

文章编号 1004-924X(2024)12-1824-12

## 基于液晶光栅的大视场红外凝视成像系统设计

赵思霖<sup>1,2,3</sup>, 穆全全<sup>1,3\*</sup>, 李大禹<sup>1,3</sup>

- 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
- 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 10049;
- 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**分视场成像的中波红外凝视成像系统为解决红外光学系统很难同时满足大视场、高分辨率的问题,将多个子视场分时成像于同一个探测器中,然而目前该系统还存在着无法实现无缝拼接和液晶快门阵列结构复杂的缺点。本文在此基础上提出了一种新的基于液晶光栅的大视场中波红外凝视成像系统设计。通过在一次像面处加入矩形视场光阑并将其后移,使原有的 $0.28^\circ$ 的视场缺失减小至 $0^\circ$ ,实现图像的无缝拼接。快门阵列采用双光栅快门结构,使其无需复杂的位置关系,并将液晶快门阵列放置于平行光路中,可消除其所引入的色差与偏振带来的主光线间纵向位移影响。采用所提出的方法,设计出了F数为3.25,焦距为130 mm,波长范围为 $4.25\sim 4.75\ \mu\text{m}$ ,全视场对角线为 $10.8^\circ$ 的红外凝视成像系统,其各子视场单元MTF均为 $0.3@30\ \text{lp/mm}$ 以上。最终通过仿真结果表明,该系统具有分视场成像的功能,且成像质量良好。

**关键词:**光学设计;冷反射;液晶光栅;视场分割

中图分类号:O439 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243212.1824

## A large field of view infrared staring imaging system based on liquid crystal grating

ZHAO Silin<sup>1,2,3</sup>, MU Quanquan<sup>1,3\*</sup>, LI Dayu<sup>1,3</sup>

- State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  - Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China;
  - Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- \* Corresponding author, E-mail: muquanquan@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To solve the problem of difficulty for infrared optical systems to simultaneously meet the requirements of large field of view and high resolution. the mid wave infrared staring imaging system with split field of view imaging images multiple sub fields of view at different times in the same detector. However, the system still has the drawbacks of inability to achieve seamless splicing and complex structure of

收稿日期:2024-02-28;修订日期:2024-04-09.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFB3600300);国家自然科学基金(No. 11974345, No. 61975202, No. U2241224)

liquid crystal shutter arrays. On this basis, this article proposed a new design of a large field of view mid wave infrared staring imaging system based on liquid crystal polarization gratings. By adding a rectangular stop at the first image plane and moving it backwards, the original  $0.28^\circ$  field of view loss was reduced to  $0^\circ$ . It achieved seamless splicing. The shutter array adopted a dual grating shutter structure, which eliminates the need for complex positional relationships. The liquid crystal shutter array was placed in a parallel light path to eliminate the longitudinal displacement between the main light rays caused by chromatic aberration and polarization. Using the proposed method, a mid-wave infrared staring imaging system was designed with an F-number of 3.25, a focal length of 130 mm, a wavelength range of  $4.25\ \mu\text{m}$  to  $4.75\ \mu\text{m}$ , and a full field of view diagonal of  $10.8^\circ$ . The MTF of each sub field of view unit is above  $0.3@30\ \text{lp/mm}$ . The final simulation results show that the system has the function of split field imaging and fine imaging quality.

**Key words:** optical design; narcissus; liquid crystal grating; field of view segmentation

## 1 引言

在自然界中,温度高于绝对零度的物体均会对外产生不同程度的红外辐射。红外光学系统具有穿透烟、雾、尘及识别伪装与全天候远距离观测的能力,因此发展迅速,被广泛应用于遥感、军事、医学等领域。随着红外焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)探测器分辨率不断提高,非拼接式红外焦平面阵列探测器可达到 $2\text{K}\times 2\text{K}$ 的分辨率<sup>[1]</sup>。然而中波红外(Medium Wavelength Infrared, MWIR)光学系统仍很难获得同时满足大视场(Field of View, FOV)和高分辨率的图像<sup>[2-7]</sup>。针对上述问题,国内外学者先后提出了多种新的成像体制,以期突破探测器的制约。2004年, Krogmann 等人利用微光电机机械结构提出了一种红外微光学技术,将整体视场划分为多个高分辨率的子视场,再将这些子视场顺序成像到同一个焦平面阵列上<sup>[8]</sup>。为了选择特定的视场,在中间像面处加入图像控制装置,该装置由两个微透镜阵列组成,通过压电陶瓷驱动。这种成像系统虽然可以得到大视场高分辨率图像,但其结构复杂,需要特殊的微光电机机械结构作为开关,且需要复杂的自适应控制方案,难以应用于实际。2012年 Hugh Masterson 等人设计出一种偏振无关的步进式光学系统<sup>[9-10]</sup>,通过在7个孔径的亚毫秒级的快速随机切换,获得不同的视场并进行拼接,无需机械调控,而是利用液晶偏振光栅(Liquid Crystal Polarization Grating, LCPG)的光学特性作为开关,这种方式解决了机械结构复杂的问题。然而,该设计中还存在几方面问题:(1)所用

快门设计为圆形独立孔径拼接结构,导致各个子视场与子视场之间存在缺失,无法实现无缝拼接;(2)液晶快门结构复杂,包含有4片光栅器件和2片主动式波片,且对元件间位置有较严格的要求。

为此,本文提出了一种新的系统设计方案,可以有效避免上述问题,实现无缝拼接大视场成像;文章第二部分详细介绍了系统的总体设计与参数优化;第三部分针对冷反射抑制,提出了消除的方法。最后对本文的主要创新点进行了总结与展望。

## 2 成像系统光学设计

本文设计的分视场中波红外凝视成像系统,光线从左至右依次通过前镜组、中继镜组、液晶快门阵列及后镜组,最后进入制冷型红外探测器成像。整体系统采用二次成像方式。所设计的中波红外凝视系统光学结构如图1所示,快门阵列中具有7个孔径,每个孔径具有不同的视场且由液晶快门阵列电控开关,其中不同颜色的光线代表通过不同孔径的光线(彩图见期刊电子版)。

