

高清晰大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

陈津津, 金 宁, 周立钢, 贾星蕊

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 随着红外热成像系统的不断发展, 对红外光学系统也提出了更高的要求。为了满足红外探测器在军事方面的广泛应用, 整机系统对高性能、大变倍的红外连续变焦光学系统的需求日益增强。针对高端中波制冷型 640×512 凝视焦平面探测器, 设计了结构紧凑、性能优良的高清晰大变倍比机械补偿连续变焦光学系统。该系统工作波段为 3.7~4.8 μm, F 数为 4, 变倍比为 35:1, 变焦范围为 15~550 mm。该系统运用“平滑换根”理论, 实现了超大变倍比的连续变焦光学系统设计, 并且采用二次成像以及 45°反射镜对光路进行 U 型折叠, 在实现了冷屏效率 100% 的同时有效控制了该系统的横向和径向尺寸。采用光学设计软件 CODE V 进行了仿真计算和像质评价, 并绘制了该系统的变焦曲线。设计结果表明, 该连续变焦光学系统具有分辨率高、变倍比大、结构紧凑、在全焦距范围内成像质量优良并且变焦轨迹平滑等优点, 能够与高性能中波红外探测器匹配用于高端红外热成像系统。

关键词: 连续变焦; 机械补偿; 二次成像; 冷屏效率

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2742-06

High resolution middle infrared continuous zoom optical system with large zoom range

Chen Jinjin, Jin Ning, Zhou Ligang, Jia Xingrui

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: For advanced 640 × 512 cooled staring focal plane array (FPA) detector, a mechanical compensation continuous zoom optical system with greater than 30× zoom range was presented based on the requirements of infrared thermal imager. The zoom system provided continuous changed in the field of view from the narrow field of view to the wide field of view. The largest constraint that used to exist developed a strategy that would allow the zoom focus to be continuous. The large zoom range created the condition of the zoom groups moving through the 1× magnification case. Discontinuities about this 1× magnification point was well documented in the paper. The spectral band of the system was 3.7-4.8 μm, and F number was 4.0. It realized 15-550 mm continuous zoom with a smooth zoom path and provided high image quality within the whole zoom range. Moreover, detailed design and image quality were given by CODE V optical design software. By the virtue of secondary imaging structure and tow reflectors, it has 100% cold shield efficiency and can reduce the transverse and radial size of system. The design results prove that the zoom system has high resolution, large zoom range, small size and excellent image quality and has also been found to be capable of accommodating advanced infrared thermal imager.

Key words: continuous zoom; mechanical compensation; secondary imaging; cold shield efficiency

收稿日期: 2013-02-20; 修订日期: 2013-03-11

作者简介: 陈津津(1980-), 女, 博士, 主要从事红外光学系统方向的研究。Email: youxin_80@sohu.com

0 引言

随着红外探测器的不断发展,红外热成像系统越来越多地被应用于红外导航、红外侦察以及红外制导等军事方面^[1],对与之相匹配的红外光学系统也提出了更高的要求。尤其是连续变焦红外光学系统,它能够对目标进行搜索、跟踪和瞄准,符合了当今飞速发展的红外热成像系统的发展需求。因此高性能、大变倍比的红外连续变焦光学系统是今后红外成像光学系统的重要发展方向之一。

通过资料调研,目前对于凝视型探测器,国外最先进的红外连续变焦系统亦为以色列的“Topaz”系列的中波红外连续变焦系统,其变倍比为 30 \times 。对于扫描型探测器,韩国实现了 20 \times 红外连续变焦系统。国内则缺乏大变倍比的红外连续变焦光学系统。较多的也仅是 10 \times 以下的红外连续变焦光学系统,且透镜片数较多,难以满足系统小型化的发展需求。

