

高变焦比中波红外连续变焦光学系统

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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对高变焦比连续变焦光学系统, 提出了一种双双组联动型变焦系统的设计方案, 完成了变焦方程的推导。采用非球面技术, 运用所推导出的变焦方程, 完成了变焦比为 40 倍、F 数为 4、工作波段为 3.7~4.8 μm 的中波红外连续变焦光学系统的设计。光学系统由八片透镜组成, 引入了四个非球面, 可以实现 10~400 mm 连续变焦, 满足冷光阑效率为 100%, 变焦曲线平滑无拐点。在不同的变焦位置, 光学系统的奈奎斯特频率处(16 lp/mm)MTF 值均大于 0.3, RMS 点斑半径均小于 22 μm 。系统具有成像质量高、镜片数量少和结构紧凑等特点。

关键词: 连续变焦; 高变焦比; 中波红外; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0663-06

MWIR zoom optical system with large zoom range

Zhou Hao^{1,2}, Liu Ying¹, Sun Qiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

Abstract: For the continuous zoom system with large zoom range, a design method named double two-group zoom system was introduced and the correspondent formulas were derived in this paper. Then a MWIR continuous zoom system with zoom range of 40 was designed. The system consisted of 8 elements with 4 aspheric surfaces, and worked in the wave band of 3.7~4.8 μm . It performed with 100% cold shield efficiency in the continuous zoom range of 10~400 mm. The F/number was 4 and the zoom paths were smooth. The MTF value in Nyquist limit (16 lp/mm) was more than 0.3 and the RMS radius of the spot diagram was less than 22 μm over the full zoom range. The system is of high image quality and compact in structure.

Key words: continuous zoom; large zoom range; MWIR; optical design

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(60977001); 吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项资金(2011CJT0004)

作者简介: 周昊(1989-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: 89zhouhao@163.com

导师简介: 孙强(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事现代红外光学仪器方面的研究。Email: sunq@ciomp.ac.cn

0 引言

红外成像技术具有抗干扰能力强、环境适应性好、隐蔽性好等优点,因此红外成像系统广泛应用于众多领域^[1-2]。不过红外定焦系统视场单一,不能实现大视场与小视场之间的转换。而红外连续变焦系统可以实现大视场搜索小视场观察的目的,并且在视场转换的过程中能够保持图像的连续性^[3-7]。因此对红外连续变焦系统,尤其是对高变焦比红外连续变焦系统的需求日益增强。高变焦比意味着系统具有更大的搜索范围和更高的观察精度,所以高变焦比红外连续变焦系统是红外系统发展的必然趋势,尤其是在军事方面的应用。目前,传统的红外连续变焦系统由于组成方式的限制,其变焦比一般不超过 30 倍且采用较多的镜片。例如 R.L.Sinclair 设计的 20 倍中波红外连续变焦系统,由 11 片透镜组成^[8]; Mark C. Sanson 和 James Cornell 设计的 30 倍中波红外连续变焦系统,由 11 片透镜组成^[9]。由此可见,当前的红外连续变焦系统具有变焦比小、镜片数量多等不足,难以适应现代军事发展需求。

针对红外连续变焦系统的发展现状,文中提出了一种适用于高变焦比连续变焦系统设计的双组联动型设计方案。据此设计了一例用于制冷型 320×240 凝视焦平面阵列探测器的中波红外连续变焦光学系统。系统采用较少的透镜就可以实现 10~400 mm 连续变焦,成像质量符合要求且结构紧凑。

1 设计原理

连续变焦光学系统应该满足两个条件:首先是焦距连续改变;其次是变焦过程中像面位置保持稳定。对于传统型连续变焦系统,这两个条件可以通过变倍组 M 和补偿组 C 的移动来实现,而前固定组 X_1 和后固定组 X_2 的位置保持不变,如图 1 所示。但是如果使用传统型变焦系统来实现高变焦比,则必然会使变焦行程增加,以及需要采用更多的透镜来消除整个变焦过程中的像差。图 2 所示为双组联动型变焦系统的设计原理。前后固定组 X_1 、 X_2 的位置固定,通过变倍组 M_1 、 M_2 和补偿组 C 的移动来实现系统焦距的连续变化并保持像面位置固定,其中变倍

