

文章编号 1004-924X(2025)09-1353-12

拼接式空间望远镜大范围高精度自动化共相调校

许博谦*, 鞠国浩, 高 雁, 王帅会, 张春悦, 匡 也, 杜一民, 鹿芝荣, 徐抒岩
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对拼接式空间望远镜拼接子镜在轨共相调整需满足大范围(mm量级)、高精度(nm量级)、无干涉仪等外部检测设备要求,提出一种拼接式空间望远镜大范围、高精度、自动化的共相调校方法。针对共焦、粗共相以及精共相等阶段的典型光学特征,分别改进共焦调校方法、基于色散条纹传感器的粗共相检测方法以及基于相位差的精共相检测方法等,形成拼接子镜共相调校完整的精度收敛链。然后搭建实验系统,开展包括共焦调校、粗共相调校和精共相调校的全链路自动化试验验证。实验结果表明:子镜相对位姿失调范围在 $-0.5\sim 0.5\text{ mm}$, $-0.1^\circ\sim 0.1^\circ$ 内时,该方法可实现拼接子镜自动化共相,共相后系统波像差RMS值优于 $0.1\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。该拼接式空间望远镜共相调校方法具有调校范围大、共相精度高、资源需求低等优点,在拼接式空间望远镜共相领域具有良好的应用前景。

关键词:空间望远镜;拼接镜;共相调校;色散条纹;位相相异

中图分类号:TH751;P111.21 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253309.1353 **CSTR:**32169.14.OPE.20253309.1353

Automated co-phasing alignment for large-scale high-precision in segmented space telescopes

XU Boqian*, JU Guohao, GAO Yan, WANG Shuaihui, ZHANG Chunyue, KUANG Ye,
DU Yimin, LU Zhirong, XU Shuyan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xuboqian@ciomp.ac.cn

Abstract: This paper presents a method for large-range, high-precision, and automated co-phasing alignment of segmented space telescopes. The approach satisfies the demands of millimeter-level range, nanometer-level precision, and operation without reliance on external interferometric measurement devices. Initially, the optical characteristics at various co-phasing stages-confocal alignment, coarse co-phasing, and fine co-phasing-are analyzed. Enhancements are made to the confocal alignment method, a coarse co-phasing detection technique based on a dispersion fringe sensor is developed, and a fine co-phasing detection method employing phase diversity is introduced. These advancements establish a comprehensive accuracy convergence chain for segmented mirror co-phasing alignment. Subsequently, an experimental system is constructed to validate the automated processes of confocal alignment, coarse co-phasing, and fine co-phasing. Experimental results demonstrate that when the relative position and ori-

收稿日期:2025-03-21;修订日期:2025-04-12.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFE0205000)

entation errors of sub-mirrors lie within ± 0.5 mm and $\pm 0.1^\circ$, respectively, the proposed method successfully achieves automated co-phasing. Following co-phasing, the system attains a wavefront error RMS better than 0.1λ ($\lambda=632.8$ nm). The proposed co-phasing method provides a broad alignment range, high accuracy, and low resource consumption, rendering it highly promising for applications in segmented space telescopes.

Key words: space telescope; segmented mirror; co-phasing alignment; dispersed fringe sensor; phase diversity

1 引言

空间天文观测需求牵引着空间望远镜分辨能力、集光能力的逐步提升,空间望远镜光学口径随之逐步增大。为突破光学元件制造尺寸和运载火箭整流罩包络的制约,近年来国际上研制及论证的大型空间望远镜大多用“拼接式”取代传统“单体式”望远镜。其中,最具代表性的是美国 2021 年末发射的“詹姆斯·韦布”空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST), 其“探索宇宙起源”成果被列入美国《科学》杂志 2024 年度“十大科学突破”。拼接式主镜由以多片口径较小拼接子镜构成,已成为新一代大型空间望远镜发展的重要技术路线之一。

拼接式空间望远镜的核心技术难点之一是在空间环境中,不借助干涉仪、标准平面镜等外部设备实施检测的条件下,仅通过自身配备的波前传感器和波前传感算法,指导子镜背部机构调整拼接子镜,实现子镜间从毫米量级的相对失调逐步收敛至纳米量级的共相状态。为实现这一目标,美国国家航天局(NASA)的研究人员基于由色散条纹传感器、相位恢复算法等构成的波前传感与控制技术(Wavefront Sensing and Control, WFS&C),有效解决了 JWST 在轨共相的问题。

近年来,波前传感与控制相关技术取得了较大进展。针对拼接子镜粗共相检测,Acton 等^[1]将色散条纹传感器(Dispersed Fringe Sensor, DFS)应用于 JWST 的粗共相阶段,将活塞误差由 $100\text{ }\mu\text{m}$ 校正至 200 nm 以内。Van 等^[2]计划在巨型麦哲伦望远镜上采用 4 个离轴 DFS 检测活塞误差,以实现 50 nm 的活塞检测精度。Haffert 等^[3]提出了全息 DFS,该方法利用单瞳孔平面全

息干涉技术实现 50 nm 活塞误差的闭环控制精度。Spechler 等^[4]通过改进型 DFS 算法,提高了活塞误差检测的稳定性。

针对拼接子镜精共相检测,基于图像的波前传感方法得到了广泛的应用。Dean 等^[5]提出了一种基于 Gerchberg-Saxton(GS)算法的混合多样性算法,实现了无相位展开的相位恢复。Carlisle 等^[6]对几何相位恢复算法^[7]进行了优化,将检测范围扩展至基本 GS 算法的 10 倍。Korkiakoski 等^[8]提出了 Fast & Furious-GS 算法,该方法基于弱像差近似与瞳孔对称性,实现了高速波前重构。Yang 等^[9]提出了频率次峰活塞误差提取算法,实现了 13.49 nm RMS 的检测精度。Fan 等^[10]通过移动像面引入像差的方式提高了相位差算法(Phase Difference, PD)算法的稳定性。Zhang 等^[11]通过构建图像低频分量与子镜倾斜之间的关系,实现了 $\lambda/30$ 的倾斜误差。Zhao 等^[12]将粒子群优化与序列二次规划方法相结合,实现了 $0.001\lambda\text{ RMS}$ 的 PD 检测精度。

