

文章编号: 1672-8785(2020)02-0001-06

小型化大面阵非制冷红外连续变焦 光学系统设计

吴海清^{1,2} 王 朋¹

(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: 为适应新型 1024×768 元大面阵高分辨率非制冷红外探测器及红外热成像系统小型化的需求, 采用机械正组补偿式连续变焦结构形式, 并通过合理分配各透镜的光焦度, 设计了一种焦距为 $25 \sim 75$ mm、工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 、 F 数为 1.2 的非制冷红外连续变焦成像光学系统。该系统由五片透镜组成, 总质量仅为 255 g, 光学总长度为 125 mm。设计结果显示, 该系统结构简单紧凑、体积小、成像良好, 在探测器对应的 36 lp/mm 特征频率处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.3, 满足应用需求。

关键词: 小型化; 光学设计; 非制冷红外; 连续变焦系统

中图分类号: O439; TH74 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.02.001

Design of Miniaturized Large-Format Uncooled Infrared Continuous Zoom Optical System

WU Hai-qing^{1,2}, WANG Peng¹

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

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

Abstract: In order to meet the requirements of the miniaturization of the new large-format high-resolution uncooled infrared detector (1024×768 pixels) and the infrared thermal imaging system, the continuous zoom structure with mechanical positive group compensation is adopted. An uncooled infrared continuous zoom imaging optical system with focal length of $25 \sim 75$ mm is designed through the reasonable distribution of optical focal degree of each lens. The operating band is $8 \sim 12 \mu\text{m}$, and the F -number is 1.2. The system consists of five lenses with a total mass of only 255 g and optical length of 125 mm. The design result shows that the system is small, simple and compact, and good in imaging. The modulation transfer function value is greater than 0.3 at the corresponding characteristic frequency (36 lp/mm) of the detector, which can meet the application requirements.

Key words: miniaturization; optical design; uncooled infrared; continuous zoom system

收稿日期: 2020-01-15

作者简介: 吴海清(1982-), 男, 陕西榆林人, 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

0 引言

与制冷型红外探测器相比,非制冷红外探测器具有小型化、低成本、高可靠性等优势,适合大批量生产。因此,它被越来越广泛应用于安全监控系统、手持红外设备、瞄具、车辆驾驶员视觉增强系统、夜视红外头盔、小型无人机等军事及民用领域^[1-3]。

当前,随着非制冷红外技术的不断进步,非制冷红外探测器在灵敏度、分辨率、帧频等方面取得了长足的进步。其焦平面的阵列规模不断增大,像元尺寸不断减小,灵敏度不断提高,但成本却在迅速下降。这为高性能非制冷红外系统的推广奠定了坚实的基础。

在国际上,Raytheon 公司开发出了像元数为 2048×1536 、靶面尺寸为 $43.3 \text{ mm} \times 39.3 \text{ mm}$ 、像元尺寸为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ 的非制冷红外探测器。此外,该公司和 BAE Systems 公司还实现了像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的非制冷红外探测器的量产。目前国内阵列规模最大的是烟台艾睿光电科技有限公司推出的像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 1280×1024 元非制冷氧化钒红外探测器。该公司生产的像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 的 1024×768 元非制冷长波红外探测器以及武汉高德红外股份有限公司生产的像元尺寸为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ 的 800×600 元非制冷长波红外探测器均已实现量产^[4]。

大面阵红外探测器需要配置大靶面的红外光学镜头,否则成像系统输出的图像就会出现黑角。所以在设计红外光学系统时,其靶面大小应该不小于所选红外探测器的靶面尺寸。因此,研究能够适配 1024×768 元非制冷长波红外探测器的大靶面光学系统具有现实意义。

定焦红外成像光学系统难以满足对不同距离处目标的探测和识别要求。而连续变焦红外光学系统在短焦距、大视场时覆盖面积大,在长焦距、小视场时分辨率高,可分别用于大范围搜索目标和对目标进行识别、跟踪与瞄准。由于连续变焦成像系统在改变焦距时始终保持对目标清晰成像,因此在对目

标进行跟踪或瞄准时,可根据观察需要调整焦距,选择合适的观察视场,并在视场切换过程中保持对目标的稳定跟踪(不丢失目标),从而有效提高人机功效^[5-7]。

本文针对像元数为 1024×768 、像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 的新型高分辨率非制冷长波红外探测器,设计了一种焦距为 $25 \sim 75 \text{ mm}$ 的小型化非制冷红外连续变焦光学系统。它适用于手持红外设备、车辆驾驶辅助系统以及小型机载光电系统等领域。

