

# 卡塞格林系统的杂散辐射分析

栗洋洋, 刘琳, 彭晴晴, 杨加强  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**卡塞格林系统是一种常见的同轴反射系统,具有长焦距、大通光口径、工作波段宽的特点。但是,卡塞格林系统的结构形式,决定了其受杂散辐射的严重影响。本文对卡塞格林系统进行了杂散辐射特性的研究和讨论,首先指出了该系统的杂散辐射源,并在杂散光分析软件 TracePro 中建立了系统的光机模型,对系统进行杂散光追迹。然后分析得出系统的外部杂散辐射和内部杂散辐射对系统的影响,得到系统的点源透过率,并据此指标评价系统的杂散光抑制水平。最后,针对系统的杂散辐射,设计了遮光罩并提出其他杂散防护措施。

**关键词:**卡塞格林系统;杂散辐射;光线追迹;点源透过率

**中图分类号:** O434.3    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.014

## Stray radiation analysis of Cassegrain system

LI Yang-yang, LIU Lin, PENG Qing-qing, YANG Jia-qiang  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Cassegrain system is a typical coaxial reflection system, which has the characteristics of long focal length, large aperture and wide reflection waveband. However, the structure of Cassegrain system determines that it is seriously affected by stray radiation. In this paper, the stray radiation characteristics of Cassegrain system are studied and discussed. At first, the source of stray radiation of Cassegrain system is pointed out, and the optical machine model of the system is established in TracePro, which is a software of stray light analysis. Then the influence of external and internal stray radiation on the system is analyzed and the point source transmittance of the system is obtained, the stray radiation suppression level of the system is evaluated according to this transmittance. Finally, the baffles and other protection measures are designed for system's stray radiation.

**Key words:** Cassegrain system; stray radiation; ray trace; point source transmittance

### 1 引言

杂散光,在红外波段也称为杂散辐射,对光学系统的探测、识别、成像等带来严重干扰。卡塞格林系统具有长焦距、大通光口径、工作波段宽等特点,因此常应用在陆基对空观测、星载太空探测、机载红外探测等领域。由于卡塞格林系统的自身结构特点,杂散辐射对其影响严重。因此,为了提高光学系统的探测、识别效率,确保光学系统的成像质量良好,

需要分析研究光学系统的杂散辐射特型,有必要时提出相应的有效防护措施。国内李建华等人对空间红外探测系统进行了杂散光分析<sup>[1]</sup>,国外的 Paul A. Lightsey 等人分析了詹姆斯韦伯空间望远镜在可见光波段和红外波段的杂散辐射情况<sup>[2]</sup>,并设计了遮光罩等抑制措施。

红外热成像系统中,杂散辐射会导致系统成像对比度下降、图像出现异样等现象,尤其对于本

文讨论的机载红外光学探测系统而言,对比度的降低直接会影响到系统的探测距离。除此之外,红外系统中的杂散辐射往往是随系统的视场、焦距、温度等条件的变化而发生变化,这就决定了在系统后期图像处理阶段,无法有效地将这些杂散辐射信号过滤掉<sup>[3]</sup>。因此,有必要对红外成像系统在光机部分就进行杂散辐射抑制,以提高系统的成像质量。

## 2 杂散辐射来源分析

对于本文讨论的机载红外光学系统而言,杂散辐射一般可以分为两类,第一类为外部杂散辐射,例如太阳辐射(大气中的云层在红外探测系统中,往往作为背景出现在成像视场内,所以此处暂不考虑云层的杂散辐射影响);第二类为内部杂散辐射,例如系统内部结构件自身辐射。如图1,为了方便分析,定义光学系统的光轴与太阳光的夹角为太阳离轴角 $\theta$ 。

