

文章编号: 1672-8785(2019)03-0001-05

微型长波红外无热化光学系统设计

吴海清^{1,2} 曾宪宇¹ 王 朋¹

(1. 凯迈(洛阳)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: 为了使微小型无人机光电吊舱能够实现红外热成像系统小型化并适应不同的环境条件, 基于光学被动无热化方式, 通过合理分配不同材料透镜的光焦度并同时引入衍射面, 设计了一种工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 、视场为 $24.5^\circ\times 19.7^\circ$ 、 F 数为 1.0 的非制冷无热化红外成像光学系统。该系统由四片透镜组成, 其总重量仅为 35 g。光学系统的总长度为 38 mm。结果表明, 本文系统具有结构简单紧凑、后截距大、成像良好等特点, 在 30 lp/mm 空间频率处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.3, 满足应用需求。

关键词: 微型吊舱; 光学设计; 红外光学; 衍射光学

中图分类号: O439; TH74 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.03.001

Design of Miniature Long-Wave Infrared Optical System With Optical Passive Athermalization

WU Hai-qing^{1,2}, ZENG Xian-yu¹, WANG Peng¹

(1. CAMA (Luoyang) Measurement and Control Co., Ltd., Luoyang 471009, China;

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

Abstract: In order to meet the requirements of miniaturization of thermal imaging system and different environmental conditions in the electro-optic POD of micro-mini UAV, an uncooled infrared imaging optical system with field of view of $24.5^\circ\times 19.7^\circ$ was designed by means of optical passive athermalization, reasonable distribution of focal degrees of lenses with different materials and introduction of a binary optical element. Its operating wavelength range is from $8\ \mu\text{m}$ to $12\ \mu\text{m}$, F number is 1.0. The system consists of four lenses with a total weight of only 35 g, and the total length of the optical system is 38 mm. The result shows that the system structure is simple and compact, the back working distance is large, and the imaging quality is high. The modulated transfer function (MTF) value at the cutoff frequency of 30 lp/mm is greater than 0.3, which satisfies the application requirements.

Key words: miniature POD; optical design; IR optics; diffractive optics

收稿日期: 2019-02-15

作者简介: 吴海清(1982-), 男, 陕西榆林人, 工程师, 硕士, 主要从事成像光学系统设计方面的研究。

E-mail: whqcust@163.com

0 引言

当前,小型无人机通过携带微型光电吊舱并利用其装载的红外成像系统,可以完成全天候的侦察和航拍等任务,因此在军民领域均得到了广泛应用。然而,由于微小型无人机由电池供电,其搭载的光电吊舱的重量是影响续航能力的重要因素。所以设计小型化红外成像系统具有重要意义^[1]。与制冷红外成像系统相比,非制冷红外成像系统具有体积小、重量轻等特点,在微型光电吊舱系统中更具优势。图1为美国航宇环境公司生产的“大乌鸦”无人机及其搭载的配有非制冷长波红外热像仪的Mantis i23微型光电吊舱系统。该系统的重量为450 g,工作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ ^[2]。

所有光学材料的折射率、透镜厚度及表面面形均会随环境温度变化。与可见光材料相比,红外材料的热效应尤为明显,使得透镜的光焦度发生变化,导致光学系统产生离焦,从而造成系统成像质量下降。因此,为了保证小型无人机携带微型光电吊舱时在不同地域、不同环境温度条件下均能正常成像,需要对红外光学系统进行无热化设计^[3]。

本文针对目前广泛使用的像元尺寸为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的 640×512 元非制冷长波红外探测器,设计了一种视场为 $24.5^{\circ}\times 19.7^{\circ}$ 的微型非制冷长波红外成像光学系统。该系统适用于车载辅助驾驶热像仪、微型无人机吊舱、安防监控等领域。



图1 Raven® RQ-11A/B 微型无人机及其吊舱系统

1 设计思路及指标

1.1 光学系统的设计思路

在对红外光学系统进行无热化设计时,主要有以下几种实现方式:(1)机械主动无热化。

采用温度传感器测出环境温度的变化量,然后计算由此温度变化产生的像面位移量,并利用电机驱动透镜沿光轴方向移动,从而实现温度补偿。(2)机械被动无热化。在光学系统的结构设计中,利用高膨胀系数材料与低膨胀系数材料的相互配合,调节两种材料的长度,通过不同膨胀系数材料的膨胀和收缩,使得红外光学系统中的一组或整组透镜沿光轴方向移动,从而实现温度补偿。(3)光学被动补偿法。利用不同光学材料所具有的热特性差异,通过多种不同特性光学材料及结构材料的配合,可以实现温度补偿^[4]。

