

文章编号 1004-924X(2026)17-2670-16

基于共架并列式双探头测量系统的平面度检测 及误差补偿模型

张胜博^{1,2}, 王之一^{1*}, 王建立^{1,2}, 刘昌华¹, 孙政奇^{1,2}, 杨云竹^{1,2}, 姚凯男^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对拼接探测器焦平面平面度检测问题, 研制了一种共架并列式的双探头测量系统。对于此系统存在的系统误差, 提出一种多姿态鲁棒分解误差补偿模型, 以实现此测量系统的高精度平面度检测能力。首先, 分析共架并列式双探头测量结构中的误差传递机理。随后, 利用系统误差固定于仪器坐标系, 标定镜面形固定于镜面坐标系的空间不变量差异, 建立多姿态鲁棒分解误差补偿模型, 将差分测量结果分解为系统误差场、标定镜面形和姿态漂移项, 并通过多姿态平移与翻转测量实现系统误差标定与补偿。实验结果表明, 以 Lumphoscan 高精度测量结果作为参考真值, 补偿后原始差分场中的整体斜坡和周期性条纹误差得到明显抑制。定量评价结果显示, 本文方法的残差 PV, RMSE 和 MAE 分别为 4.400, 0.560 和 0.446 μm , 均优于 LightGBM 等对比方法; 同时, X 向趋势降低率达到 97.82%, Y 向周期降低率达到 85.85%。所提出的误差补偿模型能够有效分离并补偿共架并列式双探头测量系统中的固定系统误差, 可为实现拼接探测器焦平面平面度高精度检测提供一种有效方法。

关键词: 光学检测; 拼接探测器; 差分测量; 平面度检测; 系统误差补偿

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

doi: 10.3724/OPE.20263417.2670

CSTR: 32169.14.OPE.20263417.2670

Flatness measurement and error compensation model based on co-frame parallel dual-probe measurement system

ZHANG Shengbo^{1,2}, WANG Zhiyi^{1*}, WANG Jianli^{1,2}, LIU Changhua¹, SUN Zhengqi^{1,2},

YANG Yunzhu^{1,2}, YAO Kainan^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wangzhiyi18@mails.ucas.edu.cn

Abstract: To address the challenge of flatness inspection for mosaic detector focal planes, a co-frame parallel dual-probe measurement system is proposed. To mitigate the systematic errors inherent in this system, a multi-attitude robust decomposition-based error compensation model is developed for high-precision flatness measurement. First, the error transfer mechanism of the co-frame parallel dual-probe mea-

收稿日期: 2026-06-26; 修订日期: 2026-07-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12133009, No. 12573084)

surement configuration is analyzed. Subsequently, exploiting the differing spatial invariance of system errors fixed in the instrument coordinate system and the surface profile of the calibration mirror fixed in the mirror coordinate system, a multi-attitude robust decomposition error compensation model is established. Differential measurement results are decomposed into a system error field, calibration-mirror surface profile, and attitude-drift term. System-error calibration and compensation are then achieved through multi-attitude translation and flipping measurements. Physical experiments demonstrate that, with high-precision Lumphoscan measurements used as the reference ground truth, the overall slope and periodic stripe errors in the original differential field are substantially suppressed after compensation. Quantitative results show that the proposed method achieves residual PV, RMSE, and MAE values of 4.400 μm , 0.560 μm , and 0.446 μm , respectively, outperforming comparative methods, including LightGBM. Moreover, the X-direction trend error and Y-direction periodic error are reduced by 97.82% and 85.85%, respectively. The proposed model effectively separates and compensates for fixed systematic errors in the co-frame parallel dual-probe measurement system, thereby providing an effective approach for high-precision flatness inspection of mosaic detector focal planes.

Key words: optical testing; mosaic detector; differential measurement; flatness inspection; systematic error compensation

1 引 言

随着暗弱目标探测、空间分辨率和巡天效率需求的提高,天文望远镜正向大口径、大视场方向发展^[1-2]。在大望远镜系统中,单片探测器受像元规模和制造工艺限制,通常难以满足宽视场和高分辨率成像需求,需采用多片探测器拼接形成大规模焦平面阵列^[2-5]。拼接探测器的空间位置一致性和焦面几何精度直接影响像面配准、焦面装调和全视场成像质量,其离焦、高度差及热载荷引起的面形变化会导致像质不均匀和测量精度下降^[3-6]。因此,拼接探测器焦平面平面度检测是大口径大视场望远镜研制与装调中的关键环节。

相比一般平面件,拼接探测器焦平面平面度检测具有更强的工程约束。首先,大规模焦面由多片探测器及封装结构组成,几何装配误差、支承受力和温度变形会共同影响各探测器单元的空间位置一致性^[7-8]。其次,大口径大视场望远镜焦深较小,焦面局部高度差会引起离焦和视场内像质不均匀,故检测结果需具备微米级精度和较高空间采样一致性^[7]。此外,拼接探测器结构刚性有限,接触式或夹持式测量可能引入附加变形,运动扫描过程中的平台直线度误差、姿态误差和传感器安装误差会通过高度测量链路传递

至最终测量结果,并与真实面形信息发生耦合,降低平面度评价精度^[9]。因此,面向拼接探测器的平面度检测方法不仅需要满足非接触、低扰动和大范围测量要求,还应具备对系统误差的分离、标定与补偿能力。

针对拼接探测器焦平面平面度检测问题,国内外研究人员已提出多种测量方法。现有方法主要包括接触式测量、光学非接触扫描以及基于差分原理的误差抑制方法。郭宁馨等^[2]系统总结了大口径望远镜探测器平面度检测技术,指出接触式、光学成像式和扫描式方法在测量精度、空间分辨率以及工程适用性方面各具特点。Liu等^[9]采用高精度龙门扫描平台结合共轴多光谱位移传感器,实现了拼接焦面在不同温度条件下的面形测量,该方法具有较高的空间采样能力,但长时间、大范围扫描过程中仍不可避免受到平台运动误差和环境漂移影响。Zhang等^[8]针对低温拼接焦面阵列建立了高精度检测方法,并考虑真空隔窗、温度变化等因素,提高了复杂工况下的测量可靠性,但其检测流程依赖稳定的实验环境和复杂辅助条件。

在差分测量方面,Shao等^[10]提出双差分共焦表面轮廓测量方法,通过双通道信息融合提高轴向测量范围和分辨能力。李杰等^[11]利用双站位激光跟踪方式降低大尺寸测量中的角度误差影

响。Usamentiaga 等^[12]通过双激光三角测量结构实现工业场景下表面形貌获取。Zheng 等^[13]则基于差分天体测量和摄影天体测量求解 CCD 拼接芯片的相对几何位置,提高了拼接单元相对位置标定精度。上述基于差分原理或多传感器融合的方法通过增加参考通道或辅助测量信息,提高了系统误差抑制能力,但其误差补偿通常依赖额外测量基准或特定结构设计,对于拼接探测器这类低刚度、装调敏感器件,仍需进一步降低测量扰动并提高误差分离能力。

综合来看,现有方法已经能够满足部分大尺寸平面检测需求,但针对拼接探测器焦平面的特殊应用场景仍存在不足:接触式方法容易因夹持力和支承边界改变引入附加变形;单探头扫描方法虽然结构简单,但平台直线度误差、姿态误差以及传感器安装误差容易与真实面形耦合;部分差分测量方法虽然能够降低公共误差影响,但对于共架并列式双探头结构中特有的空间偏置误差和扫描方向周期误差缺少有效分离机制。因此,仍需要建立一种无需改变被测件自然支承状态,同时能够利用多源观测信息实现固定系统误差分离与补偿的方法。

针对上述问题,本文提出一种基于共架并列式双探头测量系统的拼接探测器焦平面平面度检测方法,并建立多姿态鲁棒分解误差补偿模型。该方法将标准镜与被测拼接探测器置于同侧自然支承状态下,由同一运动框架上的双探头同步采集两测量面的高度信息,通过差分测量抑制平台垂向漂移和环境慢变误差。针对共架并列式结构中两探头空间间距引起的非公共系统误差,本文利用系统误差固定于仪器坐标系、标定镜面形固定于标定镜坐标系的空间不变量差异,通过多姿态平移与翻转测量,建立系统误差场、标定镜面形和姿态漂移项的鲁棒分解模型,实现固定系统误差的标定与补偿。

2 基于双探头的同步测量系统

2.1 测量原理

双探头同步测量法基本思想是在同一运动框架下,使用两个测量传感器分别同步测量标准镜与被测面的面形信息,两者测量信息做差分运算抑制平台垂向漂移、环境缓慢变化及部分同步

