

国外高变焦比中波红外镜头的研究进展

白 瑜^{1,2,3}, 邢廷文¹, 李 华¹, 蒋亚东², 冯 成⁴

- (1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国南玻集团成都南玻玻璃有限公司, 四川 成都 610200)

摘 要: 与红外定焦镜头和红外两档变焦镜头相比, 红外连续变焦镜头具有连续可变的视场, 可对目标进行连续的跟踪, 是未来红外成像技术的发展方向。随着光学冷加工、精密机械加工、镀膜技术等工艺水平的不断进步, 以及现代科技的发展要求, 红外变焦镜头向高变焦比方向发展, 同时还须保持良好的成像和消热差性能。概述了国外各种高变焦比中波红外镜头的结构和设计方法, 包括 20×高变焦比中波红外镜头、30×高变焦比中波红外镜头、300×高变焦比中波红外镜头, 总结了一套高变焦比中波红外镜头设计经验, 对国内高变焦比中波红外镜头的应用发展研究有借鉴价值。

关键词: 应用光学; 光学设计; 红外光学; 中波红外; 变焦镜头

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0795-08

Advances in foreign MWIR lens with high ratio

Bai Yu^{1,2,3}, Xing Tingwen¹, Li Hua¹, Jiang Yadong², Feng Cheng⁴

- (1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Chengdu Glass Comppany Limited, CSG, Chengdu 610200, China)

Abstract: Compared with the infrared fixed focal length lens and infrared dual-zoom lens, infrared zoom lens which has continuous variational field of view can track targets sequentially, so it is a research direction in infrared imaging technology. With the development of optical process, mechanism process, optical film coating, it is needed for infrared zoom lens not only has high ratio, but also has good athermalized and imaging performance. The configuration and design method of foreign MWIR lens with high ratio including MWIR lens with 20× ratio, MWIR lens with 30× ratio, MWIR lens with 300× ratio were presented. A set of design experience for MWIR lens with high ratio was summarized, which is useful for the application and development of chinese MWIR lens with high ratio.

Key words: applied optics; optical design; infrared optics; mid-wavelength infrared; zoom lens

收稿日期: 2014-07-10; 修订日期: 2014-08-20

基金项目: 国家 863 计划; 国家自然科学基金(10874181)

作者简介: 白瑜(1982-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事光电仪器总体设计、红外探测、光电信息处理方面的研究。

[Email: baiyu91258@163.com](mailto:baiyu91258@163.com)

导师简介: 邢廷文(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学仪器研制等方面的研究。 [Email: xtw@ioe.ac.cn](mailto:xtw@ioe.ac.cn)

蒋亚东(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理等方面的研究。 [Email: jiangyd@uestc.edu.cn](mailto:jiangyd@uestc.edu.cn)

0 引言

红外探测系统具有被动工作方式、环境适应性好、隐蔽性好、抗干扰能力强,能在一定程度上识别伪装目标,且设备体积小、质量轻、功耗低等特点,同时由于红外探测具有较强的穿透烟、雾、霾、雪、尘埃等限制的能力,且它是根据目标和背景间的温差和发射率差异来进行目标探测,其识别伪装的能力比可见光系统强,因此广泛应用于红外热像仪、航空吊舱、无人机遥感、光电经纬仪、天文观测、卫星对地观测设备、空间目标识别设备、地面成像设备、舰载成像设备等系统中,受到众多相关科研人员的关注^[1-4]。

红外定焦系统只能在某一视场范围内探测目标,红外两档系统拥有窄视场和宽视场两个视场,通过在两个视场间切换来实现用不同的视场搜索和观察目标的目的,但该类系统在视场切换时会丢失目标,导致其对快速运动目标的搜索和捕获能力有限。红外连续变焦系统不仅能够在大视场范围内跟踪和搜索目标,而且可以在小视场范围内捕获和观察目标,它较好地兼顾了系统对目标的捕获、跟踪、监视与标定。

