

中波红外三视场变焦光学系统设计

范哲源^{1,2}, 高立民¹, 张志¹, 陈卫宁¹, 杨洪涛^{1,2}, 张建¹, 武力¹, 曹剑中¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 三视场变焦光学系统相对于其他形式的变焦系统具有机械结构简单、可靠性高、变焦时间短等优点。采用 320×240 分辨率、像元尺寸 30 μm×30 μm 制冷型探测器, 二次成像方式设计了一种工作于 3~5 μm 中波制冷型三视场红外光学系统, 系统视场角 1.4°~23.8°, F 数为 4, 可实现焦距为 30mm/100mm/500mm。设计中采用了硅和锗两种材料校正谱段内色差, 采用了一个非球面校正系统球差, 两个反射镜折转光路的方式实现系统轴向尺寸的缩减, 整个系统外形尺寸小于 210 mm×160 mm×120 mm, 系统具有外形尺寸小、变焦结构简单、成像质量高等特点, 在空间频率 17 lp/mm 处, 系统调制传递函数(MTF)均在 0.5 以上, 能量集中度大于 70%。

关键词: 光学系统设计; 三视场; 变焦距; 中波红外; 调制传递函数

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0523-05

Design of three-field middle-wave infrared zoom system

Fan Zheyuan^{1,2}, Gao Limin¹, Zhang Zhi¹, Chen Weining¹, Yang Hongtao^{1,2}, Zhang Jian¹,

Wu Li¹, Cao Jianzhong¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Three-field zoom system has advantages of simple mechanical structure, better reliability, short time of changing focal relative to other pattern zoom systems. Using 320×240 resolution cooled detector with 30 μm×30 μm pixel dimension, a middle-wave three-field optical system was designed by secondary imaging way. The system's F number is 4, FOV range is 1.4°~23.8°, it can realize 30 mm/100 mm/500 mm three position focal length. In designing process, the Germanium material and Silicon material were adopted to balance chromatic aberration, introducing one asphere to balance sphere aberration. The system use two mirrors reducing the axis dimension. The dimension of system better than 210 mm×160 mm×120 mm, it has characteristics of small dimension, simple zoom structure, good image quality etc. The modulation transfer function (MTF) is above 0.5 at spatial frequency of 17 lp/mm and energy concentration ratio is greater than 70% within the sensing element of the detector.

Key words: optical system design; three-field; zoom; MWIR; MTF

收稿日期: 2013-06-14; 修订日期: 2013-07-19

基金项目: 西部之光(Y229E21213)

作者简介: 范哲源(1982-), 博士生, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: fzy@opt.ac.cn

导师简介: 高立民(1965-), 研究员, 博士生导师, 主要从事光电经纬仪方面的研究。Email: glm@opt.ac.cn

0 引言

近年来,随着红外加工及半导体行业的发展,使得红外系统应用越来越广泛。由于红外系统具有可见光系统所不具备的一些特点,例如夜间成像、非接触式测温等,使红外成像越来越多地应用在夜间营救、夜间监视等领域。随着红外系统应用需求的发展,定焦系统的缺点越来越明显,它视场单一,无法实现大视场普查和小视场详查,而变焦系统刚好可以弥补此不足^[1-3]。同连续变焦系统相比,三视场变焦系统可以省去复杂的凸轮曲线设计,通过简单的机械补偿方式,实现长、中、短三种不同的焦距,与之对应窄、中、宽三种不同的视场,可根据不同的使用场合选择相应的视场或焦距。并且三视场变焦系统同传统变焦系统相比具有视轴晃动小、变焦时间短等优点。文中采用 320×240 分辨率、像元尺寸 30 μm×30 μm 制冷型探测器,设计了一种工作于中波谱段的三视场变焦光学系统,系统 F 数为 4,长焦焦距 500 mm,中焦焦距 100 mm,短焦焦距 30 mm,视场角分别为 1.4°、6.8°、23.8°,系统由 9 片透镜及两片反射镜组成,满足 100%冷光栏效率,具有机构紧凑、成像质量较好等特点。

