

## 柱面镜拼接检测低频面形修正技术

张思琪 陈杨 骆维舟 赵乐 杨宁 崔海龙 郑越青 海阔 臧仲明

### Cylindrical optics stitching interferometry with low spatial frequency figure error correction

ZHANG Si-qi, CHEN Yang, LUO Wei-zhou, ZHAO Le, YANG Ning, CUI Hai-long, ZHENG Yue-qing, HAI Kuo, ZANG Zhong-ming

引用本文:

张思琪, 陈杨, 骆维舟, 赵乐, 杨宁, 崔海龙, 郑越青, 海阔, 臧仲明. 柱面镜拼接检测低频面形修正技术[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0051

ZHANG Si-qi, CHEN Yang, LUO Wei-zhou, ZHAO Le, YANG Ning, CUI Hai-long, ZHENG Yue-qing, HAI Kuo, ZANG Zhong-ming. Cylindrical optics stitching interferometry with low spatial frequency figure error correction[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0051

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0051>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于计算全息图零位补偿的同轴高次非球面干涉检测技术研究

CGH null compensation testing of high-order coaxial aspherical surfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 237 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0152>

#### 大口径平面镜的瑞奇-康芒检测数据处理方法

Data processing method for Ritchey-Common test for large-aperture mirrors

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1164 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0017>

#### 基于主成分分析的白光干涉微观形貌测量算法

White light interferometry micro measurement algorithm based on principal component analysis

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 637 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0172>

#### 基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究

The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 425 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0210>

#### 星载多普勒非对称空间外差干涉测量中条纹图案的相位畸变校正

Phase distortion correction of fringe patterns in spaceborne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometry

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 382 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0007>

#### 凹非球面的非零位干涉检测技术

A non-null interferometry for concave aspheric surface

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 140 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0042>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-09

## 柱面镜拼接检测低频面形修正技术

张思琪, 陈 杨, 骆维舟, 赵 乐, 杨 宁, 崔海龙, 郑越青, 海 阔, 臧仲明\*  
(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 使用基于计算全息图(CGH)的子孔径拼接检测方法是检测柱面镜表面轮廓的常用方法之一。由于误差的累积放大, 以及基于正交多项式的常规像差拟合方法无法有效分离误差和真实面形, 拼接结果存在低频面形信息失真的问题。针对这一现象, 本文提出了一种补偿修正柱面镜表面轮廓低频面形信息的新方法, 先使用基于逐次拼接的切比雪夫多项式拼接方法进行拼接, 再单独对镜面的拼接方向(即母线方向)轮廓进行检测, 获取母线方向低频信息后, 对拼接结果进行进一步的融合修正。通过对一通光口径为 150 mm×210 mm, 曲率半径为 790.23 mm 的柱面反射镜进行拼接检测实验验证, 所提方法有效修正了柱面镜的母线方向轮廓, 与使用全口径 CGH 检测得到的全口径参考面形相比, 柱面镜拼接检测结果残差均方根(RMS 值)约为 0.0103λ, 与修正前相比, 拼接残差 RMS 值降低了约 37%, 检测精度显著提升。方法具备操作简便、硬件要求较低、检测精度可靠等优势。

**关键词:** 光学检测; 柱面镜检测; 子孔径拼接; 计算全息图

中图分类号: TN247 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0051 CSTR: 32171.14.CO.2026-0051

## Cylindrical optics stitching interferometry with low spatial frequency figure error correction

ZHANG Si-qi, CHEN Yang, LUO Wei-zhou, ZHAO Le, YANG Ning, CUI Hai-long,  
ZHENG Yue-qing, HAI Kuo, ZANG Zhong-ming\*

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics., Mianyang,  
Sichuan 621900, China)

\* Corresponding author, E-mail: zangzhongming\_opt@163.com

**Abstract:** The subaperture stitching method based on computer-generated holograms (CGH) is a common approach for measuring the surface profile of cylindrical mirrors. However, the stitching result suffers from distortion in low-frequency surface shape information. This is primarily caused by the cumulative amplification of errors and the inability of conventional aberration fitting methods (based on orthogonal polynomials) to effectively separate errors from the true surface figure. To address this issue, this paper proposes a novel method to compensate for and correct the low-frequency information of cylindrical mirror surface profiles. First, an initial stitching is performed using a successive subaperture stitching method based on Chebyshev

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62305317); 四川省科技计划 (No. 2025JDDQ0005); 国家自然科学基金 (No. 52322510)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62305317); Sichuan Provincial Science and Technology Program (No. 202JDDQ0005); National Natural Science Foundation of China (No. 52322510)

polynomials. Next, the profile along the mirror's stitching direction (i.e., the generatrix direction) is measured independently to extract its low-frequency component. Finally, this low-frequency information is used to further fuse and correct the initial stitching result. Experimental validation was conducted on a cylindrical mirror with a clear aperture of 150 mm × 210 mm and a radius of curvature of 790.23 mm. The results demonstrate that the proposed method effectively corrects the generatrix direction profile of the cylindrical mirror. Compared to the full-aperture reference surface obtained via full-aperture CGH measurement, the root mean square (RMS) of the residual error for the stitching result is approximately  $0.0103\lambda$ . This represents a reduction of about 37% in the RMS value compared to the pre-correction result, indicating a significant improvement in measurement accuracy. The proposed method offers advantages including ease of implementation, low hardware requirements, and reliable measurement accuracy.

