

基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测

季文, 袁群*, 高志山, 第五蔻蔻, 刘威剑, 王若言, 郭珍艳

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 为了拓展精共相阶段平移误差的检测范围、缩减检测流程以及减少多方法检测在衔接过程中的装校要求, 本文提出基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测方法。在粗共相阶段, 采用单色激光干涉以及白光干涉分别实现百微米以及微米量级的平移误差标定; 在精共相阶段, 采用双波长激光干涉实现微米级平移误差的高精度检测。以整镜中剖出的两块六边形球面子镜为测试对象, 采用红绿激光双波长移相干涉仪与白光显微干涉仪对所提的技术方案进行实验验证, 提出基于拼接镜面形检测数据的相对平移误差解算算法, 设计并构建一套拼接镜共相装校系统。粗共相阶段标定平移误差至微米量级后, 在精共相阶段子镜间平移误差可由 601.6 nm 补偿至 16.0 nm。

关键词 测量; 拼接镜; 共相检测; 双波长干涉; 白光显微干涉

中图分类号 TH751; TN247; TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1612003

Co-Phasing Detecting for Segmented Mirror Based on Multiple Wavelength Interferometry

Ji Wen, Yuan Qun*, Gao Zhishan, Diwu Koukou, Liu Weijian, Wang Ruoyan, Guo zhenyan
School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In order to expand the detection range of the piston error in the fine common phase stage, reduce the detection process and reduce the installation and calibration requirements in the multi-method detection connection process, this paper proposes a segmented mirror common phase detection method based on multi-wavelength interference technology. In the coarse common phase, monochromatic laser interferometry and white light interferometry are used to achieve the calibration requirements of 100 micron-level and micron-level piston errors respectively; in the fine common phase, dual-wavelength laser interferometry is used to achieve high-precision detection of micron-level piston error. Taking the two hexagonal spherical sub-mirrors cut out of the whole mirror as the test object, the red and green laser dual-wavelength phase shifting interferometer and the white light micro-interferometer are used to experimentally verify the proposed technical scheme, and the proposed technique is based on the segmented mirror shape. A relative piston error calculation algorithm based on the segmented mirror shape detection data is proposed, and a set of segmented mirror co-phasing assembly and calibration system is designed and constructed. After the calibrated piston error of the coarse common phase is on the order of micrometers, the piston error between the sub-mirrors in the fine common phase can be compensated from 601.6 nm to 16.0 nm.

Key words measurement; segmented mirror; co-phasing detection; dual-wavelength interferometry; white light micro-interferometry

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 350.1260

1 引言

天文望远镜的观测能力与口径相关, 为了制造

大口径以及超大口径的望远镜, 子孔径拼接技术开始用于构建望远镜的主镜, 并在过去的 50 年里得到快速发展。六边形球面拼接镜是最基本的拼接镜形

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-03; 录用日期: 2021-03-11

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005500)、国家自然科学基金(U1931120)、江苏省六大人才高峰项目(RJFW-019)

通信作者: *yuanqun@njust.edu.cn

式之一,广泛用于望远镜的构建。由于拼接的子镜离散且存在曲率半径偏差,需对其进行由粗到精的共焦共相装校,使共相误差逐步收敛。在最后的精共相阶段,子镜的共相精度越高,望远镜的成像质量越好。拼接镜的共相误差是由子镜间的位姿失调引起的,而在所有的共相误差中,子镜间的相对平移误差是最需要也是最难检测的,误差需要保持在 $\lambda_0/20$ (λ_0 为望远镜的工作波长)^[1-2]。

各国科研人员对平移误差的检测都进行了大量的研究,也提出了许多有效的检测方法。对于平移误差的检测,衍射法^[3-4]基于夏克-哈特曼波前检测分为宽带衍射法与窄带衍射法,各自在 $\pm 30.0 \mu\text{m}$ 与 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 的检测范围内实现了 60 nm 与 6 nm 的检测精度;相位差法^[5-6]基于相位复原迭代算法在 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的检测范围内实现了 40 nm 的检测精度;四棱锥检测法^[7-8]基于四棱锥波前传感器在 $\pm \lambda$ 的波长范围内实现了 5.7 nm 的检测精度;色散条纹传感技术^[9-10]基于色散元件共相检测光路分别实现了在 $100 \mu\text{m}$ 的测量范围内优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的检测精度,以及一个波长检测范围内 $\lambda/20$ 的检测精度。对各种拼接镜平移误差检测方法的检测范围和精度进行分析,能够发现平移误差需要几十微米的检测范围以及纳米量级的检测精度,而单一的测量方法无法同时保证大量程和高精度,所以必须采用多种检测方法组合的方式对整个共相过程中的平移误差进行检测,多检测方法组合的形式往往涉及不同的检测原理与手段。

干涉法^[11-13]通常使用白光和单色光组合检测的方式在实现十纳米量级检测精度的同时拓展检测范围至几十微米,如 He-Ne 激光与白光组合的迈克耳孙干涉法可实现 $\pm 45 \mu\text{m}$ 的检测范围内 10 nm 的检测精度。单波长干涉具有完整面形检测以及高测量精度的优点,适用于精共相阶段平移误差的检测,但是其平移误差检测范围只有百纳米量级。白光干

涉具有垂轴测量范围大和测量分辨率高的优点,可用于实现平移误差在百微米到百纳米范围内的检测。但是由于白光干涉属于微观形貌测量,在粗共相过程中仅能通过小视场范围内拼接镜的接缝台阶高度来标定平移误差,拼接镜整条接缝台阶高度保持在百纳米量级范围,而且在硬件装校上具有很高的实现难度。为了解决白光与单色光组合的衔接装校问题,本文使用双波长干涉代替单波长干涉,以多波长干涉实现拼接镜的共相检测。多波长干涉技术在全程干涉的基础上可拓展精共相阶段平移误差的检测范围至微米量级,减少微米量级检测节点在衔接过程中对拼接镜装校的要求。

