

doi:10.3788/gzxb20164512.1211003

硫系玻璃在无热化长波红外广角镜头中的应用

王静^{1,2}, 吴越豪^{1,2}, 姜波^{1,2}, 戴世勋^{1,2}, 徐铁峰^{1,2}, 木锐³

(1 宁波大学 高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

(2 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

(3 云南北方驰宏光电有限公司, 昆明 650000)

摘 要:设计了一种工作波段为 8~12 μm 、有效焦距为 5 mm、 F 数为 2、视场角为 110° 的无热化长波红外广角镜头。根据红外无热化光学设计的基本原理,用了常规红外材料硫化锌、硒化锌和硫系玻璃材料制备的六片镜片,通过合理地分配各个镜片的光焦度以及相互间空气间隔等参量,在全视场角为 110° 的范围内实现接近衍射极限的成像效果。为了更好地控制系统像差,设计利用了硫系玻璃易于精密模压制备非球面的优点,在两片硫系玻璃镜片上设计了 3 处非球面。设计结果显示:系统在 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内均可实现品质良好的红外成像,光学调制函数全视场内均大于 0.4,同时在 110° 视场角时畸变控制在 5% 以下;实现了在较大视场角条件下控制红外广角镜头的畸变以及系统无热化等设计要求,该系统体积紧凑、质量较轻,整体设计符合民用红外车载镜头的使用要求。

关键词:红外成像;几何光学;光学设计;广角镜头;红外光学系统;无热化;非球面;硫系玻璃;畸变

中图分类号:O439; TH74; TN216 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2016)12-1211003-6

Application of Chalcogenide Glass in Designing a Long Wavelength Infrared Athermalized Wide-angle Lens

WANG Jing^{1,2}, WU Yue-hao^{1,2}, JIANG Bo^{1,2}, DAI Shi-xun^{1,2}, XU Tie-feng^{1,2}, MU Rui³

(1 Laboratory of Infrared Materials and Devices, Institute of Advanced and Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(3 Yunnan KIRO-CH Photonics Co, Kunming 650000, China)

Abstract: A Long Wavelength Infrared(LWIR) wide-angle lens whose Field Of View(FOV) is 110° was proposed. The operating wavelength of the lens is a range from 8 to 12 μm , the operating temperature range is $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$, the effective focal length is 5mm, and the F number is 2. This design utilizes a combination of 6 lens elements that are made of chalcogenide glass materials, Zinc Sulfide, and Zinc Selenide. The optical powers of the lens elements as well as their locations were carefully calculated and optimized to simultaneously eliminate the chromatic and thermal aberrations for the designed wavelength/temperature range. Taking advantage of the superior molding capability of chalcogenide glasses, the proposed design incorporates three aspherical surfaces on lens elements fabricated with chalcogenide glasses, such that optical aberrations can be furtherly corrected. According to the design results, the proposed system can produce thermal images with a close to diffraction limited performance for the temperature range from -40°C to 60°C . At the spatial frequency of 15 lp/mm, the Modulation Transfer Function(MTF) values of the proposed system are higher than 0.4 for the entire FOV, and at the same time, system distortion is controlled below 5%.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2016YFB030800)、发光材料与器件国家重点实验室开放基金(No. 12014-skllmd-01)、浙江省重中之重学科开放基金项(Nos. XKXL1320, XKL141039)和宁波市自然科学基金(No. 42014A610125)资助

第一作者:王静(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为红外光学系统设计. Email:1241991601@qq.com

导师(通讯作者):吴越豪(1982-),男,副研究员,博士,主要研究方向为硫系玻璃光学设计、硫系玻璃光器件. Email:wuyuehao@nbu.edu.cn

收稿日期:2016-07-11; **录用日期:**2016-08-31

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Infrared imaging; Geometrical optics; Optical design; Wide-angle lens; Infrared optical system; Athermalized design; Aspheric surfaces; Chalcogenide glass; Distortion

OCIS Codes: 110.3080; 080.4225; 080.4228; 160.2750

0 引言

红外广角镜头可用在车载、舰载、机载夜视等领域,可扩展驾驶员的夜间观察视野,为交通工具的夜间行驶提供额外的安全保障^[1-3].可见光波段广角镜头的视场通常可大于 150° ;而红外广角镜头的视场角则较少超过 100° ^[3-4].为了进一步拓展红外广角镜头在车载夜视等领域的应用,有必要进一步提升红外车载镜头的视场角以扩展驾驶员的视野.

