

大口径离轴折反式中波红外连续变焦系统设计

姜 凯^{1,2}, 周四忠¹, 王艳彬¹, 段 晶¹, 赵 睿², 张恒金¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光电测控研究室, 陕西 西安 710119;
2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 基于制冷型 320×240 凝视焦平面阵列探测器, 设计了大口径离轴折反式中波红外连续变焦光学焦系统。系统工作波段为 3.7~4.8 μm, 焦距范围 250~2 000 mm, F 数为 4。光学系统分离轴无光焦度系统和透射式连续变焦系统两部分设计, 匹配对接后优化。解决了透射式连续变焦系统因材料限制不能做到大口径、共轴折反式连续变焦系统短焦遮拦比大和离轴三反不能做到 100%冷光阑效率的缺陷。满足 100%冷光阑效率, 在空间频率 16 lp/mm 处系统的 MTF 值大于 0.5, 具有像质好, 分辨率高等特点, 满足设计要求。

关键词: 红外变焦系统; 离轴; 大口径; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2467-05

Design of large aperture off-axis catadioptric middle infrared continuous zoom system

Jiang Kai^{1,2}, Zhou Sizhong¹, Wang Yanbin¹, Duan Jing¹, Zhao Rui², Zhang Hengjin¹

- (1. Photoelectric Measurement and Control Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: On the basics of a cool 320×240 detector with staring focal plane array, a large aperture off-axis catadioptric middle infrared continuous zoom system was designed. The system worked at 3.7 - 4.8 μm which achieved the zoom of 250 mm to 2 000 mm and F number of 4. The optical system was divided into two segments. Firstly, an off-axis aspheric non-power system as the front system was designed. Then the continuous zoom lens which matched with the non-power system as the back system was designed. Because of the material constraint, the refractive zoom system could not realize large aperture. Coaxial catadioptric zoom system had great block ratio. And three mirrors zoom system could not achieve cold shield efficiency 100%. The off-axis catadioptric zoom system could account for forenamed limitation. The system could offer a high resolution and excellent images, and its cold shield efficiency is 100%. The system satisfies the design requirements.

Key words: infrared continuous zoom system; off-axis; large aperture; optical design

收稿日期: 2013-01-09; 修订日期: 2013-02-15

作者简介: 姜凯(1985-), 男, 博士生, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: jiangkai2008.jj@163.com

导师简介: 周四忠(1953-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电跟踪方面的研究。Email: szh@opt.ac.cn

0 引言

红外连续变焦光学系统通常是一类功能很明显的被动跟踪光学系统,此类系统能够探测、定位并连续跟踪在红外背景辐射和其他干扰下发射红外线的物体和目标。连续变焦的红外镜头既能在大视场时捕获目标,又能在发现目标后调整到小视场瞄准跟踪。在视场转换过程中能够保持图像的连续性,对搜索和跟踪高速运动目标是非常有利的,解决了分档变焦镜头视场切换时对高速目标丢失这一缺陷^[1]。

随着当今技术的发展,所观测的目标具有速度越来越快,要求观测的距离越来越远的特点,对光学系统的像质和分辨率的要求越来越高,从而对连续变焦光学系统的大口径和大变倍比提出了更高的要求^[2]。

但是,现有的红外连续变焦光学系统都具有一定的缺陷,不能满足技术进步带来的新的需求。由于红外材料的限制,使得透射式红外系统很难做到大口径,从而限制了透射式连续变焦系统的发展。而共轴反射式系统和共轴折反射式系统都具有短焦遮拦比大,整个系统不能用同一 F 数设计,导致不能设计为制冷型的缺点,降低了光学系统的观测效果^[3]。离轴反射式连续变焦系统的像面移动的缺点,对结构精度和变焦速度要求较大,导致不稳定性加大,使得使用条件受到限制。因此,提出了大口径离轴折反式红外连续变焦系统设计的方法,解决了以上各种设计方法的缺陷,具有一定的现实意义。