运动误差,从而提取被测面面形误差^[14-16]。

建立仪器坐标系 $O\text{-}XYZ$,其中 X, Y 为扫描方向, Z 为高度测量方向, x 和 y 分别表示测点在统一名义测量网格中沿 X 轴和 Y 轴的位置坐标, (x, y) 表示该网格中的二维名义测点。设标准镜探头输出信号为 $z_s(x, y)$, 被测面探头输出信号为 $z_m(x, y)$, 标准镜真实面形为 $f_s(x, y)$, 被测面真实面形为 $f_m(x, y)$, 平台运动引入的系统误差为 $e(x, y)$, 两探头各自的随机误差分别为 $\epsilon_s(x, y)$ 和 $\epsilon_m(x, y)$, 则在理想情况下, 标准镜探头输出信号可表示为:

$$z_s(x, y) = f_s(x, y) + e(x, y) + \epsilon_s(x, y). \quad (1)$$

被测面测量探头输出信号可表示为:

$$z_m(x, y) = f_m(x, y) + e(x, y) + \epsilon_m(x, y). \quad (2)$$

双探头测量系统差分测量结果可表示为:

$$\Delta z(x, y) = f_m(x, y) - f_s(x, y) + \epsilon_m(x, y) - \epsilon_s(x, y). \quad (3)$$

由此可知, 双探头同步测量系统的差分测量结果可抑制公共系统误差。

2.2 测量结构对比分析

在以双探头同步测量为测量原理的拼接探测器平面度检测中, 常用测量结构有共架并列式和上下对称夹持式。

共架并列式结构中, 两个探头安装在同一运动框架上, 标准镜和被测面均放置于下方平台, 两个探头随二维平台同步运动并分别采集两测量面的高度信息。上下对称夹持式结构中, 标准镜与被测面相对布置, 两个探头位于两测量面之间并相向测量。两种结构对比如图 1 所示。

上下对称夹持式结构具有空间对应性好, 对平台姿态误差敏感度低等优点。然而, 该结构通常需要对被测件进行夹持或悬挂定位。对于刚性较低、装调敏感的拼接探测器, 夹持预紧力、接触边界以及支承位置变化均可能改变器件受力状态, 并与探测器自身结构变形耦合, 从而引入局部翘曲、边缘下陷等附加误差^[17]。同时, 标准镜与被测面处于相对测量空间, 其重力影响、支承边界和安装姿态难以保持等效, 标准镜面形、被测面真实形貌及被夹持镜变形容易相互混叠, 不利于误差项的独立分解与补偿^[18]。

相比之下, 共架并列式结构安装方式简单, 标准镜与被测面均处于自然支承状态, 不需要对

拼接探测器进行夹持,可降低装夹应力和重力变形对测量结果的影响。同时,两测量面位于同侧测量空间,便于坐标统一、区域配准和误差场标定。

综合考虑拼接探测器刚性低、装调敏感和受力易变形等特点,本文采用共架并列式双探头同步测量结构。该结构虽会引入由探头空间间距导致的非公共系统误差,但该类误差主要固定于仪器坐标系,因此具有较强的空间重复性,可通过误差补偿模型进行有效修正。

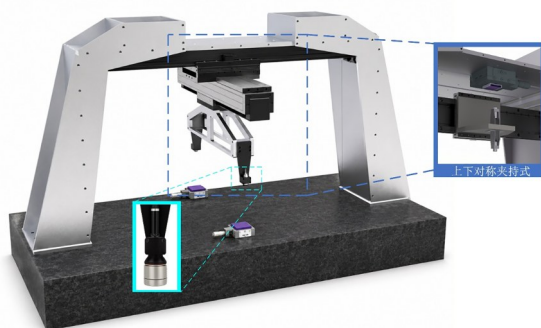


图1 共架并列式结构与上下对称夹持式结构对比

Fig. 1 Comparison of side-by-side co-mounted structure and vertically symmetric clamping structure

2.3 测量系统误差分析

理想情况下,双探头测量系统差分结果,如公式(3)所示,差分结果中只存在双探头各自输出信号及随机误差,平台垂向公共误差可以得到抑制。然而,在实际共架并列式结构中,两探头并列安装在同一运动框架上,二者之间存在固定空间间距,测量点并不重合。

设两探头在运动框架坐标系中的相对安装偏置为 $(\Delta x, \Delta y)$,平台绕Y轴的俯仰角误差为 $\theta_y(x, y)$,绕X轴的俯仰角误差为 $\theta_x(x, y)$ 。按照阿贝误差的一阶近似^[19],平台直线度误差及微小角运动时引起的非公共误差可表示为:

$$\epsilon(x, y) \approx \Delta x \cdot \theta_y(x, y) - \Delta y \cdot \theta_x(x, y). \quad (4)$$

实际扫描过程中, $\theta_x(x, y)$ 和 $\theta_y(x, y)$ 通常是随扫描位置变化的空间误差函数。在图1所代表的共架结构中,由于连接架设计中的同轴度等要求, Δx 量级常为微米级, $\Delta x \cdot \theta_y(x, y)$ 可不计。而两探头通过连接架沿Y轴布置, Δy 远大于 Δx ,结构对 $\theta_x(x, y)$ 引起的高度差尤为敏感,在差分测

量结果中体现为沿X方向的倾斜误差,其原理如图2所示。

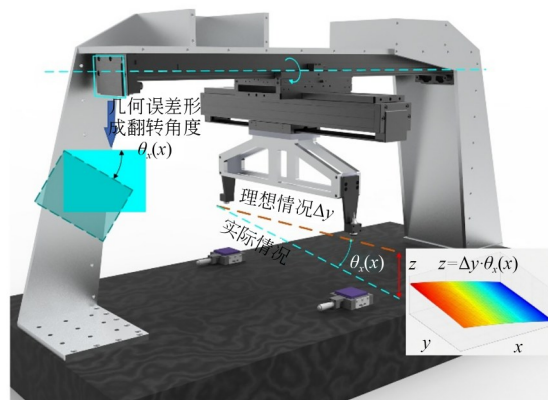


图2 低阶趋势项原理

Fig. 2 Principle for low-order trend term

此外,共架结构通常采用分行扫描方式。在扫描过程中,Y轴步进定位误差、回差效应以及运动停止后的残余振动会导致不同扫描行之间的空间参考状态发生变化。同时,结构弹性恢复、伺服系统跟随误差以及采样触发同步偏差也会进一步增加行间位置差异。上述因素共同导致Y方向出现行间偏置,并最终表现为水平条带状周期误差,其原理如图3所示。

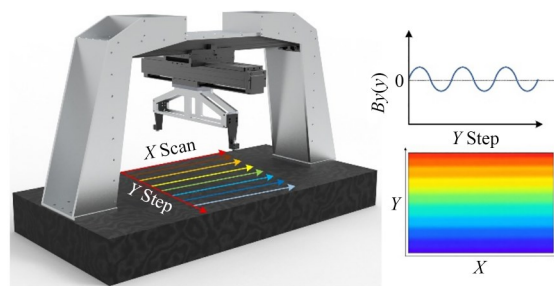


图3 Y周期条纹

Fig. 3 Y-periodic striations

3 基于多姿态鲁棒分解的双探头差分系统误差补偿算法

3.1 多姿态差分观测模型

为实现共架并列式双探头差分测量系统中系统误差的标定与补偿,本文建立多姿态鲁棒分解 (Multi-pose Calibration System-error Robust

Decomposition, MCSR) 模型。该模型利用系统误差固定于仪器坐标系, 标定镜面形固定于标定镜坐标系的空间不变量差异, 通过多姿态平移与翻转测量, 将系统误差、标定镜面形和姿态相关漂移项进行分离。

在第 k 个标定姿态下, 双探头系统分别获得探头 1 与探头 2 的测量值。为统一差分方向, 定义第 i 个测点处的差分观测值为:

$$D_{k,i} = Z_{2,k}(p_i) - Z_{1,k}(p_i), \quad (5)$$

其中: p_i 表示仪器坐标系中的第 i 个测点, k 表示标定姿态编号, 两项测量值分别对应第 k 个姿态下探头 1 和探头 2 在该测点处的输出。

由于标定镜在不同姿态下存在平移或翻转, 需要将仪器坐标系中的测点映射到标定镜坐标系。设第 k 个姿态对应的坐标变换为 T_k , 则有:

$$q_{k,i} = T_k(p_i), \quad (6)$$

其中: $q_{k,i}$ 表示仪器测点在第 k 个姿态下对应的标定镜坐标点。系统误差固定于仪器坐标系, 标定镜面形则随姿态变换在仪器坐标系中发生重排。

考虑系统固定误差、标定镜面形、姿态漂移项及随机噪声后, 多姿态差分测量的统一观测模型可写为:

$$D_{k,i} = E_s(p_i) + H_c(T_k(p_i)) + B_k(p_i) + n_{k,i}, \quad (7)$$

其中: $E_s(p_i)$ 为固定于仪器坐标系中的系统误差, $H_c(T_k(p_i))$ 为标定镜在对应镜面坐标处的面形值, $B_k(p_i)$ 为第 k 个姿态下的低阶漂移项, $n_{k,i}$ 为随机测量噪声。