围绕上述技术方案,本文使用双波长移相干涉仪以及白光显微干涉仪对拼接镜的共相检测进行实验验证。在全程干涉检测的基础上,采用平移误差解算算法以及设计制造的共相装校系统对双六边形球面拼接镜的平移误差进行解算和装校,以验证基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测方案的可行性。

2 检测流程与原理

2.1 全程干涉共相检测流程

拼接镜共相误差检测的关键问题在于平移误差的动态范围较大,故采用多种干涉检测组合的形式对整个共相过程中的平移误差进行检测。针对粗共相前期平移误差由初始状态标定至百微米以内的需求,利用单波长干涉仪对子镜间的离焦量之差进行检测。针对粗共相后期平移误差由百微米标定至微米量级以内的需求,利用白光显微干涉仪对相邻子镜的边缘接缝高度进行检测。针对精共相阶段平移误差的微米量级检测范围以及十纳米量级检测精度的要求,利用双波长干涉仪对拼接子镜的组合面形进行检测,再通过解算算法求解出相对平移误差。拼接镜平移误差的全程干涉检测流程如图 1 所示。

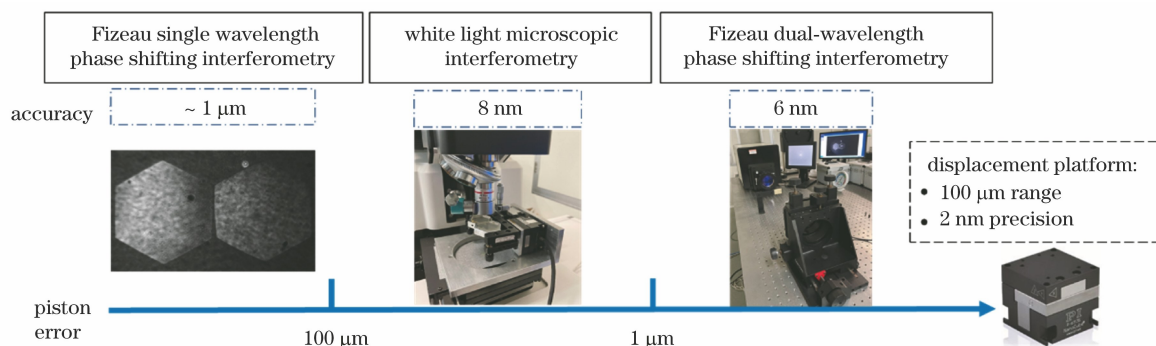


图 1 拼接镜平移误差的全程干涉检测流程

Fig. 1 Whole interference detection process of piston error of segmented mirror

2.2 单波长干涉下子镜间离焦量之差标定平移误差的基本原理

本文使用单波长干涉仪测量子镜间离焦量之差来标定平移误差,可以满足球面拼接镜粗共相初始阶段平移误差的检测需求。假设拼接子镜的曲率半径相同,则双子镜离焦干涉检测光路如图 2 所示,其

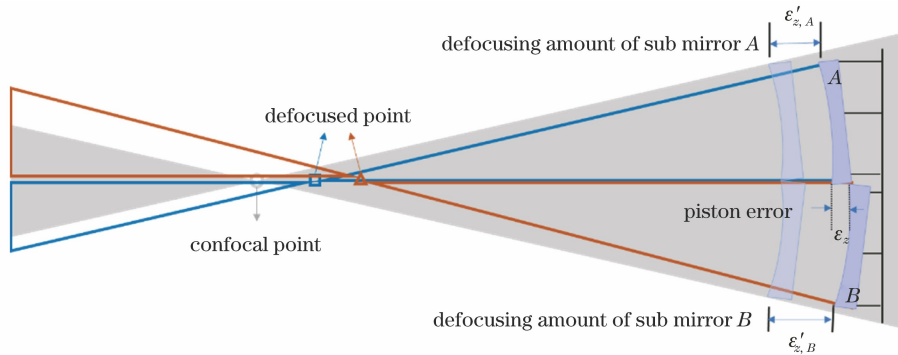


图 2 双子镜离焦干涉检测光路

Fig. 2 Optical path of defocus interference detection for two sub-mirrors

由于天文望远镜的主镜一般由大 F 数的子镜进行拼接,拼接子镜的离焦调整误差所引入的高阶球差项可以忽略,其引入波像差的主要表现形式为离焦量 ϵ'_z ,其与波前误差存在的关系可表示为

$$\Delta W(x, y) = W_4 \rho^2, \quad (1)$$

其中

$$W_4 = -\epsilon'_z \frac{1}{16F^2} = -\epsilon'_z \frac{D^2}{16f^2}, \quad (2)$$

式中: $\Delta W(x, y)$ 为波前误差,其中 (x, y) 为出瞳坐标; W_4 为离焦波像差系数; ρ 为归一化半径; f 为子镜焦距; D 为子镜直径。由(1)式和(2)式可知,离焦波像差系数与拼接子镜的离焦量 ϵ'_z 呈线性关系。

结合大 F 数球面拼接镜的离焦误差分析,考虑到实际的大口径子镜会存在百微米量级的曲率半径偏差,在精确测量曲率半径偏差 ΔR 的基础上计算拼接子镜间的平移误差,表达式为

$$\epsilon_z = \Delta R + \epsilon'_{z,B} - \epsilon'_{z,A}. \quad (3)$$

2.3 白光显微干涉检测接缝台阶高度标定平移误差的基本原理

采用白光显微干涉技术来检测拼接子镜接缝处的台阶高度,进而继续对百微米范围内的平移误差进行标定。基于白光显微干涉的拼接镜接缝台阶形貌的检测光路如图 3 所示,其中 CCD (Charge Coupled Device) 用于采集白光显微干涉图。由于白光显微干涉技术具有小视场的特点,只能检测小范围内拼接镜接缝台阶形貌,所以除了拼接镜的接缝中央,还需要对接缝两端的台阶进行多采样点检

