大视场红外折反光学系统杂散光分析

王文芳[1,2],杨晓许[1],姜 凯[1,2],梅 超[1,2],李 刚[1],张恒金[1]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:杂散光分析是保证光学系统成像质量的关键技术之一,根据红外光学系统杂散光的定义,指出大视场红外光学系统的杂光来源,以及杂光对系统的影响,并且建立了消杂光结构。在消杂结构中,为了减少内部辐射,遮光罩内部使用反射式挡光环。采用 TracePro 软件对系统进行建模、仿真分析,结果表明此红外光学系统的杂散光得到很好的抑制:太阳杂光抑制水平 PST 可以达到 10^{-5}~10^{-8},内部辐射到达像面杂散光能量量级为 10^{-10} W,系统可以实现清晰成像。

关键词:光学系统; 杂散光; PST

中图分类号:TN214 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)01-0138-05

Stray light analysis of catadioptric infrared optical system with large field

Wang Wenfang[1,2], Yang Xiaoxu[1], Jiang Kai[1,2], Mei Chao[1,2], Li Gang[1], Zhang Hengjin[1]

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stray light analysis in optical system is a key technology to ensure the system's quality. According to the definition of stray light, the sources of stray light in infrared optical system and the effect of stray light were pointed out in this paper. In view of stray light source, a structure of suppressing stray light was established. In order to reduce the internal radiation, reflective vanes were used. TracePro software was also used to build the system model and simulate analysis of the system. The results indicate that stray light is well suppressed, and the system's PST can achieve a level of 10^{-5}-10^{-8}. At the same time, the internal radiation energy that gets to imager can achieve a level of 10^{-10} W. So the system can achieve a clear image.

Key words: optical system; stray light; PST

收稿日期:2012-05-24; **修订日期**:2012-06-27

基金项目:中国科学院"西部之光"人才培养计划"西部博士资助项目"

作者简介:王文芳(1986-),女,硕士生,主要从事光学系统设计方面的研究。Email:s09031@opt.cn

导师简介:杨晓许(1972-),男,副研究员,主要从事光学仪器方面的研究。Email:yxx@opt.ac.cn

0 引 言

红外光学系统接收目标和背景固有的红外辐射,关注的往往是热源,一般隐蔽性好,抗干扰能力强以及可以在任何时间工作, 故近年来红外光学系统得到了充分的发展。例如红外相机可以拍摄设备的过热点或者建筑物热量流失的位置, 在医学领域可以测量人体的局部温度差异等。

杂散光是指到达像面的非成像光束,对光学系统而言杂散光就相当于系统的噪声,直接影响着光学系统成像质量,导致像面对比度的下降和调制传递函数的下降。严重时目标像会被杂光淹没,导致系统失效。例如,我国发射的某卫星,其星载相机的设计达到了性能指标,但是由于在研制阶段未对杂光进行很好的理论分析,没有考虑消杂光的措施,使得背景杂光量级比要求拍摄的 5 等星的曝光量还高几百倍,系统严重失效[1]。因此对光学系统杂光的分析不仅直接影响该系统的性能,而且可以节约成本。对光学系统消杂光的评价一般有两种方法, 一种是杂散光测量法,另一种为杂散光分析法。目前常用 TracePro 软件仿真评价消杂光效果,得到该光学系统加上消杂光结构以后的点源透射比曲线(PST),根据得到的 PST 曲线,进行消杂光结构的修改,从而节约了成本。

1 光学系统基本参数

大视场红外折返光学系统基本参数如表 1 所示,光学系统结构图如图 1 所示。整个光学系统打破了传统红外折反光学系统视场小的局限性, 视场可以达到 50,系统设计中将主次镜做成曼金镜,成功地将视场扩大,而且避免了非球面的使用。

表 1 光学系统技术指标

Tab.1 Technical index of optical system

Parameter	Value
Wavelengths/μm	3-5
Range/km	10
Fields/(°)	5
EFL/mm	274
EPD/mm	68.5
F#	4
SPOT/μm	<30
MTF 17 lp/mm	>0.4
Back distance/mm	>25

