

双色低温红外光学系统设计

王晨锋^{1,2}, 王晓伟¹, 陆卫国^{1*}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对当前空间环境单一、红外波段探测目标虚警率高、灵敏度低等难题, 提出了一种基于低温冷光学技术的双色红外光学系统设计方法。光学系统前置光路采用共口径式结构, 通过分光平板进行谱段分光, 然后采用中继镜组二次成像的方式实现冷阑匹配, 保证系统的轻小型化。另外, 为了提升长波系统的探测灵敏度, 对其进行了低温冷光学设计, 减小系统自身辐射对探测性能的影响。系统的工作波长为 3.7~4.8 μm 和 7.9~9.3 μm , F 数为 1.2, 光学结构三维总尺寸为 260 mm×150 mm×80 mm, 中波系统畸变小于 2.8%, 约有 82% 的能量集中在探测器的一个像元内, 长波系统畸变小于 0.33%, 约有 70% 的能量集中在探测器的一个像元内。该系统可对空间弱目标进行远距离探测, 具有虚警率低、灵敏度高、结构紧凑等优点。

关键词: 低温光学设计; 红外双色波段; 共口径; 弱目标探测

中图分类号: O435.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230297

0 引言

随着科学技术的发展, 特别是红外探测器技术的巨大进步, 红外探测技术被广泛应用在空间探索领域中^[1]。红外探测是利用物体和背景的温度差异实现对目标的探测, 这种探测技术不需要外加光源, 具备抗干扰能力强、隐蔽性好、探测距离远、可全天时工作等优点^[2]。根据维恩位移定律可知, 物体的温度与该温度下红外辐射峰值响应的波长的乘积为常数, 当物体温度越高, 物体辐射的峰值向短波方向移动。因此, 对于温度较高的物体可用中波红外进行探测, 而对于温度较低或常温的物体则用长波红外更合适。

在空间环境采用红外技术实现远距离全天时探测是常用的应用场景, 此时由于目标微弱, 背景复杂, 加上诱饵目标的干扰, 依靠单波段无法实现对点目标的有效探测和全程跟踪, 虚警率较高。利用不同波段复合探测是提高目标识别率与探测率

的有效手段^[3]。

近年来, 多波段红外探测成为研究热点。程伟宁^[4]等设计了一款中长波共口径的 RC 红外光学系统。该系统为了消除二级光谱的影响, 前置光路采用反射式光学系统, 中继镜组采用二次成像的方式实现冷光阑的匹配。整个系统结构具有紧凑、质量轻、成像性能接近衍射极限的特点。但由于采用反射式结构, 存在中心遮拦、能量利用率低、视场角偏小的问题。潘璐^[5]等设计了一款微光与长波红外波段共口径光学系统, 该系统前段采用卡塞格林结构作为公共口径, 系统成像质量良好, 接近衍射极限, 但整体布局不够紧凑, 体积较大。双色或多色复合红外探测是空间目标探测的发展趋势之一, 但当前红外复合探测光学系统普遍存在难以兼容大视场、高灵敏、轻小型化探测的需求。

文中结合实际工程应用, 针对远距离、大视场、高灵敏度、高识别概率探测的需求, 设计了一种双

收稿日期: 2023-05-13; 修订日期: 2023-07-11

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2021GY-297); 中国科学院青年创新促进会优秀会员基金项目 (Y2021107)

作者简介: 王晨锋, 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 陆卫国, 男, 研究员, 博士, 主要从事星光导航、高精度光学传递对准等技术的研究。

色低温红外光学系统,物镜组采用折射式结构,在增大视场的同时降低了结构复杂性和加工装调难度;采用光谱分光技术及二次成像结构减小物镜组体积,并有利于实现传感器冷阑匹配。此外,为提升长波红外通道的探测灵敏度,对其噪声特性进行了分析,并提出了二次成像组低温光学设计途径。设计了光学系统且完成样机研制,并通过实验验证了其性能。

1 工作波段选择

探测波段的选择要从多方面综合考虑,既要考虑探测目标的红外辐射特性,又要有利于目标与背景和干扰的鉴别。一般需要考虑以下因素:1)工作波段的大气透过率较高;2)目标辐射与背景辐射的差异性较大;3)探测器对该波段的响应足够灵敏。

