

激光与光电子学进展

X 射线柱面镜拼接检测大角度定位误差校正

覃蝶^{1,2*}, 吴永前^{1**}, 徐燕¹, 张帅^{1,2}, 邓婷^{1,2}¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决拼接干涉测量过程中的子孔径机械定位误差问题, 提出一种基于遗传算法的定位误差补偿方法。该算法利用子孔径重叠区域匹配度作为适应度函数, 再使用误差搜索算法计算并补偿子孔径测量过程中产生的定位误差。通过仿真及实验证明该算法对子孔径机械定位误差的补偿能力。拟合柱面镜的仿真结果显示, 该算法角度误差计算精度优于 0.01° , 平移误差计算精度优于 0.16 mm , 且补偿后的拼接面形与仿真面形基本一致。对曲率半径接近 100 m 的椭圆柱面镜的拼接测量实验结果表明, 所提出的机械误差补偿算法可以有效补偿拼接测量过程中引入的机械定位误差, 减少子孔径测量过程中对高精度机械位移平台的依赖。

关键词 X 射线光学; Kirkpatrick-Baez 镜; 光学测量; 面形检测; 拼接干涉仪

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1734002

Large Angle Positioning Error Correction for Sub-Aperture Stitching Interferometry of Cylindrical X-Ray Mirrors

Qin Die^{1,2*}, Wu Yongqian^{1**}, Xu Yan¹, Zhang Shuai^{1,2}, Deng Ting^{1,2}¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to solve the mechanical positioning error of sub-aperture in stitching interferometric measurement, we propose a mechanical error compensation method based on genetic algorithm. The algorithm uses the matching degree of sub-aperture overlapping area as the fitness function, and then uses the error search algorithm to calculate and compensate the positioning error generated in the process of sub-aperture measurement. Through simulation and experimental verification, it is proved that the algorithm can compensate the sub-aperture mechanical positioning error. The simulation results show that the angle error calculation accuracy of the algorithm is better than 0.01° , and the displacement error calculation accuracy is better than 0.16 mm . The stitching surface after compensation is basically consistent with the simulation surface. The experimental results of stitching measurement of an elliptical cylindrical mirror with the curvature radius of 100 m show that the mechanical error compensation algorithm proposed can effectively compensate the mechanical positioning error introduced in the process of stitching measurement, and reduce the dependence of sub-aperture measurement on the accuracy of mechanical displacement table.

Key words X-ray optics; Kirkpatrick-Baez mirror; optical measurement; surface metrology; stitching interferometer

1 引言

同步辐射是高能电子束的轨道被强偏转磁铁弯曲时产生的一种具有极高亮度和极窄方向性的电磁波, 是细胞生物学、材料科学、医学和化学等领域的一种不可替代的研究工具^[1-3]。随着同步辐射光源的广泛应用, 对于同步辐射光源光斑尺寸的要求日益严苛, 新

一代同步辐射装置要求同步辐射光斑达到纳米级尺寸^[4-6]。Kirkpatrick-Baez(K-B)镜是同步辐射 X 射线实现纳米尺寸聚焦的核心光学元件, 一般由两块正交椭圆凹柱面构成。K-B 镜能实现水平和垂直方向上的无像差理想成像, 而且具有无色散、高能量、高反射率的优势, 广泛应用于同步辐射光源纳米级微束聚焦装置。K-B 镜微束聚焦成像技术的发展主要受到镜面加工和

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-03; 录用日期: 2021-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0401304)

通信作者: *2695249921@qq.com; **wyq95111@sina.com

检测水平的制约。正在建设的第四代同步辐射光源建设对于光源光斑尺寸的要求达到 10 nm 以下,从而要求聚焦镜面形精度误差达到亚纳米量级^[7-8]。

精密计量是精密光学元件制造的基础。对于聚焦反射镜,一般要求测量精度达到所需精度的 3 倍以上,因此,K-B 镜高精度面形检测技术的创新与发展至关重要^[9]。目前国内外常用的 K-B 镜面形检测方法可以分为两类:非接触式轮廓测量方法和干涉测量方法^[10]。非接触式轮廓测量方法的代表性装置主要有美国布鲁克海文国家实验室(BNL)开发的长程轮廓仪(LTP)、纳米精度表面轮廓仪(NSP),以及德国柏林同步加速器(BESSY-II)开发的纳米光学元件测量机(NOM)等^[11-13]。这类方法已经在世界同步辐射测量领域获得了大量研究和广泛应用,目前针对平面和球面的轮廓测量已经达到 50 nrad 以下的表面残余斜率误差精度^[11]。另一类重要的测量方法是干涉测量技术,Fizeau 干涉仪只能测量与标准镜间角度不超过 0.1 mrad 的被测表面,若被测表面区域大于该角度会导致视场中干涉条纹过密,从而严重影响测量精度^[14]。为满足同步辐射 X 射线毫弧度量级的极小角度掠入射工作要求,需要反射镜切向曲率半径达到 100 m 至几千米范围,而横向曲率半径小至几厘米^[9]。对于这类反射镜,无法单次测量完整口径,需要使用拼接干涉技术来完成全口径拼接测量。相较于 LTP 和 NOM,拼接干涉测量能够以更小的空间分辨率获取更高频的二维面形信息,更适用于 X 射线反射镜精加工阶段高精度面形检测^[15-17]。

在子孔径干涉测量过程中机械位移台通常无法达到像素级的移动精度和稳定性要求,因此会在子孔径数据采集过程中引入移动被测镜产生的机械位置误差,影响子孔径的测量精度,导致被测镜拼接过程中子孔径间重叠区域产生错位,从而影响全口径拼接精度。

针对该问题,本文提出一种基于遗传算法的机械位置误差补偿方法,通过子孔径间重叠区域匹配度构造适应度函数获取对于错位和偏转 Δx 、 Δy 及 $\Delta \theta$ 的最优补偿量,对于子孔径测量过程中产生的机械位置误差进行补偿。通过模拟仿真和拼接实验对定位误差搜索算法的有效性进行了验证。实验结果表明,该方法可有效补偿移动被测镜产生的机械位置误差,提高拼接检测精度。

