

文章编号:1001-5078(2021)08-1025-06

· 红外技术及应用 ·

透射式红外光学系统的太阳杂散辐射分析

栗洋洋, 彭晴晴, 刘纪洲
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:杂散辐射可以定义为经过非正常成像光路进入到接收器中的能量。杂散辐射会降低光学系统的图像对比度和信噪比,严重时杂散辐射的能量会直接将目标能量湮没,严重影响红外光学系统正常工作。本文分析了透射式红外光学系统的杂散辐射特性,设计了物镜筒的消光螺纹和表面处理方式等抑制措施。通过点源透过率曲线分析了抑制措施的作用,并分析了消光螺纹自身辐射对光学系统的影响。最终通过对比成像实验验证,结果表明,消光螺纹对轴外的杂散辐射有明显的抑制作用;同时消光螺纹的自身辐射能量不会引入新的干扰源。

关键词:杂散辐射分析;消光螺纹;点源透过率;自身辐射

中图分类号:TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.009

Solar stray radiation analysis of transmissive infrared optical system

LI Yang-yang, PENG Qing-qing, LIU Ji-zhou
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Stray radiation can be defined as the energy entering the detector through an abnormal imaging path, which will reduce the image contrast and signal-to-noise ratio of the optical system. In severe cases, the energy of stray radiation will directly annihilate the target energy, seriously affecting the normal operation of the infrared optical system. In this paper, the stray radiation characteristics of the transmissive infrared optical system are analyzed, and the suppression measures such as the extinction thread and surface treatment of the objective lens barrel are designed. The effect of suppression measures is analyzed by point source transmittance curve, and the effect of self-emitted radiation of extinction thread is analyzed. Finally, it is verified by contrast imaging experiment, and the results show that the extinction thread has an obvious inhibition effect on the off-axis stray radiation. At the same time, the self-emitted radiation energy of the extinction thread don't introduce new interference source.

Keywords: stray radiation analysis; extinction thread; point source transmittance; self-emitted radiation

1 引言

杂散辐射是影响红外成像系统的成像质量的重要因素之一。杂散辐射不仅会降低红外成像系统探测器的信噪比,而且在杂散辐射的能量过强时,直接将正常成像的图像淹没。与可见光光学系统的杂散

光抑制不同,红外光学系统的杂散辐射抑制手段在考虑抑制效果的同时,还要考虑其自身辐射对系统的影响。相比于卡塞格林等反射式红外光学系统,透射式红外系统往往视场较大,外部遮光罩很难起到实际作用,因此需要从光学系统内部结构考虑抑

制措施。

2 杂散辐射来源及评价标准

2.1 杂散辐射源及理论计算

红外成像系统的杂散辐射可以分为两大类:一是来自系统外部辐射源的外部杂散辐射,二是来自系统内部元部件的自身辐射。本文分析的红外成像系统工作在陆地表面,视场外的太阳辐射经过光学系统第一片透镜后,经过镜筒内部的散射、镜片表面剩余反射等方式进入到探测器内部。太阳辐射作为外部杂散辐射进入系统的图像如图1所示,因此本文主要分析太阳杂散辐射对系统的影响及相应的抑制措施。

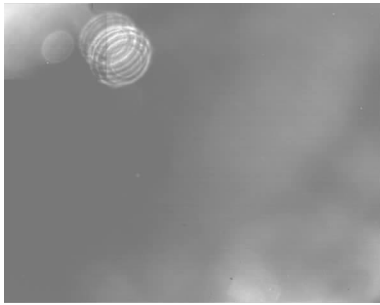


图1 太阳杂散辐射对成像质量的影响

Fig.1 The influence of the solar stray radiation on image quality

这里需要特别指出的是,透射式系统中,外部杂散源引起的杂散辐射一般分为两种情况,一是外部杂散光没有经过结构件的反射或散射,直接由镜片自身剩余反射引起的鬼像;另一个是外部杂散光经过结构件的反射或散射,然后在通过光学镜片达到探测器的杂散光。对于鬼像抑制而言,一是需要在光学设计阶段从光学结构层面考虑抑制措施,二是提高透镜膜层透过率,降低剩余反射率。可见这两种方法都不是容易做到的。因此鬼像的分析及抑制不在本文的讨论范围内,本文只讨论第二种形式的杂散光。

