

轻小型长波红外光学系统的设计及实现

郝思远^{1,2}, 谢佳楠¹, 温茂星¹, 王跃明¹, 袁立银^{1*}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 无人机载光电吊舱对其载荷体积重量的要求苛刻, 为了满足 8~12.5 μm 红外探测需求, 设计并实现了一种轻巧紧凑的长波红外光学系统。系统 F 数为 2, 口径为 150 mm, 总视场为 2.34°。光学系统采用二次成像折反射式结构, 将常用的卡式主系统简化为折叠牛顿式主系统, 将球面次镜简化为平面镜折叠光路, 轴外像差通过非球面校正镜组校正。主系统采用全铝光机结构, 结合后光路的光机材料匹配, 在工作环境温度范围内, 光学设计传函高于 0.41@17 lp/mm, 具有 100% 冷屏效率, 而体积仅为 $\Phi 152 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。整机装调后, 全视场传函高于 0.24@17 lp/mm, 像质清晰, 满足预期。光学系统设计巧妙、结构轻小紧凑、加工装调成本低。设计思路和研制方法可为类似应用的无人机载光电吊舱长波红外仪器的光学系统提供参考。

关键词: 光学设计; 长波红外; 折反式; 冷屏效率; 轻小型

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200031

Design and realization of light and small long-wave infrared optical system

Hao Siyuan^{1,2}, Xie Jianan¹, Wen Maoxing¹, Wang Yueming¹, Yuan Liyin^{1*}

- (1. Key Laboratory of Space Active Optical-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China ;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The requirements on its load volume and weight are strict for unmanned airborne photoelectric pod. In order to meet the needs of 8-12.5 μm infrared detection, a lightweight and compact long-wave infrared optical system was designed and realized. The F number of the system was 2, the diameter was 150 mm, and the total field of view was 2.34°. A twice focusing reflection-refraction structure was used as the optical system structure. It simplified the commonly used Cassegrain-type main system into a folded Newton-type main system, and simplified the spherical secondary into a plane mirror folding optical path. The off-axis aberrations were corrected by the aspherical correction lens group. An all-aluminum optical-mechanical structure was designed for the main system, combined with the optical-mechanical material matching of the rear optical path. In the temperature range of the working environment, the designed MTF of the system was more than 0.41@17 lp/mm, with 100% cold stop efficiency, and the volume was only $\Phi 152 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$. After final alignment, the MTF of the instrument

收稿日期: 2020-01-17; 修订日期: 2020-02-08

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (2017286); 国防预研基金 (Y7K001B2N2)

作者简介: 郝思远 (1993-), 男, 硕士生, 主要从事红外光学设计理论及技术方面的研究工作。Email: xuanwohsy@163.com

通讯作者: 袁立银 (1981-), 女, 研究员, 博士, 主要从空间光学与光谱成像技术方面的研究工作。Email: yuanliyin@mail.sitp.ac.cn

was more than 0.24@17 lp/mm, and the image quality was clear and met expectations. The optical system was smartly designed, so the structure was light and compact, and the cost of manufacture and alignment was low. The design ideas and development methods can provide a reference for the optical systems of long-wave infrared instruments of unmanned airborne photoelectric pods for similar applications.

Key words: optical design; longwave-infrared; catadioptric; cold stop efficiency; light and small

