

紧凑式长波红外变焦光学系统设计

曹天皓，张继艳，林正煜，孙丽婷，秦腾，申洋羽

(厦门理工学院 光电与通信工程学院，福建 厦门 361000)

摘要：为满足长波红外变焦光学系统结构紧凑的需求，利用线性双组联动连续变焦结构简化系统结构，设计了一款紧凑式长波红外变焦光学系统。本设计适用于 384×288 阵列的非制冷红外探测器，其像元尺寸为 $25\mu\text{m}$ 采用4片单晶硅(Si)镜片，系统总长为160 mm，工作波段为 $8\sim12\mu\text{m}$ ，变焦范围为100~200 mm，视场角为 $3.42^\circ\sim6.80^\circ$ ，F/#恒定为1.4。本设计引入一个二元衍射面实现无热化设计并消除二级光谱像差；引入一个圆锥面和一个偶次非球面平衡长焦距、大孔径所带来的球差和色差。设计结果显示，该系统结构紧凑，系统在 $-40^\circ\text{C}\sim60^\circ\text{C}$ 的温度范围内均可实现品质良好的红外热成像，全视场范围内调制传递函数在奈奎斯特频率为20 lp/mm处均大于0.3。变焦凸轮曲线无拐点，公差分析结果具有良好的可加工性。

关键词：光学设计；长波红外；变焦镜头；线性双组联动连续变焦；紧凑式设计

中图分类号：TB851+.1 文献标志码：A 文章编号：1001-8891(2025)05-0553-10

Design of Compact Long-Wave Infrared Zoom Optical System

CAO Tianhao, ZHANG Jiyan, LIN Zhengyu, SUN Liting, QIN Teng, SHEN Yangyu

(School of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361000, China)

Abstract: To meet the demand for compactness in long-wave infrared zoom optical systems, a linear dual-group linkage continuous zoom structure was utilized to simplify the system design. A compact long-wave infrared zoom optical system was developed using an uncooled infrared detector with a 384×288 array and a $25\mu\text{m}$ pixel size, incorporating four single-crystal silicon (Si) lenses. The system has a total length of 160 mm, operates in the $8\sim12\mu\text{m}$ wavelength band, offers a zoom range of 100-200 mm, a field of view from 3.42° to 6.80° , and maintains a constant F-number of 1.4. The design incorporates a diffractive optical element to achieve athermalization and eliminate secondary spectrum aberrations. Additionally, a conical surface and an even-order aspherical surface are introduced to balance spherical and chromatic aberrations caused by the long focal length and large aperture. The design results indicate that the system is compact and can achieve high-quality infrared thermal imaging within a temperature range of -40°C to 60°C . The modulation transfer function (MTF) across the entire field of view exceeds 0.3 at the Nyquist frequency of 20 lp/mm. The zoom cam curve is smooth and free of inflection points, and the tolerance analysis confirms good manufacturability.

Key words: optical design, long wave infrared, zoom lens, linear double linkage continuous zoom, compact design

0 引言

长波红外探测系统利用物体自身温度所发出的红外辐射对物体进行探测，而且不需要直接接触被测物体，因此可以在极端或具有潜在危险的环境中使用，例如黑暗、浓雾、森林等场景。长波红外探

测系统广泛应用于军事领域，例如监视和侦察行动、搜索和救援行动、为武器系统提供精确的目标信息等。近年来，长波红外探测系统的应用领域已经逐渐从军用向民用安防监控、医疗等领域扩张。

长波红外变焦光学系统相较于长波红外定焦光学系统，具有可变放大倍率，对于目标距离可能变

收稿日期：2024-05-14；修订日期：2024-08-08。

作者简介：曹天皓（1999-），男，硕士研究生，主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 2222031225@s.xmut.edu.cn。

通信作者：张继艳（1977-），女，博士，副教授，硕士生导师，主要从事光学设计、信息光学、激光应用、颜色光学等方面的研究。

E-mail: jyzhang@xmut.edu.cn

基金项目：福建省自然科学基金（2022J011272）；厦门市科技计划项目（项目编号 2023CXY0402）。

化的监视和侦察更具有灵活性。同时长波红外变焦系统以增加焦距为目标，实现远距离探测。长波红外镜头的发展趋势是轻量化、高性能、结构紧凑等，但由于变焦系统的复杂性以及制作适用于长波红外波段的镜片材料价格昂贵，因此长波红外变焦镜头在保证高质量成像的前提下，急需解决的问题是减少光学系统所使用的镜片数量、寻找价格更便宜的镜片材料。

Kwang-Woo Park^[1]等人采用5片镜片设计了一个F/#为1.6，变焦范围为24.5~75.1 mm，系统总长为100 mm的长波红外变焦系统；Doruk Kucukcelebi^[2]等人采用4片镜片设计了一个F/#为2.0，变焦范围为45~135 mm的长波红外变焦系统；王静^[3]等人采用单晶锗(Ge)、硫系玻璃和硫化锌(ZnS)，共6片镜片，设计了一个F/#为2.0，变焦范围为10~24 mm，系统总长为200 mm，其中包含5个偶次非球面的长波红外变焦光学系统；吴海清^[4]等人采用5片单晶锗(Ge)镜片设计了一个F/#为1.2，变焦范围为25~75 mm，系统总长为125 mm，包含3个高次非球面的长波红外变焦光学系统；吴海清^[5]等人采用5片单晶锗镜片设计了一个F/#为1.2，变焦范围为25~90 mm，包含1个高次非球面的长波红外变焦光学系统；唐玉凤^[6]等人采用硫系玻璃、单晶锗、硫化锌和硒化锌(ZnSe)，共7片镜片，设计了一个F/#为2.0，变焦范围为60~180 mm，系统总长为200 mm，包含5个偶次非球面的长波红外变焦光学系统。由此可见，长波红外变焦系统大多数采用单晶锗镜片，其焦距越长，所用的镜片越多，光学系统的总长也随之变长。

本设计针对长波红外变焦光学系统结构紧凑的应用需求，采用线性双组联动连续变焦结构实现压缩系统总长的目的。本系统为使用4片单晶硅镜片，F/#为1.4，变焦范围为100~200 mm，系统总长为160 mm的长波红外变焦光学系统，满足轻量化、高性能、结构紧凑的设计要求。

