

自由曲面在制冷型离轴三反光学系统的应用

姜晰文, 贾学志, 丛杉珊

(长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 133000)

摘要: 研究了制冷型红外离轴三反光学系统成像原理和优化设计方法。给出了一个应用自由曲面的制冷型离轴三反射镜光学系统的设计。系统采用两个自由曲面反射镜和一个偶次非球面反射镜组成二次成像的结构形式, 将制冷型红外探测器的冷光阑作为系统的孔径光阑, 得到 100% 的冷光阑效率。第二和第三反射镜将孔径光阑成像在第一反射镜的位置, 显著减小第一反射镜的口径。通过调整每个反射镜的偏心与倾斜, 实现系统的无遮拦, 使用自由曲面增大视场、校正像差、保证系统的成像质量。该系统的工作波段为 3~5 μm , 焦距为 450 mm, F 数为 2, 视场为 $3.662^\circ \times 2.931^\circ$, 各视场的调制传递函数在环境温度为 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 的范围内均高于 0.5, 实现系统的无热化, 并且结构紧凑。

关键词: 光学设计; 红外光学系统; 成像系统; 离轴三反射镜; 自由曲面

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0918004

Application of freeform surfaces in cooled off-axis three-mirror optical system

Jiang Xiwen, Jia Xuezhi, Cong Shanshan

(Changchun Satellite Technology CO., LTD, Changchun 133000, China)

Abstract: The principle and optical design method of cooled off-axis reflective optical systems were analyzed. An optical system design of a cooled off-axis three-mirror optical systems based on freeform surfaces was presented. This cooled off-axis three-mirror optical system was composed of two freeform surfaces and one even aspherical surface, which was a re-imaging structure with cold stop as the optical stop that could ensure 100% cold shield efficiency in the optical system. The optical stop could be imaged at the position of the first mirror by the second mirror and third mirror, which could reduce the size of the first mirror obviously. With the three mirrors optimized after optimization design including tilted and decentered methods, the system unobscured could be achieved and the freeform surfaces could be used to enlarge the field of view, correct image aberrations and improve the total image quality of the system. This system is with 450 mm focal length, 3–5 μm working waveband, 2 F -number, $3.662^\circ \times 2.931^\circ$ field-of-view. In addition, the modulation transfer function (MTF) of the system is above 0.5 all over the field of view with the working temperature range from -40°C to 60°C . The result shows that the system has compact structure and athermalization achievement.

Key words: optical design; infrared optical system; imaging system; off-axis three-mirror; freeform surfaces

收稿日期: 2018-04-20; 修订日期: 2018-05-22

基金项目: 国家高分辨率项目

作者简介: 姜晰文(1991-), 男, 硕士, 主要从事光学设计和光学系统设计方面的研究。Email: 13604331605@163.com

0 引言

与折射式光学系统相比,反射式光学系统具有无色差、无二级光谱、使用波段范围宽、易做到大孔径、抗热性能好、结构简单、宜轻量化等优点,得到了广泛应用。相比较传统的同轴反射式光学系统,离轴反射光学系统通过对反射镜元件进行偏心和倾斜,能够避免中心遮拦的问题^[1-2]。在采用简单面型的传统离轴三反射光学系统中,由于受到可设计变量自由度少的限制,系统在较大视场的设计要求下很难实现良好的成像质量。自由曲面光学元件的应用极大地增加了离轴三反系统中的优化变量,实现了大视场和高成像质量的共存。随着现代加工技术的发展,自由曲面技术已经越来越成熟。自由曲面具有非旋转对称特性,将其应用于离轴成像光学系统中已经成为离轴反射光学系统优化设计的一种趋势。

制冷型光学系统能够提高系统的灵敏度,降低信噪比。具有中间像面的光学系统由于具有实出瞳,将冷光阑设置在实出瞳位置可以提高冷光阑制冷效率。具有中间像面结构的制冷型离轴反射光学系统具有分辨率高、重量轻、体积小等优点,广泛应用于遥感、红外多波段探测等领域中。特殊的工作环境条件会对光学系统的性能有较大的影响,此外,视场等设计要求的提高^[3-7]都会大大增加光学系统的设计难度。因此,制冷型离轴反射光学系统是现代光学系统的一个研究热点。

