文章编号：1672-3392(2024)01-0083-07

机载中波红外离轴两反光学系统设计

吴　超　杨利红　赵晨曦　李敏敏　张静静

（西安工业大学光电工程学院，陕西 西安 710021）

摘要　为了解决现有的光学系统在机载等领域中的局限性，引入自由度比较丰富的光学自由曲面，设计了一个小 *F* 数、大视场、较轻便的机载中波红外离轴两反光学系统。采用反射式的光学系统并通过离轴方式消除光线遮拦，通过 *XY* 多项式表达的自由曲面，运用前 6 阶项有效地平衡了高级像差。最终得到一款焦距为 240 mm，视场角为 3.8°，*F* 数为 3 的中波红外光学系统，在全视场范围内系统的调制传递函数（Modulation Transfer Function，MTF）接近衍射极限，各视场的弥散斑均方根（Root Mean Square，RMS）半径在单个探测器像元尺寸 15 μm 以内，整体物理尺寸小于 130 mm（*X*）×180 mm（*Y*）×240 mm（*Z*）。最终结果表明，该系统在满足成像质量的同时，其结构简单，轻便性较好，可广泛应用于机载对地侦察成像等领域中。

关键词　机载；离轴两反；自由曲面；小 *F* 数；*XY* 多项式

中图分类号　O435　　**文献标识码**　A

1　引　言

机载光学系统在对地侦察成像领域中具有重要的应用，现有的光学系统结构形式包括折射式、折反式、反射式光学系统三种类型[1-4]。折射式光学系统受材料的影响，同一种介质对波长不同的光会产生不同的折射率，导致色差的存在且校正困难，若要得到满足要求的设计结果必然就会增加镜片数量，由此导致系统结构复杂且体积较大。折反式光学系统在折射式光学系统的基础上使用了反射镜，可进一步减小系统的尺寸，但该类型的光学系统存在中心遮拦，因此降低了中低频的传递函数值，不利于图像的均匀输出。相对于折射式和折反式光学系统，反射式光学系统不受材料的限制，无需考虑色差的影响，通过采用反射镜折叠系统光路，有效地降低系统的物理结构尺寸，在更为特殊或复杂的探测环境中具有优势。其中两反光学系统最为经典，从最初的同轴卡塞格林系统，到后来演变成为 R-C 系统，为光学系统的对地侦察探测能力增加了更多的光路结构。

离轴两反光学系统克服了同轴光学系统的中心光线遮拦问题，使得进入光学系统的光能量随之增加，由此提升了光学系统的性能。但与此同时，离轴之后会产生额外的非对称像差，通过引入自由曲面，使得系统的像差平衡能力得到校正，在提高成像质量的同时可以实现光学系统的大视场、小型化以及轻量化等目标。鲜勇[5]等人利用偏轴三反式构型设计了一种机载多波段光学系统，面型为二次曲面和非球面，*F* 数较大。郝思远[6]等人采用折反式结构，通过二次成像的方式设计了一款长波红外光学系统，系统全视场角为 2.34°。李杰[7]等人基于谐衍射与自由曲面

收稿日期　2023-08-10　**收修改稿日期**　2023-09-13
作者简介　吴超（1997—），男，硕士研究生，主要研究方向为光学设计。
导师简介　杨利红（1974—），女，博士，教授，主要研究方向为光电测试、偏振成像及目标识别。
基金项目　国家自然科学基金（62071359、62001364），陕西省教育厅重点科研计划（20JS059），陕西高校青年创新团队（K20220184），西安工业大学校长基金面上培育项目（XGPY200206）资助

设计了一个机载红外双波段光学系统，其焦距为1 200 mm，尺寸较大。现有多数离轴两反光学系统 F 数都大于5，且其视场小于2°，不能同时满足离轴两反光学系统大视场与小 F 数的需求[8]。

为了同时实现小 F 数与大视场的机载光学系统，本文根据现有的机载光学系统的发展情况，采用离轴两反的光学结构形式，通过使用自由度丰富的光学自由曲面，设计了一款机载中波红外离轴两反光学系统，使用反射式的结构减小了系统的结构尺寸，在降低了系统成本的同时增加了光学系统的轻便性。

