

## 偏视场光学系统中心遮光罩设计

王臣臣<sup>1,2</sup>, 邹刚毅<sup>1,2</sup>, 李瑞昌<sup>1,2</sup>, 樊学武<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 对偏视场光学系统的遮光罩进行优化设计。偏视场在一个方向上非对称, 设计主镜内遮光罩需要进行光线追迹, 难度大。采用痕迹图方法获得光线在空间的位置坐标, 确定系统有效视场大小及挡光部分位置, 对内遮光罩的挡光部分进行开口处理, 得到一个上短下长的特殊“鸭嘴型”遮光罩, 降低设计难度。经过优化分析, 最终的主镜内遮光罩沿 Z 轴方向的尺寸缩减为原来的一半, 在 Y 轴方向上尺寸减小来降低非有效视场的大小。使用 TracePro 软件对设计好的遮光罩进行建模、仿真, 得到 PST 在离轴角度为 30° 时达到  $10^{-9}$  量级, 小于系统的  $5.59 \times 10^{-7}$  指标要求。结果表明: 使用痕迹图法对偏视场光学系统的主镜内遮光罩进行设计是可行的。

**关键词:** 偏视场; 杂散光; 中心遮光罩; PST

**中图分类号:** O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0318002

## Centric baffle design of partial field optical system

Wang Chenchen<sup>1,2</sup>, Zou Gangyi<sup>1,2</sup>, Li Ruichang<sup>1,2</sup>, Fan Xuewu<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A partial field optical system baffle was designed and optimized. Partial field was non-symmetry along one direction, so a large number light tracing was needed to design the centric, which made it difficult to design. A method of footprint diagram was used to get the coordinate of special light in the space, the size of effective field and the part of baffle blocking light. The part blocking light was removed and a "duck mouth shaped" baffle was got, which can decrease the difficulty of design. By optimizing the design, length of final designed baffle was half of the former one, and reduced the size along Y direction, which can reduce more stray light to enter the later optical system directly. Baffle was modeled and simulated by Solidworks and TracePro software, the PST is about  $10^{-9}$  when the off-axis angle is 30°, which is less than  $5.59 \times 10^{-7}$ , the requirement of the system. The result of the simulation shows that using method of footprint diagram to design inner baffle of a partial field optical system is feasible.

**Key words:** partial field; stray light; centric baffle; PST

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-10

作者简介: 王臣臣(1987-), 男, 博士生, 主要从事光学设计、杂散光分析方面的研究。Email: wangchenchen@opt.ac.cn

通讯作者: 樊学武(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计、光学检测方面的研究。Email: anxuewu@opt.ac.cn

## 0 引言

光学系统在轨工作时需要使用遮光罩对杂散光进行抑制来提高成像质量。来自非目标的杂散光进入到探测器后,会影响采集图像的质量,包括像面对比度、像面层次、彩色饱和度等,严重时杂散光可将目标信号完全淹没<sup>[1]</sup>,从而降低光学系统对地成像的分辨能力。美国的 GOES-I/M、欧盟的 Meteosat-5/7 系列成像仪都受到太阳杂散光的直射,前者因此曾暂时关机<sup>[2]</sup>。

对称视场光学系统遮光罩进行设计时,可以通过几何计算得出口径、长度大小,根据模拟结果对遮光罩进行优化设计。而基于光学系统选型等各种原因,特别是共轴三反光学系统被广泛采用。为避免光线被阻挡,三反光学系统一般采用偏视场设计。偏视场光学系统的主要特点为视场具有非对称性,需要对大量边缘光线进行追迹来进行主镜内遮光罩设计,难度大。文章使用痕迹图法和描点法对偏视场光学系统主镜内遮光罩进行设计,降低设计难度。利用 Solidworks、Tracepro 对设计好的遮光罩建模以及杂散光抑制效果进行模拟。对模拟结果进行分析以及对遮光罩结构多次优化设计,结果显示修改后的遮光罩在离轴角为 30° 的 PST 值为  $7.59 \times 10^{-9}$ ,对杂散光的抑制效果符合系统的指标要求。

