

一种可以兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪光学系统

赵志远

(武警工程大学 信息工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 本文设计了一种可以兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪光学系统, 给出了一个设计实例, 系统工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 中心波长为 $10\ \mu\text{m}$, 长焦距为 $150\ \text{mm}$, 短焦距为 $50\ \text{mm}$, F 数为 1.1 , 可匹配像元数为 384×288 、像元大小为 $17\ \mu\text{m}\times 17\ \mu\text{m}$ 的非制冷红外焦平面探测器。系统通过变倍组的轴向移动实现变焦, 通过引入二元光学面和非球面减小成像系统体积, 减轻重量, 提高成像质量, 设计结果表明, 该热成像系统取得了良好的成像, 可用于火灾消防救援、森林防火、夜间侦查、边防监控等工作。

关键词: 光学设计; 红外成像系统; 紧凑型; 非制冷焦平面; 二元光学

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)12-1159-05

Optical System of Compact Thermal Imager for Near and Far Distances for Armed Police

ZHAO Zhiyuan

(College of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

Abstract: A compact thermal imaging system, operating over both near and far distances, for armed police is introduced. A design example is proposed. The working band is $8\sim 12\ \mu\text{m}$, the center wavelength is $10\ \mu\text{m}$, the long focal length is $150\ \text{mm}$, the short focal length is $50\ \text{mm}$, and the F number is 1.1 . The system can match the performance of an uncooled focal plane infrared detector with a pixel number of 384×288 and a pixel size of $17\ \mu\text{m}\times 17\ \mu\text{m}$. The system realizes zooming by the axial movement of the zoom group. By using binary optical surface and aspheric surface, the volume and mass of the imaging system are reduced, and the image quality is improved. The design results show that the thermal imaging system has appropriate image quality, which is suitable for fire rescue, fire prevention, night detection, and border monitoring.

Key words: optical design, infrared imaging system, compact, uncooled focal plane, binary optics

0 引言

红外热像仪通过探测目标和背景的温度差别, 生成红外图像显示在显示屏上, 该种方式为被动工作方式, 由于工作时不用发光不需要光线, 因此隐蔽性很好, 不仅可以全天时获得清晰的目标图像, 而且可以在雨、雾、烟、沙尘等能见度很差的背景条件下工作, 还可以探测到背景中伪装的目标, 躲藏在树木草丛中的目标, 获得火灾现场内部清晰的热图像, 方便火宅救援时更真实有效地判断火中的情况, 以便采取更有效的救助方案。红外热像仪广泛用于武警部队日常巡逻、周边环境监控、目标追踪、公共安防、夜间陆上和水上缉私、火灾消防救援、森林防火、侦查、禁毒、

逃犯搜寻追捕等军事国防和民用工程领域^[1-5]。

利用红外热像仪探测识别目标时, 希望可以兼顾远近距离, 远距离 ($5\ \text{km}$ 左右) 时可以在大范围下对目标进行搜索, 近距离 ($1.6\ \text{km}$ 左右) 时可以在小范围下对目标进行跟踪, 两个模式下都有清晰的图像, 在保证成像性能的同时需要结构紧凑、重量轻、功耗低、便于携带。和制冷型焦平面热像仪相比, 非制冷型焦平面热像仪具有体积小、重量轻、功耗低、价格低、便于维护等优点, 因此武警部队配备非制冷型焦平面热像仪更合适。本文设计的可以兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统, 工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 中心波长为 $10\ \mu\text{m}$, 长焦距为 $150\ \text{mm}$, 短焦距为 $50\ \text{mm}$, F 数为 1.1 , 可匹配像元数为 384×288 、

收稿日期: 2018-12-08; 修订日期: 2019-06-09.

作者简介: 赵志远 (1977-), 通信装备教研室教员, 主要研究方向: 信息通信装备。E-mail: 403391535@qq.com.

