

硫系玻璃在长波红外无热化连续变焦广角镜头设计中的应用

王 静^{1,2}, 吴越豪^{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, 云南 昆明 650000)

摘 要: 针对市场上现有红外广角镜头大多采用定焦结构且缺乏无热化设计的现状, 根据光学变焦系统的设计原理, 设计了一种有效焦距范围为 10~24 mm(变倍比为 2.4:1)、视场角变化范围为 34°~90°、工作波段为 8~12 μm 、 $F/\#$ 为 2.8 的无热化连续变焦广角镜头。考虑到红外镜头多用在温度变化较大的使用环境中, 系统设计选用了硫系玻璃 NBU-IR2($\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$)以及常规红外材料锗(Ge)和硫化锌(ZnS)制备的六片镜片, 通过合理分配各个镜片的光焦度及其空气间隔等参数, 在连续变焦设计的基础上实现了无热化的光学设计效果。实验结果显示, 系统在-40~60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内均可实现品质良好的红外热成像效果, 调制传递函数全视场范围内均大于 0.25。系统结构较为紧凑简单、质量较轻, 仅在一片硫系玻璃镜片上设计了一处非球面, 可有效控制光学系统的加工成本。整体设计适用于车载夜视等应用领域。

关键词: 光学设计; 广角镜头; 无热化; 非球面

中图分类号: O439; TH74; TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0321001

Application of chalcogenide glass in designing a long-wave infrared athermalized continuous zoom wide-angle lens

Wang Jing^{1,2}, Wu Yuehao^{1,2}, Dai Shixun^{1,2}, Xu Tiefeng^{1,2}, Mu Rui³

- (1. Laboratory of Infrared Materials and Devices, Institute of Advanced Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China;
3. Yunnan KIRO-CH Photonics Co, Kunming 650000, China)

Abstract: Current commercial wide-angle infrared lenses usually adopt simple fixed-focus design structures and lack proper athermalized design. To improve the performance of current wide-angle infrared lenses, the design principle of zoom optical systems and the theorem of passive athermalization were utilized to develop an athermalized continuous zoom wide-angle infrared lens. The effective focal length of the proposed system was 10~24 mm(zoom ratio: 2.4:1), the field of view(FOV) was 34°~90°, the operating wavelength was 8~12 μm , and the F number was 2.8. Considering the fact that infrared

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB030800); 国家自然科学基金青年科学基金(61605094); 浙江省自然科学基金(LQ15F050002); 宁波市自然科学基金(42014A610125)

作者简介: 王静(1992-), 女, 硕士生, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: 1241991601@qq.com

导师简介: 吴越豪(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事硫系玻璃光学设计、硫系玻璃光器件方面的研究。Email: wuyuehao@nbu.edu.cn

lenses were widely used in environments with large temperature variations, the proposed system was designed as a combination of six lens elements, including three fabricated with the chalcogenide glass of NBU-IR2($\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$) and three fabricated with conventional infrared materials such as germanium(Ge) and zinc sulfide (ZnS). By carefully allocating optical powers among the lens elements and properly controlling their air-spacing thicknesses, athermalization was realized by the proposed system design, in addition to the performance of continuous optical zoom. Simulation results show that the proposed system can produce thermal images with a close-to-diffraction-limit performance for the temperature range of -40 to 60 °C. The Modulation Transfer Functions (MTFs) of the system are higher than 0.25 for the entire FOV. The system also has a compact/light-weight structure that only includes one aspheric surface on a chalcogenide glass lens element. Modern precision molding technique can be used to fabricate aspheric surfaces on chalcogenide glasses so that the fabrication costs of the proposed system can be controlled. The overall system design is suitable for the application of vehicle night vision.