## 1 光学系统与遮光罩设计

### 1.1 光学系统设计

光学系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of optical system

Aperture	F#	$2\omega$	Wavelength
1 400 mm	10	1.23°	450-800 nm

初始结构需要根据光学系统的焦距、F 数以及视场大小来进行选择。根据以上提出的结构参数特点,选择三反系统作为初始结构,无需使用矫正镜进行色差矫正<sup>[3-6]</sup>。为得到更加紧凑的系统,在三镜前加入平面镜进行反射,使像面位于主镜后。系统的有效视场是沿着 Y 轴向上倾斜的环形偏视场<sup>[7]</sup>,光学结构如图 1 所示。

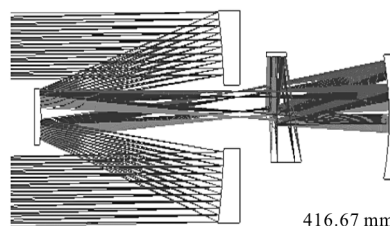


图 1 光学系统结构图

Fig.1 Diagram of optical system

### 1.2 光学系统遮光罩设计

对于光学系统遮光罩的设计,需要对光学视场进行充分利用才能保证对有效视场的光束不进行遮挡的同时对来自非目标的杂光进行充分的抑制。需要对光学系统的遮光罩进行特殊化设计来满足系统对杂散光的抑制需要。偏视场光学系统遮光罩设计的主要技术途径如下:

(1) 来自目标的光束入射到主镜上为环形圆视场,对于主镜外遮光罩、次镜遮光罩<sup>[8]</sup>采用传统遮光罩的设计方法进行设计。同时为进一步降低杂散光对光学系统成像质量的影响,在主次镜遮光罩上加上挡光环<sup>[9]</sup>。

(2) 光束经过次镜进行反射后,在 X 轴和 Y 轴上的分布呈现明显的不对称性,需要进行差异性设计。根据有效光线经过主镜和次镜反射后在同一位置截面的分布来决定形状,因此主镜内遮光罩的形状将会变成一个开口的“鸭嘴形”遮光罩。

### 1.3 主镜中心遮光罩的设计

如图 1 所示,系统的有效视场是沿着 Y 轴倾斜的偏视场,在主次镜之间插入虚拟面可以得到经过主镜反射后的视场痕迹为一个离心的圆形,而通过次镜反射后的痕迹是一个离心的环形图。按照传统遮光罩的设计,不能保证上下视场边缘的光线同时经过遮光罩的边缘,需要根据视场的特殊化而进行差异性设计。设计方法为:

(1) 以次镜顶点为中心,通过光线追迹得到光线相交的上交点(1 200,187)与下交点(761.754, -120),在此位置插入一个虚拟面,得到经过主镜反射的光线在该虚拟面上的中心椭圆孔半径为 183 mm×150 mm,沿 Y 轴正方向离心 30 mm。将该孔作为前表面,主镜中心位置处半径为 210 mm×185 mm,沿 Y 轴离心 30 mm 的圆作为后表面作一个锥形筒,即中心孔径

的遮光罩,如图 2 所示。

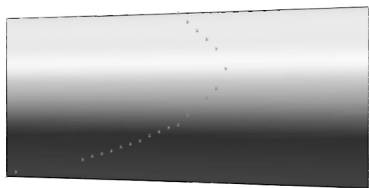


图 2 主镜中心遮光罩

Fig.2 Central baffle of primary mirror

(2) 由于视场在 Y 轴上非对称,经过主镜反射的光与次镜反射的光在上下、左右相交的点不在一个面上,需要对主镜中心遮光罩进行开口处理。

对主镜中心遮光罩进行开口处理可以通过光线追迹的方法进行计算。选择好特定的边缘视场,计算经过主镜反射的边缘光线与经过次镜反射的另外一条边缘视场光线相交的点。通过将求解出来的每个点的位置进行描点来画出中心遮光罩的开口形状。通过光线追迹的方法进行求解遮光罩的开口形状,需要进行大量的光线追迹,求解复杂且难度较大,这里采用另外一种方法:痕迹图法。

在使用光学软件对光学元件进行模拟时,通常会考虑元件的实际加工制造。为节约制造成本和节省材料,光学系统设计完成后需要确定透镜或反射镜的最小有效口径。痕迹图是光学软件通过对边缘光线进行追迹来确定光线在每个光学元件表面所走的足迹,可以用来确定光学元件的最小有效使用面积,使用痕迹图法得到经过主镜反射和次镜发射在同一虚拟面上的痕迹图如图 3 所示。

