

低成本小型化遥感光学系统设计

郭欣瑜 周顺 梅超 闫阿奇 马迎军 齐自淼 武银子

Design of remote sensing optical system with low cost and miniaturization

GUO Xinyu, ZHOU Shun, MEI Chao, YAN Aqi, MA Yingjun, QI Zimiao, WU Yinzi

引用本文:

郭欣瑜, 周顺, 梅超, 等. 低成本小型化遥感光学系统设计[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 693–699. DOI: 10.5768/JAO202445.0401004

GUO Xinyu, ZHOU Shun, MEI Chao, et al. Design of remote sensing optical system with low cost and miniaturization[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 693–699.
DOI: 10.5768/JAO202445.0401004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一款小型化可见光两档 7.5^{\times} 变焦系统的设计

Design of miniaturized two-steps 7.5^{\times} zoom system in visible band

应用光学. 2021, 42(1): 30–35 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101005>

小型化宽谱段星敏感器光学系统设计

Optical system of star sensor with miniaturization and wide spectral band

应用光学. 2021, 42(5): 782–789 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501004>

可见光/红外双视场全景式航空侦查相机光学系统设计

Optical system design of visible/infrared and double-FOV panoramic aerial camera

应用光学. 2017, 38(1): 7–11 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101002>

大口径超长焦距紧凑型光学系统设计

Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length

应用光学. 2018, 39(5): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501008>

电视观瞄/可见光直视观瞄光学系统设计

Optical system design of TV sight/visual direct-view sight

应用光学. 2017, 38(4): 538–542 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401004>

四通道可见光光谱相机的设计

Design of four-channel visible-spectral camera

应用光学. 2019, 40(3): 393–398 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0301006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 04-0693-07

低成本小型化遥感光学系统设计

郭欣瑜^{1,2}, 周顺¹, 梅超^{2,3}, 闫阿奇^{2,3}, 马迎军^{2,3}, 齐自森^{2,3}, 武银子²

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
3. 西安市飞行器光学成像与测量技术重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 随着航空航天成像技术的发展, 遥感成像观测系统需求不断增加, 为了简化光学系统的加工装配复杂度, 缩小光学系统体积, 该文提出了一种低成本、小型化遥感成像光学系统设计方法。在全球面镜的基础上, 配合氟化钙等低色散材料, 设计了一种焦距 2 000 mm, 适用于 5.08 cm (2 inch) 探测器的光学成像系统, 该系统在 50 lp/mm 处 MTF (调制传递函数) 优于 0.41, 体积与 R-C 系统接近, 系统的球面主、次镜避免了在加工装调时使用非球面补偿器, 降低了加工装调成本。同时设计了新型百叶窗遮光罩结构, 有效避免了传统外遮光罩结构形式体积过大的问题, 规避角大于 12° 后 PST (点源透射比) 值均小于 10^{-6} , 且光学体积仅为 $\phi 227 \times 421 \text{ mm}^3$, 远小于传统外遮光罩形式。该系统具有低成本、结构小型化、轻量化、像质优良、杂散光抑制良好等优点, 在工程应用中可以满足航空航天成像系统的使用要求。

关键词: 光学设计; 遥感光学成像系统; 可见光; 长焦距; 小型化

中图分类号: TN202; TH743

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0401004](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401004)

Design of remote sensing optical system with low cost and miniaturization

GUO Xinyu^{1,2}, ZHOU Shun¹, MEI Chao^{2,3}, YAN Aqi^{2,3}, MA Yingjun^{2,3}, QI Zimiao^{2,3}, WU Yinzi²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 3. Xi'an Key Laboratory of Spacecraft Optical Imaging and Measurement Technology, Xi'an 710119, China)

Abstract: With the development of aerospace imaging technology, the demand for remote sensing imaging observation system is increasing. In order to simplify the alignment and assembly complexity of the optical system and reduce the volume of the optical system, a designed method for low-cost and miniaturized remote sensing imaging optical system was proposed. On the basis of all spherical lenses and low dispersion materials such as calcium fluoride, an optical imaging system with a focal length of 2 000 mm and suitable for 5.08 cm (2 inch) detectors was designed. The modulation transfer function (MTF) was greater than 0.41 at 50 lp/mm, and the volume was close to the R-C system. The spherical primary and secondary mirrors of the system avoided the use of aspheric compensators during alignment and adjustment, which reducing the cost. The structure of a new type of louver baffle was designed to effectively avoids the problem of excessive volume of the conventional outer baffle structure. After the avoidance angle is greater than 12°, the point source transmittance (PST) value is less than 10^{-6} , and the optical volume is only $\phi 227 \times 421 \text{ mm}^3$, much smaller than the conventional outer baffle form. The system offers advantages of low cost, miniaturized structure, light weight, excellent image quality, and good stray light suppression, which can meet the requirements of aerospace imaging system in engineering applications.

