

doi:10.3788/gzxb20124106.0638

# 双视场/双色红外消热差光学系统设计

贾永丹,付跃刚,刘智颖,王志坚

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:** 双色红外光学系统能够同时获取长波红外与中波红外的波段信息,有利于目标的搜索和识别. 本文针对红外热像仪的需求,对双视场/双色红外光学系统进行了设计. 实现了  $4.4\sim 5.4\mu\text{m}/7.8\sim 8.8\mu\text{m}$  双波段同时清晰成像,在  $F\#$  为 2.68 情况下,通过切换变倍组完成  $9^\circ\times 6.75^\circ/3^\circ\times 2.25^\circ$  双视场转换. 通过红外材料与光焦度的合理分配实现了折射式被动消热差设计. 设计结果表明,系统在  $-40^\circ\text{C}\sim +60^\circ\text{C}$  工作温度下,像面稳定、像质优良,能够满足红外热像仪的使用需求.

**关键词:** 光学设计; 双视场; 双色红外; 消热差光学系统

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)06-0638-4

## 0 引言

两档变焦红外光学系统与连续变焦红外光学系统相比更具有简洁性和实用性. 双色红外光学系统能够同时获取长波红外(Long-Wave Infrared, LWIR)与中波红外(Mid-Wave Infrared, MWIR)波段的目标信息,有利于目标的搜索和识别. 在现代军事战争中的侦查与反侦查领域具有不可替代的特性<sup>[1]</sup>. 双色红外探测器的出现,使得对于不同类型目标、不同环境条件甚至不同识别任务在同一光学系统中实现成为可能<sup>[2-4]</sup>. 目前国内现有光学系统大多停留于未消热的双视场/双色红外成像阶段,国外虽有文献显示已制作出两波段切换成像的军用光学系统,但也未提及环境适应性.

本文采用法国 Sofradir 公司研制的面阵规格为  $384\times 288$ ,像元间距为  $25\mu\text{m}$  的双色量子阱红外探测器作为接收器,设计出了一款双视场/双色红外被动消热差光学系统. 工作波段为  $4.4\sim 5.4\mu\text{m}/7.8\sim 8.8\mu\text{m}$ ,可实现  $9^\circ\times 6.75^\circ/3^\circ\times 2.25^\circ$  双视场切换, $F\#$  为 2.68. 系统采用宽视场变倍组与窄视场变倍组相互切换来实现视场转换;除两个面为非球面外,其他均为球面;并且具有结构简单、体积较小、像质优良和环境适应性好等优点.

## 1 设计思路

虽然双  $F\#$  光学系统有利于降低设计难度,但在双视场<sup>[5-6]</sup>转换过程中光学系统  $F\#$  发生变化. 若要

保证冷屏距不变必须改变冷光阑口径,否则整机系统冷光阑效率便会降低,如图 1. 本文考虑应用现有固定光阑探测器,在保证冷光阑效率的同时,避开设计可变冷光阑. 即设计过程中不改变红外探测器冷光阑的任何参量,而是采用光学系统的焦距与入瞳直径同倍改变的方法,保证光学系统在视场切换过程中  $F\#$  不变,且始终与冷光阑  $F\#$  严格匹配. 此种方法虽避开了对可变光阑的设计,但也带来了本系统的第一个设计难点:窄视场设计难度加大. 为充分发挥制冷探测器的优势,光学系统的  $F\#$  与制冷探测器相同为 2.68. 对于给定探测器的定  $F\#$  光学系统而言,灵敏度和探测率已固定,需平衡视场和分辨率<sup>[7]</sup>的要求,则光学系统宽、窄视场的焦距分别为 61 mm 和 183 mm.

