

# 超紧凑型单片成像光学系统设计

虞林瑶<sup>1,2</sup> 谢京江<sup>1</sup> 魏 群<sup>1</sup> 张天翼<sup>1,2</sup> 王 超<sup>1,2</sup> 朱瑞飞<sup>1</sup> 贾宏光<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对红外搜索及跟踪系统中折反式光学系统结构复杂, 装调困难及成本高的问题, 采用了一种一体式折反结构的透镜。在单片透镜的前后表面进行分区域加工, 分别镀上内反射膜和增透膜, 形成两个反射面和两个透射面, 构成折反一体式透镜。将整个光学系统集成在一片透镜上, 降低了系统的复杂度和装调难度, 提高了系统的稳定性和可靠性。设计了适用于中波红外的紧凑型成像光学系统, 远射比达0.62, 结果表明该系统像质优良; 各视场光学传递函数均大于0.55, 接近衍射极限, 并且利用二元衍射光学元件在-40℃~60℃实现光学被动消热差; 最后利用单点金刚石车床加工出的样机在不同温度下进行成像实验, 结果表明在不离焦的情况下, 各温度下成像清晰, 满足实际加工和应用需求。

**关键词** 光学设计; R-C系统; 衍射光学; 消热差; 非球面

**中图分类号** TP394.1; TH691.9

**文献标识码** A

**doi:**10.3788/AOS201535.0422006

## Super Compact Optical System Design Based On Single Lens

Yu Linyao<sup>1,2</sup> Xie Jingjiang<sup>1</sup> Wei Qun<sup>1</sup> Zhang Tianyi<sup>1,2</sup> Wang Chao<sup>1,2</sup>

Zhu Ruifei<sup>1,2</sup> Jia Hongguang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to solve the problems when the R-C reflect IR system and the stability of the second mirror is installed, a compact integer structure is presented. The front and rear surface of lens are machined. Then inner reflect films are coated on two surfaces. At last the two mirrors are assembled in one lens which makes the installation of the two mirrors easier and the structure of the second mirror more stable. Reflection and anti-reflection films are coated on different surfaces respectively. Then two reflective surfaces and two transmission surfaces are produced on single lens. The entire optical system is integrated on a lens. It can not only effectively reduce system complexity and the difficulty of alignment, but also improve the stability and reliability of the system. A design of medium wave infrared (MWIR) compact optical system is presented. It has good imaging capability with modulation transfer function (MTF) of all field of view more than 0.55 which is very close to the diffraction limitation. The optics system realizes athermal between -40℃~60℃ by binary diffractive optical element. Finally a real lens is manufactured by a single point diamond turning machine and imaging experiments is carried out at different temperatures. The results show that the optical system performance well without defocus. The system meets the actual processing and application requirements.

**Key words** optical design; R-C systems; diffraction optics; athermal; aspheric

**OCIS codes** 220.4830; 040.3060; 230.1150

## 1 引言

近年来在各种飞行器和导弹的红外搜索与跟踪系统中, 光学系统结构的小型化和轻量化是设计时需要参考的重要标准, 折反式光学系统以其结构尺寸小、质量轻、大口径等优势成为国内外研究人员的主要选择<sup>[1-5]</sup>。而双反射镜的装调和次镜支架的固定一直是折反式系统主要的难点: 1) 双反射系统公差敏感, 装调困难; 2)

收稿日期: 2014-12-09; 收到修改稿日期: 2015-01-16

作者简介: 虞林瑶(1987—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。 E-mail: yulinyao87@163.com

为了减少支架对光线的遮挡,限制了支架截面积,导致次镜的结构强度和稳定性受到限制<sup>[2]</sup>,并且导弹在行进过程中(加速前进、横滚、转向)受到很大的加速度,使次镜的支架发生变形,严重影响成像质量,降低了制导的精确性;3) 由于系统像质对双反射镜主次镜的间距的公差非常敏感,使得由于温度变化导致间距的变化对系统成像质量影响较大,因此系统无热化变得困难。薛慧<sup>[6]</sup>使用折衍混合元件实现了长波折反结构的光学系统,并应用到红外跟踪与搜索系统中。曲贺盟等<sup>[7]</sup>采用的折反式结构设计了大相对孔径紧凑型红外光学系统,利用中继透镜组和前组反射镜互相补偿,并且配合低膨胀系数的钛合金机械结构实现消热,但是系统结构复杂,钛合金不易加工,且成本较高。