前镜组为像方远心结构,使各视场主光线均平行于光轴;中继镜组由矩形场镜阵列和准直透

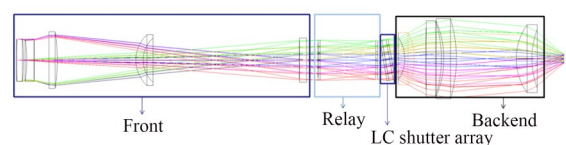


图1 红外凝视成像系统光学结构图

Fig. 1 Structure of the MWIR staring imaging system

镜阵列组成,其中矩形场镜阵列放置于一次像面后适当位置;场镜作为视场光阑实现矩形视场分割,同时将后方光线高度降低,避免后端光学元件造成光束遮挡。其位置的后移,可有效避免场镜阵列间的视场拼接缺失;准直镜阵列放置于系统前端结构的出瞳处,使各点成像光束呈平行光出射;液晶快门阵列实现对各个子视场单元快速开关切换,放置于准直透镜阵列后方的平行光路中,可以使其产生的色差对整体光学系统所带来的影响基本消除,从而便于对系统的色差进行矫正;后镜组为反远距结构,实现后端结构紧凑的同时,具有短焦、长工作距离的特点,可将各个子视场成像至同一焦平面处。之后的小节将对光学系统、液晶快门阵列进一步进行说明。

### 2.1 前镜组设计

前镜组为像方远心结构,将大视场分为多个不同的小视场,使进入后方的各个子视场单元的主光线平行,实现各个视场彼此分割,如图 2 所示。其远心度为 0.13,各个光阑孔径主光线之间的高平行度使入射后方系统结构的光线近似为无穷远入射,且改变前后透镜组间隔倍率不变。插入液晶快门阵列后,能够保持各个小视场相互齐焦,成像不会上下偏移。

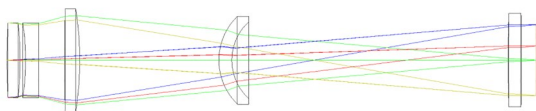


图 2 像方远心结构光路图

Fig. 2 Telecentric beam path in image space

当红外探测器的尺寸为  $640 \times 512 (20 \mu\text{m})$  时,设计该液晶快门阵列中的每个子视场单元的大小为  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,由此分配每个一次成像处的每个子视场单元的视场光阑的大小为  $12 \text{ mm} \times 9.6 \text{ mm}$ ,间距为  $0.2 \text{ mm}$ ,得出一次像面的高度为  $36.4 \text{ mm}$ 。红外凝视成像的前镜组焦距由公式(1)可得焦距为  $206 \text{ mm}$ 。在设计过程中,前组透镜正光焦度透镜在前,利用正负光焦度分离结构矫正场曲,前组透镜矫正球差、彗差;后组透镜矫正前组透镜的像散和畸变。前镜组焦距为:

$$f' = \frac{h'}{\tan \omega}, \quad (1)$$

其中: $h'$ 为像高, $\omega$ 为半视场角, $f'$ 为焦距。前镜组相关设计参数如表 1 所示。其各个子视场单元 MTF 如图 3 所示。

表 1 前镜组相关设计参数

Tab. 1 Design parameters of front lens group

焦距 $f'$	入瞳直径 $D$	视场角 $2\omega$
206 mm	40 mm	$10^\circ$

### 2.2 中继镜组设计

中继结构由矩形场镜阵列与准直透镜阵列组成,场镜阵列与准直透镜阵列均为平凸透镜阵列。场镜阵列使前镜组的出瞳与后镜组的入瞳相互衔接,放于一次像面处降低后方光线高度,使光线能够进入后方的准直透镜。场镜在一次像面处与最终成像处共轭,由一次像面的大小可得,每个子视场的视场角为  $3.29^\circ \times 2.63^\circ$ ,子视场的对角线视场为  $4.2^\circ$ ,系统的全视场对角线视场为  $10.8^\circ$ 。准直透镜阵列放置于系统前端结构的出瞳处,该出瞳为实出瞳,使各点成像光束呈平行光出射,且易于出瞳与后镜组入瞳的衔接,如图 4(a)所示。

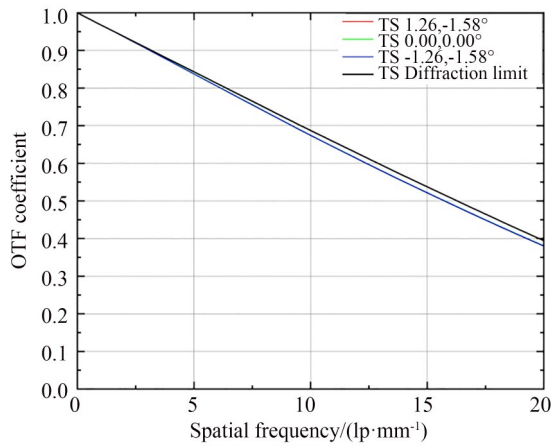
视场不连续性一直是分视场光学系统的主要问题。场镜通过阵列化排布将视场分割,然而该场镜阵列的孔径间间距为  $0.2 \text{ mm}$ ,该间距的存在会导致视场缺失,因此将场镜的位置向后移动,如图 4(b)所示。

场镜的后移减小每个孔径之间的缝隙,使“视野盲区”成为渐晕,以防止图像因视场丢失而导致的连续,但其也会导致原本系统中产生渐晕,如图 5 所示。系统渐晕系数为:

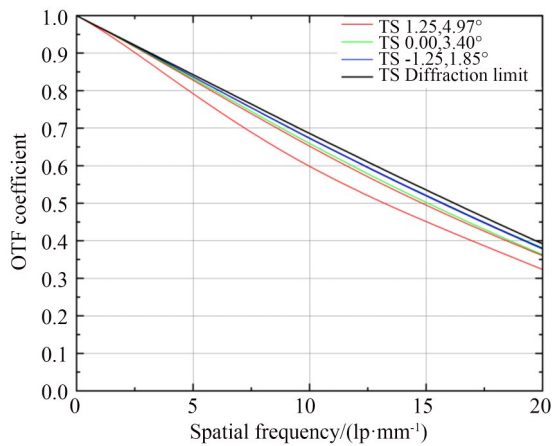
$$K_\omega = \frac{D_\omega}{D}, \quad (2)$$

其中: $D_\omega$ 为视场角  $\omega$  的轴外光束在子午截面的光束宽度, $D$ 为轴向光束口径。随着场镜向后移动  $3 \text{ mm}$ ,原本缺失的视场逐渐转化为渐晕,继续向后移动会导致原本系统中边缘视场的渐晕也随之增加。此时相较于之前的  $0.28^\circ$  视场的缺失,已将视场缺失全部消除。

