

文章编号: 1005-5630(2015)04-0319-05

大相对孔径非制冷红外光学系统无热化设计

林 琳¹, 门克内木乐², 解晓蓬¹, 郭 晶¹

(1. 内蒙古大学 物理科学与技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010021;

2. 内蒙古大学 鄂尔多斯学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 针对当前军工红外成像仪器小型化及宽温度适应性的需要, 采用光学被动式无热化方法对 8~12 μm 波段设计了一款镜头。该镜头 F 数为 1、焦距为 40 mm、视场为 16.8°、温度适应范围为 -40~65 $^{\circ}\text{C}$ 。设计结果显示, 在要求的温度范围内, 系统无需调焦, 像质接近衍射极限, 达到无热化的性能要求。

关键词: 红外光学系统; 无热化; 大相对孔径

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.008

The optical design of the uncooled infrared thermal detection device

LIN Lin¹, MENKE Neimule², XIE Xiaopeng¹, GUO Jing¹

(1. School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021;

2. Ordos College, Inner Mongolia University, Erdos 017000, China)

Abstract: To meet the needs of the current military infrared imaging instrument, we designed a lens for 8~12 μm wave band with uncooled optical passive method. The specific parameter, F is 1, focus is 40 mm, field of view is 16.8°. The design results are achieved within the scope of the -40~65 $^{\circ}\text{C}$, as close to the diffraction limitation. The system does not need focus. The athermalization performance is good.

Keywords: the infrared optical system; athermalization; large relative aperture

引 言

随着红外成像技术的发展, 对于红外成像系统在复杂环境中的适应性提出了越来越高的要求。针对特殊环境应用的红外成像系统, 需要系统在大的温度变化范围内成像稳定, 因此需要系统在设计时采取无热化技术^[1]。

温度变化对红外光学系统的影响主要表现在三个方面: 第一, 温度发生变化会引起红外材料的折射率发生变化, 导致通过光学系统的光程发生改变, 降低光学系统的成像质量; 第二, 温度变化会引起红外材料光学元件的厚度、空气间隔以及折射面的面形发生改变, 也会降低光学系统的成像质量; 第三, 温度的变化会引起光学系统金属结构件材料的收缩, 进而造成光学元件之间间隔的变化^[2]。

在设计红外成像系统的过程中, 通过使用一定的设计方法来补偿温度变化对系统成像质量的影响, 这样的设计方法称为无热化技术。目前无热化技术主要包括机械被动式无热化技术、机电主动式无热化

收稿日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61205127, 61167004)

作者简介: 林 琳(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电子技术方面的研究. E-mail: 399583358@qq.com

技术、光学被动式无热化技术、光学被动式和机电式相结合技术等,其中,光学被动式无热化技术可以适应和实现目前军工级别红外系统对于小型化、轻量化和温差大的要求,因此被广泛采用^[3]。

本文针对当前军工红外成像仪器小型化的需要,使用 640×480 像元的非制冷型探测器,在 $-40 \sim 65$ °C 的温度范围内利用光学被动式无热化方法,对 $8 \sim 12$ μm 波段设计了一款 F 数为 1、焦距为 40 mm、视场为 16.8° 的镜头。

1 光学被动式无热化设计原理

光学被动式无热化的基本原理是利用不同材料具有不同热效应的特点,在光学系统中将具有不同特性的光学材料进行合理组合,以便使温度对焦距、像面位置和像质的影响减到最小,达到热补偿的目的^[4]。例如,将折射率温度系数变化大的材料的焦距设为较小的正值,折射率温度系数小的材料的焦距设为较大的负值,同时保证想要的组合光焦度,将这样的光学材料组合使用,通过合理分配光焦度就可以减小系统的热焦移,使其移动的范围在焦深之内,或者完全补偿^[5]。这种无热化原理其实与校正色差的原理是相似的,而它们的区别仅在于热补偿的是由温度变化导致材料折射率变化从而使系统产生像差,而色差是由不同波长成像位置不同而产生的像差。