2 光学系统设计思路分析

2.1 光学系统结构形式选择

折射式光学系统通过不同的透镜组合来校正像差，易实现像差的校正，但该类型的光学系统总长较长；相对于折射式光学系统，折反式光学系统采用了反射镜、可折叠光路，从而进一步减小了系统的尺寸。但这两类光学系统都需要校正色差，在设计红外光学系统时校正色差比较困难，且都采用了透射材料，红外光学材料本身就比较少且成本较高。基于此，在设计时选择反射式光学系统，反射式光学系统设计时无需考虑色差，使用反射镜不需考虑红外光学系统材料的限制，从而可以进行轻量化处理减轻系统重量，且更加有利于降低成本[9-11]，最终能更好地满足其应用需求。

反射式光学系统包括共轴反射式离轴反射式两种类型，传统的共轴反射式光学系统中心存在遮拦，由此导致进入光学系统中的能量较低，且该类型的光学系统视场比较小；离轴反射式光学系统通过对共轴反射式光学系统进行适当的偏心和倾斜，从而避免了中心遮拦，增加了进入光学系统中的光能量。比较普遍的离轴反射式光学系统包括离轴两反和离轴三反光学系统，离轴三反光学系统在离轴两反光学系统的基础上增加了一片反射镜，其光路结构较为复杂[12]，进一步增大了系统的尺寸，且在装调上也更加困难；两反光学系统包含两个反射镜，其光路结构较为简单，系统体积也得到缩小，减小了系统装调的难度，但其优化自由度相对较少，不易实现像差的校正，因此，进一步引入多优化自由度的自由曲面来平衡光学系统的轴外像差[13]，增大系统的视场角。

综上所述，本文选择离轴两反光学系统结构形式，并进一步引入自由曲面，增大视场角的同时实现像差的校正，从而满足其应用需求。

2.2 系统设计指标

根据机载光学系统的应用需求，该离轴两反光学系统的总体指标要求为：飞行高度 H 为2.4 km，探测器像元尺寸 a 为15 μm，地面覆盖范围为0.12 km（W_x）×0.1 km（W_y），地面像元分辨率（GSD）为1.5 m，工作波长为3~5 μm。光学系统的焦距以及视场角等参数可根据下列公式计算：

$$f = \frac{a \times H}{GSD} \tag{1}$$

$$\omega = 2\arctan\left(\frac{W}{2H}\right) \tag{2}$$

$$D \geqslant \frac{1.22\lambda f}{a} \tag{3}$$

$$F = \frac{f}{D} \tag{4}$$

$$\varphi = \frac{1}{2a} \tag{5}$$

其中，f 为光学系统的焦距，2ω 为该光学系统的全视场角，D 为入瞳直径，φ 为系统截止频率，λ 为系统的中心波长，这里取为4 μm，最终光学系统设计指标如表1所示。

表1 机载中波红外离轴两反光学系统设计指标

Table 1 Design index of airborne mid-wave infrared off-axis two-mirror optical system

指标项	参数值
工作波段/μm	3~5
焦距/mm	240
视场/(°)	3°×2.4°
F 数	3
入瞳直径/mm	80
MTF（33lp/mm）	>0.2
畸变/%	<1%

3　光学系统设计

3.1　同轴两反光学系统结构参数计算

所设计的离轴两反光学系统是在同轴两反基础上进行离轴优化之后得到的，因此，首先需要根据设计指标计算得到同轴两反光学系统，其主要参数包括主镜与次镜曲率半径及圆锥系数，主镜与次镜的间隔以及次镜与像面的间隔。同轴两反系统的结构如图 1 所示。

