

折反式大口径星敏感器光学设计及杂散光分析

薛庆生

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 大口径星敏感器已成为卫星导航领域的迫切需求,根据大口径和轻量化的研究目标,采用R-C系统和球面补偿透镜组相结合的结构型式,设计了一个视场 1.8° 、焦距719 mm,入瞳直径164 mm,工作波段 $0.45\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 的折反式大口径星敏感器光学系统,采用像方远心设计,降低了像面离焦对能量质心位置计算的影响,同时提高了像面照度均匀性。根据像差理论计算初始结构参数,利用光学设计软件CODE V进行了光线追迹和优化设计,设计结果表明,光学系统遮拦比0.317,光学传递函数在特征频率26 lp/mm处,大于0.81,成像点80%的能量集中在 3×3 像元内,垂轴色差小于 $2\ \mu\text{m}$,最大质心偏差小于 $2\ \mu\text{m}$ 。采用内遮光罩、外遮光罩、次镜遮光罩和挡光环等消杂光设计来降低杂散光水平,利用Tracepro软件对光机系统的杂散光进行了仿真分析,分析结果表明,在离轴角 $6^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,点源透射比在 $10^{-7}\sim 10^{-4}$ 量级,满足应用要求。

关键词 光学设计;星敏感器;杂散光分析;折反式;遮光罩

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0222001

Optical Design and Stray Light Analysis for Large Aperture Catadioptric Star Sensor

Xue Qingsheng

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033,
China

Abstract Satellite navigation urgently requires large aperture star sensor. Based on the research objective of large aperture and light weight, a large aperture catadioptric optical system is designed using an R-C system and a spherical compensating lens. The field of view of the star sensor is 1.8° , the focal length is 719 mm, the diameter of the entrance pupil is 164 mm, and the working waveband is from $0.45\ \mu\text{m}$ to $0.9\ \mu\text{m}$. The telecentric image plane design decreases the effect of calculating the position of centroid caused by the imaging plane defocussing and increases the irradiance uniformity. The initial parameters are calculated based on aberration theory. Then, ray tracing and optimization are performed by CODE V software. The obscured ratio is 0.317. The MTF is more than 0.81@26 lp/mm, which approaches the diffraction limit, 80% energy encircled is within 3×3 pixels, the lateral chromatic aberration is less than $2\ \mu\text{m}$, and the centroidal deviation is less than $2\ \mu\text{m}$. The internal baffle, external baffle, second-mirror baffle, and blocking rings are used to decrease the stray light level. The stray light of the optical-mechanical is simulated and analyzed using TracePro software, and the results show that the point source transmittance is between 10^{-7} to 10^{-4} in the range of the incident angle $6^\circ\sim 90^\circ$ incident angle, which satisfies the requirements of application.

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

OCIS codes 220.3620; 120.4820; 230.5160; 290.2648; 250.0040

1 引 言

星敏感器是用于空间飞行器姿态测量的重要光学仪器^[1-2],它通过测量恒星的角间距来实现姿态测量,

收稿日期: 2015-8-10; 收到修改稿日期: 2015-9-30

基金项目: 国家自然科学基金(41105014, 41575023)、中科院长春光机所领域前沿创新项目

作者简介: 薛庆生(1979—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学系统设计,航天和航空遥感成像光谱技术及光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