常见的双波段组合有短中复合、中长复合和中中复合,其中,中长复合是最常见的组合。当目标温度和背景温度相差较小时,二者的辐射对比度较小,使用长波可以较容易区别出二者;当二者温度相差较大时,中波段目标与背景的辐射对比度较大。考虑到文中针对的空间目标的辐射,其辐射主要来源于尾焰和蒙皮,对应的辐射峰值分别在中波和长波附近。为了实现全程目标跟踪探测,最终选取中波和长波组合作为探测波段。

2 系统设计要求

该红外系统采用中波和长波探测器阵列的规模均为 640×512,其像元尺寸为 25 μm×25 μm,红外光学系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 红外光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of infrared optical system

Parameter	Value
Medium wavelength/μm	3.7-4.8
Long wavelength/μm	7.9-9.3
Focal length/mm	72
F number	1.2
Field angle of MWIR/(°)	> 10.1×10.1
Field angle of LWIR/(°)	> 5.1×5.1
Pixel size/μm ²	25×25

3 光学系统设计

3.1 光学系统选型

在光学系统基本参数确定的前提下,其设计原则是小型化与高能量透过率。为了满足光学系统能同时探测到目标的中波红外波段和长波红外波段信息,并为了减小系统体积,中波红外光学系统和长波红外光学系统共用一个物镜组。该系统属短焦系统,可选择的形式较多,折反式、折射式均可^[6],一次成像系统、二次成像系统均可获较高的像质^[7],各有优缺点。折反式系统具有筒长短、质量轻的优点,但存在中心遮拦,造成光能的损失,杂光抑制较难;折射系统无中心遮拦,效率高,但光学材料品种少,不易校正色差;一次像系统结构简单,但匹配冷屏的光学零件尺寸大、质量重;二次像系统易于匹配冷屏^[8],光学元件尺寸小、质量轻,但零件数量较多。综合考虑各种光学系统结构形式的优缺点和文中所需,选用折射式二次像结构。

3.2 设计方案

在系统设计优化过程中,为实现轻量化与光学系统高透过率,引入非球面可以更好地校正像差并减少光学元件数量^[9]。因此,高次非球面的表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^2 + Br^4 + Cr^6 + Dr^8 + \dots \quad (1)$$

式中: c 为非球面定点的曲率半径; k 为圆锥系数; r 为归一化半径坐标; A 、 B 、 C 和 D 分别为二次项、四次项、六次项和八次项的非球面系数,且 A 通常为0。为了减小加工成本,在系统优化中只使用了四次项、六次项和八次项非球面系数作为优化变量。

经过优化设计得到的光学系统结构如图 1 所示,图 2 和图 3 分别为中波系统结构和长波系统结构。系统选用二次成像的折射式结构,其出瞳位于冷屏处,冷光阑匹配率达到 100%。系统采用三片透镜组成的前端物镜部分形成共孔径光路,然后通过平行平板进行分光,反射光线进入中波红外光路,透射光线进入长波红外光路。通过平行平板反射的中波红外光线再次通过光路转折平面反射镜,控制光学系统的纵向尺寸,将光路尽量布局在轴向方向,有利于后续的制冷布局。同时,为了降低仪器自身辐射对探测性