随着光学冷加工、精密机械加工、镀膜技术等工艺水平的不断进步以及现代科技的发展要求,红外变焦镜头向高变焦比方向发展,同时还须保持良好的成像和消热差性能。由于反射式红外变焦镜头结构不容易实现变焦比,因此文中主要介绍了国外各种高变焦比折射式中波红外镜头的结构和设计方法,总结了一套高变焦比中波红外镜头设计经验,随着高折射率红外玻璃和新型低温度折射率系数红外玻璃的不断开发、计算机辅助加工技术的进步、工艺水平的不断提高,结合作者总结的高变焦比中波红外镜头设计经验,对于国内高变焦比中波红外镜头在提高变焦比、改善成像质量和小型轻量化方面有一定的指导意义。

1 20×高变焦比中波红外镜头

加拿大的光学专家 R. L. Sinclair 等人设计了一款变焦比为 20×的中波红外变焦距镜头^[5],该镜头采用中波制冷型 320×240 凝视型焦平面探测器,探测器像元尺寸为 30 μm×30 μm, F 数为 4.0, 20×中波

红外变焦镜头设计指标如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Tab.1 Optical design parameters

Item	Value
Wavelength range/μm	3.3-4.9
Zoom ratio	20×
F - number	4.0
Image plane diagonal/mm	12
Pixel size/μm	30
Aperture/mm	150

中波红外高变焦比镜头的设计需要系统的 F 数尽可能大,但同时还必须保证系统所成像的分辨率和系统的灵敏度不被严重影响,如图 1 所示,设计者在借助分析 F 数与分辨率和灵敏度的关系基础上确定了表 1 的光学性能指标。

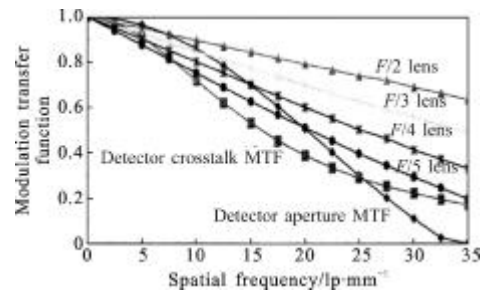


图 1 不同 F 数镜头传递函数和空间频率的关系

Fig.1 Relation of MTF with different F-number and spatial frequency

如图 2 所示,该系统由前固定组、变焦组、补偿组、后固定组组成,各个组分的光焦度分别为正、负、

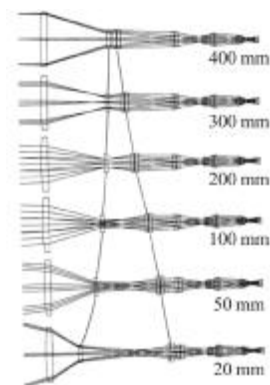


图 2 20×中波红外变焦镜头

Fig.2 MWIR zoom lens with 20× ratio

正、正,系统采用正组机械补偿的方法来补偿像面漂移的目的是为了减小系统总长,前固定组、变焦组均为单透镜,补偿组为两片分离的单透镜,后固定组由七片单透镜构成,其中五片位于中间像面之后。为了减小前固定组镜子的口径同时保证 100%的冷屏匹配,系统采用了二次成像技术,系统总长为 429 mm。

为了减小系统整体尺寸,在后固定组和中间像面之间加两片反射镜对光路进行折转,如图 3 所示,折转后包括探测器在内的系统总长小于 300 mm。为了简化整个系统的光机设计并提高成像性能,前固定组和变焦组中的单透镜均使用了一个衍射面。

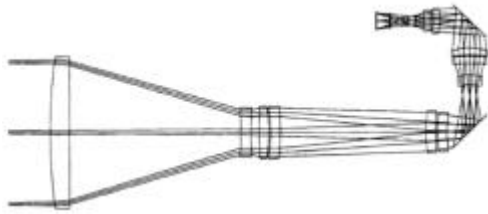


图 3 20×中波红外变焦镜头长焦 400 mm 位置的折叠结构
Fig.3 Folded configuration in f=400 mm of MWIR zoom lens with 20× ratio

