

星敏感器光学系统设计及杂散光抑制技术研究

史屹君¹, 徐子奇^{2*}

- (1. 天津可宏振星科技有限公司, 天津 300192;
2. 长春电子科技学院, 吉林 长春 130114)

摘要: 在星敏感器实际应用中, 光学系统杂散光的存在会引起星点模糊或者被遮挡。文中根据星敏感器对口径、视场、光谱范围和探测能力的要求, 采用 Code V 软件完成了星敏感器光学系统的设计, 最终设计参数为口径 15 mm、视场 18°、光谱范围 400~750 nm、探测能力 5 等星, 并利用 CAD 画图软件设计了锥形结构遮光罩, 遮光罩叶片视场边界为 19°, 共 9 片挡光环, 最前端面距离窗口玻璃 190.76 mm, 最前端面口径 108.76 mm, 太阳规避角 25°, 同时利用 ASAP 软件分析了光学系统对杂散光的抑制能力, 根据杂散光评价指标点源透射比 (PST), 在 25° 太阳规避角时, 系统满足 5 等星探测能力需求, 验证了杂散光分析方法、分析模型的正确性。

关键词: 星敏感器光学系统; 遮光罩; 点源透过率; 杂散光

中图分类号: V448.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210015

Optical system design of star sensor and stray light suppression technology

Shi Yijun¹, Xu Ziqi^{2*}

- (1. Tianjin Bright Star Technology CO., LTD, Tianjin 300192, China;
2. Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130114, China)

Abstract: In the practical application of star sensors, the presence of stray light in the optical system will cause the star points to be blurred or blocked. Based on the requirements of the star sensor for aperture, field of view, spectral range and detection capability, the optical system design of star sensor was completed using Code V software. The final design parameters were 15 mm diameter, 18 degrees field of view, spectral range from 400 nm to 750 nm, detection capability 5 grade stars. A cone structure hood was designed with CAD drawing software, shading field of view boundary of the hood blade was 19°, and there were 9 light blocking rings in total. The front end face was 190.76 mm from the window glass, the front end face diameter was 108.76 mm, and the sun avoidance angle was 25°. At the same time, the ASAP software was used to analyze the optical system's ability to suppress stray light. According to the stray light evaluation index point source transmittance(PST), the system satisfies the detection capability requirements of 5th magnitude stars at a solar avoidance angle of 25°, which verifies the stray light analysis the correctness of methods and analytical models.

Key words: optical system of star sensor; hood; point source transmittance(PST); stray light

收稿日期: 2021-06-07; 修订日期: 2021-06-21

作者简介: 史屹君, 男, 高级工程师, 主要研究方向为光电测控技术、工程光学计量测试技术等。

通讯作者: 徐子奇, 女, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为光学结构、光学工艺等。

0 引言

星敏感器是以恒星为探测对象的高精度空间姿态测量装置,广泛应用于卫星、航天飞机、导弹中,是其必备的高精度姿态敏感部件。开展新型星敏感器光学系统的设计和相关技术的研究工作有利于促进测量控制领域的发展。在星敏感器进入太空轨道之前,必须评估星敏感器的杂散光抑制能力,以免不能准确识别星点,不能达到预期定姿效果,造成巨大的经济和人力损失。欧盟 Meteosat-5/7 系列成像仪、美国 GOES-I/M 曾因为杂散光的影响导致设备性能不能达到指标要求^[1]。

星敏感器的杂散光分析在国内的研究起步较晚。2015 年,西安工业大学张欢根据杂散光在进入光学系统前的二次反射原则,推导了遮光罩长度与杂散光入射角的关系式,利用 Solidworks 软件设计了柱形筒、光阑锥形布置的遮光罩,运用 Tracepro 软件分析了光学系统对杂散光的抑制能力^[2]。2019 年,中国科学院大学宋巍利用基于双柱罐的点源透射率测试方法,对可见光星敏感器光学系统进行实测,得出点源透射率的实测数据并绘制曲线,与仿真分析数值对比,进行误差分析^[3]。2020 年,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的李建林对光谱范围 450~950 nm,最大畸变为 0.081% 的大口径折反式星敏感器光学系统的光路进行了设计及公差分析^[4]。