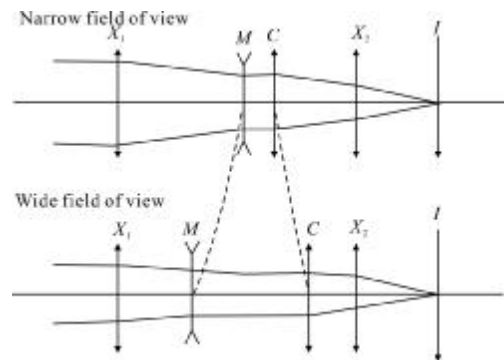


图 1 传统型变焦系统原理

Fig.1 Principle of common zoom system

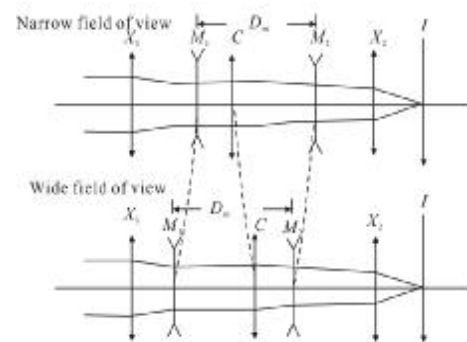


图 2 双组联动型变焦系统原理

Fig.2 Principle of two-groups moving zoom system

组 M_1 、 M_2 固定在一起做线性运动。双组联动型变焦系统在整个变焦移动过程中,成像质量良好,变倍组补偿组移动曲线平缓。不过双组联动型变焦系统要实现高变焦比,同样存在变焦行程增加的问题。这两类系统显然不适应于变焦系统轻型紧凑化的发展趋势。

运用新的思路来设计高变焦比连续变焦光学系统,在传统连续变焦光学系统的基础上再增加一个变倍组、一个补偿组,即系统由双变倍组、双补偿组构成。那么系统可以实现两级变焦,其变焦比会得到很大的提高。为了避免在变焦过程中透镜的移动过于复杂,借鉴双组联动型变焦系统的原理,令两变倍组固定在一起做线性运动、两补偿组固定在一起做线性移动。其设计思路如图 3 所示,前固定组 X_1 、后固定组 X_2 的位置固定,通过两变倍组 M_1 、 M_2 和两补偿组 C_1 、 C_2 的移动来实现系统焦距的连续变化并保持像面 I 位置固定。在变焦的过程中,令两变倍组 M_1 、 M_2 的间隔保持不变,令两补偿组 M_1 、 M_2 的间隔 D_c 保持不变。称这类系统为双双组联动型变

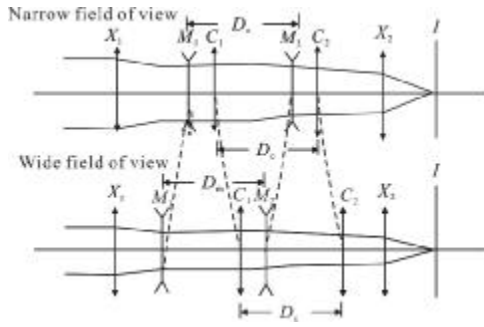


图 3 双双组联动型变焦系统原理

Fig.3 Principle of double two-groups moving zoom system

焦系统。

图 4 所示为双双组联动型变焦系统在焦距 F_s 位置处的结构。各组分的间隔分别是 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 。