**Key words:** optical testing; cylindrical mirror testing; sub-aperture stitching; computer-generated hologram

## 1 引言

柱面光学元件在  $x$  和  $y$  方向上具有不同的曲率半径, 广泛应用于光束整形、高能激光及生物医学等领域<sup>[1-2]</sup>。随着相关技术的发展, 对柱面光学元件的性能要求日益提升, 为实现高精度制造, 必须对其面形进行精准检测以指导加工过程。在精密抛光阶段, 柱面光学元件通常已具备较高的表面光洁度和较小的面形误差, 因此常采用高精度干涉法进行面形检测, 并根据实际检测需求辅以绝对检测及其他非干涉检测手段<sup>[3]</sup>。

干涉法主要分为非零位检测与零位检测两类。在零位检测中, 需设计和制造相应的零位元件, 以确保光线垂直入射至被测元件表面。计算全息图 (CGH) 是目前实现柱面镜零位/近零位检测最为常用的元件之一<sup>[4-7]</sup>。然而, 计算全息图通常针对特定的光学元件进行定制, 且受限于光刻加工技术, 大尺寸柱面镜检测所需的大尺寸高精度的 CGH 制造成本高昂、加工困难<sup>[8]</sup>。目前, 采用子孔径拼接和 CGH 相结合的检测方法是大尺寸柱面镜的常用检测手段。苏州大学的郭培基团队对子孔径拼接检测进行了一系列研究, 其中朱峰<sup>[9]</sup> 结合粒子群算法, 利用 CGH 和子孔径拼接对口径  $7.74\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ 、曲率半径  $360\text{ mm}$  的圆柱镜进行了检测, 检测结果的残差均方根 (RMS) 约为  $0.023\lambda$ 。中科院光电所的侯溪团队<sup>[10]</sup> 结合二维切比雪夫多项式, 并提出一种迭代算法, 对口径  $30\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 、曲率半径  $37.5\text{ mm}$  的大曲率半径圆柱镜进行了 CGH 拼接干涉检测, 获得高

精度的平滑拼接面, 重复性优于  $0.7\text{ nm}$ 。此外, 利用通用柱面 CGH 对柱面镜进行非零位干涉检测也是规避 CGH 高额定制成本的方法之一<sup>[11]</sup>。如国防科技大学的陈善勇团队<sup>[12]</sup> 利用近零位 CGH 拼接干涉检测方法检测了孔径为  $350\text{ mm} \times 252\text{ mm}$  的非圆柱面的表面轮廓, 检测结果与零位 CGH 检测的结构相似性指数为  $0.8901$ ; 同济大学的王占山团队<sup>[13]</sup> 提出基于勒让德-傅里叶多项式利用近零位 CGH 进行柱面拼接检测, 结果残差 RMS 约为  $7\text{ nm}$ 。

当前针对柱面拼接检测精度的研究, 主要集中在子孔径的精确定位方法上<sup>[14, 15]</sup>。然而, 除了子孔径定位误差之外, 环境随机误差、对准误差、系统误差等都会对拼接结果产生影响, 尤其在高精度面形检测中, 系统误差的对检测结果的影响难以忽略。现有对于系统误差的处理一般采用绝对检方法进行系统误差标定<sup>[16-18]</sup>。吴世霞<sup>[19]</sup> 等采用三平面互检的方法标定系统误差并对子孔径检测数据进行实时修正, 拼接残差 PV 从  $0.0721\lambda$  减小至  $0.0286\lambda$ 。中科院院长光所的张学军团队<sup>[20]</sup> 则对平移剪切法标定光学检测系统误差做了更详细的研究。这类直接标定系统误差的方法往往过程繁琐, 且一般不适用于复杂面形元件检测系统的系统误差标定。

本文提出一种基于计算全息图 (CGH) 的子孔径拼接干涉检测方法, 旨在解决大尺寸柱面光学元件难以实现全口径高精度检测的难题, 并在此基础上提出一种低频面形融合修正方法, 以解决因系统误差、对准误差和子孔径低频面形难以解耦造成的拼接方向低频面形失真的问题。具体而

言,该方法沿母线方向进行子孔径划分与检测,利用最小二乘法精确拟合并校正各子孔径之间的相对位姿偏差,通过拼接重构全口径面形后,再融合柱面母线方向轮廓信息进行低频面形修正,最终得到高精度的大尺寸柱面镜面形信息。

## 2 方法原理

### 2.1 拼接检测方法

子孔径拼接检测系统的工作原理如图 1 所示,干涉仪发出平行光束,该光束分为两部分:一部分反射于干涉仪的标准平面镜,作为参考光束;另一部分透过 CGH,照射至待测柱面。待测柱面反射的光束原路返回干涉仪,与参考光束产生干涉。本研究提出沿母线方向进行子孔径拼接,即待测柱面可通过位移装置沿  $y$  方向(母线方向)平移,实现子孔径的干涉检测。

