

引用格式: Liu Yijun, Xu Liang, Zhao Jinwei, et al. Optical Design of an Airborne Multi-Spectral Off-Axis Common-Aperture Continuous Zoom System[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0822001

刘译骏,徐亮,赵晋炜,等. 机载多谱段离轴共孔径连续变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0822001

机载多谱段离轴共孔径连续变焦光学系统设计

刘译骏^{1,2}, 徐亮^{1,2}, 赵晋炜¹, 刘峰¹, 张玺斌¹, 王伟琦^{1,2}, 丁卉宁^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所航空光电技术研究室, 西安 710072)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为满足航空机载光电吊舱在全天候复杂环境中高精度目标探测和识别的要求,目前国内机载吊舱通常采用前端卡式望远系统与后端多个谱段定焦成像系统组合的方式实现长焦距复合探测,该类型系统存在视场角小、中心遮拦损失能量和工作谱段不足等问题,针对上述问题本文设计了一种多谱段离轴共孔径连续变焦光学系统。该系统采用前端离轴无焦望远系统和后端入瞳前置连续变焦系统组合的结构形式,其中前端离轴无焦望远系统采用环形布局的结构形式实现无遮拦和小型化,后端入瞳前置连续变焦系统采用场镜与连续变焦二次成像系统组合的方式实现大变倍比连续变焦成像和尺寸压缩。系统光学口径为 200mm,最大线视场 $\pm 6.15^\circ$,最大变倍比可达 6 $\times$ 。其中,近红外实现 200mm~1200mm 连续变焦,短波红外实现 300mm~1200mm 连续变焦,中波红外实现 200mm~800mm 连续变焦。仿真结果表明,系统在各谱段变焦全程均具有良好的成像质量,系统结构紧凑,变焦曲线平滑,具备一定工程实现潜力,可为多谱段机载吊舱光学系统的设计提供技术参考。

关键词:光学工程;机载光电系统;连续变焦设计;多谱段光学系统;光学设计

中图分类号:TH74

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265508.0822001

0 引言

信息化空地一体化作战体系对战场态势感知的远距离、全天候、实时性要求日益提高,单一谱段的光电吊舱无法满足全天候作战需求,因此多谱段共孔径光电吊舱已成为重要研究方向。机载光电吊舱凭借模块化、高适配、部署快等优势,成为航空侦察与目标跟踪的核心载荷^[1]。

目前,美国、以色列及欧洲等国家已形成较成熟的多光谱共孔径瞄准吊舱体系,其中代表性的 MTS-B、MX-15D 与 EUROFLIR410 等型号已广泛装备于军用机载平台,承担侦察监视、目标识别与跟踪等任务^[2-5]。美国 MTS 系列光电吊舱历经多代技术更迭,其中 MTS-B 作为代表型号,采用同轴卡式光学结构设计,具备 12 $\times$ 放大倍率,最大通光口径达到 $\Phi 290\text{mm}$ 。该系统在窄视场条件下红外通道视场为 $0.47^\circ \times 0.63^\circ$,电视通道视场为 $0.23^\circ \times 0.31^\circ$ 。加拿大公司的 MX-15D 光电吊舱采用多通道共孔径光学结构,多视场采用次镜/透镜组切换式方案。中波红外通道视场为 1.2° ,可见光通道视场为 1.8° ,最大通光口径达到 $\Phi 160\text{mm}$ 。EUROFLIR410 是一种紧凑型多谱段机载光电吊舱,最大通光口径约 $\Phi 130\text{mm}$,中波红外分辨率为 1280×720 ,视场为 1.2° ,可见光通道分辨率为 1920×1080 ,视场为 0.33° ,支持 4 $\times$ 电子变焦。

国内目前对于多谱段共孔径光学系统的研究相对较晚。鲜勇团队^[6]设计了一种入瞳直径为 240mm 的多谱段定焦系统,中波红外系统焦距为 1320mm,可见光系统焦距 1452mm,不具备连续变焦能力。刘昊^[7]设计的系统由卡式望远系统与三组元机械补偿式变焦系统组成,通光口径为 300mm,总长为 580mm,视场角

基金项目:陆军装备部预研(XXXXXXXX)

第一作者:刘译骏(2000—),男,硕士,主要研究方向为光学设计。Email:118943077020@qq.com

通讯作者:徐亮(1984—),男,博士,主要研究方向为光学设计。Email:xl757@opt.ac.cn

收稿日期:2026-03-10;**录用日期:**2026-04-13

<http://www.photon.ac.cn>

为 $0^\circ \sim 1.5^\circ$, 焦距连续变化范围为 800mm ~ 1600mm, 变倍比仅为两倍。刘莹奇团队^[8]设计的多光谱共孔径光学系统光学有效口径为 220mm, 近红外焦距为 1100mm、短波红外焦距为 1200mm、中波红外焦距为 880mm。可装载于 $\Phi 500$ mm 系列典型机载球形光电吊舱平台。

现有研究在多谱段共孔径设计、大口径成像和连续变焦成像等方面取得了一定进展,但在离轴共孔径与大变倍比连续变焦能力的实现方面仍存在不足。一方面,多谱段共孔径光学系统多采用同轴卡塞格林结构形式。该类结构具有大口径、无色差和易装调的优点,但由于存在中心遮拦,系统通光效率受到一定影响,且不利于视场拓展。当系统口径增大时,轴向尺寸压缩空间有限,无法满足机载吊舱平台对小型化与紧凑化的需求。为改善上述问题,本文选用离轴反射式望远结构,可避免中心遮拦,提高能量利用率,并在光路空间布局上提供更大的自由度,有利于实现小型化。另一方面,目前系统采用定 F 数设计,后端连续变焦系统存在变倍比较小和长短焦亮度不一致等问题。针对上述问题,本文提出了一种改进型连续变焦光学结构,采用场镜与连续变焦二次成像系统组合的方式,通过场镜将无穷远目标预先成像于固定中间像面,使后续连续变焦系统在有限共轭条件下工作,进而提升系统的像差校正能力。该结构在光路设计上区别于传统入瞳前置连续变焦系统,可为多谱段、大口径条件下连续变焦系统的结构设计提供了新的实现思路。

本文设计了一种多谱段共孔径的光学系统,该系统覆盖近红外、短波红外和中波红外三个谱段,前端为离轴反射式的无焦系统,后端为改进型的入瞳前置连续变焦系统,二者通过光瞳匹配进一步优化设计,最终的设计结果成像质量优良。

1 设计参数

本文设计选用近红外谱段的 1920×1080 探测器,像元尺寸为 $4.5\mu\text{m}$,像面对角线尺寸为 9.9mm。短波红外谱段采用 640×512 探测器,像元尺寸为 $15\mu\text{m}$,像面对角线尺寸为 12.3mm。中波红外谱段采用制冷型 640×512 探测器,像元尺寸为 $15\mu\text{m}$,像面对角线尺寸为 12.3mm。具体设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数
Table 1 Optical system design parameters

Parameter	Near—Infrared (NIR)	Short—Wave Infrared (SWIR)	Mid—Wave Infrared (MWIR)
Work wavelength/ μm	0.7~0.9	0.9~1.7	3.7~4.8
Zoom ratio	6	4	4
Maximum optical aperture/mm	200	200	200
F—number	6	6	4
Focal length/mm	200~1200	300~1200	200~800
Number of pixels	1920×1080	640×512	640×512
Pixel Size/ μm	4.5	15	15
Field of view	$0.41^\circ \times 0.23^\circ$ $2.48^\circ \times 1.40^\circ$	$0.46^\circ \times 0.37^\circ$ $1.83^\circ \times 1.47^\circ$	$0.69^\circ \times 0.55^\circ$ $2.75^\circ \times 2.20^\circ$

2 光学设计分析

2.1 光学结构分析

目前,国内外多谱段共孔径系统的发展主要有透射式、同轴卡式和离轴折反式三种光学结构,每种结构都有其独特的优势和局限性。透射式结构在视场大、结构简单及成本低方面具有优势,但随着多谱段需求增加,其色差问题严重,且受红外材料特性限制,适用谱段范围较窄。同轴卡式结构具备像面稳定、大口径、宽谱段的优势,但其存在中心遮拦、视场角小的短板,中心遮拦会造成大量能量损耗,严重影响成像质量。离轴折反式系统则兼顾了前两种结构的优势,相较于透射式可实现大口径设计,相较于同轴卡式则遮拦更低、能量利用率更高,也可通过孔径或视场离轴扩大视场,还可以通过反射镜折叠光路去实现系统小型化,因此其更适配机载吊舱的应用需求^[9]。