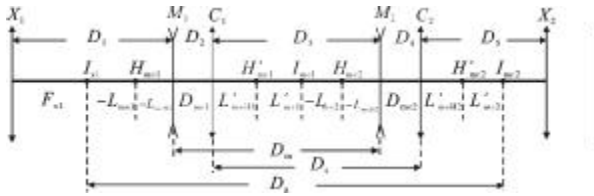


图 4 双双组联动型变焦系统的结构

Fig.4 One configuration of double two-groups zoom system

前固定组 X_1 的焦距为 F_{x1} , 前变倍组 M_1 的焦距为 F_{m1} , 前补偿组 C_1 的焦距为 F_{c1} , 后变倍组 M_2 的焦距为 F_{m2} , 后补偿组 C_2 的焦距为 F_{c2} , 后固定组 X_2 的焦距为 F_{x2} 。无穷远物体经前固定组 X_2 所成的像面与光轴交于 I_{x1} 。 I_{x1} 经前变倍补偿组合系统成像在 I_{mc1} , 前变倍补偿组合系统由前变倍组 M_1 和前补偿组 C_1 组成, 用 β_{mc1} 表示前变倍补偿组合系统成像放大倍率。 I_{mc1} 经后变倍补偿组合系统成像在 I_{mc2} , 后变倍补偿组合系统由后变倍组 M_2 和后补偿组 C_2 组成, 用 β_{mc2} 表示后变倍补偿组合系统成像放大倍率。 I_{mc2} 经后固定组 X_2 成像在像面 I 上, 用 β_2 表示后固定组成像放大倍率。系统焦距 F_s 可用下式表示:

$$F_s = F_{x1} \cdot \beta_{mc1} \cdot \beta_{mc2} \cdot \beta_2 \quad (1)$$

对于前变倍补偿组合系统, 其焦距用 F_{mc1} 表示, 其物方主平面和像方主平面的位置分别用 L'_{mcH1} 、 L_{mcH1} 表示。后变倍补偿组合系统的焦距用 F_{mc2} 表示, 其物方主平面和像方主平面的位置分别用 L_{mcH2} 、 L'_{mcH2} 表示。有如下公式^[10]:

$$\begin{cases} D_{mc1} = D_2 \\ F_{mc1} = \frac{F_{m1} \cdot F_{c1}}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}} \\ L_{mcH1} = \frac{F_{m1} \cdot D_{mc1}}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}} \\ L'_{mcH1} = \frac{-F_{c1} \cdot D_{mc1}}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_{mc2} = D_4 \\ F_{mc2} = \frac{F_{m2} \cdot F_{c2}}{F_{m2} + F_{c2} - D_{mc2}} \\ L_{mcH2} = \frac{F_{m2} \cdot D_{mc2}}{F_{m2} + F_{c2} - D_{mc2}} \\ L'_{mcH2} = \frac{-F_{c2} \cdot D_{mc2}}{F_{m2} + F_{c2} - D_{mc2}} \end{cases} \quad (3)$$

前变倍补偿组合系统成像时的物距和像距分别用 L_{mc1} 、 L'_{mc1} 表示, 后变倍补偿组合系统成像时的物距和像距分别用 L_{mc2} 、 L'_{mc2} 表示, 后固定组成像时的物距和像距分别用 L_{x2} 、 L'_{x2} 表示。根据图所示的成像关系, 可以得出以下公式:

$$\begin{cases} \beta_{mc1} = \frac{L'_{mc1}}{L_{mc1}} \\ L_{mc1} = F_{x1} - D_1 - L_{mcH1} \\ L'_{mc1} = \frac{L_{mc1} \cdot F_{mc1}}{L_{mc1} + F_{mc1}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \beta_{mc2} = \frac{L'_{mc2}}{L_{mc2}} \\ L_{mc2} = L'_{mcH1} + L'_{mc1} - D_3 - L_{mcH2} \\ L'_{mc2} = \frac{L_{mc2} \cdot F_{mc2}}{L_{mc2} + F_{mc2}} \end{cases} \quad (5)$$

用 D_m 表示两变倍组 M_1 、 M_2 的间隔, D_c 表示两补偿组 C_1 、 C_2 的间隔, D_a 表示 I_{x1} 到 I_{mc2} 的距离。有如下关系式:

$$\begin{cases} D_m = D_2 + D_3 \\ D_c = D_3 + D_4 \\ D_a = D_2 + D_3 + D_4 + L'_{mcH2} + L'_{mc2} - L_{mcH1} - L_{mc1} \end{cases} \quad (6)$$