实际在轨应用状态下,拼接子镜共相需要在由主镜、次镜等多个元件构成的完整成像光学系统中实施系统级调校,而上述多项研究主要针对拼接式主镜自身的非共相误差检测,调校在元件级层面,与实际情况存在较大差异,导致其难以在轨应用。本文提出一种拼接式空间望远镜大范围、高精度、自动化共相调校方法。基于色散条纹传感器、相位差等方法形成以共焦-粗共相-精共相为主要节点的完整、收敛的精度链,实现毫米量级误差范围、纳米量级调校精度的共相调整,并研制口径 $\Phi 200\text{ mm}$ 的拼接式空间望远镜在轨共相实验系统,有效验证了该方法的正确性和有效性。

2 原 理

2.1 共相精度收敛链

拼接式空间望远镜在轨共相调整基于的波前传感与控制技术,本质上是一种闭环控制技术,原理如图 1 所示。根据指令输入的系统波像差目标值,由波前传感器硬件及算法组成的检测单元评估当前状态与目标值间的偏差量,失调量解算系统将偏差量解算为调整机构各维度的调整量,以收敛至系统波像差目标值为判据循环迭代。

实现共相控制闭环的关键在于检测单元要准确检测拼接子镜的位姿失调量。根据目前的技术能力,拼接式空间望远镜入轨展开/组装后,拼接子镜间存在毫米量级的相对位姿误差,在其收敛至纳米量级共相的过程中,波前传感系统的检测动态范围跨度达到 6 个数量级($10^{-3}\sim 10^{-9}$ m),因此,仅依赖单一波前传感方法实现难度较大,需要在各阶段针对检测维度、误差量级和目标精度分别采取特定的检测手段,如表 1 所示,进而形成完整的共相测量精度链,如图 2 所示。

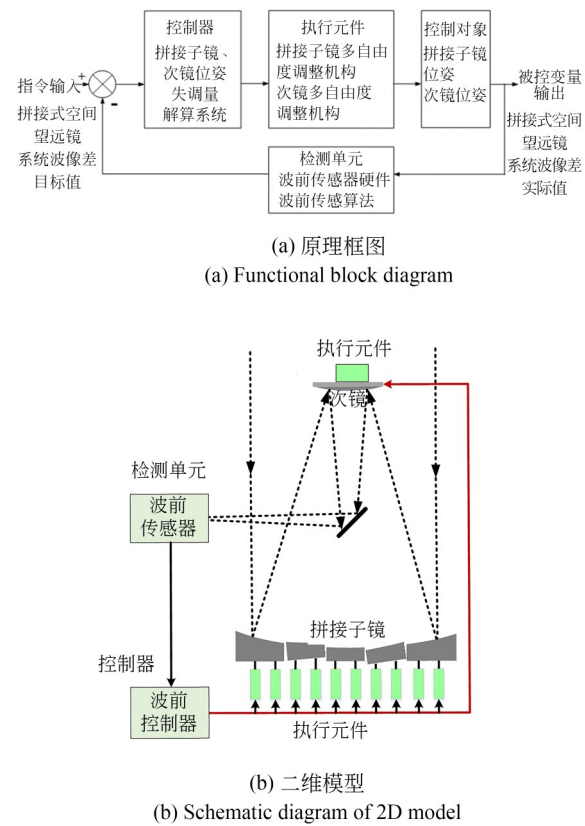


图 1 在轨共相调整原理框图
Fig. 1 Principle block diagram of on-orbit co-phasing alignment

表 1 拼接子镜共相各调校阶段调校维度对应关系
Tab. 1 Correspondence between calibration dimensions and phasing stages for segmented mirrors

调校阶段	拼接子镜调校维度				拼接子镜及系统波像差	
	X/Y 倾斜	活塞 n	X/Y 偏心	自旋	初始能力	校正后
子镜像点识别 搜索与排列	√				拼接子镜: <±0.5 mm, <±0.1° tilt	拼接子镜: <±0.5 mm, <±0.08° tilt
共焦调校	√	√	√	√	拼接子镜: <±0.6 mm, <±0.1° tilt	拼接子镜: <200 μm(rms)
粗共相调校		√			系统波像差: <250 μm(rms)	系统波像差: <1 μm(rms)
精共相调校	√	√	√	√	系统波像差: <5 μm(rms)	系统波像差: <63 μm(rms)

