

一种折反二次成像式长波光学系统的杂散光抑制

孟卫华^{1,2}, 项建胜², 倪国强¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 中国空空导弹研究院 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 讨论了一种折反二次成像式长波红外光学系统的杂散光抑制方法, 该光学系统采用 R-C 反射式结构和二次成像光路, 用于小型低成本红外成像制导系统。利用 LightTools 软件仿真找出光学系统中的主要杂散光来源和传输路径, 结合仿真分析结果设计出了合适的机械拦光结构。然后在 LightTools 中建立了光学机械结构模型针对杂散光抑制进行了迭代设计, 并对杂散光抑制效果进行了仿真验证。设计的光学系统加工、装配完成后进行了太阳杂散光抑制试验, 仿真和试验结果表明: 太阳夹角 7° 以外不存在杂散光干扰, 可以满足系统杂光抑制要求。

关键词: 杂散光; 折反系统; 二次成像; 长波红外

中图分类号: TB133; TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0966-05

Suppression of stray light in a catadioptric and re-imaging LWIR system

Meng Weihua^{1,2}, Xiang Jiansheng², Ni Guoqiang¹

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Stray light suppression in a catadioptric and re-imaging LWIR system was discussed. The optical system which comprised a classical R-C reflective optics and a re-imaging refractive optics was designed for a compact and low-cost IIR seeker. The source and path of stray light in this system were investigated by simulating the optic-mechanical model with LightTools. According to the simulation, the mechanical light stops were built, and the performance of stray light suppression was analyzed. After assembled, the optical system and its anti-stray light effect were evaluated by testing the angle limit away from the sun. The results of simulation and test indicate that there is no influence of stray light on the LWIR system outside 7° from optical axis.

Key words: stray light; catadioptric system; re-imaging; LWIR

收稿日期: 2013-02-28; 修订日期: 2013-03-13

基金项目: 航空科学重点基金项目(20100112002)

作者简介: 孟卫华(1969-), 男, 研究员, 主要从事光电系统、模式识别、跟踪与控制等方面的研究。Email: mengwh869@ustc.edu

0 引言

近几十年,红外探测系统获得了极大的应用,随着人们对红外光学系统的研究,发现它易受杂散光影响。杂散光主要包括太阳光等外部杂散光、光学系统内辐射源产生的内部杂散光以及非正常光路杂散光。当红外光学系统中存在杂散光时会严重影响系统的成像质量,造成像面对比度下降,甚至会形成虚假目标。为此,进行红外光学系统设计必须分析并解决杂散光对系统的影响问题^[1]。

国外自20世纪60年代开始研究红外光学系统杂散光问题,对杂散光来源、形成机理、仿真分析方法、抑制技术等方面进行了详细研究^[2],之后逐渐形成了红外光学系统杂散光分析理论与实用的杂散光分析软件。国内由于红外光学系统研究本身起步较晚,杂散光问题自20世纪90年代开始在专业光学研究所进行详细研究^[3-4],得出了切实有效的杂散光抑制方法。

对于红外制导系统而言,太阳是最强的外部干扰源。一般来说,红外制导系统中光轴接近太阳一定角度时性能会明显下降,进入太阳禁区。成像制导系统因其灵敏度和分辨率的提高,太阳杂光的影响更为显著,在设计中应尽可能通过对太阳杂光的抑制减小太阳禁区,扩大制导系统的使用范围。但制导系统一般结构非常紧凑,光学系统又工作于运动平台上,这给杂散光抑制带来了较大困难。

折反式光学系统在空间占用、温度适应性等方面均有良好的表现,适合于制导系统使用。但相比于透射式系统,折反式光路结构由于非完全封闭,杂散光线比较容易直接入射到探测器上从而形成杂光干扰,因此杂散光的分析及其抑制应结合系统自身特点重点分析并通过试验进行验证和评价^[5-7]。