0 引言

长波红外 8~14 μm 光谱区域既是大气窗口,也是常温物体热辐射能量的集中波段。在此区域工作的被动式光电系统主要探测目标自身的热辐射,可全天时工作、无源、隐蔽性好,军事上可用于目标侦察、捕获及跟踪等,也可用于森林火灾预警、夜间安全监视及搜索救援等应用领域。遥感应用的长波红外探测仪器,通常搭载在卫星、飞机及无人机等平台^[1-2]上,近年来,无人机应用研究热潮涌起,美国不断推进无人机载多光谱成像传感器的使用,2018年3月,美国海军陆战队首次部署小型四旋翼即时眼无人机,飞行高度可达 3 657.6 m,搭载了 3 个红外光电传感器和 1 个前视热红外传感器。2018年7月,俄罗斯 Zala 公司借助激光雷达更好的态势感知和更快的数据收集能力,首次在无人机上部署了激光雷达。目前,以色列拉法尔公司的“无人机穹”搭载的 MEOS 光电传感器,可以实现 3.2 km 外最小尺寸为 20 cm² 的目标探测,瞬时视场为 0.14 mrad^[3]。适用于无人机的光电载荷在功能和性能上发展迅速,能昼夜实时获取高质量的图像和数据,很大程度上提升了侦察监视和目标捕获的能力。然而,由于无人机的携带能力有限,要求载荷性能高、质量轻、体积小,同时面向商业和大规模批量化应用时,亦具备成本低的特点。光电吊舱由于具备姿态大范围高精度可控的优势,在无人机平台上应用较多,而安装在光电吊舱中的光电仪器,其体积和重量约束更为苛刻,其光学系统需要考虑轻小紧凑型的设计。

随着红外光学系统小型化、轻量化的发展趋势,往往使光学镜片的面型更复杂,同时对锗和硒化锌等红外硬脆性材料的光学表面的微观质量也提出了更高的要求。目前,单点金刚石车削技术已经广泛应用于红外光学零件的冷加工,在材料和其他参数一定前提下,单点金刚石车削精度、车削参数和机床震动可以

达到最优,是目前获得优质均匀红外车削非球面表面的加工方法。

笔者根据仪器的指标要求和平台约束,面向制冷探测器的应用,提出一种简化主光学形式的轻小紧凑折反光学结构,适用于批量化生产的无人机光电吊舱长波红外相机。下文将对此相机的光学设计、加工检测装调及成像实验详细阐述。

1 平台约束与指标要求

1.1 探测方式及资源约束

光学系统安装在光电吊舱内搭载在无人机上,仪器视场中等,通过光电吊舱的二维旋转实现广域目标搜索,发现目标并锁定进行跟踪。

如图 1 所示,光电吊舱采用球型结构,吊舱半径小于 200 mm,窗口口径为 165 mm,光学空间为 320 mm×310 mm×302 mm(含探测器),要求相机光机质量小于 2.0 kg(不含转台及电子设备)。

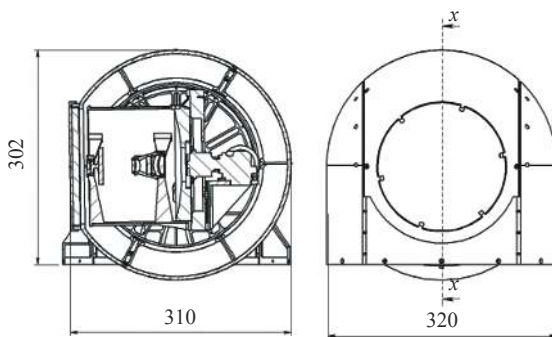


图 1 探测方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of detection method

1.2 光学设计相关指标

为提高仪器探测器灵敏度,整机选用制冷面阵探测器,像元规模 $n_x \times n_y$ 为 320×256,像元尺寸 p 为 30 μm×30 μm,光学系统设计参数如表 1 所示。

根据仪器最远探测距离^[4]要求,解得系统口径 D 为 150 mm。探测器 F 数为 2,则系统焦距 f 为 300 mm,瞬时视场 $\text{IFOV} = p/f = 0.1 \text{ mrad}$,即百公里处的目标分辨

表 1 光学系统参数

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	8-12.5
Focal length /mm	300
F number	2
I FOV/mrad	0.1
Observation range/($^\circ$)	Azimuth:0-360, Pitch: 0-90
Detection distance/km	100
Field of view/($^\circ$)	2.34(1.83 \times 1.47)
Distortion	Less than 3%