1 设计参数及讨论

采用 320×256 分辨率制冷型探测器,光学系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

Tab.1 Parameters of optical design

| Parameter | Value |
|-------------------------|---------|
| Wavelength/μm | 3.7-4.8 |
| F number | 4 |
| Focal length of NFOV/mm | 500 |
| Focal length of MFOV/mm | 100 |
| Focal length of WFOV/mm | 30 |
| Pixel size/μm | 30×30 |
| Image size/mm | 9.6×7.2 |

由于系统是制冷型红外光学系统,如何减小系统的冷反射是设计中需重点考虑的问题。冷反射是制冷红外系统普遍存在的一种现象,与可见光系统不同,在红外系统中,每个镜框或镜筒都是辐射源,

通过光学零件的非工作表面反射进入红外探测器中,如果这种全视场的分布不均匀,将在成像时产生灰度梯度,由于多数情况下中心的灰度低于边缘的灰度,成像系统出现中心黑、边缘亮的现象,这种现象可认为是背景噪声,在成像时叠加在目标图像上,当冷反射较为严重时可严重影响图像质量。因此,在设计时需要冷反射效应进行重点分析和评估。

2 系统设计过程及设计结果分析

系统采用单变倍组,单补偿组的结构形式,其高斯解应满足以下方程^[4]:

$$\tau = \frac{\beta_2^* \beta_3^*}{\beta_2 \beta_3} = \frac{B}{\beta_2 \beta_3} \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{f_2'}{f_2' + f_1' - d_{s12}} \quad (2)$$

$$\beta_3 = \frac{f_2'}{f_3' + f_2' (1 - \beta_2) - d_{s23}} \quad (3)$$

变倍组位移

$$q = f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2^*} \right) \quad (4)$$

补偿组位移

$$\Delta = f_3' (\beta_3^* - \beta_3) \quad (5)$$

变焦后变倍组与前固定组的间隔

$$d_{s12}^* = d_{s12} + q \quad (6)$$

变倍组同补偿组的间隔

$$d_{s23}^* = d_{s23} - q + \Delta \quad (7)$$

由几何光学物像关系公式可知

$$l = f' \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (8)$$

$$l' = f' (1 - \beta) \quad (9)$$

系统共轭距为:

$$d = l_2' - l_2 + l_3' - l_3 \quad (10)$$

以上公式中: τ 为系统的变倍比; β_2 为变倍组初始位置的垂轴放大倍率; β_3 为补偿组初始位置的垂轴放大倍率; β_2^* 为变焦后变倍组的垂轴放大倍率; β_3^* 为变焦后补偿组的垂轴放大倍率; f_1' 为前固定组焦距; f_2' 为变倍组焦距; f_3' 为补偿组焦距; d_{s12} 为变倍组初始位置同前固定组间隔; d_{s23} 为变倍组与补偿组间隔; d_{s12}^* 为变焦后变倍组同前固定组间隔; d_{s23}^* 分别为变焦后变倍组与补偿组间隔。

将公式(8)、(9)代入公式(10)可得:

$$\beta_2^* = \frac{-[d-2(f_2'+f_3')] \pm \{[d-2(f_2'+f_3')]^2 - 4(f_2'+f_3'/B)(f_2'+Bf_3')\}^{1/2}}{2(f_2'+f_3'/B)}$$

将求得的 β_2^* 分别代入以上各公式可计算出光学系统的基本参数。

通过变倍组和补偿组位置变化改变其组合倍率,实现系统不同焦距切换。实际使用时,可根据目标的大小及远近选择焦距档位,根据需求迅速将焦距切换至指定位置,缩短变焦时间,负组变倍系统的运动趋势如图 1 所示。