对于该变焦系统在另一焦距 F_s^* 位置处的结构, 要求满足 $F_s^* = F_s \cdot M$, 其中 M 是系统焦距的变化倍数。系统在变焦的过程中, 前固定组 X_1 的焦距不变; 后固定组 X_2 及像面位置 I 固定, 保证了后固定组 X_2 的成像放大倍率不变。则由公式(1)可知, 新焦距位置处的两变倍补偿组合系统成像放大倍率 (带 *) 满足下式:

$$\beta_{mc1}^* \cdot \beta_{mc2}^* = \beta_{mc1} \cdot \beta_{mc2} \cdot M \quad (7)$$

系统在变焦的过程中应保持两变倍组间隔不变,两补偿组间隔不变以及像面位置固定这三个条件。则新焦距位置处系统的各项参数(带*)应该满足以下关系式:

$$\begin{cases} D_m = D_{mc1}^* + L'_{mcH1} + L'_{mc1} - L'_{mc2} - L'_{mcH2} \\ D_c = -D_{mc1}^* + D_m + D_{mc2}^* \\ D_a = -L'_{mc1} - L'_{mcH1} + D_{mc1}^* + D_c + L'_{mcH2} + L'_{mc2} \end{cases} \quad (8)$$

由公式(7)、(8)可推导出公式(9)。该公式即为双双组联动型变焦系统的变焦方程。已知变焦系统某一焦距位置处的结构,通过公式(9)就可以求出任意其他焦距位置处的结构。

$$\begin{cases} D_{mc1}^* + (1 - \beta_{mc1}^*) \cdot \frac{F_{m1} \cdot F_{c1}}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}^*} + \\ (1 - \frac{\beta_{mc1}^* \cdot \beta_{mc21} \cdot M}{\beta_{mc1}^*}) \cdot \frac{F_{m2} \cdot F_{c2}}{F_{m2} + F_{c2} + D_m - D_c - D_{mc1}^*} - \\ \frac{F_{c1} \cdot D_{mc1}^*}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}^*} \cdot \frac{F_{m2} \cdot (D_c - D_m + D_{mc1}^*)}{F_{m2} + F_{c2} + D_m - D_c - D_{mc1}^*} = D_m \\ D_{mc1}^* + (1 - \frac{1}{\beta_{mc1}^*}) \cdot \frac{F_{m1} \cdot F_{c1}}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}^*} + \\ (1 - \frac{\beta_{mc1}^* \cdot \beta_{mc21} \cdot M}{\beta_{mc1}^*}) \cdot \frac{F_{m2} \cdot F_{c2}}{F_{m2} + F_{c2} - D_m - D_c - D_{mc1}^*} - \\ \frac{F_{m1} \cdot D_{mc1}^*}{F_{m1} + F_{c1} - D_{mc1}^*} - \frac{F_{c2} \cdot (D_c - D_m + D_{mc1}^*)}{F_{m2} + F_{c2} + D_m - D_c - D_{mc1}^*} = D_a - D_c \end{cases} \quad (9)$$

2 设计实例

2.1 设计指标

采用中波红外凝视型焦平面 320×240 元制冷探测器,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

Tab.1 Characteristics of zoom system

Item	Value
Spectral band/μm	3.7-4.8
Zoom range	40
Focal length range/mm	10-400
F number	4
Image plane diagonal/mm	12

