

制冷型红外双波段广角无热化光学系统设计

栗洋洋, 杨加强, 彭晴晴, 刘琳
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 设计了用于制冷型红外双波段探测器的、广角光学系统, 并进行了被动式消热差设计。镜头由6片透镜组成, 通过不同镜片材料搭配来进行消色差设计, 实现在环境温度 $-40 \sim 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内被动式消热差。光学系统采用中长波共焦面设计, 设计波段为 $3.5 \sim 4.9 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $7.5 \sim 9.5 \text{ }\mu\text{m}$, 焦距为 11 mm , F 数为 1.6 , 全视场角 150° 。结果表明, 此光学系统工作范围大、结构简单、透过率高, 能够实现在全工作温度范围内成像质量良好。

关键词: 双波段; 广角视场; 光学无热化; 共焦面

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.05.011

Design of cooled infrared dual-band wide angle athermal optical system

LI Yang-yang, YANG Jia-qiang, PENG Qing-qing, LIU Lin
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, a wide angle optical system for a cooled infrared dual-band detector with passive thermal aberration is designed. The optical lens is composed of 6 lenses, and the athermal design is carried out by matching different optical materials to realize passive athermal design in the range of environment temperature $-40 \sim 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The optical system is designed with medium and long wave confocal plane. The designed wave band is $3.5 \sim 4.9 \text{ }\mu\text{m}$ and $7.5 \sim 9.5 \text{ }\mu\text{m}$, the focal length is 11 mm , the F number is 1.6 , and the full field of view is 150° . The results show that the optical system has the advantages of large operating range, simple structure, and high transmittance and can achieve good imaging quality in the full operating temperature range.

Keywords: dual-band; wide angle; optical athermal; confocal plane

1 引言

红外热成像系统探测和识别目标的能力, 不仅取决于成像系统本身的性能, 还取决于目标的自身辐射特性。由基尔霍夫定律可知, 不同的表面辐射发射率和温度都会影响目标辐射特性, 往往地面常温物体的辐射光谱集中在长波红外波段, 而一些高温物体如飞机尾焰、舰船排气孔等辐射源, 它们的辐射光谱主要集中在中波波段^[1]。除此之外, 随着红外

伪装技术的发展^[2], 通过对目标表面的发射率和表面温度进行调整和控制, 目标在单一波段的辐射信息越来越少。因此对于红外告警识别系统, 双波段成像可以同时获取目标的中波光谱信息和长波光谱信息, 降低光学系统的虚警率, 有效提升光学系统的探测识别能力。

对于红外识别告警设备而言, 单个光学系统需要尽可能大的视场, 例如 F-35 战斗机装备的分布式

孔径红外系统,单个传感器需要提供 $90^\circ \times 90^\circ$ 视场,通过分布在机身周围的6个红外传感器,以实现 360° 的告警范围,实现全态势感知能力^[3]。由此可见,广角视场设计对于红外告警系统而言具有重要意义。对于大多数红外识别告警系统而言,需要克服环境温度的影响,因此有必要对光学系统进行无热化设计。

本文设计了制冷型红外双波段广角无热化光学系统,利用不同材料搭配和非球面进行广角视场、消色差、消热差设计,实现在 $-40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内被动式消热差,无需机械调焦,具有视场大、结构简单、透过率高、环境适应性强等优点。

2 设计原理

2.1 结构选型

常见的光学系统可以分为三种类型:折射式、反射式和折反式,对于红外双波段光学系统而言,中波波段和长波波段的消色差是设计重点和难点,因此双波段设计通常采用反射式或折反式这种没有色差的 forms^[4-6]。但是对于告警系统要求广角视场设计,反射式或折反式结构形式难以达到的设计要求,因此本文选用折射式结构形式。

2.2 光学消色差原理

薄透镜组消色差需要满足以下公式:

$$\begin{cases} \sum \frac{\phi_i}{\nu_i} = 0 \\ \sum \phi_i = \phi \end{cases} \quad (1)$$

式中, ϕ_i 为透镜组中第 i 片透镜的光焦度; ν_i 为该透镜的阿贝数; ϕ 为透镜组的总光焦度。对于红外双波段而言,中波波段和长波波段之间的色差,显然为系统主要的色差,因此红外光学玻璃的阿贝数可以等效表示为:

$$\nu = \frac{n(\lambda_M) - 1}{n(\lambda_M) - n(\lambda_L)} \quad (2)$$

其中, $n(\lambda_M)$ 、 $n(\lambda_L)$ 分别为中波波段的中心波长和长波波段的中心波长。通过(1)式和(2)式就可以计算出,红外玻璃在满足消色差的同时,各个镜片所分配的光焦度值。

