

文章编号 1004-924X(2012)10-2117-06

大面阵中波红外连续变焦光学系统设计

骆守俊*, 何伍斌, 李文虎, 徐明轩
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:针对制冷式大面阵 640×512 凝视焦平面阵列探测器, 设计了一套中波红外连续变焦光学系统。该系统由变焦系统和二次成像系统构成, 包括 7 片透镜和 2 个反射镜组成的折叠光路。首先, 根据变焦原理和专业光学设计软件给出了系统结构及其参数。然后, 分析了系统的像质和冷反射效应。最后, 验证了系统的性能指标。结果表明: 该系统可以实现 50~500 mm 的连续变焦, 变焦过程中目标景物始终清晰可见; 系统在耐奎斯特频率处的全视场光学传递函数大于 0.35, 全视场畸变小于 2%, 无冷反射现象; 具有分辨率高、热灵敏度高、像质好、变焦轨迹平滑等特点, 基本满足设计要求。

关键词: 红外光学系统; 连续变焦; 大面阵探测器; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2117

Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA

LUO Shou-jun*, HE Wu-bin, LI Wen-hu, XU Ming-xuan

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

* Corresponding author, E-mail: luoshoujun@tsinghua.org.cn

Abstract: A mid-wavelength continuous zoom optical system was presented for a staring Focal Plane Array(FPA) infrared detector by cooling assembly. The optical system with an optical configuration of reflect mirror fold was composed of a zoom object lens system and a secondary imaging system including seven lenses and two reflectors. On the basis of zoom principles, the systemic structure and design parameters were given by using special optical design software, then the schematic diagram and imaging quality were investigated. Finally, the performance and indexes of the system were verified. The results indicate that the system can offer a 50—500 mm continuous zoom and 100% cold shield efficiency. Moreover, the Modulation Transfer Function (MTF) in whole fields at Nyquist frequency is over 0.35 and the whole field distortion is below 2%. These results show that the system is characterized by high resolution, thermal sensibility, excellent images and smooth zoom locus.

Key words: infrared optical system; continuous zoom; large Focal Plane Array(FPA); optical design

收稿日期: 2012-05-09; 修订日期: 2012-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41172110)

1 引言

红外成像系统以被动工作方式,具有抗电子干扰、隐蔽性好、图像直观、易于观察、精度高、低空探测性能好等优势,在警戒、侦察、地面防空和制导等军事领域中得到了广泛应用,从而受到各国相关研究机构及人员的关注^[1-3]。近年来,随着红外光学技术特别是探测器工艺的不断改进,红外系统的应用在广度和深度上都有着长足的发展。不同于单视场或多视场光学系统,红外连续变焦光学系统在改变视场的同时,像面稳定清晰,不会发生目标丢失的问题,所以既可以大视场搜索目标,又可以小视场跟踪目标,因此其需求日益增强^[4]。加拿大 wescam 公司 Sinclair 设计的中波连续变焦镜头,其成像质量接近于衍射极限,但该镜头使用了 11 片镜片,结构复杂,系统透过率低^[5]。已报道的中波连续变焦镜头主要是基于 320×240 的面阵探测器^[6-10],不能满足红外成像系统的应用需求。

大面阵 640×512 面阵探测器与 320×240 面阵探测器相比,像元数有了大幅度的增加,大大提高了系统对景物的分辨本领,不仅可以看到更多的景物细节,而且画面在感官上也更加舒适;但是像元数的增加无疑加大了光学设计的难度。本文采用 640×512 中波红外制冷式焦平面探测器,设计了一个 10 倍连续变焦光学系统。该系统仅用了 7 片透镜和 2 个反射镜,采用了二次成像结构和折叠光路的设计。该系统的焦距为 $50 \sim 500$ mm,具有结构紧凑变焦曲线平滑等优点。在加工装配完成后,利用该系统对实际景物所成的红外图像在全视场范围内细腻、柔和,连续变焦过程中目标景物始终清晰可见,尤其在长焦时细节处表现完美。

