

光学学报

非制冷长波红外连续变焦光学系统的一种无热化设计

唐玉凤, 毛珊*, 宋逸辰, 赖涛, 袁沛琦, 丁晓炜, 赵建林

西北工业大学物理科学与技术学院光场调控与信息感知工业和信息化部重点实验室陕西省光信息技术重点实验室,
陕西 西安 710129

摘要 为了满足长波红外(LWIR)热像仪在宽温度范围下连续变焦的需求,基于LWIR 320 pixel×320 pixel型红外探测器,设计了一款非制冷长波红外连续变焦光学系统。该系统可在宽温度范围下实现无热化,采用常见的硫系玻璃,工作波段为8~12 μm,总长为200 mm,仅由7片透镜组成。通过引入偶次非球面,可以使系统色差和轴外像差得到良好的校正,同时选用后固定组的最后一组透镜充当温度补偿组来调节焦距实现无热化。分析结果表明,该系统结构紧凑,可以在-40~60 °C温度范围内和60~180 mm焦距范围内连续平滑变焦,并且全程成像质量良好(调制传递函数在20 lp/mm处均大于0.3),变焦和公差也具有的良好可实现性。

关键词 光学设计; 红外变焦系统; 长波红外; 像质评价

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231922

1 引言

相比于传统的可见光成像技术,红外光谱热成像技术利用物体自身热辐射获取目标物体的影像,能够穿透丛林、浓雾等遮蔽发现隐藏的目标,并在目标检测和追踪方面具有独特的优势^[1]。特别是长波红外波段,对于各种天气,如雨、雪、雾、霾等存在高透过性,传播距离大幅增加,探测性能更强。因此,红外热像仪在高端商业、生物医学、道路及重点区域监控等领域具有重要的应用价值。然而,传统的红外热像仪的焦距是固定的,只能观测到某一视场或区域的目标,不利于搜索和观察,这使得红外热像仪的观测性能受到很大的限制。为了解决这个问题,红外变焦热像仪随之出现,分为多档变焦和连续变焦两类。对于多档变焦而言,连续变焦光学系统通过持续改变光学系统视场与倍率关系,实现大小范围的无缝衔接并保持像面的稳定和清晰^[2]。因此,红外变焦热像仪可以实现对目标的连续追踪。

目前,红外成像光学系统研究领域中,已经有一些代表性的工作。文献[3]提出了一种光学被动半无热化变焦系统设计,然而由于其仅可工作在可见光波段的局限性使得此设计无法获取红外波段的信息;文献[4]实现了在双波段红外和宽温度范围下的无热化设计,但该系统是定焦的,因此不适用于多视场变换的环境;文献[5]提出了一种宽温度范围下的中波红外光学系统无热化设计案例;文献[6]设计了一种由4片透镜

组成的焦距为100~200 mm、F数为1.4的非制冷红外连续变焦光学系统,并采用了衍射表面和涂抗反射涂层来平衡像差和提高透过率;文献[7]设计了一种长波红外无热化连续变焦广角镜头,系统材料选取硫系玻璃,系统F数为2.8,该设计在一定程度上限制了系统的探测性能;文献[8]采用三组联动变焦技术,使用4片透镜并引入衍射面和非球面设计了一款非制冷长波红外连续变焦光学系统,但该设计忽略了大视场时衍射效率降低的问题。此外,文献[9-10]将计算成像引入折衍混合红外光学系统无热化设计中,二者均为定焦光学系统。

非制冷红外成像光学系统的优势显而易见,如具有体积小、功耗低、启动速度快、经济实用等优点,这些特点使得此类光学系统在民用领域具有越来越高的使用价值。然而,现有的长波红外变焦系统大部分均引入衍射表面,这对加工和装配过程提出了更高的要求,从而增加了系统的生产成本。此外,视场对衍射效率的影响也加大了设计的难度;同时,部分长波红外变焦系统设计未考虑环境温度对系统像质的影响,这大大降低了系统的实用性。

针对非制冷红外成像系统的发展趋势,同时为了提升连续变焦光学系统的探测效率,本文使用机械正组补偿变焦和机电主动式无热化方法,设计了一款焦距为60~180 mm的非制冷长波红外连续变焦光学系统。该系统只需要使用7片透镜,筒长为200 mm,F数为2。此系统具有结构紧凑、工作距长、畸变小,且

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-01-25; 网络首发日期: 2024-02-20

通信作者: *maoshan_optics@nwpu.edu.cn

在宽温度变化条件下仍能保持出色的成像质量等优势,在手持热像仪、无人驾驶车辆等领域具有显著的应用潜力。

2 基本原理

2.1 变焦光学系统设计原理

变焦系统是一种能使焦距持续变化,同时保持像的位置和质量稳定的光学结构。然而,通过改变透镜间隙来调整镜头的焦距时,会导致像面的偏移。为了解决这个问题,光学设计者大多选择以下两种变焦补偿方法:光学补偿和机械补偿^[11]。本文设计中,要求在宽波段内成像清晰,选用机械补偿方式实现。机械补偿型的变焦光学系统一般由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组四个部分组成。图 1 所示为机械正组补偿变焦系统的原理,其中 1~4 分别为前固定组、变倍组、补偿组、后固定组。机械补偿根据承担光焦度的正负,分为正组补偿和负组补偿,当正组补偿变焦系统从短焦端向长焦端移动时,变倍组和补偿组会朝相反方向运动;然而,负组补偿变焦系统的变倍组和补偿组首先会朝相反方向运动,然后一起向右移动,导致系统的补偿曲线变得较为弯曲。

