

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.06.03

面向批产的微小型空间光学载荷设计与验证

程鑫, 丛杉珊*, 薛志鹏, 刘金全, 苗子健, 王升

(长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130102)

摘要: 为突破传统航天产品高成本、长周期的研制瓶颈, 满足巨型卫星星座对空间光学载荷批量化制造的迫切需求, 本研究团队采用模块化结构设计、工艺优化与自动化测试技术相结合的方法, 研制了一种小 F 数(光学系统焦距/通光口径)与微小像元结合的马克苏托夫-卡塞格林式光学系统, 通过镜头与焦面组件互换装配及自动化总装总测线集成, 在500 km轨道高度可实现地面像元分辨率4.5 m、幅宽13.5 km \times 13.5 km的成像能力, 整机重量仅1.1 kg, 使整体研制效率提升50%。该成果为微小型空间光学载荷的低成本、快速批量化生产提供了重要的技术支撑。

关键词: 空间遥感技术; 空间光学载荷; 模块化设计; 幅宽; 批量化生产; 研制效率; 自动化总装总测

中图分类号: TB9; V447; TH745

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 06-0041-09

Design and verification of miniaturized space's optical payloads for batch production

CHENG Xin, CONG Shanshan*, XUE Zhipeng, LIU Jinquan, MIAO Zijian, WANG Sheng

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. Changchun 130102, China)

Abstract: To address the bottlenecks of high cost and long development cycles in traditional aerospace product manufacturing, and to meet the urgent demand for batch production of space optical payloads in giant satellite constellations, this study adopts an integrated approach combining modular structural design, process optimization, and automated testing technology to develop a Maksutov-Cassegrain optical system with a small F -number and minute pixels. By enabling interchangeable assembly of lenses and focal plane components, along with integration into an automated assembly and testing line, the system achieves a ground pixel resolution of 4.5 m and a swath width of 13.5 km \times 13.5 km at an orbital altitude of 500 km, with a total weight of only 1.1 kg. This approach has improved the overall development efficiency by 50%. The results provide crucial technical support for the low-cost, rapid, and batch-producible manufacturing of miniaturized space optical payloads.

Key words: space remote sensing technology; space optical payload; modular design; swath width; mass production; development efficiency; automated final assembly and testing

收稿日期: 2025-10-30; 修回日期: 2025-11-15

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20230201023GX)

引用格式: 程鑫, 丛杉珊, 薛志鹏, 等. 面向批产的微小型空间光学载荷设计与验证[J]. 计测技术, 2025, 45(6): 41-49.

Citation: CHENG X, CONG S S, XUE Z P, et al. Design and verification of miniaturized space's optical payloads for batch production[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(6): 41-49.



0 引言

近年来,随着空间遥感技术的飞速发展和商业航天模式的兴起,以通信、遥感、导航为代表的巨型卫星星座建设进入了高速发展期。空间应用模式正经历从“单颗大卫星”向“集群化小卫星”的重大转变。在此背景下,作为卫星“眼睛”的空间光学载荷,其研制模式也面临着根本性变革:传统定制化、长周期、高成本的研制路径已难以满足星座计划对上百甚至上千颗卫星快速、低成本部署的迫切需求。

大口径长焦距^[1]空间光学载荷具有分辨力高、幅宽大的特点,但受限于体积大、生产周期长、成本高等因素,难以实现批量化快速生产。相比之下,微纳遥感观测卫星^[2-3]凭借体积小、成本低、研制周期短等优势,已经成为提高遥感信息时间分辨力的重要发展方向。微小型空间相机作为微纳遥感卫星的核心光学载荷,承担着对地遥感观测的重要任务。因此,实现微小型空间光学载荷的批量化制造,已成为推动太空经济商业化、迈向大规模空间感知时代的必然选择和核心挑战。

在光学载荷微小型化技术领域,国内外研究已开展了多项研究工作。孙景旭等人^[4]设计的轻小型全铝高分相机采用RC+补偿组的光学结构和全铝材料一体化设计,整机重量2 kg,在500 km轨道上可实现3.48 m地面像元分辨力,成像幅宽15 km × 15 km。王上等人^[5]提出一种空间相机光机结构设计,主反射镜有效通光口径118 mm, F 数6.5,光机结构整体质量为1.52 kg,实现了光机结构微型化与高轻量化。美国行星实验室研制的“DOVE”系列微卫星^[6-8]采用马克苏托夫-卡塞格林光学系统^[9],配置1 100万像素的电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD),可实现3 ~ 5 m地面分辨力,卫星平台仅重5 kg,目前在轨200余颗。然而,现有研究多聚焦于微小型光学载荷的性能优化设计,对其批量化制造与测试技术鲜有涉及。

