

文章编号:1004-4213(2010)11-2062-6

折/衍混合的红外双视场光学系统设计*

唐大为^{1,2}, 孙强¹, 王健¹, 刘英¹, 郭帮辉¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了实现红外双视场光学系统两个视场间的快速切换, 同时满足便携式及易安装的需求, 设计了一种轻量化的折/衍混合红外双视场光学系统. 系统采用折/衍混合和二次成像光学结构, 利用光学设计软件对系统进行优化, 评价了系统的像质, 分析了系统温度补偿问题并给出其温度调焦曲线. 系统工作波长为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, 能实现 120 mm/60 mm 两档焦距变换. 设计结果表明, 冷光阑效率达到 100%, 在探测器的 Nyquist 频率 33 lp/mm 处, 轴外视场光学系统的调制传递函数大于 0.3, 系统光学总长为 200 mm. 整个系统包括 7 块透镜, 只需移动一片透镜就能完成双视场的转换, 结构简单, 实现了轻量化和高质量成像.

关键词: 折衍混合; 二次成像; 双视场; 温度补偿

中图分类号: O43; TH74 **文献标识码:** A

doi: 10.3788/gzxb20103911.2062

0 引言

近年来, 由于红外成像系统具备图像直观、易于观察、准确度高、低空探测性能好等优点, 使得其在很多领域得到广泛的应用^[1-2]. 双视场红外热像仪光学系统提供了两个大小不同的视场^[3], 宽视场状态下可用于跟踪和搜索目标, 切换到窄视场高分辨率的状态后又可用于捕获和观察目标.

双视场系统与连续变焦红外光学系统相比, 结构简单, 视场切换速度快(防止导弹、飞机等速度快的目标由于切换不及时而飞出小视场造成脱靶), 并且成像质量好, 装调容易. 但是, 传统的折射式多视场系统要满足轴外像差及色差的校正, 必须以结构复杂化, 光学元件数量多为代价, 且需采用多种玻璃材料混合使用, 加上红外波段可应用的光学材料非常稀少, 在这种情况下, 衍射光学元件所具有的消色差、简化系统结构等优点, 使得在传统红外多视场光学系统中引入衍射元件具有现实意义^[4-6].

本文利用衍射光学元件的特性, 以二次成像光学结构为基础, 引入衍射面, 设计了含 7 片透镜的用于红外热像仪的折/衍混合双视场光学系统. 系统结构简单紧凑, 满足了轻量化要求, 且轴外像差及色差得到了很好的校正, 成像质量高, 在探测器的 Nyquist 频率 33 lp/mm 处, 轴外视场光学系统的调

制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF) 大于 0.3, 冷光阑效率达到 100%, 系统光学总长为 200 mm.

1 光学设计思想

1.1 光学系统结构确定

本双视场光学系统工作中波红外波段, 系统相对口径要求为 1/2, 且实现 120 mm/60 mm 两档焦距变换, 采用制冷型凝视焦平面阵列探测器. 100%冷光阑匹配是制冷型红外热像仪特别是测温型红外热像仪的一个最基本要求. 为了满足这一要求, 本文把探测器冷光阑作为系统的孔径光阑. 一次物镜成像系统在实现冷光阑匹配的同时往往使得前部光学零件口径偏大. 二次成像结构易实现 100%冷光阑效率^[7], 并且相比一次物镜来说, 该设计还具有三个优点: 1) 对于长焦距大入瞳结构的设计时, 能够最大限度地减小镜片尺寸, 有效减轻系统重量和体积; 2) 第一像面处可以放置视场光阑, 消除杂光, 提高图像的信噪比和对比度; 3) 二次成像组也为系统校正像差提供了更多的自由变量.