中 ϵ_z 为子镜间平移误差, $\epsilon'_{z,A}$ 和 $\epsilon'_{z,B}$ 分别为子镜 A 和 B 的离焦量。子镜离焦的参考点是干涉腔中的共焦点,子镜 A 和 B 由于存在对应的离焦位置误差,其返回的待测球面波会聚点将偏离共焦点,从位置关系看子镜的离焦量之差正对应于拼接镜的平移误差。

测。采用白光显微干涉技术标定拼接镜台阶高度的流程分为两步:首先对拼接镜接缝处的多采样点形貌进行检测,计算子镜间的相对平移以及倾斜量;然后使用高精度的位姿调整系统对子镜间的平移倾斜进行补偿,装校拼接镜接缝整体台阶高度至微米量级。

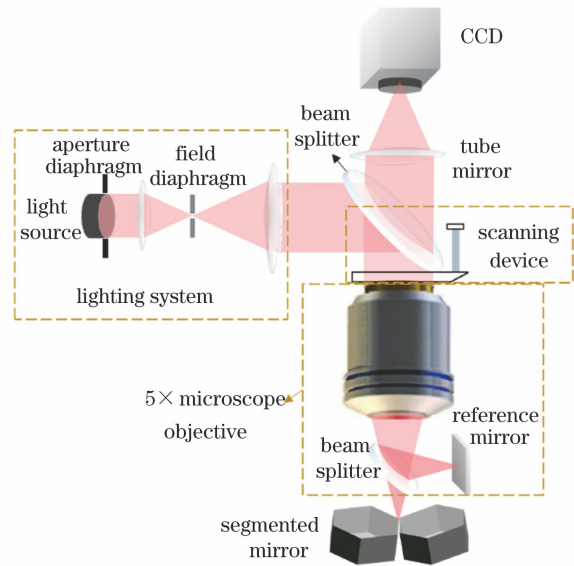


图 3 基于白光显微干涉的拼接镜接缝台阶形貌的检测光路
Fig. 3 Detection optical path of segmented mirror seam step shape based on white light microscopic interferometry

2.4 双波长干涉检测子镜间平移误差的基本原理与算法

2.4.1 接缝阶跃型拼接镜面形的检测原理

与白光显微干涉技术相比,单色光干涉技术的特点是可以实现拼接镜大视场内的面形检测,所以

在精共相阶段,采用单波长干涉的方式检测子镜间位姿关系的的面形信息是最为有效的检测方式。双波长干涉检测拼接镜面形的原理如图 4 所示,其中 λ_{eq} 为等效波长。六边形球形面拼接镜由于存在平移误差,所以形式上类似于球面台阶板,其最大的特点在于离散的接缝阶跃台阶,如图 4(a)所示。以 632.8 nm 单

波长干涉检测为例,由于解包过程中奈奎斯特采样定律存在 2π 模糊问题,而且还存在反射元件光路折返的原因,子镜间接缝台阶的最大可检测高度为 158.2 nm ($\lambda_s/4, \lambda_s = 632.8\text{ nm}$),这限制了精共相阶段平移误差的检测范围,而且提高了白光与单色光检测衔接中的装校难度。

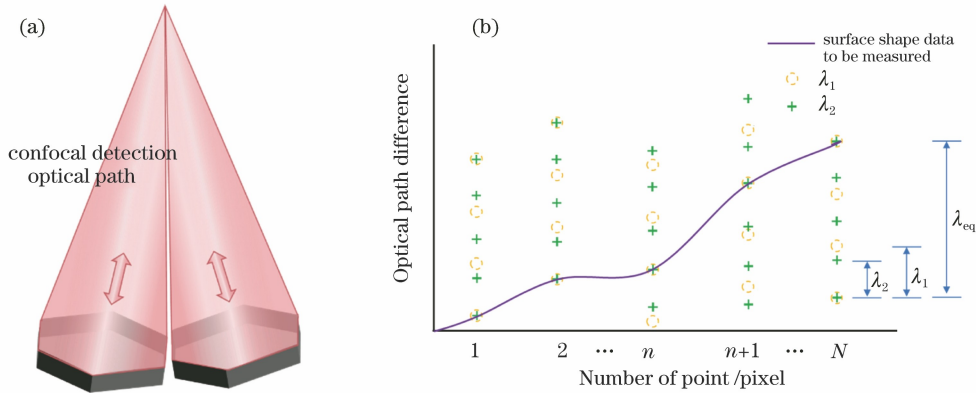


图 4 双波长干涉检测拼接镜面形的原理。(a)拼接镜完整面形检测;(b)阶跃台阶的光程差
Fig. 4 Principle of segmented mirror surface shape detection based on dual-wavelength interferometry.
(a) Complete surface shape detection of segmented mirror; (b) optical path difference of step

单波长干涉的 2π 模糊问题可由双波长干涉技术解决。对于含微米量级平移误差且离散阶跃形式的拼接镜,阶跃台阶的光程差如图 4(b)所示。在横跨接缝的一维空间分布中,同一坐标点在不同波长下有不同的光程差信息,而实际波面单一坐标点只能对应一个光程差,故重合数据点才是实际坐标点的光程差数据。从第 n 点到第 $n+1$ 点为接缝台阶两端的坐标点,利用重合数据点才能避免单波长的 2π 模糊,从而重构出真实面形。

