

# 制冷型大面阵自由曲面离轴三反光学系统设计 (特邀)

钱 壮<sup>1</sup>, 莫 言<sup>2</sup>, 樊润东<sup>1</sup>, 谈 昊<sup>2</sup>, 冀慧茹<sup>2</sup>, 马冬林<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院 & 武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 物理学院, 湖北 武汉 430074;

3. 深圳华中科技大学研究院, 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 针对超大面阵红外遥感探测的需求, 设计了一个基于自由曲面的超大矩形视场制冷型离三反光学系统。系统采用一个偶次非球面反射镜和两个自由曲面反射镜组成二次成像的结构, 具有实出瞳并与冷光阑匹配, 能够实现 100% 的冷光阑效率。与其他离轴三反系统相比, 该系统最大特点在于其适配了 4 k 分辨率的大面阵红外探测器, 具有视场大、无遮拦、成像质量好等技术特点。系统焦距为 150 mm, 工作波段为 1.5~5  $\mu\text{m}$ , 工作  $F$  数为 5, 视场为  $30^\circ \times 25^\circ$ 。结构上, 主镜采用偶次非球面, 次镜和三镜采用  $XY$  多项式自由曲面, 以校正大视场下的各种像差, 系统在各个视场下调制传递函数在 25 lp/mm 处均大于 0.4, 满足大面阵红外探测器的成像质量要求。

**关键词:** 光学设计; 红外光学系统; 离轴三反; 自由曲面

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230339

## 0 引 言

遥感技术的快速发展对于光学系统的设计提出了更高的要求, 目前在空间探索、天文观测、对地遥感以及军事等领域, 大视场的红外成像探测系统需求与日俱增。相较于透射式成像光学系统, 反射式光学系统因具有无色差、工作波段宽、抗热性良好、结构简单等特点在该领域得到了广泛应用。但传统的反射式成像光学系统存在视场小、有中心遮拦等缺点, 并不能满足目前大视场遥感探测系统的要求。

针对传统的共轴反射系统存在的局限性, 离轴反射系统被提出并受到大量研究者的关注。而随着目前加工技术的进步与光学系统设计算法的逐步发展, 越来越多基于自由曲面的离轴反射系统被提出并实现。这些基于自由曲面的离轴反射式成像光学系统克服了中心遮拦的缺点, 并且由于自由曲面能够提供的自由度更高, 系统能以更加紧凑的结构实现相同或更大的成像视场, 具备更加优异的成像性能, 以适应更加复杂的环境。

对于离轴自由曲面成像系统中经典的离轴三反系统, 大量学者进行了深入的研究<sup>[1-4]</sup>。这些系统通常是非制冷型光学系统, 因而具备实出瞳的系统并不多。1992 年, 在 Lacy G. Cook 发表的一个专利中<sup>[5]</sup>, 一种二次成像的制冷型离轴三反系统被提出, 其兼顾了大视场和实出瞳的要求, 但其具体的核心参数并未详细给出。而其他适用于制冷型光学系统的离轴三反系统设计<sup>[6-8]</sup>, 多数采用小  $F$  数, 单方向视场大小不超过  $10^\circ$ 。文中基于目前已有的自由曲面离轴系统设计方法, 提出了一个超大面阵视场制冷型红外离轴三反光学系统设计, 其系统焦距为 150 mm, 工作波段 1.5~5  $\mu\text{m}$ ,  $F$  数 5, 视场大小  $30^\circ \times 25^\circ$ 。为了实现这种超大面阵视场, 系统采用了偶次非球面为主镜, 两个  $XY$  多项式自由曲面作为次镜和三镜来校正像差, 实现了 100% 的冷光阑效率。

## 1 设计方法

### 1.1 目前离轴自由曲面成像光学系统设计理论

针对离轴和自由曲面成像光学系统的设计与分

收稿日期: 2023-06-07; 修订日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12274156)

作者简介: 钱壮, 男, 博士生, 主要从事自由曲面光学设计方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 马冬林, 男, 副教授, 博士, 主要从事自由曲面光学、天文光学方面的研究。