而恒星像的成像质量是影响角间距测量精度的重要因素之一,因此,星敏感器的性能在很大程度上取决于其光学系统的性能。

目前,传统的星敏感器光学系统多为透射式、小口径、短焦距、宽波段的光学系统^[3-4],由于口径小,探测极限星等的能力受到限制。随着航天科学技术的不断进步,对星敏感器的要求也越来越高,需要更弱的恒星(如11等星)作为参考恒星,此时,小口径星敏感器不能满足应用要求,迫切需要大口径星敏感器。随着口径的增大,一方面,全透射式光学系统的质量会急剧增加,不利于空间应用;另一方面,大口径、高性能的玻璃材料很难选择,并且色差很难校正。最近几年,有人提出一种全反射式星敏感器光学系统^[5],采用同轴三反结构,此系统主要存在两方面的缺陷,一方面,由于存在二次遮拦,系统的能量利用率低;另一方面,由于边缘视场的像差校正能力弱,残余的彗差、像散和畸变大,导致边缘视场的点列图弥散斑呈椭圆形,不仅能量集中度低,也会影响后期质心位置的提取。近年来,有人提出一种Schwarzschild系统与球面补偿透镜相结合的折反式星敏感器光学系统^[6-7],Schwarzschild系统也称为逆卡塞格林系统,此系统由于主镜为凸非球面,且口径小,造成系统的入瞳直径很小,与全透射式光学系统的入瞳大小相比,没有明显优势。另外,该系统边缘视场的畸变过大(接近2%),非球面补偿透镜组的加工和检测难度也较大。

为解决上述星敏感器光学系统存在的问题,本文采用R-C系统^[8]和球面补偿透镜组相结合的结构型式设计了一种折反式大口径星敏感器光学系统。主、次镜均为双曲面,校正球差和彗差,球面补偿透镜组校正残余的像散、场曲和畸变。首先根据像差理论计算初始结构参数,然后利用光学设计软件CODE V进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行了分析与评价。采用内遮光罩、外遮光罩、次镜遮光罩和挡光环等消杂光设计来降低杂散光水平,利用TracePro软件对光机系统的杂散光进行了仿真分析。

2 应用要求及主要技术指标

星敏感器要求在0.45~0.9 μm 光谱范围内对恒星成像探测,采用CMOS探测器作为成像探测器接收恒星像,探测器像元尺寸为6.5 μm ×6.5 μm ,极限探测星等为11等星。星敏感器探测极限星等的的能力主要与探测器的性能、光学系统的入瞳直径和积分时间相关。在探测器选定和积分时间设定的条件下,光学系统的入瞳直径越大,探测极限星等的的能力越强。根据探测器的性能和光学系统的传输效率,确定光学系统的有效入瞳直径为147 mm,考虑到次镜座和次镜支撑杆的遮拦,确定次镜的最大直径为52 mm,受星敏感器体积和重量的限制,星敏器主镜最大口径为164 mm,即次镜的遮拦比不大于0.317。另外,为了提高后续质心提取的精度,对星敏感器光学系统的畸变、倍率色差也提出了很高的要求。根据极限探测星等和探测器的性能参数,确定星敏感光学系统的主要技术指标如表1所示。

表1 星敏感器光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of the star sensor optical system

Parameter	Value
Spectral range / μm	0.45~0.9
Field of view /($^{\circ}$)	1.8
Focal length of system /mm	≥ 700
Entrance diameter /mm	164
Spot diameter encircled 80% energy / μm	19.5
Relative distortion /%	≤ 0.1
Lateral color / μm	≤ 2
Centroid chromatic deviation / μm	≤ 2
Modulation transfer function	$\geq 0.7@26 \text{ lp/mm}$
Point source transmittance /%	≤ 0.1

3 折反式星敏感器光学系统设计

从技术指标可以看出,大口径折反式星敏感器光学系统是长焦距(719 mm)、大相对孔径(1/4.38)、宽波段(0.45~0.9 μm)的光学系统,成像质量要求高。采用R-C系统和球面补偿透镜组相结合的结构型式。R-C系

统的主、次镜均为双曲面,初级球差和初级彗差为零,在较大的视场内,成像点的弥散斑基本呈圆形,便于后续的质心提取。对于两反系统,根据像差理论,可以推导出^[9-10]

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

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

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

式中, R_1 为主镜的顶点半径, R_2 为次镜的顶点半径, α 为主镜的遮拦比, β 为次镜的放大倍率, e_1^2 为主镜的二次曲面系数, e_2^2 为次镜的二次曲面系数, S_I 为球差, S_{II} 为彗差。由 $S_I=S_{II}=0$ 求解得到

