

文章编号 1004-924X(2007)07-1038-06

中波红外连续变焦光学系统

郜洪云¹, 熊涛², 杨长城²

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 2. 华中光电技术研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对制冷式 320×240 凝视焦平面阵列探测器, 设计了一个中波红外连续变焦光学系统。该系统由变焦物镜系统和二次成像系统构成, 包括 7 片透镜, 引入一个非球面, 并采用两个反射镜折叠光路。利用变焦系统原理和光学设计软件给出了系统的光学参数和外形结构图, 并对其像质和冷反射进行了系统分析。该系统可以实现 $50 \sim 500$ mm 的连续变焦, 工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 满足 100% 冷光阑效率。结构紧凑, 像质较好, 变焦行程短, 变焦轨迹平滑。

关键词: 红外光学系统; 连续变焦; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Middle infrared continuous zoom optical system

GAO Hong-yun¹, XIONG Tao², YANG Chang-cheng²

(1. *Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;*

2. *Huazhong Institute of Optoelectronic Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: For cool 320×240 detector with staring focal plane array, a middle infrared continuous zoom optical system was presented. The optical system using optical configuration of reflect mirror fold is composed of a zoom object lens system and a secondary imaging system, including seven lenses and two reflectors. Based on the practical requirement and feature parameters of detector, the optical design parameters were given. Using zoom system principle and optical design software, the schematic diagram, modulation transfer function (MTF) curve, spot diagram, and Root Mean Square (RMS) value of the spot diameter were investigated. Finally, the cold reflection ray-tracing of short EFL end was studied and the correlative schematic diagram was also given. The results indicate that the optical system with $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ spectral region can realize $50 \sim 500$ mm continuous zoom and satisfy 100% cold shield efficiency. It has the advantages of simple structure, high image quality, short zoom path and smooth zoom locus. And moreover, only one aspheric surface is adopted in the system, so the system is in a low price and easy to machine and adjust.

Key words: infrared optical system; continuous zoom; optical design

1 引言

红外成像系统以其自身的优良特点,如被动工作方式,不会被敌方电子干扰、隐蔽性好;图像直观,易于观察;精度高;低空探测性能好等,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,受到众多相关研究人员的关注^[1-5]。近年来,随着红外光学技术的长足发展及其应用范围的不断扩展,对红外连续变焦光学系统的需求日益增强。这是由于红外连续变焦光学系统的焦距在一定范围内连续改变时,像面稳定并且保持良好的像质,从而可实现像面景物的大小连续可变,得到定焦镜头和多档变焦镜头无法达到的视觉效果,可以达到大视场搜索目标,小视场仔细观察目标的目的。而目前关于此类中波系统的相关报道很少,且都存在一定的缺点。加拿大 Wescam 公司的 Sinclair 设计的焦距范围为 20~400 mm 的中波变焦镜头,虽然其成像质量接近于衍射极限,但是使用了 11 片透镜,并且采用了两个衍射元件,因此结构复杂,系统透过率低^[6]。韩国 Hyun Sook Kim 等人设计的焦距范围 13.75~75 mm 的中波变焦镜头,采用了三个非球面才达到较好的成像质量,因此提高了加工成本和装调精度的要求^[7]。

本文针对中波红外制冷式 320×240 凝视焦平面阵列探测器,设计了一个 10×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,采用反射镜折叠光路,共包括 7 片透镜和两个反射镜。系统仅引入一个非球面就达到了较好的成像质量,同时在一定程度上降低了成本。此外,它还具有结构紧凑,焦距范围(50~500 mm)大、变焦曲线平滑等优点。

2 设计参数

本文采用的探测器为中波 320×240 元制冷探测器,探测器像元尺寸为 30 μm×30 μm。根据实际应用的需要,连续变焦红外光学系统的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab. 1 Optical design parameters

工作波段	3.7~4.8 μm
变焦倍率	10×
焦距范围	50~500 mm
F 数	4
透过率	>70%
像高(对角线)	12 mm

系统的设计过程分为外形尺寸计算与像差设计两个阶段。外形尺寸计算的任务是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,采取的措施除了利用光学软件进行像差平衡之外,还有以下两种:(1)合理搭配使用红外光学材料,将色差消到最小;(2)使用非球面提高像质。

