

# 制冷型自由曲面离轴反射光学系统设计

操超<sup>1,2</sup>, 廖胜<sup>1</sup>, 廖志远<sup>1\*</sup>, 白瑜<sup>1</sup>, 陈炳旭<sup>1,3</sup>, 范真节<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 与非制冷探测器相比, 制冷型探测器具有灵敏度高、响应速度快和探测距离远等优点, 已被广泛应用于红外光学系统中。为了有效抑制杂散光, 制冷型探测器冷光阑位置需要与光学系统实出瞳位置重合。本文提出了一种制冷型离轴反射光学系统设计方法, 通过光瞳离轴和视场离轴实现无遮拦设计, 利用矢量像差理论可直接获得制冷型离轴反射光学系统的初始结构。针对长波红外制冷型探测器, 设计了一个自由曲面离轴三反光学系统, 满足了冷光阑的匹配条件。其光学系统的  $F$  数为 2.5, 焦距为 300 mm, 视场角为  $3^\circ \times 5^\circ$ 。使用自由曲面校正光学系统像差, 光学系统成像质量好, 反射镜无倾斜和偏心, 光学系统易于装调。

**关键词** 光学设计; 几何光学; 矢量像差理论; 自由曲面

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1122001

## Design of Cooled Freeform-Surface Off-Axis Reflective Optical System

Cao Chao<sup>1,2</sup>, Liao Sheng<sup>1</sup>, Liao Zhiyuan<sup>1\*</sup>, Bai Yu<sup>1</sup>, Chen Bingxu<sup>1,3</sup>, Fan Zhenjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Cooled detectors have the advantages of high sensitivity, fast response, and long detection distance as compared with uncooled detectors. Therefore, cooled detectors are widely used in infrared optical systems. To effectively suppress stray light, the cold stop of cooled detectors must be at the real exit pupil position of optical systems. In this study, a method for designing cooled off-axis reflective optical systems is proposed. In particular, an unobscured design is achieved by using an offset aperture stop and a biased input field. The initial configuration of cooled off-axis reflective optical systems is directly obtained based on vector aberration theory. A freeform-surface off-axis three-mirror optical system is designed for a long-wave infrared cooled detector that meets the cold stop matching condition. The  $F$  number of the designed optical system is 2.5, the focal length is 300 mm, and the field of view is  $3^\circ \times 5^\circ$ . Freeform surfaces are used to correct the aberrations of the designed optical system and ensure that the designed system has a good imaging quality. The mirrors are free from tilts and decenters, making the designed optical system to be easily aligned.

**Key words** optical design; geometric optics; vector aberration theory; freeform surface

**OCIS codes** 220.2740; 080.1005; 080.2730

## 1 引 言

红外成像系统是一种被动成像光学系统, 具有隐蔽性好、可全天候工作、抗干扰能力强等优点。与非制冷探测器相比, 制冷型探测器具有灵敏度高、响应速度快和探测距离远等优点, 因而在红外光学系

统中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。为了有效抑制杂散光, 制冷型探测器冷光阑位置需要与光学系统实出瞳位置重合, 满足冷光阑的匹配条件。离轴反射光学系统具有无色差、热稳定性好、无中心遮拦和能量利用率高等优点, 被广泛应用于空间光学系统中<sup>[2-3]</sup>。但与同轴光学系统相比, 离轴反射光学系统为非旋转对称

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-06-28; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61501429)

\* E-mail: liaozhiyuan1@163.com

系统,冷光阑匹配较难。Cook<sup>[4]</sup>设计了一个制冷型离轴三反光学系统,但探测器焦平面相对冷光阑存在倾斜和偏心,需要使用离轴杜瓦瓶,导致系统成本较高。之后 Cook<sup>[5]</sup>通过增加一个反射镜使探测器焦平面相对冷光阑不存在倾斜偏心,设计出了一个制冷型离轴四反光学系统。光学系统初始结构的设计是光学设计的关键,好的初始结构具有较小的剩余像差,使像差容易校正,可以减小光学表面的复杂程度,降低光学系统成本,但 Cook 未介绍制冷型离轴反射光学系统初始结构的设计方法。姜晰文等<sup>[6]</sup>提出了一种制冷型离轴三反光学系统设计方法,该方法通过赛德尔像差理论获得同轴的光学系统初始结构,再利用反射镜的倾斜和偏心获得无遮拦离轴反射光学系统。于清华等<sup>[7]</sup>提出了一种制冷型离轴三反光学系统设计方法,该方法也是基于赛德尔像差理论来获得同轴的光学系统初始结构,再通过光瞳离轴获得无遮拦离轴反射光学系统。

