

机载紧凑型中波红外相机的设计

徐新行^{1,2} 陈宁¹ 王兵¹ 高云国¹ 杨洪波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 为了实现机载光电跟瞄系统的捕获与跟踪功能, 针对机载环境狭小的空间设计了一款紧凑型中波红外相机。首先从机载平台的应用需求出发, 提出了红外相机的各项性能指标。然后, 采用二次成像与二次折转的方案对红外相机的光学系统进行了设计与优化, 并研制出一套高精度调焦平台用以光学系统的距离与温度调焦; 采用箱体式结构方案对红外相机的支撑基座进行了优化设计, 有限元分析结果表明所设计的支撑基座具有足够的结构刚度。最后, 在完成机载中波红外相机精密加工、装配与调试的基础上, 采用光电测试平台对红外相机的焦距、视场角、噪声等效温差 (NETD) 和调制传递函数 (MTF) 等参数进行了实验检测。结果显示: 相机的焦距、视场角等与理论设计较为符合, NETD 为 22 mK, 在探测器的极限空间频率处相机的 MTF 不低于 0.58, 接近衍射极限水平。因此, 所研制的机载紧凑型中波红外相机工作灵敏度高、成像质量好, 满足机载平台的应用需要。

关键词 光学设计; 机载; 红外相机; 调焦平台; 结构刚度

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0816002

Design of Compact Middle-Wave Infrared Camera Used on Airborne Platform

Xu Xinhang^{1,2} Chen Ning¹ Wang Bing¹ Gao Yunguo¹ Yang Hongbo¹

(¹ 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 In view of the small space of flying cabin, a compact middle-wave infrared camera is designed for optical-electricity tracking and pointing system used on the airborne platform. Firstly, requisite performances of infrared camera is put forward on the basis of applying requirements of airborne platform. Then, optics system including two-time imaging and double reflecting is designed and optimized. A fine focusing mechanism is developed for temperature focusing and distance emendation. A trunk supporting base is designed and its structural rigidity is analyzed by finite element method. Finally, focus, visual angle, noise equivalent temperature difference (NETD) and modulation transfer function (MTF) of infrared camera are tested by optical-electricity testing platform after finely manufacturing, assembling and adjusting. The results show that focus and visual angle agree with design parameters, the measurement NETD is 22 mK, MTF is higher than 0.58 in Nyquist frequency of CCD which approaches diffraction limit level. Therefore, the designed infrared camera with high sensitivity and good imaging quality can satisfy application requirements of airborne platform.

Key words optical design; airborne platform; infrared camera; focusing mechanism; structural rigidity

OCIS codes 220.3620; 220.4610; 220.4830; 220.4840

收稿日期: 2014-02-24; 收到修改稿日期: 2014-03-22

基金项目: 国家 863 计划(2011AA7031024G)、吉林省自然科学基金(201115123)

作者简介: 徐新行(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光精密仪器设计方面的研究。

E-mail: xxh123321xxh@163.com

导师简介: 杨洪波(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密仪器方面的研究。

E-mail: yang-hb@ciomp.ac.cn

1 引言

红外成像系统凭借成像质量好、探测精度高、抗干扰能力强和可全天时工作等突出优点,已被广泛应用于目标探测、跟踪识别和警戒搜索等领域^[1-3]。随着探测器水平的进步和红外成像技术的发展,对大口径、长焦距、高分辨力红外相机的需求越来越多。

近年来,探测器领域的前沿技术已经有了长足的进步。新型探测材料和系统封装方法、大尺寸红外焦面阵、高性能跟瞄转台以及强大的信号处理能力使得集红外成像系统、可见光电视和激光测距系统等为一体的机载轻型探测平台可以覆盖很宽的波段,广泛应用于侦察机和无人机等飞行平台^[4-6]。红外相机作为其中最重要的探测手段之一,现有两个波段最为常用,即 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中波红外和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的长波红外。美陆军在烟雾、沙尘的战场环境下更喜欢采用长波红外探测器,它可以跟踪导弹发动机排出的羽烟,帮助飞行员透过太阳光的杂波反射进行观察;而中波探测器在海面上具有较强的工作能力,它可在潮湿和高温环境下,以很窄的视场进行远距离的目标识别^[7]。

