

基于中波制冷型碲镉汞探测器的远距离探测/ 识别连续变焦热像仪

陈津津, 苏君红, 金 宁, 浦恩昌, 张 皓, 苏俊波, 周立钢, 明景谦, 徐 曼, 杨开宇, 宋治航

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 基于中波制冷型 640 pixel×512 pixel (15 μm) 凝视焦平面探测器, 设计了远距离探测/识别的高清晰大变倍比连续变焦热像仪。该热像仪变倍比为 35, 长焦处瞬时视场 (IFOV) 为 0.027 mrad/pixel, 在标准大气环境中观察视场角为 35°×28°, 能够对 4 m×3 m×2.3 m 尺寸的车辆进行 55 km 处探测、15 km 处识别 (识别概率为 50%), 满足现代光电武器系统的远距离作战需要。热像仪采用平滑的变倍-补偿曲线光学系统设计、单导轨/双滑块变焦结构技术、自适应伺服控制技术以及红外图像增强技术, 获得了在整个大变倍比的连续变焦过程中图像始终清晰并且无间断点。在奈奎斯特频率处 (18 cyc/mrad) 进行最小可分辨温差 (MRTD) 测试, 测试结果表明该热像仪性能优良, 证明该热像仪的各项关键技术实现了从理论设计到整机系统的工程化研究。

关键词: 连续变焦; 识别/探测; 自适应伺服控制; 红外图像增强; MRTD

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0404004

A long-distance detection/ identification continuous zoom thermal imager based on MW MCT detector

Chen Jinjin, Su Junhong, Jin Ning, Pu Enchang, Zhang Hao, Su Junbo, Zhou Ligang,
Ming Jingqian, Xu Man, Yang Kaiyu, Song Zhihang

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Large zooming ratio thermal imager based on medium-wave (MW) 640 pixel×512 pixel (15 μm) MCT staring focal plane detector has been achieved. The thermal imager has wide field of 35°×28° capacitating wide area surveillance by 35× continuous zoom optical lens and the instantaneous field of view (IFOV) is 0.027 mrad/pixel. In the standard atmospheric conditions, this thermal imager can detect 4 m×3 m×2.3 m vehicles target at 55 km and can identify the same target at 15 km (identification probability of 50%). This high performance has met the needs of the modern long-distance photoelectric weapons system. There are four key techniques during the design of the high performance imager including zoom optical system design of smooth change roots compensation curve, the single rail/double slider zoom structure technology, adaptive servo control technology and infrared image enhancement technology. The

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (61605070)

作者简介: 陈津津 (1980-), 女, 教授, 博士生, 主要从事红外光学系统的仿真设计及性能评估方面的研究工作。

Email: xinqin80@163.com

导师简介: 苏君红 (1937-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外探测器及红外整机应用技术方面的研究工作。

image is always clear and has no breakpoint in the continuous zoom process of the whole large variable ratio. The excellent Minimum Resolvable Temperature Difference (MRTD) of this imager has been achieved at Nyquist frequency(18 cyc/mrad). Performance data and imager photos have been presented. Test results show that the thermal imager has good performance and the above four key techniques of the thermal imager have been achieved from the theory design to the machine system engineering research.

Key words: continuous zoom; detection/identification; adaptive servo control; infrared image enhancement; MRTD

0 引言

随着红外热像仪的发展,连续变焦热像仪能够避免两/三视场热像仪在视场切换过程中丢失目标的不足,具有大视场搜索和跟踪目标、小视场识别和瞄准目标的优势,因此广泛用于光电转塔、红外吊舱、搜索跟踪等军事领域。其中大变倍比连续变焦、远探测/识别距离、高分辨率是重要的发展方向,符合当今军事领域的发展需求^[1]。

