

红外系统冷屏形状的优化设计

金 宁 杨开宇* 曹 凌 明景谦

昆明物理研究所, 云南 昆明 650223

摘要 一次成像的简化式红外光学系统冷屏与出瞳不能匹配,致使系统受到杂散光干扰。在此情况下,对冷屏的开孔形状进行合理优化设计对杂散光的抑制十分必要。利用数学中的最优化计算来解决冷屏形状的优化问题,建立了优化变量和优化目标函数的数学模型,提出了全局优化和局部优化相结合的方法,分别用区间穷举法和阻尼最小二乘法完成,以得到较优的冷屏开孔形状。利用本方法,对一个现有的简化式热像光学系统设计了冷屏开孔形状,解决了该系统中由冷屏与出瞳不匹配造成的杂散光干扰的问题,从而验证了提出的冷屏优化设计方法的正确性与实用性。

关键词 光学设计; 红外光学; 杂散光; 优化设计; 冷屏; 目标函数

中图分类号 TN216

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0111005

Optimization Design for the Shapes of Cold Shield in Infrared Systems

Jin Ning Yang Kaiyu Cao Ling Ming Jingqian

Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China

Abstract The cold shield mismatches exit pupil in simple imaging infrared optical systems, causing the interference in the systems. For those systems, optimization design for the shapes of cold shield is necessary to suppress the stray light. A mathematical method using optimization calculation to design the shapes of cold shield is proposed. The mathematical models of optimization variables and objective functions are established, then global optimization by the interval exhaustive method and local optimization by the damped least squares method are combined to obtain a proper cold shield shape. The method built in the article is used to design the shape of cold shield for an existing thermal imaging optical system. The problems of stray light in the system caused by the mismatch of cold shield and exit pupil are solved, and thus the method built to optimization design for the shapes of cold shield is proved to be positive and applicable.

Key words optical design; infrared optics; stray light; optimization design; cold shield; objective functions

OCIS codes 110.3080; 290.2648; 080.1753; 110.1220

1 引 言

红外热成像系统是通过温度差和辐射率差来观察目标和背景,在制冷型系统中,探测器组件工作在较低的制冷温度下(约77K)^[1-2]。然而系统的结构部件表面温度远远高于制冷温度,它们产生的红外辐射经过系统部件表面的传播而进入探测器^[3],这些内部杂散光在系统探测器上形成的背景辐射噪声,使信噪比降级^[4-5]。在探测器焦平面前放置冷屏,以限制杂散光能量被像面所观察到。

对常规红外系统的设计,一般采用二次成像的光学系统,冷屏的通光孔形状为圆形,其位置和孔径与光学系统出瞳完全匹配,以获得100%的冷屏效率,最大程度避免了内部杂散光干扰。但二次成像系统结构复杂,为了简化结构而改二次成像为一次成像,出瞳位置则会远离像面,致使冷屏和出瞳不能完全匹配,像面因此受到内部杂光的严重干扰^[6-7],同时也降低了像面杂光照度的均匀性,使得这些杂光形成的噪声难以通过电子处理滤除^[8]。在此类系统中,冷屏开孔不能按常规设计为圆形,而应设计成其他形状。目前国内的工

收稿日期: 2015-7-20; 收到修改稿日期: 2015-8-27

作者简介: 金 宁(1967—),男,研究员,主要从事红外光学技术方面的研究。E-mail: jinningkip@126.com

*通信联系人。E-mail: yky20030634@126.com

程应用中,通常采取试用、仿制的方式,选择运动场形、矩形等基本形状的冷屏用于红外系统中,在一定程度上削弱了杂散光,但这些方法须进行大量的筛选实验,且现有的形状不能适用于任意参数的光学系统。该问题在红外热成像系统的实际研发过程中,长期未得到解决。近年来报道的文献也对现有的圆形、运动场形和矩形等冷屏在系统中的性能进行了大量的计算分析^[9-12],但未针对其不足提出改进措施,更未提出对冷屏形状进行正向设计的方法。