双波长干涉的两组工作波长分别为 λ_1 和 λ_2 , 其中 $\lambda_1 > \lambda_2$ 。两个波长之间的差值越小,对应的等效波长越大,相邻采样点的测量范围也越大^[14], λ_{eq} 可表示为

$$\lambda_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}, \lambda_1 > \lambda_2. \quad (4)$$

2.4.2 基于拼接镜面形检测数据的平移误差解算算法

双波长干涉技术可检测出拼接镜返回的初始波面面形。考虑到拼接子镜存在倾斜误差,子镜接缝处的台阶高度并不直接对应于子镜间的相对平移误差,所以需要运行特定的平移误差解算算法。子镜间的相对平移误差解算流程如图 5 所示。根据拼接镜的面形数据,对子镜分别进行 Zernike 拟合重构,则拟合的波前面形可直观反映拼接镜的位

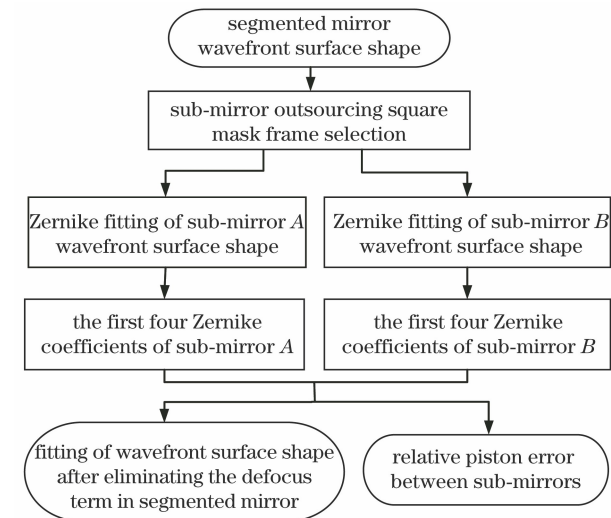


图 5 子镜间的相对平移误差解算流程
Fig. 5 Process of solving relative piston error between sub-mirrors

姿关系。

对于六边形孔径的波面,需采用六边形孔径上正交的 Zernike 标准多项式对其进行拟合重构。Mahajan 等^[15]给出了基于圆形 Zernike 标准多项式求解六边形孔径上正交 Zernike 标准多项式的一般过程。由于子镜为大 F 数的球面,调整误差引入的几何残余像差几乎可以忽略,只需要考虑对应波像差中的常数项、倾斜项和离焦项。表 1 为圆形孔径 Zernike 标准多项式的前 4 项以及六边形孔径

Zernike 标准多项式的前 4 项。从表 1 可以看到,六边形 Zernike 标准多项式在六边形孔径上的正交性可以保证拟合多项式系数的彼此独立,对比圆形与六边形 Zernike 标准多项式的前 4 项,两者形式相同,仅仅在数值上有所不同,故直接对六边形子镜进

行拟合重构。值得注意的是,对六边形拼接镜的波面数据进行 Zernike 拟合得到前 4 项系数后,重构之前需要消去离焦带来的 $x^2 + y^2$ 项,但是 Z_4 项中引入的常数项需要保留,其与常数项 Z_1 一起构成了拼接镜的位置信息。

表 1 圆形与六边形 Zernike 标准多项式的前 4 项对比

Table 1 Comparison of the first four terms of circular and hexagonal Zernike standard polynomials

Z_j	Zernike standard polynomial for circular aperture	Zernike standard polynomial for hexagonal aperture
Piston term Z_1	1	1
X tilt term Z_2	x	2.19089 x
Y tilt term Z_3	y	2.19089 y
Defocus term Z_4	$-1 + 2(x^2 + y^2)$	$-1.70499 + 4.09197(x^2 + y^2)$

对于子镜 A 和 B 进行拟合重构,表达式为

$$W = \alpha + \beta x + \gamma y + \eta(x^2 + y^2), \quad (5)$$

式中: α 、 β 、 γ 和 η 分别为对应的拟合系数。由 $\alpha_A - \alpha_B$ 表示子镜中心点沿 Z 轴方向的距离,由 $2\gamma_A/D$ 、 $2\beta_A/D$ 、 $2\gamma_B/D$ 和 $2\beta_B/D$ 分别表示两片镜子绕 X 轴方向和 Y 轴方向的倾斜误差 θ_{xA} 、 θ_{yA} 、 θ_{xB} 和 θ_{yB} (面向坐标轴的正方向逆时针旋转为正),其中 D 为子镜外切圆的直径。值得注意的是,当对子镜间的平移误差进行检测时,都是以一片子镜为基准求另一片子镜相对此子镜的平移误差,因此需要根据位置关系求解子镜间相对平移误差的解算公式。

子镜间平移误差的解算示意图如图 6 所示。在三维空间上,将子镜 A 和子镜 B 拟合为分别存在绕 X 轴方向和 Y 轴方向倾斜误差的平面,以子镜 A 为基准镜,子镜 B 相对于子镜 A 的平移误差可以用子镜 B 中间点到子镜 A 镜面的距离来表示。子镜 A 绕中间点在 X 轴方向和 Y 轴方向的倾斜角度分别为 θ_{xA} 和 θ_{yA} ,则子镜 A 镜面的法向量 $\mathbf{N} = (-\sin \theta_{yA}, \sin \theta_{xA}, -\cos \theta_{yA} \cos \theta_{xA})$,两片镜子中心点坐标可表示为 $\overrightarrow{AB} = (0, L, -H)$,其中 L 为子镜中间点与 Y 轴方向的距离, $H = \alpha_A - \alpha_B$ 为子镜中

间点与 Z 轴方向的距离,则平移误差可表示为

$$\epsilon_z = \frac{|\mathbf{N} \cdot \overrightarrow{AB}|}{|\mathbf{N}|} = \frac{|H \cos \theta_{xA} \cos \theta_{yA} + L \sin \theta_{xA}|}{\sqrt{\sin^2 \theta_{xA} + \sin^2 \theta_{yA} + \cos^2 \theta_{xA} \cos^2 \theta_{yA}}}. \quad (6)$$

