

非制冷红外探测器光阑开孔的优化设计

杨开宇*, 金宁**, 曹凌, 徐曼

昆明物理研究所夜视技术研究院, 云南 昆明 650223

摘要 非制冷红外探测器产生的杂散光会在焦平面形成非均匀的图像,而在探测器窗口附近使用光阑,并对其开孔形状进行优化设计,是抑制杂散光的关键。利用区域法建立了杂散光在焦平面上的照度分布计算模型,并建立了变量模型和目标函数模型,以区间穷举法作为极值搜寻方法,完成了优化光阑开孔的程序编制。针对某款存在杂散光问题的非制冷红外探测器,利用所提数学方法优化设计了光阑的开孔形状,极大地削弱了由杂散光引起的“锅盖效应”,从而验证了光阑开孔形状优化设计方法的正确性与实用性。

关键词 成像系统; 红外成像; 杂散光; 光阑; 优化设计; 非制冷红外探测器

中图分类号 TN216

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0811002

Optimization Design of Stop Aperture Shape for Uncooled Infrared Detector

Yang Kaiyu*, Jin Ning**, Cao Ling, Xu Man

Institute of Night-Vision Technology, Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China

Abstract The stray radiation generated by an uncooled infrared detector will form a non-uniform image on the focal plane. The key to suppress stray radiation is to use a stop near the detector window and optimize its aperture shape. The model for calculating the illuminance distribution of stray irradiance on the focal plane by Zone method and the models of variables and objective functions are established. The interval exhaustion method is adopted as the extremum seeking method, and the program for optimization is completed. Aiming at an uncooled infrared detector with stray radiation, the proposed mathematical method is applied to optimize its stop aperture shape, which greatly reduces the “pot cover effect” caused by stray radiation, and thus the correctness and practicability of this optimization design method is confirmed.

Key words imaging systems; infrared imaging; stray light; stop; optimization design; uncooled infrared detector

OCIS codes 110.3080; 290.2648; 080.1753; 110.1220

1 引 言

近年来,非制冷红外技术成为当前热成像技术发展和应用的热点之一^[1-2]。与制冷型红外探测器相比,非制冷红外探测器具有体积小、质量轻、功耗小、寿命长、成本低、启动快等优势,然而由于没有冷屏(即冷光阑)的保护,其极易受到杂散光的干扰。非制冷红外探测器工作一段时间后,其外壳温度逐渐升高,并产生高温红外热辐射。由于非制冷红外探测器没有冷屏的保护,这些杂散光辐射经过结构件(如探测器的前保护板)表面的反射后到达焦平面(FPA),导致焦平面四周出现发亮的非均匀图像^[3],称之为“锅盖效应”。这些杂散光辐射形成的图像会降低红外热成像的对比度和温度灵敏度,干

扰对目标的观察;严重时,被探测的目标信号完全湮没在非均匀杂散光背景中,系统无法提取目标,影响系统的探测能力,甚至导致整个系统失效^[4-6]。

为削弱此类杂散光,需要在贴近探测器窗口处设计一个光阑,以阻挡杂散光传播,降低焦平面接收到的杂散光能量。此时,常规的圆形开孔或矩形开孔的光阑无法使焦平面接收到的杂散光照度均匀化,必须采用其他特殊、合适的形状作为光阑的开孔形状,以缩小焦平面不同位置处单元接收到的杂散光辐射能量的差别。因此,需要对光阑开孔形状进行合理优化设计,使其在不遮挡有效信号光能量的前提下,降低杂散光引起的图像非均匀性。本文针对非制冷红外探测器杂散光的问题,建立了光阑开孔形状的优化设计方法。

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-12-23; 录用日期: 2020-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61605070)

* E-mail: yky20030634@126.com; ** E-mail: jinjingkip@126.com

2 优化光阑开孔形状的程序设计

2.1 基本思路

非制冷红外探测器的杂散光辐射主要来源于探测器壳体的前表面,杂散光经过前保护板表面的反射后,通过探测器窗口直接到达焦平面,如图 1 所示。探测器焦平面是由像元的矩形阵列组成,像元所处位置不同,所接收的辐射能量也不同。在