在机载光电跟瞄系统中,红外相机是实现目标捕获与跟踪的核心设备之一,其性能的优劣将直接影响跟瞄系统的捕获能力与跟踪精度。由于机载平台的工作环境较为复杂,因此相机的成像质量除了受光学设计的制约外,还受温度、杂光、振动、冲击等干扰因素的影响^[8-10]。另一方面,受机载平台狭小空间的限制,系统对相机的体积也提出了非常苛刻的要求。因此,本文针对机载平台的应用环境和使用要求,开展高成像质量、高环境适应性红外相机的研究。

2 机载中波红外相机的设计要求

红外相机的主要性能指标包括:工作波段、焦距、相对孔径、视场角、像元尺寸和噪声等效温差(NETD)等^[11-12]。其中,工作波段是指探测器所能响应的波长范围,它决定了光学系统材料及膜系的选择;焦距是指光学镜片中心到光线能清晰聚焦那一点的距离,它反映了光学系统聚集光线的能力;相对孔径是指光学系统的有效孔径与焦距的比值,用于评价系统的实际通光能力,相对孔径越大,通光能力越强;视场角是指光学系统能够观测到的最大范围的夹角,视场角越大,视野越宽;像元尺寸是指探测器感光芯片上单个像元的大小,相同面积的感光芯片上像元尺寸越小,所获得的像素越高,成像质量

越好;NETD是指信噪比等于1时目标与背景的温差,是评价红外成像系统灵敏度的重要指标,NETD值越低,系统越灵敏。根据机载平台的应用需求,表1列出了中波红外相机的主要性能指标。

表1 红外相机要求的主要性能指标
Table 1 Main performances of infrared camera

Item	Value
Spectral band / μm	3.7~4.8
Focus / mm	160
Relative aperture	1/2
Field angle / ($^\circ$)	2.2
Pixel size / μm	15×15
NETD@22 $^\circ\text{C}$ / mK	≤ 30

3 机载中波红外相机的设计

3.1 紧凑型光学系统的设计与优化

尽管反射式光学系统具有消色差、镜筒短、成本低等优点,但是存在中心挡光现象,且轴外彗差严重,不适合口径较小的系统使用;而折反式光学系统具有反射式系统的低色差、短镜筒以及折射式系统的高清晰、长焦距等优点,但也存在中心遮光的光线损失问题,且校正镜制作困难。因此,本相机选择了折射式光学系统。

3.1.1 二次成像光学系统的设计

研究选用制冷型红外探测器,为了获得高质量的红外图像,要求系统尽可能实现100%冷光阑效率,即将探测器的冷光阑作为系统的孔径光阑。若采用一次成像方案,由于轴外光束对通光孔径的影响,造成镜头口径比入瞳大很多;如果把孔径光阑放在其他位置,系统将无法实现100%的冷光阑效率,导致进入镜头的杂散光增多,成像质量下降。若采用二次成像方案,则更容易控制光学元件的径向尺寸,同时保持探测器100%的冷光阑效率^[13-15]。因此采用二次成像的光学系统方案。此外,由于系统的焦距较长,相对孔径较大,而体积要求却十分苛刻,若全部采用球面镜,势必造成相机的光学元件过多,系统透过率下降。非球面元件可以提高设计自由度,减少系统光学元件的数量,目前已在红外光学系统中得到广泛应用^[16]。根据机载中波红外相机的设计要求,初步设计所得的光学系统如图1所示。由图可知:系统主要由6块位于同一轴线的透镜组成,其中前2片组成物镜组,后4片组成二次成像组。物镜组和二次成像组中透镜均通过高折射率、低色散系数的硅材料和高色散系数的锗材料搭配使用,以校正红外光学系统的成像色差。在透镜类型

方面:考虑到多片非球面系统的加工难度和成本较大,透镜1~透镜5设计为球面镜,透镜6设计为非球面镜,在压缩镜片数量的同时,进一步修正系统的像差。

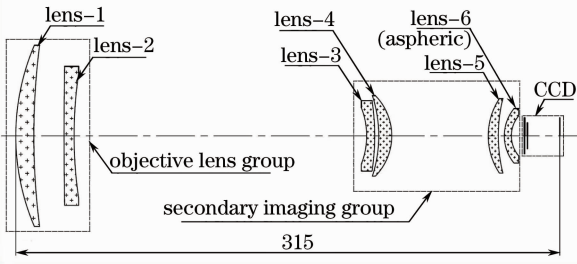


图1 红外相机的同轴式光学系统

Fig.1 Coaxial optics system of infrared camera

3.1.2 二次折转光学系统的优化

由于机载平台的空间有限,为尽可能压缩光学系统的体积,控制相机的轴向尺寸,采用两片 45° 放置的平面反射镜对光学系统进行二次折转,使得所设计的光学系统既能满足指标要求,又能适应苛刻的体积需求。图2为机载中波红外相机最终的光学设计结果。系统的调制传递函数(MTF)曲线和点列图如图3、图4所示,由图可知:光学系统在各视场处的传递函数均接近衍射极限水平,且弥散斑极小。因此,该光学系统具有良好的成像质量,可满足机载平台的应用需求。