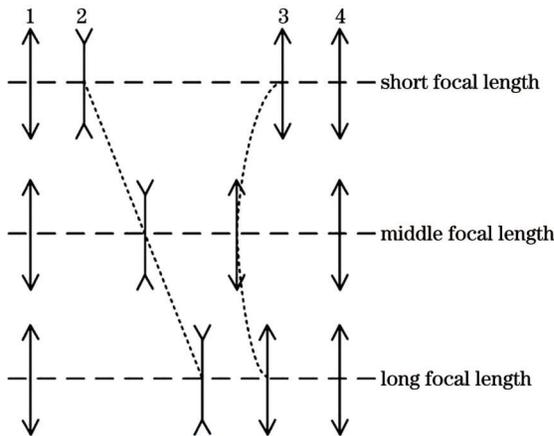


图 1 机械正组补偿变焦系统的原理

Fig. 1 Optical principle of mechanical positive group compensation zoom system

对于机械补偿法,变倍组和补偿组会依光轴方向按照某种规律移动,二者之间存在的运动关系通过计算获得^[11],即满足

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0, \quad (1)$$

式中,

$$\begin{cases} A = (f_2' - \beta_1 q_1) \beta_2 \\ B = \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f_3'(1 - \beta_2^2) \beta_1 - f_2'(1 - \beta_1^2) \beta_2] q_1 - \\ \quad f_2' f_3'(1 - \beta_2^2) \\ C = \beta_2^2 f_3' [\beta_1 q_1 - f_2'(1 - \beta_1^2)] q_1 \end{cases}, \quad (2)$$

由此得到补偿组的运动变量为

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (3)$$

式中: β_1 为变倍组初始位置的垂轴放大率; β_2 为补偿组初始位置的垂轴放大率; q_1 为变倍组沿光轴的位移量; q_2 为补偿组沿光轴的位移量; f_2' 表示变倍组的焦距; f_3' 表示补偿组的焦距。变焦后变倍组放大倍率从 β_1 变为 β_1^* ,补偿组放大倍率从 β_2 变为 β_2^* 。系统的变倍比为

$$M = \frac{\beta_1^* \beta_2^*}{\beta_1 \beta_2}. \quad (4)$$

2.2 红外光学系统无热化设计方法

相较于可见光材料,红外材料对温度变化十分敏感。在实际应用中,环境温度的变化可能导致光学透镜的面型、机械结构以及光学参数发生改变,进而导致理想成像面的偏移,最终使得光学系统的整体性能下降,成像质量变差。因此,红外光学系统的无热化设计是不可或缺的,这一关键步骤使光学系统在环境温度变化时依然可以确保其成像性能,同时满足系统总光焦度方程、系统消色差方程及系统消热差方程^[12],即

$$\begin{cases} \varphi = \sum_{i=1}^k \varphi_i \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \frac{\varphi_i}{v_i} = C = 0 \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \frac{\varphi_i}{\varphi} = T = -a_m L \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, k$; h_i 表示近轴光线入射到第 i 个透镜的入射高度; φ 为系统总光焦度; φ_i 为薄透镜的光焦度; L 为机械结构镜筒的总长度; T 、 T_i 、 C 和 a_m 分别为镜筒材料的光学热差系数、机械热差系数、色差系数和热膨胀系数。

在本文设计中,考虑到要求在宽温度范围内全焦段保持良好的成像质量,所以采用无热化设计方法。常见的无热化设计方法主要包括光学被动式、机械被动式和机电主动式三种^[13]。其中,机电主动式无热化方法使用温度传感器测试环境温度的变化,通过在轴上移动光学系统的一片或一组透镜来补偿像面的热离焦。这种方法能够较精确地控制温度补偿元件的移动,具有消热差效果明显、可靠性较高的优势。

在本文设计中,选择了一个不参与变焦且口径最小的透镜沿着轴向移动来补偿热离焦,以减小温度变化对成像质量的影响,增强系统的温度适应性。这种设计方法能够有效地提高系统的成像质量,并使其在宽温度范围内具有良好的表现。

3 设计实例

3.1 光学系统参数计算

表 1 列出了该光学系统的具体设计指标和红外探

表 1 变焦光学系统的设计指标
Table 1 Design index of zoom optical system

System	Parameter	Index
Zoom optical system	Working waveband / μm	8-12
	Field of view / ($^\circ$)	3.6-10.8
	Effective focal length (EFL) / mm	60-180
	F-number	2
	MTF@20 lp/mm	>0.3
Infrared detector	Distortion / %	<2
	Number of pixel arrays	320×320
	Pixel size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	25×25

测器的参数。由探测器的像素尺寸和像素数,可计算出探测器对角线尺寸 $d=11.3\text{ mm}$;考虑到该光学系统变焦范围为 60~180 mm,其短焦和长焦处的半视场分别为 $\omega_1=\arctan(d/2f_1)=5.4^\circ$ 和 $\omega_2=\arctan(d/2f_2)=1.8^\circ$;奈奎斯特频率为 $R=1/(2p)=20\text{ lp/mm}$,其中 d 为探测器对角线尺寸, f_1 为短焦距, f_2 为长焦距, p 为探测器像元尺寸。

3.2 光学系统设计结果

对于机械补偿变焦距光学系统,为实现连续变焦,系统需满足以下要求:1)焦距在一定范围内连续变化;2)系统变倍时像面保持稳定;3)相对孔径保持不变;4)不同焦距处的像质都满足设计指标^[14]。变焦红外无热化系统的设计分为 3 步:①通过与本设计要求对比分析,寻找现存的光学系统参数,从而确定合适的初始结构;②选用机械正组补偿作为该系统的补偿方式,通过红外光学材料相互组合,进行光焦度分配,控制筒长,尽可能减小系统尺寸,最终使用光学设计软件完成红外变焦光学系统优化;③对光学系统进行热分析,将高温与低温态设为热拾取,最终通过温度补偿元件的移动来实现系统无热化,通过对热离焦量和调制传递函数等指标进行分析,判断宽温度范围下无热化效果的好坏,进而与设计指标进行对比,未达到指标要求时可回到第②个步骤,重新进行优化设计,重复步骤②③。