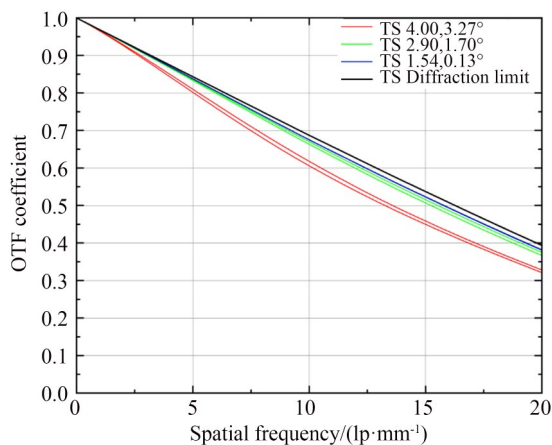
视场缺失的消除在后续的图像处理时,可对 7 个孔径的子视场的图像进行无缝的拼接,同时



(a) 中心视场  
(a) Central FOV



(b) 左方视场  
(b) Left FOV



(c) 斜上方视场  
(c) Diagonal upper FOV

图 3 各个子视场单元的 MTF 图  
Fig. 3 MTF of each sub FOV unit

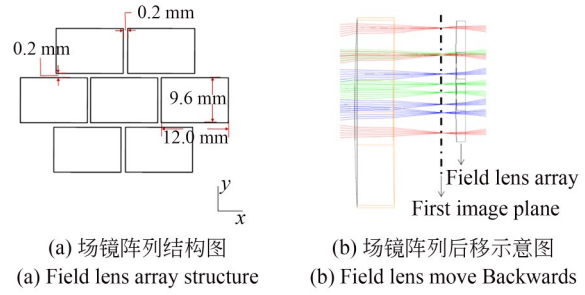


图 4 场镜阵列图

Fig. 4 Field lens array

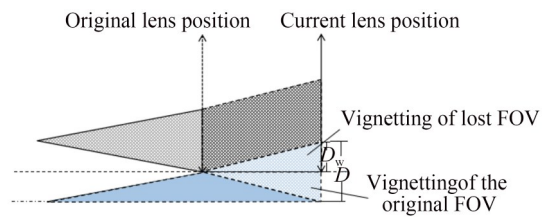


图 5 系统渐晕示意图

Fig. 5 Figures of system vignetting

场镜的后移也减小了冷反射的影响。

由于场镜阵列的后移使其具有一定的光焦度,因此导致准直透镜阵列需与其配合,场景阵列与准直透镜阵列的光焦度在归化条件下,即  $\varphi=1, h_f=1$  具有以下关系:

$$\begin{cases} h_f \varphi_f + h_z \varphi_z = 1 \\ h_z = h_f - d_{fc} \varphi_f, \\ K = h_f \varphi_f / h_z \varphi_z \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\varphi_f, \varphi_z$  为场镜与准直透镜的光焦度,且  $\varphi_f$  小于  $\varphi_z$ ;  $h_f, h_z$  为场镜与准直透镜的轴上光线高度;  $d_{fc}$  为场镜与准直透镜之间的距离;  $K$  为场镜与准直透镜的光焦度分配比。最终由式(3)所得参数设计的中继镜组焦距参数如表 2 所示。

表 2 中继镜组相关设计参数

Tab. 2 Design parameters of relay lens group

场镜阵列焦距 $f_1'$	准直透镜阵列焦距 $f_2'$
54.7 mm	55.9 mm

### 2.3 液晶快门阵列设计

液晶快门阵列为整体系统的关键结构,是实现各子视场快速切换与高效关闭的核心部件。图 6(a)所示为美国学者 Hugh 设计的六片式结构,液晶器件之间需要满足以下两个条件:(1)每

个液晶偏振光栅的周期相同,即液晶偏振光栅偏转角度相同。(2)需满足距离关系  $d_{space}=2d_{LCPG}$ 。其中,  $d_{space}$  为图中填充物的距离(space),  $d_{LCPG}$  为液晶偏振光栅的厚度。本文提出的快门阵列为四片式结构,由两个反向放置的被动式液晶偏振光栅与两个满足四分之一波长的铁电液晶波片组成,距离没有严格的要求,只需满足两个液晶偏振光栅的周期相同的条件。将其放置于光路中的平行光处,可消除其引入的色差与偏振带来的主光线间纵向位移影响,如图 6(b)所示。

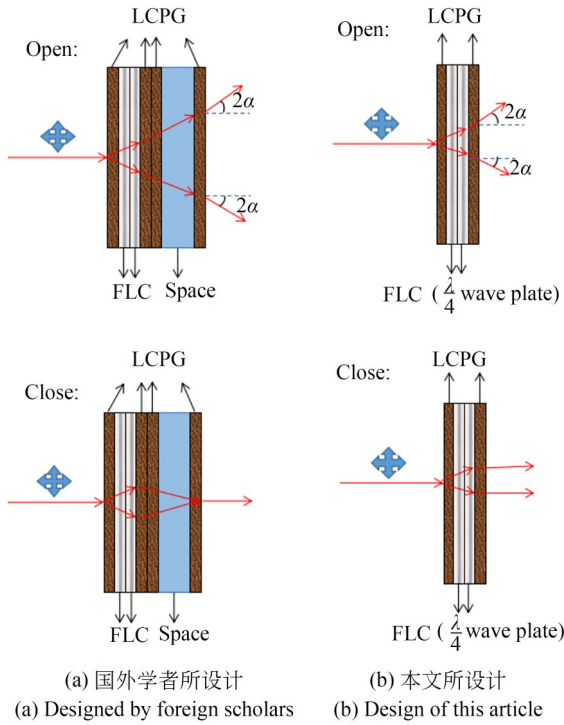


图 6 偏振无关的液晶快门阵列原理图  
Fig. 6 Polarization independent LC shutter array

液晶快门阵列的原理为:当任意偏振态的光进入液晶偏振光栅后,向其±1级偏折出一束左旋光与一束右旋光<sup>[12-14]</sup>,如图 7(a)所示;再通过作为开关的两个电控的满足四分之一波长的铁电液晶波片,当液晶快门阵列状态为开态时,两铁电液晶波片的光轴取向平行,相互叠加形成半波条件改变光的旋向,如图 7(b)所示,图中蓝线为光的旋向,绿线为铁电液晶盒的光轴;最后通过与入射时相同且相反放置的液晶偏振光栅,使光线进一步偏折,不最终成像(彩图见期刊电子