Key words: optical design; wide-angle lens; athermalized design; aspheric surfaces

0 引言

红外广角镜头在车载夜视,工业监控和环境污染监测等领域有着重要的应用^[1-2]。随着各种应用的不断深入,人们不仅要求红外广角镜头具有更大的视场角,对于其使用方法的功能性、灵活性等方面也提出了更高的要求。现有的红外广角镜头大多为定焦系统,具有视场单一,无法连续观察距离变化物体等功能局限^[3]。为红外广角镜头增加上红外连续变焦的功能不仅能够在大视场范围内对目标物进行持续跟踪,同时也可在小视场范围内对目标物进行细致地观测,可较好兼顾系统对红外成像目标物的捕获、跟踪、监视与标定等各种应用需求^[2]。

现见于报道的红外连续变焦镜头在短焦端(广角端)最大可实现约 20° 的视场角,畸变控制在20%左右。例如 Muhammad 等人提出了一种采用了五片锗单晶和一片硫化锌镜片设计的红外连续变焦镜头,实现的视场角范围为 $2.56^\circ\sim 19.2^\circ$ ^[4]。华中光电技术研究所的王海涛等人采用了锗和硅制备的八片镜片设计了视场角范围为 $2.15^\circ\sim 13.69^\circ$ 的红外变焦系统^[5]。相比较而言,可见光波段连续变焦系统的视场角变化范围明显更大。例如长春理工大学的李光辉等人采用八片玻璃镜片设计了视场角为 $22^\circ\sim 85^\circ$ 的连续变焦镜头^[6]。

在设计红外连续变焦系统时,一般采用锗单晶作为主要的镜片制备材料。但是考虑到锗单晶价格较为昂贵,且在其表面制备非球面和衍射面等特殊面型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。相比较而言,硫系玻璃具有一定的成本优势。且由于硫系玻璃为非晶态材质,没有固定的熔点,在加热过程中粘度随温度提升而逐渐降低。因此在合适的温度条件下,硫系玻璃可在一定的模具压力作用下复制模具形状,从而可经济快速地制备出高品质的非球面镜片和衍射面镜片^[7]。因此文中在设计时选用硫系玻璃作为主要的镜头制备材料。

红外光学系统多用于沙漠、海洋等温度变化较大的自然环境中,且红外材料的折射率温度系数通常比可见光材料大一个数量级以上,因此常规的折射式红外光学系统在温度变化的条件下会产生严重的像面热漂移现象,影响成像质量。因此在设计红外光学系统时需要温度变化导致的像面热漂移进行补偿^[2]。文中采用硫系玻璃结合常规红外材料锗和硫化锌三种材料,采用一种被称为坐标法的光学被动式无热化设计的方法(后面简称坐标法)对红外连续变焦系统进行无热化设计^[8]。最终的设计结果实现了一种有效焦距范围为 $10\sim 24$ mm,视场变化范围为 $34^\circ\sim 90^\circ$,工作波段为 $8\sim 12$ μm , $F/\#$ 为2.8的红外无热化连续变焦广角镜头。像质分析结果表明,系统

在-40~60℃温度范围内均可实现高品质红外成像,且调制函数值接近衍射极限。

1 原理

光学变焦系统利用了系统中两个或两个以上透镜组在光轴上的移动来改变系统的有效焦距,同时在整个变焦过程中保证系统保持良好的成像质量^[9]。变焦系统一般有光学补偿和机械补偿两种实现方式^[10]。机械补偿具有设计灵活、简单、易于加工等优点,因此应用较为普遍。文中也采用了机械补偿的方法设计红外变焦光学成像系统。其设计原理如图 1 所示。

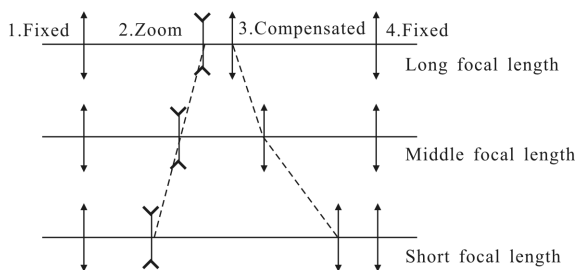


图 1 变焦系统原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of a zoom system

由图 1 可见,机械补偿法系统一般有前固定组、变倍组、补偿组和后固定组四个部分组成。当变倍组改变其在光轴上的位置时,系统焦距和像面位置也随之发生变化。因此需要有特殊设计的凸轮装置带动补偿组做非线性移动,补偿由变倍组移动带来的像面位置变化。为了保证系统像面位置在连续变焦过程中保持稳定,变倍组和补偿组的焦距和放大倍率必须符合如下关系^[10]:

$$f_3' \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 - \frac{1}{\beta_{3s}} - \beta_{3s} \right) + f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 - \frac{1}{\beta_{2s}} - \beta_{2s} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: f_2' 为变倍组的焦距; f_3' 为补偿组的焦距; β_{2s} 、 β_{3s} 为变倍、补偿组短焦位置的倍率; β_2 、 β_3 为变倍过程中任一位置的变倍、补偿组的倍率。

