

基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的非球面测量误差解耦合技术*

王炜豪 王永杰 王亚慧 伍洲 张文喜†

(中国科学院空天信息创新研究院, 光学精密测量技术研究部, 北京 100094)

(2025年7月1日收到; 2025年8月17日收到修改稿)

非球面光学元件在芯片制造、遥感探测及航空航天等前沿领域具有重要应用价值, 因而对其加工和检测精度的要求不断提高. 非球面环形子孔径拼接测量技术是一种高精度、通用性强的有效检测技术, 但在大非球面度、大陡度元件检测中显著的面形特征与测量误差的耦合问题制约了其测量精度的提升. 本文提出一种基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的非球面测量误差解耦合技术, 通过构建包含全口径圆形泽尼克多项式与子孔径环形泽尼克多项式的全局优化模型, 实现全口径面形特征与子孔径局部测量误差的同步拟合解算与解耦合并提升测量精度. 仿真与实验结果表明, 该技术可有效地分离面形特征与测量误差, 同时可避免传统拼接测量方法中面形参考基准存在误差和子孔径误差累积的问题, 在本文的实验中其 PV_r 精度较传统方法可提升近 30%. 此外, 该技术无需依赖于孔径重叠区域, 能够减少子孔径数量、提升测量效率. 此方法为大非球面度、大陡度光学元件的高精度测量提供了技术解决方案.

关键词: 光学面形检测, 非球面, 子孔径拼接, 全局拼接

PACS: 07.60.Ly, 07.85.Fv, 02.60.Pn

DOI: 10.7498/aps.74.20250866

CSTR: 32037.14.aps.74.20250866

1 引言

非球面光学元件凭借其独特的光学性能, 在芯片制造、遥感探测及航空航天等前沿领域具有重要地位^[1,2]. 随着这些领域对光学元件精度要求的不断提升, 高精度非球面光学元件测量技术的研究愈发关键. 基于干涉测量与环形子孔径拼接的非球面测量技术作为一种非接触式的非零位检测手段^[3-14], 以其简单的测量结构与较高的测量精度, 相较于无像差点法、零位补偿镜检测技术、计算全息技术以及光学轮廓仪等方法^[4,6,7,15-20], 在大口径、大非球面度旋转对称非球面光学元件的测量中展现出了分辨率高、通用性强等优势.

环形子孔径拼接测量技术基于球面面形干涉测量原理, 通过对旋转对称非球面光学元件中多个同心环形子孔径内的面形逐一进行测量, 并将各个子孔径的测量结果进行拼接, 获取完整的非球面面形轮廓^[13,16]. 测量时, 需借助机械装置驱动待测镜完成轴向扫描, 由此不可避免地会引入机械运动误差导致的偏心、俯仰偏摆、轴向定位等调整误差以及回程误差等, 直接影响测量精度^[2,7,13,21-28]. 在球面或低非球面度光学元件的测量中, 现有研究常采用圆形或环形泽尼克多项式拟合测量面形, 并基于其各个项的正交特性, 通过扣除平移、倾斜、离焦等像差项消除调整误差等因素产生的低阶测量误差^[4,7,13,22,26,28,29]; 在环形子孔径拼接测量中, 对相邻子孔径重叠区域测量面形的残差进行泽尼克多项

* 中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2023132) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangwx@aircas.ac.cn

式拟合并进行像差分析和扣除,可进一步消除相对于上一子孔径的测量偏差,进而通过对各环带进行逐次误差修正,实现测量误差的分步消除与全口径面形的拼接^[3,8,10,22,30-32].实际上,在非球面干涉测量过程中,待测镜面常见的面形特征与可能引入的测量误差常表征为相同形式的泽尼克多项式,这会导致测量过程中出现误差耦合问题并给面形数据分析解算带来困难,但通常在上述的球面或低非球面度光学元件的测量中这一类易产生耦合问题的测量误差占比相对较小并可忽略.然而,在大非球面度、大陡度光学元件的测量中,调整误差、回程误差以及测量区域掩膜误差等多种因素的相互作用使得面形测量误差更为复杂,并会表现为泽尼克多项式拟合结果中彗差、像散以及高阶球差等更高阶的像差项^[2,24],这就导致其易与光学元件自身面形特征混淆,面形特征与测量误差的耦合问题就显得尤为突出.此时,直接扣除对应像差项会误将元件真实面形特征剔除;而基于重叠区域的环形子孔径拼接测量则依赖首个子孔径面形作为参考基准,但首个子孔径的测量误差也难以解耦合并确定,且在大非球面度、大陡度元件的测量过程中拼接测量存在测量误差累积的问题^[31].在前期研究中,Liu等^[7]提出的全局拼接方法虽可减小误差累积,但没有考虑面形特征与测量误差的耦合问题,并认为测量误差仅包括平移、倾斜和离焦;Hou等^[13]使用环形泽尼克多项式表征子孔径测量误差,但同样没有分析误差耦合;Wen和Cheng^[14]将像差分析拓展至环形泽尼克多项式第9项,并基于重叠区域逐个子孔径分析测量误差,一定程度上可以应对误差耦合,但无法避免参考基准的误差问题.目前缺少针对子孔径测量误差耦合问题的有效解算方法,难以实现相同类型面形特征与测量误差分离的同时兼顾全局拼接减少误差累积,这成为了限制大非球面度、大陡度非球面光学元件测量精度提升的瓶颈,制约了相关测量与加工技术的发展.

针对上述限制非球面光学元件测量精度的测量误差耦合问题,本文提出一种基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的非球面测量误差解耦耦合技术,并在大陡度非球面光学元件拼接测量的应用场景中展开实验验证,实现环形子孔径测量误差的分离解算和测量精度与效率的提升.所提出的技术基于非球面环形子孔径的全局泽尼克多项式拟合,使用全口径圆形泽尼克多项式表征待测

元件的面形特征,使用各子孔径环形泽尼克多项式表征局部测量误差;在全局拟合过程中,同步计算全口径连续面形特征与各子孔径局部非连续测量误差,实现面形特征与测量误差的分离,提升测量精度与可靠性.同时,该技术还可以减少对子孔径重叠区域的依赖,提升测量效率.本文提出的技术旨在解决非球面环形子孔径拼接测量中的误差耦合问题,为大非球面度、大陡度光学元件的高精度测量与加工制造提供有效的技术解决方案.

2 技术原理

2.1 环形子孔径拼接原理和误差分析

基于干涉测量和环形子孔径拼接的非球面测量系统及测量过程如图1所示.系统核心测量装置为球面面形干涉仪(包括透射球面镜);待测非球面镜置于工件台上,工件台可沿轴向移动,并能对待测镜偏心、俯仰及偏摆进行微调但难以完全避免调整误差.测量时,待测非球面镜沿球面干涉仪轴向扫描,干涉仪出射的球面波与待测非球面镜相切于不同位置(即干涉零位),选取零位附近区域作为环形子孔径,基于干涉测量原理对子孔径内面形进行测量^[1,2,8,13],而子孔径外远离中心零位的区域因干涉条纹过密或无回光而无法测量.随着待测镜的轴向扫描,对覆盖全口径的多个子孔径面形进行测量,通过子孔径面形拼接得到待测镜全口径的面形测量结果.