杂散光抑制的方法有:(1)孔径光阑;(2)视场光阑;(3)里奥光阑;(4)遮光罩。其中,遮光罩的利用是杂散光消除的主要方法^[4-10]。文中采用锥形设计的遮光罩,其叶片设计视场边界为 19°,9 片挡光环。遮光罩最前端面距离窗口玻璃 190.76 mm,最前端面口径

108.76 mm,规避角 25°,所提设计保证了星敏感器 5 等星的探测能力需求,验证了杂散光分析方法、分析模型的正确性^[5-9]。

1 星敏感器基本原理

星敏感器主要包括光学系统、图像传感器件、信号处理单元和点源四个组成部分^[10-11]。光学系统包括遮光罩和光学镜头,星敏感器结构示意图如图 1 所示。其原理是恒星经过光学系统成像在图像传感器像面上,信号处理单元经过相关算法进行星点提取并计算各星点间的角距,然后与导航星库中的导航星相匹配,确定星敏感器的视轴指向,进而确定姿态。

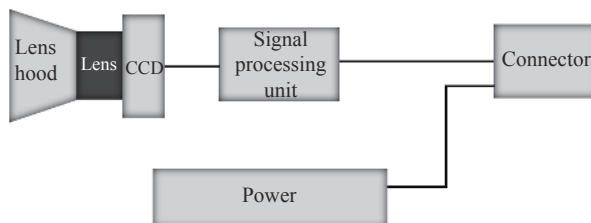


图 1 星敏感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the star sensor

2 光学系统设计

2.1 星敏光学系统设计

文中选择一款 11 片式的光学系统,优化后得到的星敏感器光学系统结构如图 2 所示,其相对孔径 $D/f=1/1.5$,焦距 $f=22.5$ mm,视场 $FOV=18^\circ$ 。在 Code V 软件中选用中心视场、0.3 视场、0.5 视场、0.7 视场、0.85 视场和全视场等 6 个视场。选用 400 nm、500 nm、550 nm、650 nm 和 750 nm 5 个波长,以 550 nm 为中心波长,镜片选用肖特玻璃,共 11 片透镜。

该星敏感器探测器选用 CMV4000,单像元大小

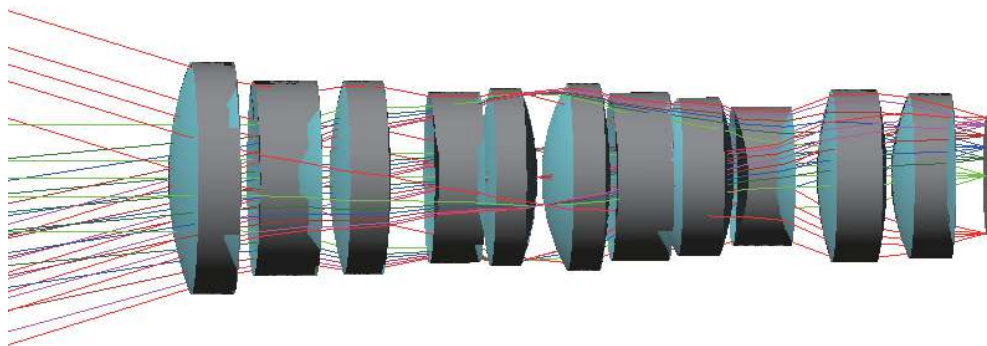


图 2 星敏感器光学系统

Fig.2 Optical system of star sensor

7.4 μm, 全视场 MTF 值在 68 lp/mm 时>0.40, 中心视场 MTF 值在 68 lp/mm 时>0.60, 满足星敏探测能力需求, 如图 3 所示。