1 设计原理

文中将所设计镜头分为两部分,即前部离轴反射无光焦度系统和后部连续变焦系统。首先,根据参数设计离轴反射望远系统,主次镜均为离轴抛物面,视场为整个系统短焦位置视场,根据实际需要设计压缩比,优化设计后得到结果。然后进行后部传统连续变焦镜头设计,根据前部望远系统的设计结果,对后部变焦系统与其进行光瞳和数值孔径的匹配,选取合适的焦距范围,与望远系统对接,优化得到最后结果。

1.1 离轴反射无光焦度系统设计原理

光学系统的单色像差共有五种:球差、彗差、像散、场曲和畸变,分别用 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 表示。由三级像差理论,在空气介质中,对无穷远成像,可得到五

种像差的求解结果为:

$$S_1 = -\frac{2h_1^4}{R_1} (1 - \alpha - e_1^2 + \alpha e_2^2) \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{2h_1^3}{R_1} (y_1 e_1^2 - y_2 e_2^2 - y_1 + y_2) \quad (2)$$

$$S_3 = -\frac{2h_1^2}{R_1} \left(y_1^2 e_1^2 - \frac{y_2^2 e_2^2}{\alpha} - y_1^2 + \frac{y_2^2}{\alpha} \right) \quad (3)$$

$$S_4 = \frac{2}{R_1} \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4)$$

$$S_5 = -\frac{2h_1}{R_1^3} \left(y_1^3 e_1^2 - \frac{y_2^3 e_2^2}{\alpha^2} - y_1^3 + \frac{y_2^3}{\alpha^2} \right) \quad (5)$$

当 $e_1^2 = e_2^2 = 1$ 时, $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0$, 即两块反射镜都为抛物面时,系统可以消除球差、彗差、像散、畸变四种像差^[4]。

该设计两反系统采用光阑离轴,如图 1 所示,即入射光阑设置在系统主镜上,在入射光瞳上选取一个没有被遮拦的子瞳形成的。其初始结构孔径值为:

$$2D + A\alpha_1 + 2d_1\omega = A \quad (6)$$

$$A = \frac{2D + 2d_1\omega}{1 - \alpha_1} \quad (7)$$

式中: D 为需要设计的系统的孔径值; A 为初始结构的孔径值; ω 为设计的半视场角; α_1 为次镜对主镜的遮拦比; d_1 为主镜到次镜间距^[5]。由初始孔径 A 和 D 可确定光阑的离轴量 h_{off} 为:

$$h_{\text{off}} = \frac{1}{2} (A\alpha_1 + D) \quad (8)$$

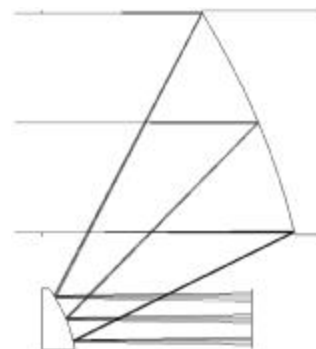


图 1 离轴无光焦度系统光路图

Fig.1 Off-axis non-power system

1.2 后部连续变焦系统设计原理

采用机械补偿式连续变焦光学系统设计(见图2),变倍组作线性移动,补偿组作相对少量非线性移动,以达到光学系统既变倍而像面位置又稳定的要求。

由变倍组移动 dq 引起的像面移动量为:

$$m_3^2(1-m_2^2)dq$$

由补偿组移动 $d\Delta$ 引起的像面移动量为:

$$(1-m_3^2)d\Delta$$

为实现像面稳定, 变倍组和补偿组的移动量应抵消:

$$m_3^2(1-m_2^2)dq+(1-m_3^2)d\Delta=0 \quad (9)$$

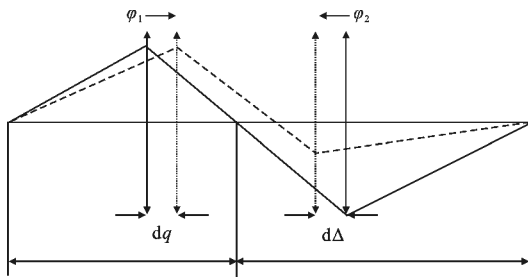


图2 机械补偿变焦组

Fig.2 Mechanical compensation zoom group

将 dq 与 $d\Delta$ 用移动组份的放大率来表示:

$$dq = \frac{f_2'}{m_2} dm_2, \quad d\Delta = f_3' dm_3 \quad (10)$$

将以上带入变焦方程, 则得到变焦的归一方程:

$$\frac{1-m_2^2}{m_2} f_2' dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3} f_3' dm_3 = 0 \quad (11)$$

