

文章编号: 1002-1582(2026)01-0018-07

紧凑型大孔径长波红外连续变焦镜头设计

曹来书¹, 谢晓娜¹, 张军光¹, 蒋威^{2*}

(1. 力鼎光电股份有限公司 福建 厦门 3610009)

(2. 泉州师范学院 物理与信息工程学院, 福建 泉州 362000)

摘 要: 针对红外目标探测等森林防火的实际需求, 用 640×512 , $17\mu\text{m}$ 平面探测器, 实现对大范围目标进行搜索, 设计了变倍比为 $9\times$ 连续变焦光学系统, 其工作波长是 $8\sim 12\mu\text{m}$, F数为 $0.99\sim 1.25$, 实现了 $25\sim 225\text{mm}$ 范围内连续变焦, 系统由4个锗透镜和2个硫系玻璃透镜组成, 采用机械正组补偿变焦系统, 引入非球面进行系统像差校正。 $f/25\sim 225\text{mm}$ 范围内连续变焦, 空间频率在 30lp/mm 下MTF调制传递函数中心在0.4以上, 其中长焦在0.38, 各个焦距段达到衍射极限。利用ZEMAX光学软件-进行光学设计以及成像质量的计算。实验表明该系统具有高分辨率、大光圈、大靶面的特点, 且像面稳定, 像质优良, 变焦平滑, 结构紧凑合理, 可用于国防、防火救灾、地质勘探等全天候监控。

关 键 词: 光学设计; 红外变焦系统; 机械补偿; 变焦凸轮

中图分类号: TH744

文献标识码: A

Design of a compact Large-aperture Long-Wave Infrared (LWIR) continuous zoom lens

CAO Laishu¹, XIE Xiaona¹, ZHANG Junguang¹, JIANG Wei^{2*}

(1. Leading Optics Cot, Ltd, Xiamen, 361000, China)

(2. College of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: To address the practical requirements for infrared target detection in applications such as forest fire monitoring, an optical system with a $9\times$ continuous zoom has been developed. This system utilizes a 640×512 planar detector with a $17\mu\text{m}$ pixel pitch to enable wide-area surveillance. Operating in the $8\sim 12\mu\text{m}$ wavelength range with an F-number varying between 0.99 and 1.25, it provides a continuous focal length adjustment from 25 mm to 225 mm. The design incorporates four germanium lenses and two chalcogenide glass lenses, employing a mechanical positive-group compensation mechanism for zoom control. Aspheric surfaces are introduced to effectively correct system aberrations. Across the entire zoom range, the modulation transfer function (MTF) remains above 0.4 at a spatial frequency of 30lp/mm , with a value of 0.38 at the longest focal length, indicating that the system approaches the diffraction limit at all focal settings. Optical design and image quality analysis were performed using ZEMAX software. Experimental results demonstrate that the system achieves high resolution, a large aperture, and a wide field of view, while maintaining a stable image, excellent image quality, smooth zoom, and a compact, mechanically robust structure. These attributes make it suitable for all-weather monitoring in defense, firefighting, disaster relief, and geological exploration.

Keywords: optical design; infrared zoom system; mechanical compensation; zoom cam

收稿日期: 2025-08-19; 收到修改稿日期: 2025-11-06

基金项目: 福厦泉自创区协同专项 (3502ZCQXT2023010) 厦门市科技局揭榜挂帅重大技术攻关项目 (3502Z20241006) 泉州市科技计划项目 (2024QZGZ6)