本文采用了一种一体式的双反射结构——将主次镜集成在一个透镜前后表面,仅用一片透镜实现了光学系统成像。安装时采用普通的铝合金材料的结构件,降低成本,简化了系统结构,其远射比达 0.62。同时通过在出射面加工衍射面,利用折衍混合实现了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的无热化。采用这种结构相当于将次镜装调的精度要求转交给加工程序,而且现在随着先进的单点金刚石车床引进,其加工精度完全可以满足要求。设计了波段 $3.7\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ ,焦距 $84\text{ mm}$ 的光学系统,实现了100%冷光阑效率,成像质量达到衍射极限。最后对样机进行成像测试,能够在不离焦的情况下实现 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 完善成像。

## 2 双反射系统设计

针对一体式折反光学系统的设计,可以先从分离的R-C系统设计出发,通过在两反射镜之间增加材料获得初始结构,最终经过进一步优化得到结果。经典的R-C系统结构形式如图1所示,将主镜改为双曲面可以校正球差和彗差,同时还可以增加视场。

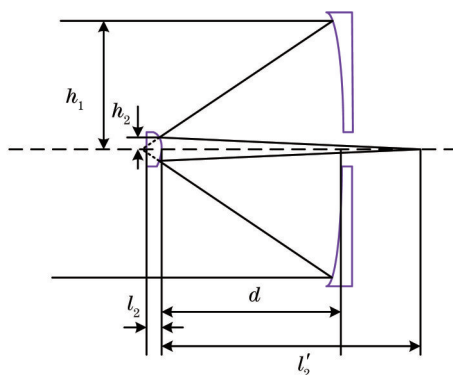


图1 R-C光学系统结构

Fig.1 R-C optical system configuration

计算系统的初始结构,各个物理量的含义见图1所示。取无限远的目标 $l_1 = \infty$ ,  $u_1 = 0$ ;将孔径光阑放置于主镜上,即 $x_1 = y_1 = 0$ ;  $\alpha$ 为次镜遮拦比,即 $\alpha = h_2/h_1$ ;  $\beta$ 为次镜的放大率,  $\beta = l_2/l_1$ ;主镜焦距乘以次镜放大率即为R-C系统的有效焦距;  $e_1^2$ 为主镜二次曲面系数;  $e_2^2$ 为次镜二次曲面系数;利用高斯光学公式求解出<sup>[5]</sup>:

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta} R_1. \quad (1)$$

R-C系统不产生色差,仅需考虑单色像差,在消球差和彗差的情形下,即 $S_I = S_{II} = 0$ ,可以解得:

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}, \quad (2)$$

$$e_2^2 = \frac{2\beta}{1-\alpha} + \frac{(1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3}, \quad (3)$$

于是在确定主镜焦距及次镜的遮拦比和放大率后,R-C系统的初始结构便可以计算出来。

通过上述方法得到的一体式折反结构的像差很严重,必须采用高次非球面才能有效地校正像差。分别选用四次项、六次项、八次项和十次项作为优化变量。此类高次非球面加工技术已经很成熟,加工精度能够达到系统设计的公差要求,且成本不是很高。

### 3 衍射光学设计

为了使系统在缩小和简化结构的同时能够很好的消单色像差和色差,采用了二元衍射光学元件<sup>[6-9]</sup>。普通的光学元件产生的色差是由元件本身选用的材料决定的,而衍射元件的色差是由元件表面的微结构引起的,与基底材料无关,其等效阿贝常数  $\nu^D$  和部分色散  $p^D$  推导如下。

对于衍射光学元件,其色散公式可以表示为

$$f = \frac{\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (4)$$

式中  $f_0$  为设计波长  $\lambda_0$  的焦距,  $m$  为衍射级次(通常取  $m=1$ ),  $f$  为元件在波长为  $\lambda$  下的焦距。