机械主动无热化光学系统需要用电机驱动,不利于光学系统的小型化设计,且可靠性不高;机械被动无热化光学系统在结构设计时需要有基于高膨胀材料的内筒和基于低膨胀材料的外筒,不利于实现小型化;光学被动无热化光学系统具有结构简单可靠、装配效率高等特点,适用于大批量生产。传统的光学被动无热化光学系统都是采用多种材料来实现的,因此镜片数量较多。由于折射元件的光热膨胀系数一般为负值,而衍射元件的光热膨胀系数始终为正值^[5],所以在光学被动无热化设计时引入衍射面,在减少系统镜片数量、减小体积、降低重量等方面具有重要意义,使得光学系统的微型化设计具有可行性。

1.2 光学系统的设计指标

表1列出了针对目前广泛应用的 640×512 元非制冷红外探测器设计的光学系统的性能参数。

表1 系统设计参数

参数	技术指标
探测器	640×512 元(非制冷型)
像元尺寸	$17\text{ }\mu\text{m}$
工作波段	$8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$
F 数	1.0
焦距	25 mm
视场	$24.5^{\circ}\times 19.7^{\circ}$
温度范围	$-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$

2 设计结果及像差分析

根据上述基本设计思路,建立了光焦度为

“+ - - +”的初始光学结构模型, 然后利用光学设计软件对其进行了优化, 最终设计出了一种由四片透镜组成的光学无热化红外光学系统。第一片和第三片透镜采用的光学材料为 ZnSe, 第二片和第四片透镜采用的光学材料为 Ge。这四片透镜的总重量为 35 g, 光学系统的总长度为 38 mm。其中第三片透镜的后表面采用非球面, 第一片透镜的后表面采用衍射非球面。

图 2 为本文设计的光学系统图。图 3~图 5 所示分别为本文系统在 +20 ℃、-40 ℃、+60 ℃下的垂轴像差曲线。可以看出, 该系统的垂轴像差小于 48 μm。图 6~图 8 所示分别为本文光学系统在 +20 ℃、-40 ℃、+60 ℃下的 MTF 曲线。可以看出, 当空间频率为 20 lp/mm 时, 该系统的全视场 MTF 均不小于 0.3。图 9~图 11 分别为本文光学系统在 +20 ℃、-40 ℃、+60 ℃下的点列图。可以看出, 该系统的均方根弥散斑直径均接近探测器的像元尺寸。

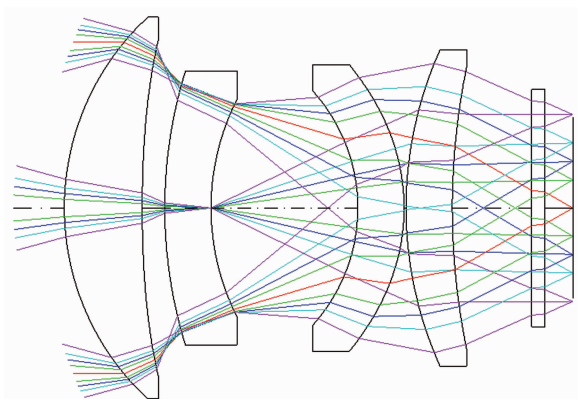


图 2 光学系统图

3 衍射面面型

CODE V 光学设计软件中的衍射非球面面型满足式(1):

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + HOR \left[\frac{C_1r^2 + C_2r^4 + C_3r^6}{n - n_0} - \frac{\lambda_0}{n - n_0} \right] \times \text{int} \left(\frac{C_1r^2 + C_2r^4 + C_3r^6}{\lambda_0} \right) \quad (1)$$

