

文章编号: 1672-8785(2011)01-0031-04

空间光学系统中红外杂散辐射的抑制方法

李欣耀 裴云天 王成良

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 根据红外系统中的不同杂散辐射源, 分析了杂散辐射的内因和外因。列举了从机械面和光学面上抑制红外杂散辐射的具体措施, 提出了选择红外涂层的方法。对一台空间红外仪器设置了里奥光阑, 并通过地面试验和在轨测试评价了其抑制红外杂散辐射的有效性。

关键词: 红外光学; 杂散辐射; 红外涂层; 里奥光阑

中图分类号: TB133 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.01.006

Suppressing Method of Infrared Stray Radiation in Space Optical System

LI Xin-yao, PEI Yun-tian, WANG Cheng-liang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The causes of the stray radiation in an infrared optical system are analyzed according to different stray radiation sources. Some particular samples for restraining the stray radiation from mechanical and optical parts are listed. A method for choosing infrared coating is proposed. A Lyot stop is set up in a space infrared instrument and its suppression effectiveness for infrared stray radiation is evaluated in ground and in-orbit tests.

Key words: infrared optics; stray radiation; infrared coating; Lyot stop

1 引言

空间红外杂散辐射按照来源不同可主要分为三类: 第一类来源于空间的太阳、地球等外部辐射源, 称为外部杂散辐射; 第二类来源于红外仪器的自身背景热辐射, 称为内部杂散辐射; 第三类来源于经系统非正常传递后进入探测器的目标成像光线, 称为成像杂散辐射^[1]。本文主要讨论前两类杂散辐射。其中, 外部红外杂散辐射会降低光学系统的传递函数, 减小仪器探测的信噪比; 而内部红外杂散辐射因提高了探测器

的暗电平, 会导致仪器响应的动态范围变小。因此, 对空间红外光学系统中的杂散辐射必须加以抑制。

2 杂散辐射的内因与外因

杂散辐射分析通常从找出关键面和照明面入手。探测器直接能看到的表面被称为关键面, 可通过采用光线倒追法得到。被杂光光源直接照射到的表面被称为照明面, 可通过光线正追找出。既是关键面又是照明面的表面被定义为重要面。一个光机零件按照关键面、照明面和重

收稿日期: 2010-09-16

基金项目: 上海技术物理研究所 2009 年度创新种子基金资助项目

作者简介: 李欣耀 (1979-), 男, 江西南昌人, 硕士, 副研究员, 研究方向为空间光学系统的杂散光抑制。E-mail: xinyaoli@sina.com

要面的概念划分,可以有四种表面,如图 1 所示。

不管是不是照明面,所有关键面(如图 1 和面 3)均会对探测器的红外辐射形成内部杂散辐射。当关键面恰好被外部杂光光源照射时(如图 1),它便成为了重要面。在重要面上发生的一次散射直接进入到了红外探测器后,便形成了外部杂散辐射。当杂光光源照射的表面为非关键面时(如图 2),发生的散射进不了探测器,便形成不了杂散辐射。

因此,关键面是红外杂散辐射发生的内因,照明面是外部杂散辐射发生的外因。内因起作用只会发生内部红外杂散辐射,内因与外因同时起作用才会发生外部红外杂散辐射。面 3 可被探测器直接看到但没有杂光光源照射,此时内因起作用而外因不起作用,只会形成仪器内部的红外背景热辐射。

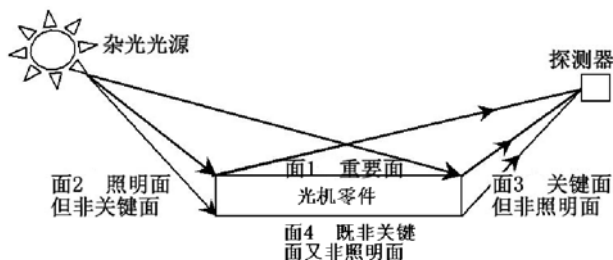


图 1 杂散辐射成因的示意图

3 红外杂散辐射的抑制措施

3.1 机械件外部杂散辐射的抑制措施

外部杂散辐射分析是以任意两个面元建立辐射能量传递关系的基本方程为基础的,如图 2 所示。其中,由面元 dA_s 辐射到面元 dA_c 的能量为

$$dP_c = dP_s \cdot \text{BRDF} \cdot \text{GCF} \quad (1)$$

其中,重要面面元 dA_s 的出射辐射能量 $dP_s = E_s \cdot dA_s$, E_s 为出射辐照度; BRDF 为面元 dA_s 上的双向反射分布函数; GCF 为面元 dA_c 对面元 dA_s 的几何 θ 构成因子,即投影立体角, $\text{GCF} = dA_c \cdot \cos\theta_s \cdot \cos\theta_c / r^2$; θ_s 为面元 dA_s 的法线与两面元中心连线的夹角; θ_c 为探测器面元 dA_c 的法

