

# 天基红外成像光学系统杂散光分析与抑制

赵宇宸<sup>1,2</sup> 许艳军<sup>1</sup> 沙 巍<sup>1</sup> 张立国<sup>1</sup> 任建岳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 杂散光是影响光学系统成像质量的重要因素之一, 因此对杂散光的分析与抑制成为现代红外光学系统设计过程中的一个重要环节。根据杂散光抑制要求, 确定了天基红外成像光学系统的结构形式; 分析了系统存在的杂散光源, 计算了系统点源透过率(PST)须满足的条件; 设计并分析了遮光罩、挡光环、遮光板、光阑和消杂散光材料等杂散光抑制方法; 在杂散光分析软件TracePro中建立系统模型, 分别对系统内部及外部杂散光进行分析, 计算并绘制了PST曲线。结果表明, 系统内部杂散光为 $1.53 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ , 系统外部杂散光PST曲线整体为下降趋势, PST在离轴角度为 $\pm 3^\circ$ 时达到 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ , 系统对杂散光的抑制能力完全满足成像质量要求。

**关键词** 散射; 红外成像系统; 点源透过率; 仿真分析

**中图分类号** TN214 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1016001

## Stray Light Analyze and Suppress of the Space-Borne Infrared Optical System

Zhao Yuchen<sup>1,2</sup> Xu Yanjun<sup>1</sup> Sha Wei<sup>1</sup> Zhang Ligu<sup>1</sup> Ren Jianyue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Stray light is one of the most important factors that affect the image quality of optical system, thus the analysis and suppression of the stray light becomes a significant part in the design processes of the modern infrared optical system. According to the requirements of stray light, the configuration of the space-borne infrared optical system is determined; the sources of the stray light is analyzed, and then point source transmittance (PST) is taken as the standard to evaluate the analysis; the methods of the stray light suppression are designed, such as baffle, vanes, occulters, stops and material; the model of the system is established and its stray light is analyzed with TracePro, and then the PST curves of the system are calculated. The results indicate that the thermal emission of the system is  $1.53 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ ; the PST curves of the system are declining, at off-field angle  $\pm 3^\circ$ , the PST of the system arrives at  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ , stray light suppression of the system satisfies the requirements of the image quality.

**Key words** scattering; infrared imaging system; point source transmittance; simulated analysis

**OCIS codes** 110.3080; 160.4760; 290.5890

## 1 引 言

杂散光是指到达光学系统探测器上的非成像光线, 它对光学系统的影响是降低系统的调制传递函数(MTF)及信噪比(SNR), 严重时甚至会导致目标信号完全浸没在杂散光所引起的噪声中。天基红外光学系统的杂散光主要可以分为三类: 1) 外部杂散光, 光学系统外部亮光源所产生的杂散光; 2) 内部杂散光, 光学系

收稿日期: 2015-04-02; 收到修改稿日期: 2015-04-25

基金项目: 国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 赵宇宸(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事空间相机杂散辐射分析及热控制技术方面的研究。

Email: bernard19@163.com

导师简介: 任建岳(1952—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感器的研制和性能评价方面的研究。

E-mail: reny@sohu.com

统内部各组件热辐射所产生的杂散光;3) 视场内亮背景所产生的杂散光<sup>[1-3]</sup>。本文主要针对前两类杂散光进行分析与抑制,而第三类是系统必须接收到得杂散光,无法通过设计抑制结构等措施对其进行衰减,通常采用信号处理的方法对其进行抑制。

目前国内外对于杂散光的研究主要采用计算机辅助设计及仿真的方法,这种方式可以避免高昂的实验费用及较长的实验周期。采用软件建模仿真的方法不仅可以得到杂散光的数值信息,同时还可以通过光线追迹更直观的了解杂散光的传播路径,对光学、结构设计及实际的研制过程具有重要的指导意义。目前使用较为广泛是LightTools、ASAP、GUERAP、APART/PADE和TracePro等基于蒙特卡罗法的光线追迹软件<sup>[4]</sup>。