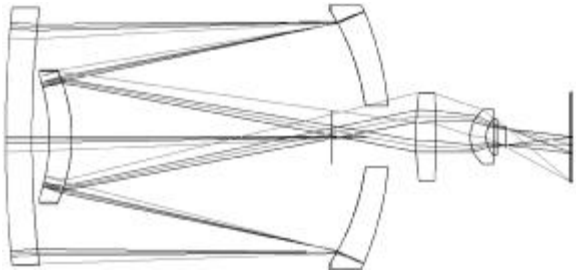

图 1 光学系统结构图

Fig.1 Optical system

2 红外光学系统杂散光的分析

杂散光就是入射到系统内或在系统内产生的非成像光束,严重影响光学系统的成像质量,甚至会使系统失效,消杂光的目的就是减少到达像面的杂光。红外系统的杂光分析与可见光系统有很多相似之处,例如杂光传输的基本理论,消杂光结构等。但是由于红外系统自身的特点, 与可见光系统之间又有显著的差异: 可见光系统不需要考虑系统自身的热辐射,而红外波段则必须考虑。

2.1 红外光学系统杂光来源

红外光学系统的杂散光主要有以下两类:第一,外部杂光;第二,内部辐射。其中外部杂光主要来自太阳以及其他星体, 在分析过程中由于太阳的杂散辐射比较强, 故此系统外部杂光分析过程中只分析太阳杂散光,可以当成固定点源的杂光进行分析。当太阳光进入系统后杂光路径主要有以下 3 种:(1) 不经主次镜由物空间直接照射到像面或者经后校正组照射到像面的杂光。(2) 视场内的成像光束不按正常光路传输的杂光。(3) 进入系统的非成像光束经镜筒漫反射后射到像面的杂光[2]。该系统所消除的杂光主要为第一种和第三种。内部辐射杂光主要是指镜筒内部的自身辐射。

2.2 红外光学系统统消杂光常用方法

红外系统消杂光与可见系统消杂光有着相似之处,但也有自己独特的消杂光方法。目前国内外常用的方法主要有以下几种:

(1) 用光阑的组合抑制杂散光[3]。即通过孔径光阑、视场光阑以及里奥光阑的组合抑制系统中的杂散辐射。

(2) 遮光罩以及挡光环消杂光结构。红外系统中,太阳和光轴必成一定夹角,故采用挡光环可以很

好的抑制杂光。

(3) 消杂光涂层的使用[4]。

(4) 对结构中的零部件进行冷却。

(5) 温栏-冷阑匹配方法消除部分背景辐射。

(6) 温控法。即对辐射率高的部件进行温度控制,使控制后的部件在成像光谱范围内辐射率降低。

上述方法中后 3 种是红外消杂光独特的方法。

2.3 大视场红外折返光学系统消杂光措施

2.3.1 消除不经主次镜直接进入像面的杂光

(1) 加内遮光筒[5-6]。一般内遮光筒尺寸采用作图方法求出[7],如图 2 所示,光线 1、2 分别是经孔径外边缘和孔径内边缘的光线, 经主镜反射后交与 **B** 点,其关于中心轴线对称的点为 **B′**,光线 3 是经边缘视场内孔径光线交主镜与点 **C**,则 **B′**、**C** 决定了内遮光筒的口径。该系统内遮光罩前口径为 20 mm,后口径为28 mm。