对比普通光学元件的焦距公式,将衍射元件的焦距表示成含有等效折射率的表达式:

$$f = \frac{1}{(n^{\text{eff}} - 1)C_0}, \quad (5)$$

式中  $C_0$  为表面曲率,  $n^{\text{eff}}$  为衍射元件的等效折射率。

由(4)式,(5)式以及阿贝常数和相对色散的定义式可得衍射元件等效的阿贝常数和相对色散为

$$V^{\text{eff}} = \frac{n_2^{\text{eff}} - 1}{n_1^{\text{eff}} - n_3^{\text{eff}}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (6)$$

$$P^{\text{eff}} = \frac{n_1^{\text{eff}} - n_2^{\text{eff}}}{n_1^{\text{eff}} - n_3^{\text{eff}}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (7)$$

式中  $\lambda_1, \lambda_3$  为需要消色差的两个波长,  $\lambda_2$  为中心波长。对 3.7~4.8  $\mu\text{m}$  的中波红外,其阿贝数和部分色散分别为  $V^{\text{eff}} = -4$ ,  $P^{\text{eff}} = 0.5$ , 所以衍射元件具有与普通元件相反的较大的色散。与通常采用的正负透镜结合消色差的相比,尤其是对中波红外系统,可选用的光学材料很少,而采用折衍结合的透镜就能够很好地消除了色差,为系统进一步消热差奠定基础,同时大大简化了结构,缩小了体积,减轻了重量。考虑到加工的难度和成本问题,可以将衍射面设置在系统的出射面处。

## 4 设计实例与分析

### 4.1 设计结果

本系统采用  $F$  数为 1.87, 320 pixel×256 pixel, 像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$  的中波红外 J-T 制冷型探测器。光学系统参数如下表所示:

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optics system

Wave / $\mu\text{m}$	Focal length /mm	Field $2\omega$ /( $^\circ$ )	$F\#$
3.7~4.8	83	4.88	1.87

设计指标如下:光学系统结构应当紧凑,其长度小于 54 mm;遮拦比小于 40%;为了最大幅度的抑制背景辐射的影响,要求实现 100%冷光阑,像质接近衍射极限;在 -40  $^\circ\text{C}$ ~+60  $^\circ\text{C}$  实现光学被动消热,完善成像。

利用 Focus Software 公司的 Zemax-EE 软件实现如图 2 所示的光学系统设计。系统总长 52 mm, 整个透镜的光学表面有 4 个部分,前表面的入射面和次镜,后表面的主镜和出射面。由于系统的视场较大,引入的轴外像差很严重,入射面和出射面采用高次非球面校正像差。透镜采用的红外材料 Ge 便于非球面的加工,主次镜由内反射膜镀成。为实现 100%冷光阑效率,将光阑设置在离像面 19.8 mm 处,并控制出瞳大小为 10.6 mm。通过软件对光学系统反复进行优化,得到最终如图 3 所示的系统。无热化设计后的光系统参数如表 2 所示。

第一个表面为透射面,采用的是凹面的结构,能够提供负的光焦度,减小了到达主反射镜的光线角度。这样能够有效地减少反射镜结构的轴外像差,尤其是球差和彗差。同时也意味着能够扩大光学系统的视场角。第四个表面为出射面,采用的凸面的结构,具有正的光焦度,能够分担系统的一部分光焦度,降低双反射镜结构的光焦度,有利于降低系统的像差校正的难度。