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-09-04

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划项目 (21JY017); 中国科学院“西部之光”人才培养计划 (XAB2021YN14)

作者简介: 郭欣瑜 (1997—), 女, 硕士, 主要从事光学系统设计研究。E-mail: g18091823519@outlook.com

通信作者: 周顺 (1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密机械设计、MEMS 技术和先进光学制造技术研究。

E-mail: zsemail@126.com

Key words: optical design; remote sensing optical system; visible light; long focal length; miniaturization

引言

遥感技术可以实时获取直观的有效目标信息,为许多突发自然灾害如洪水、地震、森林火灾等应急事件提供第一手资料,在军事侦察、环境与灾情监测、地质勘探、地理测绘、气象预报、科学实验等重要领域发挥着重要作用^[1-6]。其中光学遥感技术的重要组成部分是遥感光学成像技术。

遥感光学成像系统普遍采用望远结构形式,早期的望远结构形式有经典的开普勒型和伽利略型^[7-8],但其存在视场小,焦长比小的问题^[9]。1876年法国阿·曼金研制的一种消球差折反射式光学元件,称为曼金镜^[10-11],由第一折射表面和第二反射表面构成^[12]。早期通过选择第一表面的光焦度校正反射面的球差,相比于1980年代的折反系统,曼金镜在加工工艺方面相对于非球面镜有着简单、周期短和成本低的优势。因此,喻研芳^[13]针对某折反式红外跟踪光学系统,开展了基于曼金镜的光学系统设计,计算结果表明,引入曼金镜替换主镜时会使折反光学系统色差更大,故其折反式光学系统采用了非球面主反射镜和球面曼金镜结构形式次镜,实现了焦距为40 mm、视场为6°的红外跟踪系统,有效降低了加工装配难度。RIEDL M J等人^[14]针对曼金镜在折反射光学系统中的像差进行了分析,尤其是在卡塞格林系统中对主镜和次镜分别使用曼金镜结构后的球差变化做了实例计算,最终得出若折反射系统F数较小,采用曼金镜同时替换主、次镜才能更好地消除球差的结论。

随着光学加工和装调技术的发展,卡塞格林系统加工装配难度急剧下降,越来越多地应用于各类遥感成像系统中。闫佩佩等人^[15]设计了一款焦距为2000 mm,全视场为1.66°的R-C系统,主镜到遮光罩外顶点长度为360 mm,杂散光抑制能力良好,在规避角2°时PST从10⁻²快速下降至10⁻⁵。张雷等人^[16]针对遥感星座采用卡塞格林系统,设计了焦距为1850 mm、F数为8.8的高分辨率视频相机,在91 lp/mm处调制传递函数大于0.28,光机系统经优化后体积达到φ254×482 mm³。

虽然R-C系统^[17]的加工装调技术已经比较成熟,但在加工装调时均需要补偿器消除非球面系数,无法定心装配,只能采用干涉仪测量波前参数,增加了光学系统的加工装配复杂度及成本。鉴于此,本文设计了一种基于全球面的折反射式

长焦距光学成像系统,该系统的性能与R-C系统的成像性能相近,体积相当。该系统使用球面主镜、球面曼金次镜、球面矫正镜组,极大地降低了生产和装配方面的复杂度,可以采用传统的定心装配,有效控制了成本。设计的百叶窗形式遮光罩使该系统体积减小为φ227×421 mm³,极大地降低了系统的体积和重量,实现了小型化。

1 光学系统设计与分析

1.1 光学系统设计参数

遥感光学系统常采用大像元探测器,以保证有足够的满阱电荷和较好的灵敏度。本文取探测器像元尺寸为10 μm×10 μm,探测器靶面尺寸为5.08 cm(2 inch),对应像元数可达5 M pixel。光学系统全视场畸变限制在0.5%以内,具体的光学系统主要指标如表1所示。