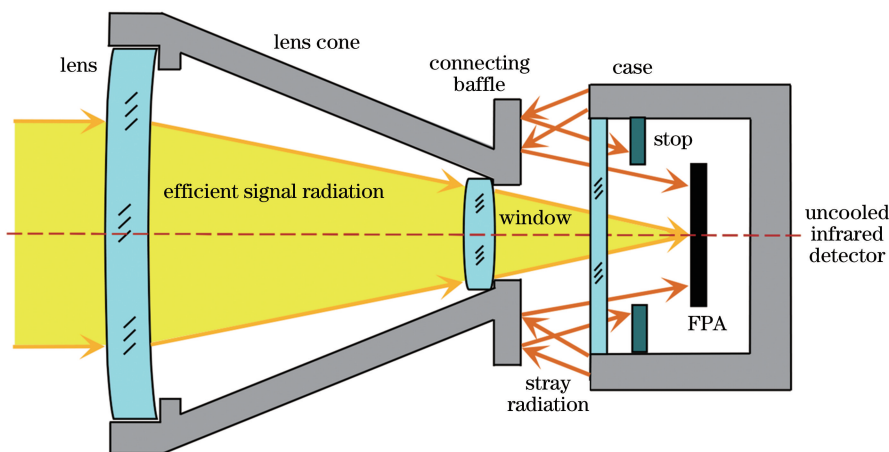


图 1 非制冷红外探测器杂散光及光阑示意图

Fig. 1 Schematic of stray radiation and stop aperture of uncooled infrared detector

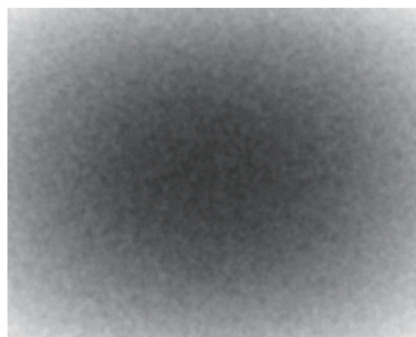


图 2 非制冷红外探测器杂散光造成的“锅盖效应”

Fig. 2 “Pot cover effect” caused by stray radiation of uncooled infrared detector

本文把光阑开孔形状的优化设计抽象成为数学中的最优化计算。最优化计算是一个极值搜寻的过程,需要建立两个数学要素,即目标函数和变量,因此,给定一个目标函数,该目标函数能够评价光阑对杂散光的抑制效果,并将描述光阑开孔形状的参数作为变量,然后选择一个合适的算法,通过不断改变变量以改变光阑的形状,在变量的约束范围内搜寻一组值,使目标函数达到最优。通过编制程序将理论模型转化为实际应用,实现对开孔形状的优化设计,以实现非制冷红外探测器对杂散光的抑制效果达到最佳。

不添加光阑时,从焦平面矩形阵列的中心到四角,像元接收的辐射能呈放射状逐渐升高,由此出现“锅盖效应”。利用一个实际的非制冷红外探测器对均匀辐射的背景进行观察时,图像呈现出的“锅盖效应”现象如图 2 所示。因此,本文对非制冷红外探测器的光阑开孔进行优化,以降低焦平面接收的杂散光能量、削弱杂散光能量随像元分布的非均匀性。

2.2 任意形状的光阑对应的焦平面杂散光能量分布计算模型的建立

光阑对应的焦平面杂散光能量分布状况,可直接衡量光阑对杂散光的抑制效果。在优化过程中,光阑的开孔形状不断变化,如果能计算出具有任意开孔形状的光阑所对应的焦平面杂散光能量分布情况,就能准确地评价光阑开孔每一次变化后的优劣性。以焦平面能量的最优分布作为目标,进行光阑开孔形状的优化。因此,需要建立相应的数学模型,计算探测器外壳辐射的杂散光通过任意形状的开孔后,在焦平面上形成的能量随像元位置的分布情况。

2.2.1 计算杂散光能量传输的区域法

计算杂散光在焦平面上的分布情况,本质上是计算杂散光的传输,目前常用的方法包括蒙特卡罗法和区域法^[7-10],本文采用区域法。从杂散光辐射源开始,沿杂散光传输的路径将辐射面和系统光机结构的表面分割成许多小面积区域,利用基本能量传输方程计算传播路径中每两个区域之间的能量交换,由此递推得到杂散光辐射能量在整个系统中的传递,以及到达焦平面的杂散光能量。

由辐射度学原理可知,光辐射能从一单位源面 1 传输到另一单位接收面 2(图 3)的关系式为

$$\Phi_2 = L_1(\varphi_r, \theta_r) \cdot A_1 \cdot \frac{A_2 \cos \alpha \cos \beta}{r^2}, \quad (1)$$

式中： Φ_2 为单位源面传递到单位接收面的辐射通量； $L_1(\varphi_r, \theta_r)$ 为单位源面在 (φ_r, θ_r) 方向的辐射亮度； A_1, A_2 分别为单位源面和单位接收面的面积； α, β 分别为源面和接受面法线与两者中心连线的夹角； r 为源面和接收面中心的距离。