率为 10 m, 视场 FOV 为:

$$\begin{aligned} 2\omega_x &= 2\arctan\left(\frac{N_y \cdot P}{f}\right) = 1.83^\circ \\ 2\omega_y &= 2\arctan\left(\frac{N_x \cdot P}{f}\right) = 1.47^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

即对角线圆视场为 2.34 $^\circ$ 。

2 光学设计

2.1 选型考虑

红外光学系统结构包括透射式、反射式和折反式结构。透射镜组由于可选材料少、100%冷屏匹配则前方透镜口径较大、体积重量较大,但加工装调相对容易,适用于中小口径、中低分辨率、大视场合;反射式系统无色差,但视场相对较小,装调相对较难,适用于中大口径、中高分辨率、小视场合;折反式系统兼具前两者优点,像差校正能力较强,体积较紧凑,可通过二次成像,实现 100%冷屏匹配,适用于中大口径、中高分辨率、中等视场合。

鉴于以上比较分析,结合无人机装载平台对仪器体积重量资源和探测距离等需求,该系统选择折反光学结构,同时考虑到加工检测及装调的成本和周期,面向制冷探测器的应用,光学设计中提出了一种简化主光学形式的折反光学结构。

2.2 初始结构

较多参考文献中的折反式红外相机光学系统采用的两反主系统加校正镜组形式的结构,其光学设计通常先求解两镜式结构的初始解,再加入透镜组进行优化,根据设定的遮拦比和要校正的像差^[5]种类,设定对应的像差系数为零,求解出主次镜的曲率半径、

圆锥系数和中心间隔,再进行放大,即可进行两镜系统的初始建模。常用的折反式系统中,其主光学为校正球差和彗差的卡式结构,主镜和次镜均为双曲面,其后方加校正镜组,校正镜组一般采用球面面型。

该系统从体积重量、装调难度、研制成本和使用环境考虑,对常用的折反系统进行简化。简化的折反式系统由牛顿折叠主系统加校正镜组组成,主系统的主镜简化为抛物面,次镜简化为平面镜,次镜无光焦度仅用于折叠光路,在校正镜组中加入非球面以校正轴外像差。

简化的牛顿折叠主系统光路示意图如图 2 所示,其中 h_1 、 h_2 分别为中心视场边缘光线主次镜上的高度, l_2 、 l_2' 分别为次镜的物距和像距, f_1' 为主镜焦距, R_{01} 为主镜中心曲率半径, R_2 为次镜曲率半径, d 为主次镜间隔, α 为次镜遮拦比, β 为次镜放大倍率。对于简化的系统有下列表达式成立:

$$\alpha = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{l_2'}{l_2} = -1 \quad (3)$$