姿态漂移项主要由零点漂移、装夹倾斜和低阶平面漂移构成, 采用一阶平面模型表示为:

$$B_k(p_i) = a_k + b_k \tilde{x}_i + c_k \tilde{y}_i, \quad (8)$$

其中: a_k 为第 k 个姿态的常数零漂项, b_k 和 c_k 分别为该姿态下沿 X, Y 方向的倾斜系数。

将 K 个姿态的有效观测离散并堆叠, 可得统一矩阵模型为:

$$d = A_E E + A_H H + A_B \beta + n = A \theta + n, \quad (9)$$

其中: d 为全部姿态的观测向量, E 和 H 分别为离散系统误差场与标定镜面形, β 由各姿态漂移参数 $\beta_k = [a_k, b_k, c_k]^T$ 组成; A^E, A^H 和 A^B 分别为仪器网格选择矩阵、姿态映射矩阵及漂移项设计矩阵的堆叠形式。由于三类分量之间存在高度零位和一阶平面自由度, 令 $Q = [1, q_x, q_y]$ 为标定镜网

格上的仿射基矩阵, 并施加规范约束:

$$1^T E = 0, Q^T H = 0, \sum_{k=1}^K \beta_k = 0, \quad (10)$$

其中: 第一项确定系统误差场的相对高度零位; 第二项将标定镜面形定义为去除最佳拟合平面后的面形残差; 第三项使姿态漂移参数仅表征各姿态之间的相对变化。上述约束共同消除了常数项与一阶平面项的不唯一性。

为提高平面拟合的数值稳定性, 坐标采用归一化形式:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x}, \tilde{y}_i = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y}. \quad (11)$$

3.2 鲁棒代价函数与分块迭代求解

在公式(7)和公式(10)的约束下, MCSR 通过下列约束鲁棒优化模型联合估计系统误差场、标定镜面形和姿态漂移参数:

$$\min_{EHB} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_k} \rho_{\delta}(r_{k,i}) + \frac{\lambda_E}{2} \|L_E E\|_2^2 + \frac{\lambda_H}{2} \|L_H H\|_2^2, \quad C\theta = 0, \quad (12)$$

其中: L_E 和 L_H 为空间差分算子, λ_E 和 λ_H 为平滑正则化权重, C 为式(10)对应的线性约束矩阵。第 k 个姿态、第 i 个测点的残差为:

$$r_{k,i} = D_{k,i} - E_s(p_i) - H_c(T_k(p_i)) - x_i^T \beta_k, \quad x_i = [1, \tilde{x}_i, \tilde{y}_i]^T. \quad (13)$$

为兼顾高斯噪声条件下的估计效率和异常点抑制能力, 鲁棒损失采用 Huber 函数:

$$\rho_{\delta}(r) = \begin{cases} \frac{1}{2} r^2, & |r| \leq \delta \\ \delta |r| - \frac{1}{2} \delta^2, & |r| > \delta \end{cases}. \quad (14)$$

残差尺度采用中位数绝对偏差估计, 并据此构造迭代重加权系数:

$$\sigma^{(t)} = 1.4826 \operatorname{median}(|r_{k,i}^{(t)} - \operatorname{median}(r_{k,i}^{(t)})|), \quad \delta^{(t)} = c \sigma^{(t)}, \quad w_{k,i}^{(t)} = \begin{cases} 1, & |r_{k,i}^{(t)}| \leq \delta^{(t)} \\ \frac{\delta^{(t)}}{|r_{k,i}^{(t)}|}, & |r_{k,i}^{(t)}| > \delta^{(t)}. \end{cases} \quad (15)$$

其中: c 为无量纲阈值, 本文取 $c = 1.345$ 。小残差保持单位权重, 大残差权重随幅值增大而减小, 因此单个异常观测不会主导分解结果。令 $W^{(t)}$ 为第 t 次迭代的对角权重矩阵。固定标定镜面形和姿态漂移项后, 系统误差场由下列正则化正规

方程更新:

$$\begin{aligned} & (A_E^T W^{(t)} A_E + \lambda_E L_E^T L_E) E^{(t+1)} = \\ & A_E^T W^{(t)} (d - A_H H^{(t)} - A_B \beta^{(t)}). \end{aligned} \quad (16)$$

固定系统误差场和标定镜面形后,第 k 个姿态的漂移参数由加权平面拟合得到:

$$\beta_k^{(t+1)} = (X_k^T W_k^{(t)} X_k)^{-1} X_k^T W_k^{(t)} y_k^{(t)}, \quad (17)$$

其中: $y_k^{(t)}$ 为扣除当前系统误差场和标定镜面形后的残差向量。随后固定系统误差场和姿态漂移项,标定镜面形:

$$\begin{aligned} & (A_H^T W^{(t)} A_H + l_H L_H^T L_H) H^{(t+1)} = \\ & A_H^T W^{(t)} (d - A_E E^{(t+1)} - A_B \beta^{(t+1)}), \end{aligned} \quad (18)$$

每轮更新后,对 E 执行去均值投影,对 H 执行去最佳拟合平面投影,并对全部 β_k 执行总体零均值投影,以持续满足式(10)。残差、MAD 尺度、Huber 权重及三个分量依次更新,直至满足:

$$\frac{\|\theta^{(t+1)} - \theta^{(t)}\|_2}{\|\theta^{(t)}\|_2 + \epsilon_0} < \epsilon, \quad (19)$$

其中: ϵ_0 为防止分母为零的微小正数, ϵ 为收敛阈值。观测模型对待估参数为线性关系, Huber 损失和二次正则项均为凸函数;当规范约束消除零空间且设计矩阵满足可辨识条件时,约束目标在相应子空间内严格凸。各加权子问题被准确求解时,IRLS 与分块更新使二次代理函数不增,并收敛至约束凸问题的唯一最优解。

3.3 模型解耦条件、抗噪性及适用边界

设 $n\theta$ 为待估参数总数, Z 为约束零空间 $\ker(C)$ 的一组基向量。忽略正则化所引入的先验约束,仅从观测数据可辨识性出发, MCSR 在约束空间内唯一分解的充要条件为:

$$\begin{aligned} \text{rank} \begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = n_q & \Leftrightarrow \text{rank}(AZ) = \dim \ker(C) \Leftrightarrow \\ & \sigma_{\min}(AZ) > 0. \end{aligned} \quad (20)$$

该条件要求多姿态映射形成的有效观测关系保持连通,并且不同姿态产生非等价的空间重排。最小奇异值 $\sigma_{\min}$ 越大,系统误差场与标定镜面的分离越稳定;当姿态完全相同或仅产生已被规范约束消除的仿射变化时, $\sigma_{\min}$ 趋近于零,模型无法稳定解耦。各姿态的漂移平面拟合还应满足:

$$\text{rank}(X_k^T W_k X_k) = 3. \quad (21)$$

即每个姿态至少包含 3 个不共线的有效测

点。为提高 MAD 尺度估计和跨姿态鲁棒平均的稳定性,工程实现中建议每个参与分解的仪器网格点和标定镜网格点具有不少于 3 次有效姿态观测;该要求属于稳定性判据,而不是公式(20)所示的一般数学充要条件。

设两探头单次测量噪声标准差分别为 σ_1 和 σ_2 , 相关系数为 ρ_{12} , 则差分噪声方差为:

$$\text{Var}(n_{k,i}) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho_{12}\sigma_1\sigma_2. \quad (22)$$

在线性化并认为其他分量已得到稳定估计的条件下,系统误差场在第 i 个网格点的加权估计方差近似为:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{E}_i) & \approx \text{Var}(n_{k,i}) \frac{\sum_k w_{k,i}^2}{(\sum_k w_{k,i})^2} = \frac{\text{Var}(n_{k,i})}{K_{\text{eff},i}}, \\ K_{\text{eff},i} & = \frac{(\sum_k w_{k,i})^2}{\sum_k w_{k,i}^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

当不同姿态噪声近似独立且权重相近时,随机噪声标准差随有效姿态数按 $1/\sqrt{K_{\text{eff}}}$ 降低。Huber 估计的影响函数有界,可进一步限制少量异常值对参数估计的作用。