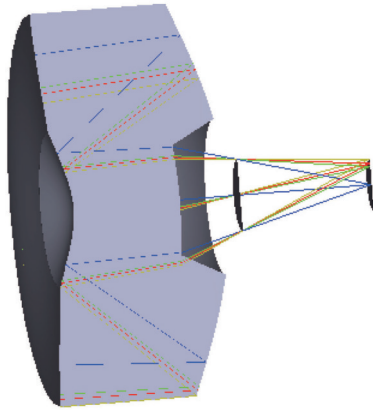


图2 3D系统光路  
Fig.2 3D configuration of optical system

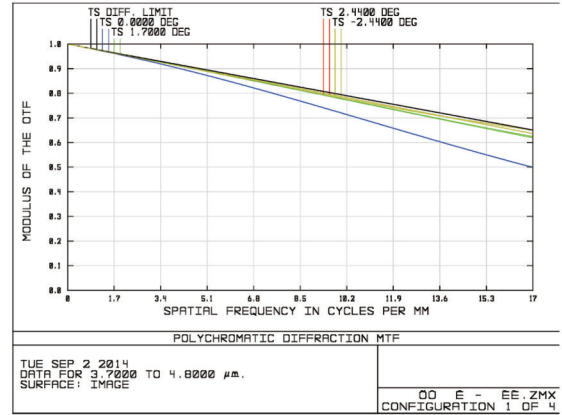


图3 光学传递函数  
Fig.3 MTF of optical system

表2 光学系统结构参数

Table 2 Parameters of the optical system structure

Lens	Radius of curvature /mm	Lens thickness /mm	Material
1	319.49 ASP1	26	Germanium
2	-80.177 ASP2	-23.48	Mirror
3	-27.775 ASP3	18	Mirror
4	-228.398 ASP4	6.94	Air
5(Stop)	Infinity	19.8	Air
IMA	-	-	-

Note: 1 Aspheric equation used in the design can be expressed as:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^2 + Br^4 + Cr^6 + Dr^8 + Er^{10} \dots$$

2 The aspheric coefficients of ASP1 are  $c=-92.6$ ,  $B=-4.728 \times 10^{-7}$ ,  $C=-6.478 \times 10^{-10}$ ,  $D=1.1038 \times 10^{-14}$ ,  $E=-2.451 \times 10^{-16}$

3 The aspheric coefficients of ASP2 are  $c=-6.46$ ,  $B=-1.341 \times 10^{-6}$ ,  $C=3.571 \times 10^{-10}$ ,  $D=-2.695 \times 10^{-13}$ ,  $E=7.012 \times 10^{-17}$

4 The aspheric coefficients of ASP3 are  $c=0.134$ ,  $B=3.342 \times 10^{-5}$ ,  $C=3.013 \times 10^{-11}$ ,  $D=-1 \times 10^{-10}$ ,  $E=2.094 \times 10^{-13}$

5 The aspheric coefficients of ASP4 are  $c=-64.112$ ,  $B=2.995 \times 10^{-5}$ ,  $C=1.29 \times 10^{-7}$ ,  $D=1.094 \times 10^{-11}$ ,  $E=-4.641 \times 10^{-12}$

6 The thermal expansion coefficient of Ge is  $6.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , the thermal expansion coefficient of Ti is  $8.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , the thermal expansion coefficient of Al is  $22.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

