

大变倍比中波红外变焦光学系统设计

李 岩^{1,2} 张 葆¹ 洪永丰¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于中波红外 320 pixel×256 pixel 制冷型探测器, 采用机械正组补偿方式, 并采用折叠光路, 实现大变倍比中波红外变焦光学系统的设计。该系统由变焦物镜系统和二次成像系统组成, 包括 7 片透镜和 2 个反射镜, 并引入 3 个非球面。介绍了该光学系统结构参数的求解过程, 并用 Zemax 光学软件进行了设计。对设计结果进行了像质评价、凸轮曲线求解和冷反射分析。设计与分析结果表明, 该系统在 3.7~4.8 μm 波段实现了 18~360 mm 连续变焦, 满足 100% 冷阑匹配, 在空间频率 16 lp/mm 处调制传递函数(MTF)值均大于 0.5, 冷反射可忽略不计。该系统具有变倍比大、分辨率高、结构紧凑和变焦曲线平滑等特点, 可应用于机载光电侦察设备中。

关键词 光学设计; 连续变焦; 大变倍比; 像质评价

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0422005

Design of Large Zoom Ratio Middle Wavelength Infrared Zoom Optical System

Li Yan^{1,2} Zhang Bao¹ Hong Yongfeng¹

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

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

Abstract For a cool 320 pixel×256 pixel detector with staring focal plane array, an infrared continuous zoom optical system using mechanical compensation and folding beam path for middle wavelength infrared (MWIR) is designed. The system is composed of a zoom system and a secondary imaging system, including seven lenses, two reflectors and three even aspheres. The computing process is introduced to obtain structural parameters of the optical system, and then optimization is applied by Zemax. Image evaluation, cam curve and cold reflection are listed. The design results show that the system which works at 3.7~4.8 μm has achieved the zoom of 18~360 mm, and satisfied 100% cold shield efficiency. The modulation transfer function is always bigger than 0.5 at the spatial frequency of 16 lp/mm. The system can be used for airborne optical-electronic detection.

Key words optical design; continuous zoom; large zoom ratio; image evaluation

OCIS codes 220.4830; 040.3060; 110.3080; 220.3620; 220.1250

1 引 言

随着红外(IR)技术的快速发展, 红外成像系统已广泛应用于警戒、地面防空和制导等军事领域^[1~3]。近年来, 对于红外变焦系统的需求日益增加, 要求也不断提高, 因此红外变焦成像系统的设计与研究显得尤为重要。常见红外变焦系统分为连续变焦光学系统和间隔变焦光学系统。连续变焦可以有效避免间

隔变焦在视场切换时丢失快速运动目标的缺陷, 保证了图像的连续性, 可实现对目标的大视场搜索以及小视场瞄准跟踪, 因此红外连续变焦系统得到广泛的应用。文献[4]基于 640 pixel×512 pixel 探测器设计的焦距为 50~500 mm 的中波红外(MWIR)变焦镜头, 使用了 7 片透镜, 引入三个非球面、两个衍射面。文献[5]基于 320 pixel×240 pixel 制冷型探测器设计的

收稿日期: 2012-11-21; 收到修改稿日期: 2012-12-06

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400603B)和中国科学院航空光学成像与测量重点实验室基金(Y2HC1SR126, Y2HCISR123)资助课题。

作者简介: 李 岩(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liyan19880217@163.com

导师简介: 张 葆(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空光电成像技术方面的研究。

E-mail: cleresky@vip.sina.com(通信联系人)

焦距为 35~700 mm 的 MWIR 变焦镜头,使用了 6 片透镜,引入三个非球面、一个衍射面。以上两系统均引入衍射面,增加了系统成本以及加工工艺难度。

本文基于 MWIR 320 pixel×256 pixel 制冷型探测器,设计了一套大变倍比连续变焦红外光学系统。该系统使用 7 片透镜,引入三个非球面,在 3.7~4.8 μm 波段实现了 18~360 mm 连续变焦。该系统具有变倍比大、分辨率高、结构紧凑和变焦曲线平滑等特点。