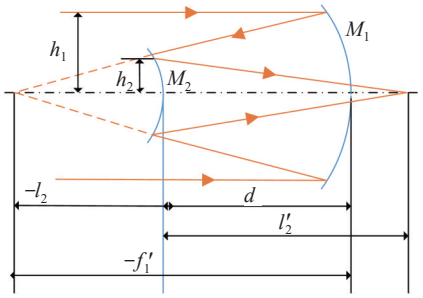

图 1　同轴两反系统结构

Fig. 1　Structure of coaxial two-mirror system

次镜对主镜的遮拦比为

$$\alpha = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1} \tag{6}$$

次镜的垂轴放大率为

$$\beta = \frac{l_2'}{l_2} \tag{7}$$

系统总焦距为

$$f' = \beta f_1' = \beta \frac{r_1}{2} \tag{8}$$

根据三级像差理论，可得同轴两反各像差的表达式为

$$S_{\mathrm{I}} = \left[\frac{\alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{4} - \frac{\alpha(1+\beta)^3 e_2^2}{4}\right] - \frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2) \tag{9}$$

$$S_{\mathrm{II}} = \frac{1-\alpha}{\alpha}\left[\frac{\alpha(1+\beta)^3}{4\beta} e_2^2 - \frac{\alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{4\beta}\right] - \frac{1}{2} \tag{10}$$

$$S_{\mathrm{III}} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)^2\left[\frac{\alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(1+\beta)^3}{4\beta^2} e_2^2\right] - \frac{(1-\alpha)(1+\beta)(\beta-1)}{\alpha\beta} - \frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha} \tag{11}$$

$$S_{\mathrm{IV}} = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha} \tag{12}$$

$$S_{\mathrm{V}} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)^3\left[\frac{\alpha(1+\beta)^3}{4\beta^3} e_2^2 - \frac{\alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{4\beta^3}\right] - \frac{3}{2}\frac{(1-\alpha)^2(1+\beta)(\beta-1)}{(\alpha\beta)^2} - \frac{2(1-\alpha)(1+\beta)}{\alpha^2\beta} \tag{13}$$

S_{I}、S_{II}、S_{III}、S_{IV}、S_{V} 分别为系统的球差、慧差、像散、场曲和畸变。从式(9)~(13)中可以看出 5 种像差共包含 4 个未知数，即 α、β、e_1 和 e_2，理论上通过 α、β、e_1 和 e_2 四个参数的组合可以同时消除四种像差，但在实际的设计过程中，α 和 β 都需要满足一定的条件。因此，这里选取 α 为 0.6，β 为−0.8，令系统的球差和像散的表达式为 0，可以得到 e_1 和 e_2 的值。经过计算得到同轴两反系统的初始结构参数表 2 所示，系统结构图如图 2 所示。

表 2　同轴两反系统结构参数

Table 2　Structural parameters of coaxial two-mirror system

参数	曲率半径	间隔	圆锥系数
主镜/mm	−600	−120	−1
次镜/mm	1 440	144	−9

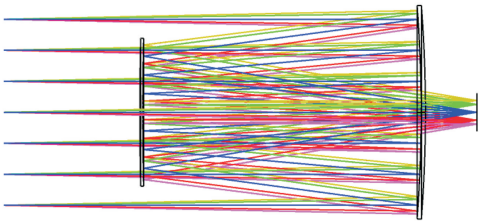

图 2　同轴两反系统结构图

Fig. 2　Structure diagram of coaxial two-mirror system

3.2　系统结构约束

经过计算得到同轴两反光学系统，接下来需要进一步对同轴光学系统进行离轴处理消除光线遮拦，采用倒“4”字型的离轴结构形式，能够有效地减小系统的尺寸，达到小型化的目的。离轴两反系统的结构形式如图 1 所示，从入瞳出发的光线经过主镜反射到达次镜，再经过次镜反射最终成像到像面上。

在设计过程中，为了避免光线被各反射镜及像面遮挡，需要适当地控制光线的走向，使得光线不存在遮拦，各反射镜及像面之间不存在相互

影响，因此需要构建光线边界约束条件。通过自定义函数编写操作数合理地控制各反射镜的偏心量和倾斜量，保证光线不被反射镜及像面遮挡，完成光线边界约束条件的建立，另一方面，同样需要建立物理尺寸约束条件[14]，限制系统尺寸在一定范围内。

