

短波红外成像系统的杂散辐射分析与抑制研究

任国栋 张 良 兰卫华 赵 延 潘晓东

中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009

摘要 针对短波红外镜头在成像中存在杂散辐射的问题,对该镜头进行杂散辐射分析与抑制研究。通过成像实验初步分析了镜头的杂散辐射现象,运用仿真软件 Tracepro 对该短波红外镜头建立分析模型,获取系统的点源透射率 (PST),并针对实验现象进行光线追迹,找出可能的杂散辐射路径。通过增加遮光罩、修改结构件和添加消杂光涂层的方法来抑制杂散辐射。通过测量采取抑制措施后的系统的 PST 值证明了该措施有效、可靠,达到了抑制镜头杂散辐射、改善成像质量的目的。

关键词 散射;短波红外;杂散辐射分析;点源透射率;杂散辐射抑制

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.122901

Analysis and Suppression of Stray Radiation of Shortwave Infrared Imaging System

Ren Guodong Zhang Liang Lan Weihua Zhao Yan Pan Xiaodong

Key Laboratory of Electro-Optic Control Technology, Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract According to the problem that stray radiation exists in the process of imaging at shortwave infrared lens. The stray radiation analysis and suppresses research of lens are carried on. By imaging experiment, the stray radiation phenomena of lens is analyzed preliminarily. The analysis model of shortwave infrared lens is established using simulation software Tracepro, the point source transmittance (PST) of system is obtained, rays tracing is conducted according to the experimental phenomenon, and the possible path of stray radiation is found out. Stray radiation is restrained by increase lens hood, modify the structure and adding extinction stray light coatings. The measured PST after taking the proposed methods can prove the effectiveness and trustiness of these methods, and reach the goal of suppress stray radiation of the lens and improve image quality.

Key words scattering; shortwave infrared; stray radiation analysis; point source transmittance; stray radiation suppression

OCIS codes 290.2648; 140.3500; 140.3510; 140.3550; 140.3570

1 引言

杂散辐射是指光学系统中除了正常成像光线外,传输到探测器表面上的其他非成像光线的辐射能量,以及通过非正常光路到达探测器的成像光线辐射能量^[1]。红外成像系统中的杂散辐射会降低像面的对比度和调制传递函数,使整个像面的层次减少、清晰度变坏、能量分布混乱,甚至形成杂光斑点,严重时使目标信号完全被杂散辐射噪声所淹没^[2]。当前国内的红外系统杂散辐射分析主要集中在对系统光机件散射的抑制方面,分析方法主要是软件仿真。但是,由于工艺和装配技术的限制以及设计者的疏忽等原因,导致很多实际的红外系统与模型存在一定的缺陷性差异,这些差异很容易引入杂散辐射,例如镜子的倒角和压边。而这些问题在系统进行杂散辐射仿真分析时往往容易被忽略。

本文针对短波红外镜头的杂散辐射问题从以下几个方面进行了分析:杂散辐射实验、杂散辐射传输抑制理论、杂散辐射传输路径分析、杂散辐射抑制措施与抑制效果的验证。

收稿日期: 2015-06-05; 收到修改稿日期: 2015-07-20; 网络出版日期: 2015-11-07

作者简介: 任国栋(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和杂散光分析方面的研究。E-mail: 1085630058@qq.com

导师简介: 张 良(1973—),男,研究员,硕士生导师,主要从事红外光学系统总体技术及设计等方面的研究。

E-mail: hope2048@163.com

2 短波红外镜头杂散辐射实验

该短波红外镜头为直筒折射式结构,光学系统指标如下:有效焦距: $f=30.198\text{ mm}$; F 数:1.4;半视场角:18.75°;光谱范围:0.9~1.7 μm 。

