

文章编号 1004-924X(2017)07-1757-07

# 分孔径三视场中波红外光学系统

何红星

(昆明物理研究所, 昆明 650223)

**摘要:** 为了克服单一光学通道长焦距与大视场之间的矛盾, 设计了一款分孔径大变倍比三视场中波红外光学系统。该光学系统采用分孔径技术, 包括小视场光学通道和中视场/大视场光学通道, 两个通道之间的转换通过切出切入 $45^\circ$ 放置的反射镜完成, 小视场光学通道采用二次成像, 仅采用6片透镜, 透过率高; 中视场/大视场光学通道采用三次成像; 小视场光学通道与中视场/大视场光学通道共用一片反射镜和中继组, 实现了共出瞳分入瞳——分孔径; 小视场长焦距为1 120 mm, 大视场短焦距为22.58 mm, 变倍比达到 $53\times$ ; 对小视场光学通道进行了三次立体折叠, 对中/大视场光学通道进行了一次折叠, 有效地对横向和纵向尺寸进行了控制, 外形包络在 $270\text{ mm}\times 217\text{ mm}\times 258\text{ mm}$ 范围内, 系统紧凑, 实现了兼具长焦距和大视场的三视场中波红外光学系统。设计及实验结果表明该光学系统像质良好, 满足热像仪使用要求。

**关键词:** 中波红外光学系统; 分孔径; 共出瞳分入瞳; 长焦距; 立体折叠; 三视场

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1757

## MWIR optical system with dual-optical aperture and three fields of view

HE Hong-xing

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

\* Corresponding author, E-mail: hxhe2000@163.com

**Abstract:** A MWIR optical system with three fields of view as well as dual-optical aperture and large zoom ratio was designed in order to overcome the conflict between long focal length and large field of view of single optical channel. The system was equipped with dual-optical aperture, which was composed of optical channels with a narrow field of view and a middle-wide field of view. The switch of the two channels was realized by cutting in and out a reflector inclined at  $45^\circ$  respectively. Using six lenses, the narrow field of view optical system was a re-imaging optical system with high transmission. The middle-wide field of view optical system was a thrice imaging optical system. The two channels share one mirror and a relay group, thus realizing common exit pupil and dual entrance pupils——dual-optical aperture. The long focal length of the narrow field of view is 1 120 mm, the short focal length of the wide field of view is 22.58 mm, and the zoom ratio reaches  $53\times$ . The three-dimensional dimensions of the optical system is effectively controlled within  $270\text{ mm}\times 217\text{ mm}\times 258\text{ mm}$  by thrice folding the narrow field of view optical system and once folding the middle-wide field of view optical system. The system is compact and realizes MWIR optical system with three fields of view as well as long focal length and large field of view. The design and experiment results indicate that image quality of the optical system is perfect, which meets the requirements of thermal infrared imagers.

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-04-14.

基金项目: 预研项目支持 (No. LZ0102040101)

**Key words:** MWIR optical system; dual-optical aperture; common exit pupil and dual entrance pupil; long focal-length; three-dimensional folding; three fields of view

## 1 引言

随着红外成像技术的发展及其应用范围的拓展,多视场和连续变焦红外系统正广泛应用于侦查、前视红外及目标探测和跟踪等领域,虽然连续变焦红外系统能实现对目标的连续观察,但其光轴一致性、成像质量及视场切换的便捷性不及多视场红外系统,因此机载观瞄光电设备主要采用多视场红外系统。近年来,国内外在多视场红外系统方面进行了大量研究,其中增大观察距离、减小系统的质量及复杂度一直以来都是这些研究的热点<sup>[1-2]</sup>。