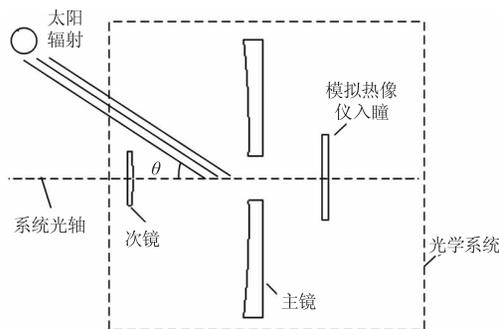


图1 太阳离轴角的定义

Fig. 1 Definition of the sun off-axis angle

在机载工作环境下,不同纬度、不同时间、不同季节、不同航向等因素都会导致太阳离轴角的变化。当太阳离轴角小于等于系统视场角时,红外光学系统直接“看到”太阳,系统出现饱和,无法正常成像。但对于本文研究的卡塞格林系统而言,视场角小于等于 $\pm 3^\circ$ ,因此在绝大部分情况下,太阳直接进入视场的情况可以避免。所以本文将太阳视作为一个视场外的杂散辐射源。如图2所示,当太阳离轴角大于系统视场角时,光线会直接通过主镜的通光孔,进入卡式系统后方的热像仪中,这些光线经过热像仪的镜筒内壁等结构件的反射最终进入像面。除此之外,主次镜的散射光线也会进入到热像仪中。这些杂散辐射会降低系统的信噪比,从而降低红外探测系统的作用距离。

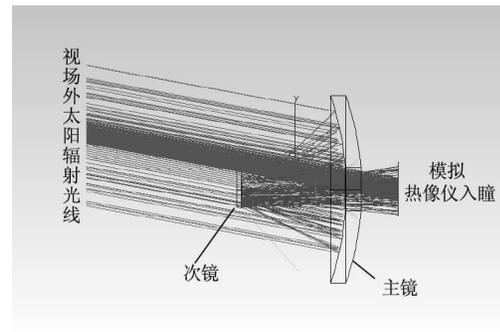


图2 视场外太阳辐射光路示意图

Fig. 2 Optical path diagram of the solar radiation out of field

本文讨论的光学系统工作波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,因此需要计算太阳辐射在该波段范围内的辐射量。由普朗克黑体公式<sup>[4]</sup>可知,太阳的辐射出射度为:

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

其中, $\lambda$ 为波长,单位 $\mu\text{m}$ ;  $\lambda_1$ 为 $3 \mu\text{m}$ ;  $\lambda_2$ 为 $5 \mu\text{m}$ ;  $c_1$ 为第一黑体辐射常数,  $c_1 = 3.7417749 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ;  $c_2$ 为第二黑体辐射常数,  $c_2 = 1.438769 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ;  $T$ 为太阳平均温度,  $T = 5900 \text{ K}$ 。

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(2)~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;  $\alpha$ 为太阳和入瞳连线与入瞳法线的夹角。

则太阳在立体角 $\Omega$ 内发出的光通量为:

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

那么太阳在中波红外波段 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 内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,  $\tau$ 为中波红外在大气中的透过率,此处取平均值0.75。

计算得出太阳光的中波红外波段,在系统入瞳表面的辐照度为 $16.86 \cos \alpha \text{ W/m}^2$ ,表1为光学系统

的杂散辐射来源。

表1 光学系统的杂散辐射来源

Tab. 1 Sources of stray radiation in optical systems

杂光来源	杂光特性
太阳辐射	非成像光束； 在系统入射面上的辐照度为 $16.86 \cos\alpha W/m^2$ , $\alpha$ 为太阳辐射对系统的离轴角。
内部热辐射	非成像光束； 系统内部热辐射源产生热辐射。

### 3 杂散辐射评价方法

目前评估光学系统的杂散辐射抑制特性的手段有很多,各个评价手段对应着不同的应用范围。其中,常用的评价手段分别有测量系统的杂光系数、模拟仿真系统的点源透过率(PST)以及生成系统的辐照度分析图。杂光系数<sup>[5]</sup>定义为像面或者探测器表面接收到的杂散光通量与像面或者探测器表面上的总光通量之比,因此该方法需要测量相关数据,对测试设备的要求较高。点源透过率和辐照度分析图则是由软件分析、计算得出,只要保证仿真模型的准确性,这两种评价手段足以评定系统的杂散辐射水平。因此,有必要对后两种评价手段展开介绍。

