

文章编号: 1672-8785(2015)08-0001-04

大视场、大相对孔径长波红外机械 无热化光学系统设计

吴海清^{1,2} 田海霞^{1,2} 崔 莉^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院凯迈测控有限公司, 河南 洛阳 471009;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 研究了大视场大相对孔径长波红外机械无热化光学系统的设计, 设计了 8~12 μm 波段内 F 数为 0.8、温度在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内无热化的光学系统。结果表明, 该系统结构简单, 像质好, 在空间频率 20 lp/mm 处的光学传递函数值大于 0.5。

关键词: 光学设计; 红外光学; 无热化

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.08.001

Design of Mechanically Athermalized Longwave Infrared Optical System with Wide Field of View and Large Relative Aperture

WU Hai-qing^{1,2}, TIAN Hai-xia^{1,2}, CUI Li^{1,2}

(1. Measurement and Control Company Limited, China Airborne Missile Academy,

Luoyang 471009, China; 2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: The design of mechanically athermalized longwave infrared optical systems with wide field of view and large relative aperture is studied. An optical system with the F number of 0.8 is designed for the waveband of 8 to 12 μm . It is athermalized in the temperature range $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The analysis results show that the optical system is simple in structure and good in imaging quality. It has an optical transfer function greater than 0.5 at the spatial frequency of 20 lp/mm.

Key words: optical design; infrared optics; athermalization

0 引言

随着技术的发展, 非制冷红外系统的像元尺寸不断减小, 灵敏度不断提高, 价格逐步降低。因其不需要制冷机, 系统能够实现小型化, 所以, 越来越被广泛应用于安防监控、车载等领域。然而, 非制冷系统的温度分辨率较低, 探测能力较差。为提高系统的温度分辨率和探测能

力, 要求红外光学系统具有大的相对孔径, 以此提高系统的通光孔径。另外, 为适应不同地域的环境温度要求, 需要进行系统的无热化设计。

针对 384×288 元长波红外探测器, 设计了大相对孔径长波红外机械被动无热化光学系统。该系统包含两个非球面, 可实现不同温度下的被动温度补偿。系统 F 数为 0.8, 工作波段为 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$, 在空间频率 20 lp/mm 处的 MTF 值大

收稿日期: 2015-07-06

作者简介: 吴海清 (1982-), 男, 陕西榆林人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为红外光学系统设计。

E-mail: whqcust@163.com

于 0.5。其结构简单,易于装调,分辨率高,像质好。

1 设计思想及设计指标

1.1 系统参数的选择原则

红外系统的综合性能参数包括噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 和最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 等。NETD 是衡量系统在噪声中辨别小信号能力的参数,可以估计系统的灵敏度。NETD 不仅与探测器有关,而且还与成像光学系统、目标以及读出电路有关。MRTD 是综合评价热成像系统的温度分辨率和空间分辨率的重要参数,其表达式为^[1,2]

$$NETD = \frac{4(F^\#)^2 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{ab\tau} D_\lambda^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_e}{\partial T} d\lambda} \quad (1)$$

$$MRTD = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR \frac{NETD \cdot f}{MTF(N_T)} \cdot \left(\frac{\alpha\beta/\tau_d}{t_e f_p \Delta f} \right)^{(1/2)} \quad (2)$$

式中, a 、 b 为探测器的尺寸; D^* 为探测器的归一化探测率; f 为噪声等效带宽; $F^\#$ 为光学系统的 F 数; τ 为镜头的透过率; M_e 是目标的光谱辐射出射度; SNR 为信噪比, f 为系统焦距; N_T 为空间频率; MTF 为光学系统的调制传递函数; α 、 β 为瞬时视场立体角; τ_d 为探测器驻留时间; t_e 为积分时间; f_p 为帧频。由式 (2) 可知:

$$MRTD \propto \frac{(F^\#)^2}{\tau \times MTF} \quad (3)$$

由式 (3) 可知,为提高红外系统的温度分辨率即减小系统的 $MRTD$, 需要减小系统的 F 数, 提高光学系统的透过率和传递函数。在进行光学系统设计时, 应尽可能增大系统的通光孔径, 减少光学系统透镜的数量, 透镜表面镀增透膜, 以提高光学系统的透过率。此外, 在设计过程中还需尽量提高光学系统的调制传递函数。

