

文章编号: 1672-8785(2023)02-0001-07

防辐射长波红外连续变焦 光学系统设计

吴海清^{1,2} 谈大伟^{1,2}

(1. 凯迈(洛阳)测控有限公司, 河南 洛阳 471009;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 为解决在强辐射环境中使用红外热像仪时由辐射导致其性能退化迅速的技术问题, 基于机械正组补偿式连续变焦结构形式, 通过后固定组中引入反射镜来形成折转式光学系统, 避免后端探测器直面前方辐射射线。设计了一种工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 、 F 数为 1.2、焦距为 $25\sim 90\ \text{mm}$ 的非制冷红外连续变焦光学系统。结果表明, 该系统结构合理、成像良好, 在探测器对应的特征频率 $42\ \text{lp/mm}$ 处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.2, 满足应用需求。加工装调后, 经实际成像测试, 验证了设计的准确性。

关键词: 防辐射; 非制冷红外; 连续变焦系统; 光学设计

中图分类号: O439; TH74 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.02.001

Design of Radiation-Proof Long-Wave Infrared Continuous Zoom Optical System

WU Hai-qing^{1,2}, TAN Da-wei^{1,2}

(1. CAMA (Luoyang) Measurement and Control Co., Ltd., Luoyang 471009, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to solve the technical problem of rapid performance degradation caused by radiation when using an infrared thermal imager in a high-radiation environment, based on the mechanical positive group compensation continuous zoom structure, the reflector is introduced into the rear fixed group to form a folding optical system, to avoid the back-end detector from the front radiation rays. An uncooled infrared continuous zoom optical system with an operating waveband of $8\sim 12\ \mu\text{m}$, a F -number of 1.2, and a focal length of $25\sim 90\ \text{mm}$ is designed. The results show that the system has a reasonable structure and good imaging. The modulation transfer function (MTF) value at the characteristic frequency of $42\ \text{lp/mm}$ corresponding to the detector is greater than 0.2, which meets the application requirements. After processing and adjustment, the accuracy of the design is verified by actual imaging test.

收稿日期: 2022-10-20

作者简介: 吴海清(1982-), 男, 陕西榆林人, 高级工程师, 硕士, 主要从事成像光学系统设计与应用研究。

E-mail: whqcust@163.com

Key words: radiation-proof; uncooled infrared; continuous zoom system; optical design

0 引言

红外热像仪是将物体的红外辐射经光电转换后进行成像的,而任何高于绝对零度的物体均时刻对外产生热辐射。因此,红外热成像不受时间限制,可实现全天时工作。由于无需使用复杂的制冷装置,非制冷红外系统可实现小型化、轻量化设计,且可靠性高、价格低,能够广泛应用于汽车辅助驾驶、安防监控、非接触式红外测温等方面^[1-2]。在光电监视设备领域,定焦红外系统视场固定,无法对不同距离处目标进行探测和识别;而连续变焦红外成像系统在短焦状态时成像视场范围大,在长焦状态时分辨率高,因此可利用大视场进行大范围的目标搜索,并利用小视场进行目标细节识别及监测,从而有效提高任务执行效率^[3-5]。

为了确保核反应堆、放射性源等辐射环境中工作人员的人身安全,可通过远程监测设备对辐射部位进行监测。在小型无人机上搭载配有可见光、红外热成像等光电传感器的机载光电系统,代替工作人员在强辐射环境下对重点目标进行监测,具有重要的现实意义。然而,在强辐射环境中工作时,暴露在射线下的电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)或互补金属氧化半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)成像器件会由于元器件的电离辐射效应而受到损伤,造成成像性能退化(甚至功能失效)^[6]。因此,对于此类特殊应用需求,需要进行相应的防辐射设计。

本文介绍了工作在强辐射环境中的红外热像仪光学系统的光路构型选择方法。针对目前分辨率为 1024×768 、像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的高分辨率非制冷长波红外探测器,设计了一种焦距为 $25 \sim 90 \text{ mm}$ 的折转型非制冷红外