在进行红外光学系统设计时,系统易受到外界温度变化的影响而对像质产生影响^[11]。为了消除此影响,文中采用坐标法消热差的方法对系统进行无热化设计^[9]。设计时将后透镜组分为三片镜片,其光焦度 ϕ 、色差系数 ω 和热差系数 θ 分别需要满足下述三个方程:

(1) 光焦度方程

$$\frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^j (h_i \phi_i) = \phi \quad (2)$$

(2) 消色差方程

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

(3) 消热差方程

$$\frac{df_b^T}{dt} = \left(\frac{1}{h_1} \right)^2 \sum_{i=1}^j (h_i^2 \theta_i \phi_i) = 0 \quad (4)$$

式中: h_1 为近轴光线在系统第一片镜面的入射高度; h_i 为近轴光线在系统第*i*片镜面的入射高度。如果透镜组为密接型,则可忽略由镜片厚度引起的相邻镜片间的高度差异,可近似认为 $h_1=h_i$ 。 ϕ_i 、 ω_i 和 θ_i 分别为第*i*片镜片的光焦度、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。形状饱满的三角形可以形成较好的无热化光学设计。图中黑色圈内的材料为硫系玻璃。通过对三角形形状进行对比,最终选择锗单晶、硫化锌和硫系玻璃(NBU-IR2:Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅)三种材料进行无热化设计。图中 BD1, BD2 为美国 Lightpath 公司硫系玻璃牌号;GASIR1 为法国 Umicore 公司硫系玻璃牌号;NBU-IR2 为宁波大学红外材料及器件实验室中试硫系玻璃产品型号。

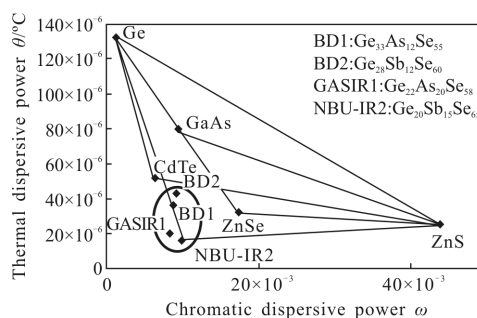


图 2 各类红外材料在 8-12 μm 波段的 ω-θ 图

Fig.2 ω-θ chart of typical infrared materials in the 8-12 μm waveband

2 镜头设计

2.1 确定镜头设计参数

文中设计的长波红外无热化连续变焦广角镜头,其主要技术指标如表 1 所示。该设计选用

Sofradir 公司的非制冷型 320×240 焦平面阵列为成像探测器,其像元尺寸为 35 μm×35 μm。

表 1 系统设计参数

Tab.1 System design parameters

Parameter	Value
EFL/mm	10-24
F/#	2.8
Wavelength/μm	8-12
Focal plane array resolution	320 pixel×240 pixel
Pixel size	35 μm×35 μm
FOV/(°)	90 (Short focal length)
	50 (Middle focal length)
	34 (Long focal length)
Temperature range/°C	-40-60
Total length/mm	90

2.2 初始光学结构

根据连续变焦光学系统的设计原理,系统由前固定组 1、变倍组 2、补偿组 3 和后固定组 4 四个部分组成。先设定四组镜片短焦时的焦距分别为 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 和 f_4' 。第 1,2 镜组、第 2,3 镜组、第 3,4 镜组之间的间距分别设定为 d_{12} 、 d_{23} 和 d_{34} 。通过给 f_2' 、 f_3' 赋初值,再确定变倍组移动的距离。通过公式 $f_1' = d_{12} + \frac{f_2'(1-m_2)}{m_2}$ 可以算出 f_1' ,其中 m_2 是变倍组的倍率。通过计算,当 $f_1' = 71.28$ mm、 $f_2' = -22.275$ mm、 $f_3' = 26.73$ mm 和 $f_4' = 25$ mm 时,系统在 10~24 mm 的焦距范围内可实现连续变焦。表 2 为 d_{12} 、 d_{23} 和 d_{34} 在不同焦距时的数值。最终通过变倍组和补偿组位置的移动,实现系统焦距从 10~24 mm 的连续变焦。表 2 展示了系统焦距为 10、16、24 mm 时各镜组之间的距离。