连续变焦红外光学系统的设计方式根据补偿方式的不同,主要分为两种:光学补偿和机械补偿。光学补偿的像面仅仅在某几个位置实现像面稳定,适用于变倍比较小并且对像质要求不高的连续变焦光学系统。机械补偿方式的连续变焦光学系统,其像面在整个变焦范围内都能保持完全稳定,可实现较大变倍比,并且成像质量较好。目前,折射式连续变焦光学系统在红外成像系统中应用较多,并基本都是采用机械补偿的连续变焦设计方式。国外有报道过变倍比为 4、10、20 及 30 的中波红外连续变焦光学系统^[2-5]。国内也报道过变倍比为 6.4、10、18 及 20 的中波红外连续变焦光学系统^[6-9]。变焦比达到 30 倍的中波红外连续变焦光学系统也有相关报道,但仅仅停留在光学系统的优化设计阶段,并没有实现相应光学系统的热像仪设计。从相关文献报道可知,同时实现大变倍比及长焦距的中波红外连续变焦系统,设计难度较大,要实现该类系统的工程化应用就更不容易。文中从系统设计到热像仪测试数据证明,该热像仪的各项性能指标在国际上均属于先进水平。

一台具备高性能的远距离探测/识别热像仪需要优良的光学设计技术、可靠的结构装调技术、精确的伺服控制技术以及有效的图像处理技术共同完成。文中针对工作波段为 3.7~4.8 μm , 高清(HD)像元尺寸(15 μm)的 640 pixel \times 512 pixel 碲镉汞焦平

面探测器,设计了变倍比为 35 的连续变焦热像仪。该热像仪具有结构紧凑、变焦曲线平滑的中波红外连续变焦光学系统;根据该变焦镜头的光学设计特点,采用不同形式的凸轮机构来实现红外变焦镜头变倍、补偿过程,从机械设计的角度保证了连续变焦光学系统的实现^[10];利用精确伺服控制技术,实现对变焦距光学镜头的连续变焦控制,使变焦距镜头中各运动组件获得要求的线性或非线性精确位移,可保证像面稳定;采用红外图像增强技术,提高目标识别度。

测试结果表明,该热像仪可以在标准大气环境中,在视场角为 35° \times 28°范围进行监视观察,并对 4 m \times 3 m \times 2.3 m 的车辆目标进行 55 km 处探测、15 km 处识别(识别概率为 50%)。在小视场,测试其奈奎斯特频率 18 cycles/mrad 处的最小可分辨温差(MRTD)为 0.23 K。热像仪在整个变焦过程中图像清晰,无间断点,成功实现了远距离探测/识别大变倍连续变焦热像仪的上述各项关键技术从理论研究到工程化的实际应用。

1 关键设计技术

表 1 给出了该热像仪的详细指标。

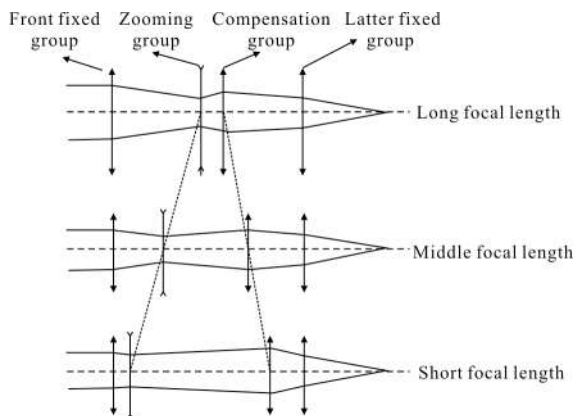
表 1 热像仪指标

Tab.1 Specifications of thermal imager

Item	Value
Operating wavelength range/ μm	3.7-4.8
Focal length/mm	15-550
System magnification	35 \times continuous
Overall transmittance	$\geq 75\%$
Cold shield F number, typical	$F/4$
Electronic zoom	2 \times , 4 \times
Image aspect ratio	4:3 TV format compatible
Number of pixels	Horizontal:512;vertical:640
Maximum resolving frequency	18 cycles/mrad
Frame rate	50 Hz
MRTD	$\geq 300 \text{ mK}(fN)$

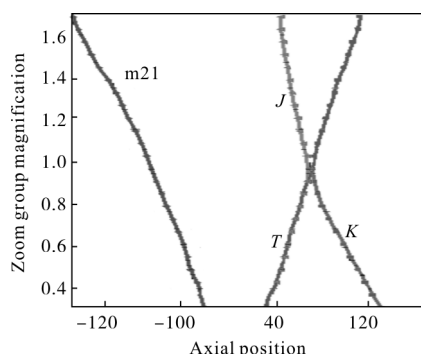
1.1 大变倍比连续变焦光学设计技术

该光学系统的设计原理图如图 1(a)所示。采用机械补偿方式设计,系统组成有前固定组、变焦组、补偿组、后固定组四组透镜。系统在整个变焦过程中变焦组与补偿组的合成共轭距保持不变,保证在整个成像过程中都有像点。变焦组与补偿组沿着设计曲线协同配合,实现连续变倍成像。