连续变焦光学系统。加工装调后对其进行了成像测试。结果表明,该系统在变焦过程中成像质量良好,适于应用在强辐射电磁环境中的小型机载光电系统。

1 光学系统结构选型

所有辐射射线均为通过原子能级跃迁所产生的高能辐射,因此其波长很短,都具有很强的穿透能力。在遇到非金属材料或较薄金属时,可以直接穿透物体。然而辐射射线遇到反射镜面时并不会被反射而改变传播路线。

由于非制冷红外探测器的灵敏度较低,光学系统的 F 数较小,透镜口径较大。因此,目前的非制冷红外光学系统均采用直筒型的一次成像系统。在强辐射源的照射下,后端的非制冷红外成像探测器会直面辐射粒子或射线的照射。暴露在射线下的成像探测器会受到损伤,无法应用在核反应堆、放射性源等辐射环境中。

因为辐射射线遇到反射镜面时会穿过而不会被反射,即射线的传播方向不会因反射镜的反射而发生改变,所以在光学系统的光路中增加折叠反射镜形成“L”型光路。来自物方的红外光经各透镜的折射以及反射镜的反射后会聚在探测器上进行成像,而来自物方的辐射射线则穿过了透镜及反射镜,不会到达探测器成像面,从而避免后端红外成像探测器直面来自物方的强辐射的问题。探测器的四周侧面可以通过增加铅板保护的方式起到对成像探测器的辐射屏蔽保护作用。

2 设计参数

本文采用像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 、工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的 1024×768 元非制冷红外探测器。表1列出了光学系统设计参数。

表 1 光学系统的技术指标

参数	技术指标
探测器规格	1024×768 元(非制冷型)
像元尺寸	12 μm×12 μm
工作波段	8~12 μm
<i>F</i> 数	1.2
焦距	25~90 mm
视场	27.6°×20.9°~7.8°×5.9°

3 设计结果及像质评价

3.1 光学设计结果

在机械正组补偿式变焦结构形式的基础上, 拉长后固定组透镜之间的距离, 设定边界条件后利用光学设计软件进行优化。最终设计的连续变焦红外光学系统由五片透镜组成。所有透镜均采用单晶锗材料, 其中第二透镜的后表面、第三透镜的前表面、第四透镜的前表面、第五片透镜的前表面采用高次非球面。优化完成后, 在后固定组中引入反射镜, 形成折转式光学系统。不同焦距段的光路图如图 1 所示。

3.2 成像质量评价

图 2 所示为本文光学系统在短焦 25 mm、中焦 50 mm、长焦 90 mm 时的 MTF 曲线。可以看出, 在不同焦距条件下, 在所用非制冷红外探测器对应的特征频率 42 lp/mm 处, 该系统中心视场的 MTF 值均大于 0.35, 边缘视场的 MTF 值均大于 0.2, 满足工程应用要求。

图 3 为本文光学系统在短焦 25 mm、中焦 50 mm、长焦 90 mm 时的点列图。可以看出, 在不同焦距条件下, 该系统的光斑直径均与探测器的像元尺寸相当, 满足工程应用要求。

图 4 为本文光学系统在短焦 25 mm、中焦 50 mm、长焦 90 mm 时的场曲及畸变图。可以看出, 该系统在短焦时的畸变值小于 5%, 在中焦时的畸变值小于 2.4%, 在长焦时的畸变值小于 2.6%, 满足工程应用要求。

