

长焦距高分辨率红外两档变焦光学系统设计

白 瑜^{1,2,3}, 邢廷文¹, 蒋亚东², 廖志远¹, 程习敏^{1,3}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对中波制冷型 640×512 凝视型焦平面探测器, 设计了一款长焦距高分辨率中波红外两档变焦光学系统。该系统工作波段为 3.7~4.8 μm, F 数为 4.0, 长焦距为 800 mm, 短焦距为 400 mm, 采用二次成像技术不仅减小了前固定组镜子的口径, 而且实现了 100%冷光阑匹配。系统采用锗和硅两种红外材料, 通过引入非球面来校正轴外像差和高级像差。设计结果表明, 系统在 33 lp/mm 处, 短焦距和长焦距的传递函数值均优于 0.2, 全视场畸变小于 0.5%, 具有结构紧凑、分辨率高、像质好等优点。

关键词: 光学设计; 红外光学; 变焦镜头

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)08-2589-06

Design of infrared dual field of view optical system with long focal length and high resolution

Bai Yu^{1,2,3}, Xing Tingwen¹, Jiang Yadong², Liao Zhiyuan¹, Cheng Ximin^{1,3}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For middle infrared cooled 640×512 detector with staring plane array, a middle infrared dual field of view optical system with long focal length and high resolution was designed. The wavelength range was 3.7-4.8 μm, F number was 4.0, long focal length and short focal length was 800 mm, 400 mm respectively. Reimaging technology had not only minished the diameter of front fixed group, but also met 100% cold shield efficiency. Two infrared materials Ge and Si were used in the optical system and two aspheric surfaces were used to correct the off axis aberration and higher order aberration. Moreover, the Modulation Transfer Function (MTF) was above 0.2 both the long focal length and short focal length at the spatial frequency 33 lp/mm. The distortion is below 0.5%. The results show that the middle infrared dual field of view optical system has small volume, high resolution and excellent image.

Key words: optical design; infrared optics; zoom lens

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(10874181)

作者简介: 白瑜(1982-), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事复杂成像光学系统设计、红外探测技术方面的研究。

Email: baiyu91258@163.com

导师简介: 邢廷文(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标探测技术等方面的研究。Email: xtw@ioe.ac.cn

蒋亚东(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理等方面的研究。Email: jiangyd@uestc.edu.cn

0 引言

红外探测系统具有隐蔽性好、抗电子干扰、图像直观、易于观察、精度高、低空探测性能好等诸多优点,同时也具有较强的穿透烟、雾、霾、雪等限制以及识别伪装的能力,特别适用于夜间及复杂气象条件下对目标的探测,使其在警戒、侦察和安防等领域中有广泛的应用前景,受到众多相关研究人员的关注^[1-6]。近年来,随着红外光学技术的不断发展及其应用范围的不断扩展,对红外两档变焦光学系统的需求日益增强,这是由于红外两档变焦光学系统的焦距在两档焦距改变时,短焦距时视场大可用于搜索和搜索目标,长焦距时视场小可用于捕获和观察目标。

对于长焦距红外两档变焦光学系统,为了校正系统的色差并保证两档变焦位置的像质,常使用较多的光学镜片来保证两档变焦位置的像质,使用衍射光学元件来校正两档变焦光学系统的色差,导致系统结构复杂化,增大了系统研制成本。孟剑奇^[7]设计的焦距为 22.5、137.5 mm 的红外两档变焦镜头使用衍射光学元件消色差,不但增加了加工检测难度,降低了光能利用效率,而且在实际使用中,主衍射级次的衍射效率下降,以及其他衍射级次的出射光成为杂散光,都将降低系统对比度和信噪比,导致系统成像质量下降。杨鹏^[8]、唐大为^[9]等设计的红外两档变焦系统也存在含有衍射光学元件不易加工检测等不足,且系统采用的是非制冷探测器,探测效率低、探测能量弱。

与传统的 320×256 凝视型焦平面探测器相比,640×512 大面阵凝视型焦平面探测器像元数增加了一倍,这不仅大大提高了红外探测系统对景物的分辨率,而且画面也更加舒适,但是像元数的增加无疑加大了光学设计的难度。文中针对 640×512 大面阵凝视型焦平面探测器,设计了一个长焦距高分辨率中波红外两档变焦光学系统。其短焦距为 400 mm,长焦距为 800 mm, F/# 为 4.0,采用轴向移动方式实现两档变焦,系统由 8 片透镜组成,仅含有两个非球面,且都在口径较小的透镜上,加工检测成本低、精度高,应用二次成像技术不仅有效减小了系统轴向尺寸,而且使得冷光阑效率达到 100%。设计结果表明,该中波红外两档变焦光学系统具有结构紧凑、体

