

## 大变倍比制冷型红外双波段变焦光学系统设计

耿海涛 虞林瑶 张葆

### Design of cooled infrared dual-band zoom optical system with large-magnification-ratio

GENG Hai-tao, YU Lin-yao, ZHANG Bao

引用本文:

耿海涛, 虞林瑶, 张葆. 大变倍比制冷型红外双波段变焦光学系统设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1431-1441. doi: 10.37188/CO.2024-0007

GENG Hai-tao, YU Lin-yao, ZHANG Bao. Design of cooled infrared dual-band zoom optical system with large-magnification-ratio[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1431-1441. doi: 10.37188/CO.2024-0007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0007>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 制冷型长波红外光学系统设计

Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(1): 72 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0116>

#### 制冷型被动式消热差红外光学系统设计

Passive athermalization design of a cooled infrared optical system

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 853 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0205>

#### 产生环形激光的光学系统设计

Design of an optical system for generating ring-shaped laser beam

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1365 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0045>

#### 轻小型金属基增材制造光学系统

Light-and-small optical systems by metal-based additive manufacturing

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(5): 1019 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0128>

#### 六边形环带排布的共光路复眼光学系统设计

Design of compound eye optical system with hexagonal band arrangement and common optical path

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 158 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0116>

#### 折反式变形光学系统设计

Design of catadioptric anamorphic optical system

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1376 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0035>

文章编号 2097-1842(2024)06-1431-11

# 大变倍比制冷型红外双波段变焦光学系统设计

耿海涛<sup>1,2</sup>, 虞林瑶<sup>1</sup>, 张葆<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 第三代红外焦平面探测器的不断发展使得探测器可以同时两个不同波段的红外辐射进行响应, 从而输出双波段对应图像, 双波段图像在目标探测和识别领域应用前景广阔。本文针对航空探测应用, 采用 320×256 双色红外制冷型探测器, 设计了一种工作波段在中波 3.7~4.8 μm 和长波 7.7~9.5 μm 的大变倍比制冷型红外双波段变焦光学系统, 用于对目标的红外探测。该光学系统采用折射式和折反式结构相结合的方式, 可实现光学四视场切换式大范围变焦, 采用二次成像以达到 100% 冷光阑效率。该光学系统四视场焦距分别为 32 mm、200 mm、800 mm、1600 mm, 变倍比为 50×。实验结果表明, 该光学系统在双波段各变倍状态下, 在调制传递函数特征频率为 17 lp/mm 时均接近衍射极限。该光学系统具有双波段、变倍范围大、大变倍比、快速切换多视场、结构简单紧凑、成像质量高等特征, 将在搜索、侦察等安防领域中得到广泛应用。

**关键词:** 双波段; 制冷型; 大变倍比; 光学系统

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0007 CSTR: 32171.14.CO.2024-0007

## Design of cooled infrared dual-band zoom optical system with large-magnification-ratio

GENG Hai-tao<sup>1,2</sup>, YU Lin-yao<sup>1</sup>, ZHANG Bao<sup>1\*</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

\* Corresponding author, E-mail: Zhangb@ciomp.ac.cn

**Abstract:** The development of third-generation infrared focal plane detectors allows them to respond simultaneously to two different bands of infrared radiation, and the dual-band image brings significant benefits to target detection and identification. In this paper, a cooled infrared dual-band zoom optical system with large-magnification-ratio is designed for aerial detection applications. The system includes a 320×256 dual-color infrared-cooled detector. It operates in the bands of 3.7–4.8 μm in mid-wave and 7.7–9.5 μm in long-wave. The optical system adopts the combination of refractive and catadioptric structures to realize an optical four-field-of-view switching wide-range zoom. In order to realize the 100% cold diaphragm efficiency, a second-

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 国家重点科研项目 (No. 303060302)

Supported by National Key Research Program of China (No. 303060302)

ary imaging mode is adopted. The four-field-of-view focal lengths of the optical system are 32 mm, 200 mm, 800 mm, and 1 600 mm, and the zoom ratio is 50 $\times$ . The experimental results show that the optical system is close to the diffraction limit at a modulation transfer function eigenfrequency of 17 lp/mm in each dual-band zoom state. The optical system has dual-band characteristics, extensive zoom ratio and large range, fast switching of multiple fields of view, simple and compact structure, and high-quality imaging, which will be useful in a wide range of security fields such as searching, reconnaissance, and so on.

**Key words:** dual-band; cooled; large-magnification-ratio; optical system

## 1 引言

红外成像系统具有被动探测、探测精度高、抗电磁干扰能力强等特点,在机载成像探测领域有着广泛的应用。大气对不同红外波长辐射的影响是不同的,如在长波红外波段、杂散辐射或热源辐射环境下,或在中波红外波段、潮湿低热的环境中,系统的探测识别能力更强<sup>[1]</sup>。对于传统的机载红外光电系统,采用单一波段成像已经不能满足目标探测的需求。相比单波段,双波段红外光学系统能够获得更丰富的目标信息,更有利于目标特征的提取和识别<sup>[2]</sup>。随着新一代红外探测器的出现,双波段/多波段成像的发展前景令人振奋。

目前红外中/长波双波段成像系统有分口径、共口径、一体共光路三种。前两种都采用两个单色红外探测器单独成像,方便可行,但结构复杂。第三种是借助双色探测器在同一个光路下同时对双波段成像,缺点是透过双波段的材料非常少,优化难度大,像差平衡困难,但是结构更加紧凑,重量轻、体积小。红外双波段变焦光学系统主要分为两种:多档变焦和连续变焦。相对连续变焦光学系统,多档变焦光学系统能在各种视场状态间快速切换,视场切换速度快,光轴一致性<sup>[3]</sup>较好,并且有装调难度低,光学透过率高,成像质量高等优点,在很多工程领域仍然有广泛应用。

近年来,国内外学者对双波段红外变焦系统进行了一系列研究。文献 [4] 设计了一款中波/长波红外一体共光路连续变焦系统。系统采用一套离轴三反式结构与一套折射式系统相结合,可实现 11.7 $\times$ 变焦。文献 [5] 设计了一款红外双波段 5.5 $\times$ 反射式共口径变焦系统。文献 [6] 设计了一款采用多层衍射光学元件的 5 $\times$ 中波/长波红外变

焦系统。文献 [7] 设计了一款中波/可见双波段共口径的连续变焦光学系统,中波系统实现了 3 $\times$ 变焦,可见光系统实现了 10 $\times$ 变焦。尽管以上设计类型多样,成像质量较高,但是存在结构复杂、装调困难、变倍比小、变倍范围小等问题,很难满足航空探测的需求。在这种情况下提出一种采用大视场短焦距光学系统用于搜索目标,小视场长焦距光学系统用于判别和精准跟踪目标的双波段红外探测技术<sup>[8]</sup>。这样,可在实现大变倍比的同时,具有较大的变倍范围,并且能够快速切换视场,可高质量成像。