图 5 为本文光学系统的圆内能量曲线图。

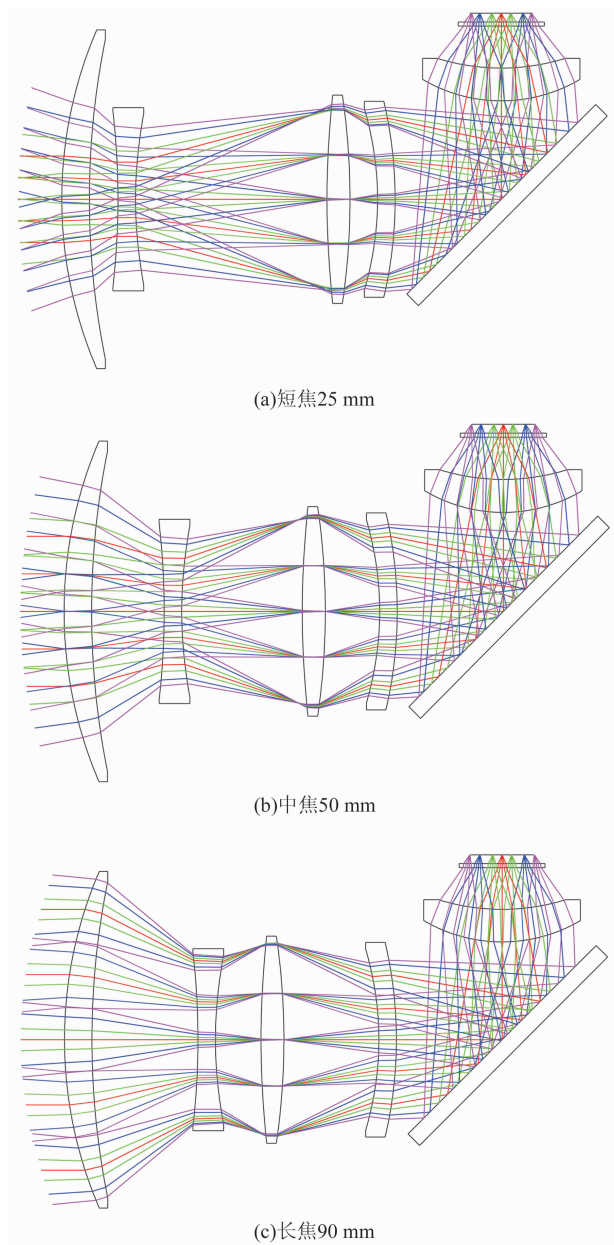
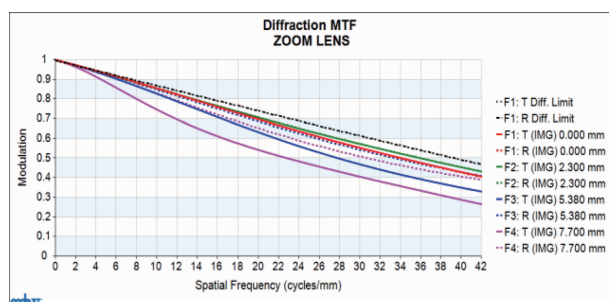