从而得出

$$\sum dL_i = 0 \quad (12)$$

其物理意义为所有运动组份的共轭距在任何时候的微分改变量为零^[6-8]。

2 光学系统设计实例

2.1 光学设计指标

文中采用的探测器为 320×240 非制冷红外探测器, 探测器像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。根据实际需要, 红外连续变焦光学系统的具体参数见表1。

表1 光学系统参数

Tab.1 Parameters of system

Parameter	Value
Wavelength/ μm	3.7-4.8
Focal length/mm	250-2 000
F#	4
Image height/mm	12
Field angle/($^\circ$)	1.374 8-0.171 9

2.2 光学系统设计结果

利用 code V 光学设计软件, 设置合理的优化参数, 对分别设计的离轴无光焦度系统和透射式连续变焦系统对接, 进行优化设计, 得到设计结构如图3所示。其中离轴系统为两同心的离轴抛物面; 透射系统共使用9片镜片, 其中, 第1片为前固定组, 第2片为变倍组, 第3、4片为补偿组, 第5~9片为后固定组。透射系统的第11、13面为非球面(非球面系数分别为 $-0.158 6; 1.675 2$), 校正系统轴外像差; 第3面为衍射面(面型系数为 $3.416 6e-005; -1.062 2e-008$), 降低系统色差和长焦位置时补偿组和后固定组的二级光谱的负担, 系统总长 990 mm, 主镜口径 520 mm。系统视场光阑与探测器冷光阑重合, 达到冷光阑效率 100%, 最大畸变小于 4%。

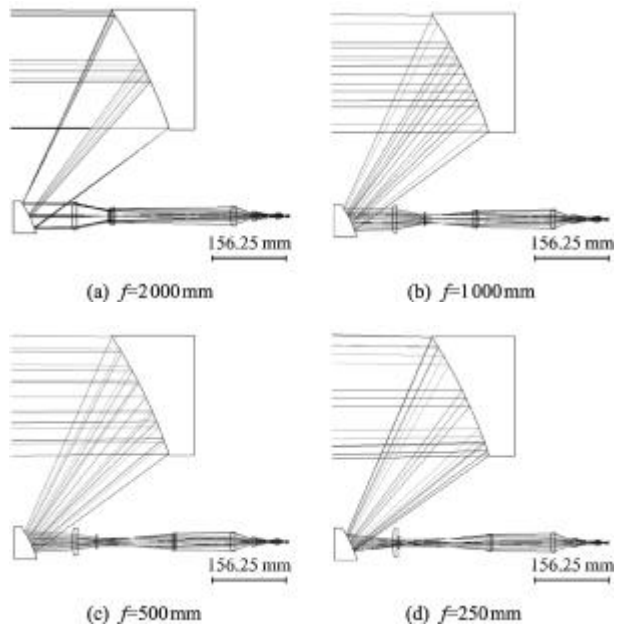


图3 变焦系统结构图

Fig.3 Structure diagram of zoom optical system

图4为该系统的凸轮曲线, 其中横坐标代表变

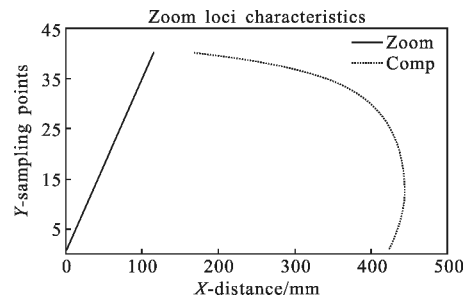


图4 变焦系统的凸轮曲线

Fig.4 Cam curves of designed zoom lens

倍组和补偿组与前固定组的距离, 纵坐标代表采样点。该凸轮曲线平滑无拐点, 易于机械加工。

3 像质评价

该系统的传递函数曲线如图 5 所示, 16 lp/mm 空间频率下系统的各焦距 MTF 都大于 0.5, 接近或达到衍射极限, 说明该系统在全焦距范围内有较高的像质。