作者简介: 曹来书 (1988—), 男, 工程师, 从事光学镜头设计、制造与检测研究。1493446320@qq.com

蒋威 (1994—), 男, 讲师, 博士, 从事光学设计、多光谱成像技术、三维成像技术研究。

* 通讯作者: jiangwchn@qq.com

0 引 言

红外成像技术与可见光成像，其核心区别在于探测目标物体自身及其与背景环境间的辐射能量差异。长波红外波段凭借其穿透烟雾、尘埃等大气干扰的能力，可有效揭示肉眼难以察觉的隐藏目标^[1,2]。然而，传统红外定焦镜头视场固定，观测不同距离目标需频繁更换对应焦距镜头，不仅操作繁琐导致观测中断，还可能因切换间隙丢失目标。因此，发展能够实现连续、无缝观测的红外连续变焦镜头成为研究热点。红外连续变焦系统在焦距连续变化过程中保持像面位置稳定，对同一目标获取不同放大倍率的清晰图像，并维持稳定的视场角覆盖范围内。这种特性使其具备对目标进行连续探测、跟踪、识别与瞄准的能力，有效避免变倍过程中的目标丢失，特别适用于高速运动目标的搜索与跟踪^[3]。长波红外变焦系统具有独特的优势，能够在夜间或者低照度环境下提供清晰图像，在微光环境如夜间驾驶、军事侦查和森林防火等领域有广泛的应用^[4]；吴等（2020）设计了一款F数为1.2的红外连续变焦成像光学系统。该系统由五片透镜组成,在探测器对应的36lp/mm特征频率处的调制传递函数值在0.3,此时的分辨率比较低^[5]。徐等（2025）的10倍红外变焦，系统在空间频率40lp/mm处的全视场调制传递函数大于0.3，但引入衍射面增加了加工检测难度^[6]。2021年，李等设计了一种长波红外浮动变焦系统，变倍比是40倍，焦距范围从5.86~234.76mm进行变化，采用浮动光阑的形式，满足大孔径与高变倍比的要求，增大了变焦凸轮的设计难度^[7]。由此可见，在光学特性方面，系统受限于较长的工作波长（8~12μm），其理论分辨率存在固有局限。为提升成像质量，通常需要采用大孔径光学设计（F数0.99~1.25）来增强光通量。其次，在系统设计方面，红外变焦镜头面临多重技术难点：（1）光学结构相对复杂，透镜数量较多（本系统采用6片式设计）；（2）需平衡透光率与变焦倍率的矛盾；（3）要确保全焦段（f25~225mm）成像的一致性与此同时，变焦镜头结构的设计又是保证镜头成

像质量的关键作用^[8-10]。

基于此，本研究设计了一种镜片数量少、结构简单的长波红外连续变焦系统，该系统仅使用6片透镜实现一个9倍的长波红外变焦系统，针对红外材料（锗及硫系玻璃）固有的透光率限制（即使镀增透膜后仍显著低于可见光材料），通过减少光学-机械界面数量（从典型10~12片减至6片），使系统总透光率提升约20~30% 为了保证各个焦距段的切换连续，成像清晰，根据机械正组补偿法变焦理论，采用变焦凸轮控制镜组运动。通过精确规划变倍组位移与凸轮转角 的运动关系，在焦距变化时稳定成像面位置。本系统具备高透过率、高分辨率、结构紧凑、轻量化及优异成像质量等优势，符合当前红外连续变焦系统的前沿研究方向。

1 镜头设计原理分析

1.1 结构形式分析

表1描述了镜头变焦结构的优缺点，从表格中可以看出，分析表明，光学补偿式变焦因仅存在有限根解，无法实现真正的连续变焦。从像差平衡角度来说，如果要实现9×的变倍，以及8~12μm的宽波段需要采用的镜片数量便会增多，若采用光学补偿，为平衡像差并兼顾高低温环境适应性，势必大幅增加镜片数量。长波红外系统因工作波段宽，常选用锗单晶（消色差性能优异）作为主要材料然而，锗材料折射率温度系数（ dn/dt ）高，其固有的热差补偿难题在高低温环境下尤为重^[11]。光学补偿法要求变倍组与补偿组固联并同步移动等量位移，这种运动模式在补偿热差调焦时会导致系统倍率显著变化，严重损害高低温成像稳定性^[12]，故不适用于连续变焦系统。双组联动是兼备着光学补偿法和机械补偿法的优点，但双组联动对近距离物体成像的时候采用独特的调焦方式，使得整个系统的 $f/\#$ 和视场角保持不变，这种方式使得前固定组分配过多的光焦度会导致系统的像差增大，且系统整体稳定比较低，因此双组联动也不适用于连续变焦过程^[13]。全组联动性的结构虽然能够满足各方面的需求，但是结构比较复杂，成本较高，需要线性和非线性的联合使用，这给

表1 变焦结构优缺点

变焦类型	变倍比	机械结构	系统长度	像面稳定性	像质情况	设计复杂性
光学补偿型	小	线性运动不需要凸轮	长	特殊几个点稳定	像质不高	低
机械正组补偿	大	需要凸轮	一般	完全稳定	高	中(经典成熟)
机械负组补偿	大	需要凸轮	适中	完全稳定	高	中(经典成熟)
双组联动型	大	两组线性,一组非线性需要凸轮	较短	完全稳定	高	高
全组联动型	大	线性与非线性需要凸轮	短	完全稳定	高	极高

结构设计人员对变焦凸轮运动设计增加了一定的难度^[14,15]。机械补偿法因其能确保全焦段清晰成像且补偿曲线相对平缓,成为本设计的首选方案。机械补偿法又分为负组补偿和正组补偿,负组补偿需使用负光焦度补偿组,而正组补偿则采用正光焦度补偿组。正组补偿结构通常呈现轴向尺寸较大但通光孔径较小的特点(相较于负组补偿),更有利于实现系统轻量化。综基于此,本研究采用正组补偿方案。光焦度分配与运动方式如图1所示1前固定组、2变倍组、3补偿组、4后固定组、5调焦组。其对总光焦度的构造为:1正、2负、3正、4负、5正。为了实现变焦过程,变倍组沿光轴做线性运动,当变倍组的位置线性变化时,凸轮使补偿组进行非线性运动,确保变焦过程中像面位置保持稳定。见图1所示的连续变焦光学系统正组补偿原理图。