2 基本原理

2.1 拼接原理及定位误差

子孔径拼接基本思想是“以小拼大”,将标准口径干涉仪无法单次准确测量的全口径面形划分为若干个有重叠区域的局部子孔径,使用干涉仪获取局部子孔径面形。然后使用合适的拼接算法计算子孔径测量过程中产生的调整和运动误差,将各个子孔径测量数据统一到同一个坐标系中,进而进行拼接操作得到全口径面形数据。这种“以小拼大”的子孔径拼接测量方法可以有效解决 X 射线柱面镜干涉测量问题。

X 射线柱面镜相邻子孔径拼接原理如图 1(a)所示。在测量过程中,为了得到准确的子孔径面形,需要对子孔径进行位置调整来减少测量范围内干涉条纹数量,位置调整参数为 x 轴倾斜斜率 a 、 y 轴倾斜斜率 b 以及 z 轴平移量 c 。在获得子孔径数据后,计算位置调整参数将子孔径置换到同一坐标系中完成数据拼接。

除了调整参数,在子孔径测量前还需要沿标准镜平行方向移动被测镜,将被测子孔径置于视场中心。在移动过程中,由于机械位移台通常无法达到像素级的移动精度和稳定性要求,会引入如图 1(b)所示机械定位误差,被测镜出现 x 、 y 方向的错位 Δx 、 Δy ,以及 xy 平面上的偏转 $\Delta \theta$,旋转中心为被测柱面镜的中心坐标。

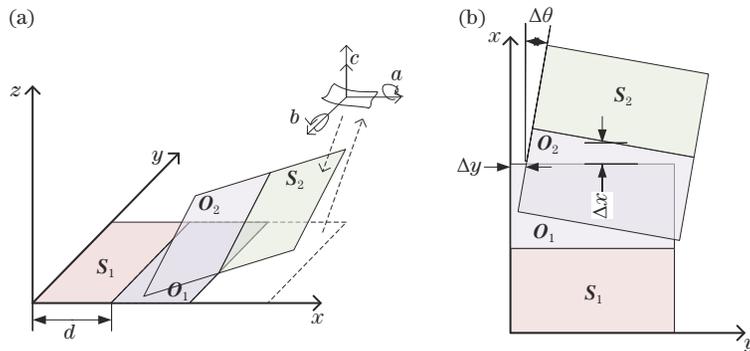


图 1 子孔径拼接原理图。(a)相邻子孔径拼接;(b)子孔径机械定位误差
Fig. 1 Schematic diagram of sub-aperture stitching. (a) Stitching of adjacent sub-apertures;
(b) sub-aperture mechanical positioning error

图 1(a)中, $S_1(x, y)$ 、 $S_2(x, y)$ 为相邻子孔径测量数据, O_1 、 O_2 为相邻子孔径重叠区域数据, (x, y) 为子孔径 S_1 的坐标系。根据相邻子孔径重叠区域面形一

致性, O_1 、 O_2 的相位关系可以表示为

$$O_2(x + d, y) = ax + by + c + O_1(x, y), \quad (1)$$

式中 d 为相邻子孔径测量移动距离, a 、 b 和 c 分别代表

O_2 相对于 O_1 在 x 和 y 方向的倾斜量以及垂直方向的平移量。

在式 (1) 的基础上引入子孔径机械定位误差 Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ ，得到包含定位误差的相位数据 $O_2^{(18)}$ ：

$$O_2(x+d, y) \rightarrow O_2[r \cdot \cos(\theta + \Delta\theta), r \cdot \sin(\theta + \Delta\theta)], \quad (2)$$

式中：

$$r = \sqrt{(x+d+\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2},$$

$$\cos \theta = (x+d+\Delta x)/r, \sin \theta = (y+\Delta y)/r. \quad (3)$$

定位误差的引入会直接影响相邻子孔径间重叠区域的点对配准精度。因此，在子孔径拼接过程中，需要先确定子孔径机械定位误差 Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ 的量，并对子孔径测量数据进行位置补偿，再由重叠区域面形一致性计算调整参数 $[a, b, c]$ ，进而调整子孔径参考坐标系实现数据拼接。

2.2 基于遗传算法的机械定位误差补偿算法

为解决运动平台定位误差导致的子孔径重叠区域数据错位问题，提出了一种基于遗传算法的机械定位误差补偿算法，根据遗传算法估计相邻子孔径间机械定位误差 Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ ，并对单个子孔径进行相对位置误差补偿。

遗传算法是模拟生物自然遗传和进化的一种自适应全局优化算法，具有高效、实用、鲁棒性强等优点。它的基本思想是使用初始种群作为问题的初始解，通过对种群进行选择、交叉和变异等一系列遗传操作逐步更新种群，直至种群包含近似最优解^[19-20]。本文算法流程如图 2 所示，随机产生由 Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ 构成的个体并由此组成初始种群，计算不同个体对应相邻孔径重叠区域残差作为个体适应度，模拟自然选择过程进行种群的进化，寻找最优适应度个体。遗传算法关键参数如表 1 所示。

