第 31 卷 第 10 期
2024 年 10 月

电 光 与 控 制
Electronics Optics & Control

Vol. 31 No. 10
Oct. 2024

引用格式:杨沛斌,徐瑞瑞,金晨,等. 一种红外成像导引头光学系统杂散光的消除[J]. 电光与控制,2024,31(10):102-105. YANG P B, XU R R, JIN C, et al. Stray light removing of optical system of infrared imaging seeker[J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(10):102-105.

一种红外成像导引头光学系统杂散光的消除

杨沛斌[1], 徐瑞瑞[2], 金 晨[1], 赵永库[1]

(1. 航空工业第一飞机设计研究院,西安 710000; 2. 中国人民解放军 93160 部队,河南 洛阳 471000)

摘 要: 反射式红外成像导引头光学系统存在杂散光。首先,分析导引头系统的漏光杂散光,完成了导引头系统遮光罩的设计,系统遮拦比为 0.476;然后,对二次反射鬼像进行分析发现,由后镜组第一片透镜的前、后表面引入的鬼像能量较强,提出必须提升该透镜表面的反射率以降低鬼像能量,而且外镜筒吸收率应达到 0.9,以削弱结构件一次散射杂光对成像的影响;最后,使用光线模拟追迹软件 ASAP 进行仿真计算,得到系统的杂光系数为 5.8%,证明了设计的可行性,保证了导引头光学系统的成像质量。

关键词: 杂散光; 大口径反射式光学系统; 遮光罩; 二次反射鬼像

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-637X.2024.10.017

Stray Light Removing of Optical System of Infrared Imaging Seeker

YANG Peibin[1], XU Ruirui[2], JIN Chen[1], ZHAO Yongku[1]

(1. The First Aircraft Institute, AVIC, Xi'an 710000, China; 2. No. 93160 Unit of PLA, Luoyang 471000, China)

Abstract: Stray light exists in the optical system of reflective infrared imaging seeker. Firstly, the light leakage and stray light of the seeker system is analyzed, and the design of shade of the seeker system is completed. The system shading ratio is 0.476. Then, the secondary reflection ghost image is analyzed, and it is found that the ghost image energy introduced by the front and rear surfaces of the first lens in the rear mirror group is stronger. It is proposed that the reflectivity of the lens surface must be increased to reduce the ghost image energy, and the absorption rate of the outer mirror tube should reach 0.9 to reduce the influence of the stray light scattered by the structural part on the imaging. Finally, the ray simulation tracking software ASAP is used for simulation, and the stray light coefficient of the system is 5.8%, which proves the feasibility of the design and ensures the imaging quality of the seeker optical system.

Key words: stray light; large aperture reflective optical system; shade; secondary reflection ghost images

0 引言

杂散光是指到达光学系统像面的非目标成像的光能量,相当于光学系统的“噪声”。它的危害性在于降低像面的对比度,增加探测器的输出噪声,降低了探测系统的信噪比,从而影响光学系统的分辨能力和探测距离。

红外系统杂散光的主要来源分为 4 类:漏光杂散光,部分光未按照所设定的光束限制(视场、孔径、渐晕)直接进入光学系统的情况;透射式光学表面的残余反射;镜筒内壁等非光学表面的残余反射;内部热辐射杂散光。

本文主要针对漏光杂散光、二次反射鬼像和镜筒内壁散射杂散光进行分析,通过设计合理的遮挡结构等措施,经过光线模拟追迹软件 ASAP 仿真计算,将系统的杂光系数控制在 6% 以内,为今后类似光学结构的杂散光分析与消杂光结构设计提供参考。

1 漏光杂散光分析与遮光罩设计

卡赛格林(卡氏)系统杂散光的研究是较成熟的课题,对其遮光罩和挡光环的设计与计算目前已基本形成一套完整的方法[1-4]。图 1 是红外成像导引头系统的光学结构图。主镜口径约 120 mm,次镜口径约 30 mm,工作波长 8 ~ 12 μm,视场角 5°。

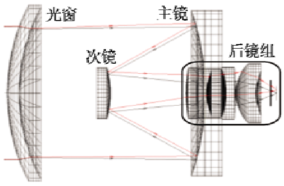


图 1 红外成像导引头系统光学结构图
Fig. 1 Optical structure of infrared imaging seeker

收稿日期:2024-03-26 修回日期:2024-06-28
作者简介:杨沛斌(1981 —),男,陕西澄城人,本科,高工。

在 ASAP 中建立等效的镜筒结构，建立连接光窗和主镜的主镜筒，以及连接主镜中心孔洞处后 5 片镜子的后镜筒。为了消除镜筒内壁散射光的影响，在这部分的仿真分析中设置大、小镜筒内壁为理想的吸收体。