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}, \quad (4)$$

$$e_2^2 = \frac{2\beta}{1-\alpha} + \frac{(1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3}, \quad (5)$$

次镜遮拦比 α 取0.317,代入(4)式和(5)式,得到二次曲面系数 e_1^2 和 e_2^2 随次镜放大倍率 β 变化关系曲线,从图1可以看出, e_1^2 随 β 的变化关系不大, e_2^2 随 β 的增大而增大。 e_2^2 越小,次镜越容易加工,可以看出, β 越小, e_2^2 越小,因此希望本系统 β 取值小,但 β 越小,次镜的公差越严格,在综合权衡的基础上取 β 为-4.5。主镜顶点半径 R_1 初始值取-310,代入(1)、(4)、(5)式求解得到 e_1^2 、 e_2^2 分别为1.04586、2.77676。主、次镜的初始间距取105.4 mm。星敏感器初始光学系统结构如图2所示。

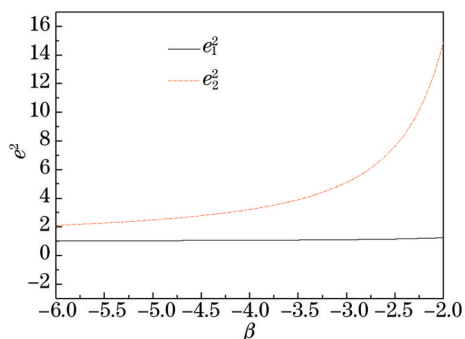


图1 e_1^2 和 e_2^2 随 β 变化关系曲线

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

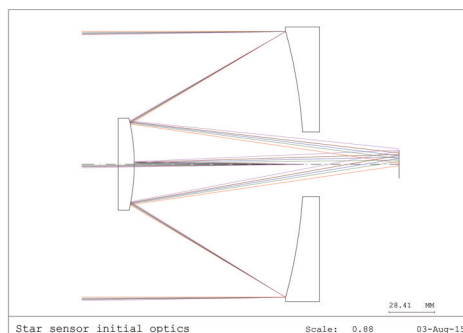


图2 星敏感器初始光学结构图

Fig.2 Initial optical path of the star sensor

由于星敏感器光学系统的视场和相对孔径都较大,初始光学系统的成像质量不能满足指标要求,因此,考虑在焦面前增加球面补偿透镜组校正残余的像散、场曲和畸变。为减小球面补偿透镜组引入的色差,要求球面补偿透镜组自身具有消色差能力。球面补偿透镜组由5片球面补偿透镜组成,与初始R-C系统一起进行优化设计,通过控制出瞳位置、垂轴像差、畸变等保证光学系统的成像质量。为保证像方远心,优化设计时通过控制出瞳距为无穷远或主光线与像面的夹角为零来实现。优化设计的星敏感器光学系统结构如图3所示,光学系统体积为 $\Phi 164 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

图4为星敏感器光学系统像面上的点列图分布,可以看出,成像点弥散斑直径的均方根(RMS)值为 $3.6 \mu\text{m}$,小于探测器的像元尺寸 $6.5 \mu\text{m}$,获得了良好的成像质量。图5为能量集中度曲线,可以看出,成像点80%的能量集中在 $12 \mu\text{m}$ 范围内,满足80%的能量集中在 3×3 像元(即 $19.5 \mu\text{m}$)范围内的指标要求。图6为光学传递函数(MTF)曲线,在特征频率 26 lp/mm 处的MTF大于0.81,满足MTF不小于 $0.7@26 \text{ lp/mm}$ 的指标要求。图7为相对畸变曲线,最大相对畸变为0.06%,满足相对畸变不大于0.1%的指标要求。图8为倍率色差随视场的变化关系曲线,最大倍率色差为 $0.7 \mu\text{m}$,满足倍率色差不大于 $2 \mu\text{m}$ 的指标要求。表2给出了不同波长对应不同视场的质心位置,最大质心色偏差为 $0.85 \mu\text{m}$,满足质心色偏差不大于 $2 \mu\text{m}$ 的指标要求。