通过外景和室内成像实验,发现了两种不同现象的杂散辐射,图1为外景成像图,三个亮环分别标记为环1、环2和环3。在室内实验时又出现一个细亮环,记为环4,如图2所示。

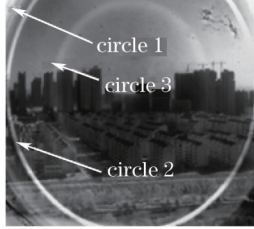


图1 外景成像图

Fig.1 Imaging of exterior

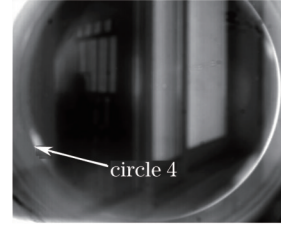


图2 室内成像图

Fig.2 Imaging of indoor scene

3 杂散辐射的能量传输公式与评价指标

3.1 杂散辐射表面能量传输公式^[3]

如图3所示,有两个朗伯微元表面元 dA_s 和 dA_r ,相距为 l ,两面的法线与 l 的夹角分别为 θ_s 和 θ_r ,由 dA_s 向 dA_r 发射的辐射功率为

$$dP_{s-r} = \frac{L_s \cos \theta_s dA_s dA_r \cos \theta_r}{l^2}, \quad (1)$$

定义源表面对接收表面的角系数 F_{s-r} 为

$$dF_{s-r} = \frac{\cos \theta_s \cos \theta_r}{\pi l^2} dA_r, \quad (2)$$

根据朗伯辐射表面双向反射分布函数(BRDF)的定义可知:

$$f_{\text{BRDF}} = \frac{L_s}{E_s}, \quad (3)$$

$$h_n = 65.2\text{ mm}, \quad (4)$$

$$d\Phi_s = E_s \times A_s, \quad (5)$$

对于两个有限的表面,有:

$$\Phi_r = \Phi_s \times f_{\text{BRDF}_s} \times F_{s-r} \times \pi, \quad (6)$$

接收表面所接收到的能量是源表面发出的辐射功率 Φ_s ,源表面 BRDF、源表面对接收表面的角系数 F_{s-r} ,三个因子的乘积。为了抑制系统的杂散辐射,可以加遮光罩和挡光结构来减小源表面对接收表面的角系数 F ,并对源表面进行表面处理降低 BRDF,降低表面温度来减小源表面的热辐射。

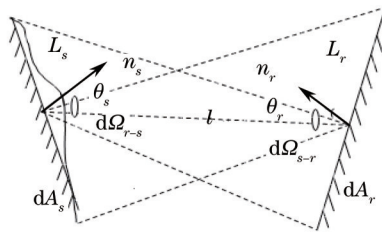


图3 杂散辐射表面能量传输图

Fig.3 Energy transmission image of stray radiation surface

3.2 杂散辐射的评价指标^[4-5]

通常评价光学系统杂散光抑制能力的指标有:点源透射比(PST)、杂光系数(VGI)和消光比(ER)^[6-8],这里选用点源透射比作为评价指标。PST定义为:光学系统视场外角度为 θ 的点杂散辐射源的辐射,经光学系统在探测器靶面产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与其在光学系统入口处的辐照度 $E_i(\theta)$ 的比值。其数学表达式为

$$f_{\text{PST}}(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}. \quad (7)$$

它表示探测系统对外部杂散辐射的衰减能力,是探测系统本身的特性,与外部杂散辐射的大小无关。

4 杂散辐射传输路径的仿真分析

4.1 镜头模型的建立

图4为镜头光学结构设计图,将该短波镜头模型导入TracePro中,对相关表面设置表面属性,如表1所示。分别对0、0.5、0.707、1.0视场进行光线追迹,对模型进行检查,结果如图5所示,各个视场的入射平行光都很好地聚焦在像面上,表明模型建立的正确性。