#### 3.1 点源透过率

光学系统对轴外杂散点光源的抑制水平通常用点源透过率<sup>[6-7]</sup>(PST)来衡量,其定义为:与光轴夹角为  $\theta$  的点光源通过光学系统后,像面辐照度  $E_d(\theta)$  与入瞳等效辐照度  $E_i(\theta)$  之比,数学表达式为:

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

点源透过率同时是光学系统中杂散辐射水平的可测量指标,它也与探测器和系统口径的大小无关,结果是量纲一的值。因此,可以通过两种方式获得 PST 的数值<sup>[8]</sup>,一种是通过测量仪器测量入瞳和探测器上的辐照度,另一种是通过杂散辐射分析软件分别计算入射光瞳和探测器上的辐照度。对于本文研究系统而言,点源透过率被用作系统的杂散辐射水平的评估指标,并且点源透过率的数量级小于或等于  $10^{-4}$  时,可以认为系统的杂光抑制效果满足要求。

#### 3.2 辐照度分析图

辐照度分析图指的是在杂散光分析软件中,某一选定平面的辐射能量分布图。分别在软件中

选中入射光瞳面和像面时,读取辐照度分析图的信息,根据公式(7)可以得出系统的点源透过率。应当注意,在杂散光分析软件进行光线追迹的过程中,如果追迹的光纤数目不够多,会导致辐照度分析图能量分布不均匀。因此,为了提高仿真计算结果的准确度和精度,必须设置足够多的光线数量。

## 4 系统建模

### 4.1 建立光机系统模型

目前具有杂散辐射分析的功能的软件一般有 LightTools、TracePro 和 OPTISWORKS 等软件,其中 TracePro 软件可以与 Pro/E、SolidWorks 等机械设计软件兼容,同时也可以和 ZEMAX、CODE V 光学设计软件兼容,具有友好的操作界面。本文采用 TracePro 软件进行杂散辐射仿真和计算,在软件中建立卡塞格林系统的光学机械系统模型,如图 3 所示。

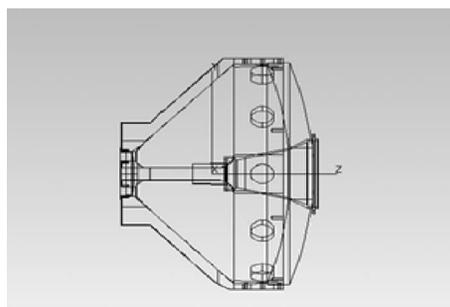


图3 光机系统模型

Fig. 3 Optical-mechanical system model

### 4.2 设置相关参数

光学系统建立之后,为了能真实描述系统的实际特征,需要给不同的元件表面设置合理的属性参数,相关参数设置见表 2。

表2 表面参数设置

Tab. 2 Surface parameter settings

元件	吸收率	反射率	透射率
镜片表面	0.01	0	0.99
结构件表面	0.9	0.1	0
探测器表面	0.99	0.01	0
反射镜表面	0.01	0.99	0

### 4.3 设置光源模型

由于光学系统远离太阳,因此太阳可以被视为点光源,而且太阳发出的光线可以视为发散角为

0.5°的平行光。内部辐射光源可以将辐射表面设置为与实际情况所对应的郎伯发射体。具体光源参数设置如表 3 所示。

表 3 光源模型设置

Tab. 3 Light Source model settings

	太阳辐射	内部辐射
光源类型	平行光出射的圆形 grid 光源	郎伯发射体
光源尺寸	半径 175 mm	辐射表面实际尺寸
光源位置	主镜前 400 mm	辐射表面实际位置
光线数量	1000 万	每个辐射表面 5000 条
光线精度	$10^{-7}$	$10^{-7}$

### 5 杂散辐射分析

本章主要针对该卡塞格林系统进行了外部杂散辐射分析及内部杂散辐射分析,通过软件的仿真结果计算得出系统的杂散辐射抑制水平,并提出了对应不同杂散辐射源的抑制措施。

#### 5.1 外部杂散辐射分析

由于卡塞格林系统的对称性,所以在分析太阳光的方位时只需考虑离轴角为  $0^\circ \sim 90^\circ$  的情况。本文分析了离轴角为  $0^\circ \sim 80^\circ$  的系统的点源透过率,并通过光线追迹求出太阳辐射在不同离轴角下的点源透过率 PST,分析结果如图 4 所示。