MCSR 适用于可表示为二维单值高度场且在采样尺度内连续变化的面形。通道时延和坐标配准误差会通过局部面形梯度转化为附加高度误差。令 $G_{\max}$ 为最大局部梯度,两通道有效时间偏差为 Δt ,采样时平台速度为 v ,残余坐标错位为 δr_{reg} ,则一阶近似下应满足:

$$\begin{aligned} |e_{\text{add}}| & \leq G_{\max} (\|v\| \Delta t + \|\delta r_{\text{reg}}\|) \leq \epsilon_z, \\ G_{\max} & = \max_r \|\nabla H(r)\|_2. \end{aligned} \quad (24)$$

对于步进一驻停测量,数据锁存阶段平台速度近似为零,通道时差不再主要表现为空间错位,而表现为驻停期间的时间漂移。若驻停阶段最大高度漂移率为 L_t ,则应满足:

$$|e_{\text{time}}| \leq L_t |\Delta t| \leq \epsilon_z, L_t = \max \left| \frac{\partial z}{\partial t} \right|. \quad (25)$$

公式(24)和公式(25)给出了面形梯度、扫描速度、通道时差、配准误差及时间漂移之间的统一约束。其数值范围应由实验系统的采样方式、实际配准精度和允许附加高度误差确定。对于陡峭台阶、断裂边界、严重遮挡或大面积失锁区域,应先进分区与无效点掩膜,再执行误差分解。

3.4 实测数据的系统误差补偿

完成系统误差场标定后,实测阶段的双探头差分值为

$$D_m(r_l) = Z_{2,m}(r_l) - Z_{1,m}(r_l). \quad (26)$$

若实测坐标与标定网格不完全一致,则将系统误差场插值到实测位置:

$$\hat{E}_s(r_l) = J[\hat{E}_s(p_i)](r_l). \quad (27)$$

扣除系统误差场并统一相对零位后,MCSR输出的补偿面形为:

$$\hat{H}_{out}(r_l) = D_m(r_l) - \hat{E}_s(r_l) - \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} [D_m(r_j) - \hat{E}_s(r_j)]. \quad (28)$$

4 仿 真

4.1 仿真环境配置

为模拟实际测量条件,设置误差提取场及误差补偿场,分别用于测量系统误差提取及拼接探测器面形还原。其中,提取场为 120 mm × 90 mm 的测量区域,模拟标准镜及误差标定镜的

同步测量差分场。补偿场为提取场中的一块 81 mm × 61 mm 测量区域,用于模拟标准镜与拼接探测器的同步测量差分场。提取场与补偿场中采样点的点间距均为 1.5 mm。

考虑实际测量中运动平台直线度误差、轴系俯仰误差、传动链周期性误差及探头随机噪声等因素的影响,仿真系统误差由低阶斜坡趋势、周期性条纹配合 XY 弱耦合扰动、局部弱畸变和随机噪声共同组成。

测量时的差分观测值可表示为:

$$D_{meas}(x, y) = H_{true}(x, y) + E_{sys}(x, y) + n(x, y), \quad (29)$$

其中: $H_{true}(x, y)$ 为被测镜真实面形, $E_{sys}(x, y)$ 为系统误差场, $n(x, y)$ 为随机噪声。系统误差场进一步表示为:

$$E_{sys}(x, y) = E_{trend}(x, y) + E_{period}(x, y) + E_{couple}(x, y) + E_{local}(x, y), \quad (30)$$

其中: $E_{trend}(x, y)$ 表示沿 X 方向变化的低阶斜坡趋势, $E_{period}(x, y)$ 表示沿 Y 方向周期调制的条纹误差, $E_{couple}(x, y)$ 表示 X, Y 方向弱耦合扰动, $E_{local}(x, y)$ 表示局部弱畸变误差,观测值分解示意如图 4 所示。

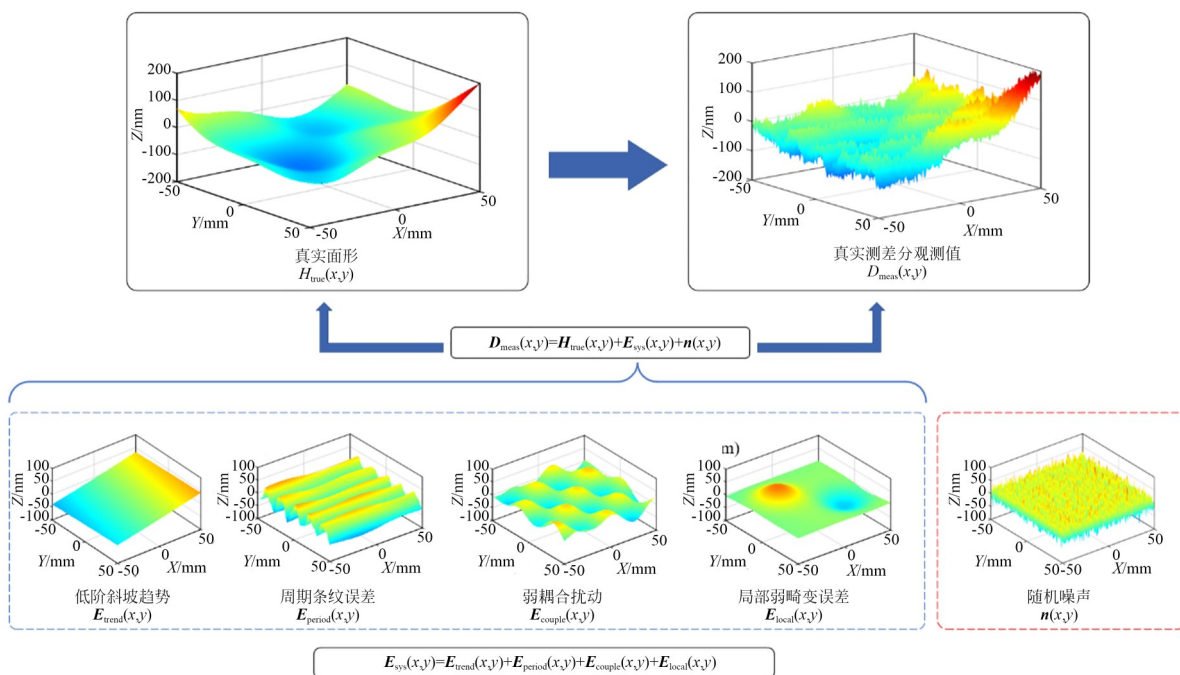


图 4 观测值分解示意图

Fig. 4 Decomposition of observed values

4.2 姿态参数效应分析

本节基于所构建的仿真误差提取场开展姿态参数效应性分析,考察姿态设置对MCSR误差提取结果的影响。

由于系统误差固定于仪器坐标系,而标定镜面形固定于镜面坐标系,因此当标定镜姿态变化时,系统误差场保持不变,标定镜面形在仪器坐标系中发生重排,据此设置标定镜在不同姿态下的误差标定镜数据。第 k 个标定姿态下的差分数据表示为:

$$D_{\text{cal},k}(x,y)=E_{\text{sys}}(x,y)+H_{\text{cal}}(T_k(x,y))+B_k(x,y)+n_k(x,y), \quad (31)$$

其中: H_{cal} 为标定镜面形, T_k 为第 k 个姿态对应的坐标变换, $B_k(x,y)$ 为该姿态下的零点漂移和低阶倾斜项, $n_k(x,y)$ 为随机噪声。

选取翻转角度数量和平移距离作为主要姿态变量进行分析。每组方案在一个中心姿态基础上对其进行角度翻转,并对每个翻转角度分别设置 $+X, -X, +Y, -Y$ 四个方向的平移姿态。即平移距离一定时,姿态总数受翻转角度数量 N_θ 决定,其关系为 $K=1+4N_\theta$ 。

姿态参数的设置受到基础场有效区域和物理测量成本的双重约束。仿真实验误差标定场为 $120\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 测量区域,仿真实测场为 $81\text{ mm}\times 61\text{ mm}$ 测量区域,每个翻转角度对应的四

方向平移距离相同,因此在仿真基础场中最大平移距离为标定场与实测场 Y 方向大小之差的二分之一,即 14.5 mm ,为避免实测场与标定场边界重合,选取最大移动距离为 12 mm 。在实际测量中,每个姿态对应一次独立测量,姿态数量的增加意味着测量时间、装夹误差和实验复杂度的同步增加。为避免测量次数过多,此处设置翻转角度数量最大为4个,即相同平移距离下的最大姿态数为17个。姿态参数对比方案参数设置如表1所示。

表1 姿态参数设置

Tab. 1 Parameter settings for poses

编号	翻转角度组合	姿态数 K	平移距离 d 取值
A1	0°	5	2, 4, ..., 10, 12
A2	$0^\circ, 180^\circ$	9	2, 4, ..., 10, 12
A3	$0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$	13	2, 4, ..., 10, 12
A4	$0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$	17	2, 4, ..., 10, 12