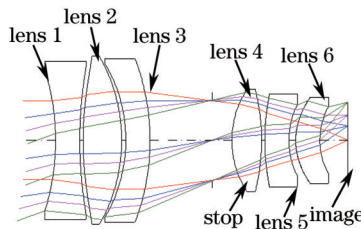


图4 镜头光学结构设计图

Fig.4 Optical structural design of lens

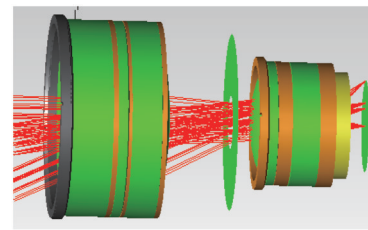


图5 镜头三维模型图

Fig.5 3D view of lens

表1 模型表面属性设置

Table 1 Surface property setting of model

Name	Property	Absorb	Reflect	Transmit	BRDF	BTDF
Lens	lens	0.01	0.01	0.9797	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}
Tube	user-defined	0.8	0.1	0	0.1	0
Stop	black paint	0.9	1.0×10^{-5}	0	0.099999	0
Image	absorber	1	0	0	0	0

4.2 镜头的PST测量

在Tracepro中,进行光线追迹,计算系统的PST,由于该镜头的半视场角为 18.75° ,在计算PST时,追迹范围从 20° 到 40° ,测量结果如图6所示。

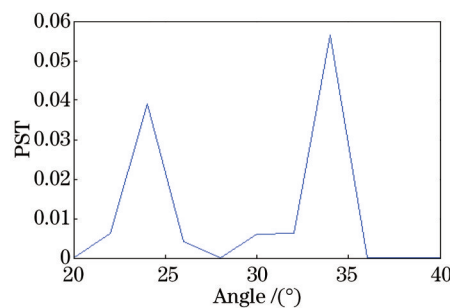


图6 短波镜头 PST测量曲线

Fig.6 PST measurement curve of the shortwave lens

从图6中可以看出,入射角为 22° 和 24° 以及 32° 和 34° 时,PST值急剧增大,说明在这几个角度附近,有大量的视场外杂散辐射到达像面。

4.3 杂散辐射路径分析

能够在像面或中间像面处看到的表面称为关键表面,这些表面向像面辐射或散射能量。从杂散辐射源所在的物空间出发找出被其照射的表面,称为照明表面。直接被辐射源照射又同时直接被像平面看到的表面,称为一次散射表面,即辐射源发出的辐射能量经过这些表面的一次散射就能传输到像平面^[9]。下面分别对形成四组不同半径亮环的杂散辐射路径进行分析。

