

# 超宽温中波红外热像仪消热差成像系统

赵志远

(武警工程大学 信息工程学院, 西安 710086)

**摘要:**针对温度变化会影响红外热像仪成像性能,影响武警战士在火灾救援时及时制订有效的救助方案,提出了一种超宽温中波红外热像仪消热差成像系统,借助被动式光学补偿方法,通过光机材料匹配和使用二元光学面,实现了系统在宽温度范围内工作,给出了一个设计实例,系统工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ ,中心波长为 $4.2 \mu\text{m}$ ,焦距为 $55 \text{ mm}$ , $F$ 数为 $2.0$ ,可匹配像元数为 $320 \times 256$ ,像元大小为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的制冷型红外焦平面探测器。系统由三片透镜组成,采用锗和硅两种红外光学材料,在 $-60 \text{ }^\circ\text{C} \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内取得了较好的消热差成像性能。

**关键词:**红外成像系统;制冷焦平面;二元光学

**本文引用格式:**赵志远. 超宽温中波红外热像仪消热差成像系统[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9): 184-188.

**Citation format:** ZHAO Zhiyuan. MWIR Athermalized Thermal Imaging System with Wide Temperature Range[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(9): 184-188.

中图分类号: TN74

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)09-0184-05

## MWIR Athermalized Thermal Imaging System with Wide Temperature Range

ZHAO Zhiyuan

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

**Abstract:** The temperature changes affect imaging performance infrared thermal imaging system, affecting the development of effective rescue programs of the armed police soldiers, a MWIR athermalized thermal imaging system with wide temperature range was introduced. The system works by using passive optical athermalized method, matching the optical and mechanical materials, using binary optics surface. A design example was proposed. The working band is  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ , the center wavelength is  $4.2 \mu\text{m}$ , the focal length is  $55 \text{ mm}$ , the  $F$  number is  $2.0$ . The system can match the cooled focal plane infrared detector which the the pixel number is  $320 \times 256$ , and the pixel size is  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ . The system is consisted of three lenses and GE, SI infrared glass. The design results show that the thermal imaging system has good image quality from  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Key words:** infrared imaging system; cooled focal plane; binary optics

自然界中当物体的温度大于 $-273.16 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,物体就存在热辐射,热辐射的同时会伴随着红外线的存在,物体是否辐射红外线和白天还是黑夜无关,只要温度大于 $-273.16 \text{ }^\circ\text{C}$ 就有红外辐射,人眼对于红外线是看不见的,必须来红外器件来接收,而红外热像仪可以把这些人眼不可见的热辐射转变

为人眼可见的热像图。红外热像仪通过探测目标和背景的温度差别,生成红外热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、沙尘等的能见度很差的背景条件下工作,还可以探测

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-04-01

作者简介: 赵志远(1977—),男,讲师,主要从事信息工程技术研究, E-mail: 403391535@qq.com。

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,方便武警战士在火宅救援时更真实有效的判断火中的情况,以便采取更有效的救助方案。红外热像仪有着和白光摄像头独特的优势,因此红外热像仪广泛用于武警战士日常巡逻、周边环境监控、目标追踪、公共安全、夜间陆上和水上缉私、火灾消防救助、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<sup>[1-5]</sup>。

本文设计了一种超宽温中波红外热像仪消色差系统,工作波段为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ,中心波长为 4.2  $\mu\text{m}$ ,焦距为 55 mm,  $F$  数为 2.0,匹配像元数 320×256,像元大小 30  $\mu\text{m}$ ×30  $\mu\text{m}$  的制冷型红外焦平面探测器。设计结果表明:借助被动式光学补偿方法,通过光机材料匹配和使用二元光学面,使得系统在 -60  $^{\circ}\text{C}$ ~120  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内取得了较好的消色差成像性能,可用于武警官兵冬天在低温环境下进行夜间侦查,边防监控工作,同时也可以在高温环境下准确清晰的获取被救人的图像,进而进行精准的火灾消防救援。

## 1 设计原理

二元光学<sup>[6-8]</sup>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、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 软件中对于二元光学面的相位分布函数定义为

$$\phi(R) = A_1 R^2 + A_2 R^4 + A_3 R^6 + \dots \quad (1)$$

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<sup>[9-10]</sup>,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,还可有效校正色差和热像差,提高成像性能。