在光窗前端设置均匀的点阵光源，光源入射角度在 2.5° ~ 90°范围内变化，进行光线追迹，发现入射角度约在 2.5° ~ 17°范围内的入射光线能够越过次镜，直接经过后镜组对像面产生影响，该部分光线即为漏光杂散光。后镜组光学系统焦平面与卡氏系统像面的距离将决定其对成像影响的严重程度，下面对后镜组光学系统进行详细研究。

图 2 为后镜组光学系统示意图。NP1 和 NP2 分别是后镜组的物方、像方主平面，f 是像方焦平面，S_5 和 S_{16} 分别表示后镜组第 1 面（导引头系统的第 5 面）和导引头系统像面的前一个面（导引头系统的第 16 面）位置，Image 为导引头系统像面位置，红色数字为平面在 z 轴上的位置，单位为 mm。

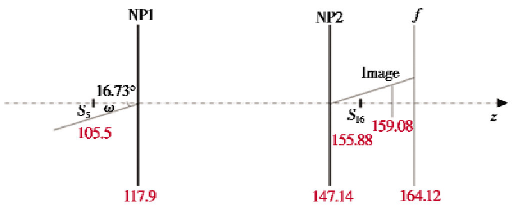


图 2　后镜组光学系统示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the rear optical system

由图 2 可以看出，后镜组焦平面 f 离导引头系统 Image 面很近，将会为导引头系统引入较强的杂散光。如果强杂散辐射源（例如太阳）进入后镜组视场，那么导引头系统将无法正常成像。

由导引头系统 Image 面决定后镜组光学系统的半视场角 ω 为 16.73°。为保证彻底消除后镜组视场内的杂散光，在遮光罩设计中，需确保角度在 2.5°（导引头系统的半视场角）~ 18°范围内的光线被完全遮拦，不能进入后镜组成像。遮光罩设计示意图见图 3。图中，L 为光窗 S_1 与主镜边缘的距离。

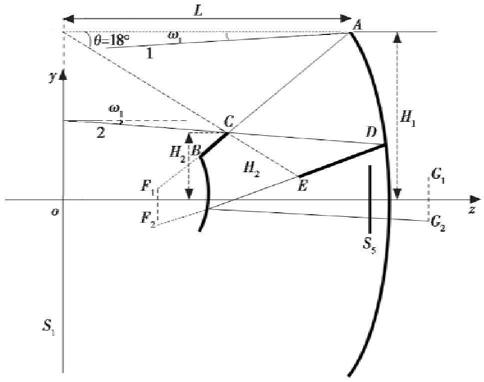


图 3　遮光罩设计示意图

Fig. 3　The design of shade

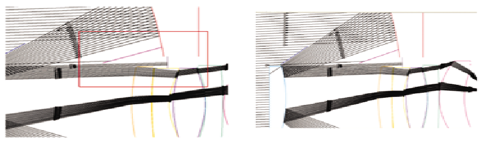
光窗第 1 面的中心位置为（0 mm，0 mm），光线 1、光线 2 分别为两条边缘视场光线，BC、DE 分别为次、主镜遮光罩的上截边，F_1、F_2 为光线经主镜反射后的虚像，G_1、G_2 分别为光线经两个反射镜后的实像，系统的视场角为 $2\omega_1 = 5°$。

遮光罩的设计原则如下：1）上边缘视场光线刚好不被次镜上的遮光罩遮挡，即图 3 中光线 1 经主镜反射后刚好不能被次镜的遮光罩遮挡，点 A、B、C、F_1 在一条直线上；2）点 C 是由系统遮拦比决定的，遮拦比等于 H_2/H_1；3）过次镜边缘的下视场光线刚好不被主镜上的遮光罩遮挡，即图 3 中主镜遮光罩刚好不能遮挡光线 2 经主镜后的反射光线，点 D、E、F_2 在一条直线上；4）CE 与水平线夹角 θ 为 18°（略大于后镜组视场角），确保通过光窗入射的光线在 2.5° ~ 18°范围内完全被主、次镜上的遮光罩吸收，不能直接进入后镜组成像；5）在保证光学系统调制传递函数（MTF）的基础上，系统的遮拦比越小越好，即图 3 中 BC 段的长度越短越好。