光学传递函数(MTF)、点斑图、能量包围曲线如图3,图4和图5所示,其中MTF在17 lp/mm处达到0.55,

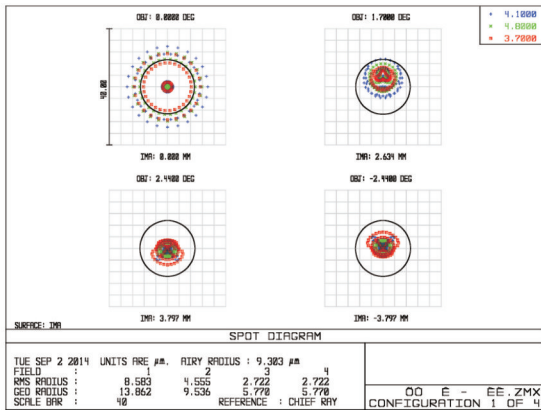


图4 光学系统点斑图  
Fig.4 Spot diagram of the system

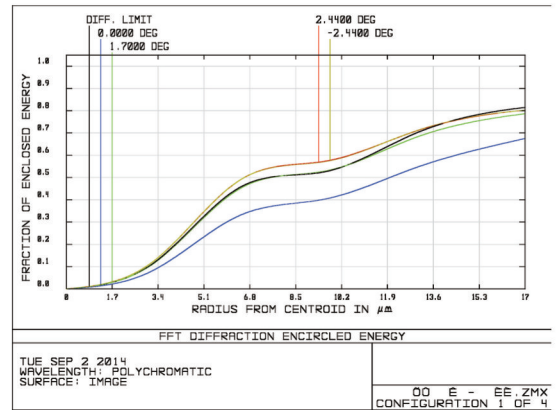


图5 系统能量集中度曲线  
Fig.5 Energy encircle curves of the system

接近衍射极限,点斑图中各个视场的几何像斑尺寸小于  $37\ \mu\text{m}$ ,单个像元内能量到达 95%,成像质量优良。

### 4.2 消热差分析

通常在红外波段实现光学被动无热化至少需要三种材料相互匹配,但对所提出的结构,次反射镜是在 Ge 内部的反射面,具有较大光焦度的负校正面,于是使用 Ge 同时配合衍射面能够很好的实现消热差<sup>[10]</sup>。由于衍射元件具有特殊的色散特性,利用它就可以对光学系统的单色像差和色差进行很好的校正,而且它受温度影响小,因此设计时只需合理地分配各个表面的光焦度就可实现消热差<sup>[11-12]</sup>。图 6 为系统最后一面(衍射面)的位相及周期与径向距离的关系,此衍射面的线频率最大为 0.86 period/mm,对应最小周期线宽为 1.162 mm,若每周期刻蚀 8 个台阶,此时对应的最小特征尺寸为  $145\ \mu\text{m}$ ,这样的线宽完全可以用“金刚石切削工艺”加工此衍射面。其中  $-40\ ^\circ\text{C}$ ,  $+60\ ^\circ\text{C}$  的 MTF 如图 7、图 8 所示,在各个温度时 MTF 均大于 0.4,有较好的消温差效果。

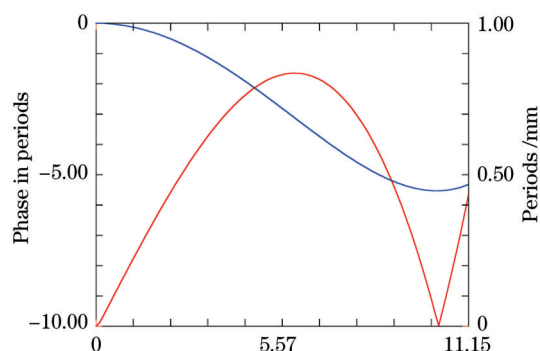


图 6 衍射光学元件的位相及周期和径向的距离关系

Fig.6 Relationship of phase and periods with radial distances of diffractive optical element

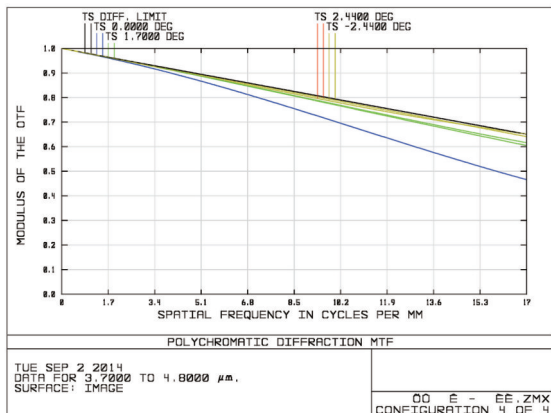


图 7  $60\ ^\circ\text{C}$  时光学传函曲线

Fig.7 MTF curves at  $60\ ^\circ\text{C}$

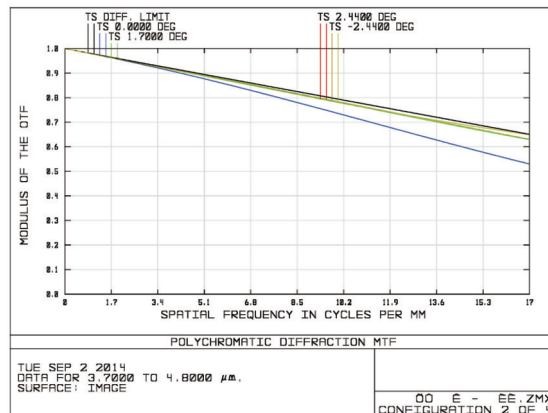


图 8  $-40\ ^\circ\text{C}$  时光学传递函数曲线

Fig.8 MTF curves at  $-40\ ^\circ\text{C}$

### 4.3 杂散光分析

在红外光学系统中,杂散辐射对成像质量的影响已成为必须要考虑的因素。由于一体式结构的特殊性,无法采用通常 R-C 结构的主次镜内遮光罩结构,因此,需要对其消杂散辐射进行分析。

设计时可以将出射面控制在两反射镜之间,如图 9 所示。这样不仅能够使系统更加紧凑,而且主反射镜与出射面之间的圆环面可以染黑,从而形成一种类似主镜挡光环的结构。从视场外入射的光束能够有效地被吸收。在 Lighttools 中建模,进行光线仿真,如图 8 所示,该圆环能够有效地吸收外视场的光线。对于太阳背景的杂散辐射,也可以通过使用外遮光罩加挡光环结构;而视场内不按成像光路行进的杂散光将在探测器上形成鬼像,可以通过在透射面镀增透膜、提高反射面的光洁度来降低鬼像的影响<sup>[13-14]</sup>。