1 基本原理

1.1 线性双组联动型连续变焦系统原理

线性双组联动的变焦系统，把原来作曲线运动的机械补偿型变焦系统简化为作直线运动，因而产生了系统像面的误差，其原理相似于光学补偿的连续变焦系统。与光学补偿式连续变焦系统相比，线性双组联动连续变焦系统通过强化变倍组的近似直线运动为完全直线运动，从而削弱了原有的自动机械补偿像面位移功能，尽管仍存在像面位移，但其

位移量显著小于光学补偿式系统。由于线性双组联动连续变焦系统中的补偿组进行线性补偿运动，对减少补偿像面位移量具有显著效果，使得该位移量能够控制在系统轴向球差公差范围内，从而不影响系统的成像质量。通过采用线性双组联动连续变焦结构，利用补偿组的线性运动代替复杂的非线性曲线运动，取消了传统的曲线导轨式凸轮结构，极大地简化了系统结构，降低了生产成本^[7]。线性双组联动连续变焦系统结构示意图如图1所示。

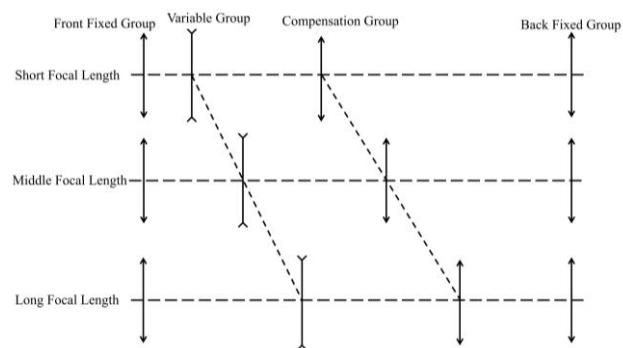


图1 线性双组联动系统结构示意图

Fig.1 Sketch of linearization double-linkage zoom lens

设线性双组联动连续变焦系统的前固定组和后固定组分别为 F_1 和 F_4 ，变倍组为 F_2 ，补偿组为 F_3 。设变焦组和补偿组的放大率在长焦分别为 β_2 、 β_3 ，后固定组放大率为 β_4 。设系统在长焦位置及短焦位置的总焦距分别为 F_L 和 F_S ，由此可得出关系式：

$$F_L = F_1 \beta_2 \beta_3 \quad (1)$$

线性双组联动连续变焦系统得到变焦采用物像交换原则，因此得出系统变焦部分短焦焦距值为：

$$F_S = \frac{F_1}{\beta_2 \beta_3} \quad (2)$$

系统总变倍比为 M ，由此可得以下关系式：

$$F_S = F_{OS} \beta_4 \quad (3)$$

$$F_L = M F_S = M F_{OS} \beta_4 \quad (4)$$

$$M = \frac{F_{OL}}{F_{OS}} = \frac{\beta_2 \beta_3}{\frac{1}{\beta_2 \beta_3}} = \beta_2^2 \beta_3^2 \quad (5)$$

其中变倍组在短焦位置的焦距为 F_{OS} ，长焦位置为 F_{OL} 。对于线性双组联动连续变焦系统，变倍组与补偿组的放大率大致有如下关系式：

$$\beta_2 \approx \beta_3 \quad (6)$$

假设 $\beta_2 = \beta_3$ ，可以把上述关系式简化为：

$$M = \beta_2^4 \quad (7)$$

由此可以根据系统总变倍比 M 的要求求得各组分别的放大率。在求解出实际 β_2 值之后，根据公式求得实际 M 值，对比所得 M 值与目标值，再进行进

一步循环计算, 直到最后 M 值达到设计指标要求。

在完成光学系统的变倍比及各组放大率的计算后, 还需进一步计算和分析各运动组件行程与焦距之间的关系。在此线性变焦系统中, 假设前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的焦距分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 , 位移分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 。系统总焦距 f 如下关系式所示:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} - \frac{d_{12}}{f_1 f_2} - \frac{d_{23}}{f_2 f_3} - \frac{d_{34}}{f_3 f_4} \quad (8)$$

式中: d_{ij} 是组元 i 和组元 j 之间的光学距离。其中变倍组的移动 x_2 会改变 d_{12} 和 d_{23} , 进而影响焦距; 补偿组的移动 x_3 用于补偿变倍组移动带来的像面位置变化, 可以得到下列关系式:

$$\begin{cases} d_{12} = d_{12,0} + x_2 \\ d_{23} = d_{23,0} - x_2 + x_3 \\ d_{34} = d_{34,0} - x_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $d_{ij,0}$ 是组元 i 和组元 j 在初始位置时的距离。由式(8)和式(9)可得到系统总焦距 f 的计算公式如下:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} - \frac{d_{12,0} + x_2}{f_1 f_2} - \frac{d_{23,0} - x_2 + x_3}{f_2 f_3} - \frac{d_{34,0} - x_3}{f_3 f_4} \quad (10)$$

1.2 无热化设计原理

红外光学系统易受到环境温度变化的影响, 光学材料热胀冷缩导致光学系统参数发生改变, 进而引起最佳像面的偏移, 从而导致成像质量下降。为减小温度变化对光学系统成像质量和稳定性的影响, 因此红外光学系统必须进行无热化设计。无热化设计主要有三种技术: 机械被动式、电子主动式和光学被动式^[8]。由于光学被动式系统无需采用多余的机械部件, 其结构紧凑。因此, 本文选择采用光学被动式设计进行无热化设计。

无热化设计需满足系统总光焦度方程, 系统消色差方程和系统消热差方程, 即:

$$\varphi = \sum_{i=1}^k \varphi_i h_i \quad (11)$$

$$\Delta f_b^{(\lambda)} = \left[\frac{1}{h_i \varphi} \right]^2 \sum_{i=1}^n h_i^2 \omega \varphi_i = 0 \quad (12)$$

$$\frac{df_b^{(\lambda)}}{dt} = \left[\frac{1}{h_i \varphi} \right]^2 \sum_{i=1}^n h_i^2 \chi_i \varphi_i = \alpha_b L \quad (13)$$

式中: φ_i 为各透镜组的光焦度; φ 为系统的总光焦度; h_i 为第一近轴光线在各透镜上的高度; $\Delta f_b^{(\lambda)}$ 为光学系统的轴向色差; ω 为各光学元件得到色散因子; α_b 为机械结构的线性热膨胀系数; L 为机械结构件的长度; χ_i 表示光热膨胀系数^[9]。本设计采用单晶