2 变焦系统原理

变焦系统的基本原理是通过焦距(指有效焦距, EFL)的连续变化使得像面上的图像的倍率连续变化,同时保持像面位置稳定。变焦距系统大体上可分为光学补偿和机械补偿两大类。由于光学补偿只能做低变倍比、小相对孔径的变焦距系统,而且焦距仅是几个离散值,因而在使用中受到很多限制,而采用机械补偿法的变焦系统的焦距能够在一定范围内连续改变,使其得到广泛的应用。本文采用机械正组补偿方式实现大变倍比连续变焦。同时为了满足 100% 的冷光阑效率,把探测器冷光阑作为系统的孔径光阑^[6]。并采用二次成像的结构形式,有效减小了系统重量和体积,利于消除杂光并为系统校正像差提供了更多的自由变量。

机械补偿变焦光学系统的基本原理是利用变倍组和补偿组两个组元的相对运动来实现焦距的连续变化^[7,8],同时保证像质良好。一般要通过高斯光学计算来确定系统的初始参数^[9]。正组补偿变焦系统原理图如图 1 所示。

图 1 中,1、2、3 分别代表前固定组、变倍组和补偿组。其中变倍组为负光焦度,做线性移动可实现

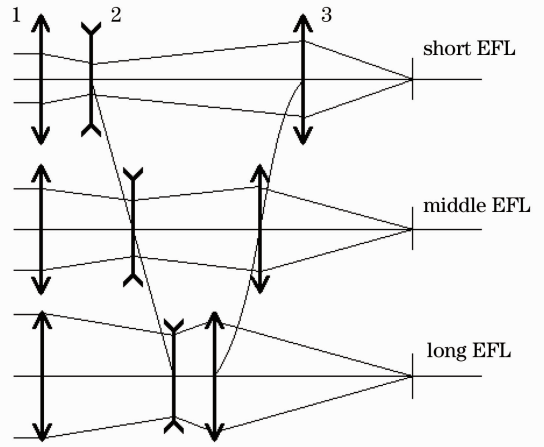


图 1 机械补偿变焦系统补偿曲线

Fig. 1 Zoom loci characteristics of the system

变焦;补偿组为正光焦度,做非线性移动可补偿像面。变焦过程中,以短焦位置为起始位置。 f'_i 为各组元的焦距; β_i 为各组元的初始放大率; β_i^* 为某个变焦位置(焦距为 f') 的放大倍率; d_{sij} 为组元间的初始间隔; d_{sij}^* 为组元间在某个变焦位置(焦距为 f') 的间隔; f'_s, f' 为初始位置、某个变焦位置的焦距; M 为某个变焦位置的变倍比; x 为变倍组的移动距离; y 为变倍组移动 x 时补偿组移动的相应距离; $i=1,2,3; j=1,2,3$ 。

起始位置的变倍组放大倍率

$$\beta_2 = \frac{f'_2}{f'_2 + f'_1 - d_{s12}} \quad (1)$$

起始位置的补偿组放大倍率

$$\beta_3 = \frac{f'_3}{f'_3 + f'_2(1 - \beta_2) - d_{s23}} \quad (2)$$

某个变焦位置(焦距为 f') 的变倍比为

$$M = f' / f'_s \quad (3)$$

该变焦位置系统变倍组的倍率为

$$\beta_2^* = \frac{-[D - 2(f'_2 + f'_3)] \pm [D - 2(f'_2 + f'_3)^2 - 4(f'_2 + \frac{f'_3}{B})(f'_2 + f'_3 B)]}{2(f'_2 + \frac{f'_3}{B})} \quad (4)$$

式中 $B = M\beta_2\beta_3; D = 2(f'_2 + f'_3) - f'_2(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2) - f'_3(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3)$ 。

该变焦位置系统补偿组的倍率

$$\beta_3^* = B / \beta_2^* \quad (5)$$

变倍组的位移

$$x = f'_2 \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2^*} \right) \quad (6)$$