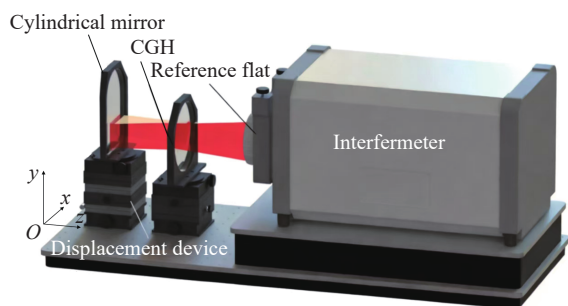


图 1 检测系统示意图

Fig. 1 Layout diagram of the detection system

### 2.2 拼接原理

本文使用基于逐次拼接的切比雪夫多项式拟合方法进行子孔径拼接。二维切比雪夫多项式在  $(-1,1)$  上正交,且与单方向光焦度下的像差有很好的对应关系,适用于矩形口径光学元件面形误差的拟合分析<sup>[16]</sup>。二维切比雪夫多项式是由正交方向的一维切比雪夫多项式相乘得到的,其表达式为:

$$C_{nm}(x,y) = C_n(x)C_m(y) \quad , \quad (1)$$

式中,  $C_n(x)$ 、 $C_m(y)$  为第  $n$ 、 $m$  阶一维切比雪夫多项式,  $C_{nm}(x,y)$  为对应的二维切比雪夫多项式。

二维切比雪夫多项式各项与像差的对应关系如表 1 所示。柱面镜检测中,由调整误差导致的主要像差包括平移、倾斜、像散、初级彗差及球差,

四阶以上高阶残差趋于零,可忽略不计<sup>[10,21]</sup>。由于柱面镜的非旋转对称性,调整误差在曲率方向与母线方向上引起的像差相互耦合,若仅选取部分低阶项进行拟合,会存在模型不完备的风险,拟合残差中可能隐含未建模像差。此外,实际检测中可能存在高阶对准误差、CGH 残余像差等未知误差形式,采用 0~4 阶拟合可提供更冗余的误差表达空间,增强算法对复杂误差环境的适应能力。

表 1 切比雪夫多项式各阶表达式与像差的对应关系

Tab. 1 The correspondence between Chebyshev polynomials and aberrations

阶数	多项式	x轴	多项式	y轴
0	1	平移	1	平移
1	x	倾斜	y	倾斜
2	$2x^2-1$	离焦	$2y^2-1$	离焦
3	$4x^3-3x$	慧差	$4y^3-3y$	慧差
4	$8x^4-8x^2+1$	球差	$8y^4-8y^2+1$	球差

则子孔径检测结果可表示为:

$$W_i(x,y) = W_{0i}(x,y) + \sum_n \sum_m c_{nm,i} C_n(x) C_m(y) \quad , \quad (2)$$

式中,  $W_i(x,y)$  表示第  $i$  个子孔径的实际波面,  $W_{0i}(x,y)$  表示第  $i$  个子孔径对应的理想波面,  $n$ 、 $m$  是多项式阶数,  $c_{nm,i}$  是对应的多项式系数。理想情况下,第  $i$  个和第  $i+1$  个子孔径的重叠区域内应具有完全相同的相位值,即  $W_{0i}(x,y) = W_{0i+1}(x,y)$ 。因此,将第  $i$  个和第  $i+1$  个子孔径重叠区域的检测结果相减,可得:

$$W_i(x,y) - W_{i+1}(x,y) = \sum_n \sum_m \Delta c_{nm} C_n(x) C_m(y) \quad , \quad (3)$$

式中,  $\Delta c_{nm} = c_{nm,i} - c_{nm,i+1}$ 。通过上述方程,可以解耦每次检测时元件的位姿变化,再进行拼接后可以获得元件的全口径面形。

在实际检测时,由于系统误差、环境误差等影响,  $W_i(x,y)$ 、 $W_{i+1}(x,y)$  两者不完全相同,拼接算法要做到的是使两者在整个重叠区域内的不匹配度最小,即使得重叠区域  $\Omega$  内所有数据点残差平方和  $\delta$  最小。本文使用表 1 中的 0~4 阶(即前 25 项)进行拟合,构建如下方程,并求最小二乘解:

$$\delta = \sum_{(x,y) \in \Omega} \left[ W_i(x,y) - W_{i+1}(x,y) - \sum_{n=0}^4 \sum_{m=0}^4 \Delta c_{nm} C_n(x) C_m(y) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

式中, 为重叠区域数据点数量, 通过上式得到的  $\Delta c_{nm}$ , 然后使用下式对第  $i+1$  个子孔径的位姿进行校准:

$$W'_{i+1}(x,y) = W_{i+1}(x,y) + \sum_{n,m} \Delta c_{nm-i} C_n(x) C_m(y), \quad (5)$$

