

静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计

王 威^{1,2} 陈凡胜¹

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 静止轨道(GEO)成像系统外遮光罩设计是空间载荷设计的重要组成部分。根据成像系统所处的空间杂散环境特点,通过分析不同太阳遮蔽角对外遮光罩几何结构的影响,确定了合适的遮光罩高度一直径比;研究了不同离轴角下刀口式和蜂窝式结构对杂光抑制能力的差别,Tracepro 软件仿真结果表明,在相同的遮蔽角下前者比后者抑制能力高 5%~28%。在此基础上,利用黑体腔工作原理,设计实现了一种新型二级遮光罩。最后结合某静止轨道成像系统进行仿真验证。结果表明,在太阳遮蔽角处,外遮光罩点源透射率(PST)曲线值小于 10^{-8} ,杂光抑制效果好,同时很好地解决了单级遮光罩内边缘效应问题,满足工程应用要求。

关键词 光学设计; 静止轨道; 太阳遮蔽角; 遮光罩设计; 边缘效应; 点源透射率

中图分类号 V447.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0916001

Design of Baffle of Imaging System for Earth Observation on Geostationary Earth Orbit

Wang Wei^{1,2} Chen Fansheng¹

(¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Baffle design is an important part of geostationary earth orbit (GEO) imaging system design engineering. According to characteristic of space stray radiation environment, the influence of the varied sun shading angle to the baffle's structure is analyzed, and height-diameter ratio is discussed. Then, the difference of stray light suppression between bladed and honeycombed structure is studied in different off-axis angles, and the Tracepro simulation results show that the bladed one has a better performance of suppression than honeycombed one with improvement from 5% to 28%. Moreover, referred to the works of blackbody, an improved two-stage baffle is obtained, and an example of baffle design of GEO imaging system is cited. It is indicated that the point source transmittance (PST) curve is less than 10^{-8} at sun shading angle, and the problem of diffraction effects in inner edge of single-stage structure is removed. The new structure is better in stray light suppression and satisfies the engineering application requirements.

Key words optical design; geostationary earth orbit; sun shading angle; baffle design; edge effect; point source transmittance

OCIS codes 220.4830; 220.3620; 220.2740

1 引 言

静止轨道(GEO)对地观测卫星在轨运行时经常会受到空间杂散辐射的干扰,干扰情况随季节和时间差别很大,会导致光学系统信噪比下降,成像质

量变差,严重时甚至无法正常工作^[1],因此消杂光抑制是静止轨道光学系统设计的重要研究内容。对于一个成型的光学系统,有效的杂光抑制方法是在光线入瞳处安装外遮光罩,对其进行设计和分析已成

收稿日期: 2014-03-29; 收到修改稿日期: 2014-04-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程基金(O9KBD013G0)

作者简介: 王 威(1987—),男,博士研究生,主要从事空间红外光学系统设计方面的研究。

E-mail: wangweisitp@163.com

导师简介: 陈凡胜(1978—),男,博士,研究员,主要从事空间红外弱小目标探测系统总体技术方面的研究。

E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

为对地观测卫星的关键技术之一。

光学系统的杂散辐射是指到达系统像面的非成像视场区域内光线的辐射,以背景辐射噪声的形式影响目标信号,严重时将会湮没信号光,使系统无法正常工作^[2]。静止轨道卫星由于工作于距地面36000 km的高空,地球辐射和反照对其影响可以忽略不计,太阳辐射是成像系统的主要杂散辐射来源。通过设置外遮光罩,可以实现对太阳杂散辐射和太阳外热流入侵的抑制,同时可以有效减少宇宙空间粒子对光学镜面的污染^[3]。目前,工程上通常采用桶状或锥状结构与内部挡光措施相结合的一级形式,但抑制效果并非非常理想,且对挡光环内边缘尖角的漫散射缺乏限制措施。