版)。当液晶快门阵列状态为关态时,两铁电液晶波片的光轴取向垂直,相互抵消不改变旋向,将光线返回且依然平行出射,只会出现光束上下偏移的现象。这种结构实现了各子视场快速切换与高效关闭的功能。

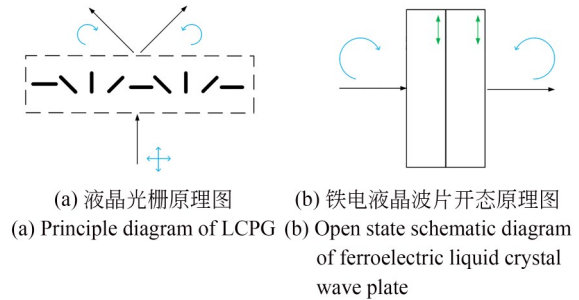


图 7 液晶快门阵列中的液晶器件原理图  
Fig. 7 Schematic diagram of liquid crystal devices in a liquid crystal shutter array

当单个被动式液晶光栅的偏折角度为±7°时,恰好使光线不成像至红外探测器上,由光栅方程公式可得到液晶偏振光栅周期:

$$\sin \theta_{out} = \sin \theta_{in} \pm \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (4)$$

其中:  $\theta_{in}$ ,  $\theta_{out}$  为入射角与出射角;  $\lambda$  为波长;  $\Lambda$  为光栅周期。将中心波长  $4.5 \mu\text{m}$  与角度代入后得到  $\Lambda$  至多为  $36.9 \mu\text{m}$ 。同时,光栅的厚度需满足半波条件,且为保证所有液晶分子无缺陷取向,还需满足盒厚的临界条件,综上得到液晶光栅相关参数如表 3 所示。

表 3 液晶光栅相关设计参数  
Tab. 3 Design parameters of LCPG

液晶光栅的周期 $\Lambda$	液晶光栅的厚度 $d$
$23 \mu\text{m}$	$11.25 \mu\text{m}$

整体红外凝视系统与液晶快门阵列相结合后,呈现其中单一孔径的光通过液晶快门阵列后,成像至红外探测器上。而其余子孔径的光通过液晶光栅具有一定的几何相位发生偏折,被光阑遮挡从而不能最终成像至像面处,如图 8 所示(彩图见期刊电子版)。此外,红外探测器的杜瓦瓶是定制的,为相机提供一个较大的冷阑,使其具有大的接收角以匹配光路中的大角

度入射。

液晶快门阵列放置于准直透镜后方的平行光路中,选择特定的视场角的同时使液晶光栅引起的色差尽可能减小,简化了整体系统的设计。快

门阵列中液晶器件之间的距离没有严格的要求,对实验仿真及实际应用中提供了极大的便利条件,经仿真设计可知,光栅所引入的色差对整体光学系统影响基本消除。

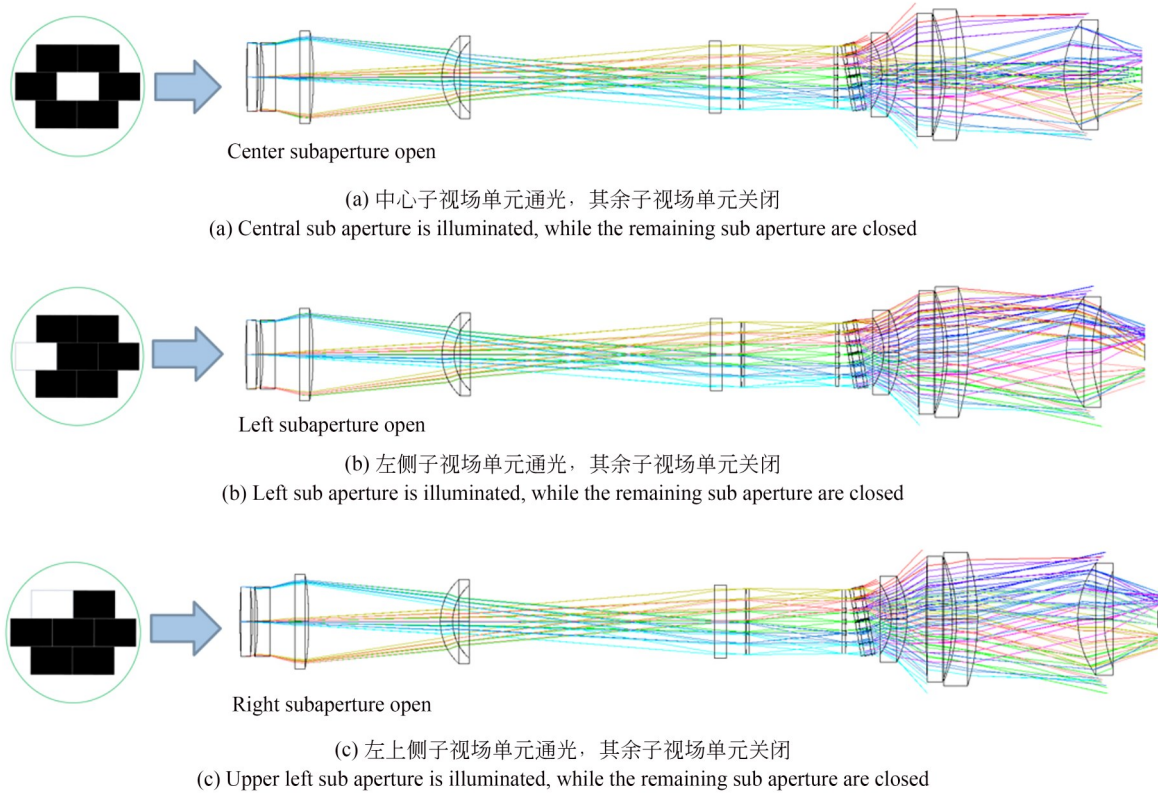


图 8 基于液晶光栅的大视场红外凝视系统 zemax 仿真图,不同颜色代表不同子视场单元中的光线

Fig. 8 Zemax simulation of a large FOV infrared staring imaging system based on liquid crystal grating, where different colors represent the light in different sub apertures

### 2.4 后镜组设计

红外成像系统对后镜组有着更为严苛的需求,不仅需实现短焦与长工作距离,且由于各个子孔径利用了透镜的不同部位,还有着大通光孔径的要求,如图 9 所示(彩图见期刊电子版),其中不同颜色代表不同子孔径的光线。在结构设计上采用负正透镜分离,负光焦度组作为前组,正光焦度组作为后组,使整个系统的后主面移出物镜之外,从而实现大孔径、短焦与长工作距离的需求。