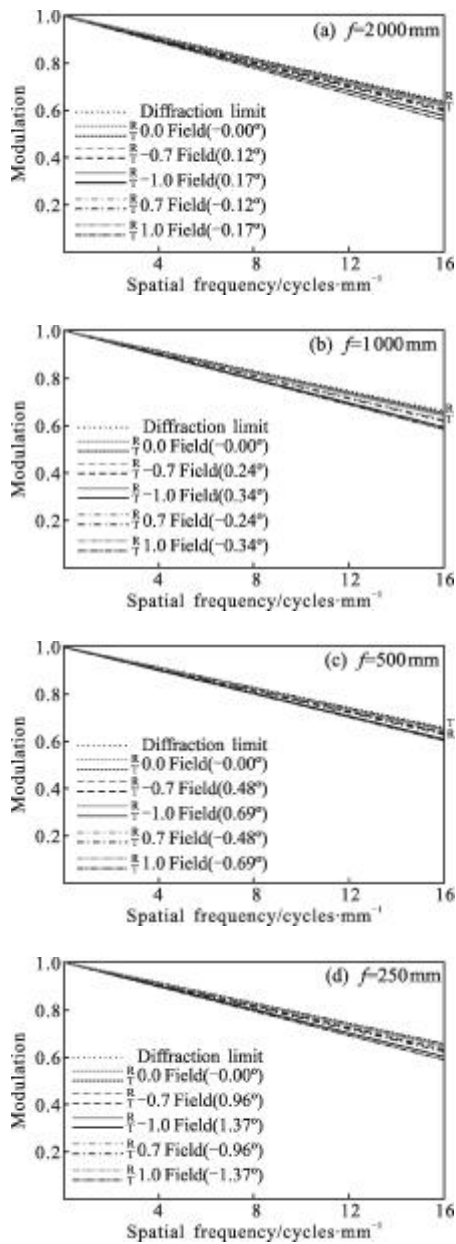


图 5 光学系统 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of the optical system