环形子孔径的面形测量结果及其拼接过程如下式所示:

$$W_{\text{all}}(x, y) = \{\{W_1(x, y)\} \cdots, \{W_k(x, y)\}, \cdots, \{W_K(x, y)\}\}, \quad (1)$$

其中 W_{all} 为待测镜全口径面形,是所有 K 个子孔径面形的集合; $W_k(x, y)$ 为第 k 个子孔径的面形, (x, y) 为各个测量点(干涉仪像素)对应的实际待测镜面上点的横向坐标, $\{W_k(x, y)\}$ 为第 k 个子孔径所有测量点面形值的集合.实际测量中,测量值是实际面形与理想面形的偏差,此时 $W_{\text{all}}(x, y)$ 和 $W_k(x, y)$ 也分别表示全口径和子孔径内的该测量值.

扫描测量过程中,第 k 个子孔径经干涉测量得到的原始测量值 W'_k 满足:

$$W'_k(x, y) = W_k(x, y) + \varepsilon_k(x, y), \quad (2)$$

其中 $\varepsilon_k(x, y)$ 为第 k 个子孔径的原始测量值中的测

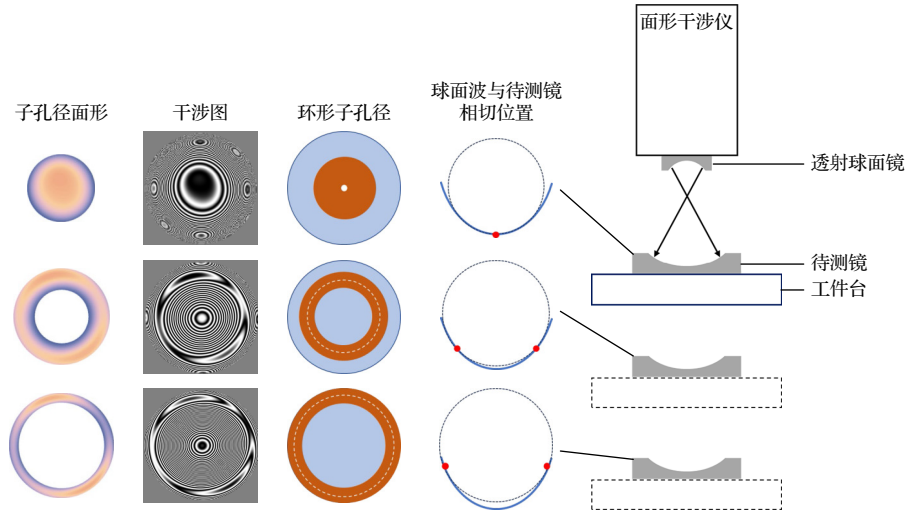


Fig. 1 基于干涉测量和环形子孔径拼接的非球面测量系统及测量过程

Fig. 1. Aspheric surface measurement system and process based on interferometry and annular subaperture stitching.

量误差, 来源包括解包裹计算时产生的直流跃变量、机械移动的调整误差导致的测量误差、干涉仪的回程误差、测量区域掩膜的选择误差等^[2,8,9,13,23]. 非球面子孔径的拼接过程通常为测量获取 W'_k , 计算并确定 $\varepsilon_k(x, y)$, 将 $\varepsilon_k(x, y)$ 从子孔径原始测量值中扣除, 此时各个子孔径测量值的集合即构成全口径的面形拼接测量结果.

第 k 个子孔径的原始测量值 $W'_k(x, y)$ 也可表示为

$$\begin{aligned} W'_k(x, y) &= W_k(x, y) + \varepsilon_k(x, y) \\ &= W_{k,\text{hf}}(x, y) + \sum_{i=1}^I W_{k,i}(x, y) \\ &\quad + \varepsilon_{k,\text{hf}}(x, y) + \sum_{i=1}^I \varepsilon_{k,i}(x, y), \end{aligned} \quad (3)$$

$$W_k(x, y) = W_{k,\text{hf}}(x, y) + \sum_{i=1}^I W_{k,i}(x, y), \quad (4)$$

$$\varepsilon_k(x, y) = \varepsilon_{k,\text{hf}}(x, y) + \sum_{i=1}^I \varepsilon_{k,i}(x, y), \quad (5)$$

其中 $W_{k,\text{hf}}(x, y)$ 和 $\varepsilon_{k,\text{hf}}(x, y)$ 分别为子孔径面形特征和测量误差中的高频分量; $\sum_{i=1}^I W_{k,i}(x, y)$ 和 $\sum_{i=1}^I \varepsilon_{k,i}(x, y)$ 分别为子孔径面形特征和测量误差中可被泽尼克多项式^[4,13,14,23,25]等方法拟合的中低频分量 ($W_{k,i}(x, y)$ 和 $\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 表示其中的各正交分量). 一般情况下, $\varepsilon_k(x, y)$ 主要为机械移动的调整误差产生的测量误差, 即 $\varepsilon_{k,\text{hf}}(x, y) = 0$ 且

$\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 仅包含平移、倾斜和离焦等低阶像差项^[7,9,13], 并且认为该类像差仅来源于测量误差, 即 $W_{k,i}(x, y)$ 中不包含相同类型的像差项. 此时可通过圆形/环形泽尼克多项式拟合^[1,4,13,25]并基于其各个项的正交特性直接扣除对应的像差项以消除测量误差, 该拟合和像差扣除的过程如下所示:

$$\sum_{i=1}^I C_{ki} A_i(x, y) = \varepsilon_k(x, y) = \sum_{i=1}^I \varepsilon_{k,i}(x, y), \quad (6)$$

其中 $\sum_{i=1}^I C_{ki} A_i(x, y)$ 表示对 $W'_k(x, y)$ 进行多项式拟合得到的各低阶像差项之和, C_{ki} 为第 k 个子孔径拟合的第 i 项的多项式系数, $A_i(x, y)$ 为第 i 项多项式; 泽尼克多项式拟合结果的低阶像差项与测量误差的组成一致, 扣减 $\sum_{i=1}^I C_{ki} A_i(x, y)$ 即对 $\varepsilon_k(x, y) = \sum_{i=1}^I \varepsilon_{k,i}(x, y)$ 进行扣减, 可消除测量误差.