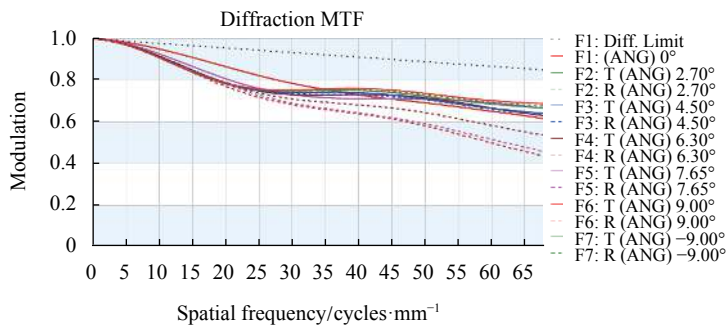


图 3 MTF 曲线

Fig.3 MTF curve

星敏传感器工作时需求提取探测目标质心信息, 因此对单像元能量集中度有一定要求, 笔者设计单像元大小 7.4 μm, 能量集中度曲线如图 4 所示, 全视场 65% 能量集中在 7.7 μm 以内, 中心视场 70% 能量集中在单像元内, 保证星敏工作时质心位置信息的提取。系统畸变曲线如图 5 所示, 全视场畸变<0.2%。

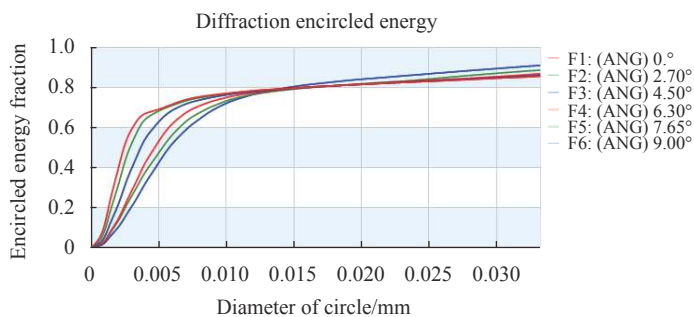


图 4 探测器径向能量分布图

Fig.4 Radial energy distribution diagram of the detector

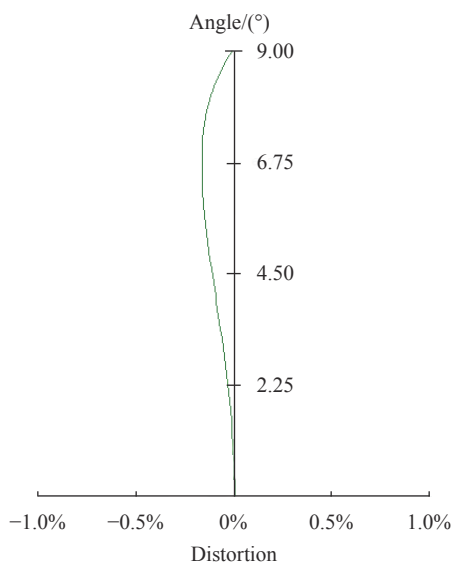


图 5 系统畸变曲线

Fig.5 System distortion curve

2.2 遮光罩设计

为降低挡光环的加工难度, 采用锥筒带高度梯度变化的挡光环的遮光罩。挡光环是设计的重点。最靠近光学系统的挡光环高度以保证通光孔径为设计依据, 根据要求 (如加工精度、装配误差等) 预留一定的误差。然后根据视场角来确定最外面的挡光环高度。合理选取挡光环的个数和其他参数, 在尽量减轻质量、减小体积的前提下, 获得最好的消杂光效果, 以保证达到系统的杂光抑制设计指标。

然后通过光学软件模拟仿真杂光的传输, 不断修改遮光罩和挡光环的各个参数, 找到一个平衡点: 既兼顾了系统要求的各种指标 (长度、质量等), 又获得了比较理想的消杂光效果。