本文讨论了静止轨道太阳杂光对成像系统影响的情况,通过软件仿真分析选取适当的遮光罩内部

结构,在此基础上给出了扩展型二级刀口式遮光罩具体设计方法,并结合某静止轨道光学系统进行实例仿真。

2 系统分析

2.1 静止轨道太阳遮蔽角分析

处于静止轨道的凝视成像卫星与地球时刻保持同步运动,光学结构入口始终朝向地球,根据日地运动规律,太阳作为最大的杂散光源,会对光学系统产生杂散干扰和午夜太阳入侵的现象,从而影响成像质量。由于地球公转、自转周期差异,南北、东西方向太阳光对光学系统影响不尽相同。设定卫星运行在地球静止轨道,遮光罩视场中心对准赤道星下点位置。以一年为周期,使用STK软件为太阳光入射角进行仿真,如图1(a)所示。

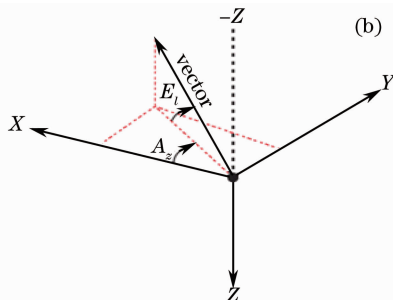
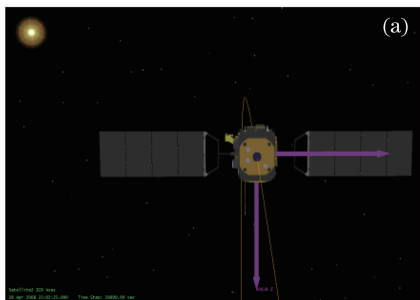


图1 (a) 静止轨道卫星运行轨迹 STK 仿真; (b) VVLH 坐标系

Fig. 1 (a) STK simulation of satellite on GEO; (b) VVLH coordinate system

采用 STK 软件卫星仿真传感器观测(VVLH)坐标系为基准,如图1(b),其中 X 轴指向飞行器速度方向,Z 轴指向地心,Y 轴根据右手定则得到。太阳对卫星指向角由入射角表示,可得一年内东西方向上太阳入射角度的变化如图2所示。

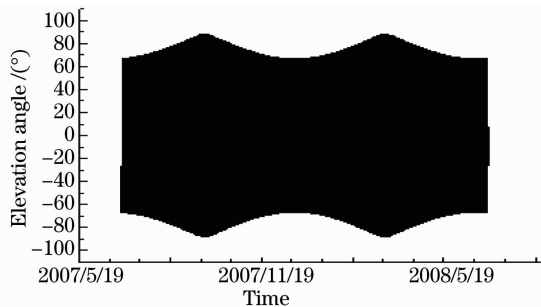


图2 一年内东西方向太阳入射角变化

Fig. 2 Vary of sun incidence angle in east-west direction in a year

可以看出,东西方向,由于同时受到地球自转和公转的作用,太阳入射角度变化较快,变化范围为 $\pm 90^\circ$,其中春秋分时,地球东西张角 $\pm 8.7^\circ$ 为地影

区,耗时约1.33 h,这段时间内太阳光完全被地球遮挡而无法到达遮光罩,除此而外,均需考虑太阳光影响。而在南北方向上,杂散光线入射角度变化主要受地球公转影响,角度变化比较缓慢,太阳在地球南北回归线之间 $\pm 23.5^\circ$ 范围内做往复运动。其中,春秋分时,太阳和卫星在同一水平面内,遮光罩不起作用;夏冬至时分,太阳与遮光罩夹角为最大,为 $\pm 23.5^\circ$ 。

进入外遮光罩的太阳光线多少与太阳光和遮光罩中心夹角有关。典型遮光罩几何结构如图3所示。

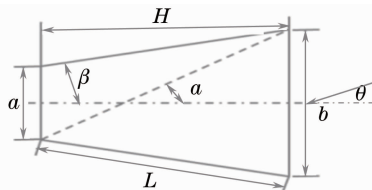


图3 典型遮光罩几何结构图

Fig. 3 Geometric structure of typical baffle structure

图3中 a 、 b 分别为遮光罩前后口径, α 为太阳遮蔽角, β 为光学系统半视场角, θ 为太阳光与遮光罩中心夹角。可以看出,当 $90^\circ \geq \theta \geq \alpha$, 太阳杂散辐射