根据上述分析，上面的设计中不能保证过主镜边缘视场光线刚好不被主镜上的遮光罩遮挡，即图 3 中主镜的遮光罩有可能遮挡光线 1，点 B、E、G_1 不在一条直线上，这将会引入渐晕，降低系统 MTF。

在满足以上 5 条设计原则的基础上，下面分别研究不同遮拦比情况下主、次镜遮光罩的设计结果，以及加入遮光罩后对导引头系统渐晕、调制传递函数的影响。

遮拦比为 0.5 时，2.5°入射光线情况见图 4。



(a) 整体图　　(b) 局部放大图

图 4　遮拦比为 0.5 时，2.5°入射光线情况

Fig. 4　The situation of incidence angle 2.5° with the obstruction ratio of 0.5

图 4 说明光学系统的渐晕是由后镜组孔径光阑产生的，与主镜遮光罩无关。通过改变 E 点坐标，使主镜遮光罩刚好不产生渐晕，此时导引头系统的遮拦比为 0.476。对应的 C、D、E 点坐标以及系统渐晕和调制传递函数见表 1。

表 1　遮光罩参数与光学系统渐晕、调制传递函数对应关系

Table 1　The relationship between shade and optical parameters

遮拦比	渐晕（全视场）	MTF
0.30	0.6673	0.29
0.35	0.6435	0.40
0.40	0.4340	0.55
0.45	0.2238	0.60
0.50	0.0560	0.65
0.476	0.1195	0.65

光学系统MTF的设计要求为20 lp/mm，0.65。由表1可知，当遮拦比为0.476时，MTF能够满足设计要求。综合考虑系统MTF以及在保证较小渐晕的情况下，选择最小的系统遮拦比为0.476。遮光罩 B、C、D、E 点的坐标 (z,y) 分别为(58.538 7，16.245 1)，(69.729 0，23.734 4)，(115.404 1，22.099 4)，(95.046 4，15.508 2)，单位为mm。

2 二次反射鬼像分析

对光学系统的透射面无论怎样处理，总会有部分光被反射，其中一些经多次反射后会在像面上形成鬼像。特别是一些复杂的光学系统，对一个比较亮的光源成像时，这种现象尤为严重，在图像中会出现一串大大小小的亮环或光点[2]。

目前，很多光学设计软件和分析软件都有鬼像分析功能。杂散光分析通常采用蒙特卡罗方法[5]，这种方法是在某个物点上随机发出很多条光线，当某条光线到达一个透射面之后，其透射或反射的概率是由透过率决定的，当追迹了大量光线之后，统计出到达像面的光线数量和分布情况，就可以了解在像面上的杂散光能量分布情况，这种方法必须追迹大数量的光线，否则结果就不具备统计意义[2]。

假定光学系统中各透射表面均镀增透膜，反射率为5%，忽略吸收损失，透射率为95%。首先计算正常光路，假定物方亮度为4000 nt，得到像点照度为263.2 lx。

对本系统做二次反射杂散光分析，整个系统共得二次反射鬼像125个。取距离探测器表面最近的8个鬼像，将其按鬼像光束在探测器表面产生的照度从大到小排序，如表2所示，其中，S'_2、S'_1 分别表示第二次反射面和第一次反射面。

表2 光学系统二次反射鬼像近轴分析

Table 2 Paraxial analysis of secondary reflection ghost images

编号	S'_2	S'_1	距离	亮度
1	5	6	−2.1E−04	5.0E−02
2	13	14	−6.0E−01	3.3E−06
3	6	10	3.5	8.5E−09
4	5	7	6.6	6.3E−09
5	6	12	9.4	4.8E−09
6	7	11	9.7	2.0E−09
7	5	10	11.2E+01	1.2E−09
8	7	12	15.3E+01	8.4E−10

由表2可以看出，第1个鬼像点就在像面上，其在像面上的照度比其他鬼像点大几个数量级，因此需要加以控制，可以将第5面和第6面这两个产生鬼像的面进一步降低反射率，以减小鬼像能量。

杂散光分析可以对几个视场进行，由于本系统各表面的透过率比较高，残余反射的能量很小，因此，杂散光的相对能量比正常光要小很多。光线经过更高次反射后，能量衰减严重，这里不予考虑。

