镜顶点半径 R_1 初始设定为 -200 mm,由高斯光学公式导出(3)式得到次反射镜顶点半径 R_2 为 -133 mm,主次反射镜中心间隔设定为 80 mm,以此作为初始双反射结构,如图 1 所示。

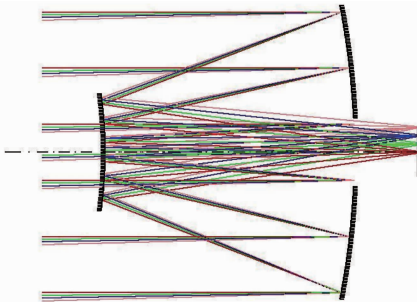


图 1 改进的卡塞格林反射镜初始结构

Fig.1 Initial structure of improved Cassegrain reflected mirror

由于此改进后的卡塞格林双反射结构球差及彗差较小、初级像散适中、场曲较大,需要在靠近像面处设置一组透镜作为校正组。因反射结构为正光焦度系统,校正组中应含有产生负光焦度的透镜来平像场。折射元件的加入导致倍率色差产生,校正透镜组中也应该含有正光焦度元件,其产生的负彗差还可用来平衡负光焦度元件带来的彗差,避免由弥散圆导致严重的弧矢失对称而使能量质心计算精度降低的问题。校正元件拟采用 3~5 片球面透镜结构,如果透镜元件数量较少,除倍率色差外,系统的大视场畸变将很难校正。如果透镜数量增多,系统透过率将会有影响,相应的加工装调误差也将会使光学成像质量降低。经设计实践,最终选用三片式库克镜头作为校正镜的初始结构。在与反射系统一

同优化的过程中应控制主光线的位置、垂轴像差等值,力求在保证畸变满足设计要求的前提下,使各视场弥散圆能量集中度高,弥散斑近似呈圆形。图 2 所示为折反系统光学元件剖面图。

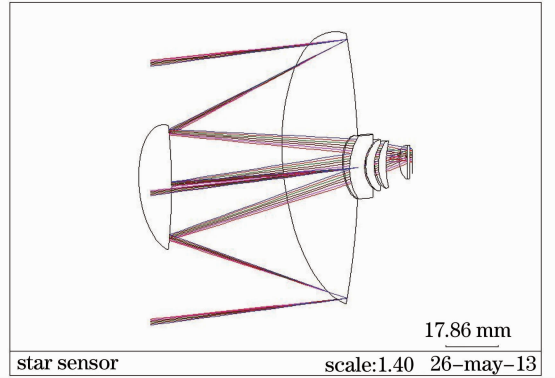


图 2 光学系统剖面图

Fig.2 Section of optical system

2.3 像质评价

经优化设计后的折反射式星敏感器光学系统为像方远心结构,通过主镜及次镜遮拦比可以计算出系统有效入瞳面积为 5107.7 mm^2 ,是常用 40 mm 入瞳直径的纯透射型星敏感器光学系统有效入瞳面积的 4.06 倍,极大提高了观察视场内暗星的能力。系统场曲及畸变如图 3 所示,点列图如图 4 所示。80% 的弥散斑能量集中在 3×3 pixel 内,全视场下 80% 弥散圆能量集中在 $21 \sim 27 \mu\text{m}$ 之间。像面离焦 $50 \mu\text{m}$ 时,全视场下 80% 弥散圆能量集中在 $34 \sim 40 \mu\text{m}$ 之间,说明离焦后系统弥散圆仍保持了较高的能量集中度,其弥散圆能量分布如图 5 所示。