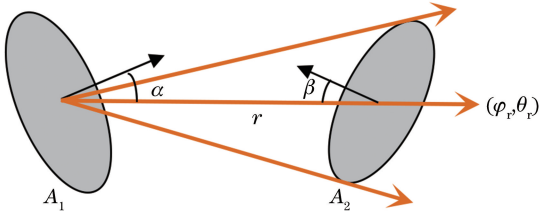


图 3 辐射能量在两个表面间的传输

Fig. 3 Transmission of radiation energy between two surfaces

若不把 A_1 视为单位光源面,而是将其视为一个被光源照射,再把光能传向单位接收面的中介面,则(1)式可变为

$$\Phi_2 = B(\varphi_r, \theta_r, \varphi_i, \theta_i) \cdot \Phi_1(\varphi_i, \theta_i) \cdot \frac{A_2 \cos \alpha \cos \beta}{r^2}, \quad (2)$$

式中： $\Phi_1(\varphi_i, \theta_i)$ 为单位面 A_1 接收到的来自 (φ_i, θ_i) 方向的辐射通量； $B(\varphi_r, \theta_r, \varphi_i, \theta_i)$ 为单位面 A_1 材料的双向反射分布函数。结构件的表面可看作郎伯反射表面,其在各个方向的散射亮度都相同,此时 $B(\varphi_r, \theta_r, \varphi_i, \theta_i)$ 为常数 $\frac{\rho}{\pi}$ (ρ 表示单位面 A_1 的反射率)。

通过(1)式和(2)式,可以计算杂散光在区域微元之间发射及反射时的能量传输,再将表面所有区域的传输结果进行叠加,就能从宏观上实现杂散光在结构件表面的能量传递。

焦平面接收的杂散光能量随像元位置的分布情况用辐射照度 $E(i, j) = \frac{\Phi(i, j)}{A}$ 表示, i, j 为像元位置参数, $\Phi(i, j)$ 为像元接收的总辐射通量, A 为像元面积。

2.2.2 计算杂散光传输路径的空间数学模型

采用区域法计算杂散光能量传输,需要预先计算杂散光传输的路径,因此建立能够计算传输路径的空间数学模型。以探测器的焦平面中心为原点、焦平面矩形阵列的长宽向分别为 x 和 y 坐标轴、光轴的反向为 z 坐标轴建立空间直角坐标系,如图 4 所示,则非制冷红外探测器杂散光产生

面(壳体前表面,如图 5 所示)、反射面(前保护板表面)、透射面(窗口表面)、接收面(焦平面)均为与 xoy 面平行的平面。光线在空间坐标系中可用参数方程表示为

$$\begin{cases} x = x_0 + \sin \varphi \cos \theta \cdot t \\ y = y_0 + \sin \varphi \sin \theta \cdot t \\ z = z_0 + \cos \varphi \cdot t \end{cases}, \quad (3)$$

式中： t 为参数； (x_0, y_0, z_0) 为光线发射或传输过程中的源点坐标； φ 和 θ 分别为光线发射方向矢量的天顶角和圆周角,如图 5 所示。

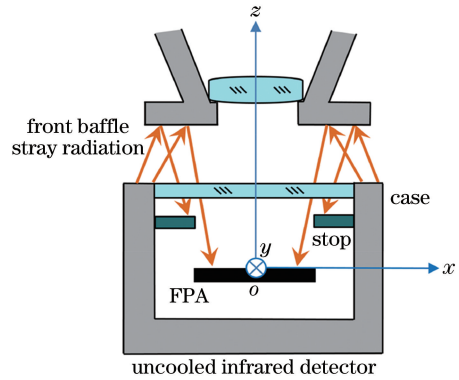


图 4 计算杂散光传输路径的空间直角坐标系

Fig. 4 Spatial rectangular coordinate system for calculation of stray radiation transmission path

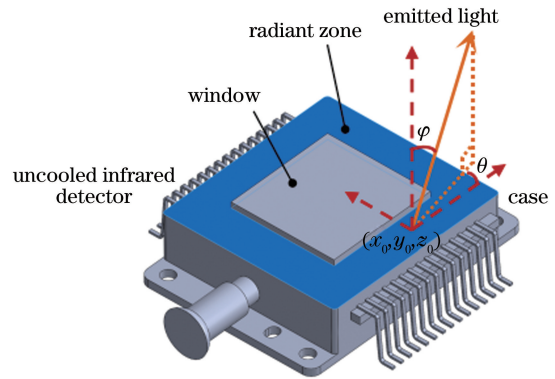


图 5 杂散光发射区域模型

Fig. 5 Stray radiation emissive region model

在上述数学模型基础上计算杂散光能量在两个表面间的传输,只要给定两个传输区域微元的位置,就能得到光线的参数方程,确定传输路径,判断光线是否通过光阑开孔,从而进行能量传输计算,获得杂散光到达焦平面的能量随像元位置的分布情况 $E(i, j)$ 。

