

6 倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计

张庭成 廖志波

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要 提出了一种求解变焦方程的新方法,并针对中红外 320×256 元制冷型焦平面阵列探测器,设计了一个 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段的透射式红外连续变焦距光学系统,其 F 数恒定为 2,最小焦距值为 22 mm,变倍比为 6。系统由变焦物镜和二次成像系统构成,包括 7 片硅、锗透镜,并引入非球面以校正系统各种轴外像差,同时利用两个平面反射镜折叠光路以减小尺寸。在空间频率 16 lp/mm 处和全焦距范围内,系统各个视场的光学调制传递函数均大于 0.55;在接收面为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的探测器敏感元内,能量集中度大于 80%。因此该系统具有较好的成像质量。

关键词 光学设计;制冷型;连续变焦;红外光学系统;非球面

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1122004

Design of $6 \times$ Cooled Thermal Imaging Middle Infrared Continuous Zoom Optical System

Zhang Tingcheng Liao Zhibo

(Beijing Space Mechanics and Electronics Institute, Beijing 100190, China)

Abstract A new method to solve the zoom equation is presented. For the middle infrared 320×256 element cooled thermal focal plane array detector, an optical system of $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ refractive infrared continuous zoom is designed, which has a constant F number of 2, a minimum focal length of 22 mm, and a zoom ratio of 6. This system is composed of a zoom objective and a secondary imaging system, including 7 lenses made of silicon or germanium in total. In order to correct off-axis aberrations, aspherical surfaces are used. Meanwhile, two folding mirrors are introduced to reduce the volume of this system. The modulation transfer function of each field of view is above 0.55 in all focal positions at the spatial frequency of 16 lp/mm. The energy permeance ratio is greater than 80% within the inscribed circle limited by the detector sensor with the size of $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$. So the continuous zoom system has a good imaging quality.

Key words optical design; cooled thermal; continuous zoom; infrared optical system; aspherical surface

OCIS codes 220.3620; 220.1250; 220.3630

1 引言

红外光学系统具有隐蔽性好、抗干扰能力强以及在一定程度上能够识别伪装目标等特点^[1,2],特别是连续变焦距光学系统在视场转换的过程中还可以始终保持目标图像的连续性和清晰度,避免丢失快速运动的目标,是红外成像系统同时解决大视场搜索目标和小视场观察目标的最佳选择^[3,4],因此具有强烈的军事需求,特别是在各种机载光电系统,如红外吊舱系统中有广泛的应用。

本文针对 320×256 元中红外制冷型焦平面阵列探测器,采用 7 片硅、锗透镜设计了一个红外连续变焦距光学系统,该系统由变焦物镜和二次成像系统组成,并使用平面反射镜折叠光路,可实现 $22 \sim 135$ mm 变焦,变倍比为 6,工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, F 数恒定为 2。为了实现制冷型红外连续变焦距系统的大相对孔径和较高变倍比^[5,6],同时避免衍射光学元件的衍射效率随工作谱段扩展而迅速下降的问题^[7,8],只使用了非球面来帮助校正各

收稿日期: 2012-05-03; 收到修改稿日期: 2012-06-25

作者简介: 张庭成(1982—),男,博士,工程师,主要从事成像光学系统设计方面的研究。

E-mail: tczhang1217@gmail.com

种轴外像差。

2 系统初始结构的计算

变焦物镜和二次成像系统的组合如图 1 所示^[9]。其中变焦物镜为机械补偿型变焦距系统,包

括前固定组、变焦组、补偿组和后固定组,分别为图 1 中编号为 1、2、3、4 的透镜组。为了有效地校正正系统的球差和色差,这里将其光焦度分别设置为正、负、正、负;而二次成像系统为一个正透镜组,在图 1 中编号为 5。

