

超长焦距红外双视场光学系统设计

白玉琢*, 木锐, 马琳, 贾钰超, 普群雁, 薛经纬
(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要:设计了一种超长焦距中波红外双视场光学系统,该系统采用二次成像结构,通过透镜轴向移动实现变焦功能。设计结果表明,该系统可以实现超长焦距 600 ~ 1500 mm 的变焦功能,且中心视场在探测器特征频率 20 lp/mm 处的光学传递函数值高于 0.5,接近衍射极限,能够很好地满足军事侦察对远距离目标同时搜索和瞄准的要求。

关键词:超长焦距;中波红外;双视场光学系统;二次成像

中图分类号:TN216 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140704.0631

Design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view

BAI Yu-zhuo*, MU Rui, MA Lin, JIA Yu-chao, PU Qun-yan, XUE Jing-wei
(Kunming Institute Of Physics, Kunming 650223, China)

* Corresponding author, E-mail:15808765752@163.com

Abstract: A mid-wavelength infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view is designed in this paper. Based on the re-image configuration, this system can realize the zoom by axial motion of a lens along the optical axis. The design results show that this system realizes the zoom with a super-long focal length of 600 – 1500 mm, and the MTF of the central view is more than 0.5 at the characteristic frequency of 20 lp/mm of detector, which shows its optical performance approximates to the diffraction limit. This system can meet the requirement of military investigation for seeking and aiming at target in a long distance.

Key words: super-long focal length; mid-wave infrared; optical system with dual field-of-view; re-imaging

1 引言

为了适应军事侦察活动以及特殊民用监控系统在观察远距离目标时对高空间分辨率的需求,长焦距光学系统越来越多地应用在远距离观察和测量中^[1-2]。由于受到红外光学材料种类少以及制备大口径红外材料难度高和成本贵等因素的限制,一般认为焦距在 300 mm 以上的红外光学系统即为长焦距系统。然而,随着光学系统焦距的增大,与之相应的光学系统前端透镜口径也在成比例增大,这是我们所不愿见到的,因为光学系统的各种像差均以透镜口径的平方倍率放大,极大地增加了光学系统的设计难度。为了校正这些像差,在传统的设计中常常选用结构形式异常复杂的纯反射式或折反式光学系统,这样不但增加了系统的装配难度,而且还有可能降低系统的能量透过率。目前国内关于结构简单、易于装调的纯透射长焦距红外光学系统的研究鲜有报道。

本文基于长焦距光学系统相关设计理论,针对中波红外 640 × 512 制冷型焦平面探测器,设计了一款焦距为 600 mm 的超长焦距光学系统,其对坦克正面的识别距离可高达 11 km。同时为了满足军事侦察对远距离目标同时搜索和瞄准的要求,将变焦距双视场光学系统的设计思想结合到本系统中,使之结合长焦距光学系统及变焦系统的优点,不但可以进行大视场范围的搜索侦查,还可以对远距离目标进行小视场的识别、跟踪与瞄准^[3]。

2 设计思想及数学描述

基于制冷型焦平面探测器的热成像光学系统为了屏蔽来自系统内部的热辐射干扰,提高系统整体的热灵敏度,要求系统的冷光阑效率达到 100%,即在光学系统设计中要求制冷探测器的冷光阑与光学系统的孔径光阑必须完全重合^[4]。根据以上思路,考虑两种光学设计方案:一是直接一次成像光学系统,缺点是考虑到冷光阑的匹配问题,镜头的前端口径太大,光学系统透镜的尺寸

与系统的焦距相差无几,加工难度增大、加工成本提高,相应的装配难度增大,推算过来,即使光学设计通过了也不能满足加工、装配等要求。二是采用二次成像光学系统^[5-6],这种光学结构在保证冷光阑匹配的同时,可以有效减小系统的轴向尺寸并有效控制物镜口径。这种结构也可以更灵活地校正光学系统像差及排布光学系统结构。二次成像光学系统的结构形式如图 1 所示,由前物镜组 1 和转像组 2 组成。