积小、分辨率高、像质好等优点,可应用于众多光电探测领域。

1 设计指标

该红外两档变焦光学系统采用中波制冷型 640×512 凝视型焦平面探测器,探测器像元尺寸为 15 m×15 m,中波红外两档变焦光学系统设计指标如表 1 所示。

表1 光学设计指标

Tab.1 Optical design parameters

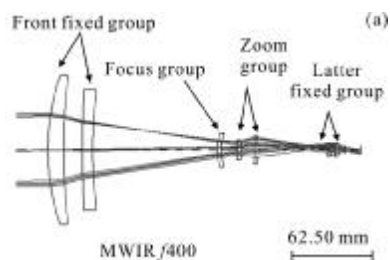
Item	Value
Wavelength range/m	3.7-4.8
Zoom ratio	2×
Field of view	0.90° (WFOV)
	0.45° (NFOV)
F - number	4.0
MTF (33 lp/mm)	> 0.15
Distortion	≤ 1%
Temperature/°C	-35-55
Transmission	> 60%

2 设计结果与像质评价

2.1 设计结果

该系统由变焦物镜系统和二次成像系统构成,共使用了 8 片透镜,如图 1 所示。其中,图 1(a)、1(b)分别为短焦距(400 mm)、长焦距(800 mm)两种情况下的外形结构示意图。

变焦物镜系统由前固定组,调焦组和变倍组组成,它们对系统光焦度的贡献分别为正、负、正,前固定组承担了系统大部分光焦度,与调焦镜组成摄远型结构,缩短了系统筒长,通过变倍组轴向移动实现两档变焦,变倍组在短焦距和长焦距两个位置满足物



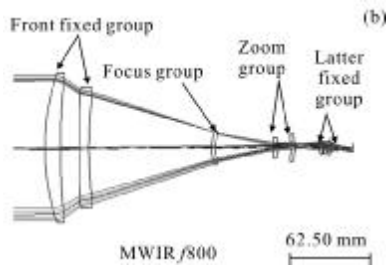


图 1 中波红外两档变焦光学系统图

Fig.1 Layout of middle infrared dual focal length system

像交换原则,这种变倍方式实现了两档变焦系统的小型化和模块化。表 2 为中波红外两档变焦光学系统的变焦位置数据,可知从短焦距到长焦距,变焦组的导程仅为 55.77 mm。二次成像系统由后固定组组成,其对系统光焦度的贡献为正,二次成像系统需要校正变焦物镜系统的剩余像差,且要保证短焦距、长焦距的像面重合,因此其结构较复杂。文中采用 3 片透镜构成二次成像系统,不仅有效减小了前固定组透镜口径,而且保证了系统满足 100%冷光阑效率。系统选用 Ge 和 Si 两种常用的红外材料,系统整个外形尺寸为 500 mm×220 mm×200 mm(长×宽×高),满足实际使用的安装空间要求。为了校正系统的轴外像差和高级像差,提高成像质量,降低镜片总数,提高系统透过率,系统使用了非球面技术,同时为了降低加工成本和装配精度要求,系统仅使用了两个非球面。

表 2 中波红外两档变焦光学系统的变焦位置

Tab.2 Zoom position of middle infrared dual optical system

Item	Short focal length/ mm	Long focal length/ mm
Distance of front fixed group and zoom group	233.28	289.05
Distance of zoom group and latter fixed group	95.60	39.83

2.2 像质评价

2.2.1 传递函数

该系统在不同变焦位置处的传递函数曲线(MTF)如图 2 所示,其中,图 2(a)、2(b)分别为短焦距、长焦距两种情况。从图中可以看出,在奈奎斯特频率 33 lp/mm 处,短焦距的传递函数大于 0.24,长焦距的传递函数大于 0.22,满足使用要求。