现有视场角超过 100° 的红外车载镜头的设计较少,主要是因为当视场角超过 100° 时,由于红外光学材料的选择不如可见光波段材料的选择丰富,红外广角镜头的各种像差(例如畸变、色差、热差)较难得到良好控制^[5].美国 Exotic Electro-Optics Inc. 的 Donald Fisher 在 1998 年报道了一种基于锗材料的红外广角镜头,采用了 4 片锗镜片实现了 100° 的视场角,畸变控制在 20% 以下^[6].随后,苏州大学的沈为民使用了 3 片锗镜片实现了一种视场角为 135° 的红外广角镜头;整体系统的紧凑性有所提升,但是这种镜头在 135° 视场角时的畸变达到了 60%,导致在大视场角的情况下光学图像存在明显桶型变形^[7].中国科学院西安光学精密机械研究所的陈潇同样也采用 3 片锗材料设计了一种红外超广角镜头,其视场角达到 160° ,畸变则达到了 100%^[8].为了控制红外成像系统在大视场时的畸变问题,中国空空导弹研究院的吴海清提出通过在锗镜片上添加衍射面的方法来控制红外广角系统的畸变;他设计了一种视场角为 240° 的红外鱼眼镜头设计,最大畸变为 13%^[9].昆明物理研究所的李林涛则采用添加非球面的方法来控制畸变;他提出了一种包含 4 片锗镜片的红外广角镜头的设计方法,最大视场角为 110° .通过在第 1 片和靠近像方的第 2 片锗镜片的后表面上添加了形状各异的非球面,该设计成功将 110° 视场角时的系统畸变控制到 14% 以下^[10].

上述设计例子均通过较为简单紧凑的光学结构实现了大视场红外成像的设计功能.但是上述设计都仅采用了锗材料作为镜片制备的基质材料,鲜有针对系统热差进行矫正.锗材料的价格较为昂贵,而且在单晶锗上制备衍射面和非球面需采用昂贵费时的单点金刚石车削技术,不利于控制红外系统的加工成本.除此之外,锗材料的折射率温度系数较高($400 \times 10^{-6}/\text{K}$),因此上述红外广角系统在温度变化较大的环境中无法正常使用.

在上述工作的基础上,本文采用硫系玻璃材料配合常规红外光学材料硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)设

计了一种视场角为 110° 的红外广角成像镜头.硫系玻璃具有优良的中远红外光学透过性能($3 \sim 15 \mu\text{m}$),且折射率温度系数较低,因此适宜用来制作红外无热化光学系统.此外,硫系玻璃的软化温度较低(例如本文采用的 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 玻璃的软化温度为 264°C),可以在较低的温度下利用高精度度模压成型工艺直接加工球面、非球面和衍射面,可有效降低特殊面型镜片的量产制备成本^[11].本文设计采用了反射远型物距结构,包含了前后两镜组共 6 片镜片(包括两片硫系玻璃镜片), F 数为 2,有效焦距为 5 mm,工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$.通过在硫系玻璃镜片上设计非球面,将系统畸变控制在 5% 以下.根据坐标法无热化设计的方法分配各个镜片的光焦度,使系统在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内均可实现高品质红外成像,调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的值接近衍射极限.系统结构紧凑,除保护窗口外最大镜片外径为 41 mm,光学长度为 80 mm,质量约为 93 g,与市场上现有的车载镜头具有类似的体积和重量,适合车载夜视等领域的应用.