设计选择二次成像光学结构(如图 1), 同时为使系统结构简单、紧凑, 选用正负正光学结构, 即固定组均为正透镜组, 移动镜为单负透镜. 利用负透镜

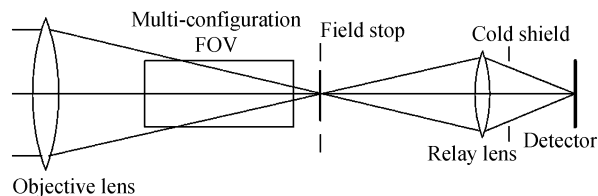


图 1 二次成像光学系统结构

Fig. 1 Layout of the re-imaging optical system

* 国家高技术研究发展计划(2007AA12Z110)和国家自然科学基金(60977001)资助

† Tel: 0431-86176056 Email: tdw@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2010-05-13

修回日期: 2010-07-30

轴向平移来切换视场,通过在优化设计时对轴向尺寸的限制,来得到满足较短轴向尺寸、不同温度和目标距离条件下都清晰成像的设计结果。

设计中,为实现光学系统轻量化,采用 7 片透镜,并适当的引入非球面,但此时系统成像质量较差,轴外像差以及色差得不到很好的校正。为了实现系统的优良成像,在光学结构中引入衍射面,衍射面和非球面的合理使用,可以有效地校正色差和其它高阶像差。

1.2 衍射光学元件的应用

衍射光学元件常用于红外波段,具有简化系统结构、消热差、扩展光学设计过程中的自由度等优点。一般光学玻璃的阿贝数都在 20 以上,而衍射光学元件在工作波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 时,其等效阿贝数大约为 -3.82 (是一个负值),这一性质使它替代传统的双胶合透镜,以减少光学系统中的透镜片数,起到缩小体积和减轻重量的作用。

衍射光学元件的加工技术在一定程度上限制了其在光学工程中的应用。目前金刚石车削技术广泛用于红外光学材料上衍射面的加工^[8]。实际设计的光学系统一般具有一定带宽的光谱范围,但实际加工时环带深度只和设计波长相对应,那么其它波长处的环带深度必然产生一定的偏差。同时,衍射光学元件在环带间隔处需要加工精确的细节,但由于金刚石刀头尺寸的原因,在环带间隔处又将产生面形偏差。下面简析一下加工时环带间隔公差对衍射效率以及成像质量的影响。

当衍射级次取 1 级,那么衍射面的衍射效率为

$$\eta_i = \left\{ \text{sinc} \left[1 - \frac{(n-1)d}{\lambda_i} \right] \right\}^2 \quad (1)$$

考虑环带间隔公差后的衍射效率下降值 $\Delta\eta$ 为

$$\Delta\eta = \frac{4}{D} \sqrt{\frac{2dR_T}{n_{\rho\text{total}}}} \sum_1^n \sqrt{n_{\rho}} \quad (2)$$

考虑环带间隔公差后光学传递函数的修正公式为

$$\text{MTF}_{\text{POLY}}(s, t) \cong \frac{\sum_{i=1}^3 \omega_i (\eta_i + \Delta\eta) \text{MTF}(\lambda_i, s, t)}{\sum_{i=1}^3 \omega_i} \quad (3)$$

式(1)~(3)中 η_i 为不同波长的衍射效率, D 为透镜直径, R_T 为刀具半径, d 是环带深度, $n_{\rho\text{total}}$ 为总环带数, n_{ρ} 为 $1\sim n_{\rho\text{total}}$ 之间的整数, ω_i 是波长的权重。当刀具半径 R_T 为 $0.762\ \text{mm}$, 透镜直径 D 为 $25\ \text{mm}$, 环带深度 $d=0.0014\ \text{mm}$, 总的环带数 $n_{\rho\text{total}}$ 为 $4, 9^\circ$ 视场 $33\ \text{lp/mm}$ 的光学传递函数设计值为 0.3 时, 结合式(1)~(3), 得到考虑环带间隔公差后, 衍射效率下降了 2.3% , 修正后传函值下降到 0.282 。由此可以看出, 无论从成像质量上还是经济