目前的制冷型离轴反射光学系统设计方法,主要是先通过塞德尔像差理论获得同轴光学系统结构,再进行离轴设计以获得无遮拦反射光学系统。赛德尔像差理论仅适用于同轴光学系统,因此通过塞德尔像差理论获得的同轴光学系统结构与最终设计的离轴光学系统偏差较大,而且系统无遮拦设计过程复杂。本文提出了一种制冷型离轴反射光学系统设计方法,采用该方法可以直接获得较好的无遮拦离轴反射光学系统初始结构。通过光瞳离轴和视场离轴实现无遮拦设计,根据探测器焦平面相对冷光阑不存在倾斜和偏心计算离轴量的大小,通过矢量像差理论直接获得无遮拦离轴反射光学系统初始结构,再利用光学设计软件对初始结构进行优化。针对长波红外制冷型探测器,设计了一个离轴三反光学系统,通过自由曲面校正光学系统像差,反射镜不存在倾斜和偏心,易于装调。

## 2 设计原理

为了使探测器焦平面相对冷光阑不存在倾斜和偏心,降低光学系统成本,通过光瞳离轴和视场离轴实现无遮拦设计,不使用反射镜的倾斜和偏心。光学系统的  $X$  方向视场角对称分布; $Y$  方向视场角范围为  $F_1 \sim F_2$ ,  $F_1$ 、 $F_2$  分别为视场角的最小值和最大值;入瞳偏移矢量  $\mathbf{P} = (0, P_Y)$ ,  $P_Y$  为入瞳沿  $Y$  方向的离轴量,光学系统焦距为  $f'$ ,可以得到像面中心  $X$  方向高度为 0,则  $Y$  方向高度  $h$  为

$$h = \frac{f'[\tan(F_2) + \tan(F_1)]}{2} \quad (1)$$

如果探测器焦平面相对冷光阑不存在偏心,出瞳的离轴量应等于  $h$ ,根据几何关系可以得到出瞳口径为  $2h$  时的像方数值孔径  $NA$  为

$$\begin{cases} NA = n \sin \theta \\ \tan \theta = \frac{h}{s} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\theta$  为像方孔径角; $s$  为冷光阑到探测器焦平面的距离; $n$  为像方折射率。

当出瞳口径为  $2h$  时,光学系统的  $F$  数为

$$F = \frac{1}{2n \sin \theta} \quad (3)$$

根据(3)式,可以得到视场离轴量所对应的光学系统入瞳离轴量为

$$P_Y = \frac{f'}{2F} \quad (4)$$

视场离轴可以看作是取同轴光学系统的轴外视场部分,不会改变光学系统的像差分布形式。而光瞳离轴可以看作是取同轴光学系统光瞳的轴外部分形成的子光学系统,如图 1 所示。由于光瞳存在偏移和缩小,像差分布形式变得十分复杂。

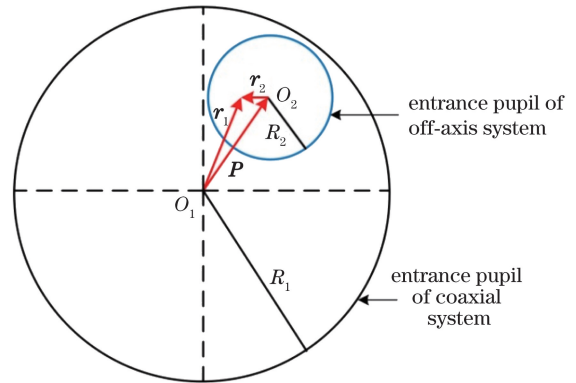


图 1 光瞳离轴光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of optical system with offset entrance pupil