为了提高整机系统的分辨率,探测器面阵已经从传统的 320 \times 240 元中波 HgCdTe 焦平面探测器发展到了 640 \times 512 元中波 HgCdTe 焦平面探测器,同时像元尺寸也从 30 μm 缩小到了 15 μm 。较大变倍比的连续变焦光学系统在变倍过程中像差较难平衡,并且需要与 640 \times 512 元中波 HgCdTe 焦平面探测器相匹配。综合以上两点,该光学系统的设计难度很大,对光学设计工作者提出了较高的要求。

文中针对中波 640 \times 512 HgCdTe 焦平面探测器(像元尺寸 15 μm),综合考虑各种制约因素,设计了一个变倍比为 35:1 的中波红外连续变焦光学系统。该光学系统采用二次成像,满足冷屏效率 100%。通过机械补偿的方式实现连续变倍,在满足像质要求的同时使整个光学系统的结构紧凑、变焦曲线平滑,实现了高清晰、大变倍比的高性能中波红外连续变焦光学系统的设计。在保证系统高性能的前提条件下,满足了小型化以及低成本的现代化红外连续变焦光学系统的设计需求。

1 系统设计原理

连续变焦红外成像系统是一种焦距可以连续变化、而像面位置保持稳定并且在变焦过程中像质保持良好的成像系统。由于连续变焦系统在视场转换

过程中能够保持图像的连续性,目标图像能够始终保持清晰,在变化倍率时不会丢失目标,是成像系统解决大视场搜索小视场分辨的最佳选择。

光学系统根据其变焦补偿方式的不同,大体上可以分为光学补偿和机械补偿,以及在这两种类型基础上发展起来的其他一些类型的连续变焦光学系统。不同的变焦方式有着各自不同的优点和缺点,光学设计工程师应当根据整机系统的结构和性能要求,综合考虑各个方面的因素,选择适合的变焦方式,得到最优的设计结果。采用机械补偿方式设计的连续变焦光学系统,在变焦过程中变倍组与补偿组的合成共轭距在变焦运动过程中是一个常量,理论上像点是没有漂移的并且各组元分担职责比较明显,整机结构也比较简单。适合大变倍比的连续变焦光学系统的设计^[2]。文中采用此种设计方式。

机械补偿方式设计的连续变焦光学系统有很多种变焦距形式。一般有前固定组、变倍组、补偿组、后固定组四组透镜组成变焦距系统。连续变焦光学系统设计的整个过程包含两个主要阶段:其一,变焦系统的高斯解的阶段;其二,消像差设计阶段^[3]。文中设计的光学系统是根据整机系统所要求的变倍比、焦距,相对孔径、像面尺寸以及外形结构尺寸,对系统的前固定组、变倍组、补偿组、后固定组以及中继透镜组进行合理的光焦度分配,合理搭配光学材料,建立良好的光学系统初始结构参数。经过反复计算,该系统的光焦度分配结果如图 1 所示,长焦时选取的参数为 $f_1' = 195 \text{ mm}$; $f_2' = -33.8 \text{ mm}$; $f_3' = 67.85 \text{ mm}$; $f_4' = 160 \text{ mm}$; $f_{12}' = 138 \text{ mm}$; $f_{23}' = 18 \text{ mm}$; $f_{34}' = 125 \text{ mm}$ 。通过作者自己编写的 MATLAB 程序,求解不同结构形式、不同参数要求的连续变焦光学系统的高斯解。根据高斯解,采用模块化设计方法^[4],进行系统的初始结构计算,采用光学设计软件 CODE V 进行仿真优化设计。