将校准后的第  $i+1$  个子孔径波前  $W'_{i+1}(x,y)$  与  $W_i(x,y)$  依次进行平滑拼接, 即可获得全口径面形。

需要注意的是, 在拟合面形时, 由于最小二乘法在失调量较大时容易失真, 所以还需要在精确拟合前进行粗定位以减小失调量。本文采取在子孔径重叠区域设置靶标的方法对面形进行粗定位。检测前在每个子孔径重叠区域内粘贴 2 个 5 mm 圆形靶标, 数据处理时通过识别靶标中心点位置确认子孔径在  $x$ 、 $y$  方向的位移, 进行子孔径粗定位, 粗定位后再进行面形拟合和拼接。最终拼接完成后, 对靶标区域进行自然邻域插值填充得到完整面形数据。

### 3 低频面形融合修正

#### 3.1 拼接方向低频面形失真现象

在实际检测中, 测量得到的原始面形数据是待测镜真实面形、对准误差、系统误差以及环境扰动等因素的综合叠加。与全口径直接检测不同, 逐次拼接的过程会使误差沿拼接方向逐步累积并放大<sup>[19]</sup>。产生这一现象的根本原因在于系统误差造成的像差、对准误差造成的失调像差以及柱面镜自身的局部面形难以解耦。在进行子孔径位姿解算时, 面形以外的像差成分可能被错误地计入真实面形, 而真实面形的低频成分也可能被误判为失调像差并予以扣除, 导致子孔径空间位姿的计算值偏离其真实物理位置, 且该误差会随拼接过程逐级传递并放大。

并且, 由于子孔径仅截取柱面镜的局部区域, 原本在全口径尺度下表现为非低频的面形信息, 在局部子孔径中依然可能呈现为近似倾斜或离焦的低频形态。图 2 是该现象的示意图, 可以看出,

即使在全口径下已消除了倾斜和离焦, 截取的子孔径局部区域仍然会表现出类似的低频特征。因此, 如果在子孔径数据处理阶段直接扣除倾斜、离焦等低阶项, 将不可避免地同时抑制或滤除真实面形中的低频成分, 导致柱面镜表面轮廓的低频信息难以准确复原。

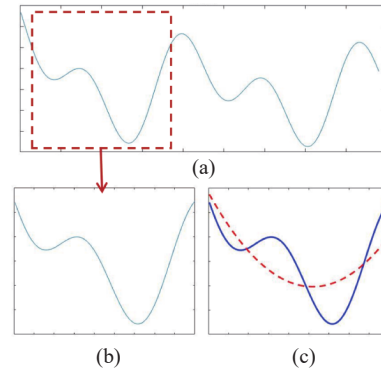


图 2 柱面镜局部面形与低频像差耦合示意图: (a) 仿真的全口径母线方向轮廓(已去除倾斜和离焦项); (b) 截取的局部面形轮廓; (c) 局部面形中类似倾斜与离焦的分量

Fig. 2 Schematic diagram of coupling between the local surface shape of the cylindrical mirror and low-frequency aberration: (a) simulated full-aperture generatrix direction profile; (b) Extracted local surface shape profile; (c) the components similar to tilt and defocus in the local surface

为了进一步探究拼接过程中低阶系统误差对拼接结果精度的影响, 本文设计了如下计算机仿真实验进行分析。

以一个  $500 \times 1000$  像素的波前数据为基础, 通过去除多项式拟合后的前 5 项(平移、倾斜、离焦)来模拟实际检测中的对准过程, 获得拼接仿真的参考面形, 参考面形的 RMS 值为  $0.66\lambda$ , PV 值为  $4.78\lambda$ 。随后, 从中拆分出三个  $500 \times 400$  像素的子孔径, 相邻子孔径的重叠区域设为 25%, 且各重叠区域内设置两个圆形靶标。为模拟实际检测中的随机失调, 对各子孔径引入了随机大小的位移、倾斜及离焦量。考虑到本文在子孔径数据处理阶段主要剔除倾斜和离焦像差, 且倾斜像差理论上可在拼接后通过拟合有效去除, 其对拼接结果的影响相对可控, 因此重点针对拼接方向和曲率方向的二阶系统误差进行仿真分析。通过向各子孔径添加不同幅值的二阶类离焦系统误差, 对比拼接残差的 RMS 值, 结果如图 3 所示。该图展

示了在不同方向和大小系统误差下, 残差 RMS 值与引入误差 PV 值的关系。可以看出, 沿拼接方向的类离焦误差对拼接精度的影响明显大于曲率方向, 这表明拼接过程会放大拼接方向的低阶系统误差, 且该类误差难以通过常规初阶像差拟合消除, 从而影响柱面镜真实面形的准确复原。

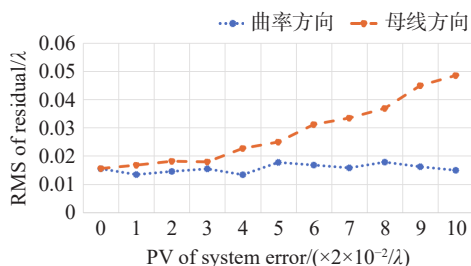


图3 不同方向类离焦误差对拼接精度的影响对比(注: 数据点为十次仿真结果的平均残差 RMS 与引入误差 PV 值的关系, 拼接结果已去除初阶像差)

Fig. 3 Comparison of stitching accuracy affected by defocus-like errors in stitching and curvature directions. (Note: Each data point represents the average residual RMS of ten simulations versus the introduced PV value; low-order aberrations have been removed from the stitching results.)

