

文章编号 1004-924X(2016)11-2683-06

超短型内嵌式遮光罩设计

李 洋*, 廖志波, 穆生博, 郭 悦, 王海超
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要:为了在不影响杂散光抑制效果的同时减少空间遥传感器的结构尺寸,方便其姿态控制,提出了一种超短型内嵌式遮光罩。介绍了超短型内嵌式遮光罩的基本结构形式及其优化设计方法。重新设计了遮光罩的形状,采用超短型多层遮光筒结构代替了传统设计中过长的外遮光罩。改变了遮光罩与主体结构的安装方式,将遮光罩嵌入式安装于空间遥传感器的主体结构,最大限度地压缩了结构尺寸。以某航空相机光学载荷为例,分析了该种遮光罩的可行性和消杂散光效果。采用 Light-tools 软件优化设计了双层同心圆柱筒结构的遮光罩,并对该遮光罩的杂散光抑制效果进行了评估。模拟计算结果表明,外遮光罩采用超短型内嵌式结构后,遮光罩总长度和重量均减小为传统设计结果的 1/3。系统的点源透过率(PST)曲线显示其整体呈下降趋势,且在离轴角大于 25° 后,光学系统的 PST 降低到 10^{-7} 以下。另外,设计的遮光罩能够有效抑制视场外杂散光,其杂散光抑制能力与其他离轴、同轴系统大体相当,满足使用需求。

关键词:空间遥感器;遮光罩;超短型内嵌式结构;点源透过率(PST);杂散光

中图分类号:V414.19;V443.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162411.2683

Design of ultra-short embedded baffle

LI Yang*, LIAO Zhi-bo, MU Sheng-bo, GUO Yue, WANG Hai-chao

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: lyshelly@sina.cn

Abstract: An ultra-short embedded baffle was put forward to reduce the size of an aerial satellite and to control its attitude meanwhile maintaining the result of stray light suppressing. The basic structure of the ultra-short embedded baffle was introduced, and its optimized design method was given. The shape of the baffle was redesigned, and an ultra-short multilayer shading tube was designed to replace the quite long baffle designed by existing methods. The installation mode between the baffle and the main structure was changed. The designed baffle was installed into the main structure of an air sensor by an embedding manner, by which the size of the baffle was reduced in the greatest extent. Finally, a concrete aerial camera was taken for an example, and the feasibility of this baffle and its effect on the stray light suppressing were analyzed. A baffle with two-layer concentric cylindrical tube was optimized by Light-tools software and its stray light suppressing was evaluated. The simulation results show that after the ultra-short embedded structured was used in the baffle, its whole length and weight are just one third of that of the traditional one. The Point Source Transmission (PST) shows a declining curve, and the PST value of the optical system is less than 10^{-7} when the off-axis angle is wider than 25° . Furthermore, the designed baffle suppresses the undesired stray-light flux at

收稿日期:2016-07-25;修订日期:2016-09-13.

基金项目:总装备部预研基金资助项目(No. 9140A21010114HT05063)

the focal plane, the suppressed effectiveness is the same as that of the off-axis and coaxial systems, and meets the requirements of the applications.

Key words: space remote sensor; baffle; ultra-short embedded structure; Point Source Transmission (PST); stray light

