

· 光学设计 ·

中长波共孔径光学系统设计

程伟宁

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要:根据多波段探测的技术要求, 设计了中长波共孔径RC光学系统, 通过二次成像方式实现了探测器件冷光阑匹配, 减小了内部杂散辐射、系统体积质量。共孔径系统的焦距为400 mm, 在中波探测器截止频率33 lp/mm时MTF为0.45, 长波探测器截止频率20 lp/mm时MTF为0.4, 系统性能良好。

关键词:红外; 双波段; 光阑; 共孔径; 截止频率

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0001-03

Design of MIR and LIR Wave Optical System with Common Aperture

CHENG Wei-ning

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on the requirements of double-band detection MIR and LIR wave RC optical system with common aperture is designed. The cold stop match of the detector is achieved to reduce inner stray radiation, system volume and weight with secondary imaging mode. The focal length of the common aperture system is 400 mm. Modulated transfer function (MTF) is 0.45 at 33 lp/mm middle wave IR detector cut-off frequencies. MTF is 0.4 at 20 lp/mm long wave IR detector cut-off frequencies. The system has good performance.

Key words: infrared; dual band; stop; common aperture; cut-off frequency

在现代的军事应用中, 红外搜索跟踪设备得到了大量应用, 但是由于使用的区域气候不同、外界环境温度的改变、目标的伪装等原因, 单一波段的探测系统获取的信息不足, 使探测系统探测不到目标或者探测准确度下降, 导致设备无法在复杂背景下探测识别出目标^[1-2]。

因此根据目标和背景的辐射和反射特性, 对目标进行多波段红外探测比较、复合图像, 成为红外光学领域的热点。利用红外波段不同波长范围的光谱, 可以有效剔除目标的伪装信息, 提高目标的探测识别能力、识别速率, 并降低系统的虚警率^[3-4]。

设计中为了减小杂散光、前端光学系统口径, 采用中继镜组二次成像的方式, 将系统出瞳与探测器相匹配, 同时与场镜共同对前端反射式系统轴外

像差进行校正, 满足对系统的视场要求; 通过分配光学系统各个组分指标, 采用分段设计、组合优化的方法, 设计了一共用前组的采用RC折反式共孔径成像系统^[5-6], 最终设计的系统口径为205 mm, 总长为300 mm, 遮拦比为1/3, 结构紧凑、质量轻, 系统性能接近衍射限, 可实现中、长波双波段复合探测。

1 光学系统主要参数

中波光学系统焦距 $f=400$ mm, 全视场 1.77° , 相对孔径 $F\#=1/2$, 两个波段均采用制冷型探测器, 中波红外工作波长 $3\sim 5\ \mu\text{m}$, 分辨率为 640×512 , 像元大小为 $15\ \mu\text{m}$; 长波光学系统焦距 $f=400$ mm, 全视场 1.72° , 相对孔径 $F\#=1/2.24$, 工作波长为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 分

辨率为384×288,像元大小为25 μm。

2 光学系统设计

2.1 系统结构形式

为了提高红外系统探测距离,需要采用长焦距大口径光学系统。当采用透射式系统时,系统受红外材料影响较大,而且系统焦距长,二级光谱严重不易校正。因此,大口径红外设备中一般使用反射式光学系统。由于离轴反射式系统加工检测、装校难度大^[7],一般采用共轴系统,通过后续折射镜组校正像差、扩大同轴系统视场^[8]。

2.2 系统设计

该共孔径系统在中长波波段均使用制冷型探测器,为了抑制杂散热辐射,实现100%的冷光阑效率,通过中继镜组实现光学系统的出瞳与探测器冷阑重合。

(1)前组共孔径系统设计

前组共孔径系统采用RC反射式结构形式,系统焦距 f 、次镜放大率 β 、遮拦比 α 、和后截距 Δ 符合以式(1)关系^[9-10]

$$\begin{aligned} \alpha &= (f + \Delta) \cdot \beta / [\beta \cdot (\beta - 1) \cdot f_1] \\ \beta &= f / f_1 \end{aligned} \quad (1)$$