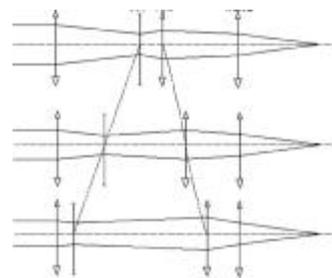


图 1 变焦原理图

Fig.1 Principle of zoom optics

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。对于红外连续变焦光学系统,不可能用光学被动式实现无热化。该系统通过对补偿组进行伺服调焦控制来实现无热化设计。因为该系统的补偿组只有一片透镜,并且该组透镜必须通过伺服调焦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,由于该系统采用中波制冷型探测器,该探测器本身携带的冷光阑决定了所设计的光学系统的出瞳位置和大小,这是由光学设计中光瞳衔接原则^[4]所决定的,满足该原则即可使系统满足冷屏效率 100%。否则,若冷屏效率没有得到满足,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^[9]。因此系统设计中采用二次成像,使物镜口径尽量最小化,并保持探测器具有 100% 的冷屏效率。为了使结构紧凑,合理地控制系统的总长,采用两个 45° 放置的反射镜,使光路折叠两次,对光学系统进行了 U 型折叠。并且该系统采用了 640×512 元 HgCdTe 焦平面探测器(像元尺寸 15 μm)。与 320×240 元焦平面探测器(像元尺寸 30 μm)相比较,达到同样的灵敏度和分辨率,系统的焦距可以减小一半,光学孔径亦可以减小一半,使得整个光学系统体积减小大约 8 倍^[9]。光学系统尺寸的缩减将会对热像仪整机尺寸、重量和成本的减小带来极大的益处,利于系统实现体积小、结构紧凑的小型化设计。

2 设计实例与分析

2.1 设计指标

文中采用 640×512 元 HgCdTe 中波红外凝视型焦平面阵列制冷探测器,像元尺寸 15 μm×15 μm。系统的变倍比为 35×,最长焦距为 550mm,最短焦距为 15mm。选定探测器的冷光阑作为光学系统的孔径光阑,系统的 F# 为探测器 F#=4,在变焦过程中保持不变。

光学系统的主要设计技术指标如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Tab.1 Parameters of optical design

Item	Value	
Wavelength range/μm	3.7-4.8	
Zoom ratio	35:1	
Field of view(FOV)	35°×28° (WFOV)	1°×0.8° (NFOV)
Focal length/mm	15-550	
F number	4	
Entrance pupil diameter/mm	137.5	
Transmission	> 70%	

2.2 仿真结果

2.2.1 光学系统图

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共由 8 片透镜组成:前固定组(1 片)、变倍组(1 片)、补偿组(1 片)、后固定组(3 片)、中继组(2 片)组成,采用+、-、+、+、+的光焦结构。为了满足整机结构的尺寸要求,采用两个 45° 放置的反射镜对光路进行了 U 型折叠。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。

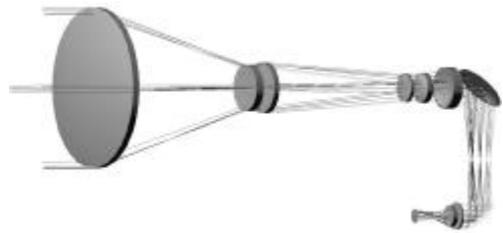


图 2 机械补偿连续变焦光学 3D 示意图

Fig.2 Three dimension model of mechanically compensating zoom optics

图 3 给出了焦距依次为 $f'=550\text{ mm}$ 、 $f'=461\text{ mm}$ 、 $f'=308\text{ mm}$ 、 $f'=202\text{ mm}$ 、 $f'=115\text{ mm}$ 、 $f'=15\text{ mm}$ 变焦过程光学系统图。



图 3 连续变焦光学系统图

Fig.3 Continuous zoom lens concept

像差设计中的难点是要同时校正不同焦距位置的球差、像散、场曲和畸变等像差,以及由于红外材

料较少导致较难校正的色差。该光学系统仅采用了 Ge 和 Si 两种红外材料,为了有效地校正色差、平衡像差,该系统引入了 3 个非球面和 1 个衍射面,不但提高了系统的像质,同时减少了采用的镜片数量,从而提高了系统透过率。