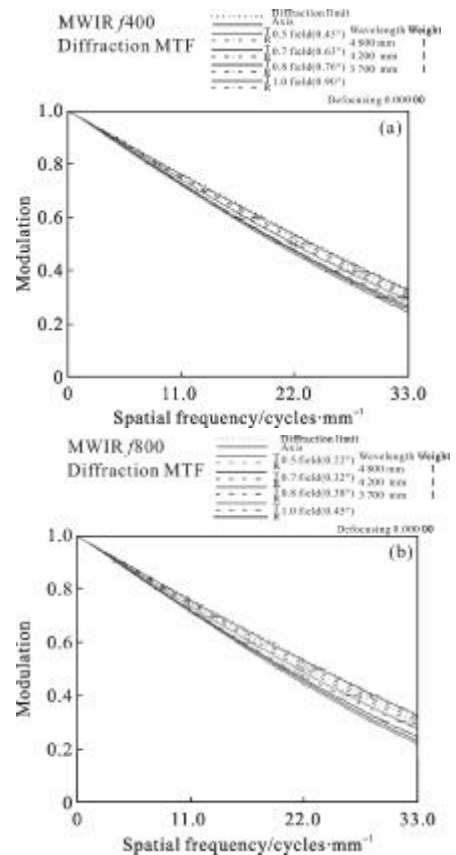


图 2 中波红外两档变焦光学系统传递函数曲线

Fig.2 MTF of middle infrared dual focal length optical system

2.2.2 畸变

系统不同变焦位置处的畸变曲线如图 3 所示,

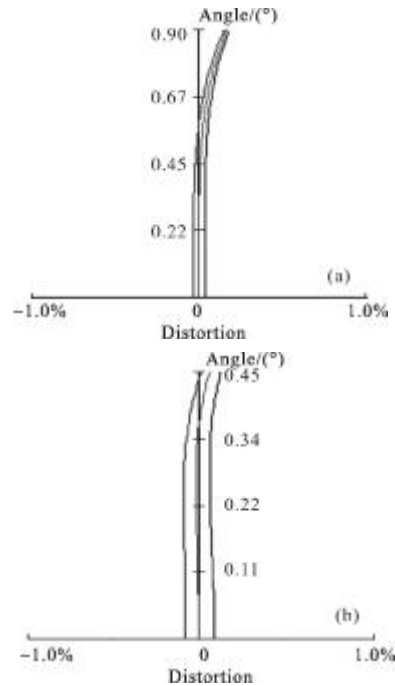


图 3 中波红外两档变焦光学系统畸变

Fig.3 Distortion of middle infrared dual focal length optical system

其中,图 3(a)、3(b)分别为短焦距、长焦距的畸变曲线。从图中可以看出,短焦距的畸变最大为 0.17%,长焦距的畸变最大为 0.06%,满足使用要求。

2.2.3 温度变化对两档变焦光学系统像质的影响

由于红外光学材料的折射率温度系数较大,随着环境温度的变化,红外光学材料的折射率、光学元件的曲率和厚度、零件间隔等都会发生变化,使红外光学系统产生热离焦,导致系统成像质量变差,因此对于宽温度范围的红外光学系统必须进行无热化设计。常用的无热化设计方法主要有机械被动式、光学被动式、主动机电式三种,该系统中采用主动机电式进行无热化设计,如图 1 所示,通过前固定组和变倍组之间的调焦组沿着轴向移动,来补偿短焦距、长焦距不同温度位置的像面漂移。

图 4 和图 5 分别给出了中波红外两档变焦光学系统短焦距、长焦距在极端温度环境下的传递函数曲线。从图中可以看出,该系统在 -35℃、55℃环境温度下,在奈奎斯特频率 33 lp/mm 处,短焦距、长焦距