式中, c 为曲率; r 为垂直光轴方向上的径向

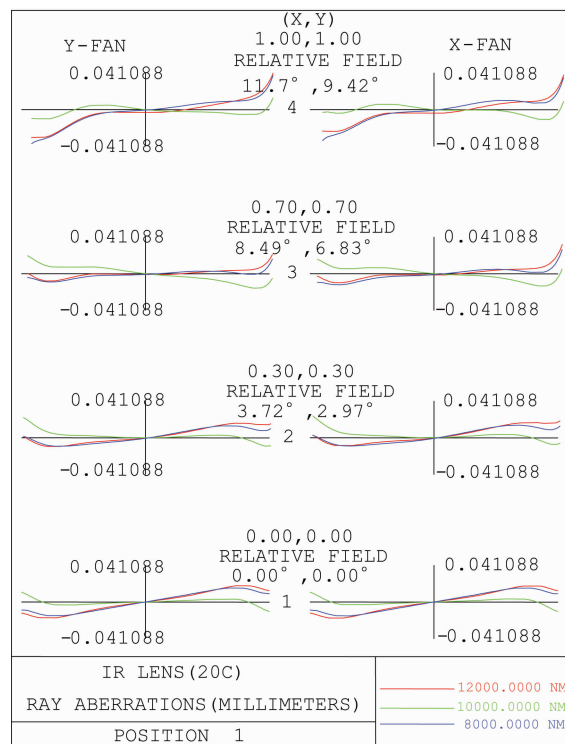


图 3 +20 ℃下本文系统的像差曲线

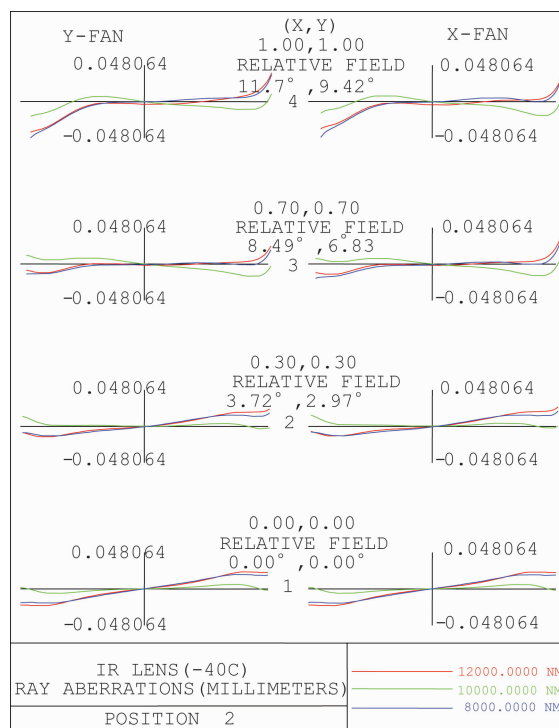


图 4 -40 ℃下本文系统的像差曲线

坐标; k 为二次曲线常数; A 为四阶非球面系数; B 为六阶非球面系数; C 为八阶非球面系数; D 为十阶非球面系数; HOR 为衍射级

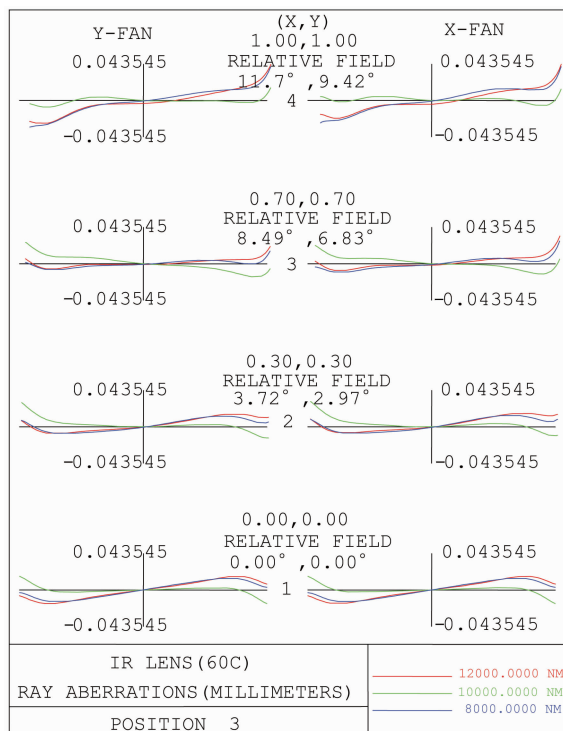


图 5 +60 °C 下本文系统的像差曲线

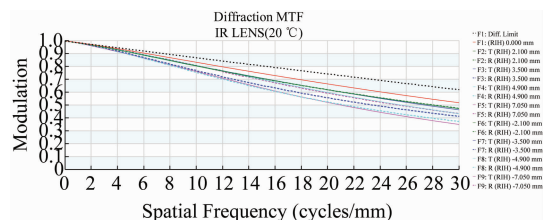


图 6 +20 °C 下本文系统的 MTF 曲线

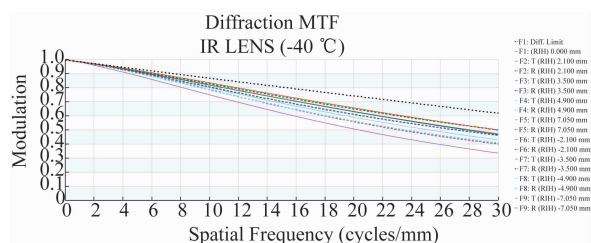


图 7 -40 °C 下本文系统的 MTF 曲线

次； C_1 、 C_2 、 C_3 为衍射面系数； λ_0 为设计中心波长； n 为透镜的折射率； n_0 为空气折射率。

图 12 所示为第一片 ZnSe 透镜后表面的衍射非球面相位周期。其中，最大环带数为 21，相应的最小线宽为 $310 \mu\text{m}$ 。基于现有的制作工艺，通过金刚石车床可以加工上述衍射非球面。