热稳定光学系统需满足方程

$$\varphi = \sum_{i=1}^N h_i \varphi_i \quad (1)$$

式中: N 为透镜总数; h_i 为第一近轴光线在各透镜的投射高度; φ_i 为各透镜的光焦度; φ 为总光焦度。

系统消色差公式

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^N (h_i^2 v_i \varphi_i) = 0 \quad (2)$$

式中: f_b 为系统后焦距; v_i 为各透镜的色差系数; Δf_b^T 为系统在工作温度为 T 时后焦距的变化量, T 的取值为系统的工作温度范围。

系统消热差公式

$$\frac{df_b^T}{dT} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^N (h_i^2 \chi_i \varphi_i) = \alpha_h L \quad (3)$$

式中: $\frac{df_b^T}{dT}$ 为系统在温度为 T 时的后焦距对温度 T 的导数; χ_i 为各透镜的热差系数; α_h 为机械结构的线膨胀系数; L 为机械结构件长度。

对于折射元件,其消热差系数为

$$\chi_r = \frac{dn}{n-1} - \alpha_L \quad (4)$$

式中: α_L 是材料本身的线膨胀系数; n 为材料折射率。

对于衍射元件,其消热差系数为

$$\chi_d = 2\alpha_L \quad (5)$$

光学被动式无热化不需要移动任何组件,也不用电子元件,是一种很好的热补偿方法。这种技术可以在任何温度下都不会离焦,可在温度大幅度变化的环境下使用,同时能保证系统的可靠性。综合考虑透镜材料的热常数和镜筒材料热膨胀系数对系统的影响,使得它们产生的像面移动保持一致,这样既能很好达到消热差的效果,也能使系统结构简单。由于各种材料的热膨胀系数和温度系数不同,所以需要进行材料组合的选择。本光学系统由 4 种材料组成:锗、硒化锌、硫化锌和 AMTIR-1(锗砷硒玻璃),镜筒材料选择铝,铝的热性能参数为 $213.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。不同材料的性能如下:

(1) 锗是最常用的红外材料,它的化学性能稳定。锗单晶的直径可以达到 250 mm,锗的光学特性是,用于长波时,锗的色散较小,用在双胶合透镜中作为正透镜使用。锗在长波波段使用时,折射率大于 4.0,

因此可以设计成较大的曲率半径以利于矫正像差。温度对于锗的折射率影响较大,所以使用锗作为透镜材料,在温差变化大的环境中,就需要有温度补偿系统。锗的物理性质是很脆、易碎,在加工、镀膜和装调过程中需谨慎处理。

(2) 硒化锌比硫化锌折射率高,广泛用于高功率二氧化碳激光器,由于材质较软,所以在使用时要镀高强度的增透膜,以提高硬度和透过率。

(3) 硫化锌在光照的条件下会变为微黄色,一般使用气相沉积的方法加工,在红外波段很常用。

(4) 在锗、砷、硒按不同比例熔炼得到的材料中,有一种称为 AMTIR-1,这种材料透过率很好,温度系数为锗的四分之一,一般用于热离焦方面。

常用红外材料的特性见表1,表中折射率对应的光波长为 $10\ \mu\text{m}$ 。

消热差设计过程包括以下几个步骤:

(1) 计算出最高预计温度和最低温度时空气的折射率(即工作环境下的空气折射率);

(2) 把与空气有关的折射率目录资料中的值转换为绝对值,即将它们乘以不用温度下空气的折射率;

(3) 使用厂家提供的 $\frac{dn}{dt}$ 值,计算玻璃在极端温度条件下的绝对折射率;

(4) 应用已知的光学材料的热膨胀系数,计算极端温度条件下的表面半径(不同气压不同温度下);

(5) 使用已知光学材料和机械材料的热膨胀系数,计算出极端温度条件下的空气间隔和零件厚度;

(6) 评价系统在极端温度条件下,调整到像质最佳位置处的性能;