像元大小为 $17\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$ 的非制冷红外焦平面探测器。系统通过变倍组的轴向移动实现变焦，通过引入二元光学面和非球面实现了系统的小型化和轻量化，设计结果表明，该热成像系统成像良好，可用于火灾消防救援、森林防火、夜间侦查、边防监控等工作。

1 设计原理

1.1 光学系统

兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪光学系统的原理示意图如图 1 所示，系统由前固定组、变倍组和后固定组组成，前固定组承担一部分光焦度，变倍组沿着光轴移动来实现焦距的切换，长焦距时可用作远距离下搜索目标，短焦距时可用作近距离下跟踪目标，后固定组用于校正残余的像差，并保证焦距切换时像面稳定。

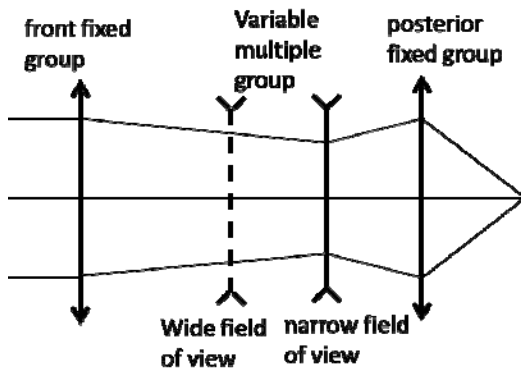


图 1 光学系统原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical system

兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统的像差校正平衡方法要尽量降低高级像差，要平衡初级像差和高级像差，同时还有平衡轴上点像差和轴外点像差，兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统远近距离时的前固定组和变倍组产生的像差量相当，后固定组校正剩余的像差维持像面的齐焦。

1.2 二元光学

二元光学是基于光波衍射理论发展起来的一个新兴光学分支，是光学与微电子技术相互渗透、交叉而形成的前沿学科。基于计算机辅助设计和微米级加工技术制成的平面浮雕型二元光学器件具有重量轻、易复制、造价低等特点，并能实现传统光学难以完成的微小、阵列、集成及任意波面变换等新功能。

ZEMAX 光学设计软件中对于二元光学面的相位分布函数定义为^[6]：

$$F(R)=A_1R^2+A_2R^2+A_3R^2+\dots \quad (1)$$

式中： R 为归一化半径； A_1 为二次相位系数，用于消除成像系统的色差； A_2 、 A_3 等为二元光学面的相位系

数，用于校正成像系统的高级像差。

从二元光学面的相位分布函数表达式可知，除可实现传统光学元件的功能外，二元光学元件在校正成像系统色差和热像差方面有特殊的功效，二元光学元件和传统光学元件配合使用^[7-8]，可以增加优化设计的自由度，在校正球差、像散等像差的同时，还可以有效校正色差和热像差，起到减小系统体积，减轻系统重量，提高成像性能，使得系统紧凑，使得兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统更加便携式，轻小型化。

2 设计指标和设计结果

2.1 设计指标

本设计实例选用多晶硅非制冷焦平面红外探测器，非制冷焦平面红外探测器的像元数为 384×288 ，像元尺寸为 $17\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$ ，变倍比为 3 倍，兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统的主要光学设计指标如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Table 1 Parameters of optical design

Working band	8-12 μm
Central wavelength	10 μm
F#	1.1
Short focal length	50 mm
Long focal length	150 mm
Distortion	5%

2.2 设计结果

设计的兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统如图 2 所示，系统由 5 片透镜组成，前固定组为材料为 Ge 的单透镜，前固定组的光焦度为正，为了减小电机的功耗，变倍组也采用单片透镜，材料为 Ge，变倍组的光焦度为负，后固定组由 3 块透镜组成，采用 Ge 和 ZnSe 两种光学材料，其中两块为 Ge 透镜，一块为 ZnSe 透镜，后固定组 3 块透镜的光焦度分别为负、正、正。设计的兼顾远近距离的紧凑型武警用红外热像仪成像系统总长小于 240 mm，变倍组从宽视场状态切换到窄视场状态时，变倍组沿光轴方向的移动距离为 40.52 mm，为了提高成像系统的成像质量，在系统中使用了一个二元光学面和一个非球面，分别位于前固定组的后表面和后固定组第二块透镜的前表面，温度改变时，光学系统的成像性能下降，通过后固定组调焦可保证系统成像性能。

2.3 像质评价

2.3.1 MTF

性能优良的光学系统的 MTF，在奈奎斯特频率处

优于 0.3 即可。图 3 给出了系统的 MTF 曲线，其中(a)为远距离下的 MTF 曲线，(b)为近距离下的 MTF 曲线。由图可知，在奈奎斯特频率 30lp/mm 处，远距离工作模式下所有视场的子午 MTF 和弧矢 MTF 都优于 0.45，近距离工作模式下所有视场的子午 MTF 和弧矢 MTF 都优于 0.55。