(6)式中 $\mathbf{N} \cdot \overrightarrow{AB}$ 的正负可以判断平移误差 ϵ_z 的方向。

3 实验与分析

3.1 实验样品

实验采用的拼接镜由单块圆形球面镜经切割而成,球面整镜的参数如表 2 所示,对圆形球面整镜进行六边形切割处理,切割方案如图 7 所示,其中 PV 为面形峰谷值,RMS 为面形均方根值,制成的六边形待测拼接球面镜可以保持良好面形。

表 2 球面整镜的参数

Table 2 Parameters of spherical lens

Shape	Effective focal length /mm	Aperture	Surface quality
Concave spherical surface	152.311	$f/2$	60-40

3.2 实验装置

基于六边形球面拼接镜平移误差检测的需求,在实验验证中使用白光显微干涉仪以及菲佐型双波长移相干涉仪,检测实景如图 1 所示。其中白光显微干涉仪采用中心波长为 573 nm 的白光光源以及放大倍率为 5× 的迈克耳孙型显微物镜,可以实现 3.38 mm×3.38 mm 视场范围内的 100 μ m 垂轴测量距离^[16]。基于菲佐型双波长移相干涉仪的拼接镜共相检测光路如图 8 所示,工作波长分别为 632.8 nm 的红光和 532 nm 的绿光^[17],拼接镜接缝

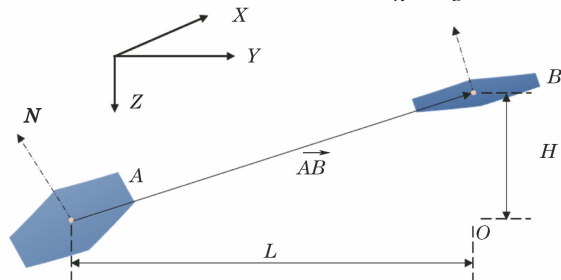


图 6 子镜间的平移误差解算示意图

Fig. 6 Schematic of solving piston error between sub-mirrors

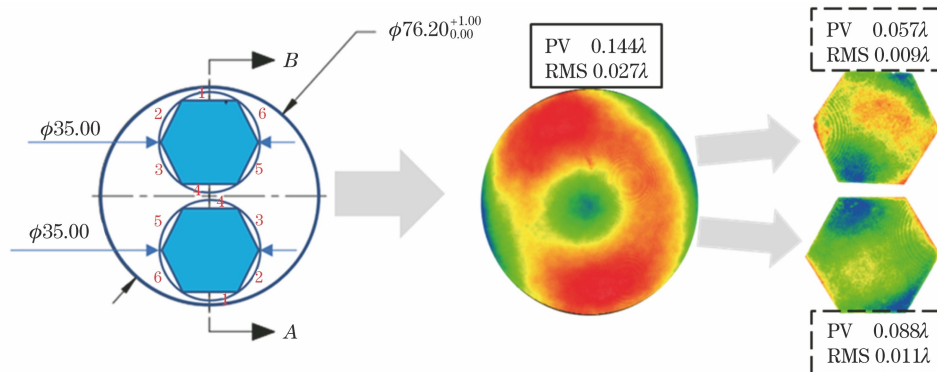


图 7 六边形球面子镜的切割方案

Fig. 7 Cutting plan of hexagonal spherical sub-mirrors

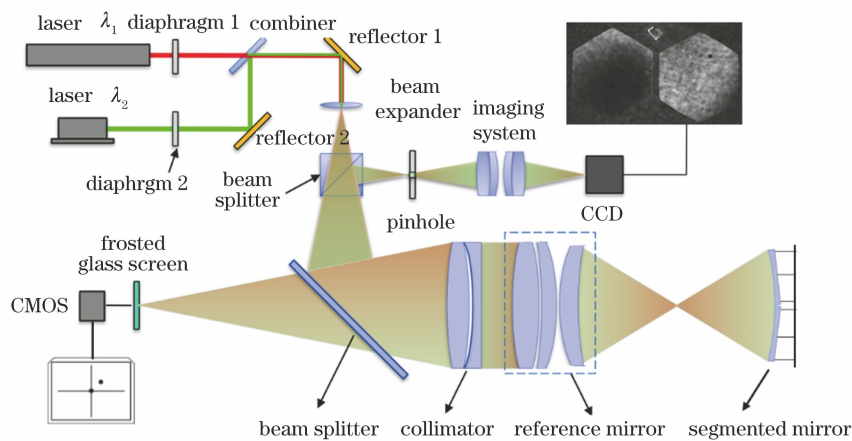


图 8 基于菲佐型双波长干涉仪的拼接镜共相检测光路

Fig. 8 Optical path of co-phasing detection of segmented mirror based on Fizeau dual-wavelength interferometer

台阶的最大可测量高度可以达到 $835 \text{ nm} (\lambda_{eq}/4, \lambda_{eq} = 3.34 \mu\text{m})$, 远大于单波长 $158.2 \text{ nm} (\lambda_s/4, \lambda_s = 632.8 \text{ nm})$, 其中 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 用于监视反射光点。

针对图 7 两片剖出的六边形球面拼接子镜, 设

计拼接镜共相装校系统以简单模拟主动光学系统对子镜共相误差的补偿。图 9 为子镜装校系统装配体的三维图以及实景图。其中核心部件压电位移台的 4 行程范围为 $120 \mu\text{m}$, 分辨率为 100 nm , 基本满足拼接镜装校以及平移误差补偿的需求。

