

文章编号 1674-2915(2012)06-0596-06

机载双视场中波红外光学系统优化设计

董科研^{1*}, 王健², 孙强², 王洪亮³, 李全熙⁴, 姜会林¹

- (1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 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;
3. 第二炮兵驻北京军代室, 北京 100039;
4. 中国人民解放军海军 91329 部队装备部, 山东 威海 264200)

摘要: 为了满足机载红外搜索与跟踪系统的实际使用要求, 根据变焦系统的基本理论及中波红外系统的特点, 设计了 320 pixel × 256 pixel 的中波制冷型焦平面阵列探测器的双视场中波红外光学系统。系统采用了二次成像结构, 并在系统的第一像面位置安装光阑, 以此减小杂散光对系统的影响。设计结果表明: 系统具有 100% 冷光阑效率, 在仅移动一片透镜的情况下可实现 800 和 400 mm 的两档变焦, 系统 F 数为 4 且恒定不变, 像面保持稳定, 系统场曲 < 0.04 mm, 畸变 $< 2.5\%$, 在探测器的 Nyquist 频率 16 lp/mm 处光学传递函数的峰值 > 0.5 , 表明光学系统的像质满足使用要求。

关键词: 中波红外光学系统; 光学设计; 双视场; 机载; 搜索与跟踪系统

中图分类号: TN216 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20120506.0596

Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared optical system

DONG Ke-yan^{1*}, WANG Jian², SUN Qiang², WANG Hong-liang³, LI Quan-xi⁴, JIANG Hui-lin¹

- (1. *Institute of Space-electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
3. *Military Representative Office of PLA 2nd Artillery in Beijing, Beijing 100039, China;*
4. *Equipment department of No. 91329 Troop, the People's Liberation Army Navy, Weihai 264200, China)*

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

Abstract: In order to meet the practical requirement of airborne infrared searching and tracking systems, a dual Field-of-View(FOV) middle wave(MW) infrared optical system is designed based on the MW cooled detector with 320 pixel × 250 pixel and a staring focal plane array. The system adopts the secondary imaging structure and a shield is installed in the first image surface station to reduce the stray light effect. The design

收稿日期: 2012-09-19; 修订日期: 2012-11-16

基金项目: 教育部博士学科重点专项科研基金资助项目(No. 20070189001); 国家自然科学基金资助项目(No. 61077056)

results show that the system has a 100% cold shield efficiency; F number of the system keeps a constant as 4 and the image surface remains stable when only one piece of the optical lens is moved to switch the focus length between 800 mm and 400 mm; the field curvature and the distortion are less than 0.04 mm and 2.5%, respectively, and the MTF is more than 0.5 at 16 lp/mm. Obtained results demonstrate that the image quality meets the operational requirement.

Key words: middle wave infrared optical system; optical design; dual field of view; airborne; searching and tracking system

1 引言

为适应现代战争的需要,世界各国正积极研制并装备机载吊舱系统,以提高军事侦察能力,而前视红外系统是机载吊舱系统中的关键子系统之一,它可以在全天候情况下进行空对地及空对空的搜索,截获,识别和跟踪地面、空中目标。随着红外探测器技术的长足发展及应用范围的不断扩展,红外双视场及连续变焦光学系统的需求日益增加。相比于连续变焦光学系统,双视场红外光学系统具有结构简单的优点,该系统仅通过透镜组之间的间隔改变,便可实现双视场间的切换,且成像质量好、视场切换速度快、装调容易,因此在现代军事中发挥了不可替代的作用,具有广泛的应用前景和其它技术手段无法比拟的优势^[1-4]。

本文在考虑机载平台对其载荷的各种约束条件基础上,针对 320 pixel × 256 pixel 的中波制冷型焦平面阵列探测器,设计了一款适用于机载红外搜索与跟踪的双视场中波红外光学系统。该系统采用二次成像结构,利用轴向移动形式,在仅移动一片透镜的情况下,实现了焦距在 800 和 400 mm 的两档变换,通过光路二次折转实现了系统的小型化、轻量化和高稳定性,满足了机载平台的使用要求。