析,国内外大量学者从不同角度进行了大量的研究工作。从偏微分方程的角度出发, Wassermann G D 和 Wolf E 在 1949 年从阿贝正弦条件出发,设计了两个相邻的非球面系统,系统在轴上实现理想成像,同时在轴上视场相邻的小视场范围内实现理想成像<sup>[9]</sup>。受到该方法的启发, Volatier J 和 Druart G 等人从费马原理出发,构建偏微分方程实现无遮拦离轴双反系统的设计<sup>[10]</sup>。Miñano J C 等人采用多曲面同步设计方法(SMS 方法)设计了四个共轴非球面,可以控制四个视场的子午光线<sup>[11]</sup>。Nie Y 等人借鉴 SMS 设计方法的思路,考虑多视场的自由曲面逐点设计方法,实现了离轴自由曲面成像系统初始结构的生成<sup>[12]</sup>。Yang T 等人提出了逐点构建与迭代的方法进行离轴自由曲面成像光学系统的设计<sup>[13]</sup>。Zhong Y 等人基于矢量像差理论,运用高斯括号法,提出了从旋转对称系统到非旋转对称系统的设计方法<sup>[14]</sup>。Qu Z 等人结合传统赛德尔像差理论和矢量像差理论提出了离轴反射光学系统的自动化初始结构生成算法<sup>[15]</sup>。

结合目前已有的设计结构以及设计方法,文中从赛德尔像差理论出发,构建一个具有实出瞳的共轴三反设计结构。随后结合矢量像差理论,对系统的视场进行离轴,同时进行光瞳的偏心以达到消除遮拦的效果,以此构建一个具有较大 Y 视场的离轴三反系统。最后进行面型转换,将次镜与三镜转化为 XY 多项式面型,以扩大 X 方向视场,完成最终设计。

### 1.2 基于赛德尔像差理论的共轴系统设计

对于具有中间二次成像的离轴三反系统,根据光焦度分配情况可以分为以下两类:凹-凸-凹型和凸-凹-凹型,后者具有更大的校正像差能力,文中的设计将采用这种构型作为初始结构的选型。

初始的共轴三反系统如图 1 所示,该结构的光阑位于主镜之后,经过中间二次成像,在像面前具有实出瞳。对系统的主光线和边缘光线进行近轴光线追迹,并根据近轴光线追迹数据可以计算系统的赛德尔像差:

$$S_I = -\sum A^2 \cdot y \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right) \quad (1)$$

$$S_{II} = -\sum \bar{A} \bar{A} \cdot y \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right) \quad (2)$$

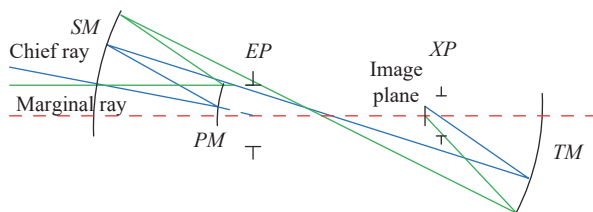


图 1 共轴三反系统的初始结构及其主光线与边缘光线追迹图

Fig.1 Ray tracing of the chief ray and marginal ray for the coaxial TMA initial structure

$$S_{III} = -\sum \bar{A}^2 \cdot y \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right) \quad (3)$$

$$S_{IV} = -\sum H^2 \cdot c \cdot \Delta \left( \frac{1}{n} \right) \quad (4)$$

$$S_V = -\sum \left\{ \frac{\bar{A}^3}{A} \cdot y \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right) + \frac{\bar{A}}{A} \cdot H^2 \cdot c \cdot \Delta \left( \frac{1}{n} \right) \right\} \quad (5)$$

式中:  $S_I$ 到 $S_V$ 分别为赛德尔像差中的球差、彗差、像散、场曲和畸变;  $y$ 表示边缘光线的高度;  $u$ 表示边缘光线与光轴的夹角;  $n$ 表示折射率(对于该三反系统,其满足 $n_1 = n_2' = n_3 = 1, n_1' = n_2 = n_3' = -1$ );  $c$ 表示光学表面的曲率;  $\bar{A}$ 和 $A$ 为主光线和边缘光线的折射不变量;  $H$ 为拉格朗日不变量,它们同样可以根据近轴光线追迹数据计算得到:

$$A = n(y c + u) \quad (6)$$

$$\bar{A} = n(\bar{y} c + \bar{u}) \quad (7)$$

$$H = n\bar{u}y - n\bar{u}\bar{y} \quad (8)$$

式中:  $\bar{u}$ 和 $\bar{y}$ 分别为主光线与光轴的夹角和高度。

文中共轴初始结构的搭建将主要对球差、彗差、像散和场曲进行消除,因此在迭代设计过程中需要对各个像差分配权重。系统的波像差系数与赛德尔像差的关系满足:

$$W_{040} = \frac{1}{8} S_I \quad (9)$$

$$W_{131} = \frac{1}{2} S_{II} \quad (10)$$

$$W_{222} = \frac{1}{2} S_{III} \quad (11)$$

$$W_{220} = \frac{1}{4} (S_{IV} + S_{III}) \quad (12)$$

$$W_{311} = \frac{1}{2} S_V \quad (13)$$

式中： $W_{040}$ 、 $W_{131}$ 、 $W_{222}$ 、 $W_{220}$ 和 $W_{311}$ 分别表示球差、彗差、像散、场曲和畸变的波像差系数。将其分配权重后整合一个像质评价函数：

$$F = \mu_1 W_{040} + \mu_2 W_{131} + \mu_3 W_{222} + \mu_4 W_{220} + \mu_5 W_{311} \quad (14)$$