$$R_{01} = 2f_1', R_2 = \infty \quad (4)$$

$$d = (1 - \alpha)f_1' \quad (5)$$

$$e_1^2 = 1 \quad (6)$$

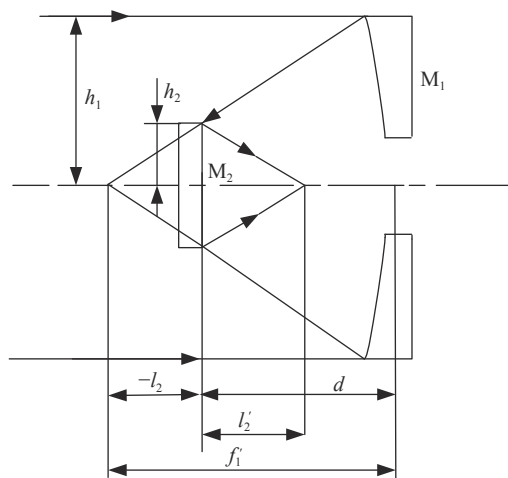


图 2 简化的牛顿折叠主系统示意图

Fig.2 Simplified schematic diagram of the Newton folding main system

系统的初始结构求解步骤为:(1)分配主光学和校正透镜的光焦度,确定 f_1' ,根据公式(4)确定主镜中

心曲率半径 R_0 ; (2) 设定遮拦比 α , 根据公式 (5) 求解主次镜间隔 d ; (3) 初步分配校正镜组的光焦度, 设定校正镜组的物距。

这种设计^[6-11]的优点是: 抛物面主镜的加工和装调的检测, 无需设计补偿镜或全息片, 主光学系统的装调主要是主抛物面镜的无应力安装, 检测调整比较简单, 研制成本低, 研制周期短; 把非球面移到校正镜组的透镜上, 采用单点金刚石车削技术加工, 旋转对称非球面和球面的加工工序和成本基本相同, 而且小口径透镜面形精度高; 光学系统出瞳在校正镜组后方, 与探测器冷屏对接, 实现 100% 冷屏匹配, 减少热背景影响, 提高灵敏度; 校正镜组在主次镜之间, 系统焦面在主镜附近, 探测器的制冷组件和安装部位在主镜背面, 有利于缩短相机体积和探测器安装。以上优点适合于轻小紧凑系统的快速批量化研制。

2.3 优化设计及结果

将初始结构输入至软件中, 简便起见, 校正镜组以光焦度按正、负、负、正分配, 设定探测器芯面前 19.8 mm(冷屏所在处) 为系统出瞳(或 STOP), 编辑绩优函数控制镜片厚度、间隔、焦距、畸变和像质等, 尽量控制入瞳在主镜附近进行光线追迹。设计结果如表 2 所示。

表 2 系统设计数据

Tab.2 Lens data of system design

	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
M1	-309.2	-111.2	Mirror
M2	Infinity	46.1	Mirror
L1	-14.7	6.0	Germanium
	-17.1	9.7	
L2	-99.6	6.0	ZnSe
	-250.9	2.92	
L3	27.7	5.9	Germanium
	23.5	2.1	
L4	37.9	7.0	Germanium
	-368.1	6.6	
Window	Infinity	1.0	Germanium
	Infinity	2.7	
Filter	Infinity	0.3	Germanium
	Infinity	19.8	