表1 光学系统设计指标

Table 1 Design specification of optical system

参数	指标
工作波段/nm	480~650
F数	10
探测器像元尺寸/(μm×μm)	10×10
焦距/mm	2 000
相对畸变/%	≤0.5

1.2 设计方法

虽然曼金镜起步较早,但受到早期光学材料特性和装调技术限制,逐步被R-C系统替代,并且R-C系统形成了自己独立的初始结构计算模型。本文基于现有光学材料发展技术,以R-C系统为基础开展优化设计,完成了较好的设计结果。具体设计思路如图1所示。

基于上述技术指标,首先开展R-C结构的初始结构计算,R-C系统结构图如图2所示。考虑到系统装调需求,定义焦点与主镜反射面的距离 A 为120 mm,放大率 β 为-5;根据参考文献[15]提供的初始结构计算方法可得R-C系统其余参数,即次镜与主镜焦点间距离 I_2 为-86.666 7 mm,遮拦比 α 为0.216 7,主镜曲率半径 R_1 为-800 mm,次镜曲率半径 R_2 为-216.666 7 mm,主、次镜间距 d 为-313.333 3 mm;根据等晕系统条件,当 $S_I=S_{II}=0$ 时,可得主镜的偏心率平方 e_1^2 为1.022 1,次镜的偏心率平方 e_2^2 为2.449 5。

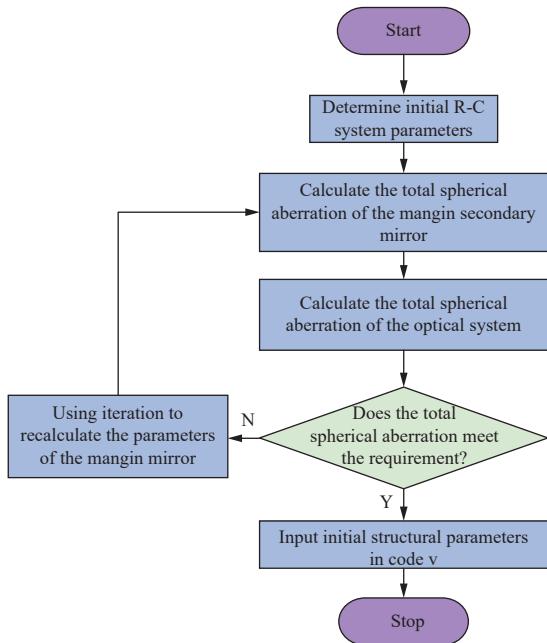


图 1 长焦距光学系统设计方法

Fig. 1 Design method for long focal length optical system

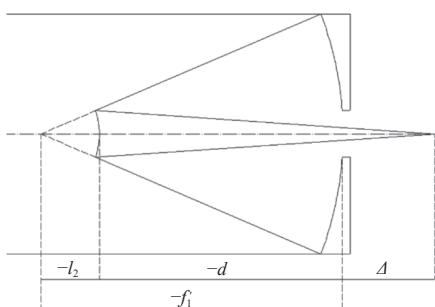


图 2 R-C 系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of R-C system

得到 R-C 系统的初始结构参数后, 选用曼金镜替换 R-C 系统的二次曲面镜。替换主反射镜时, 并不会极大地降低加工和装配的难度, 因此重点考虑替换次镜。光线在曼金镜内的折反射示意图如图 3 所示。图 3 中 u_i 为第 i 面的物方光束孔径角。

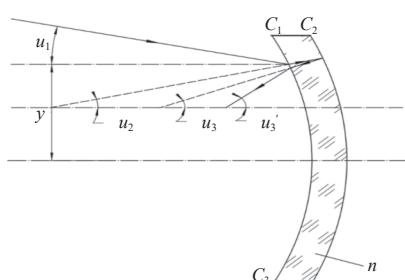


图 3 曼金镜光线折反射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light reflection and refraction of Mangin mirror

角, u'_3 为第 3 面的像方光束孔径角, y 为光线在折射面上的入射高度, C_1 为第一面曲率(即第三面曲率 C_3), C_2 为第二面曲率, n 为曼金镜的折射率^[14]。