位置的传递函数分别优于 0.233、0.215,具有良好的成像质量,在极端温度环境中,中波红外两档变焦光学系统工作性能良好。

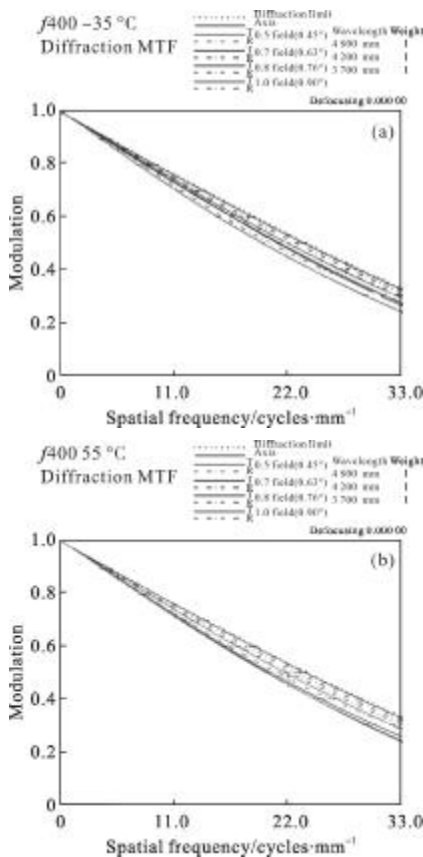


图 4 短焦距结构高低温时的传递函数

Fig.4 MTF of short focal length system in -35℃ and 55℃

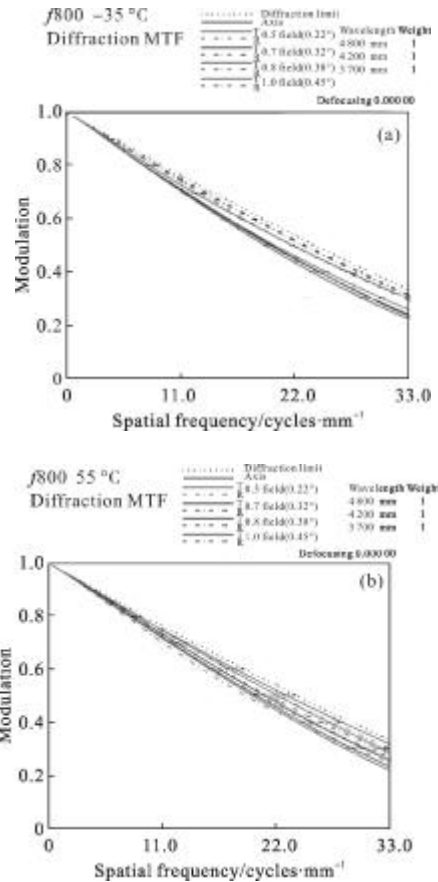


图 5 长焦距结构高低温时的传递函数

Fig.5 MTF of long focal length system in -35℃ and 55℃

表 3 和表 4 分别给出了短焦距、长焦距两位置

表 3 短焦距位置温度调焦前后数据

Tab.3 Data of focusing temperature in short focal length

	Focal length	Minimal MTF (33 lp/mm)	Maximal distortion
Data of 20℃	400	0.24	0.17%
Data of -35℃ after focusing	393.05	0.238	0.19%
Change quantity after focusing	1.6%	-0.002	-0.02%
Data of 55℃ after focusing	405.85	0.233	0.158
Change quantity after focusing	1.46%	-0.007	-0.016%

表 4 长焦距位置温度调焦前后数据
Tab.4 Data of focusing temperature
in long focal length

	Focal length	Minimal MTF (33 lp/mm)	Maximal distortion
Data of 20 °C	800	0.22	0.06%
Data of -35 °C after focusing	783.4	0.219	0.07%
Change quantity after focusing	2.1%	-0.001	-0.01%
Data of 55 °C after focusing	813.7	0.215	0.03%
Change quantity after focusing	1.7%	-0.005	-0.03%

温度调焦前后的数据,可知-35℃低温时调焦前后,短焦距、长焦距的焦距变化最大分别为 1.6%、2.1%,短焦距、长焦距奈奎斯特频率 33 lp/mm 处的最小传递函数分别下降 0.002、0.001,短焦距最大畸变下降 0.02%,长焦距最大畸变增大 0.01%;55℃高温时调焦前后,短焦距、长焦距的焦距变化最大分别为 1.46%、1.7%,短焦距、长焦距奈奎斯特频率 33 lp/mm 处的最小传递函数分别下降 0.007、0.005,短焦距、长焦距最大畸变分别下降 0.016%、0.03%。综上可知,在极端温度环境下,中波红外两档变焦光学系统短焦距、长焦距位置的成像质量变化不大,满足使用要求。

2.2.4 冷反射分析

制冷探测器被前置光学系统中的光学元件反射后成像面在探测器周围,此时探测器会感应到低于环境温度的自身冷表面信号,往往会在成像中心形成黑斑,导致光线重复反射而引起的成像缺陷,形成冷像。较强的冷反射信号会淹没目标信号造成图像异常,导致探测器灵敏度降低,影响系统的探测识别和跟踪性能。因此,在光学设计阶段要充分考虑冷反射现象使之最小。YNI 和 I/IBAR 是评价冷反射的两个重要参数,其中 Y 为该面上边缘光线的投射高, N 为折射率, I 为边缘光线的入射角度, IBAR 为主光线的入射角度。在 YNI 很小且 I/IBAR 小于 1 时,该面可能会成为产生冷反射的问题面。对短焦距、长焦距两种状态下光学系统的冷反射进行分析后,发现短焦距的冷反射最为严重,因此主要分析短