1 设计思路和原理

红外车载广角镜头通常有 3 种设计选型思路:a)3 片式物镜(天塞式物镜)结构;b)双高斯物镜结构;c)反射远型物距结构^[10].反射远型物距结构(后面简称反远距结构)由前透镜组和后透镜组两个部分组成.前透镜组的光焦度为正;后透镜组的光焦度为负.这种结构具有视场角较大、相对孔径较大、后工作距较长等优点,因此本文采用这种选型开展红外广角镜头的设计.反远距结构的近轴光路如图 1.

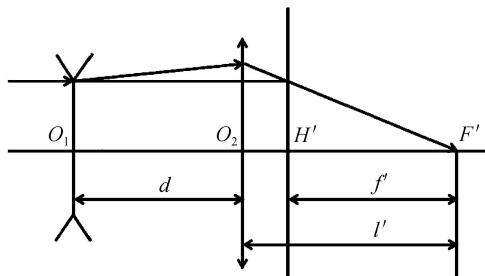


图 1 反远型光学设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inverted telephoto lens

由图 1 可知,反远型设计的像方主面位于透镜组的后方,因此系统具有较大的后焦距.当两镜组之间的距离逐渐变远时,像方主面逐渐向后移动,从而可以获得更大的后焦距.

温度会对光学系统产生影响^[12],考虑到这一影响,可通过被动式消热差的方法进行无热化设计^[13].

为了实现无热化的设计效果,本文首先按照反远型系统的基本结构设计光焦度分别为负和正的前后两个透镜组.在此基础上,采用坐标法无热化设计方案为前后两个镜组分别进行无热化设计.坐标法无热化设计要

1)光焦度方程

$$\frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi \quad (1)$$

2)消色差方程

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1}\right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \omega_i \phi_i = 0 \quad (2)$$

3)消热差公式

$$\frac{\partial f_b^T}{\partial t} = -\left(\frac{1}{h_1}\right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \theta_i \phi_i = 0 \quad (3)$$

式中: h_1 是近轴光线在系统第一片镜面的入射高度, h_i 是近轴光线在系统第 i 片镜面的入射高度.如果透镜组为密接型,忽略镜片厚度引起的相邻镜片间高度差异,则近似认为 $h_1 = h_i$. ϕ_i 、 ω_i 和 θ_i 分别为第 i 镜片组的光焦度、消色差系数和消热差系数.

坐标法无热化设计通常依据不同材料在色差/热差图中构成的三角形的形状大小来判断无热化设计性能的好坏.图 2 展示了包含常规红外材料以及几种典型硫系玻璃材料的色差/热差图.由图 2 可见,任意三种材料可以在图中形成大小形状不一的三角形,称为无热化三角形,形状饱满的无热化三角形可以形成较好的无热化光学设计^[14].根据上述原则,本设计选用了硫系玻璃($\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$,Umicore 公司牌号 GASIR2,宁波大学牌号 NBU-IR1)、硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)三种材料进行光学无热化设计.

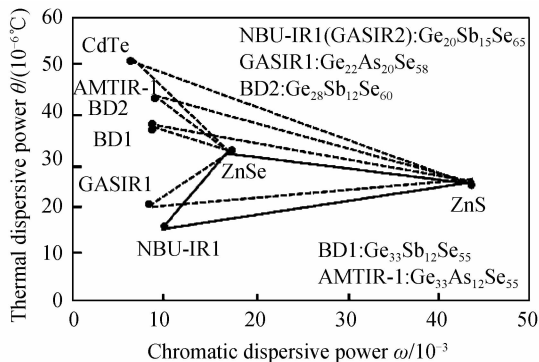


图 2 各类红外材料在 8~12 μm 波段的 $\omega\theta$ 图
Fig. 2 $\omega\theta$ chart of typical infrared materials in the 8~12 μm spectral band

2 红外车载广角镜头设计

2.1 确定镜头设计参量

本文设计的长波红外车载广角镜头,其视场角达

到 110° .其主要技术指标见表 1.设计采用的传感器为 Sofradir 公司的 320×240 非制冷型红外焦平面探测器,其像元尺寸为 $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$.