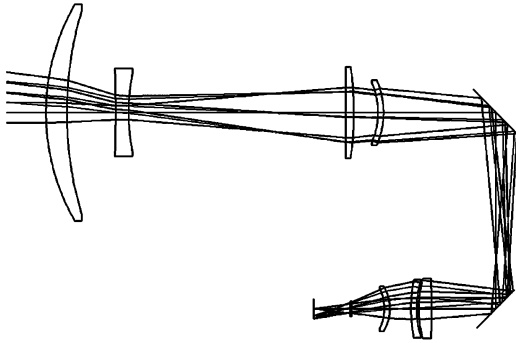
3 结果和分析

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,共用了 7 片透镜和两个反射镜,如图 1 所示,(a)、(b)、(c)分别为短焦(50 mm)、中焦(300 mm)和长焦(500 mm)三种情况下的外形结构示意图。变焦物镜系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,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,系统整个外形尺寸为 300 mm×220 mm×140 mm(长×宽×高),满足实际使用的安装空间要求。在光学系统中引入非球面可以有效提高像质并减少透镜数量^[8-9],因此,本系统采用了非球面设计,同时为了降低加工成本和装配精度要求,仅在二次成像系统的第一个透镜上设置一个非球面。

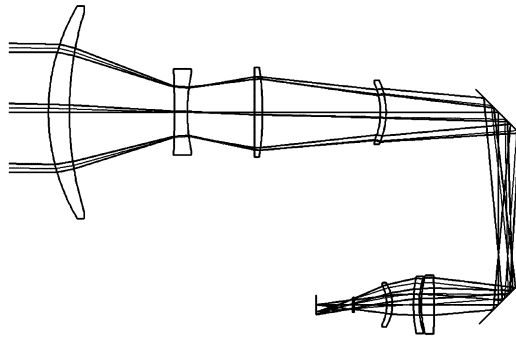
图 2 为系统的变焦轨迹,图中纵坐标为运动组元距离前固定组的距离,横坐标为系统焦距,1 和 2 两条曲线分别是变倍组和补偿组的变焦运动

曲线。由此可以看出,变倍组和补偿组的变焦行程都比较短,分别为 40 mm 和 85 mm,而且变倍组和补偿组的变焦轨迹简单,曲线平滑,并接近线性,有利于机电方式的实现。



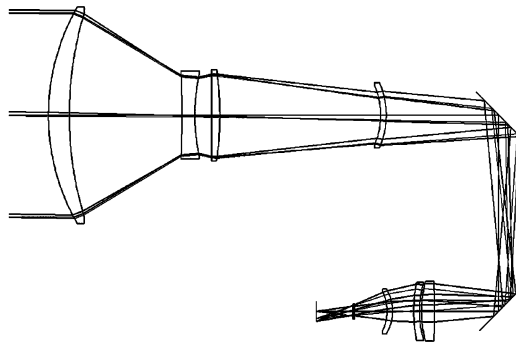
(a) 短焦

(a) Short EFL



(b) 中焦

(b) Middle EFL



(c) 长焦

(c) Long EFL

图 1 光学系统的外形结构图

Fig. 1 Schematic of optical system structure

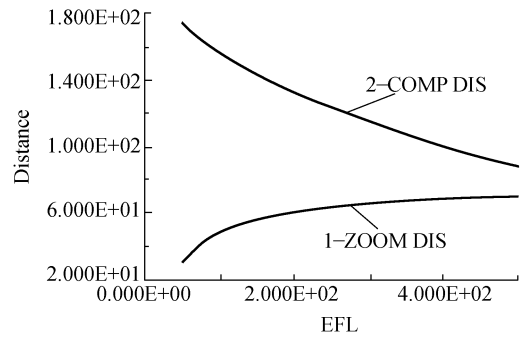


图 2 变焦运动轨迹

Fig. 2 Zoom loci characteristics of the system

3.2 像质评价

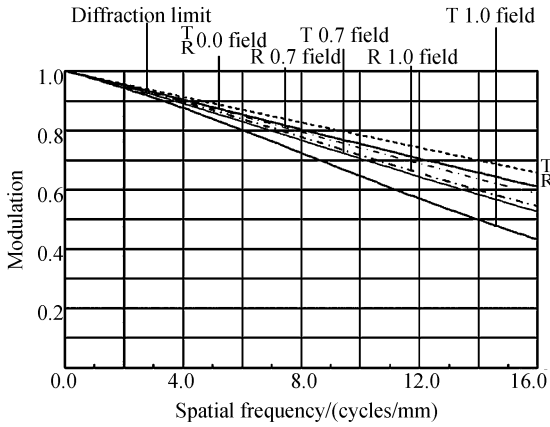
3.2.1 传递函数

该系统的传递函数曲线如图 3 所示,具体传递函数值(16 lp/mm)见表 2,其中图 3(a)、(b)、(c)分别为短焦、中焦和长焦三种情况。由此可见,系统在全焦距范围内都取得了较好的成像质量,0 视场的 MTF 值都较高,接近衍射极限。

表 2 传递函数值(16 lp/mm)