## 2 光学系统结构

杂散光是影响红外光学系统成像质量的重要因素之一,因此在光学设计过程中应采用对杂散光具有较强抑制能力的光学结构,其主要特点是:1) 采用离轴光学系统,减小中心遮拦所产生的衍射杂散光,提高系统的MTF;2) 采用具有中间像面的光学系统,在中间像面处设置视场光阑和里奥光阑对系统外部杂散光及衍射杂散光进行抑制;3) 采用折反射式光学系统,在透镜组中设置冷光阑作为红外探测器的制冷窗口,在抑制杂散光的同时增加系统设计自由度,扩大视场<sup>[5]</sup>。

综上所述,系统采用次、三镜成中间像面的离轴折反射式光学系统。系统由一个离轴三反光学系统,一个折叠镜和一个透镜组构成。系统通过折叠镜对光路进行折转,将三镜放置在主镜后部,光学系统如图1所示。系统的入瞳为600 mm,有效焦距为1200 mm, $F$ 数为2,视场为 $3^\circ \times 0.15^\circ$ ,工作波长为 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ ,电荷耦合器件(CCD)像元尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ ,系统工作的轨道高度为500 km。离轴三反光学系统偏心与倾斜如表1所示。

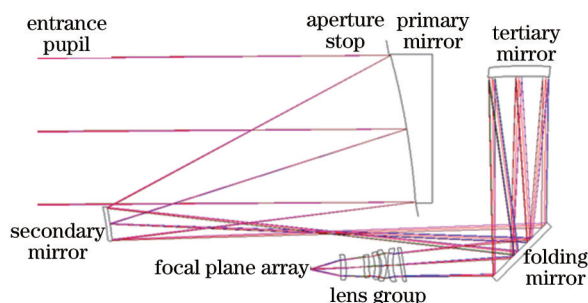


图1 离轴光学系统结构图

Fig.1 Configuration of three mirror anastigmat (TMA) optical system

表1 离轴光学系统倾斜与偏心量

Table 1 Tilts and decenters of TMA optical system

Mirror	Tilts /( $^\circ$ )	Decenters /mm
Primary mirror	0	-510
Secondary mirror	2.6753	17.5360
Tertiary mirror	3.500	68.5250

## 3 杂散光分析

### 3.1 杂散光计算

杂散光在探测器上的能量可以由(1)式得出:

$$\Phi_F = \Phi_S \times f_{GCF}(S, F) \times f_{BRDF} \times \pi, \quad (1)$$

式中 $\Phi_F$ 为探测器接收到得杂散光能量, $\Phi_S$ 为光源的能量, $f_{GCF}(S, F)$ 为几何构成因子,代表光源与探测器之间的几何关系, $f_{BRDF}$ 为表面漫反射特性的双向反射分布函数(BRDF),代表了表面的散射特性<sup>[6]</sup>。

由(1)式可以看出,通过减小 $f_{GCF}(S, F)$ 和 $f_{BRDF}$ 可以降低杂散光对探测器的影响。 $f_{GCF}(S, F)$ 可以通过设计抑制结构减小其对杂散光的影响,而 $f_{BRDF}$ 与表面粗糙度和表面污染程度等因素相关,其可以通过ABg模型来表示:

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

式中  $A, B, g$  为三个拟合系数,  $\beta$  为散射光线的单位矢量在散射面上的投影,  $\beta_0$  为反射光线的单位矢量在散射面上的投影<sup>[7-8]</sup>。

### 3.2 杂散光评价指标

通常认为杂散光在探测器上的辐照度应小于目标辐照度的 10%, 以保证系统信噪比满足成像质量要求。对于天基红外成像光学系统而言, 其视轴与地球的夹角很小, 因此外部杂散光主要来自于视场外的地球大气辐射。采用归一化的点源透过率对系统的杂散光进行评价, 其定义是光学系统视场外某一角度  $\theta$  的点光源发出的光线, 经过光学系统后在探测器上的辐照度  $E(\theta)$  与该点光源在光学系统入口处的辐照度  $E_i(\theta)$  的比值<sup>[9]</sup>, 其大小为:

$$S_{\text{PST}} = \frac{E(\theta)}{E_i(\theta)}, \quad (3)$$

地球红外辐射是系统主要的视场外扩展光源, 其在光学系统入瞳处的平均辐照度为:

$$E_i(\theta) = L_e \Omega_e \cos \theta_e, \quad (4)$$

式中  $L_e$  为地球表面在指定波段范围内的辐射亮度,  $\Omega_e$  为地球红外辐射对光学系统入瞳的立体角,  $\theta_e$  为地球与光学系统入瞳的夹角。