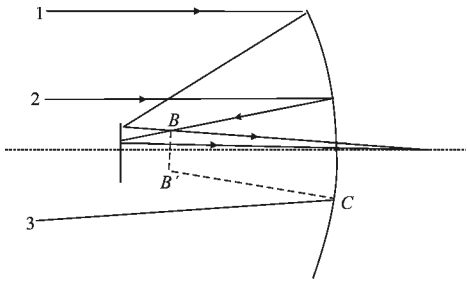

图 2 内遮光筒原理图

Fig.2 Design principle of inner hood

在光学软件中, 通过光线追迹法可以看出边缘视场光线到达光学系统入瞳的数量与最终达到像面的数量相等,故所设计的内遮光罩合理,不会阻挡视场内的光线,如图 3 所示。

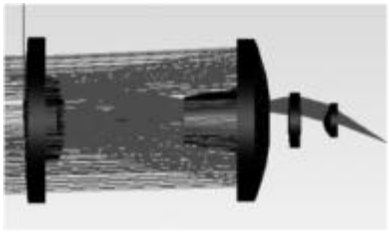

图 3 光线追迹图

Fig.3 Stray light ray tracing

(2) 加外遮光罩。外遮光罩加在系统的前方,用来防止来自视场外的杂光。该系统中外界杂光主要是太阳光,杂光抑制角为 45°,此角度决定了外镜筒的长度。传统做法是将外遮光罩内壁涂黑,黑层吸收确实可以直接阻止外界杂光进入像面,但是由于该系统是红外光学系统,黑层不再适用,因为根据基尔霍夫定律表明好的吸收体必是好的辐射体,黑层吸收是造成系统内部自身辐射的主要原因,故在此系统中将外遮光罩内表面设置为互相垂直的反射面,其原理图如图 4 所示,杂散光源和水平轴夹角为 δ,光学系统半视场角为 ω,反射面和水平面的夹角为 θ,当 $\delta+\theta\gg 90°$时,大于系统抑制角的杂散光源在镜筒内部的传布情况如图所示,有 4 种情况分别可用光线 1、2、3、4 表示。光线 1 经过一反射镜反射光线直接反射出系统,光线 2 经过互相垂直的两反射面沿原路返回也反射出系统,光线 3 经过两个互相垂直的反射面后的反射光线仍然是沿原路返回,但是却反射到遮光罩的上部,需要在经过系统的多次反射以后才可以进入系统,根据二次反射原理可知这部分杂散光能量很小。光线 4 反射光线理论上是可以进入系统的,但是这部分光线是由离轴角较大的杂散光源发出的,而且这部分光线的范围很小。另外光线 4 的反射光线与光轴的夹角大于视场角,所以这部分光线可以不考虑。系统中每个反射面的尺寸大小可以在作图软件 solidworks 中通过精确建模的方法得到[8],避免了繁琐的公式的计算。该系统中共有 16 组反射镜。通过 TracePro 软件进行光线追迹最终得出,就该系统而言,当杂散光源离轴角 $\delta\geqslant 85°$时才会出现光线 4。图 5 为离轴角为 85°时杂散光仿真图,此时进入系统的光线为 85°杂散光源总光线的 2%。而且这部分光线与光轴的夹角已经大于所设计系统的视场角,故不考虑这部分光线是合理的。

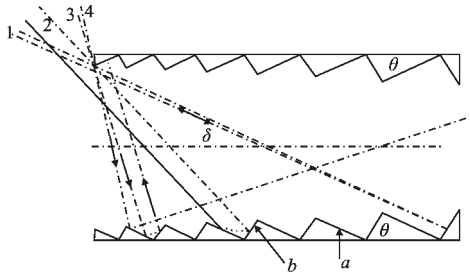

图 4 遮光罩设计原理图

Fig.4 Design principle of baffle

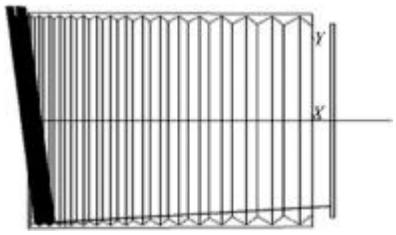

图 5 杂散光源仿真图

Fig.5 Simulation of stray light

2.3.2 消除镜筒漫反射杂光结构

当杂光射到镜筒内壁时有可能经过散射最终到达像面，因此对主次镜之间的遮光筒还需要设计挡光环。挡光环将阻止所有经过次镜边缘散射到镜筒的杂光照射到主镜上。挡光设计原理图如图 6 所示，虚线 **m** 与实线 **n** 的距离是 **h**，即挡光环的高度为 **h**，在外镜筒上选取靠近 **A** 的一点 **L**，连接 **BL**，**AL**，此路径作为镜筒接收杂光的最小角度路径。**BL**，**AL** 与虚线 **m** 交于 **K′**，**M′**，在此处设置两个挡光环，再连接 **AK′** 交直线 **n** 于 **J**，连接 **BJ** 交虚线 **m** 于 **I′**，在此处设置第三个挡光环，以此类推。该系统中挡光环的设计也是通过 solidworks 软件精确建模得到。挡光环的高度为 4，共有5 个。