2.3 建立优化光阑开孔形状的数学模型

2.3.1 变量模型

光阑开孔的边界是由闭合的曲线构成,曲线的平面方程即是对开孔形状的数学描述。光学系统和

探测器通常具有对称性,因此建模时只需考虑边界形状的半边。

在探测器未加入光阑时,由于焦平面像元接收的杂散光辐射能量具有中心弱、四角强的“锅盖式”分布,为了提高图像均匀性,光阑开孔的四角相对于边线中心内收,以遮挡更多到达焦平面四角的杂散光辐射能量。因此,为了抑制“锅盖效应”,采取四段轴对称的圆弧线围成光阑开孔形状,圆弧线对应的四条弦构成一个矩形,弧拱全部朝外,使围成的四角呈内收状态,开孔的中心与非制冷成像系统的光轴重合,如图 6 所示,光阑开孔形状由横向和纵向的两个圆弧方程描述,在对杂散光传输进行计算时,可以根据圆弧方程判断光线是否通过光阑。

由图 6 可知,一旦确定圆弧对应弦构成的矩形长宽 l_H 和 l_V ,以及横纵两个方向的弧高 h_H 和 h_V ,两个圆弧方程也就随之确定。所以,本文将 l_H 、 l_V 、 h_H 和 h_V 合成一个向量 $\mathbf{v}=[l_H, l_V, h_H, h_V]$,以其作为描述光阑开孔形状的参数并用于优化。在优化过程中,通过改变这个变量来改变光阑开孔形状,找出使目标函数最优的变量组合。

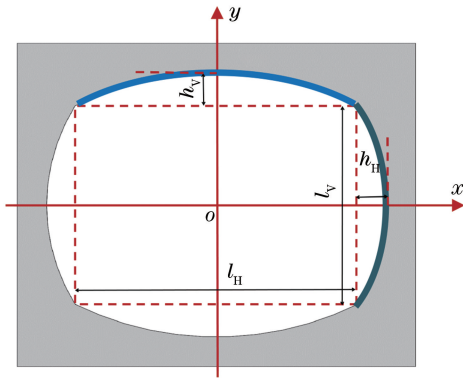


图 6 描述光阑开孔形状的参数元素

Fig. 6 Variable elements for describing stop aperture shape

优化时,还需要确定变量的初始值和约束条件。光阑能够对透过窗口的杂散光进行有效阻挡,但不能阻挡有效的信号光能量,所以其开孔应小于窗口的尺寸范围(长宽分别为 a_{max} 、 b_{max} 的矩形),且大于有效光束的投影尺寸范围。非制冷红外光学系统的视场为矩形视场,视场内有效光束在光阑上的投影接近于矩形,其长宽分别为 a_{min} 、 b_{min} 。因此本文选择该矩形作为优化的初始开孔形状,即 $\mathbf{v}_0=[a_{min}, b_{min}, 0, 0]$;而两段圆弧线应该在两个同心相套的矩形之间变化,即变量元素的约束条件为

$$\begin{cases} a_{min} \leq l_H \leq a_{max} \\ b_{min} \leq l_V \leq b_{max} \\ 0 \leq h_H \leq \frac{a_{max} - a_{min}}{2} \\ 0 \leq h_V \leq \frac{b_{max} - b_{min}}{2} \\ l_H + 2h_H \leq a_{max} \\ l_V + 2h_V \leq b_{max} \end{cases} \quad (4)$$

2.3.2 目标函数

优化问题是寻找函数的极值问题,它要求有一个被求极小值的实值函数作为目标函数。光阑在探测器中若要起到良好作用,必须通过优化达到以下几方面的目标:1)光阑能够有效抑制大量的杂散光辐射能量,也就是杂散光在焦平面的能量随像元位置分布 $E(i, j)$ 的均值尽可能小;2)光阑能使焦平面接收到的杂散光辐射非均匀性(即 $E(i, j)$ 的标准差与均值的比值)可能小^[11]。本文构造两个函数,作为被求极小值的目标函数分量,即

$$\begin{cases} F_1(\mathbf{v}) = \bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} E(i, j) \\ F_2(\mathbf{v}) = \frac{1}{\bar{E}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j} [E(i, j) - \bar{E}]^2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $F_1(\mathbf{v})$ 和 $F_2(\mathbf{v})$ 为目标函数分量,分别等于 $E(i, j)$ 的均值和非均匀性; N 为焦平面阵列像元的数量; \bar{E} 为 $E(i, j)$ 的均值。