韩国的 Hyun Sook Kim 等人设计了一款用于红外相机的 20×变焦中波红外变焦距镜头^[6],该镜头的设计指标如表 2 所示,图 4 为该镜头的 MTF 曲线。

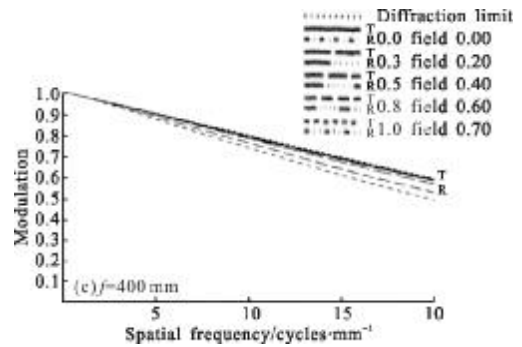
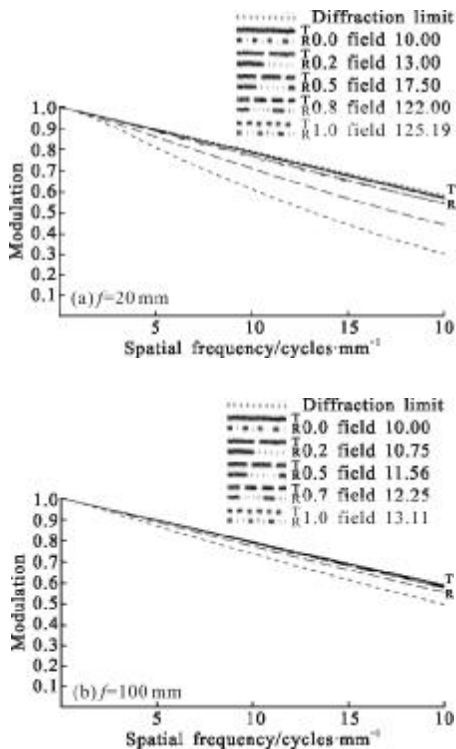


图 4 20×中波红外变焦系统传递函数曲线
Fig.4 MTF of MWIR zoom lens with 20× ratio

表 2 光学设计指标

Tab.2 Optical design parameters

Item	Value
Wavelength range/ μm	3.7-4.8
Zoom ratio	20×
F-number	2.5
Image plane diagonal/mm	12
Pixel size/ μm	30
Transmission	>70%

系统焦距从 13.75 mm 连续变化到 275 mm,如图 5 所示,系统由前固定组(Group 1)、变焦组(Group 2)、

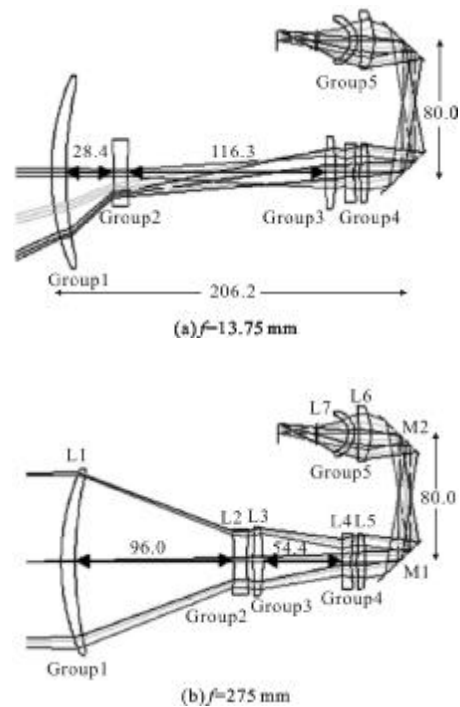


图 5 20×中波红外相机镜头
Fig.5 MWIR camera lens with 20× ratio

补偿组(Group 3)、后固定组(Group 4、Group 5)组成, Group 1 使用一片正透镜, Group 2 使用一片负透镜来实现高变焦, Group 3、Group 4 和 Group 5 来保证各个焦距位置的齐焦性。