因此,根据红外光学系统参数对冷屏开孔形状进行合理设计,使得冷屏既能保证足够的信号光能量通过其开孔,又能最大限度地减弱像面的杂散光的能量和非均匀性,这对于简化红外系统结构、同时提升系统的抗噪性能至关重要。本文针对红外系统冷屏与出瞳不匹配的情况,建立冷屏开孔形状的优化设计方法。

2 优化冷屏开孔形状的程序设计

2.1 基本思路

把冷屏形状的优化设计问题抽象成为数学中的最优化计算,主要归结为以下思路:给定一个能够评价冷屏性能的目标函数,并将描述冷屏形状的参数作为目标函数的变量,以适当的算法改变变量,在变量的约束范围内寻找一组值,使目标函数达到最优。从数学的角度来看,优化问题是一个极值求解问题,建立优化数学模型需要两个要素,即优化变量和目标函数。同时需找到适用于该模型的极值求解算法作为优化算法,通过编制程序将理论模型转化为实际应用,实现对冷屏形状的优化设计,使冷屏的性能达到最佳。

2.2 为优化冷屏形状建立的数学模型

2.2.1 冷屏形状的优化变量模型

1) 冷屏形状的数学描述

冷屏开孔的外形是由闭合的曲线构成,曲线的平面方程即是对冷屏形状的数学描述。光学系统通常具有对称性,因此在对冷屏建模时只需考虑开孔形状的半侧,描述冷屏形状的闭合曲线也就简化为与坐标轴形成封闭的函数曲线。

采用平面直角坐标系下的 M 次多项式函数 $x=f_p(y)$, 对冷屏的开孔形状进行数学描述,其标准形式为:

$$x=f_p(y)=a_0y^M+a_1y^{M-1}+\dots+a_{M-1}y+a_M=\sum_{m=0}^Ma_my^{M-m}, \quad (1)$$

式中 a_m 为多项式系数, M 为多项式次数。只要 M 取值足够大,函数方程就能精确地描述冷屏开孔形状。

选择多个浮动的离散点 $(x_n, y_n)(n=1, 2, \dots, N)$, 由它们限定冷屏开孔,将这些离散的点拟合成多项式方程曲线以描述冷屏的开孔形状,取点数越多,形状越精确。这些点的 y 值 $y_1 \dots y_N$ 在横轴上等间隔取值,通过变动每个 y_n 值对应的 x_n 而变动冷屏的开孔形状,同时改变多项式方程,如图 1 所示。将离散点的 x 分量 $x_1 \dots x_N$ 作为优化变量,将其组成一个向量 $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_N)$ 。

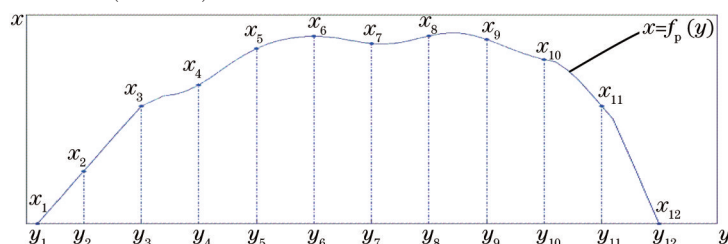


图 1 冷屏形状的优化变量示意图

Fig.1 Sketch of optimization variables of cold shield

2) 变量初始值和约束范围的确定

红外光学系统的视场通常为矩形视场,当冷屏与出瞳不匹配时,视场内有效光束在冷屏上的投影接近于矩形。因此选择矩形作为优化前的初始冷屏形状,该矩形恰好能将有效光束的投影包含在内,其具体尺寸可由光学系统的参数计算得到,如图 2 所示, h_x 、 h_y 分别表示矩形在 x 和 y 方向的边长。此时冷屏开孔不仅能透过有效光束,同时也能透过大量的杂散光,冷屏效率很低,必须通过优化来减小冷屏开孔。在优化过程中,不允许冷屏开孔形状的变化超出初始的矩形范围,以免透过更多的杂散光,因此作为初始形状的矩形框