硅 (Si) 作为透镜材料, 利用其低热膨胀系数特性进行热补偿, 在不同环境温度中保持理想像面位置的稳定, 进而保持稳定的光学性能; 采用导热性优异的铝 (Al) 作为机械结构构件的材料。

二元衍射面具有优异的热差以及色差性能, 其阿贝数 V_d 、归一化热差系数 T_d 和色散公式分别为:

$$V_d = \frac{\lambda_M}{\lambda_S - \lambda_L} \quad (14)$$

$$T_d = \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dt} - 2\alpha_G \quad (15)$$

$$P_{\lambda_1 \lambda_2} = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_F - \lambda_C) \quad (16)$$

式中: λ_M 为系统中心波长; λ_S 为短波端波长; λ_L 为长波端波长; n_0 为衍射面周围介质折射率; α_G 为热膨胀系数; $P_{\lambda_1 \lambda_2}$ 为二元衍射面对于 λ_1 波长和 λ_2 波长光的色散; λ_F 为波长为 486.1 nm 的光; λ_C 为波长为 656.3 nm 的光。由公式(14)~(16)可知, 衍射元件的色散较大, 而且仅取决于使用波长。由于长波红外系统使用环境为大气环境, n_0 取常数 1, 所以衍射元件的热特性仅取决于基底材料的热膨胀系数。正光焦度的二元衍射面具有负的色散, 可以校正系统的二次光谱像差。采用二元衍射面可以在不增加透镜数量的前提下实现无热化设计^[10]。

2 材料选取

目前对于长波红外光学系统, 可选择的材料十分有限, 主要为单晶锗 (Ge)、硒化锌 (ZnSe)、硫化锌 (ZnS) 和硫系玻璃等, 但此类玻璃的价格普遍昂贵^[9]。为了降低长波红外系统的成本, 使其应用场景更加多元化, 因此本设计采用单晶硅 (Si) 作为长波红外变焦光学系统的材料。在原材料价格上, 单晶锗 (Ge) 每吨的价格约为单晶硅 (Si) 的 6 倍, 硫系玻璃每吨的价格是单晶锗 (Ge) 的 1/3^[8], 硫化锌 (ZnS) 每吨的价格约为单晶硅 (Si) 的 5 倍, 硒化锌 (ZnSe) 每吨的价格约为单晶硅 (Si) 的 7 倍。即使硫系玻璃的价格对比于单晶硅 (Si) 的价格大约仅有两倍之差, 但是全采用硫系玻璃的长波红外系统通常适用于 20 mm 以下的长波红外短焦镜头, 焦距在 20 mm 以上的长波红外镜头全采用硫系玻璃像质难以达标, 因此硫系玻璃必须配合单晶锗 (Ge) 等玻璃进行使用。综上所述, 单晶硅 (Si) 作为长波红外变焦光学系统的材料可以大幅降低成本。

相比于上述的其他材料, 单晶硅 (Si) 的热膨胀系数小。单晶硅 (Si) 的热膨胀系数为 $2.5 \times 10^{-6}/K$, 单晶锗 (Ge) 的热膨胀系数为 $6.0 \times 10^{-6}/K$, 硫系玻

璃的热膨胀系数为 $(12 \sim 17) \times 10^{-6}/\text{K}$ ，硒化锌(ZnSe)的热膨胀系数为 $7.1 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，硫化锌(ZnS)的热膨胀系数为 $6.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。综上所述，单晶硅(Si)由温度变化所产生的形变小，高低温离焦小，成像质量更加稳定。

单晶硅(Si)采用超精密单点金刚石车床加工，口径可达到350 mm，表面粗糙度Ra小于3 nm，面型精度PV值小于0.1 μm，可加工各种高精度的自由曲面、衍射面、圆锥面。采用超精密单点金刚石车床加工工艺加工完的零件不需要抛光处理，能在保证良品率的前提下批量化生产，有效缩短制作周期以降低成本。单晶硅(Si)非球面利用高能离子束进行精细加工，可以实现高精度的非球面形状。在加工误差精度上，高精度的非球面加工可以实现亚微米级的表面形状误差，RMS误差在0.1 μm以下。经过精细抛光后，表面粗糙度可以达到纳米级，Ra小于10 nm。通过精密控制加工参数和使用高精度设备，可以将轮廓误差控制在±1 μm以内。

表1 F/#与MRTD的关系
Table 1 Relationship between F/# and MRTD

F/#	Airy disk diameter/mm	Cut off frequency/(cycles/mm)	Nyquist frequency/(lp/mm)	Diffraction MTF _{Nyquist} /(lp/mm)	MRTD ($\times 10^{-9}$)
0.5	0.012	195	20	0.90	3.87
1.0	0.025	98	20	0.80	8.73
1.4	0.035	70	20	0.71	13.6
2	0.050	49	20	0.59	23.5

由表1可知，MRTD与F/#成正比，较小的F/#可以获得更低的MRTD值，MRTD值越低表示空间分辨率越好，由于大孔径受到成本以及探测器尺寸的限制，因此系统孔径的选择需结合实际使用需求。当系统的F/#为1.4时，其MRTD值已经足够低，能够提供足够的分辨率，因此系统的最佳F/#为1.4。

系统变焦范围根据Johnson标准选择为100~200 mm^[14]。识别范围由公式(18)~(21)确定，目标临界尺寸识别范围的具体数值如表2所示。

$$Y = \sqrt{(H \times W)} \quad (18)$$

$$\text{IFOV} = \frac{D}{f} \quad (19)$$

表2 长波红外光学系统目标临界尺寸检测识别范围

Table 2 Detection and recognition range of target critical size for long wave infrared optical system

Target's critical dimension/m	Focal length/mm	Target identification (12 pixels)/m	Target recognition (6 pixels)/m	Target detection (1.5 pixel)/m
2.3	100	750	1500	6000
2.3	200	1500	3000	12000

3 系统设计参数

光学系统的艾里斑直径与探测器的像素大小应满足关系式 $2.44\lambda F\# = \sqrt{2d}$ ，其中 λ 为光学系统的工作波长， d 为探测器的像素大小^[11]。当像素尺寸为25 μm，工作中心波长为10 μm时，可计算出系统的F/#为1.4。