本星敏感器设计波段内的三个波长处的弥散圆能量质心位置统计如表 2 所示。

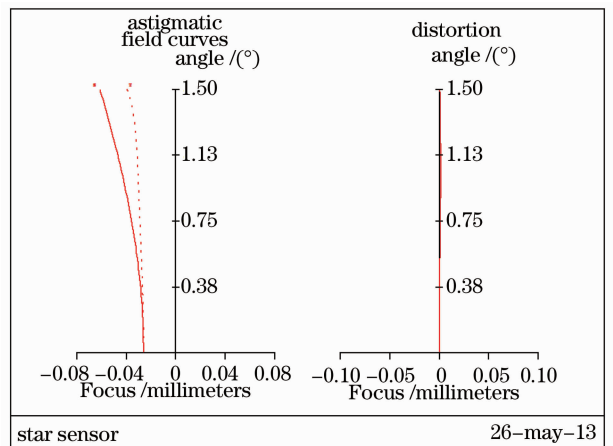


图 3 光学系统场曲及畸变

Fig.3 Field curvature and distortion of optical system

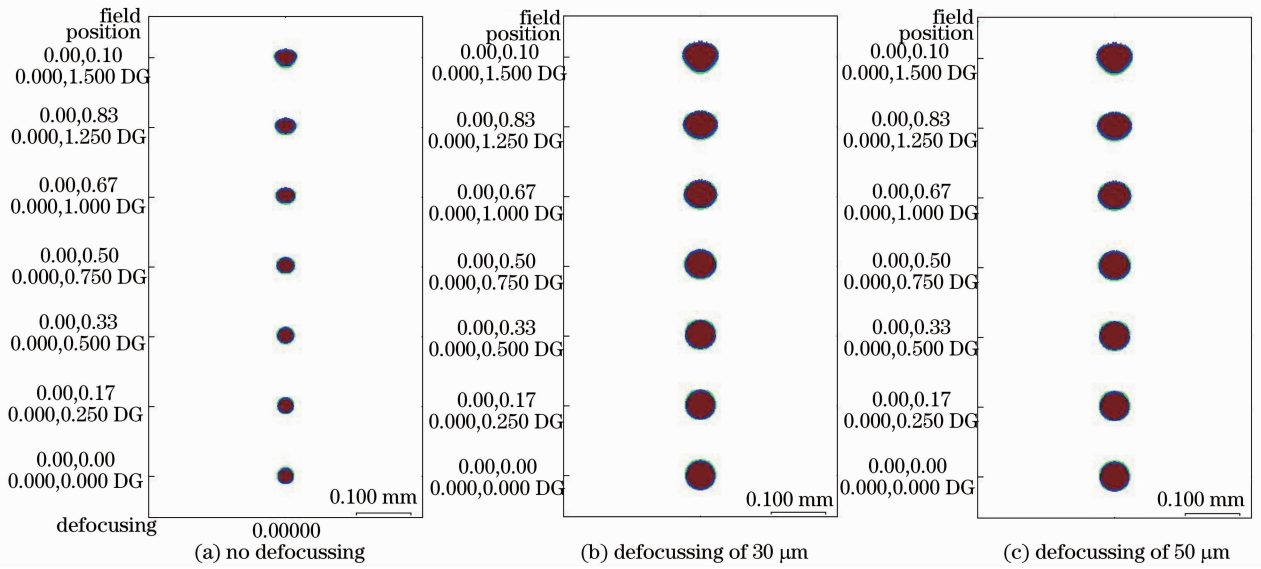


图 4 全视场点列图

Fig. 4 Spot diagram for full field of view

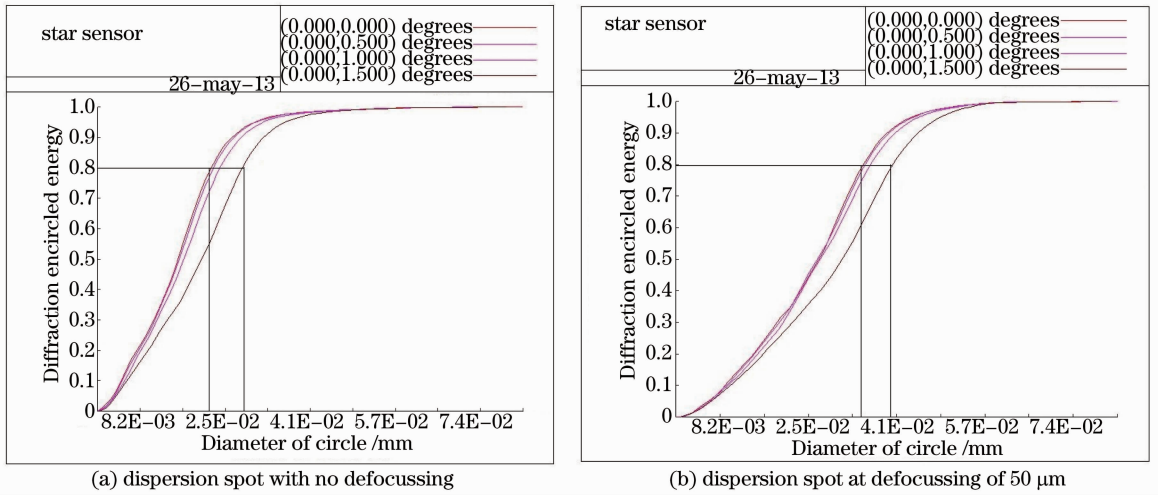


图 5 能量集中度曲线

Fig. 5 Curves of concentration energy

表 2 光学系统能量质心位置与偏差

Table 2 Optical system of energy centroid and aberration

Field	Theoretic value /mm	$\lambda=450 \text{ nm}$		$\lambda=600 \text{ nm}$		$\lambda=800 \text{ nm}$	
		Design value /mm	$\Delta / \mu\text{m}$	Design value /mm	$\Delta / \mu\text{m}$	Design value /mm	$\Delta / \mu\text{m}$