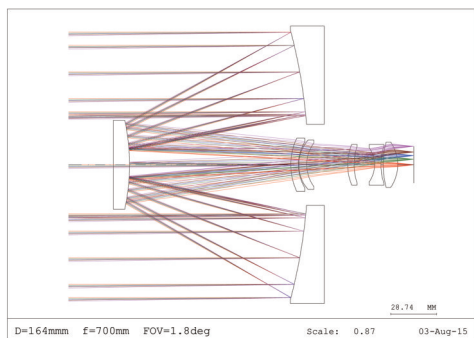


图3 优化设计的星敏传感器光学结构图

Fig.3 Optical path of the optimized star sensor

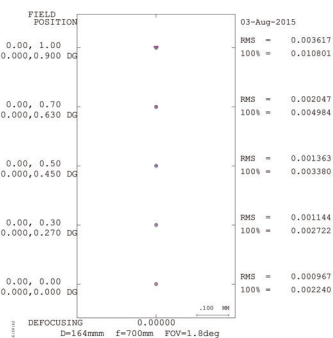


图4 像面上点列图分布

Fig.4 Spot diagram in the image plane

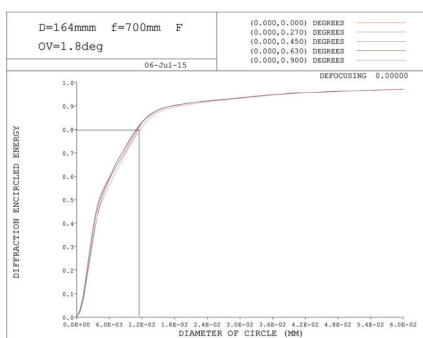


图5 能量集中度曲线图

Fig.5 Curves of the encircled energy

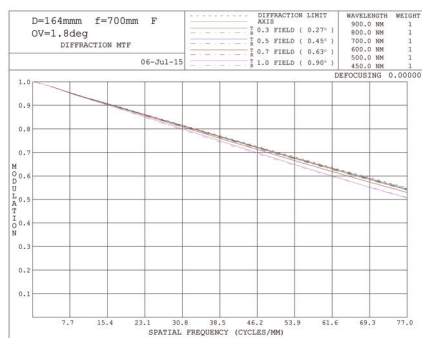


图6 星敏传感器光学传递函数曲线

Fig.6 MTF curves of the star sensor

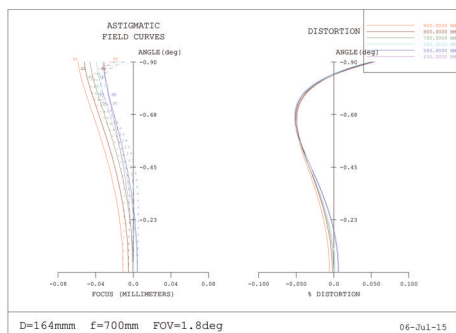


图7 相对畸变曲线

Fig.7 Relative distortion curves

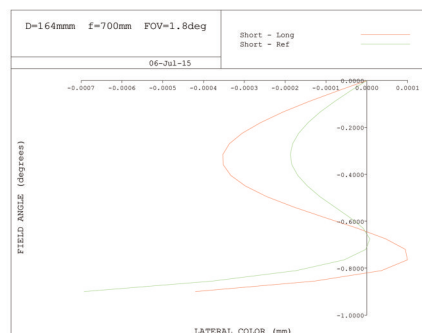


图8 倍率色差曲线

Fig.8 Lateral aberration curves

表2 光学系统质心色偏差

Table 2 Centroid chromatic deviation of the optical system

FOV / (°)	$\lambda=900\text{ nm}$ Design value /mm	$\lambda=700\text{ nm}$ Design value /mm	$\lambda=450\text{ nm}$ Design value /mm	$\Delta / \mu\text{m}$
0	0	0	0	0
0.27	3.392266	3.392421	3.392527	0.261
0.45	5.652908	5.653024	5.652995	0.116
0.63	7.912906	7.912816	7.912462	0.444
0.9	11.316162	11.315558	11.315312	0.850