为评价不同姿态参数下的补偿效果,本文选取残差PV, RMSE, MAE、 X 向趋势降低率和 Y 向周期降低率五项指标进行比较。其中, X 向趋势降低率和 Y 向周期降低率分别刻画MCSR对趋势误差和周期误差的抑制能力。

不同姿态参数下的MCSR补偿结果如图5

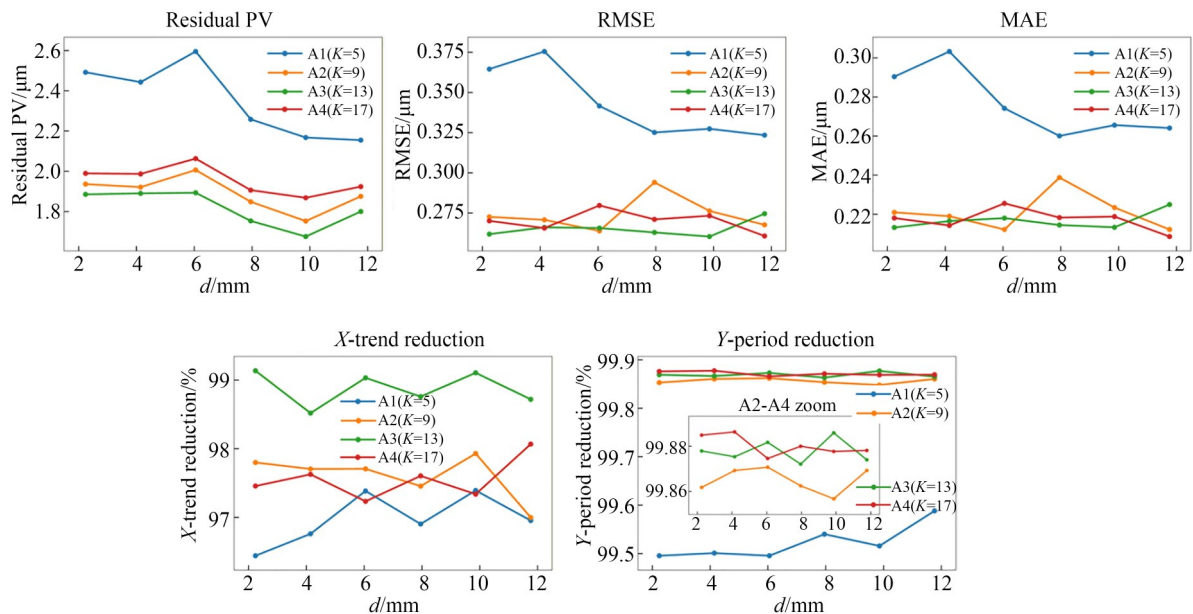


图5 不同姿态参数下MCSR的补偿结果

Fig. 5 Compensation results of MCSR under different posture parameters

所示。随着姿态角度方案由 A1 增加至 A4, Residual PV、RMSE 和 MAE 整体呈下降趋势, 其中 Residual PV 由约 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 以内, RMSE 和 MAE 分别降低至约 $0.27\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.22\text{ }\mu\text{m}$, 表明增加姿态数量能够提高误差分离能力。X-trend reduction 和 Y-period reduction 分别稳定在 97% 和 99.8% 以上, 说明 MCSR 对趋势误差和周期误差均具有较好的补偿效果。随着平移距离增加, 各方案残差指标均表现为先降低后波动的变化特征, 10 mm 附近获得较低误差水平; 继续增大距离后, 指标改善幅度减小, 变化趋于稳定。

综合角度数量和平移距离两方面结果, A3d10 表现最为均衡, 在残差 PV、RMSE、Y 向周期降低率三个指标上均有最佳表现, MAE 指标略差于 A3d2、X 向趋势降低率指标略低于 A3d2 及 A4d12 但差异较小。

4.3 对比实验分析

本节基于综合最优姿态参数方案 A3d10 进行误差补偿仿真对比实验, 为全面评估 MCSR 的误差补偿性能, 实验选取 FF-NN 神经网络误差补偿法、BP-NN 动态误差补偿法、XG Boost 误差场补偿法、Light GBM 误差场补偿法、二项式拟合消趋势法 (poly-2) 及多姿态平均法 (MPA)^[20-25]

作为对比方法。

为定量评价补偿效果, 选取残差 PV、RMSE、MAE、X 向趋势降低率及 Y 向周期降低率五项指标进行综合分析, 分别从残差幅值和方向性误差分离两个方面对不同误差补偿算法性能进行系统评价。实验设计中的关键参数如表 2 所示。

图 6 为不同误差补偿模型的误差补偿结果, 七张子图分别为不同算法的补偿结果, 每个子图包含补偿后的三维形貌及残差热力图。从三维形貌重构结果看, 各方法均能够较好恢复被测表面的整体倾斜趋势和宏观起伏特征, 说明各方法对低阶形貌分量均具有一定还原能力。但进一步比较可见, BP-NN、XG Boost、Light GBM、MPA 的重构曲面在局部区域仍存在轻微畸变, 边缘及坡度变化区域与参考形貌吻合度不足; FF-NN 及 POLY-2 的面形连续性较好, 而本文方法的重构结果与参考形貌最为一致, 表面过渡更加平滑。

残差热力图进一步表明, 传统方法残差区域呈现较明显的条带交替分布, 说明局部正负误差仍然集中存在; 相比之下, 本文方法残差颜色更接近中性, 残差幅值更小且空间分布更均匀, 表明其对系统误差、局部扰动及形貌畸变具有更强

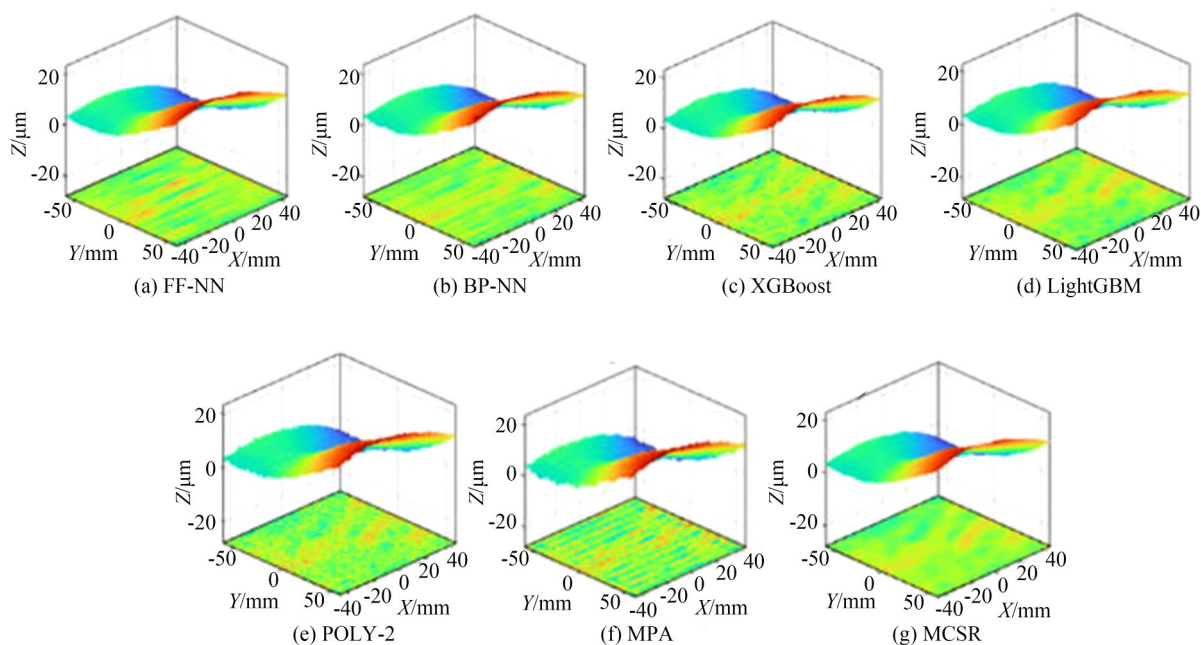


图 6 补偿结果三维形貌及残差热图

Fig. 6 Three-dimensional morphology of compensation result and residual heat map

表 2 实验关键参数

Tab. 2 Key experimental parameters		
方法	关键参数	参数值
Poly-2	X向局部拟合窗口	7
	Y向局部拟合窗口	17
MPA	姿态数量	13
	补偿增益 α	1.0
	激活函数	ReLU
FF-NN	正则化系数 α	8×10^{-4}
	最大迭代次数	800
	激活函数	tanh
BP-NN	正则化系数 α	1.2×10^{-3}
	最大迭代次数	850
	决策树数量	350
XG Boost	最大树深	5
	学习率	0.05
	采样比例	0.95
Light GBM	决策树数量	350
	叶节点数	63
	学习率	0.05
MCSR	Huber 参数 τ	1.345
	MAD 标准化系数	1.4826
	正则融合权重	0.15