被动式光学补偿方法<sup>[11-12]</sup>是通过不同的线膨胀系数和折射率温度系数的光学材料和机械材料的匹配,通过合理分配光学透镜的光焦度,使得温度变化导致成像系统的像面漂移量在系统焦深范围内,该方法具有性能稳定,不用供电,光学和机械元件不用移动就能实现消色差设计。

被动式光学补偿方法需要同时满足光焦度、消色差、消热差 3 个条件。

光焦度要求:

$$\sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi \quad (2)$$

$h_i$  为近轴光线在第  $i$  个透镜上的入射高度,  $\phi_i$  为第  $i$  个透镜的光焦度,  $\phi$  为总光焦度。

消色差要求:

$$\Delta f_b^T = \left( \frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 x_i \phi_i) = 0 \quad (3)$$

$x_i$  为第  $i$  个光学透镜的色散因子。

消色差要求:

$$\frac{df_b^T}{dt} = \left( \frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 x_i \phi_i) = \alpha_h L \quad (4)$$

$df_b^T/dt$  是由温度变化导致的离焦,  $\alpha_h$  为机械件线膨胀系数,  $L$  为系统机械件总长。

基于二元光学元件特殊的温度特性和被动式光学补偿方法,结合二者的优势可使得系统实现在一定温度范围内实现消热差。

## 2 设计指标和设计结果

实例选用制冷型焦平面红外探测器,制冷型焦平面红外探测器的像元数为 320×256,像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$ ×30  $\mu\text{m}$ ,系统的工作波长为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ,中心波长为 4.2  $\mu\text{m}$ ,  $F$  数为 2.0,全视场为 12.75 $^{\circ}$ ,焦距为 55 mm,工作温度范围为 -60  $^{\circ}\text{C}$ ~120  $^{\circ}\text{C}$ ,要求 16 lp/mm 处 MTF 大于 0.5,最大畸变的绝对值小于 2%。

设计的超宽温中波红外热像仪消色差成像光路系统如图 1 所示,系统由 3 片透镜组成,采用 GE 和 SI 两种光学材料,其中两块 SI 透镜,一块 GE 透镜,3 片透镜的光焦度分别为正、负、正。设计的超宽温中波红外热像仪消色差成像系统总长小于 85.61 mm,冷屏到像面的距离为 19.8 mm,成像系统的孔径光阑和制冷型红外探测器的冷光阑重合,满足 100% 冷光阑效率,系统由 3 片透镜组成包含 6 个光学表面,为了提高成像系统质量,在系统中使用了一个 2 元光学面和一个非球面,分别位于第 2 片透镜的前表面和第 2 片透镜的后表面,第 1 片和第 3 片透镜的材料为 SI,比较坚硬,不适合在这两片透镜上车削非球面和二元光学面,第 2 片透镜材料为 GE,适合制作非球面和二元光学面,第 2 片透镜的入射角度较大,光学像差相对更大,使用非球面和二元光学面可以很好的校正这些像差。系统中的二元光学面衍射级次为 +1 级,其衍射效率为 95%,可以满足成像系统需求。

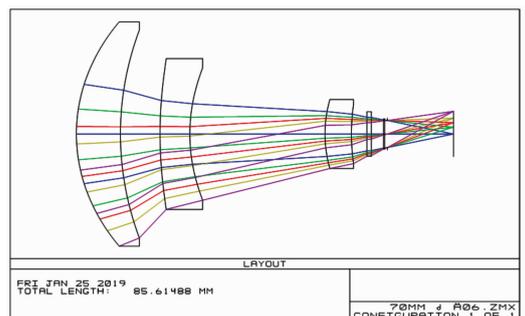


图 1 成像光路

图2表示二元光学面的位相,周期和径向距离的关系,由图2可知该二元光学面的最大线频率为0.63 periods/mm,对应最小周期线宽为1.59 mm,当台阶数为8时,其最小特征尺寸为198.75  $\mu\text{m}$ ,完全可以用金刚石车削工艺加工这样尺寸的二元光学面。