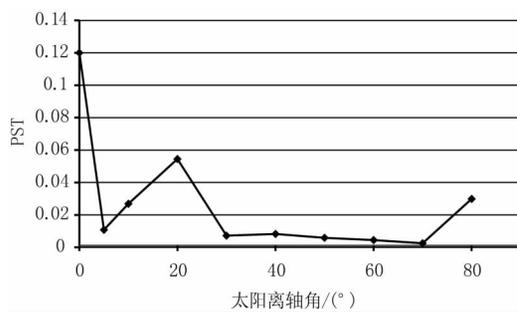


图 4 初始光学系统点源透过率

Fig. 4 The point source transmittance of the initial optical system

由仿真结果可以看出,系统的点源透过率均大于  $10^{-4}$ ,所以系统的杂散辐射已经影响正常成像,有必要对系统进行消杂光措施。由于系统遮光比的要求和工作条件的限制,本文设计主镜的外遮光罩和内遮光罩,其中外遮光罩直径为 350 mm,长度为 300 mm,内遮光罩直径为 31.8 mm,长度为 45 mm。添加遮光罩后,再次仿真计算系统的 PST,得到结果如图 5 所示。

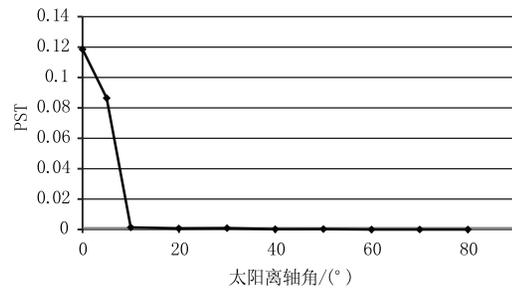


图 5 加遮光罩系统点源透过率

Fig. 5 The point source transmittance of the system with hood

由图 5 可以看出,添加遮光罩后,当太阳离轴角大于或等于  $30^\circ$  时,系统的点源透过率的数量级小于或等于  $10^{-4}$ ,当离轴角大于或等于  $60^\circ$  时, PST 为 0,太阳杂散光完全被抑制。可见,在系统中添加遮光罩,可以明显地抑制太阳杂散辐射。

#### 5.2 内部杂散辐射分析

内部杂散辐射由系统内部结构等部件的热辐射引起,为了方便热辐射的详细分析,本文将模型的各元件作为辐射源单独进行热辐射计算,把所有暴露在光路内或者能够进入光路的潜在元件都作为热辐射源计算其在像面上的残余辐射量。对系统的内部辐射源设置完成后,分析系统在像面的辐照度情况。图 6 为系统结构件不做涂黑处理的像面辐照度图,图 7 为结构件做发黑处理的像面辐照度图。

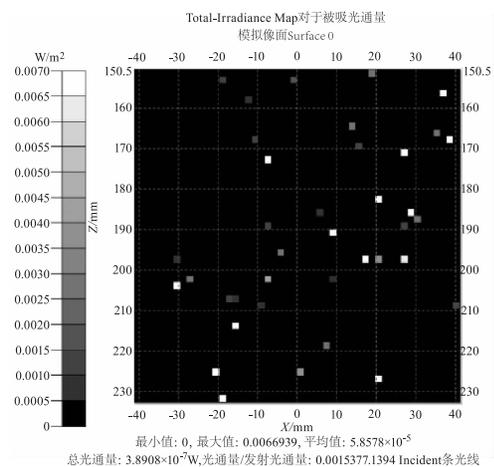


图 6 结构件不涂黑漆像面辐照度

Fig. 6 Irradiation of image without black painted structure

由分析结果可以看出,增加元件表面的吸收率,也就是发射率,虽然会提高表面的辐射发射通量,辐射源经过高吸收率的元件或表面会成几何量级的衰减其辐射通量,因此系统中采用高吸收率(即高发射率)的材料并不会使热辐射变得更加糟糕,反而有益于热辐射的抑制。