2 系统参数及其设计原理

2.1 设计参数

本文采用的探测器为中波 640×512 制冷型探测器,其像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 。根据系统要求,其光学设计参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab. 1 Parameters of optical design

工作波段	$3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$
有效口径	$< 130 \text{ mm}$
变焦倍率	$10 \times$
焦距	$50 \sim 500 \text{ mm}$
F 数	4
透过率	$> 75\%$
传递函数	$> 0.3 (20 \text{ c/mm})$
畸变	$< 2\%$

2.2 设计过程

系统的设计过程分为 3 个阶段:变焦距系统的结构组成、外形尺寸计算与像差设计。

变焦距系统结构原理是利用系统中 2 个或 2 个以上透镜组的移动来改变系统组合焦距,同时保持像面位置不动,且在变焦过程中像质始终保持良好。实际使用的变焦距光学系统通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 个透镜组组成。

外形尺寸计算是要根据系统要求的焦距范围、相对孔径、像面大小和外形尺寸确定系统中每个透镜的焦距和变焦透镜组的移动范围。像差设计过程中的难点是要校正好变焦系统各焦距位置的像差。为了校正像差、提高像质,除了利用光学软件进行像差平衡外,还有以下两种措施:(1)合理搭配使用红外光学材料,将色差降到最小;(2)使用非球面及衍射面提高像质,改善系统的畸变。

3 设计结果与分析

3.1 设计结果

本系统由变焦物镜系统和二次成像系统构成,采用反射镜折叠光路,共使用了 7 片透镜和 2 个反射镜,如图 1 所示。其中,(a)、(b)、(c)分别为短焦(50 mm)、中焦(250 mm)和长焦(500 mm)3 种情况下的外形结构示意图。变焦物镜系统包括前固定组,变焦组,补偿组和后固定组,它们对系统光焦度的贡献分别为正、负、正、负。二次成像组件能够压缩前组透镜口径,保证系统满足 100%冷光阑效率。通过两个反射镜的折叠缩短了横向尺寸,得到了较紧凑的结构形式,光学系统第一片的透镜有效口径小于 123 mm,满足设计指标要求。系统整个外形尺寸为 $350 \text{ mm} \times$