最小可分辨温差(MRTD)是客观评价红外成像系统性能的重要指标之一，其具体表达式如式(17)：

$$\text{MRTD}(\xi_t) = A \frac{F\#}{D^* \text{MTF}(\xi_t)} \quad (17)$$

式中： D^* 为归一化探测率，其平均值为 $1.44 \times 10^{-8} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。 A 是取决于探测器的正比常数；MTF(ξ)为目标频率 ξ 处的调制传递函数^[12-13]。 $F\#$ 与MRTD之间对的关系如表1所示。

MRTD结合空间分辨率和热敏性来评价热成像系统辨别场景细节。表1总结了F/#与MRTD之间的关系。

$$\text{PPM} = \frac{2 \times S}{Y} \quad (20)$$

$$L = \frac{1000}{\text{PPM} \times \text{IFOV}} \quad (21)$$

式中： Y 为目标临界尺寸； H 为目标高度； W 为目标宽度；IFOV为探测器像元的对向角； D 为探测器的单个像元尺寸； f 为光学系统有效焦距；PPM为目标平面中每平方米所需要的像素数； S 为Johnson标准要求的周期数； L 为识别范围。

本设计采用384×288阵列的非制冷红外探测器，像元尺寸为25 μm，对角线尺寸为12 mm，奈奎斯特频率为20 lp/mm，表3为长波长焦红外变焦镜头设计的具体指标。

表3 设计参数

Parameter	Index
Wavelength band/ μm	8~12
Array size/pixels	384×288
Pixel size/ μm	25
Detector size/mm	9.6×7.2
Focal length/mm	100~200
F/#	1.4
Total length/mm	160
MTF@20lp/mm	>0.3

4 设计结果

4.1 设计结果

对于机械补偿变焦光学系统，为实现连续变焦，系统须满足焦距在一定范围内连续变化、变焦过程中像面保持稳定、相对孔径保持不变和不同焦距下的像质均满足设计指标。变焦红外无热化系统的设计分为三步：①通过对比分析设计要求，寻找现存的光学系统参数，以确定合适的初始结构；②选择光学被动式进行无热化设计，进行光焦度分配和筒长控制，尽可能减小系统尺寸，最终使用光学设计软件优化红外变焦光学系统；③对光学系统进行热分析，通过离焦量和调制传递函数等指标分析，评估宽温度范围内的无热化效果，并与设计指标进行对比，如未达到指标要求，则返回步骤②重新优化设计，重复进行步骤②和③^[6]。

优化后的连续变焦光学系统光焦度分配为“ $- + - +$ ”，该分配方式有利于各组元自身像差的相互补偿，从而在整体上减少系统的像差，提升成像质量。长焦距、大相对孔径的远距离检测红外变焦镜头，其球差、色差和二次光谱像差严重且难以校正，因此本设计采用了一个二元衍射面、一个圆锥面以及一个偶次非球面来平衡这些像差。该系统工作波段为 $8\sim12\ \mu\text{m}$ ，由 4 片镜片组成，且均为单晶硅（Si）玻璃，系统总长为 160 mm，变焦范围为 100~200 mm，F/#恒定为 1.4。优化后的光学系统非球面、二元面和圆锥面参数如表 4 所示，其中 S₂、S₃ 和 S₄ 分别为光学系统沿光轴方向上的的第二表面，第三表面和第四表面。各焦距的光学系统结构如图 2 所示。两组相邻透镜组在各焦距位置的间距如表 5 所示，两组相邻透镜组在各焦距位置的间距相加均为 115.985 mm，因此可以保持各焦距下系统总长一致。图 3 为系统像面最大位移量曲线图，系统最大像面位移量为 0.041 mm，小于轴向球差（4 倍焦深）允许的公差 0.077 mm，因此不影响成像质量。

表4 优化后的面型参数

Table 4 The optimized surface profile parameters

	Binary surface 2	Even aspheres	Standard surface
S ₂	✓	-	-
S ₃	-	✓	-
S ₄	-	-	✓
Conic	0.184	-0.100	2.550
Diffraction order	1	-	-
Coefficient on r^4	1.023E-9	-1.428E-9	-
Coefficient on r^6	-4.742E-12	-1.914E-12	-
Coefficient on r^8	5.632E-16	2.704E-16	-
Coefficient on r^{10}	-3.671E-20	1.970E-20	-
Coefficient on r^{12}	-5.218E-25	9.958E-26	-
Normalization Radius	70	-	-
Maximum term #	3	-	-
Coefficient on ρ^2	-17.766	-	-
Coefficient on ρ^4	-15.090	-	-
Coefficient on ρ^6	7.186	-	-

表5 两组相邻透镜组的间距

Table 5 The distance between two adjacent lens groups

Surface	Short focal length (100 mm)	Middle focal length (150 mm)	Long focal length (200 mm)	mm
S ₂	46.172	24.469	2.000	
S ₄	53.480	50.632	49.148	
S ₆	16.333	40.884	64.837	

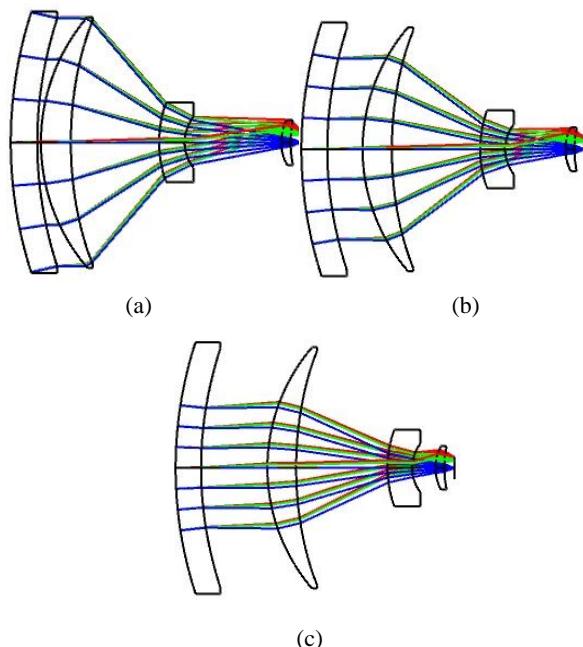


图2 各焦距的二维结构图 (a) $f=100\text{ mm}$;
(b) $f=150\text{ mm}$;(c) $f=200\text{ mm}$

Fig.2 Two-dimensional structures with different focal lengths.
(a) $f=100\text{ mm}$; (b) $f=150\text{ mm}$; (c) $f=200\text{ mm}$