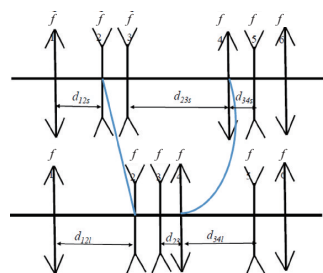


图1 连续变焦光学系统正组补偿原理图

1.2 高斯光学计算

采用高斯运算,对正组补偿控制变焦系统的长焦进行初始位移的计算^[16-18]

$$f_3' \left(\frac{1}{m_3} + m_3 - \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) + \quad (1)$$

$$f_2' \left(\frac{1}{m_2} + m_2 - \frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) = 0 \quad (2)$$

$$m_3^2 - b m_3 + 1 = 0 \quad (3)$$

$$m_3 = \frac{(b \pm \sqrt{b^2 - 4})}{2} \quad (4)$$

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (5)$$

$$m_{2s} = -\frac{f_2'}{f_3' + l_2} = \frac{f_2'}{f_2' + f_1' - d_{12s}} \quad (6)$$

$$m_{3s} = -\frac{f_3'}{f_3' + l_3} = \frac{f_3'}{f_2' + f_2'(1 - m_{2s}) - d_{23s}} \quad (7)$$

$$\frac{1 - m_{2s} + d_{23s}}{f_3' - 1 + m_{2s} - d_{23s}} - \frac{3 + m_{2s}^{-1} + d_{23s}}{f_3'} = b - 2 \quad (8)$$

$$A = 1 - m_{2s} + d_{23s} \quad B = 3 + m_{2s}^{-1} + d_{23s}$$

$$\frac{A}{f_3' - A} - \frac{B}{f_3'} = b - 2$$

由式(3)可知,方程组有解的必要条件是 $b^2 - 4 \geq 0$, 变倍组在 m_{2s} 起步且在 d_{2s} 可以根据 b

的值域确定 f_3' 的取值。将 f_3' 分解成3个区域,其中正组补偿系统满足

$$\frac{(3A + B) - \sqrt{(9A - B)(A - B)}}{8} \leq f_3' \leq d_{23s} - \frac{f_1'}{1 - f_1'} \quad (9)$$

式中,可以看出参数在值域范围内,补偿曲线保持不断地变倍,其中 b 是方程一次项的系数, d_{12s} 是短焦时前固定组与变倍组之间的最短间隔, d_{23l} 是长焦时变倍组与补偿组之间最短间隔, d_{23s} 是短焦时变倍组与补偿组最大的间隔, f_3' 表示补偿组的焦距, f_2' 表示变倍组的焦距, m_2 是变倍组的放大倍率, m_3 是补偿组的放大倍率, m_{2s} 是变焦系统在长焦初始位置时候变倍组的放大倍率, m_{3s} 是变焦系统在长焦初始位置时候补偿组的放大倍率, m_{2l} 是变焦系统在长焦初始位置时候变倍组的放大倍率, m_{3l} 是变焦系统在长焦初始位置时候补偿组的放大倍率。其中的 A 和 B 是为了简化表达式而引入的“复合参量”。

2 镜头结构选型

2.1 主要指标要求

系统设计指标如表2所示。

表2 光学系统设计指标

参数	设计指标
分辨率/pixel	640×512
焦距/mm	25~225
工作波段/μm	8~12
F数	1.25
系统总长/mm	≤253
相对照度/%	>90
光学后焦/mm	≥16.9
光学畸变/%	短焦>-5.9,长焦<0.6
像元大小/μm	12/17
传递函数	中心视场>0.4和0.35(长焦)@30lp/mm 0.8视场>0.25@30lp/mm

2.2 结构形式分析

系统结构的选择能有效控制系统体积。基于9倍变倍比及F数指标,选定正组补偿型专利架构作为设计的起点,该系统需实现9×变倍比,成像波段较宽且像质要求较高。对比不同补偿方式的五组元变焦结构,为了论证架构选择的合理性,对比了不同补偿方式。分析表明,虽然正组补偿方案相较于负组补偿方案在总长上增加了约10%,但其像差抑制能力,尤其是针对宽波段成像的像差,得到了显著提升^[19]。在code v中选择一种合适的结构对系统进行缩放。通过变倍组与补偿组的联动实现焦距连续变化, $f_{25\sim 225\text{mm}}$ 的焦距段比较长,根据变焦