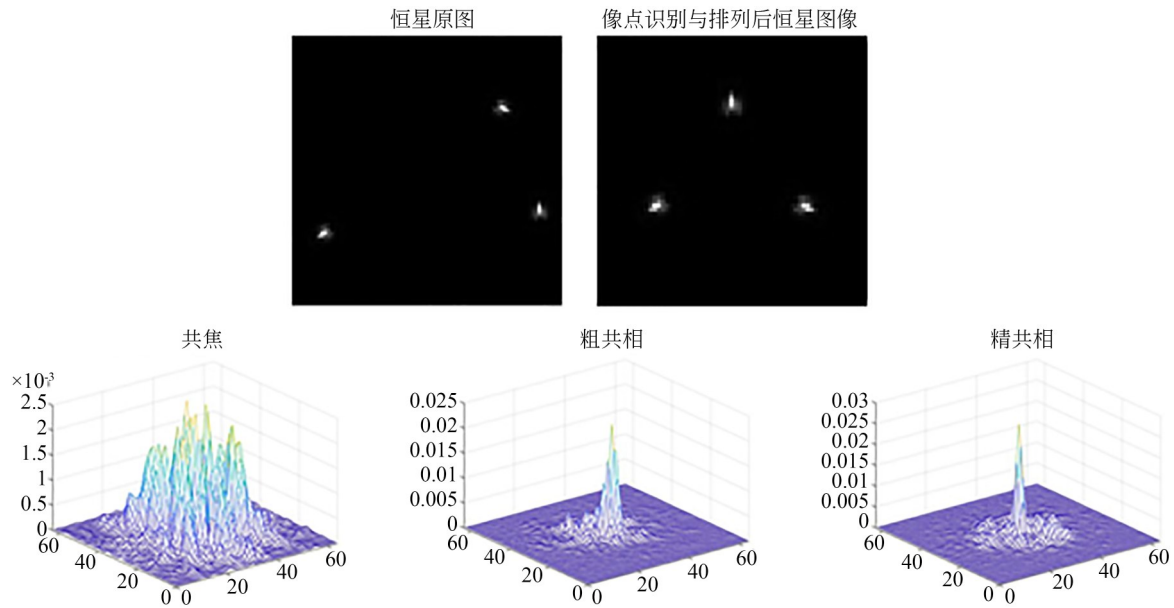


图 2 共相测量精度链

Fig. 2 Co-phasing measurement precision chain

2.2 共相调校理论

2.2.1 子镜像点识别搜索与排列

各拼接子镜即使存在一定量级的位姿误差,也会与次镜等望远镜光学系统中的其他元件形成的子望远镜在像面上形成子镜像点。当子镜间的相对位姿误差较大时,各子镜像点在像面上呈现分散状态。本阶段的主要目的在于将这些分散的子镜像点与拟控制的拼接子镜建立一一对应的关系,并按照拼接子镜布局形式排列各子镜像点,为实施共焦调校创造条件。在此过程中,如果有子镜像点未能出现在焦面约束的视场范围内,采用“矩形螺旋扫描”策略搜索像点,如图 3 所示。扫

描步长需要满足:

$$\begin{cases} \frac{n_{\text{pixel},x} \cdot d_{\text{pixel}}}{2f} \leq U < \frac{n_{\text{pixel},x} \cdot d_{\text{pixel}}}{f} \\ \frac{n_{\text{pixel},y} \cdot d_{\text{pixel}}}{2f} \leq V < \frac{n_{\text{pixel},y} \cdot d_{\text{pixel}}}{f} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: U 和 V 分别为 x 和 y 方向扫描步长, $n_{\text{pixel},x}$ 和 $n_{\text{pixel},y}$ 分别为相机靶面 x 轴和 y 轴上的像素数, d_{pixel} 为相机靶面的像元尺寸, f 为系统焦距。

2.2.2 共焦调校

共焦阶段调校可分为像点调校和像点堆叠两个阶段。其中,像点调校根据各像点对拼接子镜活塞误差进行粗定位,使子镜活塞误差进入粗共相范围。像点堆叠将粗定位后的像点逐一合并至中心视场,使子镜倾斜误差进入粗共相范围。像点调校是对各个子镜进行调焦,其关键是构建清晰度评价函数。清晰度评价函数直接决定子镜调焦的精度与效率。作为粗共相的前置步骤,调焦精度要求相对较低,调焦后子镜间活塞误差满足粗共相的要求即可。因此,选择像点最大灰度作为清晰度评价函数,像点调校流程如图 4 所示。

图像采集完成后,利用中值滤波对图像进行去噪。去除噪声后,利用图像分割算法提取像点目标,计算像点的最大灰度值。考虑到环境引入的噪声,在获取像点最大灰度值序列后,采用数

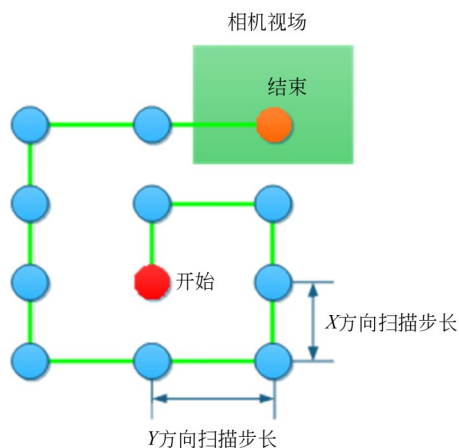


图 3 矩形螺旋扫描过程

Fig. 3 Schematic diagram of rectangular spiral scanning

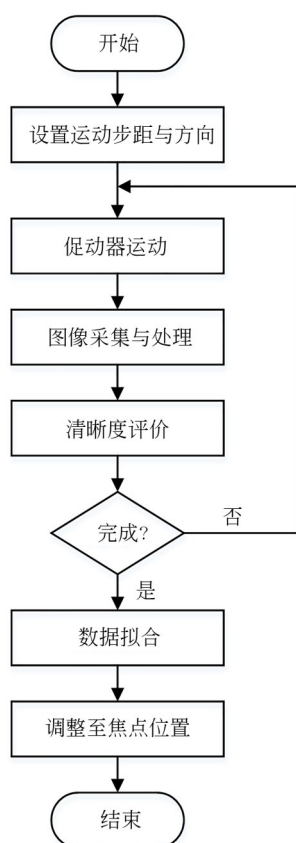


图4 像点调校流程

Fig. 4 Workflow of image point focusing

据拟合的方法求取焦点位置。

像点堆叠是调整调焦后的子镜像点位置,使子镜倾斜误差进入粗共相范围。像点堆叠的关键是像点的精确定位。针对调焦后图像,采用平方加权灰度质心法实现像点的亚像素定位。与普通质心法相比,平方加权灰度质心法更多利用了像点的中心信息,其精度更高。平方加权灰度质心法可表示为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n x_{ij} * (I(x_i, y_j))^2}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (I(x_i, y_j))^2} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n y_{ij} * (I(x_i, y_j))^2}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (I(x_i, y_j))^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_0 和 y_0 分别为像点在 x 方向和 y 方向质心, $I(x_i, y_j)$ 为坐标 (x_i, y_j) 处的图像灰度, x_{ij} 为坐标 (x_i, y_j) 处的横坐标, y_{ij} 为坐标 (x_i, y_j) 处的纵坐标, m 和 n 分别为图像行列值。

2.2.3 粗共相调校

该阶段主要针对单片子镜构成的光学系统

的相对口径较小,导致子镜像点的焦深较大,对活塞误差 insensitive 的问题,采用DFS检测手段,基于色散条纹图像检测拼接子镜间的相对活塞误差,保证子镜间活塞误差收敛至 1λ 以内。DFS的原理如图5所示。