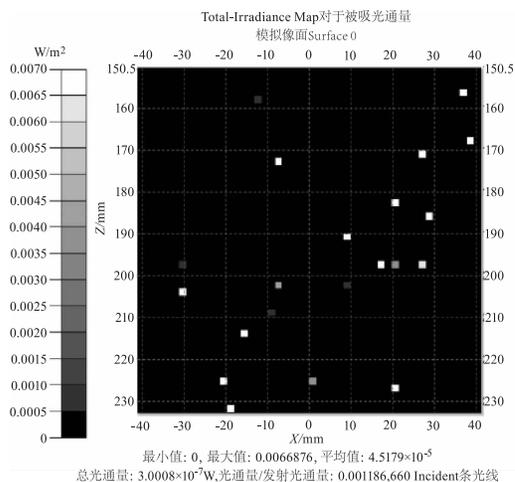


图7 结构件涂黑漆像面辐照度

Fig. 7 Irradiation of image with black painted structure

除此之外,温度对热辐射的影响较大,根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知,辐射源的辐射能量跟温度的四次方成正比,因此降低系统工作温度是热辐射的有效抑制措施。

## 6 结论

文中讨论了应用在机载红外探测领域的卡塞格林系统的杂散辐射来源,并针对外部杂散辐射和内部热辐射进行了深入的研究。本文以点源透过率作为指标,评估系统对太阳杂散辐射的抑制水平。在 TracePro 软件中建立光学机械仿真模型和光源仿真模型,并进行光线追迹。计算得到太阳杂散辐射的像面辐照度以及系统 PST,设计了遮光罩并分析其遮光效果。除此之外,仿真分析了系统内部自身热辐射对系统的影响,提出了相应的改进措施。结果表明,添加遮光罩后,在离轴角大于等于  $30^\circ$  时,相面上的太阳杂散辐射很小,系统的 PST 数量级小于或等于  $10^{-4}$ ; 在离轴角大于或等于  $60^\circ$  时,太阳杂散辐射可以完全被抑制。对于系统的内部热辐射,提出了提高系统结构件吸收率、降低系统工作温度等建议,从而降低系统的内部热辐射能量。

## 参考文献:

- [1] LI Jianhua, LI Zhifeng, LIU Jiaqi, et al. Stray light analysis and suppression for space infrared detecting system [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 185 - 188. (in Chinese)  
李建华, 李志锋, 刘佳琪, 等. 空间红外探测系统外部杂散光分析与抑制 [J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 185 - 188.
- [2] Paul A Lightsey, Zongying Wei, Dennis L Skelton, et al. Stray light performance for the James Webb Space Telescope [C] // Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [3] QI Meng. Detection probability of IR search and track system [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269 - 271. (in Chinese)  
祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究 [J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 269 - 271.
- [4] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- [5] DENG Chao. Analysis on stray light elimination for space solar telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4), 710 - 715. (in Chinese)  
邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4), 710 - 715.
- [6] CHEN Zhaofeng, HE Zhiping, LI Xiaotong, et al. Stray light analysis of optical system [J]. Optical Instruments, 2003, 25(2): 12 - 15. (in Chinese)  
岑兆丰, 何志平, 李晓彤, 等. 光学系统中杂光分析 [J]. 光学仪器, 2003, 25(2): 12 - 15.
- [7] NIU Jinxing, ZHOU Renkui, LIU Zhaohui, et al. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 738 - 771. (in Chinese)  
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算 [J]. 光学学报, 2010, 30(3): 738 - 771.
- [8] LIAO Sheng, SHEN Mangzuo. Point source transmittance (PST) of visible stray light of R-C optical system and its measurements [J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(Sup): 17 - 20. (in Chinese)  
廖胜, 沈忙作. R-C 光学系统可见光杂光 PST 的研究与测试 [J]. 光电工程, 1998, 25(Sup): 17 - 20.