

引用格式: 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

马占鹏,薛要克,沈阳,等. 可见/红外双色共孔径光学系统设计及实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0511002

可见/红外双色共孔径光学系统设计及实现

马占鹏^{1,2}, 薛要克^{1,4,5}, 沈阳¹, 赵春晖³, 周藏龙^{1,2}, 林上民^{1,2}, 王虎^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 北京控制工程研究所, 北京 100190)

(4 中国科学院青年创新促进会, 北京 100037)

(5 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:为解决现有的共孔径双波段相机成像质量差、结构复杂、体积庞大的问题,提出了一种可见/长波红外双色光学系统设计。在两个波段共用前端反射结构、主镜背部加分色镜,实现了可见光与长波红外同时成像,保证了系统结构的紧凑性。分析了分色镜对红外波段成像的影响,以及分色镜偏离垂直方向不同角度的影响。对红外波段的校正系统及像面进行了 -2.39 mm的偏心处理,使红外波段像质得到了极大提高,并通过外场试验成像验证了分析结果的正确性。该系统具有较强的容差特性,结构简单、光学元件少,具备易加工、装调的优点,工程可实现性强,能够有效提升相机的目标探测与识别能力。

关键词:可见光;长波红外;共口径;双波段;光学设计

中图分类号:TN216

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215005.0511002

Design and Realization of Visible/LWIR Dual-color Common Aperture Optical System

MA Zhanpeng^{1,2}, XUE Yaoke^{1,4,5}, SHEN Yang¹, ZHAO Chunhui³, ZHOU Canglong^{1,2},
LIN Shangmin^{1,2}, WANG Hu^{1,2}

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanism, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China*)

(4 *Youth Innovation Promotion Association, Beijing 100037, China*)

(5 *Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*)

Abstract: In order to solve the problems of poor imaging quality, complex structure and large volume of existing dual-band common aperture cameras, a visible/long-wave infrared dual-color optical system was proposed. Simultaneous imaging is achieved by sharing the front-end reflection structure in the two bands and adding a dichroic beam splitter on the back of the main mirror, thereby ensuring the compactness of the system structure. The influence of the dichroic beam splitter on the infrared band imaging was analyzed in detail, as well as the influence of different angles of the dichroic beam splitter from vertical direction. The correct system of long wave infrared band and the image plane were eccentrically processed by -2.39 mm, so the image quality of the infrared band was greatly improved. The validity of the analysis conclusion was verified by the field test imaging. The results show that the system has loose tolerances, simple structure,

基金项目:国家自然科学基金(No.11803075)

第一作者:马占鹏(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为光学系统设计及杂散光的分析与测试。Email: mazhanpeng2017@opt.cn

导师(通讯作者):王虎(1975—),男,研究员,博士,主要研究方向为空间光学探测、空间敏感器光学技术。Email: wanghu@opt.ac.cn

收稿日期:2021-01-01;录用日期:2021-02-07

<http://www.photon.ac.cn>

and a few optical components. This system has the advantages of easy processing, installation, and strong engineering feasibility, which can effectively improve the target detection and recognition capabilities of the camera.

Key words: Visible light; Long-wave infrared; Common aperture; Dual-band; Optical design

OCIS Codes: 110.2960; 110.1220; 120.4570

0 引言

近年来,随着科技发展和空间应用环境的日益复杂^[1],传统单一波段系统探测信息弱、精度低的缺陷逐渐显现,已不能满足如今的探测需求。由于在不同光学谱段下观察目标,获得的信息不同,因此可以把不同波段组合为整体对目标进行观测,以获得更全面的目标信息。可见光成像是研究物体的反射和辐射,获得的图像细节丰富,但在复杂天气和夜晚等光照条件差的情况下观测受限。红外成像具有较强的抗干扰能力,兼具隐蔽性好、不受光照条件限制、可进行远距离和全天时观测的优点^[2],虽然分辨率不如可见光,但在一定程度上弥补了可见光在夜晚成像观测不佳的缺陷。因此可见光和长波红外组成的双波段成像,以其良好的互补性,可以有效提升目标探测与识别能力^[3-5],实现全天候、宽覆盖、高分辨率成像,获得更加全面、精准的目标信息。

