

〈系统与amp;设计〉

空间光学系统的红外杂散辐射抑制特性

孙 创, 夏新林

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 黑龙江 150001)

摘要: 空间光学系统自身的红外波段杂散辐射, 是影响探测元面成像质量的一个重要因素。文章分析了导致探测元面上红外辐射能变化的相关因素。以柱状遮光筒为计算模型, 引入了红外杂散辐射传递函数 IRTF 这一无量纲参数来表征、分析柱状遮光筒的红外杂散辐射抑制特性。采用蒙特卡罗法模拟遮光筒中红外波段杂散辐射传递过程, 分析了长径比 χ 、壁面红外发射率 ϵ_w 、壁面相对黑体辐射参数 γ_w 对遮光筒 IRTF 的影响; 讨论了遮光筒抑制能力对入射杂散辐射方向的选择性。

关键词: 光学系统; 红外波段; 杂散辐射; 抑制特性

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2007)06-0337-04

Suppression of Infrared Stray Radiation in Space Optical System

SUN Chuang, XIA Xin-Lin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Infrared stray radiation, coming from the space optical system, is one of the main elements that affect the quality of figure on the detector. This paper analyzed the reference factors, which could change the energy of infrared radiation on the detector. Cylindrical shield was selected as a computation model, and then IRTF was employed to indicate and analyze the suppression characters of infrared stray radiation for this structure. The process of the transmission for infrared stray radiation through the shield has been simulated by Monte Carlo method. The ratio between lengths and diameter χ , infrared emissivity ϵ_w , the radiative parameter comparing to black body γ_w were attributed to IRTF. Finally, the alternative of direction for infrared stray radiation to the shield's suppression character was discussed.

Key words: optical system; infrared band; stray radiation; suppression character

引言

杂散辐射是指光学系统中除目标光线外, 扩散于探测器表面上的其它非目标光线辐射能以及经非正常光路到达探测器的目标光线辐射能^[1]。长期以来, 杂散辐射抑制研究主要集中在可见光波段范围内; 近年来, 随着红外技术的发展, 对红外波段的杂散辐射研究逐渐得到重视。空间光学系统中, 到达探测元面的红外杂散辐射可分为两大类: 一是物空间视场以外的杂散辐射, 如太阳辐射, 经光学系统传播后在探测器上产生杂散辐射噪声, 影响系统的分辨能力; 另一个是光学系统自身的红外杂散辐射, 这部分杂散辐射

是由系统自身的温度决定的^[2,3]。现阶段, 国内外的学者对红外波段杂散辐射的分析研究主要依靠相关分析软件。黄强等人通过杂散光分析软件 LightTools 分析系统内部热辐射给像元面带来的影响^[4]; 国外的 Czapski 等人则针对目前主要的杂散辐射软件 (ASAP, TRACEPRO) 分析红外杂散辐射问题存在的缺陷, 进行了改进性研究^[5], Schwartz 等人分析了红外系统中的相关波长的红外杂散辐射吸收情况^[6]。

红外杂散辐射抑制与可见光杂散辐射抑制的主要区别在于: 在可见光范围内, 光学系统只对可见光起到抑制作用, 自身不产生杂散辐射; 而红外杂散辐射抑制结构, 在对入射杂散辐射进行吸收的同时, 本

收稿日期: 2007-03-12; 修订日期: 2007-04-17

作者简介: 孙创 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向: 光学系统杂散辐射分析、抑制研究。

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(编号: NCET-04-0335)

身也产生红外杂散辐射。因此,空间光学系统的红外杂散辐射抑制特性分析比较复杂。

遮光筒是一种常见的抑制杂散辐射的光学结构,本文采用蒙特卡罗法^[7]模拟红外杂散辐射传递过程,通过引入红外杂散辐射传递函数分析了柱状遮光筒的红外杂散辐射抑制特性。

1 红外杂散辐射传递与抑制特性的描述

1.1 原理

空间光学系统的杂散辐射模拟计算中,一般将其入口面视为黑体面,将外界进入光学系统的杂散辐射能等效为入口面的漫发射或以一定角度发射的平行光辐射能。光学系统内壁面的处理方法也很多,如将其内壁面用涂层覆盖,此时壁面可以看作是具有高吸收率的漫灰体;或者将壁面处理成孔隙和微腔结构,这种壁面可视为各向异性吸收表面。

模拟杂散辐射传递与一般的辐射传递的主要区别在于其关心的辐射能量是小数量级量,目前最普遍的杂散辐射传递数值模拟方法是蒙特卡罗法与光线追踪法,本文采用蒙特卡罗法。定义系统中表面间的辐射传递系数 RT_{ij} , $RT_{ij}=N_{ij}/N_i$ 表示表面 A_i 对表面 A_j 的辐射传递系数;其中, N_i 代表表面 A_i 发射辐射能的抽样能束数目, N_{ij} 是表面 A_i 发射的抽样能束中经系统传播最终被表面 A_j 所吸收的能束数目。采用等温等