式中： $\mu_1 \sim \mu_5$ 为权重系数。对于 $W_{IJK}$ ，初始权重根据：

$$\mu = \frac{(FOV/\sqrt{2})^I (ENPD/2)^J}{\sum \mu} \quad (15)$$

忽略畸变项的情况下，得到： $\mu_1 = 0.20$ ， $\mu_2 = 0.24$ ， $\mu_3 = 0.28$ ， $\mu_4 = 0.28$ ，利用模拟退火算法在全局进行搜索，随后根据结果对权重进行微调 and 局部优化，得到共轴三反结构作为离轴系统的初始结构。

### 1.3 基于矢量像差理论的离轴系统设计

矢量像差理论是由传统的波像差理论推导而得，对于旋转对称系统，其主要波像差的表达式为：

$$W = W_{040}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + W_{131}(\vec{H} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + W_{222}(\vec{H} \cdot \vec{\rho})^2 + W_{220}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + W_{311}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{H} \cdot \vec{\rho}) \quad (16)$$

式中： $\vec{H}$ 为归一化视场矢量； $\vec{\rho}$ 为归一化光瞳矢量。为了消除系统遮拦，对于同轴三反进行视场偏心，因此将视场表示为：

$$\vec{H}_{Aj} = \vec{H} - \vec{\sigma}_j \quad (17)$$

式中： $\vec{H}_{Aj}$ 为像差视场中心偏移后的归一化视场，如图 2 所示<sup>[16]</sup>。

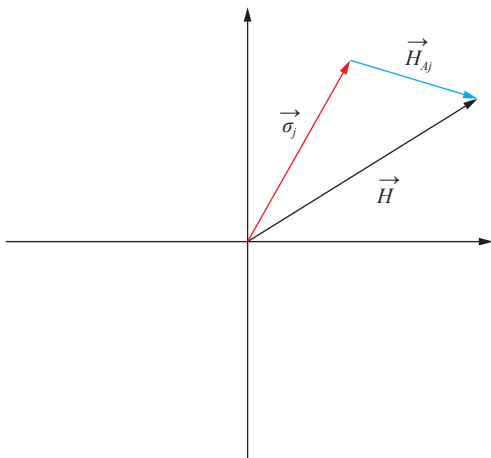


图 2 有效视场矢量示意图

Fig.2 Schematic diagram of effective field vector

因此，将有效像差视场矢量 $\vec{H}_{Aj}$ 直接代入波像差表达式，可以得到离轴系统的波像差表达式：

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j (\vec{H}_{Aj} \cdot \vec{H}_{Aj})^p \times (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^n (\vec{H}_{Aj} \cdot \vec{\rho})^m = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j)]^p (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^n [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^m \quad (18)$$

引入视场偏移后，传统的三阶像差产生了一些新的性质，以彗差为例，其形式变为：

$$W = \sum_j W_{131j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) = \left\{ \left[ \sum_j W_{131j} \vec{H} \right] - \left[ \sum_j W_{131j} \vec{\sigma}_j \right] \right\} \cdot \vec{\rho} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (19)$$

显然，对于彗差，其与视场的关系不变，唯一的改变是该视场和像方视场中心产生了偏移。考虑到视场偏移对各主要像差的影响，系统采用偶次非球面改变视场偏移中心。由于各光学表面贡献的像差会进行矢量叠加，如图 3 所示，因此，可以通过优化使不同光学表面对像差的贡献相互消除。随后，通过逐步移动出瞳中心位置进一步消除遮拦与像差，得到具有 Y 方向上大线视场的系统。该系统在 Y 方向视场大小为 25°，全视场彗差如图 4 所示。

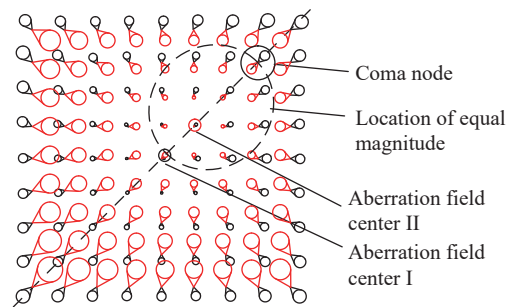


图 3 两个光学表面对彗差的矢量贡献，每个表面具有不同像差视场中心，产生了一个彗差节点<sup>[17]</sup>

Fig.3 Orientation of the two optical surface aberration contributions for coma, showing the individual aberration field centers and the coma node location<sup>[17]</sup>