0°	0	0	0	0	0	0	0
0.25°	0.7854	0.7856	0.2	0.7852	-0.2	0.7857	0.3
0.5°	1.5708	1.5713	0.5	1.5706	-0.2	1.5715	0.7
0.75°	2.3563	2.3573	1.0	2.3561	-0.2	2.3575	1.2
1°	3.1419	3.1435	1.6	3.1418	-0.1	3.1436	1.7
1.25°	3.9276	3.9296	2.0	3.9272	-0.4	3.9294	1.8
1.5°	4.7135	4.7141	0.6	4.7111	-2.4	4.7137	0.2

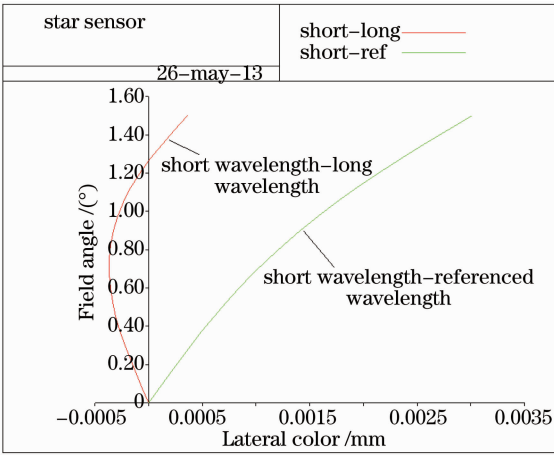


图6 光学系统倍率色差

Fig. 6 Lateral color of optical system

在 450~800 nm 工作波段内,光学系统全视场(系统旋转对称只取正角度入射)的最大能量质心偏差出现在 600 nm、最大视场处为 2.4 μm,垂轴色差小于 3 μm,系统倍率色差如图 6 所示,长短波长能量质心偏差小于 0.4 μm,光学系统设计指向精度优于 3''。