表 1 系统设计参量

Optical parameters	Value
Field	$\pm 110^\circ$
Effective focal length/mm	5
Entrance pupil diameter/mm	2.5
Working wavelength/ μm	8~12
Working length/mm	80
Focal plan array resolution/pixel	320×240
Pixel size/ μm	35×35
Temperature range/ $^\circ\text{C}$	-40~60

2.2 系统的初始和最终结构

设计的初始结构确定为反远距结构.反远距由前后两个透镜组和光阑构成.反远距型结构的光阑一般设置在后镜组上,使得通过后镜组的光线倾角变小,使其承担较小的视场,而相应的前镜组将会承担较大的视场^[8].系统前透镜组的光焦度为负,后透镜组的光焦度为正.设计时,首先需要确定系统的前后透镜组的光焦度和距离.假设前透镜组的光角度为 ϕ_1 ,后透镜组的光焦度为 ϕ_2 ,则总光焦度计算公式为 $\phi = \phi_1 + \phi_2 - t\phi_1\phi_2$,式中 t 为两透镜组之间的间距.设计时考虑到一般车载镜头的长度,令 $t = 30 \text{ mm}$,通过计算确定 $\phi_1 = -0.05$ 、 $\phi_2 = 0.1$ 、 $\phi = 0.2$,即有效焦距 $f = 5 \text{ mm}$.为了实现无热化的设计目的,系统采用了硫系玻璃、硫化锌和硒化锌 3 种材料制备的 3 片镜片分别作为反远距系统的前后透镜组.通过无热化计算公式(式(1)~(3)),得到系统前后透镜组的光焦度的数值见表 2.

表 2 初始结构的系统光焦度

Material	$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$	ZnS	ZnSe
Front group ϕ	-0.100 9	-0.004 4	0.046 4
Rear group ϕ	-0.201 8	-0.008 9	-0.092 9

将上述计算结果输入到光学设计软件 Zemax 中,适当调整镜片的曲率和间距,得到系统的初始结构如图 3.系统由 6 片镜片构成,前 3 片镜片分别为硫系玻璃、硒化锌和硫化锌,光焦度分别为负、正、正.后 3 片镜片分别为硒化锌、硫化锌和硫系玻璃,其光焦度分别

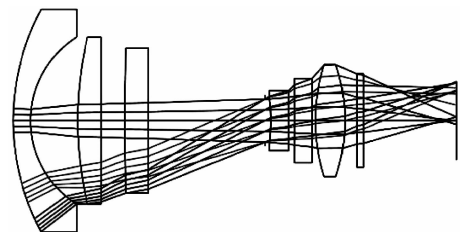


图 3 光学系统的外形结构
Fig. 3 Layout of the initial system

为负、负、正. 在图 3 中,非制冷焦平面前安装了 1 片薄光学平板(材料:ZnS,厚度:1 mm)以保护探测器阵列不受外界灰尘的污染. 镜筒材料选用铝,其线性热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / \text{K}$.

根据上述的初始结构,利用光学设计软件 Zemax 进行光学系统的性能优化. 因为系统采用了反远距光学设计,优化时需使用 Zemax 优化操作数 EFLY 控制系统前镜组和后镜组焦距值,且需分别满足前述计算的理论焦距值,同时在控制系统后工作距前提下,通过增加系统优化变量数量,改变透镜厚度、曲率,合理设置非球面位置及分配系统像差权重值等方式进行像质优化,使系统成像质量满足要求.