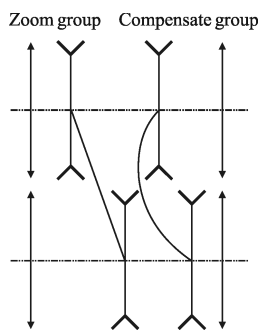
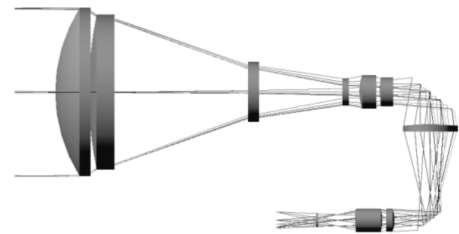


图 1 光学系统原理图

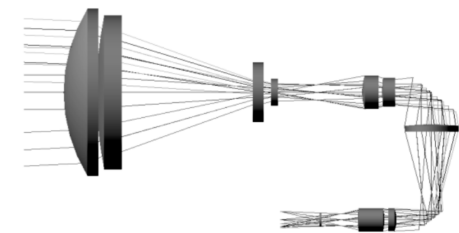
Fig.1 Principle diagram of optical system

设计中,光学系统的光阑置于探测器的冷屏位置,采用二次成像的方式达到 100%冷光阑效率,根据相关公式可以计算出系统不同焦距结构处的光阑位置^[5-6],可确保不同焦距位置都能满足 100%冷光阑效率。为减小系统的轴向尺寸,系统采用非物像交换的负组补偿变焦方式,由相关参考文献可知^[7],当补偿组焦距 $|f_3'|$ 过大时会引起系统总长的增大,所以在系统优化时限制了 $|f_3'|$ 的大小,系统最终归一化的补偿组焦距为 $|f_3'|=1.3$,当补偿组焦距减小时会使补偿组相对孔径增高,增加系统像差校正的困难,设计采用一个非球面校正系统球差和慧差,非球面加在系统第六片锗材料负透镜上。采用在中波波段色散系数大的锗材料作为负透镜,在中波波段色散系数较小的硅材料作为正透镜,使系统能够保证在各个变焦位置具有良好的成像质量^[8]。设计结果如图 2 所示。系统通过透镜 3、透镜 4 位置的改变,实现长、中、短三档焦距,省去凸轮曲线的设计,降低了系统的复杂性。未折转光路前,系统的长度为 400 mm,摄远比(总长/焦距)=400/500=0.8,采用反射镜折转光路后,系统的

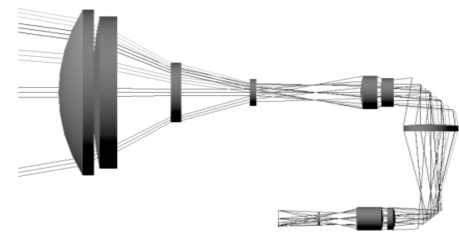
外形尺寸小于 210 mm×160 mm×120 mm,系统结构紧凑,满足小型化的要求。



(a) $f=500\text{mm}$



(b) $f=100\text{mm}$



(c) $f=30\text{mm}$

图 2 光学系统结构图

Fig.2 Optical schematic of design

光学传递函数表征了镜头对不同空间层次的目标的成像能力,其中,低频表征轮廓,中频表征层次,高频表征分辨能力。在一般成像系统中,传递函数大于 0.2,红外镜头的传递函数一般要求大于 0.4,设计中引入了一个非球面校正系统球差,位于第六片透镜中,系统像元尺寸为 30 μm ,奈奎斯特频率为 16.7 lp/mm,该系统三种焦距位置在 17 lp/mm 处的传递函数曲线如图 3 所示。从图中可以看出,系统的传递函数值均大于 0.5,接近衍射极限,说明系统成像质量良好,分辨率很高。