为了简化计算模型, 采用薄曼金镜数学模型, 即曼金镜厚度 d 取 0, 其光焦度计算公式为

$$\phi_m = \frac{1}{f_m} = 2C_1(n-1) - 2C_2n \quad (1)$$

式中: ϕ_m 为曼金镜的光焦度; f_m 为曼金镜的有效焦距; C_1 为第一面曲率(即第三面曲率 C_3); C_2 为第二面曲率; n 为曼金镜材料的折射率。

计算可得 R-C 系统主镜的球差为 -7.8988 mm, 设计的曼金镜光焦度同次镜相同, 球差与主镜球差相消。同理可得 R-C 系统次镜的有效焦距 $f_m = -R_2/2$ 为 108.3333 mm(R_2 为上述系统次镜非球面顶点曲率半径), R-C 系统次镜入射光线孔径角 u_1 为 0.2450 rad, 次镜的入射高度 y 为 21.6667 mm, 次镜出射光线孔径角为 0.0500 rad。

应用三级球差公式可得曼金镜改形的方程为

$$u'_1 = \frac{u_1}{n} + \frac{(n-1)}{n} C_1 y \quad (2)$$

$$TSC_{C_1} = \frac{(u'_1 - C_1 y - u_1)(C_1 y - u_1)^2 y(n-1)}{2nn'_k u'_k} \quad (3)$$

$$u'_2 = 2C_2 y - u'_1 \quad (4)$$

$$TSC_{C_2} = \frac{(u'_2 - C_2 y - u'_1)(C_2 y - u'_1)^2 yn}{n'_k u'_k} \quad (5)$$

$$u'_3 = (1-n)C_3 y + nu'_2 \quad (6)$$

$$TSC_{C_3} = \frac{(u'_3 - C_3 y - u'_2)(C_3 y - u'_2)^2 yn(n-1)}{2n'_k u'_k} \quad (7)$$

式中: n 为曼金镜折射率, u_1 为第 1 面的物方光束孔径角; u'_i 为第 i 面的像方光束孔径角; y 为光线在折射面上的入射高度; $u'_k n'_k$ 为射出系统的轴向光线最后倾角 u'_k 与所进入介质折射率 n'_k 之积; TSC_i 为第 i 面所产生的三级球差; TSC_m 为曼金镜的总球差。

综上可知, 总的横向球差为 3 个面贡献之和, 即:

$$TSC_m = \sum_{i=1}^3 TSC_i = TSC_{C_1} + TSC_{C_2} + TSC_{C_3} \quad (8)$$

通过迭代算法可得曼金镜 C_1 为 -0.0100, C_2 为 1.8558×10^{-4} , 最后求得曼金镜 TSC_m 为 8.1096 mm, 该光学系统的总球差为 0.2108 mm。

1.3 设计结果优化与分析

设主镜为光阑面, 在上述初始结构的基础上进一步优化设计。优化后的传递函数始终无法接近衍射极限, 主要原因在于主镜的球差过大, 如图 4 所示。

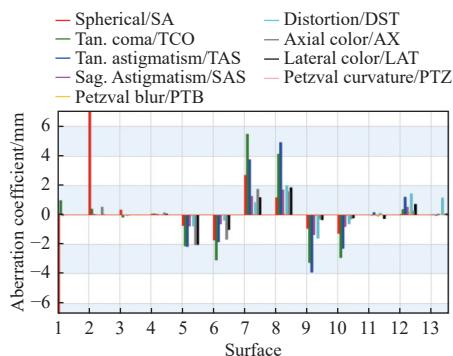


图 4 初始结构的三级像差

Fig. 4 Third order aberration of initial structure

采用低折射率、低色散的氟冕玻璃后,传递函数有了较大提升。随后又尝试 CaF_2 等超低色散材料进行优化,并将后镜组中最后一片透镜也采用 CaF_2 等超低色散材料,进一步优化后的三级像差如图 5 所示。从图 5 可以看出,光学系统的球差和色差得到了很好的抑制。