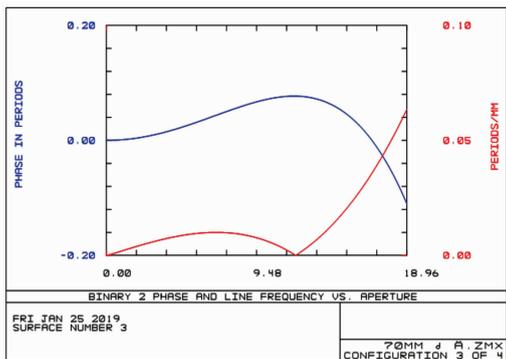


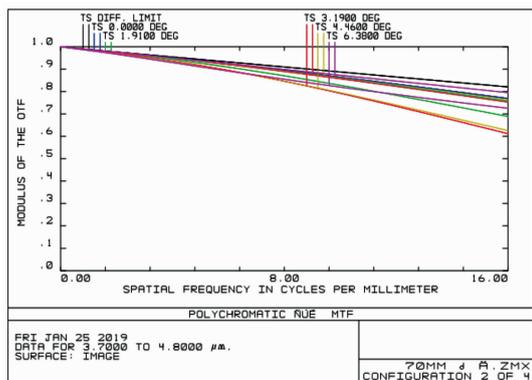
图2 二元面的位相及周期同径向距离关系

### 3 像质评价

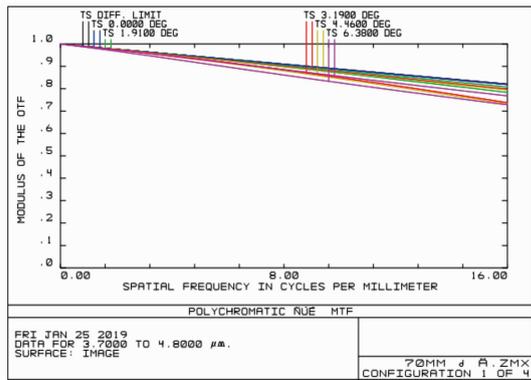
图3给出了设计的超宽温中波红外热像仪消热差成像系统 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的MTF曲线,最上面的黑实线为衍射极限线,其他线为子午光线和弧矢光线的MTF曲线。由图3可知,在奈奎斯特频率16 lp/mm处, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,所有视场的子午MTF和弧矢MTF都优于0.6,系统取得了良好的消热差成像性能。

图4给出了设计的超宽温中波红外热像仪消热差成像系统 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的点列图,由图4可知, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下所有视场弥散斑的最大均方根半径分别为11.78  $\mu\text{m}$ , 15.04  $\mu\text{m}$ , 14.98  $\mu\text{m}$ , 16.45  $\mu\text{m}$ ,均方根半径都在探测器的一个像元内,可以满足使用要求。

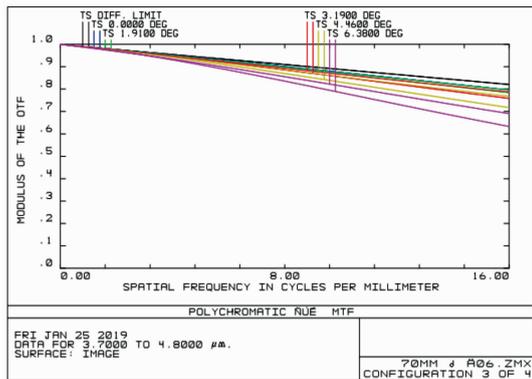
图5给出了设计的超宽温中波红外热像仪消热差成像系统 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的场曲和畸变曲线,由图可知,超宽温中波红外热像仪消热差成像系统 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下畸变的绝对值最大为0.58%,满足设计要求。



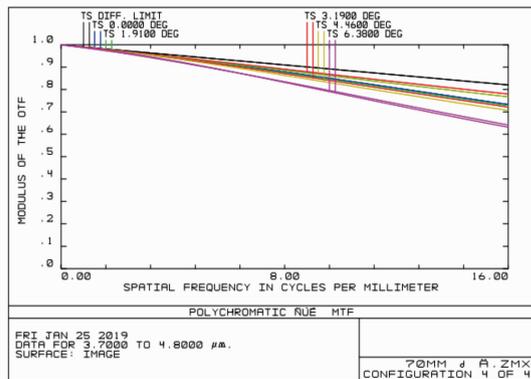
(a)  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的MTF曲线