4.2 像质分析

调制传递函数（MTF）是评价光学系统图像质量的重要指标之一，该系统在短焦距、中焦距和长焦距的 MTF 曲线如图 4 所示，其中全视场在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 时的调制传递函数（MTF）值均大于 0.3；全视场在 10 lp/mm 时的调制传递函数（MTF）值均大于 0.6，且接近衍射极限。该系统满足全焦距范围内的成像质量要求。

点列图是评价光学系统成像质量的另一个重要因素，其中均方根（RMS）半径可以反映能量的集中程度。本光学系统在短焦距、中焦距和长焦距处的点列图如图 5 所示，在短焦、中焦和长焦处的最大均方根（RMS）半径分别为 $20.081 \mu\text{m}$ 、 $15.374 \mu\text{m}$ 、 $18.113 \mu\text{m}$ ，各焦距、各视场的 RMS 半径均小于探测

器单个像素的大小，满足成像质量要求。

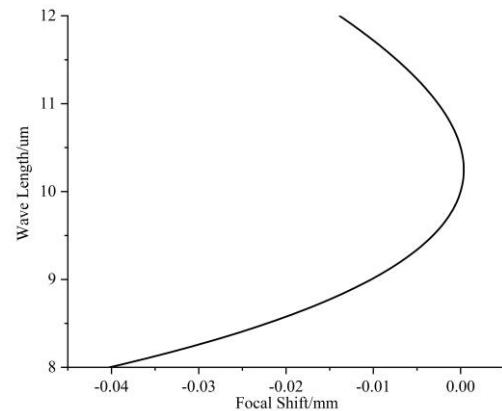
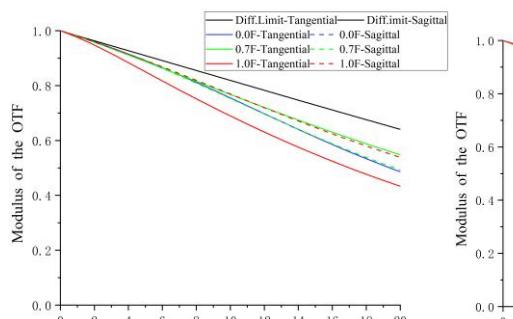
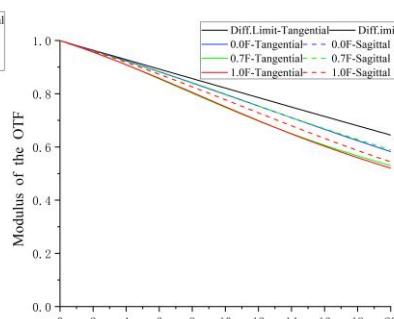


图 3 像面位移曲线

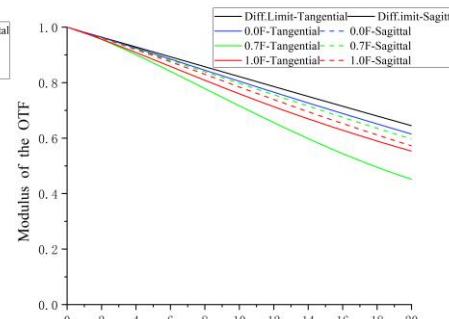
Fig.3 Image displacement curve



(a)



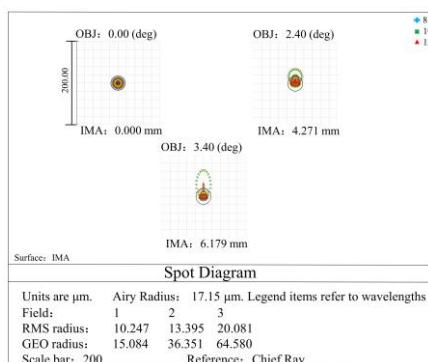
(b)



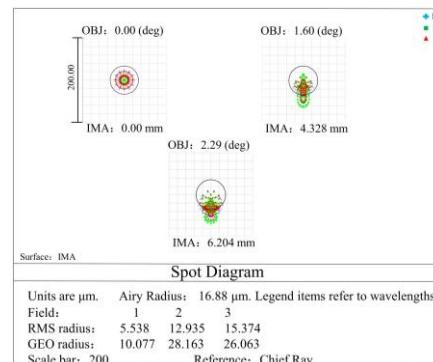
(c)

图 4 20°C 时各焦距的 MTF 曲线。(a) $f=100 \text{ mm}$; (b) $f=150 \text{ mm}$; (c) $f=200 \text{ mm}$

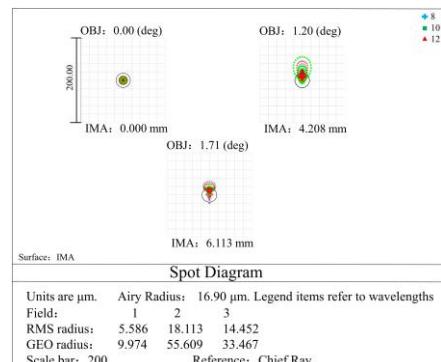
Fig.4 MTF curves of different focal lengths at 20°C . (a) $f=100 \text{ mm}$; (b) $f=150 \text{ mm}$; (c) $f=200 \text{ mm}$



(a)



(b)



(c)

图 5 20°C 时各焦距的点列图。(a) $f=100 \text{ mm}$; (b) $f=150 \text{ mm}$; (c) $f=200 \text{ mm}$

Fig.5 Spot diagrams of different focal lengths at 20°C . (a) $f=100 \text{ mm}$; (b) $f=150 \text{ mm}$; (c) $f=200 \text{ mm}$

图 6 为各焦距的场曲和畸变图。从图中可以看出，光学系统在短焦距、中焦距和长焦距下畸变均小于 5%，满足成像质量要求。

当主光线入射角较大时，光线在进入光学系统时可能会受到光学元件边缘的截断，导致边缘区域

的照度下降，从而降低相对照度。本光学系统在短焦处、中焦处和长焦处的主光线入射角分别为 7.787° 、 16.208° 和 19.901° ，其相对照度如图 7 所示。从图 7 可知，光学系统相对照度均在 87% 以上，图像亮度均匀。