图 4 为系统最终优化结构图. 由图 4 可以见,优化后系统第二片镜片光焦度由正变为负,而第三片镜片光焦度由负变为正. 光阑离后透镜组的距离增大. 表 3 为初始结构和最终结构的各镜片焦距变化和曲面间距变化表. $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ 为六镜片焦距值, $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ 为镜片间距. 由于系统的第一片镜片为硫系玻璃镜片,其表面的保护膜镀膜技术尚未成熟,因此在实际使用过程中易受磨损. 锗窗口具有良好的红外透射率、较高的机械强度和易于镀膜等优点,可

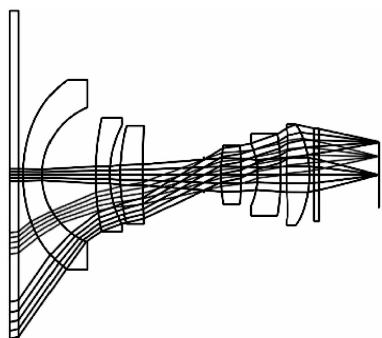


图 4 光学系统的外形结构图

Fig. 4 Layout of the optimized system

表 3 系统初始结构参量和优化后的结构参量
Table 3 Initial and optimized structural parameters of the system

	Initial parameters/mm	Optimized parameters/mm
F_1	-10.099	-23.45
D_1	4	11.60
F_2	21.87	-28.17
D_2	2	2.29
F_3	204.46	44.27
D_3	10	13.31
STOP		
D_4	0.5	3.63
F_4	-10.58	21.43
D_5	0.5	3.48
F_5	-122.68	-20.49
D_6	0.3	1.31
F_6	5.12	11.71

以有效地保护系统. 因此本设计在第一片硫系玻璃镜片前添加了一片厚度为 2 mm 的锗窗口,从而使设计更具有实用性.

2.3 系统设计性能分析

光学系统随着离焦量的增加,图象质量逐渐下降^[15]. 光学系统焦深的计算公式为: $\delta_{l_0} = \pm 2\lambda_{l_0} (f/\#)^2$. 根据上式计算得出在中心波长 $10 \mu\text{m}$ 处系统的焦深为 $80 \mu\text{m}$. 表 4 列出了优化后系统由温度变化产生的系统离焦量.

表 4 优化后光学系统离焦量
Table 4 Defocus of the optimized lens at different temperatures

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Length/mm	Defocus/ μm
-40	-79.999 9	53
20	-79.994 6	0
60	-79.991 1	-35

从表 4 可见,在设计温度范围内($-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$),系统由温度变化导致的离焦量均小于系统焦深,因此本文提出的红外广角光学系统可以在寒冷(-40°C)或是酷暑(60°C)的恶劣环境下仍然保持良好的成像效果.

图 5~7 分别为 -40°C 、 20°C 和 60°C 时优化后系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,横坐标和纵坐标分别为像面上的空间频率(单位为 lp/mm)和光学系统的光学传递函数值. 从图 5~7 可见,在 3 个不同温度点的各个视场角的位置

