

大变倍比大相对孔径连续变焦红外光学系统研制

于 洋^{1,2*}, 周潘伟^{1,2}, 潘兆鑫^{1,2}, 蹇毅^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 提出了一种新型连续变焦结构形式, 在现有经典四组元机械补偿变焦模型的基础上, 添加一个独立的变焦组, 利用二个变焦组级联的方式获得超大变倍比, 并推导了数学模型。在此基础上, 针对制冷型中波探测器, 研制了一套大变倍比大相对孔径连续变焦红外光学系统, 解决了大相对孔径红外变焦系统变倍比难以提高的问题。该光学系统工作波长 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 冷光阑效率 100%, 可实现从焦距 6 mm 至 330 mm 连续变焦, 在 F 数恒定为 2 的同时, 变倍比高达 55 倍。该系统仅包含八片镜片, 其中三片镜片独立运动实现变焦。设计结果显示, 该系统在 6 mm 至 330 mm 的焦距范围内, 变焦曲线平滑、像质良好。实验室测试和外场成像结果显示, 该系统在整个焦距范围内成像效果清晰, 达到设计要求, 验证了这种新型连续变焦数学模型的应用效果。

关键词: 光学系统; 连续变焦; 变倍比; 相对孔径

中图分类号: TN216 文献标识码: A

Realization of a continuous-zoom infrared optical system with high ratio and large relative aperture

YU Yang^{1,2*}, ZHOU Pan-Wei^{1,2}, PAN Zhao-Xin^{1,2}, JIAN Yi^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A new continuous zoom structure was described, and a new independent zoom group was added on the classical four-group-mechanical-compensation. And larger zoom ratio was achieved by the way of two zoom groups cascading. This mathematical model was deduced. Then, according to the cooled mid-wave infrared detector, a continuous-zoom infrared optical system with large zoom ratio and large relative aperture was designed. And the problem that it's hard for a zoom optical system to achieve both large zoom ratio and large relative aperture was solved. This optical system can zoom from 6 mm to 330 mm , which means it can reach 55x zoom ratio while the F number is 2 constantly. The working waveband was $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, the cold shield efficiency was 100%. It contains only eight lenses, three of them move in order to change the focal length. The result shows that the zoom curves are quite smooth and the image quality is quite good in the whole zoom range. The laboratory test and the out-door imaging experiment shows that the image quality is quite good in the whole zoom range. It proves the application effect of this new kind of zoom model, and shows that the system reaches its design goal.

Key words: infrared optical system, continuous zoom, large zoom ratio, large relative aperture

PACS: 42.15.Eq, 07.57.-c

收稿日期: 2018-04-16 修回日期: 2018-05-14

Received date: 2018-04-16 revised date: 2018-05-14

基金项目: 国家十三五国防预研项目 (Jzx2016-0404/Y72-2); 上海市现场物证重点实验室基金资助项目 (2017xewzk08); 中国科学院青年创新促进会 (2016220 资助); 中科院上海技术物理所三期创新项目 (CX-72)

Foundation items: Supported by the National 13 th Five Year Defense Preresearch Foundation (Jzx20160404/Y722), Shanghai Key Laboratory of Criminal Scene Evidence Funded Foundation (2017xewzk08), Innovative Special Foundation of Shanghai Institute of Technical Physics (CX-72)

作者简介 (Biography): 于 洋 (1984-), 女, 河南信阳人, 副研, 博士, 主要研究领域为红外光电成像技术与红外光学系统设计。E-mail: yuyang@mail.sitp.ac.cn

引言

红外成像是一种被动式成像技术,具有 24 小时全天候成像、隐蔽性好、探测性能高、抗干扰能力强等优势,在地面防空、侦察、搜索、跟踪、警戒等诸多领域得到了广泛的应用.近年来,随着红外光学技术的长足发展及其应用范围的不断扩展,红外定焦光学系统已不能满足一些特殊场合的应用,对红外连续变焦光学系统的需求不断增强^[1-3].

但是,与可见光变焦光学系统相比,一方面红外光学材料的种类有限,且材料口径等受限;另一方面,很多红外光学系统需要与制冷型红外探测器匹配,其出瞳位置不能随意更改,因此,红外变焦光学系统的设计限制多、设计难度更大.传统的红外变焦光学系统,其变倍比往往较低,很难实现大变倍比,尤其是同时具有大变倍比与大相对孔径于一体的红外变焦光学系统,更是很难实现.