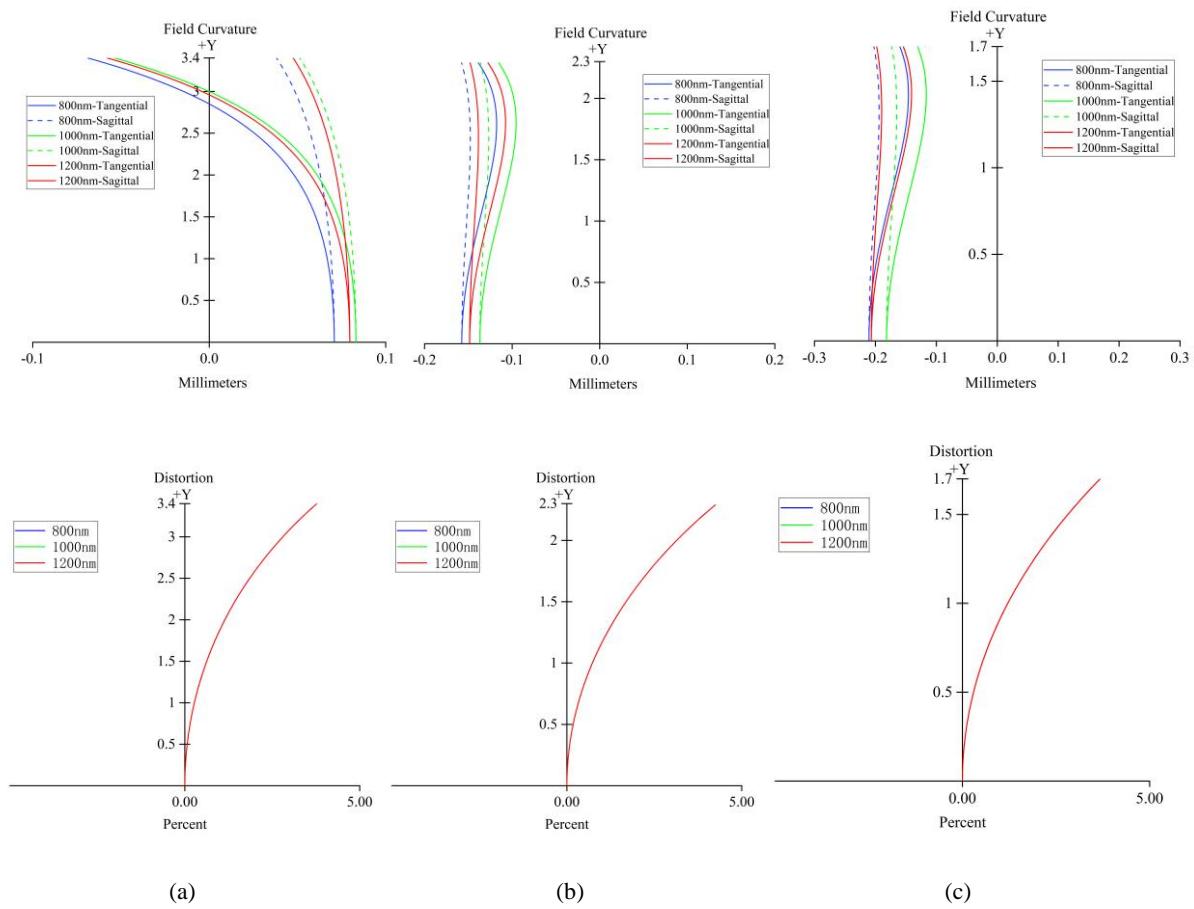


图 6 各焦距的畸变图和场曲图。(a) $f=100$ mm; (b) $f=150$ mm; (c) $f=200$ mm

Fig.6 Distortion and field curvatures of different focal lengths. (a) $f=100$ mm; (b) $f=150$ mm; (c) $f=200$ mm

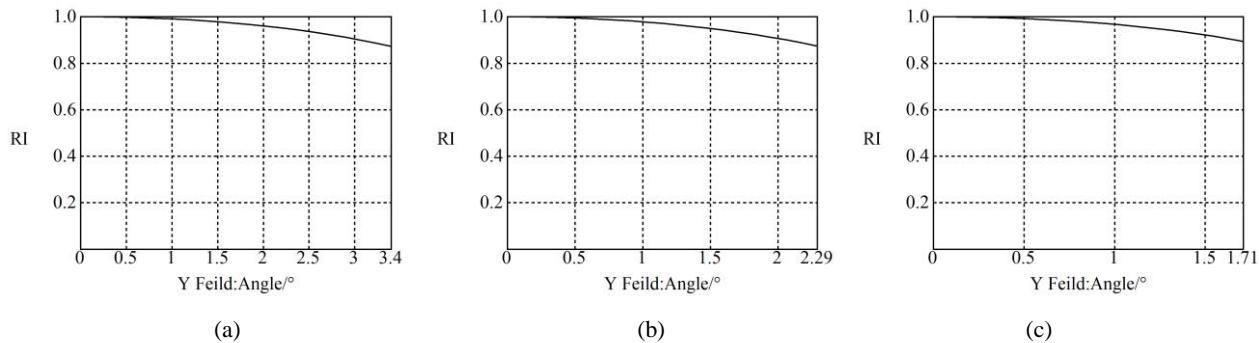


图 7 各焦距的相对照度。(a) $f=100$ mm; (b) $f=150$ mm; (c) $f=200$ mm

Fig.7 Relative illumination of different focal lengths. (a) $f=100$ mm; (b) $f=150$ mm; (c) $f=200$ mm

根据瑞利判据, 各温度下系统的离焦量 δ 必须满足 $\delta \leq \pm 2\lambda(F\#)^2$ ^[8], 将 $\lambda = 10 \mu\text{m}$, $F\# = 1.4$ 代入上式, 得到系统的离焦量为 $78.4 \mu\text{m}$, -40°C 、 20°C 、 60°C 下系统的离焦量如表 6 所示, -40°C 和 60°C 下的调制传递函数(MTF)曲线和点列图如图 8 和图 9

