

25 倍中红外连续变焦光学系统设计

周 昊^{1,2} 刘 英¹ 孙 强¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 针对制冷型 320 pixel×240 pixel 凝视焦平面阵列探测器, 设计了一个 25 倍中红外连续变焦光学系统。该系统由变焦系统和二次成像系统构成。变焦系统由两个子变焦系统串联而成, 可以实现高变焦比; 二次成像系统的作用是压缩物镜口径和实现冷光阑效率的要求。该中波红外连续变焦系统光学系统的工作波段位于 3.7~4.8 μm, 可以实现 12~300 mm 连续变焦, F 数达到 2.5, 满足 100% 冷光阑效率的要求。该系统具有变焦比大、相对孔径大、变焦行程短和变焦轨迹平滑等优点。

关键词 光学设计; 连续变焦; 中红外; 高变焦比

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0422001

Mid-Infrared Zoom Optical System with Ratio of 25

Zhou Hao^{1,2} Liu Ying¹ Sun Qiang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract For 320 pixel×240 pixel cooled staring focal plane array detector, a mid-infrared zoom optical system with ratio of 25 is designed. The system consists of a zoom system and a re-imaging system. The zoom system consists of two small zoom lenses, which can realize large zoom ratio; the re-imaging system can satisfy requirement of the cold shield efficiency, and the diameter of lens can be reduced because of it. The mid-infrared zoom optical system works in the range of 3.7~4.8 μm, it can realize 12~300 mm continuous zoom and satisfy requirement of 100% cold shield efficiency; F number of the system is 2.5. The zoom system has advantages such as a large zoom ratio, a large aperture, and short and smooth zoom paths.

Key words optical design; continuous zoom; mid-infrared; large zoom ratio

OCIS codes 220.2740; 040.3060; 220.3620

1 引 言

红外成像技术具有抗干扰能力强、环境适应性好和隐蔽性好等特点, 因此红外成像系统广泛地应用于警戒、侦查、防空和制导等军事领域^[1~3]。随着红外成像技术的发展和其应用范围的越来越广, 红外定焦系统的缺点越来越明显。主要原因是由于红外定焦系统视场单一, 不能同时实现搜索和侦查的目的。而红外连续变焦系统则可以实现大视场搜索、小视场观察的目的, 并且在视场转换过程中能够

保持图像的连续性, 因此对红外连续变焦系统的需求日益增强^[4~9]。所以设计红外变焦系统具有一定的现实意义。

传统的中波红外连续变焦系统要实现高变焦比, 往往会存在变焦行程长以及相对孔径小等问题。针对这一问题, 本文运用新的思路设计了一个连续变焦光学系统, 系统采用中波红外制冷型 320 pixel×240 pixel 凝视焦平面阵列探测器。该系统具有高达 25 倍的变焦比, 具有较小的 F 数, 且变焦曲线短而平滑。

收稿日期: 2011-08-04; **收到修改稿日期**: 2011-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)资助课题。

作者简介: 周 昊(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 89zhouhao@163.com

导师简介: 孙 强(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

2 设计原理

本文所设计的中波红外连续变焦光学系统由变焦系统和二次成像系统组成。变焦系统在整个光学系统中起连续变化焦距的作用。由于光学系统采用的是中波红外制冷型探测器,因此系统需要满足冷光阑效率 100% 的要求。追加二次成像系统的目的就是保证冷光阑效率 100%, 除此之外二次成像系统还可以起到压缩物镜口径的作用。光学系统原理如图 1 所示: 无穷远物体经变焦系统成像在一次像面 I_1 处, 一次像面 I_1 再经二次成像系统成像在二次像面 I_2 处。用 f_z 表示变焦系统的焦距, β_r 表示一次像面经二次成像系统成像时的放大倍率, 则整个光学系统的焦距 f_s 为