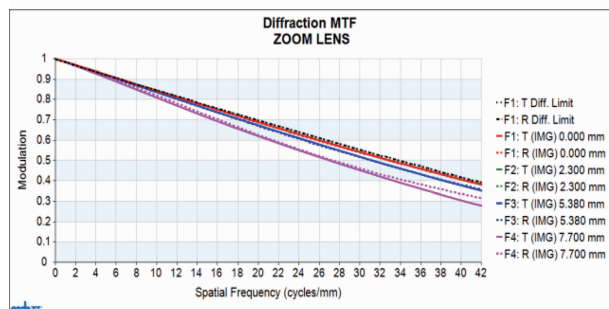
图 1 连续变焦光学系统的光路图

可以看出, 在不同焦距条件下, 除边缘视场外其他视场均有目标能量的 80% 落入一个像元直径范围内。该尺寸可与成像探测器良好匹配, 满足工程使用要求。

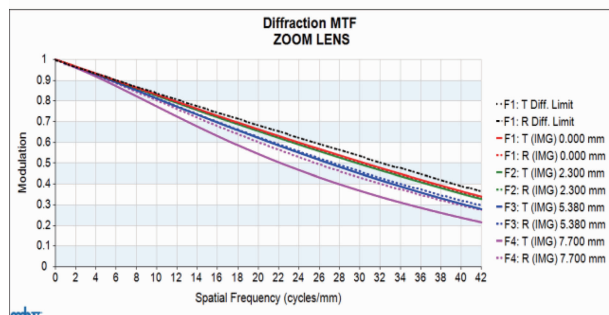
图 6 为本文光学系统的相对照度曲线图。可以看出, 该系统边缘视场的相对照度大于 86%, 可避免由于轴外照度较低所引起的图像四角较暗的现象, 满足工程应用要求。



(a)短焦25 mm



(b)中焦50 mm



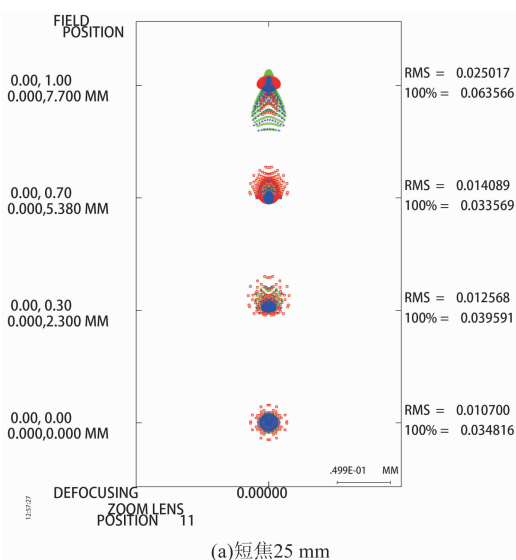
(c)长焦90 mm

图 2 连续变焦光学系统的 MTF 曲线

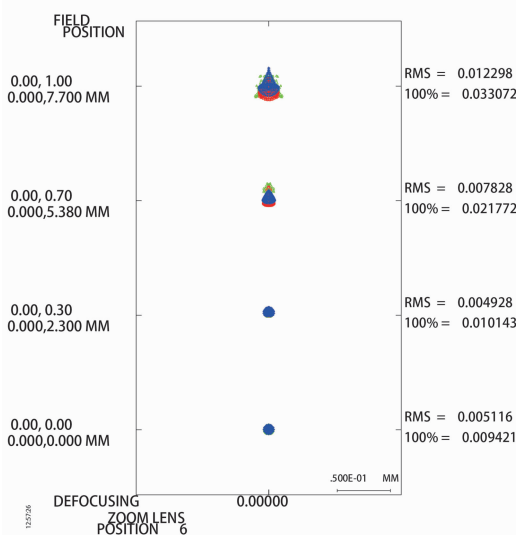
图 7 为本文光学系统变倍组、补偿组的变焦运动曲线图。其中，横坐标为光学系统的焦距，纵坐标为变倍组、补偿组距前固定组的距离；实线为变倍组的运动曲线，虚线为补偿组的运动曲线。可以看出，在由短焦至长焦的变化过程中，该系统变倍组和补偿组的运动平滑、连续，没有突变点，可确保系统在变焦运动过程中不会出现卡滞现象。

4 公差分析

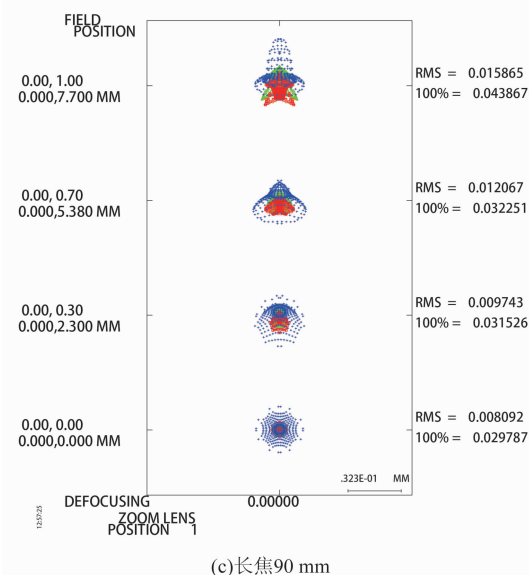
光学系统设计完成之后，转入加工阶段之前需要将各透镜的制造误差、透镜之间以及透镜与结构件之间的装配误差、光学材料误差等引入到光学系统中进行公差分析。确认在当前