表 2 相邻两组镜组的间距

Tab.2 Distances between two adjacent groups of lenses

Focal length	d_{12}	d_{23}	d_{34}
Short focal length/mm	8.91	39.516	8.9
Middle focal length/mm	16.7	27.977	12.652
Long focal length/mm	24.503	15.592	17.241

由于变倍组和补偿组的位置以及入射光线的高度在变焦过程中不断发生变化,因此较难通过公式(2)~(3)对其进行无热化设计。所以文中主要考虑对前固定组和后固定组进行无热化设计。广角镜头

的第一片镜片通常具有较大的光焦度,对其进行无热化设计时容易得到不利于实际制备的镜片设计(比如极大的光焦度和极大的镜片厚度)。因此文中仅将后固定组的结构依据无热化设计的要求选为三片式设计。根据坐标法无热化的原理,选择硫化锌、锗单晶和硫系玻璃(NBU-IR2)三种材料进行无热化设计。通过无热化公式可计算得出三者的光焦度分别为 $\phi_{ZnS} = -0.0128$ 、 $\phi_{Ge} = -0.0045$ 和 $\phi_{NBU-IR2} = 0.05726$ 。

得到了初始结构的光焦度之后,在 Zemax 软件环境里对初始结构进行仿真构建。通过改变各镜组之间的距离可以得到不同的焦距。图 3 展示了焦距为 10、16、24 mm 时系统的外形结构图。由此图可以看出系统由六片镜片构成,它们的材料分别为锗单晶、硫系玻璃、硫系玻璃、硫化锌、锗单晶和硫系玻璃。在图 3 中,红外焦平面阵列前面安装了一片锗制的光学平板(厚度:1 mm)以保护探测器阵列不受外界污染。镜筒材料选用铝,其线性热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/K$ 。

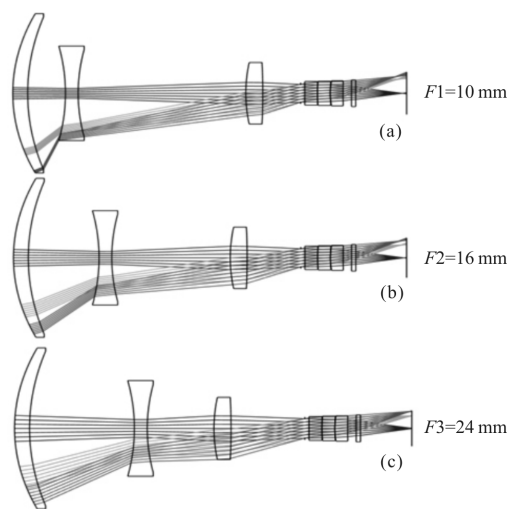


图 3 焦距为 10、16、24 mm 时系统外形结构图

Fig.3 Optical construction of the zoom system in different focal lengths of 10, 16, 24 mm

2.3 系统的最终结构

根据上述的初始结构设计,利用光学设计软件 Zemax 对其进行性能优化。在 Zemax 环境中可分析得出此连续变焦系统的初始结构在长焦时(焦距为 24 mm 时)像质表现较好,但在短焦时(焦距为 10 mm 时)具有较大的畸变以及倍率色差。主要通过调整镜片的曲率、位置及厚度、增大优化函数畸变操作数的

比重等方式对系统畸变进行矫正；通过设置优化操作数、调整镜片的曲率和厚度等方式对倍率色差进行矫正^[12]。为了更好地矫正各种像差,文中还将系统的第二片镜片(硫系玻璃镜片)的靠近物方的镜面设计为非球面,以添加非球面的方式来增加设计变量对系统进行优化。图 4 为优化后系统焦距为 10、16、24 mm 时的外形结构图。