1) 亮环1

这组亮环在两边视场较暗时也存在,来自于视场内。在Tracepro中仿真出传输路径如图7所示,入射

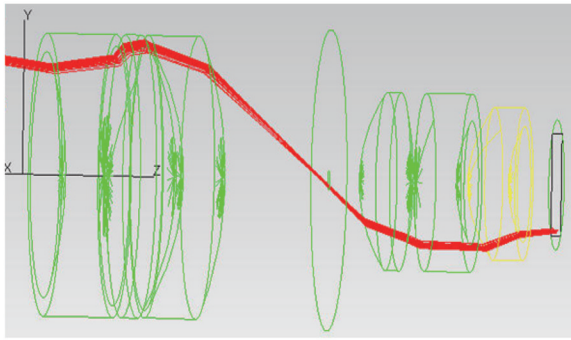


图7 经透镜3和5压边面的光路图

Fig.7 Path diagram of blank holder of lens 3 and 5

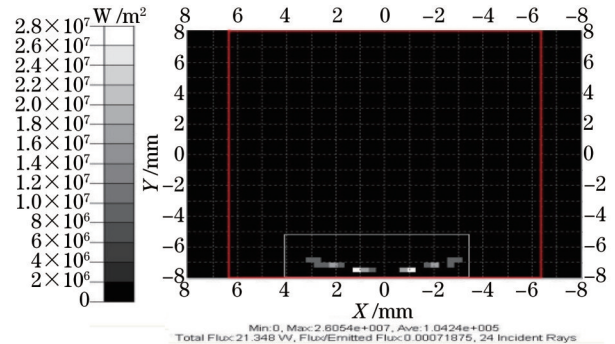


图8 经透镜3和5压边面的照度图

Fig.8 Illuminance diagram of blank holder of lens 3 and 5

角为 $6.5^\circ \sim 8^\circ$,此路径经过透镜三的前压边面,又经过透镜五的后压边面,像面照度图如图8所示。

2) 亮环2

通过移动镜头到探测器的距离,可以改变亮环的大小。定量计算后得出,出射光是从最后一面的压边上半径为 9.24 mm 的位置处出射的。这说明像面上的细亮环是通过透镜6的后表面压边出射的。其传输路径和像面辐照度分布图如图9和图10所示,形成此亮环的光源的入射角为 $23^\circ \sim 25^\circ$ 。

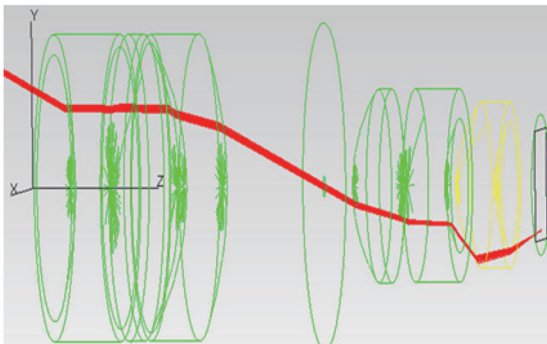


图9 透镜6后压边面出射光的光路图

Fig.9 Path diagram of emergent light through back blank holder of lens 6

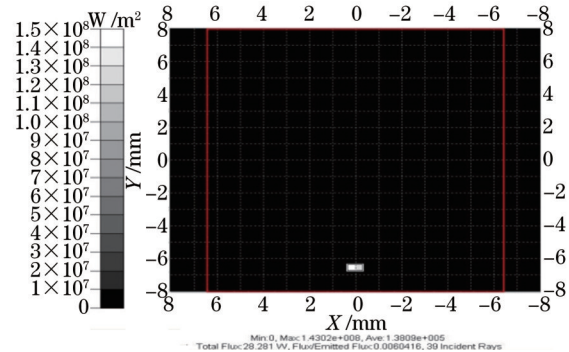


图10 透镜6后压边面出射光的照度图

Fig.10 Illuminance diagram of emergent light through back blank holder of lens 6

3) 亮环1外侧环和亮环3

在像面上设置环带光源反向追迹来寻找关键表面。同时寻找通过光阑到达镜头的后半部分的入射光,找到照明表面。最终找出一次散射表面,从而找到形成模糊光环的杂散辐射的路径。图11为反向追迹获得的关键表面:透镜5和6之间隔圈的内环面、透镜5的边缘表面、透镜6的边缘表面、透镜6之后的镜筒内表面。

设置光源正向追迹,发现在 $23^\circ \sim 24.3^\circ$ 范围内有光线入射到透镜6之后的镜筒内表面,如图12所示。同样在 $24.3^\circ \sim 27.5^\circ$ 之间光线可以入射到透镜5和6之间的隔圈,图13为入射光路径图。在图14中, 29° 左右的入射光经过光阑中心后打在透镜5边缘表面的前半部分后发生散射,且该边缘部分没有抛光,粗糙度较大,