针对红外成像系统存在的上述问题,本文创新性地将折射式和折反式结构相结合,以充分发挥各自优势。同时,为了满足在机载光电平台场景中应用的双波段系统对空间和重量的严格要求,采用一体式共光路结构,通过切换前置镜组和后置镜组的方式设计了一套制冷型双波段红外 50 $\times$ 变焦光学系统。该光学系统的焦距范围为 32~1 600 mm, F 数为 4 和 8(仅 1 600 mm 超长焦时为 8),工作波段为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$  和 7.7~9.5  $\mu\text{m}$ ,光学总长 300 mm,采用二次成像结构,满足 100% 冷光阑效率。该光学系统具有中波/长波双波段、50 倍大变倍比、大变倍范围、各变焦状态下均可高质量成像以及能快速切换多视场等优点,在航空探测等领域有很好的工程应用前景。

## 2 系统设计指标及变倍方式

### 2.1 光学系统设计指标

该红外光学系统采用双色红外 320 $\times$ 256 制冷型焦平面阵列探测器。探测器像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$  $\times$ 30  $\mu\text{m}$ ,探测器窗口采用 1 mm 的锗,滤光片采用 0.3 mm 的锗,红外光学系统设计指标如表 1 所示。

表1 光学系统设计指标

Tab. 1 Design specifications of the optical system

项目	指标
工作波段/ $\mu\text{m}$	3.7~4.8&7.7~9.5
焦距/mm	32; 200; 800; 1600
FOV/( $^\circ$ )	21.75; 3.52; 0.88; 0.44
F数	4.0; 8.0
变焦倍率	50 $\times$
冷屏到像面间隔/mm	20
总长/mm	300

## 2.2 变倍方式选择

目前多视场成像光学系统实现变倍的主流方式有移动式 and 切换式两种。前者通常使用凸轮曲线设计,通过电机带动变倍组和补偿组进行轴向运动<sup>[9]</sup>。其变倍原理本质上与连续变焦相同,即找到物像交换位置,再根据设计指标对系统进行合理缩放便可以实现多档变焦。优点是无需对中间位置进行优化设计,光学系统紧凑简洁,缺点是空间尺寸长、变倍速度慢、变倍过程中像面模糊,容易丢失跟踪目标。后者可以看作多光学系统组合,在不同视场切入不同的变倍组,优点是配合适当的驱动方式可以快速切换视场,可以实现多档大倍率变焦,具有更高的光轴精度和透过率,缺点是可能会出现径向尺寸过大,运动机构体积大且重量大等问题。为了实现大小视场的快速切换,使结构更加紧凑,同时减小载荷体积,对比分析后光学系统采用切换式结构实现多档变焦。

## 3 设计原理

### 3.1 光学系统结构

常见的光学系统可以分为三种类型:折射式、反射式和折反式<sup>[10]</sup>。双波段的折射式结构材料选择较为困难,仅适用于小口径光学系统<sup>[11]</sup>。反射式结构能满足大口径、宽波段的要求,但同轴反射式存在中心遮拦问题,对比度较低,离轴反射式则加工、装调难度太大。折反射式融合了上述两种结构的成像优势,且结构紧凑,不过对于变焦系统来说,也存在变倍范围小,短焦距实现困难等问题。

对于应用于航空成像探测这类具有苛刻要求的变焦光学系统而言,采用传统的单一结构很难达到要求,本文选用折射式和折反式结构相结合的形式,使各个光学子系统相对独立,通过不同镜组切换实现多个焦距。该结构简单易行,不但可实现大变倍比、长焦距、大口径,且具有体积小、重量轻、变倍范围大的特点。光学系统总体结构原理图如图1所示。系统采用二次成像结构,由前置红外物镜组(包括短焦红外透镜组、中焦红外透镜组及前置反射镜组)、准直透镜组和二次成像透镜组(包括长焦成像透镜组、超长焦成像透镜组)组成。其中,前置红外物镜组和准直透镜组可以看作一个拥有特定倍率的Keplerian望远镜结构,出射的准直平行光通过二次成像透镜组会聚到探测器靶面上。

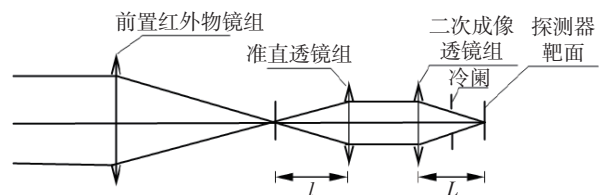


图1 光学系统结构原理图

Fig. 1 Structural diagram of optical system in this paper

### 3.2 变倍原理

对于折射式结构而言,如果短焦红外透镜组焦距为 $f'_s$ ,中焦红外透镜组焦距为 $f'_m$ ,后组倍率为 $M$ ,则系统焦距 $f'$ 满足:

$$f' = f'_s M \quad (1)$$

$$f' = f'_m M \quad (2)$$

$$M = \frac{L}{l} \quad (3)$$

对于折反式结构,如果整个系统要求倍率改变 $\beta$ ,则二次成像透镜组的垂轴放大率改变 $-\beta$ ,当系统焦距为 $f'$ ,前置反射镜组焦距为 $f'_1$ ,准直透镜组焦距为 $f'_2$ ,长焦成像透镜组焦距为 $f'_{3l}$ ,超长焦成像透镜组焦距为 $f'_{3sl}$ ,长焦时垂轴放大倍率为 $\beta_l$ ,超长焦时垂轴放大倍率为 $\beta_{sl}$ ,长焦后截距为 $L_l$ ,超长焦后截距为 $L_{sl}$ 。对于薄透镜则有:

$$f'_{3l} = L_l \quad (4)$$

$$f'_{3sl} = L_{sl} \quad , \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\beta_{sl}}{\beta_l} \quad , \quad (6)$$

$$f'_2 = \frac{f'_{3sl}}{\beta_{sl}} = \frac{f'_{3l}}{\beta_l} \quad , \quad (7)$$

$$f' = f'_1 \times \beta \quad . \quad (8)$$

### 3.3 光学消色差原理

根据系统的应用需求, 各组光学元件需要同时传输中波和长波。与可见光学材料相比, 目前红外光学材料的种类和数量均较为有限, 考虑到材料特性和加工特性, 能同时透过中波/长波的材料更加稀少。常见的宽波段红外材料主要为 Ge, Si, ZnSe, ZnS 以及硫系玻璃等。由于 Si 在长波窗口存在吸收, 不满足本系统对长波波段的需求。本系统用到的宽波段红外材料参数如表 2 所示。