确定了 α 、 β 值后,主次镜的顶点曲率半径 r_1 、 r_2 及间隔 d 可由式(2)确定

$$\begin{aligned} r_1 &= 2 \times f / \beta \\ r_2 &= \alpha \beta r_1 / (\beta + 1) \\ d &= f(1 - \alpha) / \beta \end{aligned} \quad (2)$$

由初级像差理论可知,系统的单色像差可由式(3)表示

$$\begin{aligned} \text{球差 } s_1 &= \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta-1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta^3}{4} (1 - e_1^2) \\ \text{慧差 } s_n &= \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta} e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} e_2^2 \right] - \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

RC系统可实现消球差、慧差,此时主次镜的偏心率由式(3)计算得出

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}$$

$$e_2^2 = \frac{2\beta}{1-\alpha} + \frac{(1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \quad (4)$$

由此设计的前组结构如图1所示。为了安装分束片,需要将系统焦点移出主镜,考虑到主镜支撑结构、分束片固定结构,后焦点的移到主镜后。

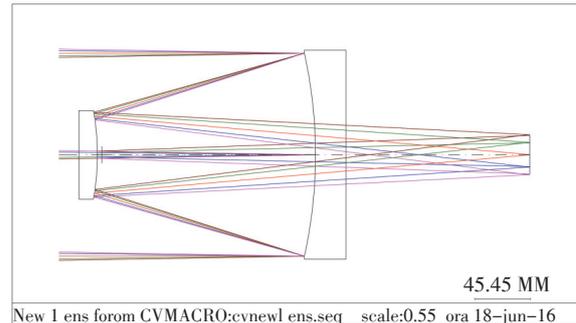


图1 前镜组光路图

由于同轴反射式系统轴外像差较大,只能应用与小视场,为了增大系统的视场,需要校正场曲、像散等像差,因此在系统中加入场镜,分别在中长波波段进行了校正,如图2所示。

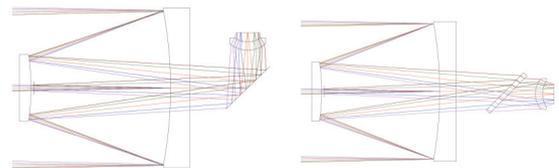


图2 前镜组分光光路

(2)中继镜组设计

根据系统中应用的探测器的使用要求,光学系统的出瞳只能设置在探测器的冷阑位置。前组系统的焦距为500 mm,中继镜组的放大率为0.8,实现前组像高与探测器靶面的匹配,同时减小了前组镜头口径。

中波波段系统在校正色差时,采用硅、锗、硒化锌三种材料降低了系统对温度的敏感性,实现中波波段的无热化设计^[11]。中波中继镜组如图3所示。

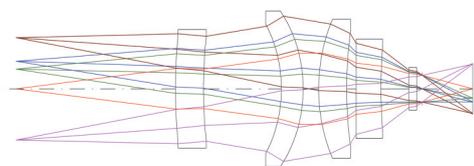


图3 中波中继镜组

长波波段系统采用锗、硒化锌两种材料,同时在光路中加入非球面,减小镜片数量。长波中继镜组如图4所示。

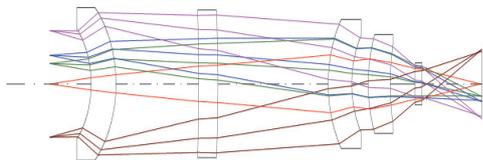


图4 长波中继镜组

3 系统性能

完成各个镜组设计后,在光学设计软件中利用多重结构建立中长波共孔径模型,对整个系统进行整体优化。

由于分束片设计在会聚光路中,其对长波透射、中波反射,使得长波光路经过分束片不仅发生位置偏移,同时带来了球差、色差、像散等像差,需要在后续光路中进行补偿。在整个系统优化时将场镜、中继镜组前两片透镜半径作为优化变量,实现前后组对接。