早期的多波段成像常采用分口径的方法,系统体积庞大、制造成本偏高,难以保证不同孔径探测时间、空间上的一致性^[6]。随着加工工艺的发展,多波段共口径成为光电系统发展的方向。常用共口径结构由共用前置光路、分光元件及独立后置光路三部分组成。其中,前置光路的实现方式包括卡塞格林式、离轴三反式或折射透镜组。分光元件包括棱镜、分色镜等。后置光路一般由多个单独镜头外加能够响应不同波段的探测器组成^[7]。共口径系统通常是将可见光通道作为主系统进行优化,在主系统确定共用前置光路后,进行红外通道的设计与优化。故红外通道的设计优化难度往往更大,且成像效果不佳。

本文结合工程应用需要,设计了一款小型化双色共口径光学系统。前置光路采用卡塞格林式结构,降低了结构复杂性和生产成本;主反射镜背部加入分色镜进行分光,实现了可见光和长波红外的一体化与同时成像。设计过程中,发现分色镜的倾斜角度对红外波段像质影响较大,通过设置合理的倾斜角度以及对红外校正镜进行有效偏心处理,最终两波段的成像质量良好,并且通过外场试验成像验证了分析结论的正确性。

1 系统指标确定与初始结构计算

1.1 指标确定

表1是系统的设计要求。本设计可见光系统采用像素为 $2\ 048 \times 2\ 048$ 的CCD,像元大小为 $5.5\ \mu\text{m}$;长波红外系统采用像素为 $1\ 024 \times 768$ 的非制冷型面元探测器,像元大小为 $14\ \mu\text{m}$ 。

表1 光学系统设计要求
Table 1 Main parameters of optical system

Items	Visible light	LWIR
Effective aperture /mm	> 120	> 120
Field of view /($^{\circ}$)	3	3
Wavelength range / μm	0.5~0.8	7~10

光学系统的焦距由探测器的参数所决定,满足

$$2f' \tan \omega = 2y' \quad (1)$$

式中, f' 是系统焦距, ω 是半视场角, $2y'$ 是探测器的对角线长度。将表1中视场角与探测器参数代入式(1),可以计算出可见光波段焦距为 $304.2\ \text{mm}$,长波红外焦距为 $342.2\ \text{mm}$ 。

当弥散斑大小覆盖探测器 3×3 像素时,光斑内则集中90%以上的能量,并且能量分布尽可能接近高斯分布,各视场、各波段的能量分布尽可能一致^[8]。因此,要求所有视场80%能量弥散斑直径:可见光谱段 $\leq 20\ \mu\text{m}$,红外谱段 $\leq 60\ \mu\text{m}$ 。本系统具备长焦距、大口径、大视场的特点,因此选择折反式结构,即在经典卡塞格林反射系统后加入校正镜来校正像差。卡塞格林光学结构如图1所示。

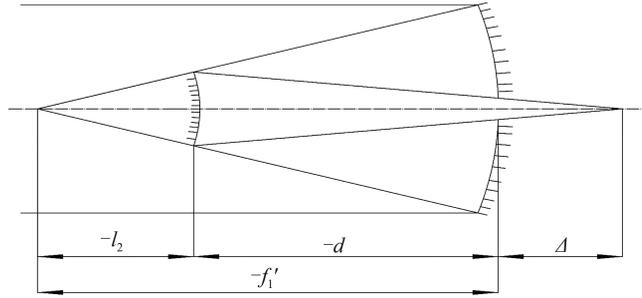


图1 卡塞格林光学结构
Fig. 1 Structure of Cassegrain system

然而卡塞格林结构是有遮拦的,有效口径 D_0 与入瞳口径 D 并不等同,故需重新确定系统的入瞳口径。次镜口径一般不超过主镜的一半,由经验可预设中心遮拦比 α 为0.5,则由

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 = \frac{\pi}{4} D^2 - \frac{\pi}{4} (\alpha D)^2 \quad (2)$$