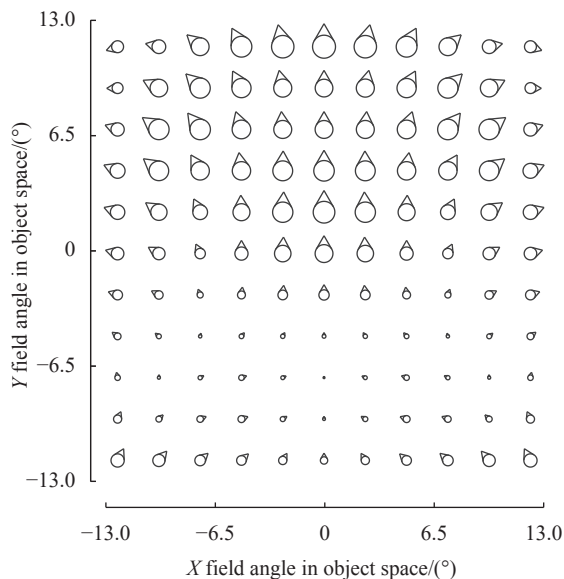


图 4 基于矢量像差设计的离轴三反系统全视场彗差图

Fig.4 Coma distribution of all field of view for TMA designed based on NAT

### 1.4 基于 XY 多项式自由曲面离轴三反系统设计

为了对更大的 X 方向视场实现清晰的成像,需要将次镜与三镜转化为 XY 多项式以在有限的空间内进一步消除像差。第 1.2 节中的设计三面反射镜均采用最高为八阶的偶次非球面,其矢高可以表示为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^4 A_{2i}r^{2i} \quad (20)$$

式中:  $c$  为曲率;  $k$  为圆锥系数;  $r$  为径向光线坐标;  $A_{2i}$  为各阶非球面系数。对于 XY 多项式曲面,其矢高表达式为:

$$z = \sum_{s=0}^S \sum_{t=0}^T f_{s,t} x^s y^t \quad (21)$$

式中:  $f_{s,t}$  为多项式系数。从偶次非球面到 XY 多项式的面型转换采取最小二乘法,而考虑到面型矢高与法矢量均会对光线产生影响,在拟合过程中需要同时考虑表面矢高与法矢量并进行一定的权重分配。光线与一个光学表面的交点到与下一个光学表面的交点坐标满足关系:

$$[x_{i+1} \ y_{i+1} \ z_{i+1}]^T = [x_i \ y_i \ z_i]^T + \vec{e}' d \quad (22)$$

式中:  $x_i$ 、 $y_i$  和  $z_i$  分别为光线与该光学表面交点坐标;  $x_{i+1}$ 、 $y_{i+1}$  和  $z_{i+1}$  分别为光线与下一光学表面交点坐标;  $\vec{e}'$  为出射光线的方向矢量;  $d$  为光线传播距离。计算光线在下一表面的交点坐标与面型转换前坐标的差

值,确定各个点的矢高与法矢量权重。在该过程中,为了提升计算效率,计算坐标差值时可以采用一阶近似。

在面型转换完成后,由于矢量像差对于 XY 多项式曲面不具有很好的描述方法,因此直接采用实际光线追迹结果评估像质。对于 X 方向视场的扩展,采取逐阶局部优化即可得到最后结果。

## 2 光学系统参数与像质评价

### 2.1 设计参数

下面给出了文中制冷型离轴三反系统的系统参数和探测器参数,如表 1 所示。

表 1 光学系统参数与探测器参数

Tab.1 Parameters of the optical system and detector

Nature	Parameter
F-number	5
FOV(2X×2Y)	30×25
Focal length/mm	150
MTF	>0.4@ 25 lp/mm
Distortion	<5%
Pixel size/μm	20
Detector format	4000×3400
Detector type	Cooled
Wavelength/μm	1.5-5
Volume/mm <sup>3</sup>	<1300×400×400

对于该系统,采取第 1 节中的设计方法进行设计并在光学设计软件 Zemax 中进行分析,图 5 给出了系统的结构图。

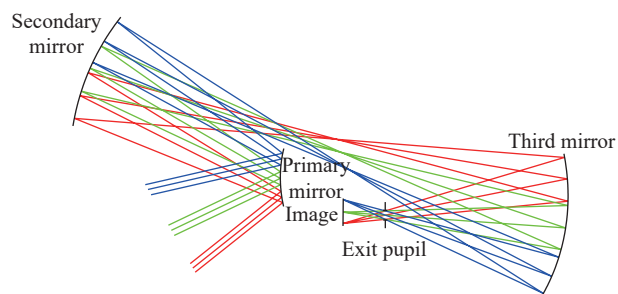


图 5 光学系统结构图

Fig.5 Optical system layout

图中,主镜为凸型偶次非球面,次镜和三镜为关于 Y 轴对称的凹型 XY 多项式曲面。系统的结构参数与偶次非球面的系数如表 2 所示,次镜和三镜的多项式系数如表 3 所示。