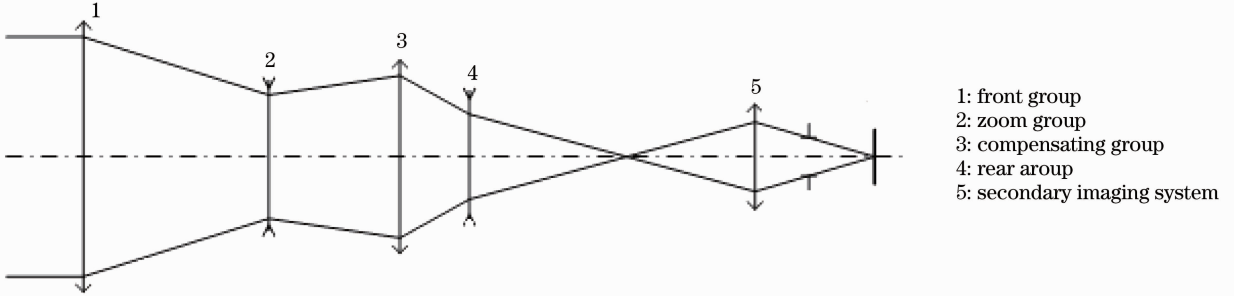


图 1 变焦物镜和二次成像系统的组合

Fig. 1 Combination of zoom objective and secondary imaging system

在求解初始结构的过程中,考虑到红外光学系统对外形尺寸的要求,用前固定组与后固定组的间隔 d_{14} 代替变焦组的焦距值 f'_2 作为归一化常数,得到方程组

$$f_s = f'_1 \beta_{2S} \beta_{3S} \beta_4 \beta_5, \quad (1)$$

$$f_L = f'_1 \beta_{2L} \beta_{3L} \beta_4 \beta_5, \quad (2)$$

$$\left(\beta_{2L} + \frac{1}{\beta_{2L}} - \beta_{2S} - \frac{1}{\beta_{2S}}\right) f'_2 + \left(\beta_{3L} + \frac{1}{\beta_{3L}} - \beta_{3S} - \frac{1}{\beta_{3S}}\right) f'_3 = 0, \quad (3)$$

$$d_{12S}/d_{14} = \frac{f'_1 - f'_2 (1/\beta_{2S} - 1)}{d_{14}} = a, \quad (4)$$

$$d_{34S}/d_{14} = \frac{f'_3 (1 - \beta_{3S}) - f'_4 (1/\beta_4 - 1)}{d_{14}} = b, \quad (5)$$

$$d_{23L}/d_{14} = \frac{f'_2 (1 - \beta_{2L}) - f'_3 (1/\beta_{3L} - 1)}{d_{14}} = c, \quad (6)$$

$$d_{45}/d_{14} = \frac{f'_4 (1 - \beta_4) - f'_5 (1/\beta_5 - 1)}{d_{14}} = d, \quad (7)$$

$$f'_2/f'_3 = e. \quad (8)$$

式中下标 S 和 L 分别表示短焦和长焦, f' 、 β 和 d 分别代表各个组元的焦距值、垂轴放大率和间隔, f 为系统焦距值。由于用 d_{14} 代替 f'_2 , f'_2 变为未知量,由 (8) 式可知, f'_3 也未知。因此在 β_{2L} 、 F_S 、 F_L 已知的情况下,无法将合成共轭距方程 (3) 式转换为一元二次方程。

因此将 (1)~(4) 式、(6) 式和 (8) 式联立,通过换元替代的方法最终可以得到一个关于 β_{2S} 的一元三次方程,因此上述方程组的求解最终转换成一元三次方程的求解。在求解的过程中,需要合理地设置 e 的值,即变焦组和补偿组的焦距值之比。由于系统采用负组变倍、正组补偿的结构形式,所以 e 是一个小于零的值,并且经过反复试验, e 的一个合理区

间应该在 $-0.7 \sim -1$ 之间。在对求得的三个 β_{2S} 进行选择时,要遵循以下原则: 1) β_{2S} 必须为实数; 2) β_{2S} 要与 β_{2L} 同号; 3) $|\beta_{2S}| < |\beta_{2L}|$ 。

另外,随着 $|\beta|$ 的增大,出瞳到探测器的距离变短,符合系统紧凑的原则,但是整个系统的 F 数也随之增加,系统的灵敏度降低。因此,可令 $\beta_5 = -1$ ^[10]。

在求得各个组元的焦距值和间隔后,根据系统 F 数和像高的要求,利用傍轴光线追迹公式即可求得两条辅助光线在各个组元上的投射高,在满足系统 100% 冷光阑效率以及冷光阑与焦面的距离限制等要求的前提下,根据 PW 法^[11] 求得各个组元的初始结构;本系统中第 2、4、6 透镜使用了硅,其余为锗材料,在用 PW 法求解初始结构时,要注意红外材