性能优良的光学系统的点列图，弥散斑的均方根半径在探测器像元内即可。图 4 给出了系统的点列图，其中(a)为远距离下的点列图，(b)为近距离下的点列图，由图可知，远距离工作模式下和近距离工作模式下所有视场弥散斑的最大均方根半径分别为 5.01 μm 和 9.26 μm ，两种工作模式下的均方根半径基本都小于探测器的一个像元 17 $\mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ ，可以满足使用要

求。

2.3.2 畸变

性能优良的光学系统的畸变小于 5%。图 5 给出了系统的场曲和畸变曲线，其中(a)为远距离下的场曲和畸变曲线，(b)为近距离下的场曲和畸变曲线，右侧为畸变曲线，由图可知，远距离工作模式下畸变的绝对值最大为 0.3%，近距离工作模式下畸变的绝对值最大为 1.4%，满足设计要求。

2.4 作用距离

作用距离是红外热像仪成像系统探测目标的一个重要指标，红外热像仪的作用距离与目标尺寸、红外热像仪成像系统的焦距、红外探测器的像元尺寸有关。

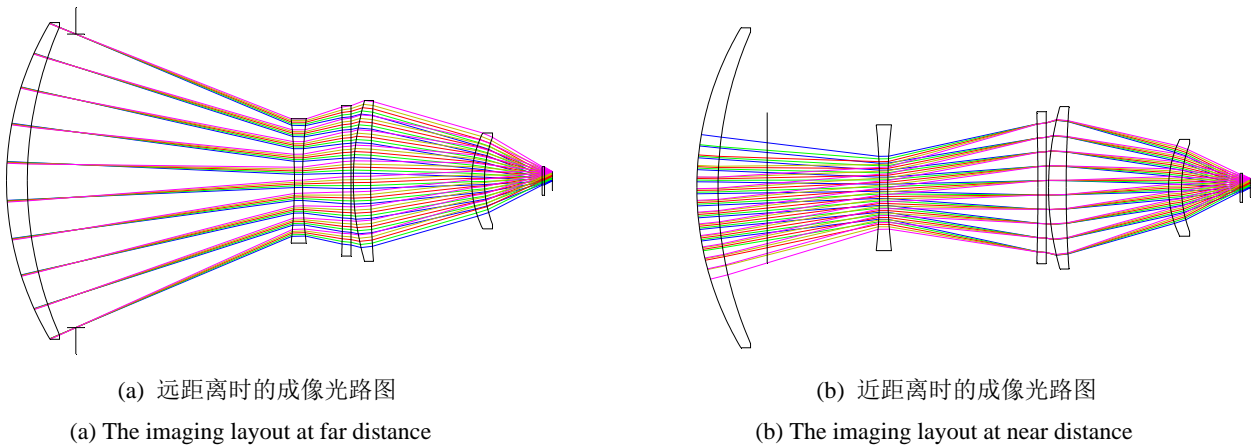


图 2 紧凑型红外热像仪成像系统远近距离时的成像光路图

Fig.2 The imaging layout of compact thermal imaging system at far and near distances

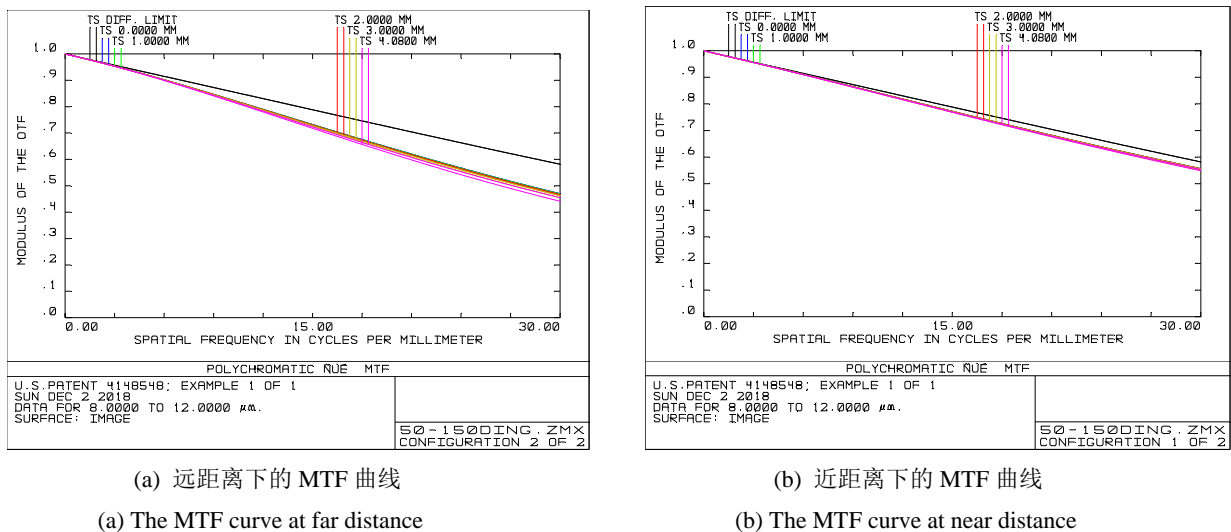
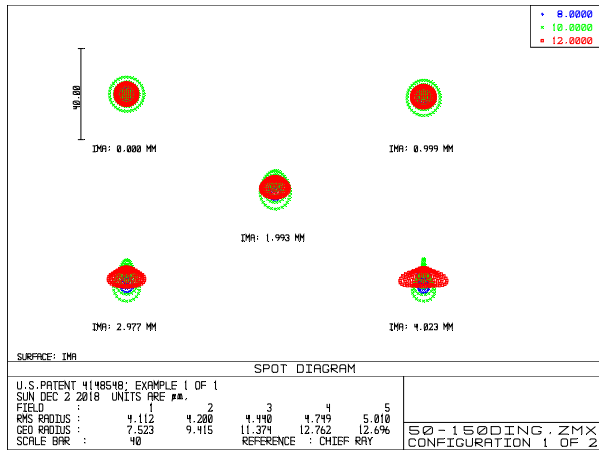