表 2 宽波段红外材料

Tab. 2 Wide-band infrared materials

材料	透射范围 ( $\mu\text{m}$ )	折射率 ( $\lambda=4 \mu\text{m}$ )	阿贝数 ( $\lambda$ 为3~5 $\mu\text{m}$ )	阿贝数 ( $\lambda$ 为8~12 $\mu\text{m}$ )
Ge	2~12	4.0247	103.4	834.3
ZnSe	0.55~18	2.4331	176.9	58.0
ZnS(BROAD)	0.42~18.2	2.3468	109.63	22.9
AMTIR1	1~14	2.5144	196.7	115.2

双波段光学系统的色差校正是设计难点之一。由于不同材料在不同波段的色散特性不同, 系统不仅在波段间有色差而且各波段内自身也存在色差。因此, 有必要研究光学系统的色差消除和材料匹配问题。对于该红外双波段变焦光学系统的折反式部分, 前置红外物镜组采用卡塞格林反射镜组成像, 反射镜可以消球差, 并通过与准直透镜组和二次成像透镜组构成整个折反式结构以消除轴外像差, 最终实现像差校正。色差主要存在于折射式部分。折射式系统的主要色差是中波段和长波波段之间的位置色差, 当中/长波不同波段的中心波长分别为 $\lambda_M$ 和 $\lambda_L$ 时, 由空气中 $n$ 个薄透镜所构成的系统之间要实现消色差需要满足光焦度方程和消位置色差方程:

$$\sum_{i=1}^n h_i \Phi_i = \Phi \quad , \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_{i=1}^n h_i^2 \frac{\Phi_i}{v_{iM}} = 0 \quad , \quad (10)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_{i=1}^n h_i^2 \frac{\Phi_i}{v_{iL}} = 0 \quad , \quad (11)$$

其中,  $h_i$  为透镜组第  $i$  片透镜上近轴边缘光线的高度,  $\Phi_i$  为透镜组第  $i$  片透镜中心波长的光焦度,  $\Phi$  为透镜组的总光焦度,  $v_{iM}$  和  $v_{iL}$  分别为透镜组第  $i$  片透镜中波波段和长波波段的阿贝数。  $v_{iM}$  和  $v_{iL}$  可以等效表示为:

$$v_{iM} = \frac{n_{iMm} - 1}{n_{iMs} - n_{iMl}} \quad , \quad (12)$$

$$v_{iL} = \frac{n_{iLm} - 1}{n_{iLs} - n_{iLl}} \quad , \quad (13)$$

其中,  $n_{iMm}$ 、 $n_{iMs}$ 、 $n_{iMl}$  分别为第  $i$  片透镜中波波段中心波长和峰谷波长对应的折射率,  $n_{iLm}$ 、 $n_{iLs}$ 、 $n_{iLl}$  是第  $i$  片透镜长波波段中心波长和峰谷波长对应的折射率。根据一次像差理论, 光学系统的绝对光焦度越小, 系统的球像差和色差就越小。因此, 在确定不同波段中心波长的情况下, 系统绝对光焦度公式可表示为:

$$\Phi' = \sum_{i=1}^n |\Phi_i| \quad , \quad (14)$$

其中  $\Phi'$  是绝对光焦度, 通过设置适当的系统消色差和光焦度, 可以确保红外玻璃在满足消色差的同时, 计算出各镜片所贡献的光焦度。

### 3.4 冷阑匹配

红外探测器可以分为制冷型和非制冷型, 它们的主要区别在于无冷光阑<sup>[12]</sup>。由于制冷型探测器的灵敏度更高且更稳定, 因此该系统选择双色制冷型探测器。为了抑制杂光辐射, 仅允许红外辐射进入系统, 同时为了提高成像质量, 必须实现 100% 冷光阑匹配<sup>[13]</sup>。因此, 光学系统在设计阶段必须考虑出瞳与冷光阑的匹配, 这样就可以有效防止镜筒杂散光到达光敏面, 从而避免其对目标造成干扰<sup>[14]</sup>。本系统采用二次成像, 为了实现冷阑匹配, 将孔径光阑后置, 在短焦、中焦、长焦情况下光阑与冷阑重合, 对于超长焦情况,

在超长焦透镜组的合适位置放置一温阑来作为光阑以实现极窄视场成像。

## 4 结果与分析

### 4.1 设计过程及结果

系统设计过程主要可以分为初始结构计算和像差校正两个阶段。在初始结构计算阶段, 需要根据系统的焦距、探测器靶面、F 数等设计指标初步确定各透镜组的焦距和彼此之间的距离。根据上述相关双波段变焦系统理论, 在短、中焦情况下, 为了防止前置镜组的残余像差放大,  $M$  取 $-1$  倍左右, 则  $f'_s=32$  mm,  $f'_m=200$  mm。在长、超长焦情况下, 前置反射镜组焦距取 800 mm 时, 即  $f'_l=800$  mm, 口径  $D=200$  mm。根据物像交换原则, 为了使结构更加紧凑, 光焦度合理分配, 选取超长焦垂轴放大倍率  $\beta_{sl}=-1$ 、长焦垂轴放大倍率  $\beta_l=-1/2$ , 探测器窗口到像面距离为 20 mm, 即  $L_l=20$  mm。将以上数据代入式(4)~式(8)可求得其他相关参数, 进而得到该光学系统的初始结构。在像差校正阶段, 需在优化阶段对系统的光焦度、色差、外形尺寸、材料等参数进行约束。利用光学设计软件 ZEMAX 对光学系统建立多重结构, 并反复优化系统, 最终得到的光学系统结构如图 2 所示。