上考虑, 不宜加入过多的衍射面。

计算表明, 衍射面具备消色差、减热差、简化系统结构的优点, 但加工中存在的各种公差, 对成像质量有一定影响, 过度使用衍射面可能会得不偿失, 故需控制其使用数量。本文设计只引入一个衍射面, 使得系统的衍射效率在 97% 以上, 对系统传递函数影响也较小。

1.3 温度补偿

大部分红外光学材料具有很高的光热膨胀系数, 随着环境温度的变化, 红外光学材料的折射率、光学元件的曲率和厚度、零件间隔等都会发生变化, 使红外光学系统产生热离焦, 导致成像质量变差。因此要设计成像质量好的红外系统必须考虑温度补偿问题。温度补偿有主动与被动两种。通过使用折衍混合可以实现光学系统被动消热差, 但需要在光学系统里加入的衍射面数量多达 3 个^[9-11], 显然与本文的设计思想不符, 并且衍射面数量多也大大增加了系统的成本。采用主动温度补偿, 移动第一片透镜补偿的效果最好, 但是作为系统的窗口, 最好固定不动, 所以在实际应用中也不宜采用。

文中通过调节探测器位置实现光学系统主动温度补偿。调焦机构中直流伺服电机通过传动机构精密螺母丝杆副, 带动有精密滑杆导向机构的探测器作微量移动, 实现温度补偿, 满足了系统的设计要求。同时该调焦机构也可以在目标距离变化时调节像面位置使得目标清晰成像。

2 设计的实现和像质评价

2.1 系统的主要技术指标

采用中波 640×512 制冷型凝视焦平面阵列探测器, 像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ 。设计指标如表 1。

表 1 系统主要设计指标

Table 1 Design parameters of the optical system

Design specifications	Value
Waveband	$3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$
FOV	$9.2^\circ\times 7.3^\circ / 4.6^\circ\times 3.7^\circ$
EFL	$60\ \text{mm} / 120\ \text{mm}$
Object distance range	Short EFL: $4.5\ \text{m}\sim\infty$; Long EFL: $9\ \text{m}\sim\infty$
F-number	2
Working temperature	$0\sim 40^\circ\text{C}$
System length	$200\ \text{mm}$

2.2 设计结果

首先考虑第一像面的大小, 二次成像部分的放大率越大, 系统总长越短^[12]。即第一像面越小, 系统总长越短。但是系统长度变短又会在一定程度上导致成像质量的下降。综合考虑系统成像质量和总长

度,选择二次物镜组的放大率为 1.5 倍.从而由已知二次像面的高度(探测器对角线 1/2)便可以得到中间一次像面的高度为 $y_1 = 6.15/1.5 = 4.1 \text{ mm}$.结合探测器结构参量,那么系统一次物镜组焦距(系统长短焦距时分别为 80 mm 和 40 mm)及二次物镜组的焦距大小也可以确定.再结合初始结构计算方法中的缩放法,从已有的专利中选取光学特性与本设计相近的结构型式,经缩放焦距、更换玻璃(选锗、硅、硫化锌等最为常用和稳定的红外材料)等步骤后,得到系统各透镜半径、厚度等初始结构参量,最后利用光学设计软件进行优化设计.

设计结果如图 2,系统总共 7 块透镜,其中透镜 1、3、5、7 采用的是低色散高折射率的硅材料,透镜 2 采用 ZnS 材料,透镜 6 为锗透镜.从图中可以看出,通过移动透镜 2 就能实现双视场的转换,视场切换的导程为 32.68 mm,系统总长为 200 mm,处于长焦状态时第 1 块透镜通光口径为 63.2 mm.为了更好地平衡轴外像差、场曲以及色差,在透镜 4 后表面及透镜 5 前表面引入非球面,在透镜 6 前表面使用衍射面,衍射面选择在锗透镜上也方便了加工.此衍射面很好地校正了系统的色差,其高次项系数同时也校正了高阶像差.

