

· 光学设计 ·

非制冷长波红外连续变焦光学系统设计

徐玉惠, 黄 凯, 刘子毓

(国麒光电科技(天津)有限公司, 天津)

摘要: 基于像元尺寸为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 的 640×512 元非制冷探测器, 采用连续变焦光学系统设计理论, 设计了一种高性能长波红外连续变焦系统, 焦距为 $30 \sim 180\ \text{mm}$, 长焦端 F 数为 1.2。系统采用锗和硒化锌两种红外材料, 引入非球面校正系统轴外像差, 从调制传递函数、点列图、畸变等方面对系统进行了像质评价。凸轮曲线经优化设计后, 减小了变倍组在短焦段的压力升角, 变焦过程平稳。实验结果表明, 该系统具有成像质量好、凸轮曲线平滑、结构紧凑等优点, 适用于红外监控领域。

关键词: 连续变焦; 光学设计; 凸轮曲线

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2025)-02-0024-05

Design of Uncooled Long Wave Infrared Continuous Zoom Optical System

XU Yuhui, HUANG Kai, LIU Ziyu

(Guoqi Optoelectronic Technology (Tianjin) Co. Ltd., Tianjin, China)

Abstract: Based on a 640×512 uncooled detector with a pixel size of $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$, a high performance long wave infrared continuous zoom system is designed by the continuous zoom optical system design theory, with a focal length of $30 \sim 180\ \text{mm}$ and a telephoto end F number of 1.2. Infrared materials such as germanium and zinc selenide are used in the system, and the off-axis aberration of the system is corrected by aspheric surface. The image quality of the system is evaluated from the aspects of modulation transfer function (MTF), spot diagram, distortion, etc. After the cam curve is optimized, the pressure rise angle of the zoom group in the short focal length is reduced, and the zooming process is smooth. Experimental results show that the system has the advantages of good imaging quality, smooth cam curve and compact structure, which is suitable for infrared monitoring field.

Key words: continuous zoom; optical design; cam curve

红外连续变焦系统既可以大视场搜索目标, 又可以小视场仔细观察目标, 在变焦过程中不会丢失目标信息, 广泛应用于民用领域。非制冷红外探测器体积小、质量轻、功耗低, 且具有隐蔽性好、抗干扰性能强、全天候作业等特点, 被广泛应用于建筑、电力、工业、医疗等民用领域。随着非制冷探测器技术的不断发展和生产工艺的改进, 红外探测器像元尺寸越来越小, 已由 $25\ \mu\text{m}$ 、 $17\ \mu\text{m}$ 进入以 $12\ \mu\text{m}$ 为主的年代, 探测器面阵的主流配置也随之增至 640×512 元, 与之相匹配的红外连续变焦系统的需求日益增强。

文中采用负组补偿式结构设计了一种焦距为

$30 \sim 180\ \text{mm}$ 的连续变焦光学系统, 系统结构紧凑、像质优良、凸轮曲线平滑, 满足 640×512 元 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 长波非制冷探测器的应用需求, 具有很好的实用性。分别从光学系统设计理论、光学系统设计、光学系统评价与分析几个方面展开论述。

1 光学系统设计理论

在像面位置保持不变的情况下, 连续变焦光学系统通过移动两个或两个以上透镜组实现变焦, 在焦距范围内能连续清晰成像^[1-2]。透镜组一般由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成^[3-4], 后固定

组中通常设有调焦透镜,以补偿温度变化引起的离焦量。连续变焦光学系统遵循物像交换原则,一般为机械补偿式结构,多采用凸轮结构实现变焦。系统进行变焦时,凸轮驱动变倍组和补偿组沿光轴相对运动,以改变变倍组和补偿组之间的间隔,使像面保持稳定。光学系统原理图如图1所示。