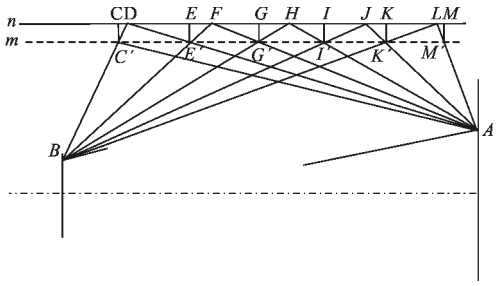

图 6 挡光环设计原理图

Fig.6 Design principle of vanes

2.4 杂散光软件仿真

近年来，软件仿真分析杂散光成为人们研究杂光的重点。在杂散光分析软件方面主要有 APARJ、GUERAP、ASAP、LightTools 、TracePro 软件。其中 TracePro 软件分析红外杂光时可以直接仿真内部系统的辐射，故大视场红外折返光学系统采用TracePro 软件进行杂光分析。在分析过程中一般以点源透射比(PST)作为评价系统消杂光能力。

2.4.1 光学表面的 **ABg** 散射模型[9]

在用 TracePro 软件分析杂散光时，各光学表面采用 ABg 散射模型，如图 7 所示。

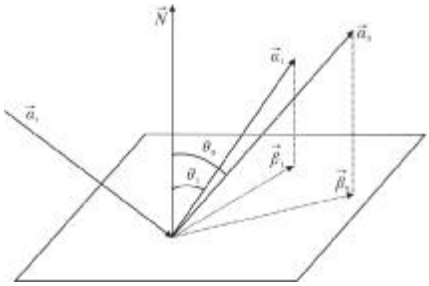

图 7 ABg 散射模型

Fig.7 ABg scattering model

某方向入射到散射面入射光线的单位矢量用$\vec{\alpha}_i$表示，$\vec{\alpha}_0$，$\vec{\alpha}_1$分别为散射面反射方向和任意散射方向的单位矢量，在散射面上的投影向量为$\vec{\beta}_0$、$\vec{\beta}_1$。**ABg** 散射模型是用幂数倒数来表达 BSDF，用表达式中的 3 个参数 **A**，**B**，**g** 命名的，如下式：

$$\mathbf{BRDF}=\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}+\left|\vec{\beta}_0-\vec{\beta}_1\right|^{\mathbf{g}}}$$

目前许多杂散光分析软件中 BRDF 数据库都是采用这种散射模型。

2.4.2 模型的建立

由于 TracePro 软件提供了 ACIS 机械转接口，故建模工作可以在三维建模软件中完成，并且在建模时已经预留了 2 mm 的压边余量，最后导入 TracePro 软件。光学系统在 TracePro 中状态如图 8 所示，其中包括光学系统和消杂光结构。

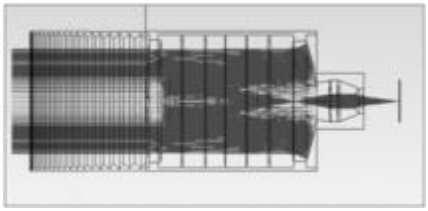

图 8 杂光分析三维模型

Fig.8 3D model for stray light analysis

在仿真分析过程中，每个表面的散射特性如下，设透镜 BRDF 参数为 **A**=0.007，**B**=0.1，**g**=0；主次镜以及遮光罩中的反射镜组 BRDF 参数为 **A**=6.385 e^{-6}，**B**=0.0001，**g**=2.172，其余镜筒壁涂 Aeroglazee Z-306。分析过程中追迹一定数量的光线，即可以得出像面