实际上, 测量误差 $\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 可能包含更为复杂的像差构成, 例如调整误差可能引入彗差、像散和高阶球差等相对高阶的像差^[2,24], 测量掩膜选择误差也可能产生彗差和像散, 上述情况中回程误差的组成也更为复杂. 此时 $\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 中像差的形式可能与面形特征一致, 即 $\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 和 $W_{k,i}(x, y)$ 中包含相同阶的像差项, 对 $W'_k(x, y)$ 进行多项式拟合时, 其结果中的某些项可能满足:

$$C_{ki} A_i(x, y) = W_{k,i}(x, y) + \varepsilon_{k,i}(x, y). \quad (7)$$

若从面形原始测量值 $W'_k(x, y)$ 中对 $C_{ki} A_i(x, y)$ 进行扣减将导致待测镜面形本身的分量被错误剔除.

(7) 式即描述了面形干涉测量过程中的待测镜面形特征和测量误差的耦合问题, 该问题在实际测量过程中难以避免, 会给面形的分析与解算带来困难. 在球面光学元件及低非球面度、低陡度非球面光学元件的常规测量中, 测量误差内相对高阶的像差部分占比偏小且可忽略, 因此测量误差的耦合问题产生的影响较弱; 但在大非球面度、大陡度待测镜的测量场景下, 高阶像差部分占比显著不可忽略, 导致面形特征与测量误差的耦合问题尤为突出, 因此采用有效方法解决该问题成为了提升非球面环形子孔径拼接测量精度的必要条件.

在环形子孔径拼接方法中, 可对相邻子孔径的重叠区域进行分析, 通过分析面形原始测量值的残差, 计算并剔除测量误差. 相邻子孔径的重叠区域如图 2 所示.

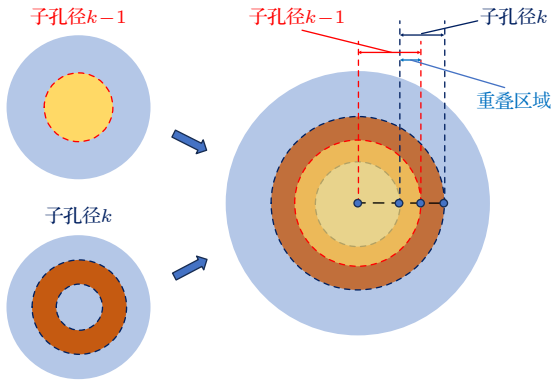


图 2 环形子孔径拼接测量中相邻子孔径的重叠区域

Fig. 2. Overlapping regions of adjacent subapertures in annular subaperture stitching measurement.

第 k 个子孔径与第 $k-1$ 个子孔径重叠区域原始测量值残差的计算过程:

$$\begin{aligned} \Delta W'_k(x, y) &= W'_k(x, y) - W'_{k-1}(x, y) \\ &= \Delta W_k(x, y) + \Delta \varepsilon_k(x, y), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta W_k(x, y) = W_k(x, y) - W_{k-1}(x, y), \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon_k(x, y) = \varepsilon_k(x, y) - \varepsilon_{k-1}(x, y). \quad (10)$$

重叠区域的面形应保持一致, 故 $\Delta W_k(x, y)$ 理论上为零, 剩余部分为测量误差的相对偏差 $\Delta \varepsilon_k(x, y)$. 当以第 $k-1$ 个子孔径测量值为参考基准并假设 $\varepsilon_{k-1}(x, y)$ 为零时, $\Delta \varepsilon_k(x, y)$ 可视为完全由第 k 个子孔径的测量误差 $\varepsilon_k(x, y)$ 引起. 此时重叠区域满足 $\Delta W'_k(x, y) = \Delta \varepsilon_k(x, y)$, 通过对该重叠区域残差 $\Delta W'_k(x, y)$ 进行多项式拟合, 可分析第 k 个子孔

径测量误差的像差项构成, 进而对整个子孔径扣除相应像差项以消除测量误差^[14]. 该方法依赖于以首个子孔径面形作为参考基准 (认为测量误差为零), 通过逐个子孔径计算扣除相对测量误差的方式消除全部子孔径测量误差. 然而首个子孔径的测量误差难以解耦合, 导致参考基准存在误差, 进而影响测量结果的准确性; 同时该过程存在误差累积的问题, 在大非球面度、大陡度待测镜测量的多子孔径拼接场景中, 误差累积更为明显; 此外, 当误差分析涉及较复杂的像差构成时, 计算误差也将进一步增加.

2.2 基于全局优化的非球面测量误差解耦合技术原理

针对大非球面度、大陡度的非球面光学元件测量场景中的待测镜面形 $W_{k,i}(x, y)$ 和测量误差 $\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 的像差组成特征一致导致的误差耦合问题, 本文提出一种基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的非球面测量误差解耦合技术. 该技术通过构建全局优化模型, 对待测镜面形 $W_{k,i}(x, y)$ 和子孔径局部测量误差 $\varepsilon_{k,i}(x, y)$ 进行联合求解, 同步获得二者的最优估计, 实现面形特征与测量误差的解耦合, 进而在大非球面度、大陡度的非球面光学元件的环形子孔径拼接测量中通过扣除相应测量误差实现测量精度的提升.

本文所提出技术的流程如下:

流程 1 基于如图 1 所示的非球面环形子孔径拼接测量系统开展测量. 根据待测非球面镜设计参数, 确定各次待测镜的轴向扫描位置, 并计算各扫描位置下环形子孔径掩膜区域内各测量点 (像素) 在待测镜上对应位置的横向坐标 (x, y) ; 通过控制工件台, 将待测镜依次移动至各轴向扫描位置, 采集对应位置的干涉图; 在子孔径区域内对干涉图进行移相计算与相位解包裹处理, 并计算其与理想非球面相位值 (由待测非球面镜设计参数推导得出) 的偏差, 进而获取各子孔径区域测量点的原始测量值 (即 $W'_k(x, y)$). 该流程作为准备步骤, 与传统环形子孔径拼接测量过程一致^[2,11,13,14].

流程 2 构建全局优化函数: 以待测镜全口径区域的圆形泽尼克多项式系数, 以及各子孔径区域的环形泽尼克多项式系数作为待求解变量; 以全口径圆形泽尼克多项式与各子孔径环形泽尼克多项式拟合结果的叠加值 (即所有多项式系数与对应多

项式的乘积之和), 与各子孔径区域全部测量点原始测量值之间的平方误差作为损失函数; 将变量的 L1 正则项作为约束条件; 通过将损失函数与 L1 正则项相加, 构建全局优化函数. 该流程是本文所提出测量技术的核心步骤.

流程 3 对全局优化函数执行最小化计算, 求解得到全口径圆形泽尼克多项式系数与各子孔径环形泽尼克多项式系数. 其中, 全口径圆形泽尼克多项式的拟合结果可表征待测非球面镜的面形(面形的中低频分量), 各子孔径环形泽尼克多项式的拟合结果可表征子孔径内的测量误差. 随后, 通过各子孔径的原始测量值减去对应环形泽尼克多项式的拟合值(即所有多项式系数与对应多项式的乘积之和), 获得各子孔径内面形的最终测量值. 所有子孔径面形测量值的集合即全口径非球面待测镜的面形测量结果.