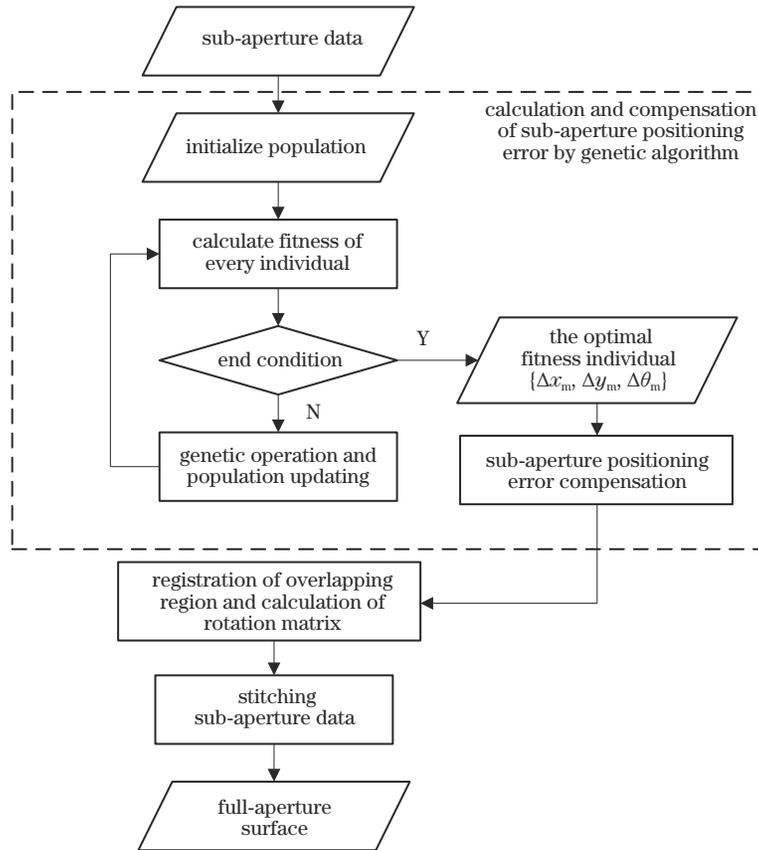


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

遗传算法搜索定位误差具体步骤如下。

1) 初始化。随机生成 N_p 个个体作为初始种群 P_0 ，其中单个个体由定位误差估计量 $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \theta_i\}$ 构成，设定终止进化代数 G 及进化代数计数器 $g = 0$ 。

2) 个体评价。计算群体 P_0 中各个个体适应度，个体适应度由位置补偿后相邻子孔径对应重叠区域残差均方根(RMS)值表示。

3) 遗传操作和更新种群。选择、交叉和变异运算。采用基于轮盘赌规则的选择操作、基于概率的交叉和变异操作，产生新种群，将历代最优个体保留在新种群中。

4) 终止条件判断。当 $g \leq G$ 时，转到步骤 2) 并且 $g+1$ ；当 $g > G$ 时，终止运算，输出最优适应度个体 $\{\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta \theta_m\}$ 。

表 1 遗传算法关键参数

Table 1 Key parameters of genetic algorithm

Parameter	Value
Population scale N_p	200
Crossover probability P_c	0.5
Mutation probability P_m	0.1
Iterations G	200
Range of $\Delta x, \Delta y$ / pixel	$[-10, 10]$
Range of $\Delta \theta$ / ($^\circ$)	$[-5, 5]$

5) 使用 $\{\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta \theta_m\}$ 补偿子孔径定位误差, 然后由补偿子孔径获取的配准点对计算测量过程中子孔径相对运动参数矩阵 $[a, b, c]$, 调整子孔径坐标系, 进而对补偿后的子孔径进行拼接得到全口径面形。

步骤 2) 中个体适应度的计算说明: 个体适应度由个体位置补偿后相邻子孔径对应重叠区域去倾斜后的面形残差 RMS 表示。随机生成个体 $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \theta_i\}$ 后, 使用式 (4) 对子孔径位置坐标 (x, y) 进行变换得到平移和旋转后的位置坐标 (x', y') , 然后使用线性插值计算点 (x', y') 对应的面形高度, (x', y') 上的相位数据即为个体补偿后的子孔径相位数据。相邻子孔径对应

重叠区域残差为个体 $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \theta_i\}$ 位姿变换后的子孔径重叠区域面形与相邻子孔径对应位置重叠区域面形去倾斜后的面形残差。个体 $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \theta_i\}$ 对应重叠区域面形残差越小, 个体适应度越高。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} \cos \Delta \theta & -\sin \Delta \theta \\ \sin \Delta \theta & \cos \Delta \theta \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 (x_0, y_0) 为子孔径旋转中心坐标。本文使用被测镜几何中心作为子孔径旋转中心坐标。

3 仿真与实验结果

3.1 仿真结果

为检验算法对定位误差的计算精度, 以图 3(a) 所示尺寸为 $78 \text{ mm} \times 119.3 \text{ mm}$ 、曲率半径接近 100 m 的仿真圆柱面作为实验对象, 仿真面形为实际被测圆柱面镜的理论加工面形。表 2 列出了柱面镜具体参数。本文将柱面面形划分为图 3(b) 所示 5 个 $78 \text{ mm} \times 39.8 \text{ mm}$ 的子孔径, 子孔径间重叠区域尺寸为 $78 \text{ mm} \times 19.9 \text{ mm}$ 。对单个子孔径进行旋转和平移操作, 在每个子孔径数据中添加随机噪声及量子孔径定位误差来模拟子孔径拼接过程, 观察并分析算法对定位误差的计算精度和补偿精度。

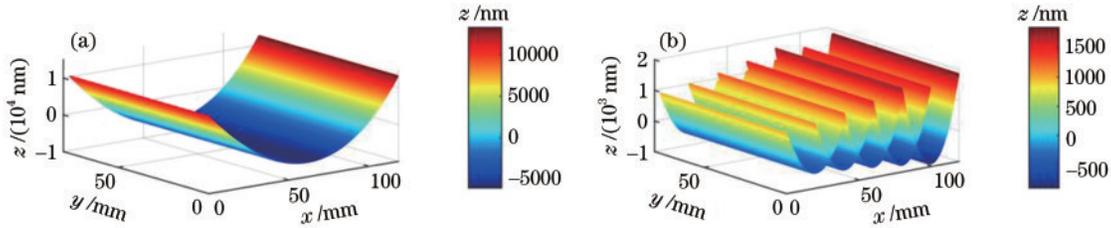


图 3 拟合柱面镜与仿真子孔径。(a) 柱面镜拟合面形; (b) 仿真子孔径

Fig. 3 Simulated cylindrical mirror and sub-apertures. (a) Fitting surface of cylindrical mirror; (b) simulated sub-apertures

表 2 拟合椭圆柱面镜具体参数

Table 2 Simulated cylindrical mirror parameters

Parameter	Value
Equation	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$
a	300100
b	43.782677
Center coordinate	$x_0=299900.003191, y_0=1.598171$

表 3 列出了单个子孔径添加的定位误差量以及定位误差补偿算法估计结果, 其中: θ_{add} 为子孔径实际添加旋转角度; x_{add} 和 y_{add} 为子孔径 x 方向和 y 方向实际添加平移量, 以 pixel 为单位, 1 pixel 为 0.159 mm ; θ_e 为算法估计角度; θ_e 为计算角度与实际添加角度残差; x_e 和 y_e 为算法估计平移量; x_e 和 y_e 为平移计算量与实际添加平移量残差。从表 3 可以看出, 在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 的大角度旋转范围内, 估计角度与实际添加角度残差 θ_e 的最大偏差绝