$F_1(\mathbf{v})$ 和 $F_2(\mathbf{v})$ 与光阑对应的焦平面能量分布有关,可根据给定的变量,利用区域法进行数值计算。由于这两个函数值在变量的取值空间内均大于 0,根据 $F_1(\mathbf{v})$ 和 $F_2(\mathbf{v})$ 的物理意义,目标值越接近 0,光阑效果越佳,因此优化的实质即为求解目标函数值为最小值时对应的变量。

在优化中,两个目标函数在数值上的量级不相等,对变量改变的敏感度不一样,因此,根据目标函数的量级,取不同的权重因子与各目标函数相乘后组合成一个向量,构造出新的向量目标函数 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$,以获得相近的变化敏感度:

$$\mathbf{F}(\mathbf{v}) = [\mu_1 F_1(\mathbf{v}), \mu_2 F_2(\mathbf{v})], \quad (6)$$

式中: μ_1 、 μ_2 为函数 $F_1(\mathbf{v})$ 、 $F_2(\mathbf{v})$ 的权重因子。此时,只要给定 \mathbf{v} 值,就能求得与之对应的目标函数 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ 值,光阑开孔形状的优化问题即为求解向量 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ 模的最小值的问题。

2.4 区间穷举法

前面已建立了变量和目标函数的数学模型,依据其特征,可将光阑形状的优化问题归结为非线性

约束多维极值求解问题,目标函数为非解析函数,可能存在多个局部极值点,这些极值未必是全局最小值。因此,本文采取区间穷举法作为全局搜索的方法:将变量 \mathbf{v} 的约束范围等分成多个取值区域,对变量元素 l_H, l_V, h_H 和 h_V 在区域内的取值进行排列组合,计算每一种组合对应的函数 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ 的模的值,

从中选择出最小值对应的组合作为全局优化结果。当区域划分的数目足够大时,就能找到全局中最好的变量结构^[12]。

在前面建立的杂散光能量分布计算模型、变量模型、目标函数模型的基础上,利用区间穷举法即可优化光阑开孔形状,其流程如图 7 所示。

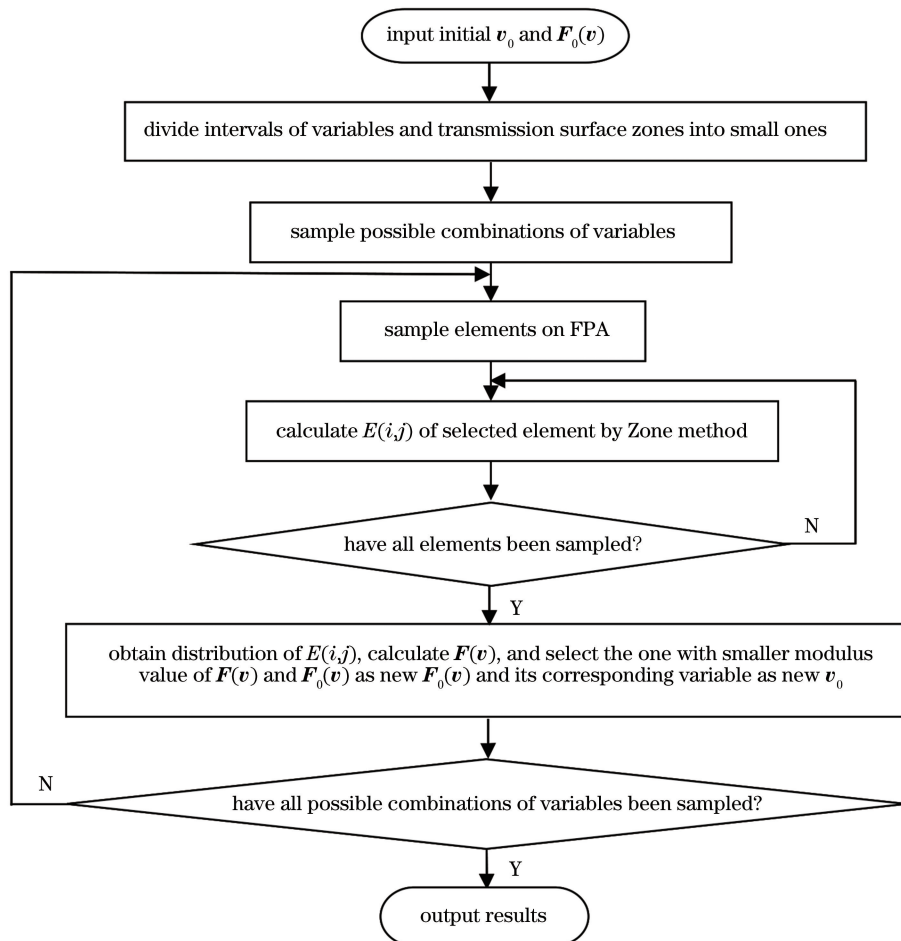


图 7 区间穷举法优化光阑开孔形状流程图

Fig. 7 Flow chart for optimizing stop aperture shape by interval exhaustion method