本文以面向批产的某型号光学遥感卫星微型化有效载荷为研究对象,设计了一款基于马克苏托夫-卡塞格林光学系统的微小型空间光学载荷,

重点突破了模块化设计、定心装配工艺和自动化测试等关键技术,使研制效率较传统方法提升50%,为空间光学载荷的批量化生产提供了有效的技术解决方案。

1 微小型空间光学载荷总体设计

微小型空间光学载荷采用小 F 数的马克苏托夫-卡塞格林光学系统,如图1所示。该光学载荷结构主要包括主镜组件、前端透镜组件(中心镀次反射膜)、校正镜组件、焦面组件及遮光罩组件,整体采用定心设计及装配方案。

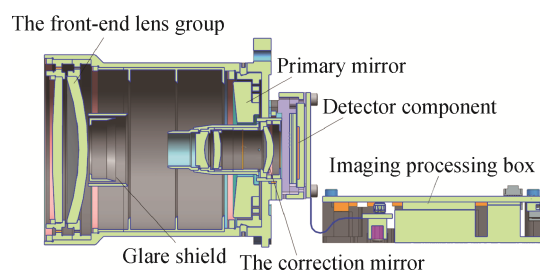


图1 空间光学载荷整体结构

Fig.1 Overall micro space optical payloads structure

在光学系统选型过程中,对比分析了折射式、折反式和全反式3种形式的空间光学系统。折射式系统受光学材料限制,难以适应宽波段范围的长焦距大视场光学系统,且长焦折射系统的二级光谱校正困难^[10]。以离轴三反式为代表的全反式光学系统虽然性能优异,但系统尺寸和重量较大,加工装调难度高、周期长^[11]。折返式光学系统则具有长焦距下极致紧凑与轻量化的优势。

综合考虑上述因素,最终选择同轴两反加校正镜结构(折返式)的光学系统设计方案。系统采用2片校正镜作为前端透镜,有效校正球差并提高成像质量。为进一步降低加工难度和成本,系统采用全球面结构,避免非球面加工周期长、成本高且需要补偿器检测等问题^[12]。

光学系统设计结构及关键参数如图2所示,图2(a)为光学系统的结构形式,光学系统由主镜、次镜反射膜及5个透镜组成(从左至右依次为透镜1至透镜5);图2(b)显示,奈奎斯特频率处的平均调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)为0.22@156 lp/mm;图2(c)表明,全视场光斑的

均方根 (Root Mean Square, RMS) 半径值不超过 $3.2\text{ }\mu\text{m}$, 小于艾里斑半径; 图 2(d) 场曲畸变设计结果显示, 全视场最大畸变不超过 0.02% 。

如表 1 所示, 光学系统在配备 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 像元尺

寸面阵 CMOS 探测器的基础上, 在 500 km 轨道高度可实现 4.5 m 的地面像元分辨率和 $13.5\text{ km} \times 13.5\text{ km}$ 的成像幅宽, 系统的 F 数为 6.5 、焦距为 360 mm 、全视场角为 $\Phi 2.2^\circ$ 。