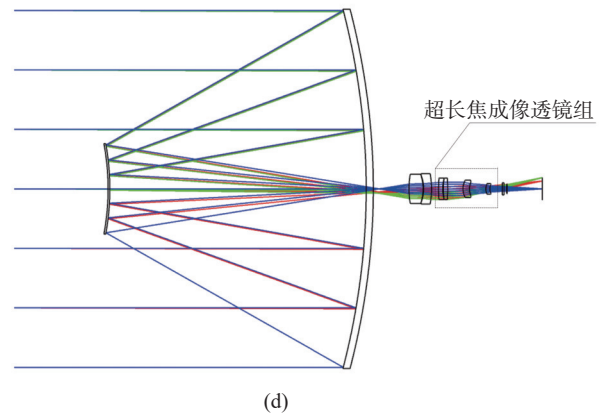
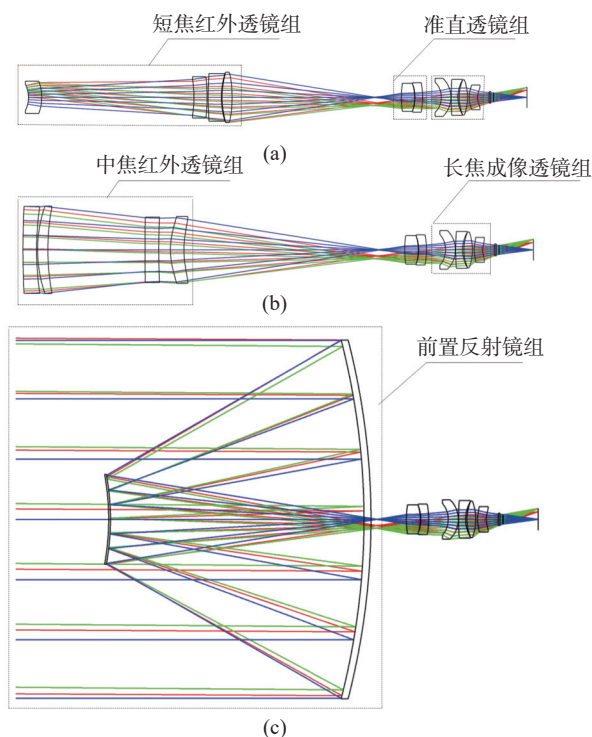


图 2 不同情况下的光学系统结构图。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦;(d)超长焦

Fig. 2 Structural diagram of optical system in this paper under different conditions. (a) Short focus; (b) middle focus; (c) long focus; (d) super long focus

该结构包括 3 个前光路系统, 1 个中继准直系统和 2 个后光路系统。通过合理分配光焦度、选用合适的材料、使用非球面等方法共同校正双波段像差<sup>[1]</sup>。前光路系统短焦红外透镜组的材料依次选用硒化锌、锗、硫化锌、硒化锌。它们对系统光焦度贡献分别为负、负、负、正。为了平衡像差, 4、7、8 面采用偶次非球面。中焦红外透镜组材料依次选用硫化锌、硒化锌、锗、硫系玻璃 AMTIR1, 光焦度贡献分别为负、正、负、正。为了平衡像差, 7、8 面采用了偶次非球面。前置反射镜组采用卡塞格林结构, 主镜是抛物面反射镜, 次镜为双曲面反射镜。准直透镜组是两片式结构, 它们对系统光焦度的贡献分别为正、负, 通过 AMTIR1 和锗两种材料平衡校正准直透镜组在中波波段和长波波段的像差。后光路系统长焦成像透镜组的光焦度贡献分别为正、负、正、负, 材料依次选用了 AMTIR1、硫化锌、硒化锌、锗, 1、7、8 面为偶次非球面。超长焦成像透镜组的光焦度贡献分别为负、正、正、负, 材料依次选用了硫化锌、AMTIR1、硒化锌、AMTIR1, 1、7、8 面为偶次非球面。

短焦红外透镜组、准直透镜组、长焦成像透镜组与探测器组成短焦光路系统。以短焦红外透镜组为基础, 当电机驱动短焦红外透镜组旋转切换至中焦红外透镜组时, 中焦红外透镜组、准直透镜组、长焦成像透镜组与探测器组成中焦光路系统。以中焦光路系统为基础, 当电机驱动中焦红外透镜组继续旋转切换至前置反射镜组时, 前置反射镜组、准直透镜组、长焦成像透镜组与探

测器组成长焦光路系统。以长焦光路系统为基础,当电机驱动长焦成像透镜组旋转切换至超长焦成像透镜组时,前置反射镜组、准直透镜组、超长焦成像透镜组与探测器组成超长焦光路系统。通过电机旋转切换不同镜组,能够实现短焦、中焦、长焦、超长焦的四档变焦。

#### 4.2 像质评价

光学系统主要的像质评价方式有调制传递函数(Modulation transfer function, MTF)、点列图<sup>[15]</sup>以及畸变图。MTF 反映系统对物体不同频率的传递能力<sup>[16]</sup>, MTF 越接近衍射极限,成像质量越好。点列图可反应光学系统像面上光线的弥散情况,点列图均方根值(Root mean square, RMS)半径越小,成像质量越好。畸变是一种轴外像差,它只反映图像的形状变化,不会对图像清晰度和系统分辨率造成影响。