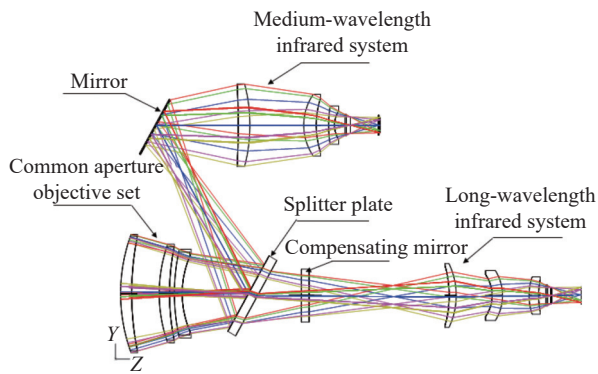


图 1 红外光学系统结构

Fig.1 Structure of infrared optical system

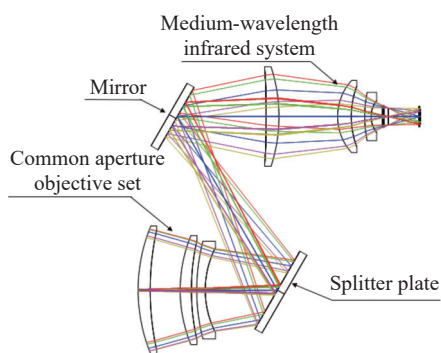


图 2 中波红外系统结构

Fig.2 Structure of medium-wavelength infrared system

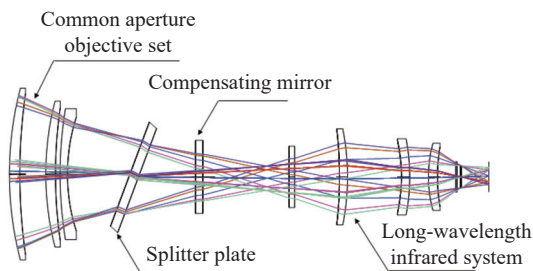


图 3 长波红外系统结构

Fig.3 Structure of long-wavelength infrared system

能的影响,对长波二次成像组做低温处理。光学系统三维总尺寸为 260 mm×150 mm×80 mm。

3.3 长波红外系统低温设计

在空间环境进行红外探测时,对于高温目标可用中波红外去探测,此时背景辐射远小于目标辐射,可忽略不计;对于常温或低温目标,主要用长波探测,由于目标辐射微弱,此时背景辐射会严重影响探测结果。为了提升长波系统的探测能力,需要采取有效措施抑制背景辐射。在长波系统接收到的背景

辐射中,观测路径上的气体、尘埃的辐射比重较小,其辐射噪声主要来源于仪器自身的热辐射。根据仿真结果,低温制冷至-70℃时可有效抑制自发辐射,如图 4 所示。

另外,对光学系统进行自发辐射分析,如图 5 所示,一次成像和二次成像对背景自发辐射贡献量分别为 30% 和 70%。

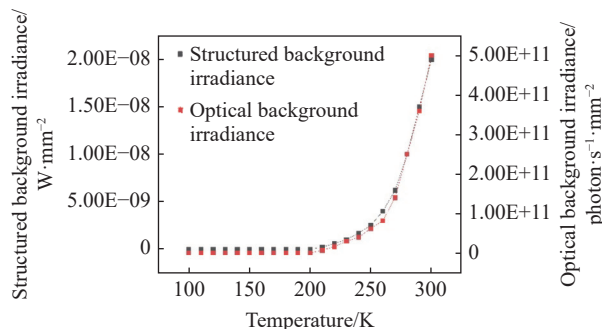


图 4 背景辐射随温度变化关系

Fig.4 The relationship between background radiation and temperature variation

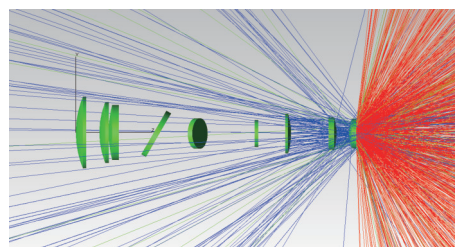


图 5 自发辐射仿真

Fig.5 Spontaneous radiation simulation

为了降低系统自发辐射,同时兼顾系统的轻小型化,降低成本,只对长波二次成像组做低温光学处理,将其放置于低温杜瓦箱内,如图 6 所示。

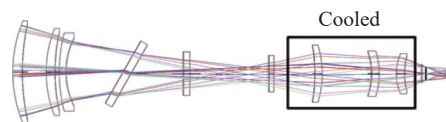


图 6 低温光学处理示意图

Fig.6 Schematic diagram of low temperature optical processing

针对透射式系统进行低温光学设计时,主要考虑红外材料的选择,合适的材料搭配能有效消除温度引起的像质下降。常用红外透镜材料的性能参数如表 2 所示。

表 2 红外材料性能参数

Infrared material	Transmission wavelength/ μm	dn/dt
Si	1.1-9	0.000 15
Ge	1.8-12	0.000 396
ZnS	0.37-14	0.000 035
ZnSe	0.5-22	0.000 06
CaF ₂	0.13-10	-0.000 011