2.3 光学消热差原理

定义光学材料折射率的温度系数:

$$B_g = dn/dt \quad (3)$$

定义光学材料的热膨胀系数:

$$X_g = (1/L)dL/dt \quad (4)$$

对于空气中单透镜而言,其光焦度为:

$$\phi = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (5)$$

其中, r_1 和 r_2 分别为透镜前后表面曲率半径, n 为材料折射率。

将式(5)对温度 t 取微分,得到:

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{dn}{dt} - 1\right)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + (n-1)\left(\frac{-1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dt} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dt}\right) = \phi\left(\frac{B_g}{n-1} - X_g\right) \quad (6)$$

引入温度焦距位移系数 X_f , 可以得出:

$$X_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = \frac{B_g}{n-1} - X_g \quad (7)$$

可以看出, X_f 和透镜元件的形状无关,只和玻璃材料的光学特性有关。 X_f 的值可以是正的,也可以是负的,当机械结构件使用同种材料时,通过材料搭配使得透镜材料的温度引起的焦移与机械结构材料热胀冷缩引起的像面移动相匹配,达到系统的消热差。

因此多片分离透镜系统消热差需要满足以下条件:

$$\left(\frac{1}{h_1\phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k h_i X_{fi} \phi_i + \alpha_H L_H = 0 \quad (8)$$

其中, h_i 为第一近轴光线在个镜组的入射高度; ϕ 为系统中光焦度, ϕ_i 、 X_{fi} 为各镜组的光焦度和温度焦距位移系数; α_H 为机械结构的线膨胀系数; L_H 为机械结构的总长度。

3 设计实例

设计实例采用 640×512 面阵双波段探测器,像元尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 。光学技术指标如表1所示。

表1 系统技术指标

Tab. 1 System specifications

Parameter	Value
Spectrum range/ μm	3.7~4.8; 7.7~9.5
Focal length/mm	10
$F/\#$	1.6
Full FOV/ $^\circ$	144
Working temperature/ $^\circ\text{C}$	-40~70
Total length/mm	150
Diameter/mm	70

如图1所示,光学系统由6片透镜组成,为了实

现 100 % 冷光阑效率,系统的光阑在最后一块透镜后,与制冷探测器的冷光阑重合,有效避免了杂散辐射对系统的影响。

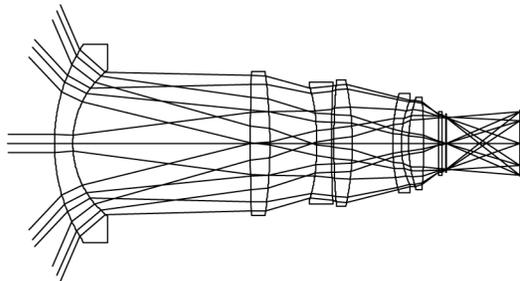


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

根据消色差和消热差原理,进行材料搭配,第一片透镜为 Ge 材料的负透镜,Ge 材料的折射率大,有利于大视场光线的偏折;第二片和第四片透镜为 ZnSe 材料的正透镜,平衡系统中色差和部分像差;第三片透镜为负光焦度的硫系玻璃透镜,第五片和第六片透镜均为正光焦度的硫系玻璃,加入硫系玻璃可以有效平衡系统的热差,从而实现光学系统的被动消热差。

同时,光学系统第一透镜后表面、第四透镜前表面和第五透镜后表面为非球面,非球面可以有效校正大视场引起的轴外剩余像差及剩余色差。光学系统中没有加入衍射面,有效避免了衍射面引起的透过率下降的问题。

4 设计结果

根据技术指标要求,结合 CodeV 光学设计软件进行优化设计,光学系统中长波在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内成像质量良好,中波焦深 $\Delta Z_1 = \pm 2\lambda (F/\#) = \pm 16\text{ }\mu\text{m}$,长波焦深 $\Delta Z_2 = \pm 2\lambda (F/\#) = \pm 31\text{ }\mu\text{m}$ 。对光学系统在 $\pm 16\text{ }\mu\text{m}$ 范围内进行 MTF 离焦分析,得出结果如图 2、图 3 所示。可以看出在离焦范围内,中长波轴上 MTF 均大于 0.4,轴外均大于 0.2,因此可以认为中长波焦面一致性符合要求,可以同时清楚成像。

图 4 ~ 图 7 分别为中长波在不同温度时 MTF 情况,可以看出在特征频率 25 lp/mm,中波轴上 MTF 均大于 0.5,轴外 MTF 均大于 0.2;长波轴上 MTF 在常温时大于 0.5, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均大于 0.35,全温轴外 MTF 均大于 0.2,成像质量良好。