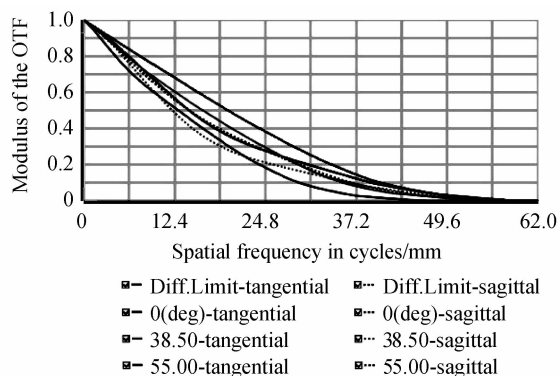


图 5 -40°C 时系统的 MTF 曲线
Fig. 5 MTF of the system at -40°C

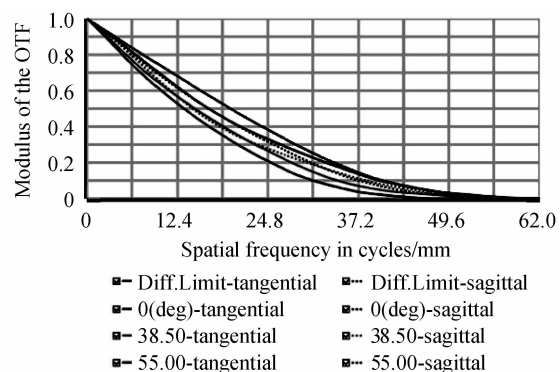


图 6 20°C 时系统的 MTF 曲线
Fig. 6 MTF of the system at 20°C

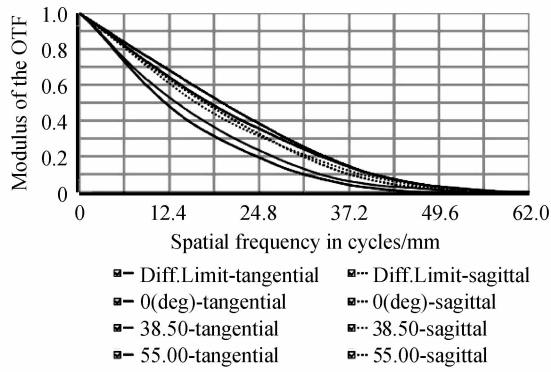


图7 60°C时系统的MTF曲线
Fig.7 MTF of the system at 60°C

置,系统的MTF曲线没有明显的下降,且镜头的成像性能接近于理论极限.在15 lp/mm空间频率处,边缘视场的MTF值最小,大于0.4,表明该镜头可适用于像素尺寸大于35 μm的面阵探测器.

图8~10给出了畸变随实际像高的变化曲线.在

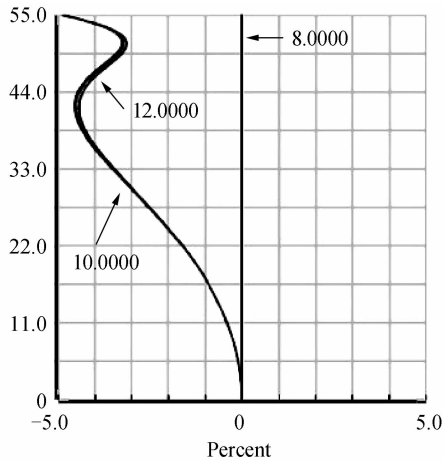


图8 -40°C时畸变随像高的变化曲线
Fig.8 Distortion vs image height at -40 °C

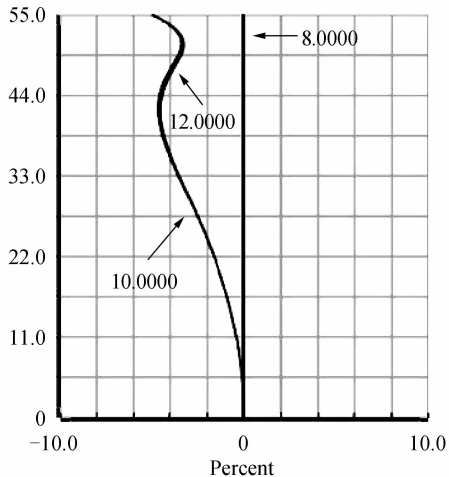


图9 20°C时畸变随像高的变化曲线
Fig.9 Distortion vs image height at 20°C

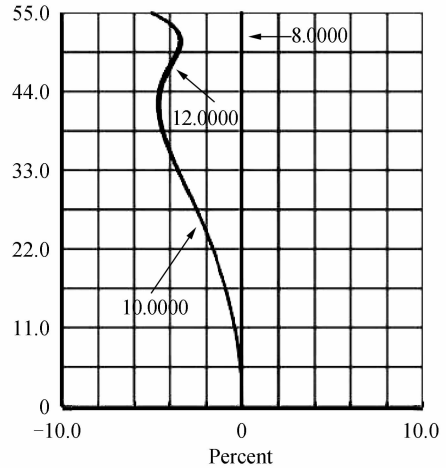


图10 60°C时畸变随像高的变化曲线
Fig.10 Distortion vs image height at 60°C
边缘视场处,畸变达到最大,为-5%,满足系统的技术指标要求.

