

10倍中波红外连续变焦光学系统设计

闫晶¹ 刘英² 孙权¹ 宦克为^{1*} 石晓光¹

¹长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 针对制冷型 320 pixel×240 pixel 凝视焦平面阵列探测器, 设计了一款 10 倍中波红外连续变焦光学系统。系统采用机械正组补偿变焦结构, 通过二次成像设计实现系统 100% 的冷光阑效率, 利用硅和锗两种普通红外光学材料, 通过引入合理的非球面和衍射面, 借助 ZEMAX 光学设计软件对系统进行优化设计和像差平衡, 实现了 20~200 mm 的中波红外连续变焦系统的优化设计。设计结果表明: 系统仅采用 7 片镜片, 实现了变倍比为 10、 F 数为 2、工作波段为 3.7~4.8 μm 的中波红外连续变焦系统的优化设计, 系统的调制传递函数在空间频率 16 lp/mm 处大于 0.4, 点斑均方根半径均小于 16 μm , 接近衍射极限, 满足系统成像要求, 且系统的变焦曲线平滑, 符合变焦要求。

关键词 光学设计; 连续变焦; 中波红外; 正组补偿

中图分类号 TN219 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.012201

Design of 10× MWIR Continuous Zoom Optical System

Yan Jing¹ Liu Ying² Sun Quan¹ Huan Kewei¹ Shi Xiaoguang¹

¹College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A 10× mid-wavelength infrared (MWIR) continuous zoom optical system is designed for cooled 320 pixel×240 pixel staring focal plane array detector. The system uses mechanical positive compensation zoom system. 100% cold stop efficiency is realized by secondary imaging system. Two common infrared optical materials, i.e., silicon and germanium, are used. By introducing reasonable aspheric and diffractive surfaces, the aberrations are balanced. By using ZEMAX optical design software, the system is optimized for continuous zoom is the range of 20~200 mm. After design and optimization, the system only uses 7 lenses to realize 10× continuous zoom. The F number is 2, the working wavelength is 3.7~4.8 μm , the modulation transfer function (MTF) at spatial frequency of 16 lp/mm is larger than 0.4, and the root mean square (RMS) radius is smaller than 16 μm . It has a resolution close to diffraction limit and satisfies the requirement of imaging. Moreover, the system has a smooth curve zoom and meets the zoom requirement.

Key words optical design; continuous zoom; mid-wavelength infrared; positive compensation

OCIS Codes 220.2740; 220.1250; 220.3620

1 引言

红外(IR)光学系统具有夜间穿透能力强、识别伪装能力强、能够被动接收红外辐射、隐蔽性好、不易受干扰等优点, 在陆、海、空等军事领域的武器系统中展现出特殊的能力, 促使欧美各个大国都投入巨大的物力和人力对其展开研究^[1-3]。这些系统在使用过程中通常要求其既能够实现搜索又能够跟踪瞄准目标, 但是定档红外变焦光学系统却不能同时实现这些功能, 从而在客观上促进了红外连续变焦系统的快速发展。但是

收稿日期: 2013-08-20; 收到修改稿日期: 2013-09-20; 网络出版日期: 2013-12-12

基金项目: 2011 年高等学校博士学科点专项科研基金(20112216110006)、吉林省自然科学基金(201215144)、长春市科技支撑计划(11KZ05)

作者简介: 闫晶(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: yanjing_cust@126.com

导师简介: 石晓光(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外辐射与探测技术方面的研究。E-mail: shixg@cust.edu.cn.

* 通信联系人。E-mail: huankewei@126.com

目前报道中波红外(MWIR)连续变焦光学系统设计的文章较少且设计的系统存在一些缺点,如韩国 Kim 等^[4]设计的中波红外变焦镜头焦距范围是 13.75~75 mm 且系统要引入三个非球面才能满足系统成像质量要求,提高了系统的加工成本和技术难度;武汉理工大学邵洪云等^[5]设计的中波红外连续变焦镜头采用两个反射镜折叠光路实现了 50~500 mm 范围内的连续变焦,但 F 数较大,且系统纵向尺寸长;北京空间机电研究所的张庭成等^[6]设计了 F 数为 2 的中波红外连续变焦系统,但是变倍比较小,仅为 6 倍。