在低温工作环境下,温度的变化会引起材料折射率的变化,在进行光学系统设计时,主要以低温环境为设计基准,把材料的低温折射率代入设计参数。由表 2 可知, CaF₂ 具有负折射率温度系数,在低温设计过程中,可以利用 CaF₂ 和其他材料搭配使用,补偿低温折射率变化对系统像质的影响。

另一方面,低温环境对光学系统最直观的影响是透镜的外形尺寸,因此在结构设计上重点考虑镜框的设计。由于透射式双波段共口径红外系统设计中需至少使用三种及以上的材料才能平衡像差,不同材料具有不同的热膨胀系数,因此,可以针对不同的透镜材料选用不同材料的镜框,以最大限度地减小热应力对透镜结构和面型的影响。

如图 7 所示,长波二次成像组由三片透镜组成,分别使用 Ge、ZnS 和 CaF₂。结构材料采用铝基碳化硅,因其膨胀系数与透镜材料比较接近,故温度变化引起的透镜和结构材料变形能够保持一致,从而保证系统的成像质量。

长波系统制冷设备采用定制型气体轴承斯特林制冷机,能有效降低制冷机的体积和质量。该设备的制冷性能如图 8 所示。

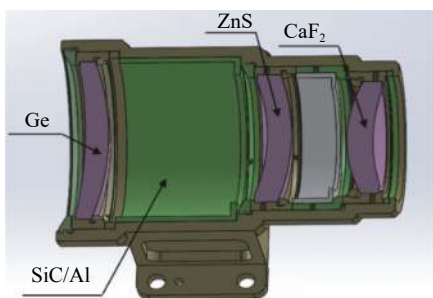


图 7 长波系统镜框结构设计

Fig.7 Frame structure design of long-wavelength system

根据计算结果可知,从常温降至-70℃,长波系统所需要的总热负载为 17.27 kJ,杜瓦箱体内表面对光学镜头的辐射漏热量约为 0.535 W,支撑件导热冷损约为 3.67 W,-70℃时制冷机能提供的最大制冷量约为 50 W,理论计算长波系统从常温降至-70℃需要的降温时间小于 7 min。

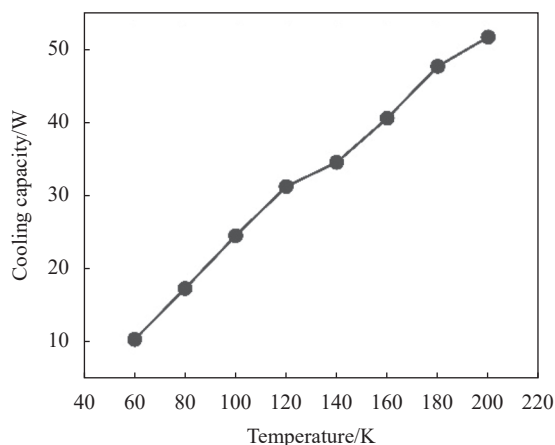


图 8 气体轴承斯特林制冷机性能曲线

Fig.8 Performance curve of gas bearing Stirling refrigerator

3.4 像质评价

由于目标距离探测系统很远,目标像点小于探测器的瞬时视场,为点目标成像探测,需主要从能量的角度考虑。光学系统是一个能量汇集系统,包围圆能量能直接反映出光学系统能量汇集的能力,也能全面描述系统的成像质量,因此,选择包围圆能量作为光学系统的评价方式。