表5展示了一个点物体发出的光由各个视场角入射系统时形成的弥散斑的均方根半径.由表5可见,光学系统在温度为-40°C、20°C和60°C条件时,所有视场的均方根弥散斑大小均满足35 μm×35 μm的探测器像元尺寸.

表5 系统弥散斑半径
Table 5 RMS radius of the system

Temperature/°C	FOV/H°×V°	RMS radius/μm
	0	12.56
-40	61.6×46.2	22.68
	88×66	31.49
	0	13.99
20	61.6×46.2	22.81
	88×66	22.65
	0	16
60	61.6×46.2	23.84
	88×66	19.22

图11~13是光学系统在-40°C、20°C和60°C时的横向色差曲线.由图可知,系统横向色差几乎不随温度的变化而变化.由此可知,本系统具有良好的消色差性能.

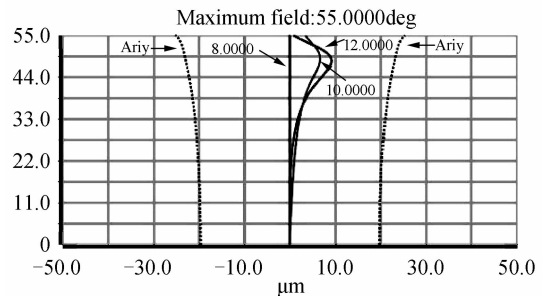


图11 -40°C时系统横向色差图
Fig.11 Lateral color of the system at -40°C

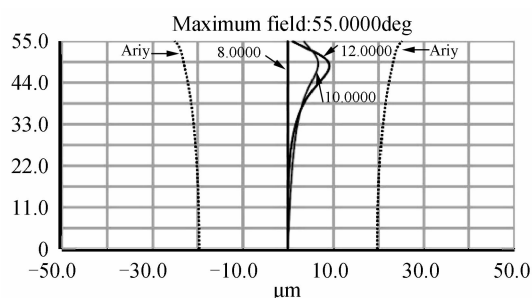


图 12 20℃时系统横向色差图
Fig. 12 Lateral color of the system at 20℃

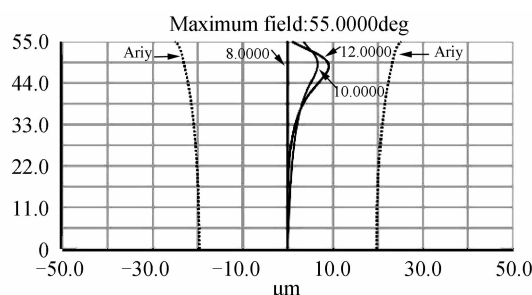


图 13 60℃时系统横向色差图
Fig. 13 Lateral color of the system at 60℃

3 总结

本文设计了一种最大视场角为 110° 的长波红外广角镜头. 利用了硫系玻璃易于模压成型的优点, 采用硫系玻璃制备的非球面镜片和常规红外材料硫化锌及硒化锌制备的球面镜片结合, 设计了一种具有反远距结构、 F 数为 2、有效焦距为 5 mm、工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的红外广角镜头. 系统利用了坐标法无热化设计方法的原理合理分配了硫系玻璃镜片和常规红外材料镜片的光焦度, 实现了在 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内和在 110° 的视场角范围内均可实现接近衍射极限的成像效果, 且系统畸变控制在 5% 以下. 系统结构体积较小, 符合民用红外车载镜头的设计要求, 可在车载夜视领域为驾驶员提供更广阔的视野和更好的成像效果, 提高行车安全.