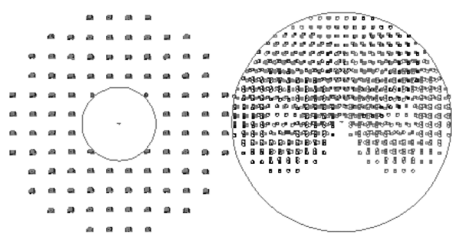


图 3 经过主镜反射和次镜反射在同一虚拟面上的痕迹图

Fig.3 Footprints on the same virtual surface are reflected by primary mirror and secondary mirror

以主镜顶点为中心坐标,描点初始位置距离次镜顶点 761.7 mm 通过在主镜、次镜之间距离相同的位置插入多个虚拟面,相邻两个虚拟面之间的距离为 24.4 mm 在同一个虚拟面上得到光线经过主镜反

射后在光学元件上的光线范围以及经过次镜反射经过相同虚拟面光线的范围。通过对前者光线痕迹图的内包络以及后者光线痕迹图的外包络的交点进行求解来得到光线的相交位置,得出两个包络相交的上下交点坐标:(-,-120)、(-,-111.3)、(-,-87.9)、(-,-81.5)、(-,-76.8)、(-,-71.7)、(-,-64.2)、(-,-58.4)、(-,-52.2)、(-,-42.8)、(-,-35.4)、(-,-27.4)、(187,-22.8)、(172.9,-4.5)、(156,12)、(139.8,28.7)、(122.2,46.4)、(84.5,84.5)。

描点后用平滑曲线将各个点进行连接,切除后可得到符合要求的主镜中心遮光罩,遮光罩的厚度为 1 mm,误差要求小于 0.01 mm,如图 4 所示。

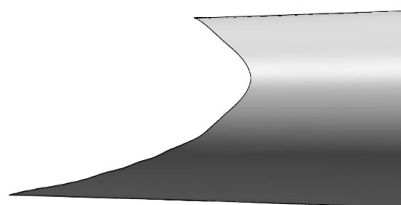


图 4 主镜中心遮光罩最终设计图

Fig.4 Final design diagram of primary mirror central baffle

## 2 遮光罩的杂光抑制分析及优化

设计好的遮光罩需要进行杂散光的模拟分析,根据杂散光的抑制效果对设计的遮光罩进行优化。

### 2.1 杂散光环境分析

在轨工作时,杂散光的来源主要可以分为外部辐射、内部辐射以及来自光线的非正常传递。后两种主要针对红外等特定光学系统,这里只讨论外部辐射<sup>[10-11]</sup>。地气光到达遮光罩外截面的照度大小为:

$$E'_{\text{earth}} = E_{\text{earth}} \times \text{PST} \times \cos \theta \times (D_{\text{in}}/D_{\text{out}})^2 \quad (1)$$

倘若要消除杂光对图像的影响,必须使  $E' \leq E_{\text{CCD}}$ 。来自太阳的光不会直接照射进入到光学系统内,所以进入遮光罩的杂散光主要是地气光。地球半径为 6 400 km,大气层高度为 90 km,光学系统轨道高度为 1 000 km,可以计算得出地气光的入射角  $\theta=30^\circ$ ,取  $L=2\ 520\ \text{mm}$ ;在保证有效视场所有光线通过的前提下,即在整个视场范围内保证对有效光线不阻拦,取  $D_{\text{out}}=1\ 508\ \text{mm}$ ,则  $D_{\text{in}}=1\ 400\ \text{mm}$ ,即  $\text{PST} \leq 5.59 \times 10^{-7}$ 。另外,光学系统还能使杂光照度降低一个数量级,取  $\text{PST} \leq 5.59 \times 10^{-8}$  时,  $E_{\text{CCD}} \gg E'$ ,即杂光在探测器上的照度要小于光学系统所要探测的极限星等在探测器