图 3 是红外相机光路图, 主镜为抛物面, 次镜为平面, 校正镜组中镜 1 的前表面和镜 3 的后表面为二

次曲面, 系统轴向总长为 125 mm。

如图 4 所示, 8~12.5 μm 光谱范围内的各视场 MTF 值在奈奎斯特频率处接近衍射受限值, 均大于 0.4; 系统畸变全视场内小于 2.8%。

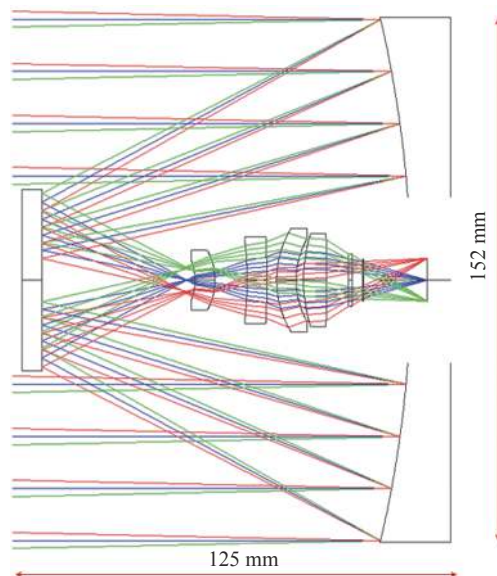


图 3 二维光路图

Fig.3 2D layout

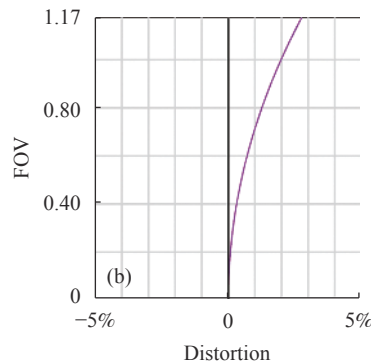
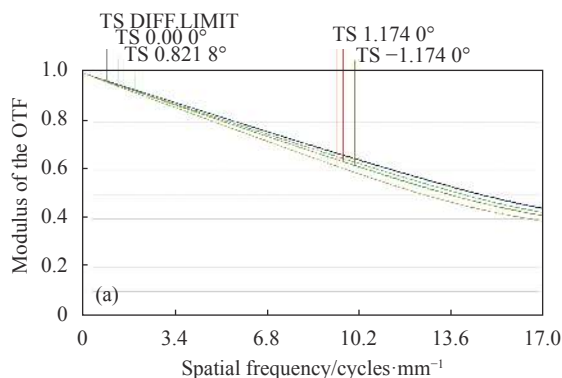


图 4 光学传函与畸变

Fig.4 Optical MTF and distortion

3 工程可行性分析

3.1 公差分析

公差分析是为光机零件加工和组部件装调提供精度控制参考值。该系统设定光学镜片的面型、面偏心和倾斜、元件偏心和倾斜、中心厚度和间隔, 设定焦面补偿变量, 通过蒙特卡洛随机分析得出最敏感参数, 调整敏感参数使得蒙特卡洛法分析使传函的下降量在 15% 以内。

对全系统进行了公差分析, 敏感公差项列于表 3, 较弯曲的第 3 片透镜的表面偏心 (TSD) 和倾斜 (TST) 比较敏感, 在光机系统研制过程中需予以重视。其余未列出公差比较常规。

表 3 敏感公差项

Tab.3 The most sensitive tolerance

Parameter	Value	Decrease of MTF
TSDX3_rear	0.015 mm	0.065
TSDX3_front	0.015 mm	0.065
TSDY3_rear	0.015 mm	0.064
TSDY3_front	0.015 mm	0.063

3.2 温度适应性分析

无热控情况下, 无人机载光电吊舱的工作环境温度为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但考虑成本和光电吊舱给予光学系统的体积资源, 其热设计方案为: 初级热控结合有限温度范围内光学适应性设计。即通过初级热控控制光电吊舱内温度在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, (径向温差小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 轴向温差小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 在此温度范围内, 在不调焦的情况下, 需要仪器像面温漂能满足空间分辨率要求。这样, 初步热控较易实现, 既减轻了光学系统的压力, 代价较小, 但系统性能能满足载荷应用需求。

校正镜组通过材料匹配和光焦度分配, 在以上工作温度范围内有效的消热差, 具有结构简单, 重量体积较小的特点。主系统的光机材料均采用铝金属, 校正镜组采用锗、硒化锌、锗、锗 4 片透镜, 镜筒结构采用铝材。

相机的环境适应性方案是采取初级热控和有限温度范围内的光学适应性设计。权衡光电吊舱给予光学系统的体积资源, 通过初级热控控制光电吊舱内温度在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

主系统镜坯和相机结构均选择铝, 相机质量为 1.8 kg (含探测器)。设定基准温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 径向温差 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,

轴向温差 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 通过有限元进行光机热仿真分析, 如图 5 所示。光学传函在奈奎斯特频率处均大于 0.3, 如图 6(a) 所示。此外, 软件仿真 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两端温度点对应的传函均大于 0.33, 如图 6(b) 和 (c) 所示。