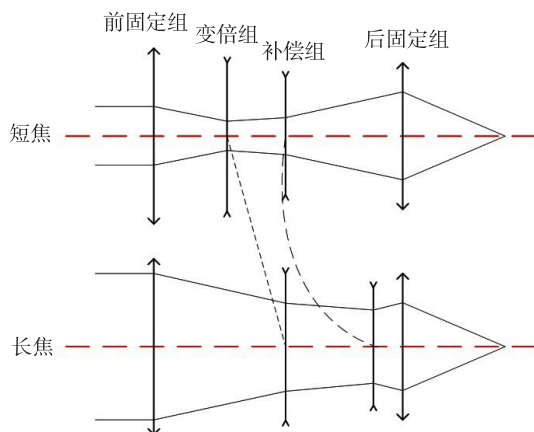


图1 光学系统原理图

当变倍组移动 dq_2 时,变倍组的像面移动为 $(1-\beta_2^2)\beta_3^2 dq_2$ 。补偿组随之改变 dq_3 ,引起的像面移动为 $(1-\beta_3^2)dq_3$ 。为了保持像面位置不变,变倍组和补偿组的共轭距改变量的总和为零,即变焦系统需满足^[5]

$$(1-\beta_2^2)\beta_3^2 dq_2 + (1-\beta_3^2)dq_3 = 0 \quad (1)$$

式中: β_2 、 β_3 是变倍组、补偿组在变焦过程中的倍率; dq_2 、 dq_3 是变倍组、补偿组的微小增量,与 β_2 、 β_3 的关系如下

$$\begin{cases} dq_2 = \frac{f_2'}{\beta_2^2} d\beta_2 \\ dq_3 = f_3' d\beta_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, f_2' 、 f_3' 表示变倍组、补偿组的焦距。

将式(2)带入式(1)中得到变焦系统的微分方程为

$$\frac{1-\beta_2^2}{\beta_2^2} f_2' d\beta_2 + \frac{1-\beta_3^2}{\beta_3^2} f_3' d\beta_3 = 0 \quad (3)$$

设 $U(\beta_2, \beta_3)$ 为原函数,则有

$$dU(\beta_2, \beta_3) = 0 \quad (4)$$

其通解为

$$U(\beta_2, \beta_3) = f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) + f_3' \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right) = C \quad (5)$$

式中, C 为待定常量。

设变倍组、补偿组初始状态都处于系统短焦位置,则

$$\beta_2 = \beta_{2s}; \beta_3 = \beta_{3s} \quad (6)$$

式中, β_{2s} 、 β_{3s} 表示变倍组、补偿组在短焦时的倍率。

将式(6)带入式(5)得

$$f_2' \left(\frac{1}{\beta_{2s}} + \beta_{2s} \right) + f_3' \left(\frac{1}{\beta_{3s}} + \beta_{3s} \right) = C \quad (7)$$

为消去待定常量 C ,用式(5)减去式(7)得

$$f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_{2s}} + \beta_2 - \beta_{2s} \right) + f_3' \left(\frac{1}{\beta_3} - \frac{1}{\beta_{3s}} + \beta_3 - \beta_{3s} \right) = 0 \quad (8)$$

连续变焦光学系统进行像差平衡时,方法基本与定焦光学系统一致,都要尽可能校正初级像差,减小高级像差,以便在全视场、全孔径范围内获得良好的像质。另外,连续变焦光学系统还要保证各个焦距位置的像质,所以连续变焦光学系统对像差校正的要求更高,设计难度更大。

2 光学系统设计实例

2.1 光学系统设计指标

采用 640×512 长波红外非制冷型探测器,像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$,综合考虑实际镜头的质量、性能、成本等方面的要求,设计一种高性能的6倍连续变焦光学系统,光学系统设计指标如表1所示。

表1 光学系统设计指标

参数	数值
工作波段	8 ~ 12 μm
探测器阵列	640×512
像元尺寸	12 μm ×12 μm
镜头焦距	30 ~ 180 mm
视场角	2.4°×2.0° ~ 14.6°×11.7°
F数	1.0 ~ 1.2
MTF	>0.3@40 lp/mm

2.2 光学系统设计

机械补偿式结构有正组补偿式和负组补偿式两种形式^[6],负组补偿式结构适合小视场系统,因此光学系统采用负组补偿形式。首先,依据设计指标选择合适的初始结构,根据式(8)确定前固定组、变

倍组、补偿组和后固定组的光焦度和间隔分配。其次,合理选择各组元的透镜形状和红外光学材料,设短焦位置为初始状态,计算变倍组和补偿组的移动范围。再次,在 Zemax 光学辅助设计软件中进行设计,将孔径光阑设置在补偿组前表面,依据非制冷探测器的像面尺寸设置视场,对短焦 30 mm、中焦 75 mm 和长焦 180 mm 位置处的多重结构,设置评价函数反复进行优化,达到设计指标后进行像质评价和凸轮曲线分析。