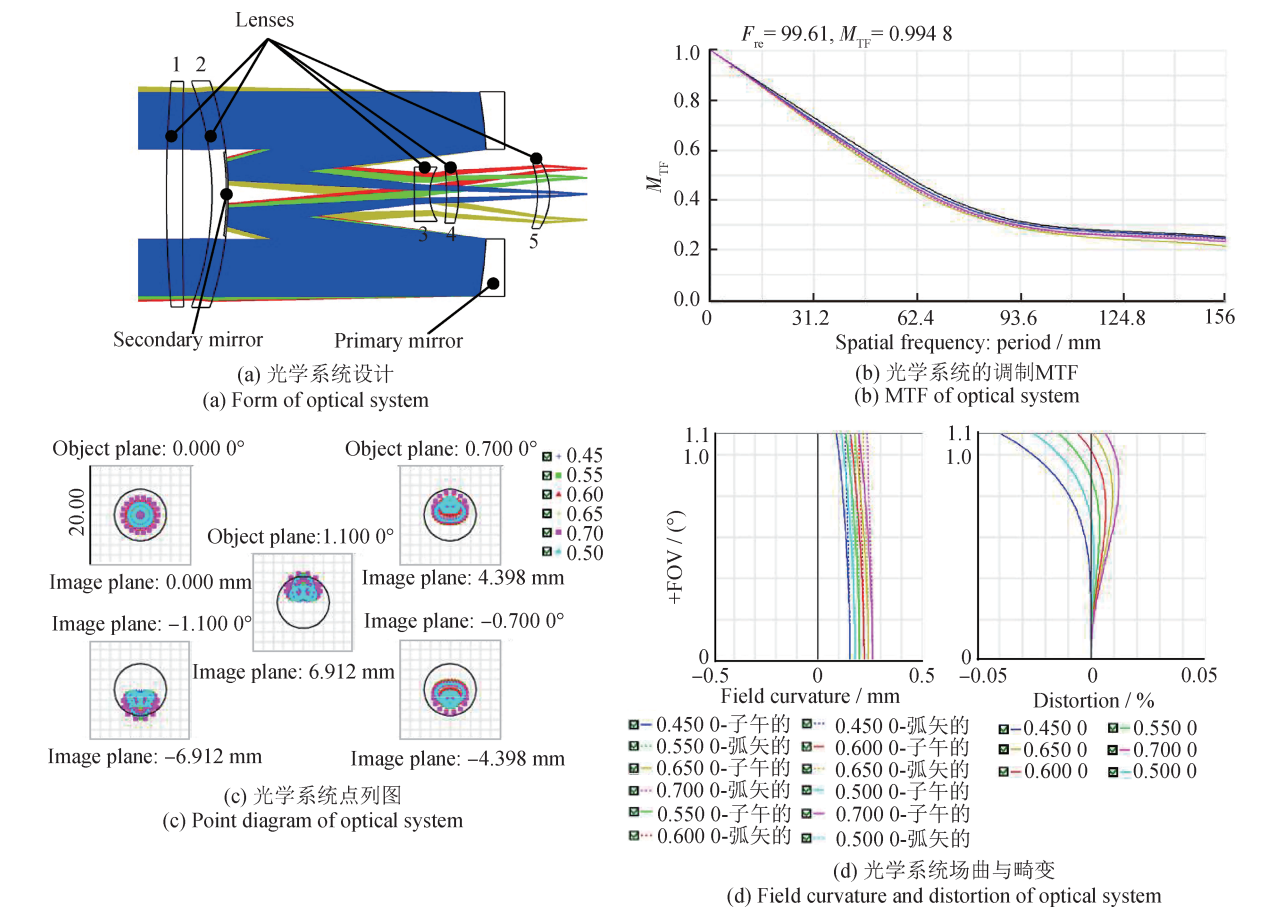


图2 光学系统设计结果
Fig.2 Design results of optical system

表1 光学系统设计结果
Tab.1 Design results of optical system

Index	Focal length /mm	F	Width of picture /km	FOV / $(^\circ)$
Parameter	360	6.5	13.5(@500 km)	2.2

注: 视场(Field of View, FOV)。

2 光机结构模块化设计

面向批量化的微小型光学载荷采用模块化结构设计, 依据光机与光电的功能属性, 将光学载荷分为镜头模块与焦面组件模块2大部分。镜头模块由主镜组件、前端透镜组件(中心镀次镜反射膜)、校

正镜组件、承力筒组件组成, 并基于定心车装配工艺进行优化设计, 以适应批量化生产需求。

如图 3(a) 所示, 主镜组件由镜体和柔性支撑 2 部分组成。镜体材料选用微晶玻璃, 柔性支撑材料选用与微晶线胀匹配的殷钢(4J32)。主镜背部中心轴与柔性支撑通过环氧胶粘接, 柔性环节设计可适应微重力及复杂空间热环境, 保证光学载荷在轨成像质量的稳定性。

次镜及校正镜补偿组分别如图 3(b) 和 3(c) 所示。次镜即为透镜 2 的中心镀膜区域, 通光口径为 22 mm 。透镜 1 与透镜 2 均采用镜座压圈的支撑方式, 构成入射补偿组; 另外 3 片透镜则组成焦前补偿组, 其口径均小于 20 mm , 每个透镜均有独立的