综上所述, 当前采用单一方向子孔径逐次拼接进行柱面镜检测时面临两难困境: 若不对子孔径数据进行预处理, 系统误差将因累积放大效应而显著降低拼接精度; 若进行拟合处理, 则因无法有效解耦对准误差与系统误差, 易导致拼接结果中出现低频面形失真。因此减少系统误差对拼接的影响是提高拼接精度的关键步骤。针对上述问题, 本文提出一种低频面形融合修正方法。

### 3.2 低频面形融合修正方法

为修正拼接后的低频面形, 现提出一种新的面形融合修正方法。图4是该低频面形融合修正方法示意图, 即通过单独对镜面的母线方向(拼接方向)轮廓进行检测, 获取母线方向低频信息后, 对拼接结果进行进一步的融合修正。

具体修正后的面形数据计算方法如式(6)所示:

$$W(x, y) = W_p(x, y) + \delta_{p-y} W_y(y) \quad (6)$$

$$\delta_{p-y} = \sigma_p / \sigma_y \quad (7)$$

其中,  $W_p(x, y)$ 是将 CGH 干涉检测得到的子孔径面形数据则按照传统方法去除多项式拟合出的低阶像差后, 再进行拼接所得到的全口径拼接面形

数据;  $W_y(y)$ 是通过干涉检测测得柱面镜母线方向的面形轮廓数据后, 通过多项式拟合获取的单向低频信息;  $\delta_{p-y}$ 是融合修正系数, 通过式(7)计算得到;  $\sigma_y$ 为母线方向轮廓检测结果中, 有效数据区域内一维平均面形轮廓的 PV 值。该一维轮廓通过对检测结果中数据完整性较好的区域进行平均处理得到;  $\sigma_p$ 则为拼接结果在母线方向上的一维平均面形轮廓的 PV 值。为兼顾一维轮廓的代表性并降低像差对结果的影响, 本文选取拼接结果中部 1/3 区域的数据进行平均, 以此作为计算  $\sigma_p$ 所用的平均面形轮廓。

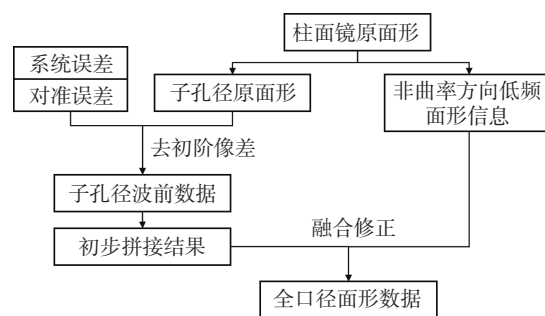


图4 低频面形融合修正方法原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the low-frequency surface shape fusion correction method

值得说明的是, 由于误差耦合和多次拼接, 拼接结果低频面形的失真程度并不等于柱面镜本身全部低频信息, 不应直接使用母线轮廓进行补偿。一般情况下, 零位干涉检测结果中的整体倾斜和曲率对波前数据幅值的影响较小, 基于这一前提, 理论上修正后的拼接结果(或真实面形)的母线轮廓的 PV 值与修正前相比不应有较大偏差。因此, 本文以修正前的拼接结果作为参考, 将单独测得的母线轮廓幅值按 PV 比值缩放至相应大小, 即按照式(7)引入融合修正系数  $\delta_{p-y}$  进行补偿修正。

同时, 柱面在拼接方向上的理论曲率半径趋于无穷大, 这一特性使得其单向面形轮廓的零位检测无需借助任何补偿元件, 从而能够以低成本、简便操作的方式获取高精度轮廓数据。相比之下, 绝对检验、伪剪切干涉等方法通常需要大量实验与复杂的数据处理, 才能实现对系统误差的精确标定。本文提出的基于低频面形补偿的融合修正方法, 不仅具备更强的通用性, 降低了对检测设备的要求, 操作更为简便, 同时也能有效提升拼接检测精度。

## 4 实验验证

### 4.1 实验及数据处理

在本节中进行了上述柱面子孔径拼接方法的实验验证。图 5 所示的实验布局是为了测试复杂柱面而构建的。干涉仪采用直径 450 mm 孔径的 Fizeau 干涉仪, 激光波长为 632.8 nm, 横向校准像素尺寸为 0.497 mm。待测柱面镜口径为 180 mm×250 mm, 通光口径为 150 mm×210 mm, 曲率半径为 790.23 mm。