光学系统在短焦、中焦、长焦端的光路设计如图 2 所示。系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,采用“+--+”型机械补偿式结构,负组变倍,负组补偿,用 6 片透镜实现了 6 倍变焦,结构紧凑。前固定组为锗正透镜,用来承担主要的光焦度。变倍组为锗负透镜,用来修正系统的彗差和轴外像差。补偿组由硒化锌负透镜和锗负透镜组成,用于补偿变倍组移动时产生的像面移动。后固定组光焦度为正,由两片锗正透镜组成,并引用一个偶次非球面来进行像差平衡,提高成像质量。

光学系统总长度为 260 mm,后工作距为 25 mm, F 数为 1.0 ~ 1.2,最后一块透镜可以调焦,以便在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内对 10 m 外物体聚焦清晰。

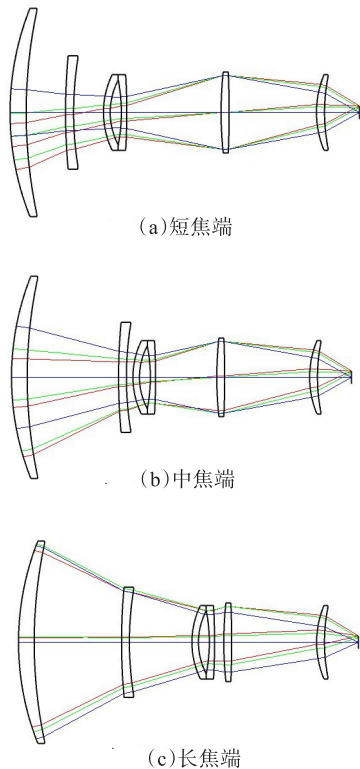


图2 光学系统光路设计示意图

3 光学系统评价与分析

分别通过调制传递函数、点列图、畸变三个指标对光学系统像质进行评价,并对系统凸轮曲线进行分析。

3.1 光学系统像质评价

3.1.1 调制传递函数

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)是一种衡量光学系统成像质量的指标,可以评估光学系统在不同空间频率下传递图像对比度的能力。光学系统在短焦、中焦和长焦端的传递函数曲线如图 3 所示。在探测器空间截止频率 40 lp/mm 处,各焦距位置上轴上视场 MTF 值均接近衍射极限,其他视场的 MTF 值也都达到 0.3 以上,满足系统要求。