245 mm×140 mm(长×宽×高),满足实际使用的安装空间要求。为了提高像质降低使用镜片

数,系统使用了 3 个非球面,并在其中两个镜片上设置了衍射面,衍射效率经实测均在 96%以上。

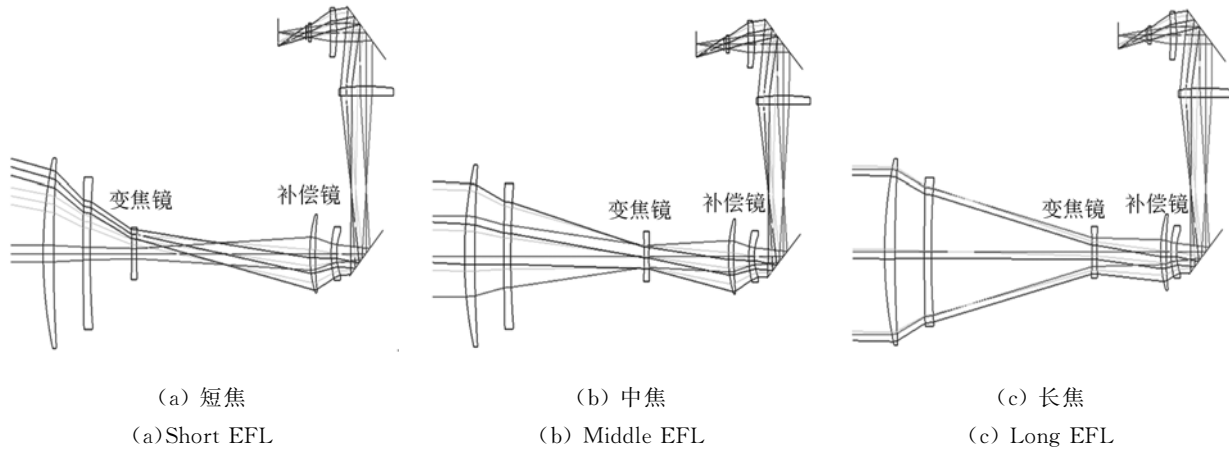


图 1 不同焦距位置的光学结构图

Fig. 1 Optical configuration in different zoom positions

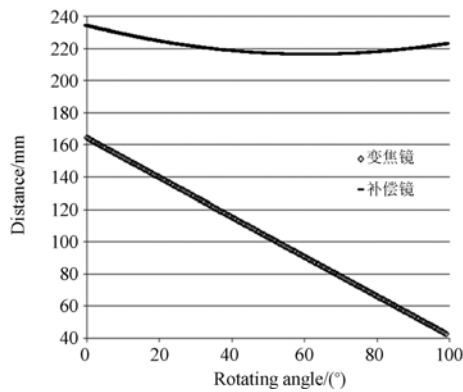


图 2 光学系统变焦轨迹图

Fig. 2 Movement track of zoom lens

图 2 为系统的变焦轨迹曲线,图中纵坐标为运动组元距前固定组的距离,横坐标为凸轮转动角度,上下两条曲线分别代表补偿镜和变焦镜的运动轨迹。从图可以看出其变焦轨迹简单,曲线比较平滑(其中变焦镜为线性移动),这样既能保证加工精度,也有利于实现机电控制。

3.2 像质评价

该系统不同变焦位置点的传递函数曲线 (Modulation Transmission Fuction, MTF)如图 3 所示。其中,(a)、(b)、(c)分别为短焦、中焦和长焦 3 种情况。从图中可以看出,其全视场的 MTF 均大于 0.35,满足指标要求。