3 镜筒内壁散射杂散光

入射光线，尤其是强杂散辐射源(如太阳光)，经过结构件表面一次散射对像面形成的杂散光可能是不可忽略的。

下面将主镜筒表面设置成吸收率为0.9、漫反射率为0.1的朗伯漫反射体。在ASAP中设置一根光线打在主镜筒壁，由蒙特卡罗算法可知将在重点采样方向(朝主镜位置)产生20根随机光线。在光窗前端设置间隔均匀的点阵光源，入射角度2.5°~90°，采样间隔为10°。每个入射角度设置96 765根光线。光线追迹结果显示没有一次散射光线入射到像面。增加光线数目至150 000根，像面上仍然没有一次散射光线，这里假设镜筒内壁表面是反射率为0.1的朗伯漫反射体，通过大量的光线追迹未找到经过筒壁一次散射直接到像面的光线路径，筒壁散射引入的杂散光能量较小，可忽略。

虽然上面的分析结果显示主镜筒壁一次散射光对像面影响较小，但对一次散射表面也应该谨慎对待。需要对主镜筒采用发黑处理，保证吸收率达到0.9。

4 内部热辐射杂散光

内部热辐射杂散光是红外系统特有的杂散光，当目标信号比较弱时，对它的抑制显得尤其重要[6-7]。

将探测器设置为朗伯辐射光源，通过反向光线追迹，能够直接被探测器看到的表面是系统的关键表面。关键表面的热辐射能够直接到达像面，是需要重点考虑的情况。

热辐射对成像的影响与关键表面的发射率、温度、探测器的噪声等相关，情况比较复杂，这里不做赘述。

5 结束语

计算机仿真模拟是杂散光分析及消杂光设计的有利手段。经过上面的研究分析，得出如下结论。

1) 给主、次镜增加遮光罩结构，消除了漏光杂散光，阻断漏光进入后镜组视场。为实现最优杂散光抑制效果，在保证系统MTF以及较小渐晕的情况下，综合考虑选择系统遮拦比0.476，并确定了遮光罩 B、C、D、E 点的坐标。

2) 后镜组第1片透镜的前、后表面二次反射引入的鬼像在像面上的照度比其他情况大多个数量级。因此，降低第5面和第6面的反射率，以减小鬼像能量。

3) 为保证杂光抑制效果，要求主镜筒、后镜筒以及

遮光罩等结构件具有较高的光学吸收率。该导引头系统在目前结构设计及安装环境下,要求各结构件采用发黑工艺处理,最终满足不低于 0.9 的光学吸收率。

4）使用光线模拟追迹软件 ASAP 进行仿真计算,得到系统的杂光系数为 5.8%,证明了设计的可行性,为进一步优化设计提供了依据。

参 考 文 献

[1] YOUNG A T. Design of Cassegrain light shields[J]. Applied Optics, 1967, 6(6):1063-1067.

[2] 岑兆丰,李晓彤,朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程,2007, 36(3):300-304.

[3] 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.

[4] 牛金星. 红外探测系统杂散辐射分析与抑制技术研究[D]. 西安:西安光学精密机械与物理研究所,2010.

[5] TAN H P, SHUAI Y, XIA X L, et al. Reliability of stray light calculation code using the Monte Carlo method[J]. Optical Engineering, 2005, 44:1-11.

[6] 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.

[7] 孙创,夏新林. 空间光学系统的红外杂散辐射抑制特性[J]. 红外技术,2007, 29(6):337-340.

(上接第 95 页)

Beijing:IEEE, 2015:491-496.

[11] GUO R X, GUO K, GAN Q, et al. Fault diagnosis for actuators in a class of nonlinear systems based on an adaptive fault detection observer[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(7):1-12.

[12] 陆孟洁,王天真,祝小元. 基于自适应观测器的直升机系统故障估计[J]. 电光与控制,2022, 29(2):103-107.

[13] 郭胜辉,朱芳来,朱树先. 离散非线性系统状态和故障估计[J]. 科学技术与工程,2017, 17(21):57-60.

[14] WANG Z H, RODRIGUES M, THEILLIOL D, et al. Sensor fault estimation filter design for discrete-time linear time-varying systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(10):2364-2369.

[15] WANG Z H, RODRIGUES M, THEILLIOL D, et al. Actuator fault estimation observer design for discrete-time linear parameter-varying descriptor systems[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2015, 29(2):242-258.

[16] ZUO Z Q, ZHANG J, WANG Y J. Adaptive fault tolerant tracking control for linear and Lipschitz nonlinear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6):3923-3931.

下　期　要　目