料的组合要最大限度地校正色差。

为了使系统具有更高的透过率,本系统仅使用了7片透镜,因而增大了光学系统优化难度。考虑到红外非球面对加工精度要求相对较低,为了校正高阶彗差和球差,同时抑制系统的畸变,系统中引入了4个非球面,分别在第2、8、10和16光学表面。

3 光学系统设计

3.1 系统设计指标

本实例采用的中红外制冷型焦平面阵列探测器的规模为 320×256 ,像素大小为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,具体的技术指标如表1所示。

表1 系统性能指标

Table 1 General design requirements

Item	Value
Working wave range / μm	3.7~4.8
Zoom ratio	6
Focal length range /mm	22~135
Image height (diagonal) /mm	12.3
F number	2
Encircled energy /%	80

3.2 设计结果

按照以上介绍的方法和步骤,经过优化计算后,最终得到如图2所示的结果。图2给出了系统在短焦(22 mm)、中焦(47.63 mm)和长焦(135 mm)时的结构示意图。为了合理地控制总长,系统使用了两个 45° 放置的反射镜来折叠光路。光学系统外形尺寸为 $270 \text{ mm} \times 144 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,系统中最小空气间隔为4.72 mm,并达到100%冷光阑效率。图3给出了系统的变焦曲线,系统具有平滑的变焦曲线,易于加工实现。

图4依次为系统在短焦、中焦和长焦时的调制传递函数(MTF)曲线和点列图。由图4可知,在16 lp/mm处,各个视场的MTF值均大于0.55。

图5分别给出了光学系统在短焦、中焦和长焦时的衍射能量曲线。由于探测器像素尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,所以在设计时应考虑衍射斑半径在 $15 \mu\text{m}$ 以内的能量集中度。图5表明,该系统的能量集中度均大于80%,因此该变焦系统具有很好的能量集中度。

4 结论

提出了一种通过求解一元三次方程来求解变焦

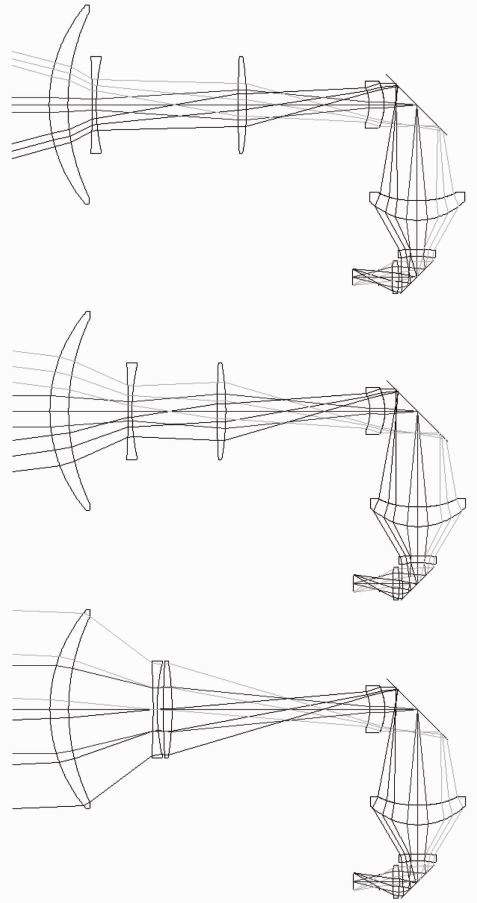


图2 连续变焦距光学系统结构图

Fig. 2 Layout of continuous zoom optical system

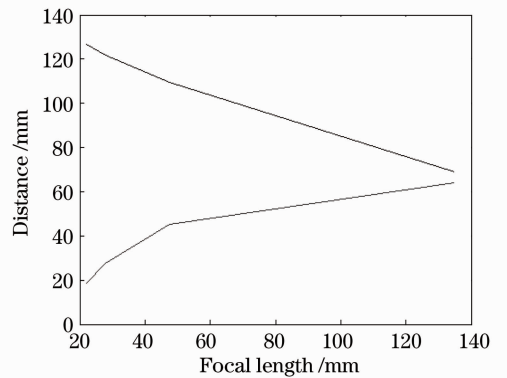


图3 系统的变焦曲线

Fig. 3 Zoom curve of system

方程的新方法,并设计了一个1:6制冷型红外连续变焦距光学系统,在变焦过程中该系统能够保持恒定的 F 数,并且只使用了硅、锗两种红外材料,降低了系统的生产成本,是一套通用型的红外组件,可以广泛应用于机载和车载光电探测和跟踪系统中,如导航、搜索、警戒和侦察等方面。