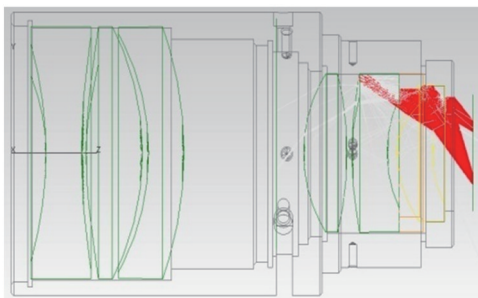


图11 系统关键表面图

Fig.11 Important surface graphs of system

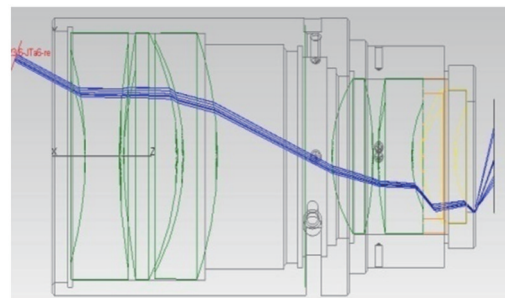


图12 镜筒内环面散射光线入射路径图

Fig.12 Incident path of scattered beams from the inner surface of barrel

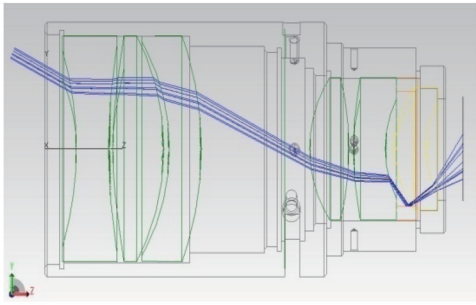


图13 隔圈散射光线入射路径

Fig.13 Incident path of spacer scatter light

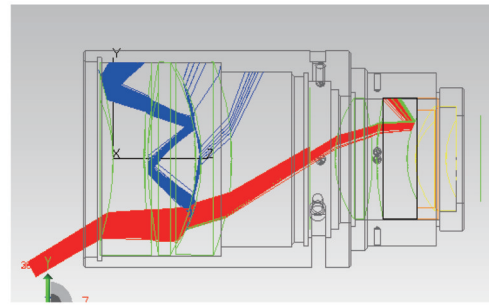


图14 透镜5边缘表面散射光线入射路径图

Fig.14 Incident path of scattered beams from the edge surface of lens 5

散射(漫反射)非常强。

从镜头最终加工数据发现:在光学设计图中透镜边缘存在倒角,其中倒角大小为 45° 、 $0.3^{+0.2}$,导致部分光线在倒角部位会发生反射。图15为透镜5的前棱角反射光到达像面的路径,入射光为 28° 的视场外光线。像面的多层模糊亮环正是由这些表面一次散射后形成的。