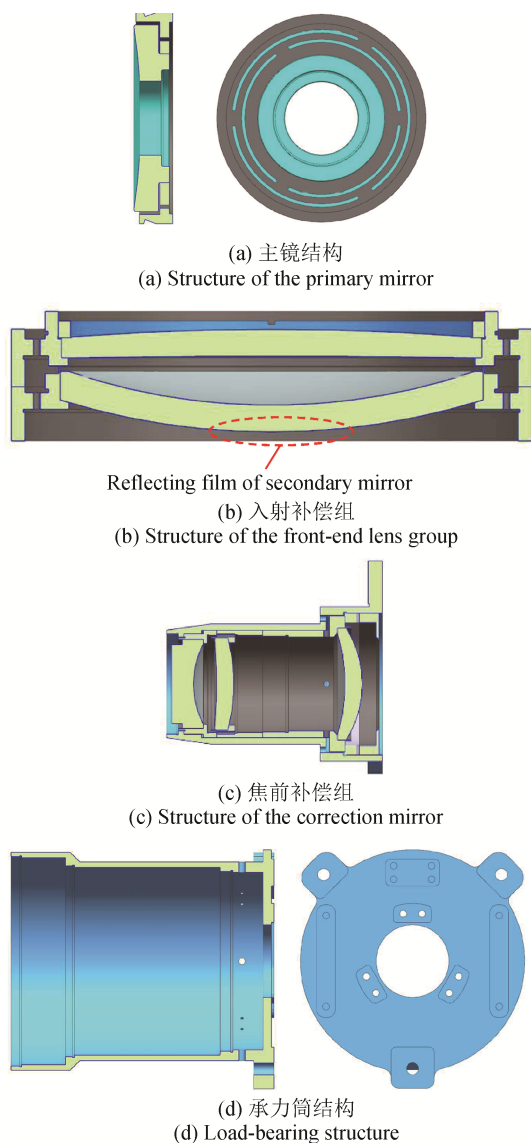


图3 各模块结构

Fig.3 Structure of each optical component

支撑镜座，采用定心设计与定心装配工艺，将同轴装配精度控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内，偏心误差小于 $30''$ 。

承力结构如图3(d)所示，基于基准传递的定心调整工艺路线，设计为筒式结构，材料为钛合金，承力结构为主镜、透镜补偿组、内部遮光罩组件以及焦平面组件提供安装接口，具有较高精度及刚度。

3 集成及测试

3.1 光机系统定心装配及测试

前端透镜组件采用定心加工工艺^[13]。该工艺通过自准直仪与附加镜头检测镜片的球心像^[14]，

将镜片光轴与定心车转轴调整至同轴后，精密修切镜座外圆与端面，确保镜片光轴与镜座机械轴统一^[15]，并保证镜片间空气间隔，大幅提高了装调效率和装配精度，工艺流程如图4所示，定心加工设备如图5所示。

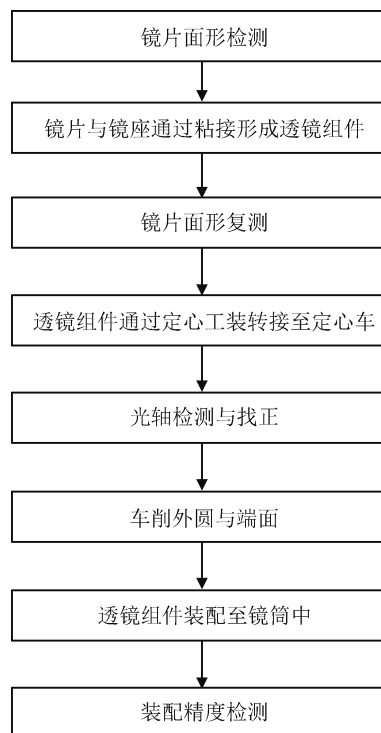


图4 定心车削工艺流程

Fig.4 Process flow of alignment turning

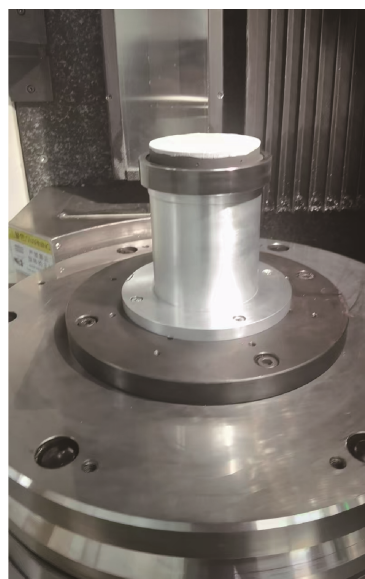


图5 透镜组件定心加工设备

Fig.5 Alignment turning equipment of the lens group

定心调整过程如图6所示，主镜与柔节粘接固化后，通过研磨工艺保证主镜中心孔与柔节端面垂直度优于0.01 mm，进而保证主镜光轴与柔节端面垂直，为后续主镜组件装调提供机械基准。