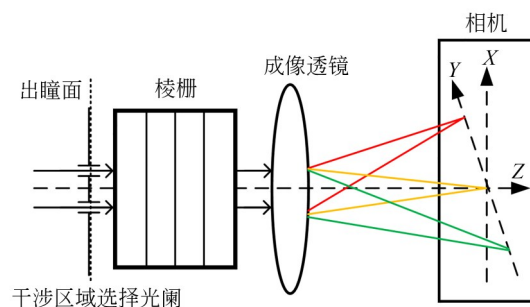


图5 色散条纹传感器结构

Fig. 5 Schematic of dispersed fringe sensor

色散条纹图像的产生原理基于复色光双孔衍射与色散,经由两个存在活塞误差的子镜反射的两束携带共相误差的光束,其波前在系统瞳面上分别通过干涉区域选择光阑的双孔发生衍射,经过棱栅元件发生色散后衍射方向与色散方向垂直,经过成像透镜在探测器靶面上形成波长与光强分布关系相对应的色散条纹图像。色散条纹光强分布与活塞误差之间的关系可表示为:

$$I(x, y) = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda(y)} \delta + \varphi(x) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: x, y 代表接收图像衍射、色散方向的坐标, $\lambda(y)$ 代表 y 方向各点对应的波长, $\varphi(x)$ 代表采样坐标 x 处的相位, δ 代表两片子镜之间的光程差, I_0 代表瞳面光路的平均光强, γ 代表条纹明暗的对比度。

本文采用一种基于色散条纹斜率分析的拼接镜共相误差校正方法,充分利用二维色散条纹斜率信息并从色散条纹自身寻找基准,省去复杂标定环节,更加适合在轨应用。合理设计色散元件参数以及配合多种活塞误差提取方法,可提高DFS的动态测量范围,将活塞误差从数百微米校正至100 nm以内。

2.2.4 精共相调校

精共相调校是最终决定拼接式望远镜系统波像差的关键步骤,采用PD算法实现对子镜各

自由度位姿误差的高精度检测,进而根据探测到的波前相位信息计算调整机构的待调整量。相位差算法原理如图6所示,其原理是同时采集在焦图像和已知离焦距离的离焦图像,根据衍射光学相关理论建立数值优化模型,解算出波前相位,如下:

$$E = (i - o(x, y) * PSF(x, y))^2 + (i_d - o(x, y) * PSF_d(x, y))^2, \quad (4)$$

式中: E 为目标函数值, i 和 i_d 分别代表焦面图像和离焦图像, $o(x, y)$ 代表目标时域信息, PSF 和 PSF_d 分别代表焦面和离焦面对应的点扩散函数。

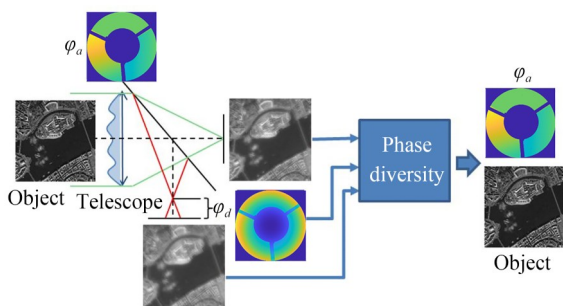


图6 相位差算法的基本原理

Fig. 6 Principle of phase diversity algorithm

基于PD算法的波前检测技术在求解各子镜相对位姿关系时,求解过程易陷入局部极值导致解算失败。本文针对该问题,提出基于像点位置关系的拓扑特征分析方法,通过建立亚像素级空间分布模型解析子镜间的相对位置关系,为PD模型提供初始解,如式(5)所示。该方法能够有效提升算法跳出局部极值的能力,突破传统随机初始化方法的盲目性,大幅提升了PD算法的求解成功率。

$$XY = \frac{n_{\text{pixel}} \cdot d_{\text{pixel}}}{f} \cdot \frac{D}{\lambda}, \quad (5)$$

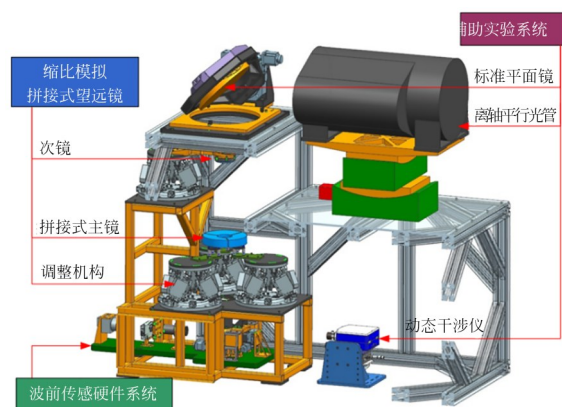
式中: XY 为待求解的某两片子镜的相位倾斜系数, n_{pixel} 为两个像点位置向量, d_{pixel} 为探测器的像素尺寸, f 为系统焦距, D 为光学口径, λ 为测试波长。

3 实验及结果分析

3.1 实验系统构成

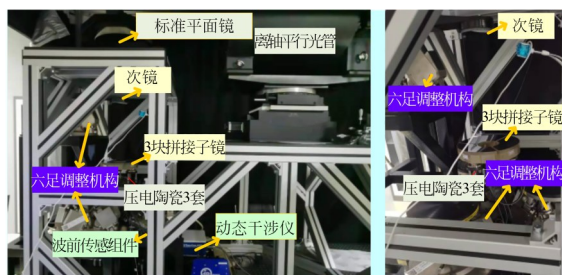
针对拼接式空间望远镜共相方法的验证需

求,搭建的实验系统如图7所示。



(a) 系统设计方案

(a) Tested system design



(b) 实物照片

(b) Physical system

图7 实验系统硬件组成示意

Fig. 7 Schematic diagram of hardware components of tested system

3.1.1 光学系统

望远镜的光学系统如图8所示,口径 $\Phi 200$ mm,焦距为2 000 mm,视场为 0.5° ,工作波段为 $0.45 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 。像质分析结果如图9所示,在中心 0.3° 视场以内,系统波像差在全工作波段优于 $\lambda/50$ RMS,在边缘 0.5° 视场内波像差在全工作