3.4.1 中波系统像质评价

中波红外光学系统的包围圆能量如图 9 所示。可以看出,约有 82% 的能量集中在探测器的一个像

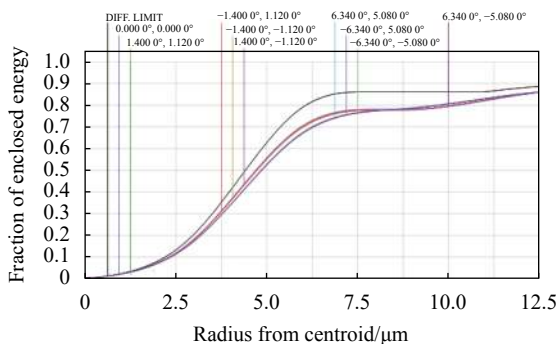


图 9 中波红外系统包围圆能量

Fig.9 Encircled energy of medium-wavelength infrared system

元内, 光学系统的能量集中度较好。

畸变为视场的函数, 不同视场的实际垂轴放大率不同, 畸变也不同。畸变改变轴外物点在理想像面上的成像位置, 使像的形状失真, 但不影响像的清晰度。中波系统畸变结果如图 10 所示, 全视场畸变最大为 2.8%。

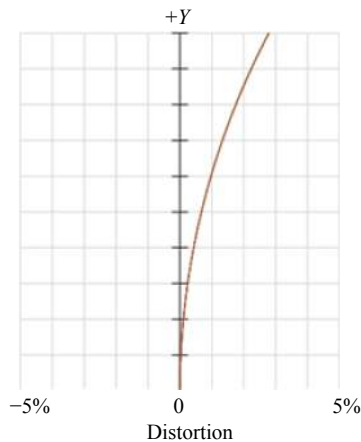


图 10 中波红外系统畸变

Fig.10 Distortion of medium-wavelength infrared system

中波光学系统采用制冷探测器, 制冷温度达到 77 K, 与光学镜头工作环境温度存在温差, 它的辐射有可能通过光学系统某些面反射回来再落在探测器上, 从而形成探测器自身的冷像, 在像面中心出现黑斑^[10]。因此, 须对红外系统的冷反射情况进行有效抑制。其中, 每个光学表面的 YNI 值 (Y : 轴上边缘光线入射高度; N : 表面介质的折射率; I : 轴上边缘光线的入射角) 与轴上冷反射光斑大小成正比, $|YNI|$ 值越大, 冷反射光斑越大, 越不会形成冷反射黑斑, 一般情况下要求 $|YNI|$ 值大于 1 则可以满足冷反射要求。此外, $I/Ibar$ 值 (I : 轴上边缘光线的入射角, $Ibar$: 边缘视场主光线的入射角) 也反映了冷反射光斑随着视场角的变化情况, 若某一面 YNI 值小于 1, $|I/Ibar|$ 值大于 1, 则表明透镜表面产生的冷反射效应基本不随视场角变化^[11]。

中波系统各个表面的 YNI 值和 $I/Ibar$ 值如表 3 所示。由表中可知, 除第 8 面之外的光学表面的 $|YNI|$ 值均大于 1, 第 8 面的 $|I/Ibar|$ 值大于 1, 满足系统冷反射的要求。

表 3 中波红外系统冷反射分析结果

Tab.3 Analysis results of the narcissus effect of medium-wavelength infrared system

Surface	YNI	$I/Ibar$
1	12.54	-3.42
2	-2.23	-3.14
3	1.94	-1.77
4	-7.88	-1.48
5	-6.66	-0.80
6	3.67	-0.59
7	2.17	12.03
8	-0.90	12.36
9	6.78	7.98
10	-3.05	6.31
11	-2.00	3.79
12	2.43	2.63

3.4.2 长波系统像质评价

长波红外系统的包围圆能量如图 11 所示, 约有 70% 的能量集中在探测器的一个像元内, 光学系统的能量集中度较好。

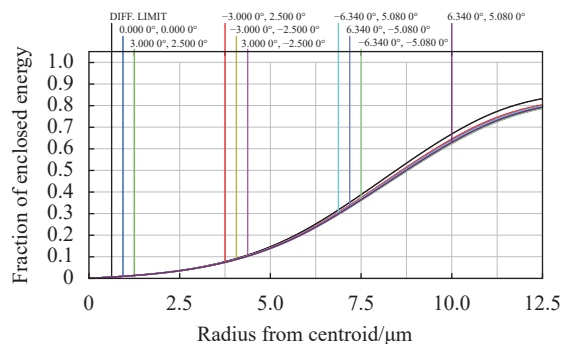


图 11 长波红外系统包围圆能量图

Fig.11 Encircled energy diagram of long-wavelength infrared system

系统畸变结果如图 12 所示, 长波红外系统全视场畸变最大为 0.33%。

长波系统各个表面的 YNI 值和 $I/Ibar$ 值如表 4 所示。由表中可知, 除第 12 面之外的光学表面的 $|YNI|$ 值均大于 1, 第 12 面的 $|I/Ibar|$ 值大于 1, 满足系统冷反射的要求。