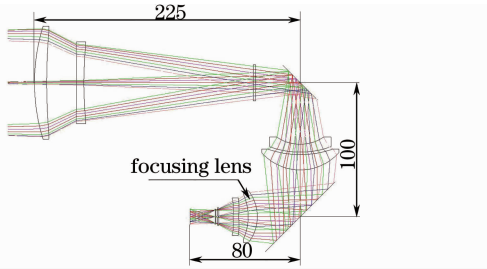


图2 红外相机的二次折转光学系统

Fig.2 Double reflecting optical system of infrared camera

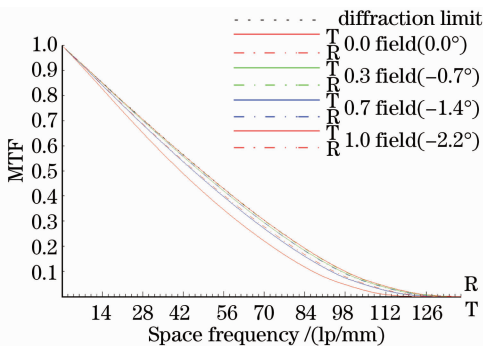


图3 红外相机光学系统的MTF曲线

Fig.3 MTF curves of optical system for infrared camera

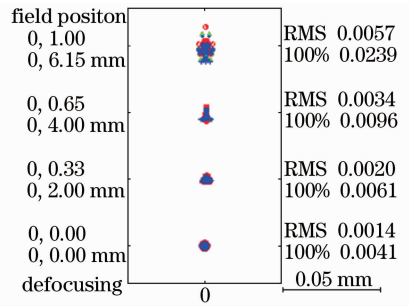


图4 红外相机光学系统的点列图

Fig.4 Spot diagram of optics system for infrared camera

3.2 高精度调焦平台的设计与检测

由几何光学的成像原理可知,对于焦距一定的光学系统,物距和像距之间存在如下关系

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

式中 f 为光学系统的焦距, l 为物到镜头前主面的距离,即物距, l' 为像到镜头后主面的距离,即像距。由(1)式可知,当相机观测目标的距离发生变化时,将会引起像距的改变从而产生离焦现象。此外,由于机载平台面临的工作环境温度变化范围较宽($-40^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$),光学元件及机械结构件将随工作环境温度的变化而热胀冷缩,进而使光学镜头的结构参数发生改变;另一方面,透射红外波段光学材料(如硅、锗等)的折射率热敏感度较普通光学玻璃高出1~2数量级,因此,工作环境温度的改变将使系统的最佳成像焦面产生严重的漂移,进而对成像质量产生恶劣影响^[17-18]。

因此,为了保证红外相机在苛刻的温度环境下正常工作,需要对光学系统进行距离和温度的调焦补偿。根据光学系统的设计结果,优选透镜5作为系统的调焦元件。由于距离调焦能够通过(1)式进行计算,这里重点研究系统的温度调焦。表2列出

表2 不同温度条件下调焦元件的调整量

Table 2 Focusing distance of lens at different temperatures

Temperature $T / ^\circ\text{C}$	Focusing distance $\Delta S / \text{mm}$
-50	-0.51
-40	-0.44
-30	-0.37
-20	-0.29
-10	-0.22
0	-0.15
10	-0.07
20	0
30	0.07
40	0.16
50	0.23
60	0.32