权抽样时, $N_i=\varepsilon_i A_i n_i$, 其中, ε_i 是表面 A_i 的发射率; n_i 是抽样数密度。

取 E_i 为入口面的红外波段杂散辐射力, A_i 为入口面面积,则光学系统入口面的红外辐射能量 Q_i 可表达为:

$$Q_i = E_i A_i \quad (1)$$

大多数的空间光学系统的结构复杂,直接对其进行杂散辐射的数值模拟比较困难,可将其内壁面分解为若干个规则表面,分别与探测元面建立联系,最终求得探测元面上的红外能量情况。取 A_j 、 T_j 、 ε_j 分别为光学系统中第 j 个内壁面的面积、温度和红外发射率, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数,则第 j 表面的红外辐射能量 Q_j 表达为:

$$Q_j = \sigma \varepsilon_j A_j T_j^4 \quad (2)$$

用 Q_c 表示探测元面上的红外辐射能量,则

$$Q_c = Q_i RT_{i,c} + \sum_{j=1}^M Q_j RT_{j,c} \quad (3)$$

式中: $RT_{i,c}$ 和 $RT_{j,c}$ 分别为遮光筒入口及壁面到出口面的辐射传递系数, M 为光学系统所含的内壁面个数。

1.2 IRTF 的推导

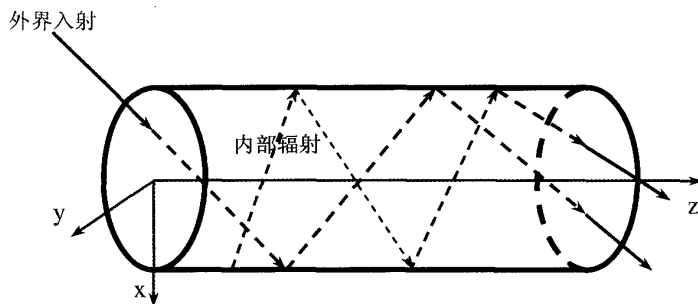


图1 柱状遮光筒结构示意图

Fig. 1 schematic of cylindrical shield

在图1所示的遮筒结构中,公式(1)可表达为:

$$Q_i = E_i A_i = E_i \pi D^2 / 4 \quad (4)$$

式中: D 为遮光筒入口圆面的直径。

取遮光筒内壁面具有一致的温度和红外发射率,则其壁面的红外辐射能量 Q_w 为:

$$Q_w = \sigma \varepsilon_w A_w T_w^4 = \sigma \varepsilon_w \pi D L T_w^4 \quad (5)$$

式中: A_w 、 T_w 、 ε_w 分别为遮光筒内壁面面积、温度与红外发射率, L 为遮光筒长度。

则探测元面的红外杂散辐射能量 Q_c 可表示为:

$$Q_c = Q_i RT_{i,c} + Q_w RT_{w,c} \quad (6)$$

式中: $RT_{i,c}$ 和 $RT_{w,c}$ 分别为遮光筒入口及壁面到出口面的辐射传递系数。

从能量的传输角度看,杂散辐射抑制结构是一个特殊的辐射传输系统。因此,可引入红外杂散辐射传递函数 IRTF 这样一个无量纲参数来描述遮光筒的红外杂散辐射抑制能力,其定义为探测元面的红外杂散辐射能与入口面的红外杂散辐射能比值,即 $IRTF = Q_c / Q_i$ 。由式(6),可导出 IRTF 的如下表达式:

$$\text{IRTF} = RT_{i,c} + 4\chi\epsilon_w\gamma_w RT_{w,c} \quad (7)$$

式中: $\chi = L/D$, 是遮光筒的长径比; $\gamma_w = \sigma T_w^4/E_i$ 是壁面的相对黑体辐射参数。对于确定的杂散辐射入射情况(漫射入射、平行入射、各向异性入射), 辐射传递系数 $RT_{i,c}$ 和 $RT_{w,c}$ 取决于参数 χ 、 ϵ_w 。因此, (4)式中的独立变量为 χ 、 ϵ_w 和 γ_w 。

显然, 只有当其 $\text{IRTF} < 1$ 时, 遮光筒才具有红外杂散辐射抑制能力; IRTF 越小, 其抑制能力越强。

2 模拟结果与分析

以图1所示柱状遮光筒为例, 采用蒙特卡罗法模拟计算 $RT_{i,c}$ 和 $RT_{w,c}$, 最终由(7)式计算出红外杂散辐射传递函数 IRTF 。图2给出了 $\gamma_w = 0.1$ 、1.0、10三种典型情况下, 对漫入射红外杂散辐射, 柱状遮光筒的 IRTF 随 χ 、 ϵ_w 的变化规律。