对值即峰-谷 (PV) 值小于 0.01° , RMS 小于 0.002° , 估计平移量与实际添加平移量残差 x_e 和 y_e 的 PV 均优于 1 pixel, RMS 小于 0.2 pixel, 说明本文提出的定位误差估计理论模型能够有效计算子孔径定位误差量, 实现优于 0.01° 的旋转角度估计以及亚像素级的偏移量估计。

为验证算法对于大角度旋转误差的补偿效果, 使用表 3 中定位误差估计量及误差补偿算法对子孔径进行误差补偿。单个子孔径的补偿效果如图 4 所示。图 4 中面形残差由引入定位误差后和定位误差补偿后的子孔径面形减去引入定位误差前的原始仿真子孔径面形获得。由图 4(a)~图 4(d) 可以看出, 加入旋转角度后子孔径面形相对原始子孔径引入了接近微米级的面形高度误差, 会严重影响子孔径面形测量精度。图 4(e)~图 4(h) 是角度误差补偿后的面形与原始子孔径面形残差, 可以看出, 补偿后子孔径与原始仿真子孔径的面形残差 PV 和 RMS 优化到亚纳米级, 补偿后子孔径面形与引入定位误差前子孔径面形基本一致, 说明使用本文误差补偿模型

表 3 定位误差添加量和算法估计结果

Table 3 Addition of positioning error and algorithm estimation results

Evaluation index	Addition of positioning error			Algorithm calculation results			Residuals		
	$\theta_{add} / (^\circ)$	x_{add} / pixel	y_{add} / pixel	$\theta_c / (^\circ)$	x_c / pixel	y_c / pixel	$\theta_c / (^\circ)$	x_c / pixel	y_c / pixel
	-5	0	0	-4.9969	0.0157	0.0136	-0.0031	-0.0157	-0.0136
	-4	1	1	-4.0009	1.2911	0.9062	0.0009	-0.2911	0.0938
	-3	2	2	-3.0036	2.0384	2.0097	0.0036	-0.0384	-0.0097
	-2	3	3	-2.0023	2.8883	3.1367	0.0023	0.1117	-0.1367
	-1	4	4	-1.0015	3.7140	3.9763	0.0015	0.2860	0.0237
	0	5	5	0.0008	5.1053	4.9998	-0.0008	-0.1053	0.0002
	1	6	6	0.9999	6.1349	5.9788	0.0001	-0.1349	0.0212
	2	7	7	2.0024	6.8761	6.9162	-0.0024	0.1239	0.0838
	3	8	8	3.0012	7.9279	7.9932	-0.0012	0.0721	0.0068
	4	9	9	3.9998	9.1483	8.9674	0.0002	-0.1483	0.0326
	5	10	10	5.0006	10.340	10.1482	-0.0006	-0.3400	-0.1482
PV							0.0067	0.6260	0.2420
RMS							0.0019	0.1830	0.0732

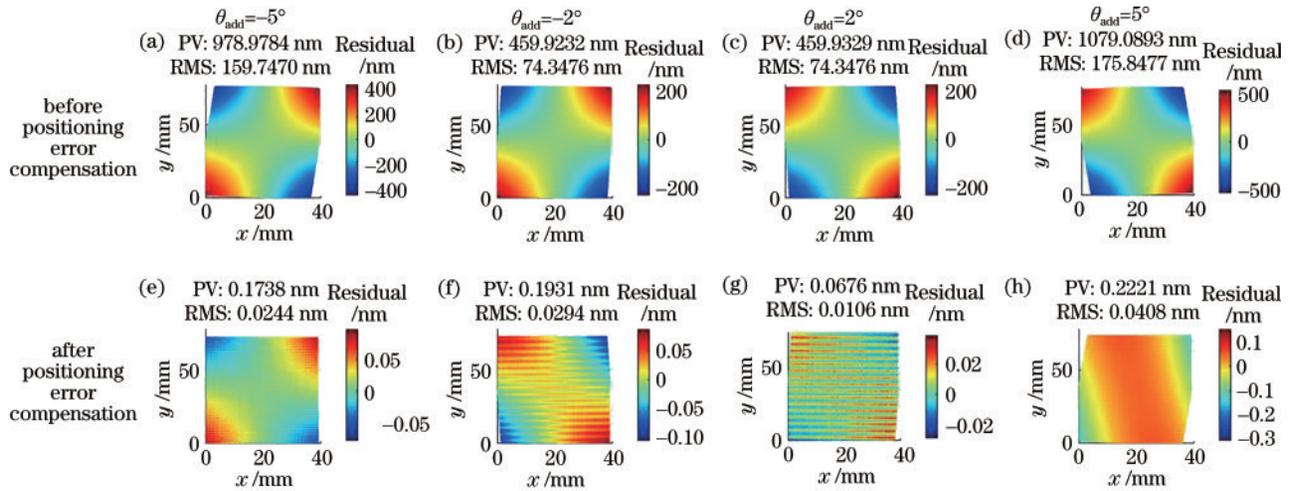


图 4 子孔径补偿效果图。(a)~(d)添加 -5° 、 -2° 、 2° 、 5° 角度误差后子孔径面形与原始拟合子孔径面形残差；(e)~(h)对添加的角度误差加以补偿后子孔径面形与原始拟合子孔径面形残差

Fig. 4 Sub-aperture compensation effect. (a)-(d) Residuals between sub-aperture surface and original fitting sub-aperture surface when adding -5° , -2° , 2° , 5° angle errors; (e)-(h) residuals between original fitting sub-aperture surface and sub-aperture surface after angle error compensation

可以大幅减小由大角度旋转误差引起的子孔径定位误差。

为进一步验证算法补偿后的拼接数据与仿真面形数据的一致性,在各个子孔径中分别添加表 4 所示定量子孔径定位误差,使用图 2 所示算法流程对子孔径数据进行位置补偿及拼接,并与位置补偿前的拼接结果进行对比,观察位置补偿前后的拼接面形与图 3(a)仿真全口径面形的高度差异,评估结果如图 5 所示。