目前,热像仪作为一种机载观瞄红外系统,既要具有远距离观察瞄准目标的能力,还要具有大范围搜索探测目标的能力。然而,这两种能力对热像仪光学系统的设计要求截然相反,前者要求光学系统具有长焦距<sup>[3-6]</sup>,即小视场;而后者却要求光学系统具有短焦距,即大视场。在单一光学通道中,长焦距和大视场是光学系统设计的两种极端情况,不容易同时具备。增大焦距意味着增大光学系统的孔径和体积,光学系统孔径像差增大;而视场增大则意味着光学系统孔径增大,轴外像差急剧增大,冷反射也急剧增大。Vizgaitis 等人设计的光学系统焦距达到了 611 mm<sup>[1-2]</sup>,为了实现小型化和变焦距,分别采用全反射式望远物镜叠加折射式物镜的光学结构形式,和切入切出反射镜实现变倍和移动透镜变倍结合的方式,采用变  $F$  数,即超小视场与其余视场  $F$  数不一致。付艳鹏等设计的光学系统采用机械补偿、三组元变倍、三次成像的光学结构形式,其焦距达到了 750 mm<sup>[3]</sup>。骆守俊和江伦等人设计的光学系统都采用机械补偿的光学结构形式,焦距分别达到了 600 mm 和 700 mm<sup>[4-5]</sup>。不过,上述方法实现超长焦距和大视场均存在局限性。为了克服单一光学通道不容易具备长焦距和大视场的矛盾,本文提出了分孔径的三视场中波红外光学系统,采用双通道<sup>[7-8]</sup>分孔径的光学结构形式,大大减小了系统体积,提高了系统长焦距与系统包络的比值,即采用较小的体积获得较远的作用距离,提高热

像仪的性能体积比,给出了分孔径三视场中波红外光学系统的设计结果,实现了 1 120 mm 长焦距和 24°大视场的三视场中波红外光学系统。该系统成像质量优良、结构紧凑。

## 2 系统指标及设计原理

### 2.1 主要技术指标

根据热像仪整机的要求,光学系统的主要技术指标如下:(1)工作波段为中波红外波段 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ;(2)视场:大视场(WFOV)24°×19.2°,中视场(MFOV)3.7°×2.96°,小视场(NFOV)0.49°×0.39°;(3) $F$  数为  $F/5.6$ ;(4)探测器为中波红外 640×512 FPA 探测器,像元尺寸为 15×15  $\mu\text{m}$ ;(5)外形包络为 270 mm×217 mm×258 mm。

### 2.2 设计原理

分孔径三视场光学系统的原理及方案如图 1 所示。该系统包括小视场光学通道和中视场/大视场光学通道,两个通道的成像原理分别如图 2、图 3 所示。

三视场光学系统的变倍(视场转换)方式分为径向切入/切出变倍组变倍和轴向移动变倍组变倍两种。其中,切入/切出变倍方式通过不同变倍镜组切入/切出光路实现视场的转换,轴向变倍方式通过变倍镜组轴向移动实现视场的转换。分孔径三视场光学系统综合两种变倍方式,采用一片反射镜切出小视场光路并接入小视场光学系统的物镜部分,实现小视场光学系统;该反射镜切入小视场光路,对小视场物镜光路进行遮挡并接入大/中视场光学系统的物镜部分,实现大/中视场光学系统,大视场至中视场之间的切换采用机械补偿原理通过轴向移动的透镜组实现,也就是说,反射镜切出/切入小视场光路实现小视场光学通道与大/中视场光学通道的切换,即分孔径或合孔径,同时实现小视场与大/中视场之间的视场转换,即变倍。

变倍过程中小视场光学通道和中视场/大视场光学通道共用中继组光路,即合孔径;前段物镜光路为两支光路,即分孔径,两支光路之间的切换(分

孔径或合孔径)通过切入切出一片反射镜完成。反射镜之后中继组光路为合孔径光路,反射镜之前两支物镜光路为分孔径光路。切入切出的反射镜尺寸不宜太大,尺寸大将导致运动机构过大,不利于小型化和轻量化。这种共用中继组物镜的方式克服了长焦距大口径与短焦距大视场之间的矛盾,两支光路可分开独立设计,分别将两支光路的像差校正到最好,并分别控制两支光路的物镜口径,最大限度地减少镜片数量和压缩系统的空间体积,获得像质优良、体积小的光学系统。