了红外相机观测无穷远目标时调焦元件的调整量与环境温度的关系,其中调整量为负表示逆着光线传播的方向移动。

由表 2 中数据,通过最小二乘法计算可得透镜 5 的调整量 ΔS 与环境温度 T 存在如下关系:

$$\Delta S = 5 \times 10^{-6} T^2 + 0.007T + 0.148. \quad (2)$$

3.2.1 调焦平台的设计

为了实现透镜 5 位置的实时动态调整,设计了高精度调焦平台带动透镜 5 沿轴线方向前后移动,全行程为: $-2.0 \sim 1.2$ mm,以补偿系统因距离和温度变化引起的离焦量。高精度微调平台的结构组成及实物照片如图 5 所示,该平台主要由平台基座、直线式步进电机(步距角为 0.9° 、步长为 0.006 mm)、移动平台、直线导轨和测位传感器等组成。温度调焦的原理是:当红外相机的工作温度发生变化时,首先由温度传感器测得相机内部的温度值,通过(2)式计算得调焦平台的精确调整量;再由测位传感器测得移动平台的实际位置,通过与平台零位、平台调整量对比后,判断调焦平台的移动方向与移动量;最后,在驱动电机的推动、直线导轨的导引及测位传感器的监测下,移动平台带着透镜 5 沿光轴方向移动至理论位置。

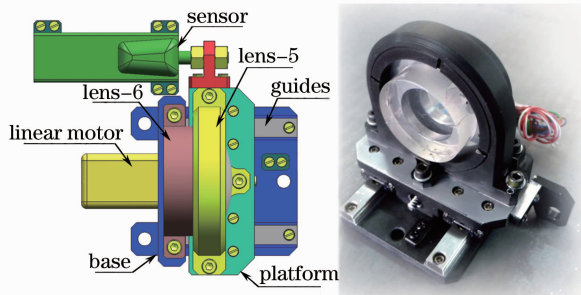


图 5 高精度调焦平台的组成结构图及实物照片
Fig. 5 Components and photograph of high precision focusing mechanism

3.2.2 调焦平台的检测

在完成调焦平台的精密加工、装调后,采用 $0.2''$ 平行光管对平台的全行程精度进行了检测,检测结果如图 6 所示。由图可知:调焦平台的全行程误差方位不超过 $10''$,俯仰不超过 $6''$,中心位置偏差不超过 $0.104 \mu\text{m}$ 。采用电感仪对调焦平台的调焦量分辨率进行了测试,实际测得平台的调焦量分辨力约为 $6.4 \mu\text{m}$ 。综合以上检测结果可知:调焦平台能够实现光学设计对透镜 5 调焦精度的要求。

3.3 高刚度支撑基座的设计与分析

红外相机成像质量的好坏,不仅与光学设计有

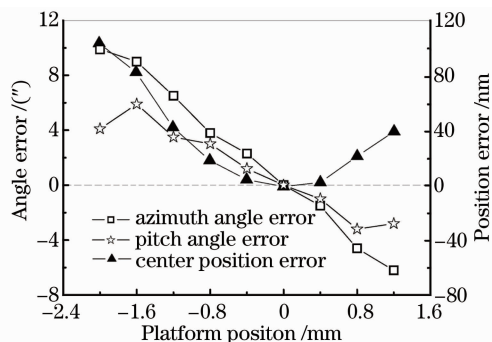


图 6 高精度调焦平台的检测结果

Fig. 6 Testing result of high precision focusing mechanism (光学系统的传递函数越接近衍射极限水平,成像质量越优),而且受支撑基座的结构稳定性和可靠性影响。支撑基座作为光学系统所有镜组的装调基准与安装平台,如果结构刚度不足,在机载平台振动、冲击等不稳定因素的干扰下,光学元件的空气间隔与同轴度将发生随机变化,进而对光学成像质量造成影响。另外,受机载环境狭小安装空间和有限负载能力的影响,为了压缩体积,最大程度地减轻光电跟瞄系统的总体重量,该相机最大的技术特点之一就是:相机的支撑基座直接作为跟瞄转台的内框架使用。因此,为了保证红外相机清晰的成像质量和光电跟瞄设备高的轴系精度,相机的支撑基座必须具有足够的结构刚度。

3.3.1 支撑基座的优化设计

选用箱体半封闭式结构对支撑基座进行设计,并运用三维设计软件 UG 对基座进行轻量化。优化设计的支撑基座外形结构如图 7 所示,该箱体式基座的四周采用“X”形筋进行加强,底板背部选用开槽的方式进行减重,最终获得支撑基座的轻量化率达 50% 以上。