2 结构原理

双视场红外光学系统的视场切换方式主要分为轴向移动式 and 切入切出式。轴向移动式通过透镜组的轴向移动来改变系统的焦距;切入切出式则是利用机械切换组件增加或减少光路中的透镜组来改变焦距。切入切出式的机械结构较为复

杂,体积较大,装调难度大,对运动件的定位精度要求高,否则会影响大小视场的光轴一致性;轴向移动式体积小,结构紧凑,光轴一致性指标易于实现^[5-10]。图 1 为轴向移动式变倍系统的基本结构图,其通过变倍组的轴向移动来实现宽视场和窄视场的两档切换。

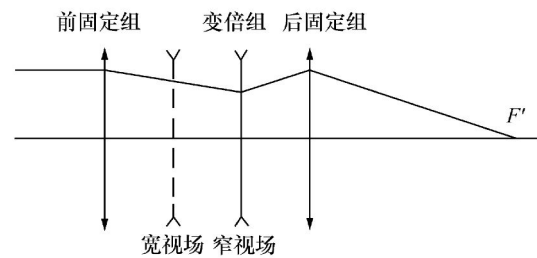


图 1 轴向移动式基本结构图

Fig. 1 Structure of axial movement

对于双视场红外光学系统,变倍组在焦距切换时满足物像交换原则,设 α 为系统倍率,则变倍组对焦距的变化为 α^2 ,短焦距时变倍组的倍率 α_{2s} 为^[11]:

$$\alpha_{2s} = -\frac{1}{\sqrt{\alpha}}. \quad (1)$$

长焦距时变倍组的倍率 α_{2L} 为:

$$\alpha_{2L} = -\sqrt{\alpha}. \quad (2)$$

由 $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_2'}$ 可得:

$$l = \frac{(1 - \alpha) \cdot f_2'}{\alpha}. \quad (3)$$

当变倍组处于长焦距和短焦距时,变倍组的移动量为:

$$\Delta = \left[\frac{(1 - \alpha_{2s})}{\alpha_{2s}} - \frac{(1 - \alpha_{2L})}{\alpha_{2L}} \right] \cdot f_2'. \quad (4)$$

设变倍组与固定组的最小间隔为 d ,短焦距时变倍组的物距为 l_s ,则固定组焦距 f_1' 为:

$$f_1' = d + l_s = \frac{(1 - \alpha_{2s}) \cdot f_2'}{\alpha_{2s}} + d. \quad (5)$$

由式(4)、(5)可看出,变倍组焦距直接影响变倍组移动距离,同时影响固定组焦距 f_1' 的选取,变倍组的移动距离和其焦距成正比,为了减小长焦距和短焦距的切换时间,并缩短整个光学系统的长度,在系统优化过程中,应对变倍组焦距及其轴向尺寸进行约束限制,从而实现较短轴向尺寸、不同目标距离条件下清晰成像的设计结果。

3 设计思想

3.1 系统分析

本文设计的双视场光学系统工作中波红外波段,且焦距在800和400mm两档变换,采用的探测器为像元尺寸为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 的320 pixel \times 256 pixel 制冷型凝视焦平面阵列探测器。为保证制冷型红外探测器对100%冷光阑匹配的基本要求,系统选择二次成像结构,并把探测器冷光阑作为系统的孔径光阑,以抑制杂散光对光学系统的影响,同时避免因光束切割而造成能量损失。相对于一次成像结构,该结构能够最大限度地减小光学元件尺寸,有效减轻系统重量和体积,满足机载平台对载荷的要求^[12-13],表1为本系统的光学设计参数。

表1 光学设计参数

Tab.1 Optical design parameters

性能指标	参数
探测器	320 pxel \times 256 pixel, 像元尺寸 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$
工作波段	$3.7 \sim 4.8\ \mu\text{m}$
焦距	800 mm, 400 mm 两档变焦
F数	4
视场	$\pm 0.44^\circ / \pm 0.88^\circ$