小视场光学通道采用二次成像方式,可同时控制光学系统的横向和纵向尺寸以及出瞳与探测器冷屏匹配,成像原理如图 2 所示。如图 1 所示,小视场光学通道包括透镜  $L_1 \sim L_6$ 、反射镜  $R_1 \sim R_3$ 。中视场/大视场光学通道采用三次成像方式,可同时控制入瞳和出瞳以及一次像和二次像之间透镜的位置及尺寸,成像原理如图 3 所示,其组成包括透镜  $L_4 \sim L_{12}$  和反射镜  $R_4$ 。两个通道共用中继透镜组,它由  $L_4 \sim L_6$  构成的中继组和探测器组成。两个通道之间的转换通过切入切入  $45^\circ$  放置的反射镜  $R_4$  完成。中视场/大视场光学通道的中视场和大视场之间的变倍采用机械补偿

方式,通过轴向移动变倍调焦补偿组  $L_9$  和  $L_{10}$  来实现, $L_9$  和  $L_{10}$  位于 A 位置时为中视场, $L_9$  和  $L_{10}$  位于 B 位置时为大视场。控制小视场光学系统通道的入瞳位于小视场大物镜( $L_1$ )上,出瞳位于探测器的冷屏上;中视场/大视场光学通道的入瞳位于中/大视场大物镜( $L_{12}$ )附近,出瞳位于探测器的冷屏上,由此实现了共出瞳分入瞳,即分孔径。该分孔径技术可同时控制小视场光学通道大物镜口径和中/大视场物镜口径,以及两个光学通道体积、像差以及其它技术指标。

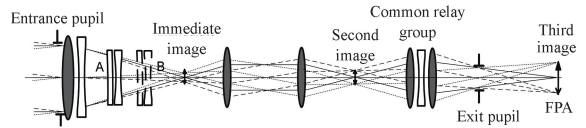


图 3 中视场/大视场光学通道成像原理图

Fig. 3 Imaging principle of MWIR optical system with middle and wide fields of view

本文分别独立设计小视场光学系统和 中/大视场光学系统,小视场光学通道仅采用 6 片透镜,透过率高;小视场光学系统的长焦距为 1 120 mm,大视场的短焦距为 22.58 mm,光学系统变倍比达到  $53\times$ 。对小视场光学通道进行三次立体折叠,对中/大视场光学通道进行一次折叠,控制外形包络在指标范围内,由此可实现兼具长焦距和大视场的三视场中波红外光学系统。

### 3 设计结果与分析

#### 3.1 设计结果

基于上述原理设计光学系统,从初级像差理论<sup>[9]</sup>出发分配并计算各子模块的初始结构参数,利用 ZEMAX 和 CODE-V 软件,基于光学评价函数等技术进行优化设计<sup>[10]</sup>以及像差校正,得到满足技术指标的三视场中波红外光学系统。光学系统设计包括分光路和合光路,即分别设计小视场光路和大/中视场光路,保持其中一支光路的中继组不变,反复优化迭代使两支光路的成像质量、外形尺寸、体积等指标满足要求,最终利用反射镜进行折叠完成合光路。

光学系统设计结果如图 4 所示,该光学系统 3 个视场对应的焦距设计值分别为 1120.2, 149.01, 22.57 mm,视场角分别为  $0.49^\circ \times 0.39^\circ$ ,

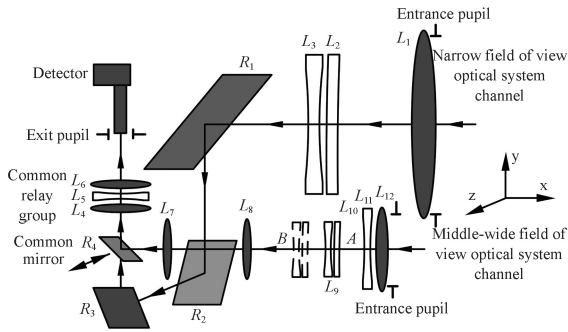


图 1 分孔径三视场中波红外光学系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of MWIR optical system with dual-optical apertures and three fields of view