如图3所示，$A_1A_2A_3A_4$、$O_1O_2O_3O_4$和$B_1B_2B_3B_4$分别是同一个视场下的上边缘光线、主光线和下边缘光线。A_1、A_2、A_3、A_4分别是上边缘光线与入瞳、主反射镜、次反射镜及像面的交点，同理，O_1、O_2、O_3、O_4分别是主光线与入瞳、主反射镜、次反射镜及像面的交点，B_1、B_2、B_3、B_4分别是下边缘光线与入瞳、主反射镜、次反射镜及像面的交点。

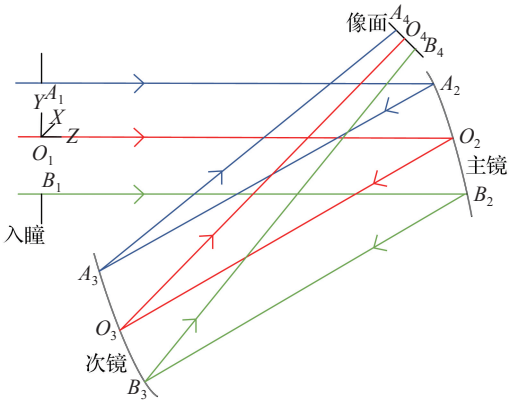

图3 离轴两反光学系统结构图

Fig. 3 Structure Diagram of the off-axis two-mirror optical system

光线边界约束条件以及系统物理尺寸约束条件如下所示：

$$\begin{cases} Y_{B_1} - Y_{A_3} > 10 \\ Z_{B_1} - Z_{A_3} > 10 \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} Y_{B_4} - Y_{A_2} > 10 \\ Z_{A_2} - Z_{B_4} > 10 \\ Z_{A_2} - Z_{B_4} < 30 \end{cases} \tag{15}$$

$$Y_{B_2} - Y_{A_3} > 5 \tag{16}$$

$$\begin{cases} Y_{A_4} - Y_{B_3} < 180 \\ Z_{B_2} - Z_{O_1} < 240 \end{cases} \tag{17}$$

式(14)表示B_1点的Y坐标值大于A_3点的Y坐标值至少10 mm，B_1点的Z坐标值大于A_3点的Z坐标值至少10 mm，从而限制了孔径光阑与次镜的位置关系，保证孔径光阑在次镜的前方且在其上方；式(15)表示B_4点的Y坐标值大于A_2点的Y坐标值至少10 mm，A_2点的Z坐标值大于B_4点的Z坐标10 mm小于30 mm，从而限制了主镜与像面的位置关系，使得像面不遮挡入射光线且在主镜的前方和上方；式(16)表示B_2点的Y坐标值大于A_3点的Y坐标值至少5 mm，由此保证次镜在主镜的下方；式(17)限制了整个系统的物理尺寸，$Y_{A_4} - Y_{B_3} < 180$表示系统在Y方向上的长度小于180 mm，$Z_{B_2} - Z_{O_1} < 240$表示系统在Z方向上的长度小于240 mm，从而保证在满足结构尺寸要求的前提下，整个系统达到成像质量要求。

3.3 系统优化设计原理分析

根据一阶光学原理，获取反射镜的初始曲率半径及厚度，然后将这些参数输入到光学设计软件中获得其初始结构。接下来，自定义编写操作数构建结构约束条件，避免光线遮拦的影响以及限制系统尺寸，然后在后续的优化中，将两个反射镜的面型转换为自由曲面，分别将反射镜的曲率半径、偏心量和倾斜量以及自由曲面表达式的系数等设定为变量进行优化，从而使得最终的光学系统满足其设计指标要求。

在设计过程中，系统一共选取了11个视场，X方向的视场为±1.5°，Y方向的视场为±1.2°。在默认评价函数的基础上，加入EFFL、WFNO操作数控制系统的焦距和F数，加入RAGY、RAGZ、OPLT、OPGT等操作数构建光线边界条件以及系统物理尺寸约束条件，通过依次增加变量的方式逐步进行优化。在每一步加入变量完成优化之后，分析设计的光学系统是否满足设计指标要求，从而判断是否需要增加变量进行下一步的优化。在反复优化后，得到满足设计要求的设计结果。