国内外已有离轴三反光学系统的设计方法的报道,离轴三反射镜式结构普遍应用于非制冷型光学系统中,而在制冷型光学系统中并不常见。1981 年 Lacy G. Cook 在发表的专利中提出了一种具有中间像面的制冷型离轴三反射镜红外光学系统的结构,能在一定程度上减小系统的整体大小^[8-9]。但并没有查阅到关于此类系统光学设计的核心技术的报道。文中以离轴三反射镜光学系统设计方法为基础,分析了三反系统的基本结构参数。然后,为了满足光学系统的设计要求,引入了非球面设计,并在高次非球面的基础上引入 Zernike Fringe Sag 面来增大视场。给出了一个自由曲面应用于中波红外的制冷型系统的设计实例,并进行了冷反射、无热化等分析。

1 制冷型二次成像离轴三反光学系统的设计原理

离轴三反光学系统是将共轴三反光学系统中光学元件进行倾斜、偏心等离轴操作后得到的。将冷光阑作为光学系统的孔径光阑进行优化设计能够满足制冷型离轴三反光学系统冷光阑效率达到百分之百,即不存在冷反射现象。为了实现系统的小型化设计,使第一片反射镜口径不要过大,需要将光阑成像在第一片反射镜位置处^[10-12]。共轴三反光学系统的成像原理如图 1 所示。

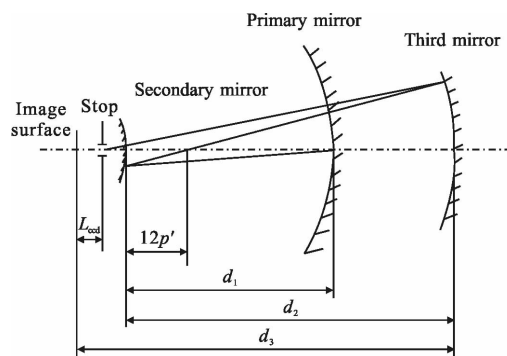


图 1 共轴系统初始结构成像原理

Fig.1 Imaging principle of initial structure of coaxial system

根据几何光学中反射系统的成像原理^[13],可知

$$\frac{1}{L_{2p'}-d_2} + \frac{1}{d_3+L_{ccd}} = \frac{2}{r_3} \quad (1)$$

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{L_{2p'}} = \frac{2}{r_2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{L_{2p'}-d_2} + \frac{1}{d_3+L_{ccd}} = \frac{2}{r_3} \quad (3)$$

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{L_{2p'}} = \frac{2}{r_2} \quad (4)$$

式中: d_1 为第一反射镜与第二反射镜顶点间隔; d_2 为第二反射镜与第三反射镜顶点间隔; d_3 为系统的工作距离; L_{ccd} 为冷光阑到像面的距离; $L_{2p'}$ 为光阑通过第三反射镜所成像到第二反射镜顶点的距离; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为三个反射镜的曲率半径。由共轴三反射镜成像关系可知:

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = S_{IV} \quad (5)$$

$$\frac{r_1 r_2 - 2r_2 d_1}{2r_1 - 4d_1 - 2r_2} - d_2 = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\frac{2(r_1r_3-2r_3d_1-r_2r_3)+1}{2r_1r_2} = \frac{d_3}{f} \quad (7)$$

由于系统为二次成像型，轮廓参数满足第二镜对第一镜的遮栏比 $\alpha_1 > 0$ ，第三镜对第二镜的遮栏比 $\alpha_2 < 0$ ，第二镜的垂轴放大率 $\beta_1 < 0$ ，第三镜的垂轴放大率 $\beta_2 > 0$ ，系统总焦距 f 为正值。如图 1 所示，虚线代表中间像面，位于第二镜与第三镜之间。