为匹配红外探测器靶面的大小,利用正切计算法求解其焦距,追迹一条透射高度为  $h_1$  的平行于光轴的光线<sup>[11]</sup>即  $\tan U_1=0$ ,代入式(5)中:

$$\begin{cases} \tan U'_1 = \tan U_2 = h_1/f'_1 \\ h_2 = h_1 - d_1 \tan U'_1 \\ \tan U'_2 = \tan U_3 = \tan U_2 + h_2/f'_2, \\ h_3 = h_2 - d_2 \tan U'_2 \\ \tan U'_3 = \tan U_3 + h_3/f'_3 \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $U'_k$  为第  $k$  个光组的出射光线与光轴的夹角,  $h_k$  为第  $k$  个光组的投射高度,  $f'_k$  为第  $k$  个光组的焦距。由上述公式可以得出后镜组焦距为 32 mm。

反远距结构存在很大的光阑像差,由于其作用使得轴外入瞳口径大于轴上入瞳口径,以致轴外点的出瞳口径角增大,对镜组间的光瞳匹配造成困难。针对该问题可在后镜组结构中加入非

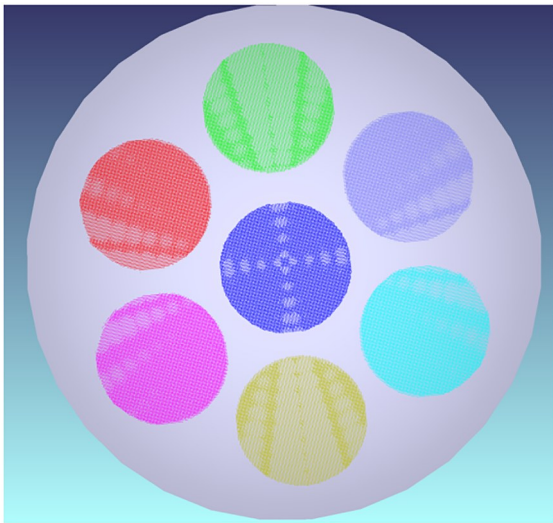


图9 后镜组的第一面实际各孔径通光图

Fig. 9 Actual aperture light transmission diagram of the first surface of the rear lens group

球面透镜优化,如图 10 所示。加入非球面透镜后,减少了系统中透镜元件的数量,同时更好地矫正了彗差、畸变等像差。系统的后工作距离为 30 mm,可以满足红外探测器对后端的距离需求。

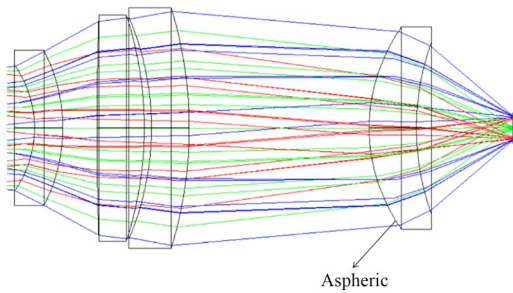
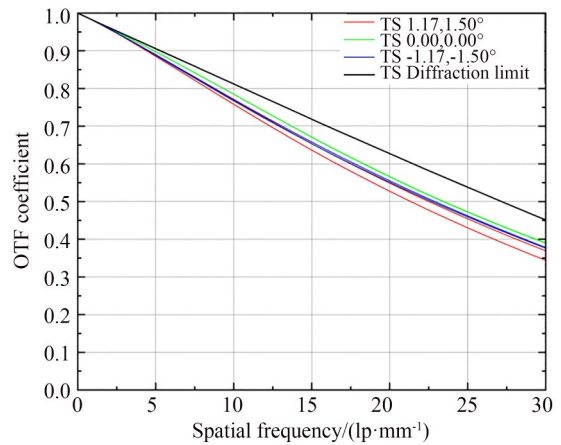


图 10 后镜组结构光路图

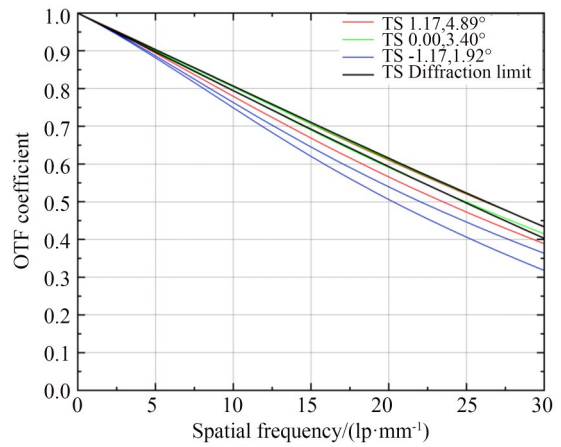
Fig. 10 Rear lens group structure

### 2.5 全系统的像质评价

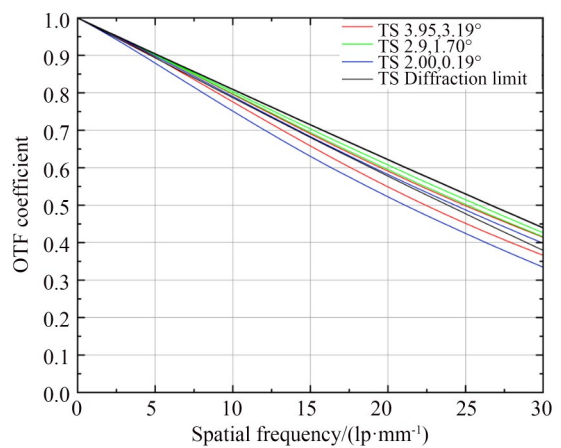
光学传递函数(MTF)是成像光学系统像质的主要评价方法,不同于传统系统,该红外系统由多个子视场组成,由图 11 和图 12 可知,在 30 lp/mm 空间频率下,该红外凝视成像系统的子视场单元 MTF 均大于 0.3,接近衍射极限,畸变均小于 10%,由图可知该系统具有良好的像质,能够满足设计要求。