3.4 光学自由曲面

该机载光学系统含有两片反射镜，优化变量相对较少，常规的球面以及非球面的自由度有限，这在校正离轴系统所带来的离轴像差时比较困难，因此需要增加更多的自由度平衡像差，基

于此，引入光学自由曲面去平衡系统的像差，提升系统成像质量[15,16]。本文中，选择 *XY* 多项式表达的自由曲面来校正离轴所带来的高阶像差，如式(18)所示。通常，*XY* 多项式自由曲面的最高阶限制在 10 阶项以内，阶次过高导致其加工与检测会更加困难，制造成本也会随之增加，不易获得高质量的自由曲面。因此，本文所采用的 *XY* 多项式自由曲面的阶数限定在 6 阶项以内。

$$z(x,y)=\frac{c(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2(x^2+y^2)}}+\sum_{j=2}^{J}a_j x^m y^n \tag{18}$$

$$j=\frac{(m+n)^2+m+3n}{2}+1 \tag{19}$$

上式中，c 为曲率半径；k 为圆锥系数；a_j 为 $x^m y^n$ 的系数；$1\leqslant m+n\leqslant 6$；$J$ 为 $x^m y^n$ 的总项数。

3.5　设计结果分析

光学系统设计结果如图 4 所示。系统焦距为 240 mm，*F* 数为 3，符合设计指标要求。反射镜在 *X* 方向的最大半径约为 62 mm；像面上边缘到次镜下边缘在 *Y* 方向的尺寸约为 180 mm；入瞳中心到主镜下边缘的在 *Z* 方向的尺寸约为 202 mm；系统满足物理结构尺寸要求。

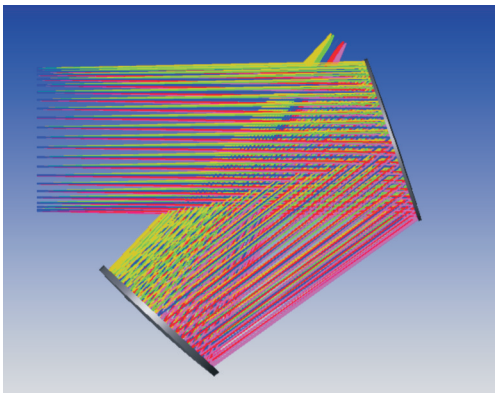

图 4　离轴两反光学系统设计结果

Fig. 4　Off-axis two-mirror optical system design results

主镜只含有绕 *X* 轴逆时针旋转的倾斜量，无偏心量，倾斜量为 17°，次镜既含有倾斜量又有偏心量，绕 *X* 轴逆时针的倾斜量大小为 42°，沿 *Y* 轴负方向的偏心量大小为 24 mm，由此保证整个光学系统无遮拦，且结构紧凑满足物理尺寸要求。主镜与次镜采用 *XY* 多项式自由曲面来校正离轴像差，满足最终的成像质量要求。优化完成后的 *XY* 多项式表达的自由曲面系数如表 3 所示。

表 3　优化后的自由曲面系数

Table 3　Optimized freeform surface coefficient

多项式	主镜系数	次镜系数
y	1.007×10^{-3}	2.200×10^{-2}
x^2	-2.94×10^{-6}	3.086×10^{-5}
y^2	3.596×10^{-6}	-5.623×10^{-6}
x^2y	1.767×10^{-8}	6.523×10^{-7}
y^3	8.748×10^{-9}	6.300×10^{-7}
x^4	-1.072×10^{-9}	3.788×10^{-9}
x^2y^2	-5.222×10^{-9}	9.423×10^{-9}
y^4	-1.001×10^{-9}	-2.694×10^{-9}
x^4y	-5.899×10^{-12}	-7.805×10^{-11}
x^2y^3	-1.201×10^{-11}	1.869×10^{-10}
y^5	-6.402×10^{-12}	-1.209×10^{-10}
x^6	-1.903×10^{-14}	-4.924×10^{-13}
x^4y^2	-2.964×10^{-13}	-1.511×10^{-12}
x^2y^4	1.135×10^{-12}	2.148×10^{-112}
y^6	-2.416×10^{-13}	-7.920×10^{-13}