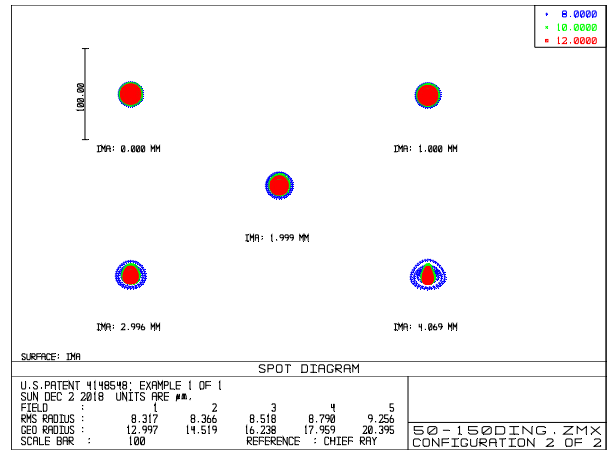
图 3 紧凑型红外热成像系统远近距离下的 MTF 曲线

Fig.3 MTF of compact thermal imaging system at far and near distances



(a) 远距离下的点列图

(a) Spot diagram curve at far distance

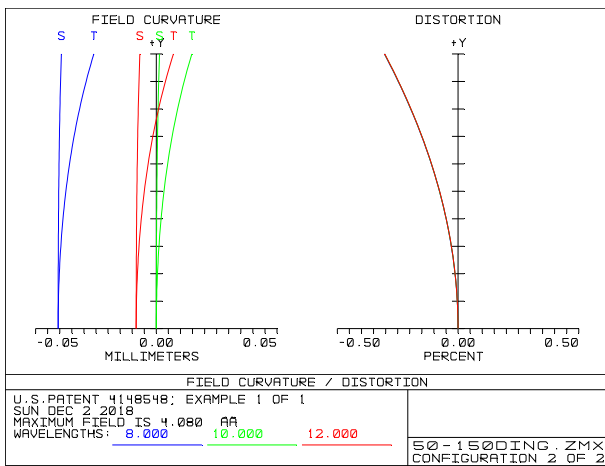


(b) 近距离下的点列图

(b) Spot diagram curve in at near distance

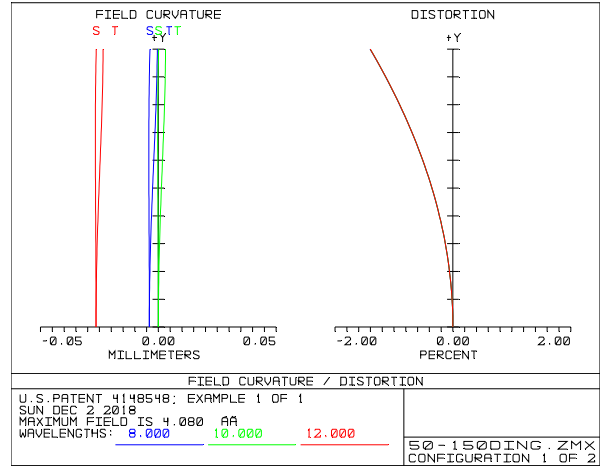
图4 紧凑型红外热成像系统远近距离下20℃时的点列图

Fig.4 Spot diagram of compact thermal imaging system at far and near distances



(a) 远距离下的畸变

(a) Distortion curve at far distance



(b) 近距离下的畸变

(b) Distortion curve at near distance

图5 紧凑型红外热成像系统远近距离下的畸变

Fig.5 Distortion curves of compact thermal imaging system at far and near distance