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

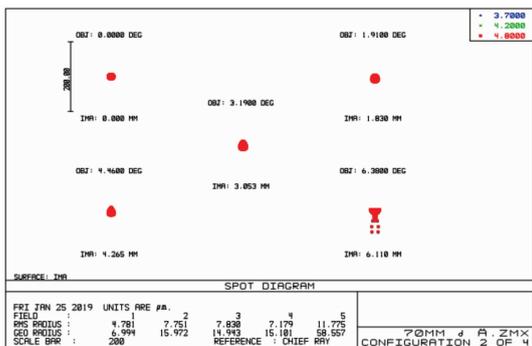


(c)  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的MTF曲线

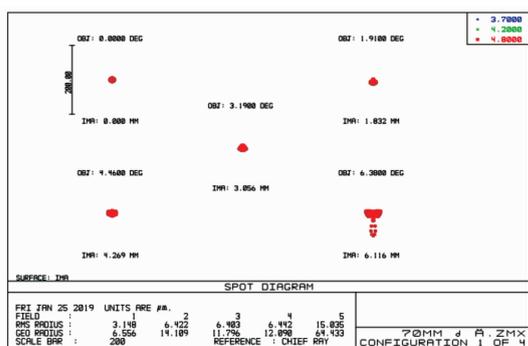


(d)  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的MTF曲线

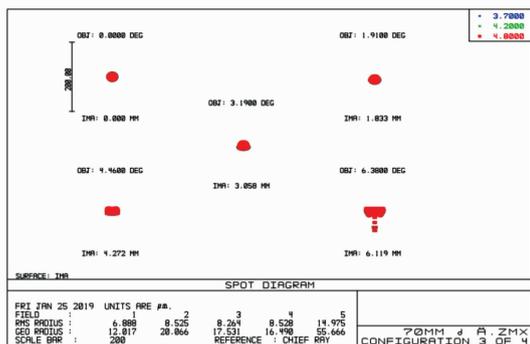
图3 MTF曲线



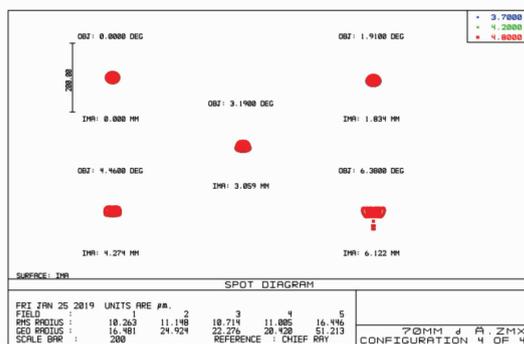
(a) -60 °C 的点列图



(b) 20 °C 的点列图

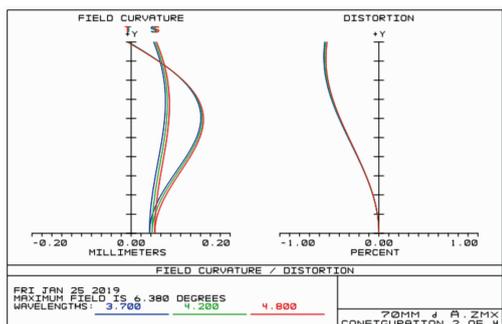


(c) 80 °C 的点列图

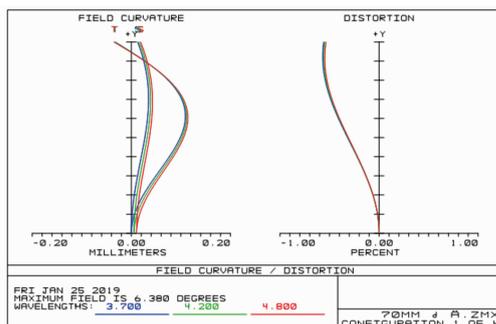


(d) 120 °C 的点列图

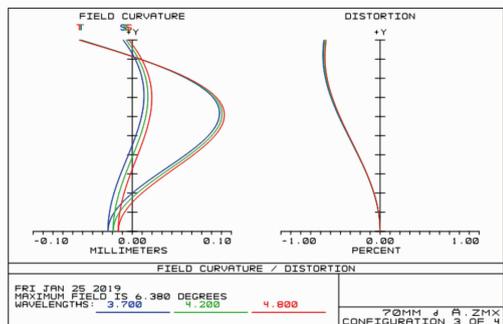
图4 点列图



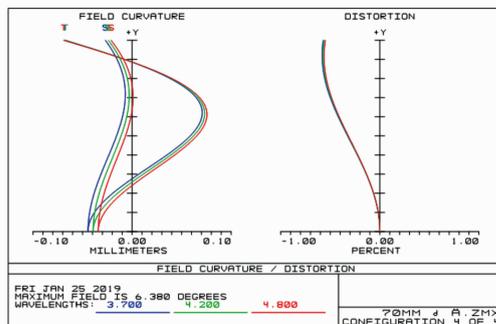
(a) -60 °C 的场曲和畸变



(b) 20 °C 的场曲和畸变



(c) 80 °C 的场曲和畸变



(d) 120 °C 的场曲和畸变

图5 场曲和畸变曲线

### 3 结论

针对像元数为  $320 \times 256$ , 像元大小为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  的制冷型红外焦平面探测器, 设计了一种可超宽温中波红外热像仪消热差成像系统, 系统工作在中波红外波段  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ , 全视场为  $12.75^\circ$ , 利用被动式光学补偿方法, 通过光机材料匹配和使用二元光学面, 使得系统取得了较好的消热差成像性能。设计结果表明, 在  $-60 \text{ }^\circ\text{C} \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$  温度, 该红外热成像系统在奈奎斯特频率  $16 \text{ lp/mm}$  处, 远距离工作模式下所有视场的子午 MTF 和弧矢 MTF 都优于  $0.45$ , 所有视场的子午 MTF 和弧矢 MTF 都优于  $0.6$ ;  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  下所有视场弥散斑的最大均方根半径分别为  $11.78 \mu\text{m}$ ,  $15.04 \mu\text{m}$ ,  $14.98 \mu\text{m}$ ,  $16.45 \mu\text{m}$ , 均方根半径都小于探测器的一个像元  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ;  $-60 \text{ }^\circ\text{C} \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$  下畸变的绝对值最大为  $0.58\%$ ; 红外热成像系统取得了良好的消热差成像性能, 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] SUN W G, LI M, CHEN H X. Design and analysis of multi-element dual band infrared detector for counter countermeasure[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 013101.