1 光学系统设计

设计的光学系统应用于小型低成本红外末制导系统,工作在长波红外波段。作为跟踪伺服平台的负载,光学系统空间和重量均受较大限制,要求可 $\pm 90^\circ$ 回转,并且具有 $-45\sim 70^\circ\text{C}$ 宽温环境适应性,尤其是应尽可能降低使用中太阳等强辐射源的影响。经综合考虑,光学系统用折反式结构实现,其主要参数如表1所示。

表1 光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of optical system

Parameter	Value
F/#	1
FOV/(°)	6
Waveband/ μm	8-12
Obstruction ratio	0.36
LOS angle limit away from the sun/(°)	8

系统在传统折反式结构的基础上增加了二次成像镜组^[8],进一步拓宽了系统视场。由于采用非制冷探测器,为提高探测灵敏度取 $F/\# = 1$ 。相比于其他折反二次成像式长波光学系统,该光学系统具有结构紧凑、相对孔径大的特点,长度与焦距之比仅为1.7,遮拦比0.36,主反射镜采用高精度非球面型铝合金反射镜。系统光路如图1所示。目标能量经过保护性整流罩后,经主反射镜会聚、次反射镜折转后形成一次成像面,一次成像面经过二次成像透镜组最终成像在探测器上。图中主、次反射镜组成经典R-C反射系统,后续五片透镜组成二次成像镜组。为了较好地控制像差,二次成像镜组放大倍率约为1。

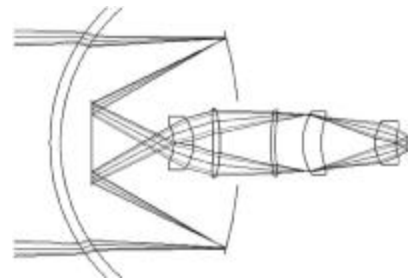


图1 系统光路图

Fig.1 Optical layout of LWIR system

系统按照无热化设计原理进行设计。记主反射镜曲率半径为 r ,其材料的热膨胀系数为 α_1 ,镜筒热膨胀系数为 α_2 ,主次反射镜间距为 L ,二次成像系统的焦距为 f ,一次像点对二次成像系统为物点,记物距为 L_1 ,像距为 L_2 。系统满足无热化设计时二次成像系统焦距变化与上述已知物理量之间的关系如公式(1)所示^[9]:

$$\Delta f = \frac{f^2(r\alpha_1 - 2L\alpha_2)\Delta t}{2L_1^2 + (L_1 - f)(r\alpha_1 - 2L\alpha_2)\Delta t} \quad (1)$$

通过适当调整主反射镜曲率半径、镜筒材料及二次成像系统内部焦距分配等方法,使得公式(1)成立即可实现无热化设计,然后再通过多次迭代得

到满足性能要求的光学系统基本设计。

光学系统调制传递函数曲线如图 2 所示, 点列图如图 3 所示。从图中可以看出, 在探测器极限分辨率下系统全视场传递函数均高于 0.4, 而 RMS 弥散斑半径不超过 $10\ \mu\text{m}$ 。

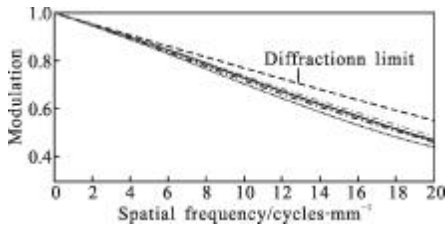


图 2 系统传递函数曲线

Fig.2 MTF of optical system

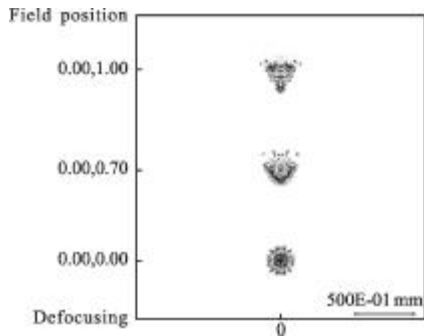


图 3 点列图

Fig.3 Spot diagram

2 杂散光分析

光学系统性能设计满足要求后, 在光机一体化仿真分析软件 LightTools 中建立模型, 经过多轮光线追迹发现部分视场外光线会直接入射到二次成像镜组内, 并经过壁面反射到达探测器, 从而形成杂散光干扰, 如图 4 所示。