对光学系统的影响受遮光罩性能限制,通过合理设置太阳遮蔽角 α ,可以实现对太阳杂散光有效抑制的目的。理论上讲,太阳遮蔽角 α 越小,杂散抑制效果越好,但随着 α 的减小,遮光罩尺寸变大,实际加工检测难度加大,甚至无法实现。 α 与遮光罩几何尺寸间关系满足

$$\begin{cases} \frac{H}{a} = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha - \beta)} \\ \frac{L}{a} = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} \\ \frac{b}{a} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)} \end{cases} \quad (1)$$

已知某成像系统光学结构为同轴透射式结构,半视场角 $\beta=9^\circ$,结合(1)式可得遮光罩几何尺寸随太阳遮蔽角的变化曲线如图4所示。

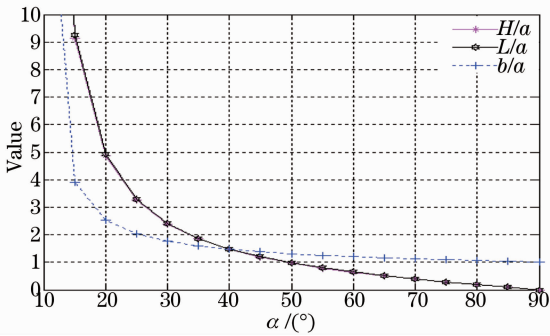


图4 遮光罩几何尺寸与太阳遮蔽角变化关系曲线图

Fig. 4 Curve graph between baffle size and sun shading angles

由图4可以看出,太阳遮蔽角取 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时,遮光罩几何尺寸变化出现分水岭现象,当遮蔽角小于 30° 时,进一步减小遮蔽角,遮光罩高直比呈指数形式增加,遮蔽角的变化带来尺寸增大较为明显,加工难度、成本加剧;而当遮蔽角大于 40° ,再继续延长遮光罩长度,即减小遮光罩高直比,对应的太阳杂光入射角的抑制效果不够明显。考虑实际加工工艺与具体系统设计要求,遮光罩高直比选取为 $1.5 \sim 2.5$ 之间,由此可以得到对应的太阳遮蔽角的取值。

2.2 内部结构分析

目前常用的遮光罩内部结构主要有蜂窝式结构和刀口式结构。根据杂光抑制机理,前者主要依赖较低的自身反射率和很强的后向散射,使得大部分入射杂散光沿入射方向返回入射空间;后者则是通过在不同挡光环形成杂光“陷阱”,使杂散光在其中进行多次散射和吸收,达到抑制目的。国内学者对于两种结构的设计、优化、性能改进等也都做了大量

研究^[4-7],但关于二者在杂光抑制能力的对比分析报道甚少。

为了选择适当的初始内部结构,对蜂窝式和刀口式内部结构进行机械建模。针对某已有遮光罩结构模型,内部结构分别设置为蜂窝结构和刀口结构,其中,前者结构参数为蜂窝高度 4.2 mm ,六边形单边长度 5 mm ,单边厚度 0.03 mm ;刀口结构参数为,刀口倾角 30° ,边缘圆角 0.1 mm ,刀口厚度 3 mm ,挡光环间距公差 $\pm 0.5 \text{ mm}$,且满足两种结构长度相等。在此基础上,设置相同外部输入光源,相同内部表面属性和材料属性,分析不同内部结构对杂散光抑制情况的差异。模型参数及结构图分别如表1和图5所示。

表1 遮光罩模型参数

Table 1 Parameters of baffle model

Parameter	Honeycombed	Bladed
Length of sunshield /mm	415	415
Waveband / μm	3~5	3~5
Sun shading angle /($^\circ$)	35	35
Inner coat	Black	Black
	nickel 2-2	nickel 2-2

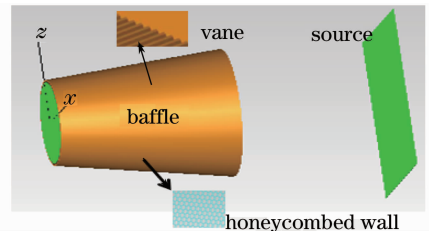


图5 遮光罩模型图

Fig. 5 Draw of baffle model

使用 Tracepro 杂光分析软件进行杂散光追迹,设置追迹阈值为 10^{-7} ,光源照度为 100000 W/m^2 ,光线条数为 10000 条。分别计算两种内部结构下遮光罩出口处的点源透射率(PST)曲线,计算结构及二者对比情况如图6所示。