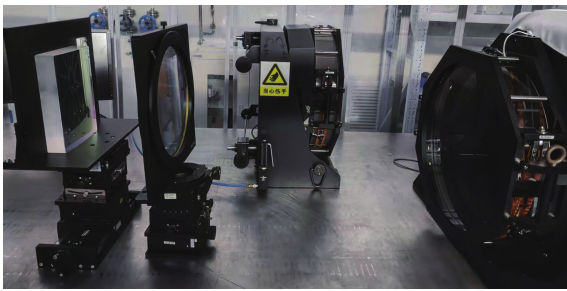


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

实验时, 先使用全口径 CGH 对被测柱面镜的全口径面形进行检测, 测得的全口径面形用于后续与子孔径拼接结果进行对比验证, 再自上而下对划分的三个子孔径进行检测。本次实验的子孔径划分如图 6 所示, 子孔径数量为 3, 子孔径大小 150×90 mm, 重叠区域高 30 mm, 占子孔径区域的 33.3%, 相邻子孔径之间的平移距离为 60 mm, 检测顺序为(#1, #2, #3)。

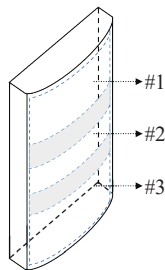


图 6 子孔径划分

Fig. 6 Schematic diagram of the sub-aperture division

实验前, 需将系统的波前像差最小化, 以保证实验起始条件的准确性。每次检测子孔径时, 都需将波前像差最小化, 检测结果如图 7(a) 所示。完成子孔径检测后, 移除 CGH, 重新搭建柱面镜母线方向轮廓检测所需的检测系统, 一方面母线

轮廓检测无需零位补偿器, 另一方面消除由 CGH 的波前误差引起的系统误差, 使检测结果更接近柱面镜的真实面形, 测得柱面镜中间区域的面形数据如图 7(b) 所示。

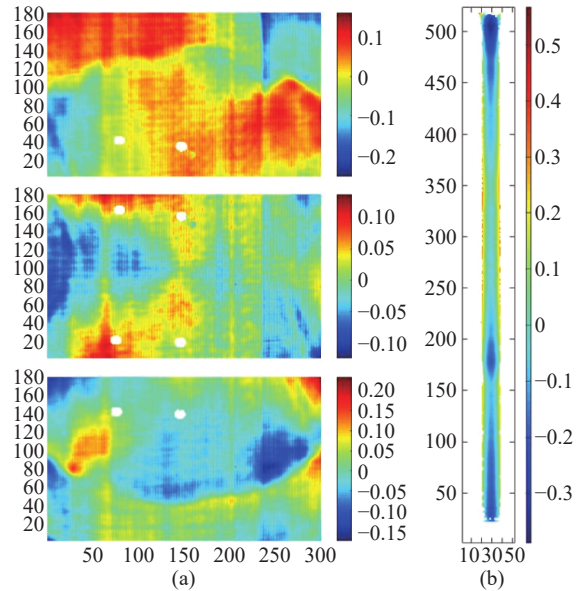
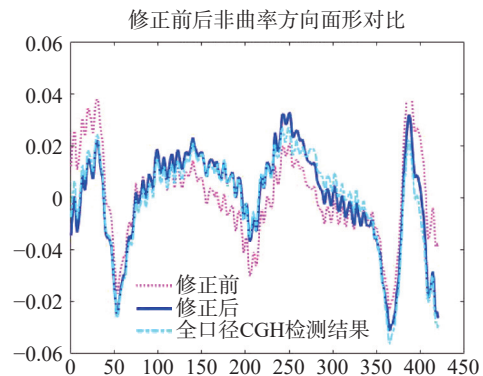


图 7 实验检测结果: (a) 子孔径检测结果 (自上而下: #1、#2、#3); (b) 柱面镜拼接方向轮廓检测结果

Fig. 7 Experimental test results: (a) Sub-aperture measurement results (from top to bottom: #1, #2, #3); (b) Measured profile of the cylindrical mirror along the stitching direction

利用前文所述方法将子孔径检测结果进行拼接和修正, 图 8 展示了低频面形修正前后拼接结果的母线方向面形轮廓, 以及与全口径检测结果相减得到的母线方向面形轮廓残差。可以看出, 修正后的母线方向面形轮廓更接近全口径检测结果。



(a) 修正前、后拼接结果和全口径CGH检测结果的柱面镜中部母线方向轮廓对比

(a) Comparison of generatrix direction profiles at the central region of the cylindrical mirror obtained from pre-correction, post-correction, and full-aperture CGH measurements

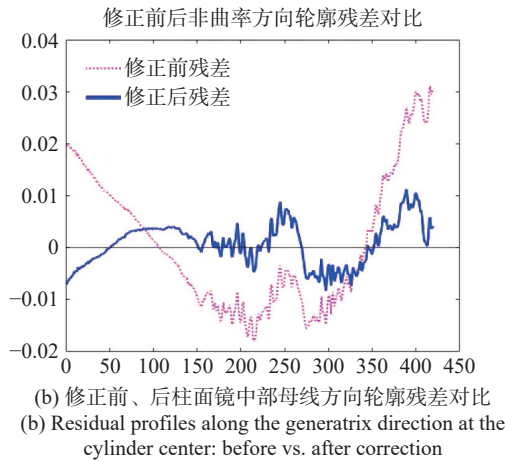


图 8 低频面形修正效果 (注: 中部区域母线方向轮廓数据通过对柱面镜中部 100 列数据点取平均获得)

Fig. 8 Correction effect of low-frequency surface shape. (Note: The profile along the generatrix direction at the central region is obtained by averaging 100 data columns across the cylinder center.)