目标范围内地球红外辐射在光学系统入瞳处的辐射能通量为:

$$\varphi_e = L_e A \Omega_i \cos \theta_i, \quad (5)$$

式中  $A$  为目标面积,  $\theta_i$  为空间光学系统视轴与目标和相机连线之间的夹角,  $\Omega_i$  为目标与光学系统入瞳之间的立体角, 其大小可以由(6)式求得:

$$\Omega_i = \frac{\pi D^2}{4H^2}, \quad (6)$$

式中  $D$  为光学系统入瞳直径,  $H$  为空间光学系统的轨道高度。

因此, 光学系统探测器所接收到的目标能量可以表示为:

$$\varphi_{\text{td}} = \frac{\pi}{4} L_e A \Omega_i \tau_0 \cos \theta \left( \frac{D}{f} \right)^2, \quad (7)$$

式中  $\tau_0$  为光学系统透过率,  $f$  为光学系统的有效焦距。

考虑到在实际成像过程中, 像斑的中心不能与一个像元完全重合, 在计算过程中通常取 2 pixel×2 pixel 的面积。因此, 在目标范围内地球红外辐射在探测器上弥散斑的辐射照度为:

$$E_{\text{td}} = \frac{\varphi_{\text{td}}}{4a}, \quad (8)$$

式中  $a$  为单个像元的面积。由此可以得到, 视场外角度为  $\theta$  的光线在探测器上的辐照度  $E(\theta)$  应该满足:  $E(\theta) \leq 0.1E_{\text{td}}$ 。

## 4 抑制杂散光结构设计

### 4.1 遮光罩设计

遮光罩及挡光环的作用是尽可能阻挡视场外的杂散光进入光学系统, 同时使到达探测器的杂散光至少经过两次以上的反射或散射, 对杂散光进行数量及能量上的衰减<sup>[10]</sup>。遮光罩最常见的位置位于光学系统入瞳与主镜之间, 通常采用光线追迹的方法进行设计, 其结构设计简图如图 2 所示。其中:  $A$  为遮光罩的长度(一般由系统尺寸确定);  $B$  为挡光环的边缘位置(根据不同方向视场角, 确定挡光环边缘位置), 虚线为预留的加工余量(一般取 1~1.5 mm);  $C$  为光学系统入口处挡光环;  $D$  为主镜下边缘与入口处挡光环顶端连线; 在虚线  $B$  与直线  $D$  的交点处设置第二条挡光环  $E$ ; 直线  $F, G$  为系统入口下部挡光环经过第二条挡光环及遮光罩与主镜下部的连线, 其与  $B$  的交点为第三条挡光环  $H$  的位置; 以此类推, 可以得到内遮光罩直至孔径光阑之间各挡光环的位置。由于系统的视场为条形视场( $3^\circ \times 0.15^\circ$ ),  $X$  方向视场大于  $Y$  方向, 采用圆形挡光环会造成  $Y$  方向杂散光增加, 因此遮光罩内的挡光环的通光口径根据不同视场采用非对称设计, 遮光罩及挡光环设计如图 2 所示。

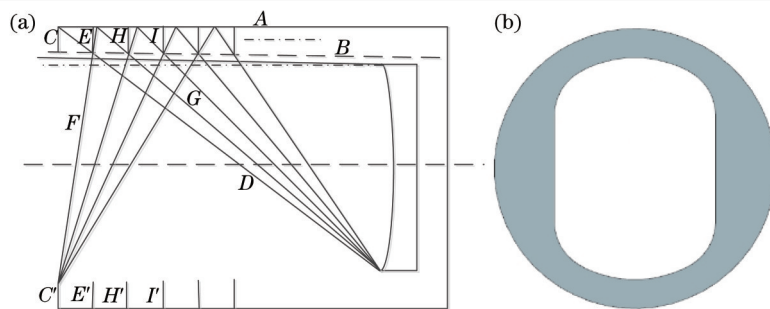


图2 遮光罩及挡光环示意图。(a) 遮光罩; (b) 挡光环  
Fig.2 Schematic diagram for baffle and vane. (a) Baffle; (b) vane