补偿组的位移

$$y = f'_3 (\beta_3^* - \beta_3) \quad (7)$$

前固定组与变倍组之间的间隔

$$d_{s12}^* = d_{s12} + x \quad (8)$$

变倍组与补偿组之间的间隔

$$d_{s23}^* = d_{s23} - x + y. \quad (9)$$

反复计算(1)~(9)式,即可求解出中间各个焦距位置的变倍组与补偿组的倍率、移动距离以及二者的间隔。

3 光学设计实例

3.1 设计参数

采用的探测器为 MWIR 320 pixel×240 pixel 制冷型探测器,探测器像元尺寸为 30 μm×30 μm,制冷方式为斯特林制冷器。连续变焦 MWIR 光学系统设计参数如表 1 所示。表中 NFOV 和 WFOV 分别表示窄视场和宽视场。

3.2 设计结果

根据第 2 节介绍的变焦系统理论,通过计算得到该光学系统的外形结构。利用 Zemax 光学设计软件进行像差校正,优化系统。设计中共对 30 个焦距位置进行优化,最终实现 30 个焦距位置的空间频率 16 lp/mm 处调制传递函数(MTF)值均大于 0.5,具有良好的像质。由于篇幅有限,仅给出部分数据。表 2 为系统的最终设计参数(短焦)。图 2 为短焦

18 mm,中焦 130 mm,长焦 360 mm 三种情况下的外形结构图,由图 2 可知,该系统由变焦物镜系统和二次成像系统组成。设计中共采用硅、锗、硫化锌三种材料。其中,第 1 片透镜为前固定组。第 2、3 片为变倍组,采用锗和硫化锌两种材料消除系统色差。第 4 片透镜为补偿组。第 5 片透镜为场镜,可以有效减小系统尺寸。第 6、7 片透镜为二次成像组,采用硅、锗两种材料,用于消除剩余色差等。设计中共引入 3 个偶次非球面。

表 1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Wavelength band /μm	3.7~4.8
Zoom ratio	20×
Variable focal length /mm	18~360
F number	4
Transmittance /%	>75
Angular field / (°)	1.2×1.5 (NFOV) 24×30 (WFOV)
Cold shield efficiency /%	100
Structure dimension /mm	<270×130×92

表 2 系统最终参数

Table 2 Final parameters of system

Surface	Type	Radius of curvature	Thickness	Class	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity	Infinity	
1	Standard	169.870	6.009	Silicon	45.999
2	Even asphere	246.629	5.297	45.258	
3	Standard	2467.989	3.600	Germanium	19.974
4	Standard	129.269	0.347	19.382	
5	Standard	77.907	3.600	ZnS_broad	19.357
6	Standard	83.091	216.950	19.122	
7	Even asphere	204.060	3.600	Silicon	20.350
8	Standard	-2184.614	115.732	20.322	
9	Standard	-11.954	4.650	Germanium	9.359
10	Even asphere	-14.598	63.789	12.057	
11	Standard	37.627	3.205	Silicon	11.787
12	Standard	-278.788	0.265	11.538	
13	Standard	-164.361	8.611	Germanium	11.309
14	Standard	145.005	12.163	9.781	
Operture stop	Standard	Infinity	20.000	3.932	
Imagine plane	Standard	Infinity	-	6.046	

非球面系数:

Surface2, $k = -0.044$, $\alpha_1 = -9.590 \times 10^{-7}$, $\alpha_3 = -2.004 \times 10^{-13}$;

Surface7, $k = -3.815$, $\alpha_1 = -2.165 \times 10^{-5}$, $\alpha_3 = -4.373 \times 10^{-11}$;