图 5(a)为原始仿真全口径面形,图 5(b)为引入定位误差后子孔径拼接面形,图 5(c)为对子孔径定位误差补偿后的拼接面形,图 5(d)和图 5(e)分别为定位误差补偿前后拼接面形与原仿真面形的残差。图 5(d)中,含定位误差拼接结果与原面形残差 PV 大于 $2 \mu\text{m}$,

表 4 子孔径位置误差添加量

Table 4 Position error addition of sub-apertures

Sub-aperture	$\theta_{add} / (^\circ)$	x_{add} / pixel	y_{add} / pixel
Sub-aperture 1	0	0	0
Sub-aperture 2	3	2	2
Sub-aperture 3	2	3	2
Sub-aperture 4	5	3	3
Sub-aperture 5	2	1	3

RMS 大于 300 nm,由此看出,子孔径定位误差的引入严重影响到全口径面形拼接精度。图 5(e)中,误差补偿后的拼接面形与原面形残差 PV 和 RMS 分别降至 0.7435 nm 和 0.1136 nm,相对补偿前,将面形残差从微米级降低到亚纳米级,说明本文算法可以有效补偿

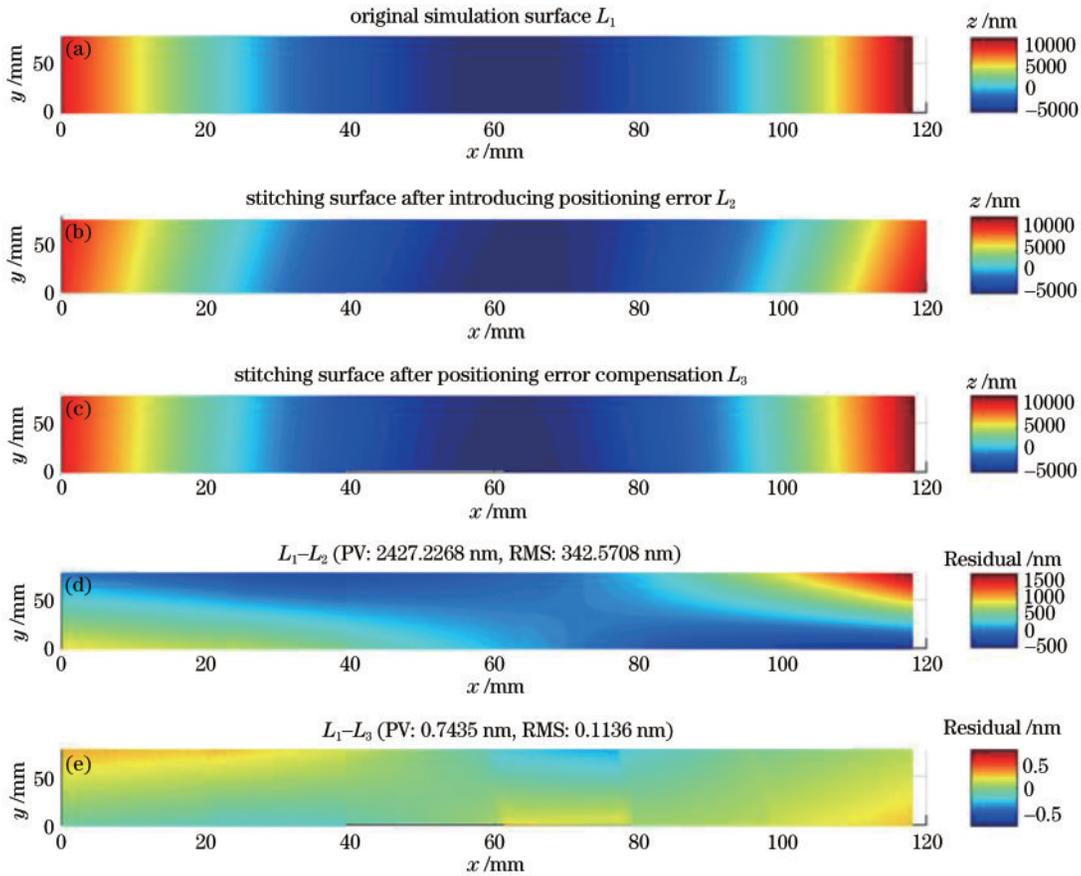


图 5 仿真拼接补偿效果。(a)原始仿真面形;(b)引入定位误差后拼接面形;(c)定位误差补偿后拼接面形;(d)引入定位误差后拼接面形与原始仿真面形的残差;(e)定位误差补偿后拼接面形与原始仿真面形的残差

Fig. 5 Simulation of stitching compensation. (a) Original simulation surface; (b) stitching surface after introducing positioning error; (c) stitching surface after positioning error compensation; (d) residuals between original simulation surface and stitching surface after introducing positioning error; (e) residuals between original simulation surface and stitching surface after positioning error compensation

子孔径相位数据测量过程中产生的平移和大角度旋转定位误差,降低机械定位误差对于拼接结果的影响。

3.2 实验结果

为验证算法在实际拼接测量过程中的有效性,使用 6 inch (1 inch=25.4 mm) 高精度干涉仪对尺寸为 78 mm×119.3 mm 的椭圆柱面镜进行拼接测量实验。测量装置和被测镜如图 6 所示。实验采用如图 6(a) 所示立式 6 inch 高精度干涉仪,测量装置主要由干涉测量镜头和六维精密位移台构成,能够实现子孔径测量过程

中多个维度的平移及倾斜。被测椭圆柱面镜尺寸为 78 mm×119.3 mm,最接近球面的曲率半径为 100 m。

具体实验步骤如下。

1) 将被测椭圆柱面镜划分为 5 个 78 mm×39.8 mm 的子孔径,相邻子孔径间重叠区域尺寸为 78 mm×19.9 mm。

2) 依次采集各个子孔径数据 $S_i (i=1, 2, \dots, 5)$, 在原子孔径 S_i 引入子孔径机械定位误差,采集含定位误差的面形数据 $S'_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 。

3) 使用图 2 所示算法流程对 S'_i 进行误差补偿和数据拼接,同时对原子孔径测量数据 S_i 进行拼接,以 S_i 拼接面形 T_1 为基准,分别记引入定位误差后拼接面形为 T_2 、定位误差补偿后拼接面形为 T_3 。观察算法误差补偿对拼接面形精度的影响。