该低频面形融合修正方法改善了由于子孔径系统误差、对准误差产生的低频像差与镜面局部低频面形数据难以解耦产生的拼接结果母线方向低频面形失真, 有效还原了柱面镜的母线方向轮廓。

最终低频面形修正后的拼接结果如图 9(b) 所示, 图 9(a) 是使用全口径 CGH 检测得到的柱面镜参考面形, 图 9(c) 是拼接结果减去参考面形数据得到的拼接残差。表 2 是检测结果残差 RMS、PV 值, 修正后, 残差 RMS 值从 0.0163λ 减小至 0.0103λ。

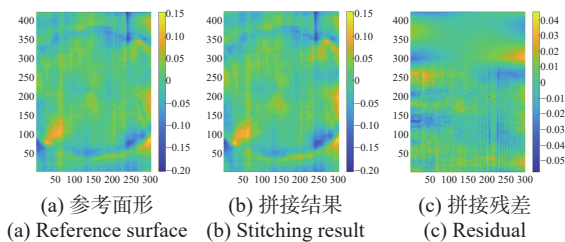


图 9 拼接检测结果与 CGH 检测结果对比

Fig. 9 Comparison of stitching measurement and CGH measurement results

表 2 柱面子孔径拼接检测实验数据

Tab. 2 Experimental data for cylindrical subaperture stitching

残差/λ	低频面形修正前	低频面形修正后
RMS	0.0163	0.0103
PV	0.1375	0.1025

## 4.2 误差分析

上述方法在检测过程中会受到各种误差的影响, 其中包括检测过程中的环境因素、干涉仪-标准镜误差、CGH 的制造误差、拼接算法的精度等。其中, 检测过程随机误差主要由温湿度变化、振动、空气扰动等造成, 在当前实验室条件下这部分误差约为 2.5 nm; 根据干涉仪及 CGH 的产品出厂信息, 两者的误差大小约为 1.0 nm 和 3.0 nm; 根据表 2 检测结果, 拼接算法精度为 0.103λ (约为 6.7 nm)。综上, 本文所使用的基于低频面形融合修正和 CGH 零位补偿的柱面镜子孔径拼接方法的检测精度分析如表 3 所示。将上述各误差分量视为相互独立, 采用方和根法合成全口径面形检测精度, 检测精度拟合结果为 7.8 nm。

表 3 检测精度分析

Tab. 3 Measurement Accuracy Analysis (Unit: nm)

误差类型	误差大小
随机误差	2.5
干涉仪误差	1.0
CGH 误差	3.0
拼接算法精度	6.7
检测精度	7.8

## 5 结 论

基于计算全息图(CGH)的全口径零位干涉检测方法理论上能够检测任意复杂曲面光学元件。然而, 由于 CGH 需要根据特定表面面形进行定制, 因此这种方法通用性差且成本高。采用拼接干涉检测法能够降低成本, 但是拼接过程会使得系统误差被放大, 且系统误差、对准误差和柱面镜表面轮廓难以解耦, 利用常规方法直接分离对准误差会使得表面轮廓的低频信息丢失。

因此, 本文提出一种用于补偿修正柱面镜表面轮廓低频信息的新方法。提出了利用从直接检测得到的柱面镜母线方向表面轮廓信息中提取的低频信息, 对拼接结果进行低频面形融合修正的方法, 并通过计算机仿真和柱面拼接实验进行了验证。与使用 CGH 进行全孔径检测的结果相比, 所提出的拼接技术的检测结果 RMS 误差约

为 3.36%，残差 RMS 约为  $0.0103\lambda$ ，且有效修正了柱面镜的母线方向轮廓。此方法具有操作简单、硬件要求低、检测精度可靠等优点，为柱面镜的高精度检测提供了一个可行的方法。