光瞳离轴反射系统入瞳及其对应轴对称系统入瞳的关系如图 1 所示<sup>[8]</sup>,  $O_1$ 、 $O_2$  分别为同轴光学系统和离轴光学系统的光瞳中心,  $r_1$ 、 $r_2$  分别为同轴光学系统和离轴光学系统的光瞳矢量,同轴光学系统和离轴光学系统归一化光瞳矢量关系为

$$\boldsymbol{\rho}' = B\boldsymbol{\rho} + \mathbf{P}_1, \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\rho}'$  为轴对称反射系统光瞳归一化矢量; $\boldsymbol{\rho}$  为离轴反射系统光瞳归一化矢量; $\mathbf{P}_1$  为光瞳偏移归一化矢量,  $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}/R_1$ ;  $B$  为离轴反射系统与轴对称反射系统的孔径缩放比,  $B = R_2/R_1$ ,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为同轴

光学系统和离轴光学系统的入瞳半径。  
 矢量像差理论可以用来描述非旋转对称光学系

统的像差场分布规律,光瞳离轴光学系统的初级矢量像差系数<sup>[9]</sup>为

$$\begin{cases} C_1 = B^4 \sum_j W_{040j} \\ C_2 = B^3 \left( 4 \sum_j W_{040j} \mathbf{P}_1 + \sum_j W_{131j} \mathbf{H} \right) \\ C_3 = B^2 \left( 2 \sum_j W_{040j} \mathbf{P}_1^2 + \sum_j W_{131j} \mathbf{P}_1 \mathbf{H} + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 \right) \\ C_4 = B^2 \left[ 4 \sum_j W_{040j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) + 2 \sum_j W_{131j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{H}) + \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \right], \\ C_5 = B \left[ 4 \sum_j W_{040j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) \mathbf{P}_1 + 2 \sum_j W_{131j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) \mathbf{H} + \sum_j W_{131j} \mathbf{P}_1^2 \mathbf{H}^* + \right. \\ \left. \sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 \mathbf{P}_1^* + 2 \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \mathbf{P}_1 + \sum_j W_{311j} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \mathbf{H} \right] \end{cases}, \quad (6)$$

式中:球差系数  $C_1$  和场曲系数  $C_4$  为标量;彗差系数  $C_2$ 、像散系数  $C_3$  和畸变系数  $C_5$  为矢量;  $W_{040j}$ 、 $W_{131j}$ 、 $W_{222j}$ 、 $W_{220Mj}$  和  $W_{311j}$  为同轴光学系统的初级波像差系数,且不受光学元件偏心和倾斜的影响; $j$  为第  $j$  个光学表面; $\mathbf{H}$  为视场归一化矢量;\* 表示向量的共轭。

同轴光学系统的初级波像差系数和一阶属性可以通过近轴光线追迹获得,利用反射矩阵  $\mathbf{R}$  和传递矩阵  $\mathbf{T}$  获得主光线和边缘光线的近轴光线追迹数据<sup>[10]</sup>,如图 2 所示光线追迹模型由入瞳面  $s_0$  和其余  $k$  个光学表面  $s_1 \sim s_k$  组成, $k$  表示最后一个光学表面的顺序。

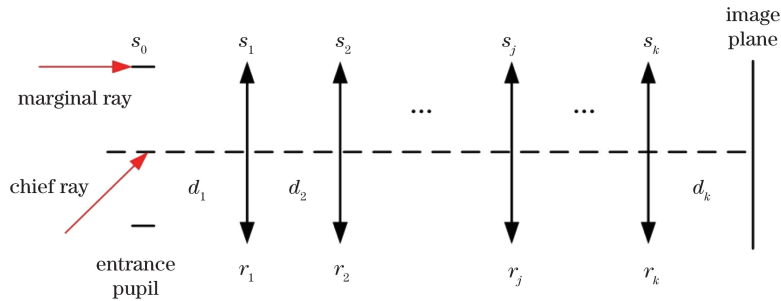


图 2 光线追迹模型

Fig. 2 Ray-tracing model

第  $j$  个表面的反射矩阵和传递矩阵分别为

$$\mathbf{R}_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_j} & -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_j = \begin{pmatrix} 1 & d_j \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中: $r_j$  为  $s_j$  的半径; $\mathbf{R}_0$  为  $s_0$  的反射矩阵; $d_j$  为  $s_j$  到  $s_{j+1}$  的距离; $d_0$  为  $s_0$  到  $s_1$  的距离; $\mathbf{T}_0$  为  $s_0$  的传递矩阵。