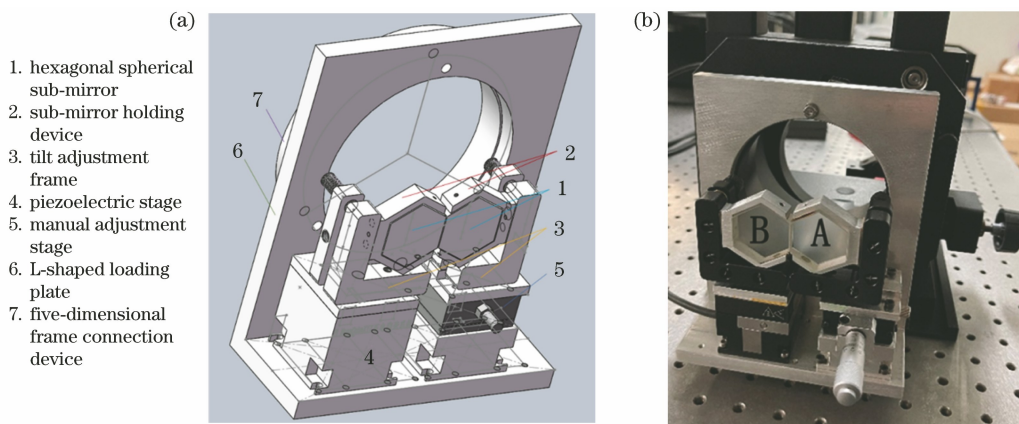


图 9 拼接镜的共相装校系统。(a) 三维装配体; (b) 系统实景图

Fig. 9 Co-phasing installation system of segmented mirror. (a) Three-dimensional assembly; (b) actual view of system

3.3 粗共相阶段的实验调节过程

由于待测拼接子镜源于同一片整镜, 所以曲率

半径近似相等。按照 2.1 节的检测原理, 可直接利用菲佐型双波长移相干涉仪的单波长工作模式, 借

由拼接镜的近零条纹干涉图将平移误差标定至百微米之内。拼接镜近零条纹干涉图的调节流程如图 10 所示,分别调节子镜位姿直至拼接子镜 A 和 B 出现近零条纹干涉图,此时可认定对于曲率半径相同的子镜 A 和 B 之间的平移误差已标定至 100 μm 以内。

粗共相阶段剩下的平移误差可利用白光显微干涉仪进行检测。初始阶段由于存在百微米量级的平移误差,同一高度位置只会有台阶的一边出现条纹,如图 11(a)所示。通过拼接镜共相装校系统的压电位移台对子镜间的平移误差进行补偿,补偿至干涉图出现在同一视场内且对比度最好,如图 11(b)所示,此时补偿位移量为 64.1 μm 。白光干涉仪垂直扫描干涉(VSI)法设置的移相距离范围为 $\pm 4.32 \mu\text{m}$,移相步长为 0.072 μm ,步数为 120 步,对拼接镜接

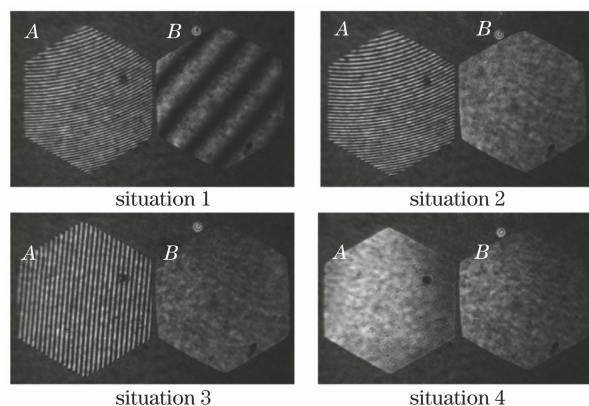


图 10 拼接镜近零条纹干涉图的调节流程
Fig. 10 Adjustment process of near-zero fringe interferogram for segmented mirror

缝处的形貌进行测量,拼接镜接缝处的形貌如图 11(c)所示。

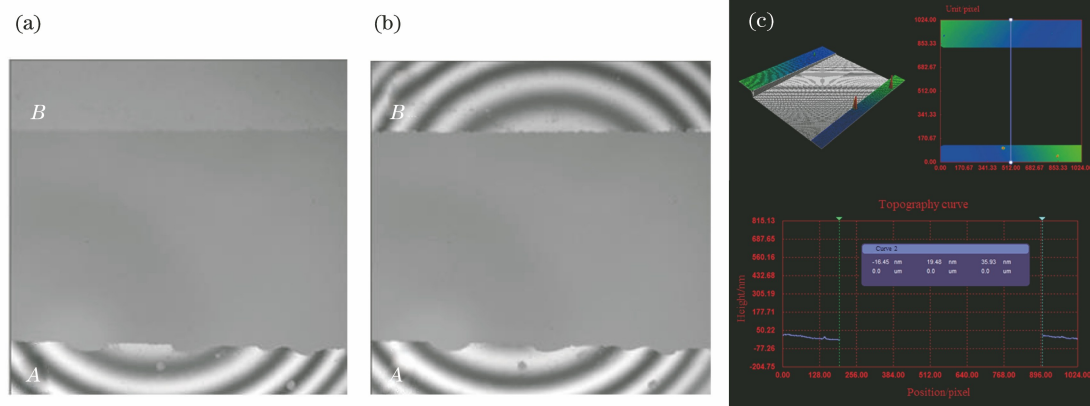


图 11 白光显微干涉仪的标定流程与结果。(a) 平移误差未补偿前干涉图;(b) 平移误差补偿后干涉图;
(c) VSI 检测模式下拼接镜的接缝处台阶形貌分布

Fig. 11 Calibration process and results of white light microinterferometer. (a) Interferogram before piston error compensation; (b) interferogram after piston error compensation; (c) seam step topography distribution of segmented mirror under VSI detection mode