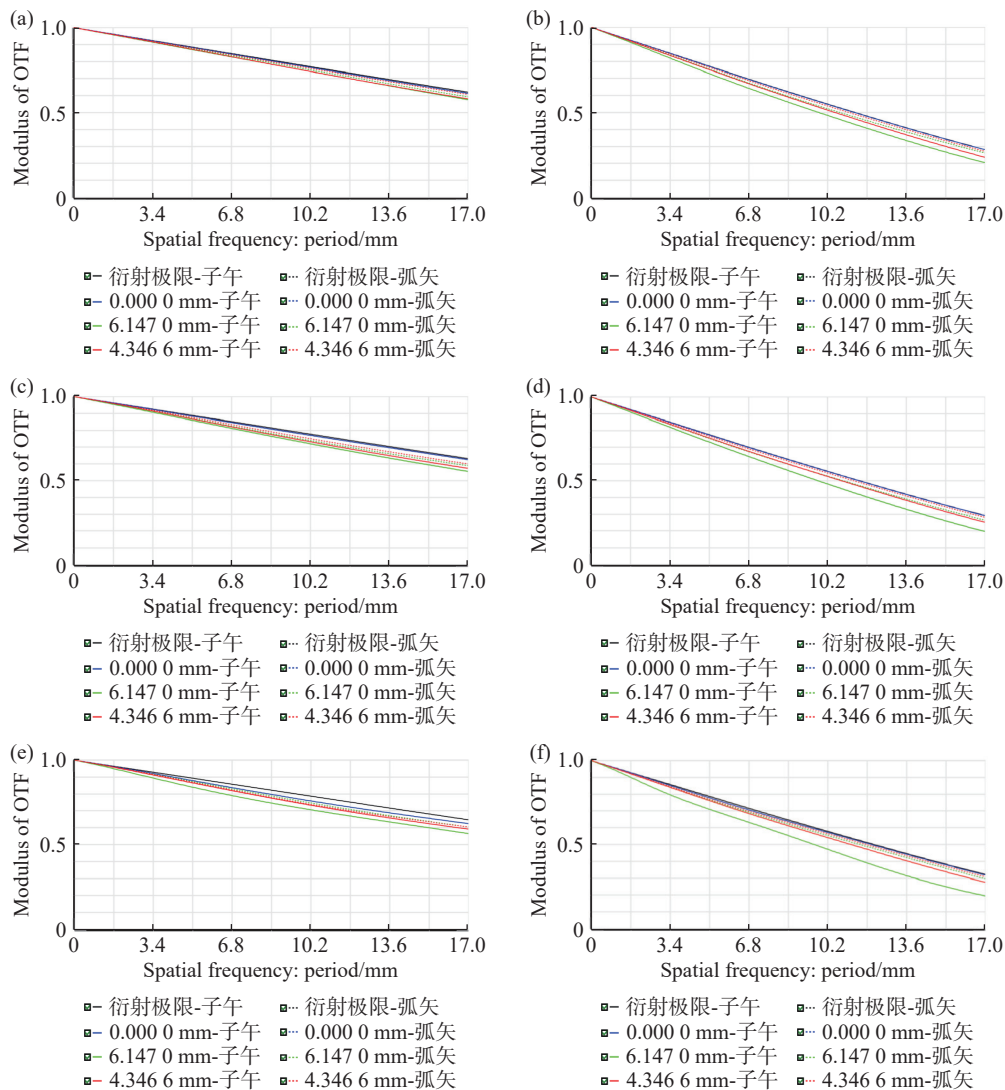
图 3(彩图见期刊电子版)为双波段变焦光

学系统在奈奎斯特频率(17 lp/mm)焦距分别为 32 mm、200 mm、800 mm、1600 mm 的 MTF 曲线。探测器采样频率和光学截止频率分别为:

$$f_c = \frac{1}{2 \text{ pixel}} \quad (15)$$

$$\nu_{\text{cutoff}} = \frac{1}{\lambda F/\#} \quad (16)$$

由于光学的空间分辨率受到探测器的奈奎斯特采样频率和光学系统自身截止频率的双重限制,故会出现奈奎斯特频率为 17 lp/mm, MTF 早早为 0 的情况。由 MTF 曲线图可以看出:中波波段短焦、中焦、长焦状态下,各视场 MTF 大于 0.55, 超长焦 MTF 大于 0.28;长波波短焦、中焦、长焦状态下 MTF 大于 0.2, 超长焦状态下各视场 MTF 始终接近衍射极限。这表明中波/长波双波段各变倍状态下各视场的 MTF 均接近衍射极限,成像质量良好。



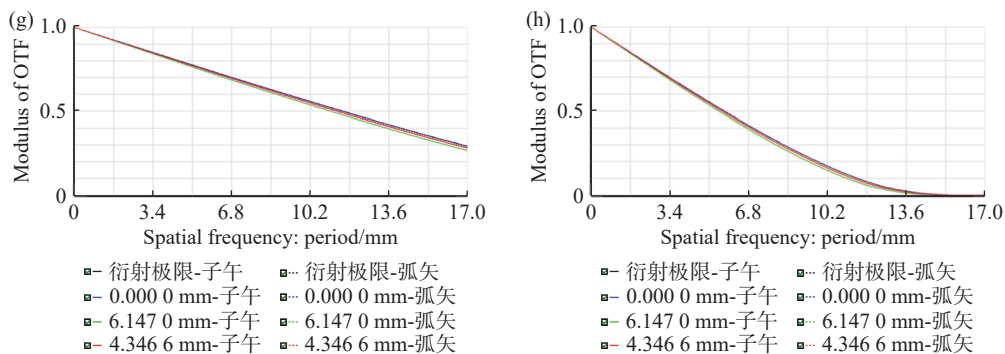
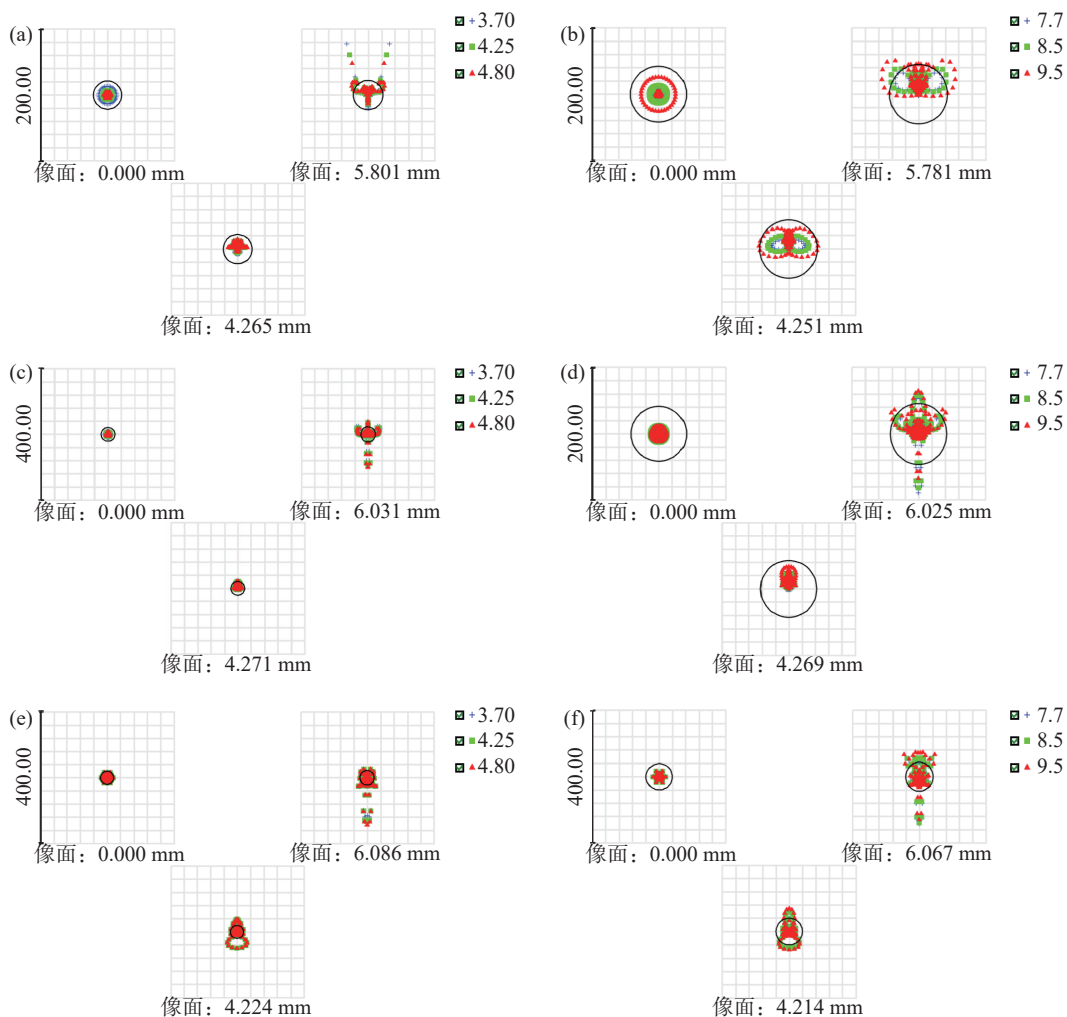