结合各种形式的光学系统优缺点和本课题所设计光学系统的特点,共孔径部分采用离轴折反射光学结

构。离轴反射系统分别与后置近红外通道、短波红外和中波红外通道实现连续变焦成像。

2.2 离轴系统设计

本文设计的系统前端采用离轴反射系统对入射光线进行压缩,以降低望远系统出瞳处的光线高度,进而可减小后端连续变焦系统像差校正的难度。在设计离轴反射系统时,首先要求解同轴反射的初始结构,便于获得较好的成像质量,之后可通过对反射镜进行适当的倾斜或偏心,对系统进行光阑离轴或视场离轴处理,以消除中心遮拦对成像质量的影响并实现无中心遮挡光路。故在离轴反射望远镜设计中,获取同轴反射初始结构并离轴化设计是实现高质量光学系统的关键步骤^[10-13]。

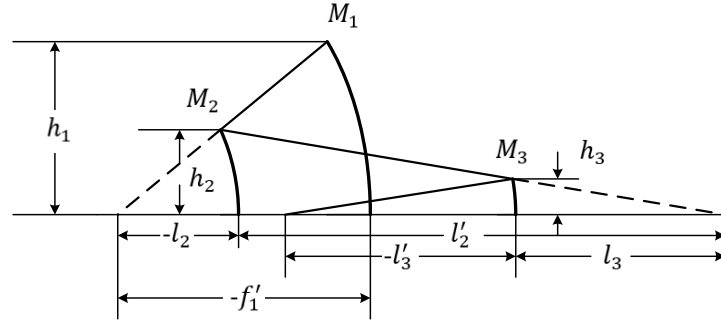


图1 同轴反射结构示意图

Fig. 1 Schematic of the coaxial three-mirror optical structure

如图1所示为同轴反射系统的初始结构,其中第一反射镜、第二反射镜和第三反射镜分别用 M_1 、 M_2 、 M_3 表示,光线途经 M_1 、 M_2 、 M_3 最终到达像面上。三个半径分别用 R_1 、 R_2 、 R_3 表示。用 e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^2 来表示各个反射面的圆锥系数。光学系统的焦距用 f' 来表示。分别用 h_1 、 h_2 、 h_3 来表示边缘孔径光线与 M_1 、 M_2 、 M_3 的交点高度。用各个表面的放大率和它们之间的遮拦比来定义系统的轮廓:

第二反射镜对第一反射镜的遮拦比用 α_1 表示,并且有

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f'} \approx \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

第三反射镜对次镜的遮拦比用 α_2 表示,并且有

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \quad (2)$$

第二反射镜的放大率用 β_1 表示,并且有

$$\beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} \approx \frac{u_2}{u'_2} \quad (3)$$

第三反射镜的放大率用 β_2 表示,并且有

$$\beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} \approx \frac{u_3}{u'_2} \quad (4)$$

根据几何关系有

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f' \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{\beta_1(1+\beta_1)} f' \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} f' \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2} f' \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} f' \quad (9)$$

$$l'_3 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot f' \quad (10)$$

$$\beta_1 \beta_2 = \frac{(1 + \beta_1) \beta_2}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (11)$$

$$S_I, S_{II}, S_{III} = 0 \quad (12)$$

通过给定三个已知的轮廓参数可以求取光学系统的结构参数。

2.3 连续变焦系统设计

传统光阑前置连续变焦系统^[14-15]往往直接工作于无穷远处,前固定组需同时承担成像、入瞳控制及大口径光线压缩等功能,导致长短焦距难以平衡。为改善上述问题,本文在变焦系统前引入场镜,并将孔径光阑置于场镜前方。场镜将无穷远处光线成像在固定的中间像面,使后续变焦系统在有限共轭距下工作。在近轴条件下,系统可划分为五个光学组元:场镜 G_0 及变焦系统内部的四个组元 $G_1 \sim G_4$ 。其中 G_1 与 G_4 分别作为前固定组与后固定组, G_2 与 G_3 分别作为变倍组与补偿组,其余组元轴向位置保持不变。改进型入瞳前置的变焦系统如图2所示。

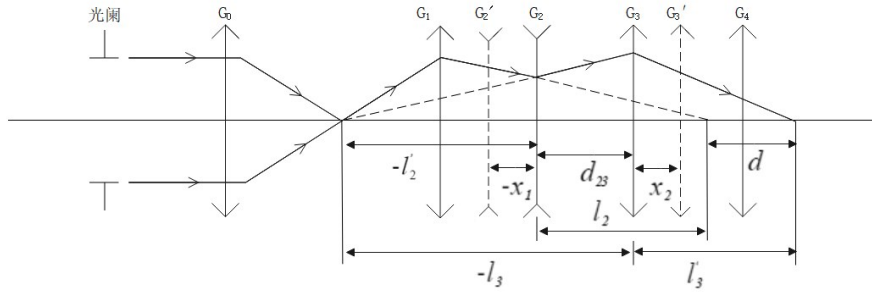


图2 改进型入瞳前置的变焦系统示意图

Fig. 2 Optical layout of a novel front-entrance-pupil zoom system

根据有限远共轭连续变焦系统的近轴理论,系统总垂轴放大倍率可表示为各组垂轴放大倍率的乘积形式:

$$M = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \quad (13)$$

式中 β_i 为第 i 组的垂轴放大倍率。引入场镜后,系统总放大倍率需包含场镜对物方光线的聚焦作用,可写为:

$$M' = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \quad (14)$$

其中 β_0 为场镜将物方成像至中间像面的垂轴放大倍率。变焦系统仅对中间像进行再成像与连续变倍。

为实现连续变焦过程中的像面稳定,需保持前固定组关于变倍组的像点 A 与后固定组关于补偿组的像点 A' 之间的轴向间距 d 为常数,即

$$d = (l'_3 - l_3) - (l'_2 - l_2) \quad (15)$$

式中 l_i 与 l'_i 分别表示第 i 组的物距与像距。根据高斯成像关系,物距与像距可表示为垂轴放大倍率的函数:

$$l = f \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (16)$$

$$l' = f(1 - \beta) \quad (17)$$

将式(16)和(17)代入式(15),可得两组连续变焦系统的补偿方程:

$$d = 2(f_2 + f_3) - f_2 \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) - f_3 \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right) \quad (18)$$

可推得补偿组放大倍率与变倍组放大倍率之间的关系为

$$\beta_3 = \frac{f_3}{f_3 + f_2(1 - \beta_2) - d_{23}} \quad (19)$$

需要指出的是,引入场镜并不改变式(15)~(19)的数学形式,这是因为上述推导仅依赖于变倍组与补偿组之间的几何关系与高斯成像条件,而与系统前端的共轭形式无关。

场镜对前固定组放大倍率定义的影响:在短焦状态下,前固定组的垂轴放大倍率可表示为

$$\beta_1 = \frac{l_2 + d_{12}}{l_1} \quad (20)$$

式中 l_1 为系统物距, l_2 与 d_{12} 分别为短焦状态下变倍组物距及前固定组至变倍组的最小轴向间隔。在加入场镜后,变焦系统不再直接面对外部物方,而是以场镜形成的中间像面作为等效物面。因此,式(20)中的物距 l_1 应替换为前固定组至中间像面的等效物距 l_Δ ,即

$$\beta_1 = \frac{l_2 + d_{12}}{l_\Delta} \quad (21)$$

当中间像面位置固定时, l_Δ 为常数,从而使得前固定组放大倍率 β_1 由场镜与前固定组的几何布局共同决定。

传统光阑前置结构中,入瞳由孔径光阑经前固定组直接成像,其位置易随变倍过程发生漂移,导致长焦端 l_r 增大,引起主光线高度上升。 l_r 表示前固定组到系统入瞳的轴向距离。

在本文结构中,孔径光阑首先经场镜成像形成中间瞳,随后中间瞳再由前固定组成像得到系统入瞳。通过合理设计场镜焦距,可有效调节中间瞳位置,使入瞳轴向位置较小且随变倍变化平缓,可以抑制主光线高度的增长并降低前固定组口径负担。