### 4.2 外遮光罩

外遮光罩的设计受系统尺寸的约束,一般情况下外遮光罩长度越长,系统抑制视场外杂散光的能力也就越强。但外遮光罩长度过长,会导致系统的一阶频率过低,使系统整体结构难以实现。外遮光罩主要用于防止视场外大入射角的光线直接照射主镜,进而反射到光学系统内部。为防止视场内光线被阻挡,取外遮光罩的圆锥角为 $1.5^\circ$ ,外遮光罩的长度及孔径为:

$$D_2 = D_1 + 2L \tan(\theta), \quad (9)$$

$$D_1 = L \tan \alpha - L \tan(\theta), \quad (10)$$

式中 $D_1$ 为系统入瞳直径, $D_2$ 为外遮光罩入口直径, $\theta$ 为外遮光罩圆锥角度, $\alpha$ 为视场外光线抑制角度(取 $40^\circ$ )。因此在考虑一定的加工和安装误差后,可以得到: $D_2 = 640 \text{ mm}$ , $L = 740 \text{ mm}$ 。外遮光罩如图3所示。

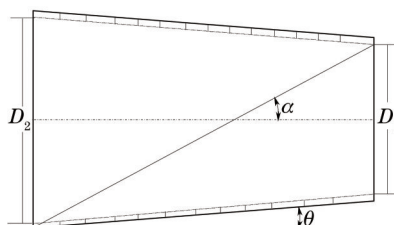


图3 外遮光罩及挡光环示意图  
Fig.3 Schematic diagram for fore-baffle and vane

### 4.3 光 阑

对于所涉及的光学系统而言,在系统中可以设置四类光阑,分别为:1) 孔径光阑:限制光束孔径的光阑,其位于主镜前 $60 \text{ mm}$ 处。2) 视场光阑:限制系统成像的最大范围,位于中间像面位置,其主要作用是限制大离轴角度的光线进入光学系统或直接照射到系统的探测器。3) 里奥光阑:位于中间像面及探测器前部,用于阻挡孔径光阑及视场光阑所产生的衍射杂散光<sup>[5]</sup>。4) 冷光阑:红外探测器在低温环境中才能达到更好的成像效果,因此一般红外成像系统在探测器前一定距离处需设置冷光阑。冷光阑与光学系统的出瞳重合,作为探测器制冷窗口,实现对红外探测器的制冷,进一步减小由系统热辐射所产生的杂散光。

同时根据系统结构,折叠镜与三镜安装在主镜背板后,背板下部的通光孔径使光学系统正常工作。这种结构安排可以减小系统的尺寸,同时通光孔径可以起到光阑的作用,将折叠镜与三镜在空间上与其它光学元件隔离,减小系统的杂散光。光阑及通光孔径位置如图4所示。

### 4.4 遮光板及消杂散光材料

由于系统的前置光学系统为离轴三反系统,通过次、三镜之间的折叠镜减小系统轴向尺寸。折叠镜位于主镜背板的通光孔后,为了防止光线不经由主镜直接照射到折叠镜,在通光孔上部到视场光阑之间及次镜周围放置遮光板。

消杂散光材料是从能量上对杂散光进行抑制的有效方法之一,通过不同材料的匹配实现对外部及内部杂散光的抑制。消杂散光材料的选择如表2所示。

设定遮光罩及挡光环的发射率为 $0.9$ ,透镜筒及内部里奥光阑发射率为 $0.04$ ,反射镜镜面发射率 $0.01$ ,反射镜镜体发射率为 $0.7$ ,透镜材料中Ge的发射率为 $0.03$ ,ZnSe的发射率为 $0.0005^{[11]}$ 。

表 2 消杂散光材料

Table 2 Restrain stray light material

Key surface	Illuminated surface	Material requirements
No	No	High absorptivity
Yes	No	Low emissivity
No	Yes	High absorptivity
Yes	Yes	As appropriate

最终在杂散光分析软件 TracePro 中建立系统的几何模型,如图 4 所示。

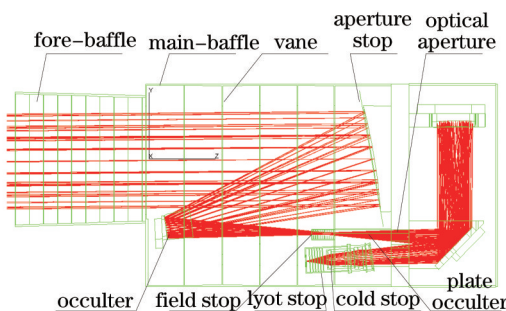


图 4 系统模型

Fig.4 Model of the system

## 5 杂散光仿真与结果分析

### 5.1 模型建立

以上根据相关理论设计了红外光学系统抑制杂散光结构,为测试设计结果,将上述设计的三维模型代入到 TracePro 杂散光分析软件中。软件中各表面的散射特性采用 BRDF 的 AB<sub>g</sub> 模型表示,各表面具体参数如下<sup>[11-12]</sup>:

- 1) 反射镜表面(SiC): $\lambda=10\ \mu\text{m}$ , $r\geq 95\%$ , AB<sub>g</sub> 模型  $A=0.0015$ ,  $B=0.0014$ ,  $g=2$ ;
- 2) 透射镜: $\lambda=10\ \mu\text{m}$ , $\tau\geq 95\%$ , AB<sub>g</sub> 模型  $A=1\times 10^{-5}$ ,  $B=0.015$ ,  $g=2$ , BTDF 模型  $A=0.0001$ ,  $B=0.015$ ,  $g=2$ ;
- 3) 遮光罩及挡光环(表面喷 Z306 黑漆):  $\alpha=90\%$ ,  $r\geq 2\%$ , AB<sub>g</sub> 模型  $A=0.0066$ ,  $B=0.1$ ,  $g=2$ ;
- 4) 透镜筒内部(表面镀金处理): AB<sub>g</sub> 模型  $A=1\times 10^{-5}$ ,  $B=0.01$ ,  $g=2$ ;
- 5) 探测器: $\alpha=100\%$ 。

其中 $\lambda$ 为波长, $\alpha$ 为吸收率, $\varepsilon$ 为发射率, $r$ 为反射率, $\tau$ 为透过率。

根据上述分析,可以计算得到目标范围内的红外辐射在探测器上的辐照度为:

$$E_{\text{td}} = 1.76 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2, \quad (11)$$

因此,当  $E(\theta)$  满足下式时,杂散光抑制满足系统指标要求。

$$E(\theta) \leq 1.76 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2. \quad (12)$$

### 5.2 内部杂散光分析

系统前置光学系统(离轴三反系统及折叠镜)工作温度为 20 °C,红外探测器至冷光阑的工作温度为 80 K。将系统所有表面按照上述参数设置成面光源,且均为朗伯体表面,出射波长为系统的工作波长,对系统内部杂散光进行光线追迹,得到系统各表面在内部杂散光影响中所占比例,如图 5 所示。通过分析数据可以得到,系统结构组件中主镜背板、视场光阑及遮光板内表面在内部杂散光影响中占主导作用。因此调整相关表面的发射率,分别对发射率为 0.9、0.5、0.3 及 0.1 进行内部杂散光分析,得到不同发射率下探测器接收到的辐照度,如表 3 所示。

由表 3 可以看出,在发射率为 0.5 以下时,光学系统内部杂散光在探测器上的辐照度满足(12)式。因此,可以认为系统的内部杂散光满足成像质量要求。



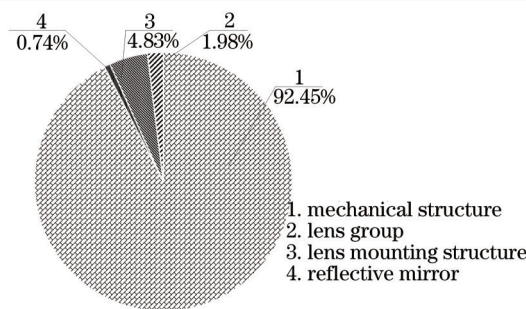


图5 内部杂散光分析

Fig.5 Analyze of internal stray light

表3 不同发射率下的内部杂散光

Table 3 Internal stray light in different emission

Emissivity	0.9	0.5	0.3	0.1
Irradiance $/(W/m^2)$	$2.15 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-3}$

### 5.3 外部杂散光分析

点源透过率  $PST(\theta)$  可以反映光学系统对视场外杂散光的抑制能力,在仿真过程中,采用软件自带的重点采样技术对光学系统进行分析。在两方向视场角  $0^\circ \sim 40^\circ$  之间依次取 37 个离轴角度进行光线追迹,并绘制  $PST$  分布曲线,如图 6 所示。