3.2 像差分析和光学设计

按照技术要求,结合轴向移动式双视场切换原理及系统光焦度的分配原则,依据高斯光学理论计算出系统的初始结构,利用CODE V光学辅助设计软件对初始结构进行优化,系统最终设计结果如图2所示。为使系统结构简单、紧凑,本系统选用正负正光学结构,即固定组为正透镜组,变

倍组为单负透镜,后固定组为正透镜组,利用单负透镜轴向平移来切换视场。在系统光路中,折叠光路采用了2片反射镜,从而减小了系统体积,负透镜选择硫化锌材料,用于校正系统的彗差和轴外像差,整个系统采用单晶锗、硅和硫化锌3种常用的红外光学材料。

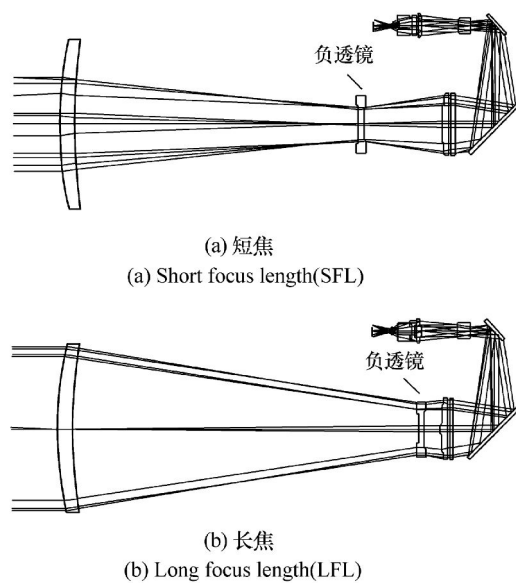


图2 两视场中波红外光学系统结构图

Fig. 2 Schematic of dual field-of-view MW infrared optical system

从图中可以看出,通过移动负透镜就能实现双视场的转换。为保证系统在长焦和短焦位置全孔径内都获得满意的像质,在透镜2前表面及透镜5后表面引入了非球面,用以平衡轴外像差、场曲、色差。通过优化设计,双视场光学系统的总长为530mm,处于宽视场时第1块透镜通光口径为200mm,双视场光学系统的基本变焦位置如表2所示。

表2 双视场中波红外光学系统的变焦位置

Tab.2 Zoom position of dual field-of-view MW infrared optical system

系统焦距	短焦/mm	长焦/mm
前固定组与变倍组	345.32	419.94
变倍组与后固定组	20.00	94.61

调制传递函数(MTF)能够全面地评价出光

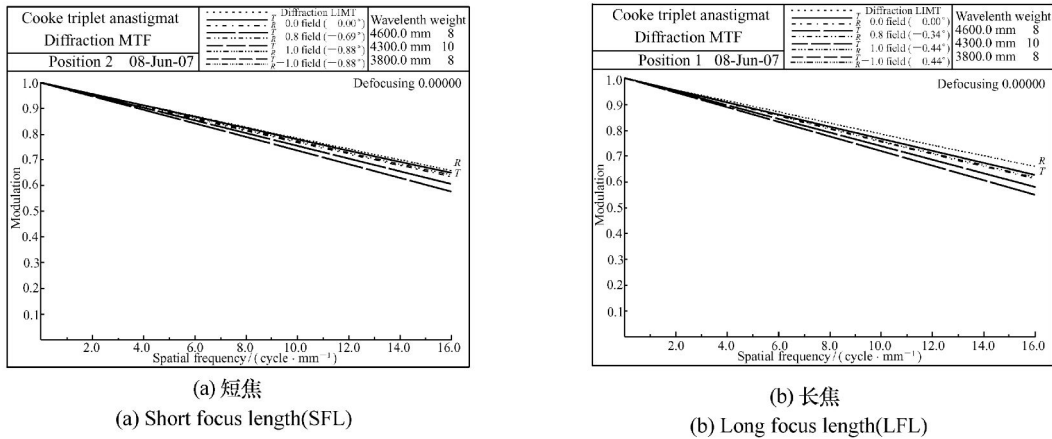


图 3 两视场红外光学系统 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of dual field-of-view MW infrared optical system