最终设计的遮光罩采用锥形设计, 遮光罩叶片设计视场边界为 19°, 9 片挡光环, 遮光罩最前端面距离窗口玻璃 190.76 mm, 最前端面口径 108.76 mm, 规避角

25°,设计结果如图 6 所示,遮光罩三维模型如图 7 所示。

对杂散光进行分析应满足:波段范围 0.40~0.75 μm,光学件单面透过率 99.8%,光学件镜面残余反射率 0.2%,光学件表面粗糙度为 2 nm。遮光罩和光学件散射模型如图 8、图 9 所示,其中遮光罩涂层吸收率在正入射时 ≥95%。

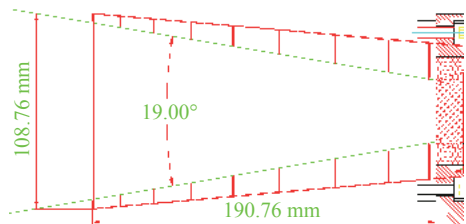


图 6 遮光罩二维模型图

Fig.6 Two-dimensional model of the hood

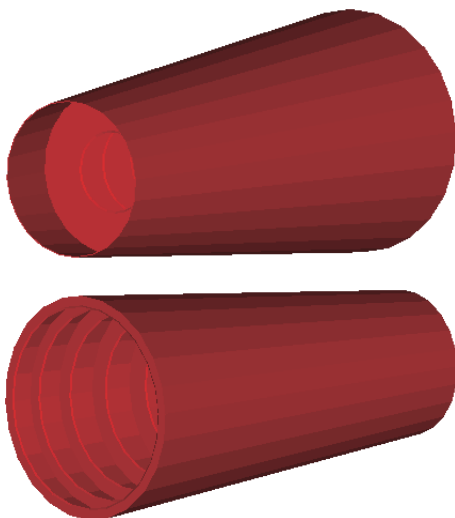


图 7 遮光罩三维模型图

Fig.7 Three-dimensional model of the hood

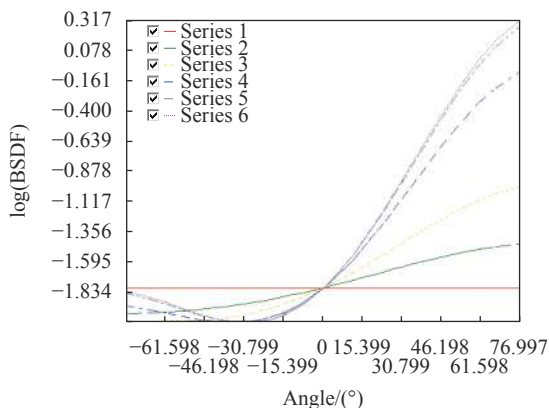


图 8 遮光罩散射模型

Fig.8 Scattering model of the hood

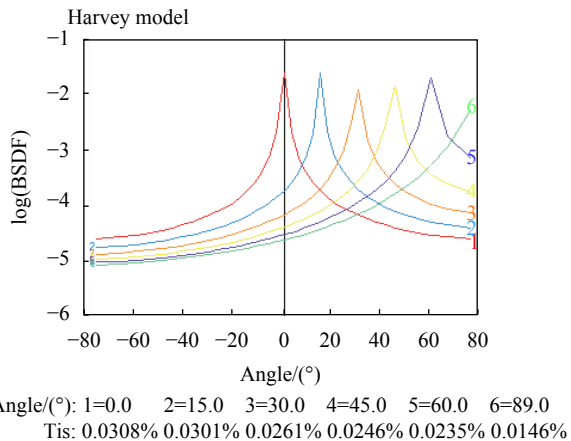


图 9 光学件散射模型

Fig.9 Scattering model of optical parts

3 杂散光分析与计算

系统散射 PST 计算分析步骤如图 10 所示: (1) 按实际模型 1:1 转换成光学模型; (2) 指定各个面的散射模型和光学参数; (3) 建立杂散光源, 指定光线数; (4) 光线追迹, 获得该杂散光源在探测器上的杂散光量级; (5) 得到视场外 25°入射时系统的散射 PST 值;