Surface10, $k = -0.083$, $\alpha_1 = 1.256 \times 10^{-4}$, $\alpha_3 = -5.392 \times 10^{-10}$;

k 为圆锥系数, α_1 、 α_3 分别为 r^2 、 r^6 的系数, r 为透镜半径。

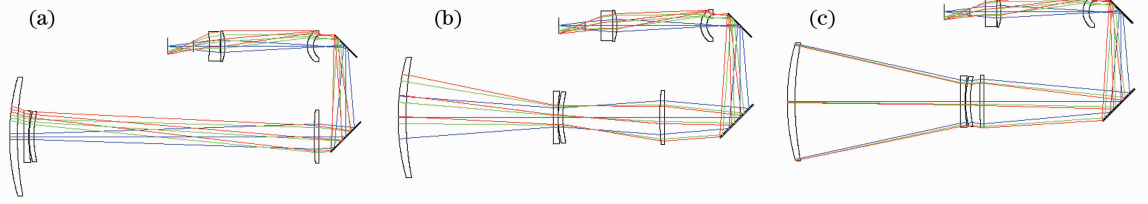


图 2 光学系统的外形结构图。(a)短焦；(b)中焦；(c)长焦

Fig. 2 Schematic of optical system structure. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

系统的变焦轨迹如图 3 所示。由图 3 可知变焦过程中变倍组和补偿组运动轨迹短而平滑。

3.3 像质评价

3.3.1 传递函数

传递函数是光学系统的重要评价手段。该光学系统的传递函数曲线如图 4 所示，其中图 4(a)~(c)分别为短焦、中焦和长焦三种情况下的传递函数曲线。由图 4 可知，系统在各焦距位置均有良好的成像质量，16 lp/mm 空间频率下 MTF 值小于 0.5。其中中心视场 MTF 值大于 0.6，接近衍射极限。

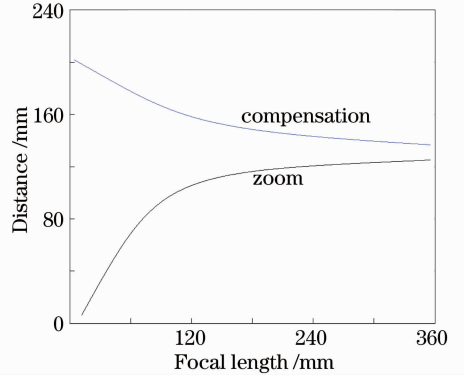


图 3 系统变焦轨迹

Fig. 3 Zoom paths of the system

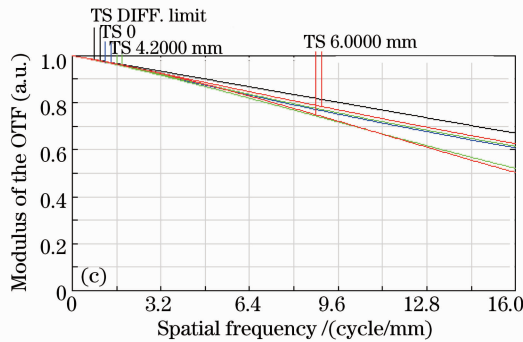
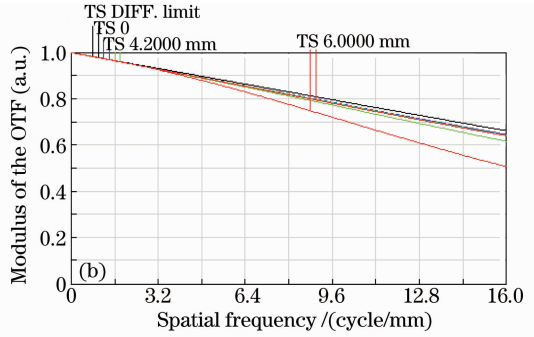
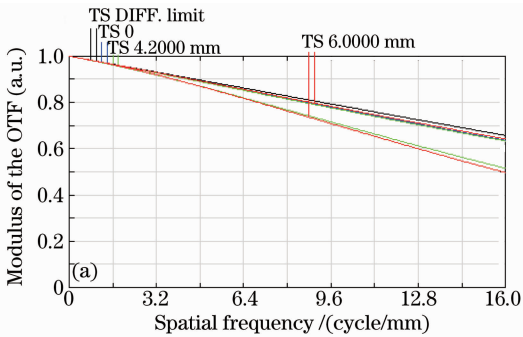


图 4 变焦光学系统的调制传递函数。(a)短焦；(b)中焦；(c)长焦

Fig. 4 MTF curves of the zoom optical system. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