图 7 为算法对单个子孔径 S_2 的补偿效果图。

图 7(a) 为引入定位误差前原子孔径面形,图 7(b) 为引入定位误差后子孔径测量面形,图 7(c) 为对图 7(b) 子孔径数据进行误差补偿后的面形,图 7(d) 为引入定位误差前后子孔径面形残差,图 7(e) 为误差补偿后面形与引入定位误差前子孔径面形残差。从图 7(d) 可以看出,引入定

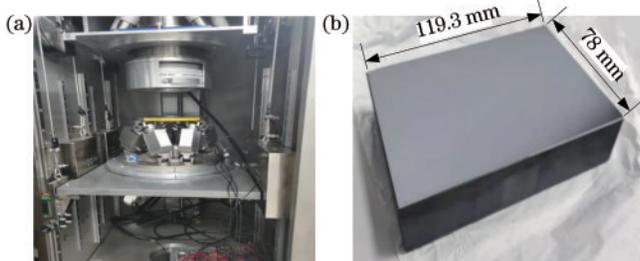


图 6 测量装置和被测镜。(a) 6 inch 干涉仪;(b) 椭圆柱面被测镜
Fig. 6 Measuring device and tested mirror. (a) 6 inch interferometer; (b) elliptic cylindrical mirror

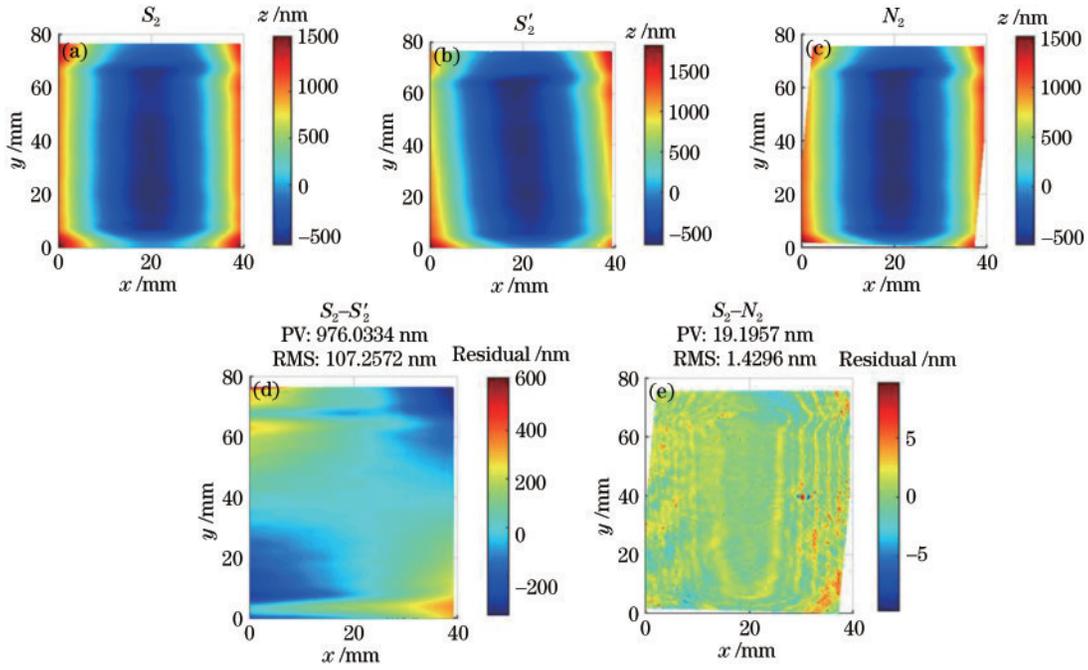


图 7 单个子孔径补偿效果图。(a)原始子孔径 S_2 ; (b)引入定位误差后子孔径 S'_2 ; (c)定位误差补偿后子孔径 N_2 ; (d) $S_2 - S'_2$; (e) $S_2 - N_2$
 Fig. 7 Effect of single sub-aperture compensation. (a) Original sub-aperture S_2 ; (b) sub-aperture after introducing positioning error S'_2 ; (c) sub-aperture after positioning error compensation N_2 ; (d) $S_2 - S'_2$; (e) $S_2 - N_2$

位误差会严重影响子孔径测量精度。图 7(e)与图 7(d)相比较,定位误差补偿后子孔径面形与原面形残差 RMS 由 107.2572 nm 降至 1.4296 nm,大幅降低了定位