2017 年,操超等人设计了一套变倍比为 36 倍,1 短焦部分 F 数为 2、长焦部分 F 数为 4 的非制冷长波连续变焦光学系统^[4].2014 年,周昊设计了一套变倍比为 30 倍、 F 数为 2 的中波连续变焦光学系统^[5].2017 年,杨明洋等人设计了一套变倍比达 80 倍、 F 数为 4 的中波连续变焦光学系统^[6].2010 年,Mark C Sanson 等人设计了一套变倍比为 30 倍、 F 数为 4.5 的中波连续变焦光学系统^[7].

现有的文献调研结果显示,很少见到同时实现了大相对孔径大变倍比的红外变焦光学系统,已公开发表的少数超大变倍比的变焦系统的 F 数大都为 4.而且在公开发表的介绍大变倍比红外变焦系统的文献中,大部分文献仅给出了理论设计结果,比较少见实物成像效果公开.

创新采用了二个独立变倍组加一个补偿组的新变焦型式,通过二个独立变倍组的级联,有效提高了系统的变倍比,实现了大相对孔径大变倍比的红外连续变焦.本文所研制的连续变焦红外光学系统,焦距变化范围从 6 mm 到 330 mm,变倍比达 55 倍,且 F 数恒定为 2,具有小 F 数大相对孔径、大变倍比、长焦距的特点.该系统与制冷型红外探测器配套,能实现 100% 冷光阑匹配,从而提高系统灵敏度,提升系统性能.

理论设计结果与实际内外场成像实验结果显示,本系统可以实现从短焦广角端到长焦端的完整焦距范围内的满意成像,成像质量良好,满足使用要求.

1 系统原理

为了突破实现大相对孔径高变倍比的设计目标,在经典四组元机械补偿型变焦系统的基础上^[8-9],本文在模型中增加了一个独立运动的变倍组,希望通过两个变倍组级联的方式,获得更大的变倍比,以及留有更多的自由度以便扩大相对孔径.这种新型变焦结构型式如图 1 所示.

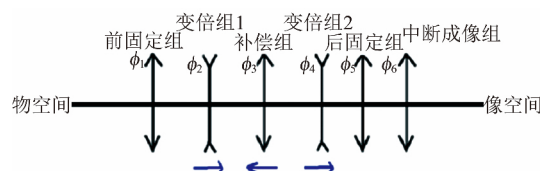


图 1 新型变焦结构型式
Fig. 1 New Zoom Model Structure

对于这种新型变焦结构形式,只需抽出运动组份 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 加以分析即可.由于变倍组 ϕ_2 的微小移动引起整个运动组份像面移动为: $m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2$, 两组份 ϕ_3 和 ϕ_4 的微小移动引起整个运动组份像面移动分别为: $m_4^2 (1 - m_3^2) d\Delta$ 和 $(1 - m_4^2) dq_4$, 那么为了保持像面稳定必须有:

$$m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2 + m_4^2 (1 - m_3^2) d\Delta + (1 - m_4^2) dq_4 = 0 \quad (1)$$

而各运动组份 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 的微分移动量 dq_2 、 $d\Delta$ 、 dq_4 与倍率变化 dm_2 、 dm_3 、 dm_4 之间的关系为:

$$dm_2 = -\frac{m_2^2}{f_2'} dl_2 \quad (2)$$

$$dq_2 = \frac{f_2'}{m_2^2} dm_2 \quad (3)$$

$$dq_4 = f_4' dm_4 \quad (4)$$

$$d\Delta = \frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f_2' dm_2 + \frac{f_3'}{m_3^2} dm_3 \quad (5)$$

将(3)、(4)、(5)代入(1),经整理可得新型变焦系统的变焦微分方程(或称运动方程)如下:

$$\frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f_2' dm_2 + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f_3' dm_3 + \frac{1 - m_4^2}{m_4^2} f_4' dm_4 = 0 \quad (6)$$

上式也可以写成下列形式:

$$\sum_i dL_i = 0 \quad (7)$$

方程(7)的含义即各运动组份共轭距的变化量之和为零.