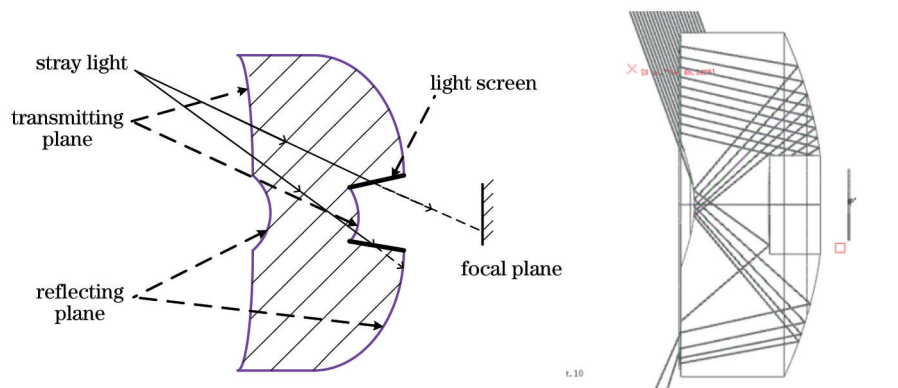


图9 一体式结构消杂光示意图  
Fig.9 Stray light resistant structure

## 5 成像实验

利用单点金刚石车床加工出的如图 10 所示的镜头,一体式折反透镜和探测器之间的结构材料选用为成本低廉的铝合金。装调完成后,经测试,连同探测器,整机的 MTF 曲线如图 11 所示(由于测试仪器原因,横坐标单位为 cycle/mrad,对应的奈奎斯特频率为 1.4 cycle/mrad),由于该测得的 MTF 受加工误差影响,同时也包含了探测器的 MTF,比仿真的降低了 0.35。在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境下,进行无离焦成像,目标选用温差为 0.5 K 的黑体。成像结果如图 12 所示,从图中可以看出,在无离焦的情况下,各个温度下的目标成像轮廓清晰,满足实际成像需求。

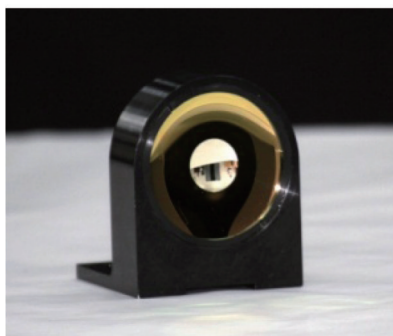


图10 加工装调完成的镜头  
Fig.10 Lens after manufacturing

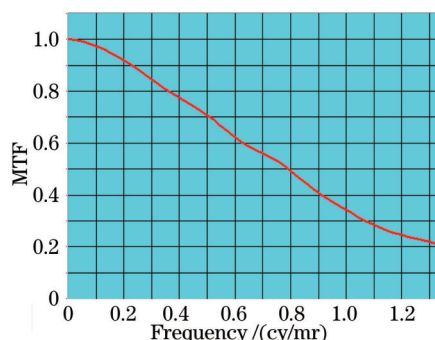


图11 整机实测传递函数曲线  
Fig.11 Testing MTF curve of whole system

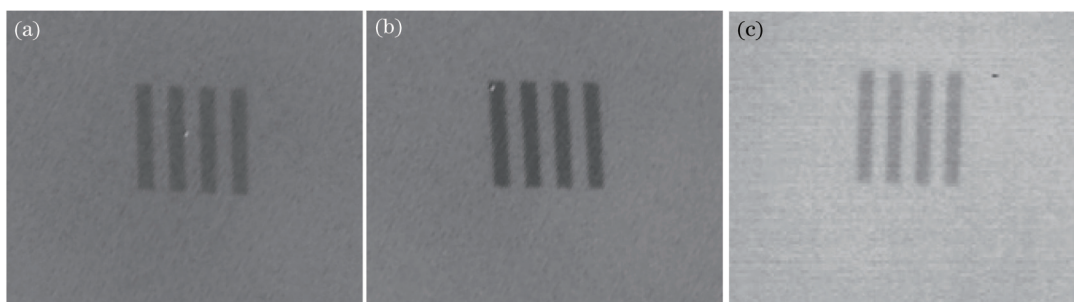


图12 光学系统无热化成像实验(未离焦)。(a)  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  成像; (b)  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  成像; (c)  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  成像  
Fig.12 Athermal imaging experiment of optical system(without defocus). (a) Imaging at  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
(b) imaging at  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c) imaging at  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 6 结 论