从上图看出刀口式结构要比蜂窝式结构抑制杂散光的能力更强,并且离轴角越小效果越明显。在太阳遮蔽角范围内,刀口遮光罩相对蜂窝遮光罩抑制能力能够提高 $5\% \sim 28\%$ 。刀口式内壁结构一方面可以起到光阑的作用,另一方面可以有效抑制外热流的入侵,减小相机受热变形的影响。其最突出的作用在于对大离轴角的杂散光具有非常有效的抑制作用,通过仿真分析,拟采用刀口式结构进行遮光罩模型设计。

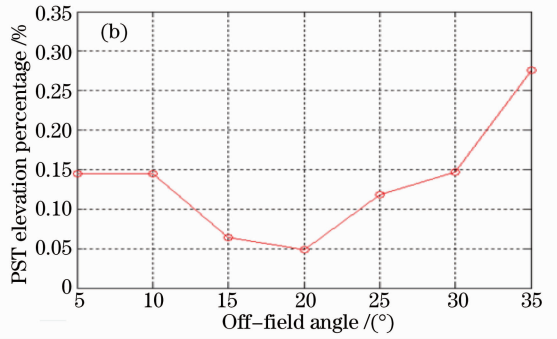
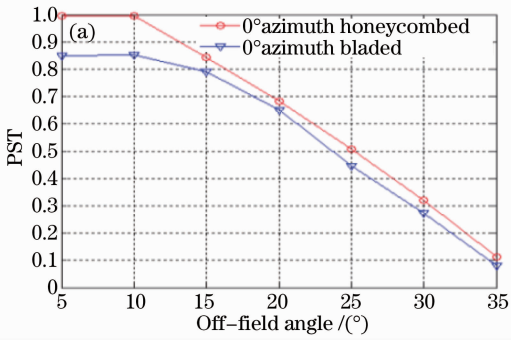


图 6 (a) 两种结构的 PST 曲线图和(b)刀口结构相对蜂窝结构抑制能力提高百分比

Fig. 6 (a) PST curve versus each structure; (b) improved percentage of bladed structure's PST to honeycombed one

3 遮光罩优化设计

传统一级刀口式遮光罩可以比较好地抑制外部杂光对主光学系统的影响,但对于从刀口边缘发出的漫射光,由于边缘效应的存在,光线方向不易控制,会直接到达主光学系统形成杂散辐射。边缘效应主要包括边缘尖角的散射效应,定义 ρ 为挡光环边缘尖角向主光学系统散射的表观散射率,则散射效应可表示为边缘散射辐射与到达挡光环整个间隔 S 内的入射辐射之比,表达式如下^[8]

$$\rho = \frac{r\rho_0}{2S\sin\theta_o\sin\theta_i} \times$$

$$[(\theta_i - \theta_o + \pi)\cos(\theta_i - \theta_o) - \sin(\theta_i - \theta_o)], \quad (2)$$

式中 r 为刀口边缘的表面半径, S 为刀口间距, ρ_0 为朗伯体表观散射率, θ_i 、 θ_o 分别为杂散光线入射角和出射角。其几何结构示意图如图 7 所示。

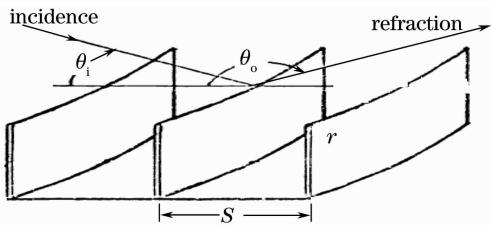


图 7 遮光罩内刀口边缘表观散射示意图

Fig. 7 Scattering diagram of inner edge apparent scattering effect of baffle

从(2)式可以看出,当进光量一定时,表观散射率与刀口边缘锐度和光线入射角度相关。对于遮光罩底端的挡光环,相比于杂散辐射入射量,边缘效应产生的不定向杂散光线散射起主导作用,且随着刀口边缘半径和入射光线角度的增大,刀口边缘散射效应影响加强,成为进入主光学系统的主要杂散光源。为了实现既利用刀口式结构良好的消杂光效果,又防止直接接触大量入射光带来的不确定性传播和散射的不利影响,根据黑体原理,在刀口式结构