2.2 设计结果

根据所推导出的公式(9)求出双双组联动型变焦系统的理想高斯结构,然后选用合适的透镜替换就得出了系统的初始结构。对初始结构进行优化设

计,得出最终的设计结果,如图 5 所示。系统总长为 396 mm,共采用了八片透镜,引入四个非球面。前六片透镜组成变焦系统,其中第二片透镜(变倍组 1)和第四片透镜(变倍组 2)具有相同的运动轨迹,因此可以将两变倍组固定在一起移动;第三片透镜(补偿组 1)和第五片透镜(补偿组 2)具有相同的运动轨迹,同样可以将两补偿组固定在一起移动。由于采用的是制冷型探测器,所以系统需要满足 100%冷光阑效率,后两片透镜构成的二次成像系统的主要目的就是来满足这一要求。图 6 所示为该系系统变倍组、补偿组的变焦运动轨迹,变倍组行程为 56.5 mm,补偿组行程为 38.9 mm,变焦曲线平滑无拐点,这保证了系统变焦的可行性。

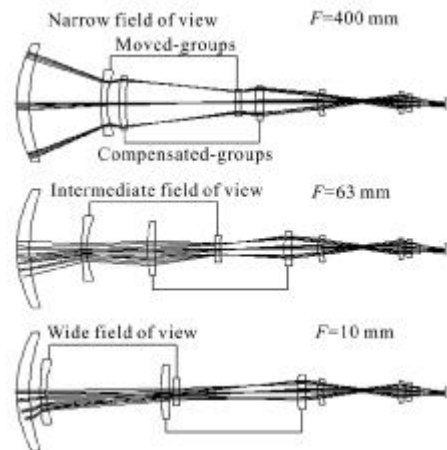


图 5 系统结构图

Fig.5 Schematic of zoom system structure

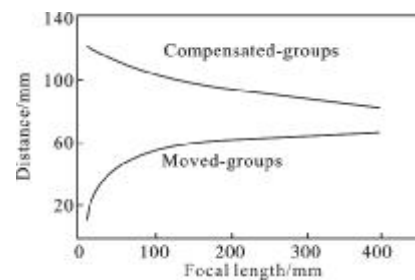


图 6 系统变焦轨迹

Fig.6 Zoom paths of zoom system

2.3 像质评价

图 7 所示为变焦系统在不同焦距位置处的调制传递函数曲线。系统在奈奎斯特频率处(16 lp/mm)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。图 8 所示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 $22\ \mu\text{m}$, 满足要求。