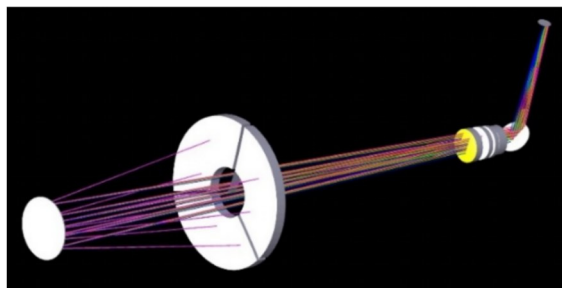
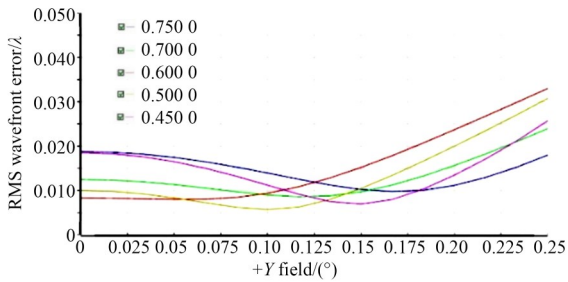


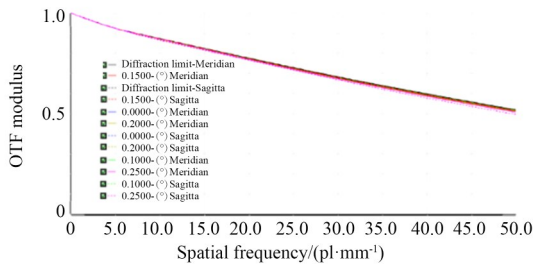
图8 拼接式望远镜的光学系统

Fig. 8 Optical system of segmented telescope

波段优于 $\lambda/30$ RMS,MTF 接近衍射极限,成像质量较好,满足实验需求。其中,曲率半径的一致性公差小于 $\lambda/50$ RMS(等效为面形误差),子镜面形公差小于 $\lambda/60$ RMS($\lambda=632.8\text{ nm}$)。



(a) 波像差设计结果
(a) Wavefront error of the optical system



(b) MTF设计结果
(b) Modulation transfer function of the optical system

图9 光学系统像质
Fig. 9 Image quality of optical system

3. 1. 2 光机结构

综合考虑实验需求、结构布局等因素,主镜采用三片扇形拼接式子镜,如图10所示。外轮廓为圆形,共相状态下点扩散函数的对称性较好。

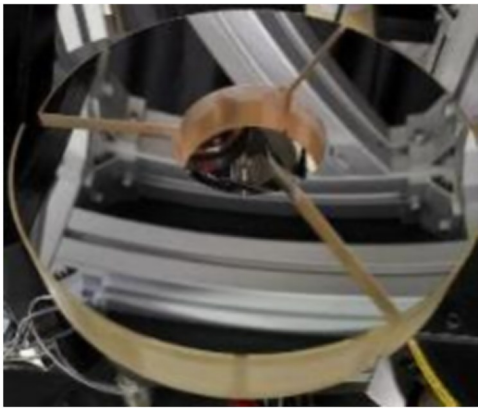


图10 拼接式主镜实物
Fig. 10 Segmented primary mirrors

在调整机构方面,鉴于市场上较难找到同时兼顾毫米量级行程和纳米量级调整分辨率的货架产品,因此实验采用粗精配合的两级调整结构。其中,粗调整机构选取德国PI公司的H-824. G2型六足调整机构,精调整机构采用该公司的P-843. 10型压电陶瓷促动器,将3个该型促动器按照正三角形排布,可实现 Z, θ_x, θ_y 三个维度的调整,相关指标如表2所示。

上述组合兼顾了调整维度、范围及精度的需求。

表 2 调整机构综合行程及分辨率	
Tab. 2 Range and resolution of motion mechanism	
指 标	数值
X/Y行程	$\pm 22.5\text{ mm}$
Z行程	$\pm 12.5\text{ mm}$
θ_x/θ_y 行程	$\pm 7.5^\circ$
θ_z 行程	$\pm 12.5^\circ$
X/Y分辨率	$0.3\text{ }\mu\text{m}$
z分辨率	0.3 nm
θ_x/θ_y 分辨率(设计值)	$0.02\text{ }\mu\text{rad}$
θ_z 分辨率	$3.5\text{ }\mu\text{rad}$

3. 1. 3 波前传感硬件

波前传感系统需要兼顾像面检测和瞳面检测的需求,由于两种检测方法应用于不同的调校阶段,因此,一般采用机构驱动光学元件的方式实现光路切换。以JWST为例,采用“双滤光轮”模式实现光路切换,其光学元件数量较多,结构较复杂且光路中各元件、切换机构等容易引入波前误差。考虑到实验需求和实现代价,这里采用高重复精度的直线导轨搭载屋脊反射镜的方式实现光路切换,以保证波前传感光路波前质量的稳定性。波前传感系统光路如图11所示。

波前传感系统的光路整体上呈直线排布,屋脊反射镜位于系统中部,两侧分别为像面检测光

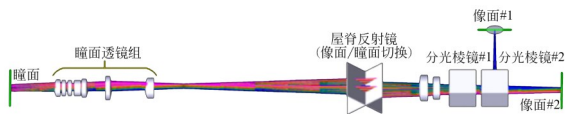


图11 波前传感系统的光学设计
Fig. 11 Optical design of wavefront sensing system

路和瞳面检测光路。像面检测光路包括两组分光棱镜和安装于焦面和离焦面的两部相机,其中一组分光棱镜分出的光路作为动态干涉仪检测系统波像差的接口机。瞳面检测光路包括瞳面透镜组、色散条纹传感器和相机等,可实现 0.1~200 μm 的动态检测活塞误差,调校精度优于 100 nm,如图 12 所示。将波前传感系统与模拟拼接式望远镜集成后,即可开展拼接式望远镜的共相实验。



图 12 波前传感系统的硬件组成
Fig. 12 Hardware components of wavefront sensing system

3.2 实验结果与分析

共相调校是一个完整的闭环流程,前一调校阶段的调校结果是下一调校阶段的输入。实验过程拟实施 5 次完整的调校流程——即由初始输入较大子镜位姿误差,通过逐步实施各阶段调校,至精共相收敛的全部流程。

3.2.1 子镜像点识别搜索与排列实验及结果

图 13 为引入失调量后,相机靶面内探测到的像点,可以看出,相机仅探测到两块子镜所成像点。由于子镜失调量过大,其他子镜所成像点落在相机靶面之外,需使用矩形螺旋扫描策略,通