联立以上方程组，其中一般要求场曲 $S_{IV}=0$ ，系统工作距 d_3 确定，焦距 f 值与 L_{cd} 值已知，为了使计算简单，给定 L_{2p}' 值，然后将已知量代入公式中，可以求出三个反射镜的半径 r_1, r_2, r_3 与两个顶点间隔 d_1, d_2 ，代入以下公式中计算得到系统的轮廓参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ ：

$$\alpha_1 = 1 - \frac{2d_1}{r_1} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{2d_2(r_1 - 2d_1 - r_2)}{r_2(r_1 - 2d_1)} \quad (9)$$

$$\beta_1 = \frac{-r_2}{r_2 - r_1 + 2d_1} \quad (10)$$

$$\beta_2 = \frac{r_3}{\beta_1 r_1 - 2\beta_1 d_1 - 2d_2 - r_3} \quad (11)$$

由于一个系统有其固定限制的球差 S_I 、彗差 S_{II} 、像散 S_{III} ，解出轮廓参数后代入到以下公式中求解，得到各反射镜面面形的二次锥面系数。因此，系统的八个结构参数可全部确定。

$$S_I = \frac{1}{4} [(e_1^2 - 1)\beta_1^3 \beta_2^3 - e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 + e_3^3 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 + \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^3] \quad (12)$$

$$S_{II} = -\frac{e_2^2 (\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3}{4\beta_1 \beta_2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3}{4\beta_1 \beta_2} + \frac{(\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{1}{2} \quad (13)$$

$$S_{III} = -e_2^2 \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 - \beta_1)^3}{4\alpha_1 \beta_1^2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} + \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1 \beta_1} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2}$$

$$\beta_1 \beta_2 + \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (14)$$

当采用一般的球面进行离轴三反光学系统的优化时，能够优化的变量很少，系统的成像质量无法达到设计要求。因此，应该考虑加入偶次非球面进行优化设计^[14-16]。偶次非球面的表达式为：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16} \quad (15)$$

式中： z 为曲面的矢高； k 为二次曲面系数； c 为定点处的曲率半径； r 为径向半径； α 为各径向坐标项系数。优化过程中发现选取 r^{10} 项以下的参数作为变量即可满足系统的设计指标，而且随着设为变量的非球面次数的提高，优化的时间大大增加，故不选取 r^{10} 以上的参数作为变量。

高次非球面的引入虽然能够提高系统的成像质量，但并不能满足系统的视场的设计要求。考虑在高次非球面的基础上引入 Zernike Fringe Sag 面来增大视场，该面形是偶次非球面加上由 Zernike Fringe 系数表示组成的非球面多项式，其表达式如下：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \phi) \quad (16)$$

式中： A_i 为第 i 个 Fringe Zernike 多项式的系数； r 为径向光线坐标； ρ 为归一化的径向坐标； ϕ 为以角度表示的坐标。为了实现初级像差的校正，选取 Zernike Fringe 多项式的前九项进行优化设计。为保证整个系统及各反射镜关于 YZ 平面对称，需要将直角坐标系下 Zernike 多项式中所有含 x 奇次方项 Z_i 的系数固定为 0，因此只有 Z_4, Z_5, Z_6 的系数可以作为变量校正像差。

然后对制冷型红外光学系统的冷反射进行研究。制冷型光学系统的探测器通常在 77 K 的温度环境下工作，而光学系统和目标仍然处于常温之中，这一强烈的温差会使得探测器像面除接收目标辐射能量之外，还接收到了像面自身发出的冷辐射经过系统中光学元件反射后又回到像面的辐射能量。系统产生冷反射的通常形式为探测器像面处生成一块叠加而成的黑斑，影响成像质量。环境温度的变化会使系统中的光学元件、机械元件的形状、间隔、折射率等参数发生改变，从而影响光学系统的性能。因此，对光学系统进行无热化设计是十分重要的。对于反

射式光学系统，当光学系统中的关键零件均采用同一种材料进行设计时，光学元件和机械元件都具有相同的膨胀和收缩。文中的光学系统中三片反射镜及镜筒均采用相同的铝材料，再进行系统无热化设计的结果分析。

2 光学系统设计实例

下面给出了一个基于自由曲面的制冷型三反光学系统的设计。该光学系统的主要设计要求如表 1 所示。

表 1 设计要求

Tab.1 Design requirement

Nature	Parameter
Wave range/ μm	3-5
Focal length/mm	450
$F\#$	2
Total system length/mm	$L < 500$
$2X \times 2Y / (^\circ)$	3.662×2.931
MTF at 17 lp/mm of all fields and temperature	MTF > 0.5
Environment temperature/ $^\circ\text{C}$	-40-60

此外，根据系统实际要求进行制冷型探测器的选择，选取的制冷型探测器的像元数为 960×768 ，像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ ，探测器尺寸为 $28.80 \text{ mm} \times 23.04 \text{ mm}$ ，该探测器可由拼接技术制成。然后进行制冷型二次成像离轴三反射镜光学系统的具体设计、像差分析和冷反射分析。