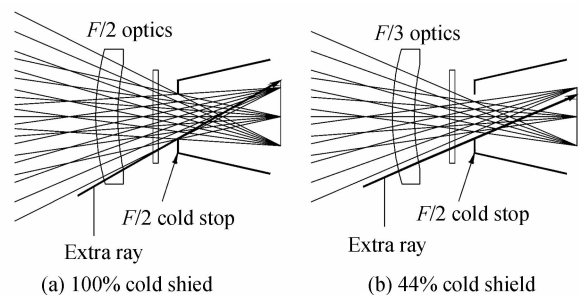


图 1 不同冷光阑效率的光学系统示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of different cold shield optical systems

接收器的工作波段  $4.4\sim 5.4\mu\text{m}/7.8\sim 8.8\mu\text{m}$ ,光学系统不仅要对这两个波段同时成像,而且要保证两波段的像面位置重合,即像面稳定,这成为本系

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61108044)资助

第一作者: 贾永丹(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学设计及检测技术. Email: jwana@126.com

责任作者/导师(通讯作者): 付跃刚(1972-),男,教授,博导,主要研究方向为光学系统设计及检测技术. Email: Fuyg@cust.edu.cn

收稿日期: 2011-11-03; 修回日期: 2011-12-16

统的设计难点之二.为了提高系统工作的可靠性,光学系统需要做到被动消热,且在温度变化过程中仍需兼顾像面稳定问题,这成为本系统的设计难点之三.本文通过衡量视场切换方式,合理分配红外材料与光焦度,充分考虑镜筒材料,解决了上述三个设计难点,实现了折射式被动消热差设计.

光学被动消热差设计是指在满足系统成像质量要求的同时,利用光学材料热特性之间的差异,合理分配光焦度,使温度变化过程中整个光学系统产生的像面离焦与镜筒材料产生的离焦相互补偿,从而获得消热差效果.为实现光学被动消热差设计,系统须满足光焦度方程,消色差方程和消热差方程<sup>[8-9]</sup>

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \Phi \quad (1)$$

$$\frac{\Phi_1}{\nu_1} + \frac{\Phi_2}{\nu_2} + \frac{\Phi_3}{\nu_3} = 0 \quad (2)$$

$$\chi_1 \Phi_1 + \chi_2 \Phi_2 + \chi_3 \Phi_3 = -\alpha_1 \Phi \quad (3)$$

式中: $\chi_i$ 为各种玻璃材料的热膨胀系数, $\nu_i$ 为各种玻璃材料的阿贝数; $\alpha_1$ 为镜筒材料的线膨胀系数.

## 2 设计结果及像质分析

### 2.1 设计指标

双视场/双色红外消热差光学系统的主要设计指标如表 1.

表 1 设计指标

Table 1 Parameters of optical design

Parameters	Value
Wavelength	4.4~5.4 $\mu\text{m}$ /7.8~8.8 $\mu\text{m}$
$\beta$	3 $\times$
FOV	9 $^\circ$ ×6.75 $^\circ$ /3 $^\circ$ ×2.25 $^\circ$
$f'$	61 mm/183 mm
$F\#$	2.68
Operating temperature	-40 $^\circ\text{C}$ ~+60 $^\circ\text{C}$

### 2.2 设计结果及像质分析

根据技术指标要求,按照被动消热差设计原则计算光学系统的初始结构,结合变焦系统理论<sup>[10]</sup>,应用 ZEMAX 光学设计软件对光学系统进行设计,

利用多重结构实现双波段、双视场以及多点温度分析设计.

双视场/双色红外消热差光学系统整体结构如图 2.整个系统仅由五片透镜组成,镜筒材料采用钛合金,透镜材料主要为锗和进口硅.宽视场系统由四片透镜组成,物镜组(两片)、变倍组(两片).窄视场系统由三片透镜组成,物镜组(两片)、变倍组(一片).物镜组为宽窄视场共用结构,包含两个偶次非球面,系统口径 102 mm,总长 121 mm.实际工作过程中通过宽视场变倍组与窄视场变倍组相互切换来实现视场转换.具体切换过程如图 2 所示,宽、窄视场变倍组可绕固定旋转轴旋转,以保证所需要的变倍组在光轴上.