选择长波红外定焦光学系统作为初始结构,根据第 2 节的变焦原理,先进行变焦光学系统的设计,得到

满足要求的变倍比,再进行无热化设计,使系统能够在较宽温度范围下工作。

设计的长波红外连续变焦光学系统的二维结构如图 2 所示,系统使用 7 片透镜,第 1、2 片为前固定组,光焦度为正,由于硫系玻璃的色散较小,采用 ZnSe 和 ZnS 材料组合来消除系统色差;第 3、4 片为变倍组,光焦度为负,相比于传统的红外材料,硫系玻璃的折射率温度系数较小,IRG24 材料的折射率温度系数是 IR 系列中数值最低的,所以引入 IRG24 材料可以显著减小系统的像面离焦量;第 5 片为补偿组,第 6、7 片为后固定组,材料都为 Ge,用来校正前组剩余的像差,该光学系统共使用 5 个偶次非球面。

为了解决实际应用中较宽范围的温度变化引起像质变差的问题,选用后固定组的最后一组透镜作为温度补偿元件来调节焦距,实现无热化的目的。该透镜

表 2 变焦光学系统的镜头数据
Table 2 Lens data of zoom optical system

Surface	Type	Radius of curvature	Thickness	Glass
Object	Standard	Infinity	Infinity	—
1	Standard	107.933	10.276	ZnSe
2	Standard	289.649	1.000	—
3	Standard	283.193	10.992	ZnS
4	Standard	143.846	4.662	—
5	Even asphere	34.665	4.430	Ge
6	Standard	30.647	11.297	—
7	Standard	184.574	3.003	IRG24
8	Even asphere	62.939	68.180	—
9	Even asphere	94.595	3.361	Ge
10	Standard	-2584.285	3.699	—
Stop	Standard	Infinity	1.790	—
12	Even asphere	-189.861	3.997	Ge
13	Standard	523.850	32.531	—
14	Even asphere	211.333	3.000	Ge
15	Standard	546.132	38.831	—
Image	Standard	Infinity	—	—

表 3 非球面参数
Table 3 Parameters of aspheric surface

Surface No.	Conic	4th order term	6th order term	8th order term	10th order term
5	-0.286	4.178×10^{-7}	-1.711×10^{-10}	1.479×10^{-12}	-2.902×10^{-15}
8	-0.029	-2.249×10^{-6}	-1.540×10^{-9}	3.986×10^{-12}	-1.594×10^{-14}
9	1.797	-9.198×10^{-8}	-4.067×10^{-10}	3.150×10^{-14}	7.792×10^{-17}
12	-9.827	-4.380×10^{-7}	1.732×10^{-10}	3.776×10^{-12}	-6.915×10^{-15}
14	0	5.821×10^{-7}	-1.049×10^{-8}	5.962×10^{-11}	-1.293×10^{-13}

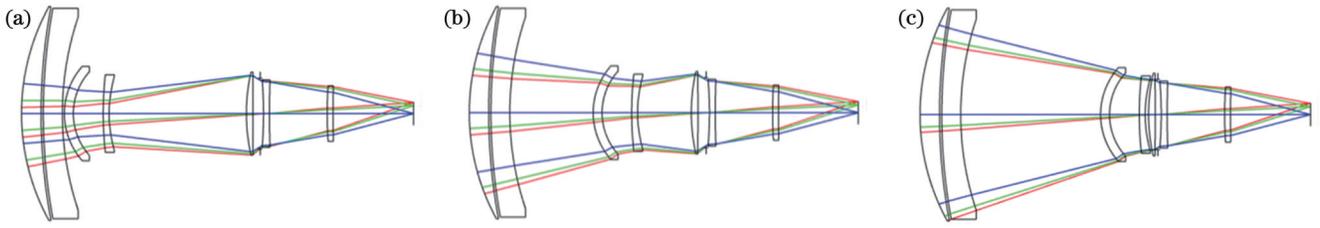


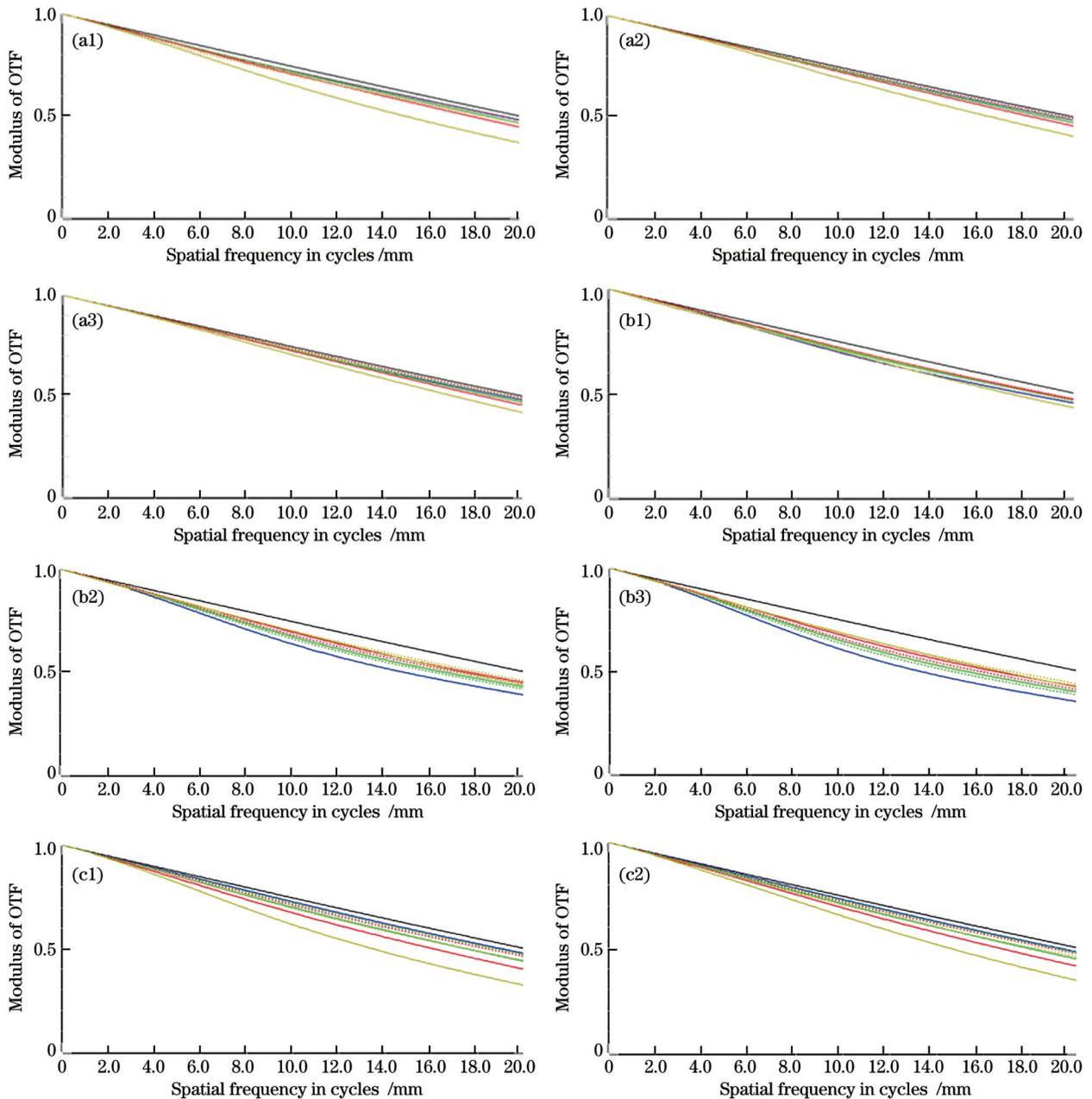
图 2 变焦光学系统的二维结构图。(a) $f' = 60$ mm; (b) $f' = 120$ mm; (c) $f' = 180$ mm