上形成的照度大小,此时目标探测受杂光的影响较小,可以被探测到。

### 2.2 相机杂光模型的建立及杂光分析

使用 Tracepro 软件对光学系统的设计结果及设计的遮光罩建立三维几何模型,对所设计的遮光罩的杂散光抑制能力进行相关分析。光学系统的表面散射特性使用双向散射分布函数(BSDF)的 AB<sub>g</sub> 模型来表示:

$$BSDF = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g} \quad (2)$$

式中:β<sub>0</sub>为反射光线在散射面上的投影;β为散射光线在散射面上的投影。对于光学反射表面,根据材料特性的不同以及抛光方法的不同等等,上式中的g一般可以选取0~3中的数值。对于理想漫反射体,g=0。在这里,光学元件的g取2.172,A取6.385×10<sup>-6</sup>,B为1×10<sup>-4</sup>。

在该系统中,对于光学系统主镜外遮光罩,次镜遮光罩以及主镜中心遮光罩和挡光环涂层的BSDF参量为:A=0.007,B=0.1,g=0<sup>[2]</sup>。三维模型如图5所示。

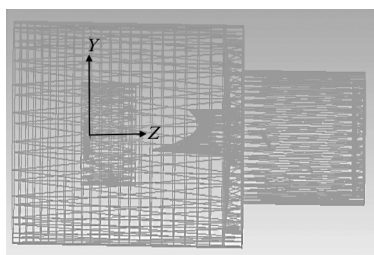


图 5 优化后 3D PST 曲线

Fig.5 3D PST curve after optimization

通过软件对设计的光学系统遮光罩的杂散光抑制能力进行模拟是对光学系统进行实际应用的重要前提,根据模拟的结果对遮光罩进行反复修改优化,直至满足系统对杂散光的抑制要求。对于杂散光的抑制能力的评价一般使用两种方法:一种是杂散光测量法;另一种为杂散光分析法。目前最为常用的方法是通过 TracePro 软件建立系统的模型进行仿真来对消杂光效果进行评价,根据模拟的结果可以得到消杂光系统的点源透射比(PST)曲线<sup>[13-14]</sup>,分析系统杂散光抑制能力。

在 Tracepro 中选取 476 519 根光线在不同的离轴视场进行追迹,设定光线追迹阈值为 1×10<sup>-8</sup>。对处于-80°~80°之间离轴角的杂光源进行光线追迹,

并通过 Matlab 绘制得到的 PST 曲线如图 6 所示。

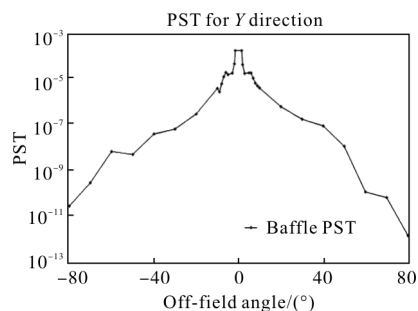


图 6 光学系统的 PST 曲线

Fig.6 PST curve of optical system

经过分析发现,在离轴角为 30°角得到的 PST 为 1.11×10<sup>-7</sup>,大于指标要求,需要对设计的遮光罩进行优化设计。

### 2.3 内遮光罩优化设计

经过分析发现杂光通过主镜中心遮光罩的非有效视场部分进入到后置光学系统而导致杂光在探测器上的照度增大,如图 7 所示。按照上述计算方法,主镜内遮光罩下端长度比上端长度大 440mm 左右。但是考虑内遮光罩的长度过长容易引起安装困难,且前伸部分为尖锥状,尺寸较小作用不大,因此其总长在适当折中后截断至 486mm。同时为了减少主镜中心遮光罩的非有效视场部分,将下半部遮光筒改成了椭圆截面的一部分,降低了遮光罩的横截面积,设计结果如下。

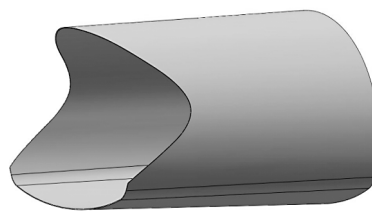


图 7 优化后的主镜中心遮光罩设计图

Fig.7 Diagram of primary mirror centric baffle after optimization

通过将修改后的主镜中心遮光罩在 TracePro 中进行建模,通过软件模拟可以得到光学系统的 PST 曲线,结果如图 8 中底部图线所示。

通过对比发现,优化后的遮光罩的杂散光抑制能力有明显提高。在离轴角为 30°的 PST 值为 7.59e-9,离轴角为-30°的 PST 值为 4.63e-9,比优化之前的结果小两个数量级,离轴角度大于 30°的范围,杂散光的抑制能力明显提高,设计结果符合指标要求。