(a)短焦25 mm



(b)中焦50 mm



(c)长焦90 mm

图 3 连续变焦光学系统的点列图

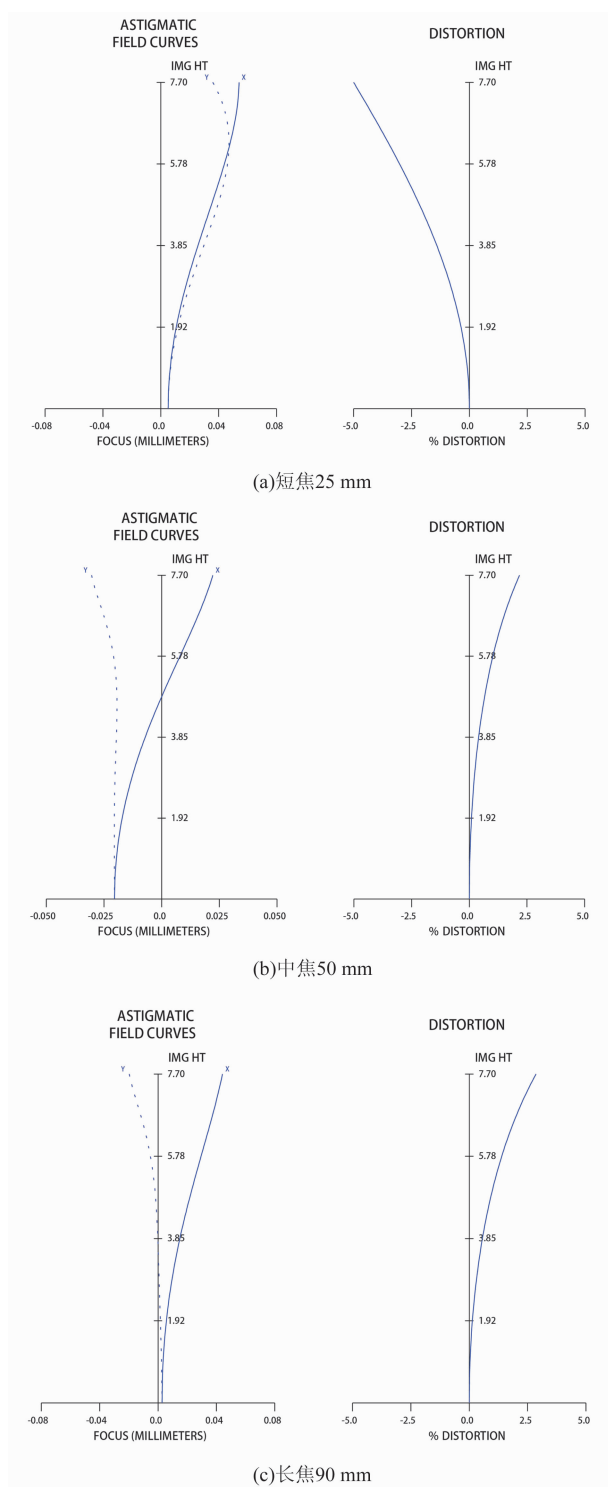


图 4 连续变焦光学系统的场曲及畸变图

加工及装配误差条件下对系统成像质量的影响程度,从而预计光学系统的成像质量是否能够满足要求。表 2 列出了各透镜加工、装调公差类型及公差值。

图 8 为本文光学系统的公差曲线图。其

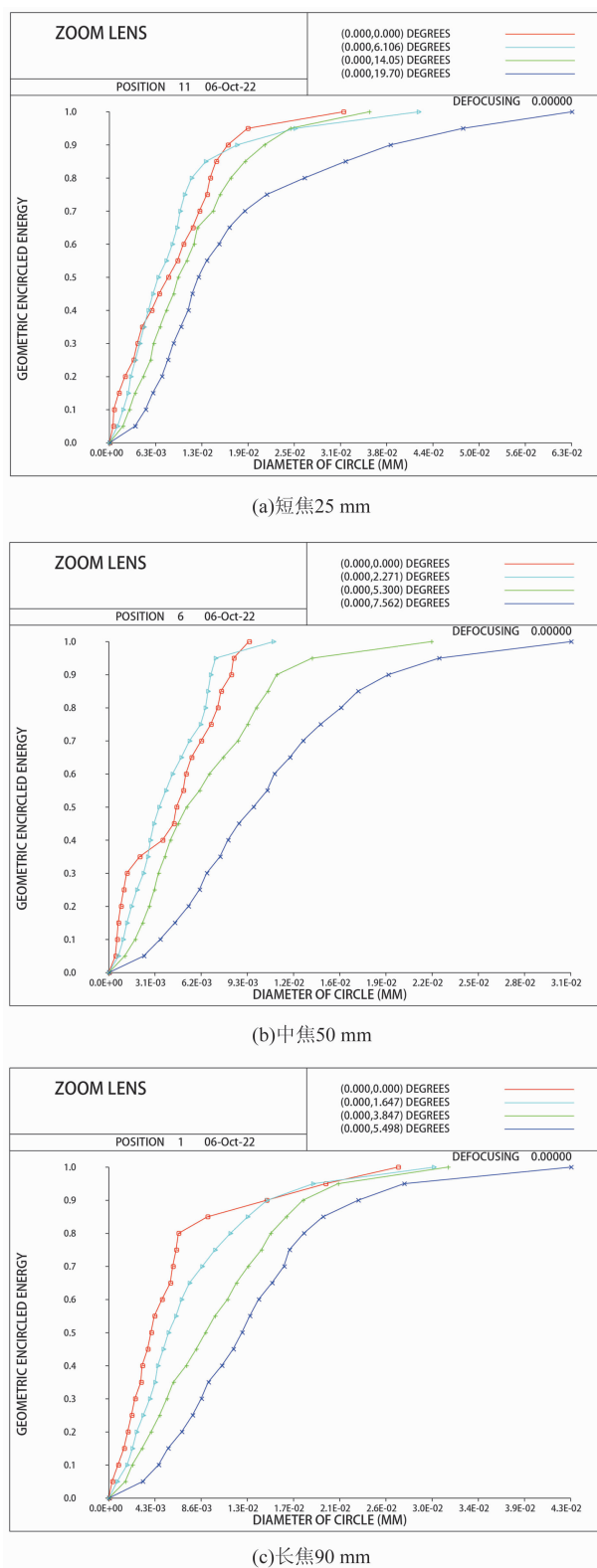


图 5 连续变焦光学系统的圆内能量曲线图

中,横坐标为光学系统的传递函数,纵坐标为发生概率。可以看出,光学系统的零件加工及系统装配均按照表 2 所给定的公差值进行。最