为了减小系统的径向尺寸,对中波光路进行折转,使两个光路的探测器安装方向一致,最终得到的光路如图5所示。系统三维图如图6所示。

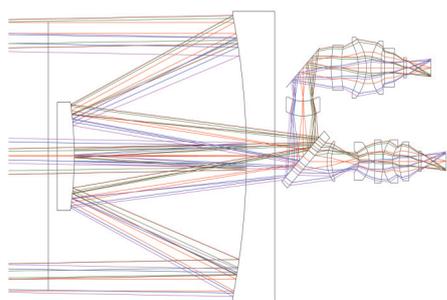


图5 系统组合光路

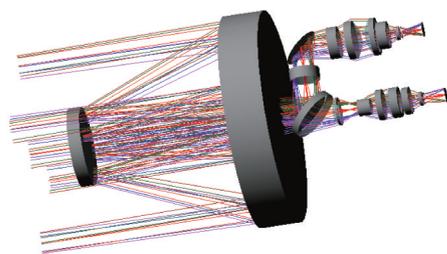


图6 系统三维图

中波探测器的截止频率为33 lp/mm,在全视场范围内光学传递函数接近50%;长波探测器的截止频率为20 lp/mm,在全视场范围内光学传递函数接近40%;中波传递函数如图7所示。长波传递函数如图8所示。

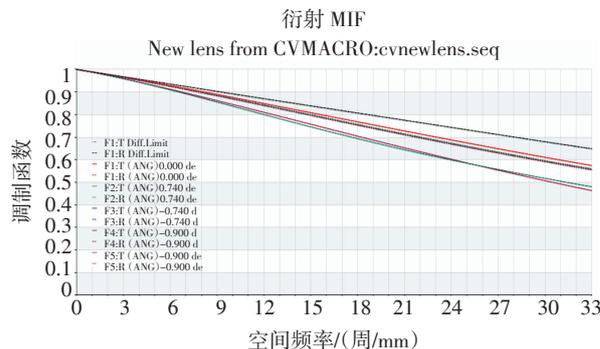


图7 中波传递函数

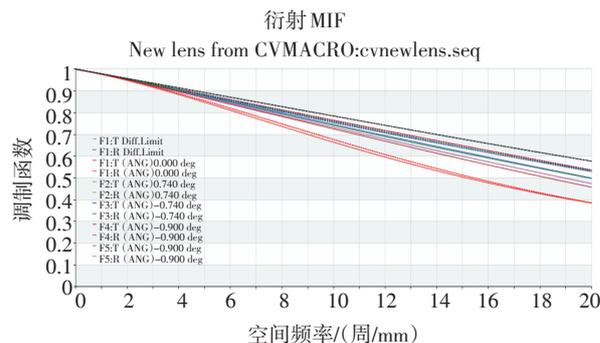


图8 长波传递函数

光学系统弥散斑如图9所示。其均方值半径在13 μm左右,接近衍射极限。

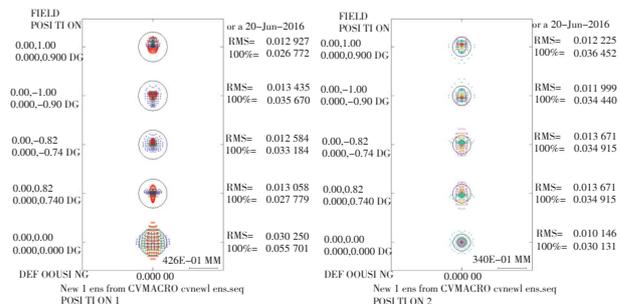


图9 光学系统弥散斑

4 结论

介绍了中长波红外共孔径系统在现代设备中的发展应用,利用RC反射式系统实现了中长波共

(下转第8页)