3 光学系统设计

3.1 前端离轴系统设计

根据系统设计指标要求,前端离轴望远系统入瞳直径为 200mm,孔径光阑位于主镜上,放大倍率为 $5\times$ 。由离轴反射系统的分析可知,本文首先利用 MATLAB 对给定轮廓参数进行数值求解,获得同轴反射系统的初始结构。在此基础上,望远系统采用开普勒式无焦构型,其中 M1 为主镜, M2 为次镜, M3 为平面反射镜, M4 为第三反射镜, M5 为平面反射镜。主、次两反射镜共同作为系统物镜, M4 作为系统目镜,通过控制物镜与目镜的焦距比实现望远系统放大倍率设计。同时,轴上视场在两反物镜焦面处形成完善像,便于在系统装调过程中利用干涉仪或传函仪进行检测与校准,提高系统装调效率并保证光学性能。

考虑到机载吊舱平台对系统包络尺寸和结构紧凑性的严格要求,本文采用主镜偏心、次镜光轴与机械轴重合和第三反射镜折轴,并结合两块平面反射镜对光路进行折叠重排,形成环形布局。M1、M2 和 M4 采用偶次非球面,系统前端轴向总长仅为 430mm,其中 M1、M4 和 M5 的 Y 向偏心量分别为 160mm、40mm 和 -8mm。该布局一方面避免了传统同轴反射系统中的中心遮拦,提高了通光效率;另一方面通过离轴分光与折叠反射相结合,将原本沿主光轴展开的光路重新分配到更紧凑的空间包络内,从而有效压缩了系统轴向尺寸,实现了无遮拦与小型化设计。

设计好的离轴反射望远系统如图 3 所示。详细参数如表 2 所示。

对离轴望远系统的成像质量进行分析,其波像差曲线如图 4 所示:

由图 4 可以看出,离轴望远系统的大小视场波像差小于 0.05 个波长,具备良好的成像效果。

3.2 后端连续变焦系统设计

本文设计的系统采用 5 倍前端望远+后端多波段连续变焦(近红外 6 倍连续变焦、短波红外和中波红外 4 倍连续变焦)的总体设计构型,在其出瞳引入分色组件实现对不同波段光路的分离;各波段的成像物镜均采用入瞳前置的设计构型,以实现与前置系统的光瞳匹配。本文以短波红外连续变焦系统为例,讲述其设计过程。

1、短波红外连续变焦系统

由短波红外系统焦距指标要求范围(300mm~1200mm)和前端望远系统的放大倍率($5\times$),可求得后端连续变焦系统的焦距范围(60mm~240mm),具体指标如表 3 所示。

为实现长短焦像差更好平衡的问题,基于改进型变焦系统理论的分析,本系统引入场镜并将孔径光阑置于其前方。

首先,对于无穷远物方,场镜在其像方形成固定的中间像面,像高与视场角满足:

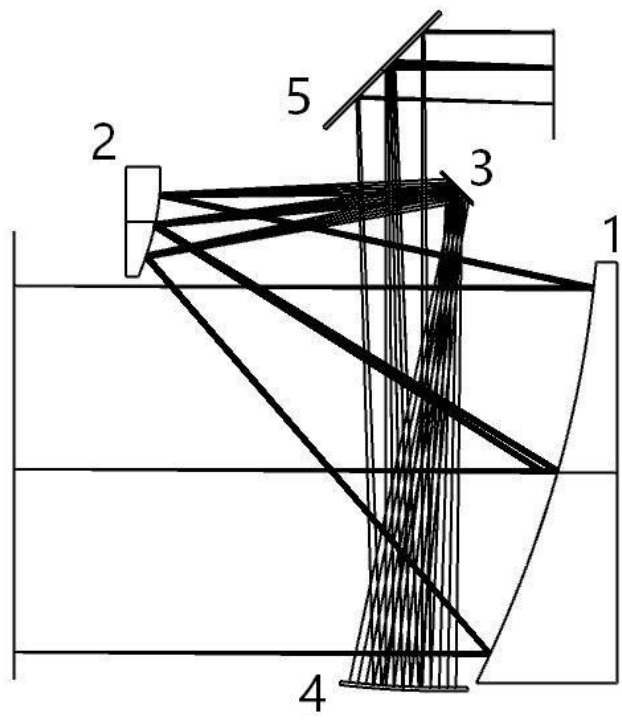


图 3 离轴望远系统光路图
Fig. 3 Optical configuration of the off-axis telescope system

表 2 前端离轴望远系统反射镜结构参数
Table 2 Mirror structural parameters of the front off-axis telescope system

Mirror	Radius of curvature (mm)	Distance (mm)	Conic constant	Y decenter (mm)
M1	−568.402	−240	−1	160
M2	−115.127	155	−2.161	/
M3	∞	−280	/	/
M4	489.736	330	−4.723	40
M5	∞	−160	/	−8

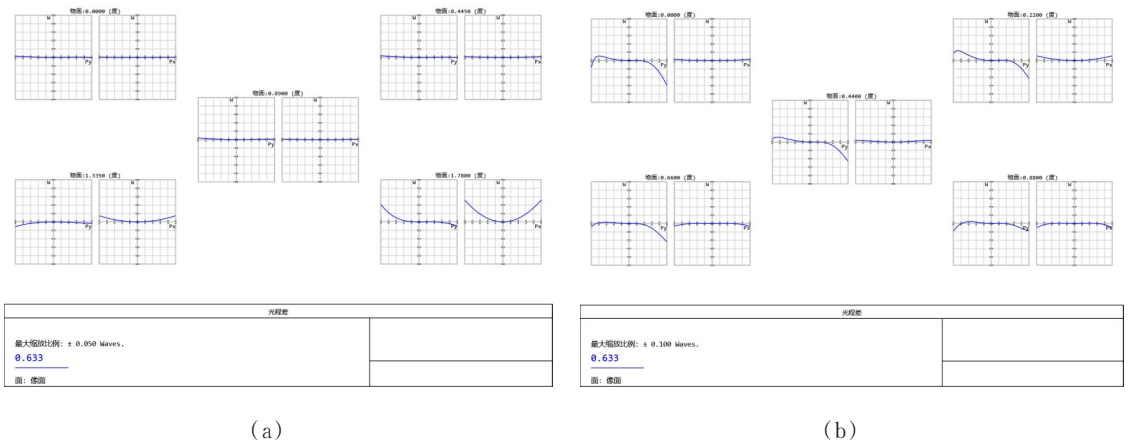


图 4 离轴望远系统波像差。(a)大视场;(b)小视场
Fig. 4 Wavefront aberration distribution of the off-axis telescope system. (a) Short focal length; (b) Long focal length.

表 3 短波红外连续变焦设计参数
Table 3 Design parameters of the short-wave infrared continuous zoom system

Parameter	Value
Work wavelength/ μm	0.9~1.7
Number of pixels	640×512
Pixel size/ μm	15
Image Plane size/mm	9.6×7.68
F-number	6
Focal length/mm	60~240

$$y_F = f_0 \cdot \tan(\theta) \tag{22}$$

θ 为系统视场角,由式(22)可见 f_0 决定中间像面的高度。若 f_0 过小,则在给定视场角下中间像面过小,后续变焦系统需在较小像高条件下完成大倍率变化,系统对装调误差与像差更敏感;反之若 f_0 过大,则中间像面尺度增大,导致有限远变焦系统的主光线高度上升,使前固定组与变倍组的口径增加并加剧长焦端像差校正压力。故场镜的焦距选择将对后续系统的设计至关重要。

在具体设计中,场镜焦距并非由近轴理论单独确定,而是结合后续优化迭代过程综合选取。优化结果表明,当场镜形成的中间像面大小与整系统像面大小一致或接近时,更有利于整系统的像差平衡与优化收敛。通过分析,短波红外连续变焦系统场镜焦距选择为 $f_0=120\text{mm}$ 。为满足系统的焦距要求,场镜后的有限远变焦系统的放大倍率也可求出,分别为短焦0.5×和长焦2×。根据所需的像面高度为6.15mm,结合放大倍率可求出长短焦处的中间像面高度。

$$\beta = \frac{y'}{y} \tag{23}$$

根据式(23),求得短焦中间像面高度为12.3mm,长焦中间像面为3.075mm。场镜焦距为120mm,长焦口径为40mm,短焦口径为10mm。

对于场镜后的有限远连续变焦系统,首先依据目标焦距范围和放大倍率要求建立两动组初始关系,再结合各通道成像特点与优化结果,对变倍组和补偿组的光焦度进行不断调整与完善,最终形成满足设计要求的连续变焦系统。图5分别是焦距为60mm、120mm和240mm的光路图。