特性，将系统设置为 7 个离散组态，25mm、50mm、90mm、125mm、150mm、180mm、225mm 等进行一个初步的优化，随后导入 ZEMAX 中进行细节优化，用 CONF 组态控制每个组态，用 TTHI 操作数控制系统的第 2~15 面的总长保持不变，确保变焦过程像面位置偏移量 $\leq 0.03\text{mm}$ 。

针对变焦系统的优化，校正畸变与球差往往是在第一片镜片与第二片镜片中实现，当第一片镜片加入非球面（高阶次数）既可以校正像差也可以使得镜片的口径减小从而减小镜片重量降低成本的效果，但设计加入的高阶非球面优化未达预期，考虑材质也是影响系统成像质量的重要因素，逐步替换材料，换成锗材料，Ge 在 8~12 μm 的时候有良好低色散高折射率性能。当镜头焦距从短焦向长焦变化时，变倍组趋近像面而补偿组远离，通过相对位移的变化实现连续变焦。在短焦位置，变倍组与补偿组之间的间隔达到最大，此时变倍组与成像平面的距离也达到最大值，以确保系统的成像质量。在长焦位置，变倍组与补偿组的间隔最小，但仍保持一定的最小中心间隔，以保证变倍组与补偿组之间的镜片不会相互影响，此时变倍组与成像平面的距离达到最小值^[20]。如图 2 连续变焦系统 2D 图，该系统的组合焦距范围为 25 至 225mm，变倍比为 9 倍，视场角从 32.76°变化至 2.21°。系统的总长度 $\leq 253\text{mm}$ ，相对口径在 1/0.99 至 1/1.25 之间，确保了高成像质量和宽视场角。成像范围 $\geq \varphi 13.93\text{mm}$ ，适用 640 $\times$ 512~17 μm 传感器。整体结构设计紧凑，体积小，便于安装和使用，具有很高的实用性和操作便捷性。设计结构如图 2 所示的连续变焦光学系统图。系统的第一组为固定组，提供稳定的光学基准；第二组为变倍组，负责实现系统的放大倍数变化；第三组为补偿组，用于校正变焦过程中的光学畸变；第四组为固定组，以维持系统的光学稳定性；第五组为调焦组，用通常是指可以沿光轴做小范围移动，用于补偿加工、装配误差以及环境变化（主要是温度）引起的像面偏移的透镜组。本次设计的成像镜头初始结构参数如表 3 以及如表 4 变焦镜头的变化参数指标。

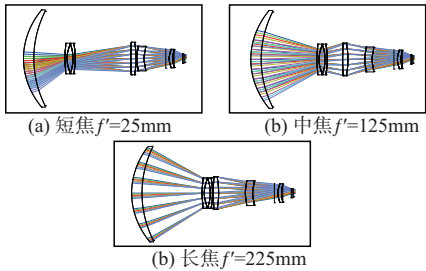


图 2 连续变焦光学系统 2D 图

表 3 光学系统设计结构参数

面序号	表面	曲率半径	间隔	材质	折射率	焦距
c	OBJ	Infinity	Infinity			
1	第一透镜	165.8	16.20	玻璃	4.0	155.9
2		237.9	48.55			
3	第二透镜	151.8	3.50	玻璃	4.0	-42.3
4		67.9	9.25			
5	第三透镜	-118.56	3.45	玻璃	2.8	-101.7
6		-351.2	87.31			
7		Infinity	0.00			
8	第四/光阑	459.90	8.25	玻璃	4.0	47.5
9		-204.1	1.12			
10	第五透镜	75.87	11.39	玻璃	2.8	-184.5
11		55.67	34.01			
12		Infinity	5.43			
13	第六透镜	44.43	5.68	玻璃	4.0	45.8
14		59.35	2.00			
15		Infinity	13.10			

续表 3-1

面号	S3	S4	S5	S6	S8
A4	7.36×10^{-7}	1.6×10^{-6}	-1.5×10^{-7}	-9.6×10^{-7}	-6×10^{-7}
A6	-7.4×10^{-9}	-9.8×10^{-9}	-7.9×10^{-9}	-5.9×10^{-9}	8.8×10^{-10}
A8	6.75×10^{-12}	7.82×10^{-12}	1.23×10^{-11}	1.05×10^{-11}	-3.5×10^{-13}
A10	-1.9×10^{-15}	-1.7×10^{-15}	-5.1×10^{-15}	-4.5×10^{-15}	7.59×10^{-17}
面号	S9	S10	S11	S13	S14
A4	-4.9×10^{-7}	-3.9×10^{-6}	-7×10^{-6}	1.11×10^{-6}	2.14×10^{-6}
A6	8.31×10^{-10}	-3.7×10^{-9}	-8.5×10^{-9}	-2.5×10^{-8}	-4.6×10^{-8}
A8	-3.2×10^{-13}	1.02×10^{-12}	1.26×10^{-11}	2.66×10^{-12}	2.31×10^{-11}
A10	7.14×10^{-17}	4.68×10^{-16}	-6×10^{-15}	-4.1×10^{-14}	-2.9×10^{-15}