(a) 中心视场  
(a) Center FOV



(b) 左方视场  
(b) Left FOV



(c) 斜上方视场  
(c) Diagonal upper FOV

图 11 各个视场单元的 MTF 图

Fig. 11 MTF of each FOV unit

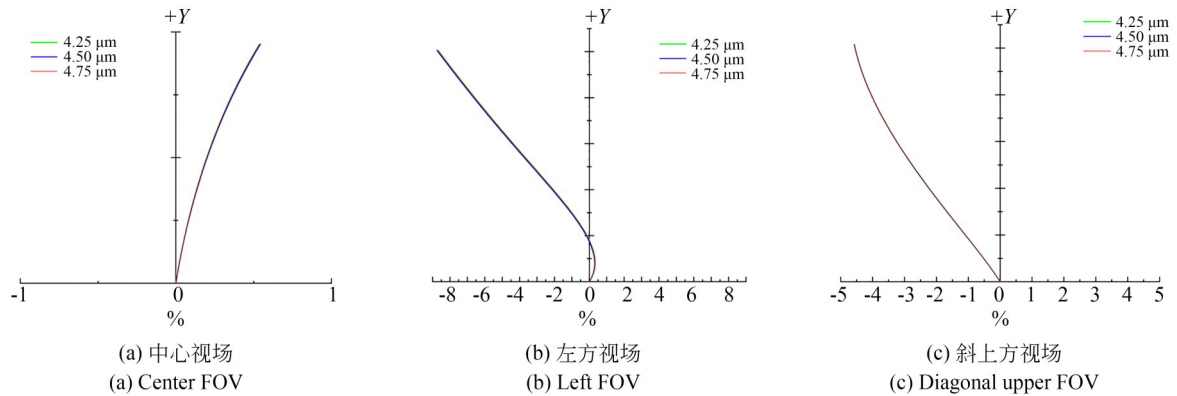


图 12 各个视场单元的畸变图

Fig. 12 Distortion figures of each FOV unit

### 3 冷反射分析

冷反射是评价红外光学系统性能的一个重要指标,冷反射越小,红外系统的成像质量越好。经仿真分析,当液晶快门阵列打开时,前镜组不发生冷反射,如图 13(a)所示;当液晶快门阵列关闭时,单个子视场单元的前镜组发生少量冷反射,如图 13(b)所示。因此,主要针对后镜组与液晶快门阵列进行冷反射分析。

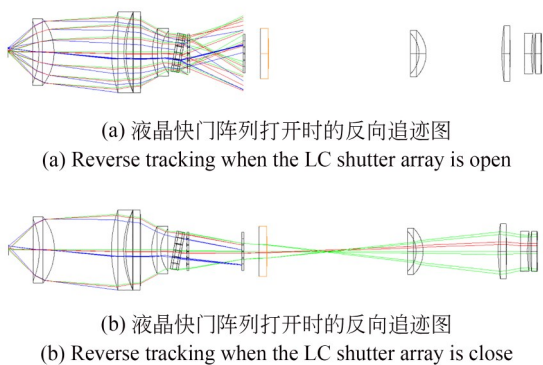


图 13 冷反射的反向追迹

Fig. 13 Reverse tracing of Narcissus

液晶光栅与液晶盒的基板为平行平板,在红外光学系统中的平行光路中放置平行平板常常会出现冷反射现象,将液晶光栅放入平行光路中虽基本消除了光栅所引起的色差,但其仍会引起冷反射。

针对上述问题,采用整体液晶快门阵列倾斜放置的方法,如图 14 所示。倾斜放置的角度不小

于 10°,平行平板倾斜放置过大的角度会导致后方镜组口径增大且会增加液晶快门阵列与后镜组的距离,引入难以矫正的彗差,将整体系统的结构复杂化,而角度过小会导致冷反射无法移出像面。对其反向追迹,平行平板冷反射基本消除,如图 15 所示。