抑制能力,形貌还原精度与稳定性更优。

图 7 为二维残差频谱分布对比,从图中可以看出,不同补偿方法对误差频率成分的抑制效果存在明显差异。FF-NN 和 BP-NN 补偿后仍存在明显的水平或垂直方向高能量带,说明其对特定方向周期误差的消除不充分;XG Boost 的频谱能量分布较为弥散,虽然削弱了部分主频成分,但残余噪声较强;LightGBM 和 POLY-2 方法虽降低了部分误差能量,但中心区域仍存在能量聚集,并伴随一定周期性纹理,说明补偿结果仍保留部分结构化误差;MPA 方法能够进一步削弱高频误差,但仍存在局部残余能量。相比之下,本文方法的频谱能量主要集中在低频中心区域,外围周期性亮带明显减弱,表明该方法能够有效抑制扫描过程引入的周期误差和方向性误差,使残差分布更加均匀,提高测量结果的准确性。

五项指标最终结果对比如表 3 所示,可见本文方法在残差 PV, RMSE, MAE 和 Y 向周期降低率四个指标上均为最优, X 向趋势降低率虽略低于其他算法,但差异较小。

通过仿真实验,对本文所提出的 MCSR 误差补偿模型进行了系统验证。实验表明,在仿真条件下, A3d10 组参数具有综合最优的实验效果。

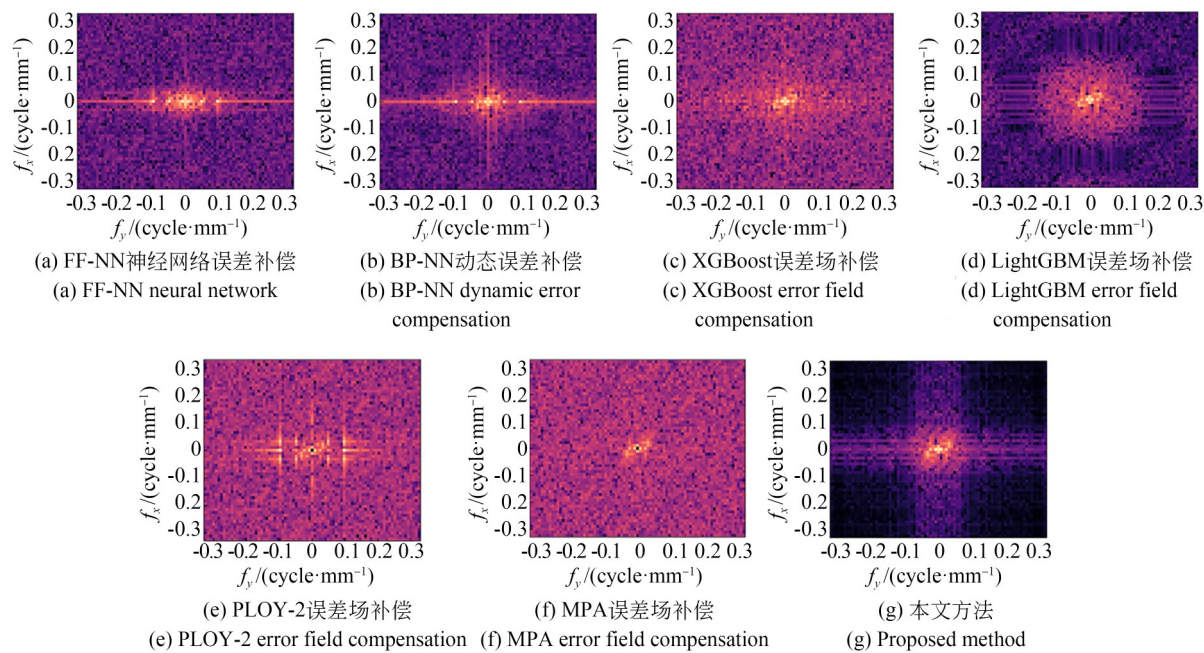


图 7 二维残差频谱

Fig. 7 Two-dimensional residual spectra

表 3 五项指标结果对比

Tab. 3 Comparison of results for five indicators

方 法	残差 PV/ μm	RMSE/ μm	MAE/ μm	X向趋势降低率/%	Y向周期降低率/%
MPA	3.296 0	0.452 2	0.361 7	99.274 4	99.881 3
POLY-2	4.332 4	0.535 4	0.426 3	99.676 5	99.898 4
FF-NN	2.115 1	0.313 1	0.250 1	99.647 2	99.882 5
BP-NN	3.472 6	0.284 2	0.225 2	99.943 4	99.891 8
XG Boost	3.271 2	0.335 7	0.267 1	99.228 4	99.883 7
Light GBM	1.784 8	0.279 0	0.229 3	99.266 7	99.837 7
MCSR	1.580 7	0.248 7	0.200 9	97.634 6	99.908 4

相比 FF-NN 神经网络模型、MPA 模型等算法,从补偿后三维形貌及误差热图、残差频谱图等结果看,本文方法能够更有效地补偿共架并列式双探头测量系统中的仪器误差,说明本文方法有更好的误差补偿能力。

5 实 验

5.1 实验条件

为验证所建立误差补偿模型在实际测量中的有效性,本文基于共架并列式结构搭建了双探头差分测量实验装置。该实验装置主要由二维运动平台以及测量探头组成,测量装置实物如图 8 所示。测量系统搭建于恒温恒压恒湿洁净室中,二维运动平台采用龙门式结构,通过直线运

动模组构建 X 向运动轴和 Y 向运动轴。直线模组选用米思米 (MISUMI) E-RSZ12-8S-X360-Y600-DE30-XC5YC5 高精度二维平台,可在 $600\text{ mm}\times 360\text{ mm}$ 的行程范围内实现 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 的重复定位精度和 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 的直线度,为实验提供微米级扫描定位能力。测量系统选用基恩士 CLP015 共焦位移传感器,其单点位移测量分辨率可达 $0.25\text{ }\mu\text{m}$,最高线性精度可达 $\pm 0.41\text{ }\mu\text{m}$,具备微米级 PV 值检测能力。

实验选用两块定制平面反射镜作为误差提取组被测对象,两平面反射镜外形相同,选用一块拼接探测器作为实测对象。两块平面镜的 PV 指标分别为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,相对于原始差分误差幅值较小,可作为系统误差提取的高精度参考面。其中, PV 值为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的平面镜作为标准镜, PV 值为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的平面镜作为标定镜,补偿实测差分场时,标准镜仍保持同一位置和同一支撑状态,因此该固定项能够随系统误差场一并扣除,不会单独传递为被测拼接探测器面形。

拼接探测器表面探测区域尺寸为 $70\text{ mm}\times 66\text{ mm}$,为获得表面形貌参考值,本文使用 Lumphoscan 260 对其进行高精度测量,此仪器形状测量精度可达 35 nm ;在重复性方面, PV 测量结果的变化量小于 $\pm 5\text{ nm}(3\sigma)$, Power 项的变化量小于 $\pm 20\text{ nm}(3\sigma)$;系统噪声不超过 $\pm 5\text{ nm}(3\sigma, \text{RMS})$ 。Lumphoscan 测量区域与双探头扫描区域保持一致,测量结果经公共区域裁剪、坐标方向统一、网格插值和刚性配准后,作为补偿结果的



图 8 实验装置及被测对象实物图

Fig. 8 Physical diagram of experimental setup and object being tested

参考面形,测量结果 PV 值为 $13.405\ \mu\text{m}$ 。平面反射镜及拼接探测器如图 8 所示。

5.2 实验数据采集

本次物理实验中,MCSR算法采用 A3d10 作为姿态参数,共测量 13 组姿态数据及 1 组探测器实测数据。图 9 为所测实验输入数据可视化,其

中 13 组姿态三维形貌如图中 pose1-pose13 所示,pose14 为测得的探测器原始差分场,pose15 为 Lumphoscan 所测得参考形貌。由于固定系统误差场在原始差分场中占主导,各姿态宏观形貌相似,姿态 2-姿态 13 相比姿态 1 的差异由热力图表示。