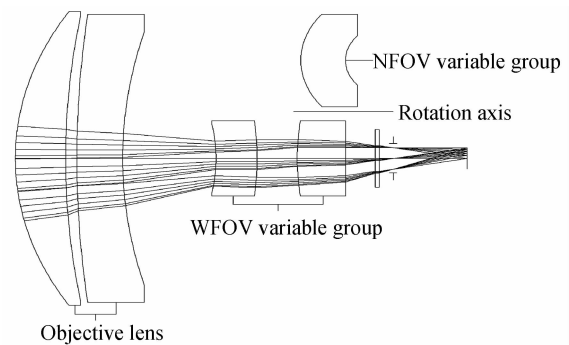
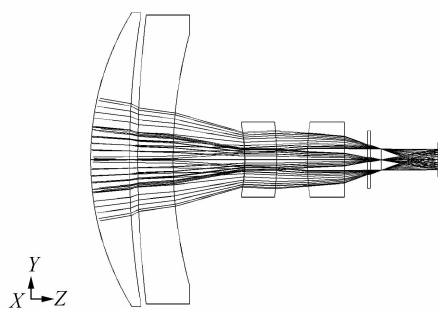


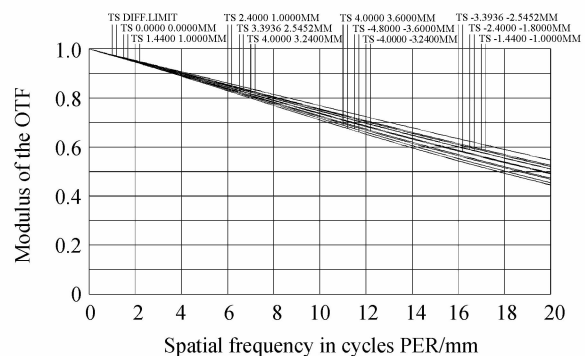
图 2 光学系统整体结构图

Fig. 2 Layout of the optical system

经过优化设计,系统在-40 $^\circ\text{C}$ ~+60 $^\circ\text{C}$ 温度范围内宽、窄视场的像面稳定,像质优良.图 3 和图 4 分别为宽、窄视场在不同温度下的光学调制传递函数曲线,所示传递函数曲线分别为 20 $^\circ\text{C}$ 、-40 $^\circ\text{C}$ 、60 $^\circ\text{C}$ 的情况.宽视场在 20 lp/mm 处轴上视场各温度下的传递函数值分别为 0.526、0.360、0.389,边缘视场传递函数值分别为 0.454、0.266、0.313,满足环境适应性及像质要求.窄视场在 20 lp/mm 处轴上视场各温度下的传递函数值分别为 0.375、0.324、0.421,边缘视场传递函数值分别为 0.066、0.102、0.038,亦可满足环境适应性及像质要求.