(a) 变焦原理图

(a) Figure of zoom principle



(b) 实际变焦曲线图

(b) Actual zoom curve

图 1 变焦曲线图

Fig.1 Zoom curve graph

该光学系统的变焦曲线如图 1(b)所示。系统在变焦组放大率等于 1 时,实现了“平滑换根”的思想^[11-12],两条补偿组曲线相切,得到了最速变焦曲线,即为系统补偿组的最终运动曲线。补偿组越过换根点后,变倍比迅速增长,易于实现了大变倍比的变焦系统设计。图 1(b)中的 *J* 曲线和 *K* 曲线就是该系统由于物像关系形成的两条补偿组曲线,为了实现大变倍比的紧凑设计,设计优化过程中使两条补偿曲线不断靠近,最后合成为 *T* 曲线,使系统由大视

场向小视场变化的时候,变焦曲线平滑,使伺服控制容易实现,同时易于保证伺服机构的控制精度。

由于红外材料的热膨胀系数较大,在实际工程应用中,必须考虑红外光学系统的热补偿。该系统的补偿组只有一片透镜,对补偿组进行伺服调焦控制来完成变倍补偿功能,用其承担消热调焦不需要增加多余的伺服机构。此外,该系统采用中波制冷型探测器,为了保证系统在整个变倍过程中能力均匀变化,必须采 100%的冷屏效率。否则将会造成光束切割,损失能量、降低系统反应灵敏度,或者额外的热辐射杂散光入射到探测器靶面上,造成干扰,降低系统信噪比^[13]。采用 3 个反射镜,将光学系统进行 3 次折叠,实现该系统的体积最小化布局。

光学系统仿真设计结果如图 2 所示,该中波红外连续变焦光学系统采用两种材料 Si 和 Ge,8 片透镜及 2 个非球面组成,3 个 45°放置的反射镜对光路进行折叠后光学系统尺寸为 390 mm×137.5 mm×110 mm (长×宽×高),实现了总长/焦距比约为 0.7^[14]。

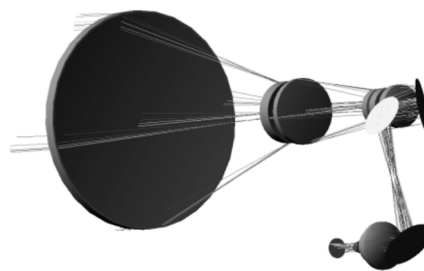


图 2 机械补偿连续变焦光学 3D 示意图

Fig.2 Three dimension model of mechanically compensating continuous zoom optics

该光学系统在整个变焦范围内的畸变都在 4% 以内,见图 3。

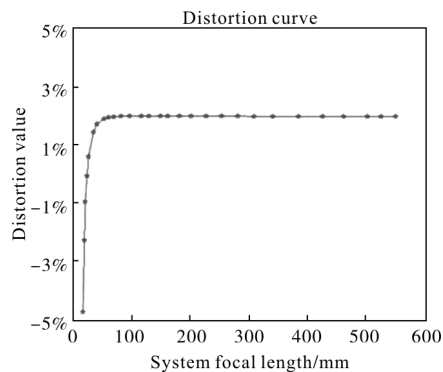


图 3 系统畸变图

Fig.3 Distortion of the system

热成像系统由于低温腔与镜筒其他部分温度的明显差异,导致了一种成像缺陷——冷反射(Narcissus)。也就是说,探测器除了接收到正常成像的景物辐射外,还通过光学系统中折射面的微弱反射,接受到本身及周围低温腔冷环境的影响,形成冷像,冷像的辐射强度随视场大小变化,成为不可滤掉的交流噪声信号叠加在景物信号上,在热图像的视场中心形成黑斑^[10]。在该连续变焦光学系统的设计过程中,控制了 YNI 和 I/Ibar 两个量,进行了准确的 YNI 水仙花效应的评估。YNI 主要综合反映系统的冷反射大小, YNI 值越大,产生的冷反射就越弱。YNI 的值由光学系统的近轴边缘光线高度,入射角在表面和折射率这 3 个方面决定^[14]。而 I/Ibar 的值表示系统的冷反射随视场的变化情况,若该值大于 1,则说明系统的冷发射基本不会在变焦过程中随视场变化而变化。该系统的冷反射抑制效果很好,没有明显的黑斑效应,不会降低系统的成像性能。同时对 I/Ibar 的控制优化,使整个系统在变焦过程中没有明显的黑斑出现。