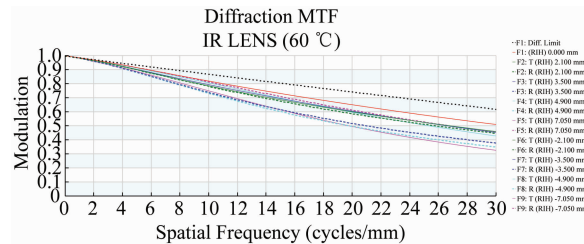


图 8 +60 °C 下本文系统的 MTF 曲线

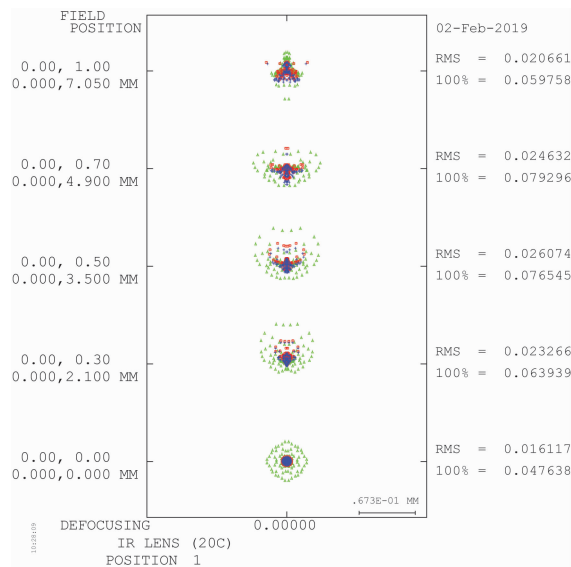


图 9 +20 °C 下本文系统的点列图

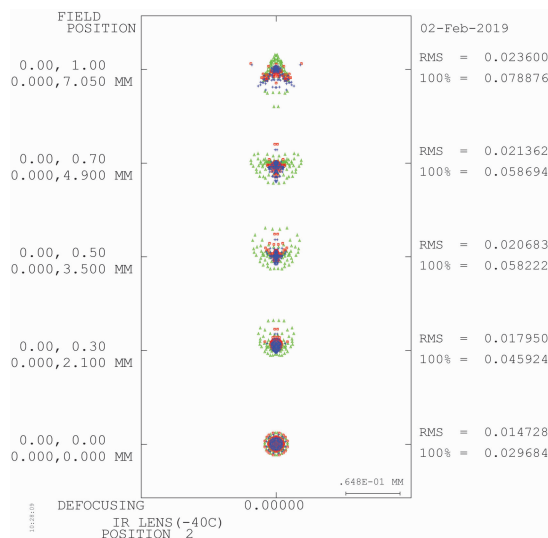


图 10 -40 °C 下本文系统的点列图

4 公差分析

光学系统设计完成后，要绘制光学系统图和光学部件图等。除了给出系统的结构参数以外，图中还需要根据不同加工公差对系统的影响

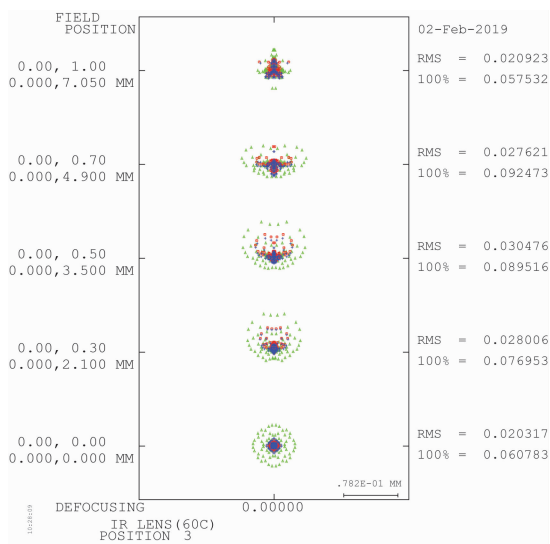


图 11 +60 °C 下本文系统的点列图

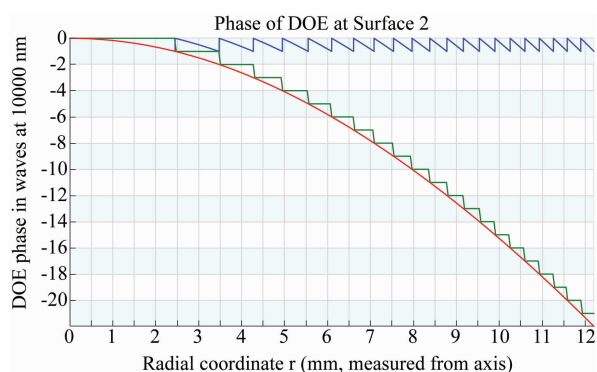


图 12 衍射面相位周期与径向距离的关系图

响给出系统的加工公差。下面对这种红外光学系统的加工公差进行分析。首先列出加工公差的定义(见表 2)。

在分析该系统的公差时, 将最后一片透镜到像面的距离作为公差补偿项。厚度补偿的最

表 2 光学系统的主要公差值

公差名称	公差类型	公差值
DLF	光圈	5
DLT	厚度公差	± 0.02 mm
DLX	x 方向偏心	± 0.02 mm
DLY	y 方向偏心	± 0.02 mm
TRX	x 方向倾斜	± 0.025 mm
TRY	y 方向倾斜	± 0.025 mm
DSX	元件 x 偏心	± 0.025 mm
DSY	元件 y 偏心	± 0.025 mm
BTX	元件 x 倾斜	± 0.005 rad
BTY	元件 y 倾斜	± 0.005 rad

小值为 -0.2 mm, 最大值为 0.2 mm。图 13 中, 横坐标为 MTF, 纵坐标为发生概率。可以看出, 按前面给定的公差进行加工和装配时, 约 80% 产品的 MTF 值能够达到 0.25 以上, 表明本文设计满足指标要求。