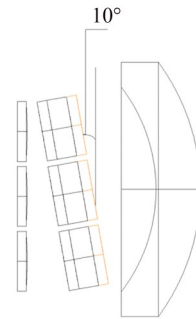


图 14 倾斜放置的液晶快门阵列

Fig. 14 Tilted LC shutter array

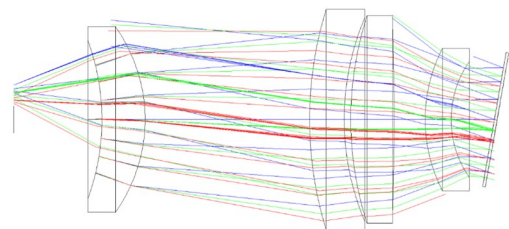


图 15 液晶快门阵列倾斜后的反向追迹光路图

Fig. 15 Reverse tracking after tilting the LC shutter array

倾斜前后对光学系统的成像质量基本没有影响,倾斜前与倾斜后光学系统的 MTF 图如图 16 所示。

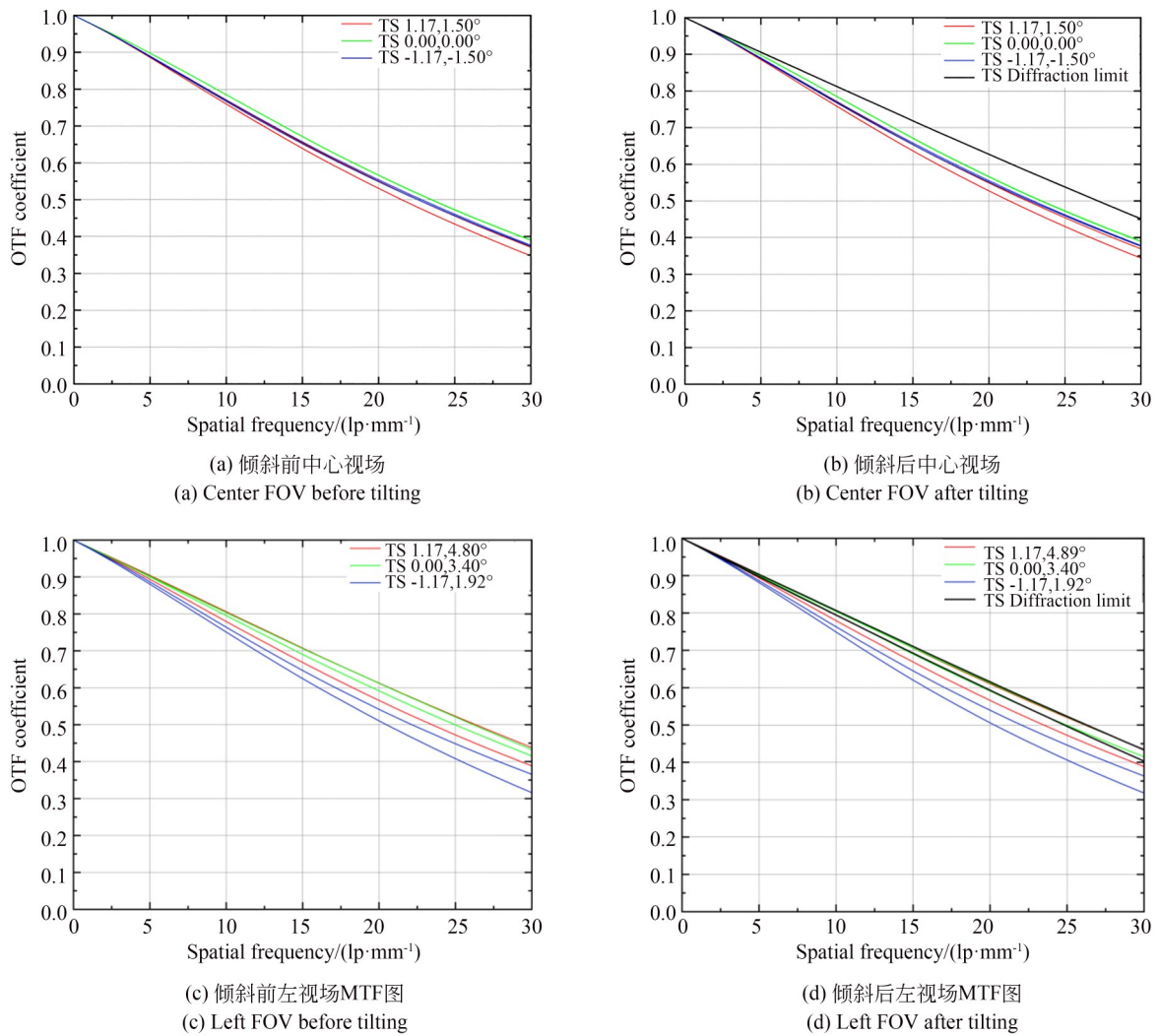


图 16 中心孔径与左孔径倾斜前后 MTF 图

Fig. 16 MTF of the center and left aperture tilting

针对其余后镜组组件采用 YNI, I/IBAR 值对冷反射的影响进行初步定性判定<sup>[15]</sup>, 再通过光线追迹分析特定透镜面的冷反射, 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。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。

红外系统的冷反射性能评价的主要表征指标 I/IBAR 和 YNI 具体表达式为式(6)和式(7):

$$I/IBAR = i/i', \quad (6)$$

$$YNI = yni, \quad (7)$$

其中:  $y$  表示轴上点边缘光线在透镜表面入射高度,  $n$  为透镜表面处的折射率,  $i$  为轴上点边缘光线在透镜表面的入射角,  $i'$  为边缘视场主光线在

透镜表面的入射角。公式(6)中 I/IBAR 为光学系统中透镜表面冷反射效应变化与视场角的关系。式(7)中 YNI 为衡量光学系统视场中心冷反射程度的量, 冷反射效应与 YNI 的值成反比, 即 YNI 的值越小, 该表面产生的冷反射效应越严重。倾斜放置后, 后镜组各透镜 YNI, I/IBAR 数据如表 4 所示。

由表 4 可知 S21, S26 面 YNI, I/IBAR 均较小, 可能会引起一定的冷反射。利用 I/IBAR 和 YNI 分析冷反射效应对红外系统成像影响具有一定的局限性, 为了实现红外成像系统冷反射效应定量分析, 引入等效温差 (Narcissus Induced Equivalent Temperature Difference, NITD)<sup>[16]</sup>:

表 4 各透镜的 YNI, I/IBAR 值

Tab. 4 YNI and I/IBAR of each lens

Surf	YNI	I/IBAR
S21	-0.716 33	0.277
S22	-0.103 01	1.342
S23	0.688 63	3.164
S24	-0.987 16	0.857
S25	-1.079 78	0.936
S26	-0.622 47	0.617
S27	0.520 99	13.318
S28	-0.444 85	0.924

$$NITD_{ij} =$$

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{N(\lambda, T_H) - N(\lambda, T_D)\} R_d(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial N(\lambda, T_{MS})}{\partial T} R_d(\lambda) d\lambda} \frac{t_j^2}{t_o} R_j \sigma_{ij}, \quad (8)$$

其中:  $T_H$  为相机温度,  $T_D$  为探测器温度,  $T_{MS}$  为主场景温度;  $R_d(\lambda)$  为归一化的探测器光谱响应,  $t_o$  为从第一透镜表面到检测器的平均透射率,  $t_j$  为从探测器表面开始到第  $j$  个透镜表面的平均透射率,  $R_j$  为第  $j$  个透镜表面的表面光谱反射率,  $\sigma_{ij}$  为第  $j$  个表面反射至探测器表面的辐射的单位立体角  $\Omega_{Rij}$  与探测器像元  $i$  的冷屏单位立体角  $\Omega_{CSi}$  的比值:

$$\sigma_{ij} = \frac{\Omega_{Rij}}{\Omega_{CSi}}. \quad (9)$$

$N(\lambda, T)$  由普朗克方程得出,

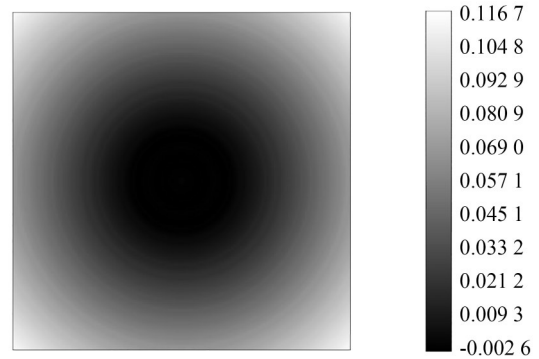
$$N(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1}, \quad (10)$$

其中:  $h$  为普朗克常量,  $k$  为玻耳兹曼常数。通过上述公式利用光学软件的宏程序, 对光学系统中的所有透镜表面重复计算反射至探测器表面的辐射的单位立体角  $\sigma_{ij}$ , 通过对所有这些贡献求和并乘以透镜表面反射率来计算得到总冷反射值。计算仿真可得, FPA 上的总 NITD 最大值为 0.116 7 K, 如图 17 所示。