得到入瞳口径 $D = 138.56$, D 取140 mm。

1.2 初始结构计算

在设计中,系统的孔径光阑与主镜重合。已知系统入瞳直径为140 mm,中心遮拦比 α 为0.5。主镜的 F 数越小,主系统的筒长越短,主镜的加工越困难^[9],综合考虑将主镜的 F_1 设计为1。次镜放大率 β 为

$$\beta = \frac{f_0'}{f_1'} \quad (3)$$

式中, f_0' 、 f_1' 分别为可见光波段的焦距、主镜焦距。主、次镜的曲率半径 R_1 、 R_2 ,以及间隔 d 可由式(4)~(6)确定。

$$R_1 = 2f_1' \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta+1} R_1 \quad (5)$$

$$d = f_1'(1-\alpha) \quad (6)$$

经典卡塞格林系统是使用最广的两镜系统之一^[10],只消除球差,主镜为抛物面,则主镜偏心率为

$$e_1^2 = 1 \quad (7)$$

球差为0时,则次镜偏心率为

$$e_2^2 = \frac{(e_1^2 - 1)\beta^3 + \alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{\alpha(1+\beta)^3} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),可得

$$e_2^2 = \frac{(1-\beta)^2}{(1+\beta)^2} \quad (9)$$

经计算,可见光初始结构参数如表2所示,将数据输入ZEMAX软件中,并进行下一步的优化。

表2 前置光路初始结构
Table 2 Initial structure of pre-system

Items	R_1	R_2	d	e_1^2	e_2^2
Value	-280 mm	-260 mm	-70 mm	1	7.3

2 像差平衡与优化

2.1 可见光的优化设计

卡塞格林系统仅校正了球差,轴外像差并未校正,因此需要在初始结构的基础上进行优化。在主镜背部加入校正镜,将主、次镜二次曲面系数及各镜片曲率半径、间隔设为变量,同时保证优化过程中校正镜中心厚度、边缘厚度的合理性,透镜间隔能满足后续加工及装调要求,在此基础上逐步优化,直到满足可见光波段的指标要求。优化后的入瞳直径为150 mm,中心遮拦比 α 为0.46,满足有效口径大于120 mm,优化后

的可见光波段结构如图2所示。主镜为二次抛物面,口径为150 mm,次镜为二次双曲面,口径为70 mm,材料均为石英玻璃,具备耐高温、热膨胀系数小的优点。镜筒采用钢材材料,主、次镜的连接材料选择碳纤维材料,可以有效降低温度变化对主、次镜间隔的影响。可见光波段校正镜依次采用成都光明ZPK7、ZF71、ZPK5、ZLAF3、ZF5玻璃,价格便宜,性能稳定。

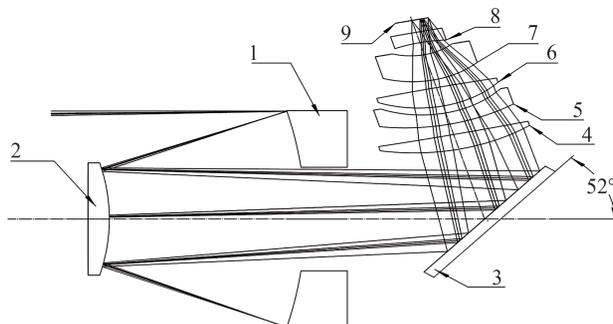


图2 可见光波段结构图
Fig. 2 Structure of visible light

2.2 长波红外的优化设计

为保证两波段能够合并,需要保留前置光路,作为红外系统的初始结构。红外材料透过率普遍较低,即使镀了增透膜,其透过率也不能与可见光玻璃相比,并且红外探测器灵敏度也比可见光探测器要低。因此,为减小红外能量损失及降低成本,采用三片校正镜进行像差校正。在主镜和次镜的曲率半径、厚度、空气间隔、二次曲面系数均保持不变的基础上,将三片红外校正镜的曲率半径、镜片中心厚度、镜片空气间隔及分色镜的厚度、倾斜角设为变量,同时使用操作函数控制畸变和像质的变化,进行逐步优化,直到满足长波红外波段的指标要求。