4 消杂光设计与分析

杂散光存在于星敏传感器光学系统中有诸多危害,例如,降低光学系统的成像质量、降低信噪比,直接入射到探测器上的杂散光甚至会导致探测器饱和,影响恒星的探测,因此,要对星敏感光机结构进行消杂光设

计,降低系统的杂散光水平。消杂光设计首先要避免视场外经过外遮光罩内壁的一次反射或直接入射到探测器上的光线,因此,设置内遮光罩、外遮光罩和次镜遮光罩,如图9所示。

如图10所示,光线1、2是由主镜口径决定的边缘视场光线,光线3、4是由遮拦比决定的内孔径边缘光线。次镜遮光罩外边缘的B点为光线2经主镜反射的光线与光线4的交点。内遮光罩的边缘点C为光线2经主镜、次镜反射后的光线与光线3经主镜反射后的光线的交点。外遮光罩可以拦截视场外直接进入像面的非成像光线,但由于外遮光罩的内表面具有一定的反射率,入射到外遮光罩内表面的光线经内表面反射后入射到反射镜表面、透镜表面和镜座表面,经过多次反射后也会在像面形成杂光。因此,在遮光罩内壁涂消光黑漆并设置挡光环。如图11所示,在主镜有效边缘外设置外遮光罩,外遮光罩半口径与主镜半口径之差为挡光环的高度,采用等高挡光环设计,挡光环的高度为 h 。实线为外遮光罩位置,虚线为不加挡光环时外遮光罩的位置。挡光环设置的目的是隔断射到外遮光罩内部的光线到达主镜的路径。外遮光罩的最外边缘设置第一个挡光环,第二个挡光环的设计是用来连接外遮光罩的外边缘点L与主镜的下边缘点N,连线与虚线交于点O,在O点设置第二个挡光环。连接M点和O点,其延长线与实线相交,实线交点与N点的连线与虚线的交点为P,在P点设置第二个挡光环,以此类推,在500 mm的长度内共设计了9级挡光环。