同时约束着变量取值范围。

据此规定,围成冷屏形状的离散点在图2所示的实线矩形框内变化,离散点的 y 值固定在 $[-h_y/2, h_y/2]$ 内等间隔取值,则优化变量 x 的各元素初始值为 $x_1 \cdots x_N = h_x/2$,变量约束范围为 $0 \leq x_1 \cdots x_N \leq h_x/2$ 。

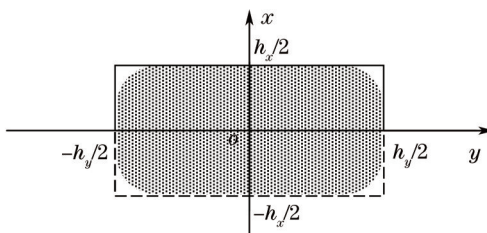


图2 作为冷屏初始形状的矩形
Fig.2 Rectangle acting as initial shape of cold shield

2.2.2 优化目标函数

1) 评价冷屏性能的参数

在冷屏的优化过程中,需要有能够衡量冷屏在系统中作用效能的参数,从而借助这些参数得到优化目标函数,来指定优化最终需达到的目标。冷屏对应的像面能量分布状况是最直接的衡量冷屏作用的依据,它们与像面单元对应的通光立体角大小相关^[13-14]。据此,选取以下和立体角有关的特征量指定优化目标:

① 有效立体角 $\Omega_{usc}(i)$

有效立体角 $\Omega_{usc}(i)$ 是探测器第 i 个单元被出瞳边缘所围成、并且不被冷屏边缘阻挡的立体角,表征探测器某个单元接收到穿过冷屏的信号光能量大小。 $\Omega_{usc}(i)$ 越大,冷屏对信号光遮挡越少。

② 总立体角 $\Omega_{tot}(i)$

总立体角 $\Omega_{tot}(i)$ 是冷屏边缘对探测器第 i 个单元所围成的立体角,表征探测器某个单元接收到穿过冷屏的总能量的大小,它包括信号光能量和杂散光能量。

③ 光度无效性

冷屏的光度无效性(PI)由以下公式定义^[15]:

$$V_{PI}(i) = \frac{\Omega_{tot}(i)}{\Omega_{usc}(i)}, \quad (2)$$

$V_{PI}(i)$ 在数值上是冷屏效率的倒数,反映透过冷屏的杂散光能量相对于信号光能量的大小,衡量冷屏对系统中杂散光的抑制能力。每个探测器单元对应的 $V_{PI}(i)$ 值越小,探测器接收的相对杂散辐射越少; $V_{PI}(i)$ 值随探测器单元位置 i 值变化幅度越小,像面各位置的相对杂散辐射照度越均匀; $V_{PI}(i)-i$ 曲线整体值越低而平坦,则冷屏对内部杂散光的抑制能力越强;当 $V_{PI}(i)-i$ 曲线为水平直线时,背景杂散辐射为直流噪声,系统经电子滤除噪声后,冷屏效率等效为100%。

$\Omega_{tot}(i)$ 、 $\Omega_{usc}(i)$ 和 $V_{PI}(i)$ 3个参数可以从一个全面的角度综合定量评价冷屏对系统的作用效能,采用文献[16]中的方法计算这些参数,从而获取优化冷屏形状的目标函数。

2) 优化目标函数的选择

优化问题表现为求解函数的极值问题,它要求有一个被求极小值的实值函数作为目标函数。

冷屏在系统中若要起到良好作用,必须通过优化实现以下几方面的目标:① $V_{PI}(i)$ 关于 i 的均值尽可能小,使冷屏能够有效抑制大量的相对杂散辐射能量;② $V_{PI}(i)$ 随 i 值变化的均方根尽可能小,使 $V_{PI}(i)-i$ 曲线接近水平直线,可经电子滤除直流噪声而使冷屏效率接近100%;③零视场的 $\Omega_{usc}(i)$ 值取最大值,使中心视场的光束不受到遮挡;④探测器单元不同位置的 $\Omega_{usc}(i)$ 与零视场的差值尽可能小,使冷屏对信号光能量产生的阻挡较少。