$$f_s = f_z \beta_r. \quad (1)$$

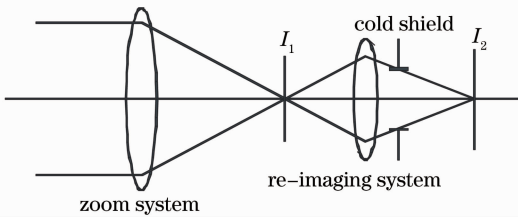


图 1 光学系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of optical system

2.1 变焦系统

连续变焦系统需要满足系统焦距连续改变和像面位置保持稳定这两个条件。机械补偿式连续变焦系统可以通过变倍组和补偿组的移动来实现这两个要求。为了提高变焦系统的变焦比, 采用两个机械补偿式变焦系统串联的方式来组成一个变焦系统, 其原理如图 2 所示。各透镜组的焦距不变, 三个固定组 X_1 、 X_2 、 X_3 的位置保持固定。通过两个变倍组 (zoom) M_1 、 M_2 和两个补偿组 (comp) C_1 、 C_2 的移

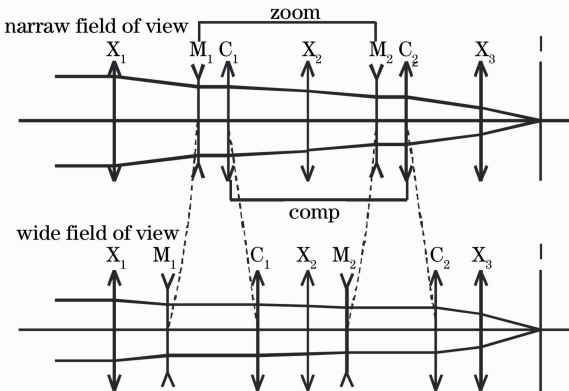


图 2 变焦系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of zoom lenses

动, 来实现系统焦距连续改变并且保持像面 I 稳定。在变焦的过程中, 为了不失透镜的移动过于复杂, 令两变倍组具有相同的移动轨迹, 两补偿组具有相同的移动轨迹。即两变倍组具有固定的间隔, 两补偿组具有固定的间隔。

2.1.1 子变焦系统

变焦系统由两个机械补偿式变焦系统串联组成, 我们称这两个系统为子变焦系统。如图 3 所示, 子变焦系统由变倍组 M 和补偿组 C 组成, 用 f_m 表示变倍组焦距、 f_c 表示补偿组焦距、 d_{mc} 表示变倍组与补偿组的间隔。子变焦系统的物方主平面用 H_{mc} 表示, 像方主平面用 H'_{mc} 表示, 焦距用 f_{mc} 表示。变倍组 M 到 H_{mc} 的距离用 l_{mcH} 表示, 补偿组 C 到 H'_{mc} 的距离用 l'_{mcH} 表示。物点 I' 经子变焦系统成像在 I'' 处, 其放大倍率用 β_{mc} 表示。成像时的物距用 l_{mc} 表示, 像距用 l'_{mc} 表示。 $I'I''$ 之间的间隔用 D 表示。

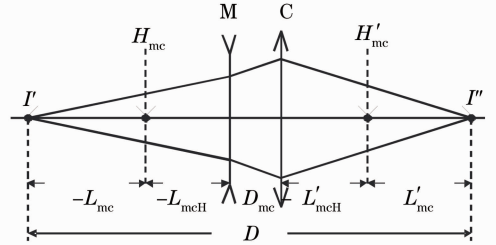


图 3 子变焦系统原理图

Fig. 3 Principle diagram of a part of zoom lenses

有以下公式^[10]:

$$f_{mc} = \frac{f_m f_c}{f_m + f_c - d_{mc}}, \quad (2)$$

$$l_{mcH} = \frac{d_{mc} f_m}{f_m + f_c - d_{mc}}, \quad (3)$$

$$l'_{mcH} = -\frac{d_{mc} f_c}{f_m + f_c - d_{mc}}, \quad (4)$$

$$l_{mc} = \left(\frac{1}{\beta_{mc}} - 1\right) f_{mc}, \quad (5)$$

$$l'_{mc} = (1 - \beta_{mc}) f_{mc}, \quad (6)$$

$$D = -l_{mc} - l_{mcH} + d_{mc} + l'_{mcH} + l'_{mc} = \frac{(\beta_{mc} - 1)^2 f_m f_c + d_{mc}^2}{f_c + f_m - d_{mc}}. \quad (7)$$