根据之前的计算结果，将共轴三反系统初始结构的数据输入到光学设计软件 Zemax 中。然后对三个反射镜元件进行偏心和倾斜操作。为了满足整个光学系统相对子午面对称的目的，三个反射镜和光阑的偏心和倾斜操作只在 YZ 平面内进行。最后对偏

心倾斜后的三反光学系统进行优化设计，得到离轴三反光学系统的结构如图 2 所示。

图 2 中，三反光学系统的孔径光阑与冷光阑位置重合，当孔径光阑的位置确定且系统焦距 f 、 F 数已知时，光阑的口径也能够确定。图 3 为光学系统结构图。第一反射镜和第三反射镜均为 Zernike Fringe Sag 面，第二反射镜为偶次非球面，孔径光阑位于像面之前，与冷光阑位置重合，整个光学系统结构紧凑、无遮拦。

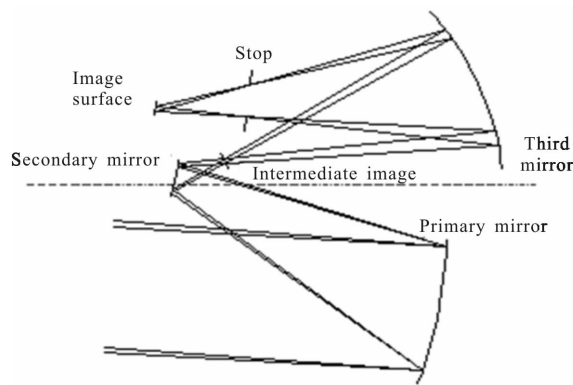
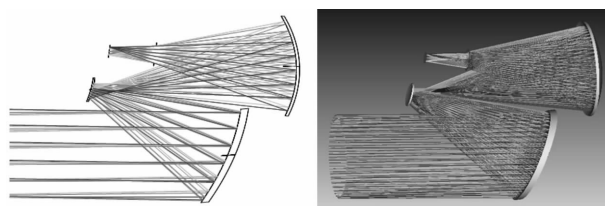


图 2 离轴系统初始结构图

Fig.2 Initial structure of off-axis system



(a) YZ 平面内的二维平面图 (b) 三维结构图

(a) Two-dimensional graph of YZ plane (b) Three-dimensional graph

图 3 光学系统结构图

Fig.3 Structure diagram of the optical system

系统在全局坐标系下的结构参数列于表 2 中，

表 2 光学系统的结构参数

Tab.2 Structure parameters of the optical system

Surface	Radius/mm	Surface type	Vertex coordinates			Angle of rotation around X axis/ $^\circ$
			X	Y	Z	
Standard surface	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0
Primary mirror	-621.225	Zernike Fringe Sag	0.0	218.500	451.281	-10.470
Secondary mirror	-204.490	Even asphere	0.0	191.832	167.178	-7.717
Third mirror	-365.961	Zernike Fringe Sag	0.0	165.201	560.106	-0.889
Stop	-	-	0.0	224.733	283.378	1.779
Image	-	-	0.0	233.503	193.806	1.779

各反射镜及 Zernike Fringe Sag 面参数的偶次非球面参数及 Zernike Fringe Sag 面参数分别列于表 3 中，系统总长 473 mm。

因为系统关于 YZ 平面对称,故只取关于子午面

表 3 反射镜镜面参数

Tab.3 Surface parameters of mirrors

Surface	Conic	4th	6th	8th	10th	Z ₄	Z ₅	Z ₆
Primary mirror	-0.688	-4.365E-012	-7.595E-017	6.700E-022	-1.892E-027	-2.359E-005	-3.104E-004	2.566E-005
Secondary mirror	-4.162	-5.680E-011	-6.776E-015	1.383E-018	3.431E-022	-	-	-
Third mirror	-0.102	-1.851E-011	-2.206E-016	5.547E-021	-5.132E-025	-5.144E-005	4.061E-005	-1.994E-005