由图 4 可见,各镜片的焦距和镜片之间的间距都在变焦过程中发生了改变。在优化的过程中,通过对硫系玻璃镜片上添加一处非球面等操作,使得系统在短焦端的畸变和像散有了明显的改善;畸变从原来的 44%减小到 25%;倍率色差由 28 μm 降到 23 μm 。优化后系统的这两项像差表现均可与现见于报道的红外广角镜头相类比^[13-14]。图 5(a)、(b)分别为系统在短焦时优化前后的畸变图;图 6(a)、(b)分别为系统在短焦时优化前后的倍率色差图。

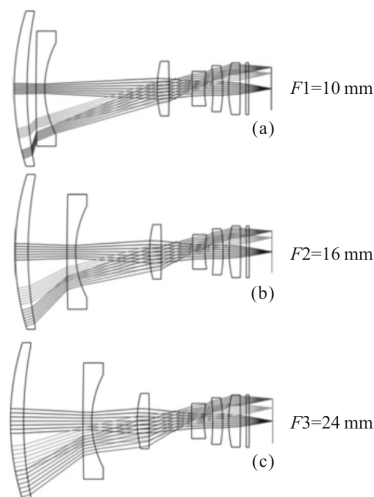


图 4 优化后焦距为 10、16、24 mm 时系统外形结构图

Fig.4 Optical constructions of the optimized system in different focal lengths of 10, 16, 24 mm

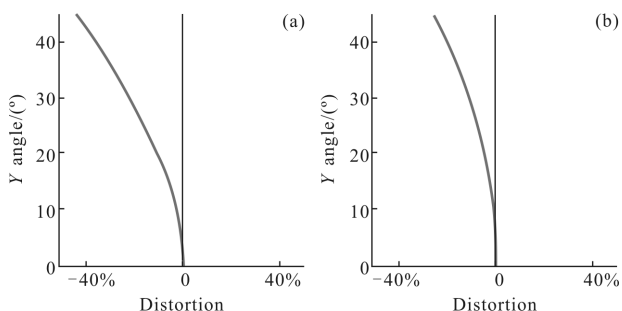


图 5 系统短焦时优化前后畸变图(焦距:10 mm)

Fig.5 Distortion diagrams before and after the optimization process (focal length: 10 mm)

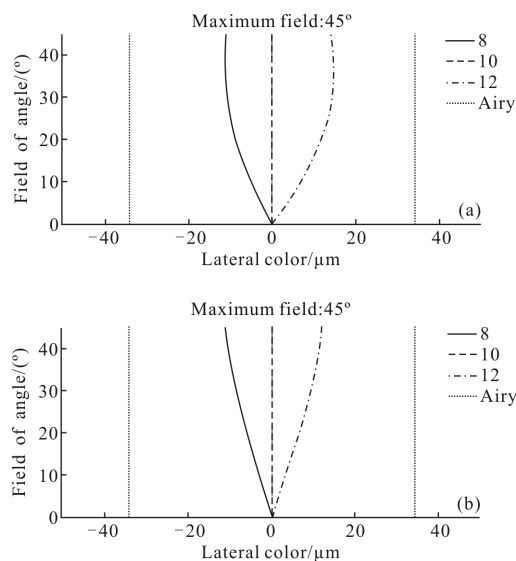


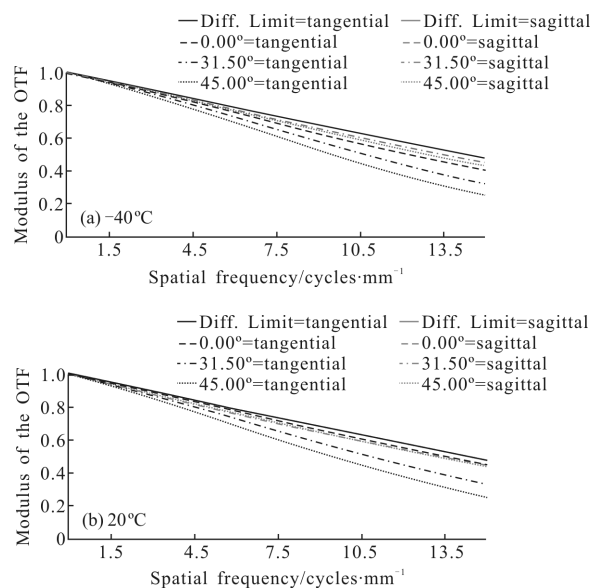
图 6 系统短焦时优化前后倍率色差图(焦距:10 mm)