(a) Layout of WFOV



(b) +20 $^\circ\text{C}$  MTF

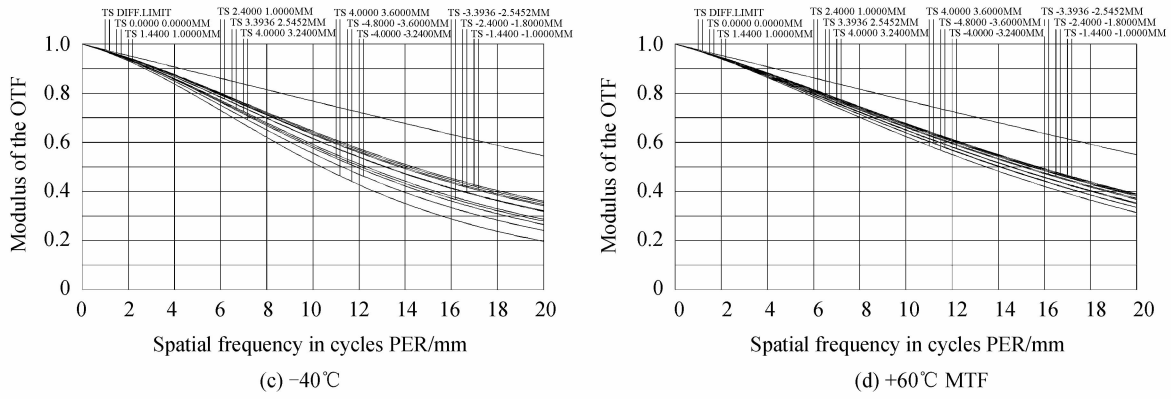


图3 宽视场光学系统传递函数  
Fig.3 WFOV MTF of the optical system

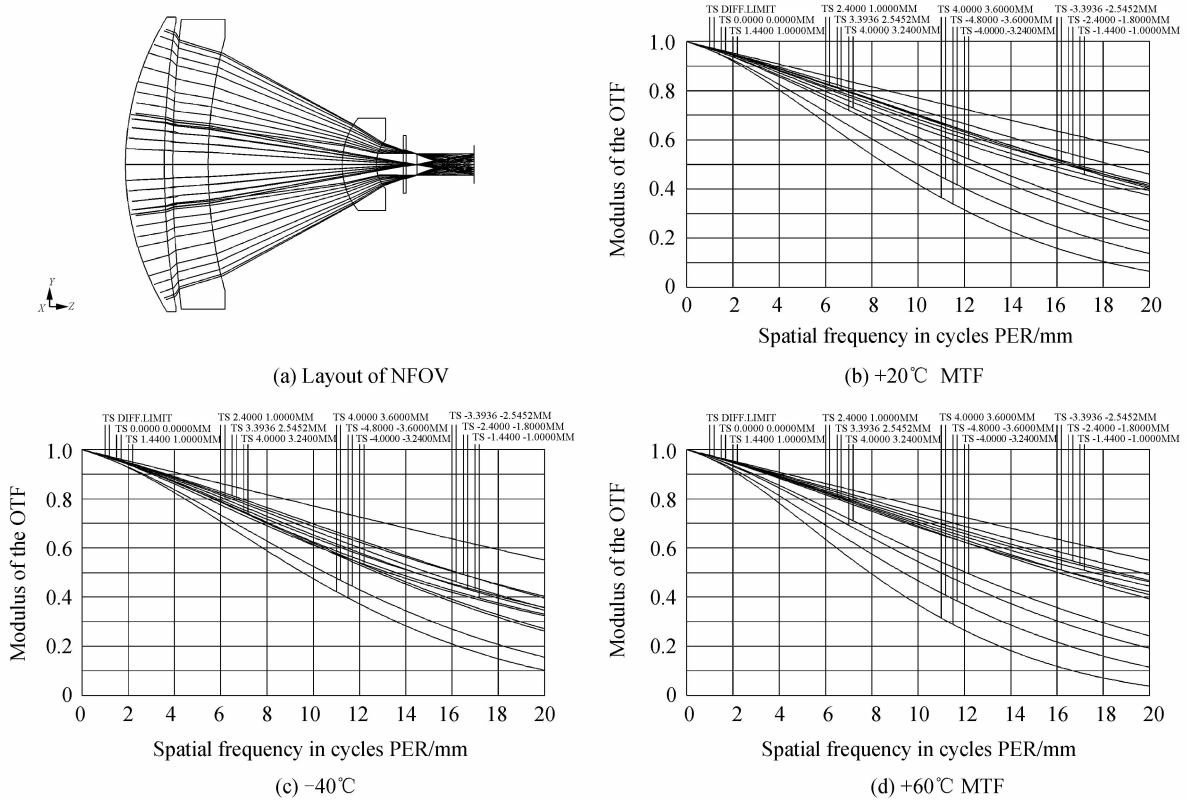


图4 窄视场光学系统传递函数  
Fig.4 NFOV MTF of the optical system

表2为宽、窄视场光学系统的畸变情况,由表可知两波段下的光学系统畸变差异极小,对系统实际成像质量影响甚微.