过控制子镜促动器,使所有子镜所成像点移动至相机靶面内,如图 14(a)所示。在此基础上,通过调整子镜促动器,将 3 块子镜所成像点按正三角形排列于相机中心位置,如图 14(b)所示,方便后续进行像点调校和像点堆叠步骤。表 3 为子镜像点识别搜索 5 组实验结果,表中分别给出了 3 块子镜引入的 $\theta_x/\theta_y/z$ 方向失调量以及不在相机靶

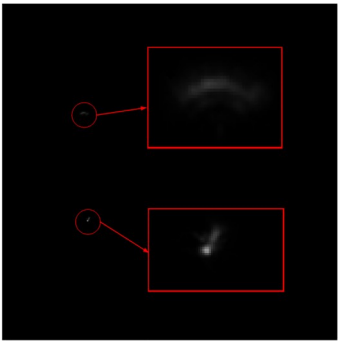


图 13 相机内仅两个子镜所成像点
Fig. 13 Image points formed by two segmented mirrors in camera

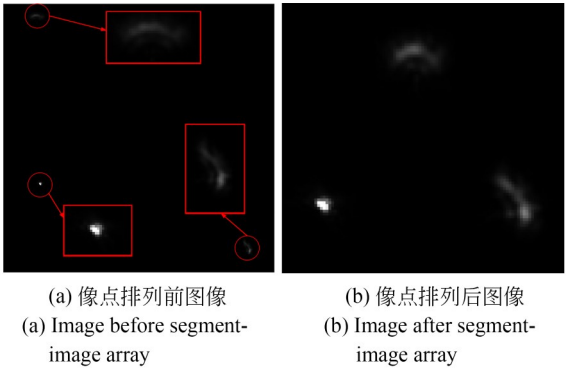


图 14 像点排列前后焦面图像的对比
Fig. 14 Comparison of focal plane image before and after segment-image array

表 3 子镜像点识别搜索实验结果

Tab. 3 Experimental results of segment-image identification and search

实验 次数	$\theta_x/(^\circ)$			$\theta_y/(^\circ)$			z/mm			是否出现在视场内			螺旋扫描步数			是否成 功识别 排列
	子镜#1	子镜#2	子镜#3	子镜#1	子镜#2	子镜#3	子镜#1	子镜#2	子镜#3	子镜#1	子镜#2	子镜#3	子镜#1	子镜#2	子镜#3	
1	-0.096	0.072	-0.062	0.0620	0.079	0.032	0.353	-0.102	-0.385	否	是	是	1	0	0	是
2	0.088	-0.078	0.049	0.095	-0.064	-0.09	-0.42	-0.14	0.329	否	是	否	6	0	3	是
3	-0.086	0.07	-0.099	-0.002	0.099	0.009	-0.285	0.291	0.155	否	否	否	1	7	1	是
4	0.072	0.069	0.049	0.082	0.076	-0.077	-0.474	0.286	0.423	否	是	是	7	0	0	是
5	0.002	0.066	-0.066	-0.066	0.086	0.076	-0.008	0.334	-0.369	是	否	是	0	7	0	是

面内的像点进行矩形螺旋扫描的步数,可以看出,该策略可以识别所有子镜像点并将其调整至预设位置。

3. 2. 2 共焦调校验证实验及结果

共焦调校实验中,像点调校主要调校子镜沿 Z 轴方向的离焦误差,基于检测像点最大灰度的方法,以焦面相机为基准寻找最优调校点。图 15 为像点最大灰度值检测拟合曲线,可以看出,曲线拟合结果良好。图 16 为像点调校后图像。

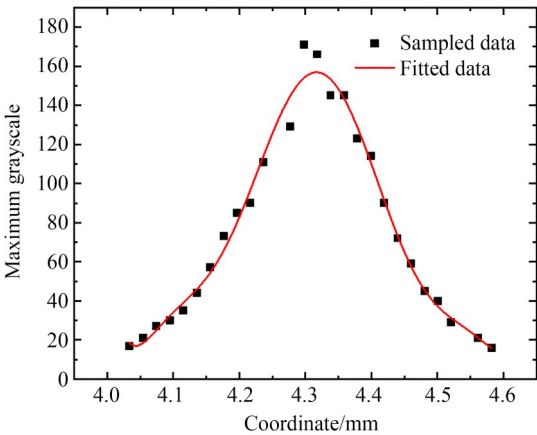


图 15 像点最大灰度值检测拟合曲线
Fig. 15 Maximum grayscale value detection fitting curve for image spots

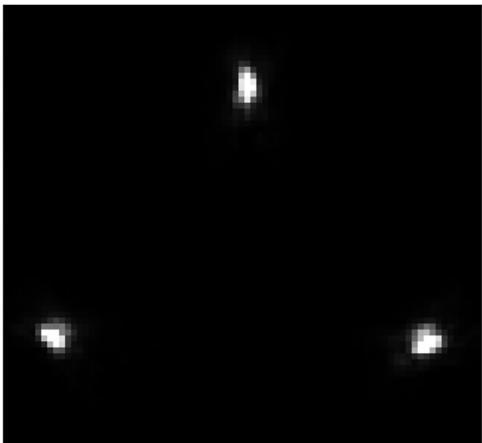


图 16 像点调校后图像
Fig. 16 Image after segment-image focusing

像点调校的实验结果如表 4 所示。从表 3 和表 4 中可以得出,该策略可以将子镜间活塞误差控制在 $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ 。

表 4 像点调校实验结果

Tab. 4 Experimental results of segment-image focusing

实验 次数	Z/mm		
	子镜#1	子镜#2	子镜#3
1	0.341	−0.146	−0.359
2	−0.41	−0.147	0.374
3	−0.278	0.307	0.196
4	−0.523	0.259	0.393
5	−0.018	0.31	−0.385