在优化过程中,发现分色镜的厚度与倾斜角对像质影响很大。原因是倾斜分色镜插入到旋转对称光学系统的会聚光束中,系统将不再旋转对称,其结果是轴上视场位置存在视场像差,比如彗差、像散和横向色差。倾斜分色镜引入最为严重的像差是像散^[11],并随着分色镜的厚度和偏离垂直方向倾斜角度的增大尤为严重。结合实际加工情况,分色镜厚度取6 mm,并进一步确定分色镜倾斜角及其他优化措施。

分色镜与垂直方向夹角越小,红外系统像质越好,同时主镜1和可见光校正镜4的水平间隔则要更大,才能保证可见光校正镜组及其像面正常反射,与红外系统进行拼接。最终确定分色镜偏离垂直方向38°(与水平方向的夹角为52°),较常见的45°角来说,主镜1和可见校正镜4水平间隔要大一些,但红外像质得到了提高。在该距离和角度下,保证了主镜1与可见校正镜4、5、6不发生干涉,同时给镜筒设计及安装留有余量,但红外像质还有待进一步提高。

2.3 红外校正镜的偏心处理

光线通过分色镜时,在其内部发生折射,光轴在分色镜中发生了微小位移,导致成像较差。图3为分色镜折射示意图。分色镜材料选择的是ZnSe,吸收系数小,可以降低对长波红外探测能量的损耗^[12]。

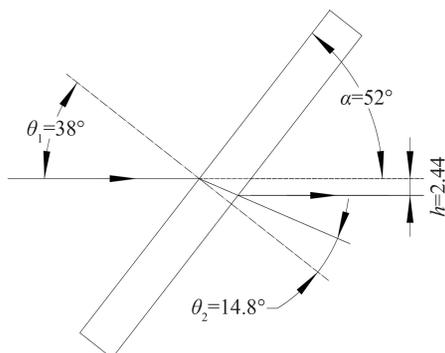


图3 分色镜折射示意图
Fig. 3 Refraction diagram of the dichroic beam splitter

当入射角 $\theta_1 = 38^\circ$ 时,折射角 $\theta_2 = 14.8^\circ$,光轴向下平移了 2.44 mm。因此,对红外校正镜 10、11、12 以及像面 13 进行相应的偏心处理,并对偏心量进行优化。当偏心量为 -2.39 mm,红外像质得到显著提高,说明对红外校正镜及像面的偏心处理十分有效。优化后的长波红外结构如图 4 所示,分色镜长为 100 mm。红外校正镜材料分别为 Ge、ZnSe、Ge,光焦度分别为正、负、负,中心厚度分别为 10 mm、8 mm、5.88 mm。在保证红外成像质量和加工装调的同时,减小了红外校正镜的厚度,节约了材料成本,减轻了整个系统的质量。此外,通过材料匹配和光焦度分配实现光学被动无热化^[13]。

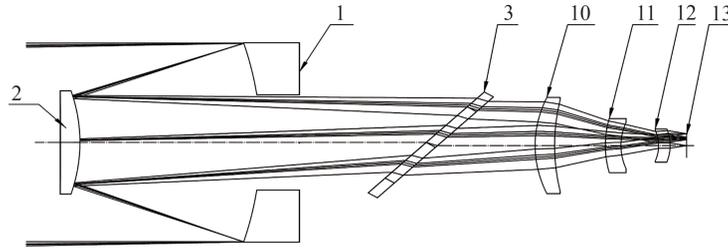


图 4 长波红外结构图
Fig. 4 Structure of LWIR

将设计好的可见与红外系进行整合,一体化结构如图 5 所示。当目标经反射系统反射之后,利用位于主镜背部的分色镜分光,可见光经过反射、长波红外经过透射,分别引入到各自的校正光路中成像,两波段使用独立的探测器,保证了光学系统的小型轻量化。由于共轴系统存在中心遮拦,有效通光孔径和通光面积不可避免的减小,会损失部分能量,影响成像照度,因此在满足设计要求的情况下,尽可能减小次镜口径^[14]。