在中波红外波段,硅材料色散系数低,锗材料有相对较高的色散系数,可以在系统中通过硅、锗光焦度的合理搭配来校正色差。该系统中除 Group 2 的材料选用锗外,其他各组均选用价格更便宜的硅材料。为了保证 100% 的冷屏效率并减小前固定组口径,采用了二次成像技术,最终 Group 1 透镜的口径为 110 mm,系统整机质量小于 6 kg。利用两个反射镜对光路进行折转,从而缩短了整个光学系统的横向尺寸,最终系统整机空间尺寸为 240 mm(L)×130 mm(W)×200 mm(H)。

最终系统在整个变焦过程中的光学性能接近衍射极限,如图 6 所示。采用二维微扫描来提高空间分辨率,在空间频率为 6 cycles/mm 时的 MRTD 为 0.3°,采用机械主动补偿方式来改善温度带来的像面漂移,为了减轻质量,没有使用专门的调焦装置,直接用变倍组与补偿的移动来进行补偿,从而进一步缩小了系统的尺寸。

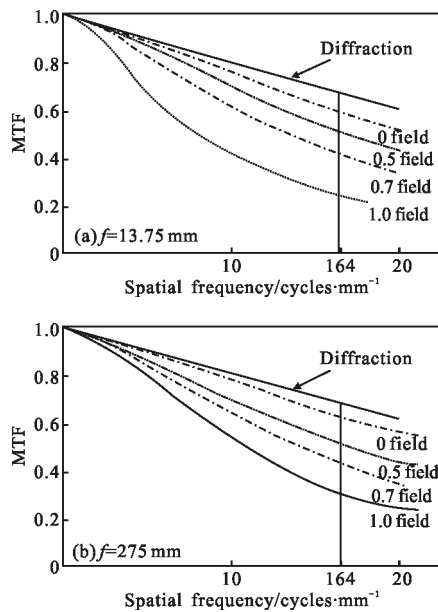


图 6 20×中波红外相机镜头传递函数曲线
Fig.6 MTF of MWIR camera lens with 20× ratio

2 30×高变焦比中波红外镜头

美国 Corning 公司的 Mark C. Sanson 等人设计

了一款变焦比为 30×的中波红外变焦距镜头^[7],该镜头采用中波制冷型 320×256 凝视型焦平面探测器,探测器像元尺寸为 30 μm×30 μm, F 数为 4.5, 30×中波红外变焦镜头设计指标如表 3 所示。

表 3 光学设计指标

Tab.3 Optical design parameters	
Item	Value
Wavelength range/μm	3-5
Zoom ratio	30×
F-number	4.0
Image plane diagonal/mm	12.3
Pixel size/μm	30
Distortion	<0.5%
Temperature/°C	-40-60
Transmission	>70%

如图 7 所示,系统由前固定组、变焦组、补偿组、后固定组组成,为了抑制 Nacissus 冷像并减小系统质量,前固定组使用一片透镜,变焦组使用两片光焦度分别为负、正的分离透镜来实现高变焦成像,补偿组使用三片透镜组成,焦距从 15.25 mm 连续变化到 456 mm,焦距变化范围较宽且长焦距较大,各个变焦位置的像面漂移较大,因此后固定组使用了五片透镜。为了减小系统的最大口径和入瞳口径,满足 100%冷光阑效率,保证镜头的轻量化、小型化,系统使用了三次成像技术,一次像面之前只有三个组元,有效抑制了第一片透镜的口径,最终第一片透镜的口径为 120 mm,系统总长为 353 mm,系统变焦比较大,为了校正轴外像差和长焦位置的色差,采用八个非球面和一个衍射面来提高成像质量。

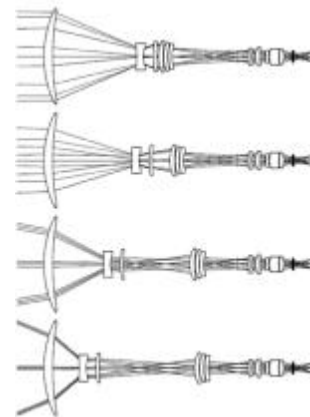


图 7 30×中波红外变焦系统结构图
Fig.7 Schematic of MWIR zoom lens with 30× ratio

该系统在不同变焦位置处的传递函数曲线 (Modulation Transfer Function, MTF) 如图 8 所示, 其中, 图 8(a)-(d) 分别为焦距为 15.25 mm、132 mm、187 mm、455 mm 不同焦距位置时的传递函数曲线, 在空间频率 20 lp/mm 处, 不同焦距位置的传递函数都接近衍射极限。