流程 2 中所提到的全局优化函数 $f(\mathbf{X})$ 满足:

$$f(\mathbf{X}) = \|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L}\|_2^2 + \eta\|\mathbf{X}\|_1, \quad (11)$$

其中 \mathbf{A} 满足:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{01} & \mathbf{A}_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \mathbf{A}_{0k} & 0 & & \mathbf{A}_k & & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{0K} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \mathbf{A}_K \end{bmatrix}. \quad (12)$$

矩阵 \mathbf{A} 中第一列各个元素 \mathbf{A}_{0k} 满足:

$$\mathbf{A}_{0k} = \begin{bmatrix} A_{0k11} & \cdots & A_{0ki1} & \cdots & A_{0kI_{\text{circ}}1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ A_{0k1j} & & A_{0kij} & & A_{0kI_{\text{circ}}j} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ A_{0k1J_k} & \cdots & A_{0kiJ_k} & \cdots & A_{0kI_{\text{circ}}J_k} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

矩阵 \mathbf{A}_{0k} 中的元素为全口径范围内各测量点位置对应的圆形泽尼克项^[25], 计算归一化半径时, 以待测非球面镜的全口径半径作为最大半径; A_{0kij} 表示第 k 个环形子孔径区域内第 j 个测量点对应的第 i 个圆形泽尼克项; 测量过程共包含 K 个环形子孔径, 第 k 个环形子孔径包含 J_k 个测量点, 拟合过程共 I_{circ} 个圆形泽尼克项.

矩阵 \mathbf{A} 中第二列开始出现的各个元素 \mathbf{A}_k 满足:

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} A_{k11} & \cdots & A_{ki1} & \cdots & A_{kI_{\text{annular}}1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ A_{k1j} & & A_{kij} & & A_{kI_{\text{annular}}j} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ A_{k1J_k} & \cdots & A_{kiJ_k} & \cdots & A_{kI_{\text{annular}}J_k} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

矩阵 \mathbf{A}_k 中各元素为各环形子孔径内测量点位置对应的环形泽尼克项^[14,25,27], 计算孔径比时内、外半径分别取对应环形子孔径的实际内、外半径值; A_{kij} 表示第 k 个环形子孔径区域内第 j 个测量点对应的第 i 个环形泽尼克项; 测量过程共包含 K 个环形子孔径, 第 k 个子孔径包含 J_k 个测量点, 拟合过程共 I_{annular} 个环形泽尼克项.

$f(\mathbf{X})$ 中, \mathbf{X} 满足:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{C}_0 \ \mathbf{C}_1 \ \cdots \ \mathbf{C}_k \ \cdots \ \mathbf{C}_K]^T. \quad (15)$$

\mathbf{X} 的各个元素 \mathbf{C}_k 满足:

$$\mathbf{C}_k = [\mathbf{C}_{k1} \ \cdots \ \mathbf{C}_{ki} \ \cdots \ \mathbf{C}_{kI}]^T, \quad (16)$$

其中各个元素 \mathbf{C}_{ki} 满足: 当 $k=0$ 时, \mathbf{C}_{0i} 是全口径范围内第 i 个圆形泽尼克项的系数, 并且 $I = I_{\text{circ}}$; 当 $k=1, 2, \dots, K$ 时, \mathbf{C}_{ki} 是第 k 个环形子孔径的第 i 个环形泽尼克项的系数, 并且 $I = I_{\text{annular}}$.

$f(\mathbf{X})$ 中, \mathbf{L} 满足:

$$\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1 \ \cdots \ \mathbf{L}_k \ \cdots \ \mathbf{L}_K]^T. \quad (17)$$

\mathbf{L} 的各个元素 \mathbf{L}_k 满足:

$$\mathbf{L}_k = [W'_k(x_1, y_1) \ \cdots \ W'_k(x_j, y_j) \ \cdots \ W'_k(x_{J_k}, y_{J_k})]^T. \quad (18)$$

\mathbf{L}_k 中的各个元素是第 k 个环形子孔径内第 j 个测量点上的原始测量值 $W'_k(x_j, y_j)$, (x_j, y_j) 为该测量点对应待测镜面的横向坐标; 测量过程共 K 个环形子孔径, 其中第 k 个环形子孔径共 J_k 个测量点.

$f(\mathbf{X})$ 中: $\|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L}\|_2^2$ 是 $\mathbf{A}\mathbf{X}$ 和 \mathbf{L} 的平方误差, 需对该项进行最小化计算以求解 \mathbf{X} . 为避免过拟合, 引入约束项并通过迭代优化求解逼近最优解; 具体而言, 增加 L1 范数项 $\eta\|\mathbf{X}\|_1$ 作为约束(其中 η 为正则化系数), 并对整体进行最小化计算以获得最优解. 这一处理基于稀疏假设, 即各子孔径测量误差相位值的占比相对面形相位值水平较小, 且大部分像差项的系数接近于 0(仅产生的测量误差对应的像差项系数不为 0). 全局优化拟合计算即对全局优化函数 $f(\mathbf{X}) = \|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L}\|_2^2 + \eta\|\mathbf{X}\|_1$ 进

行最小化计算, 并返回 \mathbf{X} 的优化结果, 即执行如下计算:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{X}} f(\mathbf{X}). \quad (19)$$

优化计算可以使用梯度下降法^[33,34]等.

完成全局优化拟合计算后, 可得到 \mathbf{X} 的最优解. \mathbf{X} 中, C_0 为待测镜全口径面形测量值的圆形泽尼克多项式的拟合系数, C_k ($k \neq 0$) 为各环子孔径测量误差的环形泽尼克多项式拟合系数. 基于该系数计算结果可实现待测镜面形与测量误差的解耦合, 即保留面形分量并扣除误差分量. 此时, 第 k 个子孔径内第 j 个测量点的最终面形测量值 $W_{\text{meas},k,j}(x_j, y_j)$ 为该点原始测量值 $W'_k(x_j, y_j)$ 减去环形泽尼克多项式拟合的测量误差, 如下:

$$W_{\text{meas},k,j}(x_j, y_j) = W'_k(x_j, y_j) - \sum_{i=1}^{I_{\text{annular}}} C_{ki} A_{kij}(x_j, y_j). \quad (20)$$

则第 k 个子孔径区域内的面形为子孔径内所有 J_k 个测量点的面形测量值的集合:

$$W_{\text{meas},k}(x, y) = \{W_{\text{meas},k,1}(x_1, y_1), \dots, W_{\text{meas},k,j}(x_j, y_j), \dots, W_{\text{meas},k,J_k}(x_{J_k}, y_{J_k})\}. \quad (21)$$