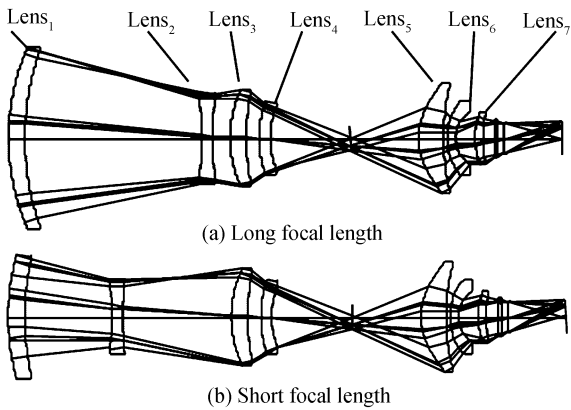


图 2 长焦和短焦时光学系统
Fig. 2 Optical layouts of long and short focal length

2.3 像质评价

MTF 能够全面地评价出光学系统的成像质量,不但能够反映系统的分辨率,同时还可以反映出系统的对比度.图 3 给出了光学系统的 MTF 曲线.从图中可以看出,在探测器的 Nyquist 频率 33 lp/mm 处(像素大小 $15 \mu\text{m}$),镜头的 MTF 在轴上视场高于 0.5,轴外视场高于 0.3.为了对比一下系统引入衍射面前后的成像性能,图 4 给出了同等设计指标下、不加衍射面的光学系统(含有 8 片透镜)位于长焦时 MTF 曲线.图中显示在频率 33 lp/mm 处,轴上视场 MTF 为 0.4,轴外视场还不到 0.2.这说明系统中引入衍射面后整体的成像性能得到了提高.