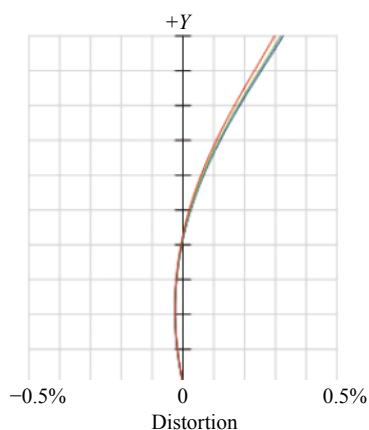


图 12 长波红外系统畸变

Fig.12 Distortion of long-wavelength infrared system

表 4 长波红外系统冷反射分析结果

Tab.4 Analysis results of the narcissus effect of long-wavelength infrared system

Surface	YNI	I/Ibar
1	12.54	-3.98
2	-2.17	-3.67
3	2.01	-2.23
4	-7.79	-1.91
5	-6.59	-1.16
6	3.74	-0.93
7	2.61	14.15
8	-1.59	14.57
9	7.77	13.37
10	-3.53	11.18
11	-3.06	8.23
12	-0.51	6.84

4 工程可行性分析

4.1 公差分析

公差分析是光学系统加工装调过程中的必要环节。在 ZEMAX 中, 根据经验和当前加工水平先给出预定公差值, 根据结果找出敏感项, 进行重新分配^[12-14]。预设公差值如表 5 所示。

以包围圆能量作为误差分析评价依据, 取 7 个视场点, 对其加工误差和装调误差的敏感度进行了分析, 中波系统和长波系统的分析结果分别如表 6 和表 7 所示。分析结果表明, 中波红外系统在全视场范

表 5 预设公差值

Tab.5 Preset tolerance value

Parameter	Conic	Tilt/ (")	Decenter/ mm	Thickness/ mm	Radius/ mm
Splitter plate	±0.001	±60	±0.02	±0.02	±0.05
Mirror	±0.001	±60	±0.02	±0.02	±0.05
Lens	±0.001	±45	±0.02	±0.02	±0.05
Compensating mirror	±0.001	±45	±0.05	±0.02	±0.05

表 6 中波系统包围圆能量公差分析结果

Tab.6 Analysis results of encircled energy tolerance for medium-wavelength system

Field	Design value of encircled energy	Tolerance value of encircled energy
(0, 0)	10.43	11.11
(6.34, 0)	10.41	11.06
(0, 5.08)	10.04	10.95
(6.34, 5.08)	11.37	12.47
(4.43, 0)	9.86	10.53
(0, 3.5)	10.15	11.21
(4.43, 3.5)	10.24	11.49

表 7 长波系统包围圆能量公差分析结果

Tab.7 Analysis results of encircled energy tolerance for long-wavelength system

Field	Design value of encircled energy	Tolerance value of encircled energy
(0, 0)	12.72	13.61
(6.34, 0)	11.55	13.30
(0, 5.08)	11.87	13.54
(6.34, 5.08)	14.69	16.10
(4.43, 0)	12.35	15.17
(0, 3.5)	13.10	14.21
(4.43, 3.5)	13.11	14.65

围内的包围圆能量均小于 12.5 μm, 长波红外系统在全视场范围内的包围圆能量均小于 16.1 μm, 满足使用要求。

4.2 系统探测能力实验验证

双色低温红外系统的实物图如图 13 所示。整个系统的尺寸为 440 mm×260 mm×200 mm, 整机质量(包含制冷机)约为 5.5 kg。结构上采用框架式系统一体化设计, 使电路、探测器、制冷机组件在框架内部