三片子镜依次完成调校后,控制促动器调整子镜倾斜,将子镜像点调整至像面中心处,完成像点堆叠,结果如图 17 所示。

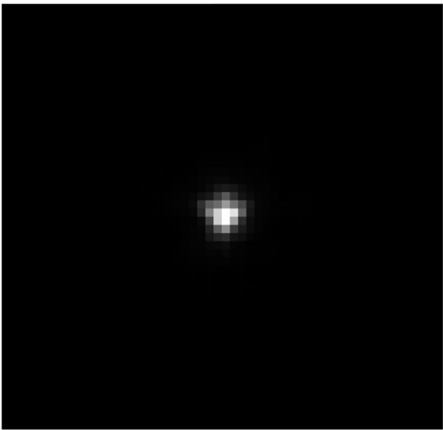


图 17 像点堆叠后焦面图像
Fig. 17 Focal plane image after segment-image stacking

3. 2. 3 粗共相调校验证实验及结果

在前阶段共焦调校之后,控制屋脊反射镜平移,切换至瞳面检测光路。瞳面相机获得的色散条纹如图 18 所示,条纹相对色散方向的倾斜角度代表被测子镜间相对活塞误差量,倾斜角度方向代表被测子镜间相对活塞误差正负号,倾斜角度越大则代表活塞误差越大,平行时则代表活塞误差接近零。粗共相调校后瞳面相机获得的色散条纹如图 19 所示。多组工况粗共相调校结果数据如表 5 所示,粗共相后子镜间活塞误差小于半个波长,可以满足后续精共相检测范围需求。其中,子镜编号与拼接缝编号如图 20 所示。子镜间的相对活塞误差计算方法为子镜沿着光轴方向(Z

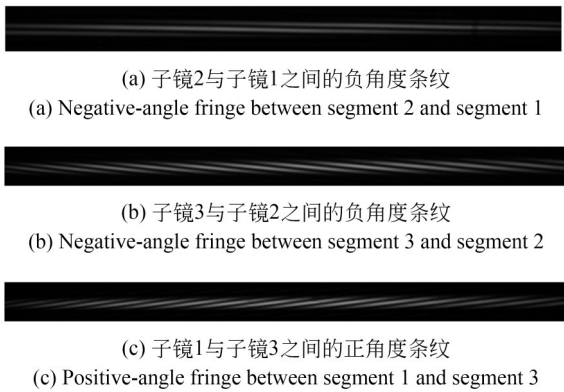


图 18 DFS 采集的色散条纹图像(粗共相调校前)
Fig. 18 Dispersed fringe images acquired by DFS(before coarse-phasing)

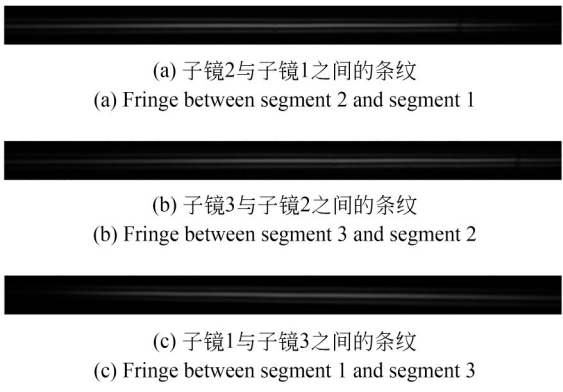


图 19 DFS 采集的色散条纹图像(粗共相调校后)
Fig. 19 Dispersed fringe images acquired by DFS(after coarse-phasing)

轴)的绝对位移量之差,如拼接缝#1的初始工况 活塞误差即为子镜#2与子镜#1的Z坐标差值。

表 5 粗共相调校实验结果

Tab. 5 Experimental results of coarse co-phasing (μm)

实验 次数	初始误差			调校残差		
	拼接缝#1	拼接缝#2	拼接缝#3	拼接缝#1	拼接缝#2	拼接缝#3
1	32	-70	38	0.137	0.024	-0.219
2	17	-52	35	-0.185	-0.124	0.358
3	-9	-25	34	0.164	0.139	-0.25
4	-22	3	19	0.202	-0.083	-0.157
5	14	-8	-6	-0.074	-0.175	0.215

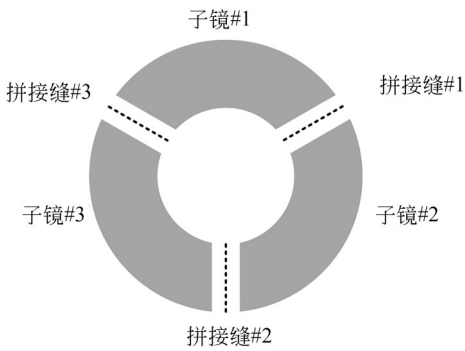


图 20 子镜编号与拼接缝编号
Fig. 20 Segments number and slits number

3. 2. 4 精共相调校验证实验及结果

由表 5 可知,子镜间的活塞误差控制在 1λ

(λ=632.8 nm)以内,可以实施精共相调校。调校前首先需要控制屋脊反射镜平移,切回像面检测光路,通过离焦相机采集前后离焦图像,它与理论 PSF 的对比如图 21 所示。

将以上图像数据输入目标函数,通过寻优算法解算相位获得子镜失调量信息,并控制促动器校正失调量,完成精共相调校,校正前后像点如图 22 所示,部分实验结果如图 23 和表 6 所示。