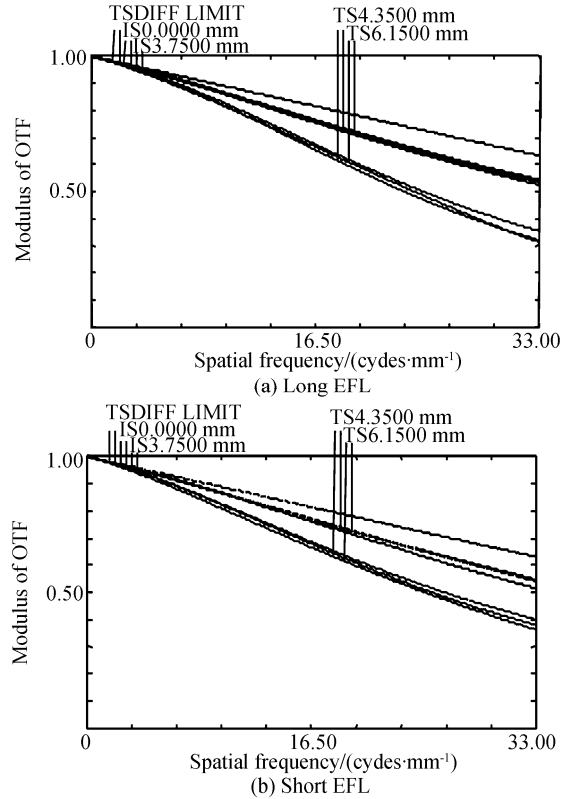


图 3 长焦和短焦时光学系统传递函数
Fig. 3 MTF curves at long and short EFL

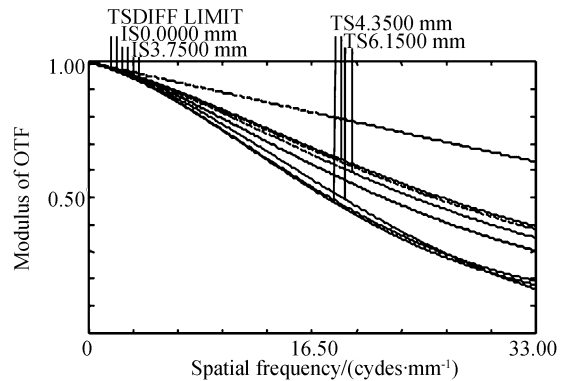
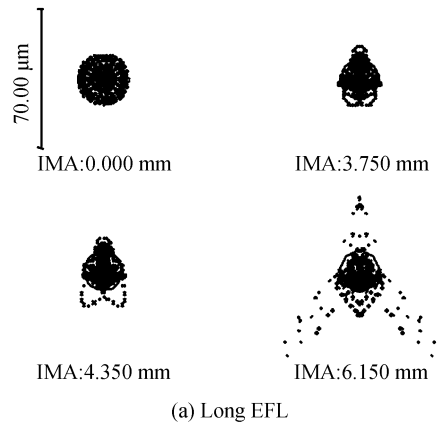


图 4 传统光学系统长焦时 MTF 曲线
Fig. 4 MTF curves at long EFL for traditional optical system

图 5 是系统的点列图,长焦 120 mm 时,点斑 RMS 半径在各个视场下分别为 $6.5 \mu\text{m}$ 、 $7.6 \mu\text{m}$,



(a) Long EFL

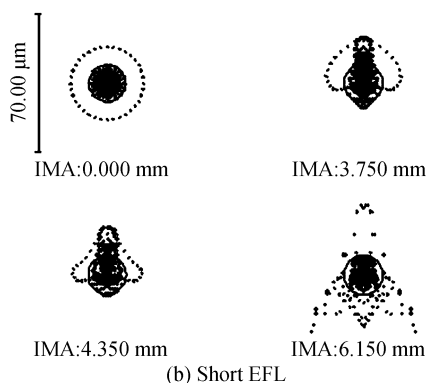


图5 长焦和短焦时光学系统点列

Fig. 5 Spot diagrams at long and short EFL

8.1 μm 、13.6 μm ;短焦 60 mm 时,点斑 RMS 半径各个视场下分别为 7.3 μm 、8.8 μm 、8.6 μm 、12.9 μm .各种点斑基本上都集中在 Airy 斑内,点斑尺寸小进一步说明系统的像差很小,能量集中度比较高,成像质量好.

图 6 是系统轴向色差图,系统在长焦距、短焦距状态时,系统轴向色差均小于 0.05mm,与只含有非球面的 7 透镜片光学系统相比,色差小了很多,这说明系统引入衍射面后色差得到了很好的校正,满足了系统的设计要求.

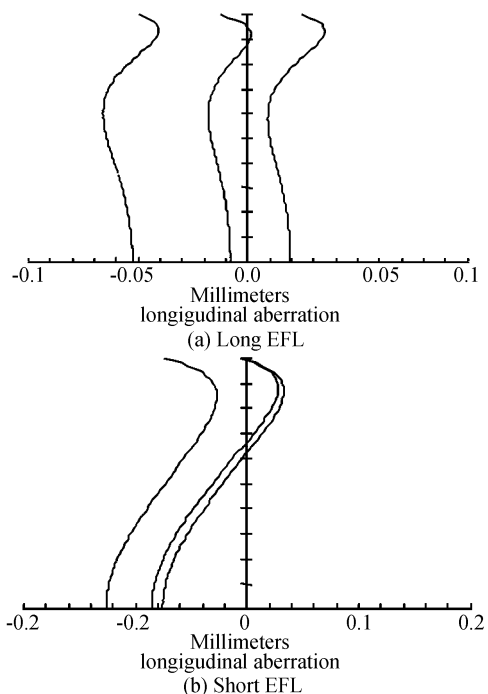


图6 长焦和短焦时轴向色差曲线

Fig. 6 Longitudinal aberration curves at long and short EFL

图 7 给出了透镜 6 上衍射面的位相和周期同径向距离的关系,从图中可看到,所设计的衍射光学元件有 5 个周期环带,最大的频率为 0.893 34 periods/mm,即最小的环带间隔为 1.12 mm,完全满足加工要求.