假设入射光线的起始数据为  $\mathbf{A} = (h_0 \ u_0)$ ,  $h_0$  为光线在  $s_0$  上的入射高度,  $u_0$  为光线在  $s_0$  上的入射孔径角,根据(7)式和(8)式可得光线在第  $j$  个面上的光线追迹数据为

$$\begin{pmatrix} h_j \\ u_j \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{j-1} \mathbf{R}_{j-1} \mathbf{T}_{j-2} \cdots \mathbf{T}_0 \mathbf{R}_0 \mathbf{A}^T, \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} h'_j \\ u'_j \end{pmatrix} = \mathbf{R}_j \mathbf{T}_{j-1} \mathbf{R}_{j-1} \mathbf{T}_{j-2} \cdots \mathbf{T}_0 \mathbf{R}_0 \mathbf{A}^T, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{A}^T$  为起始数据矩阵的转置矩阵。

通过(7)~(10)式可以获得主光线和边缘光线在不同表面的入射高度  $h$  和  $\bar{h}$ 、入射孔径角  $u$  和  $\bar{u}$ 、出射孔径角  $u'$  和  $\bar{u}'$ 。近轴光线追迹中的孔径角正负与国内光学教材定义方式相反<sup>[10]</sup>,光线与光轴的夹角用由光线转向光轴所形成的锐角度量,顺时针为正,逆时针为负。

根据初级波像差系数和赛德尔像差系数的关系可得同轴光学系统的初级波像差系数为

$$\begin{cases} W_{040j} = \frac{1}{8} S_{Ij} = -\frac{1}{8} A_j^2 h_j \left( \frac{u'_j}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) + \frac{1}{8} \tau \\ W_{131j} = \frac{1}{2} S_{IIj} = -\frac{1}{2} A_j \bar{A}_j h_j \left( \frac{u'_j}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) + \frac{\bar{h}_j}{2 h_j} \tau \\ W_{222j} = \frac{1}{2} S_{IIIj} = -\frac{1}{2} \bar{A}_j^2 h_j \left( \frac{u'_j}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\bar{h}_j}{h_j} \right)^2 \tau \\ W_{220j} = \frac{1}{4} S_{IVj} = -\frac{1}{4} H_j^2 c_j \left( \frac{1}{n_j} - \frac{1}{n_{j-1}} \right) \\ W_{311j} = \frac{1}{2} S_{Vj} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{A}_j}{A_j} H_j^2 c_j \left( \frac{1}{n_j} - \frac{1}{n_{j-1}} \right) + \right. \\ \left. \frac{\bar{A}_j^3}{A_j} h_j \left( \frac{u'_j}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) \right] + \frac{1}{2} \left( \frac{\bar{h}_j}{h_j} \right)^3 \tau \\ \tau = c_j^3 (n_j - n_{j-1}) k_j h_j^4 \end{cases}, \quad (11)$$

式中： $S_{Ij}$ 、 $S_{IIj}$ 、 $S_{IIIj}$ 、 $S_{IVj}$ 和 $S_{Vj}$ 为第 $j$ 面的赛德尔像差系数； $h_j$ 为边缘光线在 $s_j$ 上的入射高度； $\bar{h}_j$ 为主光线在 $s_j$ 上的入射高度； $u'_j$ 为边缘光线在 $s_j$ 上的出射孔径角； $u_j$ 为边缘光线在 $s_j$ 上的入射孔径角； $n_j$ 、 $n_{j-1}$ 分别为 $s_j$ 的物方和像方折射率； $\tau$ 为中间量简化公式； $A_j = (u'_j - u_j)/(1/n_j - 1/n_{j-1})$ ； $\bar{A}_j = (-H_j + \bar{h}_j A_j)/h_j$ ； $H_j$ 为光学系统拉赫不变量； $k_j$ 为光学表面圆锥常数； $c_j$ 为光学表面曲率。