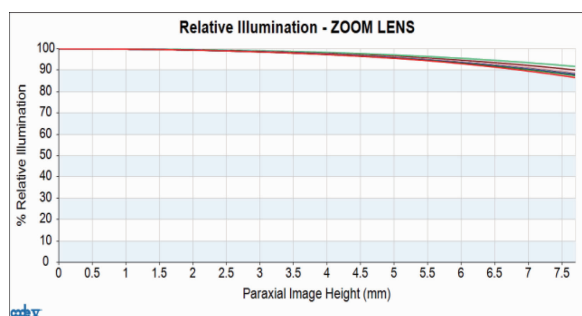


图 6 连续变焦光学系统的相对照度曲线图

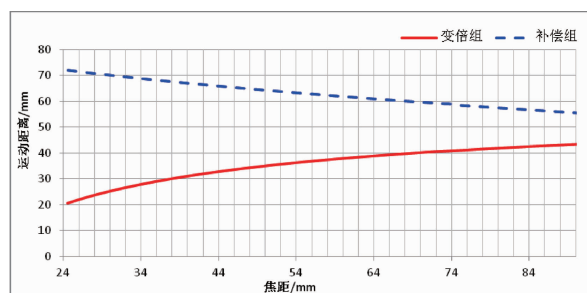


图 7 光学系统变倍组、补偿组的变焦运动曲线图

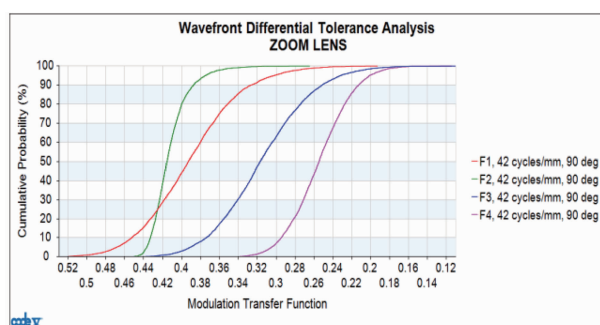
表 2 光学系统的主要公差值

公差名称	公差类型	公差值
DLF	光圈	5
DLT	厚度公差	± 0.02 mm
DLX	x 方向偏心	± 0.02 mm
DLY	y 方向偏心	± 0.02 mm
TRX	x 方向倾斜	± 0.025 mm
TRY	y 方向倾斜	± 0.025 mm
DSX	元件 x 偏心	± 0.025 mm