通过干涉仪实测结果、DFS 检测活塞误差数据和 PD 实验数据比对,证明拼接式望远镜实验系统达到共相状态,系统波像差在 0.1λ RMS 以内。

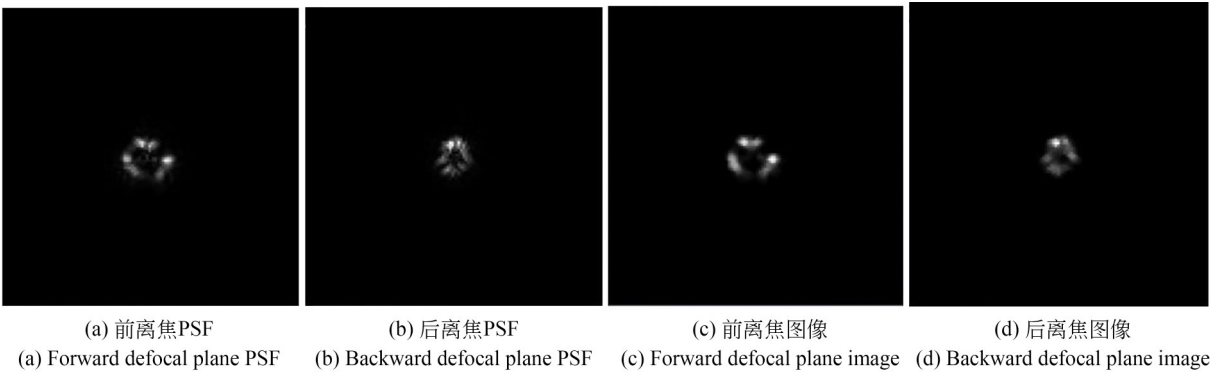


图 21 理论 PSF 与实际采集图像对比

Fig. 21 Comparison between theoretical PSF and acquired images

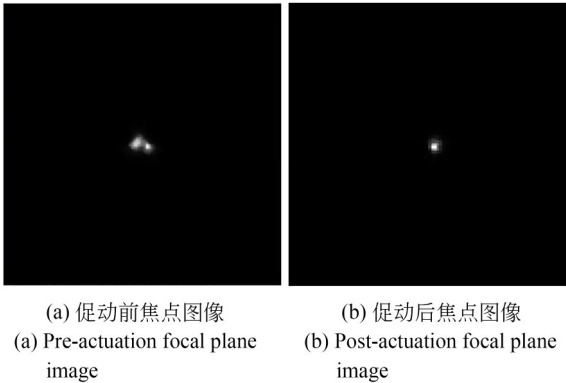


图 22 促动前后像点对比

Fig. 22 Focal plane image changes before and after actuation

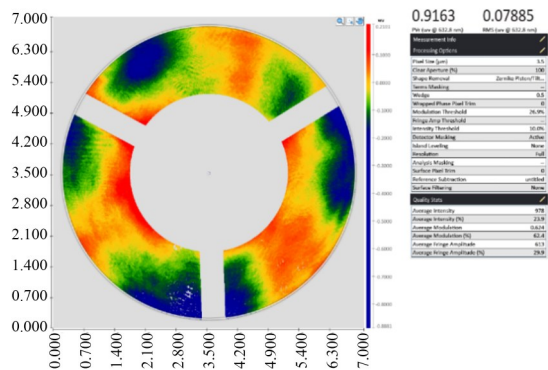


图 23 精共相调校后干涉仪检测结果

Fig. 23 Test result of interferometer after fine phasing

4 结 论

本文针对拼接式空间望远镜在轨共相调校的需求,提出了拼接式空间望远镜大范围高精度自动化的共相调校方法,形成了由改进共焦调校方法、基于色散条纹传感器的粗共相检

表 6 精共相调校实验结果	
Tab. 6 Experimental results of fine phasing	
实验次数	系统波像差检测结果 $\lambda(632.8\text{ nm})$
1	0.083 19
2	0.078 85
3	0.092 68
4	0.083 82
5	0.085 96

测方法,以及基于相位差的精共相检测方法构成的拼接式空间望远镜子镜共相体系。最后,搭建实验系统开展了子镜像点识别搜索与排列、共焦调校、粗共相调校和精共相调校,实现了完整的共相调校流程。实验结果表明:综合干涉仪实测、DFS 检测活塞误差和 PSF 检测的结果,实验系统波像差优于 0.1λ RMS ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 以内,系统达到共相水平,验证了调校方法的有效性。

作者贡献声明:

许博谦:总体方案设计,论文构思与撰写;
鞠国浩:算法研究;
高雁:结构分系统设计;
王帅会:电子学分系统设计;
张春悦:算法设计,实验实施;
匡也、杜一民:结构分系统设计;
鹿芝荣:数据分析与数据可视化呈现;
徐抒岩:总体方案指导,论文审核。

参考文献:

- [1] ACTON D S, ATCHESON P D, CERMAK M, *et al.* James Webb Space Telescope wavefront sensing and control algorithms[C]. *Optical, Infrared, and Millimeter Space Telescopes*. USA. SPIE, 2004, 5487: 887-896.
- [2] VAN DAM M A, MCLEOD B A, BOUCHEZ A H. Dispersed fringe sensor for the giant Magellan telescope [J]. *Applied Optics*, 2016, 55 (3) : 539-547.
- [3] HAFFERT S Y, CLOSE L M, HEDGLEN A D, *et al.* The holographic dispersed fringe sensors (HDFS): phasing the giant Magellan telescope [J/OL]. 2022: 2206.03615. <https://arxiv.org/abs/2206.03615v1>.
- [4] SPECHLER J A, HOPPE D J, SIGRIST N, *et al.* Advanced DFS: a dispersed fringe sensing algorithm insensitive to small calibration errors [C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. San Diego, California, USA. SPIE, 2010, 10021: 452-458.
- [5] DEAN B H, ARONSTEIN D L, SMITH J S, *et al.* Phase retrieval algorithm for JWST flight and testbed telescope [C]. *Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter*. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2006, 6265: 314-330.
- [6] CARLISLE R E, ACTON D S. Demonstration of extended capture range for James Webb Space Telescope phase retrieval[J]. *Applied Optics*, 2015, 54 (21): 6454-6460.
- [7] THURMAN S T. Method of obtaining wavefront slope data from through-focus point spread function measurements[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2011, 28(1): 1-7.
- [8] KORKIAKOSKI V, KELLER C U, DOELMAN N, *et al.* Fast & Furious focal-plane wavefront sensing[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(20): 4565-4579.
- [9] YANG K Y, MA X F, WEI W L, *et al.* Model-driven extended scene piston sensing for synthetic aperture telescopes [J]. *Optics Express*, 2024, 32 (23): 42071-42090.
- [10] FAN J L, WU Q Y, CHEN B H, *et al.* Wavefront sensing for sparse aperture imaging system based on the sub-aperture phase diversity [C]. *Optical Design and Testing VII*. Beijing, China. SPIE, 2016, 10021: 452-458.
- [11] PAINE S W, FIENUP J R. Extending capture range for piston retrieval in segmented systems[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(33): 9186-9192.
- [12] ZHAO Y, LI J B, LIU T, *et al.* Piston detection of optical sparse aperture systems based on an improved phase diversity method [J]. *Photonics*, 2023, 10(9): 1039.

作者简介:



许博谦(1985—),男,黑龙江大庆人,博士,副研究员,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间光学装备在轨制造、超大型空间光学系统研制等工作。E-mail: xuboqian@ciomp.ac.cn