Fig. 2 Two-dimensional structure diagram of zoom optical system. (a) $f' = 60$ mm; (b) $f' = 120$ mm; (c) $f' = 180$ mm

在整个系统中口径最小,温度补偿的同时还可以有效减小调节机构的体积和质量,并且其位移量较小,有利于系统的小型化和轻量化。系统总长为 200 mm,后工作距为 39 mm。使用铝合金作为镜筒材料,该材料的热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

调制传递函数(MTF)是评价光学系统成像性

能的综合指标,常用 MTF 来表征光学系统对不同空间频率分量的传输本领,图 3 为本文设计的变焦光学系统的 MTF 曲线图。可以看出,该长波红外变焦光学系统的短焦、中焦和长焦在常温 20°C 、低温 -40°C 和高温 60°C 下,均具有良好的成像质量;在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处,短焦、中焦、长焦时的



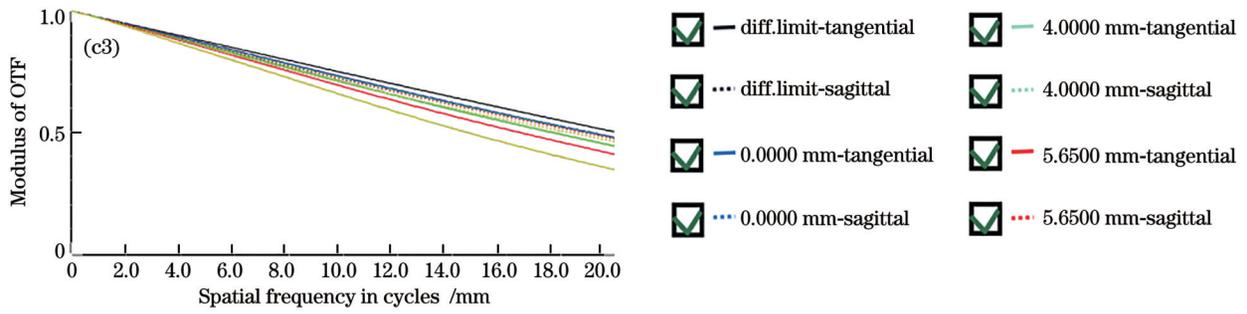


图 3 光学系统在不同温度下取不同焦距时的 MTF。(a1)~(a3) $f' = 60$ mm, $T = -40, 20, 60$ °C; (b1)~(b3) $f' = 120$ mm, $T = -40, 20, 60$ °C; (c1)~(c3) $f' = 180$ mm, $T = -40, 20, 60$ °C

Fig. 3 MTF of optical system at different temperatures with different focal lengths. (a1)~(a3) $f' = 60$ mm, $T = -40, 20,$ and 60 °C; (b1)~(b3) $f' = 120$ mm, $T = -40, 20,$ and 60 °C; (c1)~(c3) $f' = 180$ mm, $T = -40, 20,$ and 60 °C