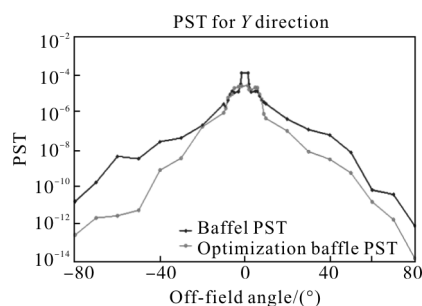


图 8 优化后的 PST 曲线图

Fig.8 PST curve after optimization

### 3 结 论

根据光学系统杂散光分析理论,对偏视场光学系统的遮光罩进行了设计。主镜外遮光罩和次镜遮光罩采用了传统遮光罩设计方法进行设计。由于偏视场在一个方向上具有非对称性,不能使用传统方法进行设计。通过光线追迹的方法需要进行大量的运算,提高设计难度。通过使用痕迹图,在软件中可以定位光线在空间中的轨迹,对边缘光线的位置进行定位。根据得到的数据使用描点法对设计的内遮光罩的遮挡部分进行去除处理。在软件 TracePro 中对设计的遮光罩进行了建模和模拟,根据模拟结果对遮光罩进行了优化,得到了一个尺寸小,加工难度小的新型主镜中心遮光罩,两侧进行了开口处理。通过仿真分析得出,在离轴角为 30° 以后的系统的点源透射比 PST 值为 10<sup>-9</sup> 量级,轴外杂散光的抑制水平很好,符合指标要求。

### 参考文献:

[1] Hao Yun cai, Xiao Shuqin, Wang Lixia. Status and development of stray light elimination technology for space-borne optical sensors[J]. *Beijing Institute of Space Machine and Electricity*, 1995, 15(3): 40-50. (in Chinese)  
郝云彩, 肖淑琴, 王丽霞. 星载光学传感器消杂光技术现状与发展[J]. *中国空间科学技术*, 1995, 15(3): 40-50.

[2] Ghaffarian B. Solar intrusion thermal analysis [C]//SPIE, 1996, 2812: 251-259.

[3] Guo Yongxiang, Li Yongqiang, Liao Zhibo, et al. Novel design of off-axis three reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 546-550. (in Chinese)  
郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反射光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 546-550.

[4] Yu Linyao, Wei Qun. Design of long focal catadioptric

optical system for multi-guided system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 234-240. (in Chinese)

虞林瑶, 魏群. 中波红外长焦距折反光学系统设计[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 234-240.

[5] Tian Tiejun, Wang Hong. Optical zoom system with long focal length and large aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2369-2374. (in Chinese)  
田铁印, 王红. 长焦距大口径连续变焦距光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2369-2374.

[6] Zhang Bao, Cui Enkun, Hong Yongfeng. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 395-401. (in Chinese)  
张葆, 崔恩坤, 洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 395-401.

[7] Gong Dun. Review on mapping space remote sensor optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714-724. (in Chinese)  
巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述 [J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 714-724.

[8] V Yu Terebizh. Optimal baffle design in a cassegrain telescope [C]//SPIE, 2001, 11(1): 171-191.

[9] Li Taoran, Jiang Xiaojun. Stray light analysis and control for 50 BiN telescopes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3618-3619. (in Chinese)  
李陶然, 姜晓军. 50BiN 望远镜杂散光分析及控制方案[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12): 3618-3619.

[10] Shi Guanghui. Methods preventing stray light emerged in cassagrain systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5) :10-16. (in Chinese)  
史光辉. 消除卡塞格林系统杂散光的措施 [J]. *光学精密工程*, 1997, 5(5): 10-16.

[11] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 35(2): 316-318. (in Chinese)  
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. *红外与激光工程*, 2008, 35(2): 316-318.

[12] Pompea S M, Pfisterer R N, Morgan J S. A stray light analysis of apache point observatory 3.5 meter telescope system[C]//SPIE, 2003, 4842: 128-138.

[13] Stauder J L. Stray light comparison of off-axis and on-axis telescope [D]. US: Utah State University, 2000: 196.

[14] Xu Liang, Zhao Jianke, Xue Xun, et al. PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (4): 1289-1295. (in Chinese)  
徐亮, 赵建科, 薛勋, 等. 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1289-1295.