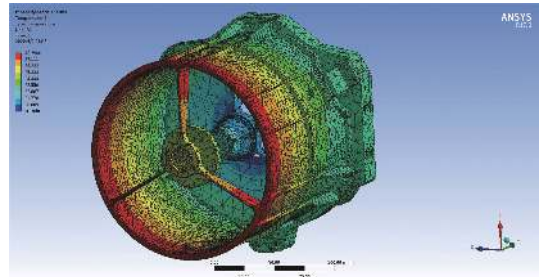


图 5 有限元分析模型

Fig.5 Finite element analysis model

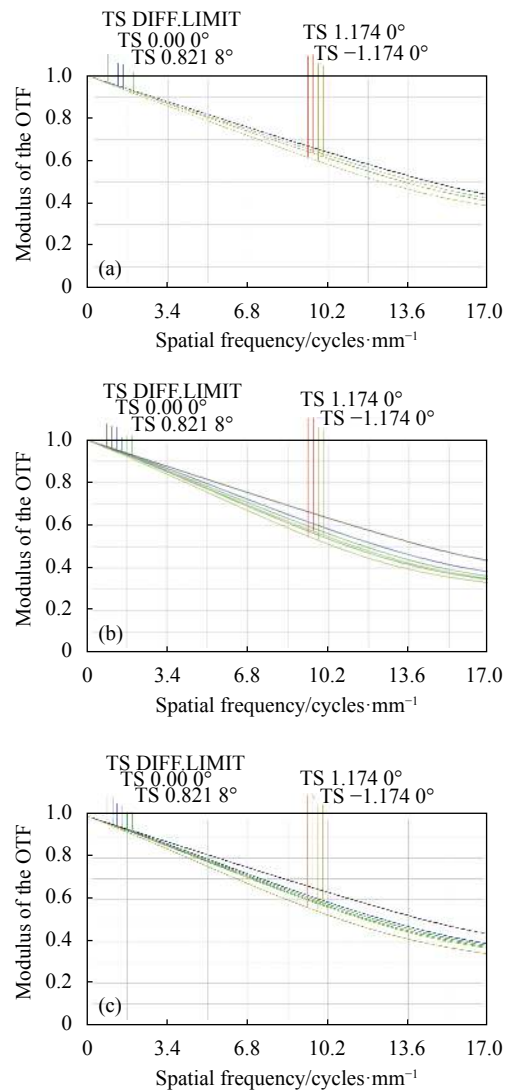


图 6 传函仿真

Fig.6 Transfer function simulation

4 加工检测、装调与成像实验

4.1 光学加工检测

主系统中的反射镜和校正镜组中的透镜,均采用单点金刚石车削技术 (SPDT)^[12-14] 进行加工。主光学中的主镜和次镜,镜坯材质为光学铝 T6061,如图 7 所示,车削后再结合抛光工艺进一步提高面形精度,均优于 $\lambda/20@632.8\text{ nm}$;校正镜组中的透镜,均为旋转对称的球面或非球面,镜坯材质为锗或者硒化锌,口径小的红外材料易于加工,面形精度均优于 $1/20\lambda@632.8\text{ nm}$ 。

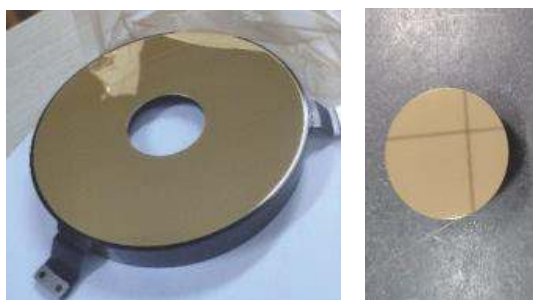


图 7 主镜与次镜

Fig.7 Primary and secondary mirrors

利用干涉仪检测^[15-16]法进行主系统无应力的装调。主镜通过凸耳与主镜背板相连,凸耳通过单点金刚石车削,背板安装凸台通过精研,确保安装面共面度在 0.002 以内。主镜装配至主系统框架后面形 rms 为 $0.048\lambda@632.8\text{ nm}$,如图 8 所示。在主镜安装好之后,由结构加工确保精度,直接安装次镜。校正镜组短且为同轴结构,由光机加工确保同轴精度。