设计了一种中波红外的一体式折反成像系统,在单个透镜上实现了焦距  $f=84\text{ mm}$ , 100%冷光阑效率的折返式成像系统,结构紧凑,装调简单。系统的装调误差转嫁给加工,而目前利用单点金刚石车床技术已经很成

熟,可以保证其加工精度。MTF在17 lp/mm处达到0.55,接近衍射极限,利用折衍混合元件实现 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内消热差,通过实验验证在该范围内无需调焦,成像质量优良,具有一定的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Shi Guangwei, Zhang Xin, Zhang Jianping. Unobsured catadioptric infrared optical systems[J]. Opt Precision Eng, 2014, 22(8): 1995-2000.  
史广维,张 新,张建萍.无遮拦折反射红外光学系统[J].光学精密工程,2014,22(8):1995-2000.
- 2 Zhang Shuqing, Wang Jinyang, Wang Zhile, *et al.*. Design of infrared optical system for multi-target compounded simulator[J]. Opt Precision Eng, 2014, 22(6): 1454-1460.  
张树青,王敬洋,王治乐,等.红外多目标复合仿真光学系统设计[J].光学精密工程,2014,22(6):1454-1460.
- 3 Li Ning, Zhang Yunfeng, Liu Chunxiang, *et al.*. Calibration of 1m aperture infrared theodolite[J]. Opt Precision Eng, 2014, 22(8): 2054-2060.  
李 宁,张云峰,刘春香,等.1 m口径红外测量系统的辐射定标[J].光学精密工程,2014,22(8):2054-2060.
- 4 Ye Jingfei, Gao Zhishan, Ye Haishui, *et al.*. Near-infrared afocal laser beam expanding system with large zoom ratio[J]. Opt Precision Eng, 2013, 21(5): 1129-1136.  
叶井飞,高志山,叶海水,等.大变倍比近红外无焦激光扩束系统[J].光学精密工程,2013,21(5):1129-1136.
- 5 Fu Xuenong, Cheng Xiaojuan, Wu Wenkai, *et al.*. Design of large aperture mirror support and its stability[J]. Opt Precision Eng, 2008, 16(2): 179-184.  
傅学农,陈晓娟,吴文凯,等.大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J].光学精密工程,2008,16(2):179-184.
- 6 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2383-2386.  
薛 慧.红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J].光学学报,2010,30(8):2383-2386.
- 7 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003.  
曲贺盟,张 新,王灵杰,等.大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J].光学学报,2012,32(3):0322003.
- 8 Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1475-1478.  
潘君骅.大口径红外成像系统的光学设计[J].光学学报,2003,23(12):1475-1478.
- 9 Dong Keyan, Pan Yulong, Wang Xuejin, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system[J]. Opt Precision Eng, 2008, 16(5): 764-771.  
董科研,潘玉龙,王学进,等.折谐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):764-771.
- 10 Thomas Stone, Nicholas George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. Appl Opt, 1988, 27(14): 2960-2971.
- 11 Dun Xiong, Jin Weiqi, Wang Xia. Design of large relative aperture compact infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622002.  
顿 雄,金伟其,王 霞.大相对孔径超紧凑型红外光学系统设计[J].光学学报,2014,34(6):0622002.
- 12 Bai Jian, Sun Ting, Shen Yibing, *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid-diffractive optical systems[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(7): 997-1002.  
白 剑,孙 婷,沈亦兵,等.红外折射-衍射混合光学系统的热差分析[J].光学学报.1999,19(7):997-1002.
- 13 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2267-2271.  
牛金星,周仁魁,刘朝晖,等.红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J].光学学报,2010,30(8):2267-2271.
- 14 Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suporession of internal and external strau light in infrared optical remate sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.  
李 岩,刘剑峰.红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J].光学学报,2013,33(9):0928002.

栏目编辑:韩 峰