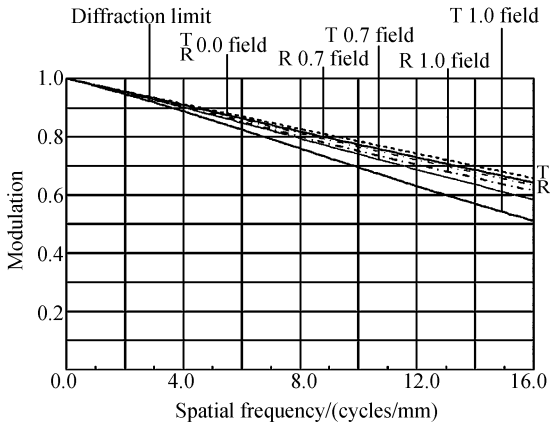
Tab. 2 Values of MTF(16 lp/mm)

焦距	视场	MTF
短焦	0(tan)	0.610
	0.7(tan)	0.526
	1(tan)	0.432
中焦	0(tan)	0.643
	0.7(tan)	0.584
	1(tan)	0.511
长焦	0(tan)	0.638
	0.7(tan)	0.531
	1(tan)	0.413



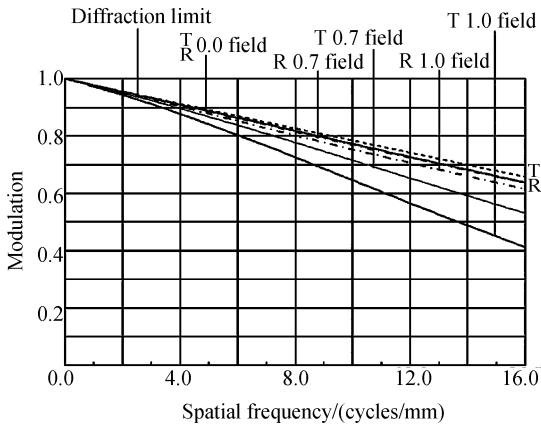
(a)短焦

(a) Short EFL



(b)中焦

(b) Middle EFL



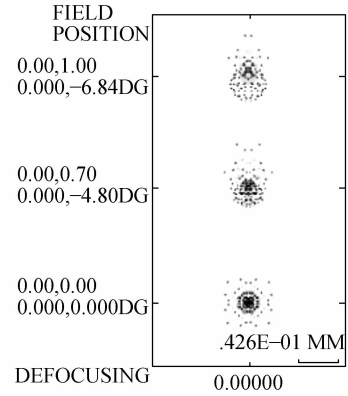
(c)长焦

(c) Long EFL

图 3 系统的传递函数曲线
Fig. 3 MTF curves of the system

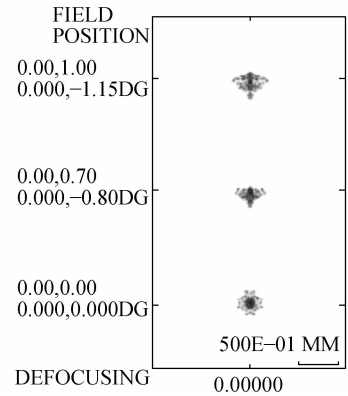
3.2.2 点列图

该系统的点列图见图 4,具体数值见表 3。由此可见,所有焦距位置在全视场内弥散斑的均方根值(RMS)都 $<30 \mu\text{m}$,满足系统使用要求。



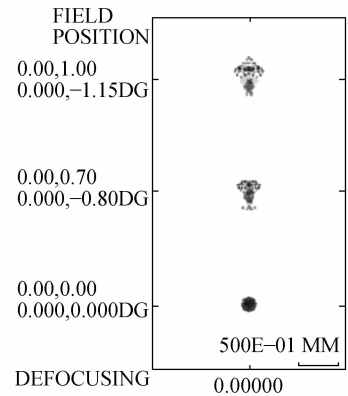
(a)短焦

(a) Short EFL



(b)中焦

(b) Middle EFL



(c)长焦

(c) Long EFL

图 4 点列图
Fig. 4 Spot diagrams

表 3 弥散斑直径的均方根值

Tab. 3 RMS of spot diameters

焦距	视场	弥散斑的均方根值(MM)
短焦	0	0.184 48E-01
	0.7	0.218 17E-01
	1	0.224 77E-01
中焦	0	0.120 07E-01
	0.7	0.136 52E-01
	1	0.173 17E-01
长焦	0	0.810 60E-02
	0.7	0.132 99E-01
	1	0.183 92E-01