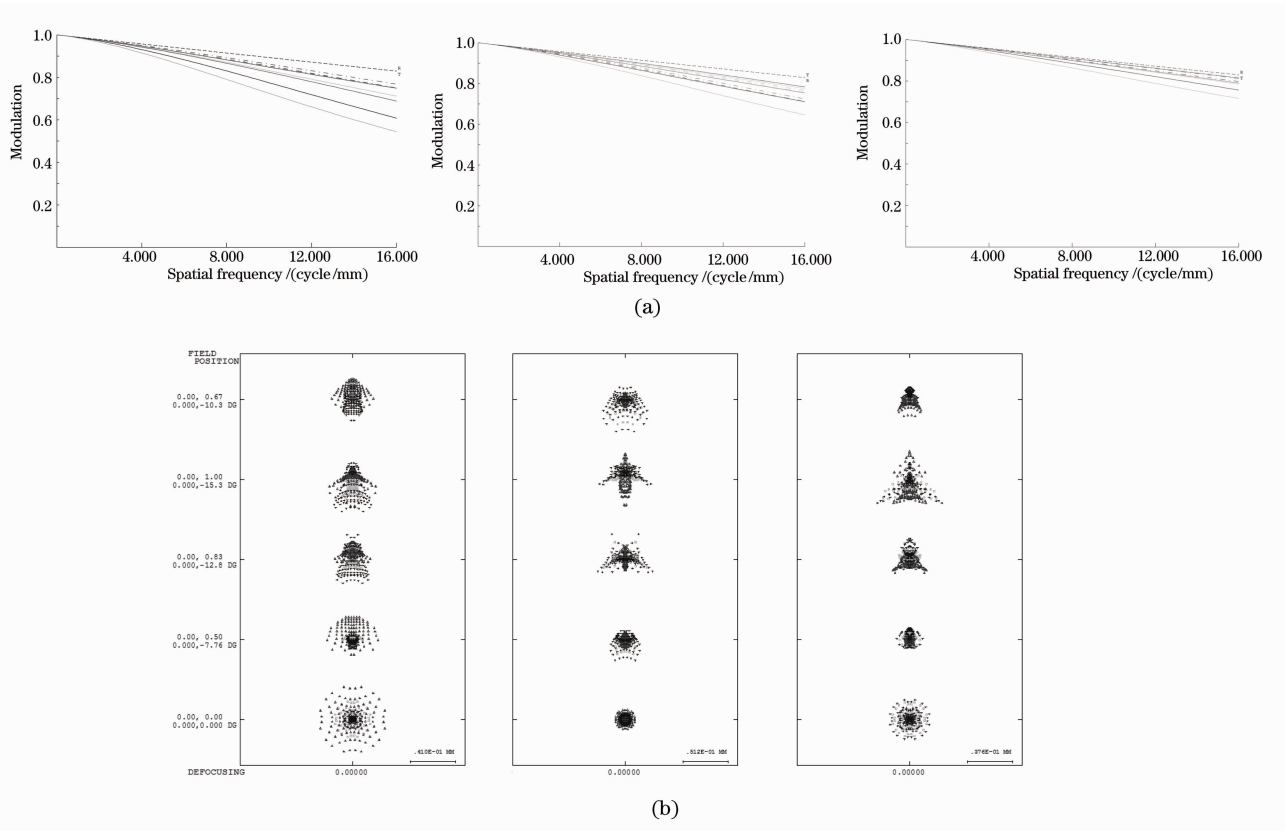


图 4 (a)系统的调制传递函数曲线；(b)系统的点列图
Fig. 4 (a) MTF curves of system; (b) spot diagram of the system