1.2 单导轨/双滑块结构设计

连续变焦镜头在连续变焦的过程中,光轴随着变倍和补偿镜组的位移始终在跳动,该跳动量会随着系统变倍比的增大而增加,并且难以控制。在热像仪的工程化研究中,光轴跳动量的大小直接影响系统的性能指标,因此变倍组、补偿组的运动精度保证是此红外变焦距镜头结构设计的核心^[10]。光学系统调焦/变倍机构大体有 3 种方式,一种是丝杠副机构,一种是凸轮机构,另一种是采用直线电机机构。凸轮机构结构紧凑、可靠性高,但机构的动行程、同步和运动特性是不变的,对机构的加工精度和装调精度要求比较高,当光学零件的加工及装调误差累积时,很难通过调整凸轮机构达到系统要求;由于该系统的超大变倍比导致变倍组的行程较大,用直线电机机构也无法到达系统要求。因此选用滚珠丝杠副+直线滚动导轨/滑块机构,可以通过伺服系统控制电机实现变倍/补偿透镜组做非线性移动,有效地补偿光学零件的加工及装调的累积误差。滚珠丝杠副的传动效率高达 90%~98%,直线滚动导轨/滑块的摩擦系数 μ 在 0.001~0.003 之间,该机构的摩擦阻力小、灵敏度好,保证机构在低温时仍能平稳运

行。图 4 为变倍补偿机构示意图。

在该系统中,为保证变倍透镜和补偿透镜的同轴度,采用单导轨/双滑块的形式。其中,导轨的总长度为 250 mm,变倍组和补偿组运动总行程约为 180 mm,在导轨的装调过程中,辅助三坐标测量机等仪器,可保证导轨与物镜组光轴的平行度 ≤ 0.02 mm,由于精密级滑块行走平行度约为 2.0 μm ,那么,通过中心偏测量仪将变倍透镜与补偿透镜调整同轴并固定后,变倍透镜与补偿透镜行走最大夹角为 0.12 mrad,(用 CODEV 光学软件进行仿真)能保证光学系统的指标要求。

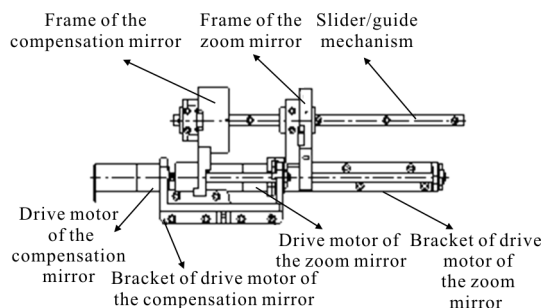


图 4 变倍补偿机构示意图

Fig.4 Schematic diagram of zoom compensation group mechanism

1.3 集成式自适应伺服控制设计

精密伺服控制已成为红外热像系统中必不可少的关键技术,自适应控制方法将其集成于成像电路是热成像电子学小型化、低功耗发展提出的要求。

对于连续变焦光学系统伺服控制系统,其能否准确快速地聚焦对于一个光学系统非常重要,聚焦的好坏直接影响热像仪的成像质量。但是由于机械运动的惯性或振动的存在,将导致调焦、变倍组对聚焦位置有一定程度的偏移。此外,当红外光学材料的折射率比较大,系统在较高温度和较低温度工作时,透镜就会发生形变,并且相关的机构和丝杆也会受到影响,偏离常温时候的机械定位值,造成热像仪调焦伺服机构特性改变,导致控制参数变化而引起成像的失焦效应以及因此造成的图像模糊。而这种现象可以通过采用自适应控制参数调整和温度补偿算法来解决。集成式自适应伺服控制是一个具有一定适应能力的系统,它能够认识环境条件的变化,并自适应校正控制动作,使小型化、高集成的系统达到最优或次优的控制效果。