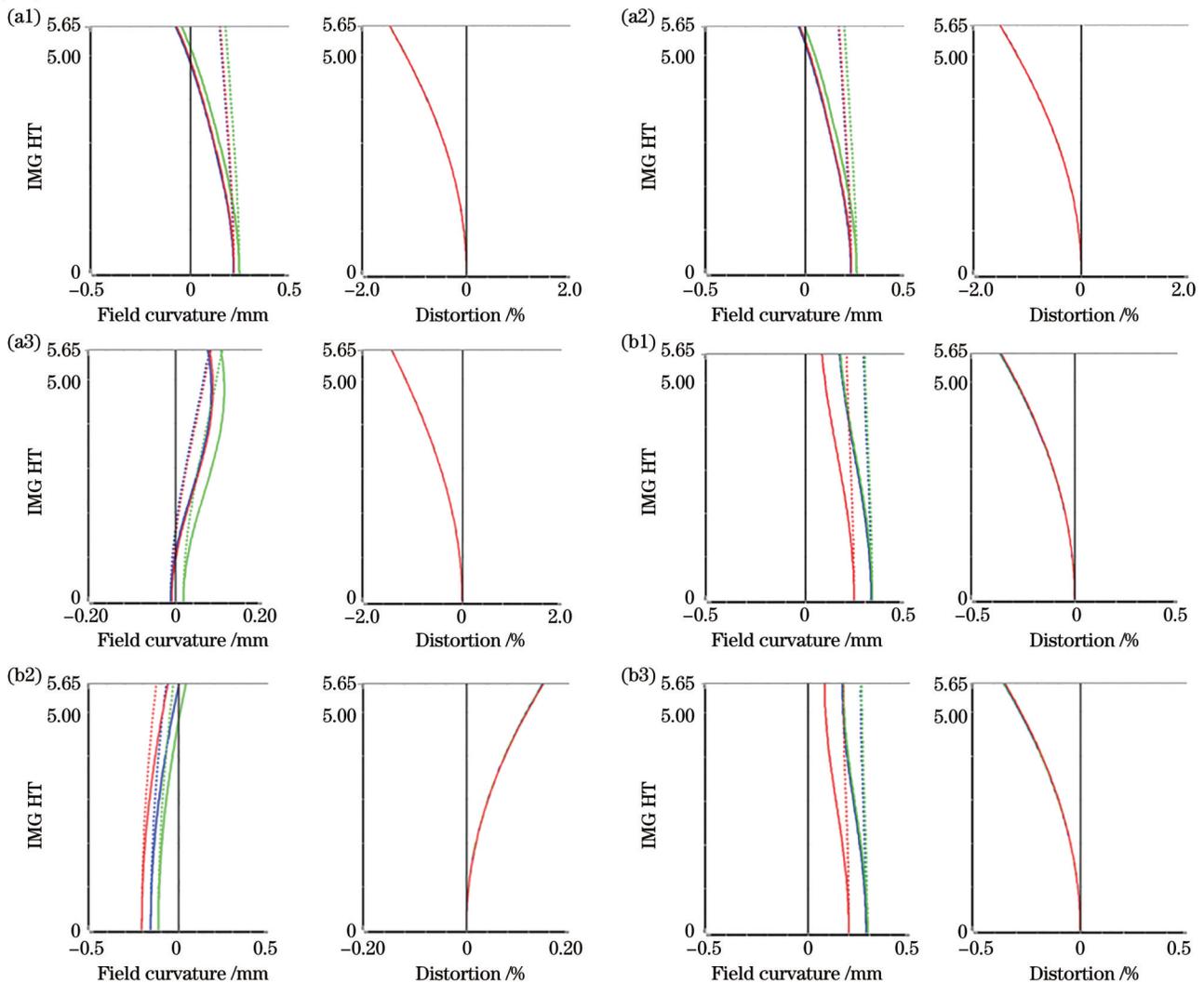
MTF 分别大于 0.37、0.35、0.32, 表明该系统能够实现宽温度范围下全焦段的温度自适应, 实现无热化目标。

图 4 为光学系统在不同温度下取不同焦距时的场曲畸变图。可以看出, 该系统在不同温度下短焦时的畸变值小于 1.8%, 中焦和长焦时的畸变值小于 0.4%, 满足红外变焦系统设计的参数要求。

图 5 为光学系统在不同焦距时的包围圈能量图,

在一个像元尺寸 ($25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$) 内, 短焦时的各视场包围圈能量大于 82%, 中焦时大于 70%, 长焦时大于 77%, 表明系统聚焦效果良好。

根据瑞利判据, 在全视场下的消热差误差 ΔL_T 不超过 $1/4$ 波长, 其数值须在系统焦深范围之内, 即: $\Delta L_T \leq 2\lambda(F/\#)^2 = 80 \mu\text{m}$ 。表 4 为变焦光学系统分别取短焦、中焦和长焦时, 在三种不同温度 $-40, 20, 60$ °C 下的像面热离焦量。这些数值表明, 不同温度下, 光学系