线与两面元中心连线的夹角。

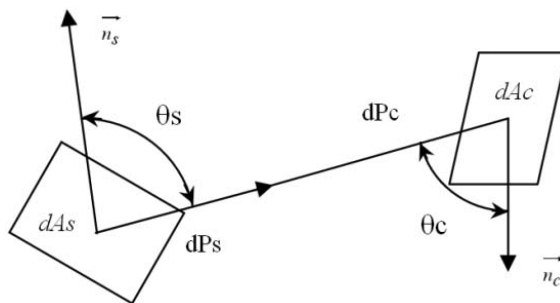


图 2 辐射能量传递的示意图

降低外部杂散辐射的最有效方法是减小重要面的面积 A_s 。这通常可通过在光学设计中设置光阑和在机械设计中减小、消除重要面来实现。在二次成像系统中,为了达到良好的遮挡效果,里奥光阑一般和视场光阑结对使用。冷光阑与出瞳重合称为里奥光阑,它能够减小系统中重要面的数目和面积,挡住一部分外部杂散辐射。在机械设计中,应尽量减小镜框重要面的面积,尤其是减小与镜面平行的 ($\theta_s=0$) 这部分镜框的面积。为了使镜框重要面的面积为零,镜子可采用无镜框的背部支撑方式支撑。光路中圆柱或圆球形的零件易形成重要面,而方形设计可将关键面与照明面分离,从而消除重要面。

降低重要面表面的 BRDF 和增大 θ_s 角也是比较实用的外部杂散辐射抑制措施。根据红外仪器的工作波段,选择“黑色”涂层,增强对入射辐射的吸收,可以明显降低重要面的 BRDF。增大 θ_s 能够使入射的杂光不向探测器的方向散射。

3.2 光学件外部杂散辐射的抑制措施

当红外系统中不存在机械件重要面时,就应该考虑由光学件重要面带来的外部杂散辐射。光路中的光学镜面都是重要面,镜面上的划痕、斑点和灰尘都会对散射产生影响。镜面的微观粗糙度是镜面散射光的决定因素。普通光学镜面的总散射占入射光的比例为

$$1 - e^{-(4\pi\delta/\lambda)^2} = \left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

式中, δ 为表面微观粗糙度的均方根。降低 δ 可使散射杂散呈两次方衰减, 这有赖于抛光工艺的提。散射与波长的平方成反比, 因为可见光的粒子性比红外光更易发生散射, 所以红外镜面散射比可见镜面散射要小很多。另一方面, 适当减小光学镜面的光学余量, 去除镜面的盲区, 减少发生散射的镜面面积, 能够有效抑制镜面散射。

3.3 红外内部杂散辐射的抑制措施

根据维恩位移定律, 对于在常温下工作、探测波段为 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 的长波红外系统, 仪器背景热辐射比较严重^[2], 其计算公式为

$$\phi = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda}(T) d\lambda}{\pi} \varepsilon \tau \Omega A_d \quad (3)$$

式中, ϕ 为仪器背景辐射通量, $P_{\lambda}(T)$ 为普朗克函数, ε 为仪器内部关键面的发射率, τ 为该关键面到探测器的光学效率, Ω 为该关键面对探测器的立体角, A_d 为红外探测器的面积。

光机内部结构的温度对内部红外杂散辐射影响很大^[3], 降温是最有效的方法。虽然低温光学是红外光学的发展方向之一, 但是在空间环境中对光机专门进行制冷的成本巨大, 不易实施。相对而言, 设置光阑以减小关键面的立体角, 选择合适涂层以减小关键面的发射率也能够有效抑制内部红外杂散辐射, 并具有较强的实用性。

4 红外涂层的选择

空间红外光学系统中的机械表面应根据需要选用不同的涂层。对于机械表面对系统杂散辐射的影响, 既要考虑它对内部杂散辐射的发射作用, 也要考虑它对外部杂散辐射的传递作用^[4]。在机械重要面上喷涂低发射率涂层有利于减小内部杂散辐射, 然而根据基尔霍夫定律, 吸收率等于发射率 ($\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$)。吸收率低, 双向反射分布函数 (BRDF) 就会高, 也就会影响外部红外杂散辐射。

一般来说, 对于光学系统中既非照明面又非关键面的普通表面, 主要是考虑其对外部杂

散辐射的传递作用, 因此宜采用各波段上吸收率都较高的涂层, 例如美国的航天专用 Z306 涂层。对于是关键面但不是照明面的表面, 主要是考虑内部杂散辐射。内部杂散辐射与发射率成正比, 也与温度的四次方成正比。若在常温下, 应选用低发射率涂层, 如镀黑镍。若在低温下, 无论发射率是高还是低, 该表面对探测器的辐射量级均很小。为兼顾外部杂散, 应选用吸收率高而发射率也高的涂层。对于是照明面但不是关键面的表面, 若无需降温, 则可采用高吸收率涂层。需要降温的表面可用白漆降低太阳吸收率 α_s , 以增加散射。红外系统在设计时不应有机械面成为重要面的情况, 如果有的话, 在选择涂层时就要对外部杂散和内部杂散进行权衡。