Fig.6 Lateral color diagrams before and after the optimization process (focal length: 10 mm)

3 系统性能分析

图 7(a)~(c)展示了焦距为 10 mm 时(短焦时)系统在 -40 、 20 、 60 $^{\circ}\text{C}$ 时的调制传递函数;图 8(a)~(c)展示了焦距为 24 mm 时(长焦时)系统在 -40 、 20 、 60 $^{\circ}\text{C}$ 时的调制传递函数曲线。调制传递函数的横坐标和纵坐标分别为像面上的空间频率(单位为 lp/mm)和光学系统的调制传递函数值。

由图 7、8 可见,在 -40 ~ 60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,在各个视场位置,系统的 MTF 均接近于衍射极限。表明该变焦系统在约 100 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内在全视



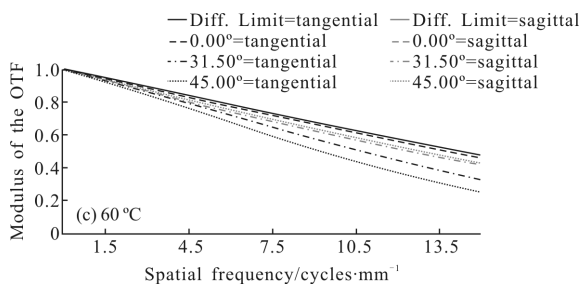


图 7 焦距为 10 mm 系统在 -40、20、60 °C 时系统的传递函数曲线
Fig.7 MTF curves of the system with $f=10$ mm at -40, 20, 60 °C

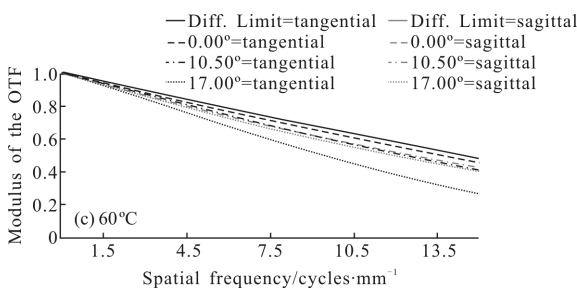
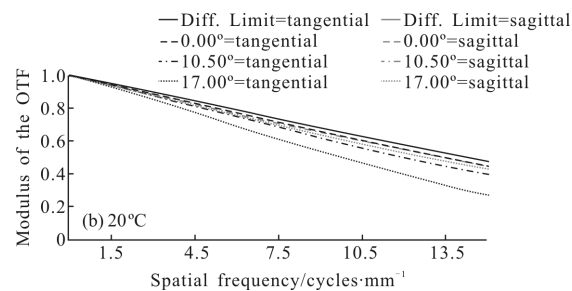
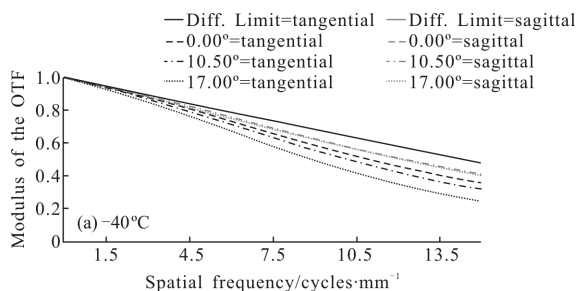


图 8 焦距为 24 mm 时系统在 -40、20、60 °C 时系统的调制传递函数曲线
Fig.8 MTF curves of the system with $f=24$ mm at -40, 20, 60 °C

场范围内均保持了较好的成像质量。在 15 lp/mm 空间频率处,边缘视场的 MTF 值最小,但仍大于 0.25,表明该镜头适用于系统设计时选用的像素尺寸为 35 μm 的面阵探测器。

表 3 展示了一个点物体发出的光由各个视场角入射系统时在像面形成的弥散斑的均方根半径。由表 3 可见,当系统焦距为 10 mm 和 24 mm 时,光学系统在温度为 -40、20、60 °C 时对应的均方根弥散斑