针对现有连续变焦系统的不足,本文基于制冷型 320 pixel×240 pixel 凝视焦平面阵列探测器,设计了一款 10 倍中波红外连续变焦光学系统。系统共用了 7 片透镜,仅引入了一个非球面和一个衍射面,实现了工作波段为 3.7~4.8 μm 、变焦范围为 20~200 mm 的连续变焦系统,系统 F 数为 2,冷光阑效率为 100%。该系统具有变焦曲线平滑、镜片数少、 F 数较小、像质高等优点。

2 初始结构设计计算

机械补偿型变焦系统的基本原理是通过变倍组与补偿组相对运动实现系统焦距的连续变化,同时保证在变焦过程中像面保持稳定、像质保持良好^[7]。机械补偿型变焦系统又分为正组补偿和负组补偿两种变焦形式。正组补偿型变焦系统前固定组的焦距较长、口径较小、长度较长、二级光谱较小,负组补偿型变焦系统前固定组焦距较短、口径较大、长度较短、二级光谱较大。由于本文所设计的系统的 F 数为 2,变倍比为 10,长焦焦距为 200 mm,所以系统的焦距较长、相对孔径较大,二级光谱和球差也会较大,因此本系统的初始结构采用正组补偿形式^[8]。为了使系统的结构简单且更加紧凑,系统各组分别采用的结构形式为“+,-,+,-”。图 1 为各组的运动方式,图中 ϕ_1 为前固定组、 ϕ_2 为变倍组、 ϕ_3 为补偿组、 ϕ_4 为后固定组。当系统处于短焦位置时,变倍组 ϕ_2 紧靠前固定组 ϕ_1 ,补偿组 ϕ_3 紧靠后固定组 ϕ_4 。当系统向长焦位置运动时,变倍组 ϕ_2 向右运动,而补偿组 ϕ_3 向左运动,最后它们在中部靠拢,使变倍组和补偿组之间的距离 d_{23} 最短^[9-10]。

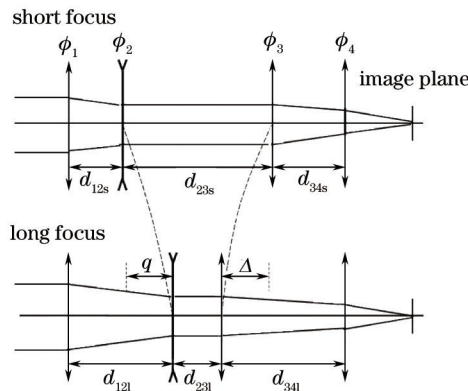


图 1 正组补偿变焦系统运动方式

Fig.1 Movement scheme of positive compensation zoom system

通常运用高斯光学计算公式来确定满足系统要求的初始参数。首先给出变倍组、补偿组的归一化焦距 f'_2 、 f'_3 以及长焦时变倍组和补偿组的归一化倍率 m_{21} 、 m_{31} 的初始值,然后根据高斯光学物像公式推得此时变倍组与补偿组之间的距离 d_{231} :

$$d_{231} = f'_2(1 - m_{21}) + f'_3 - \frac{f'_3}{m_{31}}. \quad (1)$$

变倍组的移动量 q 与短焦时所对应的倍率 m_2 的关系为

$$m_2 = \frac{1}{1/m_{21} + q/f'_2}. \quad (2)$$

根据变焦过程微分方程的通解整理出短焦时补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 为

$$m_3 = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2}, \quad (3)$$

其中

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{21}} + m_2 - m_{21} \right) + \left(\frac{1}{m_{31}} + m_{31} \right), \quad (4)$$

则补偿组的像面移动量 Δ 为

$$\Delta = f_3'(m_3 - m_{31}). \quad (5)$$

短焦位置时组合倍率为

$$m_2 m_3 = \frac{m_{21} m_{31}}{F}. \quad (6)$$

联合(1)~(6)式便可解得正组补偿时光学系统变倍组、补偿组的移动量 q 和 Δ 。此时变倍组与补偿组之间的距离为

$$d_{23s} = q + d_{231} + \Delta. \quad (7)$$

设短焦时前固定组和变倍组之间的距离为 d_{12s} , 那么系统前固定组焦距 f_1' 为

$$f_1' = d_{12s} + \frac{f_2'(1 - m_2)}{m_2}. \quad (8)$$

这样由所获得的参数 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 d_{12s} 和 d_{231} 就可以确定光学系统的初始结构。