- [2] 杨明洋, 杨洪涛, 曲锐. 80 倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 88 - 94.
- [3] LIN Y Y, JIA H G, WEI Q. A Design of mid-wave infrared integral catadioptric optical system with wide fov[J]. Jour-

- nal of the Optical Society of Korea, 2014, 17(2): 142 - 148.
- [4] KANYATHARE B. Imaginary optical constant in near-infrared spectral range for the separation and discrimination of adulterated diesel binary mixtures[J]. Optical Review, 2019, 26(1): 85 - 94.
- [5] ASANO Y. Correction by the skin-to-chest wall distance in near-infrared spectroscopy and assessment of breast responses to neoadjuvant chemotherapy[J]. Optical Review, 2019, 26(1): 111 - 117.
- [6] 张宇, 王文生. 制冷式红外长波折衍混合消热差望远物镜设计[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 648 - 653.
- [7] 宏宇. 紧凑型折/衍混合中波红外无热化成像光学系统[J]. 光电技术应用, 2016, 30(3): 20 - 24.
- [8] JIANG Y R, WANG J, XIE Q K. Athermal design of refractive-diffractive hybrid infrared optical system [J]. Optik, 2017, 131(3): 592 - 597.
- [9] ZHANG Z F, XIE Y J, YIN Q Y. Design and testing of infrared diffractive telescope imaging [J]. Optik, 2015, 126(2): 5740 - 5743.
- [10] 张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射双波段红外消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622004.
- [11] 陈潇. 大面阵长波红外光学无热化镜头的设计[J]. 红外技术, 2018, 40(11): 1061 - 1064.
- [12] 安晓强. 大相对孔径紧凑型非制冷光学系统消热设计[J]. 激光与红外, 2015, 45(7): 795 - 800.

(责任编辑 杨继森)