对于方程(6),设 $U(m_2, m_3, m_4)$ 为原函数,则

有 $dU(m_2, m_3, m_4) = 0$, 则式(6)的通解为:

$$U(m_2, m_3, m_4) = f_2' \left(\frac{1}{m_2} + m_2 \right) + f_3' \left(\frac{1}{m_3} + m_3 \right) + f_4' \left(\frac{1}{m_4} + m_4 \right) = C \quad (8)$$

其中 C 为待定常量. 注意到:

$$m_{3l} = \frac{f_3'}{f_3' - d_{23l} + (1 - m_{2l}) f_2'} \quad (9)$$

$$m_{4l} = \frac{f_4'}{f_4' - d_{34l} + (1 - m_{3l}) f_3'} \quad (10)$$

代入起始条件:

$$m_2 = m_{2l}, m_3 = m_{3l}, m_4 = m_{4l} \quad (11)$$

得:

$$f_2' \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + f_3' \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} + m_3 - m_{3l} \right) + f_4' \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{4l}} + m_4 - m_{4l} \right) = 0 \quad (12)$$

补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 依然构成同之前经典四组元推导一样形式的二次方程:

$$m_3^2 - b m_3 + 1 = 0 \quad (13)$$

其中系数 b 为:

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) - \frac{f_4'}{f_3'} \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{4l}} + m_4 - m_{4l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (14)$$

解得两根为:

$$\left. \begin{aligned} m_{31} &= \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

第一步, 由式(6), 对 q_2 由零积到 q_2 , 对 m_2 由 m_2 积到 m_{2l} 得:

$$\int_0^{q_2} dq_2 = \int_{m_2}^{m_{2l}} \frac{f_2'}{m_2^2} dm_2 \quad (16)$$

由公式 $\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + c$ 可知, 式(16)可化为:

$$q_2 = f_2' \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} \right) \quad (17)$$

整理后可得:

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} + \frac{q_2}{f_2'}} \quad (18)$$

从此式可以看出, 只要给定变倍组 ϕ_2 的移动量 q_2 就能解得它的倍率 m_2 .

第二步, 由于本系统含三组独立运动的镜组, 则

由式(3)和(4)积分得:

$$m_4 = m_{4l} - \frac{q_4}{f_4'} \quad (19)$$

第三步, 将(18)和(19)求得的 m_2 和 m_4 代入式(14)便可求出系数 b , 从而解得 m_{31} 和 m_{32} .

第四步, 由式(5)积分得:

$$\Delta = f_3' \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} \right) - q_2 + f_2' (m_2 - m_{2l}) \quad (20)$$

由此式可解得为了补偿变倍组 ϕ_2 和 ϕ_4 各自作 q_2 和 q_4 的移动量所引起的像面位移所必须有的补偿量 Δ .

在上述推导的基础上, 可以求出系统的变焦比为:

$$\Gamma = \frac{m_{2l} m_{3l} m_{4l}}{m_2 m_3 m_4} \quad (21)$$

由此即可判断是否达到变焦比, 若没有的话, 继续增加 q_2 和 q_4 , 直到达到变焦比为止. 达到了变焦比的要求之后, 当前位置即为短焦位置, 即

$$m_{2s} = m_2, m_{3s} = m_3, m_{4s} = m_4, q_{2s} = q_2, q_{4s} = q_4, \Delta_{3s} = \Delta_3 \quad (22)$$

根据上述模型, 利用式(18)、(19)、(14)、(15)、(13)和(20), 可解得各组份的运动情况与光焦度分配关系.

2 光学系统设计

2.1 系统参数

在上述模型分析的基础上, 实际设计了一套变倍比达 55 倍且 F 数恒定为 2 的连续变焦红外光学系统. 实际变焦系统的参数如表 1 和表 2 所示. 根据前面的理论推导, 计算出系统所需的光焦度搭配组合为: 前固定组焦距 f_1' 为 186.5 mm, 变倍组 1 焦距 f_2' 为 -49.8 mm, 补偿组焦距 f_3' 为 83.4 mm, 变倍组 2 焦距 f_4' 为 -23.3 mm, 后固定组焦距 f_5' 为 -26.1 mm. 将这些值作为初始约束代入 ZEMAX 优化, 经过反复调整和增减镜片, 得到的最终系统光路图如图 2 所示.