3.3.2 几何能量分析

红外光学系统在短焦、中焦、长焦时的几何能量分布曲线如图 5 所示。由图 5 可知，全视场内弥散

半径为 $15 \mu\text{m}$ 时的能量集中度均大于 72%，满足红外制冷型探测器的基本要求。

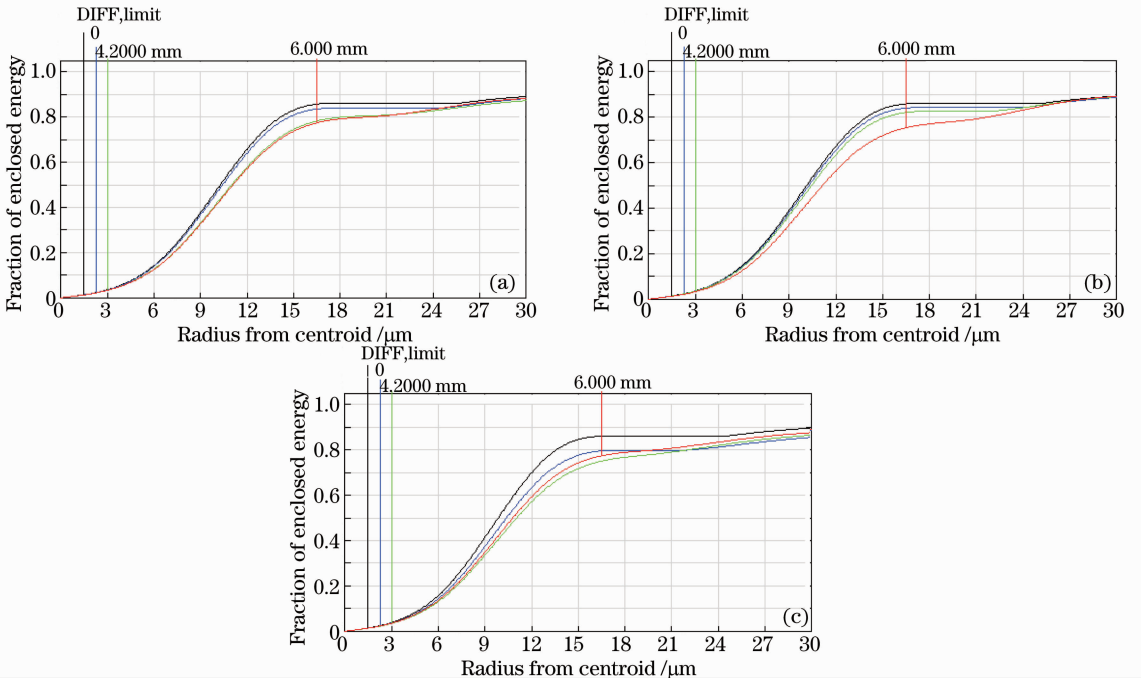


图 5 光学系统能量分布曲线。(a)短焦；(b)中焦；(c)长焦

Fig. 5 Curves of energy distribution for the optical system. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

4 冷反射现象及分析

冷反射现象是指红外探测器看到了从自身的制冷器(如杜瓦瓶)发出,经过红外光学系统某些折射面反射回的自身冷像^[10,11]。对于制冷型红外变焦系统,系统内镜片的移动导致冷反射对系统成像质量的影响无法被矫正,所以在设计此类光学系统时必须考虑冷反射的影响。通常引入两个重要参数 V_{YNI} 和 $V_{I/IBar}$ 来反映冷反射的强弱。 $V_{YNI} = y_k n_k i_k$, 能比较全面地反映冷反射的大小,其中 y_k 是近轴光线在第 k 面之入射高度, n_k 为第 k 面折射率, i_k 为边缘光线在第 k 上之入射角度。 $V_{I/IBar}$ 表征冷反射随视场变化情况,通过改变曲率来提高 $V_{I/IBar}$ 。当 V_{YNI} 与 $V_{I/IBar}$ 二者之中有一个大于 1 时,说明冷反射小,但并不是判断冷反射的完整条件。当某面的 V_{YNI} 与 $V_{I/IBar}$ 二者都小于 1 时,该面可能会成为冷反射的问题面,则需要做进一步的分析。通过冷反射分析,得知系统在短焦时冷反射最为强烈,分析结果如表 3 所示。