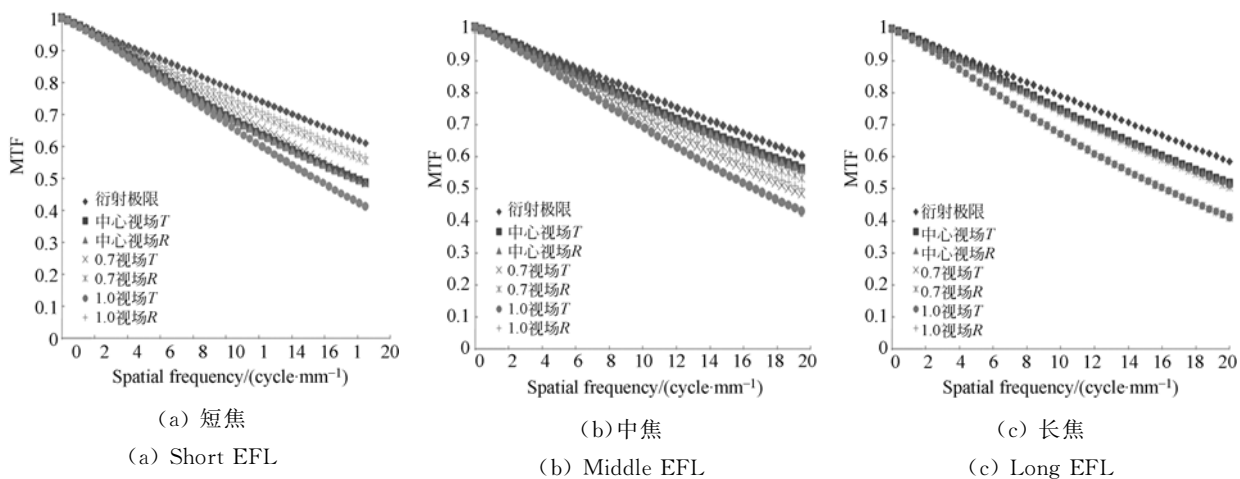


图 3 不同变焦位置的 MTF 曲线图

Fig. 3 MTFs in different zoom positions

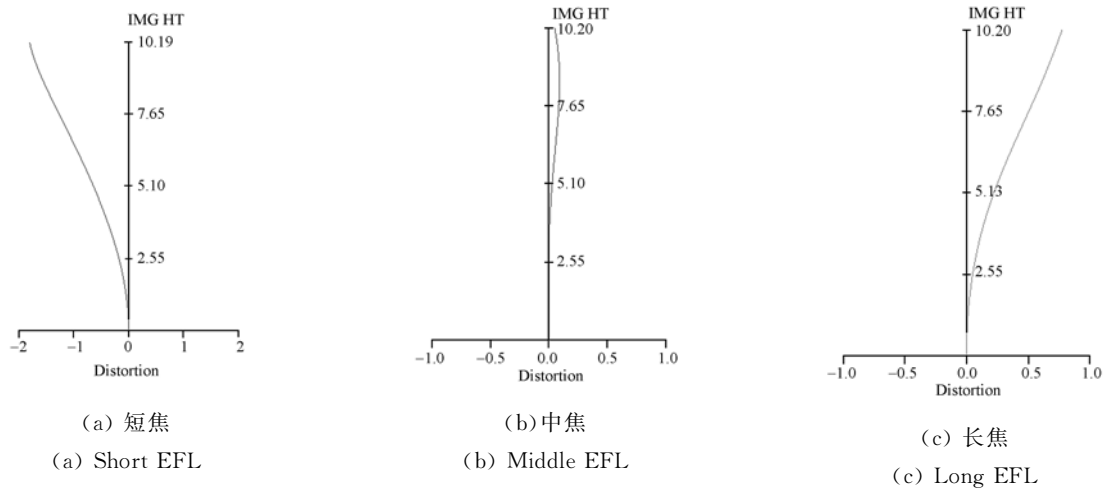


图 5 不同变焦位置的畸变图

Fig. 5 Distortion in different zoom positions

系统不同变焦位置处的全视场畸变如图 5 所示。其中, (a)、(b)、(c) 分别是短焦、中焦、长焦的畸变曲线, 从图中可以看出, 系统的全视场畸变 $< 2\%$, 满足系统指标。

3.3 冷反射分析

探测器通过前置光学系统中折射面的微弱反射, 接收到自身及周围低温控环境的辐射, 形成冷像。如果冷像的辐射强度发生变化, 就会出现不可滤掉的交流噪声信号叠加在景物信号上, 在热图像的中心形成黑斑, 严重干扰对景物图像的观察^[11]。所以, 在光学设计中要充分并最大限度地减小冷反射现象。考察冷反射的两个重要参数是 YNI 和 I/I_{BAR} , 其中 Y 是边缘光线在该面的投射高, N 是折射率, I 是边缘光线的入射角度, I_{BAR} 是主光线的入射角度。在 YNI 很小且 $I/I_{\text{BAR}} < 1$ 时, 该面可能会成为产生冷反射的问题面。对 3 种状态下光学系统的冷反射进行分析后, 发现短焦端的冷反射最为强烈, 因此这里主要分析短焦端的情况。表 2 为系统短焦端的冷反射分析。

从表 2 可以看出, 最有可能产生严重冷反射效应的是第 1, 6, 9, 13 和 15 面。其中, 第 1, 9 面的 $I/I_{\text{BAR}} > 1$, 不会出现导致图像不均匀的冷反射像; 第 13, 15 面产生的冷反射用放置在 1 次像面前的参考源来校正, 即利用可控温参考源和相应的均匀性校正算法来处理该面的冷反射。因此, 重点考虑第 6 面。这里, 采用反向追迹光线法将整个系统倒过来, 将探测器作为冷光源, 追迹从它发出的反向光线。图 6 为第 6 个面的冷反射光线