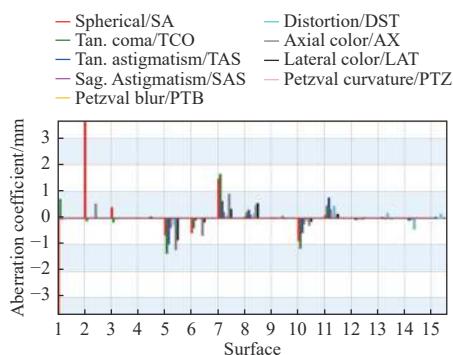


图 5 最终光学系统的三级像差

Fig. 5 Third order aberration of final optical system

该光学系统的调制传递函数曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,在空间频率 50 lp/mm 处全视场 MTF 均大于 0.41。光学系统结构如图 7 所示。该光学系统采用氟化钙、重火石玻璃、重镧火石玻璃和石英材料,该长焦距成像光学系统元件全部采用球面,便于加工装调,具有较好的成像质量。

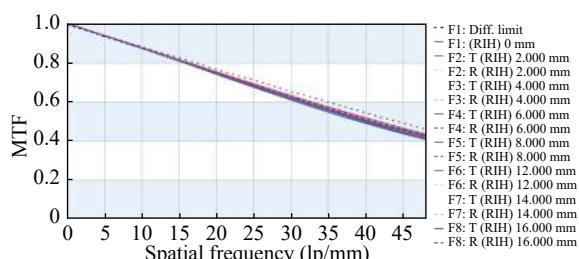


图 6 光学系统的调制传递函数曲线

Fig. 6 MTF curves of optical system

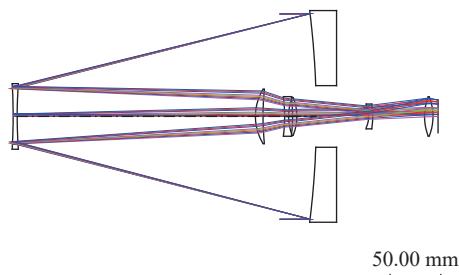


图 7 光学系统外形结构图

Fig. 7 Outline structure diagram of optical system

全球面长焦距成像光学系统的最终设计结果如表 2 所示。从表 2 可知,光学系统畸变不大于 0.5%,体积为 $\phi 227 \times 421 \text{ mm}^3$ 。总之,基于曼金镜结构形式的全球面折反射光学系统成像参数优异,与相同类型的光学系统相比,在体积、重量方面具有优势。

表 2 光学系统设计结果

Table 2 Design results of optical system

参数	设计结果
工作波段/nm	480~650
F数	10
探测器像元尺寸/($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	10×10
焦距/mm	2000
视场角/(°)	0.9
相对畸变/%	≤0.5
口径/mm	200
长度/mm	415
后截距/mm	15
面遮拦比	0.15

2 实验结果与分析

在光学系统遮光罩抑制杂散光方面作出新的尝试,力求在不减小杂散光抑制水平的情况下减小光学系统的体积。航空航天遥感类光学系统往往都存在较大的外遮光罩,是影响成像系统体积重量的重要因素之一。对于折反式成像光学系统,主、次镜之间的直接漏光是杂散光的主要来源之一^[18-19],太阳抑制角是限制外遮光罩长度的重要因素之一。以本光学系统为例,若采用传统的设计方法,对于 30° 的太阳抑制角,主镜到外遮光罩边缘的长度需要 352 mm。针对折反射式望远成像光学系统主、次镜之间存在的漏光和太阳光抑制角的问题,本文基于百叶窗结构形式,设计了一种新型遮光罩结构,具体结构如图 8 所示。首先,参

考文献 [20] 提供的挡光环设计方法设计挡光环;其次,根据几何光学计算主镜边缘视场的上光线下入射主镜 M_1 到次镜 M_2 及镜 1 的边缘视场光线路径,即:AB-BC-CD-DE-EF;再次,在遮光罩最左侧轮廓边缘 L 点向光轴方向做垂线 KL;再次,做 BC 交 FL 于 G_1 点,沿 G_1 向左做光轴平行线交 KL 于 H_1 ;然后,做 BC 交 FH_1 于 G_2 点,沿 G_2 向左做光轴平行线交 KL 于 H_2 ;同理,直至做到第 i 条平行线,做 BC 交 FH_i 于 G_{i+1} 点,连接次镜镜座及 G_{i+1} 点,得到次镜内遮光罩位置。最后,得到百叶窗结构形式的遮光罩,将主镜到遮光罩边缘长度缩小到 293.56 mm,减小到原来的 0.83,实现了小型化。