3 光阑开孔优化设计实例

某款非制冷红外探测器在工作一段时间后,图像会出现明显的“锅盖效应”。针对该探测器,利用基于上述数学模型编制的程序,优化设计一个合适的光阑,以消除杂散光造成的影响。优化设计所需的输入参数包括探测器焦平面的数据,窗口数据,焦平面、光阑、壳体辐射面、前保护板的位置数据,以及作为变量的光阑开孔形状的初始值和约束条件数据。壳体辐射面、前保护板为铝合金结构件,可看作灰体。窗口为平行平板,光线经过后方向不变,为方便计算,可将其厚度 d 等效成空气层厚度 d_e ($d_e =$

$\frac{d}{n}$, n 为窗口材料折射率),所有窗口以外的位置数据均根据等效空气层厚度计算得到。输入的数据如表 1 所示,壳体辐射面及前保护板平面尺寸如图 8 所示。

用于区间穷举法的变量元素 l_H, l_V, h_H 和 h_V 的区间划分精度为 0.01 mm,以满足光阑开孔形状精度要求。在目标函数分量 $F_1(\mathbf{v})$ 和 $F_2(\mathbf{v})$ 中, $F_2(\mathbf{v})$ 随变量的变化非常敏感,约为 $F_1(\mathbf{v})$ 的 10^4 倍,当 $F_1(\mathbf{v})$ 权重为 1 时,需要对 $F_2(\mathbf{v})$ 赋予 10^{-4} 量级的权重,进而组成目标函数向量 $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ 以待优化。

表 1 光阑开孔形状优化的输入数据

Table 1 Data input for optimization of shape of stop aperture

Type of data	Data input
Data of FPA	Array size of 640×512 , pitch of $17 \mu\text{m}$, wavelength of $8\text{--}12 \mu\text{m}$
Data of window	Size of $16.9 \text{ mm} \times 14.7 \text{ mm}$, $d=1 \text{ mm}$, $n=4.0043$
Radiation properties of structural parts	Emissivity of 80% , absorption of 80% , reflectivity of 20% , temperature of 300 K
Distance between stop and FPA	0.8 mm
Distance between radiant surface of case and FPA	1.15 mm
Distance between plane of front baffle and FPA	7.35 mm
Initial shape of stop aperture	Rectangle of $11.20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$
Restriction range of stop aperture	Between two concentric rectangles of $11.20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ and $16.9 \text{ mm} \times 14.7 \text{ mm}$

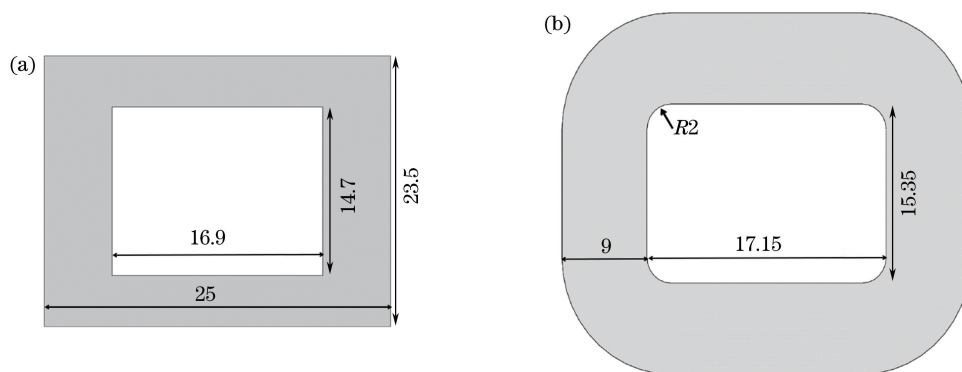


图 8 尺寸示意图(单位:mm)。(a)壳体辐射面;(b)前保护板平面

Fig. 8 Dimensions (unit:mm). (a) Radiant surface of case; (b) plane of front baffle

把以上参数输入区间穷举法优化程序,完成全局优化。最终获得的光阑开孔形状如图 9 所示,其中 X 、 Y 分别为光阑所处平面上水平和垂直方向的坐标值(以光阑中心为原点)。此时变量元素的值分别为 $l_H=11.82 \text{ mm}$, $l_V=9.77 \text{ mm}$, $h_H=0.34 \text{ mm}$, $h_V=0.27 \text{ mm}$;对应焦平面照度分布的均值 $F_1(\nu)=1.8644 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,非均匀性 $F_2(\nu)=6.55\%$ 。