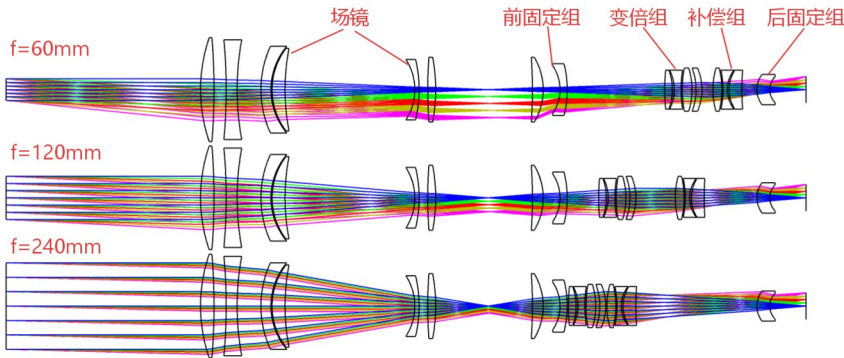


图 5 短波红外连续变焦系统
Fig. 5 Short-wave infrared continuous zoom system.

2、近红外连续变焦系统

近红外连续变焦系统的设计要求为:焦距40mm~240mm,F数6,像元尺寸为4.5 μm ,像元数为1920×1080,对角线长度为9.9mm,选择场镜焦距 $f_0=120\text{mm}$ 。为满足系统的焦距,后端的有限远变焦系统的放大倍率也可求出,分别为短焦0.33×和长焦2×。在短波红外连续变焦系统光学设计方法与像质评价结果的基础上,采用相同的设计原理与技术路线,对近红外波段的连续变焦光学系统进行设计。系统结构形式与短波红外系统保持一致。图6分别是焦距为40mm、120mm和240mm的光路图。

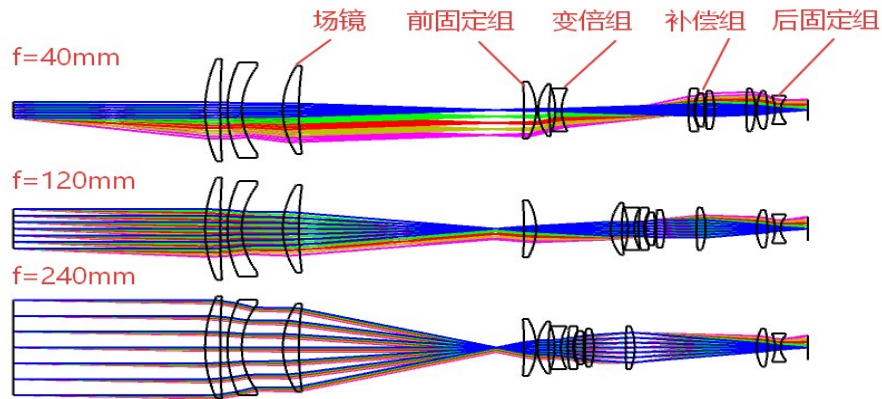


图6 近红外连续变焦系统
Fig. 6 Near-infrared continuous zoom system.

3、中波红外连续变焦系统设计

中波红外连续变焦系统的设计要求为:焦距40~160mm, F数4, 像元尺寸为 $15\mu\text{m}$, 像元数为 640×512 , 对角线长度为12.3mm。设计中重点考虑了冷反射抑制与冷阑匹配对系统成像性能的影响。对中波红外通道对各光学表面的YNI值进行控制, 使其绝对值大于1, 以抑制冷反射引起的杂散光。为进一步降低系统冷反射影响, 本文设计了冷光阑组件, 通过将系统的光阑后置, 即在设计视场范围内, 系统出瞳与冷光阑完全匹配, 探测器有效视场内的通光光束均可无遮挡地通过冷光阑, 且不会接收来自冷屏外的杂散辐射, 可实现100%冷光阑效率, 具体结构如图7所示。场镜焦距选取为80mm。为满足系统焦距变化要求, 后端有限共轭变焦系统的放大倍率分别取短焦0.5 $\times$ 和长焦2 $\times$ 。基于上述设计思路, 完成了中波红外连续变焦成像系统设计, 其在40mm、80mm和160mm焦距下的光路如图8所示。

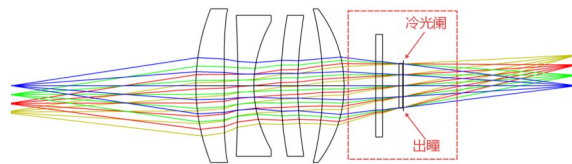


图7 冷光阑效率示意图
Fig. 7 Schematic diagram of cold stop matching efficiency

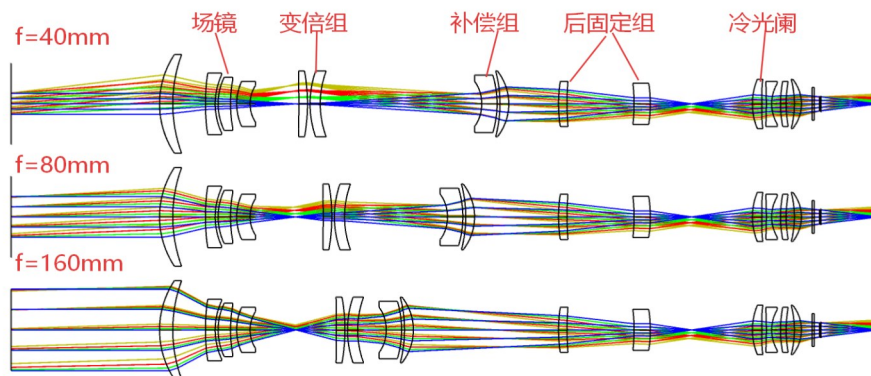


图8 中波红外连续变焦系统
Fig. 8 Mid-wave infrared continuous zoom system.

3.3 系统的组合设计

在完成前端离轴望远系统与后端多波段连续变焦系统设计后, 在望远系统输出的平行光段引入两个分光镜, 实现近红外、短波红外和中波红外三个波段的分光成像。第一分光镜反射近红外、短波红外和透射中

波红外,第二分光镜反射近红外和透射短波红外。通过上述两个分光镜,实现了三波段的分离,并且经过平面反射镜压缩光路,使三路独立的变焦成像系统紧凑的置于主镜背部。

根据光瞳匹配理论,各子系统在设计阶段已充分考虑光瞳尺寸及空间位置的一致性。在组合设计阶段,将前置离轴望远系统的出瞳与各波段后端连续变焦系统的入瞳进行精确匹配,以保证系统整体成像质量。由于分光组件布置于望远系统后的平行光段,可有效减小分光镜引入的像差影响,同时便于结合反射镜对各波段光路进行折叠,从而压缩系统轴向尺寸并满足机载平台对紧凑化布局的要求。经优化后,组合系统充分利用了前置离轴望远系统无遮拦、大口径和高透过率的优势,在实现三波段共孔径成像的同时,兼顾了良好的结构紧凑性与工程实现性。图9为多谱段共孔径离轴连续变焦系统组合光路示意图。