根据普朗克黑体公式^[1],可以计算出某一辐射体的在特定温度特定波段的辐射出射度。由此可以计算出太阳在中波3.7~4.8 μm 的辐射出射度:

$$M_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (1)$$

其中, λ_1 为3.7 μm , λ_2 为4.8 μm ; c_1 为第一黑体辐射常数, $c_1 = 3.741844 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$; c_2 为第二黑体辐射常数, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; T 为辐射体温度,太阳的平均温度 $T = 5900 \text{ K}$ 。

太阳的辐射通量为:

$$\Phi_s = A_s M_s = 4\pi R_s^2 M_s \quad (2)$$

其中, A_s 为太阳的表面积, R_s 为太阳的半径。

太阳的辐射强度为:

$$I_s = \frac{A_s M_s}{4\pi} = R_s^2 M_s \quad (3)$$

光学系统入瞳对太阳所张的立体角为:

$$\Omega = \frac{A_o \cos\alpha}{l^2} \quad (4)$$

式(4)中, A_o 为光学系统入瞳面积; l 为太阳与光学系统入瞳之间的距离; α 为太阳和光学系统的离轴角。则太阳在立体角 Ω 内发出的光通量为:

$$\Phi_o = I_s \cdot \Omega = R_s^2 M_s \frac{A_o \cos\alpha}{l^2} \quad (5)$$

那么太阳在光学系统入瞳处的等效辐照度为:

$$E_o = \tau \frac{\Phi_o}{A_o} = \tau \frac{R_s^2 M_s}{l^2} \cos\alpha \quad (6)$$

其中, τ 为中波红外在大气中的透过率,此处取平均值0.49。

同理,对于系统元部件的内部自身辐射能量,也可以通过上式计算出不同元件表面在特定温度和特定波段的辐射能量。

2.2 杂散辐射评价标准

对于外部杂散辐射,本文采用点源透过率(PST)作为评价标准。点源透过率的定义^[2]为:离轴角为 θ 的点光源经过光学系统在探测器上形成的辐照度 $E_d(\theta)$ 与光源在光学系统入瞳处的等效辐照度 $E_i(\theta)$ 之比,数学表达式为:

$$PST(\theta) = E_d(\theta)/E_i(\theta) \quad (7)$$

点源透过率表征系统对轴外杂散辐射的抑制能力,数值越小代表抑制能力越强,杂散辐射对系统成像影响越小。通过杂散辐射分析软件 Lighttools 可以计算得出入瞳和探测器上的辐照度,从而得出杂散辐射源的 PST。

对于内部自身辐射而言,本文采用辐照度分析图作为评价标准。辐照度分析图是杂散光分析软件的一种输出结果,它可以表示探测器接收面上辐射能量的分布情况。对于系统元部件的自身辐射,需要考虑两点因素:一是观察辐照度分析图中能量分布是否均匀;二是观察辐照度分析图中的能量大小。当辐照度分析图满足能量分布均匀或者整体能量低于探测器响应能量条件时,即可

认为该元部件的内部自身辐射能量对系统成像质量影响不大。

3 杂散辐射分析模型

3.1 光学系统参数

透射式红外光学系统的为双视场系统,其系统参数如表1所示。本文要同时分析光学系统在双视场受太阳辐射的影响。

表1 光学系统参数

Tab.1 Optical system parameters

工作波段/ μm	3.7~4.8
焦距/mm	大视场 $f=200$;小视场 $f=500$
视场角/ $^\circ$	大视场 $2\omega=3.5$;小视场 $2\omega=1.4$
F 数	3
探测器规格	像元数 640×512 ,像元尺寸 $15 \mu\text{m}$

3.2 杂散辐射分析建模

在非序列光学仿真软件 Lighttools 中导入光机系统模型,并对模型进行必要的简化,排除一些对杂散辐射分析影响较小的元部件,这样可以有效提升杂散辐射分析的分析效率。简化后的模型如图2所示。