以上结果表明, 该红外凝视成像系统的后端结构很好地控制了冷反射现象。

#### 4 公差分析

光学系统设计时, 还需对光学系统中各透镜



Narcissus analysis: TITD distribution over FPA

图 17 NITD 的分布在红外探测器上的图像

Fig. 17 Image of NITD distribution on infrared detectors

的距离、偏心、间隔等因素进行公差分配。采用光学软件中的蒙特卡洛公差分析对该公差分析, 并对该光学系统的性能进行评估。

通过初步公差分析, 可得前镜组、中继镜组、后镜组中公差相对严重的项及对其精度控制, 如表 5 所示。

表 5 系统中公差相对严重项

Tab. 5 Relatively severe tolerance items in the system

表面	公差操作数	设置值	MTF(平均) 改变
S3	TFRN	±2 mm	-0.043 918 48
S5	TFRN	±2 mm	-0.036 983 86
S4	TFRN	±2 mm	-0.032 480 42
S2	TFRN	±2 mm	-0.018 941 31
S4, S6	TTHI	±0.05 mm	-0.010 770 96
S5	TSTX	±1.5'	-0.009 821 52
S7, S8	TTHI	±0.03 mm	-0.008 647 26
S5	TSTY	±1'	-0.003 227 22

由表 5 可知, 表面厚度公差对于整体系统的影响最大, 应将部分面精度控制在 ±2 mm。且前镜组精度比中继镜组与后镜组的要求更为严格, 需在加工与装调过程中进行调控。引入加工与装调的误差后, 仍有 90% 的产品 MTF 高于 0.194 343 17, 80% 的产品高于 0.208 728 72。由此证明, 其具有较好的容差, 成像可满足实际应用。

## 5 结 论

本文提出了一种新的基于液晶光栅的大视场红外凝视成像系统设计。通过矩阵场镜阵列与像方远心光路分割视场,再将不同的子视场的光通过液晶快门阵列与后镜组成像到同一个像面,实现了红外凝视成像系统获得高分辨率、大视场的图像的功能。其中,视场光阑为矩形并将其后移,使原有的 $0.28^\circ$ 的视场缺失减小至 $0^\circ$ ,实现图像的无缝拼接。快门阵列由两个液晶光栅与两铁电液晶波片组成,使其无需复杂的位置关系。将液晶快门阵列放置于平行光路中,消除其

所引入的色差与偏振带来的主光线间纵向位移的影响。在这个系统中,红外波段为 $4.25\sim 4.75\ \mu\text{m}$ ,子孔径视场角 $3.29^\circ\times 2.63^\circ$ ,全视场对角线为 $10.8^\circ$ ,总长度为 $512\ \text{mm}$ 。设计结果表明 MTF 在 $30\ \text{lp/mm}$ 时大于 $0.3$ ,具有良好的像质。冷反射分析后表明,倾斜放置的液晶快门阵列在光路中不会再引起冷反射,且其余透镜产生冷反射基本得到控制。与传统的分视场成像的红外凝视成像系统相对比,基于液晶光栅的大视场红外凝视成像系统具有非机械式、快速响应的特点,为红外光学系统获得高分辨率、大视场图像提供了新的思路。

## 参考文献:

- [1] 赵俊, 王晓璇, 李雄军, 等. 碲镉汞红外探测器研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(9): 1419-1433.  
ZHAO J, WANG X X, LI X J, *et al.* Development of a mercury cadmium telluride infrared detector[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2023, 53(9): 1419-1433. (in Chinese)
- [2] HACKWELL J A, WARREN D W, BONGIOVI R P, *et al.* LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote Sensing [C]. *Imaging Spectrometry II. Denver, CO.* SPIE, 1996, 2819: 102-107.
- [3] SUN C S, DING Y L, WANG D J, *et al.* Back-scanning step and stare imaging system with high frame rate and wide coverage[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 4960-4965.
- [4] 何祥峰. 基于棱镜扫描的红外宽视场高分辨率成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
HE X F. *Research on Infrared Imaging Technology Based on Prism Scanning with Wide Field and High Resolution* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] SUGIYAMA H, KOSHOUBU J, KASHIWABARA S, *et al.* Time-resolved step-scan infrared imaging system utilizing a linear array detector[J]. *Applied spectroscopy*. 2008, 62(1): 17-23.
- [6] 刘毓博. 机载大视场高分辨率热红外成像系统研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.  
LIU Y B. *Research of Airborne High Resolution Thermal Infrared Imaging System with Wide Field of View* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [7] 李文雄, 申军立, 张星祥, 等. 低温红外离轴三反准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(9): 1285-1294.  
LI W X, SHEN J L, ZHANG X X, *et al.* Design of low temperature infrared off-axis three-mirror collimation system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1285-1294. (in Chinese)
- [8] KROGMANN D, THOLL H. Infrared micro-optics technologies [C]. *The International Society for Optical Engineering*, SPIE, 2004, 5406: 121-132.
- [9] MASTERSON H, SERATI R, SERATI S, *et al.* MWIR Wide-area step and stare imager [C]. *Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXV. Orlando, Florida, USA.* SPIE, 2011: 161-166.
- [10] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, *et al.* Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review[J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.
- [11] 郁道银, 谈恒英. 工程光学(4版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics 4th ed.* [M]. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese)
- [12] TANG D L, SHAO Z L, XIE X, *et al.* Flat multifunctional liquid crystal elements through multi-dimensional information multiplexing[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(4): 220063.
- [13] 周东洪. 液晶光栅的技术进展及应用[J]. 数字通

信世界, 2019(1): 230, 242.

ZHOU D Q. Technical progress and application of liquid crystal grating [J]. *Digital Communication World*, 2019(1): 230, 242. (in Chinese)

- [14] 陈万. 高效率宽波段液晶偏振光栅光束偏转技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.

CHEN W. *Research on Beam Steering Technology of High-Efficiency Broadband Liquid Crystal Polarization Gratings* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

- [15] 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)

- [16] LU K, DOBSON S J. Accurate calculation of Narcissus signatures by using finite ray tracing[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6393-6398.

#### 作者简介:



赵思霖(1999—),男,吉林吉林人,硕士研究生,2021年于长春理工大学获得学士学位,主要从事红外光学设计方面的研究。E-mail: 115944273958@163.com

#### 通讯作者:



穆全全(1980—),男,山西吕梁人,研究员,博士生导师,主要从事液晶光学调控技术及其应用研究。E-mail: muquanzhan@ciomp.ac.cn