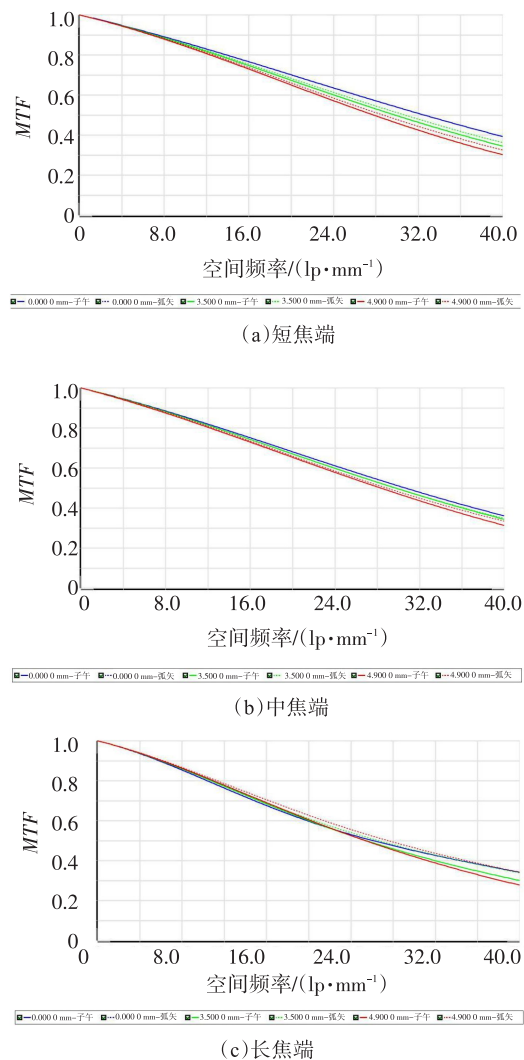


图3 光学系统 MTF 图

3.1.2 点列图

点列图也是评估光学系统成像质量的指标之一,能直观呈现像面上弥散斑的分布情况,还能反映能量的集中度。光学系统在短焦、中焦和长焦端的点列图如图4所示。结果表明,光学系统边缘视场的均方根半径最大,分别为 11.148 μm 、10.324 μm 、7.352 μm ,都小于艾里斑半径,能量集中度特性较好,满足非制冷红外探测器的使用要求。

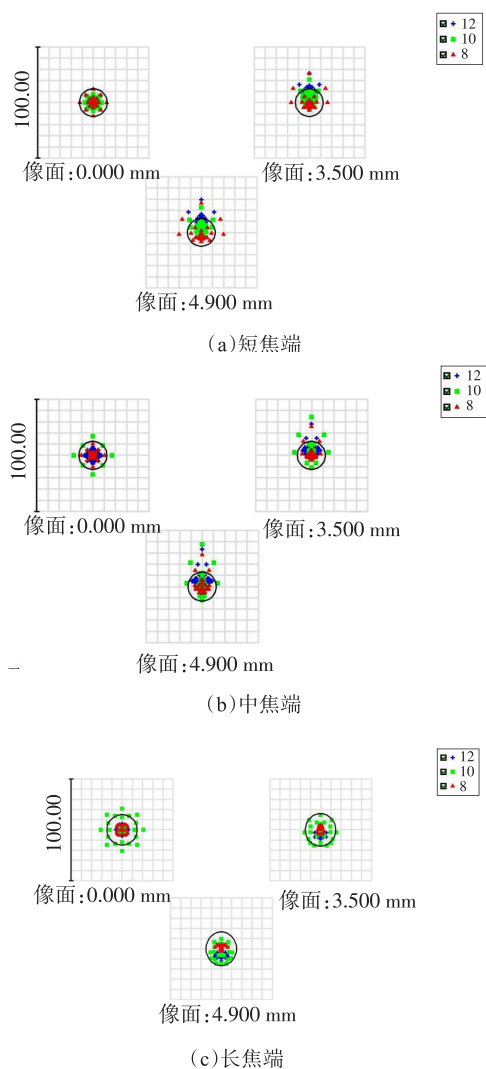


图4 光学系统点列图

3.1.3 畸变

畸变为理想像高与实际主光线高度的差。光学系统在短焦、中焦和长焦端的畸变情况如图5所示。在长焦时最大畸变为0.23%,在短焦时最大畸变为2.16%,满足设计指标要求,系统在连续变焦过