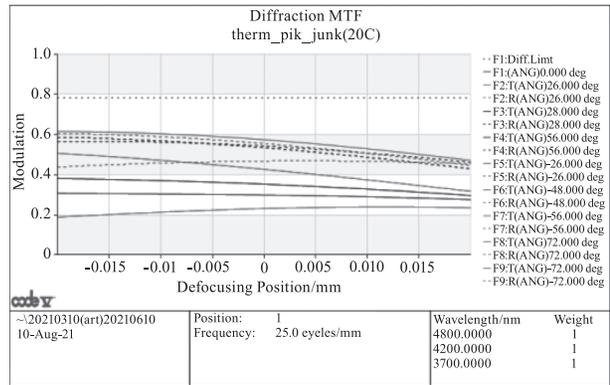


图 2 中波 MTF 离焦分析

Fig. 2 Defocus analysis of medium wave MTF

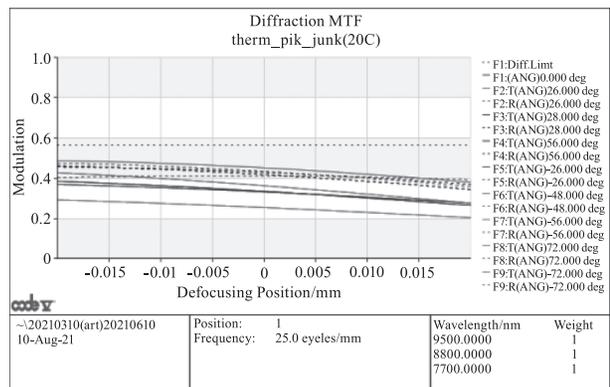


图 3 长波 MTF 离焦分析

Fig. 3 Defocus analysis of long wave MTF

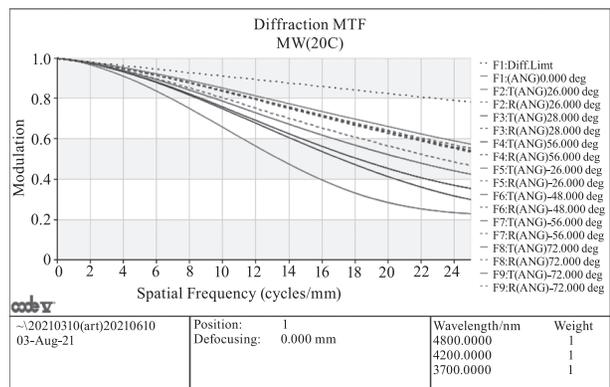


图 4 中波波段在 20 °C 时 MTF

Fig. 4 Medium wave MTF at 20 °C

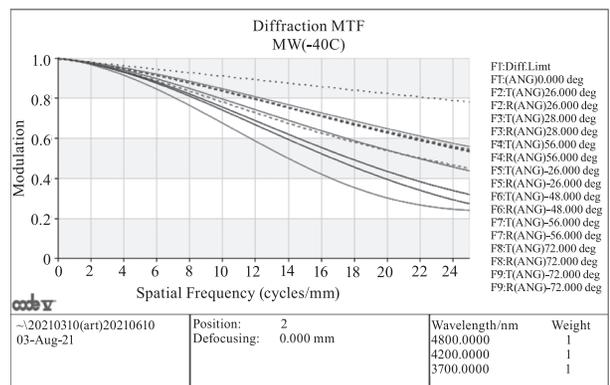


图 5 中波波段在 -40 °C 时 MTF

Fig. 5 Medium wave MTF at -40 °C

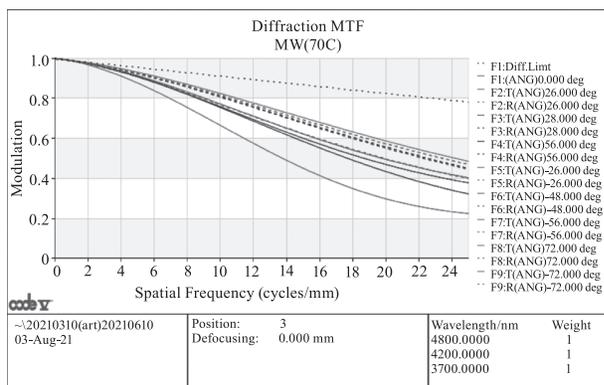


图6 中波波段在 70 °C 时 MTF

Fig. 6 Medium wave MTF at 70 °C

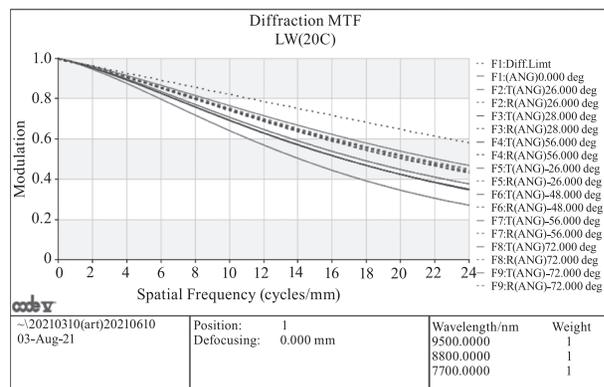


图7 长波波段在 20 °C 时 MTF

Fig. 7 Long wave MTF at 20 °C

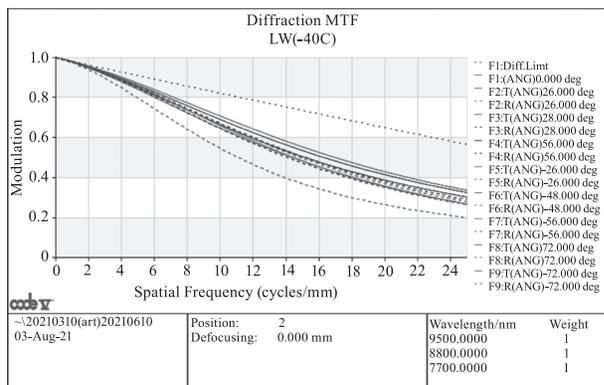


图8 长波波段在 -40 °C 时 MTF

Fig. 8 Long wave MTF at -40 °C

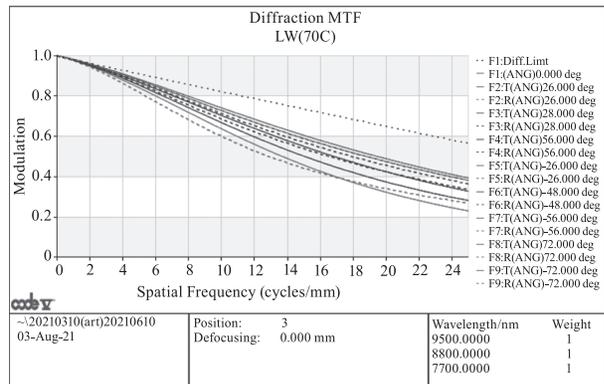


图9 长波波段在 70 °C 时 MTF

Fig. 9 Long wave MTF at 70 °C

5 结论

本文分析了制冷型红外双波段的共焦面、无热化设计方法,利用光学消热差和消热差原理,通过材料搭配和非球面技术设计了红外双波段广角无热化镜头。系统 $F/\#$ 为 1.6,可以实现 144° 广角范围内 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}/7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 波段, $-40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内光学被动无热化设计,成像质量良好,具有结构简单、透过率高、聚光能力强等特点。该系统在红外识别、告警、搜索工作中,具有广泛应用前景。

参考文献:

- [1] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Principles and techniques of photoelectric imaging [M]. Beijing Institute of Technology Press, 2010: 65 - 79. (in Chinese)