表 4 变焦镜头的变化参数指标

变焦过程指标	短焦端	长焦端
$d1/\text{mm}$	48.4011	1.4232
$d2/\text{mm}$	87.5264	93.7611
$d3/\text{mm}$	1.1203	41.7298
视场角 DFOV/(°)	32.76	2.21
焦距/mm	25	225
光圈	1.0	1.28
像面尺寸/mm	$\varphi 13.93$	$\varphi 13.93$
光学总长/mm	253	253

3 像差校正与像质量评价

3.1 光学传递函数(MTF)

图 3 展示了该系统在 25mm、225mm 两个特征焦距状态下的调制传递函数（MTF）曲线。作为评价光学系统成像质量的关键指标，MTF 反映了系统对不同空间频率下对比度传递能力。分析结果如，在 30lp/mm 的空间频率处，所有焦距下中心视场的 MTF 值均高于 0.4，只有长焦中心视场 MTF 值在 0.38 边缘视场也均超过 0.25，表明系统在全焦段均具备良好的分辨率和对比度能力充分满足高分辨率成像系统应用需求。

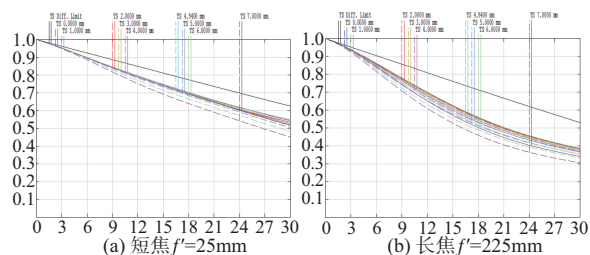


图 3 变焦光学系统 MTF 曲线

3.2 相对照度

为抑制由轴外大角度入射光线引起的高级像差,通过适当缩小某一镜片的口径,有效限制了部分大视场光线的进入。该结构策略不仅显著提升了成像质量,还同时促进了系统结构的小型化。此类拦光处理虽可能影响系统照度,但在本设计中可以平衡,既控制了轴外像差,又保证了足够的通光效率。针对长焦成像优化与最大口径压缩的需求,固定组设置了约 5% 的拦光比例。如图 4

所示,系统在短焦、中焦和长焦状态下的相对照度均维持在 90% 以上,覆盖整个变焦范围,完全符合设计指标。

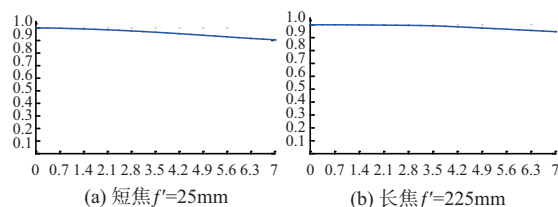


图 4 变焦光学系统 RI 图变焦光学系统

3.3 光学畸变

设计的光学系统变焦范围为 25~225mm (最大像高 $\phi 14\text{mm}$)。根据理想成像公式,短焦(25mm)和长焦(225mm)视场角分别为 32.76° 和 2.21° ,预示短焦畸变更显著。设计畸变图如图 5 畸变 $< 5.6\%$,全焦距段畸变性能均达到设计指标,展现出像面形貌保真能力。