图 4 给出了系统的衍射包围圆能量曲线。从图中可以看出,约 70%的能量集中在探测器敏感元内,满足红外制冷探测的基本需求。

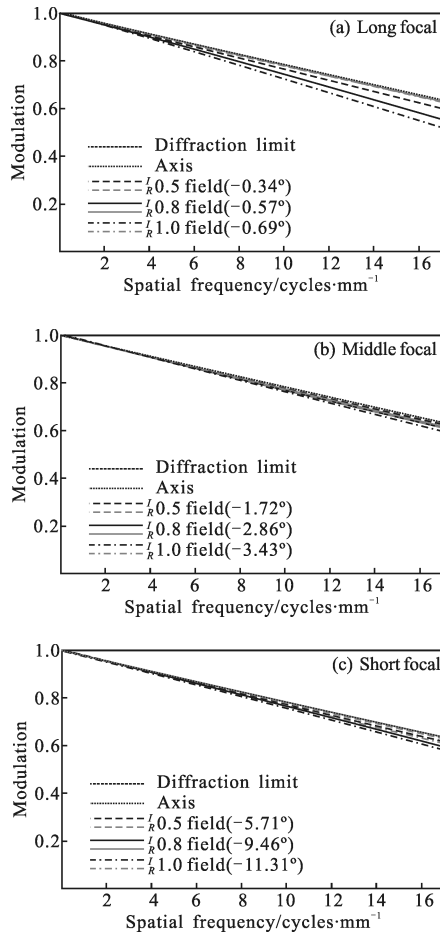


图 3 传递函数曲线

Fig.3 Curves of MTF

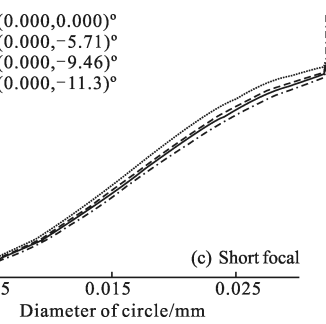
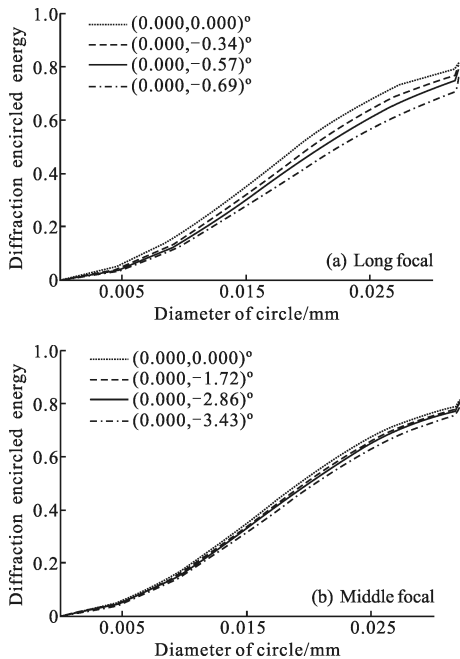


图 4 包围圆能量

Fig.4 Diffractive spot

3 冷反射分析

由于制冷型探测器的冷光栏可以通过其前面光学系统中的折射面发生反射,接收自身及周围环境的冷辐射,形成冷反射像,冷反射会在靶面中心会形成暗斑,使系统的信噪比降低,所以设计中要加以考虑,使之对系统的成像影响减到最小。为了抑制冷反射,常用的方法有^[9]:(1) 镀减反射膜,提高光学元件的透过率,降低反射率从而降低参与反射成像光束的能量;(2) 控制参与反射成像光线的角度,使其尽可能不沿表面法线方向入射,沿表面法线入射光线易反射到探测器靶面上。冷反射分析中, YNI 和 $I/IBAR$ 是重要考察参数,其中 Y 是边缘光线高度, N 是表面折射率, I 是边缘光线 Y 对应的入射角度, $IBAR$ 是主光线入射角度。通常当 $YNI \geq 1$ 时,表明该面对冷反射的贡献可以忽略。当 YNI 数值较小且 $I/IBAR < 1$ 时,该表面可能会产生比较严重的冷反射。经分析得出系统在短焦时可能出现严重的冷反射,表 2 中给出了系统短焦位置的分析结果,从表中可以看出,表面 3、6、7 可能出现冷反射比较严重。由于表面 6 的 YNI 数值及 $I/IBAR$ 值最小,所以重点考察第 6 面,将系统倒置,将探测器作为光源,反向追迹光线,将系统第 6 面设为反射面进行光线追迹,图 5 中给出了光线追迹的结果,从图中可以看出,从像面发出的光线经表面 6 反射所成的像距离像面很远,造成的冷反射影响可以忽略。