$\gamma_w = 0.1$ 时, 遮光筒壁面的红外辐射能力比进入系统的红外杂散辐射小一个数量级。由图2(a)可看出, 此种情况下, 遮光筒出口的红外杂散辐射主要由外界进入遮光筒的杂散辐射能产生。这时, 增大壁面的红外发射率与增加遮光筒长径比, 都可增强遮光筒的杂散辐射抑制能力。在一般的长径比下 ($\chi > 1$), 当 $\epsilon_w = 0.8$ 时, 继续增大 ϵ_w 的效果已不明显。因此, 对 $\gamma_w = 0.1$ 的情况, 应在 $\epsilon_w \geq 0.8$ 的条件下, 采用较大的长径比 $\chi > 2$ 来增强抑制效果。但这种柱状遮光筒的抑制能力有限, 最多可使漫入射红外杂散辐射量降低一个数量级。

$\gamma_w = 0.1$ 时, 遮光筒壁面的红外辐射能量与进入系统的红外杂散辐射能量大小相当。由图2(b)可看出,

此种情况下, 遮光筒壁面自身红外辐射的杂散辐射效应已很严重。壁面的红外发射率较大时 ($\epsilon_w > 0.5$), 遮光筒的红外杂散辐射抑制能力很小, 增加长径比 χ 几乎没有影响。只有在很小的红外发射率下 ($\epsilon_w < 0.1$), 遮光筒才可使红外杂散辐射量降低半个数量级。因此, 对 $\gamma_w = 1.0$ 的情况, 通过改变壁面辐射特性参数与长径比来实现红外杂散辐射抑制的效果很差; 应通过热控降低壁面温度, 减小参数 γ_w 来实现有效抑制, 或采用其它抑制结构。

$\gamma_w = 10$ 时, 说明壁面的红外辐射能量超过入口处的红外能量一个量级, 遮光筒成为一个强烈的红外辐射源, 其红外辐射传递函数远大于1, 如图2(c)所示。这时, 单纯采用热控手段也难于将 γ_w 减小到足够小的数值范围, 应去掉此遮光筒。

进入抑制结构的杂散辐射存在漫射入射、平行入射、各向异性入射几种不同的方向分布情况。另外, 抑制结构出口面的杂散辐射能量分布与方向分布对系统总的杂散辐射衰减也有重要作用。在出口面杂散辐射能量相同的情况下, 能量分布偏离中心、方向偏离轴线(光轴)程度越大, 抑制效果越好。因此, 在参数 χ 、 ϵ_w 和 γ_w 相同的情况下, 柱状遮光筒对入射方向特性不同的红外杂散辐射的抑制能力可能存在较大差别。

图3给出了 $\chi = 1.0$ 、 $\epsilon_w = 0.9$ 、 $\gamma_w = 0.1$ 条件下, 柱状遮光筒对漫射入射、45°角(与轴线夹角)平行入射及 60°角平行入射三种情况的红外杂散辐射抑制结果。图中, 以能束数目代表能量大小, 出口面杂散辐射能束的传播方向与光轴的夹角小于5°。