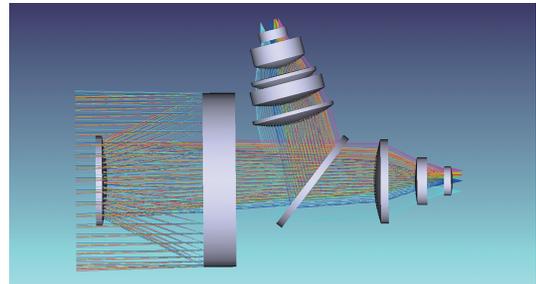


图 5 可见/红外双色一体化结构图
Fig. 5 Structure of visible / LWIR dual-color integrated system

3 像质评价

为了保证系统的探测性能,利用 ZEMAX 对两波段的成像性能,包括能量分布、弥散斑及畸变进行全面评估。两波段设置相同的 5 个视场,分别为 0° 、 0.75° 、 0.9° 、 1.06° 、 1.5° 。可见光在 $0.5 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内,取中心波长为 $0.65 \mu\text{m}$;长波红外在 $7 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内,取中心波长为 $8 \mu\text{m}$ 。

图 6(a)、(b)分别为可见光、长波红外能量集中度曲线,由图 6 可知,两波段的能量集中度的分布较集中。表 3 给出了具体数值。由表 3 可知,80% 能量集中度处弥散斑直径:可见光直径在 $11 \mu\text{m} \sim 15.2 \mu\text{m}$,长波红外直径在 $36 \mu\text{m} \sim 38 \mu\text{m}$,满足可见光弥散斑直径 $\leq 20 \mu\text{m}$,长波红外弥散斑 $\leq 60 \mu\text{m}$ 的设计要求。

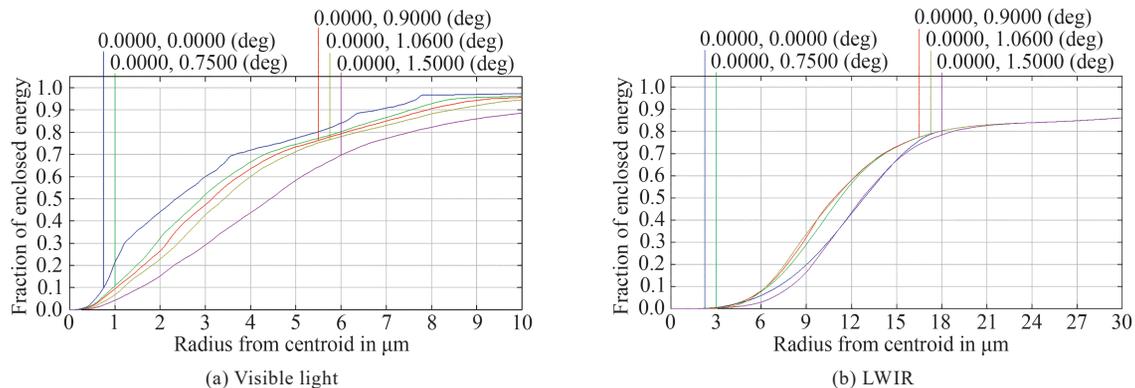


图 6 可见与红外能量集中度曲线
Fig. 6 Encircled energy of visible and LWIR

表3 双波段不同视场弥散斑直径(集中80%能量)
Table 3 Diameter of different fields of two bands (with 80 percent of energy)

Field	0°	0.75°	0.9°	1.06°	1.5°
Visible light	11 μm	12 μm	12.4 μm	12.8 μm	15.2 μm
LWIR	36 μm	36 μm	36 μm	36 μm	38 μm

图7(a)、(b)分别为可见光、长波红外的点列图,表4给出了两波段在不同视场下RMS半径的具体数值。由表4可知,可见光RMS半径最大值为10.116 μm,长波红外RMS半径最大值为12.629 μm,满足设计要求。