对于另一结构, 要求子变焦系统的成像放大倍率为 β_{mc}^* 。保持像面位置稳定, 即 $I'I''$ 之间的间隔不变。用 d_{mc}^* 表示该结构处变倍组与补偿组的间隔。由 (7) 式可得

$$-\frac{[(\beta_{mc}^* - 1)^2 / \beta_{mc}^*] f_m f_c + d_{mc}^{*2}}{f_c + f_m - d_{mc}^*} = D,$$

解出

$$d_{mc}^* = \frac{D \pm \sqrt{D^2 - 4a}}{2}, \quad (8)$$

式中 $a = \frac{(\beta_{mc}^* - 1)^2}{\beta_{mc}^*} f_m f_c + D(f_m + f_c)$ 。(8)式就是子变焦系统的变焦方程。

2.1.2 串联变焦系统

图 2 所示的变焦系统由两个子变焦系统串联而成。固定组 X_1 的焦距用 f_{x1} 表示。系统在某位置成像时,固定组 X_2 的放大倍率用 β_{x2} 表示;后固定组 X_3 的放大倍率用 β_{x3} 表示;两个子变焦系统的成像放大倍率分别用 β_{mc1} 、 β_{mc2} 表示。变焦系统在该位置时的焦距为

$$f_z = f_{x1} \beta_{mc1} \beta_{x2} \beta_{mc2} \beta_{x3}. \quad (9)$$

在变焦的过程中,令两个子变焦系统的像面位置都保持固定,显然可知 β_{x2} 、 β_{x3} 会不变。则系统焦距 f_z 与 $\beta_{mc1} \beta_{mc2}$ 成正比。已知变焦系统焦距为 f_z 的一结构,要求求出焦距 $f_z^* = M f_z$ 的另一结构。即要满足条件:

$$\beta_{mc1}^* \beta_{mc2}^* = M \beta_{mc1} \beta_{mc2}, \quad (10)$$

式中 β_{mc1}^* 、 β_{mc2}^* 分别表示新焦距结构的两个子变焦系统的成像放大倍率。

通过(8)式和(10)式,再约束上两个条件:两变倍组的间隔保持不变,两补偿组的间隔保持不变。就可以确定变焦系统在新焦距位置处的结构。

2.2 二次成像系统

追加二次成像系统的目的是实现冷光阑效率 100% 的要求和压缩物镜口径。为了压缩物镜口径,可将长焦位置处的光阑设在固定组 X_1 。光阑经变焦系统成像在一次出瞳 EPL 处。如图 4 所示, I_1 表示变焦系统一次像面的位置, I_1 经二次成像系统成像在二次像面 I_2 处,用 CS 表示冷光阑位置。EPL 到一次像面的距离用 L_{ei1} 表示,一次像面到二次成像系统的距离用 L_{ir1} 表示,冷光阑到二次像面的距

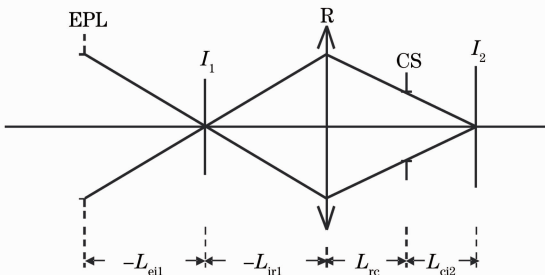


图 4 二次成像系统原理图

Fig. 4 Principle diagram of re-imaging system

离用 L_{ci2} 表示,二次成像系统到冷光阑的距离用 L_{rc} 表示。一次出瞳的直径用 D_{ep1} 表示,冷光阑的直径用 D_{cs} 表示。用 f_r 表示二次成像系统的焦距。