对称的半个视场就可以评价整体的成像质量。评价系统成像质量的视场点为:(0°,0°)、(0°, +1.465°)、(0°, -1.465°)、(1.282°, 0°)、(1.282°, +1.025°)、(1.282°, -1.025°)、(1.831°, 0°)、(1.831°, +1.465°)、(1.831°, -1.465°)。由于光学系统的工作温度范围为-40~60℃,对不同温度条件下光学系统的调制传递函数曲线进行分析。

在 20℃时,光学系统的调制传递函数曲线如图 4 所示,系统全视场范围内在 17 lp/mm 处的 MTF 均高于 0.5。

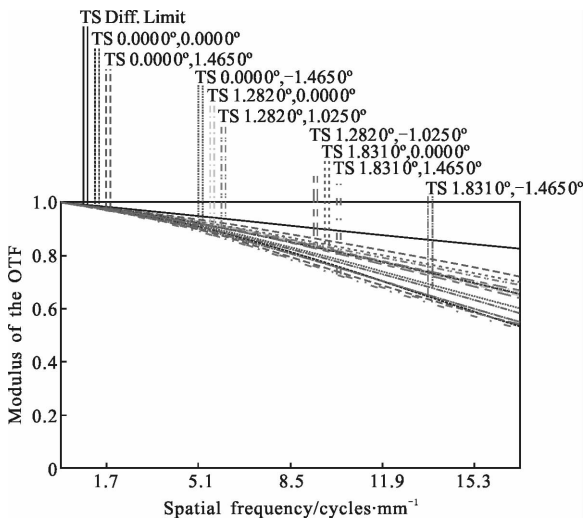


图 4 20℃时 MTF 曲线
Fig.4 MTF curve at 20℃

在-40℃、60℃时光学系统的调制传递函数曲线分别如图 5、图 6 所示,由图可知在-40~60℃的温度范围内,光学系统的 MTF 曲线变化很小,各视场 MTF 在 17 lp/mm 处均高于 0.5,说明此光学系统对温度变化不敏感,热稳定性好,即实现了无热化设计。

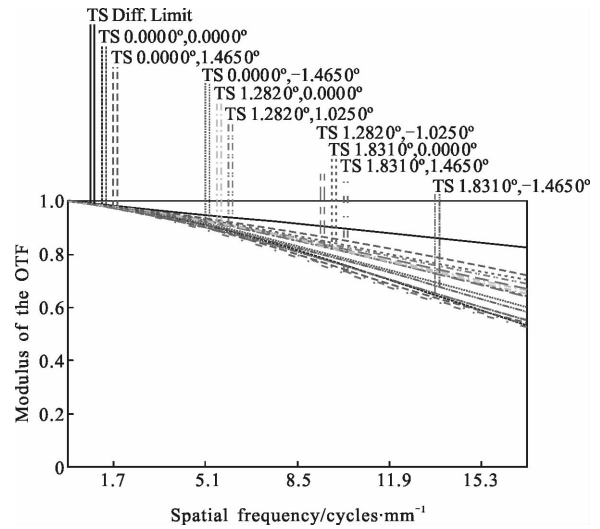


图 5 -40℃时 MTF 曲线
Fig.5 MTF curve at -40℃

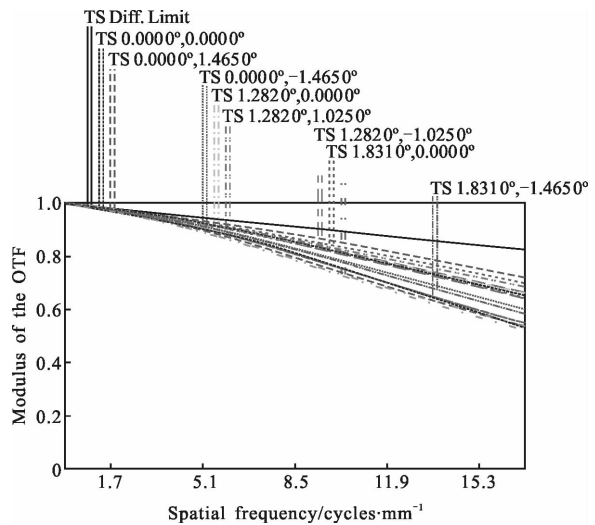
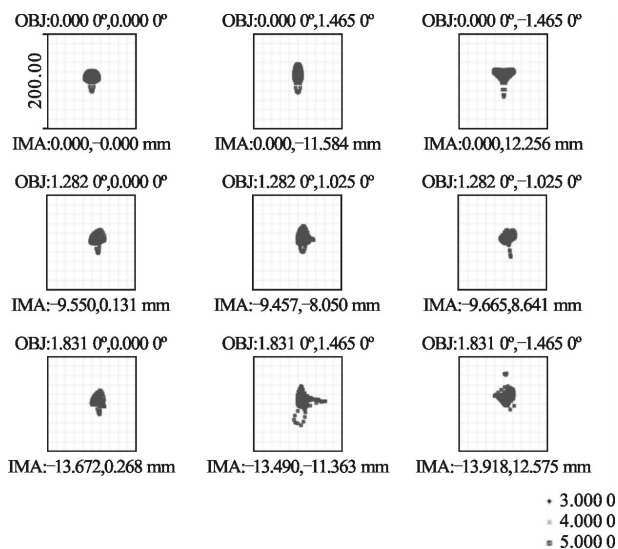