误差对子孔径测量精度的影响,说明本文算法可以有效补偿单个子孔径测量过程中位姿变化产生的定位误差。

图 8 描述了算法对全孔径拼接面形的补偿效果。

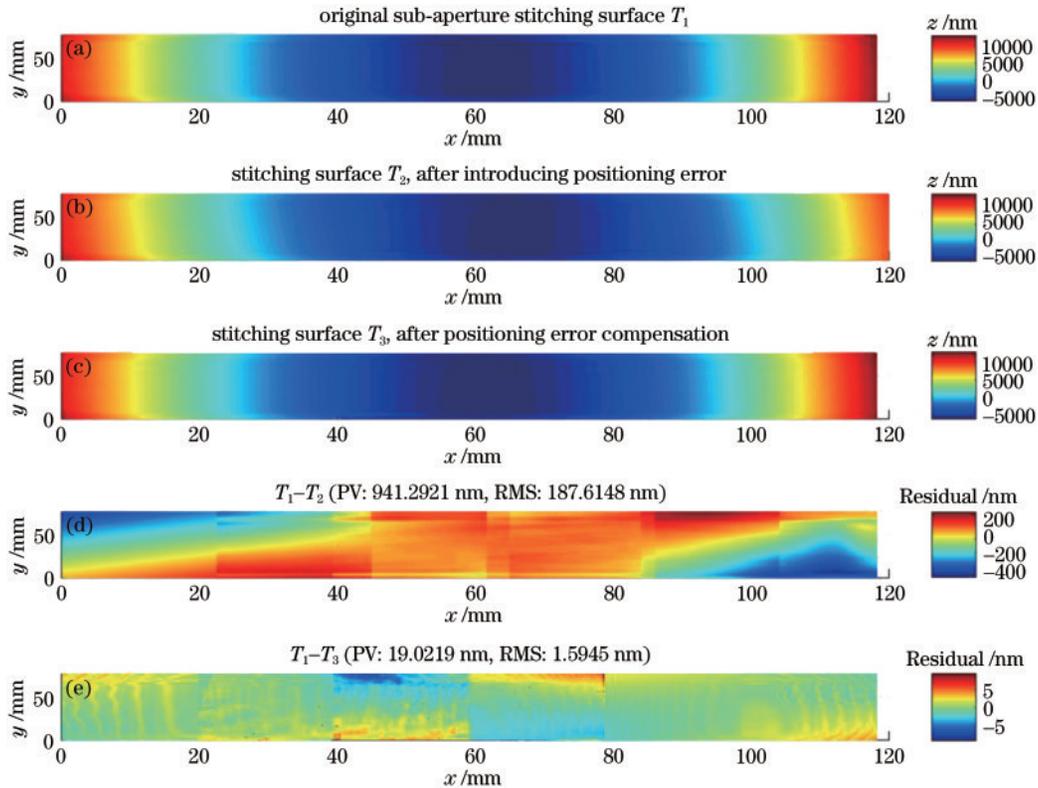


图 8 全孔径拼接补偿效果。(a)原始子孔径拼接面形 T_1 ; (b)引入定位误差后拼接面形 T_2 ; (c)定位误差补偿后拼接面形 T_3 ; (d) $T_1 - T_2$; (e) $T_1 - T_3$

Fig. 8 Effect of full-aperture stitching compensation. (a) Original sub-aperture stitching surface T_1 ; (b) stitching surface after introducing positioning error T_2 ; (c) stitching surface after positioning error compensation T_3 ; (d) $T_1 - T_2$; (e) $T_1 - T_3$

图 8(a)为引入定位误差前原子孔径拼接面形 T_1 ,图 8(b)为引入定位误差后子孔径拼接面形 T_2 ,图 8(c)为定位误差补偿后的子孔径拼接面形,图 8(d)为引入定位误差前后拼接面形残差,图 8(e)为定位误差补偿后拼接面形与原面形的残差。从图 8(d)可以看出,引入定位误差后,拼接面形会引入 RMS 大于 100 nm 的面形误差,严重影响拼接测量精度。图 8(e)与图 8(d)对比,定位误差补偿后拼接面形与原拼接面形残差 RMS 从原来的 187.6148 nm 降低至 1.5945 nm,大幅降低子孔径定位误差对拼接面形精度的影响,说明本文算法可以有效补偿实际拼接测量过程中由于子孔径定位误差引起的全孔径面形拼接误差。

为进一步探讨本文提出算法对实际测量子孔径的机械位置误差的计算和补偿效果,以中国科学院高能物理研究所长程轮廓仪实际测量的被测镜中线轮廓为基准,观察实际测量中定位误差补偿前后拼接结果与长程轮廓仪测量结果的差异。被测件、测量仪器以及子孔径规划与前述实验步骤一致,但未

主动引入定位误差,仅存在实际操作过程中可能引入的定位误差。使用本文算法对实际测量子孔径进行定位误差分析并补偿,将定位误差补偿前后的子孔径拼接结果与长程轮廓仪测量结果进行对比,观察补偿前后拼接面形轮廓与轮廓仪测量轮廓的高度残差变化。

图 9(a)为实际测量子孔径拼接面形,图 9(b)为对实际测量子孔径进行定位误差补偿后的拼接面形,图 9(c)为长程轮廓仪测量的被测镜中线高度轮廓,图 9(d)为实际测量拼接面形中线轮廓与长程轮廓仪测量轮廓残差,图 9(e)为对实际子孔径定位误差补偿后的拼接面形中线轮廓与长程轮廓仪测量轮廓残差。图 9(d)和图 9(e)中纵坐标 e_{LTP-ST} 为取柱面镜 8~114.5 mm 部分长程轮廓仪测量轮廓与拼接面形中线轮廓的残差。对比图 9(d)和图 9(e)可以看出,误差补偿后的拼接面形中线轮廓与长程轮廓仪测量的中线轮廓一致性更高,进一步说明本文算法可以有效补偿实际测量中产生的子孔径机械定位误差。

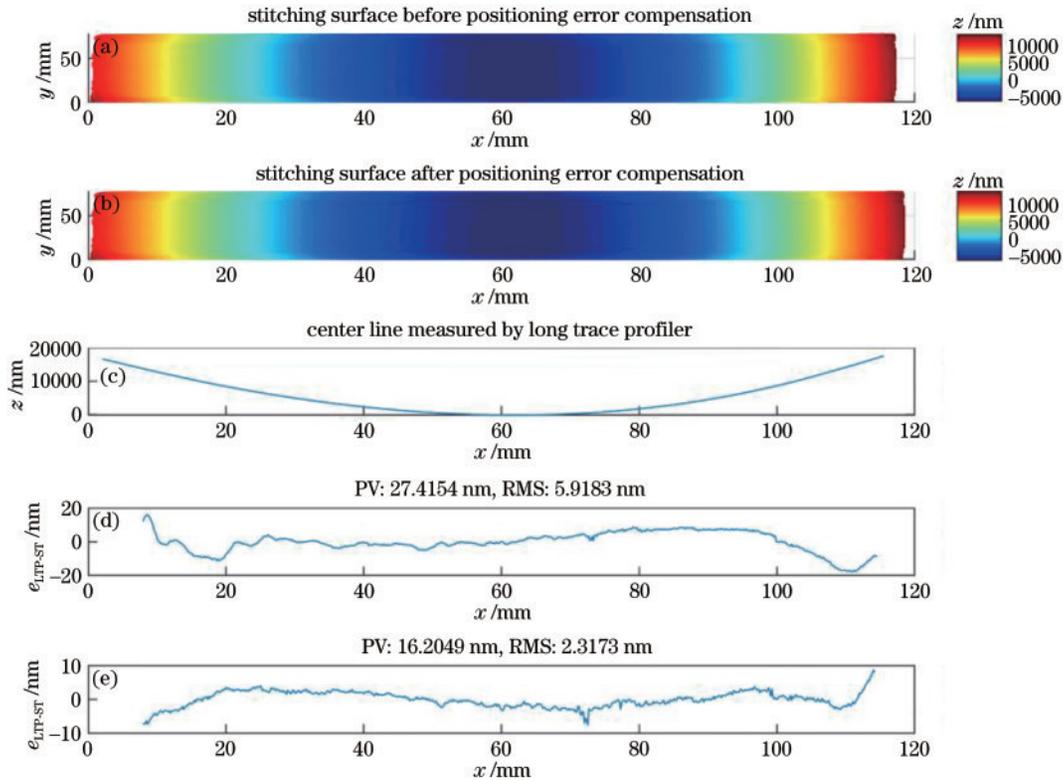


图 9 拼接结果与长程轮廓仪测量结果。(a)定位误差补偿前拼接面形;(b)定位误差补偿后拼接面形;(c)长程轮廓仪测量的中线轮廓;(d)误差补偿前拼接面形轮廓与长程轮廓仪面形轮廓残差;(e)误差补偿后拼接面形轮廓与长程轮廓仪面形轮廓残差