均小于 35 $\mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ 的探测器像元尺寸。

表 3 系统弥散斑均方根半径

Tab.3 Dispersion spot RMS radius of the system

Focal length/mm	Temperature/°C	FOV/H°×V°	RMS radius/ μm
10		0	11.725
	-40	50.4×37.8	16.744
		72×54	17.721
	20	50.4×37.8	21.536
		72×54	21.837
	60	50.4×37.8	25.251
72×54		25.071	
24		0	14.011
	-40	19.05×14.29	15.925
		27.21×20.41	17.714
	20	19.05×14.29	21.1
		27.21×20.41	24.624
	60	19.05×14.29	27.826
27.21×20.41		32.129	

根据光学系统连续变焦过程中,变倍组、补偿组和前固定组的相对位置关系,图 9 拟合了变倍组和补偿组的运动轨迹曲线。其中横坐标代表变倍组和补偿组与前固定组的距离,纵坐标代表了系统的焦距。

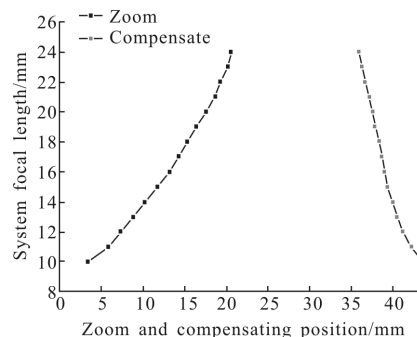


图 9 变倍组和补偿组随系统焦距的移动轨迹

Fig.9 Movement curve of the zoom group and the compensating group with varying focal lengths

由图 9 可以看出,补偿组随着变倍组的移动做

相应的非线性运动。在整个变焦过程中,变倍组和补偿组的运动轨迹简单,曲率变化平缓且无回程,有利于凸轮曲线的加工。

4 结论

文中展示了可在 10~24 mm 焦距范围内连续变焦的,最大视场角为 90°的长波红外无热化广角镜头的设计。系统 f 数为 2.8;工作波段为 8~12 μm 。利用硫系玻璃易于模压成型的优点,系统采用硫系玻璃制备的一片非球面镜片与硫系玻璃制备的两片球面镜片,以及常规红外材料制备的 3 片球面镜片相结合的方式,矫正了系统在各个焦段的各种单色像差以及在 8~12 μm 波段的色差。在此基础上,系统根据坐标法无热化设计的基本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,在 -40~60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内实现了接近衍射极限的成像效果,满足了镜头无热化的设计要求。

参考文献:

- [1] Zhu Yongjian. Far infrared lens based on chalcogenide glass: China, 203870316[P]. 2014-10-08. (in Chinese)
- [2] Bai Yu, Xing Yanwen, Li Hua, et al. Advances in foreign MWIR lens with high ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 795-802. (in Chinese)
- [3] Bao Jiaqi, Ji Ziji, Ge Zhenjie, et al. Design of a long-wave infrared continuous zoom optical system with high resolution [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2): 75-80. (in Chinese)
- [4] Akram M N, Asghar M H. A step-zoom dual field-of-view IR telescope[C]//SPIE, 2002, 4832: 328-333.
- [5] Wang Haitao, Guo Liangxian. Cooled thermal imaging mid-wavelength infrared zoom camera [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(1): 8-11. (in Chinese)
- [6] Li Guanghui. A design of wide-angle CCTV zoom lens for day and night [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847-854. (in Chinese)
- [8] Tamagawa Y, Wakabayashi S. Multilens system design with an athermal chart [J]. *Applied Optics*, 1994, 33 (34): 8009-8013.
- [9] Bai Yu, Yang Jianfeng, Ruan Ping. Design of long wavelength infrared continuous zoom optical system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23 (5): 15-17. (in Chinese)
- [10] Tao Chuncan. Design of Zoom Optical System [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [11] Zhou Chao. Thermal analysis of lager telescope structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0422006. (in Chinese)
- [12] Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, et al. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (12): 1222001. (in Chinese)
- [13] Shen Weimin, Xue Mingqiu, Yu Jianjun. Optical design of the lens of long wave infrared wide-angle horizon[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 329-332. (in Chinese)
- [14] Chen Xiao. Low F number LWIR optical system with wide field of view [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 350-353. (in Chinese)