系统在长焦位置处,为了实现冷光阑效率 100%,一次出瞳与冷光阑应满足物象关系。有如下公式:

$$\frac{1}{L_{rc}} - \frac{1}{L_{ei1} + L_{ir1}} = \frac{1}{f_r}, \quad (11)$$

$$-\frac{L_{rc}}{L_{ei1} + L_{ir1}} = \frac{D_{cs}}{D_{ep1}}. \quad (12)$$

用 β_r 表示一次像面 I_1 成像时的放大率,有公式:

$$\frac{L_{rc} + L_{ci2}}{L_{ir1}} = \beta_r, \quad (13)$$

$$\frac{1}{L_{rc} + L_{ci2}} - \frac{1}{L_{ir1}} = \frac{1}{f_r}. \quad (14)$$

根据(11)~(14)式便可求解出二次成像系统的结构。根据已解出的二次成像系统和已知的冷光阑位置,可以计算出系统其他焦距结构处的光阑位置。通过在不同的焦距结构位置设定相对应的光阑,就可以确保光学系统在不同焦距位置处都能满足冷光阑效率 100% 的要求。

3 设计实例

3.1 设计指标

采用中波红外凝视型焦平面 320 pixel × 240 pixel 制冷探测器,探测器像元尺寸为 30 μm × 30 μm,连续变焦红外光学系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Table 1 Optical design parameters

Quantity	Value
Spectral band / μm	3.7~4.8
Zoom range	25
Focal length range / mm	12~300
F number	2.5
Image plane diagonal / mm	12

3.2 设计结果

在计算得出系统的理想高斯结构以后,选用合适的透镜进行替换就得出了系统的初始结构。再经过优化设计后就得出最终的设计结果,如图 5 所示。本设计采用硅和锗两种材料,引入了 4 个非球面。系统总长为 405 mm,使用了 10 片透镜,其中前 7 片透镜组成变焦系统。二次成像系统由后 3 片透镜构成,其主要目的是压缩物镜口径和满足冷光阑效率 100% 的要求。两变倍组(第 2 片透镜和第 5 片透镜)具有相同的移动轨迹,行程为 61.39 mm。