接下来进一步分析了系统的成像质量，该系统的奈奎斯特频率为 33 lp/mm，所以应该考察系统在 33 lp/mm 时的 MTF 值。如图 5 所示，中心视场的 MTF 在 0.4 以上，边缘视场的 MTF 较低，但也大于 0.3，全视场范围内系统 MTF 值满足设计指标要求，接近衍射极限。RMS 体现了光学系统对光线的汇聚程度的强弱，通过 RMS 半径来衡量光学系统的成像性能，各视场的 RMS 半径如图 6 所示，RMS 半径均小于探测器像元尺寸 15 μm。畸变反应了物像的失真度，如图 7 所示，最大畸变为 0.3%，不超过 1%，满足设计指标要求，保证物像具有很好的相似度。整体而言，该系统满足其设计指标要求。

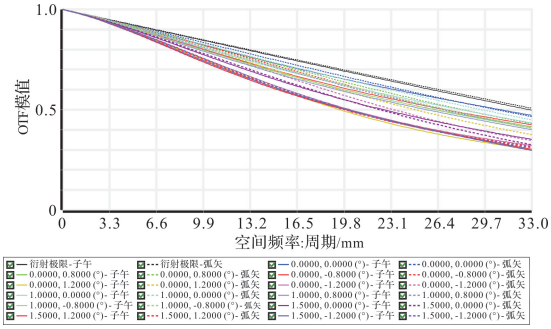

图 5　离轴两反光学系统 MTF 曲线图

Fig. 5　MTF curve of off-axis two-mirror optical system

图 6 离轴两反光学系统的点列图

Fig. 6 Spot diagram of off-axis two-mirror optical system

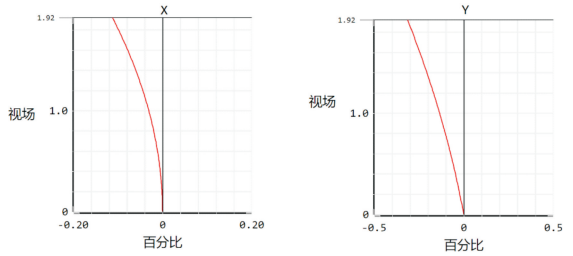

图 7 离轴两反光学系统畸变图

Fig. 7 Distortion diagram of off-axis two-mirror optical system

4 结 论

为了解决现有的大部分机载光学系统小视场和大 F 数的问题，设计了一个机载中波红外离轴两反光学系统，其焦距为 240 mm，F 数为 3，全视场为 3.8°。全视场内系统的 MTF 值接近衍射极限，RMS 半径小于探测器像元尺寸，最大畸变值在 1% 以内，成像质量良好，满足设计指标要求。引入 XY 多项式自由曲面，提升了光学系统的成像质量，采用反射镜折叠光路减小了系统的物理尺寸，提高了系统的轻便性，扩大了机载光学系统的应用范围。

参 考 文 献

[1] XUE Qing-sheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(3): 271-277.

[2] 惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结构分析[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 1117-1120.
HUI Bin, LI Jing-zhen, PEI Yun-tian, *et al*. Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 1117-1120.

[3] 马子轩, 李旭阳, 任志广, 等. 基于自由曲面的大相对孔径大视场光学探测系统[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1722002.
MA Zi-xuan, LI Xu-yang, REN Zhi-guang, *et al*. Optical detection system with large relative aperture and large field of view based on freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1722002.

[4] WANG Chao, SHI Hao-dong, LI Ying-chao, *et al*. Design of super-resolution telescopic imaging optical system with relative large field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1322002.

[5] 鲜勇, 李文强, 赵翔. 一种机载多波段共光路望远光学系统[J]. 电光与控制, 2020, 27(8): 109-112.
XIAN Yong, LI Wen-qiang, ZHAO Xiang. Design of an airhorme telescope optical system with mulispectrum and common aperture[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(8): 109-412.

[6] 郝思远, 谢佳楠, 温茂星, 等. 轻小型长波红外光学系统的设计及实现[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 293-300.
HAO Si-yuan, XIE Jia-nan, WEN Mao-xing, *et al*. Design and implementation of light and small long-wave infrared optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 293-300.