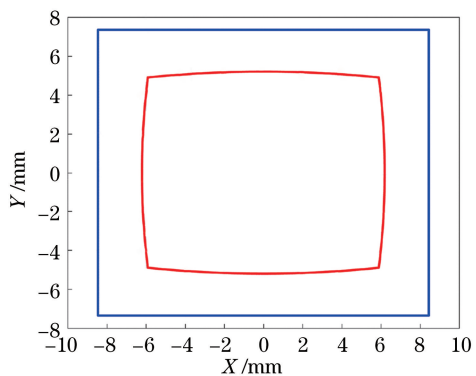


图 9 优化获得的光阑开孔形状

Fig. 9 Stop aperture shape after optimization

为了验证该优化设计结果的合理性,本文在三维光机软件平台上,对该非制冷红外探测器的内部杂散光进行仿真,对比分析该非制冷红外探测器在不加光阑和加光阑时,焦平面接收到的杂散光辐射照度分布情况,如图 10、11 所示,其中 X_1 为焦平面的对角线坐标值(以焦平面左下角为原点), X_2 、 Y_2 分别为焦平面上水平和垂直方向的坐标值(以焦平面中心为原点)。可以看出,未加光阑时,从图像对角线方向来看,焦平面接收到的杂散光辐射照度的幅值较高,从中心到边缘,照度明显递增,如图 10(a) 所示;从整幅图像来看,四角的照度比中间更强,“锅盖效应”显著,如图 11(a) 所示。加光阑后,从图像对角线方向来看,辐射照度的幅值明显减小,从中心到边缘照度的递增趋势也有所减缓,如图 10(b) 所示;从整幅图像来看,图像照度分布比较均匀,“锅盖效应”削弱,如图 11(b) 所示。所以,可以得出,优化设计的光阑能有效地削弱杂散光能量及其引起的非均匀性。

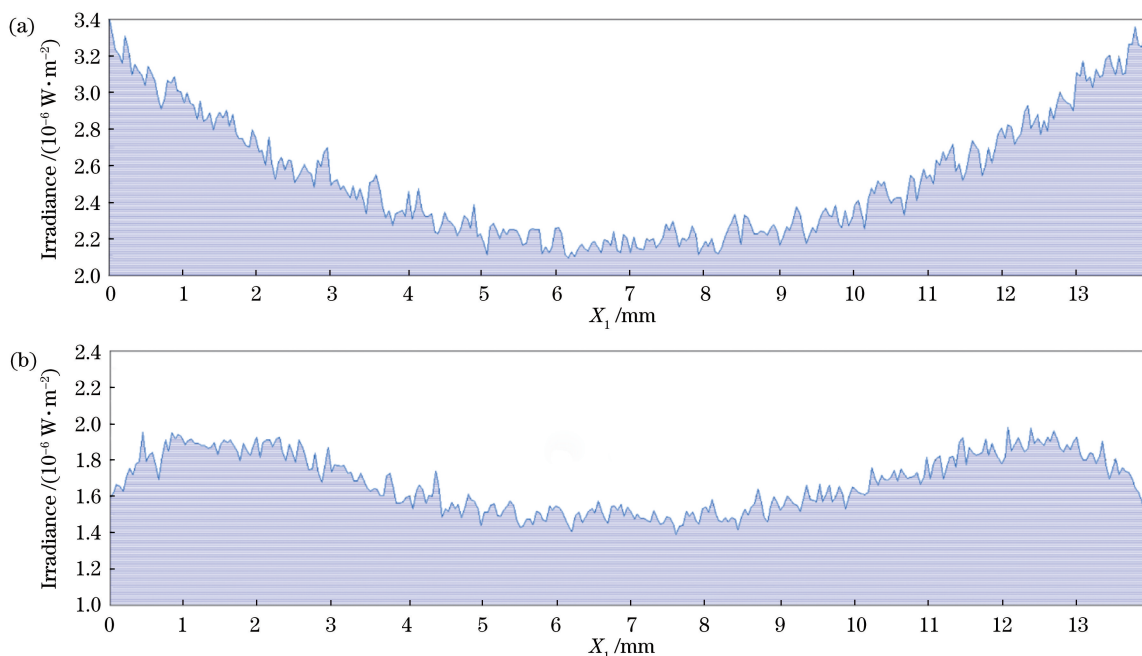


图 10 杂散光辐射照度沿焦平面对角线方向的分布。(a)不加光阑;(b)加光阑

Fig. 10 Distribution of stray irradiance along diagonal line of FPA. (a) Without stop; (b) with stop