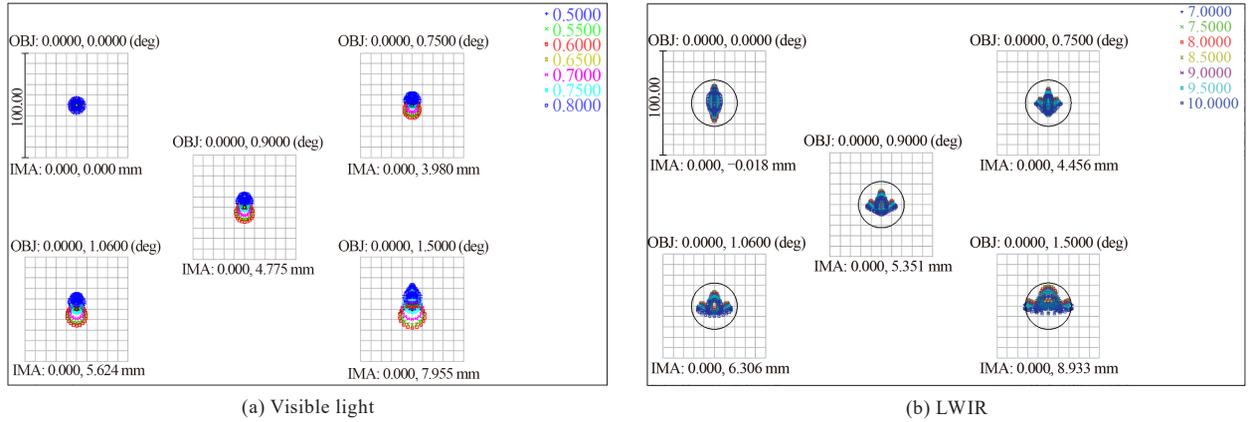


图7 可见与红外点列图

Fig. 7 Spot diagram of visible and LWIR

表4 双波段不同视场RMS半径值
Table 4 RMS Radius of different fields of two bands

Field	0°	0.75°	0.9°	1.06°	1.5°
Visible light	3.536 μm	5.232 μm	5.972 μm	6.892 μm	10.116 μm
LWIR	9.902 μm	8.266 μm	8.155 μm	8.595 μm	12.629 μm

图8(a)、(b)分别为可见光、长波红外的畸变曲线。由图8可知,可见光波段畸变小于0.2%,长波红外畸变小于0.05%,满足设计要求。

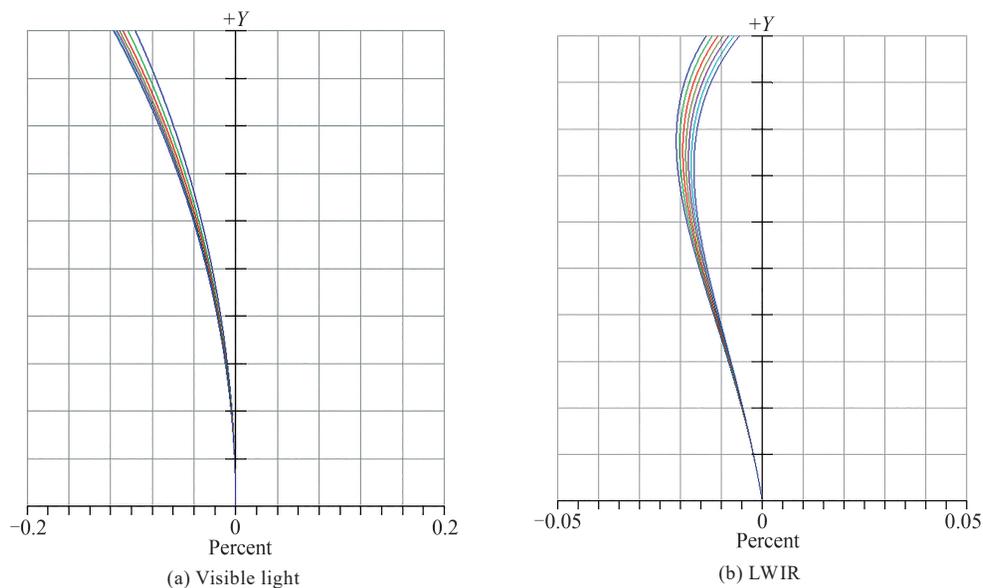


图8 可见与红外畸变曲线

Fig. 8 Distortion of visible and LWIR

4 工程可行性分析

4.1 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^[15],直接关系到光学系统的成像质量和生产成本。不合理的公差分配将会影响系统的加工、装调难度^[16],并会延长研制周期。按照经验及实际工艺水平,先给出较为宽松的各参量公差预定值,对设计结果进行公差分析,找出特别敏感的公差,对其公差进行重新分配。利用ZEMAX中的公差分析功能,对本系统弥散斑大小随公差变化情况进行分析。图9为预设公差值。