DSY	元件 y 偏心	± 0.025 mm
BTX	元件 x 倾斜	± 0.005 rad
BTY	元件 y 倾斜	± 0.005 rad

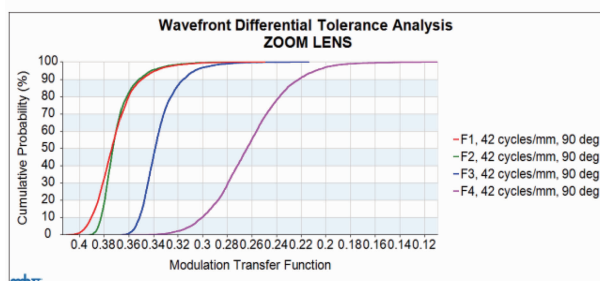
终装调后,该成像系统在短焦条件下的中心视场 MTF 值大于 0.32 的概率为 90%,边缘视场 MTF 值大于 0.21 的概率为 90%;中焦条件下,中心视场 MTF 值大于 0.35 的概率为 90%,边缘视场 MTF 值大于 0.22 的概率为 90%;长焦条件下,中心视场 MTF 值大于 0.2 的概率为 90%,边缘视场 MTF 值大于 0.13 的概率为 90%。结果表明,装调后光学系统的成像性能满足应用要求。