连续变焦光学系统集成式自适应伺服控制系统(见图 5)是利用成像处理系统输出的图像质量信息为调整依据,通过自动改变光学组件之间的相对位置来实现焦距的变化,从而完成多个视场的成像^[15]。对于连续变焦光学系统集成式自适应伺服控制系统主要采用闭环控制方式,用直流力矩电动机作为执行元件,精密的直线式电位器作为位置反馈元件。在调焦过程中是以成像处理系统输出的图像质量信息为位置指令,通过电机带动调焦透镜的位置精确变化来实现焦距的变化。在连续调焦机构中的精密透镜是固定在一个刚性的机械支架上的,通过电机驱动一根带有光学镜头和支架的直线丝杆实现整个连续变焦光学系统自适应伺服控制^[15]。同时巧妙地把精密电位器的刷子固定在调焦透镜支架上,通过此电位器来实现镜头位置的实时性反馈,连续变焦光学系统一般需驱动两个镜组运动,使得变倍组与补偿组配合运动来实现连续变焦。

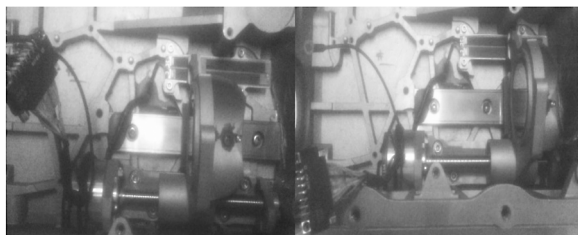


图 5 变焦光学系统伺服结构
Fig.5 Servo structure of zoom optical system

连续变焦光学控制系统由直流力矩电机、丝杆、基准面部件、带有光学透镜的支架、直线式电位计以及集成式自适应伺服控制系统组成,部分组成如图 6 所示。

连续变焦光学系统集成式自适应伺服控制系统的基本组成如图 6 所示,包括 FPGA 控制器、A/D 转换单元、电机驱动器、传感器、电机负载、FLASH、ROM。

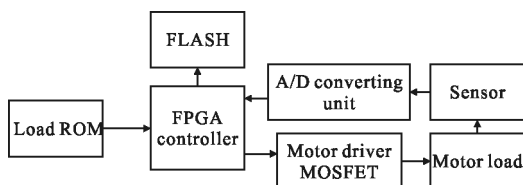


图 6 FPGA 控制系统结构图
Fig.6 Structure chart of FPGA control system

在连续变焦光学系统的集成式自适应伺服控制系统中,硬件主要由调焦机构和集成式的 FPGA 及相关电路做成电路板构成。其中以 FPGA 为核心控制器的集成式自适应伺服控制系统的闭环回路如图 7 所示。

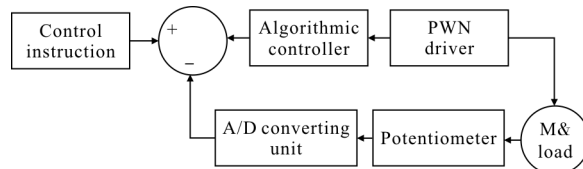


图 7 伺服控制系统闭环回路图
Fig.7 Closed-loop circuit diagram of servo control system

1.4 红外图像增强技术

红外成像系统由于其核心器件——红外探测器自身的限制以及环境等外界条件的影响,使获得的红外图像存在图像模糊、对比度较低、噪声严重等问题,不便于人眼观察,影响后续工作,有可能引起目标误判,甚至造成目标丢失。因此,在红外成像系统中电子处理学必须考虑图像增强算法设计,从而提高目标的识别度。在该热像仪中,对图像进行处理前,了解图像整体或局部的灰度分布情况,对图像的灰度级别进行分析,建立灰度直方图,通过图像灰度直方图,可以直观地看出系统图像中各个灰度级的分布情况,通过修正直方图的方法来增强图像,即通过直方图拉伸扩展其动态响应范围,提升图像对比度,这样可以将信号强弱反差较大的两个区域拉近,使得信号反差变小,原本被掩盖的区域目标细节被显现出来。

此外,在图像增强过程中,采用各类图像平滑算法消除噪声。一般说来,图像的能量主要集中在其低频部分,噪声所在的频段主要在高频段,同时图像边缘信息也主要集中在其高频部分,这样会导致原始图像在平滑处理之后,图像边缘和图像轮廓模糊的情况出现。该系统中,利用图像锐化技术,使图像的边缘变得清晰。经过平滑的图像变得模糊的根本原因是因为图像收到了平均或积分运算,因此可以对其进行逆运算(如微分运算),就可以使图像变得清晰^[16]。