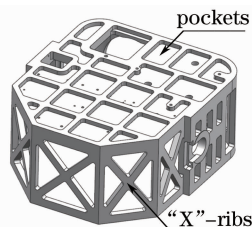


图 7 支撑基座的外形结构图

Fig. 7 Structure of trunk supporting base

3.3.2 支撑基座的刚度分析

在完成基座结构的优化设计后,采用有限元分析软件 MSC. Patran 对设计结果进行仿真计算,以确保支撑基座具有足够的刚度。结构件的刚度包括静刚度和动刚度两种:静载荷下抵抗变形的能力称

为静刚度,动载荷下抵抗变形的能力称为动刚度。静刚度一般用结构件在静载荷作用下的变形量来衡量,动刚度则用结构件的谐振频率来衡量。因此,在有限元分析过程中,分别对支撑基座的静态变形量和模态进行了计算,进而对支撑基座的结构刚度做出评价。

图 8(a)为箱体式支撑基座的有限元网格划分结果。为了保证计算精度,该模型共包括 33533 个节点,16814 个元素。在进行静态变形量的计算时,

将支撑基座的轴孔四周固定,并对安装基座整体施加重力场($g=9.8 \text{ m/s}^2$)、对基座底板上表面施加压力载荷($P=2040 \text{ Pa}$)等边界条件。图 8(b)为支撑基座最大变形量的分析结果。由图可知:箱体式支撑基座的最大变形量为 $6.34 \mu\text{m}$,低于光学设计允许的最大偏差值;而且,该最大变形量出现在底板的几何中心附近,此处并无光学元件,因此对光学系统的影响进一步减小。

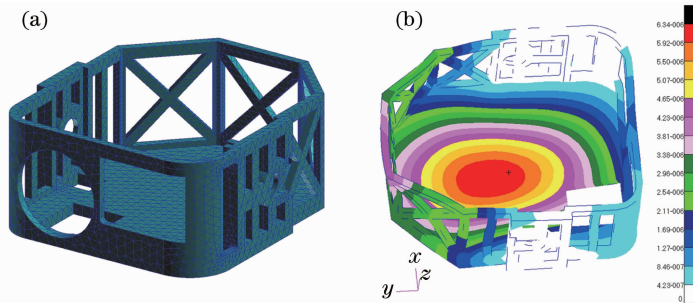


图 8 支撑基座的(a)有限元模型及(b)变形分布云图

Fig. 8 (a) Finite element model and (b) deformation distribution of supporting base

图 9 为支撑基座的模态分析结果。如图所示:箱体式支撑基座的 1 阶模态为 533.09 Hz,2 阶模态

为 673.41 Hz,因此可知所设计的箱体式支撑基座具有较高的动态结构刚度。

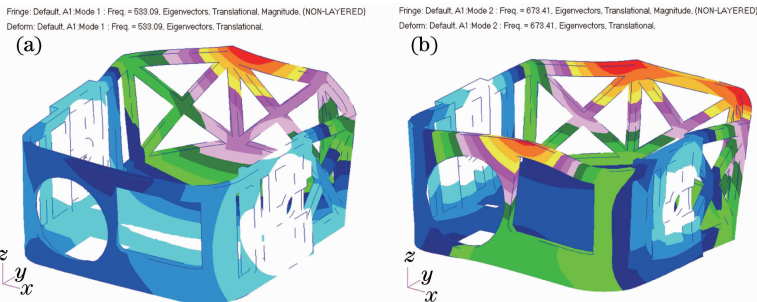


图 9 支撑基座的模态分析结果。(a) 1 阶模态; (b) 2 阶模态

Fig. 9 Mode analysis results of supporting base. (a) First order mode; (b) second order mode

4 机载中波红外相机的实验检测

在室温条件下完成光学镜头的装调后,针对无穷远目标进行了中波红外探测器的精确安装,即实现探测器的成像靶面与镜头焦面的重合。最后,采用中长波光电测试平台对中波红外相机的焦距、视场角、NETD、MTF 等指标进行了检测。检测装置如图 10 所示,主要由离轴平行光管、红外目标发生器、黑体、主控计算机、显示器和气浮平台等组成。经检测,该红外相机的焦距约为 159.3 mm、视场角为 2.3° (与理论设计较为一致),NETD 为 22 mK ($\leq 30 \text{ mK}$),在探测器的空间极限频率 33 lp/mm 处的 MTF 不低于 0.58(接近衍射极限水平),满足