1 设计参数

本文设计的连续变焦光学系统采用烟台艾睿光电科技有限公司生产的 1024×768 元非制冷长波红外探测器。表 1 列出了该光学系统的设计参数。

表 1 光学系统的技术指标

参数	技术指标
像元数	1024×768 (非制冷型)
像元尺寸	$14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$
光谱范围	$8 \sim 12 \mu\text{m}$
F 数	1.2
焦距	$25 \sim 75 \text{ mm}$
视场	$32.0^\circ \times 24.3^\circ \sim 10.9^\circ \times 8.2^\circ$
像面直径	18 mm

2 设计结果及像质评价

2.1 设计结果

采用机械正组补偿式连续变焦光学结构模型,并在建立初始模型后利用光学设计软件对其进行优化。由于该系统属于大视场、大相对孔径光学系统,其轴外像差和高级像差都比较大。为了校正高级像差,引入了三个高次非球面,较好地平衡了轴外和轴上像差。

最终设计了一种由五片透镜组成的小型化连续变焦红外光学系统(光路图见图 1)。五片透镜的光学材料均采用单晶锗;透镜的总质量仅为 255 g ;光学系统的总长度为 125 mm 。其中,第三、第四和第五片透镜的前表面均为非球面。

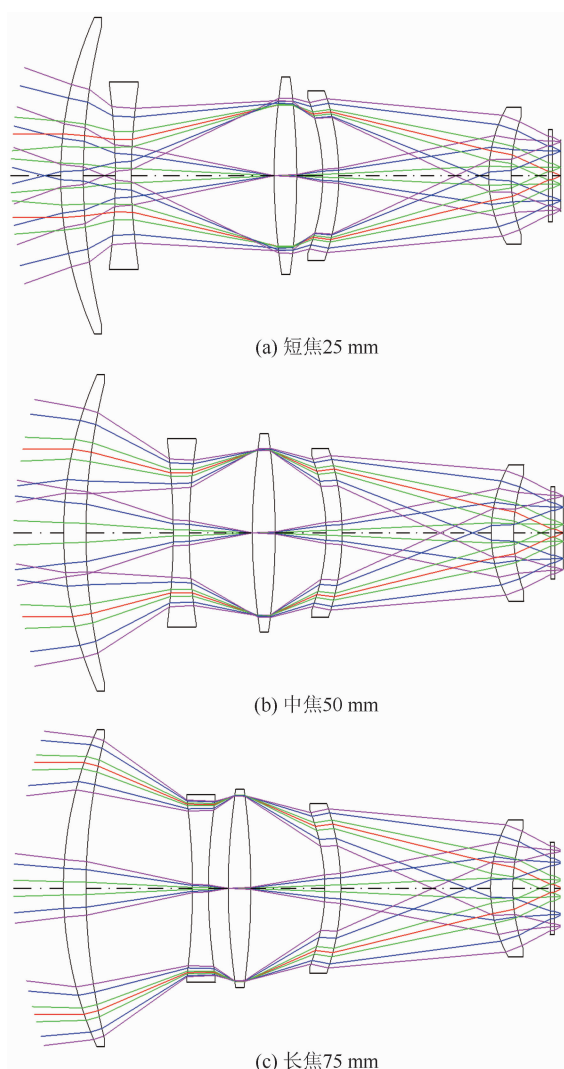


图 1 连续变焦光学系统的光路图

2.2 像质评价

图 2、图 3 和图 4 所示分别为本文光学系统在短焦 25 mm、中焦 50 mm 和长焦 75 mm 时的 MTF 曲线。可以看出, 在 1024×768 元

非制冷红外探测器对应的 36 lp/mm 特征频率处, 该光学系统在全视场范围内的 MTF 值均大于 0.3, 满足应用要求。

图 5、图 6 和图 7 分别为本文光学系统在短焦 25 mm、中焦 50 mm 和长焦 75 mm 时的点列图。可以看出, 该系统的光斑直径均与探测器的像元尺寸相当, 满足应用要求。

图 8、图 9 和图 10 分别为本文光学系统在短焦 25 mm、中焦 50 mm 和长焦 75 mm 时的场曲与畸变图。可以看出, 该系统在短焦时畸变小于 5%, 在中焦时畸变小于 2.5%, 在长焦时畸变小于 3.5%, 满足应用要求。

由于探测器的靶面尺寸较大, 如果轴外照度较低, 那么图像就容易出现四角较暗的现象。图 11 为该光学系统的相对照度曲线图。可以看出, 该光学系统边缘视场的相对照度大于 88%, 满足应用要求。