由表 3 可知,最有可能产生严重冷反射效应的是第 1、2、3、9、10 面。这里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。由于篇幅有限,仅给出 1、3 面的光线追迹示意图,如图 6 所示。

表 3 冷反射分析

Table 3 Analysis of cold reflection

Surface	Clipping aperture	V_{YNI}	$V_{I/IBar}$
1	15 (F)	0.0284	0.192
2	15 (R)	-0.0035	-0.014
3	15 (R)	-0.0197	-0.070
4	15 (R)	0.1072	-2.753
5	15 (R)	0.1302	-1.379
6	15 (R)	0.1228	-1.875
7	10 (R)	0.7465	2.222
8	10 (R)	-0.8595	-8.023
9	15 (F)	0.0112	0.057
10	15 (R)	-0.0425	-0.122
11	15 (R)	0.8400	-16.655
12	15 (R)	-1.3586	-2.024
13	15 (R)	-1.3823	-2.049

F: Front; R: Rear

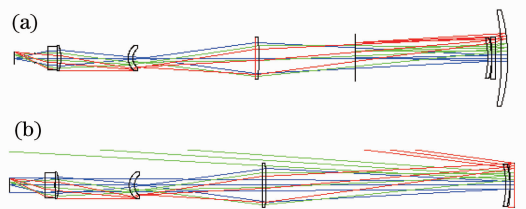


图 6 冷反射光路追迹图。(a)第 1 面；(b)第 3 面

Fig. 6 Schematic of cold reflection ray-tracing.

(a) Surface 1; (b) surface 3

经过光线追迹可得,经过第 1、2 面追迹后,光线分别聚焦到探测器前 322 mm,后 207 mm 处。第 3、9、10 面追迹后,光线反射后发散,没有聚焦到探测器上。因此,不会带来严重的冷反射。

5 结 论

基于 MWIR 320 pixel \times 256 pixel 制冷型探测器,采用机械正组补偿方式,并采用折叠光路,实现大变倍比连续变焦红外光学系统的设计。设计与分析结果表明,该系统使用 7 片透镜在 3.7~4.8 μm 波段实现了 18~360 mm 连续变焦,满足 100%冷阑匹配,冷反射可忽略不计。仅使用三个非球面就达到了良好的像质,有效降低了加工成本。该系统具有变倍比大、分辨率高、结构紧凑和变焦曲线平滑等特点,可应用于机载光电侦察设备中。

参 考 文 献

- 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
- 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
- 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
- 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
骆守俊, 何伍斌, 李文虎等. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(10): 2117~2122
- Jiang Lun, Huang Wei. Design of long focal length large zoom ratio MWIR zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(7): 1867~1871
江 伦, 黄 玮. 长焦距大变倍比中波红外变焦距系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(7): 1867~1871
- 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
- Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of 6 \times cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 1122004
张庭成, 廖志波. 6 倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(11): 1122004
- R. L. Sinclair. High magnification zoom lenses for 3~5 μm application [C]. *SPIE*, 1998, **3429**: 120~125
- Li Lin, Wang Yongtian, Zhang Liqin *et al.*. An approach on the calculation of Gaussian parameters of zoom lenses [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(4): 424~427
李 林, 王涌天, 张丽琴等. 变焦距物镜高斯光学参数的求解 [J]. 北京理工大学学报, 2003, **23**(4): 424~427
- Jin Ning. Analysis of narcissus effect in scanning infrared systems [J]. *Infrared Technology*, 1998, **20**(3): 10~14
金 宁. 对红外热成像系统中冷反射现象的分析[J]. 红外技术, 1998, **20**(3): 10~14
- Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1038~1043
郜洪云, 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

栏目编辑: 张 腾