以上4个方面为优化冷屏形状所要达到的目标,所以构造4个函数,作为被求极小值的目标函数:

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{x}) = \overline{V_{PI}(i)} \\ f_2(\mathbf{x}) = \sqrt{\left[V_{PI}(i) - \overline{V_{PI}(i)} \right]^2} \\ f_3(\mathbf{x}) = \Omega_{usc, \max} - \Omega_{usc}(0) \\ f_4(\mathbf{x}) = \Omega_{usc}(0) - \overline{\Omega_{usc}(i)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, x 为构成冷屏形状点的横坐标 $x_1 \cdots x_N$ 组成的优化自变量向量, 其取值范围在 0 和初始值之间, 即 $x_1 \cdots x_N \in [0, h_s/2]$ 。

以上函数与冷屏对应的立体角或光度无效性有关, 可根据给定的自变量, 由文献[16]中的叠加积分法做出数值计算。由于这些函数值在自变量的取值空间内均大于 0, 根据 $f_1(x) \sim f_4(x)$ 的物理意义, 优化目标值越接近 0, 冷屏效果越佳, 因此优化的实质即为求解目标函数值为最小值时的自变量。

在优化中, 各个目标函数在数值上量级不相等, 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 $F(x)$, 以获得相近的变化敏感程度:

$$F(x) = \{\mu_1 f_1(x), \mu_2 f_2(x), \mu_3 f_3(x), \mu_4 f_4(x)\} \\ = (F_1, F_2, F_3, F_4) \quad (4)$$

式中 $\mu_1 \sim \mu_4$ 为函数 $f_1(x) \sim f_4(x)$ 的权重因子, $F_1 \sim F_4$ 为向量 $F(x)$ 的元素。此时, 只要给定优化变量一组 x 值, 就能求得与之对应的目标函数 $F(x)$ 值, 冷屏的优化问题即为求解向量 $F(x)$ 模的最小值的问题。

2.3 优化方法选取

前面已建立了优化变量和目标函数的数学模型, 据其特征, 可将冷屏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。因此采取全局优化和局部优化相结合的方法: 先进行全局优化, 在自变量空间内寻找一组变量, 使目标函数达到相对于全局较低的值; 再将全局优化的结果作为初始状态, 进行局部优化, 使目标函数在相对于全局较低的点附近找到最小值, 完成细致优化。

2.3.1 全局优化

目前常用的全局优化成熟方法有模拟退火法、随机抽样法、区间穷举法等, 它们各具优缺点, 对它们的选择需要结合冷屏形状变量的特征。冷屏形状的变化对优化变量 x 的每个元素 $x_1 \cdots x_N$ 值灵敏程度基本相同, 且每个元素的初始值和取值区间完全相同, 适合选用区间穷举法优化冷屏形状。模拟退火法无法充分利用变量模型的这些特点, 另外还存在收敛速度慢的缺点; 随机抽样法由于随机性, 优化的方向性较差, 需要做大量的循环才能找到较好的结构^[17-19]。

采取区间穷举法作为全局优化的方法, 这是一种全局搜索方法。对于冷屏形状的全局优化, 其做法是: 将变量 x 的约束范围 $[0, h_s/2]$ 等分成多个取值区域, 对 $x_1 \cdots x_N$ 在区域内的取值进行规则排列组合, 计算每一种组合的函数 $F(x)$ 模值, 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, 就能找到全局中较好的变量结构, 为下一步的局部优化提供较好的初始结构。

2.3.2 局部优化

目前常用的局部优化方法大多数是基于求导或求梯度进行的。对于建立的目标函数, 只能对其做出数值计算, 而不能对其写出解析的函数关系式, 因此无法用求导数或梯度的方法进行优化。此类非线性优化问题在工程应用中通常采用阻尼最小二乘法求解^[17-19]。