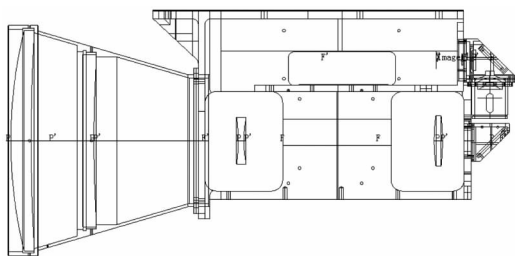


图2 Lighttools 软件中光机分析模型

Fig.2 The optical machine analysis model in LightTools

在光机模型建立后,需要对各个部件的表面属性进行定义。光学元件和机械元件表面属性的定义,主要是指需要对各个表面的反射、透射、吸收和散射情况进行定义。根据部分原件的表面属性实测数据^[3],综合考虑仿真效率和仿真精度,仿真模型中的表面属性设置如表2所示。

需要指出的是,一些文献中^[4]常使用 ABg 模型来模拟表面的散射属性,ABg 模型是基于双向散射分布函数^[5] (BSDF)的一个经验模型。BSDF 表示不同入射条件下物体表面在任意观测角的散射特性,它是入射角、反射角和波长 λ 的函数。对于未镀膜的光学表面粗糙度引起的散射现象,可以通过

公式建立仿真模型和实际模型对应关系;但是对于镀膜后的光学表面粗糙度引起的散射,光学涂层如增透涂层、带通涂层、保护涂层等,会严重影响表面的 BSDF^[6]。一般来说,镀膜表面的膜层层数越多,其 BSDF 和未镀膜表面之间的差异就越大。如果想要准确地模拟光学表面的散射属性,需要对表面进行 BSDF 测量。同理,对于机械元件的表面,不同厂家、不同工艺的表面处理方式,其表面的 BSDF 参数像差很大。因此,为了提高系统的仿真效率,本文对光机表面的散射属性进行了简化。

表2 仿真模型中表面属性设置

Tab.2 Surface property settings in the simulation model

表面名称	透过率	吸收率	反射率	散射率
光学透镜表面	0.99	0.005	0.005	0
光学反射镜表面	0	0.01	0.99	0
发黑喷砂机械表面(铝基底)	0	0.92	0	朗伯散射 0.08
原色处理机械表面(铝基底)	0	0.1	0	朗伯散射 0.9

设置完光机系统的表面属性后,需要设置杂散辐射源和系统仿真精度等参数。由式(1)~(6)可以计算出太阳辐射正入射在系统入瞳处辐照度为 11.02 W/m^2 ,波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。

4 杂散辐射仿真分析及其抑制措施

本文分析的太阳杂散辐射相对于系统光轴的离轴角范围为 $5^\circ \sim 80^\circ$,分析组间隔为 5° ,同时分析系统的大小视场。仿真模型的光线追迹阈值设置为 1×10^{-10} ,每组分析追迹光线数量为1000万根。

4.1 杂散辐射的光线路径

通过对不同离轴角的太阳辐射进行光线追迹,可以得到太阳辐射在探测器像面的成像情况,以及引起杂散辐射的主要光线路径。由3可以看出,此时入射的太阳辐射离轴角为 40° ,光学系统为大视场状态,物镜筒为原色氧化且未经其他处理。当视场外的光线进入系统后,部分光线会照射到物镜筒内壁产生散射,然后通过物镜表面的剩余反射进入到探测器中。这部分光线在接收器上的成像如图4所示,由图4可以看出,该图像和图1中的真实成像中亮斑十分相似,只是相对位置有所区别,其中原因是仿真模型中太阳杂散辐射的方位角为零度,与实际太阳方位角有所差别,这并不影响最终的仿真结果。

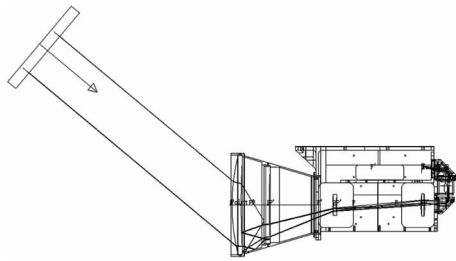


图 3 太阳杂散辐射的光线路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path of solar radiation