本文光学系统变倍组的行程为 19 mm, 补偿组的行程为 11.9 mm。短行程有利于系统结构的小型化设计。图 12 中的虚线和实线分别为该系统变倍组和补偿组的变焦运动曲线。其中, 横坐标为光学系统的焦距, 纵坐标为变倍组及补偿组与前固定组的距离。可以看出, 在焦距从 25 mm 到 75 mm 的变化过程中, 变倍组和补偿组的运动均平滑、连续、无拐点, 可有效避免系统在变焦运动过程中出现卡滞现象。

3 公差分析

在光学系统中, 各透镜的加工和装配误差

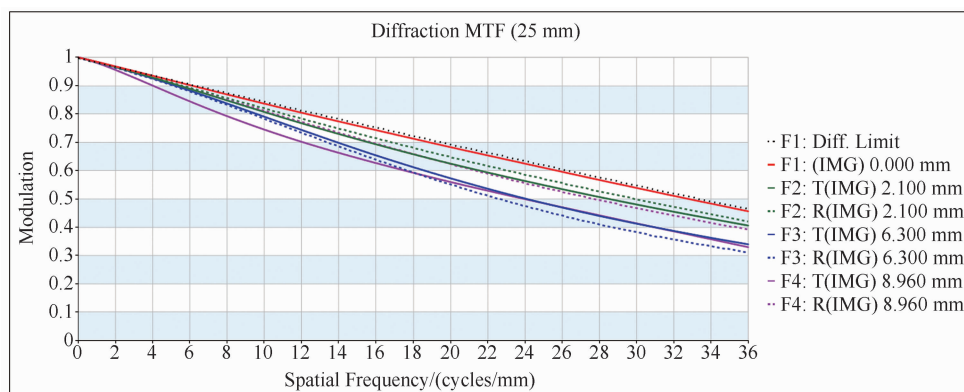


图 2 短焦 25 mm 时的系统 MTF 曲线

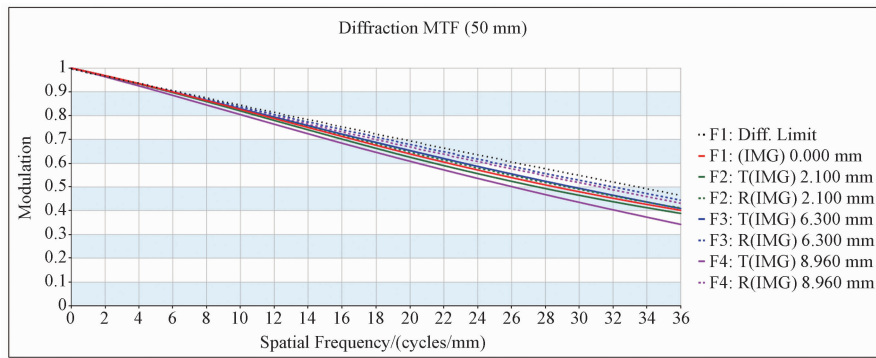


图 3 中焦 50 mm 时的系统 MTF 曲线

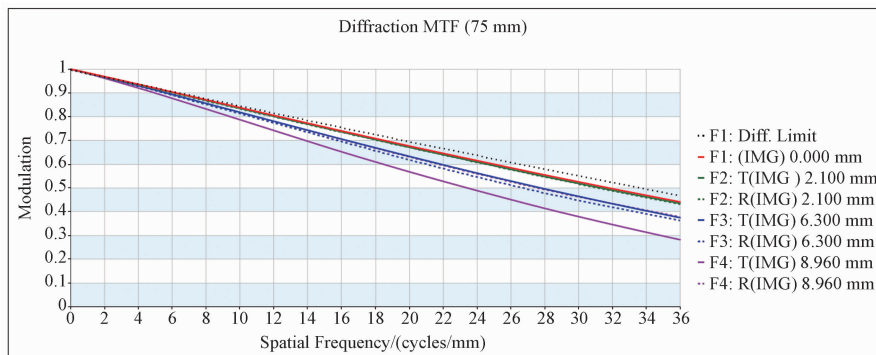


图 4 长焦 75 mm 时的系统 MTF 曲线

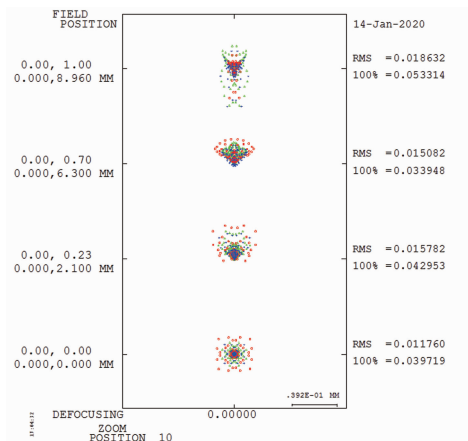


图 5 短焦 25 mm 时的系统点列图

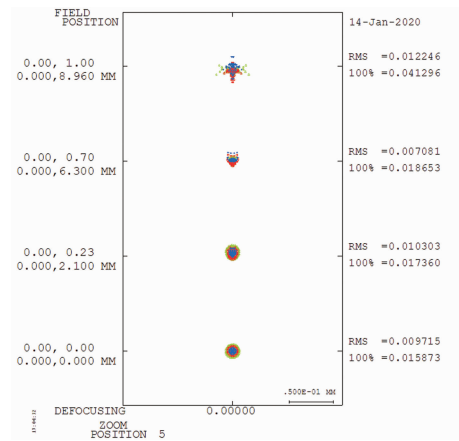


图 6 中焦 50 mm 时的系统点列图

是一定存在的。每一种误差都会对光学系统的成像质量造成不同程度的影响，而影响大小又取决于该光学系统对每个公差值的敏感度。公差分析的目就是在投产前预测各种类型的加工和装配误差造成光学系统成像质量下降的程度。在最终装配和调试期间，需要对光学系统的后截距(即最后一块透镜到像面的轴向距离)进行调整，从而确定探测器的最佳安装位置。因此，在对该光学系统进行公差分析时，选择

后截距作为公差补偿项。距离补偿的最小值为 -0.15 mm，最大值为 0.15 mm。表 2 列出了各透镜加工和装调公差类型及公差值。

图 13 为本文光学系统的公差曲线图。其中，横坐标为光学系统的 MTF 值，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 列出的公差值来进行。最终装调后，该成像系统的 MTF 值能够达到 0.22 以上的概率约为 80%，表明装调后光学