采取阻尼最小二乘法作为局部优化的方法, 利用矩阵运算, 经过多轮优化求解而使目标函数逐渐逼近最小值。用该方法进行每一轮优化的自变量改变值为^[19]:

$$\Delta x = (A^T A + pI)^{-1} A^T \Delta F, \quad (5)$$

式中 $\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \dots \\ \Delta x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \dots \\ x_N - x_{0N} \end{bmatrix}$, $\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \dots \\ \Delta F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{01} \\ \dots \\ -F_{04} \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} \delta F_1 & \dots & \delta F_1 \\ \delta x_1 & & \delta x_N \\ \dots & & \dots \\ \delta F_4 & \dots & \delta F_4 \\ \delta x_1 & & \delta x_N \end{bmatrix}$, Δx 、 ΔF 分别为每一步优化的自变量和目标

函数改变向量, x_0 、 F_0 分别为每一步优化的自变量和目标函数初始值, p 为阻尼系数, I 为单位矩阵。每一轮优化求解得到 Δx , 可获得一个比原冷屏形状有所改善的新形状, 将该形状作为新的初始结构, 重新进行下一轮求解, 这样不断重复, 当 $F(x)$ 模值趋近最小值时, Δx 几乎不再变化, 因此当向量 Δx 的模小于一个设定的微小阈值时终止运算, 其优化流程如图 3 所示。

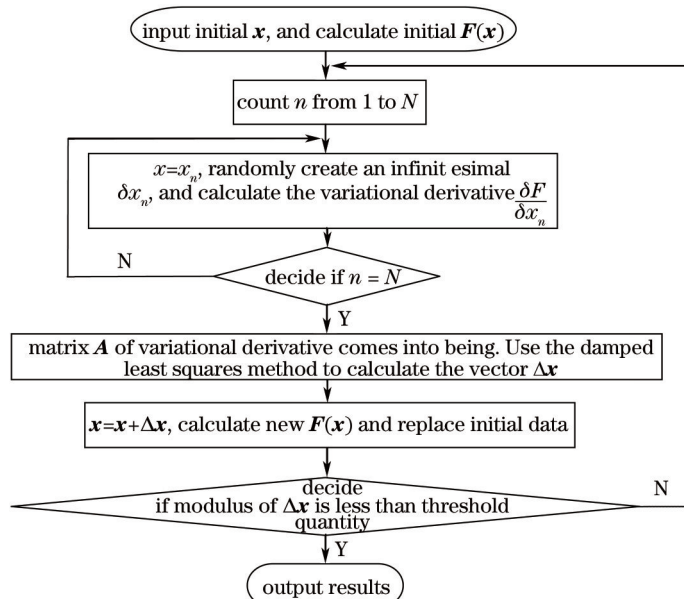


图3 阻尼最小二乘法优化冷屏流程图

Fig.3 Calculating flow diagram of the damped least squares method to optimize cold shield shape

3 冷屏的优化设计实例

为了验证所建方法的实用性,选取了实际研制的某款典型红外长波 288×4 焦平面阵列(FPA)的扫描型热像仪,如图4所示,其扫描镜后端光学系统采取一次成像方式,以减小系统的体积、重量和成本,此时,光学系统出瞳与冷屏不能完全匹配。当样机完成装配时,实验发现无论采用圆形、运动场形或是矩形等常规冷屏,均未能抑制杂散光对像面带来的非均匀干扰。与本系统类似的 576×4、1152×4、480×6 等简化式红外光学系统中,皆存在此类问题。为解决该问题,根据前文所述思路编制 Matlab 程序,对本系统的冷屏形状进行优化设计,提高冷屏在系统中的杂光抑制效率。