(4)式中的波像差系数 $W_{220Mj}$ 可以根据(11)式中的像散系数 $W_{220j}$ 和场曲系数 $W_{222j}$ 得到<sup>[11]</sup>：

$$W_{220Mj} = W_{220j} + \frac{1}{2} W_{222j}. \quad (12)$$

根据(6)~(12)式,可以获得光瞳位于任意位置处的任意视场离轴反射光学系统初级像差系数。由于离轴反射光学系统是一种非旋转对称光学系统,几个视场点的成像质量不能反映所有视场的成像质量。在离轴反射系统初始结构设计时,本文考虑了所有视场点的成像质量,建立了评价离轴反射光学系统初始结构成像性能的函数,成像性能函数由所有视场点的初级像差系数的绝对值组成：

$$\begin{cases} Q = \iint_{c \ a}^{d \ b} Q(\mathbf{H}) dH_x dH_y, \\ a \leq H_x \leq b, c \leq H_y \leq d, \\ Q(\mathbf{H}) = \omega_1 |C_1| + \omega_2 \|C_2\|_1 + \\ \omega_3 \|C_3\|_1 + \omega_4 |C_4| + \omega_5 \|C_5\|_1 \end{cases}, \quad (13)$$

式中： $Q$ 为所有视场的像差系数绝对值之和； $Q(\cdot)$ 为某一个视场的像差系数绝对值之和； $H_x$ 、 $H_y$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 方向归一化视场； $a$ 和 $b$ 分别为 $X$ 方向视场角最小值和最大值； $c$ 和 $d$ 分别为 $Y$ 方向视场

角最小值和最大值； $\omega_i$ 为不同项的权重； $i$ 为对应的像差项， $i=1,2,\dots,5$ ； $\|\cdot\|_1$ 表示1-范数。

为了提高计算效率,可以采用一种离散形式来近似代表(13)式,即

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Q(\mathbf{H}_m), \quad (14)$$

式中： $N$ 为总的采样视场数； $\mathbf{H}_m$ 为第 $m$ 个抽样的归一化视场。

利用近轴光线追迹数据可以计算出光学系统的一阶数据。光学系统焦距 $f'$ 和后截距 $d_k$ 分别为

$$f' = -h_0/u'_k, \quad (15)$$

$$d_k = -h_k/u'_k, \quad (16)$$

式中： $h_0$ 为边缘光线在 $s_0$ 上的入射高度； $u'_k$ 为边缘光线在 $s_k$ 上的出射孔径角； $h_k$ 为边缘光线在 $s_k$ 上的入射高度。

最后一个表面到出瞳的距离 $L$ 为

$$L = -\bar{h}_k/\bar{u}'_k, \quad (17)$$

式中： $\bar{h}_k$ 为主光线在 $s_k$ 上的入射高度； $\bar{u}'_k$ 为主光线在 $s_k$ 上的出射孔径角。

为了有效抑制杂散光,探测的冷光阑位置需要与光学系统实出瞳位置相匹配,根据(15)~(17)式可得冷光阑匹配需要满足的条件为

$$s = d_k - L. \quad (18)$$

光学系统初始结构设计是光学设计的关键,本文建立了评价光学系统初始结构性能的误差函数,误差函数由所有采样视场的像差系数、焦距约束条件和冷光阑匹配条件组成,也可以根据系统需要添加其他的约束条件。误差函数可表示为

$$G = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Q(\mathbf{H}_m) + \omega_6 |f' + h_0/u'_k| + \omega_7 |d_k - L - s|, \quad (19)$$

式中： $\omega_6$ 为第6项的权重； $\omega_7$ 为第7项的权重。

误差函数越小表示初始结构越好,目前主流的光学设计软件通常采用阻尼最小二乘法作为优化算法,该算法是一种局部优化算法,容易陷于局部最优解,因此选择一个好的初始结构是光学设计非常重要的一步。遗传算法是一种全局优化算法,可以获得全局最优解。本文通过遗传算法优化误差函数求取离轴反射光学系统的初始结构,再通过光学设计软件对初始结构进一步优化。初始结构设计的具体流程如下：