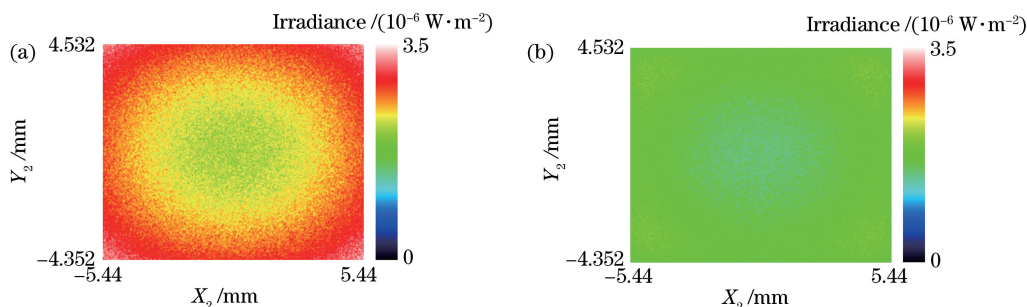


图 11 焦平面上杂散光辐射照度分布。(a)不加光阑;(b)加光阑

Fig. 11 Distribution of stray irradiance on FPA. (a) Without stop; (b) with stop

4 结 论

非制冷红外探测器产生的杂散光红外辐射经反射后进入焦平面,形成非均匀图像,造成“锅盖效应”。在紧贴探测器窗口处增设特殊开孔形状的光阑,是抑制杂散光的有效方式。对此,提出了光阑开孔形状的优化设计方法。基于辐射能量传输的区域法,建立了计算杂散光在焦平面照度分布的模型;同时也建立了变量和目标函数的数学模型,将光阑形状的优化问题归结为极值求解问题,选取区间穷举法作为极值搜寻方法。针对某款非制冷红外探测器设计了光阑,对其开孔形状开展优化设计;并对添加光阑前后焦平面接收到的杂散光辐射照度分布情况进行了仿真和对比分析,最终验证了设计的光阑对“锅盖效应”的抑制效果。利用所提出的优化方法能够设计出形状合理、作用良好的光阑,为非制冷红外

探测器杂散光的抑制提供了有效的手段。

参 考 文 献

- [1] Kimata M. Uncooled infrared focal plane arrays[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(1): 4-12.
- [2] Zhang X, Jin W Q, Li L, et al. Band optimization of passive methane gas leak detection based on uncooled infrared focal plane array: publisher's note [J]. Applied Optics, 2018, 57(15): 3991-4001.
- [3] Yang K Y, Jin N, Yang D, et al. Monte Carlo calculation on stray radiation scattered by the baffle with a heterotypic surface for uncooled infrared system[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10815: 108150R.
- [4] Yang Z H, Ma Y H, Guo J G, et al. Analysis and correction of stray thermal radiation in infrared optical systems including an experimental case study [J]. Applied Optics, 2019, 58(13): 3582.

- [5] Tian Q J, Chang S T, Li Z, et al. A method to measure internal stray radiation of cryogenic infrared imaging systems under various ambient temperatures [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 1-6.
- [6] Sun C, Wang Z Y, Cheng X H, et al. Simulation and evaluation of stray radiation from optical window effects on infrared detection system [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 94: 200-206.
- [7] Oh E, Hong J, Kim S W, et al. Novel ray tracing method for stray light suppression from ocean remote sensing measurements[J]. *Optics Express*, 2016, 24 (10): 10232.
- [8] Cai W W, Ma L. Improved Monte Carlo model for multiple scattering calculations [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(1): 012901.
- [9] Jia M Y, Cui S S, Chen X Y, et al. Image reconstruction method for laminar optical tomography with only a single Monte-Carlo simulation [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(3): 031702.
- [10] Zhang F Q, Zhang W G, Wan W B. Research on stray radiation of infrared detection optical system based on ray-tracing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0904006.
张发强, 张维光, 万文博. 基于光线追迹的红外探测光学系统杂散辐射研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 0904006.
- [11] Yang K Y, Jin N, Xu M, et al. Calculation of photometric inefficiency for all shapes of cold shields with superposition integral method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311004.
杨开宇, 金宁, 徐曼, 等. 用积分法计算任意形状冷屏的光度无效性 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311004.
- [12] Jin N, Yang K Y, Cao L, et al. Optimization design for the shapes of cold shield in infrared systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0111005.
金宁, 杨开宇, 曹凌, 等. 红外系统冷屏形状的优化设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0111005.