Fig. 9 Stitching surface and long trace profiler measurement results. (a) Stitching surface before positioning error compensation; (b) stitching surface after positioning error compensation; (c) center line measured by long trace profiler; (d) residuals between long trace profiler surface and stitching surface before error compensation; (e) residuals between long trace profiler surface and stitching surface after error compensation

4 结 论

为减小在子孔径干涉检测过程中机械位移台定位误差对子孔径拼接结果的影响,本文提出了基于遗传

算法的机械定位误差补偿方法,对子孔径机械定位误差 Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ 进行计算并加以补偿。首先介绍了柱面镜拼接和定位误差搜索算法原理,然后采用模拟仿真和拼接实验两种方法对定位误差搜索算法的有效性进

行验证。仿真结果表明,对于定位误差计算,算法偏移量计算精度高于 1 pixel,旋转角度计算精度优于 0.01° ,补偿后拼接面形与仿真面形残差 RMS 小于 0.2 nm,说明算法可以有效计算并补偿子孔径机械定位误差。对曲率半径接近 100 m 的柱面镜进行拼接检测实验,定位误差补偿后面形与引入误差前面形残差 RMS 从原来的 187.6148 nm 降低至 1.5945 nm。在实际测量中将补偿前后子孔径拼接轮廓与长程轮廓仪测量轮廓对比,结果表明,定位误差补偿后的拼接面形轮廓与长程轮廓仪测量结果的一致性比实测拼接面形轮廓更高,进一步说明在实际测量过程中,本文算法可以有效补偿由于子孔径定位误差引起的全口径面形拼接误差,提高柱面镜拼接检测精度,减小对高精度测量转台的依赖,从而简化测量过程,提高测量效率。

参 考 文 献

- [1] 陈倩,喻虹,谈志杰,等. X光超瑞利散斑场傅里叶变换关联成像模拟研究[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1934001. Chen Q, Yu H, Tan Z J, et al. Simulation research on X-ray Fourier-transform ghost imaging using super-Rayleigh speckle field[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1934001.
- [2] 胡哲,洪春霞,滑文强,等. 上海光源硬 X 射线光束在线监测[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1534001. Hu Z, Hong C X, Hua W Q, et al. Online monitoring of hard X-ray beam at SSRF[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1534001.
- [3] Su Y R, Ma W B, Yang Y M. Perovskite semiconductors for direct X-ray detection and imaging[J]. Journal of Semiconductors, 2020, 41(5): 051204.
- [4] Osterhoff M, Robisch A L, Soltau J, et al. Focus characterization of the NanoMAX Kirkpatrick-Baez mirror system[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2019, 26(4): 1173-1180.
- [5] Gong X P, Lu Q P, Wang Y, et al. Mechanical design and finite element analyses of surface bending mechanism for X-ray optics[J]. Precision Engineering, 2018, 53: 107-119.
- [6] Gong X P, Lu Q P, Song Y. Mechanical design and performance evaluation of KB mirror system for the ARPES beamline at SSRF[J]. Precision Engineering, 2016, 46: 166-176.
- [7] Yashchuk V V, Centers G, Gevorkyan G S, et al. Correlation methods in optical metrology with state-of-the-art X-ray mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10612: 106120O.
- [8] Idir M, Huang L, Kaznatcheev K, et al. X-ray optics R&D at NSLSII: focus on optical metrology development [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9687: 96870G.
- [9] Qian S N, Takacs P. Nano-accuracy surface figure metrology of precision optics[M]//Modern metrology concerns. London: InTech, 2012: 3-40.
- [10] 张帅,侯溪. K-B 镜面形高精度检测技术研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 660-675. Zhang S, Hou X. Research progress of high-precision surface metrology of a K-B mirror[J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 660-675.
- [11] Qian S N, Idir M. Innovative nano-accuracy surface profiler for sub-50 nrad RMS mirror test[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9687: 96870D.
- [12] Takacs P Z, Qian S N, Colbert J. Design of a long trace surface profiler[J]. Proceedings of SPIE, 1987, 749: 59-64.
- [13] Alcock S G, Sawhney K J S, Scott S, et al. The Diamond-NOM: a non-contact profiler capable of characterizing optical figure error with sub-nanometre repeatability[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 616(2/3): 224-228.
- [14] Mimura H, Yumoto H, Matsuyama S, et al. Relative angle determinable stitching interferometry for hard X-ray reflective optics[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(4): 045102.
- [15] Vivo A, Lantelme B, Baker R, et al. Stitching methods at the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 051908.
- [16] Yumoto H, Koyama T, Matsuyama S, et al. Stitching interferometry for ellipsoidal X-ray mirrors[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 051905.
- [17] Zang Z M, Bai J, Liu D, et al. Interferometric measurement of freeform surfaces using irregular subaperture stitching[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(5): 055202.
- [18] 张敏,隋永新,杨怀江. 用于子孔径拼接干涉系统的机械误差补偿算法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 934-940. Zhang M, Sui Y X, Yang H J. Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 934-940.
- [19] Li Z S, Li Y B. Application of multi-objective optimization problem based on genetic algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2037(1): 012021.
- [20] 朱昌会,周佩,朱江平,等. 利用遗传算法优化误差扩散核参数的条纹二值编码方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2110002. Zhu C H, Zhou P, Zhu J P, et al. Stripe binary encoding method using genetic algorithms to optimize kernel parameters of error diffusion[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2110002.