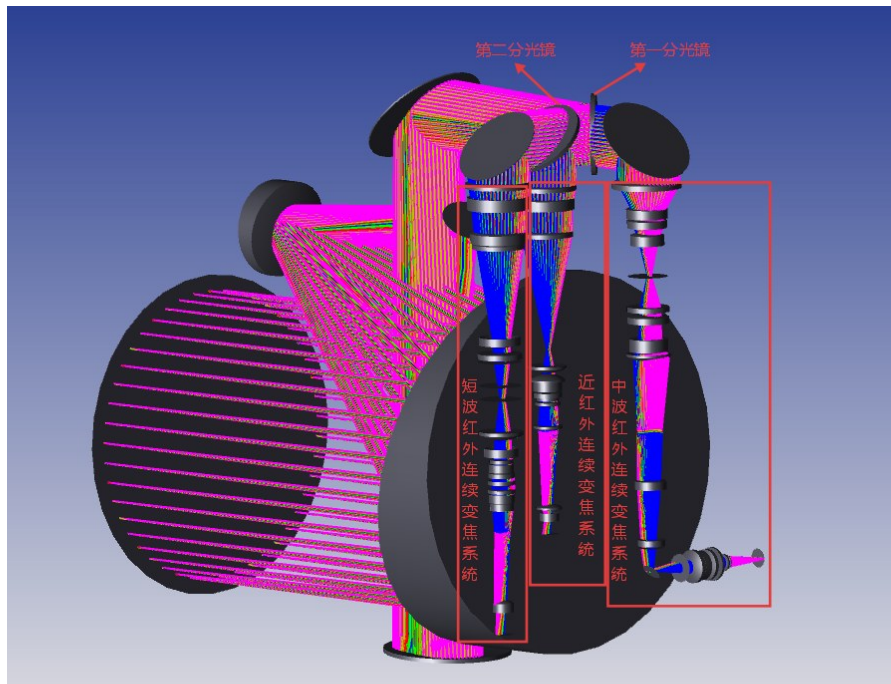


图9 多谱段共孔径离轴连续变焦系统

Fig. 9 Multispectral common-aperture off-axis continuous zoom system

对组合光学系统的成像性能进行了系统性的评估。通过分析系统在不同变焦位置及视场条件下的成像特性,对光学系统组合后的整体像质进行分析,结果如表4、表5和表6所示。

(1) 近红外离轴连续变焦系统:

MTF图显示设计完成的光学系统长短焦不同位置全视场MTF在截止频率为110lp/mm处均大于0.3,可保证该系统实现较好的成像对比度。

场曲畸变图显示,系统的场曲校正良好,短焦的最大畸变为3.1278%,短焦和中焦最大畸变小于1%,符合成像系统的使用要求。

(2) 短波红外离轴连续变焦系统:

MTF图显示设计完成的光学系统长短焦不同位置全视场MTF在截止频率为33lp/mm处均大于0.4,可保证该系统实现较好的成像对比度。

场曲畸变图显示,系统的场曲校正良好,短焦的最大畸变为4.0823%,中焦和长焦最大畸变小于1%,符合成像系统的使用要求。

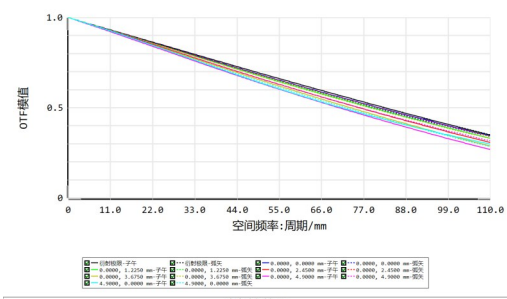
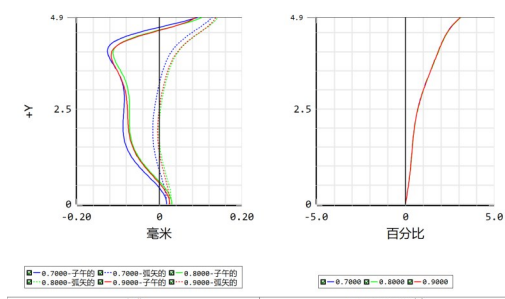
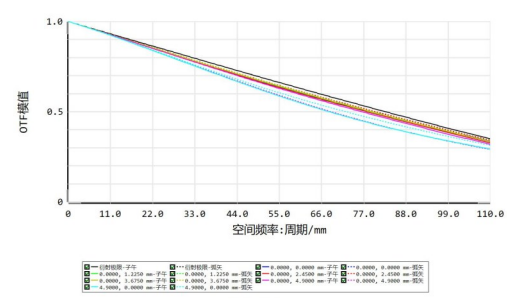
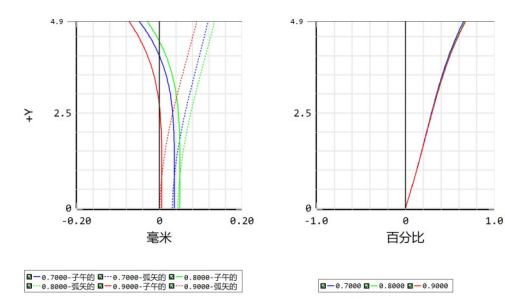
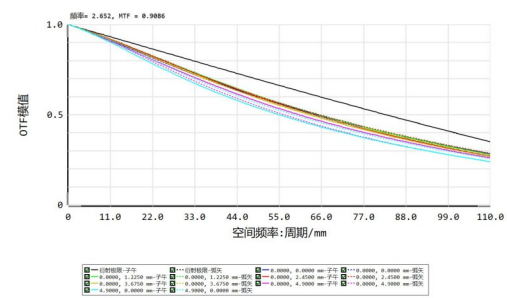
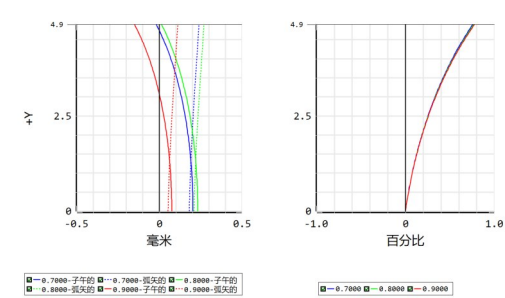
(3) 中波红外离轴连续变焦系统:

MTF图显示设计完成的光学系统长短焦不同位置全视场MTF在截止频率为33lp/mm处均大于0.2,可保证该系统实现较好的成像对比度。

场曲畸变图显示,系统的场曲校正良好,短焦的最大畸变为2.0841%,中焦和长焦最大畸变小于1%,符合成像系统的使用要求。

表 4 近红外离轴连续变焦成像效果

Table 4 Imaging performance of the near-infrared off-axis continuous zoom system

Focal length	MTF	Field curvature and distortion									
f=200mm <table><tr><td>数据 0.7000 到 0.9000 μm.</td><td></td></tr><tr><td>面: 像面</td><td></td></tr><tr><td>图例对应于视场位置</td><td></td></tr></table>	数据 0.7000 到 0.9000 μm .		面: 像面		图例对应于视场位置		<table><tr><td>场曲</td><td>F-Tan(Theta) 畸变</td></tr><tr><td>最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.1430 毫米 子午场曲 = 0.2160 毫米 图例对应于波长</td><td>最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 3.1270% 图例对应于波长</td></tr></table>	场曲	F-Tan(Theta) 畸变	最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.1430 毫米 子午场曲 = 0.2160 毫米 图例对应于波长	最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 3.1270% 图例对应于波长
数据 0.7000 到 0.9000 μm .											
面: 像面											
图例对应于视场位置											
场曲	F-Tan(Theta) 畸变										
最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.1430 毫米 子午场曲 = 0.2160 毫米 图例对应于波长	最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 3.1270% 图例对应于波长										
f=600mm <table><tr><td>数据 0.7000 到 0.9000 μm.</td><td></td></tr><tr><td>面: 像面</td><td></td></tr><tr><td>图例对应于视场位置</td><td></td></tr></table>	数据 0.7000 到 0.9000 μm .		面: 像面		图例对应于视场位置		<table><tr><td>场曲</td><td>F-Tan(Theta) 畸变</td></tr><tr><td>最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.0893 毫米 子午场曲 = 0.0792 毫米 图例对应于波长</td><td>最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 0.6787% 图例对应于波长</td></tr></table>	场曲	F-Tan(Theta) 畸变	最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.0893 毫米 子午场曲 = 0.0792 毫米 图例对应于波长	最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 0.6787% 图例对应于波长
数据 0.7000 到 0.9000 μm .											
面: 像面											
图例对应于视场位置											
场曲	F-Tan(Theta) 畸变										
最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.0893 毫米 子午场曲 = 0.0792 毫米 图例对应于波长	最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 0.6787% 图例对应于波长										
f=1200mm <table><tr><td>数据 0.7000 到 0.9000 μm.</td><td></td></tr><tr><td>面: 像面</td><td></td></tr><tr><td>图例对应于视场位置</td><td></td></tr></table>	数据 0.7000 到 0.9000 μm .		面: 像面		图例对应于视场位置		<table><tr><td>场曲</td><td>F-Tan(Theta) 畸变</td></tr><tr><td>最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.0606 毫米 子午场曲 = 0.2196 毫米 图例对应于波长</td><td>最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 0.7706% 图例对应于波长</td></tr></table>	场曲	F-Tan(Theta) 畸变	最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.0606 毫米 子午场曲 = 0.2196 毫米 图例对应于波长	最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 0.7706% 图例对应于波长
数据 0.7000 到 0.9000 μm .											
面: 像面											
图例对应于视场位置											
场曲	F-Tan(Theta) 畸变										
最大视场是 4.900 毫米. 视场场曲 = 0.0606 毫米 子午场曲 = 0.2196 毫米 图例对应于波长	最大视场是 4.900 毫米. 最大畸变 = 0.7706% 图例对应于波长										