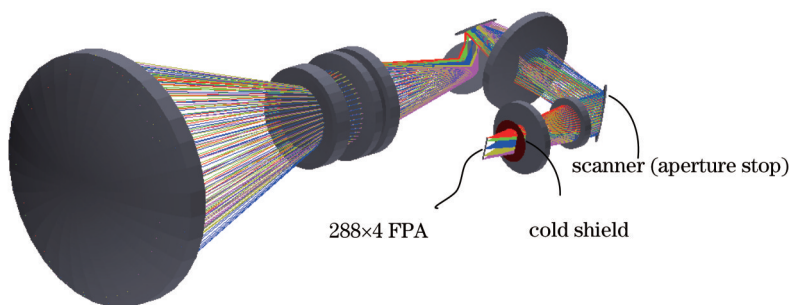


图4 288×4 热像仪的光学系统

Fig.4 Optical system of 288×4 thermal imager

由于 288×4 探测器像元可近似看作呈线列分布,在优化中,对目标函数的计算,只需考虑在线列方向。优化设计所需的输入参数包括有关 288×4 探测器焦平面的数据、红外光学系统出瞳数据、以及作为优化变量的冷屏开孔形状的初始结构,其中,系统出瞳参数可由物像关系计算得出,冷屏开孔形状初始结构及约束范围根据光学参数求得。输入数据如表 1 所示。

表1 冷屏形状优化的输入数据

Table 1 Data input for the optimization of cold shield shape

Size of FPA	Number of FPA elementary in alignment	Size of FPA elementary	Distance between FPA and cold shield	Distance between FPA and exit pupil	Size of exit pupil	Size of rectangle acting as initial shape of cold shield
0.384 mm×8.064 mm	288	25 μm×28 μm	11.54 mm	37.4 mm	Φ15 mm	4.9 mm×10.2 mm

用37个可浮动的点围成冷屏开孔形状,将这些点对(1)式拟合成20次多项式方程,用来描述冷屏开孔形状。在目标函数 $f_i(\mathbf{x}) \sim f_i(\mathbf{x})$ 中, $f_i(\mathbf{x})$ 随自变量的变化非常敏感,约为其他函数的 10^3 倍,需要赋予相对于其他函数 10^{-3} 量级的权重得以均衡,组成目标函数向量 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 以待优化。

1) 全局优化

把以上参数输入区间穷举法优化程序,并将其运行,完成全局优化。最终获得的优化结果如图5所示,分别是优化得到的冷屏对应的有效立体角、光度无效性和冷屏开孔形状。有效立体角和光度无效性分布在像面上是关于线列中心对称的,所以图中仅仅显示了一侧从中心到边缘的分布,即横坐标表示的像元序号*i*取值为0~144。

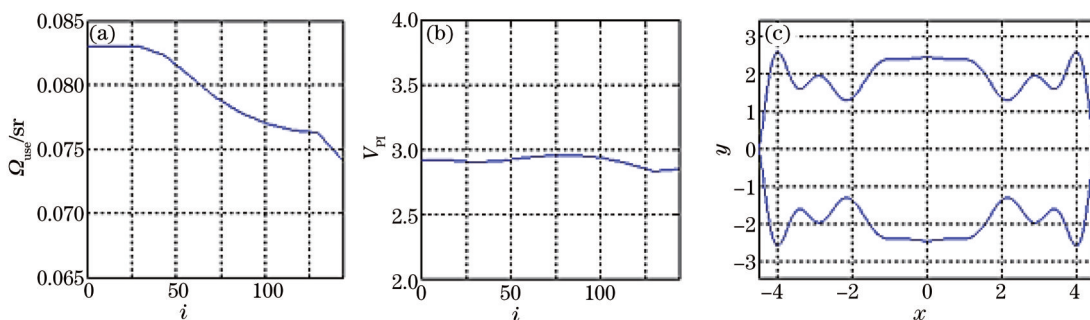


图5 全局优化获得结果。(a)有效立体角;(b)光度无效性;(c)冷屏形状

Fig.5 Results of global optimization. (a) Useful solid angle; (b) photometric inefficiency; (c) shape of cold shield

从图5反映的全局优化结果可以看出,有效立体角从像面中心到边缘,其值有所衰减,边缘值约为中心值的90%,这说明有效视场边缘能量衰减仅10%左右,满足一般要求;光度无效性对所有像元的值均小于3,并且分布曲线接近于水平线,随像元分布浮动不超过5%,说明杂光能量低而均匀,易于电子滤除噪声。全局优化得到的冷屏在系统中的性能基本达到了一般要求,可将该冷屏形状作为初始结构,对其继续进行局部细致优化,以获得更优的结果。