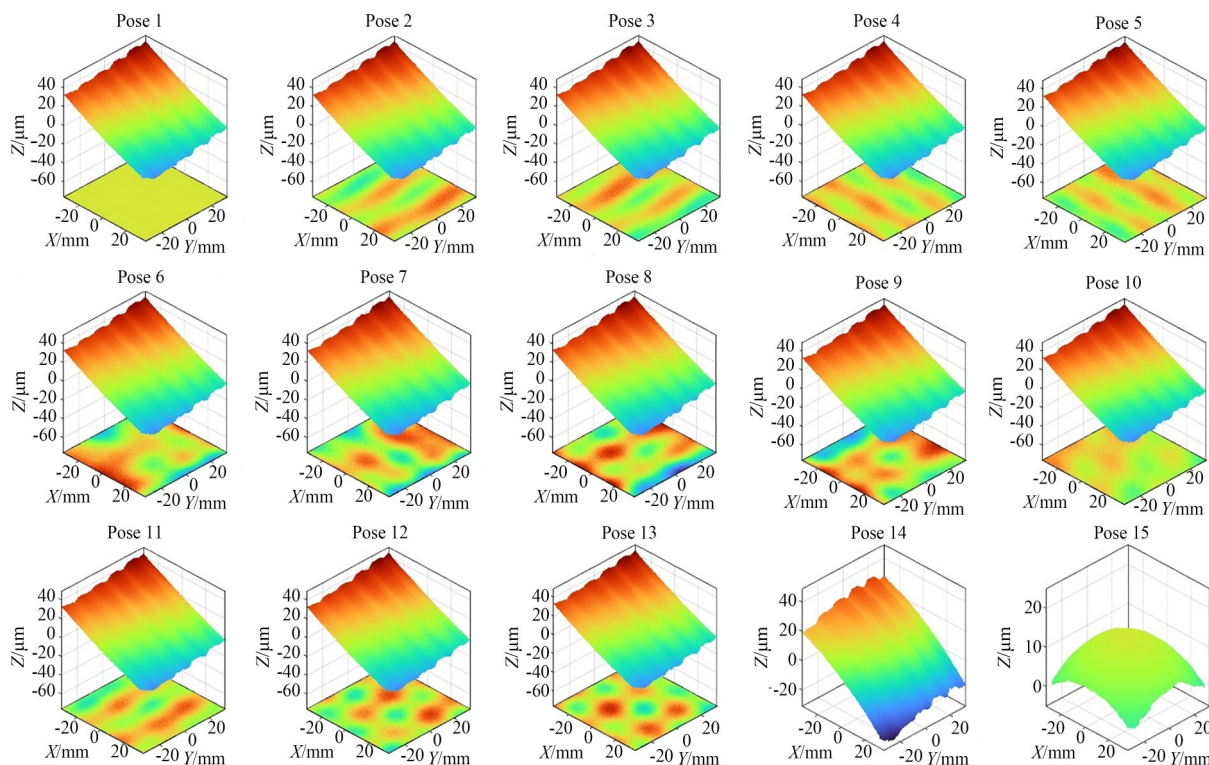


图 9 实验数据的可视化

Fig. 9 Visualization of experimental data

5.3 实测探测器误差补偿结果

图 10 为拼接探测器实测数据经补偿后的三维形貌及嵌套残差热图。由图可见,各对比算法补偿后的形貌表面仍存在不同程度的方向性条纹和局部起伏,尤其在曲面中部及边缘过渡区域,残余条纹对面形连续性产生了较明显影响。相比之下,本文方法补偿结果与参考真值在整体曲率变化、中心区域隆起特征以及边缘下降趋势方面保持较高一致性,表面形貌过渡更加连续平滑,残差热图中的局部异常区域明显减少,说明本文方法能够在有效抑制系统误差的同时,更好地保留被测面真实的形貌特征,提高实测面形的重构精度。

从残差热图来看,对比方法补偿结果中仍可

观察到明显的条纹状或带状残差,说明其补偿后仍残留扫描方向相关误差。相比之下,本文方法的残差热图整体分布更加均匀,高残差区域范围较小,条纹特征明显减弱,说明本文方法能够更有效地削弱系统性残差并提高补偿结果与参考真值的一致性。

图 11 为不同算法结果的指标对比。从残差 PV, RMSE 及 MAE 三个指标来看, MCSR 均优于其他方法,表明本文方法在整体误差水平、平均偏差以及极值误差控制方面均具有更好的性能,补偿结果与参考真值的一致性更高。同时, MCSR 在 X 向趋势和 Y 向周期误差降低率指标亦为最优,说明 MCSR 可有效补偿共架并列式结构特有系统误差。

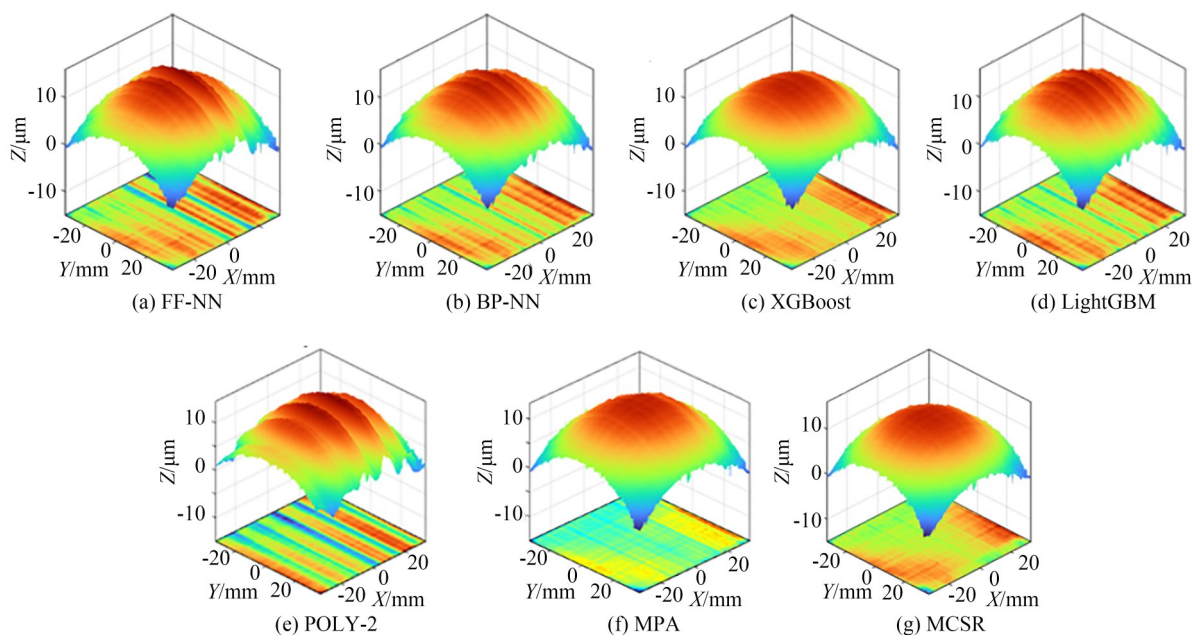


图 10 不同算法实测数据补偿结果

Fig. 10 Compensated results of measured data from different algorithms

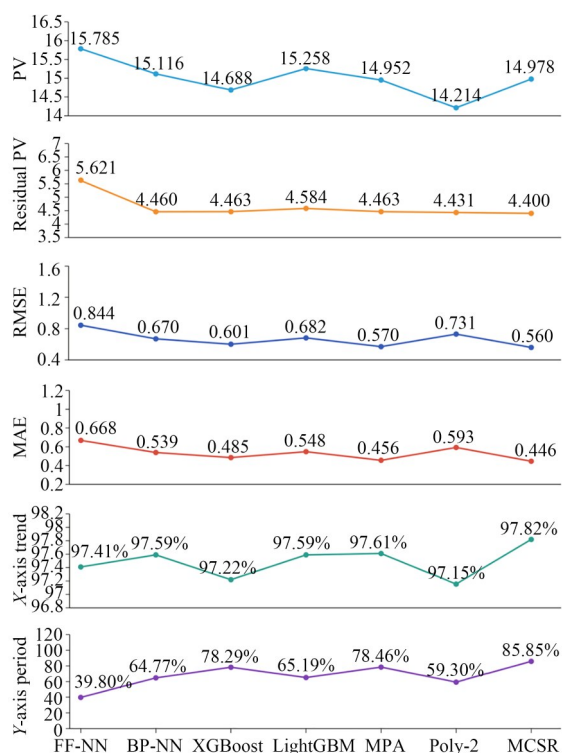


图 11 不同算法结果指标对比

Fig. 11 Comparison of result indicators of different algorithms

综合来看,本文方法在误差幅值控制、残差稳定性及方向性误差补偿方面均具有更优表现,

说明所提出的误差补偿模型能更好地补偿共架并列式双探头同步测量系统的仪器系统误差,适应拼接探测器平面度高精度检测要求。

6 结 论

本文针对大口径望远镜拼接探测器平面度高精度测量问题,设计了一种基于共架并列式结构的双探头测量系统。针对该系统存在的固定系统误差,进一步建立了多姿态鲁棒分解(MCSR)误差补偿模型。该模型利用系统误差与标定镜面形分别固定于仪器坐标系和标定镜坐标系中的空间不变量差异,实现了固定系统误差与标定面形的有效解耦。仿真分析了姿态参数设置对MCSR误差分离效果的影响。结果表明,随着翻转角度数量和空间平移距离的增加,标定镜面形与系统误差之间的空间重排更加充分,模型解耦能力得到提高,但解耦能力随参数增加趋于平衡。在仿真数据下,A3d10方案采用 0° , 90° , 180° 三角度组合和平移距离10 mm,对应13个标定姿态,在补偿精度、误差分离能力和测量成本之间取得较优折中。与FF-NN,BP-NN,XG Boost和Light GBM等对比方法相比,本文方法在三维形貌恢复、残差热图及残差频谱等方面均表现出