表 1 探测器参数

Table 1 Focal plane array parameters

Pixel number	640 × 512
Pixel size	15 μm × 15 μm
Spectral range	3.7 μm ~ 4.8 μm
F number	2
Type	Cooled FPA

表 2 光学系统参数

Table 2 Optical system parameters

Focal length	6 mm-330 mm
Field of view (FOV)	91.4°-2.1°
Zoom Ratio	55x
Entrance pupil diameter	3 mm-165 mm
F number	2
Note1	100% cold-shield match
Note2	continuous zoom

2.2 光学系统设计结果

系统光路图如图 2 所示。

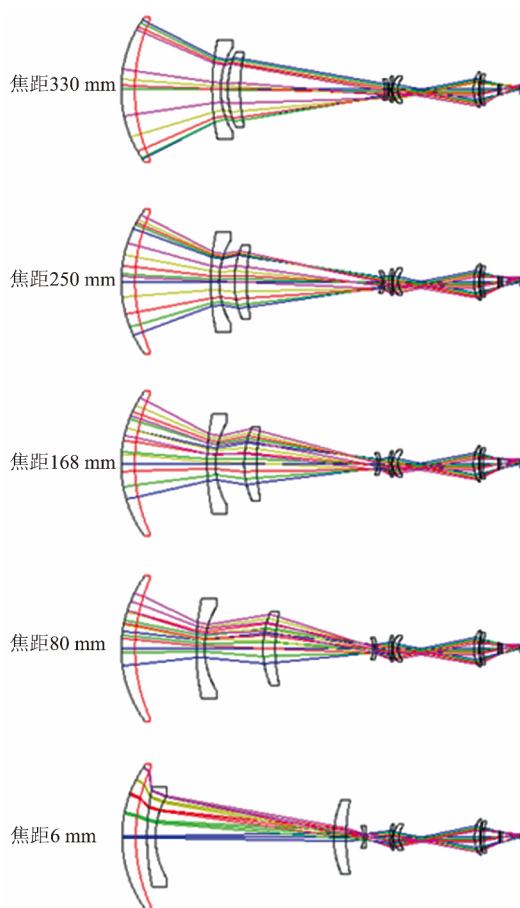


图 2 光学系统光路图

Fig. 2 Optical system layout

在图 2 中,从上到下依次为从长焦经中焦到短焦的系统光路图。每幅图中从左至右依次: 镜片 1 是前固定组, 镜片 2 是变倍组 1, 镜片 3 是补偿组, 镜片 4 是变倍组 2, 镜片 5~6 是后固定组, 镜片 7~8 是中继成像镜组。

其中, 正光焦度的前固定组用于会聚收集光线, 以便压缩后组镜片尺寸, 并校正大孔径带来的相关像差。系统在口径最大的前固定组中避免了使用非球面及衍射面, 以便采用较为成熟简单的加工工艺、

保证精度的同时降低加工成本。

变倍组 1 和变倍组 2 均为负光焦度的锗透镜, 利用锗材料高色散、高折射率的特性, 承担改变光焦度的主要功能。在变倍过程中, 变倍组 1 和变倍组 2 由像方向物方移动, 实现由长焦向短焦的改变。通过二个变倍组级联的方式, 可有效扩大系统的变倍比, 获取大变倍比的变焦系统。

补偿组为正光焦度的硅透镜, 在从长焦向短焦的变焦过程中, 向探测器方向移动, 利用硅材料低色散、高折射率的特性, 主要用于与变倍组的锗材料互补, 实现消除色差以及补偿本系统在变焦过程中产生的像差, 保证在整个变焦过程中共轭距不变, 实现最终像面位置的补偿。

中继成像镜组将系统的孔径光阑再次成像到探测器的冷光阑处, 以便实现 100% 冷光阑匹配, 降低背景噪声的影响, 提高系统响应灵敏度。

本系统使用硅和锗二种材料进行搭配, 正光焦度镜片使用硅材料, 负光焦度镜片使用锗材料, 经验表明, 这种硅锗搭配的设计方案可使色差有效减小。另外, 本系统还引入了高次非球面和二元衍射元件, 以便给系统设计提供更多的自由度, 有助于球差、色差、像散等像差的消除, 扩大相对孔径。设计结果表明, 非球面和二元衍射面的引入, 可以有效减轻系统质量, 缩小系统体积, 减少镜片数目。

经优化设计, 本系统仅由八片透镜组成, 材料均为硅和锗, 镜片总重量 1 700 克。镜头本身总长恒定为 418 mm, 从镜片一至探测器焦平面距离为 460 mm, 最大镜片口径 168 mm。在整个变焦过程中, 系统 F 数恒定为 2。由于系统变倍比极大, 且为大相对孔径系统, 因此光学系统设计难度极大。

由于二元衍射元件的色散特性与普通红外折射材料的正好相反, 可互相抵消; 另外, 二元衍射元件本身不产生场曲, 还可以校正大视场畸变^[9-11]。因此, 为了消除色差及其它像差的影响, 进一步提升像质, 本系统在后固定组和中继成像镜组中使用了两个二元衍射面。