图 7(a)所示为系统焦平面处 MTF 曲线,各视场下 MTF 均大于 0.8,轴上及小视场 MTF 接近衍射极限,图 7(b)~(d)所示为像面离焦 10、20、50 μm 时,全视场在 18 lp/mm 下,子午及弧矢方向的系统 MTF 均在 0.3 以上,满足设计要求。此外,主次反射镜均为 SiC 材料,透镜材料均为普通商用玻璃,系统光学成像部分总重约 85.46 g,有效控制了系统重量及加工成本。

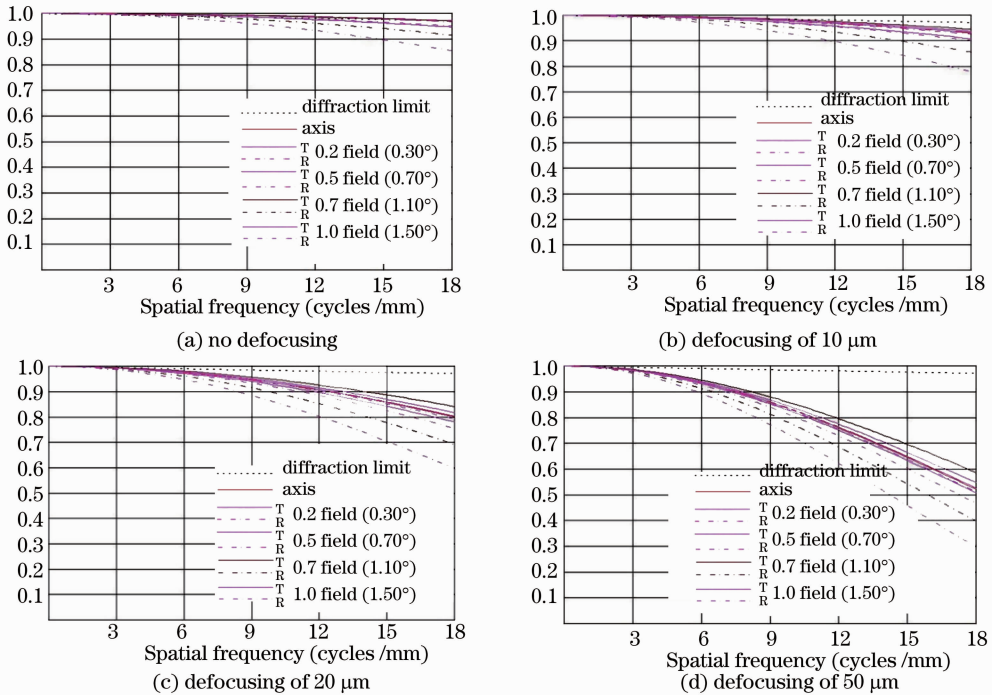


图7 系统各位置全视场下 18 lp/mm 传递函数

Fig. 7 MTF at 18 lp/mm for all fields of view at different positions

综上所述,本折反射式星敏感器在全视场内绝对畸变、色偏差均小于指标要求值,光轴指向精度优于 3'',在名义后工作距下的 MTF 接近衍射极限,同时系统像面发生离焦时的 MTF 也满足设计指标值,符合高精度星敏感器传递函数的指标要求,并为后期系统装调留有了余量。

3 杂散光抑制与分析

3.1 遮光罩设计

杂散光广泛存在于每一种光学系统中,虽然较

难完全消除,但可以采用多种方法将其抑制衰减,减小对成像质量的影响。星敏感器应用在复杂的太空环境中,系统光学成像视场外非成像光(如太阳光、月球反射光、地气光、系统内部杂散光)经成像光学系统内部反射或散射进入接收面,会造成图像探测器成像对比度、清晰度、光学传递函数、系统信噪比降低等问题,严重时系统电学部分可能将入射到图像探测器上的杂散光像错误判读为恒星像,或图像探测器曝光过饱和等问题。