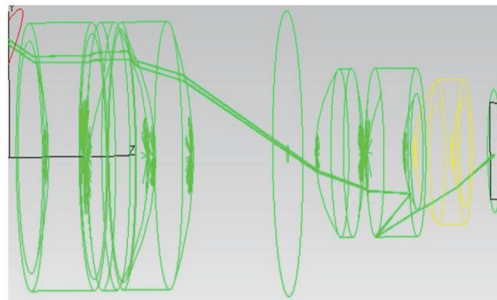


图15 透镜5棱角反射光线入射路径

Fig.15 Incident path of light beams reflected from the corner of lens 5

4) 亮环4

此亮环是 $25.4^\circ \sim 37.9^\circ$ 范围内的杂散光线经透镜5的后压边面传输到达像面。图16和图17是光路图和像面照度图。

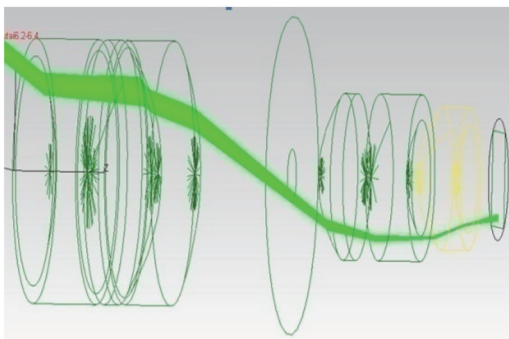


图16 经透镜5压边面出射光的光路图

Fig.16 Path graph of emergent light through blank holder of lens 5

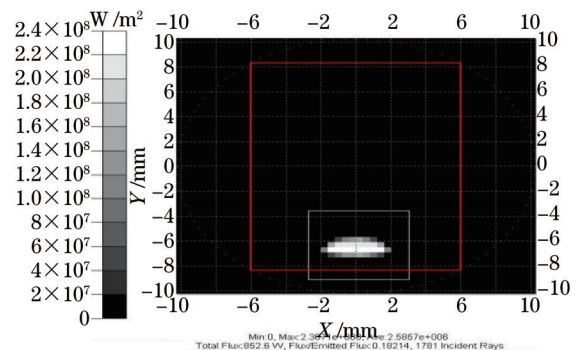


图17 经透镜5压边面出射光的照度图

Fig.17 Illuminance diagram of emergent light through blank holder of lens 5

5 杂散辐射的抑制与验证

基于以上对亮环形成原因的分析,针对该短波红外镜头杂散辐射的抑制主要有三种方法:1)设计遮光罩抑制视场外杂散辐射进入镜头;2)对透镜裸露出的压边面进行严格遮挡;3)对参与杂散辐射传输的一次散射表面进行表面处理例如加消光螺纹和喷涂消光涂料。

1) 遮光罩的设计

一般来说遮光罩的设计有如下原则^[10-11]:避免非成像光线直接到达像面;取太阳等强杂散辐射源的最小入射角度 30° 为太阳规避角,使大于规避角的角度入射的强杂散辐射至少经过一次的散射后才允许进入光学系统;边缘视场的正常光线不能被遮光罩遮拦。

设 h_1 为在遮光罩前端上设置的挡光环高度, h_n 为遮光罩同光学系统那端挡光环的高度, θ 为太阳规避角, D_0 为光学系统第一片透镜的口径, D_L 为遮光罩口径, ω 为半视场角, L 为遮光罩总长。

有关的计算公式为

$$D_L - h_n - h_1 = L \tan \theta, \quad (8)$$

$$\tan \omega = \frac{h_n - h_1}{L}, \quad (9)$$

$$D_L = D_0 + 2h_n. \quad (10)$$

已知短波镜头中, $D_0 = 45 \text{ mm}$, $\omega = 18.75^\circ$, $\theta = 30^\circ$,取 $h_1 = 1 \text{ mm}$ 则: $L = 189.2 \text{ mm}$, $h_n = 65.2 \text{ mm}$ $D_L = 175.4 \text{ mm}$ 。

2) 透镜压边的处理

针对透镜1前表面和透镜6后表面的压边,通过减小镜筒的压圈半径进行遮挡;对于透镜3前表面与透镜5后表面的压边,需要减小与这两个面接触的隔圈半径来遮挡。

3) 一次散射表面的处理

由于该短波红外镜头的镜筒、隔圈和压圈的表面处理方式是阳极氧化发黑,这种处理方式在 $1.3 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的红外波段有较大的反射率,尤其是一次散射表面。消杂散辐射涂料利用涂料的表面粗糙度和多孔性散射来吸收杂散辐射^[12]。当微观结构的涂料颗粒尺寸接近于光波的波长时,吸收效果最佳,所以要针对红外系统的工作波段选择合适的涂料,如金属表面阳极氧化后用染料染黑(马丁黑、阳极氧化铍等),磨砂后进行酸蚀处理(黑色酸洗铍)和等离子喷铍等。本文选用一种专门用于短波红外的发黑涂料对镜头的隔圈和压圈表面进行处理,该涂料在红外短波波长内反射率小于2.5%。