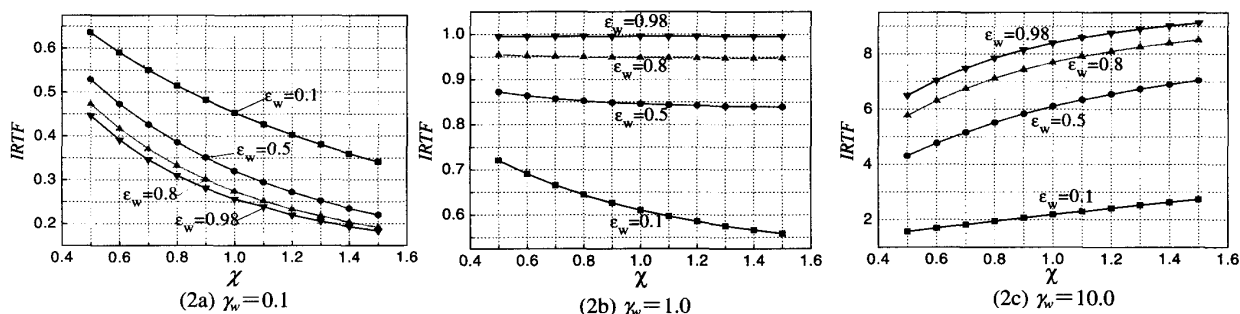


图2 不同条件下柱状遮光筒的红外杂散辐射传递函数分布

Fig.2 The distribution of IRTF for cylindrical shield in different conditions

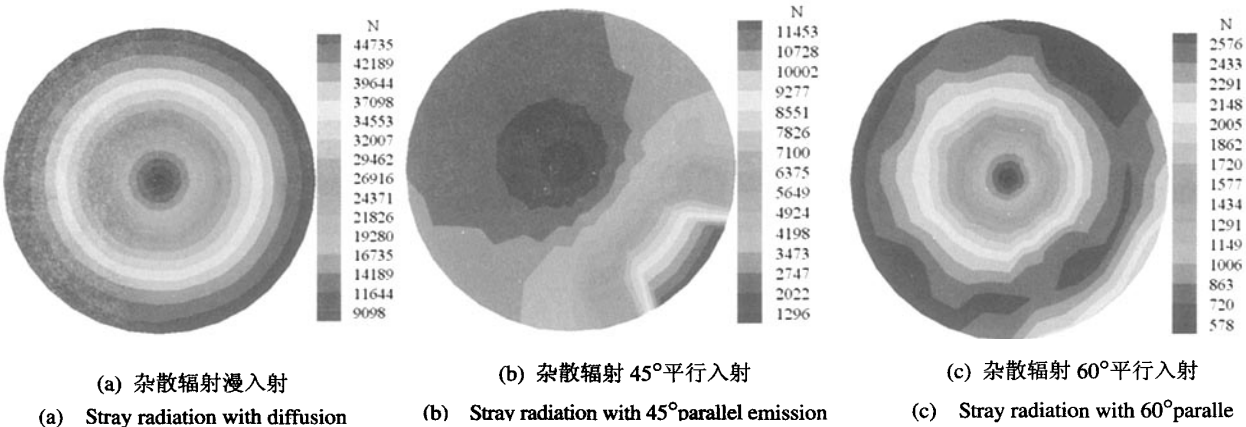


图3 柱状遮光筒对不同入射方向的红外杂散辐射的选择性抑制结果
Fig. 3 Selective suppression results for infrared stray radiation in different direction

从图3可看出,柱状遮光筒的抑制能力对红外杂散辐射入射方向的选择性非常强。与漫入射情况相比,如果平行入射的红外杂散辐射角度大于 45° ,柱状遮光筒的抑制能力可提高多倍;当入射杂散辐射角度大于 60° 时,遮光筒的红外杂散辐射抑制能力可提高1~2个数量级。

视场外杂散辐射可看作是由多方向平行光组成的各向异性入射辐射能。结合图2的计算结果分析可知,对视场外红外杂散辐射, $\eta_w=0.1$ 的柱状遮光筒的红外杂散辐射传递函数 $IRTF<0.05\sim 10^{-3}$,即具有1.5~3个数量级的抑制能力。

3 结论

文章首先介绍了空间光学系统中,影响探测元面上红外杂散辐射能量形成大小及分布情况的相关因素。然后,导出了柱状遮光筒的红外杂散辐射传递函数 $IRTF$ 来表征其抑制特性;采用蒙特卡罗法模拟杂散辐射传递,分析了参数 χ 、 ϵ_w 、 η_w 及杂散辐射入射方向对遮光筒红外杂散辐射抑制能力的影响。结果表明:

- 1) 在 $\eta_w\leq 0.1$ 的条件下,遮光筒才有较强的红外杂散辐射抑制能力。在 $\epsilon_w\geq 0.8$ 条件下,应采用较大长径比 χ 增强抑制效果。
- 2) 柱状遮光筒对入射杂散辐射的方向性比较敏感;可使漫入射红外杂散辐射量降低一个数量级,使视场外红外杂散辐射降低1.5~3个数量级。

参考文献:

- [1] 夏新林, 谈和平, 肖淑琴等. 空间光学系统中内部构件热辐射引起的谱段杂散辐射[J]. 航天返回与遥感. 1996, 17(1): 22~31.
- [2] 王寿, 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, (12): 21~25.
- [3] 廖胜, 沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试[J]. 红外与毫米波学报. 1996, 15(5): 375~378.
- [4] 黄强, 钮学华, 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.
- [5] Gideon Czapski, Yair Ozeri, Sara Goldstein, "Pitfalls and artifacts in measuring absorption spectra and kinetics: the effect of stray light in the UV and red regions", Radiation Physics and Chemistry 72 (2005): 229~234.
- [6] Roni Schwartz, Steve Bloomberg, Michael Moin, Yishay Z. Layosh, "Stray radiation in airborne FLIR system", Proc. SPIE[C].2003, 4820. 676~687.
- [7] Howell J R. The Monte Carlo Method in Radiative Heat Transfer. ASME J. Heat Transfer, 1998, 120(4): 547~560.