参考文献

- [1] ZHU Yong-jian. Far infrared lens based on sulfur system glass: China, 203870316[P]. 2014-10-08.
朱勇建. 基于硫系玻璃的远红外镜头: 中国, 203870316[P]. 2014-10-08.
- [2] REN He-qi. Long wave infrared wide-angle lens: China, 203502651[P]. 2014-03-26.
任和齐. 一种长波红外广角镜头: 中国, 203502651[P]. 2014-03-26.
- [3] JIANG Bo. Application of chalcogenide glasses in designing vehicle-mounted infrared imaging lens for civilian applications[J]. *Infrared*

and Laser Engineering, 2015, **44**(6): 1739-1745.

姜波. 硫系玻璃在民用红外车载成像系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(6): 1739-1745.

- [4] SUN Ai-ping, GONG Yang-yun, ZHONG Chen, *et al.* Athermal design of a large-aperture, wide-field assisting pilot infrared lens [J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(10): 617-622.
孙爱平, 龚杨云, 忠陈, 等. 大孔径、大视场辅助驾驶仪红外镜头无热化设计[J]. 红外技术, 2013, **35**(10): 617-622.
- [5] ZHANG Bao-long, LI Dan, ZHANG Shao-jing, *et al.* Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(12): 1222001.
张宝龙, 李丹, 张少敬, 等. 非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, **34**(12): 1222001.
- [6] FISHER D S. Design of high-speed infrared lenses using conic surfaces[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1998, **3482**: 718-724.
- [7] SHEN Wei-min. Optical design of the lens of long wave infrared wide-angle horizon [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(4): 329-332.
沈为民. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(4): 329-332.
- [8] CHEN Xiao. Low F number LWIR optical system with wide field of view[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(3): 350-353.
陈潇. 长波红外大视场大相对孔径光学系统设计[J]. 应用光学, 2010, **31**(3): 350-353.
- [9] WU Hai-qing, ZHAO Xin-liang, LI Tong-hai, *et al.* Design of refractive / diffractive infrared fisheye lens optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1533-1536.
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼眼镜头光学系统设计[J]. 光子学报, 2010, **39**(8): 1533-1536.
- [10] LI Lin-tao. A LWIR ultra wide angle fisheye lens: China, 202735579[P]. 2013-02-13.
李林涛. 一种非制冷长波红外超广角鱼眼镜头: 中国, 202735579[P]. 2013-02-13.
- [11] DAI Shi-xun, CHEN Hui-guang, LI Mao-zhong, *et al.* Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 847-854.
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(4): 847-854.
- [12] ZHOU Chao. Thermal analysis of lager telescope structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0422006.
周超. 大口径望远镜结构热分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(4): 0422006.
- [13] SHEN Man-hong, LI Chen, REN Huan-huan, *et al.* Athermalization design of wide temperature range for dual-band infrared lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0422008.
沈满德, 李程, 任欢欢, 等. 一种实现双光谱宽温探测的红外物镜设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(4): 0422008.
- [14] TAMAGAWA Y, WAKABAYASHI S, TAJIME T, *et al.* Multilens system design with an athermal chart[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(34): 8009-8013.
- [15] ZENG De-xian, HU Bing-liang, SONG Hai-jun. Analysis of defocus in space based space optical debris detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0111002.
曾德贤, 胡炳梁, 宋海军. 空间碎片天基光学探测系统离焦问题分析[J]. 光子学报, 2016, **45**(1): 0111002.

Foundation item: The National Key Research and Development Program(No. 2016YFB030800), the Open Fund of the Stat Key Laboratory Luminescent Materials Devices (No. 12014-skllmd-01), the Zhejiang Open Foundation of the Most Important Subjects(Nos. XKXL1320, XKL141039) and the Natural Science Foundation of Ningbo City (No. 42014A610125)