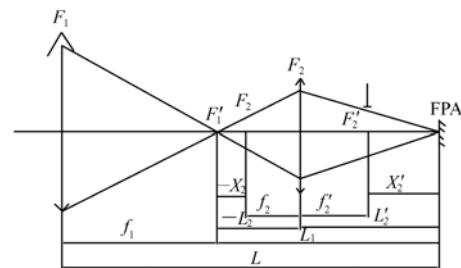


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Sketch of optical system

2.1 长焦距光学系统设计理论

对于长焦距光学系统来说,由于长焦物镜的焦距较长,在实际的设计过程中,一般要求系统的筒长小于焦距^[7]。由此根据高斯光学对图 1 中二次成像系统的结构参数进行计算。

径向尺寸的控制:为控制物镜口径使入瞳位于前物镜组附近并且使入瞳共轭于冷光阑处。

轴向尺寸的控制:系统总长表示为:

$$L = f'_1 - l_2 + l'_2, \quad (1)$$

式中: f'_1 是前物镜组的焦距, $-l_2$ 是转像组的物距, l'_2 是转像组的像距。

要控制总长 L ,一方面应使 f'_1 尽量小,另一方面应控制转像组共轭距 $(-l_2 + l'_2)$ 尽量小。但减小 f'_1 的同时,必然使前组相对口径增大,设计难度大。

系统总的焦距:

$$f = f'_1 \cdot \beta_2, \quad (2)$$

转像组的放大率:

$$\beta_2 = l'_2/l_2, \quad (3)$$

牛顿公式:

$$f_2'^2 = -x_2 \cdot x'_2, \quad (4)$$

式中; β_2 为转像组的放大率; x_2 、 x'_2 分别为转像组的牛顿物距和像距; f'_2 为探测器冷光阑到像面距离,因 $f'_1 \gg f'_2$,可近似认为转像组的焦点位于冷光阑处,即 f'_2 近似为镜头的安装尺寸。

根据上述公式可以求得二次成像系统的参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab. 1 Parameters of system

参数名称	参数值
f'_1/mm	150
$F_1/\#$	1
β_2	-4
$-l_2/\text{mm}$	17.1
f'_2/mm	11
f/mm	600
F	4
L/mm	308

通过计算得到:系统总长小于其焦距值,物镜口径为 150 mm, $f'_2 = 11$ mm,均满足安装要求。

2.2 变焦光学系统原理

变焦光学系统是通过改变系统中透镜或透镜组的位置,即改变透镜或透镜组之间的间距,从而改变系统焦距,并且在改变过程中要确保系统的焦面位置不变。变焦光学系统通常遵循一个基本原则^[8],即物像交换原则^[9-10]。

图 2 可以解释物像交换原则,两个平面 A 和 A' 之间的距离不变,在这段距离中一定存在两个位置,将透镜放在这两个位置时,这两个平面 A 和 A' 透过透镜的成像互为物像,其放大率分别为 β 和 $1/\beta$,即当一个位置成缩小像时,另一个位置成放大像。而当透镜自位置 1 移动到位置 2 时,放大率就在 β 和 $1/\beta$ 之间变化。所以,该透镜称为变焦组,用 L_2 表示。如果在变焦组前加一前固定组 L_1 ,使景物目标成像于变焦组的物平面上,A 作为变焦组的物被变焦组成像于 A',这样就组成了一个变焦距系统,如图 3 所示,2-1 和 2-2 分别为变焦组 L_2 的符合物像交换原则的两个位置。

由图可知,前固定组 L_1 的焦距:

$$f'_1 = \frac{h_2}{u'_2}. \quad (5)$$

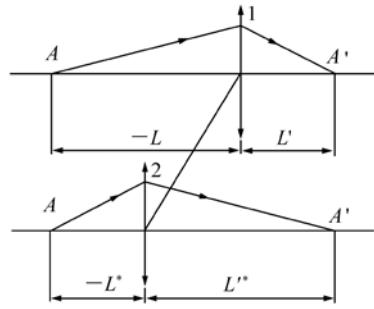


图 2 物像交换原则

Fig. 2 Principle of exchange object and image

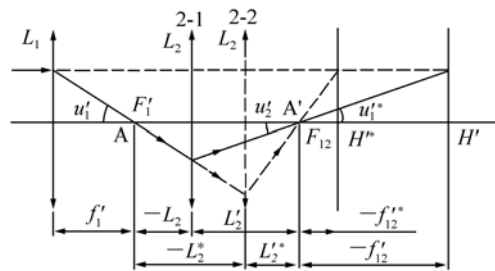


图 3 变焦系统最短焦与最长焦位置

Fig. 3 Shortest focal position and the longest focal position of the zoom system

前固定组 L_1 和变焦组 L_2 在 2-1 位置的合成焦距为:

$$f'_{12} = \frac{h_1}{u'_2} = \frac{h_1}{u'_1} \times \frac{u'_1}{u'_2} = f'_1 \beta_2, \quad (6)$$