2.2.2 变焦曲线

该系统在变倍过程中,变倍组做线形运动,补偿组通过一定的曲线轨迹运动,从而补偿变倍组在变倍过程中产生的像面位移,使像面位置稳定。同时,通过补偿组的移动还可以实现调焦及补偿温度变化引起的像面位移。根据物像交换原则,补偿曲线始终有两条,通常情况下,两条曲线互相分离。只存在一种情况,就是两条变倍组曲线在变倍组的放大倍率等于 1 时($m_2=1$)相切,此时补偿组可以从一条曲线切换到另一条曲线上来,以便达到补偿组曲线保持单调变化,使得变倍比迅速增长。

该系统的变焦曲线如图 4 所示。系统在变倍组放大率等于 1 时,实现了“平滑换根”的思想^[7],两条补偿组曲线相切,得到了最速变焦曲线,该最速变焦曲线就是该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,实现了大变倍比的变焦系统设计。图 4 中的实线和“T”线就是该系统的变焦曲线,当系统由短焦向长焦变化的时候,变倍组与补偿组相互靠近,其变焦行程分别为 125mm 和 50mm。由图可见,

变焦轨迹平滑且无拐点,接近线形,有利于变焦机构的伺服控制,利于整机系统的小型化设计。

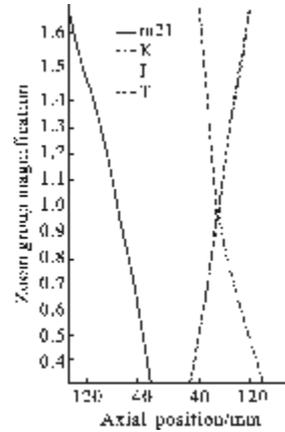


图 4 变焦曲线图

Fig.4 Zoom group motions

2.3 像质评价

2.3.1 传递函数

传递函数是光学系统的主要评价手段。图 5 分别给出了变焦系统不同焦距位置时的传递函数曲线,最上面的黑色实线为衍射限。由图可知,系统在奈奎斯特频率(33 lp/mm)处的 MTF 都就近衍射极限,说明了该变焦系统在全焦距范围内都具有较好的成像质量。