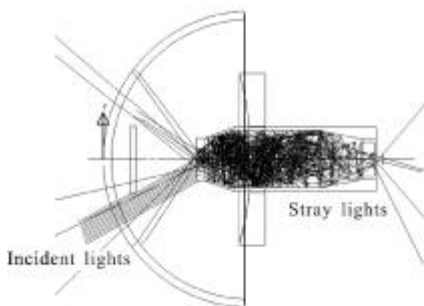


图 4 杂散光形成路径

Fig.4 Path of stray light

可以通过诸如涂黑色消光漆、车削消光螺纹等措施降低机械镜筒的反射率, 进而减弱杂散光的影响。但根本上还是要从源头上解决: 尽可能阻止视场外光线直接入射到二次成像镜组内。较好的办法是设置拦光机构, 拦光机构的设置应遵循以下两个原则: 一是尽可能减少对正常光线的阻挡; 二是要在一次成像面处设置消光光阑^[10]。

根据上述原则对光学系统设置的拦光机构进行了初步设计。拦光机构主要由两部分组成, 一部分是位于次反射镜处的遮光罩, 另一部分是位于二次成像镜组前端的遮光筒。遮光罩与遮光筒的形状及尺寸主要由主反射镜内、外孔径边缘的最大视场角光线确定。如图 5 所示, 虚线表示位于主反射镜内、外孔径边缘的 3° 视场光线, 实线表示主反射镜内、外孔径边缘的 -3° 视场光线。设计中, 遮光筒在边缘光线能够通过的情况下尽量向次反射镜方向延伸, 同时在遮光筒上设置一次消光光阑。放置在次反射镜边缘的遮光罩设计为圆锥形结构, 为了尽可能减少对正常光路的遮挡, 其张角设计为最大视场孔径内边缘光线经主反射镜反射后与光轴的夹角。

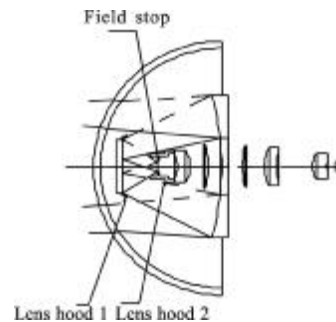


图 5 拦光机构设计示意图

Fig.5 Design of stray light stop

需要注意的是, 遮光筒和遮光罩的表面必须进行消光处理, 遮光筒由于位于二次成像镜组前端, 尤为重要。可在遮光筒内壁设置多重光阑或者车削 45° 消光螺纹, 对杂光进行多次散射以最大程度减弱达到探测器上的杂光能量。

3 杂散光抑制效果仿真与验证

杂散光抑制的效果一方面可利用软件仿真进行分析, 另一方面可通过室外抗太阳夹角试验中观察输出图像来评估。

根据前文初步设计得出的杂散光抑制结构,首先在 LightTools 软件中建立初始模型进行仿真,然后根据分析结果对模型进行修正与优化。杂散光仿真分析模型如图 6 所示。

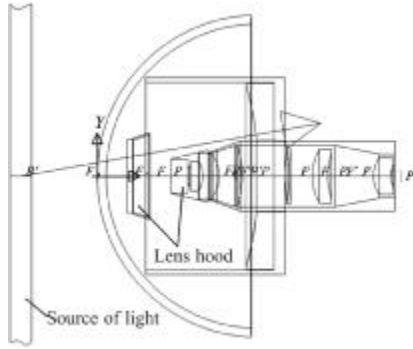


图 6 杂散光仿真分析模型

Fig.6 Simulation model of stray light

采用光线追迹法对系统杂散光进行仿真分析。首先追迹轴上视场光线,结果如图 7 所示。从图中可以看出,像面上除正常成像点外不存在杂散光,像面最大照度为 3.5428 W/mm^2 。