焦距的情况。表 5 为系统短焦距的冷反射分析。可以看出,最有可能产生严重冷反射效应的是第 3、5、8、9、12 和 13 面。但第 5、8、9、12 和 13 面的 I/IBAR 大于 1,所以这些面不会产生导致图像不均匀的冷像。因此重点考虑第 3 面,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 6 为第 3 个面的冷反射光线追迹示意图,可知经过这个面反射回去的冷反射像成像在第 3 个面后端 294.16 mm 处。由此可见,第 3 面反射回来的光线没有聚焦在探测器或冷光阑上,因此并不会带来严重的冷反射效应。

表 5 冷反射分析
Tab.5 Nacissus analysis

Surface	Surface with cutting	YNI	I/IBAR
1	11(R)	8.668 5	-43.214
2	11(R)	-10.303 0	-5.346
3	11(R)	0.236 3	0.280
4	10(R)	-2.653 9	-2.557
5	19(R)	0.236 3	1.835
6	11(R)	0.988 9	0.941
7	11(R)	-1.109 5	14.041
8	19(R)	-0.008 9	-9.011
9	19(R)	0.110 2	6.122
10	11(R)	-1.739 6	1.463
11	19(R)	0.962 9	-1.305
12	19(R)	-0.091 7	-10.10
13	19(R)	0.566 7	-8.372
14	19(R)	0.842 8	-3.686
15	19(R)	0.804 5	-11.695

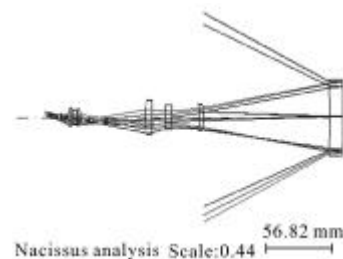


图 6 冷反射光线追迹图

Fig.6 Schematic of cold reflection ray tracing

3 结 论

文中报道了一个适用于中波制冷式 640×512 大面阵凝视型焦平面探测器的长焦距高分辨率中波红外两档变焦光学系统。系统由变焦物镜系统和二次成像系统构成,满足 100%冷光阑效率,仅使用锗和硅两种普通红外材料可以实现短焦距 400 mm、长焦距 800 mm 两档变焦。仅采用了两个非球面就达到了良好的像质,且非球面均在口径小的透镜上,同时也大大降低了加工成本和装调的精度,并进行了无热化设计,保证了系统在宽温度范围内成像质量稳定良好,具有像质好、分辨率高、热灵敏度高、质量轻便等优点。可以预见,该系统将在导航、搜索、跟踪、警戒、侦查等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Gao Hongyun, Xiong Tao. Mid -wavelength infrared dual field -of -view optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 1891-1894. (in Chinese)
- [2] Li Ronggang, Yang Dongliang, Liu Lin, et al. Design of dual -field -of -view optical system for mid -wave infrared focal -plane arrays [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (6): 640-642. (in Chinese)
- [3] Zhang Mingyi, Li Baoping, Wan Zhongnan, et al. Design of the switch -zoom dual -field -of -view infrared optical system with hybrid refractive -diffractive [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 850-853. (in Chinese)
- [4] Luo Shoujun, He Wubin, Li Wenhui, et al. Design of middle infrared continuous zoom optical system with large FPA [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2117-2123. (in Chinese)
- [5] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1279-1283. (in Chinese)
- [6] Yang Le, Sun Qiang, Wang Jian, et al. Design of long -wave infrared continuous zoom optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 999-1005. (in Chinese)
- [7] Meng Jianqi. Dual field zoom 6x infrared imaging optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (1): 89-92. (in Chinese)
- [8] Yang Peng. Infrared dual -FOV refractive/diffractive hybrid zoom system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (10): 2745-2749. (in Chinese)
- [9] Tang Dawei, Sun Qiang, Wang Jian, et al. Design of hybrid refractive/diffractive dual -FOV infrared optical system [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 39(11): 2062-2068. (in Chinese)