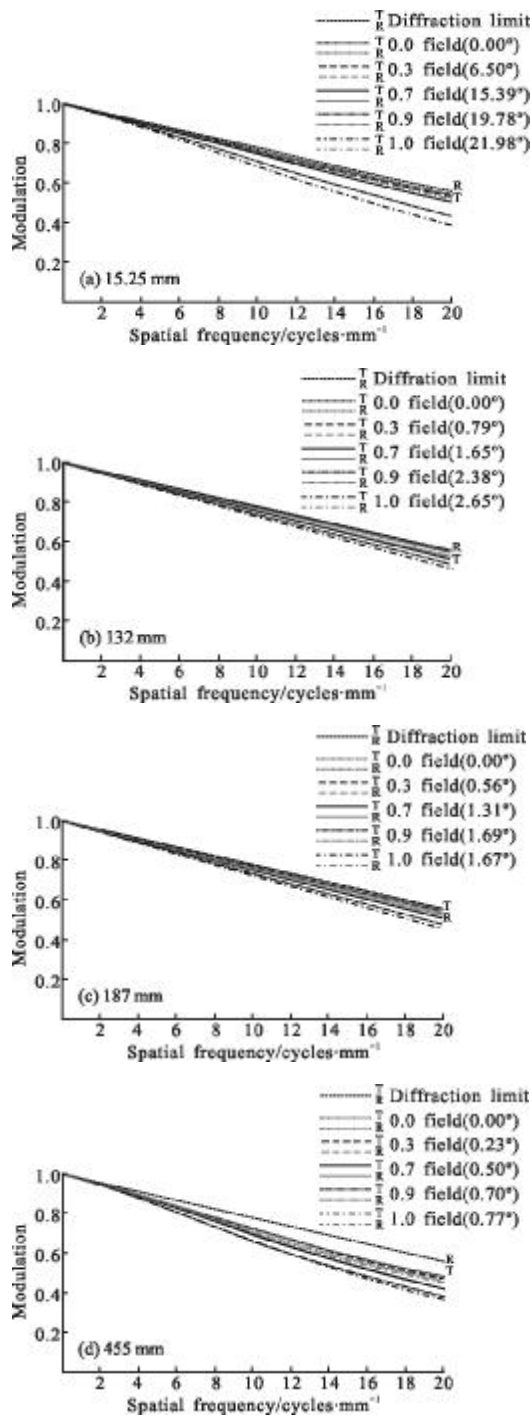


图 8 30×中波红外变焦系统传递函数曲线

Fig.8 MTF of middle wavelength infrared zoom system with 30× ratio

图 9 为全变焦范围内畸变变化曲线, 系统焦距从 15.25 mm 连续变化到 456 mm 的过程中, 系统的最大畸变控制在 0.4% 以内。图 10 为 30×中波红外连续变焦镜头实物图, 系统宽度为 192 cm, 高度为 164.6 cm。