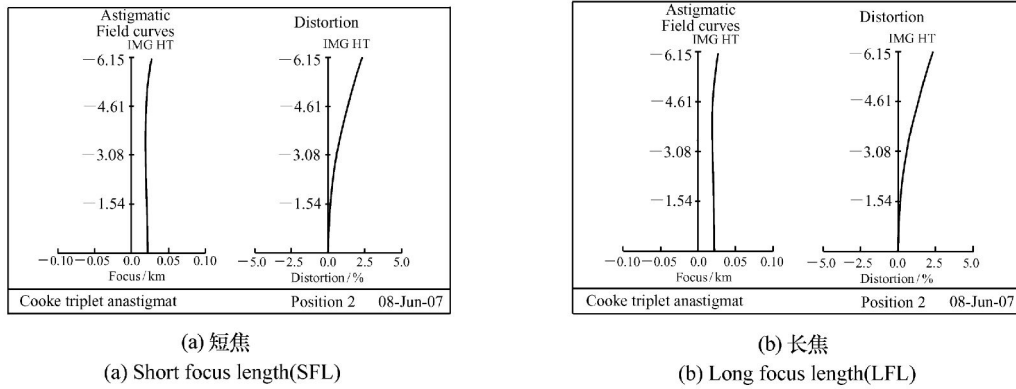


图 4 两视场红外光学系统的场曲、畸变图

Fig. 4 Field curvature and distortion diagram of dual field-of-view MW infrared optical system

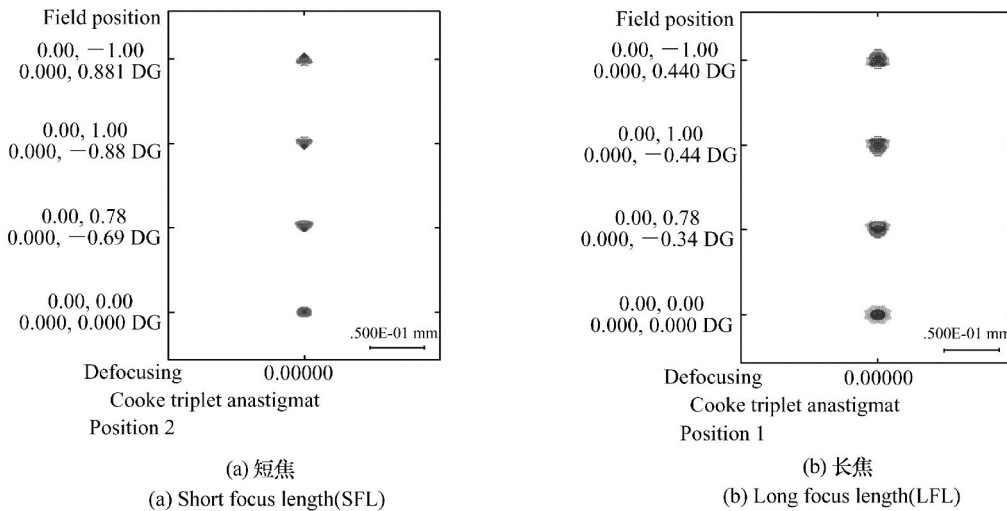


图 5 两视场红外变焦系统点列图

Fig. 5 Spot diagrams of dual field-of-view MW infrared optical system

学系统的成像性质,包括系统的分辨率和对比度,本系统的调制传递函数曲线如图3所示,从曲线可以看出,在系统 F 数为4且恒定不变,像面保持稳定的情况下,焦距可在800和400 mm两档变焦,在探测器的Nyquist频率16 lp/mm处的MTF值 >0.5 ,接近衍射极限;本系统的场曲、畸变图如图4所示。从图中可以看出,双视场的场曲 <0.04 mm,畸变 $<2.5\%$;点列图是光学系统对点目标成像时所形成的几何像斑,图5给出了窄、宽视场的弥散斑直径均方根值(RMS),双视场的RMS <30 μm ,满足探测器的使用要求。