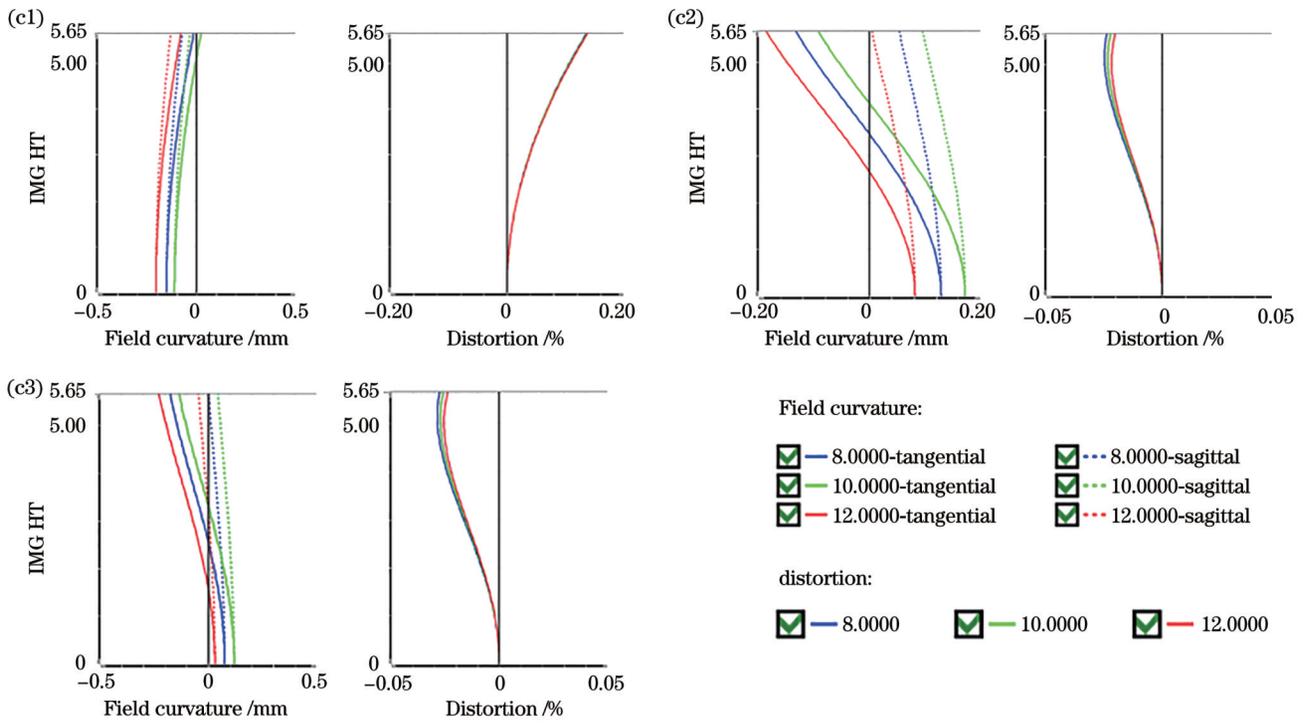


图 4 光学系统在不同温度下取不同焦距时的场曲及畸变图。(a1)~(a3) $f' = 60$ mm, $T = -40, 20, 60$ °C; (b1)~(b3) $f' = 120$ mm, $T = -40, 20, 60$ °C; (c1)~(c3) $f' = 180$ mm, $T = -40, 20, 60$ °C
 Fig. 4 Field curvature and distortion diagrams of optical system at different temperatures with different focal lengths. (a1)~(a3) $f' = 60$ mm, $T = -40, 20, \text{ and } 60$ °C; (b1)~(b3) $f' = 120$ mm, $T = -40, 20, \text{ and } 60$ °C; (c1)~(c3) $f' = 180$ mm, $T = -40, 20, \text{ and } 60$ °C

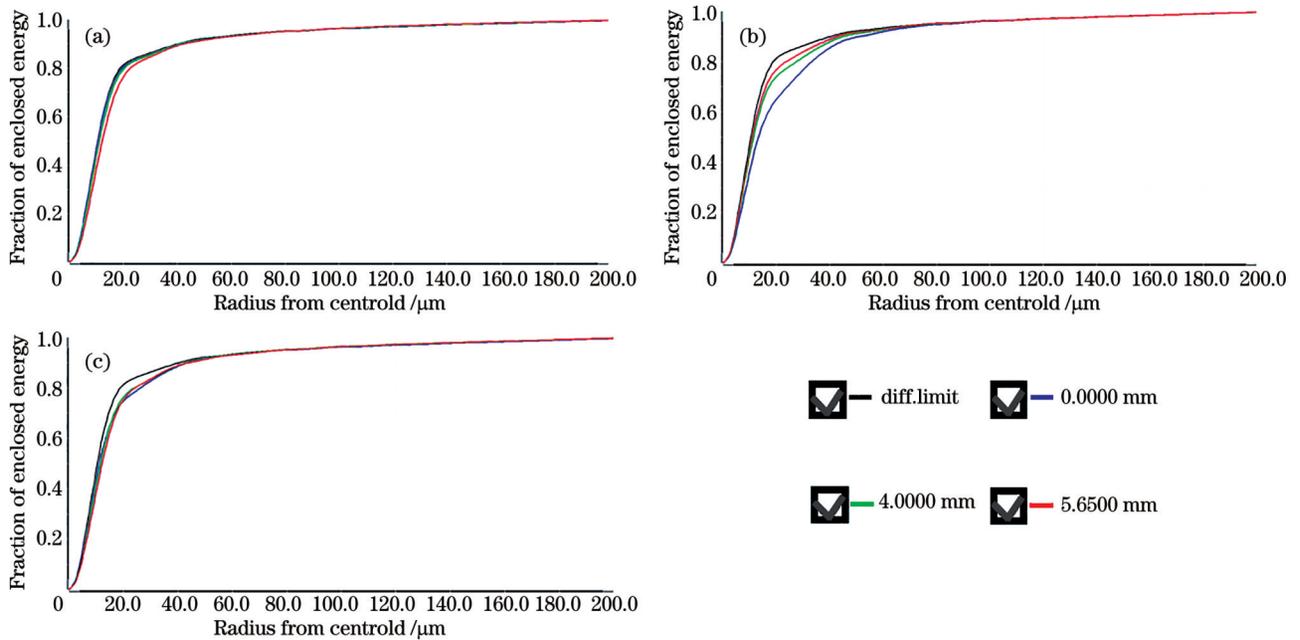


图 5 不同焦距时变焦光学系统的包围圈能量。(a) $f' = 60$ mm; (b) $f' = 120$ mm; (c) $f' = 180$ mm
 Fig. 5 Fraction of enclosed energy of zoom optical system with different focal lengths. (a) $f' = 60$ mm; (b) $f' = 120$ mm; (c) $f' = 180$ mm

表 4 像面热离焦量

Table 4 Image thermal defocus unit: μm

Focal length	-40 °C	20 °C	60 °C
Short	13.1	3	6
Middle	0	9	11
Long	3	5	0

统像面的离焦范围均小于 $80 \mu\text{m}$, 所以本文设计结果无热化效果较好。

设计中引入 5 个偶次非球面, 其面型满足:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10}, \quad (6)$$

式中： z 表示光轴方向的高度； c 表示表面曲率； k 是 Conic 值； r 是旋转对称透镜径向半口径高度； a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 分别表示二次、四次、六次、八次、十次曲面系数。变焦系统中的非球面的截面曲线如图 6 所示，本文设计中的非球面口径适中，易于加工，采用计算机数控单点金刚石车削技术可以实现高精度的制造，不仅能够减轻系统质量还可以降低成本，具有很高的可实现性。

3.3 光学系统公差分析

就光学设计而言，只提供满足系统图像质量的设计是不够的，因为它与加工后的透镜之间存在着很大

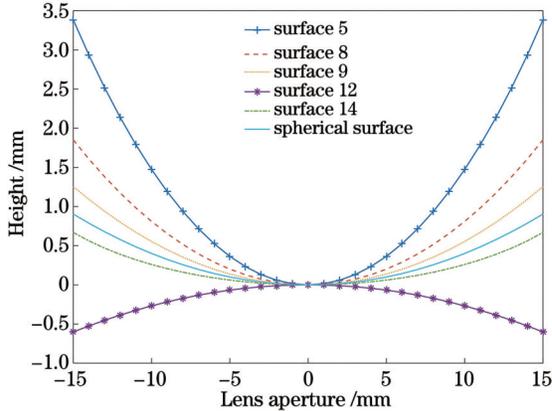


图 6 非球面的截面曲线

Fig. 6 Cross-sectional curves of aspheric surfaces

的差异，这种差异主要来自于实际生产中的误差、光学元件的加工和组装过程中的误差^[15]。上述误差会同时产生并作用于光学系统，从而影响到成像质量。因此，在像质评价完成后，应对系统进行公差分析。