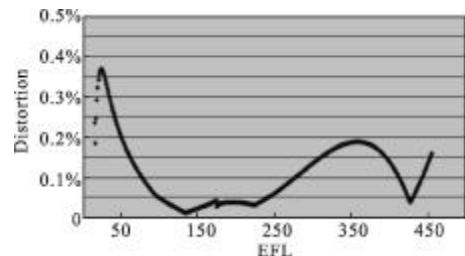


图 9 全变焦范围内畸变变化曲线

Fig.9 Distortion through the entire zoom range

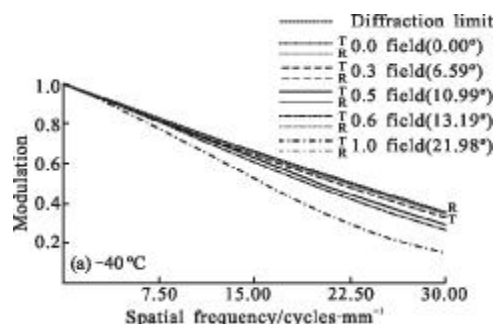


图 10 30×变焦镜头实物图

Fig.10 Practical schematic of 30× ratio zoom lens

常用的热补偿设计方法主要有机械被动式、光学被动式、主动机电式三种方式, 该系统中采用主动机电式进行无热化设计, 通过沿轴向移动变焦组来补偿温度变化产生的像面漂移。

图 11、图 12 分别给出了 30×中波红外连续变焦镜头短焦距、长焦距在极端温度环境下的传递函数曲线, 图(a)、(b) 分别为 -40 °C、60 °C 的传递函数曲线。该系统短焦距、长焦距在 -40 °C、60 °C 环境温度下、空间频率 20 lp/mm 处的传递函数分别优于 0.15、0.2, 具有良好的成像质量, 在极端温度环境中, 30×中波红外连续变焦镜头工作性能良好。



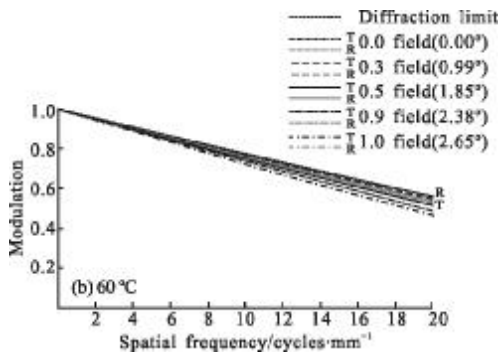


图 11 短焦距结构高低温时的传递函数

Fig.11 MTF of short effl system in -40 °C and 60 °C

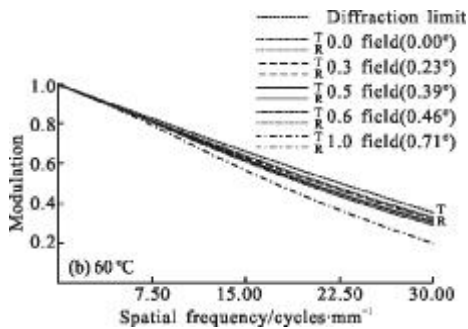
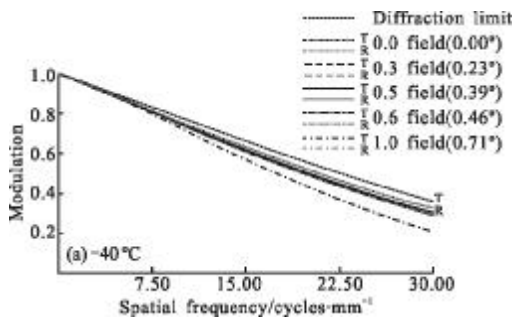


图 12 长焦距结构高低温时的传递函数

Fig.12 MTF of long effective focal length system in -40 °C and 60 °C

该 30×中波红外连续变焦镜头可对 25 m 处的近景目标优良成像,对于短焦距结构对 25 m 处的近景目标时无须任何补偿就可获得和无穷远目标时一样的成像质量。长焦距结构对 25 m 处的近景目标成像时需要将补偿组沿轴向移动来补偿像面漂移,图 13

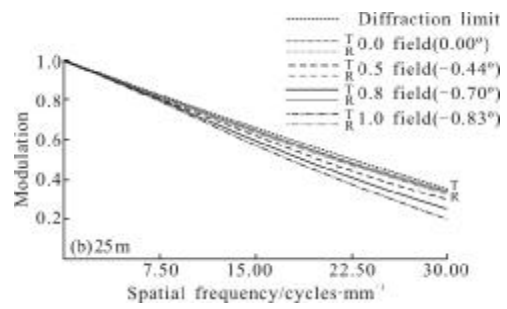
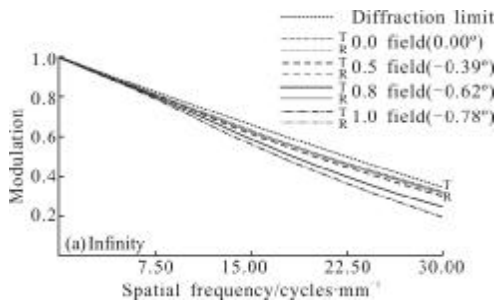