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术 [M]. 北京理工大学出版社, 2010: 65 - 79.
- [2] Hu Jie, Lu Yuan, et al. Research progress of infrared camouflage technology [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (7) : 803 - 805. (in Chinese)
胡杰, 路远, 等. 红外伪装技术研究进展 [J]. 激光与红外, 2018, 48 (7) : 803 - 805.
- [3] Ren Ning, Jiang Lixin. Development analysis of electro-optical warning technology and foreign typical equipments [J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35 (3) : 12 - 14. (in Chinese)
任宁, 姜丽新. 光电告警技术与国外典型设备发展分析 [J]. 光电技术应用, 2020, 35 (3) : 12 - 14.
- [4] Liu Lin, He Yiliang, et al. Design of a dual-band IR optic system based on harmonic diffraction [J]. Laser & Infrared, 2012, 42 (1) : 85 - 88. (in Chinese)
刘琳, 贺宜亮, 等. 基于衍射特性的红外双波段光学系统设计 [J]. 激光与红外, 2012, 42 (1) : 85 - 88.
- [5] Chang Jun, Liu Liping, Wang Yongtian, et al. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25 (3) : 170 - 172. (in Chinese)
常军, 刘莉萍, 王涌天, 等. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25 (3) : 170 - 172.
- [6] Yasuhisa Tamagawa and Toru Tajime. Dual-band optical systems with a projective athermal chart; design [J]. Applied Optics, 1997, 36 (1) : 297 - 301.