所有 K 个子孔径即待测镜全口径的最终面形测量值即为所有测量点的面形测量值的集合:

$$W_{\text{meas}}(x, y) = \{W_{\text{meas},1}(x, y), \dots, W_{\text{meas},k}(x, y), \dots, W_{\text{meas},K}(x, y)\}. \quad (22)$$

如 (3) 式所示, 原始测量值 $W'_k(x, y)$ 包含原面形的高频与中低频分量, 以及测量误差的高频与中低频分量. 通常认为测量误差的高频分量占比较小可忽略不计, 所以需计算并扣除测量误差的中低频分量. 子孔径测量误差的中低频分量主要源于机械移动过程中的调整误差引发的测量误差 (这里也包括回程误差) 等. 通常情况下, 工件台带动待测镜扫描至不同位置时产生的调整误差存在差异, 致使测量误差在子孔径间呈现不连续性, 而待测镜自身面形在子孔径间具有连续性, 这使得各子孔径测量误差的多项式拟合系数理应存在差异. 利用这一特性, 通过上述全局优化拟合可分别求解待测镜全口径面形的中低频分量与子孔径的测量误差 (以泽尼克多项式形式表征), 而待测镜全口径面形的高频分量则保留在原始相位测量值 $W'_k(x, y)$ 中. 这实现了面形特征与子孔径测量误差的分离与解耦合, 并

可进一步提升测量精度.

除此之外, 传统非球面环子孔径拼接方法依赖子孔径重叠区域计算直流跃变量及其他误差以实现拼接, 而本文方法通过全局圆形泽尼克多项式表征全口径待测镜面形特征, 将其作为子孔径间面形的公共基准量. 在此基础上, 通过扣除环形泽尼克多项式拟合结果即足以消除直流跃变量与测量误差. 该特性使本方法无需依赖重叠区域, 可在测量场景中减少扫描位置的密度与数量, 从而提升测量效率.

3 实验与分析

3.1 仿真分析

展开仿真实验验证本文所提出方法对待测镜面形特征和测量误差的解耦合能力. 通过泽尼克多项式和随机生成多项式系数, 仿真生成待测镜全口径面形和各子孔径测量误差. 其中, 全口径面形构建基于 36 项圆形 Zernike Fringe 多项式^[25], 生成 36 个随机数作为多项式系数; 子孔径测量误差构建基于 36 项环形泽尼克多项式^[14,25] (多项式排序与 Zernike Fringe 相同), 将全口径圆形区域划分为 3 个环子孔径, 每个子孔径随机生成泽尼克多项式系数, 考虑测量误差的形式, 仅对平移、倾斜、离焦、像散、彗差、球差和三叶草像差项生成随机系数, 其余系数置零. 生成的全口径面形和子孔径测量误差如图 3 所示. 圆形全口径面形和各子孔径测量误差叠加后即得到各子孔径的原始测量值, 通过本文所提出的方法从该值中对面形特征和测量误差进行解耦合.

按照所提出的全局优化拟合方法展开计算. 基于仿真生成的数据, 利用 36 项圆形 Zernike Fringe 多项式与 36 项环形泽尼克多项式构建全局优化函数并执行计算, 优化计算过程采用梯度下降法^[33,34], 分别求解全口径圆形泽尼克多项式系数和各个子孔径的环形泽尼克多项式系数, 并进一步完成全口径面形的计算. 面形计算结果如图 4 所示. 通过本文所提出的方法, 可实现从面形的原始测量值中对测量误差解耦并完成扣除, 得到平滑且无明显拼接缝的全口径面形测量值. 仿真实验中, 对于 PV(峰谷) 值为 1.14(无量纲) 的待测面形, 测量结果与其差值的 PV 值为 0.33(无量纲).

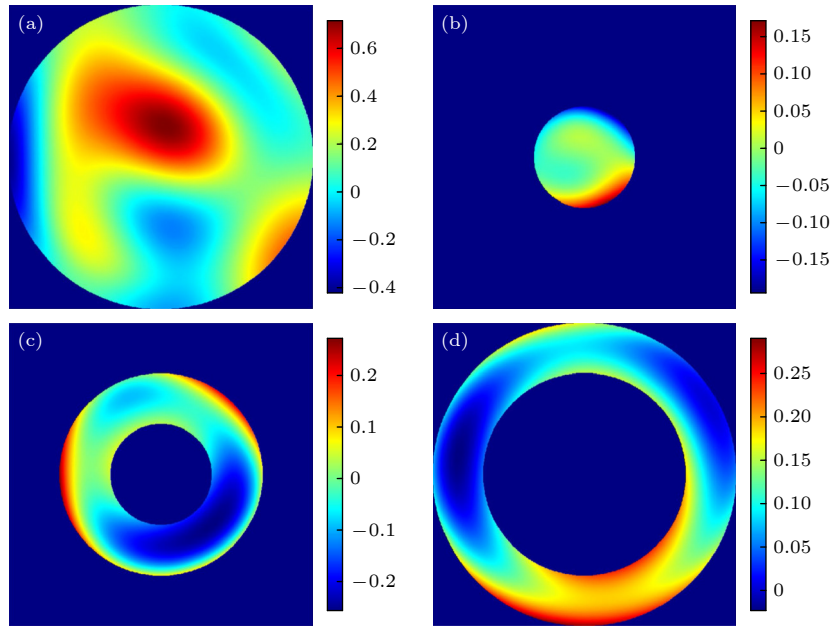


图 3 仿真生成的待测镜面形和测量误差 (a) 圆形全口径面形; (b) 第 1 个子孔径测量误差; (c) 第 2 个子孔径测量误差; (d) 第 3 个子孔径测量误差

Fig. 3. Simulated aspheric surface and measurement errors: (a) Full-aperture surface; (b) measurement error of the 1st subaperture; (c) measurement error of the 2nd subaperture; (d) measurement error of the 3rd subaperture.