1) 建立误差函数。通过光学系统的像差系数和需要满足的约束条件建立评价系统初始结构性能的误差函数。

2) 编码和产生初始种群。编码是遗传算法的基础,采用二进制编码对结构参数进行编码,并在结构参数范围内随机产生初始种群。

3) 计算误差函数值。计算不同个体的误差函数值,误差函数值的大小反映初始结构性能的优劣,误差函数值越小的个体被选择的概率越大。

4) 选择、交叉和变异。选择、交叉和变异是遗传算法的三个操作符,通过这三个操作符可以产生新一代种群。

5) 解码和输出结构参数。重复步骤 3)~4)直到满足迭代终止条件,输出最佳个体,对最佳个体进行解码,输出系统初始结构参数。

### 3 设计实例

针对制冷型长波红外面阵探测器,基于所提出的制冷离轴反射光学系统设计方法,设计了一个无遮拦离轴三反光学系统,验证了所提方法的有效性。光学系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System specifications

Parameter	Specification
Wavelength range / $\mu\text{m}$	8-12
Focal length /mm	300
F-number	2.5
Field ofview /[( $^{\circ}$ ) $\times$ ( $^{\circ}$ )]	3 $\times$ 5
Pixel size / $\mu\text{m}$	30

采用光瞳离轴和视场离轴结合的方式实现无遮拦设计,光学系统的视场角范围分别为 X 方向  $-2.5^{\circ}\sim 2.5^{\circ}$  和 Y 方向  $3.5^{\circ}\sim 6.5^{\circ}$ 。由于该系统是一个平面对称光学系统,所以一半视场范围内所有视场点的成像质量可以代表所有视场点的成像质量,在一半视场范围内均匀采集了 36 个视场点,建立了评价光学系统性能的误差函数,表达式为

$$G = G(B, \mathbf{P}_1, \mathbf{H}_m, r_j, d_j, k_j) = \frac{1}{36} \sum_{m=1}^{36} Q(\mathbf{H}_m) + 3 |f' + h_0/u'_3| + 3 |d_3 - L - s|, \quad (20)$$

式中: $u'_3$ 为边缘光线在  $s_3$  上的出射孔径角; $d_3$ 为  $s_3$  到像面的距离。

为了控制主镜的口径和抑制杂散光,光学系统采用二次成像的结构形式,中间像面在次镜和三镜中间,光学系统入瞳位置在主镜位置。为了得到一个合理的光学系统布局,增加的约束条件为

$$\begin{cases} h_2 > 0 \\ h_3 < 0 \\ d_3 \leq -0.85d_2 \end{cases} \quad (21)$$

利用遗传算法在约束条件下求解误差函数的最小值。遗传算法可以在结构参数范围内搜索误差函数的最优解,结构参数范围和优化结果如表 2 所示。结构参数范围主要是根据光学系统的光焦度分配、系统体积要求及加工难易程度等因素来确定的,可以按照实际需要确定结构参数的合理范围。为了避免初始结构发生光线遮拦,可以通过改变离轴量的大小,并根据光线是否发生遮拦,确定离轴量的范围。

表 2 结构参数范围和求解结果

Table 2 Ranges of configuration parameters and results of optimization

Parameter	Range	Result
$d_0/\text{mm}$	[0, 0]	0
$d_1/\text{mm}$	[-250, -100]	-184.7766
$d_2/\text{mm}$	[100, 350]	276.8154
$r_1/\text{mm}$	[-600, -100]	-414.4935
$r_2/\text{mm}$	[-600, -100]	-135.6293
$r_3/\text{mm}$	[-600, -100]	-239.2461
$k_1$	[-5, 5]	-0.6976
$k_2$	[-5, 5]	-3.7775
$k_3$	[-5, 5]	-0.1131