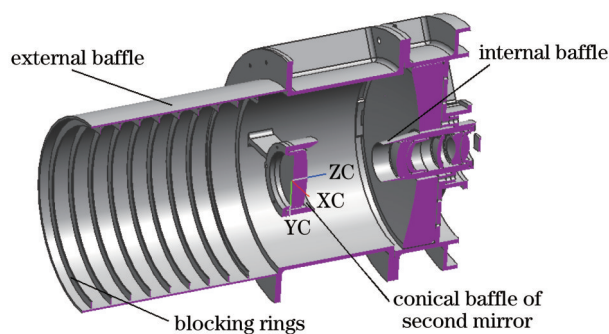


图9 遮光罩示意图

Fig.9 Schematic diagram of the baffles

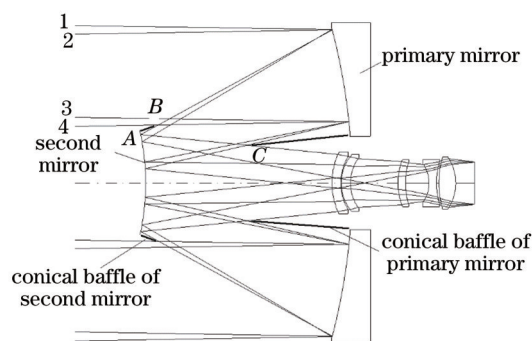


图10 遮光罩与杂光路径

Fig.10 Baffles and pathway of the stray light

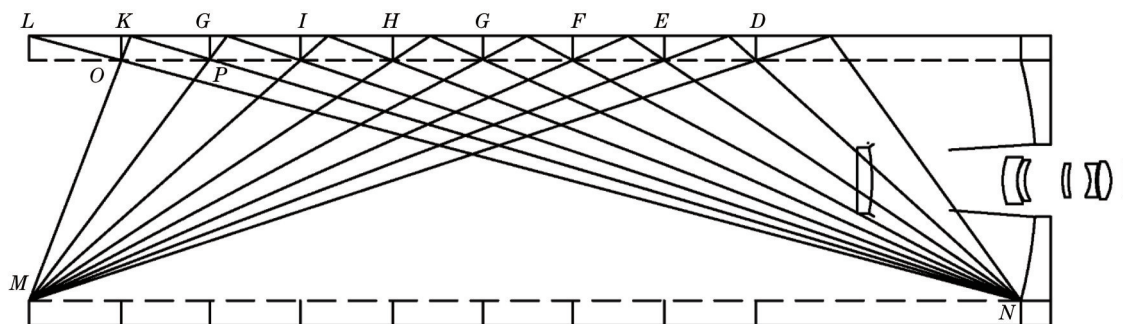


图11 挡光环设计示意图

Fig.11 Schematic diagram of the blocking rings

采用杂散光分析软件TracePro进行杂散光分析。首先,在杂散光分析软件中建立相关光机模型,定义与杂散光有关的散射表面的散射特性,即双向散射率分布函数(BSDF),然后,采用蒙特卡罗法进行光线追迹,利用点源透射比(PST)^[11]作为杂光抑制能力的评价标准。PST的定义为离轴角为 θ 的视场外光源在像面上产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与垂直于该点源的输入口径上的辐照度 $E_i(\theta)$ 之比:

$$S_{\text{PST}} = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}, \quad (6)$$

S_{PST} 表示系统自身对杂散光的衰减能力,它与视场外杂散光源的绝对强度无关, S_{PST} 的数值越小,表示系统的杂散光抑制能力越强。

根据星敏感器探测要求,确定在 6° 规避角以外的PST不大于 1×10^{-3} 。系统中光学元件的散射模型采用

J E Harvey 提出的描述光学表面散射特性的 ABg 模型^[12]:

$$S_{\text{BSDF}}(|\beta - \beta_0|) = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}, \quad (7)$$

其中 A, B, g 为拟合系数, β 和 β_0 分别为散射方向向量和镜面反射方向向量在垂直于法线平面上的投影。系统中主、次镜采用 SiC 材料, 表面镀银膜, 表面粗糙度小于 2 nm, 对于主、次镜, 取 $A=0.001, B=0.015, g=2$ 。系统中的球面校正透镜, 镀增透膜, 对于球面校正透镜, 取 $A=1 \times 10^{-5}, B=0.015, g=2$ 进行分析。系统内、外遮光罩的内壁、次镜遮光罩等对杂散光有影响的非光学表面涂消光黑漆, 平均吸收率为 95%, 取 $A=0.063, B=1, g=0$ 进行分析。利用 TracePro 软件对不同离轴角时的杂光路径进行追迹, 输入孔径上的辐照度 $E_i(\theta)$ 取一个太阳常数(约 1366 W/m^2), 图 12 为以 30° 离轴角入射杂光影响剖面图, 根据追迹得到的杂光在探测器上产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 计算出 PST 曲线如图 13 所示, 可以看出在离轴角 $6^\circ \sim 90^\circ$ 范围内入射, PST 在 $1.01 \times 10^{-7} \sim 5.38 \times 10^{-4}$ 之间, 满足 $S_{\text{PST}} \leq 1 \times 10^{-3}$ 的指标要求, 并且在 20° 视场外, PST 随视场的变化变得缓慢, 当视场角大于 36° 时, $S_{\text{PST}} < 4.19 \times 10^{-6}$, 表明该折反式星敏感器系统的杂散光抑制能力较强, 可满足探测要求。