更好的系统误差抑制能力,能够有效削弱方向性误差和周期性误差对测量结果的影响。最后,以Luphscan高精度测量结果作为参考真值,对拼接探测器实测面形进行补偿分析。结果表明,本文方法所得三维形貌与参考真值在中心隆起、边缘下降及整体曲率变化方面更加一致,残差热图分布更加均匀,条纹状残差明显减弱。定量结果显示,本文方法的残差PV, RMSE和MAE分别为4.400, 0.560和0.446 μm ,均优于对比方法;同时,X向趋势降低率为97.82%,Y向周期降低率为85.85%,表明该方法在误差幅值控制、残差稳定性和周期误差抑制方面具有较好性能。

本文提出的MCSR误差补偿模型能够有效

分离并补偿共架并列式双探头同步测量系统中的固定系统误差,提高拼接探测器平面度测量结果的稳定性与可信度,可为拼接探测器焦平面平面度检测及相关精密光学测量提供一种可行的误差补偿方法。

作者贡献声明:

张胜博:测量结构误差分析、误差补偿算法实现,论文构思和撰写;

王之一:测量结构提出及误差补偿思路,实验指导;

王建立、姚凯男:论文写作指导;

刘昌华:提供实验环境;

孙政奇、杨云竹:实验协助。

参考文献:

- [1] 冯晓鹏,王之一,王建立,等. 基于边缘增强弱监督K-means的大口径望远镜拼接探测器点云分割[J]. 光学精密工程, 2025, 33(21): 3331-3342.
FENG X P, WANG ZH Y, WANG J L, *et al.* Edge-enhanced weak-supervised K-means point cloud segmentation for large-aperture telescope tiled detectors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(21): 3331-3342. (in Chinese)
- [2] 郭宁馨,张景旭,刘昌华,等. 大口径大视场望远镜探测器平面度检测方法综述[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 387-395.
GUO N X, ZHANG J X, LIU CH H, *et al.* Overview of CCDs flatness test method for large aperture and wide-field telescope [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 387-395. (in Chinese)
- [3] 牛盛光,郭亮,陆振玉,等. 基于光机热集成分析的大规模拼接焦面误差分配[J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(5): 1000-1006.
NIU SH G, GUO L, LU ZH Y, *et al.* Large-scale splicing focal plane error distribution based on optical-structural-thermal integration analysis [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1000-1006. (in Chinese)
- [4] 张璐,付志凯,刘伟. 超长线列红外探测器组件的低温面形研究[J]. 红外, 2023, 44(9): 16-22.
ZHANG L, FU ZH K, LIU W. Study on low-temperature profile of ultra-long line array infrared detector assembly [J]. *Infrared*, 2023, 44(9): 16-22. (in Chinese)
- [5] 刘昌华. 主焦点式大口径大视场光学校正镜及拼接探测器关键技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
LIU CH H. *Key Technologies of Prime-focus Large-Aperture Wide-field Optical Correctors and Mosaic Detectors*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [6] WANG Z Y, WANG T Y, YANG Y Q, *et al.* Precise two-dimensional tilt measurement sensor with double-cylindrical mirror structure and modified mean-shift algorithm for a confocal microscopy system[J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6794.
- [7] ZHANG J, ZENG F, WANG J, *et al.* Study of CCD mosaicking technique based on error accumulation model for WFST[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 7505911.
- [8] ZHANG Y H, ZHANG H F, ZHANG J, *et al.* High-precision flatness measurement for cryogenic mosaic focal plane arrays[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 5021512.

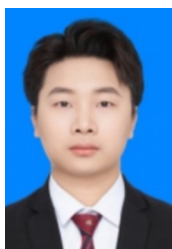
- [9] 周志鹏, 楼盈天, 王升帆, 等. 基于卡尔曼滤波的激光外差干涉位移测量误差补偿[J]. 光学精密工程, 2024, 32(3): 357-365.
- ZHOU ZH P, LOU Y T, WANG SH F, *et al.* Error compensation for laser heterodyne interferometric displacement measurement based on Kalman filter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(3): 357-365. (in Chinese)
- [10] SHAO R J, ZHAO W Q, QIU L R, *et al.* Dual differential confocal method for surface profile measurement with a large sensing measurement range[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 614.
- [11] LI J, YANG J, WU S B, *et al.* Flatness measurement of large flat with two-station laser trackers[J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2018, 12(1): 53-62.
- [12] USAMENTIAGA R, GARCIA D F, DELACALLE F J. Rail flatness measurement based on dual laser triangulation[C]. 2023 *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. October 29-November 2, 2023, Nashville, TN, USA. IEEE, 2024: 1-8.
- [13] ZHENG Z J, PENG Q Y, VIENNE A, *et al.* A deeper solution to the actual geometry of CCD mosaic chips[EB/OL]. 2021: *arXiv*: 2107.12691. <https://arxiv.org/abs/2107.12691>.
- [14] FAN K C, CHEN M J. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(1): 15-23.
- [15] GAO W, ARAI Y, SHIBUYA A, *et al.* Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 96-103.
- [16] LEE K I, LEE J C, YANG S H. The optimal design of a measurement system to measure the geometric errors of linear axes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(1): 141-149.
- [17] CHAN C Y, YOU Z T, HUANG B K, *et al.* Analysis investigation of supporting and restraint conditions on the surface deformation of a collimator primary mirror[C]. *Optomechanical Engineering* 2015. San Diego, California, USA. SPIE, 2015: 95730V.
- [18] CHENG J M, LIU Z, JIN L M, *et al.* Finite element calculation for surface shape optimization of a polished synchrotron radiation thin mirror based on Bessel-point supporting[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1042: 167458.
- [19] 林荣炜, 程真英, 何亚雄, 等. XY工作台六自由度误差在线测量和补偿[J]. 光学精密工程, 2023, 31(12): 1761-1773.
- LIN R W, CHENG ZH Y, HE Y X, *et al.* On-line six-degree-of-freedom errors measurement and compensation for XY stages[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(12): 1761-1773. (in Chinese)
- [20] GAO S, LI Z, BRAND U. Neural network approach for modelling and compensation of local surface-tilting-dependent topography measurement errors in coherence scanning interferometry[J]. *Metrology*, 2024, 4(3): 446-456.
- [21] 陆艺, 曲颖, 罗哉, 等. 坐标测量机动态误差补偿的分析与建模[J]. 中国机械工程, 2011, 22(2): 144-148.
- LU Y, QU Y, LUO Z, *et al.* Analysis and modeling of dynamic error compensation of CMM[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(2): 144-148. (in Chinese)
- [22] GAO X S, ZHANG K, ZHANG Z T, *et al.* XGBoost-based thermal error prediction and compensation of ball screws[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2024, 238(1/2): 151-163.
- [23] ZHOU X Y, BAI W Y, HE J L, *et al.* An enhanced positional error compensation method for rock drilling robots based on LightGBM and RBFN[J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2022, 16: 883816.
- [24] ZHENG J H, NIAN J, MA X, *et al.* Nonequal arm surface measurement of femtosecond optical frequency combs using the Savitzky - Golay filter-

ing algorithm[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(33): 9801-9806.

[25] HUANG L, WANG T Y, NICOLAS J, *et al.*

Multi-pitch self-calibration measurement using a nano-accuracy surface profiler for X-ray mirror metrology[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23060.

作者简介:



张胜博(2002—),男,河北邯郸人,硕士研究生,2025年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学曲面精密检测、仪器误差补偿等方面的研究。E-mail: zhangshengbo25@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



王之一(1996—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2018年于山东大学获得学士学位,2024年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径光学自由曲面精密检测、非接触式光学探针测量等方面的研究。E-mail: wangzhiyi18@mails.ucas.edu.cn