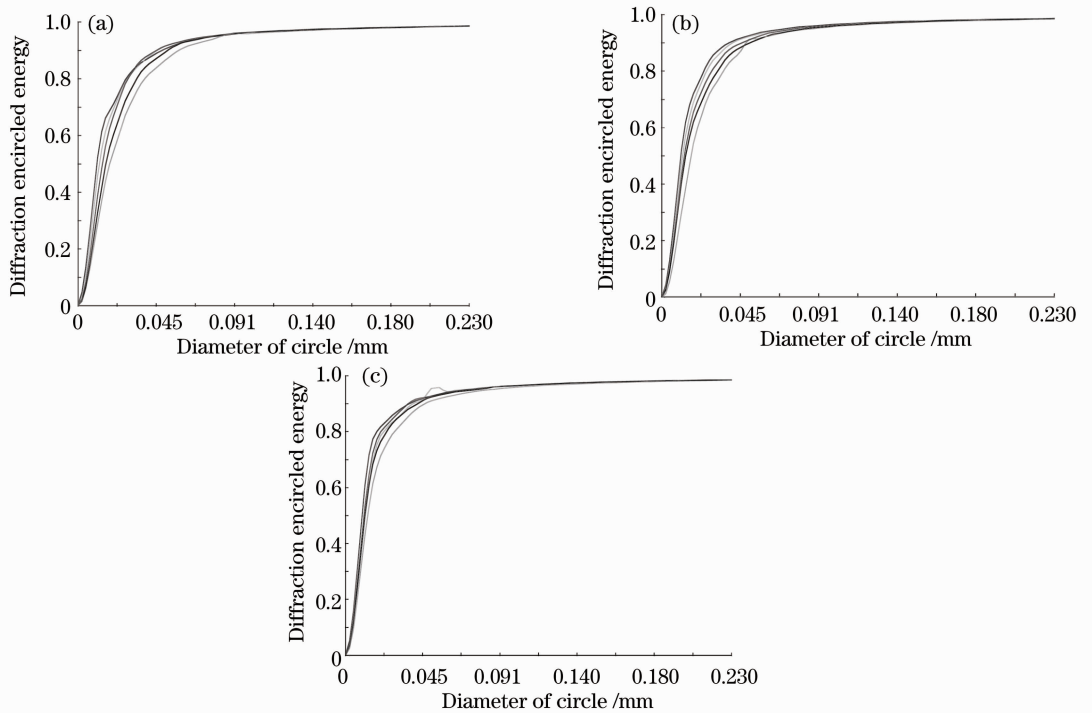


图 5 系统的能量分布曲线
Fig. 5 Curves of energy distribution of system

参 考 文 献

- 1 Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid-infrared zoom optical system with ratio of 25 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0422001
周昊, 刘英, 孙强. 25倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0422001
- 2 Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088
刘峰, 徐熙平, 孙向阳等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2084~2088
- 3 Chen Lüji, Li Ping, Ma Lin. Compact MWIR zoom system[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(10): 562~566
陈吕吉, 李萍, 马琳. 紧凑中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外技术*, 2010, **32**(10): 562~566
- 4 Hu Jixian. Design of long focal length large aperture optical zoom system[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(5): 569~577
胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 569~577
- 5 Zhang Liang. Optical design for middle infrared zoom system[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(1): 32~34
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
- 6 Gao Hongyun, Xiong Tao. Mid-wavelength infrared dual field-of-view optical system[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1891~1894
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
- 7 C. W. Tsai, Y. C. Fang, H. C. Lin. Extended optimization for 350X zoom optics via hybrid Taguchi genetic algorithm [C]. *SPIE*, 2008, **7138**: 71381F
- 8 Y. C. Fang, H. C. Lin. Optical design and optimization of zoom optics with diffractive optical element [C]. *SPIE*, 2009, **7282**: 72820F
- 9 Jiang Lun, Huang Wei. Lens design for optical system of high zoom ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222006
江伦, 黄玮. 高变倍比变焦距系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222006
- 10 Yang Weijin, Sun Qiang. Design of middle infrared continuous zoom system [J]. *Chinese J. Optics & Applied Optics*, 2010, **3**(2): 164~169
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
- 11 Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 111~119
袁旭沧. 光学设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 111~119

栏目编辑: 何卓铭