经过外镜筒内壁等光机结构表面一次反射或直

接入射到图像探测器上的视场外非成像光是首先要考虑并加以避免的。为降低外镜筒过长造成系统重量及体积过大,在主、次反射镜处外置锥形遮光罩,如图 8 所示。根据遮拦限制设定次镜锥形遮光罩外边缘直径,外边缘一点设为 B, B 与次镜的连线相对于光轴的角度等于最大入射角的边缘光经过主镜反射入射到次镜的角度。以 B 为起始,沿最大视场 -1.5° 的光线两入射次反射镜路径与次反射镜相交连线作为次反射镜遮光罩外缘(如图 8 所示)。令入射光线 2 经主次反射镜反射与最大视场 $+1.5^\circ$ 入射经主镜反射的光线 3 的交点 A 设为主反射镜的锥形遮光罩最外边缘。以 A 为起点,沿光线 3 经主镜

反射后路径与主镜相交连线做遮光罩边缘。由于外镜筒内壁表面有一定的反射率,杂散光经外镜筒内壁反射入射到折射元件表面或元件镜座表面,经多次反射也会对像面造成影响,在外镜筒内表面设置挡光环,如图 9 所示。在主反射镜有效边缘外设置外镜筒,外镜筒最边缘点设为 D,外镜筒半径与主反射镜半径之差为挡光环带宽度,在外镜筒壁上设一点为 E, EB 连线与 BD 夹角为视场角,连接 C 与挡光环和 BE 交点到外镜筒,依次确定 G、H、I 挡光环位置。此外为了降低经镜筒外壁、遮光罩内壁反射后入射到透镜表面的视场外杂光,在挡光环 I 后仍然设置挡光环,同时满足视场的入射特性。

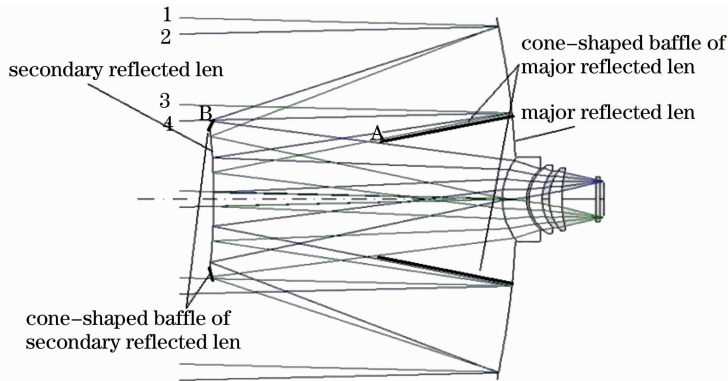


图 8 反射镜遮光罩设置示意图

Fig. 8 Sketch map of baffle of reflected lens

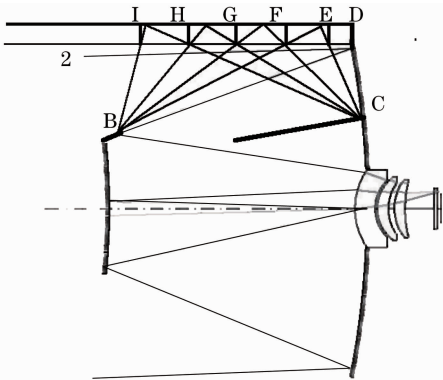


图 9 挡光环设置示意图

Fig. 9 Setup of blocking rings

靠近次镜的二级遮光罩(如图 10 所示)内挡光环的设计遵循不影响镜头视场内光进入的原则,采用与靠近像面的一级遮光罩挡光环一致的涂覆材料。因镜头视场角较小,同时为了便于加工及装配,二级遮光罩可以设计成直筒形结构,由若干个环形金属壁外部级联组成。