图9 预设公差值

Fig. 9 Preset tolerance values

通过分析可知,可见光系统的敏感公差为次镜2的倾斜公差与偏心公差;长波红外系统的敏感公差为次镜2、分色镜3的倾斜公差、偏心公差。经过反复调整,这几项公差应调整为:次镜2的偏心公差为 ± 0.05 mm,倾斜公差为 $\pm 0.05^\circ$;分色镜3的偏心公差为 ± 0.15 mm,倾斜公差为 $\pm 0.15^\circ$ 。系统弥散斑公差的分析结果如表5所示。对表5分析可知,可见光在给定视场内集中80%能量的弥散斑直径小于 $15.84 \mu\text{m}$ 的概率大于80%,长波红外波段给定视场内集中80%能量的弥散斑直径小于 $31.79 \mu\text{m}$ 的概率大于80%,均满足设计要求,该系统具有较好的容差特性。

表5 弥散斑公差分析表

Table 5 RMS spot radius tolerance analysis

Probability	RMS Spot Radius / μm	
	Visible light	LWIR
90%	7.058	15.79
80%	6.730	13.51
50%	5.748	11.12
20%	4.970	9.412
10%	4.908	8.682

4.2 加工与装调要求

图10是整个双色系统的三维结构图,包含机械结构件及遮光罩。整个系统长宽高分别为 $501.4 \text{ mm} \times 197 \text{ mm} \times 251.9 \text{ mm}$,重量约为5.5 kg。整个系统由主遮光罩、反射系统、可见-红外分光组件、底板以及红外光子系统和可见光子系统组成。

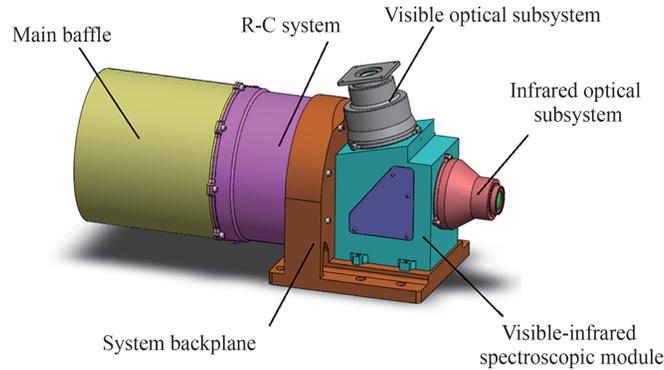


图10 双色一体化三维结构图
Fig. 10 3D structure of dual-color integrated system

光学零件加工时,应控制表面均方根RMS值及光学零件的内应力,确保光学零件具有良好的光学性能;结构零件加工时,经过多次时效处理后,采用数控精密车床一次精加工完成,实现零件的高精度加工尺寸和形位公差,并且消除零件切削时产生的内应力和减小零件的微变形。

装调时,光学零件入框和对心加工后,用Zygo干涉仪测量敏感镜片面型RMS值,确保产品最终装配时,光学零件的内应力在合适范围内;通过光学组件之间的间隔圈修正各光学零件之间的光学间隔,每一个间隔圈的上下面平行差严格控制,确保光学组件的光轴与光学系统的光轴一致;采用超高精度的对心仪对每一光学镜组进行逐片对心装调装配,实现光学镜片光轴的高度重合,以保证光学系统光轴同轴度要求。

4.3 外场观星实验

双色系统外场观星实验地点为陕西省天文台,海拔1301.9 m,实验时间为冬季晚七点,天气晴朗,满足观星条件。图11(a)是相机实物图,图11(b)、(c)分别是相机可见波段和长波红外波段对月成像图。从图中可清晰看到月球及其表面形貌,成像良好,到达预期目标。