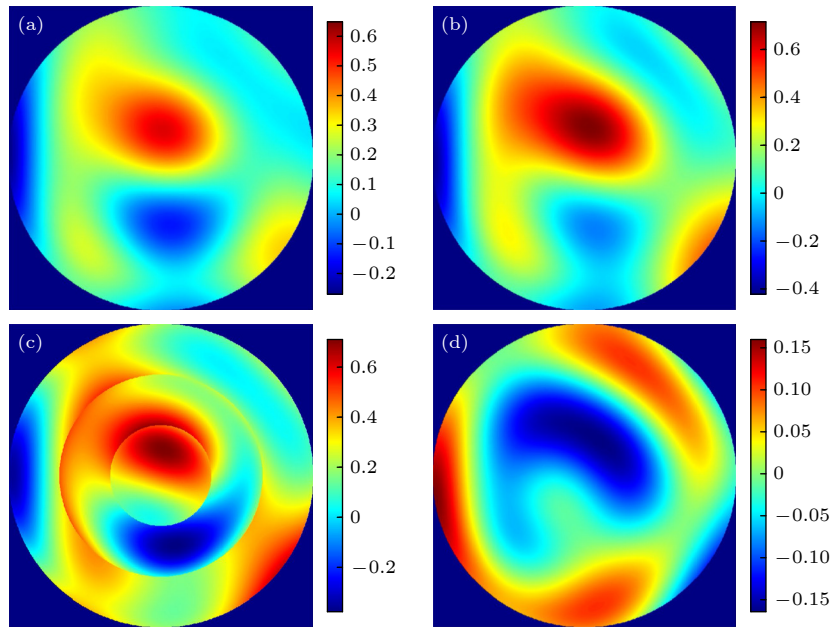


图 4 仿真实验的面形计算结果 (a) 圆形全口径面形计算结果; (b) 圆形全口径面形真值; (c) 圆形全口径面形与各子孔径测量误差的叠加 (原始测量值); (d) 圆形全口径面形的计算结果与真值的差值

Fig. 4. Surface calculation results of the simulation experiment: (a) Calculated results of the full-aperture surface; (b) true value of the full-aperture surface; (c) superposition of the full-aperture surface and measurement errors of each subaperture; (d) difference between the calculated result and true value of the full-aperture surface.

计算得到的全口径圆形泽尼克多项式系数和各子孔径环形泽尼克多项式系数结果如图 5 所示。由图 5 可以看到, 本文所提出的方法能够分别解算出全口径和子孔径的泽尼克多项式系数, 在面形特

征与测量误差中均包含平移、倾斜、离焦、像散、彗差、球差和三叶草像差时, 从上述像差项中分离出面形特征与测量误差分量。

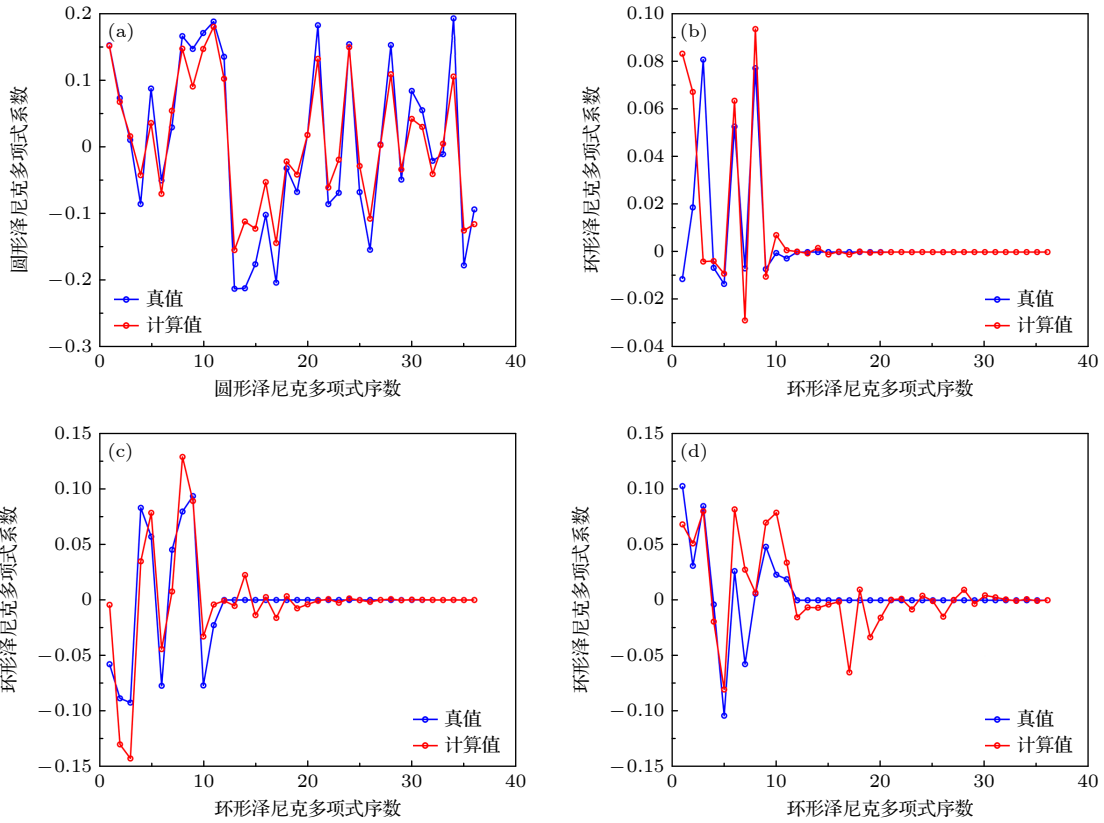


图 5 泽尼克多项式系数的计算值与真值对比 (a) 全口径圆形泽尼克多项式系数; (b) 第 1 子孔径环形泽尼克多项式系数; (c) 第 2 子孔径环形泽尼克多项式系数; (d) 第 3 子孔径环形泽尼克多项式系数

Fig. 5. Comparison between calculated and true values of Zernike polynomial coefficients: (a) Zernike polynomials coefficients of full-aperture; (b) annular Zernike polynomials coefficients of the 1st subaperture; (c) annular Zernike polynomials coefficients of the 2nd subaperture; (d) annular Zernike polynomials coefficients of the 3rd subaperture.

3.2 实验分析

开展本文所提出方法在实际大陡度非球面光学元件的环形子孔径拼接测量场景中应用性能的实验验证. 基于图 6 所示非球面环形子孔径拼接测量系统展开实验, 系统包含面形干涉仪和透射球面镜 (F/3.5, 焦距 525 mm), 以及一个可进行 6 维调整的工件台用以放置待测镜并完成轴向扫描. 待测镜为凸面非球面测量样件, 面形为旋转对称的二次曲面 [35], 直径 45 mm、顶点曲率半径 150 mm、圆锥常数 -48, 待测镜的非球面度 [30] 为 $63.2 \mu\text{m}$, 最大非球面度梯度为 $19.12 \mu\text{m}/\text{mm}$ [36], 该待测镜是面形梯度变化非常大的大陡度非球面镜 [36,37].

分别采用如下三种方案对待测镜进行测量以进行对比验证.

方案 1 使用本文所提出的基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的测量误差解耦拼接方案完成测量. 测量过程子孔径无重叠区

域; 全局优化函数构建中, 全口径圆形面形采用 36 项 Zernike Fringe 多项式进行拟合, 各环形子孔径采用 36 项环形泽尼克多项式进行拟合 (多项式排序与 Zernike Fringe 相同) 并在后续面形计算中作为测量误差进行扣除; 全局优化拟合计算使用梯度下降法.