追迹示意图, 其中, 经过这两个面反射回去的冷反射像成像在探测器像面前 50 mm 处。由此可见, 第 6 面反射回来的光线没有聚焦在探测器上, 因此, 并不会带来严重的冷反射效应。

表 2 冷反射分析

Tab. 2 Narcissus analysis

面	切割光线面	YNI	I/I_{BAR}	冷反射相对强度比
1	21 (F)	0.15	-2.151	1
2	21 (R)	-0.20	0.07	0.076
3	21 (R)	-0.18	0.072	0.11
4	21 (R)	-0.07	0.04	0.347
5	21 (R)	-0.14	0.077	0.29
6	21 (F)	0.24	-0.512	1
7	21 (R)	2.43	-0.524	0.046
8	13 (R)	-2.36	-1.2	0.077
9	13 (R)	-1.03	-2.74	0.424
10	21 (R)	0.692	-0.282	0.181
12	21 (R)	0.486	1.545	0.321
13	21 (R)	-0.078	0.05	0.489
15	21 (F)	0.567	-0.761	1
16	21 (R)	-0.616	0.329	0.2



图 6 冷反射光线追迹图

Fig. 6 Schematic diagram of cold reflection ray-tracing

3.4 实验验证

图 7 是系统对 3.5 km 处高压线铁塔变焦成像的截图。在变焦过程中, 像质清晰无冷反射引

起的黑斑。经测试,全视场畸变最大为 1.86%,特征频率下 MRTD(Minimum Resolvable Tem-

perature Difference) <0.15 K,透过率为 78.5%,达到了设计要求。

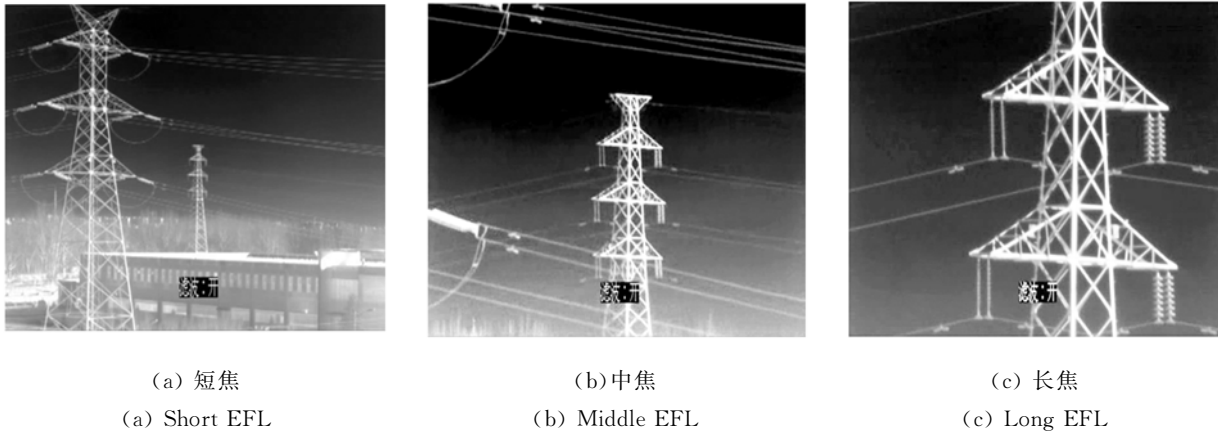


图 7 不同焦距位置的成像截图

Fig. 7 Screenshots in different zoom position

4 结 论

本文设计了一个适用于大面阵中波制冷式 640×512 焦平面阵列探测器的连续变焦光学系统。该系统由变焦物镜系统和二次成像系统构

成,满足 100% 的冷光阑效率,可以实现 50~500 mm 的连续变焦,采用反射镜折叠光路,实现了较紧凑的结构形式。系统具有分辨率高、热灵敏度高、像质好、变焦轨迹平滑等特点,因此,在导航、搜索、警戒、侦察等方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] GREALISH K, KACIR T, BACKER B, *et al.*. An advanced infrared thermal imaging module for military and commercial applications [J]. *SPIE*, 2005, 5796:186-192.
- [2] 骆守俊,张浩,宋春鹏. 一种新型非制冷焦平面双视场红外光学系统[J]. *激光与红外*, 2009, 38(9): 965-968.
LUO SH J, ZHANG H, SONG CH P. Novel dual field of infrared optical system for uncooled focal plane detector [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 38(9):965-968. (in Chinese)
- [3] RONTIS, SOLAZZO S, BLANCO A, *et al.*. An infrared zoom for space applications [J]. *Planetary and Space Science*, 2000, 48:523-528.
- [4] 许照东,刘欣,董涛. 机载高分辨连续变焦红外热像仪设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5):619-621.
XU ZH D, LIU X, DONG T. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineer-*
- ing*, 2007, 36(5):619-621. (in Chinese)