表2 冷反射分析

Tab.2 Narcissus analysis

| Reflecting surface | YNI | I/IBAR |
|--------------------|----------|--------|
| 1 | 0.100 9 | 1.253 |
| 2 | -0.096 5 | -1.764 |
| 3 | -0.093 3 | 0.050 |
| 4 | -0.024 3 | 3.023 |
| 5 | -0.059 9 | -1.068 |
| 6 | -0.005 8 | 0.007 |
| 7 | -0.027 0 | 0.032 |
| 8 | 0.191 0 | -2.575 |
| 9 | 2.659 2 | -1.559 |
| 10 | -1.149 1 | 3.948 |
| 11 | -0.908 5 | 2.774 |
| 12 | 0.971 0 | -0.781 |
| 14 | -2.043 9 | 0.067 |
| 15 | -0.646 8 | -1.015 |
| 16 | 1.465 1 | 3.153 |
| 17 | 2.490 1 | 1.950 |
| 18 | 2.552 2 | 2.189 |

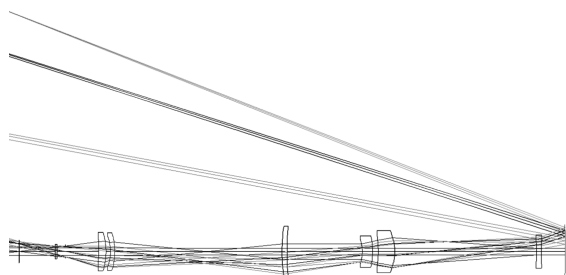


图5 冷反射光线追迹图

Fig.5 Schematic diagram of cold reflection ray-tracing

4 结论

文中详细介绍了三视场变焦距光学系统的特点,并采用 320×240 分辨率制冷型红外探测器设计了一种中波红外三视场变焦距光学系统,三档焦距分别为 30 mm 、 100 mm 、 500 mm ,给出了设计过程及设计结果,设计中采用两种材料校正系统色差,应用

非球面校正系统球差,提高了系统成像质量,运用二次成像的方式使系统达到100%冷光栏效率。系统光路折转前总长为 400 mm ,摄远比达到0.8,采用两片反射镜折转光路后,总长度小于 210 mm 。系统传递函数曲线接近衍射极限,包围圆能量集中度高,说明该系统具有良好的成像质量。文中最后对冷反射进行了分析,给出了冷反射分析方法及分析结果,分析结果表明其冷反射影响可以忽略。系统外形尺寸小,结构紧凑,满足小型化要求,能够广泛应用于机载搜索营及救夜间成像等方面。

参考文献:

- [1] Zhang Mingyi, Li Baoping, Wang 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)
- [2] Chen Lvji, Chen Jinjin, Li Ping. A novel stop-zoom LW infrared dual field-of-view optical system design[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(7): 406-410. (in Chinese)
- [3] Zhao Xinliang, Wang Haixia, Cui Li, et al. Design of dual-field scanning LWIR optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1517-1520. (in Chinese)
- [4] Dong Keyan, Sun Qiang, Li Yongda, et al. Design of a refractive/diffractive hybrid infrared bifocal optical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(9): 4602-4606. (in Chinese)
- [5] Luo Shoujun, He Wubin, Li Wenhui, et al. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2117-2122. (in Chinese)
- [6] Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid-infrared zoom optical system with ratio of 25[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422001-1-0422005. (in Chinese)
- [7] Tao Chunkan. Zoom Lens Design [M]. Beijing: Beijing National Defense Industry Press, 1988: 33-39, 140-153. (in Chinese)
- [8] Fan Zheyuan, Yang Hongtao, Qu Enshi, et al. Design of long-wave infrared scan system with large field and large aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2740-2744. (in Chinese)