制冷型离轴反射光学系统初始结构如图 3 所示,光学系统是个二次成像光学系统,光线无遮拦;光学系统初始结构的点列图均方根(RMS)直径如图 4 所示,在工作视场范围内点列图均方根直径比较均匀。

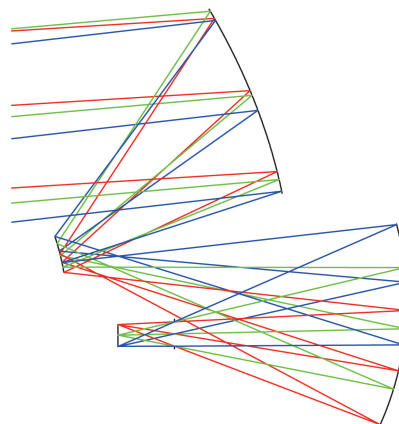


图 3 制冷型离轴三反光学系统初始结构  
Fig. 3 Initial configuration of cooled off-axis three-mirror optical system

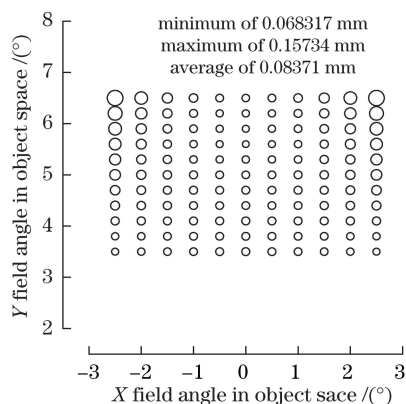


图 4 初始结构点列图均方根直径

Fig. 4 RMS diameters of spot diagram of initial configuration

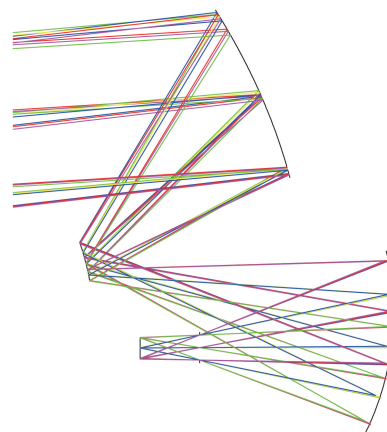


图 5 优化后的制冷型离轴三反光学系统

Fig. 5 Cooled off-axis three-mirror optical system after optimization

为了提高初始结构的成像质量,通过光学设计软件对初始结构进一步优化,优化时不使用反射镜的倾斜和偏心。自由曲面是一种非对称光学表面,具有更多的优化自由度,而且可以校正非对称像差。利用自由曲面校正光学系统剩余像差时,为了保证光学系统关于YOZ面对称,采用 $xy$ 多项式自由曲面,仅使用含有 $x$ 的偶次方多项式进行优化。优化后的光学系统光路布局如图5所示,光学系统满足冷光阑匹配条件,系统可以有效地抑制杂散光;优化后光学系统的点列图均方根直径如图6所示,最大均方根直径小于探测器像元尺寸 $30\ \mu\text{m}$ ,满足使用要求;优化后光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图7所示,调制传递函数接近衍射极限,表明光学系统具有良好的成像质量。