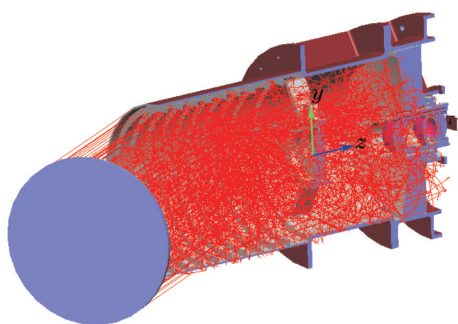


图 12 30° 离轴角入射杂光影响剖面图

Fig. 12 Sectional view of stray light influence with 30° off-axis incident angle

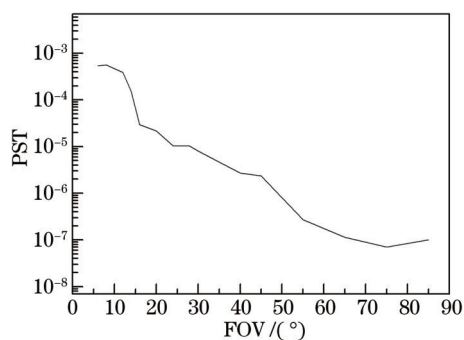


图 13 点源透射比曲线

Fig.13 Curve of the PST

5 结 论

大口径星敏感器已成为卫星导航领域的迫切需求, 根据大口径和轻量化的研究目标, 采用 R-C 系统和球面补偿透镜组相结合的结构型式, 设计了一个视场 1.8° 、焦距 719 mm, 入瞳直径 164 mm, 遮拦比 0.317, 工作波段 $0.45 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 的折反式大口径星敏感器光学系统, 采用像方远心设计, 降低了像面离焦对能量质心位置计算的影响, 同时提高了像面照度均匀性。利用光学设计软件 CODE V 进行了光线追迹和优化设计, 设计结果表明, MTF 在特征频率 26 lp/mm 处, 大于 0.81, 成像点 80% 的能量集中在 3×3 像元内, 倍率色差小于 $2 \mu\text{m}$, 最大质心偏差小于 $2 \mu\text{m}$ 。采用内遮光罩、外遮光罩、次镜遮光罩和挡光环等消杂光设计来降低杂散光水平, 利用 Tracepro 软件对光机系统的杂散光进行了仿真分析, 分析结果表明, 在离轴角 $6^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 点源透射比在 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 量级, 满足星敏感器的指标要求。

参 考 文 献

- 1 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Honghua, *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. 星敏感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
- 2 Gong Dun. Optical design of high sensitive star sensor with wide spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s222003.
巩 盾. 高灵敏度宽谱段星敏感器系统的光学设计[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s222003.
- 3 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口径星敏感器光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822001.
- 4 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.大口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.
- 5 Zhao Yang. New Type Reflection Optical System Design for a Star Sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- 赵 阳. 新型反射式星敏感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- 6 Wu Feng, Shen Weimin. 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.折反式大视场星敏感器光学系统设计[J].光学技术,2004,30(2):142-145.
- 7 Wu Feng. Design of Catadioptric System for Star Sensors with Wide Field of View[D]. Suzhou: Soochow University, 2004.
- 吴 峰.折反式大视场星敏感器光学系统的设计[D].苏州:苏州大学,2004.
- 8 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.
- 9 Pan Junhua, Hao Peiming. A general study of the optical system with two aspherical mirror[J]. Acta Astronomic Sina, 1965, 13(1): 46-56.
- 潘君骅,郝沛明.两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究[J].天文学报,1965,13(1):46-56.
- 10 Hao Peiming, Kong Xianglei. Research of beam expander with a two-mirror system[J]. Chinese J 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.
- 11 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Optical design and stray light analysis for ultraviolet board with off-axis four mirrors optical system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0216001.
- 朱 杨,张 新,伍雁雄,等.紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析[J].中国激光,2015,42(2):0216001.
- 12 Zhong Xing, Jia Jiqiang. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 621-625.
- 钟 兴,贾继强.空间相机消杂光设计及仿真[J].光学精密工程,2009,17(3):621-625.

栏目编辑:韩 峰