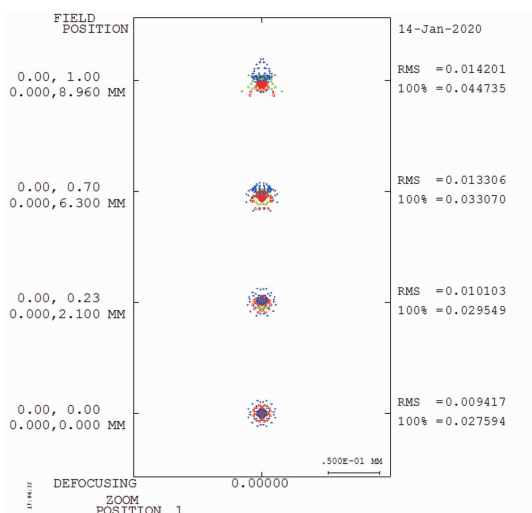


图 7 长焦 75 mm 时的系统点列图

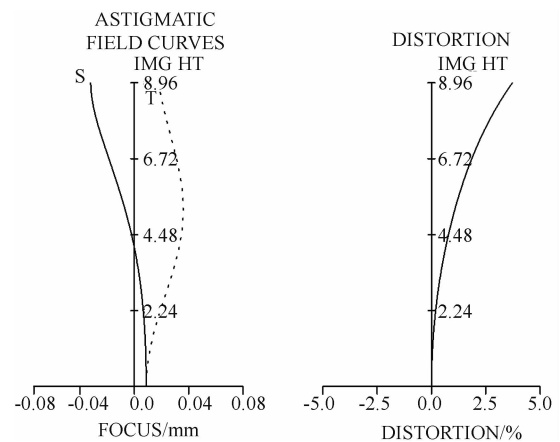


图 10 长焦 75 mm 时的系统场曲与畸变图

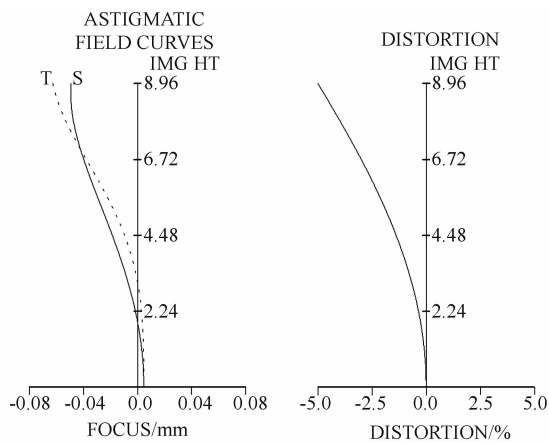


图 8 短焦 25 mm 时的系统场曲与畸变图

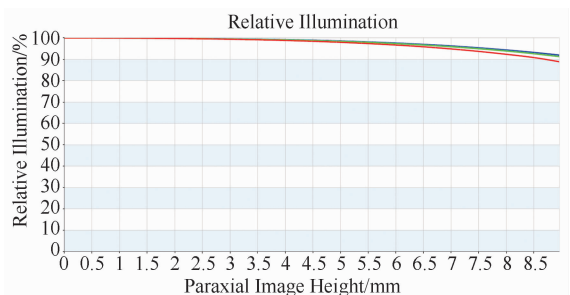


图 11 光学系统的相对照度曲线图

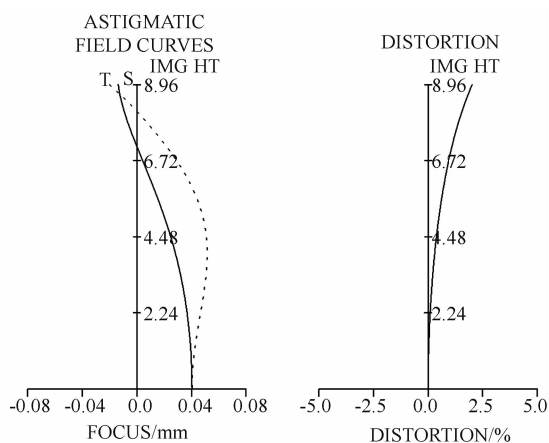


图 9 中焦 50 mm 时的系统场曲与畸变图

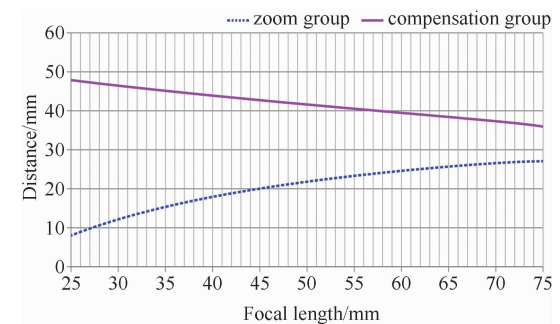


图 12 光学系统变倍组和补偿组的变焦运动曲线

系统的成像性能可以满足应用要求。

4 结论

本文对大面阵、高分辨率非制冷红外连续变焦光学系统设计进行了研究。针对目前新推

表 2 光学系统的主要公差值

公差名称	公差类型	公差值
D_{LF}	光圈	5
D_{LT}	厚度公差	± 0.02 mm
D_{LX}	x 方向偏心	± 0.02 mm
D_{LY}	y 方向偏心	± 0.02 mm
T_{RX}	x 方向倾斜	± 0.025 mm
T_{RY}	y 方向倾斜	± 0.025 mm
D_{SX}	元件 x 偏心	± 0.025 mm
D_{SY}	元件 y 偏心	± 0.025 mm
B_{TX}	元件 x 倾斜	± 0.005 rad
B_{TY}	元件 y 倾斜	± 0.005 rad

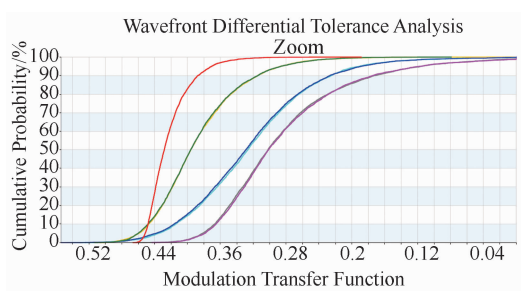


图 13 公差曲线图

出的像元尺寸为 $14\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m}$ 的 1024×768 元高分辨率非制冷长波红外探测器, 采用了机械正组补偿式结构形式, 设计了一种焦距为 $25 \sim 75\ \text{mm}$ 的小型化非制冷红外连续变焦光学系统。该系统仅由总质量为 $255\ \text{g}$ 的五片透镜组成, 其总长度为 $125\ \text{mm}$ 。由于具有体积小、重量轻的特点, 它将在安防监控、小型机载光电系统等领域拥有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 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.

[2] 雷述宇, 方辉, 刘俊, 等. 国产 640×512 非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术, 2013, 35(12): 759-763.

[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] 李煜, 方辉, 谭果. 高性能 $17\ \mu\text{m}$ 非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术, 2017, 39(9): 785-797.

[5] 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.

[6] 薛慧, 李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5): 421-424.

[7] 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.