一阶微分运算主要指梯度运算,图像的梯度模值包含了边界及细节信息。梯度膜算子用于计算梯度模值,它是边界提取算子,具有极值性、位移不变性和旋转不变性。图像 $f(x,y)$ 在点 (x,y) 处的梯度 $G[f(x,y)]$ 定义为一个二维列向量^[17],如公式(1)所示:

$$G[f(x,y)] = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (1)$$

梯度的模值为公式(2):

$$|G[f(x,y)]| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

由于图像为离散函数,可用差分代替微分,在 x, y 方向的一阶差分可以定义如下,见公式(3)、(4):

$$\nabla_x f(i,j) = f(i,j) - f(i-1,j) \quad (3)$$

$$\nabla_y f(i,j) = f(i,j) - f(i,j-1) \quad (4)$$

梯度定义如公式(5)所示:

$$G[f(x,y)] = [\nabla_x f(i,j) \nabla_y f(i,j)]^T \quad (5)$$

梯度的模值见公式(6):

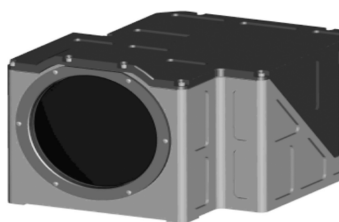
$$|G[f(x,y)]| = [(\nabla_x f(i,j))^2 + (\nabla_y f(i,j))^2]^{1/2} \quad (6)$$

由梯度的计算可知,当梯度值变化较大,说明图像灰度变化较大;当梯度值较小,灰度变化比较平缓;当梯度值为零时,则图像灰度达到均匀。因此可以根据得到的梯度值返回像素的值,加强梯度值大的像素灰度值就可以突出细节以达到图像退化的目的,从而实现图像边缘增强。

2 系统装配及性能测试

2.1 整机装配

该高性能连续变倍热像仪如图 8 所示。为了考



(a) 3D 模型图

(a) 3D model



(b) 实物照片

(b) Imager photograph

图 8 热像仪外形图

Fig.8 Outside view of the thermal imager

虑该热像仪的轻量化和小型化,在系统的 3D 设计中就考虑了大量的光机设计细节。因此,该热像仪包括光、机、电在内的总重量为 9.35 kg,三维尺寸为 340 mm(L)×280 mm(W)×190 mm(H)。

考虑到系统性能和成本,透镜的静态位置公差为 0.1 mm,在整个移动过程中的公差为 ±0.02 mm,透镜的公差都在 0.15%,公差曲线如图 9 所示。

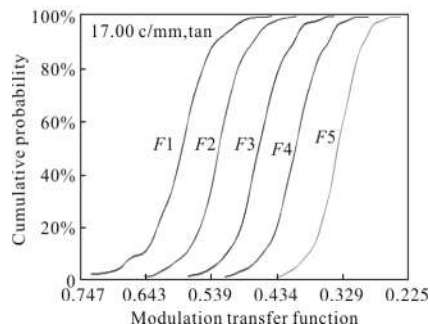


图 9 系统公差曲线图

Fig.9 System tolerance curve

此外,在大物镜的第一面镀了类金刚石膜,第二面镀高效增透膜,其平均透过率不小于 94%,其余透镜的每一面都镀了高效增透膜,每片透镜的平均透过率不小于 98%,整个系统透过率 ≥ 75%,所有光学透镜重 0.43 kg,见图 10。

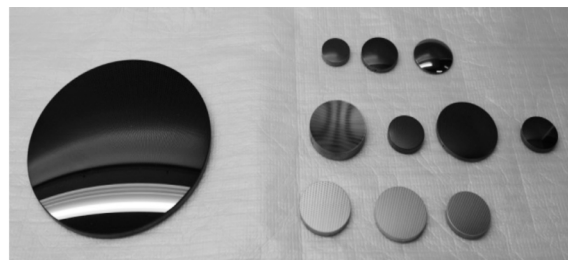


图 10 镀膜透镜组件

Fig.10 Coated lens component

2.2 系统性能测试

该连续变焦光学系统的轴上 MTF 的公差在理想值的 5% 以内,可以满足系统的性能。为了对成像质量进行全面评估和量化分析,以及与理论设计的对比,对该变焦系统进行 MTF 测试。表 2 提供了在系统在长焦 (NFOV)、中焦 (MFOV) 和短焦 (WFOV) 3 个位置。在总能量 50% 收集范围内,MTF 在截止频率 36 cycles/mm 处的测试值。图 11 给出了该热像仪在各个放大倍率处的图像。