1.2 无热化实现方式的选择

环境的温度变化会造成光学系统离焦。红外光学系统的焦深公式为 $\Delta l = \pm 2\lambda(F^\#)^2$ 。可见, 大相对孔径即小 F 数红外光学系统的焦深小, 因此, 系统离焦会引起成像质量严重下降。要保证系统在不同温度条件下成像清晰, 需要进行系统的无热化设计。

红外光学系统的无热化可分为主动无热化和被动无热化两种, 被动无热化又分为机械被动无热化和光学被动无热化两种方法。主动无热化是利用温度传感器测出温度的变化量, 计算出由温度变化引起的像面位移, 然后利用电机驱动透镜产生轴向位移, 从而实现温度补偿。主动无热化虽然降低了光学系统的设计难度, 但需要使用驱动装置, 增加了系统尺寸和重量, 并且调节精度要求较高。光学被动无热化, 是利用光学材料热特性之间的差异, 通过不同特性材料的搭配来消除温度影响, 这要求系统所使用的材料应有三种以上, 因此, 镜片数量较多, 系统的透过率较低, 相应光学系统的温度分辨率不易提高。此外, 对于长波红外系统, 所能选择的材料有限, 这会增加光学系统的设计难度。引入衍射光学, 利用其负温度特性可以减少系统所使用的材料, 简化系统设计, 但衍射面有衍射能量损失, 影响成像的质量和对比度, 降低系统的性能; 且加工费用较高, 不适于民用领域推广。机械被动无热化是当温度变化时利用结构件的膨胀和收缩来轴向移动红外光学系统中的某一片透镜或整组透镜, 从而补偿由于温度变化所引起的系统像面位移。通常, 结构件利用高膨胀系数材料与低膨胀系数材料组合, 可得到所期望的热膨胀系数。调节两种材料的长度可以保证补偿像面位移所需要的移动量^[3-5]。

本文采用机械被动无热化的方式, 实现了大视场、大相对孔径长波红外光学系统在宽温度范围内的无热化设计。

1.3 设计指标

采用 384×288 元非制冷探测器, 系统指标见表 1。

表 1 光学系统的参数

探测器	384×288 非制冷
像元尺寸	25 μm
工作波段	8~12 μm
F	0.8
焦距	19 mm
总长	≤45 mm
口径	≤30 mm
工作温度	-40℃~60℃
无热化类型	机械被动式

2 设计结果及像质分析

2.1 设计结果

经过调整优化, 设计了如图 1 所示的红外光学系统。透镜材料全部为 Ge, 其中, 第二、第三透镜的前表面为非球面。通过调节系统的后截距可实现不同温度下的被动温度补偿。结果表明, 该系统结构简单, 体积小, 成像质量良好, 满足设计指标要求。

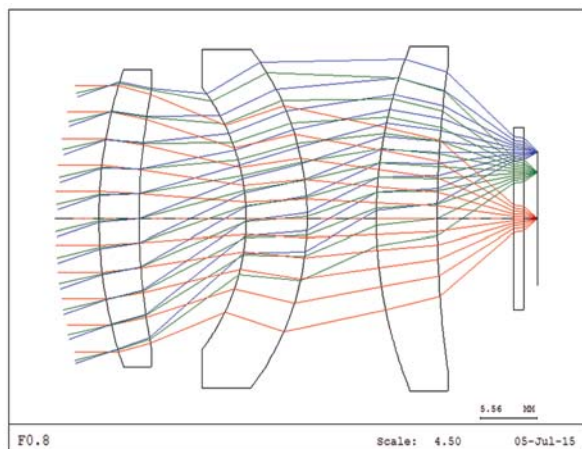


图 1 光学系统图

表 2 给出了系统在 -40℃ 和 60℃ 条件下, 调节系统的后截距需要移动的方向和距离。

表 2 不同温度下的系统离焦补偿量

温度 (°C)	调节前 (mm)	调节后 (mm)	移动方向	移动量 (mm)
20	-	7.5	-	0
-40	7.49	7.64	向左 (+)	0.15
60	7.51	7.40	向右 (-)	0.11