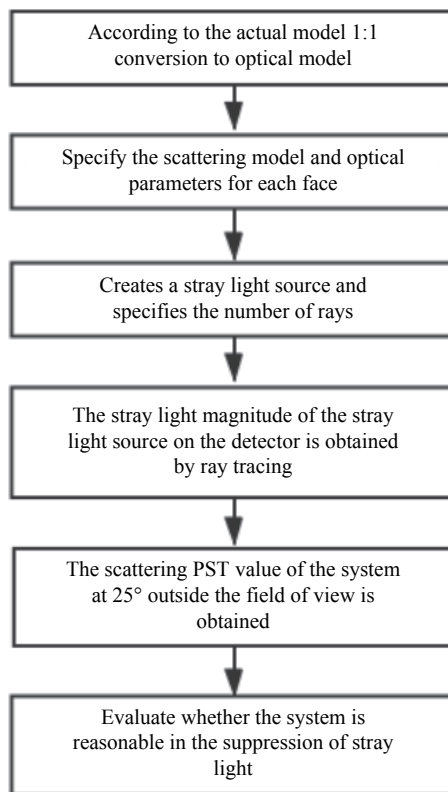


图 10 杂散光分析与计算步骤

Fig.10 Analysis and calculation steps of stray light

(6) 评价系统杂光抑制是否合理。

图 11 为星敏光学系统光线追迹图。仿真模型的表面特性(反射率、散射模型等)以及内部物理性质(透镜材料的折射率等),按照光学件、结构件的实际情况赋值。通过对系统进行光线追迹,分析视场外 25°时像面上 PST。

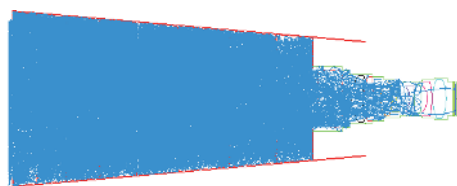


图 11 杂散光分析光线追迹图

Fig.11 Analysis ray trace of stray light

4 仿真结果

光学系统的杂散光通常由衍射杂散光和散射杂散光共同构成,其中衍射杂散光是系统固有的不可消除的杂散光,是系统杂光设计的极限。衍射杂散光主要由光学系统口径、 F 数、工作波长、系统透过率和杂散光入射角等因素决定。衍射杂散光点源透射比计算公式为:

$$PST_d = \frac{\tau \lambda \cos \theta}{4D\pi^2 F^2 \sin^3 \theta} \quad (1)$$

式中: D 为入瞳口径; F 为光学系统的 F 数; θ 为杂散光离轴角; λ 为中心波长; τ 为透过率。图 12 为该系衍射 PST 的分析结果。

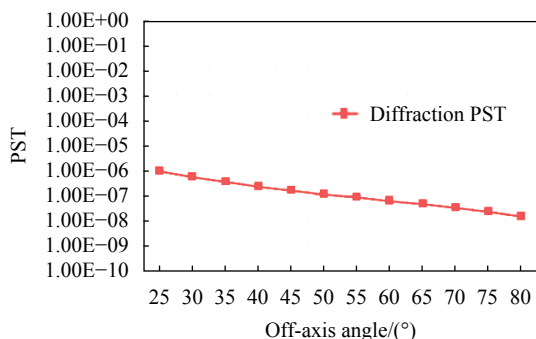


图 12 衍射 PST 与离轴角的关系

Fig.12 Diffraction PST vs off-axis angle

系统在不同离轴角下的杂散光抑制能力如表 1 所示,系统总的杂散光分析结果如图 13 所示,仿真结果表明光学系统在观察 5 等星时,杂散光抑制能力满

表 1 系统不同离轴角 PST

Tab.1 Different off-axis angle PST of the system

| Off-axis angle/(°) | Diffraction PST | Scattered PST | Total PST |
|--------------------|-----------------|---------------|-----------|
| 25 | 8.86E-07 | 5.58E-07 | 1.44E-06 |
| 30 | 5.11E-07 | 4.28E-07 | 9.39E-07 |
| 35 | 3.20E-07 | 9.90E-08 | 4.19E-07 |
| 40 | 2.13E-07 | 8.75E-08 | 3.00E-07 |
| 45 | 1.48E-07 | 6.85E-08 | 2.16E-07 |
| 50 | 1.06E-07 | 5.72E-08 | 1.63E-07 |
| 55 | 7.70E-08 | 4.61E-08 | 1.23E-07 |
| 60 | 5.68E-08 | 3.69E-08 | 9.37E-08 |
| 65 | 4.19E-08 | 2.14E-08 | 6.33E-08 |
| 70 | 3.04E-08 | 1.65E-08 | 4.69E-08 |
| 75 | 2.12E-08 | 8.25E-09 | 2.95E-08 |
| 80 | 1.34E-08 | 5.90E-09 | 1.93E-08 |

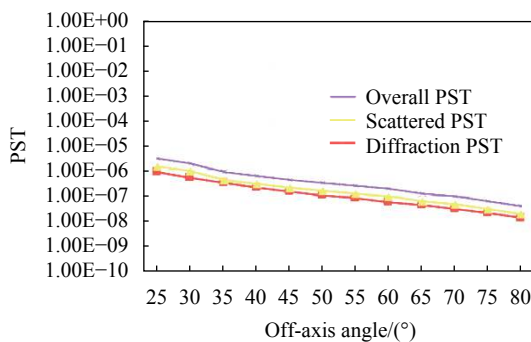


图 13 系统总的杂散光分析结果

Fig.13 Total stray light analysis result of the system

足观星要求。

5 结论

文中针对高质量星点图像的实际需求,对星敏感器光学系统进行了设计和分析,成像质量满足 5 等星探测能力需求。同时针对该系统设计了锥形遮光罩,并对光学表面粗糙度和遮光罩涂层提出了明确的工艺指标要求,在 25°太阳规避角时,杂光抑制比达到了 10^{-6} 量级,仿真结果表明光学系统在观察 5 等星时,杂散光抑制能力满足观星要求。

参考文献:

[1] Ghaffarian B. Solar intrusion thermal analysis[C]//Proc of SPIE, 1996, 2812: 251-259.
 [2] Zhang Huan. Design of optical for star sensor and study on stray

- light suppressing technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015. (in Chinese)
- [3] Song Wei. The stray light analysis and control in star sensor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [4] Wu Yanxiong, Qiao Jian, Wang Liping. Optical system design of star sensor with long focal length and athermalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200061. (in Chinese)
- [5] Zhang Ruoxi. Optical system design of multi mode common optical path navigation sensor[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [6] Li Jianlin, Lei Guangzhi, Bai Yang, et al. Optical path design for catadioptric star sensor with large aperture [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6): 0611002. (in Chinese)
- [7] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2960-2971.
- [8] Mercado R I, Ryzhikov L. Designs of apochromats and superachromatic objectives[C]//SPIE, 1998, 3482: 321-331.
- [9] Biswas A, Wilson K E, Page N A. Lasercom Test and Evaluation Station (LTES) development: an update[C]//Proc of SPIE, 1998, 3266: 22-32.
- [10] Keizo Nakagawa, Akio Yamamoto. Engineering model test of LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment)[C]//Proc of SPIE, 1996, 2699: 114-120.
- [11] Meng Xiangyue, 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): 0718005. (in Chinese)