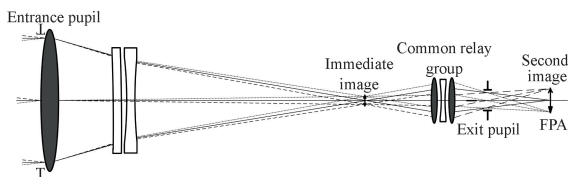


图 2 小视场光学通道成像原理图

Fig. 2 Imaging principle of MWIR optical system with narrow field of view

3.69°×2.95°,24°×19.2°。其中,小视场光学通道仅有6片透镜,透过率高,能够保证远距离探测识别具备足够的能量;中视场/大视场光学通道共计9片透镜;小视场光学通道与中视场/大视场光学通道共用中继组3片透镜、一片视场切换反射镜。

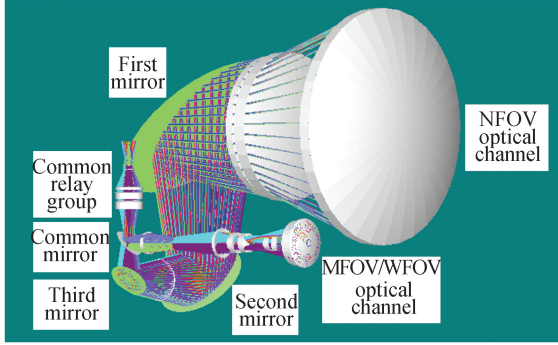


图 4 分孔径三视场中波红外光学系统图

Fig. 4 Design plot of MWIR optical system with dual optical apertures and three fields of view

小视场光学通道  $L_1$  口径与入瞳口径一致,得到了有效控制, $L_2$  和  $L_3$  的口径大大减小,大/中视场透镜的口径都较小,反射镜的口径也大大减小,整个光学系统得到了轻量化。

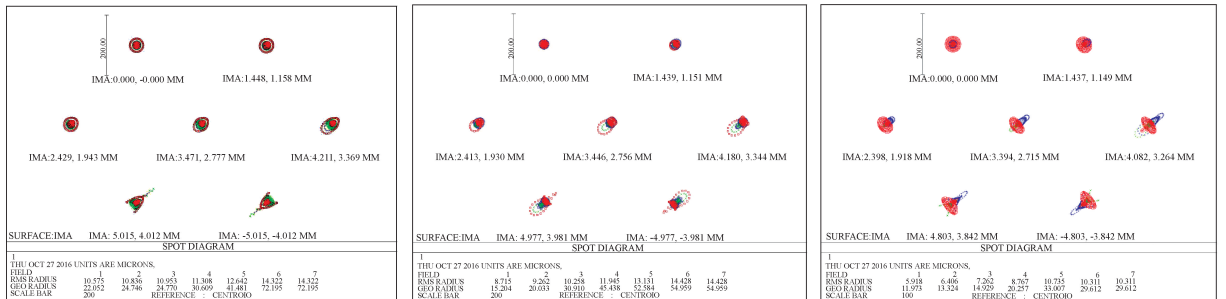
在-40~+70℃小视场光学系统通过材料搭配实现了消热差,中/大视场光学系统通过移动变倍补偿组实现了消热差,小视场光学系统无运动部件,大大提高了光轴的稳定性,保证了瞄准的精度。 $L_1$  材料为硅, $L_2$  材料为锗, $L_3$  材料为 Amtir-1, $L_4$ 、 $L_6$ ~ $L_{10}$  和  $L_{12}$  的材料为硅, $L_5$  材料为硫化锌, $L_9$  和  $L_{11}$  的材料为锗; $R_1$  和  $R_2$  的材料为铍, $R_3$  和  $R_4$  的材料为钛合金;镜筒材料为铝合金。

整个光学系统只包括小视场和中视场/大视场两个光学通道之间的转换机构和 中视场/大视场之间的视场转换结构两组变倍运动机构,系统得到了极大的简化。光学系统的3个视场依据需要进行切换,满足不同的功能,3个视场成像的位置都在探测器的焦面位置,即探测器只有一个,切换到对应视场时输出对应视场的图像。小视场光学通道进行了3次立体折叠,中视场/大视场光学通道进行了一次折叠,有效地对横向和纵向尺寸进行了约束,光学系统的外形包络在 270 mm×217 mm×258 mm 的范围内,系统紧凑。