1 引言

太阳、月亮等强辐射源引起的杂散光是影响空间遥感器成像质量的重要因素^[1]。为了尽量减少视场外直接进入空间遥感器的杂散光,通常情况下,遥感器的外遮光罩要满足一定的长度,至少能够限制以杂散光抑制角入射的太阳光直接入射到主镜上。此外,不同的对地观测遥感器对轴外杂散光的抑制要求也不同,通常要求轴外强光源的消光比在 10^6 以上,因此,国内外较为常见的空间遥感器的外遮光罩往往具有较长的结构尺寸或较宽的口径^[2-6]。较长的外遮光罩会增大光机系统的尺寸、重量和惯性。然而,空间遥感器的外遮光罩尺寸受限于火箭整流罩的空间包络、卫星整体结构、航空相机搭载平台等结构尺寸。国外主要采用可展开式紧凑型遮光罩的设计。为了避免发射过程中火箭整流罩对遮光罩的空间约束,美国 Aerospace and Bonded Structures (ABS) 公司与 QinetiQ North America (QNA) 联合为 NASA 研制了一款通用的可展开遮光罩^[7],但其缺点在于结构设计复杂、稳定性差、质量大,不利于遥感器的姿态控制。本文提出了一种超短型内嵌式外遮光罩设计,该遮光罩具有质量轻、惯性小、结构稳定性好的优点,利于空间遥感器的尺寸和姿态控制。以某航空飞机搭载的离轴反射式光学载荷为例,利用 Light-tools 软件建立了杂散光分析模型,对超短型内嵌式遮光罩的结构和尺寸进行了优化设计。最后,通过仿真计算系统的杂散光系数和点源透过率 (Point Source Transmission, PST),综合评估了该遮光罩的杂散光抑制能力。

2 遮光罩基本结构模型

遮光罩的基本原则是在不遮挡视场内光线的前提下,尽可能地阻拦视场外的杂散光进入光学系统^[8]。本文提出一种超短型内嵌式外遮光罩结构,采用两层或多层遮光筒结构阻挡不同视场外的强杂散光源进入光学系统。根据实际的杂散光路径,遮光筒可以设计成圆柱筒、方筒、锥状或其他形状。为避免遮光筒遮挡成像光线,本文采用非对称的结构形式。由连接杆将多层遮光筒固定在连接法兰周侧,连接法兰前端面开有螺纹孔,将超短型内嵌式遮光罩固定在空间遥感器的入口,其结构模型如图 1 所示。

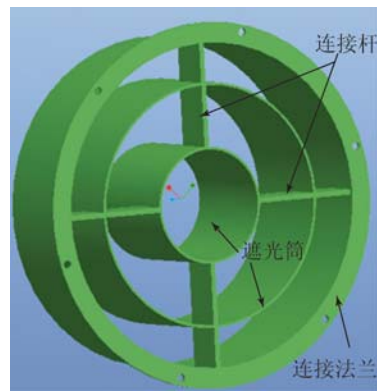


图 1 超短型内嵌式遮光罩基本结构

Fig. 1 Structure of ultra-short embedded baffle

3 遮光罩设计实例

本文以某航空相机搭载的光学载荷为例,该载荷的光路如图 2 所示。光学系统是由主、次、三镜组成的离轴反射式结构,后续透镜组由多片透镜组成。为了减小结构尺寸,次镜和三镜间增加了折转镜,通过光路的折转使结构紧凑。遮光罩的设计指标要求如表 1 所示。

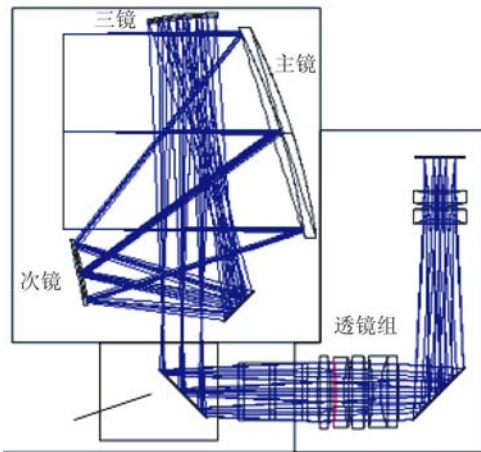


图 2 光机系统的简化模型图

Fig. 2 Lay out of optical and mechanical system

表 1 遮光罩设计指标要求

Tab.1 Index requirements in baffle design

设计指标	值
杂散光抑制角/(°)	40
视场角/(°)	1.5×1.5
通光口径/mm	120
PST 指标要求	9.1×10 ⁻⁶
尺寸/mm	≤80

3.1 传统设计

一般来说,外遮光罩主要用于抑制大角度入射的光线,其长度受到光机系统结构尺寸的约束,但至少能够限制以杂散光抑制角入射的太阳光直接入射到主镜上。目前,不同结构类型的外遮光罩结构尺寸的计算方法及公式有很多,较常用的计算方法为^[9-12]:

$$L = d / (\tan \omega - \tan \theta), \quad (1)$$

$$D = d + 2 \times L \times \tan \theta, \quad (2)$$

其中: θ 为半视场角; ω 为杂散光抑制角; d 为通光口径; L 为遮光罩长度; D 为遮光罩最外端的开口直径。

根据式(1)和式(2)计算出杂散光抑制角为40°时,图2所示的离轴三反系统所需的外遮光罩长度 $L = 145.3 \text{ mm}$,遮光罩最外端的开口直径 $D = 123.8 \text{ mm}$ 。

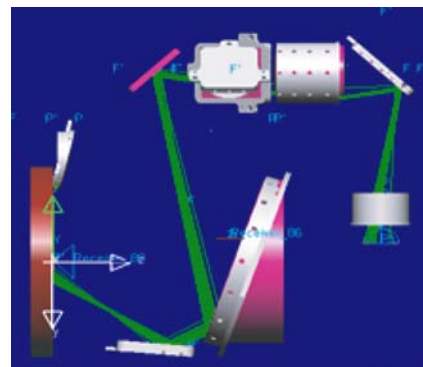
3.2 超短型内嵌式遮光罩设计

根据图1所示的超短型内嵌式遮光罩的结构形式,利用 Light-tools 软件对光机系统建模。然

后基于蒙特卡罗法,通过光线追迹定位轴外大角度入射光线进入系统的路径,并根据此路径确定超短型内嵌式遮光罩遮光筒的数量和结构形式。Light-tools 软件进行仿真分析前,首先设置光机系统各元件表面的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)属性。镜框、镜筒等机械结构的表面涂覆有消杂光黑漆,该模型的总散射率设置为 15%,吸收率设置为 85%;镜面等光学元件模型的总散射率设置为 3%,反射率设置为 97%,透镜的透过率设置为 99%,反射率设置为 1%。Light-tools 对光机系统进行光线追迹,确定轴外大角度入射光线进入光学系统的主要杂散光路径有以下两种:

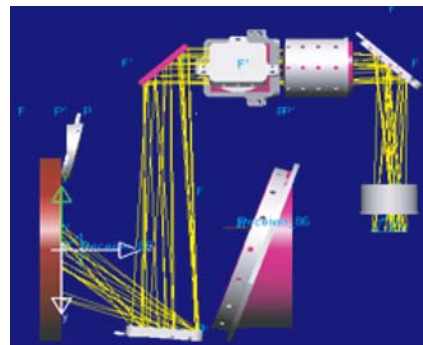
(1)视场外大角度入射光线未经过次镜反射直接进入光学系统到达像面的一次杂散光,如图3(a)所示;

(2)视场外大角度入射光线未经过主镜和次镜的反射到达像面产生的一次杂散光,如图3(b)所示。



(a)路径 1

(a)First ray path



(b)路径 2

(b)Second ray path

图 3 杂散光路径

Fig. 3 Simulation of stray light paths using light-tools

根据杂散光的主要路径,优化第 2 节超短型内嵌式遮光罩的基本结构。为了避免遮光罩遮挡视场内成像光线,本文设计的遮光罩采用非对称双层同心圆柱筒结构,如图 4 所示,遮光罩总长度 $L=46$ mm。由设计结果可知,超短型内嵌式遮光罩的总长仅为传统设计所需长度的 $1/3$,大大缩小了遮光罩的结构尺寸。