这里采用灵敏度法对系统的公差进行分析，按照当前光学器件的加工及系统安装技术要求，公差设置如表 5 所示，设置 MTF 值为评价标准值，频率设置为 20, 300 次蒙特卡罗采样计算分析公差后的结果如表 6 所示。可以看出，各个焦距下的分析结果均满足 $90\% > 0.33$ ，表明该系统在规定的公差范围内能够达到预期的成像质量，且易于加工和装调，可实现性高。

表 5 系统公差设置

Table 5 Tolerance settings of system

Tolerance type	Value
Refractive index	0.0008
Curvature radius /fringe	2
Surface irregularity /fringe	0.25
Thickness /mm	± 0.025
Abbe number /%	0.08
Element decenter /mm	± 0.008
Element tilt /(')	0.8
Test wavelength / μm	10

表 6 公差分析结果

Table 6 Tolerance analysis results

Yield rate /%	MTF of short focal length >	MTF of middle focal length >	MTF of long focal length >
90	0.339	0.333	0.336
80	0.351	0.345	0.350
50	0.374	0.369	0.371
20	0.392	0.392	0.394
10	0.403	0.404	0.405

3.4 变焦曲线

确定变焦结构之后，即可以确定每一组分的系统参数。固定透镜材料，曲率和间隔情况下，必须考虑到系统中各部件的运动状况，即变倍组和补偿组的运动轨迹。由于变焦镜头的部分镜组是通过凸轮来实现移动的，所以凸轮的设计将直接影响到图像的稳定性和成像质量，因此，变焦凸轮的设计是实现变焦的重要环节^[16]。目前，高精度的凸轮可以确保各个运动部件都遵循运动方程进行移动。

在最初的变焦系统优化过程中，通常只采用长焦、中焦和短焦三种组态来保证系统的最佳化，然后逐渐加入次长焦与次短焦两个组并进一步进行优化。该方法可以使得每个组态的成像质量都能满足需要，在组态数量足够的情况下，得到相应的凸轮曲线。图 7 为变倍组和补偿组的运动曲线，横坐标表示系统焦距，纵坐标表示变倍组和补偿组相对前固定组的距离。该图

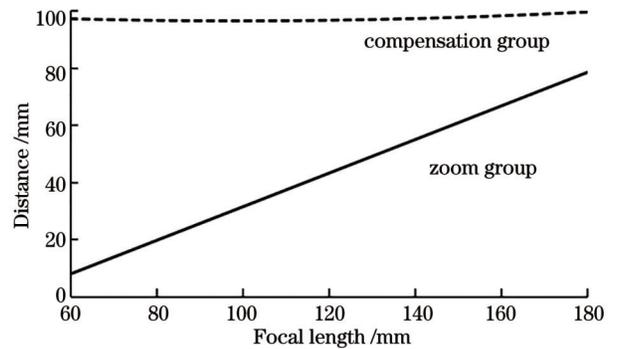


图 7 变焦曲线

Fig. 7 Zoom curve

表明，变倍组作线性移动，补偿组作非线性运动，从而补偿变倍组运动带来的像面漂移，变焦过程中变倍组和补偿组运动轨迹短而平滑，有利于凸轮机构的加工。

4 结 论

针对长波红外(LWIR)320 pixel×320 pixel型红外探测器,采用机械正组补偿和机电主动补偿方式设计了一款工作于8~12 μm波段且连续变焦范围为60~180 mm的无热化非制冷LWIR光学系统。设计与分析结果表明,该系统在-40~60 °C温度范围内成像质量良好,全焦段下MTF接近衍射极限,筒长仅为200 mm,具有结构紧凑、视场畸变小、工作距长、成像质量高等特点,引入非球面的同时避免使用二元面,在系统性能良好的前提下尽可能降低成本,减小了系统尺寸和质量,降低了系统复杂性,并且变倍组和补偿组的运动曲线平滑无拐点,凸轮机构加工难度小。该系统在搜索、跟踪、侦查等领域具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, et al. Design of large zoom ratio long-wave infrared zoom system with compound zoom method[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(2): 025104.
- [2] Park B, Park S, Park S K, et al. Long-wavelength infrared zoom system using tunable concave and convex mirrors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 133: 104707.
- [3] 闫阿奇, 崔雯, 董森. 大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0422001.
Yan A Q, Cui W, Dong S. Optical design of optical passive half-athermalization zoom lens with high zoom ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0422001.
- [4] 田晓航, 薛常喜. 小F数红外双波段无热化折衍摄影物镜设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1422002.
Tian X H, Xue C X. A thermalization design of small F-number refractive-diffractive telephoto objective lens in infrared dual-band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1422002.
- [5] 毛珊, 赖涛, 聂怀乐, 等. 宽温度范围双层衍射元件优化设计及应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822026.
Mao S, Lai T, Nie H L, et al. Optimal design and application of double-layer diffractive optical element over wide temperature range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822026.
- [6] Mowafy K, EL-Dessouky T, Medhat M. Design of IR zoom lens system for long-range detection in uncooled LWIR camera[J]. *Journal of Optics*, 2022, 52(1): 281-289.
- [7] 王静, 吴越豪, 戴世勋, 等. 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[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0321001.
Wang J, Wu Y H, Dai S X, et al. Application of chalcogenide glass in designing a long-wave infrared athermalized continuous zoom wide-angle lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0321001.
- [8] 唐晗, 郑万祥, 曾兴容, 等. 紧凑低成本非制冷长波红外连续变焦光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(4): 20220607.
Tang H, Zheng W X, Zeng X R, et al. Compact and low-cost uncooled LWIR continuous zoom optical design[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(4): 20220607.
- [9] Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Athermalization of dual-waveband infrared systems containing diffractive optical elements via optical-digital joint design[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(4): 1212-1216.
- [10] Mao S, Nie H L, Zhao J L. Digital-optical co-design enables athermalization of hybrid optical systems[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 13837-13850.
- [11] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
Tao C K. Design of zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
- [12] 周正平, 陈恒, 纪辉, 等. 折衍混合轻量化长波红外消热差光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1022001.
Zhou Z P, Chen H, Ji H, et al. Design of lightweight long-wave infrared athermalized optical system with hybrid refractive-diffractive[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1022001.
- [13] 陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 折/衍混合红外物镜超宽温度消热差设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 79-82.
Chen X, Yang J F, Ma X L, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive/diffractive infrared objective[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 79-82.
- [14] 高铎瑞, 钟刘军, 赵昭, 等. 基于Matlab的变焦光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0416002.
Gao D R, Zhong L J, Zhao Z, et al. Zoom optical system design based on Matlab[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0416002.
- [15] Peng X, Kong L B. Design of a real-time fiber-optic infrared imaging system with wide-angle and large depth of field[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 011201.
- [16] 王金沙, 巩岩, 高志山, 等. 双波段长后工作距连续变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(21): 2122004.
Wang J S, Gong Y, Gao Z S, et al. Design of dual-band optical system with long back working distance and continuous zoom[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2122004.