3.3 冷反射分析

制冷的探测器通过前置的光学系统中折射面的微弱反射,接收到自身及周围低温腔环境的辐射,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^[10-11]。所以,在光学设计中要充分考虑到冷反射现象,并使之减到最小。考察冷反射的两个重要参数是 YNI 和 $I/IBAR$,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, $IBAR$ 是主光线的入射角度。在 YNI 很小且 $I/IBAR < 1$ 时,该面可能会成为产生冷反射的问题面。变焦系统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 4 为系统短焦端的冷反射分析。

表 4 冷反射分析

Tab. 4 Analysis of cold reflection

面	切割光线的面	YNI	$I/IBAR$
1	22(F)	0.297 7	-31.768
2	22(R)	-0.131 4	0.123
3	22(R)	-0.24	0.216
4	11(R)	0.501 9	-12.824
5	11(R)	1.241 5	-1.315
6	11(R)	-2.883 4	10.092
7	11(R)	-5.614 2	-12.335
8	11(R)	-5.529 0	-12.146
14	22(R)	0.658 4	1.953
15	22(F)	-1.721 7	0.489
16	22(R)	-1.768 9	0.498
17	22(R)	0.686 4	0.376
18	22(R)	1.107 3	1.567
19	22(F)	0.334 2	-1.05

从表 4 可以看出,最有可能产生严重冷反射效应的是第 1、2、3、4 和 19 面。其中,第 1、4、19 面的 $I/IBAR$ 大于 1,不会出现导致图像不均匀的冷反射像,因此,重点考虑第 2、3 面。这里,采用反向追迹光线的办法,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 5 的(a)和(b)分别是第 2 个面和第 3 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分别在探测器后 14 mm 和 64 mm 处。由此可见,第 2、3 面反射回来的光线没有聚焦在探测器或是冷光阑上,因此,并不会带来严重的冷反射效应。

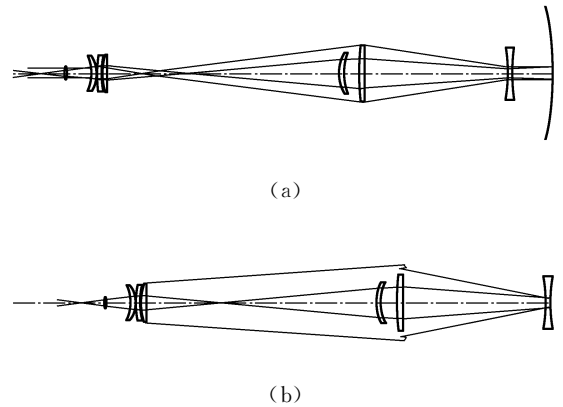


图 5 冷反射光线追迹图

Fig. 5 Schematic of cold reflection ray-tracing

4 结 论

报道了一个适用于中波制冷式 320×240 凝视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 范围内的连续变焦,工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。采用反射镜折叠光路,实现了较紧凑的结构形式。仅采用了一个非球面就达到了较好的像质,同时也有效地降低了加工成本和对装调精度的要求。此外,该系统的焦距范围大,变焦行程较短,变焦曲线平滑,有利于机电方式的实现。可以预见,该系统在导航、搜索、警戒、侦察等方面将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] CHANG J, WENG ZH CH, WANG Y T, *et al.*. Design of infrared afocal zoom system[J]. *SPIE*, 2006, 6034: 1-5.
- [2] 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.
- [3] FONTI S, SOLAZZO S, BLANCO A, *et al.*. An infrared zoom for space applications[J]. *Planetary and Space Science*, 2000, 48:523-528.
- [4] 孙强,王肇圻,李凤友,等. 红外 3.2~4.5 μm 段折射衍射光学系统的减热差设计[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 121-124.
SUN Q, WANG ZH Q, LI F Y, *et al.*. Design on the thermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5 μm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 121-124. (in Chinese)
- [5] LIU H, WANG Y SH, GUO CH J. Research on optical system of airborne infrared search and tracking with stared array sensor[J]. *SPIE*, 2002, 4927: 838-846.
- [6] SINCLAIR R L. High magnification zoom lenses for 3-5 μm applications[J]. *SPIE*, 1998, 3429: 11-18.
- [7] 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.
- [8] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 533-538.
LI R G, ZHENG L G, XUE D L, *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 533-538. (in Chinese)
- [9] 薛栋林,郑立功,王淑平,等. 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 380-385.
XUE D L, ZHENG L G, WANG SH P, *et al.*. Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 380-385. (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: 442-452.
- [11] AKRAM M N. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays[J]. *SPIE*, 2002, 4767: 13-23.

作者简介:郜洪云(1978—),女,安徽濉溪人,武汉理工大学讲师,博士,主要从事光学设计和激光光束整形技术的研究。

E-mail:ccyun@126.com

(本栏目编辑 严寒)