3.2 杂散光建模与分析

采用随机光线蒙特-卡罗光线追迹方法,考虑外镜筒内壁、挡光环、主次反射镜遮光罩的吸收、反射,

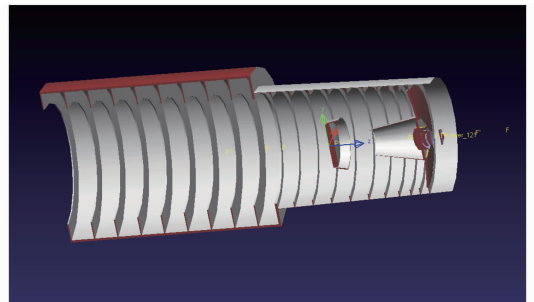


图 10 系统消杂散光设计图

Fig. 10 Stray light removing design of system

遮光罩边缘的衍射,可以较好地反映像面杂光相对于入射光的衰减比例。采用点源透过率(PST)作为本折反式星敏感器光学系统对杂光点源的衰减能力的评价标准,是为了更好地反映在了解太空复杂的杂光光源辐照强度的前提下进行系统杂散光抑制能力的分析。在计算反映杂光抑制能力时,定义镜筒内各表面的双向散射分布函数(BSDF),同时根据 Harvey 描述的光学表面散射 ABg 模型^[13-14],采用 SiC 作为反射镜材料,使用平均吸收率为 95%,散射率为 5%的电介质膜层作为镜筒内壁、挡光环、锥形遮光罩表面涂层材料。在 Lighttools 中对上述光学

特性及设置建模,简化不影响杂光分析的部分设置。由 PST 的定义式可知其结果与外界光源的辐照能量无关,但一般的 PST 数值都很小,同时星敏感器又是探测微弱信号的高精密系统,为保证像面探测器能在其动态响应范围内捕捉到杂光信号,在模拟阶段采用最大辐照度约为 1.2 倍(约 1645 W/m^2) 太阳常数的杂光源,加入遮光罩的折反镜头光轴与

表 3 不同视场角入射杂光系统 PST 值(30 万条光线)

Table 3 Values of system PST with different incident angles of stray light (300 thousand beams)

Incident angles of stray light	Max irradiance of system		Value of PST
	entrance $/(W/m^2)$	image $/(W/m^2)$	
2°	1643	0.925	5.51×10^{-4}
4°	1640	0.583	3.56×10^{-4}
8°	1628	0.387	2.38×10^{-4}
12°	1609	0.154	9.58×10^{-5}
16°	1581	0.105	6.67×10^{-5}
20°	1545	0.057	3.69×10^{-5}
24°	1502	0.011	7.53×10^{-6}
28°	1452	0.010	6.91×10^{-6}
32°	1395	0.009	6.54×10^{-6}
36°	1330	0.007	5.07×10^{-6}
40°	1260	0.006	4.87×10^{-6}

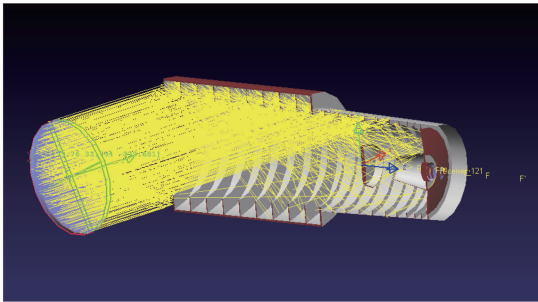


图 11 32°视场角入射杂光系统剖面图

Fig. 11 Section map of system with 32° incident angle of stray light

分析表明,靠近镜头最大成像视场的杂光 PST 为 10^{-4} 量级,40°视场角内的 PST 曲线如图 12 所示,视场外杂光 PST 为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 量级,且在 20°视场外杂 PST 值趋于平缓,40°视场外后 PST 小于 5.62×10^{-6} ,说明两级遮光罩对于本折反射形式的星敏感器有较好的杂散光抑制能力,较好地保证了整机可以工作于复杂照度环境下。