杂光大小。

2.4.3 杂光分析结果

假设系统工作温度为 300 K,主镜筒内壁辐射率设为 0.9,遮光罩内壁辐射效率为 0.001,在这种假设下用 TracePro 软件进行光线追迹得到像面杂散光量级为 10^{-10}, 并且挡光环在此系统中可以阻止镜筒内壁的内部辐射到达像面,如图 9 所示。

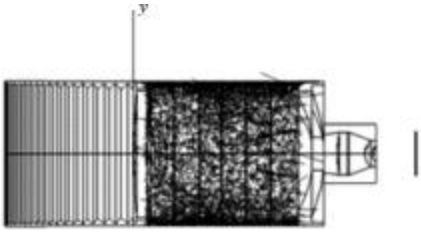

图 9 镜筒内壁辐射图

Fig.9 Internal radiation

通过此仿真结果可以得出的结论为：此消杂光结构很好地抑制了系统内部辐射，大大减少了到达像面的内部辐射能量。

PST 定义为离轴角为 θ 的点源引起探测器上的辐照度与在垂直该点源的输入孔径上的辐照度之比。在软件仿真过程中采用 10 621 根、29 701 根、67 051 根入射光线在 0 方位角以不同离轴视场进行光线追迹,由仿真结果可知,当入射光线 29 701 根以上时 PST 值趋近稳定，所以 TracePro 软件仿真过程中入射光线采用 29 701 根,得到像面杂散光大小,并计算出每个离轴角度时系统的 PST,图 10 为所绘制的 PST 曲线。

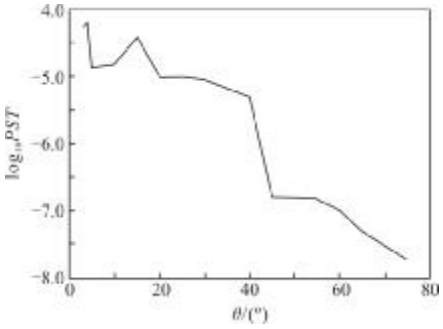

图 10 系统的点源透射比曲线

Fig.10 Curve of point source transmittance

分析点源透射比曲线可知，视场杂光的点源透射比数量级在 10^{-5}~10^{-8} 之间，可以满足实际工作的需要。

3 结 论

红外折返光学系统在杂散光分析方面，该系统所采用的消杂光结构很好的抑制了到达像面的杂光,使系统的点源透射比数量级在 10^{-5}~10^{-8} 之间,而且此系统很好地抑制了系统自身辐射使得像面杂散光量级为 10^{-10} W，另外 TracePro 软件仿真分析杂光是目前分析杂光较好的方法，避免了杂光测试试验中繁琐的问题。

参考文献：

[1] Li Ting. Stray light analysis of lunar-based optical telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36: 137-142. (in Chinese)

[2] Shi Guanghui. Mathods preventing stray light emergence in Cassegrain systems[J]. Opt Precision Eng, 1997, 5(5): 10-16. (in Chinese)

[3] Wang Qian. Suppression of stray light radiation in infrared system[J]. OME Information, 2002, 12: 21-24. (in Chinese)

[4] Moldosanov Kamil A, Kashirin Victor A. Black coating for stray light and thermal control application [C]//SPIE, 2001, 4458: 87-94.

[5] Song Ning. Design and analysis of baffle of the ritchey-chretien(R-C) system used in space remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 821-826. (in Chinese)

[6] Huang Zhiqiang. Principle and realization of baffle and vane, sprogrammable design[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(4): 119-123. (in Chinese)

[7] Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Science Press, 1983: 635-644. (in Chinese)

[8] Zhong Xing. Stray light removing of reflective optical system [J]. Infrared and laser Engineering, 2008, 37 (2): 316-318. (in Chinese)

[9] TracePro user's manual 3.0. Lambda Research Corporation, version3.0, 2002.