### 3.2 像质评价

采用点列图及光学传递函数评价光学系统的成像质量。常温 20℃ 条件下光学系统的点列图如图 5 所示,图 5(a) 图为小视场光学系统点列图,均方根弥散斑半径最大值为 14.32 μm,几何弥散斑半径最大值为 72.12 μm,75% 的能量落在探测器像元之内,满足成像要求;图 5(b) 为中视场光学系统的点列图,均方根弥散斑半径最大值为 14.43 μm,几何弥散斑半径最大值为 54.96 μm,76% 的能量落在探测器像元之内,满足成像要求;图 5(c) 为大视场光学系统点列图,均方根弥散斑半径最大值为 10.31 μm,几何弥散斑半径最大值为 29.61 μm,75% 的能量落在探测器像元之内,满足成像要求。

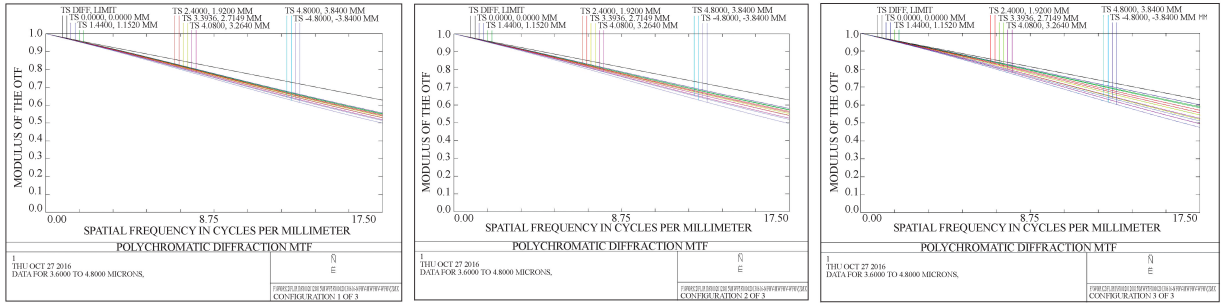
常温 20℃ 光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function MTF) 如图 6 所示,低温(-40℃)下光学系统 MTF 如图 7 所示,高温(+70℃)下光学系统 MTF 如图 8 所示。由图可知,在 16.67 lp/mm(对应探测器的两个线对)处,光学系统 MTF 大于 50%,接近衍射极限。



(a) 小视场 (a) NFOV (b) 中视场 (b) MFOV (c) 大视场 (c) WFOV

图 5 光学系统点列图

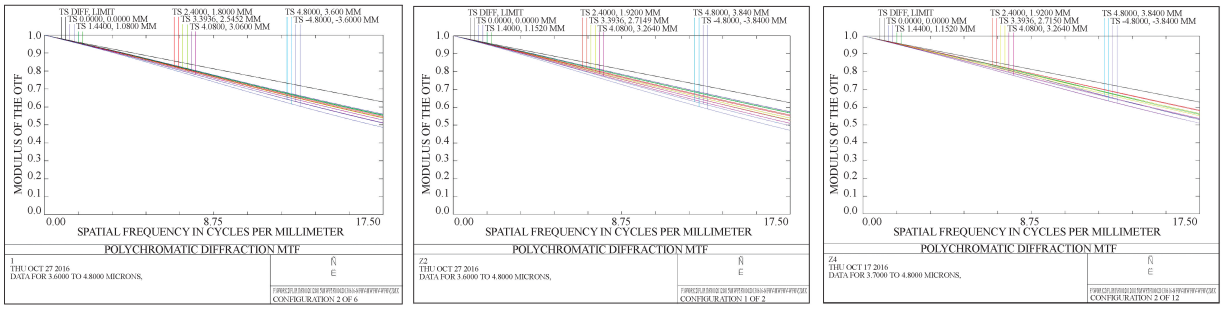
Fig. 5 Spot diagrams of MWIR optical system with three fields of view