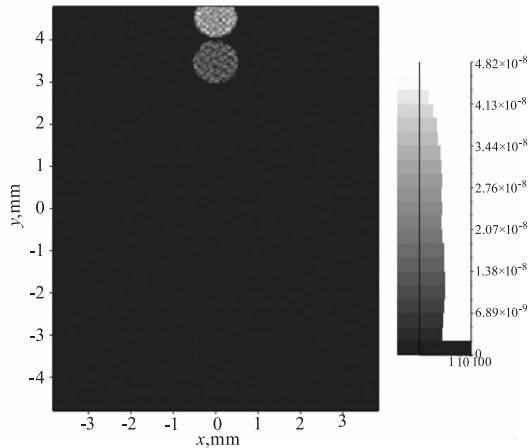


图 4 太阳杂散辐射的仿真成像

Fig. 4 Simulation imaging of solar radiation

4.2 设计消光螺纹及仿真结果

在确定杂散辐射的光线路径后,需要提出针对性的抑制措施。杂散辐射抑制手段通常包括“移走”、“遮挡”、“清洁”、“镀涂”等手段。对于本系统中物镜筒内壁反射造成的杂散辐射,前两种明显不适用,而“清洁”通常适用于镜片表面污染引起的杂散辐射,因此考虑“镀涂”手段消除或削弱杂散辐射。镀涂的目的是增加物镜筒内壁表面吸收率,减少反射或散射光线进入探测器中的能量。由此可以联想到,通过设计消光螺纹,使光入射到消光螺纹表面上时,能够增加一次或多次反射或散射,可以有效提高消杂光的能力。因此,本文设计消光螺纹的原理也是基于建立杂光“陷阱”^[7-8]的原理,使光线在入射到消光螺纹后,能够尽可能多地在螺纹表面之间发射反射或散射,增加镜筒内壁的螺纹对杂散辐射的吸收作用。本文设计的消光螺纹模型如图 5 所示,螺纹类型为三角螺纹,螺距为 1.5 mm,牙型高度 3 mm,牙型角 30°,并对消光螺纹及镜筒内壁进行氧化发黑、喷砂处理。

通过仿真对比原色氧化、未加消光螺纹的物镜筒和氧化发黑喷砂、添加消光螺纹的测试筒,可以得

出在不同离轴角下,太阳杂散辐射对系统的影响。图 6、图 7 是两种处理方式的物镜筒,对不同离轴角的太阳杂散辐射 PST 的影响。

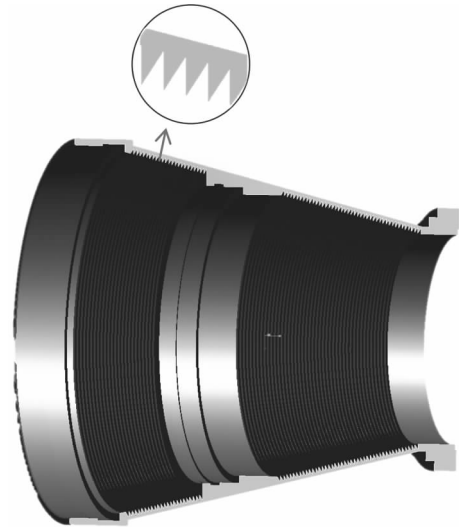


图 5 添加消光螺纹和表面处理的物镜筒模型

Fig. 5 Objective lens barrel with extinction thread and surface treatment

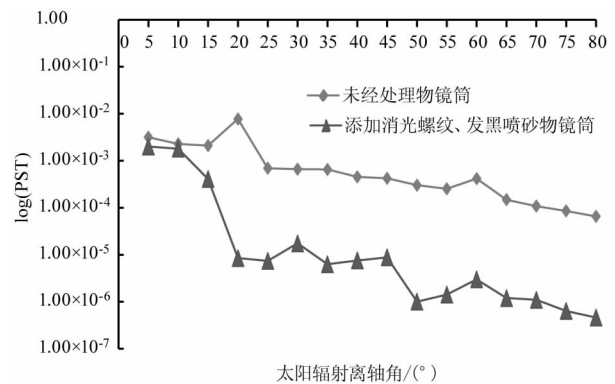


图 6 大视场不同处理方式物镜筒的 PST 对数曲线

Fig. 6 Logarithmic curve of PST with different lens barrel treatments in wide field of view

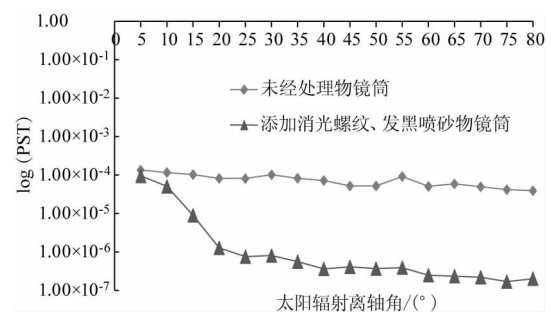


图 7 小视场不同处理方式物镜筒的 PST 对数曲线

Fig. 7 Logarithmic curve of PST with different lens barrel treatments in narrow field of view