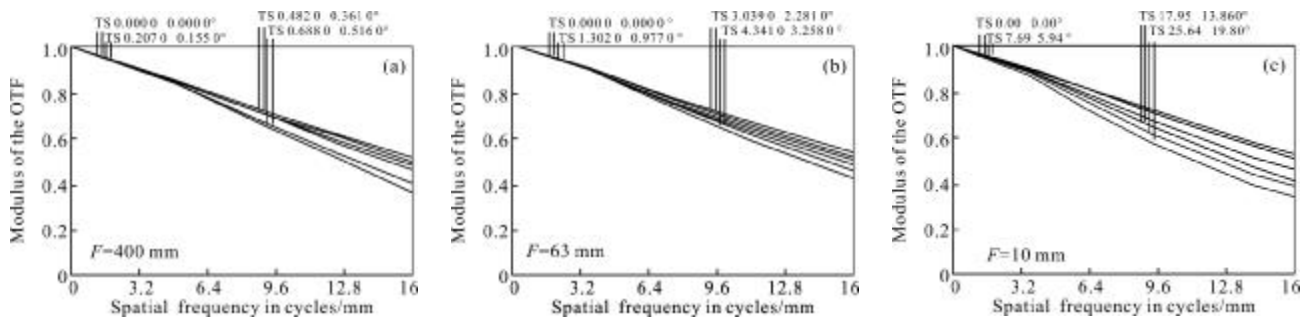


图 7 系统 MTF 图

Fig.7 MTF curves of the system

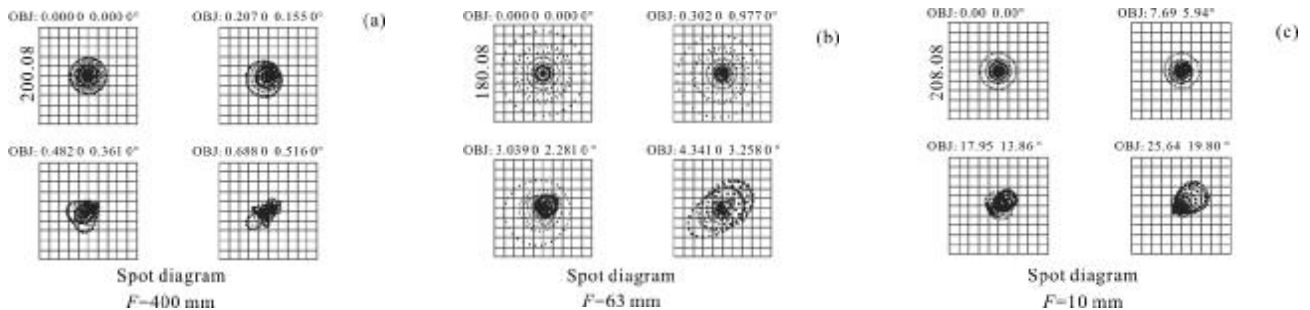


图 8 系统点列图

Fig.8 Spot diagrams of the system

3 结 论

文中提出了双双组联动型连续变焦系统的设计方案,并推导出了该类变焦系统的变焦方程。据此设计了一款用于中波制冷型 320×240 凝视焦平面阵列探测器的红外连续变焦光学系统。系统仅采用八片透镜,可以实现 40 倍的变焦比,变焦行程短且曲线平滑。系统轻型紧凑且满足冷光阑效率 100% 的要求。同时系统具有良好的成像质量,在奈奎斯特频率处 ($16\ \text{lp/mm}$) 处的调制传递函数值均大于 0.3,在全视场内的弥散斑半径的均方根值均小于 $22\ \mu\text{m}$ 。由此可见双双组联动型连续变焦系统适用于高变焦比连续变焦系统的设计,这为该类高变焦比中波红外连续变焦系统在警戒、侦查等领域的应用打下基础。

参考文献:

[1] Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou et al. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5 μm [J]. Opt Precision Eng, 2002, 10(2): 121-125. (in

Chinese)

孙强,王肇圻,李凤友,等. 红外 3.2~4.5 μm 波段折射/衍射光学系统的减热差设计 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 121-125.

[2] Meng Jianqi. Dual field zoom (6 \times) infrared imaging optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 89-92. (in Chinese)

孟剑奇. 双视场 6 倍变焦红外热成像光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 89-92.

[3] 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.

[4] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1279-1309. (in Chinese)

张良,刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1279-1309.

[5] Chen Lvji, Li Ping, Ma Lin. Compact MWIR zoom system [J].

- Infrared Technology, 2010, 32(10): 562-566. (in Chinese)
陈吕吉, 李萍, 马琳. 紧凑中波红外连续变焦光学系统[J]. 红外技术, 2010, 32(10): 562-566.
- [6] Gao Hongyun Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. Opt Precision Eng, 2007, 15(7): 1038-1043. (in Chinese)
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.
- [7] Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang, et al. Design of Infrared hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2084-2088. (in Chinese)
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.
- [8] Sinclair R L. High magnification zoom lenses for 3-5 μm applications [C]//SPIE, 1998, 3429: 11-18.
- [9] Mark C Sanson, James Cornell. MWIR continuous zoom with large zoom range[C]//SPIE, 2010, 7660: 76601X-1-76601X-12.
- [10] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)
郁道银, 谭恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

下期预览

目标高真实感红外图像生成方法

黄曦, 张建奇, 张绍泽, 吴鑫

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为满足仿真实验对高真实感目标红外图像的丰富需求, 提出了一种基于实测图像与三维数字仿真相结合的红外图像生成方法。首先通过测量获得物体表面实际辐射分布, 并以之为基础数据, 建立真实温度分布的数学反演模型, 生成目标红外纹理。然后将纹理映射到几何模型, 最终利用三维渲染技术生成高真实感红外图像。实验结果表明, 该方法仿真灵活性高, 生成的目标红外特征自然、准确, 纹理细节丰富, 图像实用性强。