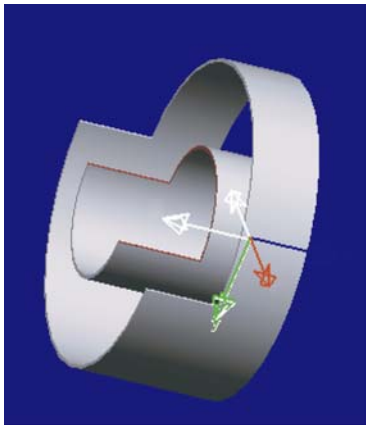


图 4 优化的超短型内嵌式遮光罩结构

Fig. 4 Optimized structure of ultra-short embedded baffle

3.3 杂散光分析结果

本文通过计算光学系统的轴外视场 PST,结合杂散光系数,综合评估光学系统的杂散光抑制能力。轴外视场 PST 定义为视场角为 θ 的点源目标辐射经过光学系统后,在像面产生的辐射照度 $E_d(\theta)$ 与输入的辐射照度 $E_i(\theta)$ 的比值^[13-15],即:

$$PST(\theta) = E_d(\theta) / E_i(\theta). \quad (3)$$

采用 Light-tools 软件对光学系统进行仿真分析,算得该系统的杂散光系数为 1.4%。同时,本文对光学系统为 $2 \sim 40^\circ$ 离轴角的杂散光进行详细分析,计算得到的 PST 如图 5 和表 2 所示。角度的确定主要考虑视场角附近的入射光线及杂散光抑制角内的入射光线对成像的影响,由于遮光罩能够阻挡角度大于 40° 的入射光线,因此离轴角大于 40° 的入射光线不予考虑。

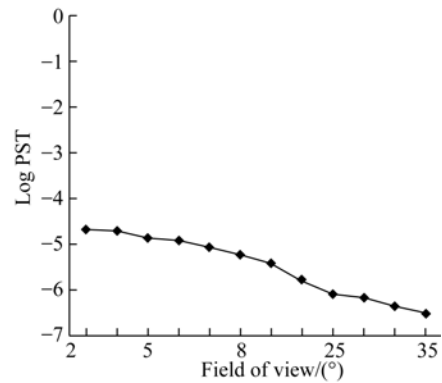


图 5 各离轴角下光学系统的 PST 曲线

Fig. 5 PST curve of optical system with different off-axis angles

表 2 各离轴角的 PST

Tab. 2 PST results at different off-axis angles

入射角/(°)	PST
2	2.24×10^{-5}
3	2.12×10^{-5}
5	1.44×10^{-5}
6	1.35×10^{-5}
10	6.13×10^{-6}
15	4.09×10^{-6}
20	1.81×10^{-6}
25	8.47×10^{-7}
30	7.13×10^{-7}
35	4.38×10^{-7}
40	3.19×10^{-7}

由分析结果可知,随着离轴角的增大,光学系统的 PST 一直在下降。当离轴角为 2° 时,系统 PST 为 10^{-5} ;当离轴角为 25° 时,光学系统 PST 降低至 10^{-7} 以下,说明该系统能够有效抑制各种离轴角度入射光线产生的一次散射杂散光。对于轴外小角度入射光线产生的散射,其他几种离轴、同轴反射式系统也无法消除,本文所设计的超短型内嵌式遮光罩的杂散光抑制能力与其他离轴、同轴系统大体相当^[8,16-18]。

4 结 论

本文提出了一种超短型内嵌式遮光罩设计方案。以某航空相机搭载的光学遥感器为例,采用 Light-tools 软件优化设计了双层同心圆柱筒结构的遮光罩,并对该遮光罩的杂散光抑制效果进行评估。模拟计算结果表明,外遮光罩采用超短型内嵌式的结构后,遮光罩总长度、质量均减小为