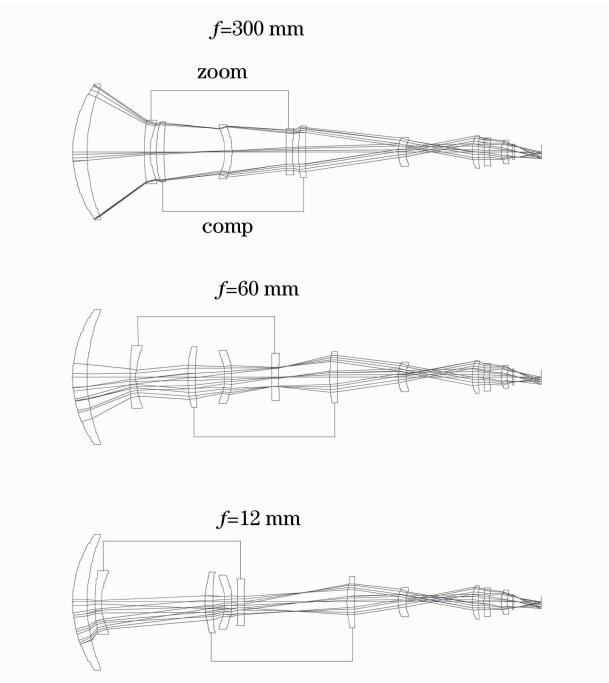


图 5 连续变焦系统图

Fig. 5 Schematic of continuous zoom optical system

两补偿组(第 3 片透镜和第 6 片透镜)具有相同的移动轨迹,行程为 33.10 mm。图 6 为变倍组和补偿组的变焦轨迹,曲线短而平滑。

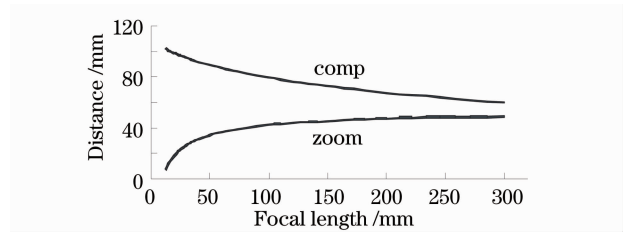


图 6 系统变焦轨迹

Fig. 6 Zoom paths of the system

3.3 像质评价

3.3.1 调制传递函数

图 7 为变焦系统在不同焦距位置处的调制传递函数 (MTF) 曲线。系统在尼奎斯特频率处 (16 lp/mm) 处的调制传递函数值均大于 0.3, 说明该系统具有较好的成像质量。

3.3.2 点列图

图 8 为变焦系统在不同焦距位置处的点列图。可以看出,任意焦距位置在全视场内的弥散斑半径的均方根值均小于 30 μm , 满足要求。

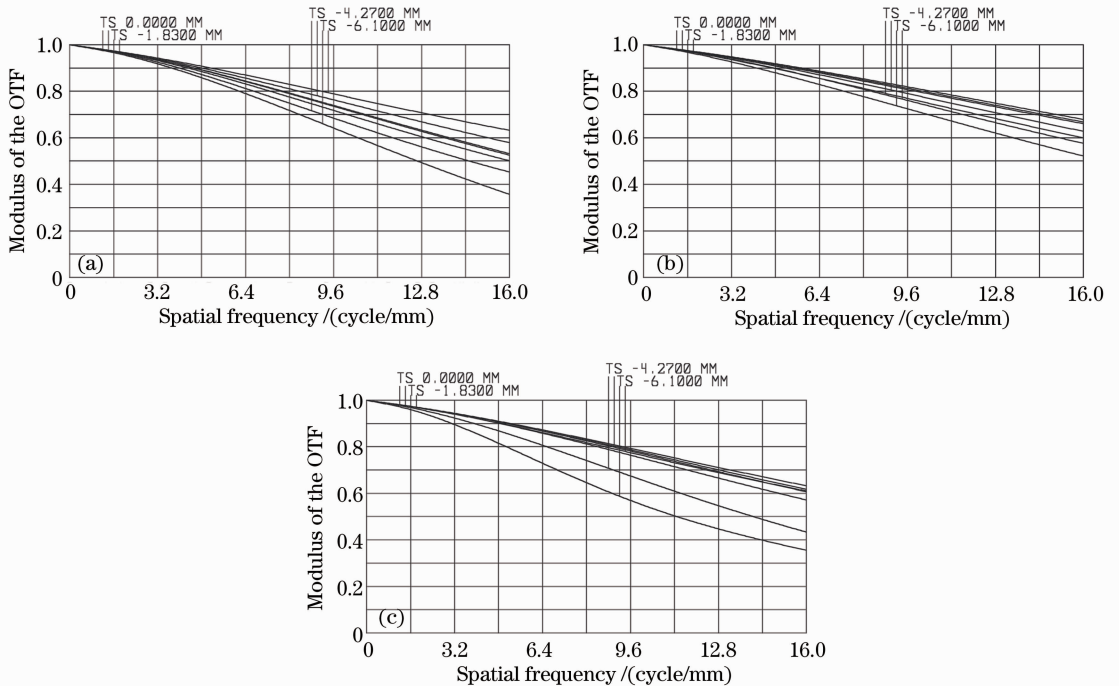
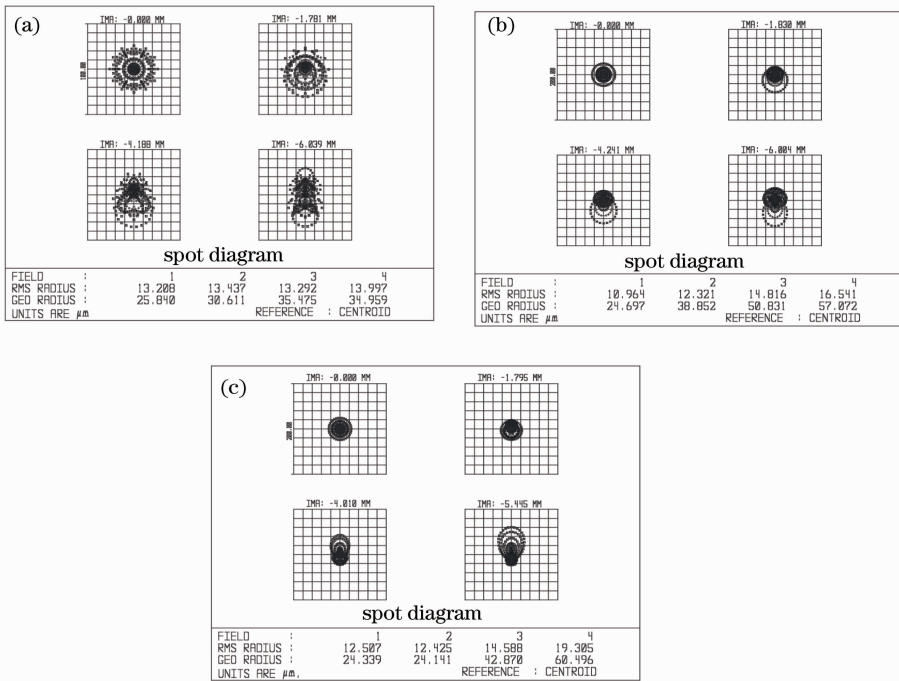