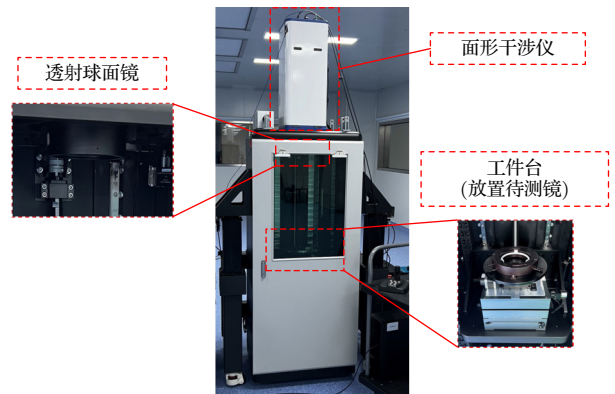


图 6 非球面环形子孔径拼接测量系统

Fig. 6. Aspheric surfaces measurement system based on annular subaperture stitching.

方案2 逐个环形子孔径进行面形测量和拼接。逐个获取各个环形子孔径面形的原始测量值;子孔径面形原始测量值采用36项环形泽尼克多项式进行拟合(多项式排序与Zernike Fringe相同),扣除被认为仅来自于测量误差的像差项(倾斜、离焦、

1—3阶像散、1—3阶彗差、1—3阶球差);子孔径间的重叠区域宽度为0.01 mm,仅用于拟合相对直流跃变量并进行扣除,进而完成全口径面形拼接测量。

方案3 基于重叠区域分析的环形子孔径拼接测量(如前文所述方法)。测量过程中,子孔径间

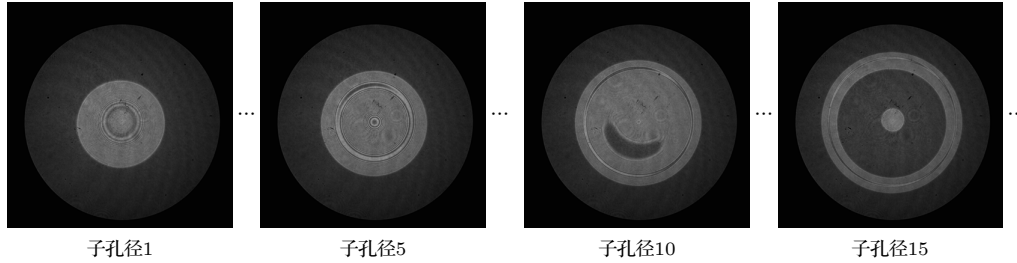


图7 各轴向扫描位置采集的干涉条纹

Fig. 7. Interferograms captured at each scanning position.

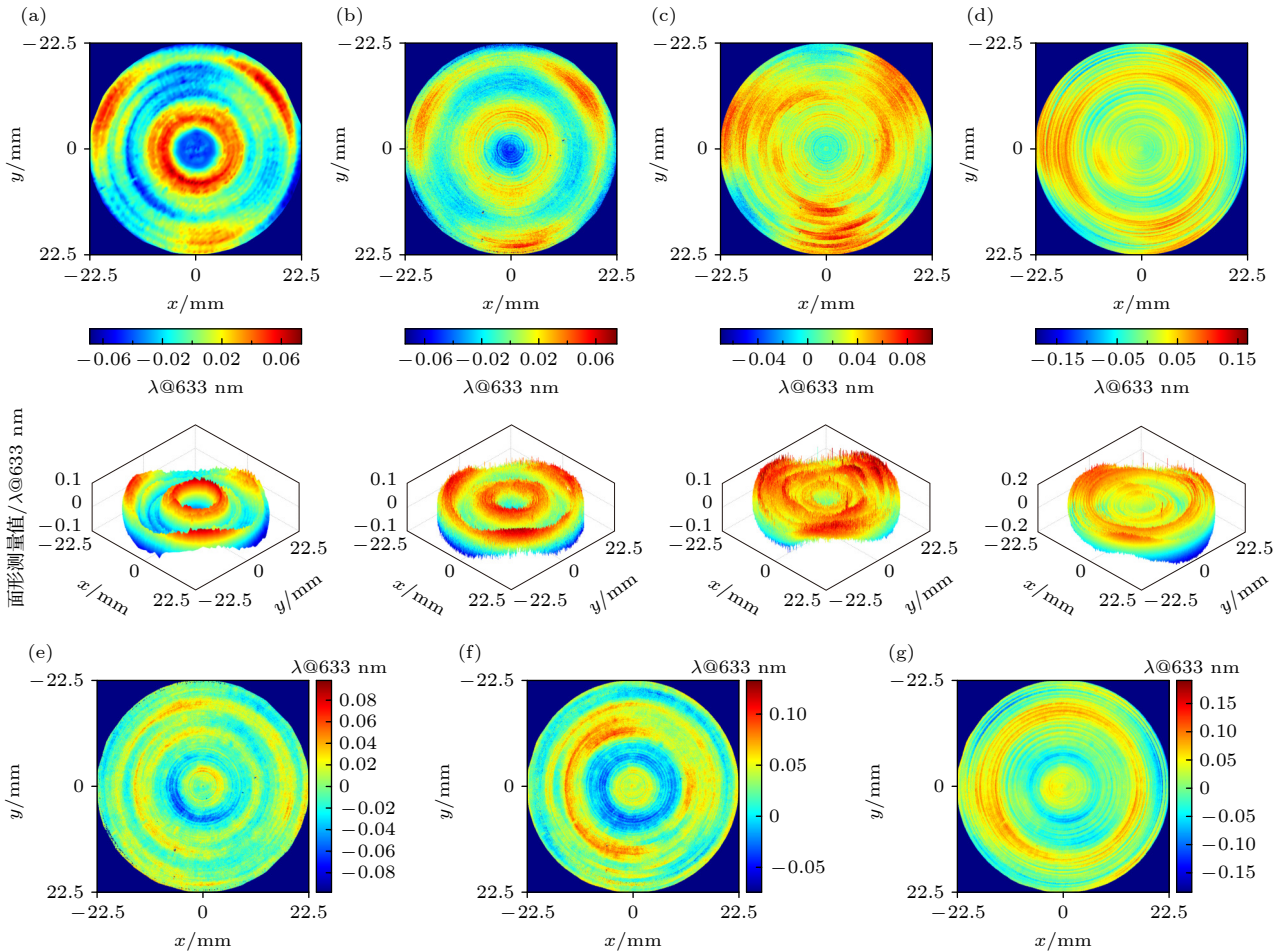


图8 非球面待测镜面形的参考测量结果以及使用方案1—3得到的拼接测量结果 (a) 参考测量结果; (b) 方案1(本文所提出的方法)的测量结果; (c) 方案2的测量结果; (d) 方案3的测量结果; (e) 图(b)结果与(a)结果的残差面形图; (f) 图(c)结果与图(a)结果的残差面形图; (g) 图(d)结果与图(a)结果的残差面形图

Fig. 8. Reference result of the aspheric surface and measurement results using Method 1-3: (a) Reference results; (b) measurement results of Method 1; (c) measurement results of Method 2; (d) measurement results of Method 3; (e) residual between the results of panel (b) and the results of panel (a); (f) residual between the results of panel (c) and the results of panel (a); (g) residual between the results of panel (d) and the results of panel (a).