3 设计

3.1 设计指标

采用中波红外制冷型凝视焦平面阵列探测器,该探测器阵列规模为 320 pixel×240 pixel,像素尺寸为 30 μm ×30 μm 。系统变倍比为 10 倍,最长焦距 200 mm,最短焦距 20 mm。为了保证系统的冷光阑效率为 100%,系统选定探测器的冷光阑作为光学系统的孔径光阑;为了保证整个变焦过程中系统能量保持不变,设定整个变焦过程系统的 F 数均为 2。表 1 为本系统具体的光学设计技术指标。

表 1 中波红外变焦系统设计指标

Table 1 MWIR zoom system's design parameters

Parameter	Value
Working wave range / μm	3.7~4.8
F number	2
Zoom ratio	10
Focal length range /mm	20~200
Image hwight /mm	12

整个系统的设计过程分为初始结构的计算与综合像差校正两个阶段。由于光学系统采用的是制冷型探测器,为了保证系统 100%冷光阑效率并减小系统口径,采用二次成像光学系统结构,因而整个光学系统分为连续变焦系统和二次成像系统。根据系统要求的各项指标如焦距范围、 F 数等,运用(1)~(8)式经过反复迭代计算确定系统中各透镜的焦距和移动范围,最后确定系统的初始结构,并根据红外光学材料特性选择性能优良的常规红外材料 Ge、Si 为透镜材料,从而确定系统的初始结构。在像差校正阶段,利用非球面的单色像差校正优势和衍射面的色差校正优势来对不同变焦结构进行各种初、高级像差的校正,借助 ZEMAX 利用像差理论对系统进行综合像差平衡,最终达到所需镜片数目少、系统透射率高、系统重量轻的设计要求。

3.2 设计结果

根据上述的方法与步骤,利用 ZEMAX 光学设计软件,通过设置合理的优化参数(如空气间隔、表面曲率、透镜厚度等参数),对初始结构进行优化。图 2 为所获得的优化后连续变焦光学系统图,系统由变焦物镜系统和二次成像系统构成,包括 7 片透镜,第 1~4 片透镜依次为系统的前固定组、变倍组、补偿组和后固定组。对于整个变焦系统,由于长焦时系统口径比较大,需要对长焦系统的球差和彗差进行重点控制,由于短焦时视场比较大,需要对短焦系统的彗差和像散进行重点控制,而且对于红外系统,由于能量和系统重量的问题,需要光学系统采用的镜片数量尽量少。为此,系统前固定组采用的是具有高折射率和低色散的硅材料做成的正透镜,用于降低系统的第一、第二辅助光线在第二片透镜上的入射高度;变倍组采用的是锗材料做成的负透镜,用于校正系统的彗差、场曲以及轴外像差,且在系统变倍过程中保证做线性运动,进而保证

系统的变焦曲线平滑;补偿组采用的是硅材料做成的透镜,该透镜按照一定的曲线运动以补偿系统变倍过程中发生的像面移动,保证系统像面稳定不变;后固定组采用的是锗材料做成的正透镜,为了更好地校正系统短焦时的球差和轴外像差,在其第二面引入了非球面。第5~7片透镜构成系统的二次成像组即中继镜组,压缩了变焦系统透镜的口径,保证系统满足100%冷光阑效率。中继镜组作为固定部分,对整个变焦过程具有很好的像差补偿作用,由于系统的第6片透镜的前表面孔径较大、入射光线高度较高,对系统的球差、彗差、像散都有较大的影响,因此在透镜6的第一面引入了衍射面,形成折衍混合结构代替双胶合镜组进行色差校正^[1]。系统镜片的使用量较少,同时对单色像差也起到一定的补偿作用,而且中继镜组作为系统变焦过程中的固定组成部分,还可以平衡整个系统的高级像差。该系统镜片数目少,结构紧凑,质量轻,系统总长为350 mm。图3是系统的变焦曲线,从中可以看出,系统的变焦曲线平滑,易于加工。