(7) 为了在极端温度时可以调整选定的零件间隔,即将图像恢复到正确的位置,要进行必要的机械结构设计;

(8) 在极端温度状态下,对补偿后系统的性能进行评估。

以上几个步骤有利了解系统性能在不同条件下的最佳效果^[6]。

2 光学系统设计

2.1 光学系统设计指标

本系统采用 640×480 像元的面阵探测器,像元尺寸为 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$,根据整机需求,使用 480×480 像元的内切圆作为像面,其余像元用于电子学非均匀性校正。经过计算,光学系统设计参数如表2所示。

2.2 设计结果

对于红外光学材料的加工,除自由曲面和衍射面外其他面型的加工技术均已经成熟。因此在设计时,系统第1、3、5面采用高次非球面,通过引入高次非球面使系统的镜片数量减少到5片,系统的总长为58.4 mm,后工作距为11.7 mm,总质量87 g,实现了系统的小型化、轻量化要求。光学系统的设计结果图如图1所示。

2.3 像质评价

系统的MTF曲线如图2~4所示,从上到下依次为 $12\ ^\circ\text{C}$ 、低温 $-40\ ^\circ\text{C}$ 和高温 $65\ ^\circ\text{C}$ 的MTF曲线图。由图可以看出,系统在各个温度下的光学传递函数,在 $20\ \text{lp/mm}$ 处值分别为0.688、0.624、

表1 红外材料的光学特性

Tab. 1 The optical properties of infrared materials

材料	折射率	$dn/dt / ^\circ\text{C}$
锗	4.003 2	0.000 369
硅	3.417 9	0.000 150
硫化锌	2.200 5	0.000 0433
硒化锌	2.406 5	0.000 060
AMTIR-1	2.487 6	0.000 072

表2 光学系统设计参数

Tab. 2 Parameters of optical system design

参数	参数值
焦距	40 mm
相对孔径	1
视场角	16.8°
波段	$8\sim 12\ \mu\text{m}$
工作温度	$-40\sim 65\ ^\circ\text{C}$

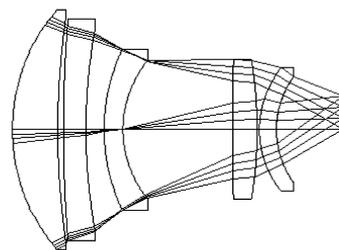


图1 光学系统图

Fig. 1 Optical system

0.581, 接近衍射极限。根据军工长波红外系统的应用经验, 系统加工完成后的光学传递函数值在 0.3 以上均可使用, 因此本系统的设计结果满足使用要求。系统的点列图如图 5~7 所示, 从上到下依次为 12 °C、低温 -40 °C 和高温 65 °C 的点列图。