程中畸变对成像无明显影响。

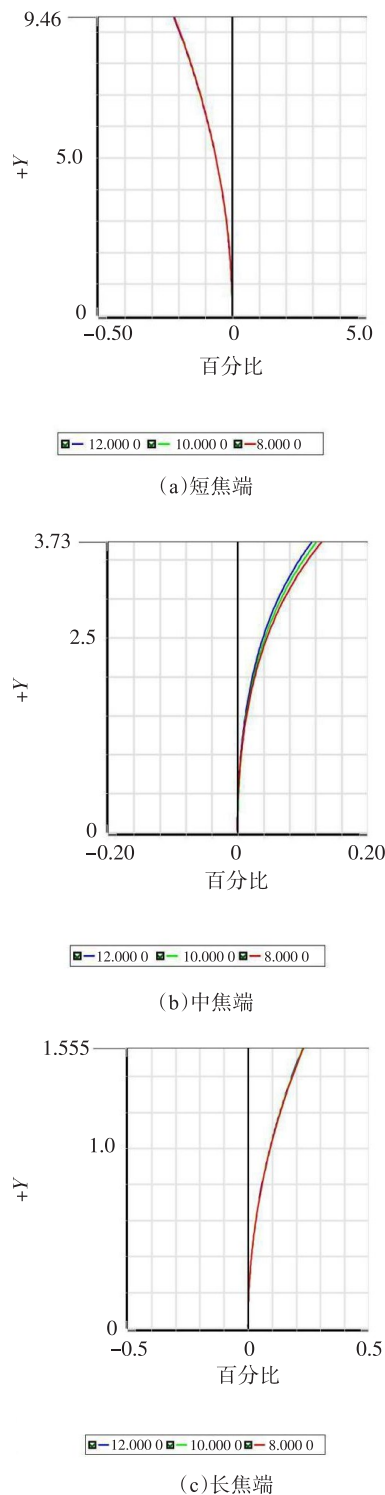


图5 光学系统畸变图

3.2 系统凸轮曲线分析

系统采用机械补偿式结构,光学系统焦距连续变化是通过电机驱动凸轮,带动变倍组和补偿组沿

光轴移动来实现的^[7],可见凸轮是实现焦距连续变化的关键部件,凸轮曲线设计的好坏直接关系到光学系统最后像面的稳定程度。凸轮曲线设计时要保证光学系统变焦的精确性、顺畅性和平稳性,为了使转动力矩均衡,压力角不宜过大,一般要小于 45° ^[8-9]。在设计时,为了降低凸轮加工难度,提高加工精度,通常采取等间隔设计,将变倍组设计成线性运动,对应的补偿组为非线性运动,这样变倍组的压力升角容易控制。

系统补偿方式为负组补偿,由短焦端移动至长焦端的过程中,补偿组会先远离变倍组,再靠近,最终一起向后固定组方向运动。当变倍组线性运动至中焦段时,补偿组靠近变倍组,两者会出现间隔值为负的情况,为此在设计凸轮曲线时,将补偿组设计成线性运动,变倍组为非线性运动。用Zemax软件优化出最佳像质时的变焦间隔数据,并拟合成曲线,凸轮曲线如图6所示,系统由短焦移动至长焦的过程中,变倍组最大移动距离为50.78 mm,补偿组最大移动距离为66.05 mm。

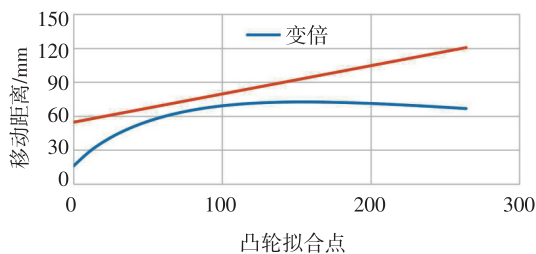


图6 凸轮曲线

由图6中的曲线可知,变倍曲线运动速率在短焦段迅速增大,曲线变陡,整个变倍区间凸轮压力的均衡性被破坏,导致凸轮在短焦段转动时扭矩增大,容易卡滞甚至卡死。因此,对凸轮曲线进行了优化,在变倍曲线上找到某个特殊点,在此复合最佳位置上,变倍曲线在该位置相切,向短焦线性运动,平滑过渡。优化后的变倍曲线仍旧保持连续性和平滑性,变焦过程平稳且顺畅,不存在斜率跳跃点。这样做有效减小了变倍组在短焦段的压力升角,使整个变焦过程的压力更加平衡,变焦更加均匀。优化后的凸轮曲线如图7所示,变倍组和补偿组的压力角均小于 40° ,满足凸轮加工要求。

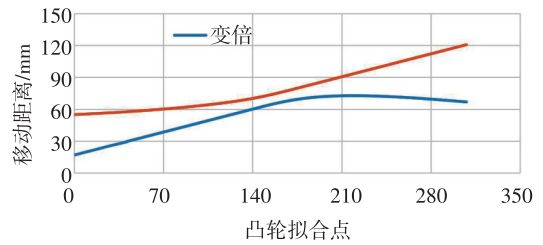


图7 优化后的凸轮曲线

由于系统变倍组和补偿组的机械结构径/长比较大,为保证变焦运动的平滑性,凸轮采用“对径双驱动”方式来驱动变倍组和补偿组的运动。变倍组和补偿组分别固定在滑架中,变倍滑架和补偿滑架在数控车床上加工,其加工精度保证了该系统在变焦过程中,光轴跳动量控制在允许精度范围内,确保了像面稳定、像质优良。