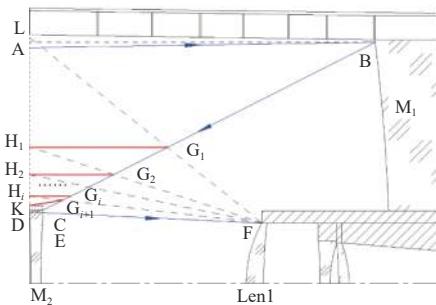
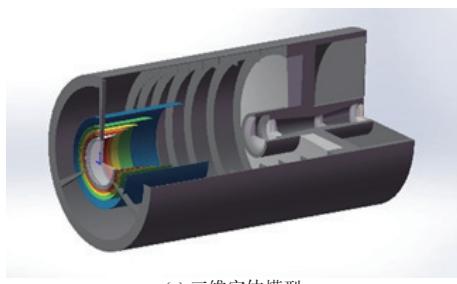


图 8 百叶窗遮光罩结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of louver baffle

在光学仿真软件 Tracepro 中建立该光学系统和遮光罩实体模型,如图 9 所示。由于系统工作在可见光波段,设入射光波长为 0.55 μm,进行杂散光分析。



(a) 三维实体模型

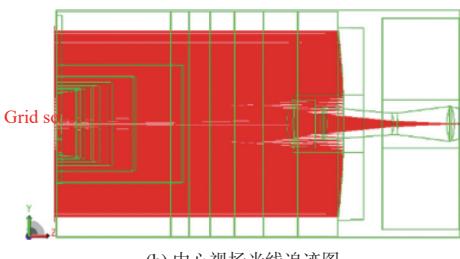


图 9 百叶窗遮光罩结构光学系统

Fig. 9 Optical system with louver baffle structure

采用基于随机模型的 Mento-Carlo 方法进行计算。设置阈值为 10^{-7} ,在表面为 tracepro 自带的 black paint 模型的情况下,分别对 $0.5^\circ \sim 60^\circ$ 之间 29 个规避角进行光线追迹,获取新型遮光罩设计结果下整个光学系统 PST(点源透射比)曲线,如图 10 所示。

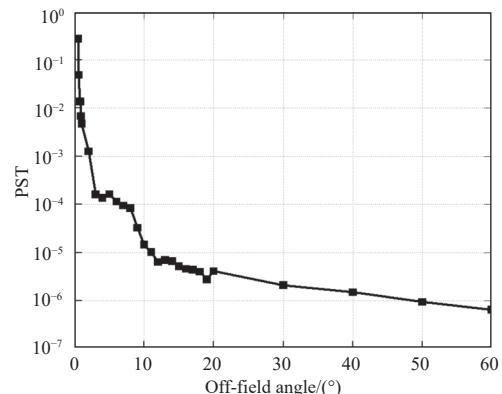


图 10 光学系统点源透射比曲线

Fig. 10 Point source transmittance curve of optical system

由图 10 可知,PST 曲线下降迅速,在规避角 12° 处到达了 10^{-6} 量级,表明该遮光罩性能与传统遮光罩杂散光抑制水平相近,但体积明显下降。

3 结论

本文提出了一种低成本、小型化遥感光学系统设计方法,配合新型遮光罩设计方法,设计了一个具有良好成像质量的全球面长焦距折反射式光学系统。该光学系统可以采用传统的定心装配工艺,在加工装配过程中避免使用非球面补偿器,降低了装配复杂度和成本。根据该光学系统的特点设计了百叶窗式遮光罩,与传统设计方法的遮光罩相比,体积减小到原来的 0.83,实现了小型化,系统整体体积为 $\phi 227 \times 421 \text{ mm}^3$ 。在 Tracepro 中对系统进行杂散光分析,计算了系统的点源透射比 PST,在规避角大于 12° 后 PST 值均小于 10^{-6} ,能够满足实际工程要求。

参考文献:

- [1] 曾晨欣,李加慧,谭奋利,等.超轻小宽视场高分辨无人机机载相机光学系统设计[J].激光与光电子学进展,2023,60(5):244-251.
- ZENG Chenxin, LI Jiahui, TAN Fenli, et al. Optical design of an airborne light weight camera with wide field of view and high resolution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 244-251.