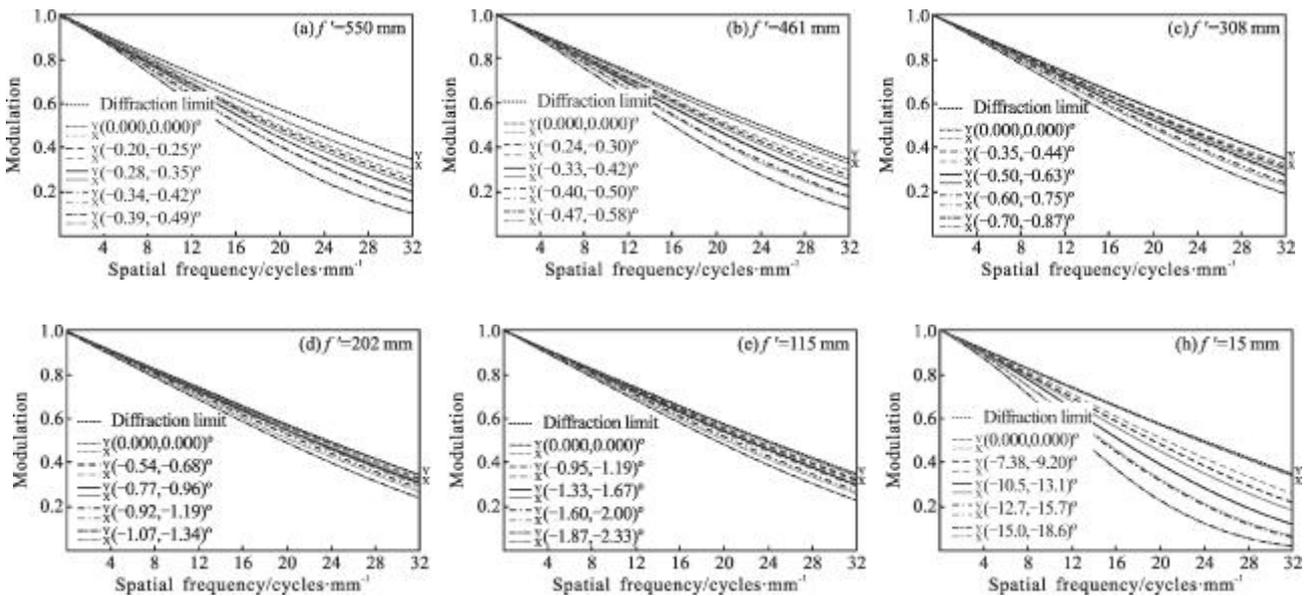


图 5 连续变焦红外光学系统 MTF 图

Fig.5 MTF curves of zoom optical system

2.3.2 点列图

点列图是光学系统对点目标成像时所形成的几何像斑,该变焦系统的点列图如图 6 所示。由图可知,不同焦距位置在全视场内弥散斑的均方根值(RMS)都小于 $7.5\ \mu\text{m}$,点列图基本在一个探测元尺寸($15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$)以内,并且该光学系统各种色光的轴外点基本重合,色差校正较好,满足系统使用要求。