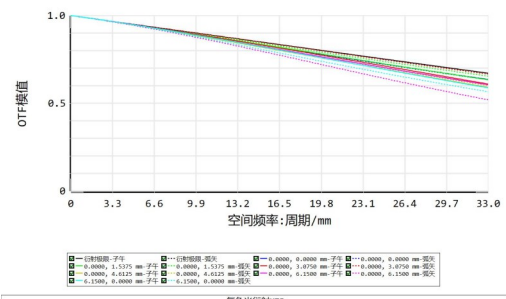
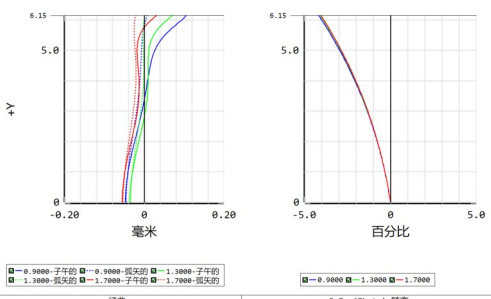
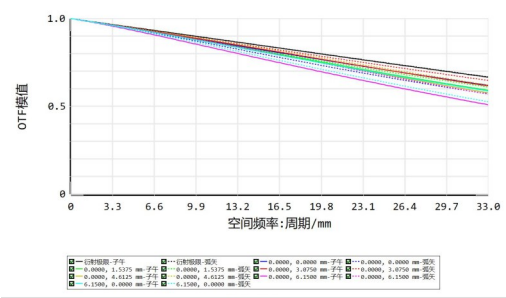
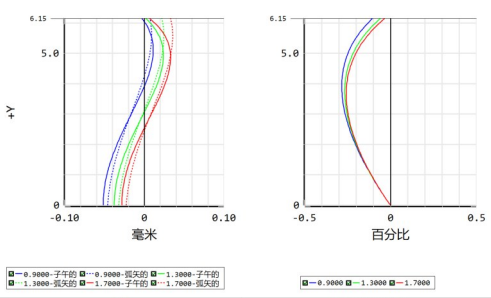
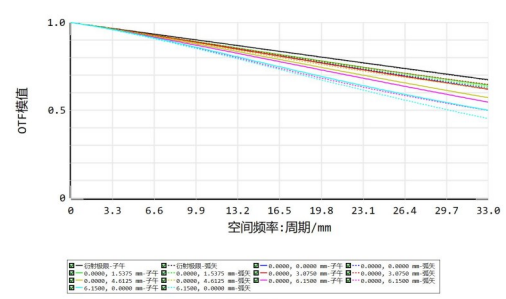
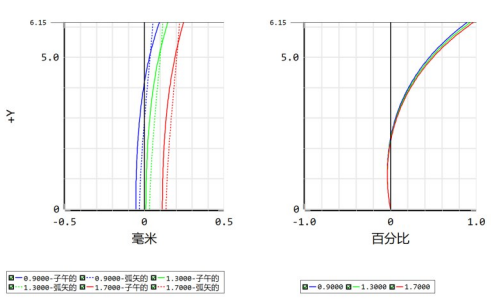
4 公差分析

公差范围太小可能会使得实际无法加工或者提高加工成本,公差范围太大,可能会导致生产出来的产品不符合设计要求。因此,公差范围的设定至关重要,各透镜的偏心、倾斜及透镜材料公差见表7所示。

本文采用蒙特卡罗方法进行公差分析,分析次数取1000次,并以像面位置作为补偿量,考察公差对各系统长短焦状态下衍射平均MTF的影响。

评价频率选取探测器奈奎斯特频率附近,其中近红外通道取110lp/mm,短波红外和中波红外通道取33lp/mm。对于目标识别而言,目标轮廓、边缘及纹理等关键信息主要依赖中高空间频率成分。当系统受制造与装调误差影响后,奈奎斯特频率附近的MTF应不低于0.2,否则高频细节将明显削弱,不利于目标识别与鉴别。因此,本文将奈奎斯特频率处 $\text{MTF} > 0.2$ 作为最低判据。表8给出了各通道长短焦状态下衍射平均MTF的蒙特卡罗统计结果。结果表明,在80%概率下,各系统长焦和短焦状态的MTF均达到相应判据要求,说明系统在考虑制造与装调误差后仍能满足清晰成像与目标识别需求,

表 5 短波红外离轴连续变焦效果
Table 5 Imaging performance of the short-wave infrared off-axis continuous zoom system

Focal length	MTF	Field curvature and distortion
f=300mm	 数据 0.9000 到 1.7000 μm. 面: 像面 图例对应于视场位置	 场曲 最大视场是 6.150 毫米. 视场场曲 = 0.0372 毫米 子午场曲 = 0.0373 毫米 图例对应于波长 F-Tan(Theta) 畸变 最大视场是 6.150 毫米. 最大畸变 = 4.0823%
f=600mm	 数据 0.9000 到 1.7000 μm. 面: 像面 图例对应于视场位置	 场曲 最大视场是 6.150 毫米. 视场场曲 = 0.0567 毫米 子午场曲 = 0.0617 毫米 图例对应于波长 F-Tan(Theta) 畸变 最大视场是 6.150 毫米. 最大畸变 = 0.2661%
f=1200mm	 数据 0.9000 到 1.7000 μm. 面: 像面 图例对应于视场位置	 场曲 最大视场是 6.150 毫米. 视场场曲 = 0.0848 毫米 子午场曲 = 0.1375 毫米 图例对应于波长 F-Tan(Theta) 畸变 最大视场是 6.150 毫米. 最大畸变 = 0.9662%

5 变焦曲线设计

系统变焦采用凸轮驱动的方式,对于凸轮驱动机构而言,变焦曲线平滑且无明显突变点,说明两动组位移关系连续,所对应的凸轮变化较为平缓,有利于凸轮结构的加工与装配,并可降低机构卡滞风险;同时,平缓的机械补偿关系有助于减小变焦过程中的冲击与晃动,保持视轴稳定,减小像面漂移。图 10 为各系统的变焦曲线示意图,横轴代表系统焦距,纵轴代表两动组相对前固定组移动距离,可以看出各系统的运动曲线均平滑流畅,可为后续凸轮驱动机构设计提供依据。

6 结论

本文针对传统机载光电吊舱系统存在的视场受限、中心遮拦、工作谱段不足以及变倍比小等问题,设计了一种多谱段离轴共孔径连续变焦光学系统。系统前端采用离轴无焦望远结构通过环形布局实现无遮拦与小型化;后端采用入瞳前置连续变焦结构通过场镜与连续变焦二次成像系统组合的方式实现了大变倍比连续变焦成像。该系统最大光学口径为 200mm,最大线视场为 $\pm 6.15\text{mm}$,最大变倍比达到 $6\times$ 。其中,近红