式中, β_2 是变焦组 L_2 在 2-1 位置的垂轴放大率。而变焦组 L_2 在 2-2 位置时,前固定组 L_1 和变焦组 L_2 的合成焦距为:

$$f'_{12*} = \frac{h_1}{u'_{2*}} = \frac{h_1}{u'_1} \times \frac{u'_1}{u'_{2*}} = f'_1 \beta_2^* = \frac{f'_1}{\beta_2}. \quad (7)$$

所以当变焦组 L_2 从 2-1 位置移到 2-2 位置时,焦距变化了

$$\frac{f'_{12}}{f'_{12*}} = \frac{f'_1 \beta_2}{\frac{f'_1}{\beta_2}} = \beta_2^2. \quad (8)$$

变焦距系统的最大焦距 f'_{\max} 和最小焦距 f'_{\min} 之比称为系统的变焦比 M ,即

$$M = \frac{f'_{\max}}{f'_{\min}} = \frac{f'_{12}}{f'_{12*}} = \beta_2^2. \quad (9)$$

因此根据以上公式,通过对本二次成像系统的设计参数进行计算,可知系统的理论变焦位置,如表2所示。

表2 光学系统原理变焦位置

Tab.2 Theoretical zoom positions of system (mm)

	长焦	短焦
系统焦距	600	150
前变焦距离	137.2	78.3
后变焦距离	10.09	68.99
变焦比	4	

3 设计结果与分析

3.1 设计结果

根据制冷型红外光学系统的特点,并结合上述对超长焦距系统工作原理和变焦距光学系统设计理论的研究和分析,采用二次成像的光学系统结构,这种结构不但可有效控制透镜的口径,而且可保证达到100%的冷光阑效率。具体设计参数如表3所示。

表3 系统设计参数

Tab.3 Design parameters of system

参数名称	参数值
探测器	640 × 512 @ 15 μm
波段范围/μm	3.7 ~ 4.8
焦距/mm	600/150
视场角/(°)	0.92 × 0.73/3.67 × 2.93
$F/\#$	4
变倍比	4
第一片透镜口径/mm	150
系统总长/mm	308

光学系统共含有6片透镜,分为一次成像的前物镜组和二次成像的转像组两部分。前物镜组将光线聚焦在一次像面上,其作为转像组的物面,经过转像组后再次聚焦成像在焦平面探测器上。变焦功能在前物镜组中实现,前物镜组由前固定组和变焦组组成,变焦形式为正-负结构,变焦组沿轴向前后移动,在两个共轭位置形成两个互为倒数的放大倍率,从而实现4倍变焦比。

为了保证系统成像质量,并控制系统的加工成本和安装精度,系统中仅在最后一片口径较小的固定透镜上使用偶次非球面,非球面的加入有助于更好地校正系统像差并减少透镜数量。其它透镜全部采用普通球面面型,利用传统的磨抛工艺不仅降低加工难度,还可以保证面形精度。

光学系统采用硅、锗、硅、硅、硅的光学材料组合形式,除第二片选用锗材料外,其它全部使用硅材料。此种透镜搭配方式不仅可以校正系统的色差,还可以有效地减轻镜头的总重量。

最终优化得到的超长焦距红外双视场光学系统如图4所示,图4(a)和图4(b)分别为窄视场和宽视场。系统的焦距为600 mm/150 mm, $F/\#$ 为4,系统总长为308 mm,远小于其长焦焦距。

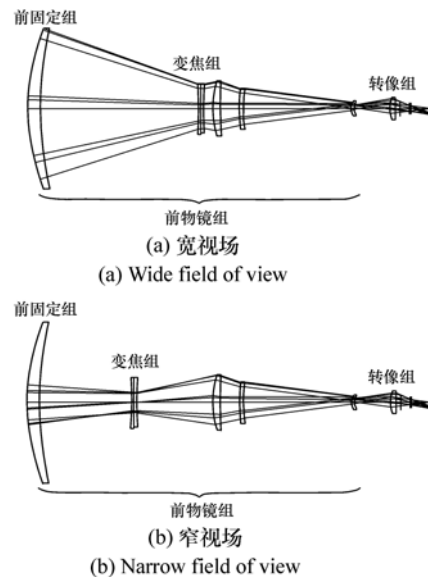


图4 超长焦距红外双视场光学系统

Fig.4 Layout of optical design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view