2) 局部优化

将全局优化的结果作为局部优化的初始状态输入程序,用阻尼最小二乘法程序进行优化,设定 $\Delta\mathbf{x}$ 的模小于阈值 10^{-5} 为优化循环结束条件,获得图6所示的结果。从曲线图来看,有效立体角对于*i*值为50~100的像元,均值比全局优化的结果有所提高,说明冷屏对有效信号光的遮挡更少;光度无效性分布曲线比全局优化后更平直;冷屏形状更简洁、光滑。说明经局部细致优化后,冷屏性能达到了更理想的状态。

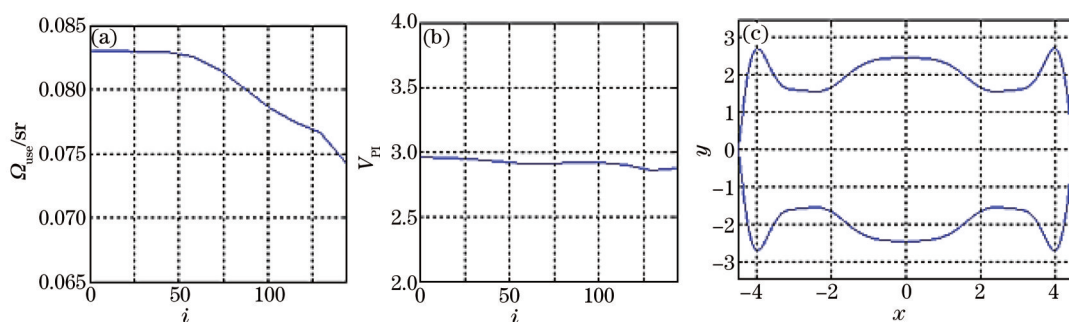


图6 局部优化获得的(a)有效立体角、(b)光度无效性曲线以及(c)冷屏形状

Fig.6 Local optimization results of (a) useful solid angle, (b) photometric inefficiency and (c) shape of cold shield

图7为优化设计后的冷屏,将其装于样机中,由于其光度无效性PI曲线接近直线,系统经电子滤噪后,系统冷屏效率接近于100%,由冷屏与出瞳不匹配造成的杂散光干扰问题已完全解决。

4 结 论

对于一次成像的简化式红外光学系统,冷屏与出瞳不能完全匹配,像面必然受到内部杂散光的严重影响。为解决此问题,提出了冷屏开孔形状的优化设计方法。利用数学中的最优化计算来解决冷屏形状的优