图 7 连续变焦系统调制传递函数(MTF)图。(a) $f=300\text{ mm}$; (b) $f=60\text{ mm}$; (c) $f=12\text{ mm}$

Fig. 7 Modulation transfer function (MTF) curves of continuous zoom optical system, (a) $f=300\text{ mm}$; (b) $f=60\text{ mm}$; (c) $f=12\text{ mm}$

图 8 连续变焦系统点列图。(a) $f=300$ mm; (b) $f=60$ mm; (c) $f=12$ mmFig. 8 Spot diagrams of continuous zoom optical system. (a) $f=300$ mm; (b) $f=60$ mm; (c) $f=12$ mm

4 结 论

本文设计了一个适用于中波制冷型 320 pixel \times 240 pixel 凝视焦平面阵列探测器的红外连续变焦光学系统。该系统由变焦系统和二次成像系统构成。其中变焦系统部分由两个机械补偿式子变焦系统串联组合而成,实现了高变焦比(25 倍)和较大的相对孔径(F 数为 2.5)。两个子变焦系统的移动轨迹完全相同,且轨迹曲线短而平滑。二次成像系统保证了冷光阑效率 100%。该系统具有高变焦比、小 F 数以及较高的成像质量,符合红外连续变焦系统的发展趋势。可以预见该类变焦系统在警戒、侦查、防空和制导等领域将得到广泛的应用。

参 考 文 献

- Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. Design on the thermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5 μm [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2002, **10**(2): 121~125
- 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): 121~125
- Zhang Hui, Zhao Baojun, Tang Linbo *et al.*. Infrared object tracking based on adaptive multi-features integration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1291~1296
- 张 辉, 赵保军, 唐林波等. 基于自适应多特征整合的红外目标跟踪[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1291~1296
- Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2383~2386
- 薛 慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. *光学学报*,

2010, **30**(8): 2383~2386

- 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
- Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622005
- 许伟才, 黄 玮. 新型折反射式连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622005
- Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1038~1043
- 郭洪云, 熊 涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(7): 1038~1043
- Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(6): 1020~1023
- 刘 峰, 徐熙平, 孙向阳等. 高变焦比红外变焦距光学系统设计 [J]. *应用光学*, 2009, **30**(6): 1020~1023
- Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 陆 强, 季轶群, 沈为民. 大相对口径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 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
- Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 28~30
- 郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 28~30