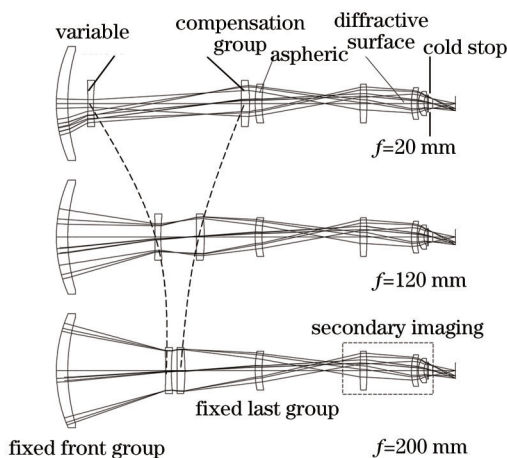


图2 变焦系统结构图

Fig.2 Zoom system structure

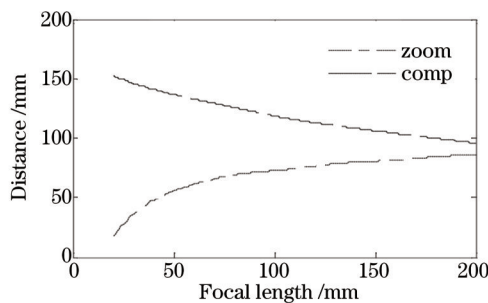


图3 系统的变焦曲线

Fig.3 Zoom curve of the system

3.3 系统像质评价

3.3.1 调制传递函数

调整传递函数(MTF)是光学系统的主要评价手段。图4(a)~(c)分别给出了变焦系统在 $f=20\text{ mm}$ 、 $f=120\text{ mm}$ 以及 $f=200\text{ mm}$ 焦距位置时的传递函数曲线。由图4可以看出,系统在空间频率 16 lp/mm 处,短焦距位置时MTF大于0.4,其他焦距位置时MTF都大于0.5,接近或达到衍射极限,说明该系统在该焦距变化范围内像差已经得到了很好的控制和平衡,达到了较高的像质,满足中波红外变焦系统的高成像质量要求。

3.3.2 点列图

由于红外波段范围较宽,因此红外光学系统的像差校正比一般可见光系统要困难许多。点列图是指光学系统对目标成像时所形成的几何像斑,是光学系统成像质量好坏的评价手段之一。该系统的点列图如图5所示,图中黑色圆圈为系统的艾里斑。由图5可知,在全焦距变化范围内、全视场内弥散斑的均方根(RMS)半径均小于探测器像素尺寸,说明系统的成像质量非常好,满足探测器对成像质量的要求。