前加类黑体腔结构,将遮光罩扩展为二级形式,通过前端腔体的多次反射和吸收,消除大部分杂散光。同时利用刀口式结构的“陷阱”作用对进入二级遮光罩的边缘散射及衍射杂光进行消除。一二级配合作用,以达到消除太阳杂散辐射的目的。这种设计方法将全反射结构与挡光环结构相结合,仅在结构的末段设置必要数目的刀口挡光环,在实现杂光抑制效果的同时,避免了三段式结构全部使用挡光环结构带来的加工难度,降低了实际生产成本。整体构架如图 8 所示。

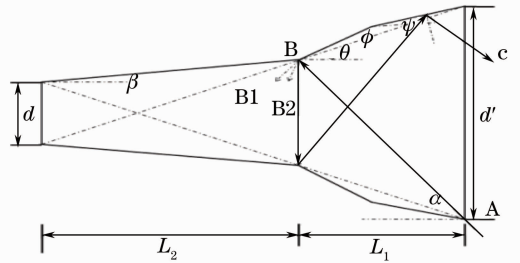


图 8 扩展型二级遮光罩结构图

Fig. 8 Structure of an improved two-stage baffle

图 8 中 β 为光学系统半视场角, θ 为一级遮光罩半张角, α 为太阳遮蔽角, d 为光学系统入瞳口径, L_1 、 L_2 为遮光罩长度。由上图推导可得,遮光罩一二级长度为^[9]

$$\begin{cases} L_1 = \frac{d(\tan\beta + \tan\theta)}{(\tan\alpha - \tan\theta)(\tan\theta - \tan\beta)} \\ L_2 = \frac{d}{\tan\theta - \tan\beta} \end{cases} \quad (3)$$

构建满足要求的一级遮光罩结构,以一束光线为例,考虑三次反射作用,类黑体结构腔光线追迹图如图 8 所示。外部太阳杂散辐射以遮蔽角 α 从 A 点进入一级遮光罩,在内壁 B 点发生反射,后经一级遮光罩内壁三次反射,将腔内表面涂黑,设腔壁的吸收率为 0.9,反射率为 0.1,以三次反射为例,腔体对

入射光的吸收可以达到 0.999,很好地实现了对入射光线的一次抑制作用。未被吸收的光线绝大多数通过内壁的全反射作用最终从 C 点返回外部空间。同时极少数由于内壁边缘效应在 B 点发生散射,散射光 B1、B2 进入二级遮光罩,在刀口式挡光环的“陷阱”作用下,通过多重散射和吸收被完全消除。

通过合理设置结构张角 θ 、 ϕ 、 ψ ,保证以太阳遮蔽角入射的光线经一级遮光罩内壁多次反射后未被吸收部分基本都能返回入射空间。一级遮光罩散射产生的杂光则通过二级遮光罩得到解决。根据全反射原理,在三次反射条件下,一级遮光罩各结构张角应满足

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{\tan \beta + \tan \alpha}{2} \\ \phi \geq \frac{90^\circ - \alpha}{2} \\ \psi = \frac{90^\circ - \alpha}{3} \end{cases} \quad (4)$$

4 实例仿真分析

以某静止轨道对地观测相机为例,考虑实际加工能力,结合太阳遮蔽角的分析结果,选取遮蔽角为 36° 。表 2 给出相机技术指标。

表 2 成像系统技术参数

Table 2 Specification of imaging system

Parameter	Value
Field of view	$18^\circ \times 18^\circ$
Waveband	$3 \sim 5 \mu\text{m}$
Sun shading angle	36°
Aperture	180 mm
Length of structure	$\leq 1 \text{ m}$
Weight	$< 4 \text{ kg}$

由(2)、(3)式计算可得一级遮光罩角度 θ 、 ϕ 和 ψ 分别为 25.5° 、 25.75° 和 17.17° ,两级遮光罩长度分别为 249.39 mm 和 497.85 mm。机械结构模型如图 9 所示。