对于二元衍射元件, 需要首先确定其中心波长、材料折射率、衍射级次, 然后分析其台阶深度、衍射环带半径、衍射效率等参数, 以便判断该元件是否可以加工。其中, 台阶深度可按下式计算:

$$\Delta = d_{\max} = \frac{\lambda}{N_0 - 1} \quad (23)$$

本文例中, 材料折射率 $N_0 = 4.02278$, 中心波长 $\lambda = 4.2 \mu\text{m}$, 则台阶深度可算出为 $\Delta = 1.389 \mu\text{m}$ 。

对于二元衍射元件而言,衍射效率是非常关键的指标.对于表面连续浮雕结构的衍射面 m 级衍射光的衍射效率与波长的关系为^[12]:

$$\eta_m(\lambda) = \text{sinc}^2\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m\right) = \frac{\sin^2\left[\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m\right)\right]}{\left[\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m\right)\right]^2} \quad (24)$$

基于上述公式,分析了所使用的衍射元件在工作波段内的衍射效率的影响,按中心波长 $4.2 \mu\text{m}$,波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,1 级衍射级次的条件,二个衍射元件在整个工作波段内,衍射效率普遍在 94% 以上,满足系统需求.

2.3 光学系统像质评价

系统 MTF 曲线图和点列图如图 3 所示.

从图 3 变焦光学系统的像质评价图中可见,本系统在大部分焦距位置的中心视场 MTF 曲线,在奈奎斯特频率 33 lp/mm 的数值都在 0.5 以上,短焦端略有下降,但仍然达到了 0.4,各轴外视场的 MTF 曲线相比轴上视场仅略有下降,因此认为整体像质水平良好.

2.4 变焦曲线

系统变焦曲线如图 4 所示.在图 4 中,从下至上的三条曲线依次是变倍组 1(镜片 2)、补偿组(镜片 3)、变倍组 2(镜片 4)的运动轨迹.图 4 中,横轴代表系统焦距,纵轴代表镜组移动距离.由图 4 可见,本系统的三组运动组元的变焦曲线平滑流畅,变倍组 1 的最大行程为 76.42 mm ,补偿组的最大行程为 121.12 mm ,变倍组 2 的最大行程为 25.88 mm ,三组运动组元的运动曲线均平滑流畅,没有明显拐点,易于工程实现.

3 实验结果

将所设计的大相对孔径大变倍比红外变焦光学系统进行了实际加工装调,并拍摄了远处的城市楼房外景成像图片.外景成像结果如图 5 所示.

在广角端如图 5(a),能看到远处城市景像全貌,获得大空域成像视野.在长焦端如图 5(i),能将广角端完全看不清楚的细节物体放大观察.比如图 5(i)显示了在焦距 330 mm 的长焦位置,观察远处的建筑工地,除了能看清楚探照灯、楼房窗户之外,连脚手架的细钢筋都能清晰成像.