紧密连接,形成整体,在其整体结构牢固可靠的前提下,最大可能地减小体积和质量。

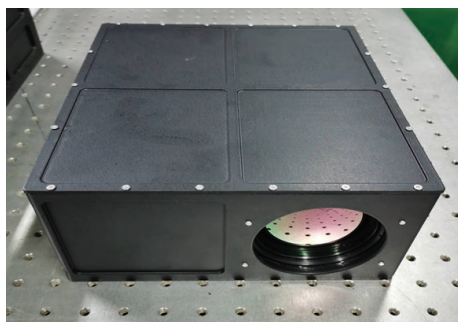


图 13 光学系统实物图

Fig.13 Optical system profile diagram

实验现场如图 14 所示,实验拍摄效果图如图 15 所示。采用高精度黑体模拟探测目标在红外系统焦平面上的辐照度,分别测量噪声等效温差 (NETD) 和最小可探测温差 (MDTD),根据测量数据计算出对应的探测距离。实验中模拟的目标,中波波段的辐射强度约为 47000 W/sr,长波波段的辐射强度约为 0.15 W/sr。

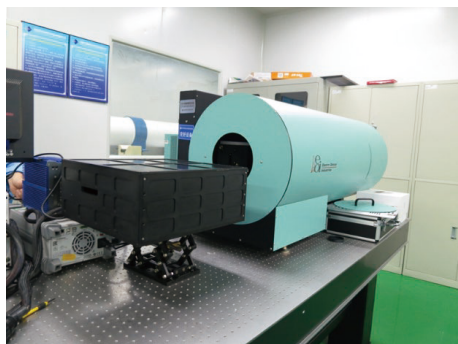


图 14 实验现场

Fig.14 Test site

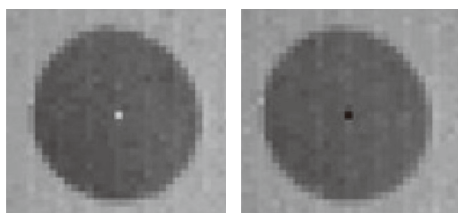


图 15 实验拍摄效果图

Fig.15 Test shooting effect diagram

根据表 8 的实验数据所示,系统探测距离符合预期目标,达到设计要求。

表 8 实验数据

Tab.8 Experimental data

Parameter	MDTD	NETD
Measured value of MWIR	210 mK	22 mK
Corresponding distance	6422 km	
Pre-cooling measured value of LWIR	323 mK	28 mK
Corresponding distance	20.81 km	
After cooling measured value of LWIR	192 mK	18 mK
Corresponding distance	31.16 km	

从表中可知,长波系统制冷后测得的 MDTD 和 NETD 明显降低,探测距离进一步提升,由此可知低温冷光学设计有效提升了长波红外系统的探测性能。

5 结论

随着空间目标探测技术的发展,多波段复合探测已成为红外探测技术的重要方向之一。文中设计了一种可在 3.7~4.8 μm 和 7.9~9.3 μm 波段工作的中波-长波低温红外探测系统,系统 F 数为 1.2,中波系统约有 82% 的能量集中在探测器的一个像元内,畸变小于 2.8%;长波系统约有 70% 的能量集中在探测器的一个像元内,畸变小于 0.33%;系统各种像差得到了较好的优化,满足设计要求。通过实验验证,系统的探测能力达到预期目标,证明了低温冷光学设计的有效性。该系统对类似的工程性应用设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Chen Jianfa, Pan Zhifeng, Wang Helong, et al. Athermalization design of a dual-band infrared optical system with cryogenic detector [J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(10): 83-86. (in Chinese)
- [2] Ma Zhanpeng, Xue Yaoke, Shen Yang, et al. Design and realization of visible/LWIR dual-color common aperture optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0511002. (in Chinese)
- [3] Zhu Xiaohong, Lin Suzhen, Zhang Shangmin, et al. Selection of difference texture features for multi-band infrared images [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(4): 66-72. (in Chinese)
- [4] Cheng Weining. Design of MIR and LIR wave optical system with common aperture [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2016, 31(3): 1-3, 8. (in Chinese)