传统设计结果所需长度的 1/3。由系统的 PST 曲线可知,PST 曲线整体呈下降趋势,且在离轴角大于 25° 后,光学系统点 PST 降低到 10^{-7} 以下,本文所述遮光罩能够有效抑制视场外的杂散光,其杂散光抑制能力与其他离轴、同轴系统大体相当,能够满足使用需求。此类型遮光罩的基本结构及优化结构还适用于其他结构尺寸要求严格的光学系统,具有一定的通用性和实用性。

参考文献:

- [1] 陈世平. 景物和成像条件对遥感图像品质的影响[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(1): 1-7.
CHEN SH P. The effects on remote sensing image quality from scenes and imaging conditions [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(1): 1-7. (in Chinese)
- [2] 廖志波, 伏瑞敏, 焦文春. 航天遥感器三反同轴系统遮光罩程序自动化设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 385-388.
LIAO ZH B, FU R M, JIAO W CH. Design of baffle for three-mirror optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 385-388. (in Chinese)
- [3] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331-2336
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Stray light suppression of space-bore differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2331-2336. (in Chinese)
- [4] DZAMBA T, ENRIGHT J. Ground testing strategies for verifying the slew rate tolerance of star trackers [J]. *Sensors*, 2014: 3947-3952.
- [5] ZEH T, GAL C, KAISER S, *et al.*. MERTIS-Reflective baffle design and manufacturing [J]. *SPIE*, 2010, 7808: 1-3.
- [6] SHI R B, ZHOU J K, JI Y Q, *et al.*. Stray light analysis and baffle design of remote sensing [J]. *SPIE*, 2009, 7506: 1-5.
- [7] PETER A W, MARK J S, BENJAMIN J D. Lightweight optical barrel assembly structures for large deployable space telescopes [J]. *SPIE*, 2009, 7436: 74360B.
- [8] STAUNDER J L. *Stray Light Comparison of Off-axis and On-axis Telescopes* [D]. USA: Utah State University, 2000.
- [9] 李芸, 相里斌, 李立波. 一种新型空间相机遮光罩的设计与仿真[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 41-44.
LI Y, XIANG L B, LI L B. Design and simulation of the baffle of a new type space camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 41-44. (in Chinese)
- [10] 邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 605-608.
ZOU Y G, FAN X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 605-608. (in Chinese)
- [11] 刘洋, 方勇华, 吴军, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1164-1168.
LIU Y, FANG Y H, WU J, *et al.*. Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectrometer system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1164-1168. (in Chinese)
- [12] 张欢. 星敏感器光学系统设计及杂散光抑制技术的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015
ZHANG H. *Design of Optical System for Star Sensor and Study on Stray Light Suppressing Technology* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015. (in Chinese)
- [13] STANDER J L, ESPLIN R W. Stray light design and analysis of the sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) telescope [J]. *SPIE*, 1998, 437: 52-59.
- [14] 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.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of space-borne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 621-625. (in Chinese)

- [15] 颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程,2010,18(2): 289-292.
YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 289-292. (in Chinese)
- [16] 李晓平,沙晟春,胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2603-2608.
LI X P, SHA SH CH, HU T L. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2603-2608. (in Chinese)
- [17] SHOLL M J, GROCHOCKI F S, FLEMING J C, *et al.*. Stray light design and analysis of the SNAP telescope [J]. *SPIE*, 2007, 6675: 66750C.
- [18] 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.
MEI CH, ZHOU S ZH, YAN P P, *et al.*. Design of an outer baffle based on scattering model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122005. (in Chinese)

作者简介:



李洋(1985—),女,吉林省吉林人,硕士,工程师,2007年于长春理工大学获得学士学位,2011年于中科院南京天文光学与技术研究所获得硕士学位,主要从事光学设计与仿真方面的研究。
E-mail:lyshelly@sina.cn



廖志波(1981—),男,湖南长沙人,硕士,高级工程师,2004年、2006年于北京理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学检测技术及光学仿真方面的研究。E-mail:bitliaozeb@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)