在从短焦到长焦的变焦过程中,比如图 5(b)、(g)、(h)依次对远方某大楼进行了变焦放大成像,

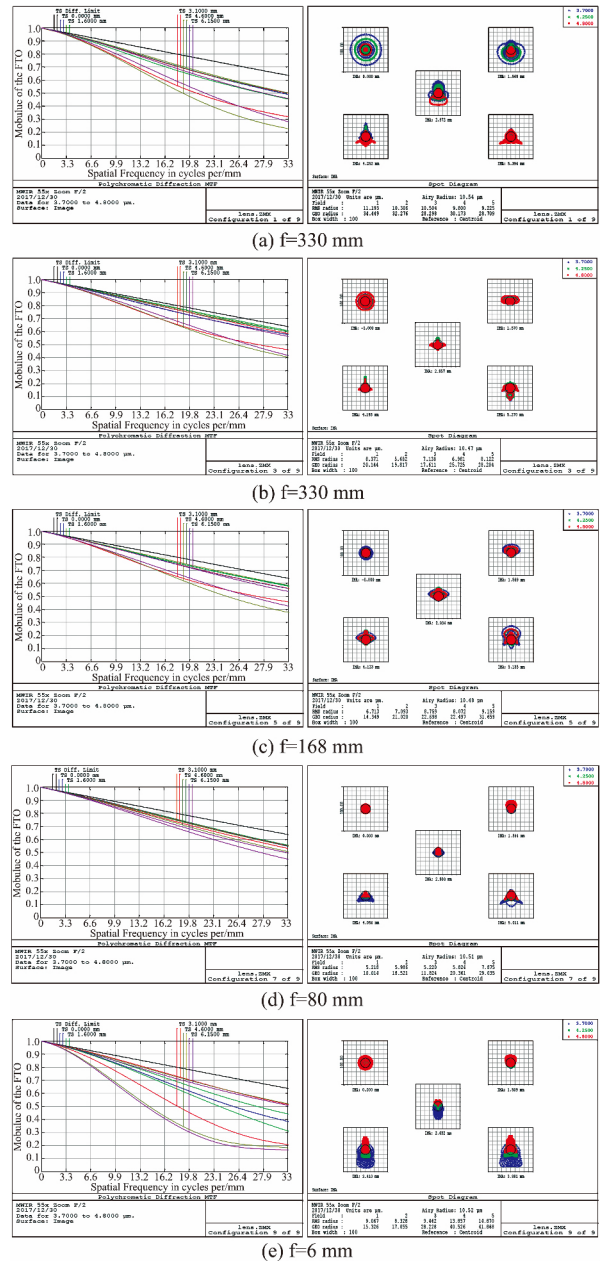


图 3 光学系统像质评价图
Fig.3 Optical system MTF and spot diagrams

像质保持清晰;又比如图 5(e)、(g)、(i)依次显示了对远处某工地的脚手架钢筋细节的变焦观察效果,放大率逐渐增大,像质依然良好.

由上可见,从焦距 6 mm 的广角端,至焦距 330 mm 的长焦端,该系统均能对外场景物实现较为清晰的成像.

4 结语

综上,研制成功了一套 F 数恒定为 2 且变倍比高达 55 倍的中波红外连续变焦成像系统,变焦曲线

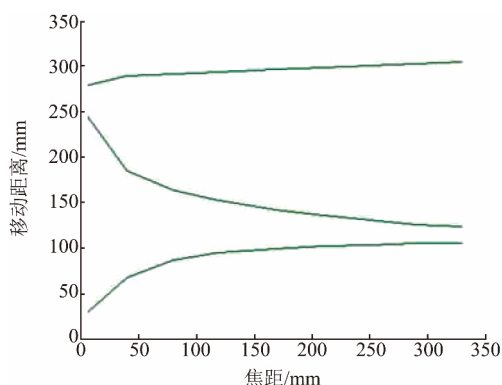


图4 系统变焦曲线图

Fig.4 Optical system cam curves

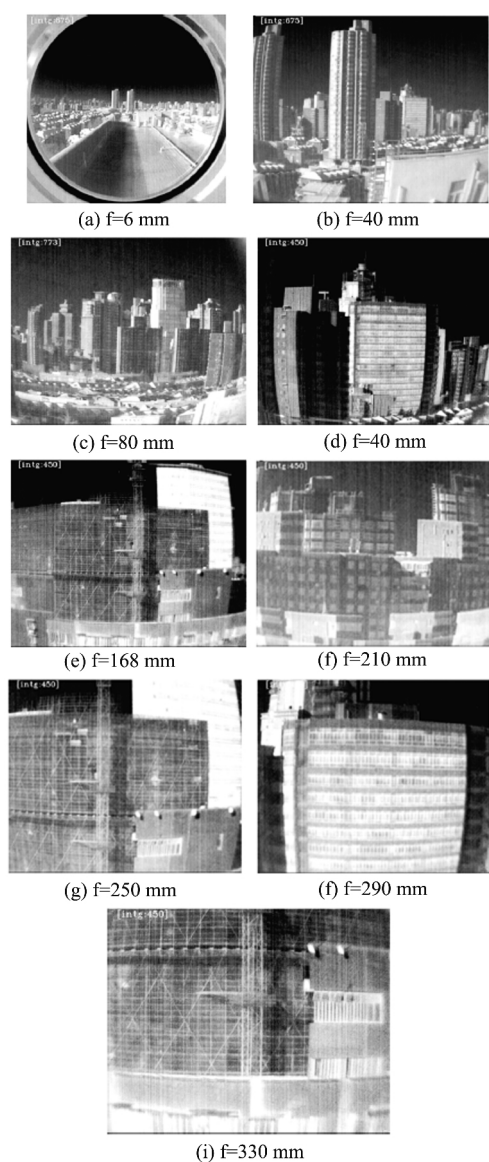


图5 外场成像图片

Fig.5 Out-door imaging results

效果优良。

在经典机械四组元变焦模型理论的基础上,增加了1个独立变倍组,通过2个变倍组加1个补偿组的新型变焦型式,获取更高的变倍比,光学系统设计结果以及实际成像效果图显示,这套设计方法是行之有效的。