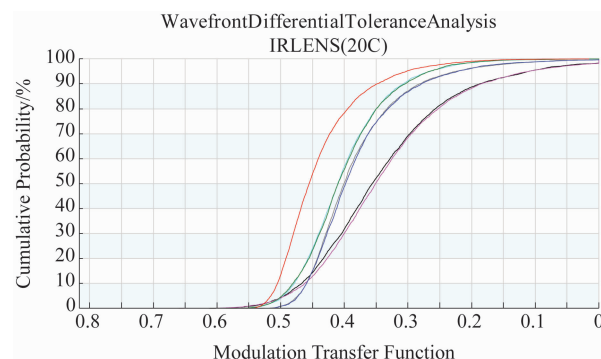


图 13 公差曲线

5 结束语

本文对微型红外光学系统的无热化设计进行了研究。针对目前广泛使用的像元尺寸为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的 640×512 元非制冷长波红外探测器, 设计了一种视场为 $24.5^\circ \times 19.7^\circ$ 的非制冷长波红外成像光学系统。其中, 四片透镜的总重量为 35 g , 光学系统的总长度为 38 mm 。结果表明, 该系统适用于车载辅助驾驶热像仪、微型无人机吊舱以及安防监控等领域。

参考文献

- [1] 李萍, 陈吕吉, 董明礼. 用于无人机的长波红外消热物镜设计 [J]. 红外技术, 2012, 34(4): 205–208.
- [2] 李煜, 陆强, 白丕绩, 等. 非制冷红外成像系统在陆军装备中的应用现状及趋势 [J]. 红外技术, 2017, 39(7): 581–593.
- [3] 崔莉, 赵新亮, 李同海, 等. 无调焦非制冷红外光学系统的无热化设计 [J]. 红外技术, 2010, 32(4): 187–190.
- [4] 吴海清, 田海霞, 崔莉, 等. 大视场、大相对孔径长波红外机械无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2015, 36(8): 1–4.
- [5] 吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼镜头光学系统设计 [J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1533–1536.