图 3 MTF 曲线。(a)中波短焦;(b)长波短焦;(c)中波中焦;(d)长波中焦;(e)中波长焦;(f)长波长焦;(g)中波超长焦;(h)长波超长焦

Fig. 3 MTF curves. (a) MWIR short focus; (b) LWIR short focus; (c) MWIR middle focus; (d) LWIR middle focus; (e) MWIR long focus; (f) LWIR long focus; (g) MWIR super long focus; (h) LWIR super long focus

图 4(彩图见期刊电子版)为双波段变焦光学系统 4 个焦距处的点列图,由图 4 可以看出各个

视场不同波段的 RMS 弥散斑直径都小于或接近艾里斑半径,满足设计要求。





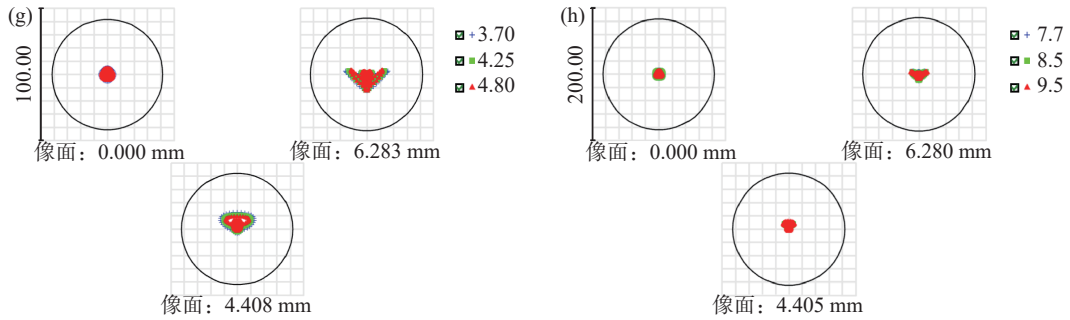


图 4 弥散斑点列图。(a)中波短焦;(b)长波短焦;(c)中波中焦;(d)长波中焦;(e)中波长焦;(f)长波长焦;(g)中波超长焦;(h)长波超长焦

Fig. 4 Diffuse speckle diagrams. (a) MWIR short focus; (b) LWIR short focus; (c) MWIR middle focus; (d) LWIR middle focus; (e) MWIR long focus; (f) LWIR long focus; (g) MWIR super long focus; (h) LWIR super long focus

图 5(彩图见期刊电子版)为光学系统畸变情况。可见:在极大视场( $f=32\text{ mm}$ )时,中波波段最大畸变为 7.49%,长波波段最大畸变为 7.48%;在大视场( $f=200\text{ mm}$ )时,中波波段最大畸变为 0.74%,长波波段最大畸变为 0.75%;在中视场( $f=800\text{ mm}$ )中波波段最大畸变为 4.96%,长波波段最大畸变为 4.90%;在小视场( $f=1600\text{ mm}$ )时,中波波段最大畸变为 1.59%,长波波段最大畸变为 1.60%。系统在双波段 4 个视场中的畸变对成像均无明显影响。

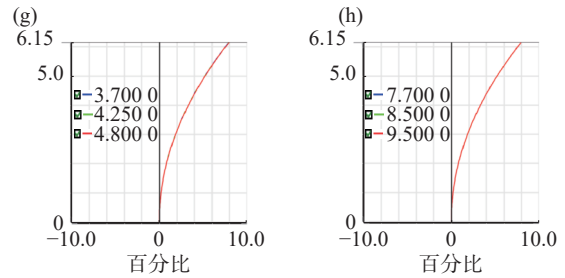


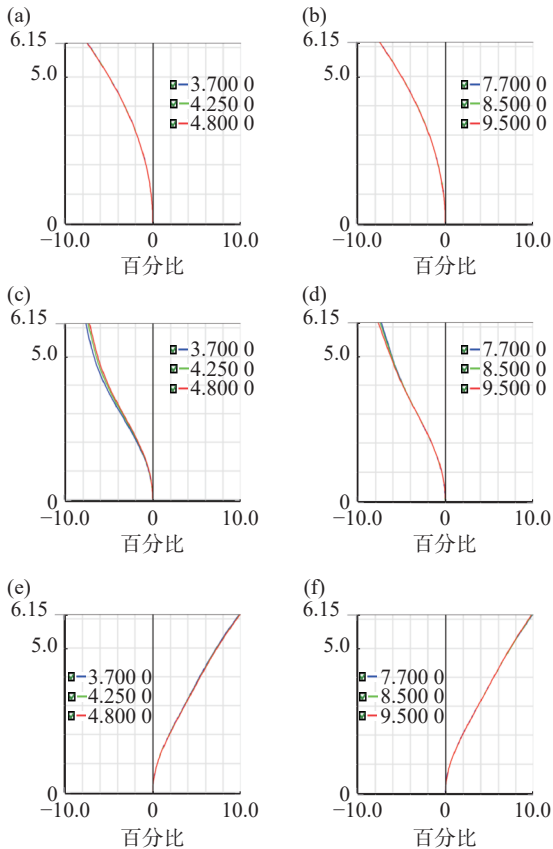
图 5 畸变曲线。(a)中波短焦;(b)长波短焦;(c)中波中焦;(d)长波中焦;(e)中波长焦;(f)长波长焦;(g)中波超长焦;(h)长波超长焦

Fig. 5 Distortion curves. (a) MWIR short focus; (b) LWIR short focus; (c) MWIR middle focus; (d) LWIR middle focus; (e) MWIR long focus; (f) LWIR long focus; (g) MWIR super long focus; (h) LWIR super long focus

### 4.3 系统能量分析

光学系统的主要作用是采集被测目标的反射或辐射能,然后将其传输到探测器靶面上。光学系统实质上被视为一种能量收集器。在这个过程中,发生了一些与目标点和接收点之间的相互作用现象。当接收点接收到的能量值不小于探测器所设置的最低值时,说明光学系统的成像质量好。同时,接收到的能量密度越高,光学系统对信号的响应能力越强,反应也更迅速<sup>[17]</sup>。

图 6 显示了该系统衍射圈入能量的分布情况,光学系统中波波段的能量接收率 80% 以上的能量都在一个直径为  $30\text{ }\mu\text{m}$  的探测器像元大小的圆内。光学系统长波波段的能量接收率除了超长焦情况下,70% 以上的能量都在直径为  $30\text{ }\mu\text{m}$  的圆内,长波波段超长焦光学系统接近 80% 的能量在直径为  $60\text{ }\mu\text{m}$  的圆内。结果表明各波段下能量汇聚程度均较高,所有视场的衍射能量都非常接