该研究成果,可推广应用到下一代红外搜索跟踪系统中,使系统既能随时根据需要切换成更小的视场,获得更远的探测距离、对重点目标以更高的分辨率成像;又能随时恢复成更大的视场搜索或者凝视成像,实现更大的空域警戒覆盖,更及时地发现感兴趣目标,缩短系统反应时间。该技术在防空、搜索、跟踪、侦察以及警戒等诸多领域都有良好的应用价值。

References

- [1] GAO Hong-yun, XIONG Tao, YANG Chang-cheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optical and Precision Engineering* (郝洪云,熊涛,杨长城.中波红外连续变焦光学系统) 2007, **15**(7): 1038-1043.
- [2] BAI Yu, XING Ting-wen, JIANG Ya-dong. Advances in infrared spectrum zoom imaging system research [J]. *Spectroscopy and spectral analysis* (白瑜,邢廷文,蒋亚东.国外红外光谱连续变焦成像系统的研究进展,光谱学与光谱分析) 2014, **34**(12): 3419-3423.
- [3] Kim H S, Kim C W, Hong S M. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20: 1 zoom range and automatic athermalization [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(7): 1661-1667.
- [4] CAO Chao, LIAO Zhi-yuan, BAI Yu, et al. A new compound zoom optical system [J]. *Acta optica sinica* (操超,廖志远,白瑜,等.一种新型复合变焦光学系统.光学学报) 2017, **37**(11): 1108001-1 ~ 1108001-7.
- [5] ZHOU Hao. Study on midwave infrared continuous zoom optical system with a large zoom range [D]. *Changchun: Changchun Institute of optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences* (周昊.高变焦比中波红外连续变焦光学系统研究,长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 2014.
- [6] YANG Ming-yang, YANG Hong-tao, QU Rui, et al. Design of high ratio middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica* (杨明洋,杨洪涛,曲锐等.80倍中波红外连续变焦光学系统设计.光子学报) 2017, **46**(5): 0522003-1 ~ 0522003-7.
- [7] Sanson M C, Cornell J. MWIR Continuous zoom with large zoom range [C]. *Proc. SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVI* 2010, **7660**: 1-12.
- [8] TAO Chun-kan. Design of zoom optical system [M]. *Beijing: National Defense Industry Press* (陶纯勘.变焦距光学系统设计,北京:国防工业出版社) 1988.
- [9] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics [M]. *Beijing: China Machine Press* (郁道银,谈恒英.工程光学,北京:机械工业出版社) 2006.

(下转第90页)