红外热像仪的作用距离计算公式为:

$$R = hf / H \quad (2)$$

式中: R 为红外热像仪的作用距离; f 为红外热像仪成像系统的焦距; h 为目标尺寸; H 为目标在红外探测器上占的尺寸大小。

假设待探测目标为人, 其目标尺寸 h 为 1.7 m, 目标在红外探测器上占的像元个数为 3 个, 则 $H=0.051$ mm, 近距离工作模式下的焦距 $f_{near}=50$ mm, 远距离工作模式下的焦距 $f_{far}=150$ mm, 可得红外热像仪近距离工作模式下的作用距离^[9]为:

$$R_{near} = \frac{h}{H} f_{near} = \frac{1.7m}{0.051mm} \times 50mm = 1.6km \quad (3)$$

可得红外热像仪远距离工作模式下的作用距离为:

$$R_{far} = \frac{h}{H} f_{far} = \frac{1.7m}{0.051mm} \times 150mm = 5km \quad (4)$$

3 结论

设计了一种可兼顾远近距离的武警用红外热像仪的紧凑型光学系统, 系统工作在长波红外波段 8~12 μ m, 变倍比为 3 倍, 通过变倍组的轴向移动实现变焦, 通过引入二元光学面和非球面实现了系统的小型化和轻量化, 设计结果表明, 该红外热成像系统在奈奎斯特频率 30 lp/mm 处, 远距离工作模式下所有视场的子午 MTF 和弧矢 MTF 都优于 0.45, 近距离工作模式

下所有视场的子午 MTF 和弧矢 MTF 都优于 0.55, 远距离工作模式下和近距离工作模式下所有视场弥散斑的最大均方根半径分别为 5.01 mm, 9.26 mm, 远距离工作模式下畸变最大为 0.3%, 近距离工作模式下畸变最大为 1.4%, 红外热成像系统取得了良好的成像, 满足设计要求, 具有较好的探测距离, 可用于武警官兵火灾消防救援、森林防火、夜间侦查、边防监控等工作。

参考文献:

- [1] Allen Mann. Infrared zoom lenses in the 1990s[J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(1): 109-115.
- [2] Akram M N. A step-zoom dual field-of-view IR telescope[C]//*Proc. of SPIE*, 2002, **4832**: 328-333.
- [3] 陈吕吉, 陈津津, 李萍. 新型变焦双视场长波红外光学系统设计[J]. *红外技术*, 2011, **33**(7): 406-410.
CHEN Lvji, CHEN Jinjin, LI Ping. A novel step-zoom LW infrared dual field-of-view optical system design[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(7): 406-410.
- [4] 白玉琢, 李茂忠, 张莹昭, 等. 紧凑型长波致冷型红外变焦距透镜系统[J]. *红外技术*, 2011, **33**(8): 453-456.
BAI Yuzhuo, LI Maozhong, ZHANG Yinzhao. Compact long-wave infrared cooled zoom lens system[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(8): 453-456.
- [5] 吕银环, 雷存栋, 崔维鑫, 等. 长波红外地平仪的无热化光学系统设计及实现[J]. *红外技术*, 2011, **33**(11): 651-654.
LV Yinhuan, LEI Cundong, CUI Weixin. Design and realization of athermalizing optical system for long-wave infrared horizon sensor[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(11): 651-654.
- [6] 孟剑奇. 衍射光学及其在红外成像系统中的应用[J]. *航空兵器*, 2006, **20**(6): 38-41.
MENG Jianqi. Diffractive optics and its application in infrared imaging systems[J]. *Aero Weaponry*, 2006, **20**(6): 38-41.
- [7] 齐雁龙. 8-12 μm 折/衍混合监视系统无热化设计[J]. *红外技术*, 2009, **31**(11): 676-680.
QI Yanlong. Design on athermal infrared refractive-diffractive hybrid surveillance system at 8-12 μm [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(11): 676-680.
- [8] Doshi R. Design and fabrication of diffractive infrared objectives for staring arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 1994, **2269**: 260-270.