5 成像效果试验

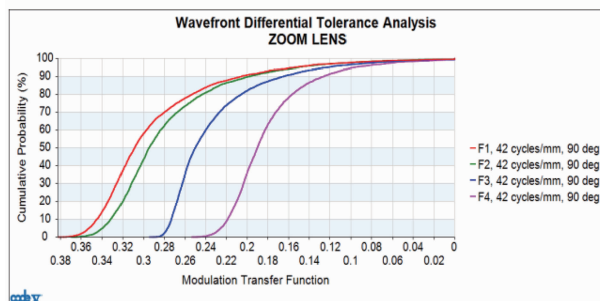
图 9 为加工装调后的光学镜头实物图。图



(a)短焦25 mm



(b)中焦50 mm



(c)长焦90 mm

图 8 连续变焦光学系统的公差曲线图



图 9 镜头实物图

10 为装调后的镜头成像图。可以看出,该系统在短焦及长焦状态下均画面细腻,目标细节突出,整体成像效果良好。

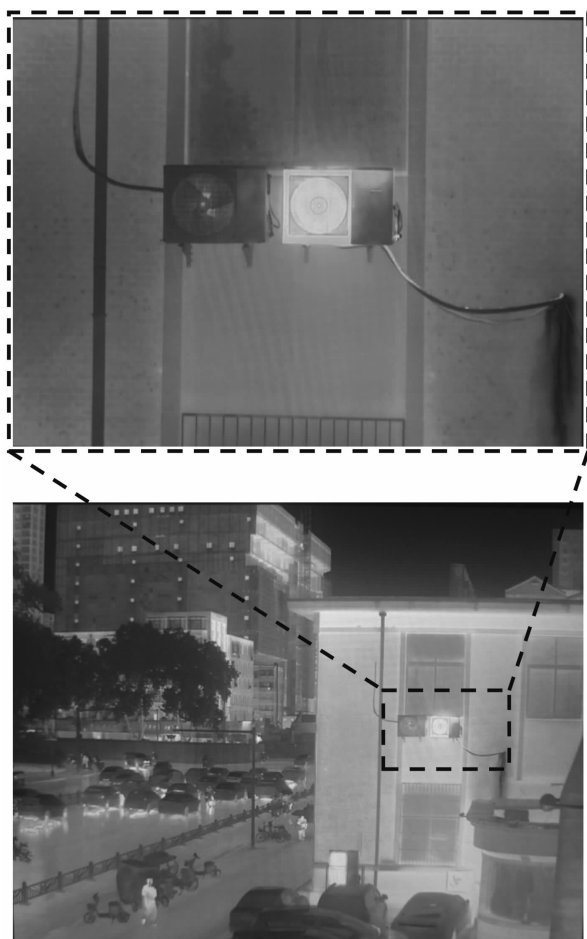


图 10 长焦及短焦成像效果图

6 结束语

本文开展了耐辐射非制冷红外连续变焦光学系统设计研究。基于当前国产的分辨率为 1024×768 、像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的高分辨率非制冷长波红外探测器,采用机械正组补偿式结构形式并引入折叠反射镜,设计了一种

焦距为 $25 \sim 90 \text{ mm}$ 的折转式非制冷红外连续变焦光学系统。该系统由五片透镜和一片反射镜组成,具有结构合理、可制造性良好的特点。我们对连续变焦系统进行了外景成像测试。它在变焦过程中成像质量良好,表明系统设计合理可行。该系统将在具有强电磁辐射环境的安防监控、目标探测查证等领域具有广泛的应用前景。下一步研究重点为长焦距、高分辨率非制冷红外连续变焦光学系统的小型化、轻量化设计。

参考文献

- [1] 吴海清. 防辐射非制冷红外二次成像光学系统设计 [J]. 光学与光电技术, 2020, 18(6): 60-64.
- [2] 李煜, 陆强, 白丕绩. 非制冷红外成像系统在陆军装备中的应用现状及趋势 [J]. 红外技术, 2017, 39(7): 581-593.
- [3] 吴海清, 曾宪宇, 王朋. 微型长波红外无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2019, 40(3): 1-5.
- [4] 吴海清, 李同海, 赵新亮, 等. 大靶面中波红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外, 2019, 40(1): 7-10.
- [5] 王向军, 王敏. 适用于无人机小型吊舱的变焦控制系统设计 [J]. 光电工程, 2013, 40(1): 139-144.
- [6] 赵雪, 周彦平, 刘海刚. 空间光学系统抗辐射设计研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(3): 406-409.