表2 三个视场处的轴上 MTF 值
Tab.2 On-axis MTF characteristics
at three FOVs

	Diffraction -limitation MTF	Designed value	Toleranced value	Measured value
NFOV	0.35	0.33	0.315	0.32
MFOV	0.35	0.32	0.31	0.316
WFOV	0.35	0.3	0.28	0.296

为了系统评价该热像仪的性能,测试了其 MRTD,奈奎斯特频率(18 cycles/mrad)处的 MRTD 为 0.23 K,该测试结果证明了该热像仪具有优良的热分辨率。



图 11 连续变焦热像仪在不同倍率处 HDTV 成像图

Fig.11 HDTV imaging of continuous zoom thermal imager
at different magnification ratios

3 结 论

文中针对中波 640 pixel×512 pixel MCT 制冷型红外焦平面探测器(像元尺寸为 15 μm),采用机械补偿的光学变焦方式、单滑块、双导轨变焦结构模式、集成式伺服控制技术以及红外图像增强技术,充分考虑该热像仪的工程化设计,实现了 15~550 mm 范围内远距离车辆探测/识别中波连续变焦热像仪的样机设计及性能测试。采用小像元尺寸的 640 pixel×512 pixel(15 μm)像素的探测器比采用 320 pixel×240 pixel(30 μm)的探测器,在热像仪相同的外形尺寸要求下,前者比后者可以提高一倍的探测/识别距离,显著改善热像仪的探测和识别范围。该热像仪性能测试与仿真结果一致,性能优良,能够与小像元尺寸的高清晰中波红外探测器相匹配,应用于远距离识别光电系统中。

参考文献:

- [1] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1279-1281. (in Chinese)
- [2] Johnson R B, Allen Mann. Compact infrared zoom lens for the 3-5 μm spectral band [C]//SPIE, 1996, 2774: 181-192.
- [3] Thomas H Jamieson. Diffraction limited infrared zoom collimator [C]//SPIE, 1997, 3129: 284235.

- [4] Hyun Sook Kim, Hang Woo Kim, Seok Min Hong. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(7): 1661–1667.
- [5] Mark C Sanson, James Cornell. MWIR continuous zoom with large zoom rang [C]//SPIE, 2010, 7660: 1–12.
- [6] Wang Haitao. Cooled thermal imaging mid-wavelength infrared zoom camera[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(1): 8–11. (in Chinese)
- [7] Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng, et al. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(7): 1038–1043. (in Chinese)
- [8] Yang Weijin, Sun Qiang. Design of middle infrared continuous zoom system.[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2001, 3(2): 164–169. (in Chinese)
- [9] Zhang Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(1): 32–34 (in Chinese)
- [10] Li Yonggang, Zhang Bao, Ding Jinwei. Mechanism design of continuous infrared zoom lens [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2009, 32(1): 60–63. (in Chinese)
- [11] Chen Jinjin, Jin Ning. High resolution middle infrared continuous zoom optical system with large zoom range.[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2742–2747. (in Chinese)
- [12] Tao Chunkan. Zoom Optics System Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 45–48. (in Chinese)
- [13] Li Lin. The Design Method of Modern Optics System[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [14] Jin Ning. Analysis of narcissus effect in scanning infrared systems[J]. *Infrared Technology*, 1998, 20(3): 10–14. (in Chinese)
- [15] Zheng Jie, Chen Jie, Zhou Ligang. Model-free control of focus system in the infrared thermal imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 12–16. (in Chinese)
- [16] Wu Haibo, Liu Chao. Color image sharpening and processing based on Laplacian [J]. *Converter Computer Development and Application*, 2008, 21(9): 27–28. (in Chinese)
- [17] Zhu Caigao. Infrared Image Enhancement Algorithm and DSP Implementation [M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 11–12. (in Chinese)