- [2] 王保华, 张绪国, 封宇航, 等. 可见光/红外共口径模块化光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 328-334.
WANG Baohua, ZHANG Xuguo, FENG Yuhang, et al. Design of visible/infrared common - aperture modular optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 328-334.
- [3] 陈茂林, 刘旭辉, 周浩浩, 等. 适用于微纳卫星的微型电推进技术研究进展[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(2): 188-206.
CHEN Maolin, LIU Xuhui, ZHOU Haohao, et al. Research and development of micro electric propulsion technology for micro/nano satellites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(2): 188-206.
- [4] 沙治波, 俞越, 焦建超. 国外微纳遥感载荷技术最新进展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(5): 39-48.
SHA Zhibo, YU Yue, JIAO Jianchao. The latest development of micro-nano remote-sensing payload technology abroad[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(5): 39-48.
- [5] 任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 323-329.
REN Zhiguang, LI Xuyang, NI Dongwei. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 323-329.
- [6] 梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 242-249.
MEI Gui, ZHAI Yan, MIAO Jianyu, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 242-249.
- [7] SMITH W J. Modern optical engineering: the design of optical systems[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 251-255.
- [8] 黄龙. 大型望远镜指向精度及轴系技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(光电技术研究所), 2016.
HUANG Long. Research in pointing error and shafting technologies for large telescope[D]. Beijing: University Chinese Academy of Sciences(The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2016.
- [9] 顾宪松. 紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 33-38.
GU Xiansong. Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 33-38.
- [10] RIEDL M J. The Mangin mirror and its primary aberrations[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(7): 1690-1694.
- [11] CIFUENTES A, ARASA J, MCDL F. Use of Mangin and aspheric mirrors to increase the FOV in Schmidt-Cassegrain telescopes[J]. SPIE, 2008, 7100: 210-218.
- [12] 杜康. 微纳卫星遥感相机光学系统紧凑化设计与杂散光分析[D]. 北京: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
DU Kang. Optical system compact design and stray light analysis of micro/nano satellite remote sensing camera[D]. Beijing: University Chinese Academy of Sciences(Changchun Insitute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [13] 喻妍芳. 红外跟踪光学系统中曼金镜的设计与应用[J]. 航空兵器, 1984(6): 15-18.
YU Yanfang. Design and application of Mangin mirror in infrared tracking optical system[J]. Aero Weaponry, 1984(6): 15-18.
- [14] RIEDL M J, WANG Guoju. 用作成像元件的曼金镜[J]. 航空兵器, 1984(6): 38-42.
RIEDL M J, WANG Guoju. Mangin mirror used as imaging element[J]. Aero Weaponry, 1984(6): 38-42.
- [15] 闫佩佩, 樊学武. R-C光学系统设计及杂散光分析[J]. 红外技术, 2011, 33(4): 214-218.
YAN Peipei, FAN Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system[J]. Infrared Technology, 2011, 33(4): 214-218.
- [16] 张雷, 邵梦旗, 薛志鹏, 等. 微纳卫星高分辨视频相机光机结构设计与试验[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 52-58.
ZHANG Lei, SHAO Mengqi, XUE Zhipeng, et al. Optomechanical structure design and experiment of high-resolution video camera for micro-nano satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 52-58.
- [17] 陈洁, 夏团结, 杨童, 等. 长波红外与激光共孔径双模导引光学系统研究[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 184-193.
CHEN Jie, XIA Tuanjie, YANG Tong, et al. Research on long-wave infrared and laser common-aperture dual-mode guided optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 184-193.
- [18] SUN L, CUI Q, XIE N, et al. Design of a built-in baffle for a Ritchey-Chretien optical system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10264-10270.

- [19] SENTHIL KUMAR M, NARAYANAMURTHY C S, KIRAN KUMAR A S. Iterative method of baffle design for modified Ritchey-Chretien telescope[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1240-1247.
- [20] 梅超. 大口径多光谱变焦光学系统杂散光分析与抑制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(西安光学精密机械研究所), 2014.
- MEI Chao. The study of stray light analysis and suppressing technology in large pupil mulit-spectral zoom optical system[D]. Beijing: University Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2014.