表 1 红外涂层的选择

是否 关键面	是否 照明面	温度	涂层要求
否	否	常温或低温	吸收率高
是	否	常温 低温	发射率 ε 低 吸收率高
否	是	常温, 不需要降温 常温, 需要降温	吸收率高 α_s 低
是	是	常温	权衡选择

5 里奥光阑及验证

针对一套空间红外光学系统, 在出瞳处设置了里奥光阑, 如图 3 所示。设置在探测器前面的里奥光阑同时减小了关键面的立体角和重要面的面积, 有效降低了红外仪器的内部和外部杂散辐射。

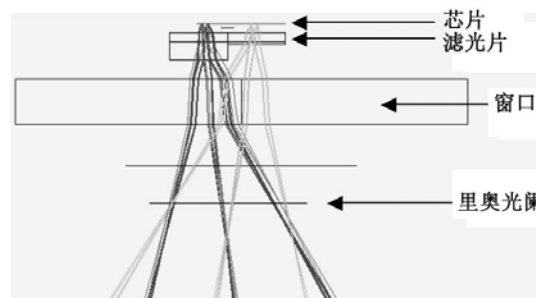


图 3 里奥光阑的示意图

表 2 设置里奥光阑前后的内部杂散辐射比较

波段	3.5 μm ~ 4.0 μm		6.3 μm ~ 7.6 μm		10.3 μm ~ 11.3 μm		11.5 μm ~ 12.5 μm	
工况	无光阑	有光阑	无光阑	有光阑	无光阑	有光阑	无光阑	有光阑
1	87.7	34.4	38.5	0.63	62.0	2.47	62.5	10.8
2	82.8	23.4	40.8	0.50	64.3	4.12	59.3	7.85
3	80.4	28.2	41.4	1.66	67.9	4.05	66.7	13.9

5.1 抑制内部杂散辐射的验证

为了建立输出电平 V 和目标黑体辐射量 Φ 的关系, 确定仪器的响应率 $R = V/\Phi$, 并进行了红外定标实验。采用二次多项式对 V 和 Φ 两组数据进行了拟合, $V = a \cdot \Phi + b \cdot \Phi^2 + c$ 。其中, 常数项 c 的物理意义是零输入时红外系统的电压输出, 它反映了红外仪器内部杂散辐射的大小。里奥光阑使探测器本来看得见的一部分关键面变得看不见了, 导致常数项 c 发生了变化。表 2 比较了设置里奥光阑前后主镜次镜处于不同温度时的三种工况的参数 c 。

表 2 数据显示, 设置里奥光阑前后, c 在四个波段上的平均降幅分别为 66%、98%、95% 和 83%。 c 在图形上表现为定标曲线的纵轴截距更趋近于零, 说明里奥光阑对仪器各波段的内部红外杂散辐射都发挥了明显的抑制作用。

5.2 抑制外部杂散辐射的验证

仪器随卫星发射上天后, 我们对其进行了在轨测试。图 4 为其在轨初期 24h 内的视场外红外杂散辐射均值, 其中圆圈和星号分别表示设置里奥光阑前后的数值。在轨数据表明, 设置里奥光阑后的红外杂散辐射平均下降了 30% ~ 40%, 信噪比得到了明显提高。

6 结束语

在空间红外光学系统中, 外部杂散辐射以机械件重要面的一次散射为主, 内部杂散辐射表现为光学件和机械件关键面的热辐射。若要抑制红外杂散辐射, 最重要的是光学系统选型, 带

有中间像的离轴光学系统最好。其次是光阑设计, 孔径光阑离探测器越近, 杂散辐射越小, 视场光阑和里奥光阑配合使用才能取得良好的遮挡效果。再次是涂层选择, 应根据关键面、照明面、重要面和温度的实际情况选择合适的红外涂层。

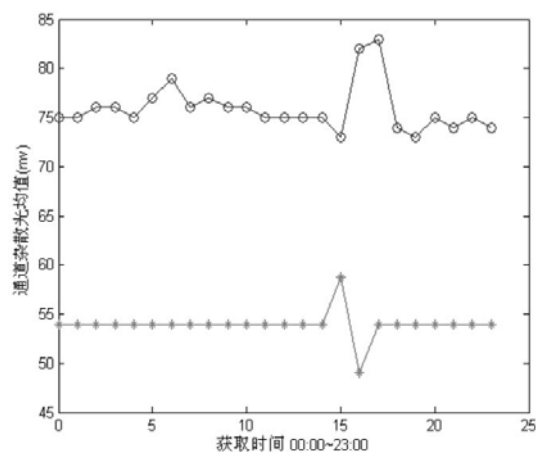


图 4 设置里奥光阑前后的外部杂散辐射比较

参考文献

- [1] 王平阳, 夏新林, 谈和平, 等. CCD 相机的杂散光模拟计算与分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(5): 55-59.
- [2] 王骞, 张景旭, 郭劲. 红外系统中杂散辐射的抑制方法 [J]. 光机电信息, 2002, 19(12): 21-25.
- [3] 杜胜华, 夏新林, 孙创. 星载多波段红外光学系统的杂散辐射分析 [J]. 光子学报, 2008, 37(4): 763-767.
- [4] 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.