4 结 论

本系统通过改进的卡塞格林结构及球面补偿镜组合的方式,设计了具有大入瞳的折反式星敏感器光学系统,该系统具有如下特性:1) 在工作波段内最大成像弥散斑质心偏差、倍率色差满足设计指标,

杂光源的法线夹角即为杂光源入射的视场角,并根据不同入射视场角,分别计算入瞳及像面处的最大辐照度,统计两者的比值,建立系统抑制杂光能力列表,如表 3 所示。由于在追迹 2~30 万条光线后,各视场 PST 数值整体收敛,可以停止更多数量光线追迹。图 11 为以 32°视场角入射杂光系统剖面示意图。

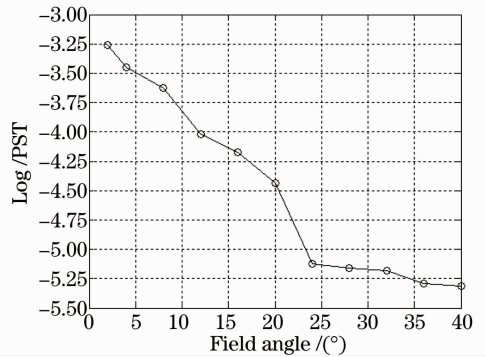


图 12 点源透射比曲线

Fig. 12 Curve of point source transmittance

光轴指向精度优于 $3''$,传递函数接近衍射极限;2) 全视场内无渐晕及像方远心的设计保证了系统存在像面调焦不准时较高的能量集中度、全视场照度的均匀性;3) 系统主次镜共轴设计,透射元件全球面、无胶合、无特种材料光学玻璃,降低了在检测及装调上的难度;4) 通过两级外镜筒遮光罩及主次镜锥形遮光罩及相关光学参数的设计,并基于随机光线蒙特卡罗仿真分析方法,在 Lighttools 软件中建模并分析了系统杂散光抑制能力。分析结果表明,该光学系统设计具有良好的成像质量,满足星敏感器的系统要求。

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.
李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522005.
- 2 Sun Jun, Zhang Shijie, Li Baohua. Autonomous navigation based on star light and ultraviolet earth sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1192–1198.
孙 俊, 张世杰, 李葆华. 利用地球紫外和恒星可见光的卫星自主导航[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1192–1198.
- 3 Dan Michaels, James Speed. New ball aerospace star tracker achieves high tracking accuracy for a moving star field[C]. *SPIE*, 2004, 5430: 43–52.
- 4 Roelof W H, VANBezooijen. SIRTf autonomous star tracker [C]. *SPIE*, 2003, 4850: 108–121.
- 5 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): 0822001.
巩 盾, 田铁印, 王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822001.
- 6 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. 全天时星敏传感器光学系统设计参数选择[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122001.
- 7 Zhao Yang. New Type Reflection Optical System Design for a Star Sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
赵 阳. 新型反射式星敏传感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- 8 Wu Feng. Design of a 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.
- 9 Wu Feng, Shen Weimin. Design of a catadioptric system for star sensors with wide field of view[J]. *Optical Technology*, 2004, 2(30): 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, 2(30): 142–145.
- 10 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. 24–32.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 24–32.
- 11 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传感器光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 151–154.
- 12 Yuan Jiahu. A Study on Technology Navigation Star Sensor[D]. Chengdu: Sichuan University, 1999.
袁家虎. 导航星敏传感器技术研究[D]. 成都: 四川大学, 1999.
- 13 Schlick C. A survey of shading and reflectance models [C]. *Computer Graphics Forum*, 1994, 13(2): 121–131.
- 14 Mei Chao, Zhou Sizhong, Yan Peipei, *et al.*. Design of an outer baffle based on scattering model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122005.
梅 超, 周泗忠, 闫佩佩, 等. 基于散射模型设计外遮光罩[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122005.

栏目编辑: 韩 峰