近衍射极限, 探测器像元接收到的能量相对集中,

满足系统的设计要求。

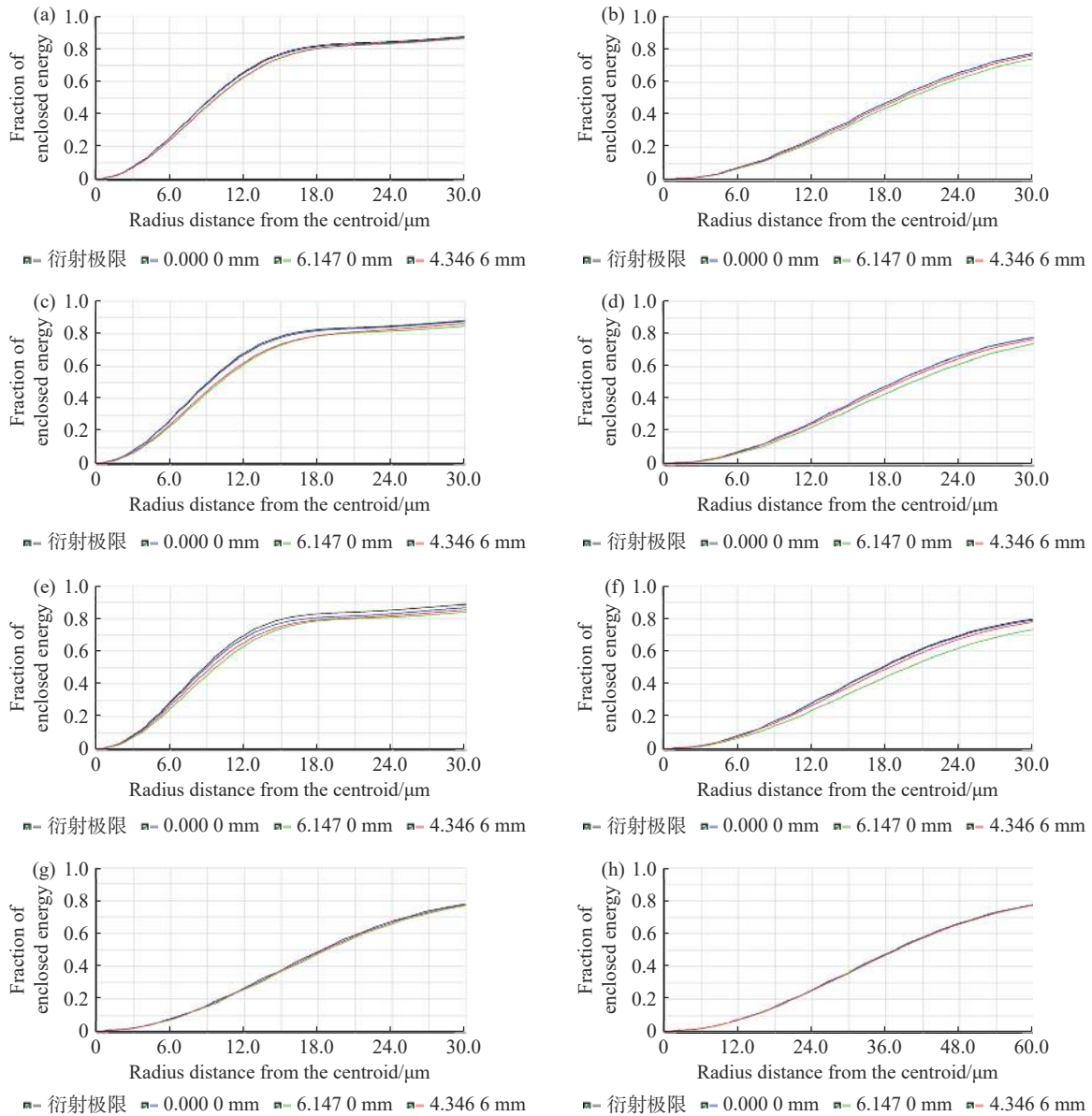


图 6 衍射圈入能量图。(a)中波短焦;(b)长波短焦;(c)中波中焦;(d)长波中焦;(e)中波长焦;(f)长波长焦;(g)中波超长焦;(h)长波超长焦

Fig. 6 Diffraction enclosed energy diagrams. (a) MWIR short focus; (b) LWIR short focus; (c) MWIR middle focus; (d) LWIR middle focus; (e) MWIR long focus; (f) LWIR long focus; (g) MWIR super long focus; (h) LWIR super long focus

### 4.4 冷反射现象及分析

冷反射是制冷型红外成像系统中一种普遍的杂光效应,是红外探测器看到的由自身的制冷器发出,经红外光学系统的某些透镜表面反射回来的自身冷像<sup>[18,19]</sup>。一般用特征量 YNI 和 I/IBAR 来反映冷反射的强弱<sup>[20]</sup>。YNI 为边缘光线在反射面的投射高度 Y,入射面折射率 N 和入射角度 I 的乘积,能较为全面地反映冷反射的大小。I/IBAR

为边缘光线入射角和主光线入射角的比值,表征冷反射随视场的变化情况。

对于制冷型红外双波段变焦系统,若要冷反射小,通常需要中波和长波的 YNI 与 I/IBAR 的绝对值至少有一个大于 1,但这并不是判断冷反射的必要条件。当某面两者的绝对值都小于 1 时,此面需要做进一步的冷反射分析。通过分析,系统在长焦时冷反射最强,表 3 给出了其中最

有可能产生冷反射的几个面的中/长波双波段的 YNI 和 I/IBAR 值。

表 3 冷反射严重面中波/长波 YNI 和 I/IBAR 值  
Tab.3 Cold reflection severe surface MWIR/LWIR YNI and I/IBAR values

表面	5	6	7	10	14
YNI	-0.811	-0.849	0.044	0.176	0.516
	-0.806	-0.845	0.047	0.185	0.522
I/IBAR	0.319	0.357	0.107	0.154	0.541
	0.320	0.357	0.129	0.169	0.550

在这项分析中,本文采用一种倒置系统反向追踪光线方法,将探测器作为冷光源,追踪从其发出的反向光线。由于篇幅有限,仅给出冷反射最严重的第 7 面的光线追迹示意图,如图 7 所示。