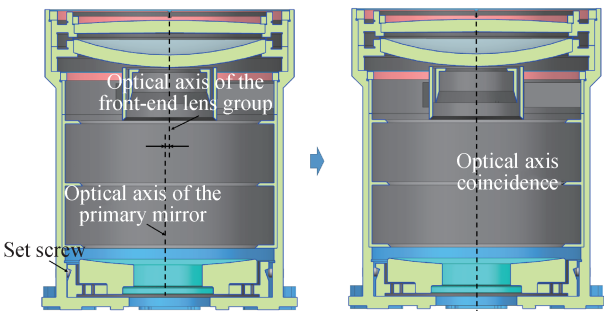


图6 主镜组件定心调整图

Fig.6 Alignment adjustment of primary mirror assembly

将主镜组件与前端透镜组件装配至承力筒内，将承力筒装夹至定心仪工作台，以前端透镜组件内透镜光轴为基准找正承力筒，通过顶丝调节主镜偏心，将主镜球心调整至透镜光轴，保证主镜光轴与前端透镜组光轴同轴，最终系统内各镜面装调精度测试结果如表2所示。

表2 定心调整精度测试结果

Tab.2 Test results of centering adjustment accuracy

Surface number	Surface tilt/($''$)
1	12.516
2	15.658
3	4.433
4	3.520
5	7.268

光学载荷系统的波像差和调制 MTF 可以客观地评价光学系统的成像性能^[16-17]。使用干涉仪测试光学载荷镜头模块装调后中心视场和边缘视场的波像差，测试结果如表3所示。干涉云图如图7所示，光学载荷中心视场波像差 RMS 值为 $\lambda/22.4$ (波长 $\lambda = 632.8\text{ nm}$)，所有视场系统波像差均小于 $\lambda/16.6$ ，系统成像质量接近衍射极限。

3.2 系统总装及 MTF 测试

搭建了自动化总装总测系统，其测试逻辑如

表3 光学载荷波像差测试结果

Tab.3 Test results of optical payload wavefront aberration

FOV	RMS
Central FOV	0.044 7 λ
Left FOV	0.060 1 λ
Right FOV	0.049 9 λ
Upper FOV	0.044 5 λ
Bottom FOV	0.042 6 λ

图8所示，相机（光学载荷）置于两自由度转台上，通过计算机控制端实现相机上下电、视场切换、成像控制与处理以及靶标位置调整等闭环控制环节。基于该系统实现光学载荷的焦面标定和自动化测试。

光学载荷在自动化总装总测生产线上完成总装与总测，如图9所示。首先，通过平行光管将条纹靶标成像到光学载荷焦面上，软件自动计算奈奎斯特频率处的 MTF 值。然后通过光管的靶标自动调节机构，调节靶标轴向位置；通过二维视场调节转台切换光学载荷视场，获取不同视场下，不同靶标位置的 MTF 值。最后，通过 Matlab 拟合出最佳焦面位置。根据拟合结果调整垫片并固定焦面位置，完成焦面标定。MTF 测试结果如表4所示，在经过焦面标定和验收级振动试验后，光学载荷各视场 MTF 值稳定，表明其具有良好的机械稳定性和环境适应性。

传统光学载荷研制周期为2个月，包括组件研制、光学装调、垫片连接等多环节人工参与耗时过程，本文通过模块化设计实现镜头与焦面组件的互换装配，依托定心装配工艺显著提升装调效率，最终在自动化总装总测系统上完成系统集成与焦面标定，研制周期缩短至1个月，且无需投入大量人员，使整体研制效率提升50%。