图11 相机外场测试
Fig. 11 Field test picture of the camera

5 结论

设计了一种可见/长波红外双色共孔径光学系统,两个波段通过共用前端反射结构,实现了共口径一体化,结构紧凑,减小了整个系统的体积和质量。在可见光系统优化完成以后,确定了分色镜的倾斜角度并对红外校正镜及像面进行了偏心处理,最终两波段的像质良好,公差比较宽松,能够满足设计要求。通过外场观星测试,达到预期的目标。该设计工程实用性较强,对于多波段探测具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] GAO Ming, LIU Binbin, LIU Jun, et al. Design of visible light, medium/long-infrared tri-band Shared-aperture and con-focal optical system[J]. Laser&Infrared, 2015, 45(3): 301-306.
高明, 刘彬彬, 刘钧, 等. 可见光、中/长波共口径共焦距光学系统设计[J]. 激光与红外, 2015, 45(3): 301-306.
- [2] GUO Yulin, YU Xun, CAI Kejun, et al. Optical design of TV/IR dual-band common-aperture system [J]. Infrared Technology, 2018, 40(2): 125-132.

- 郭钰琳,于洵,蔡珂珺,等.可见光/中波红外双波段共口径光学系统设计[J].红外技术,2018,40(2):125-132.
- [3] CHEN Zhe, ZHANG Xingxiang, CHEN Changzheng, et al. A common aperture coaxial three-mirror optical system with high resolution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 310-316.
陈哲,张星祥,陈长征,等.高分辨率共孔径同轴三反光学系统[J].中国激光,2015,42(11):310-316.
- [4] WANG Yidong, LI Wenqiang, MENG Qingbin. Design of a visible light /LWIR dual-band mutual path optical system [J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12): 94-97.
王艺栋,李文强,孟庆斌.可见光/红外双波段共光路光学系统设计[J].电光与控制,2018,25(12):94-97.
- [5] SUN Ting, ZHU Haiyan, YANG Zijian, et al. Design of dual-band common aperture camera optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3):348-351.
孙婷,朱海燕,杨子健,等.双波段共孔径相机光学系统设计[J].应用光学,2017,38(3):348-351.
- [6] HAN Peixian, REN Ge, LIU Yong, et al. Optical design of VIS/MWIR dual-band common-aperture system[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(3):435-440.
韩培仙,任戈,刘永,等.可见/中波双波段共口径光学系统设计[J].应用光学,2020,41(3):435-440.
- [7] XING Zhenchong. Research on miniature telefocal multiband common aperture optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
邢振冲.灵巧型长焦多波段共口径光学系统的研究[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [8] DONG Ying, XING Fei, YOU Zheng. Determination of the optical system parameters for a CMOS APS based star sensor [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 663-668.
董瑛,邢飞,尤政.基于CMOSAPS的星敏感器光学系统参量确定[J].宇航学报,2004,25(6):663-668.
- [9] HAN Peixian, JING Guang, ZHONG Xing. Design of new type of micro video-capable satellite optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 691-697.
韩培仙,金光,钟兴.一种新型微小视频卫星光学系统设计[J].应用光学,2015,36(5):691-697.
- [10] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [11] FISCHER R E, TADIC-GALEB B. Optical system design [M]. United States of America: The McGraw Hill companies, 1976.
- [12] 余怀之.红外光学材料[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [13] CHENG Weining. Design of MIR and LIR wave optical system with common aperture [J]. Electro-Optic Technology Application, 2016, 31(3): 1-4.
程伟宁.中长波共孔径光学系统设计[J].光电技术应用,2016,31(3):1-4.
- [14] WANG Hu, LUO Jianjun. Optical system design of multi-spectral camera for space debris [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1188-1193.
王虎,罗建军.空间碎片多光谱探测相机光学系统设计[J].红外与激光工程,2014,43(4):1188-1193.
- [15] 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): 293-300.
郝思远,谢佳楠,温茂星,等.轻小型长波红外光学系统的设计及实现[J].红外与激光工程,2020,49(9):293-300.
- [16] LI Jianlin, LEI Guangzhi, BAI Yang, et al. Optical path design for catadioptric star sensor with large aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 0611002.
李建林,雷广智,白杨,等.大口径折反式星敏感器光学系统的光路设计[J].光子学报,2020,49(6):0611002.