表 2 光学系统的结构与镜面参数

Tab.2 Structure parameters of the optical system and surface parameters of mirrors

Surface	Vertex coordinates/mm			Radius/mm	Conic	A4	A6	A8	A10
	X	Y	Z						
PM	0.0	0.0	0.0	360.0	6.7	-6.7E-09	-1.0E-013	-4.7E-018	-6.8E-22
SM	0.0	-3.8	-498.9	621.5	-	-	-	-	-
TM	0.0	-5.2	683.1	-494.2	-	-	-	-	-
Stop	0.0	-79.2	250.0	-	-	-	-	-	-
Image	0.0	-79.2	150.0	-	-	-	-	-	-

表 3 多项式镜面的面型系数

Tab.3 Coefficients of polynomial surface

Surface	X <sup>2</sup> Y <sup>0</sup>	XY <sup>2</sup>	X <sup>2</sup> Y <sup>1</sup>	X <sup>0</sup> Y <sup>3</sup>	X <sup>4</sup> Y <sup>0</sup>	X <sup>2</sup> Y <sup>2</sup>	X <sup>0</sup> Y <sup>4</sup>	X <sup>4</sup> Y <sup>1</sup>	X <sup>2</sup> Y <sup>3</sup>
SM	-3.3E-5	-2.6E-05	-1.1E-07	-5.0E-08	-3.2E-11	4.1E-10	3.3E-10	3.4E-13	-3.2E-12
TM	8.6E-5	9.7E-05	8.7E-08	8.4E-08	2.7E-10	4.9E-10	2.3E-10	1.3E-13	2.6E-13

Surface	X <sup>0</sup> Y <sup>5</sup>	X <sup>6</sup> Y <sup>0</sup>	X <sup>4</sup> Y <sup>2</sup>	X <sup>2</sup> Y <sup>4</sup>	X <sup>0</sup> Y <sup>6</sup>	X <sup>6</sup> Y <sup>1</sup>	X <sup>4</sup> Y <sup>3</sup>	X <sup>2</sup> Y <sup>5</sup>	X <sup>0</sup> Y <sup>7</sup>
SM	-2.2E-12	-3.4E-16	1.0E-15	9.4E-15	4.9E-15	-2.3E-18	-5.7E-18	-1.1E-17	-4.4E-18
TM	5.0E-14	6.4E-16	1.7E-15	2.1E-15	4.6E-16	6.1E-19	2.1E-18	3.7E-18	1.1E-18

2.2 像质评价

探测器像元尺寸为 20 μm, 根据奈奎斯特准则, 需要在 25 lp/mm 保持清晰。为了给公差预留一定的余量, 在设计中要求全视场 MTF 在 25 lp/mm 处大于 0.4, 系统的 MTF 曲线如图 6 所示。

由图可知, 系统在全视场满足设计要求, 适配探测器参数。

图 7 给出了系统的点列图, 各个视场的 RMS 半径分别为: 15.705、12.581、10.248、7.863、10.863、11.208、8.443、8.017、8.953、10.162、11.816、7.708、8.973、10.551、14.633 μm, 艾里斑大小为 29.15 μm。由图可知, 各视场弥散斑基本位于艾里斑半径范围内, 具有良好的成像质量。

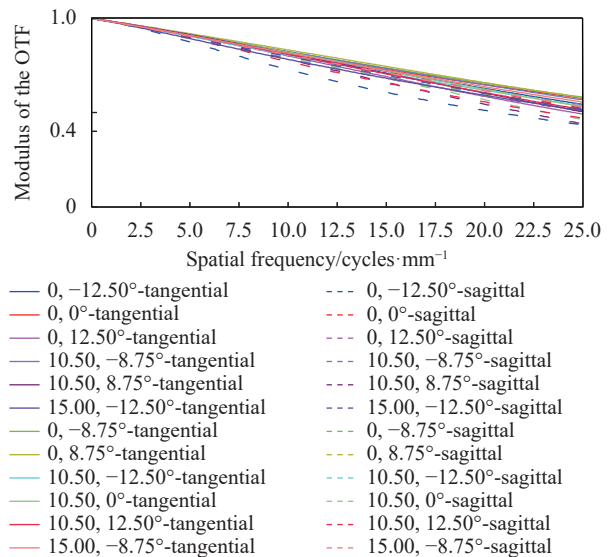
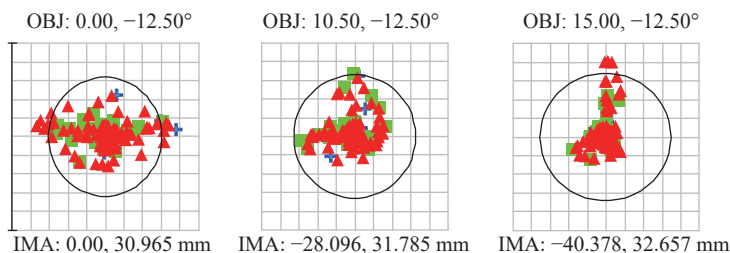