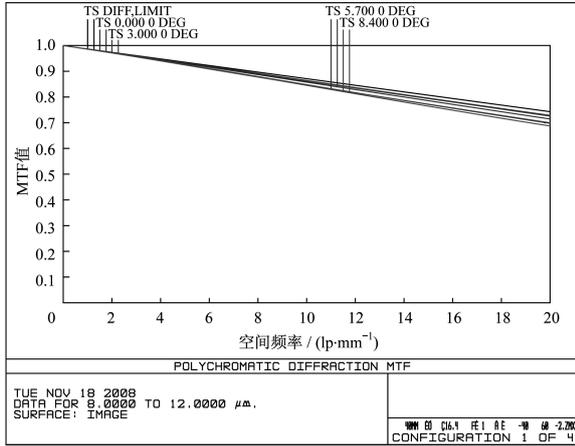


图 2 常温 12 °C 时 MTF 曲线图

Fig. 2 MTF at 12 °C

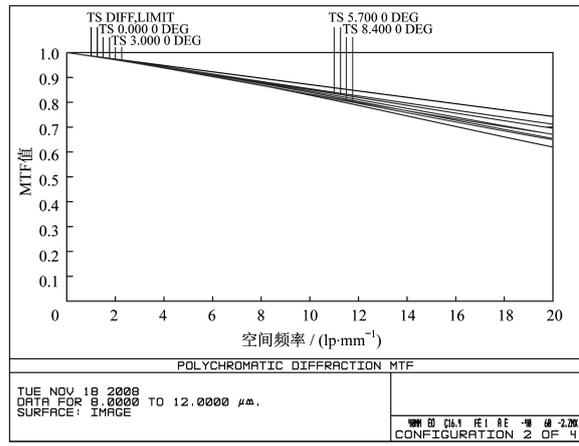


图 3 低温 -40 °C 时 MTF 曲线图

Fig. 3 MTF at -40 °C

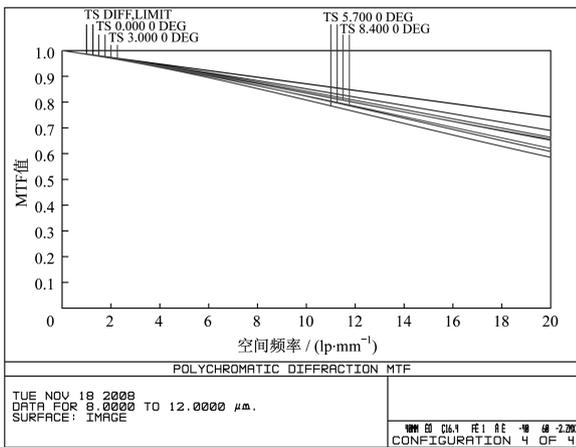


图 4 高温 65 °C 时 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF at 65 °C

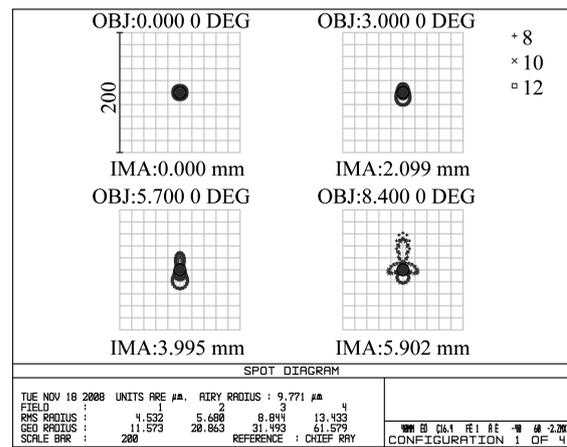


图 5 12 °C 时点列图

Fig. 5 Spot diagram at 12 °C

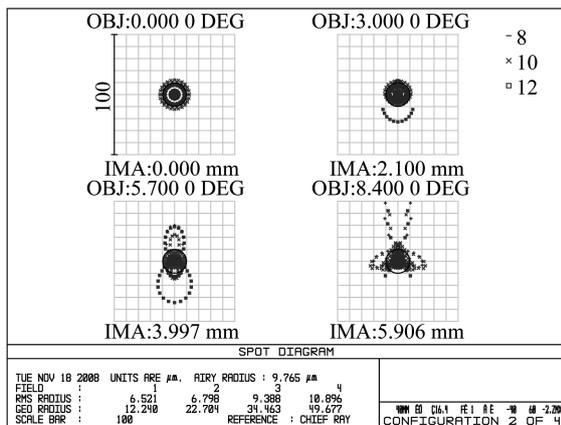


图 6 低温 -40 °C 时点列图

Fig. 6 Spot diagram at -40 °C

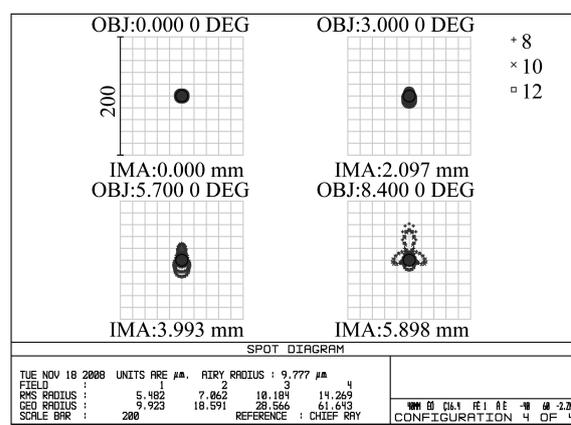


图 7 高温 65 °C 时的点列图

Fig. 7 Spot diagram at 65 °C

由图5~7不同温度下的点列图可以看出,系统在各个温度下所有视场80%的能量都集中在半径为 $14.3\ \mu\text{m}$ 的圆内。根据所选探测器像元大小 $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ 、外接圆半径 $17.7\ \mu\text{m}$,80%能量集中的范围略大于像元尺寸的内接圆、小于像元尺寸的外接圆。由此可见,本光学系统在 $-40\sim 65\ ^\circ\text{C}$ 之间满足成像系统对像质的要求,实现了无热化设计。

考虑工程使用需要,需要对系统进行公差分析,由于系统在 $-40\sim 65^\circ$ 实现了无热化,因此针对 12° 设计结果进行公差分析即可。公差分析考虑国内目前的加工能力,公差设定如下:球面的光圈数设定为3,局部光圈设定为0.5,面倾角设定为 $50''$,面偏心设定为 $0.01\ \text{mm}$,非球面的面型精度 $PV<0.3\lambda$,厚度公差设定为 $0.02\ \text{mm}$,零件装配误差的倾角设定为 $1'$,偏心设定为 $0.01\ \text{mm}$ 。按照国内目前的装调水平,选择能够装调成功,且成品率较高情况下的结果作为评判标准,公差分析后的MTF曲线如图8所示。