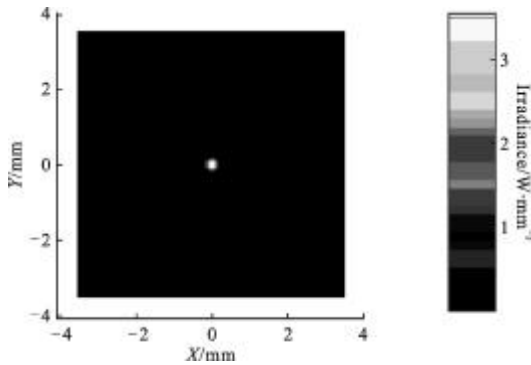


图 7 轴上视场仿真结果

Fig.7 Simulation result of 0° off-axis angle

同样追迹视场外 5°离轴角情况下的杂散光分布情况,结果如图 8 所示。可以看出,图像中存在一

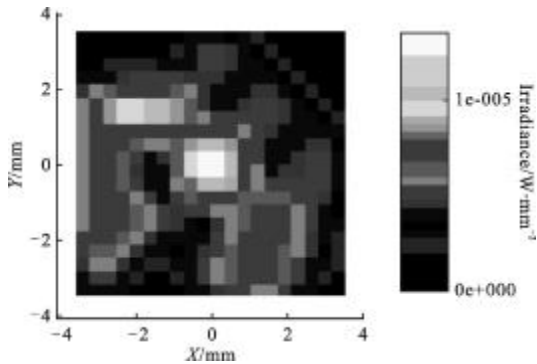


图 8 5°离轴角仿真结果

Fig.8 Simulation result of 5° off-axis angle

定的杂散光分布,在像面上的最大照度为 $1.3454 \times 10^{-7} \text{ W/mm}^2$ 。

点源透射比(PST)是一种评价光学系统消杂散光能力的指标^[11],其定义为:光学系统视场外离轴角为 θ 的光源,经过光学系统后在像面产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与垂直于该点源的输入孔径上的辐照度 $E_i(\theta)$ 的比值,如公式(2)所示。

$$PST = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)} \quad (2)$$

根据 PST 的定义,计算可知 5°离轴角下的点源透射比约为 3.8×10^{-8} ,说明该离轴角下杂散光抑制效果较好。

按照同样的方法,分别追迹了离轴角为 10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、50°、60°、70°情况下的杂散光分布情况,根据计算得到的各个角度下的 PST 绘制了不同离轴角下的 PST 分布曲线,如图 9 所示。可以看出,随着离轴角增大 PST 快速减小。仿真结果说明系统设计可以满足杂散光抑制的要求。