图 13 长焦距远景成像和近景成像的传函

Fig.13 MTF of long effective focal length for an object at infinity and 25 meters

(a)、(b)分别给出了长焦距结构对无穷远目标和 25 m 处的近景目标成像的传递函数曲线,可知长焦距结构通过补偿组沿轴向移动可实现对 25 m 处的近景目标成像时和对无穷远目标成像一样好的传递函数。

3 300×高变焦比中波红外镜头

美国报道了 Panavision 公司一种变焦比达 300×的高变焦比红外连续变焦系统^[6],但只给出了相关的结构,未给出具体的设计方法,系统工作波段为中波红外,图 14 为该 300×高变焦比系统的示意图,系统为组合变焦结构,由 20×变焦的前端变焦模块和 15×变焦的中继变焦模块组成,两个变焦模块均由正、负、正、正四组构成,前端变焦部分形成一个中间像面,该像再经中继变焦部分后形成更大的像,焦距可从 7 mm 变化到 2100 mm。

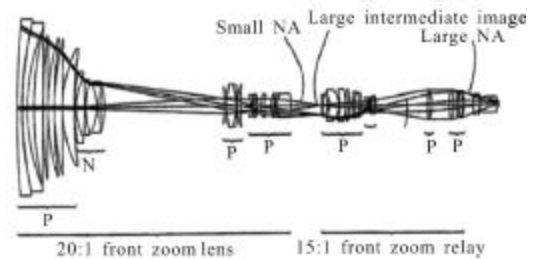


图 14 300×高变焦比系统示意图

Fig.14 Schematic of 300× ratio zoom system

图 15 为 300×高变焦比系统的实物图,该系统已投入实际应用中,图 16 为用该系统观测月球表面时焦距分别为 7 mm, 440 mm, 1200 mm, 2100 mm 所拍摄的画面,可知该 300×高变焦比系统像质良好。



图 15 300×连续变焦距系统实物图

Fig.15 Practical schematic of 300× ratio zoom system

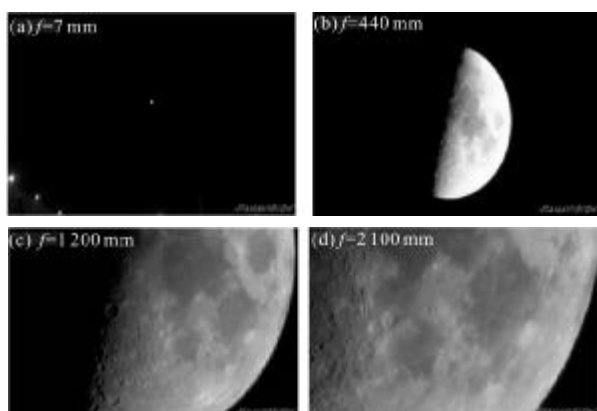


图 16 300×变焦系统不同焦距观测月球得到的图片

Fig.16 Photos for moon in different effective focal length of 300× ratio zoom system

4 结论

红外连续变焦成像系统具有连续可变的视场,可对目标进行连续跟踪,是未来红外成像技术的发展方向。文中系统报道了国外各种高变焦比中波红外镜头结构和设计方法,包括 20×高变焦比中波红外镜头、30×高变焦比中波红外镜头、300×高变焦比中波红外镜头。通过国外报道的各种高变焦比中波红外镜头结构可以看出:

(1) 对于高变焦比红外变焦镜头,系统都采用负组变焦、正组补偿的机械补偿方式来实现变焦和补偿像面漂移,可采用二维微扫描来提高红外相机的空间分辨率。

(2) 由于高变焦比红外变焦镜头的长焦色差难校正,为了校正长焦位置的色差并提高其他位置的成像质量,基于衍射光学元件具有消色差和对波面进行任意整形的特点,在高变焦比红外变焦镜头中都使用了衍射光学元件,但考虑到衍射光学元件的散射和高次衍射对成像的影响,高变焦比红外变焦镜头中不宜多用衍射光学元件。

(3) 为了减小系统前固定组透镜的尺寸并满足 100%冷光阑效率,高变焦比红外变焦镜头都使用了多次成像技术,变焦比不大时采用二次成像技术,变焦比超过 20×时就须采用三次成像技术。

(4) 为了减小整机系统的空间尺寸,高变焦比红外变焦镜头须采用一块平面反射镜或两块平面反射镜对光路进行折转,减小镜头尺寸。

(5) 经验证明,对于变焦比小于 20×的红外变焦镜头,前固定组、变焦组、补偿组均采用一片透镜为佳,前固定组、变焦组、补偿组的材料分别选用硅、锗,硅更易于得到成像良好的高变焦比红外变焦镜头,至于后固定组可根据具体的设计参数对选用材料进行合理匹配。对于更高变焦比的红外变焦镜头,采用多组联动或两个变焦镜头相叠加的方式实现变焦。

(6) 为了对高变焦比红外变焦镜头进行热补偿,普遍采用沿轴向移动变焦组、补偿组来补偿温度对红外变焦镜头造成的像面漂移,没有使用专门的热补偿调焦装置,有效减轻了整机质量。针对高变焦比红外变焦镜头各个透镜选择材料时,可以选用一些新型的红外材料来代替传统的锗材料,如新型硫系玻璃的折射率温度系数为 $0.00005 \sim 0.00009 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,而锗单晶的折射率温度系数为 $0.000396 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,与传统的锗材料相比,新型硫系玻璃具有更小的折射率温度系数,更有利于红外变焦镜头消热差,同时可减小变焦组、补偿组的移动量和电机的驱动量,有助于减小红外变焦相机的功耗。

(7) 高变焦比红外变焦镜头的设计关键为初始结构的确定,国外文献中对初始结构的确定未见报道,实际上确定镜头的基本结构后,可以利用 PW 法计算各个组分的光焦度,进而利用 VC++ 软件编程得到具体各个组分的光焦度,实现设计的模块化、自动化。

(8) 上述国外文献报道的高变焦比红外变焦镜头均为制冷型选题,对于匹配非制冷红外探测器的非制冷型高变焦比红外变焦镜头设计难度要小,设计时可以不考虑冷屏匹配,大大减小了优化设计的约束性,可不采用二次成像技术来满足冷屏匹配,设计时可将其光阑置于后固定组。

伴随着红外光学材料的长足发展,计算机辅助加工技术的进步、工艺水平的不断提高,以及光学冷

加工、精密机械加工、镀膜技术等工艺水平的不断进步,充分借鉴上述方法和结论,对于发展国内的高性能高变焦比红外热成像探测技术具有重要意义。

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): 1279-1283. (in Chinese)
- [2] Luo Shoujun, He Wubin, Li Wenhui, et al. Design of middle infrared continuous zoom optical system with large FPA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2117-2123. (in Chinese)
- [3] Muhammad Nadeem Akram. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays [C]//*SPIE*, 2002, 4768: 10-21.
- [4] Wang Haitao, Guo Liangxian. Cooled thermal imaging mid-wavelength infrared zoom camera [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(1): 8-12. (in Chinese)
- [5] Hyum Sook Kim, Chang 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.
- [6] Sinclair R L. High magnification zoom lenses for 3-5 m applications [C]//*SPIE*, 1998, 3429: 11-20.
- [7] Sanson M C, Cornell J. MWIR continuous zoom with large zoom range [C]//*SPIE*, 2010, 7660: 1-12.
- [8] Neil. Zoom lens system: USA, 7224535B2 [P]. 2007.