由图 6、图 7 可以看出,对物镜筒添加消光螺纹和表面处理后,系统对于视场外,尤其是离轴角大于

20°的太阳杂散辐射有了明显的抑制作用,太阳杂散辐射的 PST 降低了两个数量级。

4.3 消光螺纹的内部辐射分析

红外成像系统的杂散辐射分析不仅考虑外部杂散辐射,还需要考虑结构件的自身辐射。针对上文提出的抑制措施,分析消光螺纹的自身辐射对系统带来的影响。在仿真模型中,设置物镜筒的温度为 300 K,黑体辐射率为 0.9,镜筒内壁总表面积为 1078.04 cm²,通过式(1)、式(2)可以求出,镜筒内壁在 3.7 ~ 4.8 μm 的辐射通量为 0.4576 W。仿真阈值设置为 10⁻¹⁰,光线数量设置为 1 亿根,大、小视场仿真的辐照度分析图如图 8、图 9 所示。

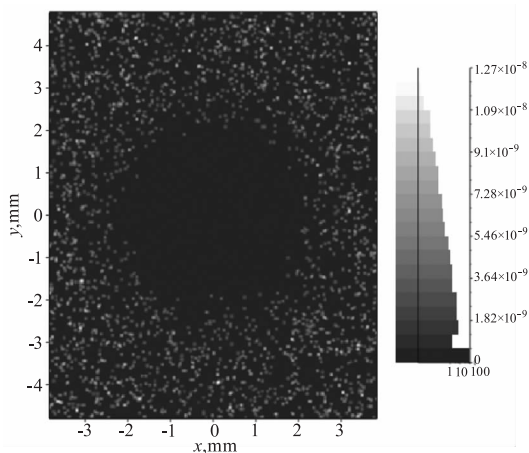


图 8 大视场镜筒内壁自身辐射

Fig. 8 Self-emitted radiation energy of lens barrel's inner wall in WFOV

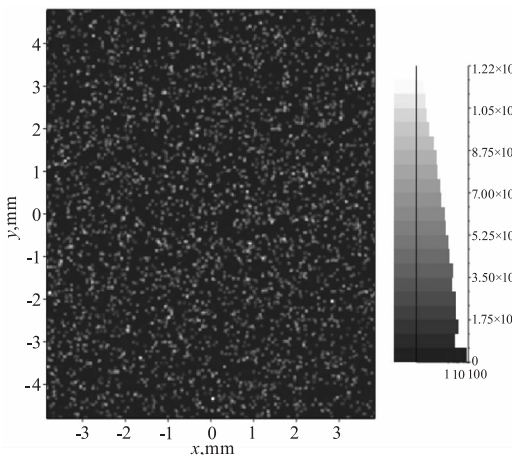


图 9 小视场镜筒内壁自身辐射

Fig. 9 Self-emitted radiation energy of lens barrel's inner wall in NFOV

通过以上两图可以看出,镜筒内壁在大视场的自身辐射能量分布在像面四周,像面中心有直径约 2 mm 的能量凹陷;镜筒内壁在小视场的自身辐射能

量均匀分布在像面上。两种视场的能量数值差别不大,但能量分布不同,需要对图像进行非均匀校正使得图像成像均匀。

4.4 成像验证实验

通过对比安装未经处理的物镜筒和添加消光螺纹并发黑处理的物镜筒的系统成像,得到的图像如图 10 ~ 图 13 所示。实验结果证明,在物镜筒添加消光螺纹和表面处理的方式,对视场外的杂散辐射有明显的抑制,与仿真结果一致。而且在系统成像中也可以看出,物镜筒内壁的自身辐射通过非均匀校正后,不会在图像上形成圆环,成像质量良好。