所示。

表 6 各温度下系统的离焦量

Table 6 The defocusing amount of the system at each temperatures

Temperature/°C	-40	20	60
Defocus/ μm	53	0	57

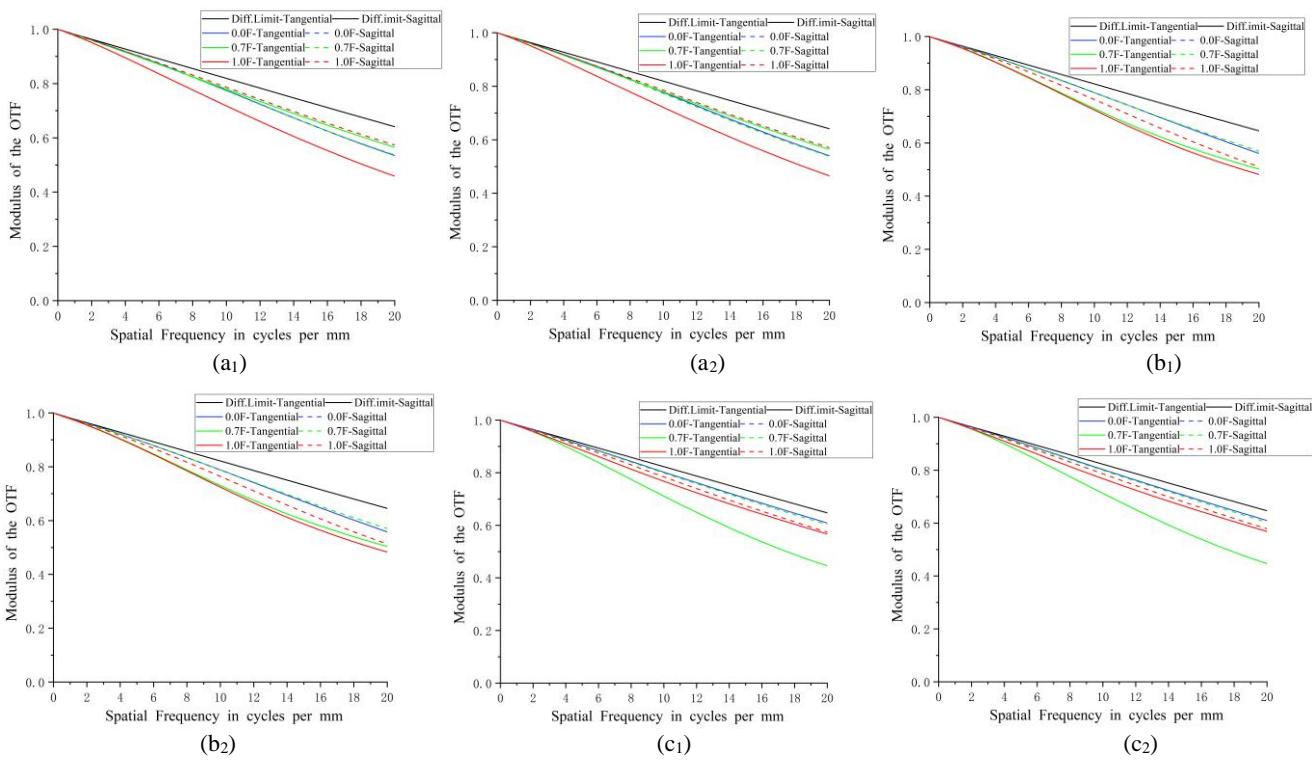


图8 -40°C 和 60°C 时各焦距的 MTF。(a₁) $f=100\text{ mm}$, -40°C ; (a₂) $f=100\text{ mm}$, 60°C ; (b₁) $f=150\text{ mm}$, -40°C ;
(b₂) $f=150\text{ mm}$, 60°C ; (c₁) $f=200\text{ mm}$, -40°C ; (c₂) $f=200\text{ mm}$, 60°C

Fig.8 MTF of different focal lengths at -40°C and 60°C . (a₁) $f=100\text{ mm}$, -40°C ; (a₂) $f=100\text{ mm}$, 60°C ;
(b₁) $f=150\text{ mm}$, -40°C ; (b₂) $f=150\text{ mm}$, 60°C ; (c₁) $f=200\text{ mm}$, -40°C ; (c₂) $f=200\text{ mm}$, 60°C



图9 -40°C 和 60°C 时各焦距的点列图。(a₁) $f=100\text{ mm}$, -40°C ; (a₂) $f=100\text{ mm}$, 60°C ; (b₁) $f=150\text{ mm}$, -40°C ;
(b₂) $f=150\text{ mm}$, 60°C ; (c₁) $f=200\text{ mm}$, -40°C ; (c₂) $f=200\text{ mm}$, 60°C

Fig.9 Spot diagrams of different focal lengths at -40°C and 60°C . (a₁) $f=100\text{ mm}$, -40°C ; (a₂) $f=100\text{ mm}$, 60°C ;
(b₁) $f=150\text{ mm}$, -40°C ; (b₂) $f=150\text{ mm}$, 60°C ; (c₁) $f=200\text{ mm}$, -40°C ; (c₂) $f=200\text{ mm}$, 60°C

从表 6 可以看出系统在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内离焦量均在规定范围内, 该系统无热化效果较好。从图 8 和图 9 可以看出, 系统在各温度下调制传递函数曲线变化小, 接近衍射极限, RMS 半径均小于探测器单个像素的大小, 满足设计要求。

4.3 公差分析

光学系统的公差分析可以避免在实际生产中的误差以及光学元件在加工和组装过程中的误差对成像质量的影响, 同时可以发现系统潜在的制造问题, 进而避免材料浪费和重新加工, 从而提高生产效率并降低生产成本。

本光学系统的公差分析方法为灵敏度法, 公差设置如表 7, 设置 MTF 值为评价标准, 奈奎斯特频率为 20lp/mm, 并进行 300 次蒙特卡洛分析, 分析结果如表 8 所示。由表 8 可以看出, 各焦距的分析结果中, 调制传递函数 (MTF) 在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 处达到 0.3 的概率在 90% 以上, 因此本系统在规定的公差范围内达到预期成像效果, 且易于加工装调。公差敏感项如表 9 所示, 其中 TIRR 为透镜表面不规则度的公差, TFRN 为曲率半径的公差。经过上述蒙特卡洛分析后, 结果表明, 该光学系统在表 7 所示的公差设置影响下, 依旧能保持良好的像质, 调制传递函数 (MTF) 在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 处大于 0.3, 该光学系统的光学性能依旧良好, 达到设计要求。

表 7 公差分析参数

Table 7 Tolerance analysis parameters

Parameter	Index
Refractive index	0.0005
Number of apertures	1
Thickness/mm)	0.0125
Irregularity	0.25
Lens wedge angle/(')	0.5
Abbe error/(\%)	0.05
Lens tilt/(')	0.5
Lens eccentricity/mm	0.005
Mirror set position/mm	0.0125
Mirror alignment/(')	0.005