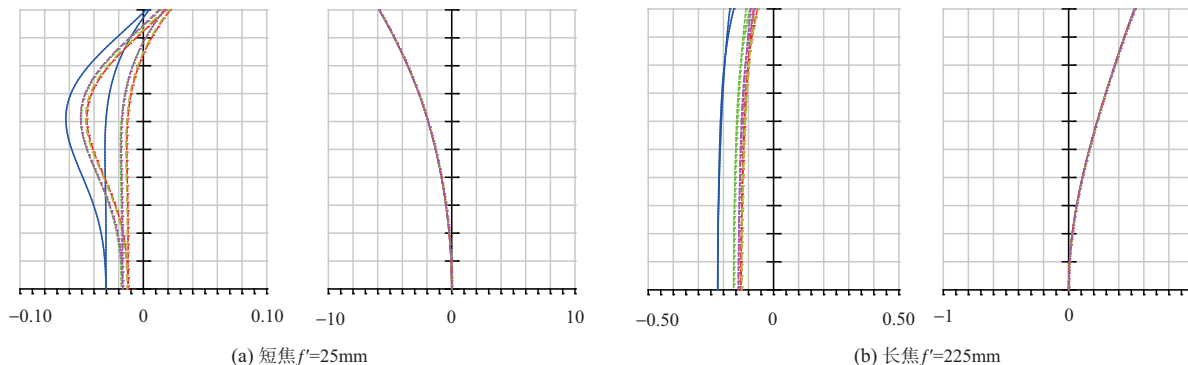


图 5 变焦光学系统畸变图

3.4 凸轮曲线设计

图 6 为系统的变焦运动轨迹图。由于变倍组做线性运动补偿组做补偿变倍组所带来的像面偏移。当 $f=25\text{mm}$ 时前固定组透镜最后一面作为基准面,定取变倍组运动的间隔为 d_{12s} ,补偿组运动的间隔是 d_{23s} ,将焦距 f' 作为自变量和 d_{23s} 为因变量的变焦凸轮曲线。经过 ZEMAX 软件的优化,并利用其宏语言对各焦距段间隔进行精确计算,展示了前固定组、变倍组与补偿组之间的间隔与凸轮转角关系,以及变倍组与补偿组在短焦至长焦过程中的移动变化量曲线图^[21,22]。最后从 Origin 软件上得到 1440 多个数据点的变焦系统图,再经拟合后制作出如图 6 所示的变焦凸轮曲线图,通过利用 ZEMAX 计算全变焦范围内的压力角,得到其最大压力角为 45.65° 。该值远小于常用材料的许用压力角(通常为 60°)表明凸轮机构传动效率高,无自锁风险,所以该凸轮曲线在整个变焦范围内是无拐点的平滑曲线,完符合机械工程设计应用的标准要求,可以有效验证系统的设计合理性与可行性。

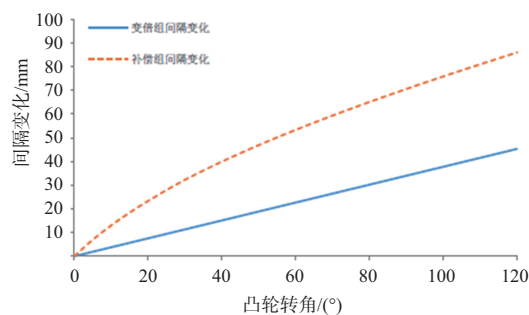


图 6 变焦凸轮曲线

3.5 公差分析

在光学元件加工与装调中,需合理分配零件与结构件公差。经分析,第一片透镜偏心与第 3 片透镜倾斜相对敏感,生产中须加以管控。本设计的公差允许范围如表 5 所示。

最后用蒙特卡罗公差如表 6、7,分析最终批量生产的良率。由蒙特卡罗分析可得,该镜头 70% 以上的蒙特卡罗样本 MTF 大于等于 0.25。如表 6 所示。

表 5 镜头元件公差确定

类型	镜片公差
TTHI	± 0.02
TEDY/mm	0.02
TSDY/mm	0.01
TETX/(°)	0.05
TSTX/(°)	0.017
TIRR	± 0.3
TFRN	± 3
TABB/%	± 0.5
TIND	± 0.0003

表 6 短焦蒙特卡罗分析结果

蒙特卡罗分析	中心视场 MTF	边缘视场 MTF
90%	0.3877	0.2501
80%	0.4572	0.3125
50%	0.5306	0.3991
20%	0.5645	0.4408
10%	0.5743	0.4534

表 7 长焦蒙特卡罗分析结果

蒙特卡罗分析	中心视场 MTF	边缘视场 MTF
90%	0.3018	0.1910
80%	0.3486	0.2340
50%	0.3869	0.2774
20%	0.4009	0.3143
10%	0.4107	0.3292

4 镜头性能测试

4.1 光轴一致性测试

镜头光轴一致性是机械的中心轴与光轴是否一致，其中最主要的影响因素主要有组内同轴度和组间同轴度：（1）组内同轴度反映的是元件内部的同轴关系。在未实施调心操作时，其精度取决于镜片与镜筒的配合公差。（2）组间同轴度指不同组元间的同轴关系。未调心时，其精度取决于连接处各机械零件的加工精度。系统变倍组与补偿组的位移由凸轮槽引导，通过双导轨滑动实现变倍补偿曲线运动。导轨两端采用固定末端法兰进行微调，旨在确保其与系统光轴间的平行度及间距要求。导轨上安装的线性轴承为运动组件提供低摩擦滑动支撑，有效降低变倍调焦过程中的摩擦阻力与磨损。如图 7 所示，经测量对比得到：焦距较短（ $f'=25\text{mm}$ ）和较长（ $f'=225\text{mm}$ ）条件下，以较长焦距条件作为参考，对于焦距变化来说，光轴的跳跃量不超过 0.3mrad ，在此基础上可以认为该系统在变焦过程中保持了系统的光