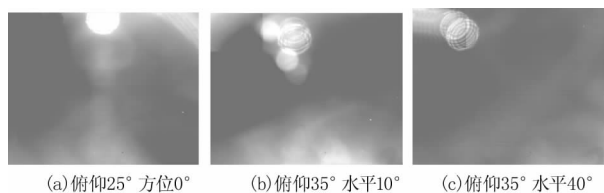


图 10 大视场未经处理物镜筒时不同角度太阳辐射的图像

Fig. 10 Images of solar radiation at different angles when the objective lens barrel is not processed in WFOV

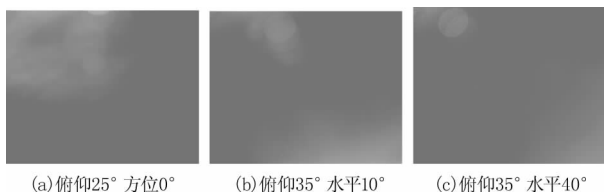


图 11 大视场添加消光螺纹并发黑处理物镜筒时不同角度太阳辐射的图像

Fig. 11 Images of solar radiation at different angles when the objective lens barrel is processed in WFOV

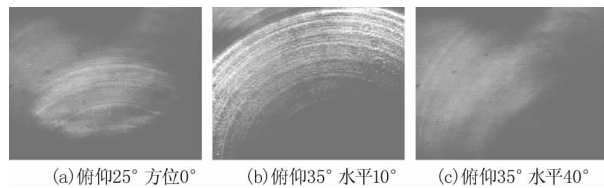


图 12 小视场未经处理物镜筒时不同角度太阳辐射的图像

Fig. 12 Images of solar radiation at different angles when the objective lens barrel is not processed in NFOV

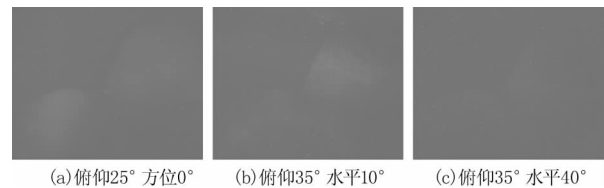


图 13 小视场添加消光螺纹并发黑处理物镜筒时不同角度太阳辐射的图像

Fig. 13 Images of solar radiation at different angles when the objective lens barrel is processed in NFOV

5 结 论

本文通过 Lighttools 软件建立光机分析模型, 并进行光线追迹, 分析了太阳外部杂散辐射对透射式红外系统的影响。分析得出杂散辐射的光线路径, 并在物镜筒内壁设计了消光螺纹和表面处理方式相结合的抑制措施, 并分析该抑制措施自身辐射对系统成像的影响, 最终通过对比成像实验, 验证杂散辐射抑制措施的有效性。结果表明, 设计的消光螺纹和和氧化发黑、喷砂的表面处理方式, 能够有效地抑制视场外的太阳杂散辐射, 且其自身辐射通过非均匀校正, 不会对系统成像带来明显的负面影响。

参考文献:

- [1] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 67 - 69.
- [2] Cao Zhirui, Fu Yuegang. Research on high performance light trap technology for PST test[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0117006. (in Chinese)
曹智睿, 付跃刚. 点源透射比测试的高性能光陷阱技术研究[J]. 红外激光与工程, 2017, 46(1): 0117006.
- [3] Lu Jiatao, Zhang Xinyu, Li Yanhong. Test and analysis of average BRDF in different blackening processes of cold shield[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 196 - 199. (in Chinese)
卢加涛, 张新宇, 李艳红. 不同冷屏黑化工艺 BRDF 指标对比分析[J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 196 - 199.
- [4] Song Xincheng, Zhang Yu, JIA Yuchao, et al. Stray light analysis and suppression structure design of transmissive infrared lens [J]. Infrared Technology, 2018, 40(11): 1068 - 1069. (in Chinese)
宋新成, 张宇, 贾钰超, 等. 透射式红外镜头杂散光分析与抑制结构设计[J]. 红外技术, 2018, 40(11): 1068 - 1069.
- [5] 牛金星. 红外探测系统杂散辐射的分析与抑制技术研究[D]. 西安: 中科院西安光学精密机械研究所, 2010.
- [6] Eric C. Fest 著, 于清华等译. 杂散光抑制设计与分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2019: 60 - 74.
- [7] 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. (in Chinese)
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.
- [8] Wang Wei, Chen Fansheng. Design of baffle of imaging system for earth observation on geostationary earth orbit [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0916001. (in Chinese)
王威, 陈凡胜. 静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0916001.