Athermalization Design of Uncooled Long Waveband Infrared Continuous Zoom Optical System

Tang Yufeng, Mao Shan*, Song Yichen, Lai Tao, Yuan Peiqi, Ding Xiaowei, Zhao Jianlin
Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Light-Field Manipulation and Information Acquisition, Ministry of Industry and Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China

Abstract

Objective Compared with the traditional visible light imaging technology, infrared spectral thermal imaging technology utilizes the thermal radiation emitted by objects to obtain images of target objects, with unique advantages in target

detection and tracking. Particularly in the long-wave infrared (LWIR) bands, it demonstrates superior transmittance, increased propagation distance, and enhanced detection performance. Consequently, infrared cameras possess application significance in the high-end commerce, monitoring, and other fields. However, conventional thermal imaging cameras are limited by a fixed focal length, which enables observation only within a specific field of view or area and hampers search and observation capabilities. To this end, the infrared zoom thermal imaging camera is developed. By continuously adjusting the field of view and magnification relationship via a continuous zoom optical system, seamless range size adjustment is achieved, with stability and image clarity maintained. However, the majority of existing LWIR zoom systems incorporate diffractive surfaces, which results in complex design requirements, elevated processing and assembly demands, and increased system costs. Furthermore, the design of certain LWIR zoom systems overlooks the influence of ambient temperature on image quality, subsequently compromising practicality. Thus, it is imperative to devise a low-cost, compact, and uncooled long-wave infrared continuous zoom optical system that preserves excellent image quality across a wide range of temperature variations and exhibits strong practicality. We aim to make the design outcomes contribute to advancements in military weapon targeting, handheld thermal imaging cameras, unmanned vehicles, and related fields.

Methods To meet the requirements of the specific application environment, we have determined the appropriate initial structure for the design. The mechanical positive group compensation method is chosen as the compensation technique for the system. Additionally, the introduction of sulfur glass helps control chromatic aberration and minimize thermal defocus within the system. Meanwhile, the temperature compensation group employs the smallest aperture lens in the system to address temperature variations and maintain image quality. We incorporate the electro-mechanical active non-thermalization method, allowing the temperature compensation mirror group to be adjusted and ensuring excellent imaging quality across a wide temperature range. Additionally, we utilize Zemax OpticStudio software to optimize the design to help control the system size and improve overall image quality. By adopting this iterative process, we design a non-thermalized continuous zoom optical system for LWIR. The designed system takes into account the practicality of implementation, cost-effectiveness, and compactness while delivering excellent image quality and addressing thermal variations. This design has significant potential for applications in handheld thermal imaging cameras, unmanned vehicles, and other related areas.

Results and Discussions After implementing the Zemax OpticStudio software for optimization, a continuous zoom optical system for LWIR consisting of seven lenses is designed. The materials chosen for the lenses are ZnSe and ZnS for the first and second lenses, IRG24 for the fourth lens, and Ge for the third and fifth to seventh lenses (Table 2). In this optical system, five even-ordered aspherical surfaces are employed, and their feasibility for machining is analyzed (Table 3 and Fig. 6), with the remaining surfaces being standard spherical surfaces. The evaluation of the system's imaging quality produces the following results. The modulation transfer function (MTF) exceeds 0.32 at all focal lengths, which is close to the diffraction limit (Fig. 3). The aberration values are also found to be less than 1.8% at the short focus and 0.4% at the intermediate and long focuses (Fig. 4). Furthermore, the energy of the field-of-view envelope is more than 82% at the short focus, 70% at the intermediate focus, and 77% at the long focus for a pixel size of $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$. At short focal length, it exceeds 70% and is greater than 77% at the long focal length (Fig. 5). The out-of-focus amount of the image plane of the optical system at different temperatures is within the depth of focus of the system (Table 4). Additionally, tolerance analysis demonstrates that the system is easily machinable and has a high degree of realizability (Tables 5 and 6). Meanwhile, the cam curve of the lens displays a smooth trend without any inflection point (Fig. 7).

Conclusions For the LWIR 320 pixel \times 320 pixel infrared detector, a continuous zoomable non-thermalized uncooled LWIR optical system is designed by mechanical positive group compensation and electromechanical active compensation. The system achieves MTF values close to the diffraction limit at all focal lengths, indicating excellent image sharpness. It has a compact structure, minimal aberrations, long working distance, and high overall imaging quality. The design strategy focuses on cost reduction by incorporating only aspherical surfaces while maintaining system performance. This approach helps minimize the system's size and weight, simplifies its complexity, and ensures smooth motion curves for both the zoom and compensation groups. The cam mechanism chosen for this design is relatively straightforward to process. Given these features and advantages, the system holds application significance in various fields such as searching, tracking, and detecting, and can be effectively utilized in scenarios where high-quality infrared imaging is crucial.

Key words optical design; infrared zoom system; long-wave infrared; image quality evaluation