位置, 全视场内弥散斑的均方值(RMS)都小于 $15 \mu\text{m}$, 满足系统使用要求。

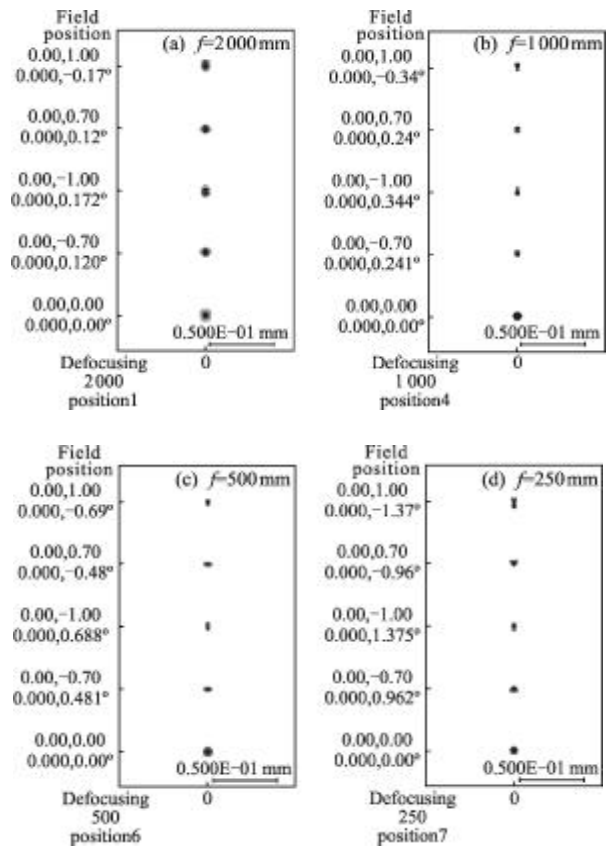


图 6 点列图

Fig.6 Spot diagram

表 2 RMS

Tab.2 RMS

Field	RMS/mm			
	F=2 000 mm	F=1 000 mm	F=500 mm	F=250 mm
0	0.740 64E-02	0.521 25E-02	0.513 01E-02	0.432 92E-02
0.7	0.681 54E-02	0.558 85E-02	0.412 07E-02	0.463 39E-02
1	0.759 00E-02	0.627 52E-02	0.457 67E-02	0.522 86E-02
-0.7	0.672 60E-02	0.563 55E-02	0.404 05E-02	0.455 57E-02
-1	0.762 93E-02	0.643 15E-02	0.418 81E-02	0.666 48E-02

4 结论

文中基于制冷型 320×240 凝视焦平面阵列探测

该系统点列图如图 6 和表 2 所示, 在所有焦距

器,设计了大口径离轴折反式中波红外连续变焦光学系统,并介绍了离轴系统的初始结构计算和系统分两部分设计匹配对接的设计方法。系统工作波段 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$,焦距 $250\sim 2\ 000\ \text{mm}$,变倍比为 $8\times$,F数为4,满足100%冷光阑效率。该系统具有大口径的优点,且解决了透射式连续变焦系统因材料限制不能做到大口径、共轴折反式连续变焦系统短焦遮拦比大和离轴三反变焦系统不能100%冷光阑的缺陷,光学传递函数接近衍射极限,凸轮曲线平滑,结构紧凑,满足实际需求。大口径是红外连续变焦镜头发展的必然趋势,将在军用、民用,特别是高速目标跟踪和识别上得到广泛应用。

参考文献:

- [1] Aron Y, Boubis I, Shabit R. Topaz: a novel design of a high magnification athermalized 1:30 zoom in the MWIR [C]//SPIE, 2004, 5406: 97-106.
- [2] Xu Zhaodong, Liu Xin, Dong Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 619-621. (in Chinese)
许照东,刘欣,董涛.机载高分辨率连续变焦红外热像仪设计[J].*红外与激光工程*, 2007, 36(5): 619-621.
- [3] Deng Jian, Zhang Wei, Long Funian. Optical design of large aperture segmented mirror system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 29-34. (in Chinese)
邓键,张伟,龙夫年.大口径拼接式合成孔径光学系统设计[J].*光学精密工程*, 2008, 16(1): 29-34.
- [4] Liu Xiumei, Li Hongguang. Design of off-axis aspheric non-power system [J]. *Infrared*, 2010, 31(7): 14-17. (in Chinese)
刘秀梅,李红光.离轴非球面无光焦度系统设计 [J].*红外*, 2010, 31(7): 14-17.
- [5] Che Chicheng, Li Yingcai, Fan Xuewu. Optical design of off-axis two mirrors collimator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1793-1796. (in Chinese)
车驰骋,李英才,樊学武.离轴两镜平行光管的 optical 设计 [J].*光子学报*, 2008, 37(9): 1793-1796.
- [6] Jin Fengxi, Jin Hujie. Structural style's the best select of vari-focus lens [J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(1): 34-38. (in Chinese)
金逢锡,金虎杰.变焦镜头结构形式的最佳选择方法[J].*光学仪器*, 2004, 26(1): 34-38.
- [7] Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continuous zoom system with high speed [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(9): 2674-2679. (in Chinese)
陆强,季轶群,沈为民.大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J].*光学学报*, 2010, 30(9): 2674-2679.
- [8] Tao Chunkan. *Zoom Focus Optics Design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 122-124. (in Chinese)
陶纯堪.变焦距光学系统设计 [M].北京:国防工业出版社, 1988: 122-124.