中波红外相机的设计指标和实际应用需要。

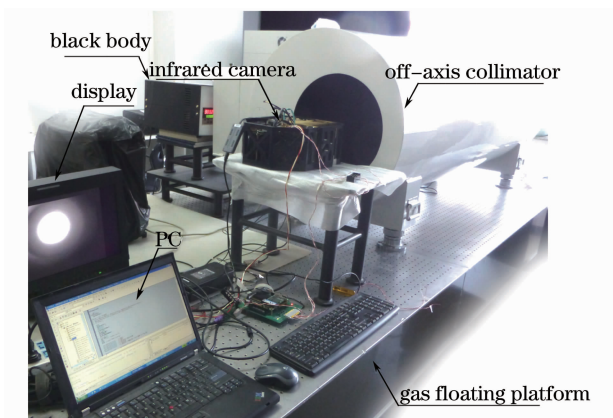


图 10 中波红外相机的实验检测

Fig. 10 Testing experiment of middle-wave infrared camera

5 结 论

红外相机作为光电跟瞄系统中实现目标捕获与跟踪必不可少的设备之一,相比可见光成像系统而言,不仅可以实现全天时工作,而且环境适应性更强,因此在目标探测、跟踪识别和警戒搜索等领域得到广泛应用,近年来一直是国内外研究的热点。从机载平台的应用需求出发,提出了中波红外相机的各项性能指标,并据此展开了紧凑型光学系统、高精度调焦平台和高刚度支撑基座的详细设计。在完成机载中波红外相机的精密加工、装配、调试后,采用中长波光电测试平台对红外相机的焦距、视场角、NETD和MTF等指标进行了实验检测。结果表明,所研制的机载紧凑型中波红外相机的工作灵敏度高、成像质量好,满足机载平台的应用需要。

参 考 文 献

- Li Fudong. Status and development of airborneIRST systems [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 409-412.
李富栋. 机载红外搜索跟踪系统的现状与发展[J]. *激光与红外*, 2008, 38(5): 409-412.
- S Fonti, S Solazzo, A Blanco, *et al.*. An infrared zoom for space applications[J]. *Planetary and Space Science*, 2000, 48(5): 523-528.
- Zhao Kun, Li Shenghui. Optical design of dual aperture infrared zoom optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2889-2893.
赵 坤, 李升辉. 双孔径红外变焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2889-2893.
- Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 266-273.
张晓龙, 刘 英, 孙 强, 等. 消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 266-273.
- Li Jiangyong, Wang Cheng. New thoughts on the development of airborne infrared detection system[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 794-798.
李江勇, 王 诚. 机载红外探测系统的发展新思路[J]. *激光与红外*, 2013, 43(7): 794-798.
- Fan Dapeng, Zhou Yuan, Lu Yafei, *et al.*. Overview of beam steering technology based on rotational double prisms [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 136-150.
范大鹏, 周 远, 鲁亚飞, 等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 136-150.
- Zhang Liang. Optical design for middle infrared zoom system[J]. *Journal of 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.
- Lü Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2154-2160.
吕世良, 刘金国, 贾 平, 等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 2154-2160.
- Zhang Lübo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.*. Optical system design of sensor for space rendezvous and clocking[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1216003.
张吕博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 空间交会对接探测器光学系统设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1216003.
- 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.
- Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316003.
- 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.
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.
- Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, *et al.*. Error analysis for focusing mechanism of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1349-1356.
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间相机调焦机构误差分析[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1349-1356.
- Ge Jingjing, Lin Zhaorong, Zhu Dakai. Design of mid-wave infrared continuous zoom system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 728-732.
葛婧菁, 林招荣, 朱大凯. 机载轻小型中波红外连续变焦系统设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(5): 728-732.
- Li Bo. Application and development trend of infrared stealth technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 818-823.
李 波. 红外隐身技术的应用及发展趋势[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 818-823.
- K Grealish, T Kacir, B Backer, *et al.*. An advanced infrared thermal imaging module for military and commercial applications [C]. *SPIE*, 2005, 5796: 186-192.
- M Subbarao, J K Tyan. The optimal focus measure for passive auto-focusing and depth-from-focus[J]. *SPIE*, 1995, 2589: 89-99.
- Shao Mingdong, Guo Jiang, Zhu Lei, *et al.*. Effects of focusing method on principal point of aerospace mapping camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 773-779.
邵明东, 郭 疆, 朱 磊, 等. 调焦方式对测绘相机主点位置的影响[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 773-779.

栏目编辑: 韩 峰