4 在轨验证

该微小型光学载荷在通过各项地面验收测试后，已搭载某型号卫星平台成功发射至预定轨道，并顺利完成在轨调焦与成像测试。图10和表5为

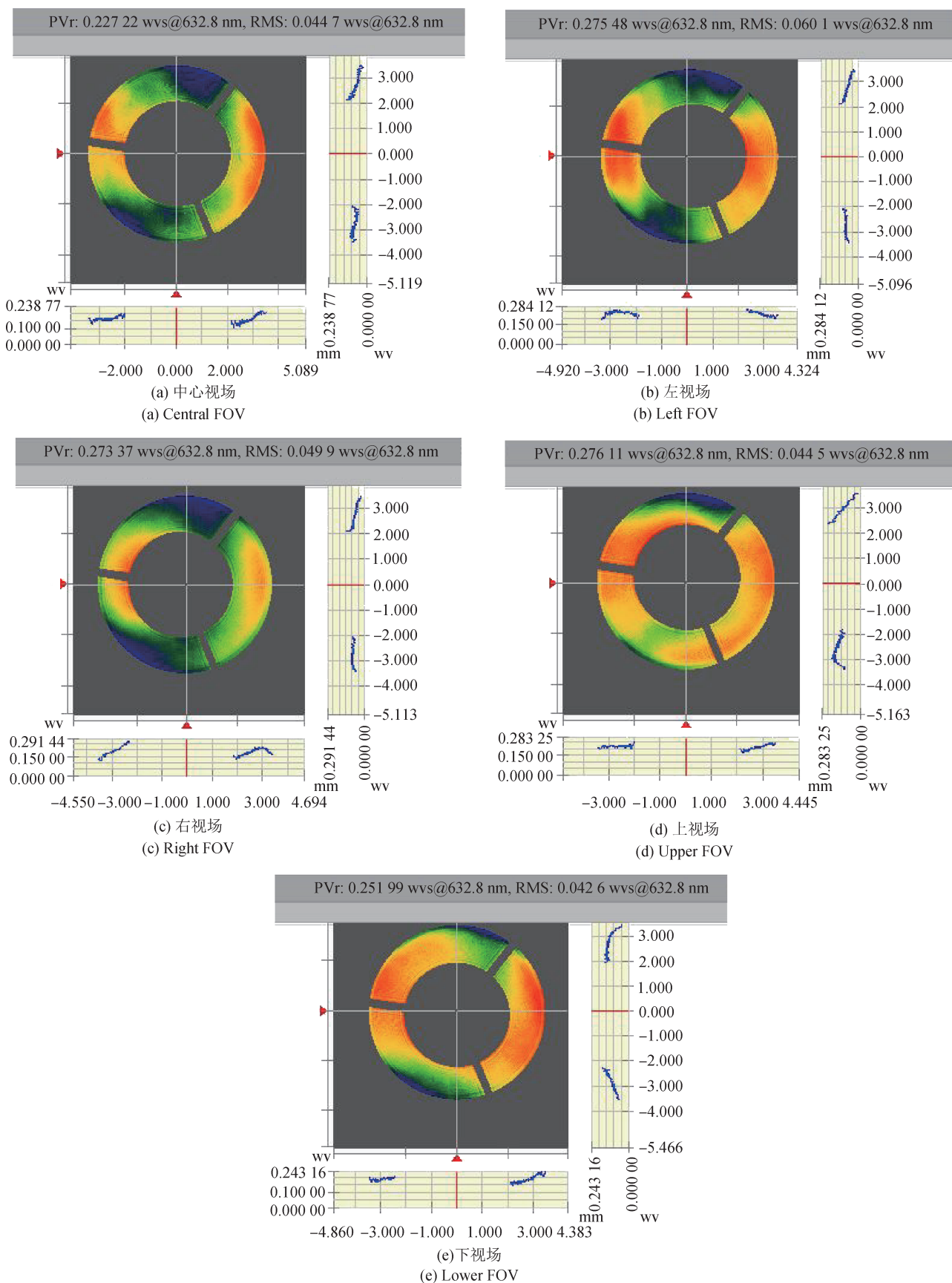


图7 光学载荷波像差测试结果

Fig.7 Test results of optical payload wavefront aberration

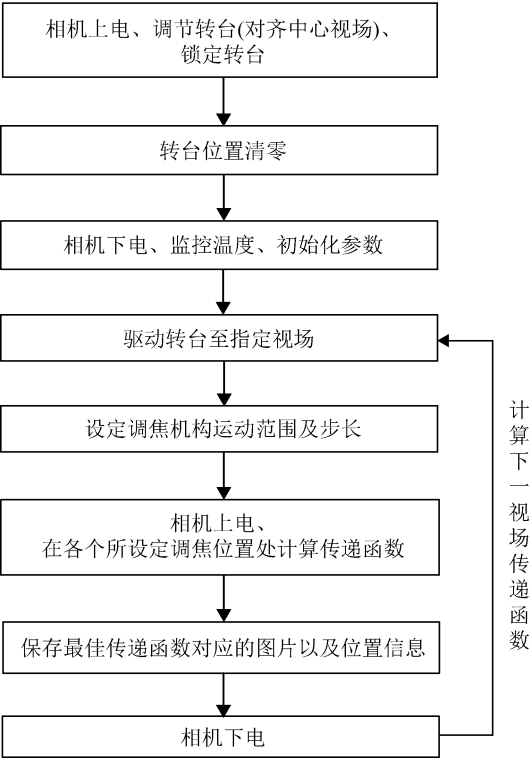


图8 自动化总装总测系统逻辑图

Fig.8 Logic diagram of automated assembly and testing system

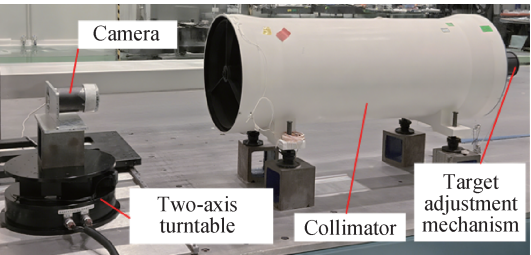


图9 自动化总装总测生产线

Fig.9 Automated assembly and testing system

表4 MTF测试结果

Tab.4 Test results of MTF

Stage	After focal plane calibration	After acceptance level vibration
Upper	0.143 5	0.142 9
Lower	0.144 6	0.143 3
Central	0.142 7	0.144 8
Left	0.139 8	0.140 1
Right	0.140 3	0.140 7
Average	0.142 1	0.142 3

相机分别对2个目标靶场成像的刃边测试计算过程，对2个目标靶场测试的动态MTF结果均大于0.08，满足系统指标。图11为该载荷对国内某区

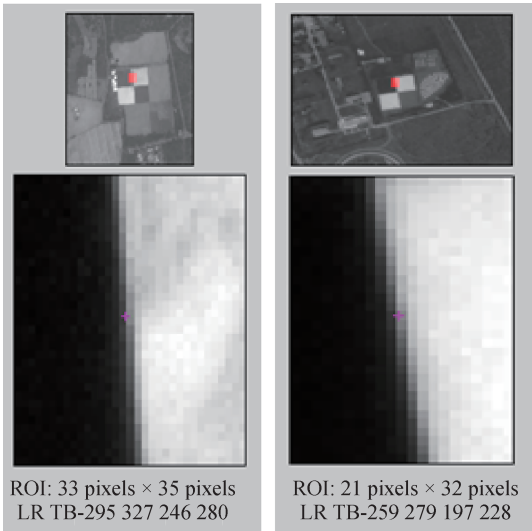


图10 对2个目标靶场的动态MTF刃边测试结果