4 结 论

针对像元大小为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 的中波红外 $320\ \text{pixel} \times 256\ \text{pixel}$ 制冷型凝视焦平面阵列探测器,通过技术指标需求分析,结合中波红外系统的光学特性,采用CODE V光学辅助设计软件,设计了满足机载红外搜索与跟踪系统实际使用要求的双视场中波红外系统,实现了800 mm/400 mm两档变焦。该系统在宽、窄视场都具有良好的成像质量,可在大范围内搜索目标的同时,对具体目标进行识别和分析。此类系统可以广泛应用在军事、民用方面,特别适用于对目标进行跟踪和识别。

参考文献:

- [1] DOV F, ZINOVY E, ARIE C. Dichroic beamsplitter for a dual-wavelength camera in a long-range airborne reconnaissance system[J]. *SPIE*, 2005, 5783: 827-834.
- [2] 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.
TANG D W, SUN Q, WANG J, *et al.*. Design of hybrid refractive diffractive dual field of view infrared optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11): 2062-2067. (in Chinese)
- [3] 郜洪云, 熊涛. 中波红外两档变焦光学系统[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1891-1894.
GAO H Y, XIONG T. Design of middle infrared continuous system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1891-1894. (in Chinese)
- [4] MANN A. Infrared zoom lenses in the 1990s[J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33(1): 109-115.
- [5] 陈吕吉, 陈津津, 李萍. 新颖变焦双视场长波红外光学系统设计[J]. *红外技术*, 2011, 33(7): 406-410.
CHEN L J, CHEN J J, LI P. A novel step-zoom LW infrared dual field-of-view optical system design[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(7): 406-410. (in Chinese)
- [6] 杨乐, 孙强, 王健, 等. 长波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 999-1004.
YANG L, SUN Q, WANG J, *et al.*. Design of long-wave infrared continuous zoom optical system[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2012, 41(4): 999-1004. (in Chinese)
- [7] 张鑫, 贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计[J]. *中国光学*, 2011, 4(4): 374-379.
ZHANG X, JIA H G. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 374-379. (in Chinese)
- [8] 程欣, 张葆, 洪永丰, 等. 机载高光通量双波段成像光谱仪的设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 690-695.
CHENG X, ZHANG B, HONG Y F, *et al.*. Optical design of an airborne dual-wavelength imaging spectrometer with high throughput[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2012, 41(3): 690-695 (in Chinese)
- [9] 白瑜, 邢廷文, 林妮媚, 等. 中波红外成像无热化光学系统设计[J]. *应用光学*, 33(1): 181-185.
BAI Y, XING T W, LIN W M, *et al.*. Athermalization of middle infrared optical system[J]. *J. Appl. Opt.*, 33(1): 181-185. (in Chinese)
- [10] 郜洪云, 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.
GAO H Y, XIONG T, YANG CH CH. Middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15

- (7):1038-1043. (in Chinese)
- [11] 张明意,李保平,万中南,等. 折-衍混合型两档变倍红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2008,37(5):850-853.
- ZHANG M Y,LI B P,WAN ZH M,*et al.*. Design of the switch-zoom dual-field-of-view infrared optical system with hybrid refractive-diffractive[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2008,37(5):850-853. (in Chinese)
- [12] 杨为锦,孙强. 中波红外连续变焦系统设计[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(2):164-169.
- YANG W J,SUN Q. Design of middle infrared continuous zoom system[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2010,3(2):164-169. (in Chinese)
- [13] 赵新亮,王海霞,崔莉,等. 长波双视场扫描型红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2011,40(8):1517-1520.
- ZHAO X L,WANG H X,CUI L,*et al.*. Design of dual-field scanning LWIR optical system[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2011,40(8):1517-1520. (in Chinese)

作者简介:董科研(1980—),男,吉林梅河口人,博士,助理研究员,主要从事光学设计及系统仿真等方面的研究。

E-mail:dongkeyan@163.com