表 8 公差分析结果

Table 8 Tolerance analysis result

Yield rate/%	MTF of short focal length	MTF of middle focal length	MTF of long focal length
90	>0.357	>0.441	>0.368
80	>0.401	>0.494	>0.437
50	>0.462	>0.540	>0.532
20	>0.497	>0.569	>0.591
10	>0.513	>0.584	>0.608

4.4 变焦凸轮曲线

本系统根据变倍组和补偿组的运动情况, 采用插值法^[12]在系统中选择 10 个焦距位置, 并进行优化, 直到每个焦距都具有完善的图像质量, 图 10 为变倍组与补偿组的运动轨迹曲线, 其中横坐标为系统焦距, 纵坐标为变倍组、补偿组与前固定组之间的距离。由图 10 可知, 变倍组凸轮运动和补偿组凸轮运动均接近线性, 有利于凸轮结构的加工。

表 9 公差敏感项

Table 9 Tolerance sensitive term

Type	Value	Criteria	Change
TIRR	1	-0.25000000	0.33034831
TIRR	4	0.25000000	0.36808095
TIRR	5	-0.25000000	0.42888454
TFRN	4	1.00000000	0.43233746
TIRR	6	0.25000000	0.43943020
TFRN	1	1.00000000	0.44124179
TFRN	2	-1.00000000	0.44374342
TFRN	3	1.00000000	0.45611497
TFRN	6	-1.00000000	0.45938626
TFRN	5	1.00000000	0.46150857

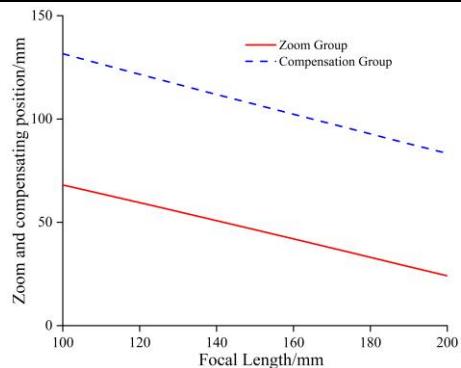


图 10 变倍组与补偿组凸轮曲线

Fig.10 CAM curves of variable multiplier group and compensation group

5 结论

本设计通过引入线性双组联动连续变焦系统结构, 用补偿组线性运动代替了复杂的非线性运动, 大幅简化了系统结构, 压缩系统总长, 实现紧凑式设计。本系统以单晶硅 (Si) 作为镜片材料, 引入一个二元衍射面、一个圆锥面和一个偶次非球面, 采用 384×288 像素阵列, 单个像素大小为 $25 \mu\text{m}$ 的非制冷探测器, 设计了一个紧凑型长波红外变焦系统。系统总长为 160 mm, 变焦范围为 100~200 mm, F# 为 1.4。变焦范围各焦距的调制传递函数曲线均接近衍射极限。系统离焦量在可接受范围内, 各温度的调制传递函数曲线均接近衍射极限, 系统

成像质量优异。凸轮曲线无拐点，利于凸轮结构加工。该系统具有结构紧凑、长焦距、大相对孔径和轻量化等优点，其应用范围可以从军事领域扩展到民用安防领域。

参考文献：

- [1] Park K, Choi J, Kang J. Design and performance verification of a LWIR zoom camera for drones[J]. *Curr. Opt. Photon.*, 2023, **7**: 354-361.
- [2] Doruk Kucukcelebi. Optical design of athermalised dual field of view zoom lens in long wave infrared (8μm-12μm) spectral band using benefits of paraxial optics[C]//SPIE Optical Engineering + Applications, 2016: 99470B.
- [3] 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): 165-171.
WANG J, WU Y H, DAI S X, et al. Application of chalcogenide glass in the design of long wave infrared non-thermal continuous zoom wide-angle lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(3): 165-171.
- [4] 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 H Q, WANG P. Design of miniaturized large array uncooled infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared*, 2020, **41**(2): 1-6.
- [5] 吴海清, 谈大伟. 防辐射长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外, 2023, **44**(2): 1-7.
WU Haiqing, TAN Dawei. Design of radiation-proof long-wave infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared*, 2023, **44**(2): 1-7.
- [6] 唐玉凤, 毛珊, 宋逸辰, 等. 非制冷长波红外连续变焦光学系统的一种无热化设计[J]. 光学学报, 2024, **44**(7): 0722002.
TANG Y F, MAO S, SONG Y C, et al. Athermalization design of uncooled long waveband infrared continuous zoom optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, **44**(7): 0722002.
- [7] 姚多舜, 王楠茜, 康文莉. 线性双组联动型连续变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2015, **36**(1): 1-8. DOI: 10.5768/JAO201536.0101001
YAO D S, WANG N Q, KANG W L. Method of designing linearization double-linkage continuous zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(1): 1-8. DOI: 10.5768 / JAO201536.0101001
- [8] 张继艳, 林海峰, 黄章超. 基于硫系玻璃的紧凑式大相对孔径长波红外光学系统无热化设计[J]. 应用光学, 2021, **42**(5): 790-795.
ZHANG J Y, LIN H F, HUANG Z C. Non-thermal design of compact long wave infrared optical system with large relative aperture based on chalcogenide glass [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, **42**(5): 790-795.
- [9] 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): 392-397.
ZHOU Z P, CHEN H, JI H, et al. Design of hybrid lightweight long-wave infrared thermal suppression optical system[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2022, **59**(10): 392-397.
- [10] 洪新华, 杨建峰, 陈立武, 等. 衍/折射光学元件消二级光谱的设计[J]. 强激光与粒子束, 2004(4): 421-424.
HONG X H, YANG J F, CHEN L W, et al. Design of secondary elimination spectrum for diffractive/refraction optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004(4): 421-424.
- [11] Arnold Daniels. *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs*, Third Edition[M]. Bellingham: SPIE, 2018.
- [12] Bhan R K, Saxena R S, Jalwani C R, et al. Uncooled infrared microbolometer arrays and their characterization techniques[J]. *Defence Science Journal*, 2009, **59**(6): 580-589.
- [13] Ok C M, Park S C. Design and analysis of a 10× optical zoom system for an LWIR camera[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2014, **18**(5): 574-581.
- [14] Leonardo. How to assess thermal camera range capability for site design purposes[R]. MR: DRS, 2014.