(a)小视场 (a)NFOV (b)中视场 (b)MFOV (c)大视场 (c)WFOV

图 6 常温下光学系统 MTF

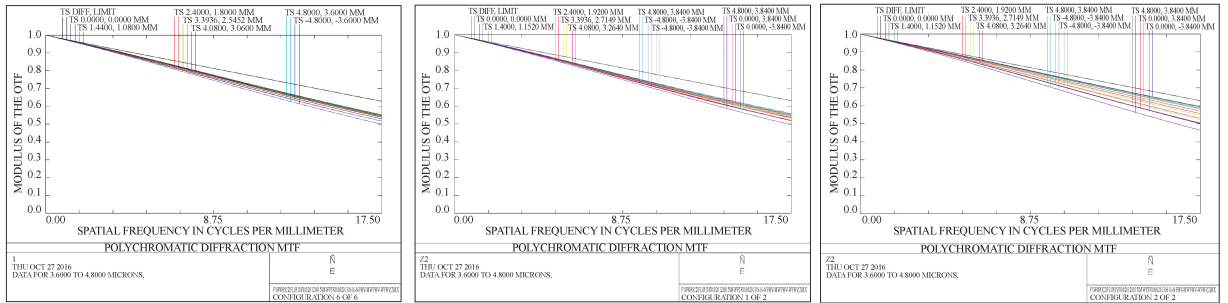
Fig. 6 MTFs of MWIR optical system with three fields of view at room temperature



(a)小视场 (a)NFOV (b)中视场 (b)MFOV (c)大视场 (c)WFOV

图 7 -40 °C 光学系统 MTF

Fig. 7 MTFs of MWIR optical system with three fields of view at -40 °C



(a)小视场 (a)NFOV (b)中视场 (b)MFOV (c)大视场 (c)WFOV

图 8 +70 °C 光学系统 MTF

Fig. 8 MTFs of MWIR optical system with three fields of view at 70 °C

### 3.3 冷反射分析

冷反射是评价光学系统性能的一个重要指标。冷反射越小,热像仪的成像质量越好。经仿真分析,光学系统的小视场和中视场几乎没有冷反射,只有大视场存在少量的冷反射。这里用光

线追迹分析大视场光学系统的冷反射,确定冷反射在像面上的相对照度分布及其所占的视场范围。然后,采用 YNI 值对冷反射的影响进行初步判定,定量分析通过计算冷反射在像面上引起的等效温差来确定冷反射的影响。冷反射引起的等

效温差<sup>[11]</sup>为:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_s R}{(S_N/S_1)^2}, \quad (1)$$

其中: $\Delta T$ 为冷反射引起的等效温差, $\Delta T_s$ 为场景与探测器的温差, $R$ 为表面反射率, $S_N$ 为冷反射像点直径, $S_1$ 为正常像点直径。

假设场景温度为 300 K,透镜表面反射率为 0.015。经计算冷反射像点直径为  $1\ 271\ \mu\text{m}$ ,正常像点直径为  $18.85\ \mu\text{m}$ ,从而得到  $\Delta T=0.000\ 73\ \text{K}$ ,远小于最小可分辨温差  $0.05\ \text{K}$ ,说明采用分孔径技术可有效控制冷反射。

## 4 实验验证

应用装配该分孔径大变倍比三视场中波红外光学系统的热像仪对远距离三角塔进行成像实验,结果如图 9 所示。从成像实验结果可以看出,图像清晰、成像质量较好,无冷反射引起的黑斑。

然后采用热像仪进行了最小可分辨温差(MRTD)测试,在典型频率处的测试结果如下: $\text{MRTD}(4.67\ \text{cyc/mrad})=0.065\ \text{K}$ , $\text{MRTD}(9.33\ \text{cyc/mrad})=0.094\ \text{K}$ , $\text{MRTD}(14\ \text{cyc/mrad})=$