表2 光学系统的畸变

Table 2 Distortion of imaging system

FOV	WFOV		NFOV	
Wavelength	4.4~5.4 μm	7.8~8.8 μm	4.4~5.4 μm	7.8~8.8 μm
Distortion	0.332%	0.311%	1.796%	1.834%
Different	0.021%		0.038%	

### 3 结论

本文针对 Sofradir 公司研制的双色量子阱红焦平面探测器,通过合理选择常用红外材料,结合光学被动消热差设计理论,设计出了一种双视场/双色红

外消热差光学系统.  $F\#$  为 2.68,可实现  $9^\circ \times 6.75^\circ / 3^\circ \times 2.25^\circ$  双视场切换.在  $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$  温度范围内两视场、两波段均具有良好的成像质量.具有结构紧凑、体积较小、环境适应性好的优点,可应用于具体导航、搜索、侦查工作中.

## 参考文献

- [1] COCLE O, RANNOU C, FORESTIER B, *et al.* QWIP compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 1-12.
- [2] SUN Qiang, LU Zhen-wu, WANG Zhao-qi. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 830-833.  
孙强,卢振武,王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 830-833.
- [3] SCHREER O, SAENZ M L, PEPPERMULLER C, *et al.* Helicopter-borne dual-band dual-FPA system [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 637-647.
- [4] WU Hai-qing, WANG Hai-xia, ZHAO Xin-liang, *et al.* Design of dual-band/dual-filed IR optical system[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(11): 640-644.  
吴海清,王海霞,赵新亮,等. 双波段/双视场红外光学系统设计[J]. *红外技术*, 2010, **32**(11): 640-644.
- [5] AKRAM M N. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$  infrared focal-plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(6): 1704-1714.
- [6] AKRAM M N. Design of a dual field-of-view optical system for infra-red focal-plane arrays[C]. *SPIE*, 2002, **4767**: 13-23.
- [7] VIZGAITIS J N. Dual f/number optics for 3rd generation FLIR systems[C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 875-886.
- [8] JIAO Ming-yin, FENG Zhuo-xiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1364-1367.  
焦明印,冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1364-1367.
- [9] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. ZHOU Hai-xian, CHENG Yun-fang, transl. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 285-289.  
史密斯 W J. 现代光学工程[M]. 周海宪,程云芳,译. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2011: 285-289.
- [10] CHEN Lü-ji, LI Ping, FENG Sheng-rong, *et al.* Athermal design for MW dnfrared dual field-of-view optical system[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(1): 1-3.  
陈吕吉,李萍,冯生荣,等. 中波红外消热差双视场光学系统设计[J]. *红外技术*, 2011, **33**(1): 1-3.

## Design of Dual-FOV Athermal Optical System for Infrared Dual-color

JIA Yong-dan, FU Yue-gang, LIU Zhi-ying, WANG Zhi-jian

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Dual-color infrared optical systems can obtain LWIR and MWIR information simultaneously, which would be good for the target tracking and recognition. As to the needs of the infrared thermography, dual FOV /dual color infrared optical system is designed with simplified optical configuration. Dual color (4.4~5.4  $\mu\text{m}$ /7.8~8.8  $\mu\text{m}$ ) clear imaging is achieved, and double view switch ( $9^\circ \times 6.75^\circ/3^\circ \times 2.25^\circ$ ) can be completed by switching variable group when  $F\#$  is constant (2.68). Through rational distributions of IR material and focal power, the optical passive athermal design achieves. The results indicate that when the systems works on  $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ , the image plane is stable and the image quality is excellent, which can meet the using requirement of infrared thermographs.

**Key words:** Optical design; Dual field of view; Infrared dual-color; Athermal optical system