白光显微干涉视场中央标记竖线处的台阶高度为 35.93 nm。事实上,利用白光显微干涉仪进行检测与补偿后,由于设计制造的共相装校系统无法进行高精度倾斜补偿,相隔 3.38 mm 的视场两端接缝台阶高度差分别达到 281 nm 和 -332 nm,对于整条接缝而言,产生的高度差将会超过双波长干涉仪可检测的台阶高度。实际检测过程中还是需要使用高精度的旋转台按照 2.2 节的检测流程,对子镜间的平移和倾斜误差进行协同补偿,以保证精共相阶段的检测前提。

3.4 精共相阶段双波长干涉平移误差检测与补偿

在精共相阶段利用菲佐型双波长移相干涉仪通过拼接镜面形的检测以及平移误差解算算

法解算出子镜间微米量级的相对平移误差,并利用共相装校系统对子镜间的平移误差进行最终补偿。

图 12 为平移误差补偿前后红绿双波长下的拼接镜干涉图,补偿后的子镜 B 干涉图由于位移方向与球面中心法线方向存在偏差,所以会引入倾斜调整误差。

运行移相干涉处理程序,补偿前后的拼接镜初始波面三维图如图 13 所示。对初始波面进行 Zernike 拟合重构,拼接镜拟合波面如图 14 所示。拼接镜拟合波面去除了子镜离焦和具体的面形信息,只保留了常数项和倾斜项,重构的组合三维结构更有利于直观地观察子镜间的位姿关系。

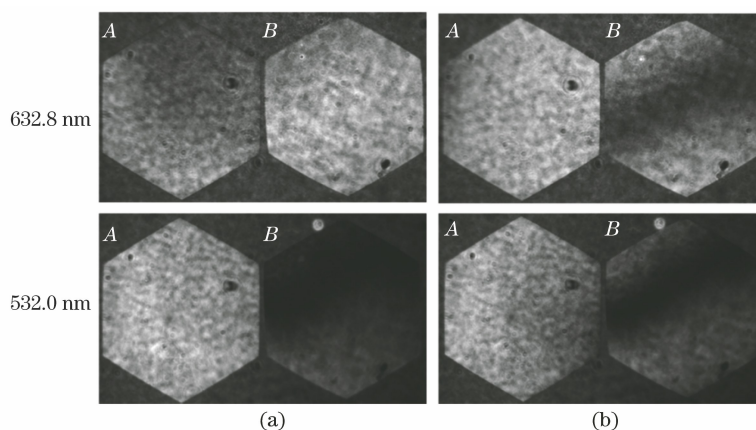


图 12 平移误差补偿前后红绿双波长下的拼接镜干涉图。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 12 Interferogram of segmented mirror in red and green dual wavelengths before and after piston error compensation.

(a) Before compensation; (b) after compensation

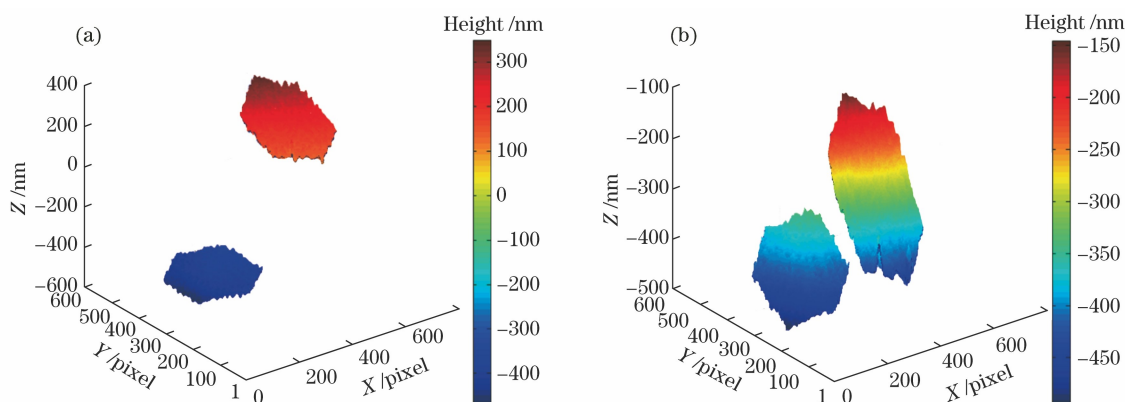


图 13 拼接镜初始波面三维图。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 13 Three-dimensional image of segmented mirror initial wavefront surface shape.

(a) Before compensation; (b) after compensation

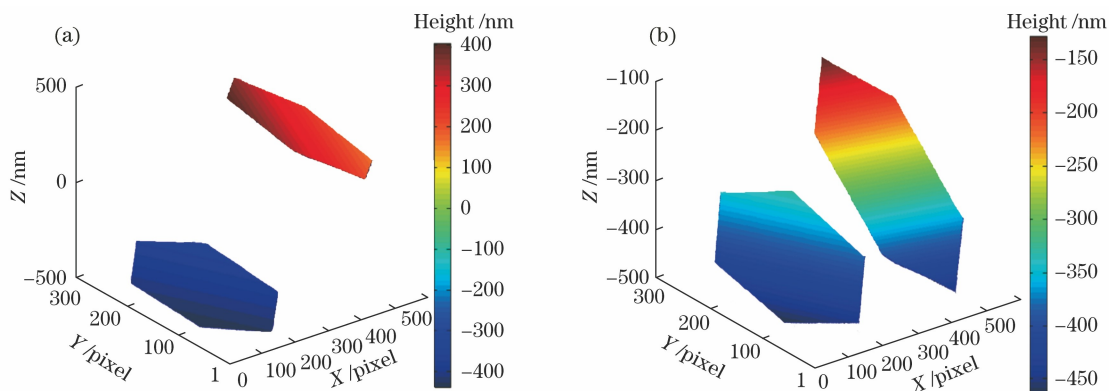


图 14 拼接镜拟合波面三维图。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 14 Three-dimensional image of segmented mirror fitting wavefront surface shape.