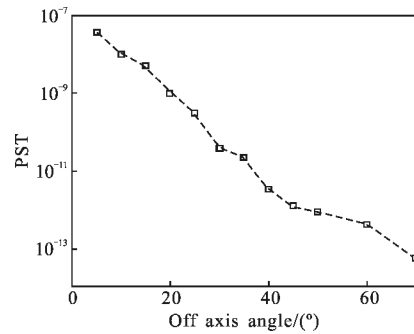


图 9 PST 值随离轴角的变化

Fig.9 PST vs off-axis angle

光学系统加工、装配完成后按图 10 进行了室外太阳杂散光抑制试验。

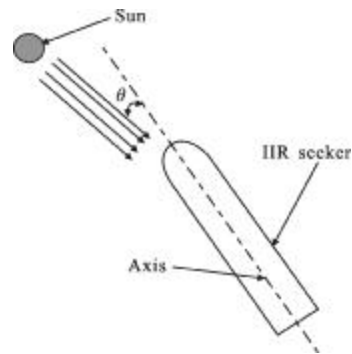


图 10 太阳杂散光抑制试验

Fig.10 Test of sun stray light suppression

试验通过将光轴偏离太阳不同角度,利用图像整体灰度以及分布情况评估杂散光抑制效果。试验结果表明,在太阳夹角 7° 以外,光学系统视场内不存在明显太阳杂散光干扰。不同太阳夹角下采集到的图像如图 11 所示。



图 11 部分杂散光试验图片
Fig.11 Images of stray light test

4 结论

针对减小制导系统太阳禁区的需求,讨论了一种折反二次成像式长波红外光学系统的杂散光抑制设计,结合光路自身特点,采用遮光罩、遮光筒、一次成像像面消杂光光阑等拦光机构并结合车削消光螺纹、喷涂消光漆等方法抑制杂散光。在 LightTools 软件中建立了光学机械模型,经过多轮迭代仿真优化了拦光机构的位置与结构尺寸。经软件仿真评估以及室外抗太阳杂散光试验验证,结果表明该光学系统杂散光抑制效果良好,可以满足系统使用要求。

参考文献:

- [1] Huang Qiang, Niu Xinhua, Shen Xuemin. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical systems[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(6): 348-352. (in Chinese)
黄强, 钮新华, 沈学民. 红外光学系统内部热辐射引起的杂散辐射分析[J]. *红外技术*, 2006, 28(6): 348-352.
- [2] Andrew T Y. Design of cassegrain light shields [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1063-1067.
- [3] Zhang Guoyu, Cao Weiguo, Gao Yujun, et al. The methods of analysis and calculation for stray light in optical system [J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1995, 18(4): 21-24. (in Chinese)
张国玉, 曹维国, 高玉军, 等. 光学系统杂散光的计算与分析方法[J]. *长春光学精密机械学院学报*, 1995, 18(4): 21-24.
- [4] Li Hui, Li Yingcai. Mathematical and physical model for a simplified stray light analysis method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(7): 665-672. (in Chinese)
李晖, 李英才. 一种简化杂散光分析方法的数理模型[J]. *光子学报*, 1996, 25(7): 665-672.
- [5] Gao Guopeng, Xiong Wang'e, Gang Yuquan, et al. Design and estimation of suppressing stray light in R-C system [J]. *Optical Instruments*, 2009, 31(5): 36-37. (in Chinese)
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): 36-37.
- [6] Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jiaguang. Stray light analysis for hyper-spectral imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1532-1537. (in Chinese)
王美钦, 王忠厚, 白加光. 高光谱成像仪的杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1532-1537.
- [7] Xiang Jiansheng, Pan Guoqing, Zhang Yunqiang, et al. The design of reflective and refractive reimaging infrared optic system used in air-to-air missile [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(8): 457-459. (in Chinese)
项建胜, 潘国庆, 张运强, 等. 应用于空空导弹的二次成像折反式红外光学系统的设计[J]. *红外技术*, 2011, 33(8): 457-459.
- [8] Robert E F, Biljana T G. *Optical System Design* [M]. NewYork: McGraw-Hill, 2004: 250-254.
- [9] Xiang Jiansheng, Pan Guoqing, Zhang Yunqiang, et al. The design of catadioptric and reimaged LWIR athermalization system[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(11): 644-647. (in Chinese)
项建胜, 潘国庆, 张运强, 等. 一种折反二次成像式长波无热化光学系统设计[J]. *红外技术*, 2012, 34(11): 644-647.
- [10] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical syatem[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 316-318.
- [11] Yan Peipei, Fan Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(4): 214-217. (in Chinese)
闫佩佩, 樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析[J]. *红外技术*, 2011, 33(4): 214-217.