表 6 中波红外连续变焦成像效果

Table 6 Imaging performance of the mid-wave infrared continuous zoom system

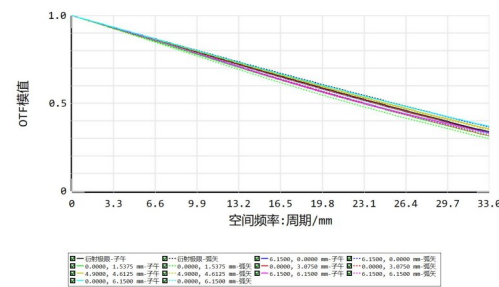
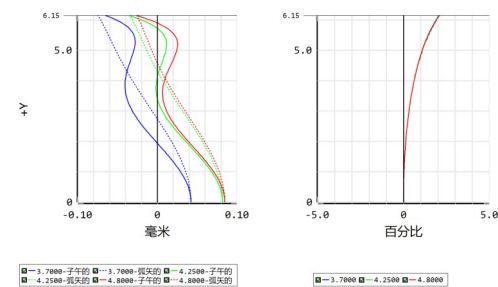
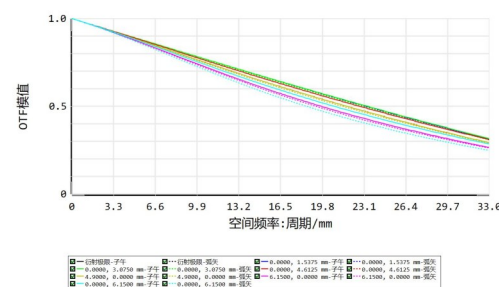
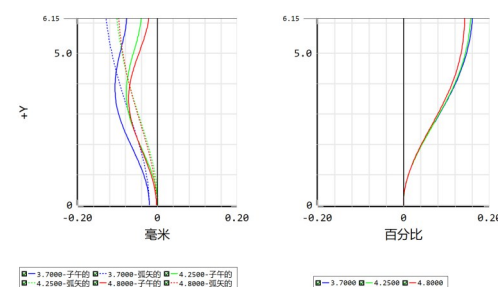
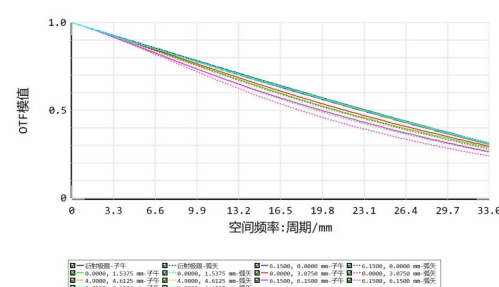
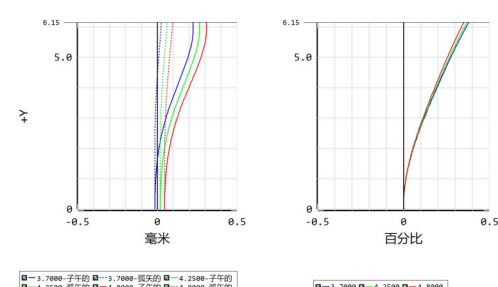
Focal length	MTF	Field curvature and distortion
f=200mm	 数据 3.7800 到 4.8000 μm. 面: 像面 图例对应于视场位置	 场曲 最大视场是 6.150 毫米. 视场场曲 = 0.1167 毫米 子午场曲 = 0.1182 毫米 图例对应于波长 F-Tan(Theta) 畸变 最大视场是 6.150 毫米. 最大畸变 = 2.0841%
f=400mm	 数据 3.7800 到 4.8000 μm. 面: 像面 图例对应于视场位置	 场曲 最大视场是 6.150 毫米. 视场场曲 = 0.2492 毫米 子午场曲 = 0.6794 毫米 图例对应于波长 F-Tan(Theta) 畸变 最大视场是 6.150 毫米. 最大畸变 = 0.1572%
f=800mm	 数据 3.7800 到 4.8000 μm. 面: 像面 图例对应于视场位置	 场曲 最大视场是 6.150 毫米. 视场场曲 = 0.8447 毫米 子午场曲 = 0.2479 毫米 图例对应于波长 F-Tan(Theta) 畸变 最大视场是 6.150 毫米. 最大畸变 = 0.3781%

表 7 公差分配表

Table.7 Tolerance allocation table

Parameter	Value
Eccentricity tolerance/mm	± 0.01
Angularity tolerance	$\pm 30''$
ΔNd	± 0.0001
ΔVd	± 0.002
N	2
ΔN	0.2

外波段实现 200mm ~ 1200mm 连续变焦,短波红外波段实现 300mm ~ 1200mm 连续变焦,中波红外波段实现 200mm ~ 800mm 连续变焦。设计结果表明,该系统在近红外、短波红外和中波红外各波段均可实现连续变焦,并在全焦段范围内保持良好的成像质量和稳定的光学性能。同时,系统整体结构紧凑、变焦过程平滑,具有较好的工程实现潜力。

表 8 衍射平均 MTF 蒙特卡罗结果
Table 8 Diffraction average MTF monte carlo results

Sample	NIR	NIR	SWIR	SWIR	MWIR	MWIR
	short—focus	long—focus	short—focus	long—focus	short—focus	long—focus
90%>	0.16	0.17	0.31	0.35	0.23	0.25
80%>	0.20	0.21	0.40	0.41	0.26	0.27
50%>	0.23	0.24	0.42	0.45	0.30	0.31
20%>	0.26	0.28	0.46	0.52	0.32	0.33
10%>	0.29	0.31	0.53	0.55	0.35	0.35

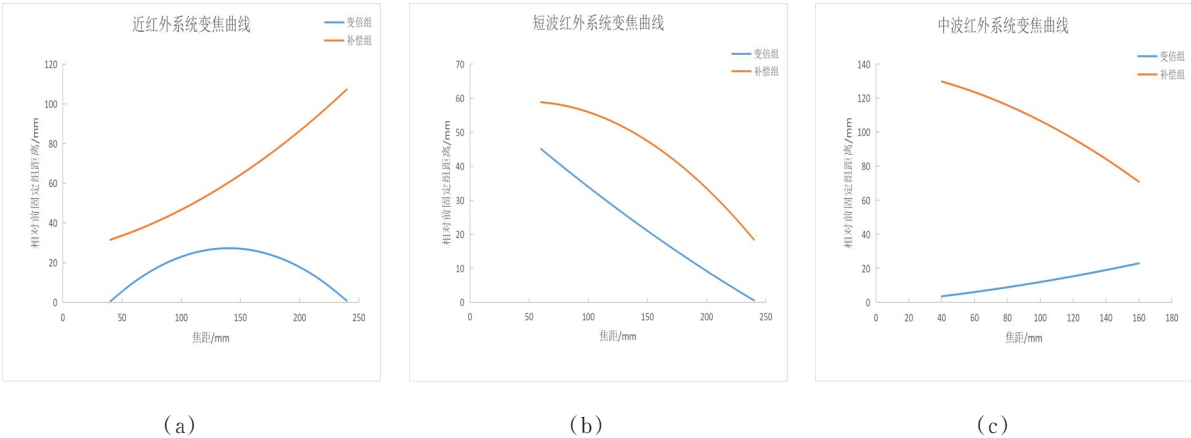


图 10 各分系统的变焦曲线。(a)近红外连续变焦系统;(b)短波红外连续变焦系统;(c)中波红外连续变焦系统;
Fig 10 Zoom curves of each subsystem. (a) Near-infrared continuous zoom system; (b) Short-wave infrared continuous zoom system; (c) Mid-wave infrared continuous zoom system.

参考文献

[1] ZHANG Sai, MA Hui, WEN Qing-rong. Development Status and Analysis of Airborne Photoelectric Reconnaissance Pod [J]. INFRARED, 2022, 43(7): 8.
张赛, 马会, 温庆荣. 机载光电侦察吊舱发展现状与分析[J]. 红外, 2022, 43(7): 8.

[2] Jian LI, ZHAOXiangjie, ZHANGDayong. Development analysis of overseas EO targeting turret technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(16): 2474.
李剑, 赵祥杰, 张大勇. 国外转塔式光电瞄准吊舱技术发展分析[J]. 光学精密工程, 2024, 32(16): 2474.

[3] WANGHuilin, Fei NING, LIUJilong. Development of aviation electro-optical reconnaissance technology[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 825.
王惠林, 宁飞, 刘吉龙. 航空光电侦察技术发展研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 825.

[4] HUANG Zhonghua, FENG Yanhui, LIU Yu. Development of Airborne Electro-Optical Targeting Systems Abroad[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(10): 61.
黄中华, 冯彦辉, 刘于. 国外机载光电瞄准设备发展[J]. 电光与控制, 2021, 28(10): 61.

[5] Wang HOU, Tao LI, Conglun LI, ZHANGQijie, LIUFeifei, RANChengping. Overview of the development of aviation electro-optical turret and technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(9): 20240203.
侯旺, 李涛, 李翀伦, 张奇婕, 刘飞飞, 冉承平. 航空光电转塔技术发展综述[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(9): 20240203.