平滑,在从6 mm至330 mm的焦距范围内实测成像

- reduction of graphene oxide by zinc powder at room temperature [J]. *Carbon*, 2011, **49**(15): 5389-5397.
- [66] Dey R S, Hajra S, Sahu R K, *et al.* A rapid room temperature chemical route for the synthesis of graphene: metal-mediated reduction of graphene oxide [J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2012, **48**(12): 1787-1789.
- [67] Kumar N A, Gambarelli S, Duclairoir F, *et al.* Synthesis of high quality reduced graphene oxide nanosheets free of paramagnetic metallic impurities [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, **1**(8): 2789-2794.
- [68] Liu Y Z, Li Y F, Zhong M, *et al.* A green and ultrafast approach to the synthesis of scalable graphene nanosheets with Zn powder for electrochemical energy storage [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, **21**(39): 15449-15455.
- [69] Feng H, Cheng R, Zhao X, *et al.* A low-temperature method to produce highly reduced graphene oxide [J]. *Nature Communications*, 2013, **4**(2): 1539.
- [70] Yang S, Yue W B, Huang D Z, *et al.* A facile green strategy for rapid reduction of graphene oxide by metallic zinc [J]. *RSC Advances*, 2012, **2**(23): 8827-8832.
- [71] Muszynski R, Seger B, Kamat P V. Decorating graphene sheets with gold nanoparticles [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, **112**(14): 5263-5266.
- [72] Shin H J, Kim K K, Benayad A, *et al.* Efficient Reduction of Graphite Oxide by Sodium Borohydride and Its Effect on Electrical Conductance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, **19**(12): 1987-1992.
- [73] Chen W, Yan L, Bangal P R. Chemical Reduction of Graphene Oxide to Graphene by Sulfur-Containing Compounds [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, **114**(47): 19885-19890.
- [74] Zhou M, Wang Y, Zhai Y, *et al.* Controlled synthesis of large-area and patterned electrochemically reduced graphene oxide films [J]. *Chemistry*, 2009, **15**(25): 6116-6120.
- [75] Dubin S, Gilje S, Wang K, *et al.* A one-step, solvothermal reduction method for producing reduced graphene oxide dispersions in organic solvents [J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(7): 3845-3852.
- [76] Chen W F, Yan L F, Bangal P R. Preparation of graphene by the rapid and mild thermal reduction of graphene oxide induced by microwaves [J]. *Carbon*, 2010, **48**(4): 1146-1152.
- [77] Williams G, Seger B, Kamat P V. TiO₂-graphene nanocomposites. UV-assisted photocatalytic reduction of graphene oxide [J]. *ACS Nano*, 2008, **2**(7): 1487-1491.
- [78] Voiry D, Yang J, Kupferberg J, *et al.* High-quality graphene via microwave reduction of solution-exfoliated graphene oxide [J]. *Science*, 2016, **353**(6306): 1413-1416.
- [79] Maiti R, Manna S, Midya A, *et al.* Broadband photore-sponse and rectification of novel graphene oxide/n-Si heterojunctions [J]. *Opt Express*, 2013, **21**(22): 26034-26043.
- [80] Karteri I, Karatas S, Yakuphanoglu F. Photosensing properties of pentacene thin film transistor with solution-processed silicon dioxide/graphene oxide bilayer insulators [J]. *Journal Of Materials Science-Materials In Electronics*, 2016, **27**(5): 5284-5293.
- [81] Li S S, Tu K H, Lin C C, *et al.* Solution-Processable Graphene Oxide as an Efficient Hole Transport Layer in Polymer Solar Cells [J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(6): 3169-3174.
- [82] Wang P, He F L, Wang J, *et al.* Graphene oxide nanosheets as an effective template for the synthesis of porous TiO₂ film in dye-sensitized solar cells [J]. *Applied Surface Science* 2015, **358**: 175-180.
- [83] Liu S, Wu X, Zhang D, *et al.* Ultrafast Dynamic Pressure Sensors Based on Graphene Hybrid Structure [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, **9**(28): 24148-24154.
- [84] Huang Z, Zhou A, Wu J, *et al.* Bottom-Up Preparation of Ultrathin 2D Aluminum Oxide Nanosheets by Duplicating Graphene Oxide [J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(8): 1703-1708.
- [85] Bardhan N M, Kumar P V, Li Z, *et al.* Enhanced Cell Capture on Functionalized Graphene Oxide Nanosheets through Oxygen Clustering [J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(2): 1548-1558.
- [86] Ren F, Wang H, Zhai C, *et al.* Clean method for the synthesis of reduced graphene oxide-supported PtPd alloys with high electrocatalytic activity for ethanol oxidation in alkaline medium [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2014, **6**(5): 3607-3614.
- [87] Madadrang C J, Kim H Y, Gao G, *et al.* Adsorption behavior of EDTA-graphene oxide for Pb(II) removal [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2012, **4**(3): 1186-1193.
- [88] Perez J V D, Nadres E T, Nguyen H N, *et al.* Response surface methodology as a powerful tool to optimize the synthesis of polymer-based graphene oxide nanocomposites for simultaneous removal of cationic and anionic heavy metal contaminants [J]. *RSC Advances*, 2017, **7**(30): 18480-18490.
- [89] Jiang Y, Shao H, Li C, *et al.* Versatile Graphene Oxide Putty-Like Material [J]. *Advanced materials*, 2016, **28**(46): 10287-10292.

(上接第 60 页)

- [10] NONG Wen-jie, JIN Ning. Evaluation of Binary Optics Manufacturing Parameters [J]. *Infrared Technology (农文捷, 金宁. 二元光学工艺参数计算. 红外技术)* 2004, **26**(6): 13-16.
- [11] DING Xue-zhuan, WANG Xin, LAN Wei-hua, *et al.* Design of Re-imaging MIR Optical System Employing Refrac-

tive and Diffractive Optical Elements [J]. *Infrared Technology (丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 二次成像中波红外折射衍射光学系统设计. 红外技术)* 2009, **31**(8): 450-457.

- [12] Buralli D A, Morris G M, Rogers J R. Optical performance of holographic kinoforms [J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(5): 976-983.