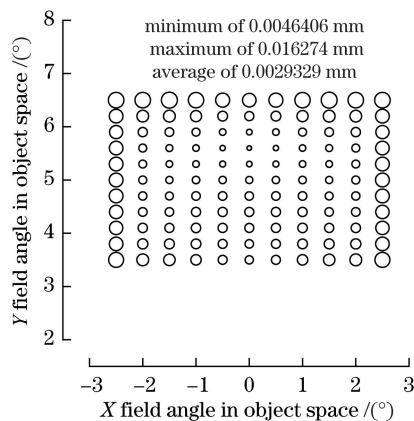


图 6 光学系统点列图均方根直径

Fig. 6 RMS diameters of spot diagram of designed optical system

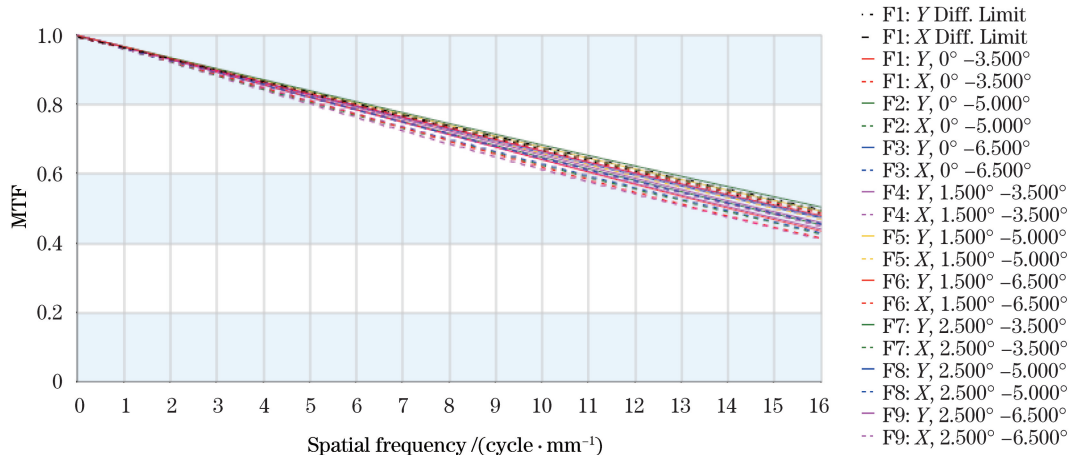


图 7 光学系统调制传递函数

Fig. 7 MTFs of designed optical system

## 4 结 论

针对制冷型离轴反射光学系统冷光阑匹配较难

的问题,本文提出了一种制冷型离轴反射光学系统设计方法。该方法可直接获得满足冷光阑匹配的离轴反射光学系统初始结构,初始结构在整个工作视

场范围内成像质量较好。基于该方法设计了一个制冷型自由曲面离轴反射光学系统,通过使用自由曲面提高系统性能。光学系统的成像视场大, $F$ 数较小,可以满足使用要求。矢量像差理论可以描述非旋转对称光学系统的像差场分布特性,可以利用矢量像差理论求解其他类型非旋转对称光学系统的初始结构。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang T C, Liao Z B. Design of  $6\times$  cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122004.  
张庭成, 廖志波. 6倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1122004.
- [2] Liu J, Liu W Q, Kang Y S, *et al.* Optical design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1022002.  
刘军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1022002.
- [3] Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, *et al.* Optical design of space detailed survey camera in the middle or high orbit[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0116001.  
王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 中高轨道空间详查相机光学设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0116001.
- [4] Cook L G. Method and apparatus for receiving optical signals: US4834517[P/OL]. 1987-01-13[2019-04-15]. <https://patents.google.com/patent/US4834517A/en>.
- [5] Cook L G. Compact four-mirror anastigmat telescope: US6767103[P/OL]. 2002-05-22[2019-04-15]. <https://patents.google.com/patent/US6767103B2/en>.
- [6] Jiang X W, Jia X Z, Cong S S. Application of freeform surfaces in cooled off-axis three-mirror optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0918004.  
姜晰文, 贾学志, 丛杉珊. 自由曲面在制冷型离轴三反光学系统的应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0918004.
- [7] Yu Q H, Xiao X S, Chen F S, *et al.* Design method for triple conjugate optical system with good stray light control performance[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(1): 8-14.  
于清华, 肖锡晟, 陈凡胜, 等. 三重共轭消杂散光学系统的设计方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(1): 8-14.
- [8] Pang Z H, Fan X W, Ren G R, *et al.* Study of aberration characteristic of off-axis reflective system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0618002.  
庞志海, 樊学武, 任国瑞, 等. 离轴反射光学系统像差特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0618002.
- [9] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, *et al.* Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 134201.  
操超, 廖志远, 白瑜, 等. 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 134201.
- [10] Shi S X, Ma L, Wang X E. *Physical optics and applied optics*[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 403-408.  
石顺祥, 马琳, 王学恩. *物理光学与应用光学*[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 403-408.
- [11] Thompson K P. *Aberration fields in tilted and decentered optical systems*[D]. Tucson: University of Arizona, 1980: 54-56.