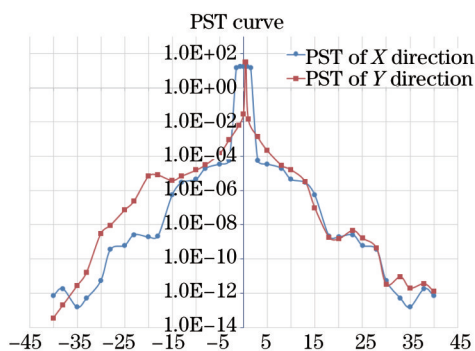


图6 PST曲线

Fig.6 PST Curves

从图 6 中可以看出,系统  $PST$  曲线整体呈下降趋势,在离轴角  $\pm 15^\circ$  以后,系统的  $PST$  下降明显;离轴角度在  $\pm 15^\circ \sim \pm 40^\circ$  之间有明显的波动,且在  $-Y$  方向离轴角  $-15^\circ \sim -25^\circ$  之间系统  $PST$  大于  $+Y$  方向,这是由于杂散光在挡光环上经过多次反射后进入系统探测器所造成的;两个方向  $PST$  曲线在离轴角为  $\pm 3^\circ$  时都达到了  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。因此,系统对于外部杂散光的抑制满足成像质量要求。

## 6 结 论

对离轴折反射式光学系统的杂散光进行了分析,针对光学系统的结构特点设计了杂散光抑制结构,并通过对比关键表面的发射率,对系统内部杂散光进行抑制。采用 TracePro 对光学系统进行仿真,系统内部杂散光在探测器上的辐照度小于  $1.53 \times 10^{-3} W/m^2$ ,外部杂散光从  $PST$  曲线图中可以看出,曲线整体呈下降趋势,在离轴角度为  $\pm 3^\circ$  时  $PST$  达到  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ ,因此该系统具有较好的杂散光抑制能力。同时,采用软件建模仿真是杂散光分析与抑制的有效方法,在已知光学系统参数及系统工作环境的前提下,建立杂散光分析的数学模型,对系统的杂散光环境进行分析计算,通过与仿真结果的对比得到满足系统杂散光抑制要求的设计结构,这种方法得到的结果具有一定的参考价值,对杂散光抑制设计及工程实现具有指导作用。

### 参 考 文 献

1 Wang Wenfang, Yang Xiaoxu, Jiang Kai, *et al.*. Stray light analysis of catadioptric infrared optical system with large field[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(1): 138-142.

- 王文芳, 杨晓许, 姜 凯, 等. 大视场红外折反光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 138-142.
- 2 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
- 朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- 3 Lin Jianchun, Sun Liwan, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0116001.
- 林剑春, 孙丽崑, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0116001.
- 4 Li Da. Design and Stray Light Analysis of Reflective Solar Coronagraph[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 53-57.
- 李 达. 反射式日冕仪的设计与杂散光分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 53-57.
- 5 Martin E Caldwell, Peter F Gray. Application of a generalized diffraction analysis to the design of nonstandard Lyot-stop systems for earth limb viewing radiometers[J]. Opt Eng, 1997, 36(10): 2793-2808.
- 6 Huang Qiang. Analysis of stray light in space optical system[J]. Infrared, 2006, 27(1): 26-33.
- 黄 强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. 红外, 2006, 27(1): 26-33.
- 7 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.
- 8 Lu Haiping, Yuan Xiangyan, Zhang Kaiyuan. Infrared background radiation removing design and simulation of antarctic survey telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1122002.
- 卢海平, 袁祥岩, 张凯元. 南极红外巡天望远镜红外背景辐射抑制方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1122002.
- 9 Liao Sheng, Shen Mangzuo. Point source transmittance of stray light of infrared optical systems and its measurements[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996, 15(5): 375-378.
- 廖 胜, 沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试[J]. 红外与毫米波学报, 1996, 15(5): 375-378.
- 10 Du Baolin, Li Lin, Huang Yifan, *et al.*. Optimum design and analysis of vane in satellite remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(S2): 233-236.
- 杜保林, 李 林, 黄一凡, 等. 星载遥感器的挡光环优化设计与分析[J]. 光学学报, 2008, 28(S2): 233-236.
- 11 Li Gang. Research about Space-Based IR-Optical System for Space Object Detection[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 53-56.
- 李 刚. 空间目标天基红外探测光学系统研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013: 53-56.
- 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: 刘丰瑞