(a) Before compensation; (b) after compensation

补偿前后的拼接镜检测数据如表 3 所示。由于移相干涉检测过程中存在误差,子镜 A 补偿前后的倾斜量在 X 轴方向和 Y 轴方向都约有 $0.2''$ 的偏差;子镜 B 由于是平移误差的补偿对象,在 X 轴方向

和 Y 轴方向的倾斜量均有较大的改变,不再列出。从表 3 可以看到,最终的精共相阶段,基于菲佐型双波长移相干涉仪可将子镜 B 相对于子镜 A 的平移误差由 601.6 nm 补偿至 16.0 nm 。

表 3 补偿前后的拼接镜检测数据

Table 3 Detection data of segmented mirror before and after compensation

Detection date	Before compensation	After compensation
Diameter of circumscribed circle of sub-mirrors /mm	34	34
Tilt around the X axis of sub mirror A /(")	0.46	0.65
Tilt around the Y axis of sub mirror A /(")	-0.44	-0.64
X-axis distance of middle points of sub-mirrors /mm	32.3	32.3
Piston term of sub mirror A /nm	-392.4	-398.0
Piston term sub mirror B /nm	281.6	-279.5
Z-axis distance of middle points of the sub-mirror /nm	-674.0	-118.6
Piston error /nm	601.6	16.0

4 结 论

本文基于多波长干涉技术提出改进的拼接镜共相检测方案,搭建一套基于白光显微干涉仪以及菲佐型双波长移相干涉仪的拼接镜共相检测实验系统。检测过程由粗到精,分别通过单波长干涉测量子镜间离焦量之差以及白光显微干涉检测子镜间接缝台阶高度的方法,可将平移误差标定至百微米以及微米量级,最后利用双波长干涉面形检测以及平移误差解算算法对微米量级检测范围内的平移误差进行检测。通过设计制造的拼接镜共相装校系统,在最后的精共相阶段可将子镜间的平移误差由 601.6 nm 补偿至 16.0 nm。实验结果表明基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测方法可行,后续若开发出便携式的白光干涉测量头,该方法将具有更广阔的实际应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang L, Wang X K, Cheng Q, et al. Optical-co-phasing detection technology of segmented telescopes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 230102.
张龙, 王孝坤, 程强, 等. 拼接式望远镜光学共相探测技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 230102.
- [2] Li B, Tang J L, Yu W H, et al. Effect of segmented errors on image quality of segmented telescope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071202.
李斌, 唐金龙, 于文豪, 等. 拼接误差对拼接镜成像质量的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071202.
- [3] Li B, Wu J, Liu Y D, et al. Co-phasing experiment of active optics for segmented mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0212003.
李斌, 吴建, 刘燕德, 等. 拼接镜主动共相实验研究 [J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0212003.
- [4] Zhang Y F, Xian H. Effects of gap and decenter of mask on narrow-band algorithm with ideal templates for co-phasing a segmented mirror [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(8): 081101.
张永峰, 鲜浩. 间隙及掩模偏心对采用理想模板窄带算法共相拼接镜的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(8): 081101.
- [5] Chanan G A, Mast T S, Nelson J E, et al. Phasing the mirror segments of the W. M. Keck Telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2199: 622-637.
- [6] Luo Q, Huang L H, Gu N T, et al. A modified phase diversity wavefront sensor with a diffraction grating [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(9): 094201.
- [7] Esposito S, Riccardi A. Pyramid wavefront sensor behavior in partial correction adaptive optic systems [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, 369(2): L9-L12.
- [8] Zhu N H, Chen X Y, Zhou D, et al. Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(3): 433-437.
朱能鸿, 陈欣扬, 周丹, 等. 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(3): 433-437.
- [9] Shi F, Ohara C M, Chanan G, et al. Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment-phasing technique using the Keck Telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 1061-1073.
- [10] Zhang Y, Zhang L, Liu G R, et al. Experimental study of segmented mirrors-co-phase using dispersed fringe sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212004.
张勇, 张靓, 刘根荣, 等. 基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0212004.
- [11] Angel J R P. Ground-based imaging of extrasolar planets using adaptive optics [J]. *Nature*, 1994, 368(6468): 203-207.

- [12] Song H L, Jiang W H, Xian H, et al. Technology of co-phasing of the segmented mirrors based on a Michelson interferometric system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(5): 748-751.
宋贺伦, 姜文汉, 鲜浩, 等. 基于迈克耳孙干涉系统的拼接主镜共相位检测技术[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 748-751.
- [13] Song H L, Li H Q, Xian H, et al. Application of low-coherence-source interferometric system to phase error detection of segmented primary mirrors for large-aperture telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1523-1526.
宋贺伦, 李华强, 鲜浩, 等. 低相干光源干涉系统在大口径拼接子镜间相位误差检测上的应用[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1523-1526.
- [14] Cheng Y Y, Wyant J C. Two-wavelength phase shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1984, 23(24): 4539-4543.
- [15] Mahajan V N, Dai G M. Orthonormal polynomials for hexagonal pupils[J]. Optics Letters, 2006, 31(16): 2462-2464.
- [16] Gao Z S, Sun Y F, Yu H B, et al. Detection method of 3D micro-structure based on microscopic interference[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11): 1-5.
高志山, 孙一峰, 于颢彪, 等. 三维微结构显微干涉检测方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(11): 1-5.
- [17] Cheng J L. Research on the technology for the high precision testing of three-dimensional shape with steps by dual-wavelength phase-shift interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 14-17.
成金龙. 基于双波长移相干涉的阶跃型三维形貌高精度检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 14-17.