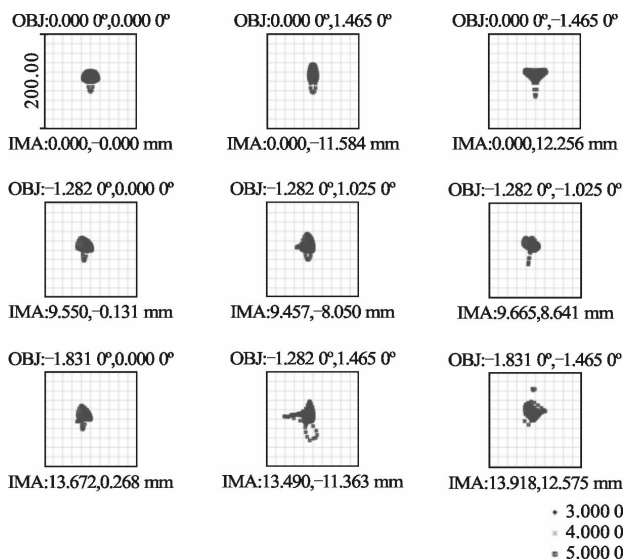
图 6 60℃时 MTF 曲线
Fig.6 MTF curve at 60℃

系统的点列图如图 7(a)所示,各视场的 RMS 半径分别为 14.955、17.663、18.842、16.429、19.973、16.269、17.595、25.408、21.545 μm , 艾里斑半径为 7.32 μm 。子午面对称半视场点列图如图 7(b)所示,结果证实该系统关于子午面对称。



(a) 半视场

(a) Half field of view



(b) 子午面对称半视场

(b) Symmetric half field of view in meridian surface

图 7 点列图

Fig.7 Spot diagram

系统的最大畸变出现在边缘视场(1.831°, -1.465°)处,值为 3.704%,其网格畸变如图 8 所示。在后续工作中,需要通过图像处理的方法对像面畸变进行逐点校正。

关于制冷型红外系统的冷反射问题的分析,采

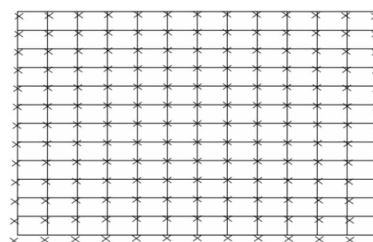


图 8 网格畸变

Fig.8 Mesh distortion

用逆光路追迹观察弥散斑大小的方法。即将光学系统进行倒置,将像面作为物面,像面发出的光线经过光学系统的反射后会在之前的物面成像成弥散斑,弥散斑的大小可以直接反映红外系统冷反射现象的严重程度。将设计好的光学系统利用逆光路追迹法进行光学系统的冷反射分析,得到逆光路追迹示意图如图 9 所示。图中系统的像面作为新的物面,其发出的冷辐射经过三镜反射到次镜,再到主镜,最后离开系统,并没有返回像面位置,即红外探测器没有接收到冷辐射。最后,对逆光路进行追迹,其点列图如图 10 所示,可以看出该制冷型离轴三反光学系统