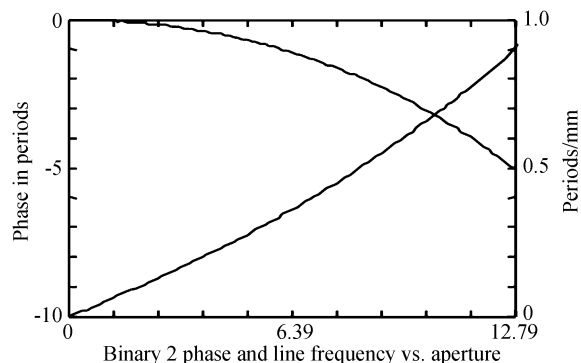


图7 位相及周期与径向距离关系

Fig. 7 Relationship between phase and radial distance

2.4 调焦与温度补偿

温度改变时,系统焦距发生变化,系统像面发生移动,此时对探测器位置进行调整,实现主动式温度补偿.光学成像系统在 0 $^{\circ}\text{C}$ 时,长焦距和短焦距分别变为 120.812 mm,60.509 6 mm;40 $^{\circ}\text{C}$ 时,长焦和短焦分别变为 118.315 mm,59.177 9 mm;图 8 给出了系统的温度调焦曲线.其中负号表示探测器向前移动,正号表示向后.结果显示探测器在温度补偿时做线性移动,操作方便,控制精确.

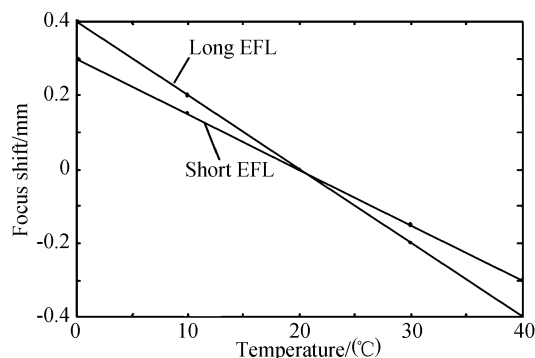


图8 温度调焦曲线

Fig. 8 Temperature compensation curves

物距改变时,系统的焦距不变化,但是系统像面发生移动,对探测器位置进行调整,能保证清晰成像.对于长焦,目标从 ∞ 变到 9 m,像面移动 1.6 mm;对于短焦,目标从 ∞ 变到 4.5 m,像面移动 0.75 mm.由设计结果可以得到:对不同物距的目标成像时,在探测器 Nyquist 频率处,镜头 MTF 值均在 0.1 以上,表明系统能够在给定的空间频率范围内对目标成像.

3 结论

本文针对中波红外双视场光学系统,研究了其成像质量好、透镜少、成本低的设计方案,完成了红外折/衍混合光学系统的设计.设计结果符合热像仪多功能、小体积、轻量化的发展趋势,可广泛应用于

手持或轻武器热像仪. 双视场的切换只需移动一片透镜,且切换迅速,同时也降低了变倍过程中光轴晃动对定位准确度的影响. 工作温度为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$. 折衍光学组件相比同等性能的热像仪光学组件在重量上以及体积上都减少了 10%左右,且光学系统成像质量好,满足系统技术指标和要求.