图 6 光学系统 MTF 曲线

Fig.6 MTF curve of the optical system





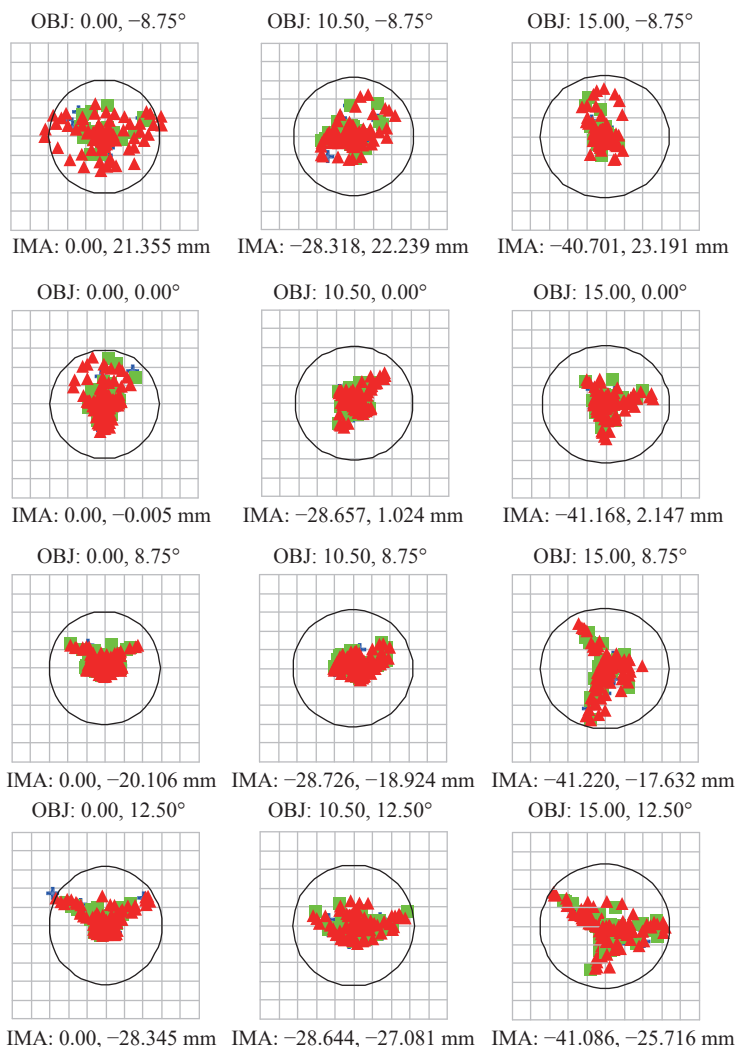


图 7 点列图

Fig.7 Spot diagram

系统在其边缘视场 (15°, 12.5°) 产生最大畸变, 畸变大小为-4.88%, 对于大面阵视场系统满足要求, 可以通过算法进行补偿。系统的网格畸变如图 8 所示。

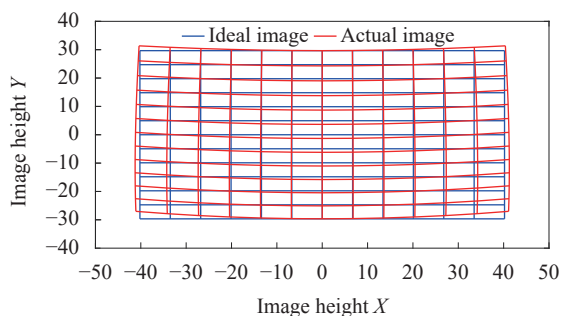


图 8 网格畸变图

Fig.8 Grid distortion

### 3 公差分析

对于该系统, 首先根据装调经验, 针对其间隔、偏心和倾斜生成一组公差限, 将三镜到最后出瞳的距离作为补偿器, 进行蒙特卡洛统计, 分析不同参数的灵敏度。对于较高灵敏度的参数进行公差收紧, 而对于灵敏度不高的参数进行适当放松, 根据其 MTF 曲线下下降情况最后给定合理的公差范围。