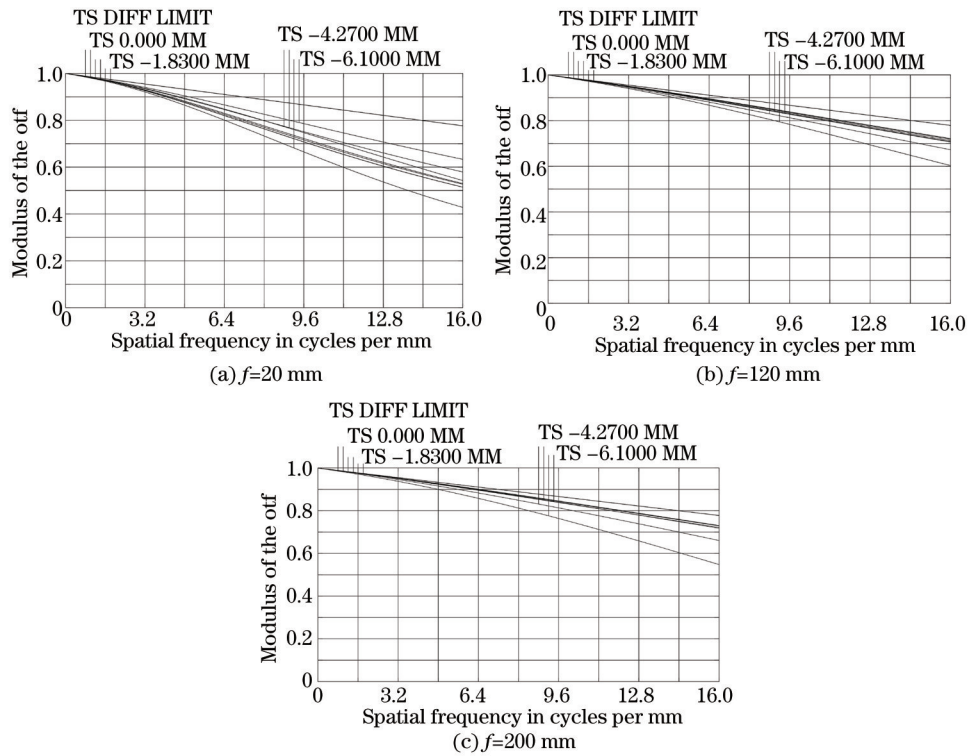


图4 系统的调制传递函数曲线

Fig.4 MTF curves of the system

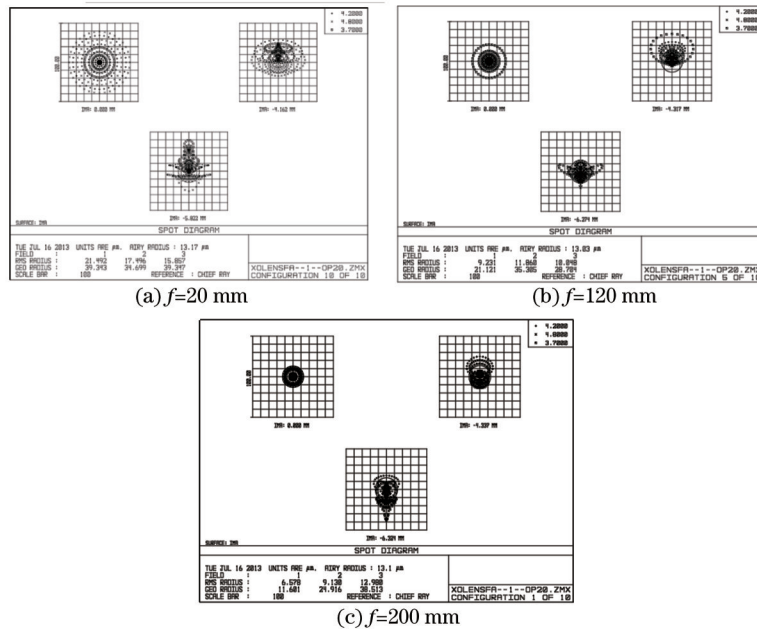


图5 系统的点列图

Fig.5 Spot diagrams of the system

4 结 论

针对中波红外制冷式凝视焦平面阵列探测器,采用机械正组补偿变焦结构形式和二次成像系统,采用7片透镜且每片透镜仅使用普通红外光学材料硅和锗,并借助ZEMAX光学设计软件对系统进行了设计优化。设计结果实现了系统大变倍比下像差校正、20~200 mm范围内连续变焦以及冷光阑效率100%。系统具有相对孔径较大、变焦曲线平滑、分辨率高、镜片数少、像质高、 F 数小等优点,符合当前红外变焦的发展趋势。该系统可广泛应用于跟踪、搜索、侦查、导航等领域。

参考文献

- 1 Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid-infrared zoom optical system with ratio of 25[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422001.
周昊, 刘英, 孙强. 25倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422001.
- 2 Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622005.
许伟才, 黄玮. 新型折反射式连续变焦系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622005.
- 3 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2383-2386.
薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2383-2386.
- 4 Kim H S, Kim C W, Hong S M. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization[J]. Opt Eng, 2002, 41(7): 1661-1667.
- 5 Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(7): 1038-1043.
郭洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1038-1043.
- 6 Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of 6× cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122004.
张庭成, 廖志波. 6倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122004.
- 7 Chen Lüji, Li Ping, Ma Lin. Compact MWIR zoom system[J]. Infrared Technology, 2010, 32(10): 562-566.
陈吕吉, 李萍, 马琳. 紧凑型中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(10): 562-566.
- 8 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continuous zoom system with high speed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2674-2679.
陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2674-2679.
- 9 Tao Chunkan. Zoom Focus Optics Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. 122-124.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. 122-124.
- 10 Wang Qi, Wang Guangyu, Cheng Xuemin, *et al.*. Gauss optics of zoom lenses[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 983-988.
王琦, 王光宇, 程雪岷, 等. 变焦距镜头高斯光学设计的新方法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 983-988.
- 11 Tang Dawei, Sun Qiang, Wang Jian, *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive dual field of view infrared optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 2062-2067.
唐大为, 孙强, 王健, 等. 折/衍混合的红外双视场光学系统设计[J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2062-2067.