- [5] SINCLAIR R L. High magnification zoom lenses for 3-5 μm application [J]. *SPIE*, 1998, 3429:11-18.
- [6] 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.
- [7] 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)
- [8] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计 [J]. *应用光学*, 2006, 27(1):32-34.
ZHANG L. Optical design for middle infrared zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(1):32-34. (in Chinese)
- [9] 王海涛,郭良贤. 制冷型中波红外变焦镜头 [J]. *红外技术*, 2007, 29(1):8-11.
WANG H T, GUO L X. Cooled thermal imaging

mid-wavelength infrared zoom camera[J]. *Infrared Technology*, 2007,29(1):8-11. (in Chinese)

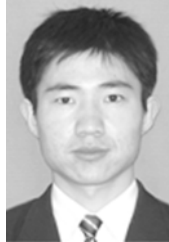
[10] SCHERR L M, ORLANDO H J, HALL J T, et

al.. Narcissus considerations in optical designs for infrared staring arrays[J]. *SPIE*, 1996, 2864: 4422452.

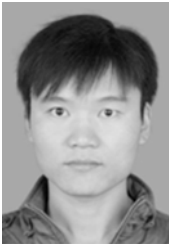
作者简介:



骆守俊(1978—),男,江苏镇江人,高级工程师,2005年于清华大学获得硕士学位,主要从事红外光学系统的研究。E-mail: luoshoujun@tsinghua.org.cn



李文虎(1985—),男,河北衡水人,工程师,2007年于山东大学获得学士学位,2010年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事光学图像处理的研究。E-mail: liwenhu66@126.com



何伍斌(1985—),男,湖北鄂州人,工程师,2008年于中国海洋大学获得学士学位,2010年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事红外光学系统的研究。E-mail: he-wu-bin@163.com



徐明轩(1985—),男,北京人,工程师,2008年毕业于北京工业大学机械工程专业及自动化专业,主要从事光学结构设计方面的工作。E-mail: xumingxuan_2004@126.com

● 下期预告

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制

周海金^{1,2}, 刘文清², 司福祺², 江宇², 薛辉²

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪通过获取地球大气或表面反射、散射的紫外/可见光辐射, 监测各种痕量气体的全球分布, 而杂散光是影响系统测量精度的重要因素之一。为抑制杂散光, 设计了遮光罩和其他消杂光结构。针对系统紫外通道 1, 利用 TracePro 软件, 分析了该通道杂散光水平。通过仿真分析, 确定了杂散光传输的一次、二次散射路径。根据杂散光传输路径, 计算了杂散光评价指标点源透射比(PST)曲线。发现杂散光抑制措施效果明显: PST 小于 3×10^{-5} , 中心视场杂散光照度水平为 5.472×10^{-4} , 最终杂散光水平达到了设计指标要求。并采用截止滤光片法测量了系统的杂散光水平, 中心视场杂散光比值 8.167×10^{-4} , 和仿真结果接近, 验证了仿真过程的准确性, 说明设计的消杂光机构能够满足系统的杂散光抑制要求。