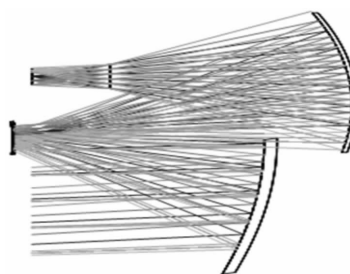


图 9 逆光路追迹示意图

Fig.9 Schematic diagram of reverse-light tracing

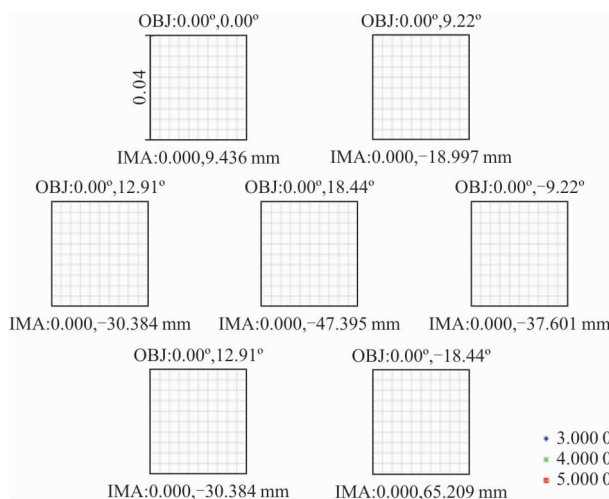


图 10 逆光路追迹点列图

Fig.10 Spot diagram of reverse-light tracing

并没有产生冷反射。

3 结论

文中研究了制冷型离轴三反光学系统的优化设计方法,利用光学设计软件 Zemax 实现了对具有中间像面的制冷型离轴三反射镜红外光学系统的设计。系统采用三面反射镜组成二次成像的结构形式,将红外探测器的冷光阑作为系统的孔径光阑,得到了 100% 的冷光阑效率,第一面、第三面反射镜均为凹形的自由曲面,第二面反射镜为凸形的高次非球面。系统结构紧凑,无中心遮拦,拥有较大的矩形视场。视场为 $3.662^\circ \times 2.931^\circ$,工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 焦距为 450 mm, F 数为 2。环境温度为 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 时,各视场的调制传递函数在奈奎斯特频率处(17 lp/mm)高于 0.5,在满足高质量成像的前提下同时实现了系统无热化设计。文中设计的制冷型离轴反射系统可用于远距离成像及航天航空遥感领域,完成对目标的制冷成像,在军用和民用方面都有着一定的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhang Xiaolong, Liu Yin, Sun Qiang, et al. Design of hybrid refractive and reflective optical system of long-wave infrared region imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122005. (in Chinese)
- [2] Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122002. (in Chinese)
- [3] Zhu Jun, Hou Wei, Zhang Xiaodong. Design of a low F -number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view [J]. *Journal of Optics*, 2014, 17: 015605-015609.
- [4] Matthias Beier, Johannes Hartung, Thomas Peschel, et al. Development, fabrication, and testing of an anamorphic imaging snap-together freeform telescope [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3530-3542.
- [5] Meng Qingyu, Wang Wei, Ji Zhenhua, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 578-582. (in Chinese)
- [6] Juraneck H J, Sand R, Schweizer J, et al. Off axis telescopes-the future generation of earth observation telescopes [C]// SPIE, 1998, 3439: 104-115.
- [7] Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao, et al. Research of broad width off-axis three mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0722002. (in Chinese)
- [8] Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Application of ZEMAX software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)
- [9] Ding Xuezhan, Wang Xin, Lan Weihua, et al. Design of four mirror reflective anastigmat optical system [J]. *Infrared of Laser Engineering*, 2008, 37(2): 319-321. (in Chinese)
- [10] Cook L G. Three mirror anastigmatic telescope: US, 4265510 [P]. 1981.
- [11] Cook L G. Compact four-mirror anastigmat telescope: US, 6767103[P]. 2004-06-27.
- [12] Zhao Wencai. Design of improved off -axial TMA optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2837-2843. (in Chinese)
- [13] Fan Xuewu, Ma Weihong, Chen Rongli, et al. Research of three-mirror system with double imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 1001-1003. (in Chinese)
- [14] Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lv Baobin, et al. Design of new style unobscured three-mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1144-1147. (in Chinese)
- [15] Yoder P R. Opto-Mechanical System Design [M]. 3rd ed, UK: Taylor & Francis Groups, 2006.
- [16] Pan Junhua. Fabrication and Testing of Optical Asphere[M]. Beijing: Science Press, 1994: 19-37. (in Chinese)