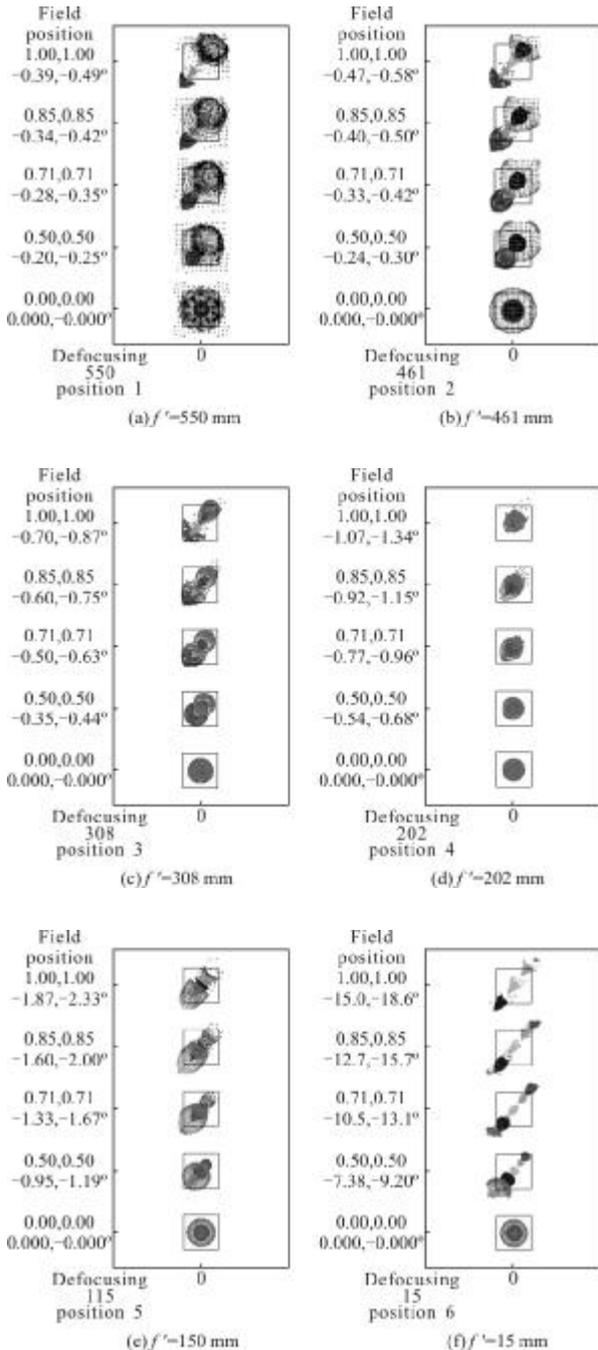


图 6 连续变焦红外光学系统点列图

Fig.6 Spot diagrams of zoom optical system

2.3.3 畸变

该光学系统在整个变焦范围内的畸变都在 5% 以内,满足系统使用要求。如图 7 所示。

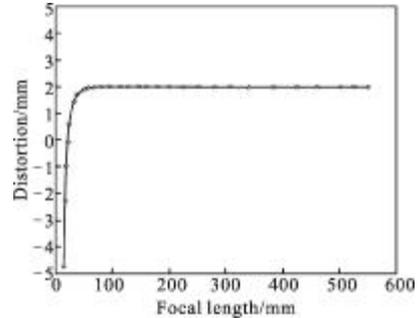


图 7 系统畸变图

Fig.7 Distortion of system

2.3.4 离焦量

实际波面和理想波面之间的光程差称为波像差,可以作为衡量该像点质量优劣的指标。如果光学系统的光程差小于或等于 $\lambda/4$, 则系统符合瑞利判据,系统的像几乎接近于完善。可以有效地使用这个结果,以确定系统允许多大的离焦量时刚好可以维持衍射极限性能。对于文中所设计的连续变焦光学系统,像平面位置产生四分之一波长离焦时,对应于 $\pm\lambda/4$ 光程差的焦深是:

$$\delta = \pm 2\lambda(f')^2 = \pm 0.1344(\text{mm})$$

该系统在整个变焦范围内的离焦量都在焦深范围之内,可以维持衍射极限性能,保证成像质量,满足系统使用要求。如图 8 所示。

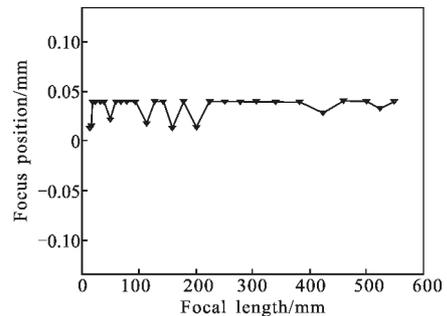


图 8 系统离焦量曲线

Fig.8 Best focus plots of the system

2.3.5 冷反射分析

红外光学系统冷反射效应用 YNI 值衡量。YNI 值定义为近轴边缘光线的高度、光线在透镜表面的入射角与折射率的乘积。经过软件分析,该光学系统

所有表面 YNI 的绝对值均大于 0.3, 表明系统对冷反射的抑制效果较好, 不会出现明显的黑斑造成成像质量下降, 满足红外光学系统设计的要求。

3 结 论

文中针对中波 640×512 元 HgCdTe 制冷型红外焦平面探测器(像元尺寸为 15 μm), 采用机械补偿的方式, 运用八片透镜, 实现了 15~550 mm 范围内中波红外大变倍比连续变焦光学系统设计。该红外连续变焦光学系统实现了大变倍比、高分辨率、高像质、小尺寸、轻量化的综合要求。能够与高性能中波红外探测器匹配应用于机载稳瞄系统或预警系统、地面防空警戒系统、舰载侦察、跟踪系统、战场侦察搜索与监视系统、武器平台瞄准跟踪系统。

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)
张良, 刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1279-1281.
- [2] Robert E Fischer. *Optical System Design* [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2000.
- [3] Li Lin. *The Design Method of Modern Optics System* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
李林. 现代光学设计方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [4] Yin Na, Meng Qingchao, Qi Yanlong, et al. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(12): 694-697. (in Chinese)
尹娜, 孟庆超, 齐雁龙, 等. 中波红外连续变焦光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2009, 31(12): 694-697.
- [5] Yu Daoyin. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)
郁道银. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] Chen Lvji, Xu Man, Wang Hongwei, et al. Design of hand-held dual field-of-view infrared optical system [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 100-1037. (in Chinese)
陈吕吉, 徐曼, 王红伟, 等. 手持双视场红外光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2011, 33(2): 100-1037.
- [7] Tao Chuncan. *Zoom Optics System Design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 45-48. (in Chinese)
陶纯堪. 变焦距光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 45-48.