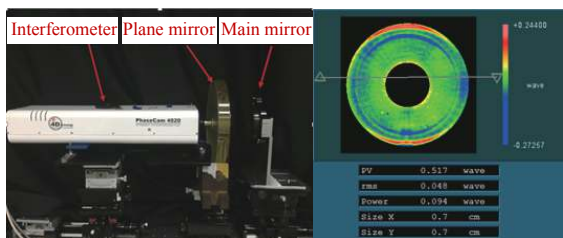


图 8 主镜检测光路与波前图

Fig.8 Measurement light path and wavefront of primary mirror

4.2 系统光电联调及传函测试

三坐标装配校正镜组至整机框架,系统联调中通

过修研垫片实现探测器精准对焦。装调测试平台主要包括 2 m 焦距平行光管、焦面条纹靶标(理论缝宽 0.2 mm,实测略大,约 0.23 mm)和转台,MTF 界面如图 9 所示。

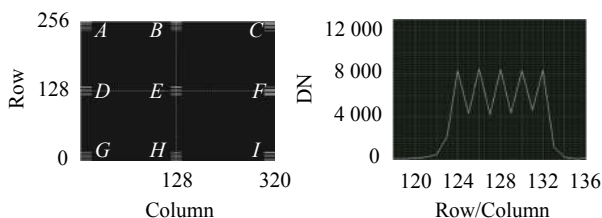


图 9 系统 MTF 测试

Fig.9 MTF measurement of system

全像面选择 9 点,根据靶标像 DN 值按公式 (7) 计算 MTF,结果列于表 4 中,系统 MTF(子午和弧矢方向的平均值)优于 0.243。探测器传函按 0.6 计算,考虑狭缝略宽,则系统的光学 MTF 可达到设计值的 85%,在可接受范围内。

表 4 MTF 测试结果

Tab.4 Result of MTF measurement

Field of view	MTF
A,B,C	A-0.245, B-0.262, C-0.243
D,E,F	D-0.259, E-0.267, F-0.248
G,H,I	G-0.251, H-0.263, I-0.244

$$MTF = \frac{DN_{\text{peak}} - DN_{\text{valley}}}{DN_{\text{peak}} + DN_{\text{valley}} - 2DN_{\text{background}}} \times \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

4.3 外景成像实验

系统外景成像实验地点为大楼九楼,实验时间为冬季傍晚。系统成像图如图 10 所示,景物中的 a 点为距离 2 km 外的居民楼,轮廓分明,细节清楚;b 点为距离 1 km 的居民楼管道,尺度约为 0.1 m,可以清晰分辨出;成像左下角 c 处黑点为冬季空调外机,右上角黑色部分为天空。



图 10 外景成像图
Fig.10 Scene image

5 结束语

针对无人机载微型光电吊舱的红外探测需求,设计研制了一套面向制冷探测器应用的长波红外光学成像系统。用牛顿式折叠结构代替常用的卡式结构,通过简化主望远镜的结构,在校正镜组中加入非球面来实现较大视场像质校正。主系统采用全铝光机结构设计,全系统光学元件采用单点金刚石车削技术加工,降低了加工装调难度以及研制成本;通过二次成像实现了 100% 冷屏效应设计,降低了红外热背景,有利于提高系统的灵敏度。该光学系统具有体积小、结构紧凑、像质优良的特点。系统最终装调测试结果表明:像质达到设计预期,满足项目技术指标要求。文中对类似无人机载微型光电吊舱红外探测用的紧凑型红外光学系统的设计与研制,具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] Cao Yinqi, Qi Yuan, Cheng Gang, et al. Development and key technologies of small photoelectric pods for military drones [J]. *Aircraft Missiles*, 2019(3): 54-59. (in Chinese)
曹尹琦, 齐媛, 程刚, 等. 军用无人机小型光电吊舱的发展和关键技术[J]. 飞航导弹, 2019(3): 54-59.
[2] Zhou Feng, Liu Jianhui, Guo Jun, et al. Development analysis of