由表4可知,由于加工装调误差引起的下降后的MTF传函值最小为0.347 119 64,满足设计指标中MTF传函大于0.3的要求。

3 结论

设计了一种应用于低空的小型无人机物镜,首先根据客户提出的要求,对小型无人机电物镜的指标参数进行了计算,从而得到物镜的光学设计指标,然后依据指标确定了光学系统的结构型式,在设计物镜的同时兼顾了加工、装调的公差,最后根据厂家的加工、装调实际能力对物镜设计结果进行了公差分析,公差分析结果表明很好的满足了设计指标要求。

参考文献

- [1] IBRAHIM A W N, PANG W C, GERALD S G L, et al. Moving objects detection and tracking framework for UAV-based surveillance[C]//2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, Singapore, 2010:456-461.
- [2] CHAO H Y, AUSTIN M J, HAN Y D, et al. AggieAir: To-

wards low-cost cooperative multispectral remote sensing using small unmanned aircraft systems [M]. Advances in geoscience and remote sensing, 2009: 463-490.

- [3] YI L, JUHA H, ANTONI J. Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 426-430.
- [4] 刘仲宇,张涛.超小型无人机相机系统关键技术研究[J].光电工程,2013,40(4):83-84.
- [5] Muller K. Fast and accurate three-dimensional reconstruction from cone-beam projection data using algebraic methods[D]. The Ohio State University, 1998: 32-43.
- [6] ZHOU Hua-peng, CHEN Wei-jian, TANG Shao-fan. Optical system design for lens with relative aperture of 1:1[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 55-57.
- [7] YANG Li-hua, FAN Xue-wu, ZOU Gang-yi. Design of large-aperture camera lens working in wide spectral range[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 925-928.
- [8] Li Yu-yao, Tang Yong, Lin Zhao-heng, et al. Design of apochromatism objective lens aerial camera based on large frame array CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3183-3185.
- [9] 张远健,唐勇.光学系统设计中降低公差灵敏度的方法[J].光电工程,2011,38(10):128-133.

(上接第3页)

孔径设计,并通过分束片将中、长波分离;因系统视场较大,在光路中设置了场镜校正了RC系统中的剩余像差;分别设计了中、长波中继镜组,减小杂散辐射,同时对分束片带来的像差进行了校正;最终对组合系统性能进行了整体设计,减少了镜片数量,系统性能良好。

参考文献

- [1] 郭晟男,付跃刚,刘智颖,等.红外搜索跟踪系统中的双波段共孔径光学设计[J].光电技术应用,2013,28(6):35-39.
- [2] 张兴德,李荣刚,刘琳,等.红外双波段成像系统的研究与发展[J].激光与红外,2010,40(8):801-804.
- [3] 刘玉超,张科.基于双色红外探测比较研究[J].计算机仿真,2010,27(2):55-58.

- [4] 郭玮芳,潘玉田,张雷.双波段红外图像融合算法研究[J].弹箭与制导学报,2009,29(4):198-200.
- [5] 蔡占恩,刘朝晖,黄静,等.大视场大相对孔径双波段夜视R-C系统设计[J].应用光学,2010,31(4):525-528.
- [6] 樊学武,马臻.红外双波段卡塞格林光学系统设计[J].光子学报,2003,32(4):463-465.
- [7] 孙赤全,赵侃,孟军合.共孔径红外双色离轴全反射系统[J].红外与激光工程,2012,41(3):729-733.
- [8] 吴凡,王柏林,唐树威.周视扫描成像红外双波段光学系统设计[J].光电技术应用,2010,25(6):27-30.
- [9] 邵帅.多波段共孔径红外系统光机热一体化设计[J].仪器仪表学报,2013,34(2):387-393.
- [10] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [11] 杨新军,王肇圻,母国光,等.红外双波段消热差系统设计[J].光子·激光,2004,15(4):385-389.