参考文献

- [1] LI Shi. The design and analysis of the infrared imaging system for cloud meteorological observation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **17**(12): 2429-2434.
李仕. 气象测云红外成像系统的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2008, **17**(12): 2429-2434.
- [2] MAI LÜ-bo. Outline on development and application of fpa thermal imaging sets[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(9): 497-501.
麦绿波. 焦平面热像仪的发展与应用综述[J]. 红外技术, 2006, **28**(9): 497-501.
- [3] GAO Hong-yun, XIONG Tao. Mid-wavelength infrared dual field-of-view optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **17**(10): 1891-1894.
郝洪云, 熊涛. 中波红外两档变焦光学系统[J]. 光学精密工程, 2008, **17**(10): 1891-1894.
- [4] DONG Ke-yan, PAN Yu-long, WANG Xue-jin, et al. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 764-770.
董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谱衍射红外双波段双焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(5): 764-770.
- [5] XU Yan, WANG Zhao-qi, TIAN Ye, et al. Hybrid refractive/diffractive optical system of a digital retina camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1122-1124.
许妍, 王肇圻, 田野, 等. 基于眼模型的折/衍混合眼底相机设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1122-1124.
- [6] ZHANG Yun-cui, SUN Qiang, LU Zhen-wu. Design of diffractive/refractive LWIR staring imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1257-1259.
- [7] DING Xue-zhuan, WANG Xin, LAN Wei-hua, et al. Design of Re-imaging MIR optical system employing refractive and diffractive optical elements[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(8): 449-452.
丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 二次成像中波红外折射衍射光学系统设计[J]. 红外技术, 2009, **31**(8): 449-452.
- [8] LI Jun-qi. The using of diamond turning in fabricating diffractive optical elements for infrared[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004: 25-49. 李军琪. 红外衍射光学元件的金刚石车削加工技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 25-49.
- [9] ZHANG Hui, DING Xue-mei, TAN Jiu-bin. An achromatic method based on hybrid refractive-diffractive principle for the optical imaging objective with long focal depth[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **17**(10): 1810-1814.
张慧, 丁雪梅, 谭久彬. 基于折/衍混合的长焦深成像物镜消色差方法[J]. 光学精密工程, 2008, **17**(10): 1810-1814.
- [10] ZHANG Liang. One kind of athermalization and dual field of view optical system design[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 566-567.
张良. 无热化双视场红外光学系统的设计[J]. 光学技术, 2009, **35**(4): 566-567.
- [11] BAI Yu, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, et al. An athermal design of infrared hybrid diffractive/refractive optical system in $3.2\sim 4.8\ \mu\text{m}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2261-2263.
白瑜, 杨建峰, 马小龙, 等. 红外 $3.2\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的消热差设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 2261-2263.
- [12] LEE K H. First-order optics computation for re-imaging IR optical systems[C]. *SPIE*, 2003, **5076**: 123-129.

Design of Hybrid Refractive-Diffractive Dual Field of View Infrared Optical System

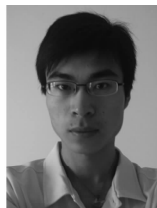
TANG Da-wei^{1,2}, SUN Qiang¹, WANG Jian¹, LIU Ying¹, GUO Bang-hui¹

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

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

Abstract: In order to switch the dual Field of View Infrared optical system quickly, and satisfy the requirements of the portability and installation, a lightweight hybrid refractive-diffractive dual FOV IR optical system is designed. The system adopts re-imaging and hybrid refractive-diffractive system, is optimized by optical design software, and the image quality is also evaluated. The temperature compensation is also analyzed, and the temperature compensation curves are also shown. The system can be switched from 120 mm/60 mm and the work wavelength is between 3.7~4.8 μm . The results indicate that the efficiency of the cold shield is 100%; at the Nyquist frequency 33 lp/mm of the detector, the MTF of the off-axial field is higher than 0.3, and the system's optical length is 200 mm. The whole system consists of 7 pieces of lenses, and the dual FOV can be switched by shifting only one piece of them, which makes the system simple, lightweight with high quality imaging.

Key words: Hybrid refractive-diffractive; Re-imaging; Dual Field of View(FOV); Temperature compensation



TANG Da-wei was born in 1986. Now he is pursuing the M. S. degree, and his research interests focus on IR optical design.



SUN Qiang was born in 1971. He is a researcher with the Ph. D. degree and his research interests focus on infrared optics, binary optics and IR optical system simulations.