[6] XIAN Yong, LI Wenqiang, ZHAO Xiang. Design of an Airborne Telescope Optical System with Multispectrum and Common Aperture[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(8): 109.
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.

[7] LIU Hao, ZHAO Yu, CHEN Yuanyuan, YAN Hongyu, YUE Junzhe, LI Jinhua. Design of large aperture continuous zoom optical system based on Cassegrain system[J]. LaserJournal, 2024, 45(3): 35.
刘昊, 赵宇, 陈媛媛, 闫红宇, 岳俊哲, 李晋华. 基于卡式结构的大口径连续变焦光学系统设计[J]. 激光杂志, 2024, 45(3): 35.

[8] Liu Yingqi, Lu Hongqiang, Shu Yingen, et al. Design of an airborne multispectral common-aperture targeting pod optical system. Chinese Optics, 2025, 18(4): 850 - 858.

- 刘莹奇, 陆红强, 舒营恩, 等. 一种机载多光谱共口径瞄准吊舱光学系统设计[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(04): 850-858.
- [9] Xu Weicai, Huang Wei. Innovated Lens Design for Catadioptric Zoom System[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622005.
许伟才, 黄玮. 新型折反射式连续变焦系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622005.
- [10] Bo ZHANG, Feng ZHANG, LIUYongqiang. Design of multi-band off-axis three-mirror optical system with common aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 654.
张博, 张峰, 刘永强. 多波段共口径离轴三反光学系统设计[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 654.
- [11] Zhanpeng MA, XUEYaoke, Yang SHEN, ZHAOChunhui, ZHOUCanglong, LINShangmin, Hu WANG. Design and Realization of Visible/LWIR Dual-color Common Aperture Optical System[J]. ACTA PHOTONICA SINICA, 2021, 50(5): 24.
马占鹏, 薛要克, 沈阳, 赵春晖, 周藏龙, 林上民, 王虎. 可见/红外双色共口径光学系统设计及实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 24.
- [12] Jie LI, Hui LUO, Jincheng LI, Hanping WU. Design of Airborne Infrared Dual-band Imaging Optical System Based on Harmonic Diffraction and Free-form Surface[J]. ACTA PHOTONICA SINICA, 2021, 50(12): 1222004.
李杰, 罗辉, 李金铖, 吴晗平. 基于谐波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): 1222004.
- [13] ZHANG Guo-wei, WANG Hai-tao. Design of Airborne Mid-Wave Infrared Continuous Zoom System With Large Zoom Range and Large Field[J]. OPTICS & OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY, 2018, 16(5): 20.
张国伟, 王海涛. 机载大变焦比大视场中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(5): 20.
- [14] WangJinsha, Yan Gong, GaoZhishan, ZhengHanqing, ZhangYanwei, WangLuhan. Design of Dual-Band Optical System with Long Back Working Distance and Continuous Zoom[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2122004.
王金沙, 巩岩, 高志山, 郑汉青, 张艳微, 汪路涵. 双波段长后工作距连续变焦光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2122004.
- [15] WEIJinyang, Xuyang LI, TANLongyu, Hao YUAN, RENZhiguang, ZHAOJiawen, YAOKaizhong. Design of an Integrated Optical System for Detection and Imaging of Large Aperture and Long Focal Length Based on Continuous Zoom[J]. ACTA PHOTONICA SINICA, 2024, 53(1): 0122001.
魏锦洋, 李旭阳, 谭龙玉, 袁灏, 任志广, 赵佳文, 姚凯中. 基于连续变焦的大口径长焦距的探测成像一体化光学系统设计[J]. 光子学报, 2024, 53(1): 0122001

Optical Design of an Airborne Multi-Spectral Off-Axis Common-Aperture Continuous Zoom System

Liu Yijun^{1,2}, Xu Liang^{1,2}, Zhao Jinwei¹, Liu Feng¹, Zhang Xibin¹, Wang Weiqi^{1,2}, Ding Huining^{1,2}

(1 Department of Aeronautical Optoelectronic Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710072, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: This paper aims to address the challenges faced by traditional airborne electro-optical pods in high-precision target detection and recognition in complex environments. These challenges include limited field of view, energy loss due to central obscuration, insufficient spectral coverage, and small zoom ratios. To overcome these limitations, a multispectral off-axis common-aperture continuous zoom optical system is designed. The focus of the study is on constructing an optical architecture that balances large aperture size, wide spectral coverage, a large zoom ratio, compactness, and engineering feasibility. The system is designed to achieve high-quality continuous zoom imaging under unified aperture conditions in the near-infrared, short-wave infrared, and mid-wave infrared spectral bands. The overall system adopts a combination of a "front off-axis afocal telescope system + rear entrance-pupil-forward continuous zoom system." The front common-aperture section employs an off-axis reflective structure, where the initial configuration is based on a coaxial three-mirror structure. Through eccentric, tilting, and folding adjustments, the system is shifted off-axis to eliminate central obscuration while reducing the system's axial dimension. The rear continuous zoom section addresses the challenges of balancing long and short focal

length aberrations in traditional entrance-pupil-forward zoom systems by introducing a field lens before the zoom system. This setup allows collimated light from infinite distance to be projected onto a fixed intermediate image plane, ensuring image plane stability during the zoom process. The system design optimizes pupil matching and minimizes aberrations across different spectral bands. Specific designs are created for the near-infrared, short-wave infrared, and mid-wave infrared channels, where the mid-wave infrared channel incorporates YNI value control and cold stop matching to reduce stray light from cold reflections. Two beam-splitters are introduced in the parallel light segment of the front telescope to separate the three spectral bands and achieve a compact system layout. Comprehensive evaluations are carried out, including modulation transfer function analysis, field curvature, distortion, tolerance Monte Carlo simulations, and zoom curve analysis. The proposed multispectral off-axis common-aperture continuous zoom system features an optical aperture of 200 millimeters, a maximum linear field of view of ± 6.15 millimeters, and a maximum zoom ratio of $6\times$. The near-infrared channel covers a continuous zoom range from 200 millimeters to 1200 millimeters, the short-wave infrared channel spans from 300 millimeters to 1200 millimeters, and the mid-wave infrared channel operates from 200 millimeters to 800 millimeters. The front off-axis telescope system has a total axial length of only 430 millimeters, with wavefront aberrations smaller than 0.05λ across both large and small field-of-view conditions, ensuring high-quality imaging at the front end. The system's performance across the three spectral bands is excellent. The modulation transfer function in the near-infrared channel is greater than 0.3 at 110 line pairs per millimeter, in the short-wave infrared channel, it exceeds 0.4 at 33 line pairs per millimeter, and in the mid-wave infrared channel, it remains above 0.2 at 33 line pairs per millimeter, demonstrating strong imaging contrast across all focal lengths. Field curvature and distortion analyses indicate that the system has excellent field curvature correction, with slight distortion at short focal lengths, but the distortion remains within acceptable limits for all focal lengths. A Monte Carlo tolerance analysis, performed with 1000 iterations, reveals that the system maintains diffraction-limited modulation transfer function at the Nyquist frequency with an 80% probability for both long and short focal lengths, even when accounting for manufacturing and assembly errors. The zoom curves for all channels are smooth, showing no abrupt changes, which facilitates the design of the zoom mechanism and ensures stability in the zoom process. The proposed multispectral off-axis common-aperture continuous zoom optical system successfully addresses the challenges of traditional optical designs, including central obscuration, limited field of view, and small zoom ratios, by offering a high-quality solution with a large zoom ratio and wide spectral coverage. The system delivers excellent continuous zoom imaging performance across the near-infrared, short-wave infrared, and mid-wave infrared spectral bands while maintaining stable optical performance over the entire zoom range. The off-axis reflective structure and improved entrance-pupil-forward continuous zoom system design ensure compactness and efficient energy utilization, making the system suitable for practical engineering applications in airborne multispectral electro-optical pods. This approach represents a significant step forward in the design of optical systems for target detection and recognition in complex environments.

Key words: Optical engineering; Airborne electro-optical System; Continuous zoom design; Multispectral optical system; Optical design

OCIS Codes: 220.4830; 220.3620; 080.4035; 120.482

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0822001