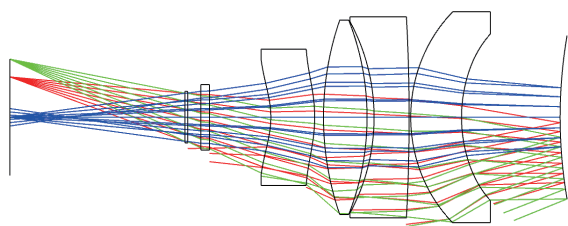


图 7 第 7 面冷反射光路追迹图

Fig. 7 Cold-reflected optical path trace on the 7th surface

经过第 7 面光线追迹后,轴上视场少量光线

聚焦到探测器,造成轻微的像面发散,第 5、6、10、14 面光线追迹后,光线反射后向外分散出去,没有聚焦到探测器上,表明该系统不会出现非常严重的冷反射。

## 5 结 论

本文为满足远距离、小目标航空探测的需求,设计了一套适用于制冷型 320 pixel×256 pixel 双色探测器的大变倍比红外双波段变焦光学系统。创新性地采用折射式结构和折反式结构相结合切换变焦的方式,实现了一款四视场变焦光学系统设计。该系统的 4 个焦距值分别为 32 mm、200 mm、800 mm 和 1600 mm,相对应的水平视场分别为 21.75°、3.52°、0.88°和 0.44°;变倍比为 50×。优化设计结果表明,中/长波双波段条件下各视场 MTF 在空间频率 17 lp/mm 下均接近衍射极限,点列图 RMS 弥散斑直径都小于或接近艾里斑半径,畸变最大不超过 7.5%,一个像元内能量接收率基本都在 70% 以上,冷反射不严重。该光学系统在中波和长波双波段均取得了良好的成像效果,符合设计要求。该双波段变焦光学系统具有大变倍比、变倍范围大、结构简单、可高速切换多视场等优点,可应用于航空光电侦察、探测等领域。

## 参考文献:

- [1] 白瑜, 廖志远, 廖胜, 等. 共孔径消热差红外双波段光学系统[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 268-277.  
BAI Y, LIAO ZH Y, LIAO SH, *et al.*. Infrared dual band athermal optical system with common aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 268-277. (in Chinese).
- [2] 聂怀乐, 毛珊, 赵建林. 制冷型折衍混合双波段红外光学系统无热化设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822025.  
NIE H L, MAO SH, ZHAO J L. Athermalization design of cooled refractive-diffractive hybrid dual-band infrared optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822025. (in Chinese).
- [3] 何红星. 分孔径三视场中波红外光学系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1757-1763.  
HE H X. MWIR optical system with dual-optical aperture and three fields of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1757-1763. (in Chinese).
- [4] VIZGAITIS J N. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7652: 76522E.
- [5] VIZGAITIS J N, HASTINGS A R JR. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6): 061306.
- [6] ZHANG B, CUI Q F, PIAO M X, *et al.*. Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2058-2067.
- [7] 党更明, 高明, 吕宏. 双波段共口径连续变焦光学系统设计[J]. *西安工业大学学报*, 2022, 42(6): 578-587.  
DANG G M, GAO M, LYU H. Design of a dual-band and common-aperture continuous zoom optical system[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2022, 42(6): 578-587. (in Chinese).

- [8] 曲贺盟,张新.高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计[J].中国光学,2014,7(4):622-630.  
QU H M, ZHANG X. Design of athermalized infrared optical system with high-speed switching and compact dual-FOV[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 622-630. (in Chinese).
- [9] 毛廷凯,赵振宇,张国华,等.红外双波段/双视场导引头的光学设计[J].红外与激光工程,2020,49(7):20190490.  
MAO Y K, ZHAO ZH Y, ZHANG G H, *et al.*. Optical design of infrared dual band/dual field of view seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190490. (in Chinese).
- [10] 栗洋洋,杨加强,彭晴晴,等.制冷型红外双波段广角无热化光学系统设计[J].激光与红外,2023,53(5):712-715.  
LI Y Y, YANG J Q, PENG Q Q, *et al.*. Design of cooled infrared dual-band wide angle athermal optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(5): 712-715. (in Chinese).
- [11] 陈洁,夏团结,杨童,等.长波红外与激光共孔径双模导引光学系统研究[J].光学学报,2023,43(12):1222001.  
CHEN J, XIA T J, YANG T, *et al.*. Research on long-wave infrared and laser common-aperture dual-mode guided optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1222001. (in Chinese).
- [12] 王嘉晨,李江勇.变F数红外光学设计方法[J].激光与红外,2022,52(6):909-913.  
WANG J CH, LI J Y. Infrared optical design method of variable F number[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(6): 909-913. (in Chinese).
- [13] 王希,彭晴晴,徐长彬,等.大视场大孔径制冷型红外光学系统设计[J].激光与红外,2023,53(10):1575-1578.  
WANG X, PENG Q Q, XU CH B, *et al.*. Refrigerated infrared optical system design with large aperture and wide field-of-view[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(10): 1575-1578. (in Chinese).
- [14] 李刚,杨晓许,张恒金,等.基于卡塞格林系统的红外制冷型长焦分档变焦光学系统的设计[J].中国光学,2014,7(2):293-300.  
LI G, YANG X X, ZHANG H J, *et al.*. Design of cooled infrared switch-zoom optical system with long effective focal length based on R-C system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 293-300. (in Chinese).
- [15] 王金沙,巩岩,高志山,等.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.  
WANG J SH, GONG Y, GAO ZH SH, *et al.*. Design of dual-band optical system with long back working distance and continuous zoom[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2122004. (in Chinese).
- [16] 杨明洋,杨洪涛,曲锐,等.80倍中波红外连续变焦光学系统设计[J].光子学报,2017,46(5):0522003.  
YANG M Y, YANG H T, QU R, *et al.*. Design of high ratio middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 0522003. (in Chinese).
- [17] 党更明,高明,范晨,等.红外双波段共焦复合孔径光学系统设计[J].光学学报,2023,43(8):0822019.  
DANG G M, GAO M, FAN CH, *et al.*. Design of infrared dual-band confocal composite aperture optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822019. (in Chinese).
- [18] 卜和阳,虞林瑶,田浩南,等.中波红外成像系统冷反射抑制[J].中国光学(中英文),2023,16(6):1414-1423.  
BU H Y, YU L Y, TIAN H N, *et al.*. Narcissus suppression of medium-wave infrared imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1414-1423. (in Chinese).
- [19] 李岩,张葆,洪永丰.大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J].光学学报,2013,33(4):0422005.  
LI Y, ZHANG B, HONG Y F, *et al.*. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422005. (in Chinese).
- [20] 单秋莎,谢梅林,刘朝晖,等.制冷型长波红外光学系统设计[J].中国光学(中英文),2022,15(1):72-78.  
SHAN Q SH, XIE M L, LIU ZH H, *et al.*. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. (in Chinese).

#### 作者简介:



张葆(1966—),男,吉林磐石人,博士,研究员,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像处理、光学设计、目标识别与跟踪的研究。E-mail: Zhangb@ciomp.ac.cn