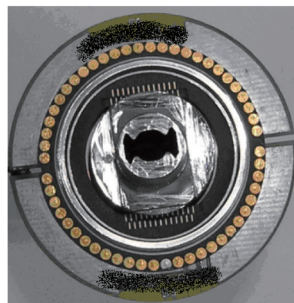


图7 优化后装于样机中的冷屏

Fig.7 Cold shield optimized and assembled in the thermal imager

化问题,建立了优化变量的数学模型,给定优化自变量的初始值和约束范围。从杂散光角度抑制引入衡量冷屏作用效能的参数,并建立了优化目标函数。采取全局优化和局部优化相结合的方法,用区间穷举法对目标函数进行全局优化,再用阻尼最小二乘法进行局部优化,以得到较优的冷屏开孔形状。选取了典型的一次成像式的热像光学系统,针对冷屏与出瞳不匹配的情况,对其冷屏开孔形状进行优化设计,最终解决了热像系统杂散光干扰的问题。提出的优化方法能够设计出的形状合理、性能良好的冷屏,为红外系统杂散光抑制提供了有效的手段,同时也为红外系统结构的简化起到重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Liu Yang, An Xiaoqiang, Wang Qian, *et al.*. Analysis and control of Narcissus effect of long-wavelength cooling infrared imaging system based on optical defocusing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422003.
刘 洋,安晓强,王 茜,等.基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统冷反射效应的分析与控制[J].*光学学报*, 2012, 32(4): 0422003.
- 2 Liu Yang, An Xiaoqiang. Analysis and control of Narcissus effect of cooling it focal plane system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222007.
刘 洋,安晓强.制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J].*光学学报*, 2012, 32(2): 0222007.
- 3 Yang Kaiyu, Wang Feiyu, Jin Ning, *et al.*. Analysis of interior stray light for infrared thermal imager by OptisWorks[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(8): 443-448.
杨开宇,王飞宇,金 宁,等.利用OptisWorks对红外热像仪进行内部杂散光分析[J].*红外技术*, 2010, 32(8): 443-448.
- 4 Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0116001.
林剑春,孙丽巍,陈博洋,等.同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J].*中国激光*, 2013, 40(1): 0116001.
- 5 Zhang Yan, Fang Jiexiong. Noise analysis of HgCdTe photoconductive detector with different response wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28 (7): 1369-1373.
张 燕,方家熊.不同响应波长的HgCdTe光导器件噪声分析[J].*光学学报*, 2008, 28(7): 1369-1373.
- 6 Xu Xinxing, Chen Ning, Wang Bing, *et al.*. Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0816002.
徐新行,陈 宁,王 兵,等.机载紧凑型中波红外相机的设计[J].*中国激光*, 2014, 41(8): 0816002.
- 7 Bai Qinglan, Ma Caiwen, Sun Dongyan. The match form between exit pupil and cold shield and the vignetting calculation at a IR optical system[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(2): 95-97.
白清兰,马彩文,孙东岩.红外光学系统出瞳与冷屏匹配方式及渐晕分析计算[J].*红外技术*, 2006, 28(2): 95-97.
- 8 Bertrand Forestier, Joël Rollin, Dominique Ragot. *Optical Architecture for Infrared Viewing System:United States*, 6181486[P]. 2001.
- 9 Wang Yifeng, Zhuang Jisheng, Mao Jingxiang. Calculation of field angle of candy shape cold shield with Monte Carlo method and MATLAB [J]. *Infrared*, 2009, 30(11): 45-48.
王忆锋,庄继胜,毛京湘.用蒙特卡罗方法和MATLAB计算糖果形冷屏的视场角[J].*红外*, 2009, 30(11): 45-48.
- 10 Wang Yifeng, Fan Naihua. Computation of angle of viewing field of track field shape cold shield with Monte Carlo method and MATLAB [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(3): 274-276.
王忆锋,范乃华.用蒙特卡罗方法和MATLAB计算田径场形冷屏的视场角[J].*激光与红外*, 2009, 39(3): 274-276.

- 11 Wang Yifeng, Fan Naihua, Zhuang Jisheng. Changing trends of pixel solid angles of long linear device under circular cold shield and its imaging simulation[J]. Infrared Technology, 2009, 31(11): 631-633.
王忆锋, 范乃华, 庄继胜. 圆形冷屏下长线列器件光敏元立体角的变化趋势及其成像仿真[J]. 红外技术, 2009, 31(11): 631-633.
- 12 Li Jianlin, Sun Juan, Zhou Xiaojun. Method of accurate calculation of solid angle cold shield for infrared focal plane array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1153-1157.
李建林, 孙娟, 周效军. 精确计算红外焦平面冷屏立体角的方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1153-1157.
- 13 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 768-771.
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 768-771.
- 14 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis of caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2267-2271.
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267-2271.
- 15 Yang Kaiyu, Jin Ning, Cao Ling, *et al.*. Calculation of energy distribution in image plane for all shapes of cold shields[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1721-1726.
杨开宇, 金宁, 曹凌, 等. 任意冷屏对应的像面能量分布状况的计算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1721-1726.
- 16 Yang Kaiyu, Jin Ning, Xu Man, *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. 用叠加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.
- 17 Gong Chun, Wang Zhenglin. Mastery of Optimization Calculation by Matlab[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
龚纯, 王正林. 精通 Matlab 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- 18 Xie Zheng, Li Jianping, Chen Zhi. Theories and Methods of Linearity Optimization[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
谢政, 李建平, 陈挚. 非线性最优化理论与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- 19 Li Ling. Methods of Modern Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.

栏目编辑: 韩峰