foreign airborne infrared early warning systems [J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(4): 399-403. (in Chinese)
周峰, 刘建辉, 郭俊, 等. 国外机载红外预警系统发展动态分析[J]. *激光与红外*, 2017, 47(4): 399-403.
[3] Li Lei, Xu Yue, Jiang Qi, et al. Overview of foreign military UAV equipment and technology development in 2018 [J]. *Tactical Missile Technology*, 2019(2): 1-11. (in Chinese)
李磊, 徐月, 蒋琪, 等. 2018年国外军用无人机装备及技术发展综述[J]. *战术导弹技术*, 2019(2): 1-11.
[4] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli, et al. Estimation of working distance of infrared system under complex atmospheric conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941-944. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 941-944.
[5] Shi Guanghui. Using Gaussian optics and third-order aberration theory to find the initial solution of a zoom objective lens [J]. *China Optics*, 2018, 11(6): 1047-1060. (in Chinese)
史光辉. 用高斯光学和三级像差理论求变焦距物镜的初始解[J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 1047-1060.
[6] Chen Li, Liu Li, Zhao Zhicheng, et al. Optical system design of long focal length coaxial four-mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0118002. (in Chinese)
陈丽, 刘莉, 赵知诚, 等. 长焦距同轴四反射镜光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0118002.
[7] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Li Hua, et al. Design and analysis of athermal imaging system for folded reflective medium wave infrared detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 407-412. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 李华, 等. 折反射中波红外探测无热化成像系统设计分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 407-412.
[8] Jiang Kai, Zhou Sizhong, Li Gang, et al. Thermal-free design of a folding medium wave infrared dual field of view zoom system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 403-407. (in Chinese)
姜凯, 周四忠, 李刚, 等. 折反式中波红外双视场变焦系统无热化设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 403-407.
[9] Xiao Guanghui, Hao Peiming. Design of a newton's optical system with no power correction plate [J]. *Applied Optics*, 2008, 29(5): 753-757. (in Chinese)
肖光辉, 郝沛明. 一种带有无光焦度校正板的牛顿光学系统的设计[J]. *应用光学*, 2008, 29(5): 753-757.
[10] Mu Yongji, Mao Yijiang, Hu Mingyong. Design of an off-axis parabolic mirror aberration correction mirror group [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 227-232. (in Chinese)

- 穆永吉, 毛一江, 胡明勇. 一种离轴抛物面镜像差校正镜组的设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 227-232.
- [11] Zhou Xiaobin, Sun Hao, Yuan Qi, et al. Design of an optical system for a reversible infrared / laser seeker [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 987-992. (in Chinese)
周晓斌, 孙浩, 原琦, 等. 一种折反式红外/激光复合导引头光学系统设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 987-992.
- [12] Wang Peng, Xue Dongbai, Zhang Hao, et al. Isometric constant-speed single-point diamond turning of infrared crystals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0742001. (in Chinese)
王朋, 薛栋柏, 张昊, 等. 红外晶体等距恒速单点金刚石车削[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7): 0742001.
- [13] Zeng Kai, Chen Hongzhang, Shen Jianyun, et al. CNC machining of axisymmetric aspherical optical glass lenses with diamond grinding heads [J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2019, 39(4): 103-109. (in Chinese)
曾凯, 陈宏堃, 沈剑云, 等. 用金刚石磨头数控加工轴对称非球面光学玻璃透镜[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(4): 103-109.
- [14] Meng Xiaohui, Wang Yonggang, Li Wenqing, et al. Zero-gravity surface processing of large-aperture aspheric mirrors using rotation method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2517-2524. (in Chinese)
孟晓辉, 王永刚, 李文卿, 等. 应用旋转法实现大口径非球面反射镜零重力面形加工[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2517-2524.
- [15] Zhang Haidong, Wang Xiaokun, Xue Donglin, et al. Surface shape detection method for super large-diameter convex aspheric surface [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154. (in Chinese)
张海东, 王孝坤, 薛栋林, 等. 一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1147-1154.
- [16] Zhao Haibo, Zhao Weiguo, Dong Jihong, et al. Precision analysis and test of the secondary mirror adjustment mechanism of large space telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2374-2483. (in Chinese)
赵海波, 赵伟国, 董吉洪, 等. 大型空间望远镜次镜调整机构精度分析与测试[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(11): 2374-2483.