#### 参考文献:

- [1] 邢陈陈, 郑继红, 陈芳芳, 等. 光控取向液晶偏振全息柱透镜的制备及聚焦特性[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 593-601.  
XING CH CH, ZHENG J H, CHEN F F, *et al.*. Preparation and focusing characteristics of polarized holographic photoalignment liquid crystal cylindrical lenses[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 593-601. (in Chinese).
- [2] CHEN Y L, ZHONG J F, FENG B, *et al.*. Morphology measurement of cylindrical lens based on the phase deflection method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(3): 035008.
- [3] 李佳慧, 匡翠方, 徐月暑, 等. 极紫外光学元件全频段面形误差检测与缺陷探测技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2025, 33(17): 2661-2690.  
LI J H, KUANG C F, XU Y SH, *et al.*. Research progress of full-spatial frequency error measurement and defect detection technology for extreme ultraviolet optical components[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(17): 2661-2690. (in Chinese).
- [4] MACGOVERN A J, WYANT J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(3): 619-624.
- [5] 黎发志, 罗霄, 赵晶丽, 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 709-716.  
LI F ZH, LUO X, ZHAO J L, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 709-716. (in Chinese).
- [6] 孔令伟. 二次柱面反射镜的面形误差检测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
KONG L W. *Research on surface error measurement of quadratic cylinder mirrors*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese).
- [7] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 161-186.  
LIANG Z J, YANG Y Y, ZHAO H Y, *et al.*. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese).
- [8] 徐凯. 计算全息检具的制造精度分析与波前误差补偿关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2025.  
XU K. *Research on the fabrication accuracy analysis and the key technology of wavefront error compensation for computer-generated holograms*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese).
- [9] 朱峰. 柱面镜的子孔径拼接检测技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.  
ZHU F. *Research on the sub-aperture stitching testing technology for cylindrical lens*[D]. Suzhou: Soochow University, 2019. (in Chinese).
- [10] ZHANG SH, HOU X, HU X CH, *et al.*. Stitching interferometry using computer-generated hologram (CGH) based on sub-aperture adjustment aberration of 2-D Chebyshev polynomial[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106618.
- [11] YUMOTO H, KOYAMA T, MATSUYAMA S, *et al.*. Stitching interferometry for ellipsoidal x-ray mirrors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 051905.
- [12] KONG L W, CHEN SH Y. Subaperture stitching test for large aperture mild acylinders[J]. *Optics Communications*, 2020, 455: 124526.
- [13] SHENG P F, YU J, WANG K, *et al.*. Alignment aberrations compensation for near-cylinder surface stitching interferometry with near-null computer-generated hologram based on Legendre-Fourier polynomials[J]. *Measurement*, 2024, 235: 115000.
- [14] 蒋宸哲, 张雷洪, 徐邦联, 等. 基于改进自适应粒子群退火的子孔径拼接干涉算法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(4): 128-135.

- JIANG CH ZH, ZHANG L H, XU B L, *et al.*. Sub-aperture splicing interference algorithm based on improved adaptive particle swarm annealing[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2024, 14(4): 128-135. (in Chinese).
- [15] 严威. 柱面镜的子孔径拼接检测方法的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.  
YAN W. *Research of sub-aperture stitching algorithm in cylinder surface testing*[D]. Suzhou: Soochow University, 2022. (in Chinese).
- [16] 徐浩宇, 韩森, 吴泉英, 等. 柱面绝对检测的子孔径加权拼接算法[J]. *应用光学*, 2025, 46(4): 826-834.  
XU H Y, HAN S, WU Q Y, *et al.*. Sub-aperture weighted stitching algorithm for absolute measurement of cylindrical surface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(4): 826-834. (in Chinese).
- [17] 张明意, 李新南. 子孔径拼接检验法中倾斜的影响及消除方法[J]. *光电工程*, 2006, 33(8): 117-122.  
ZHANG M Y, LI X N. Influence of tilt in stitching interferometry and how to eliminate it[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(8): 117-122. (in Chinese).
- [18] BLOEMHOF E E. Absolute surface metrology with a phase-shifting interferometer for incommensurate transverse spatial shifts[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5): 792-797.
- [19] 吴世霞, 田爱玲, 刘丙才, 等. 子孔径拼接中系统误差的修正方法[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 639-643.  
WU SH X, TIAN A L, LIU B C, *et al.*. System error correcting method in sub-aperture stitching[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 639-643. (in Chinese).
- [20] 杨或. 基于多步平移剪切法的高精度绝对检测关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2024.  
YANG Y. *Research on high-precision absolute test technology based on multi-step translation shear method*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2024. (in Chinese).
- [21] 俞魁榜. 切比雪夫多项式在圆柱面系统辅助装调中的应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.  
YU K B. *The research on the application of Chebyshev polynomial in computer-aided alignment of the cylindrical system*[D]. Suzhou: Soochow University, 2018. (in Chinese).

#### 作者简介:



张思琪(1998—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 2019年于北京大学获学士学位, 主要从事光学检测技术的研究。E-mail: [m17801003047@163.com](mailto:m17801003047@163.com)



海阔(1991—), 男, 吉林省吉林市人, 毕业于中科院长春光机所, 光学工程博士学位, 主要从事光学超精密加工与检测技术研究。E-mail: [haikuo\\_6s@126.com](mailto:haikuo_6s@126.com)



臧仲明(1994—), 男, 山东淄博人, 特聘研究员, 硕士生导师, 2022年于浙江大学获博士学位, 主要从事光学精密检测技术研究。E-mail: [zangzhongming\\_opt@163.com](mailto:zangzhongming_opt@163.com)