镜筒材料采用低膨胀系数的硬性材料如铝合金、镁合金或不锈钢。驱动透镜组移动的补偿机构选用高膨胀系数的塑性材料如聚甲醛、ABS 或尼龙。按照表 2 所给的光学参量变化规律, 根据两种材料的膨胀系数差异及所需补偿量可以计算出伸缩材料的长度。

$$\Delta L = (L_h \times \alpha_h - L_l \times \alpha_l) \times \Delta T \quad (4)$$

式中, ΔL 为所需补偿量, L_h 为高膨胀材料的长度, α_h 为高膨胀材料的膨胀系数, L_l 为低膨胀材料的长度, α_l 为低膨胀材料的膨胀系数, ΔT 为相对于常温 20℃ 的温度差。

2.2 像质分析

图 2 为系统的畸变图, 可见, 全视场 35° 时的系统畸变为 1.2%, 系统畸变小, 能满足使用要求。

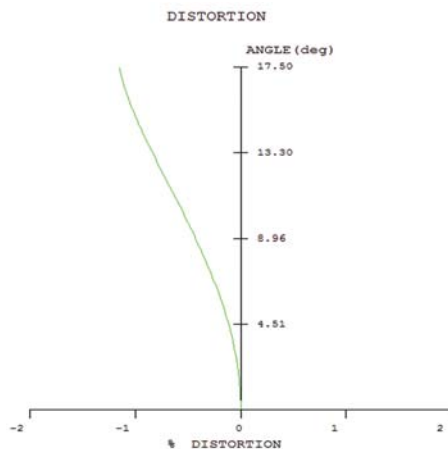


图 2 系统畸变图

图 3、图 4 和图 5 分别为系统在 -40℃、20℃ 和 60℃ 条件下的调制传递函数曲线, 横坐标和纵坐标分别为像面上的空间频率和光学系统的光学传递函数值。所选像元尺寸为 25 μm、384×288 像素的 CCD 对应的空间分辨力为 20 lp/mm 时, 系统传递函数值最低为 0.5, 表明该镜头可用于像素尺寸大于 25 μm 的面阵探测器。