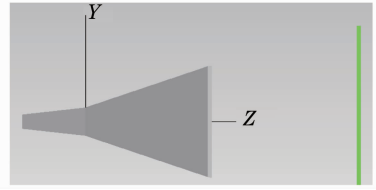


图 9 遮光罩杂散光分析模型

Fig. 9 Analysis model of baffle stray light

使用 Tracepro 软件进行杂散光分析,采用 ABg 模型描述遮光罩表面散射特性,ABg 模型计算方法为

$$V_{\text{BRDF}} = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}, \quad (5)$$

式中 g 描述表面散射随散射角变化而衰减的程度,主要依赖于材料特性和表面的抛光方法、抛光程度。如果 $g=0$ 则表面为朗伯反射面。一级遮光罩设计为吸收系数比较高的 Z306 黑漆涂层,理想漫反射面;蜂窝状结构设置为全吸收体,在中波红外波段,吸收系数为 0.99,对应的全积分散射为 0.01;底端靠近光学元件的表面因为红外波段要考虑其辐射对光学系统的影响,采用比辐射率比较低的黑镍,其吸收系数为 0.86。遮光罩的外侧设置为理想的完美吸收。针对太阳光在不同方向作用的不同,追迹俯仰、方位方向杂散辐射情况,绘制 PST 曲线,得到结果如图 10 所示。

可以看出,对于大于太阳光遮蔽角的光线,遮光罩在俯仰和方位方向均有较好的杂光抑制效果,消光比大于 10^{-8} 。满足系统设计要求。

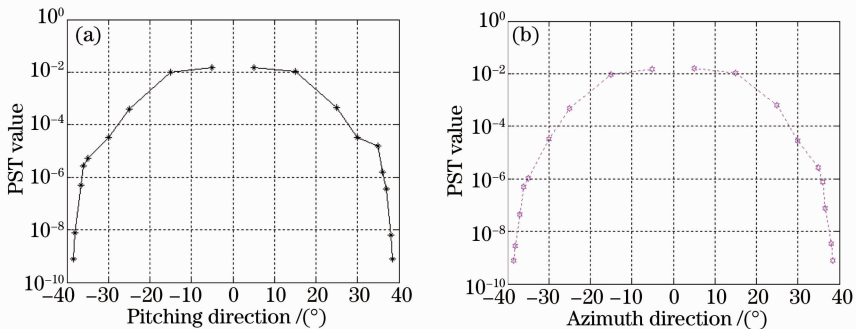


图 10 (a) 俯仰方向 PST 变化情况；(b) 方位方向 PST 变化情况

Fig. 10 (a) PST versus the pitching direction; (b) PST versus the azimuth direction

5 结 论

以抑制静止轨道太阳杂散辐射对光学系统的影响为目的,探讨了太阳遮蔽角对结构的影响,论证了不同内部结构对杂光抑制能力的高低,设计反射结构与刀口式挡光环相结合的方式,解决了对边缘散射杂光的消除。仿真分析结果表明,对于太阳遮蔽角大于 36° 的入射杂散辐射,外遮光罩杂光抑制能力高于 10^{-8} 量级,满足设计要求,同时工程实现性较好。

参 考 文 献

- 1 L Feinberg, L Cohen, B Dean, *et al.*. Space telescope design considerations[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011006.
- 2 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271.
牛金星, 周仁魁, 刘朝辉, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2267-2271.
- 3 Qian Jing, Dong Deping, Sun Shengli. Design of outer baffle of earth observation optical system on geostationary orbit [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 637-642.
钱 婧, 董德平, 孙胜利. 静止轨道对地观测光学系统外遮光罩设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 637-642.

- 4 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.
- 5 Li Yun, Xiangli Bin, Li Libo. Design and simulation of the baffle of a new type space camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 41-44.
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.
- 6 Li Xiaoping, Sha Shengchun, Hu Tingliang. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2063-2068.
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): 2063-2068.
- 7 Chen Xue, Sun Chuang, Xia Xinlin. Stay light suppression property of baffle with honeycombed wall[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0523004.
陈 学, 孙 创, 夏新林. 具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0523004.
- 8 Robert P Breault. Problems and techniques in stray radiation suppression[C]. *SPIE*, 1997, 107: 2-23.
- 9 Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. Optical design of baffle of star sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 987-990.
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏传感器遮光罩的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 987-990.

栏目编辑: 韩 峰