3.2 像质评价

利用光学调制传递函数(MTF)、弥散斑点列图和衍射能量曲线对超长焦距红外双视场光学系统的成像质量进行分析和评估。

3.2.1 光学调制传递函数

图5(a)和(b)分别为本系统长焦和短焦时的光学调制传递函数,由图可知,在探测器特征频率20 lp/mm时,不论长焦还是短焦,中心视场的

MTF 皆大于 0.5, 这说明本系统的分辨率和对比度较高。虽然边缘视场的光学调制传递函数略有下降, 但是超长焦距系统在实际观测、监控中主要为了远距离应用, 即中心视场成像决定其应用前景。

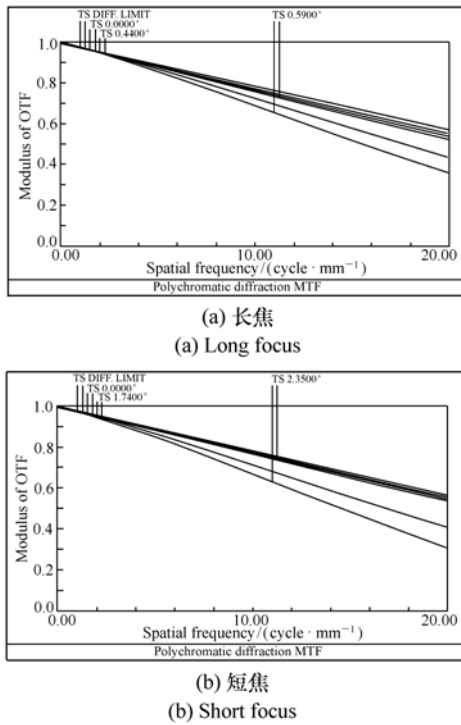


图 5 系统的光学调制传递函数

Fig. 5 MTFs of the system

3.2.2 点列图

系统长焦和短焦的弥散斑点列图及弥散斑尺寸如图 6 (a)、(b) 和表 4 所示, 系统成像光斑均方根直径最大只有 14.7 μm , 小于像元尺寸, 表明点目标经过光学系统的像完全落在一个像元之内。

表 4 弥散斑尺寸

Tab. 4 Spot diagram

像高/mm	弥散斑/ μm	
	窄视场	宽视场
0	10.2	9.04
4.3	10.54	9.34
6.15	11.06	9.66
8.61	12.43	12.2
12.3	14.32	14.7

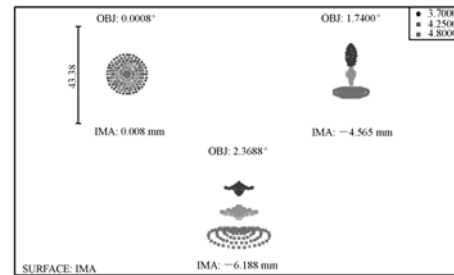
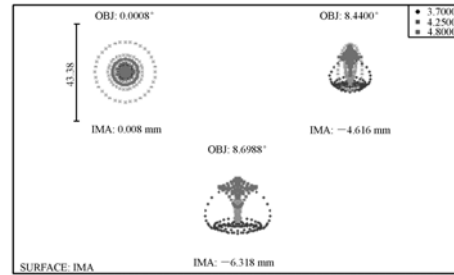


图 6 光学系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of the system

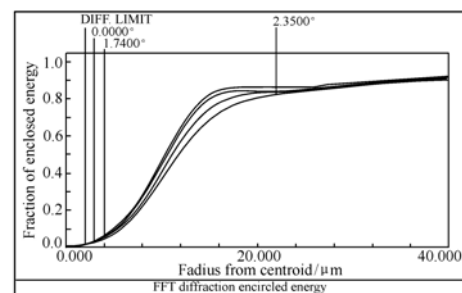
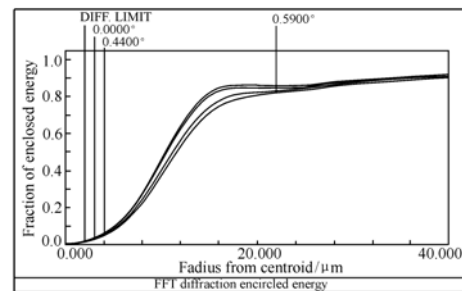