对于面型误差, 结合具体的加工方法, 通过对表面矢高施加不同频率的扰动来进行分析。结合前面生成的间隔、偏心和倾斜的公差范围进行整体分析并不断调整, 最后得到表 4 的结果。

对于表 4 给出的公差范围, 经过 500 次蒙特卡洛分析, 将 25 lp/mm 处 MTF 的平均值作为评价指标, 得

表 4 系统各公差范围

Tab.4 Value range of tolerances

Surface	Surface irregularity ( $\lambda=635\text{ nm}$ )	Spacing/ mm	Decenter/ mm	Tilt/ ( $^\circ$ )
PM	RMS $\lambda/20$	$\pm 0.03$	$\pm 0.03$	$\pm 0.02$
SM	RMS $\lambda/40$	$\pm 0.03$	$\pm 0.03$	$\pm 0.02$
TM	RMS $\lambda/40$	-	$\pm 0.03$	$\pm 0.02$

到图 9 所示的结果。从结果上看,系统具有良好的可加工性,可以满足所要求。

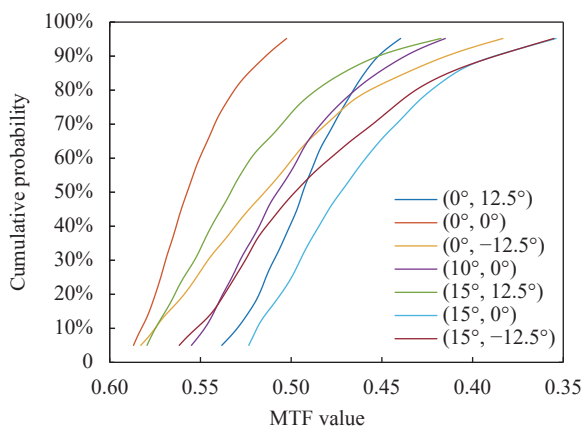


图 9 系统在 25 lp/mm 下的 MTF 蒙特卡洛分析结果

Fig.9 Monte Carlo analysis result of the system MTF at 25 lp/mm

## 4 结 论

文中针对超大面阵红外遥感探测的需求,从传统赛德尔像差理论出发,结合矢量像差理论,提出了一种超大矩形视场制冷型离轴三反设计。系统具有  $30^\circ \times 25^\circ$  的视场,  $F$  数 5, 满足  $4000 \times 3400 @ 20\ \mu\text{m}$  探测器的像质要求。其中,系统主镜采用偶次非球面,次镜和三镜采用  $XY$  多项式曲面,无中心遮拦,结构紧凑,具有实出瞳,匹配制冷红外探测器,达到 100% 的冷光阑效率。系统在中红外  $1.5\sim 5\ \mu\text{m}$  波段具有良好的成像质量,能运用于远距离成像及航天遥感等领域,实现对目标的制冷成像。

随着加工与制造技术的进步,自由曲面已被应用于各种不同的系统中,以满足目前对于大视场、高分辨率、紧凑结构成像光学系统的要求。文中的离轴三反系统设计在超大矩形视场条件下具备良好的像质,解决了多项传统成像光学系统难以克服的缺点。随着自由曲面成像光学系统设计方法的发展,未来将出

现更多优秀的自由曲面离轴反射系统设计,自由曲面成像光学系统也会在越来越多的领域被广泛应用。

## 参考文献:

- [1] Yang T, Zhu J, Jin G. Starting configuration design method of freeform imaging and afocal systems with a real exit pupil [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 345-353.
- [2] Cook L G. Fast folded wide angle large reflective unobscured system: US, US5331470[P]. 1994-07-19.
- [3] Ji H, Zhu Z, Tan H, et al. Design of a high-throughput telescope based on scanning an off-axis three-mirror anastigmat system [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2817-2823.
- [4] Zhu J, Hou W, Zhang X, et al. Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(1): 15605-15608.
- [5] Cook L G. Wide field of view focal three-mirror anastigmat: US, 5170284(A)[P]. 1992-12-08.
- [6] Zhu D, Zhang Y, Hu Z, et al. Cooled infrared off-axis freeform three-mirror system design with convenience in testing and assembly [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(36): 10794-10800.
- [7] Wang Helong, Chen Jianfa, Huang Haoyang, et al. Development of off-axis three-mirror system based on free-form surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220523. (in Chinese)
- [8] Jiang Xiwen, Ja Xuezhi, Cong Shanshan. Application of freeform surfaces in cooled off-axis three-mirror optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0918004. (in Chinese)
- [9] Wassermann G D, Wolf E. On the theory of aplanatic aspheric systems [J]. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1949, 62(1): 2.
- [10] Volatier J B, Druart G. Differential method for freeform optics applied to two-mirror off-axis telescope design [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1174-1177.
- [11] Miñano J C, Benítez P, Lin W, et al. An application of the SMS method for imaging designs [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24036-24044.
- [12] Nie Y, Thienpont H, Duerr F. Multi-fields direct design approach in 3D: calculating a two-surface freeform lens with an entrance pupil for line imaging systems [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 34042-34054.
- [13] Yang T, Zhu J, Hou W, et al. Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction

- process [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9193.
- [14] Zhong Y, Gross H. Initial system design method for non-rotationally symmetric systems based on Gaussian brackets and Nodal aberration theory [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10016-10030.
- [15] Qu Z, Zhong X, Zhang K, et al. Automatic initial configuration in off-axis reflective optical system design using combined nodal and Seidel aberration [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(13): 3630-3640.
- [16] Thompson K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [17] Schmid T. Misalignment induced nodal aberration fields and their use in the alignment of astronomical telescopes[D]. Orlando: University of Central Florida, 2010.

## Design of cooled freeform off-axis three-mirror system with large rectangular field (*invited*)

Qian Zhuang<sup>1</sup>, Mo Yan<sup>2</sup>, Fan Rundong<sup>1</sup>, Tan Hao<sup>2</sup>, Ji Huiru<sup>2</sup>, Ma Donglin<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. School of Optical and Electronic Information & Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
3. Shenzhen Huazhong University of Science and Technology, Shenzhen 518057, China)

### Abstract:

**Objective** A cooled off-axis three-mirror system with a large rectangular field of view based on freeform surface is designed to satisfy the requirement of infrared remote sensing using a large plane array detector. The off-axis three-mirror system is composed of one even aspherical surface and two freeform surfaces, achieving secondary imaging with a real exit pupil that matches the cold shield, resulting in 100% cold shield efficiency. The system has larger rectangular field and decent imaging quality compared to other off-axis three-mirror systems, which ensures the adaption to large-format infrared detectors with a 4 k resolution. The system has a focal length of 150 mm, working waveband of 1.5-5  $\mu\text{m}$ ,  $F$ -number of 5, and field of view of  $30^\circ \times 25^\circ$ . The primary mirror is even-order aspherical surface, and the secondary and third mirror are  $XY$  polynomial surfaces. High-order aberrations are properly corrected with the adoption of freeform surfaces, so the modulation transfer function of the system at 25 lp/mm exceeds 0.4 across all fields of view, meeting the imaging quality requirements of large-format infrared detectors.

**Methods** An off-axis three-mirror systems with large rectangular field of view is presented in this paper. The initial structure is a coaxial three-mirror system with its optical power distribution being convex-concave-concave (Fig.1). The curvatures of three mirrors are calculated by eliminating primary aberrations based on Seidel aberration theory. The off-axis three-mirror system is derived from the coaxial structure by shifting the field center. According to Nodal aberration theory, even aspherical surfaces are adopted to shift aberration contributions of surfaces to new field centers so they can compensate for each other (Fig.3). The off-axis three-mirror system with large field of view in tangential direction is further optimized with pupil shifting (Tab.1). The secondary and third mirror are then converted to  $XY$  polynomial surface to expand field of view in horizontal direction while the image quality is not degenerating.

**Results and Discussions** The optimized off-axis three-mirror system is presented (Fig.5) with primary mirror being even aspherical surface, the secondary and third mirror being  $XY$  polynomial free-form surfaces. The system



meets the requirements of the detector and the design specifications (Tab.2) and the efficiency of cold diaphragm is 100%. The modulation transfer function of the system at 25 lp/mm exceeds 0.4 across all fields of view (Fig.6). RMS radius of spot diagram for all fields of view are less than Airy disk radius (Fig.7), indicating a good imaging quality. The maximum distortion of the system is  $-4.88\%$ , which is acceptable and can be corrected by specific image processing algorithm. A tolerance analysis is conducted on the system, proving a good instrumentation feasibility (Fig.9).

**Conclusions** A cooled off-axis three-mirror system with a large rectangular field of view is presented in this paper. The field of view of the system is  $30^\circ \times 25^\circ$ , and  $F$ -number is 5, ensuring the adaption to  $4000 \times 3400 @ 20 \mu\text{m}$  infrared detector. Of three mirrors of the system, the primary mirror is even aspherical surface, and the secondary and third mirror are  $XY$  polynomial free-form surfaces. The system is a re-imaging structure with no obscuration and a real exit pupil matching cold shield of the detector, achieving 100% cold shield efficiency. The image quality is good when the system works in  $1.5\text{-}5 \mu\text{m}$  waveband, thus the system has broad application in optical remote imaging and sensing field.

**Key words:** optical design; infrared optical system; off-axis three-mirror; freeform surface

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (12274156)