在Tracepro中对以上三种杂散辐射抑制措施进行仿真,并在添加抑制措施后重新测量短波镜头的PST曲线和成像效果,测量结果和成像效果如图18和图19所示。

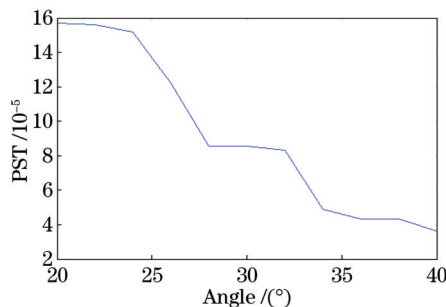


图18 采取抑制措施后 PST 曲线

Fig.18 PST curve after taken suppression measures



图19 成像效果图

Fig.19 Diagram of imaging effect

在添加抑制后发现该短波红外镜头的点源透射率下降了三个数量级,像面的亮环消失,成像效果明显提高,证明杂散辐射得到了有效地抑制。

6 结 论

对一款直筒折射式红外短波镜头的杂散辐射情况进行了分析。经过Tracepro仿真可知,由于镜头中多片透镜的压边面没有有效遮挡以及一些关键的结构件表面处理工艺不到位,导致多路视场外特定角度的杂散辐射通过镜头到达像面,形成多组杂散辐射亮环。当对镜头加入遮光罩、喷涂消光涂料和遮挡裸露压边面后,其PST值降低了三个数量级,成像质量得到很大地改善。

在光学设计中,压边是不可避免的,尤其是当压边面离探测面比较近时,很可能会将视场外的杂散辐射引入光学系统,必须设计合适口径的隔圈或光阑对压边进行严格遮挡。同时,对于镜头中的一些关键表面,尤其

是一次散射表面要进行严格的表面处理,以便降低杂散辐射对系统的影响,提高光学系统成像质量。

参考文献

- 1 Xia Xinlin, Tan Heping, Xiao Shuqin, *et al.*. Analysis on spectral stray radiation caused by thermal radiation from structural elements of space applied optical system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1996, 17(1): 22-31.
夏新林, 谈和平, 肖淑琴, 等. 空间光学系统中内部构件热辐射引起的谱段杂散辐射[J]. *航天返回与遥感*, 1996, 17(1): 22-31.
- 2 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.
- 3 Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. *Infrared Physics*[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2004: 8-46.
张建奇, 方小平. *红外物理*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 8-46.
- 4 Freniere E R. First-order design of optical baffles[C]. 1980 Huntsville Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1981: 19-28.
- 5 Pompea S M. The Management of Stray Radiation Issues in Space Optical Systems[M]. Netherlands: Springer, 1996: 181-193.
- 6 ZhuYang, 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.
- 7 Liao Zhibo, Jiao Wenchun, Fu Ruimin. Veiling glare index calculation for refract optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 424-427.
廖志波, 焦文春, 伏瑞敏. 透射式光学系统杂光系数计算方法[J]. *光子学报*, 2011, 40(3): 424-427.
- 8 Li Ting, Ma Xiaolong, Li Fu, *et al.*. Stray light analysis and test of cassegrain optical antenna[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1): 1-5.
李 婷, 马小龙, 李 福, 等. 卡塞格伦光学天线杂散光分析与测试[J]. *光子学报*, 2013, 42(1): 1-5.
- 9 Gao Guopeng, Xiong Wang'e, Gan Yuquan, *et al.*. Design and estimation of suppressing stray light in R-C system[J]. *Optical Instruments*, 2009, 31(5): 36-41.
高郭鹏, 熊望娥, 甘玉泉, 等. R-C系统消杂散光设计与效果评估[J]. *光学仪器*, 2009, 31(5): 36-41.
- 10 Fischer R E, Tadic-Galeb B, Yoder P R, *et al.*. *Optical System Design*[M]. New York: McGraw Hill, 2000.
- 11 Hubbs J E, Brooks L D, Nofziger M J, *et al.*. Bidirectional reflectance distribution function of the Infrared Astronomical Satellite solar-shield material[J]. *Appl Opt*, 1982, 21(18): 3323-3325.
- 12 Liu Haofei, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, *et al.*. Data structure of stray light analysis in systems including diffraction components and ghosts analysis[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(4): 60-64.
留浩飞, 李晓彤, 岑兆丰, 等. 衍射光学元件杂散光分析的数据结构及鬼像分析[J]. *光学仪器*, 2005, 27(4): 60-64.

栏目编辑: 苏 岑