Fig.10 Dynamic MTF knife-edge test results on two target ranges

表5 动态传函测试结果

Tab.5 Test results of dynamic MTF

Calibration field	Dynamic MTF	Index
1	0.081 2	> 0.08
2	0.083 7	



图11 在轨成像结果

Fig.11 On-orbit imaging results

域的在轨成像结果,光学载荷能量集中度可达0.8,成像效果良好。

5 结论

本文面向批量化生产需求,开展了微小型空间光学载荷的集成设计与验证研究。通过模块化结构设计、定心装配工艺优化和自动化测试系统的综合应用,成功研制出重量仅1.1 kg、在500 km轨道高度实现4.5 m地面分辨力的微小型光学载荷,为大规模星座部署提供了可行的技术路径。

面向批产的设计策略包括3方面,其一,采用模块化设计理念,将光学载荷分解为镜头模块和焦面模块,实现了组件的快速互换与高效装配;其二,采用定心车装配工艺,将同轴装配误差控制在10 μm 以内,满足光学系统设计指标的同时显著提升了装调效率;其三,构建自动化总装总测系统,实现了总装总测流程化作业,大幅降低了人工干预带来的质量波动。

测试结果表明:该光学载荷各视场波像差小于 $\lambda/16.6$,MTF值大于0.14,具备良好的成像性能与力学稳定性。在轨成像验证进一步表明:载荷动态传函高于0.08,且能量集中度达0.8,成像效果满足任务要求。

综上所述,本研究通过模块化、工艺创新和自动化测试的系统性集成,实现了微小型空间光学载荷从“定制开发”向“批量生产”的转变,整体研制效率提升50%。该技术路线不仅适用于当前微纳卫星星座的建设需求,也为未来大规模空间感知系统的低成本、快速部署提供了重要借鉴。后续将进一步完善工艺数据库和自适应装配策略,推动空间光学载荷制造向智能化、柔性化方向发展。