图 7 系统衍射能量曲线

Fig. 7 Encircled energy curves of the system

3.2.3 圈内能量

系统的长焦和短焦在接收半径为 10 μm 的探测器敏感元内的衍射能量曲线如图 7 (a) 和

(b)所示,从图中可以看出,双视场系统能量均大于80%,说明该尺寸与探测器匹配良好,满足了系统使用的基本需求。

经过优化,最终的光学系统对像差进行了严格的校正,从几种评价函数图中可以看到,光学系统成像质量良好,符合实际应用要求。

4 结 论

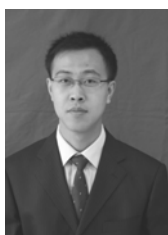
本文介绍了一种超长焦距红外双视场光学系

统。该系统采用二次成像技术,很好地平衡了制冷型焦平面探测器冷光阑匹配、光学系统轴向尺寸、镜头前端口径过大与系统超长焦距等之间的问题。本系统可以实现超长焦距600~150 mm的变焦功能,且中心视场在探测器特征频率20 lp/mm处的光学传递函数值高于0.5,具有较好的成像质量,能够同时满足军事侦察对远距离目标大视场搜索和小视场瞄准的要求。该系统必将在搜索、警戒、侦察等方面得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 569-573.
HU J X. Design of long focal length large aperture optical zoom system[J]. *J. Appl. Optics*, 2007, 28(5): 569-573. (in Chinese)
- [2] 杨智, 戴一帆, 张沛. 折衍混合在长焦物镜中的应用研究[J]. 激光技术, 2007, 31(2): 206-208.
YANG ZH, DAI Y F, ZHANG P. The study of hybrid refractive-diffractive telephoto lens[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 206-208. (in Chinese)
- [3] ARTHUR COX, JONATHAN S KANE. Optically compensated zoom lens design in the infrared[J]. *SPIE*, 2005, 5783: 887-898.
- [4] 孟剑奇. 双视场6倍变焦红外热成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 30(4): 89-92.
MENG J Q. Dual field zoom(6×) infrared imaging optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 30(4): 89-92. (in Chinese)
- [5] 陶亮, 赵劲松. 5×光学补偿长波红外连续变焦物镜系统[J]. 红外技术, 2008, 30(4): 210-213.
TAO L, ZHAO J S. Optically compensated LWIR zoom objective with magnification of 5×[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(4): 210-213. (in Chinese)
- [6] SCHREER O, LÓPEZSÁENZ M, PEPPERMÜLLER CH, et al. Helicopter-borne dual-band dual-fpa system[J]. *SPIE*, 2003, 5074: 637-647.
- [7] ANTONIN M, JIRI N, PAVEL N. Zoom lens design[J]. *SPIE*, 2005, 8233: 1-9.
- [8] 魏群, 艾兴乔, 贾宏光. 小型可见光双视场光学系统的研制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 739-744.
WEI Q, AI X Q, JIA H G. Development of small-scale and dual-field visible light optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 739-744. (in Chinese)
- [9] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2003.
LI X T, CEN ZH F. *Geometrical Optics Aberrations and Optical Design*[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
ZHANG Y M. *Applied Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982. (in Chinese)

作者简介:



白玉琢(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,高级工程师,2007年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事红外光学系统的开发及整机检测方面的研究。E-mail: 15808765752@163.com



贾钰超(1988—),男,河北晋州人,硕士,2010年、2013年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外光学系统设计方面的研究。E-mail: jiayuchao@qq.com



木锐(1975—),男,云南人,高级工程师,主要从事光学加工及镀膜工艺方面的研究。E-mail:murui@263.net



薛经纬(1982—),男,吉林公主岭人,本科,工程师,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学检测等方面的研究。E-mail:xjwkiro@sina.com



马琳(1981—),女,吉林人,硕士,高级工程师,主要从事红外光学系统方面的研究,E-mail:malin_box@163.com



普群雁(—),女,云南广南人,本科,工程师,1994年于云南民族学院获得学士学位,主要从事光学检等方面的研究。E-mail:puqunyan@163.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、材料物理和化学;液晶光学与光子学、生物液晶;液晶显示、有机电致发光显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:40元/期

网 址:www.yjyxs.com