轴一致，在整个变焦过程中光轴偏移量均 $\leq 0.15\text{mrad}$ ，可满足其要。

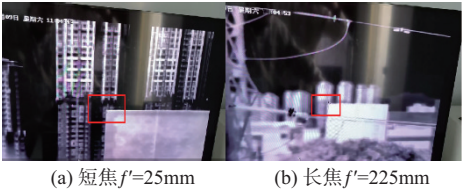


图 7 连变焦系统的光轴一致性测试结果

4.2 镜头 MTF 实测

如图 8 所示 MTF 曲线是利用 HR 测试设备对成品镜头的测试，从图上显示可以看出在 30lp/mm 的空间频率处，所有焦距的中心视场 MTF 值均高于 0.4 其长焦在 0.38 以上，边缘视场 MTF 值均超过 0.25，符合既定设计指标。为了进一步验证镜头实拍像质，搭建光路进行了实拍，实拍如图 8 所示焦距 $f' 25\sim 225\text{mm}$ 的画面，验证了镜头从短焦到长焦，不同焦距段成像清晰，从而验证了镜头的可使用性。为了进一步验证镜头实拍像质，搭建光路进行了实拍，实拍如图 9 所示焦距 $f' 25\sim 225\text{mm}$ 的画面，验证了镜头从短焦到长焦，不同焦距段成像清晰，从而验证了镜头的可使用性。

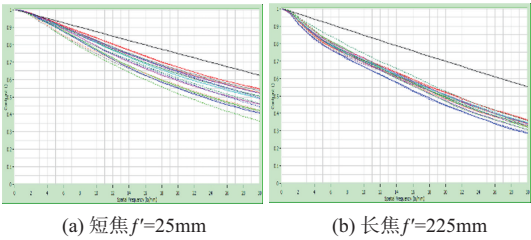


图 8 使用 HR 对镜头成像质量进行实测

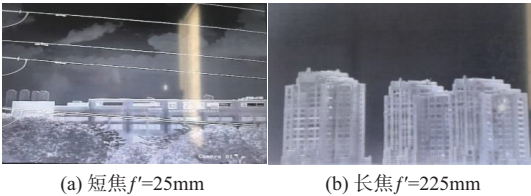


图 9 $f' 25\sim 225$ 焦距段实拍场景

5 结 论

基于 ZEMAX 软件对正组补偿法换根变焦的原理进行了讨论，在考虑各像差的基础上，选取较为合理的初始结构，采用光学设计软件进行全面的像质优化，精确定位各种焦距时各组的光焦度。在此基础上设计了一个放大比为 $9\times$ ，焦距范围从 25mm 到 225mm 的连续变焦光学系统，该系统成像质量优质，整个视场下的 MTF 值 30lp/mm 在 0.25 以上，凸轮曲线较为平缓且无拐点，外景测试表明，该系统达到了良好的昼外观测条件，其水

平方向视场的一致性小于 0.15mrad, 可用于光电跟踪系统在恶劣气象环境或低照度下的工作。

参考文献:

- [1] Mann A. Developments and trends in infrared zoom lenses from 2000 to 2010[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1):013001—013001.
- [2] 吴传超, 苏宏锦, 张治祥, 等. 基于傅里叶红外光谱分光的椭圆薄膜测量技术[J]. 光学技术, 2025, 51(2):252—256.
Wu Chuanchao, Su Hongjin, Zhang Zhixiang, et al. Measurement technology of elliptical thin film based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Optical Technique, 2025, 51(2): 252—256.
- [3] 屈立辉, 王芬, 钟兆铨, 等. 具有强透雾能力的近红外高清变焦光学系统: 中国, CN202011217864.0[P]. 2020-11-21.
Qu Lihui, Wang Fen, Zhong Zhaoquan, et al. Near-infrared high-definition zoom optical system with strong fog transmission ability: China, CN, 202011217864.0 [P]. 2020-11-21.
- [4] 唐哈, 夏丽昆, 刘炼, 等. 大变倍比制冷型长波红外变焦光学系统设计[J]. 中国光学, 2024, 17(1):69—78.
Tang Han, Xia Likun, Liu Lian, et al. Design of Long-wave infrared zoom optical system with large magnification ratio[J]. Chinese Optics, 2024, 17(1):69—78.
- [5] 吴海清, 王朋. 小型化大面阵非制冷红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外, 2020, 41(2):1—6.
Wu Haiqing, Wang Peng. Design of miniaturized large-area array uncooled infrared continuous zoom optical system[J]. Infrared, 2020, 41(2):1—6.
- [6] 徐玉惠, 郭宁, 李先帅, 等. 10 倍折/衍射红外连续变焦光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2025, 40(03):24—29
Xu Yuhui Guo Ning Li Xianshuai, et al. 10x folding/diffraction infrared continuous zoom optical system design[J]. Optoelectronic Technology Application, 2025, 40(03):24—29
- [7] 李锦程, 谢洪波, 杨磊, 等. 一种工作于长波红外波段的 40× 成像物镜设计[J]. 应用光学, 2021, 42(2):229—235.
Li Jincheng, Xie Hongbo, Yang Lei, et al. Design of a 40× imaging objective working in the long wave infrared band[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(2):229—235.
- [8] 曹天皓, 张继艳, 林正煜, 等. 紧凑型长波红外变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2025, 47(5):553—562.
Cao Tianhao, Zhang Jiyan, Lin Zhengyu, et al. Design of compact long-wave infrared zoom optical system[J]. Infrared Technology, 2025, 47(5):553—562.
- [9] 赵哈, 史浩东, 王超, 等. 宽波段非制冷红外变焦光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(06):9—16.
Zhao Han, Shi Haodong, Wang Chao, et al. Design of wide-band uncooled infrared zoom optical system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 46(6):9—16.
- [10] 唐哈, 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 Han, Zheng Wanxiang, Zeng Xingrong, et al. Compact and low-cost uncooled long-wave infrared continuous zoom optical design[J]. Infrared & Laser Engineering, 2023, 52(4): 20220607.
- [11] 曹一青, 沈志娟. 长波红外大孔径长焦距无热化光学系统设计[J]. 光子学报, 2024, 53(03):121—129.
Cao Yiqing, Shen Zhijuan. Design of long wave infrared large aperture long focal length non-thermal optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(03):121—129.
- [12] Jo S H, Park S C. Design and analysis of an 8x four-group zoom system using focus tunable lenses[J]. Optics Express, 2018, 26(10):13370—13382.
- [13] 唐哈, 夏丽昆, 刘炼, 等. 大变倍比制冷型长波红外变焦光学系统设计[J]. 中国光学, 2024, 17(01):69—78.
Tang Han, Xia Likun, Liu Lian, et al. Design of long-wave infrared zoom optical system with large magnification ratio[J]. Chinese Optics, 2024, 17(1):69—78.
- [14] 沈志娟, 林海峰, 曹一青. 多组元全动型大孔径及超大视场变焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0708001.
Shen Zhijuan, Lin Haifeng, Cao Yiqing. Design of multi-component full-motion large aperture and ultra-large field of view zoom system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7):0708001.
- [15] 谢佳儀, 王治乐, 于东辉, 等. 多运动组共轨型紧凑变焦光学系统[J]. 光学精密工程, 2025, 33(11):1713—1721.
Xie Jiayi, Wang Zhile, Yu Donghui, et al. Multi-motion group common rail compact zoom optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2025, 33(11):1713—1721.
- [16] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988:49—93.
Tao Chungan. Optics design of zoom optical system[M]. National Defense Industry Press, 1988:49—93.
- [17] 张坤, 曲正, 钟兴, 等. 30 倍轻小型变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(11):1263—1271.
Zhang Kun, Qu Zheng, Zhong Xing, et al. Design of 30x light and compact zoom optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(11):1263—1271.
- [18] 马迎军, 张葆, 洪永丰. 连续变焦光学系统的像差自动设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8):822003—1.
Ma Yingjun, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Automatic design of aberrations in continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8):822003—1.
- [19] Chihita Yen, Jyunmin Shih. A study of optical design on 9times zoom ratio by using a compensating liquid lens[J]. Applied Sciences, 2015, 5(3):608—621.
- [20] Tie Hu, Xing Feng, Yunxuan Wei, et al. Design of an achromatic zoom metalens doublet in the visible[J]. Optics letters, 2022, 47(24):6460—6463.
- [21] 金丽漫. 红外连续变焦镜头变焦凸轮曲线优化分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
Jin Liman. Optimization and analysis of zoom cam curve of infrared continuous zoom lens[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [22] 罗敏, 张生全, 王海洋, 等. 一种连续变焦凸轮优化设计及试验验证[J]. 红外技术, 2022, 44(09):958—963.
Luo Min, Zhang Shengquan, Wang Haiyang, et al. Optimal design and experimental verification of a continuous zoom cam [J]. Infrared Technology, 2022, 44(9):958—963.