- [5] Pan Lu, Xiang Yang, Li Qi, et al. Design of visible light and long wave infrared dual-band common aperture optical system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2020, 43(6): 1-7. (in Chinese)
- [6] Xuan Bin, Zhao Zeyu, Luo Yaowei, et al. Design of optical system for wide-spectrum visible-shortwave infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(4): 20220638. (in Chinese)
- [7] Fu Qiang, Zhang Xin. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1467-1471. (in Chinese)
- [8] Wu Wenda, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Design of co-aperture antenna for airborne infrared and synthetic aperture radar [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 595-604. (in Chinese)
- [9] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. (in Chinese)
- [10] Yang Le, Sun Qiang, Wang Jian, et al. Design of long-wave infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 999-1004. (in Chinese)
- [11] Xie Hongbo, Meng Qingfan, Yang Lei, et al. Athermalization and suppression of narcissus for medium-wave infrared optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 352-357. (in Chinese)
- [12] Hao Siyuan, Xie Jianan, Wen Maoxing, et al. Design and realization of light and small long-wave infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200031. (in Chinese)
- [13] Sun Yongxue, Xia Zhentao, Han Haibo, et al. Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 803-808. (in Chinese)
- [14] Zhang Bo, Cui Qingfeng, Piao Mingxu, et al. Method for dual-band multilayer diffractive optical elements and its application in the zoom system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0605001. (in Chinese)

Design of two-color cold infrared optical system

Wang Chenfeng^{1,2}, Wang Xiaowei¹, Lu Weiguo^{1*}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Objective For the current space environment single infrared band detection target false alarm rate is high, low sensitivity and other challenges, a double-color infrared optical system design method based on cold optical technology is proposed. The front optical path of the optical system adopts a common aperture structure, and the spectral band splitting is performed by a splitting plate, and the cold apparatus matching is realized by the secondary image of the relay mirror in order to ensure the light miniaturization of the system. In order to enhance the detection sensitivity of the long-wavelength system, a cold optical design is carried out to reduce the impact of the system's own radiation of detection performance. The working wavelengths are 3.7-4.8 μm and 7.9-9.3 μm , the F -number is 1.2, the total dimension of the optical structure is 260 mm \times 150 mm \times 80 mm, the aberration of the medium-wavelength system is less than 2.8%, about 82% of the energy is concentrated in a pixel of the detector, and the aberration of the long-wavelength system is less than 0.33%, about 70% of the energy is concentrated in one image element of the detector. The system can detect dim space targets at a long distance, and has the advantages of low false alarm rate, high sensitivity and compact structure.

Methods The common optical systems included refractive, reflective and reflexive, and the different optical structures have their unique advantages and disadvantages. Refractive systems have no center obscuration and high efficiency, but the variety of optical materials is small and not easy to correct chromatic aberration.

Secondary image system is easy to match the cold screen, the optical components are small in size and light in weight, but the number of pieces is more. After comprehensive consideration, the refractive secondary image system is selected.

Results and Discussions According to the design index of infrared optical system and the design principle of light miniaturization and high energy transmission rate, it is decided to choose refractive secondary imaging system as the initial structure. The front optical path of the system adopts a common aperture type structure, and then the spectroscopic plate is used for spectroscopy, and the relay mirror set adopts the secondary imaging method to realize the cold apparatus matching and ensure the compactness of the system. In the process of system design optimization, aspheric surface is introduced to correct the aberration. The aberration of the medium-wavelength system is less than 2.8%, and about 82% of the energy is concentrated in one image element of the detector, while the aberration of the long-wavelength system is less than 0.33%, and about 70% of the energy is concentrated in one image element of the detector. Each mirror of the medium-wavelength system and long-wavelength system meets the requirements of the system cold reflection. After setting a reasonable tolerance value, the system image quality still meets the use requirements. After the completion of processing and assembly, the experimental verification, the system detection distance meets the expected target, to meet the design requirements.

Conclusions As the demand for space target detection grows, multi-band detection will become one of the future directions of infrared detection technology. A cold dual-color infrared detection system is designed in the paper. Through experimental verification, the detection capability of the system meets the expected target.

Key words: cold optical design; infrared dual-color band; common aperture; dim target detection

Funding projects: Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2021GY-297); Excellent Member Fund of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Y2021107)