[7] 李杰, 罗越, 李金铖, 等. 基于谐衍射与自由曲面的机载红外双波段成像光学系统设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12): 148-163.
LI Jie, LUO Yue, LI Jin-cheng, *et al*. Design of airborne infrared dual-band imaging optical system based on harmonic diffraction and free-form surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12): 148-163.

［8］ HORTON R F, PECK T, COLGATE A. All reflective 2 mirror unobscured wide field telescope/collimator designs［C］. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010, 7733: 77332U.

［9］ 李荣刚, 张兴德, 孙昌锋, 等. 离轴反射式光学系统的研究进展与技术探讨[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 128-131.
LI Rong-gang, ZHANG Xing-de, SUN Chang-feng, *et al*. Research progress and technical discussion of off-axis reflective optical system[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(2): 128-131.

［10］ 霍宏伟, 金奇, 刘洋, 等. 离轴反射式光学系统的设计与装调分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 363-366.
HUO Hong-wei, JIN Qi, LIU Yang, *et al*. Design and assembly analysis of off-axis reflective optical system[J]. Laser and Infrared, 2017, 47(3): 363-366.

［11］ 孙永雪, 夏振涛, 韩海波, 等. 大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析[J]. 应用光学, 2018, 39(6):803-808.
SUN Yong-xue, XIA Zhen-tao, HAN Hai-bo, *et al*. Design and tolerance analysis of large-aperture infrared off-axis three-mirror optical system[J]. Applied Optics, 2018, 39(6): 803-808.

［12］ 沈志娟. 大视场离轴三反光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2020, 35(2): 24-27.
SHEN Zhi-juan. Design of off-axis three-mirror optical system with large field of view［J］. Application of Optoelectronic Technology, 2020, 35(2): 24-27.

［13］ 郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 546-550.
GUO Yong-xiang, LI Yong-qiang, LIAO Zhi-bo, *et al*. Design of novel off-axis three-reflection optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 546-550.

［14］ 周欣茹, 宋华堂, 朱润徽, 等. 结构紧凑型大相对孔径离轴两反自由曲面望远光学系统设计[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 18-26.
ZHOU Xin-ru, SONG Hua-tang, ZHU Run-hui, *et al*. Design of optical system with compact structure with large relative aperture off-axis two-inverse free-form surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(10): 18-26.

［15］ YE J F, CHEN L, LI X H, *et al*. Review of optical freeform surface representation technique and its application［J］. Optical Engineering, 2017, 56(11): 110901.

［16］ 王梦晖, 赵高兴, 时其然, 等. 自由曲面成像光学系统的设计方法及其应用[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 222-242.
WANG Meng-hui, ZHAO Xing-xing, SHI Qi-ran, *et al*. Design method and application of freeform imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 222-242.

Design of Airborne Mid-Wave Infrared Off-Axis Two-Mirror Optical System

WU Chao　YANG Li-hong　ZHAO Chen-xi　LI Min-min　ZHANG Jing-jing

（School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China）

Abstract　In order to solve the limitations of existing optical systems in airborne and other fields, optical free-form surfaces with rich degrees of freedom are introduced to design a small *F* number, large field of view, and lighter airborne mid-wave infrared off-axis two-mirror optical system. The reflective optical system is adopted to eliminate light occlusion by off-axis, and the free-form surface expressed by *XY* polynomials effectively balances the advanced aberrations by using the first 6 terms. Finally, a medium-wave infrared optical system with a focal length of 240 mm, a field of view angle of 3.8° and an *F* number of 3 is obtained, and the system's Modulation Transfer Function (MTF) is close to the diffraction limit in the full field of view, and the radius of the Root Mean Square (RMS) of each field of view is within 15 μm of the cell size of a single detector, and the overall physical size is less than 190 mm(*X*)×190 mm(*Y*)×240 mm(*Z*). The final results show that the system not only meets the imaging quality, but also has simple structure and good lightness, and can be widely used in airborne ground reconnaissance imaging and other fields.

Key words　airborne; off-axis two-mirror; freeform surfaces; small *F* number; *XY* polynomials