4 结论

根据连续变焦光学系统设计理论,利用6片透镜实现了6倍红外连续变焦光学系统的设计,系统焦距为30~180 mm,视场角为 $2.4^{\circ} \times 2.0^{\circ} \sim 14.6^{\circ} \times 11.7^{\circ}$ 。经验证,该系统像质优良,视场畸变小,其MTF和点列图数据均接近衍射极限。通过凸轮曲线优化设计,使得系统在整个变焦过程中,图像清晰且平稳顺畅。系统相对孔径大,结构紧凑,分辨率高,将会在民用领域特别是红外监控领域得到广泛应用。

参考文献

- [1] 张良,刘红霞.非制冷高变倍比连续变焦光学系统的设计[J].应用光学,2012,33(2):250-254.
- [2] 王合龙,陈建发,李淑忠.长波红外连续变焦光学系统设计[J].电光与控制,2014,21(12):1-4.
- [3] 刘峰,徐熙平,孙向阳,等.高变倍比红外变焦距光学系统设计[J].应用光学,2009,30(6):1020-1023.
- [4] 吴凡,李森森.高分辨率红外变焦光学系统设计[J].光电技术应用,2017,32(5):1-4.
- [5] 陶纯堪.变焦距光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,1988:153-163.
- [6] 张良.中波红外变焦距系统的光学设计[J].应用光学,2006,27(1):32-34.

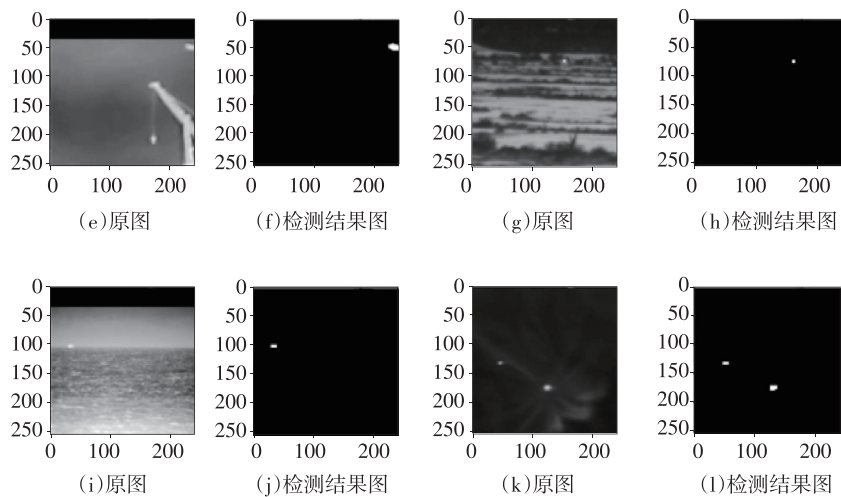


图7 检测结果图

4 结 论

提出一种基于深度学习的红外目标检测算法。采用图像平滑和伽马变换对图像进行预处理。随后,使用全局关注的局部补丁网络(LPNet)实现复杂背景下的红外目标检测。在SIRST数据集上验证了该算法的有效性与鲁棒性。未来的研究方向包括探索更有效的数据获取和标注方法,进一步改进网络架构以提高对复杂环境的鲁棒性,研究在保证检测精度的前提下提高检测速率的技术等。随着技术的不断发展,基于深度学习的红外目标检测技术将在更多领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] BAE T W, SOHNG K I. Small target detection using bilateral filter based on edge component[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010, 31 (6): 735-743.
- [2] ZHU H, LIU S, DENG L, et al. Infrared small target detection via low-rank tensor completion with top-hat regularization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 58(2): 1004-1016.
- [3] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE, 2015: 1440-1448.
- [4] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2016: 779-788.
- [5] WANG H, ZHOU L P, WANG L. Miss detection vs. false alarm: adversarial learning for small object segmentation in infrared images[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). New York: IEEE, 2019: 8508-8517.
- [7] 许正光,赵一菲,宋才良,等.用OZSAD软件实现复合式变焦凸轮曲线优化设计[J].应用光学,2006,27(3):203-207.
- [8] 程伟宁,赵久良.制冷型红外变焦光学系统设计[J].光电技术应用,2024,39(4):37-41.
- [9] 王平,张葆,程志峰,等.变焦距镜头凸轮结构优化设计[J].光学精密工程,2010,18(4):893-898.

(上接第28页)