(a)大视场  
(a)WFOV



(b)中视场  
(b)MFOV



(c)小视场  
(c)NFOV

图 9 三视场中波热像仪成像实验

Fig. 9 Images of MWIR imager with three fields of view

$0.25\ \text{K}$ ,  $\text{MRTD}(18.67\ \text{cyc/mrad})=0.595\ \text{K}$ ,  $\text{MRTD}(22.40\ \text{cyc/mrad})=0.95\ \text{K}$ ,  $\text{MRTD}(26.13\ \text{cyc/mrad})=1.26\ \text{K}$ ,其中  $18.67\ \text{cyc/mrad}$ 为特征频率,对应探测器的两个线对,从测试结果看,热像仪满足设计要求。

## 5 结论

分孔径大变倍比三视场中波红外光学系统采用分孔径技术,包括小视场光学通道和中视场/大视场光学通道,两个通道之间的转换通过切出切入  $45^\circ$ 放置的反射镜完成,两个通道共用中继组和探测器。小视场光学通道采用二次成像,仅采用 6 片透镜,透过率高;中视场/大视场光学通道采用三次成像;对小视场光学通道进行了三次立体折叠,对中/大视场光学通道进行了一次折叠,有效地对横向和纵向尺寸进行了控制,外形包络在  $270\ \text{mm}\times 217\ \text{mm}\times 258\ \text{mm}$ 范围内,系统紧凑、体积小,实现了兼具长焦距和大视场的三视场中波红外光学系统。光学系统的小视场可用于远距离观察瞄准目标,大视场可用于大范围搜索观察目标,中视场可用于中等范围搜索观察目标。设计及实验结果表明,该光学系统像质优良,满足热像仪的使用要求,是长焦距大视场中波红外光学系统一种较好的解决方案。

该光学系统是一个高性能的三视场中波红外光学系统,已应用到热像仪整机,在常温、低温、高温下的成像质量良好、性能稳定,可广泛用于机载、舰载、车载、地基等远程探测高性能热像仪。

## 参考文献:

- [1] VIZGAITIS J. Third generation infrared optics [J]. *SPIE*, 2008, 6940: 69400S.
- [2] VIZGAITIS J, MILLER J, HALL J, *et al.*. Third-generation FLIR demonstrator [J]. *SPIE*, 2008, 6940: 69400U.
- [3] 付艳鹏, 金宁, 李训牛, 等. 机载新颖连续变焦中波红外光学系统设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(4): 309-312, 324.  
FU Y P, JIN N, LI X N, *et al.*. Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(4): 309-312, 324. (in Chinese)
- [4] 骆守俊, 何伍斌, 李文虎, 等. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2117-2122.  
LUO SH J, HE W B, LI W H, *et al.*. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2117-2122. (in Chinese)
- [5] 江伦, 黄玮. 长焦距大变倍比中波红外变焦距系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1867-1871.  
JIANGL, HUANG W. Design of long focal length large zoom ratio MWIR zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1867-1871. (in Chinese)
- [6] 白玉琢, 木锐, 马琳, 等. 超长焦距红外双视场光学系统设计[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 631-637.  
BAI Y ZH, MU R, MA L, *et al.*. Design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 631-637. (in Chinese)
- [7] 李瑞昌, 邹刚毅, 王臣臣, 等. 可见光与红外一体化光学系统设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522002.  
LI R CH, ZOU G Y, WANG CH CH, *et al.*. Optical design of visible and infrared integrative camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522002. (in Chinese)
- [8] 刘凯, 陈荣利, 常凌颖, 等. 共口径双通道红外扫描成像光学系统[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 395-401.  
LIU K, CHEN R L, CHANG L Y, *et al.*. Common-aperture dual-channel infrared scanning imaging optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 395-401. (in Chinese)
- [9] 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010: 845-855.  
LI J ZH. *Handbook of Optics* [M]. Xi'an: Publishing House of Shanxi Science and Technology, 2010: 845-855. (in Chinese)
- [10] SMITH W J. *Modern Lens Design* [M]. New York: McGraw-Hill, 2005: 11-68.
- [11] COUTURE M E. Challenges in IR optics [J]. *SPIE*, 2001, 4369: 649-661.

## 作者简介:



何红星(1977—),男,研究员级高工,博士,主要从事红外光学及热像仪总体技术的研究。E-mail: hxhe2000@163.com