从结果分析看,各个视场在公差分析后的MTF值最小为0.492,仍大于军工长波红外系统MTF的应用经验值0.3以上,因此本系统的设计结果符合实际要求,可以应用在军工项目上。

3 结论

本文基于光学被动式无热化理论,设计了非制冷型长波红外大相对孔径的光学系统。设计结果表明在 $-40\sim 65\ ^\circ\text{C}$ 工作温度范围内系统满足消热差的要求。而且光学系统的结构紧凑、体积小,满足我国当前军工红外仪器小型化、轻量化的要求。

参考文献:

- [1] 李树宏,张士明,朱佳丽,等. 非制冷红外物镜设计中最佳波段的选择[J]. 光学仪器,2008,30(6):60-63.
- [2] 张鑫,贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计[J]. 中国光学,2011,4(4):374-379.
- [3] 奚晓,李晓彤,岑兆丰. 被动式红外光学系统无热设计[J]. 光学仪器,2005,27(1):42-46.
- [4] STONE T,GEORGE N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. Applied Optics,1988,27(14):2960-2971.
- [5] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学,2006,27(1):32-34.
- [6] MANN A. Design and analysis of a compact wide-field unobscured zoom mirror system[J]. SPIE,1997,3129:97-107.

(编辑:刘铁英)

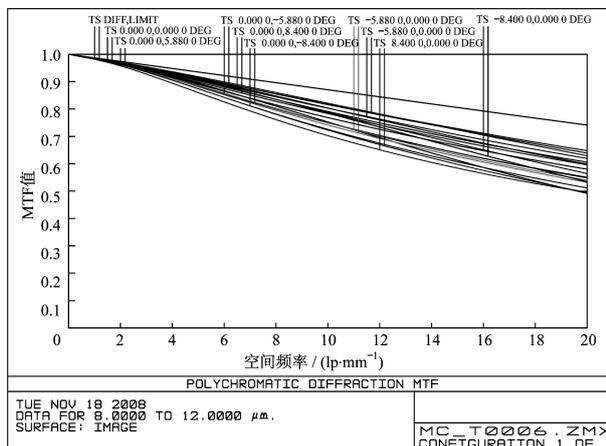


图8 公差分析过程中的MTF曲线图

Fig. 8 MTF in tolerance