参考文献

- [1] 王丰璞,李新南,徐晨,等.大型光学红外望远镜拼接非球面子镜反衍补偿检测光路设计[J].中国光学,2021(5):1184-1193.
WANG F P, LI X N, XU C, et al. Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1184-1193. (in Chinese)
- [2] 傅丹膺,满益云,李瀛搏,等.微纳卫星光学有效载荷的发展机遇与挑战[J].航天返回与遥感,2018(4):64-69.
FU D Y, MAN Y Y, LI Y B, et al. The opportunities and challenges in optical of micro-nano satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4): 64-69. (in Chinese)
- [3] 李健全,王倩莹,张思晔,等.国外对地观测微纳卫星发展趋势分析[J].航天器工程,2020(4):126-132.
LI J Q, WANG Q Y, ZHANG S X, et al. Analysis on development trends of foreign country's micro-nano satellites in earth observation[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(4): 126-132. (in Chinese)
- [4] 孙景旭,谢虹波,李淑贤,等.轻小型全铝高分相机[J].中国光学(中英文),2023(6):1450-1462.
SUN J X, XIE H, LI S X, et al. All-aluminum high-resolution camera with lightweight and compact size[J]. Chinese Optics, 2023, 16(6): 1450-1462. (in Chinese)
- [5] 王上,张星祥,朱俊青.空间相机全铝合金光机结构的设计与分析[J].红外技术,2022(4):364-370.
WANG S, ZHANG X X, ZHU J Q. Design and analysis of all aluminum alloy optical mechanical structure of micro space optical payloadss[J]. Infrared Technology, 2022, 44(4): 364-370. (in Chinese)
- [6] JUNAID M. The development of a hardware-in-the-loop platform for the attitude determination and control testing of a small satellite[J]. Byte España, 2015, 1(4): 78-80.
- [7] HAND E. Startup liftoff[J]. Science, 2015, 348(6231): 172-177.
- [8] 龚燃,姜代洋.2022年国外民商用对地观测卫星发展综述[J].国际太空,2023(2):26-33.
GONG R, JIANG D Y. Overview of the development of foreign civil and commercial earth observation satellites in 2022 [J]. Space International, 2023 (2): 26-33. (in Chinese)
- [9] 袁颖华.小型反射/折反射式望远镜的研究[D].苏州:苏州大学,2011.
YUAN Y H. The research for small-sized reflecting/cata-dioptric telescope [D]. Suzhou: Soochow University, 2011. (in Chinese)
- [10] 李宏壮,赵勇志,王国强,等.大相对口径长焦距折射式光学系统设计[J].红外与激光工程,2014(9):2954-2958.

- LI H Z, ZHAO Y Z, WNG G Q, et al. Design of refractive optical system with large relative aperture and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2954–2958. (in Chinese)
- [11] 郭继锴, 王治乐, 陆敏. 基于主成分分析法的离轴三反系统装调及其应用[J]. *光学学报*, 2019(3): 341–347.
- GUO J K, WANG Z L, LU M. Off-axis three-mirror anastigmatic system and application based on principal component analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 341–347. (in Chinese)
- [12] 郝群, 宁妍, 胡摇. 基于干涉法的非球面测量技术[J]. *计测技术*, 2018(1): 1–8.
- HAO Q, NING Y, HU Y. Interferometric testing of aspheric surface[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018(1): 1–8. (in Chinese)
- [13] 尤宏波, 李星, 范翔, 等. 红外光学系统中心偏差及装调方法研究分析[J]. *激光与红外*, 2022(11): 1641–1648.
- YOU H B, LI X, FAN X, et al. Research and analysis on center deviation and assembly and adjustment method for infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 52(11): 1641–1648. (in Chinese)
- [14] 王尹虎. 光学透镜中心偏差测量系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- WANG Y H. Design of optical lens center deviation measurement system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024. (in Chinese)
- [15] 赵莹, 乔仁晓, 郭鑫鑫, 等. 同轴度测量方法综述[J]. *计测技术*, 2024(2): 25–31.
- ZHAO Y, QIAO R X, GUO X X, et al. Overview of coaxiality measurement methods[J]. *Metrology Technology*, 2024(2): 25–31. (in Chinese)
- [16] 余承昊, 吕丽军. 应用波像差理论计算 Kirkpatrick-Baez 系统的调制传递函数[J]. *应用光学*, 2020(5): 904–910.
- YU C H, LYU L J. Calculating MTF of Kirkpatrick-Baez system by wave aberration theory [J]. *Journal of Applied Optics*. 2020(5): 904–910. (in Chinese)
- [17] 周言敏, 李建芳, 王君. 光学测量技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- ZHOU Y M, LI J F, WANG J. Optical measurement techniques [M]. Xi'an: Optical Measurement Technology Xidian University Press, 2013. (in Chinese)

(本文编辑: 李成成)



第一作者: 程鑫(1996—), 男, 工程师, 主要研究方向为空间相机结构设计。



通信作者: 丛杉珊(1981—), 女, 正高级工程师, 主要研究方向为空间遥感相机总体。