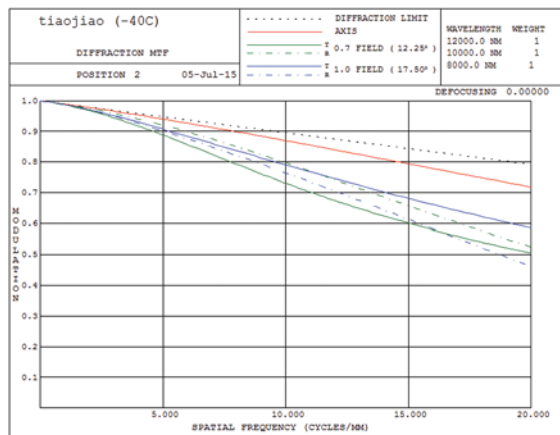
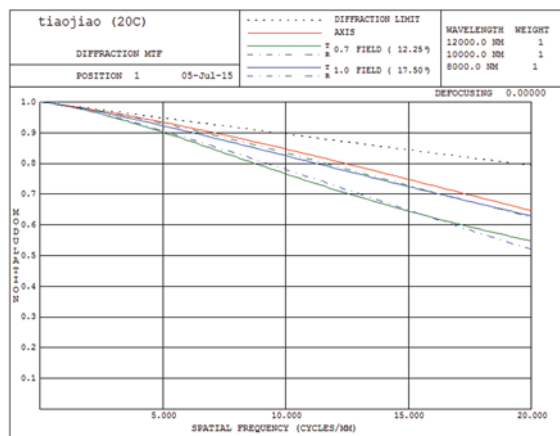
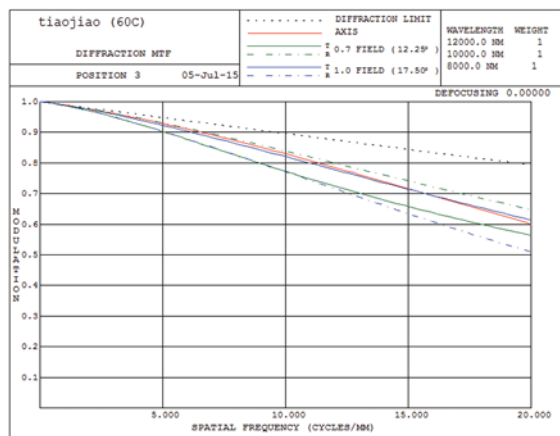
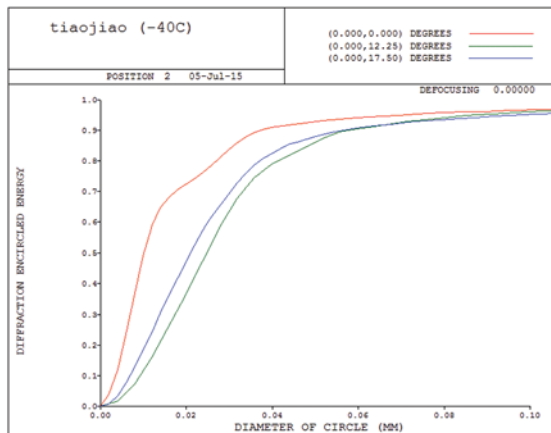
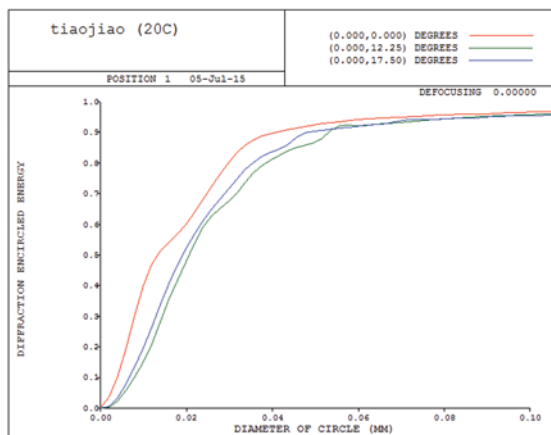
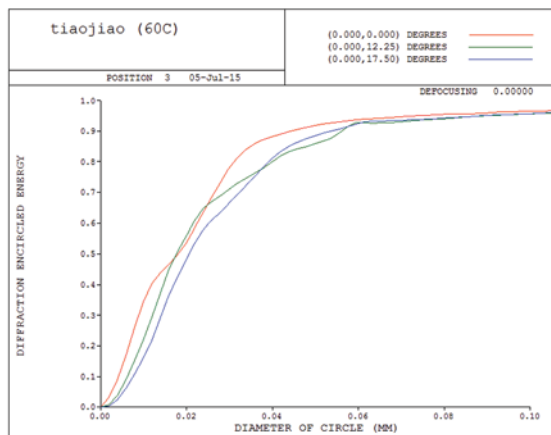
图 3 -40°C 时系统的传递函数图 4 20°C 时系统的传递函数图 5 60°C 时系统的传递函数

图 6、图 7 和图 8 分别为系统在 -40°C 、 20°C 和 60°C 温度条件下, 在接收半径为 $25\ \mu\text{m}$ 的探测器敏感元内的包围圆能量曲线。从图中可以看出, 所设计的系统 80% 的能量集中在一个

像元范围内, 能满足应用需求。

综上, 光学系统的 MTF、包围圆能量分布在不同的工作温度条件下, 图像的传递性能好, 能量集中, 此系统达到了无热化设计的目的。

图 6 -40°C 时系统的包围圆能量图图 7 20°C 时系统的包围圆能量图图 8 60°C 时系统的包围圆能量图

(下转第 8 页)