的重叠区域宽度比例为 45%，并以第一子孔径为参考基准，逐个子孔径基于重叠区域面形差值的像差分析进行相对测量误差的计算和扣除，进而实现完整面形的拼接测量；重叠区域的面形差值采用 36 项环形泽尼克多项式进行拟合 (多项式排序与 Zernike Fringe 相同)，并认为全部像差项均来自于相对测量误差 (相对于前一子孔径)。

三种方案的测量过程中均包括 20 个轴向扫描位置和 20 个子孔径。各个子孔径干涉条纹如图 7 所示，可以看到由于待测镜陡度较大，条纹的干涉零位区域较窄、边缘条纹密度变化快速。边缘条纹密度超过相机的采样率或无回光因而无法进行测量，需通过子孔径拼接实现完整面形的测量。

待测镜面形的参考测量结果采用荷兰联合仪器 (Dutch United Instruments, DUI) 的 NMF600S 轮廓仪进行获取。使用不同方案的测量结果与该参考结果进行比对，验证所提出方法的有效性。

参考测量结果与三种方案的测量结果如图 8—图 10 所示。方案 1 (本文所提出方法) 的测量结果与参考测量结果更加接近，拼接缝影响较小、测量面形更平滑，且待测镜的三叶草形特征在各子孔径间分布一致。方案 2 的测量结果中拼接缝较为明显

(图 10) 且各子孔径间的三叶草形特征方向分布存在不一致的情况，这是由于面形特征与测量误差中均存在三叶草形特征，若不解耦会引入方向分布不一致的三叶草形测量误差并影响子孔径间面形特征的连续性；若强行扣除三叶草像差则会导致面形特征误剔除。方案 3 通过相邻子孔径的重叠区域对比分析并扣除测量误差，相较方案 2 减小了三叶草形测量误差的影响，但存在高阶球差等形式的计算误差累积，导致拼接缝在全口径尤其是外圈区域较为明显 (如图 10 所示)。

将方案 1—3 的面形测量结果与参考测量结果进行比较以量化分析三种方案的测量精度。计算方案 1—3 的面形测量结果与参考测量结果的残差，并计算三组残差面形的 PV_r (稳健峰谷值)^[38]。 PV_r 是一种可靠的圆形口径面形测量精度的评价方法，适合于进行不同仪器间面形测量结果的比对，相对于参考面形的 PV_r 值越小代表测量精度越高。 PV_r 的计算式为^[38]

$$PV_r = PV_{36Zernikes} + 3 \times \sigma_{36ZernikeResid} \quad (23)$$

其中 $PV_{36Zernikes}$ 为残差的 36 项泽尼克多项式拟合面形的 PV 峰谷值， $\sigma_{36ZernikeResid}$ 为残差去除 36 项泽尼克多项式拟合面形后的残差的 RMS 值。

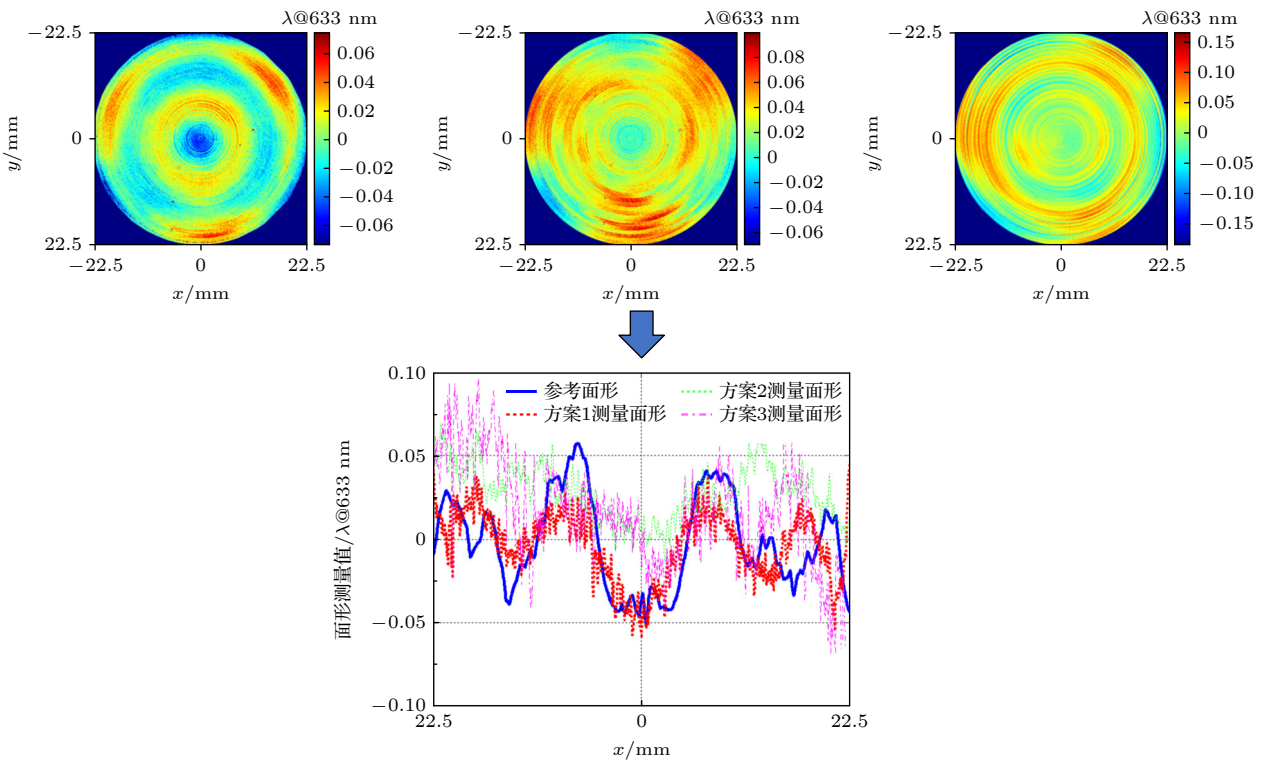


图 9 待测镜面形的参考测量结果和方案 1—3 的测量结果中红色虚线处像素的测量值曲线

Fig. 9. Measurement value curves of pixels at the red dashed line in the measurement results of the aspheric surface.

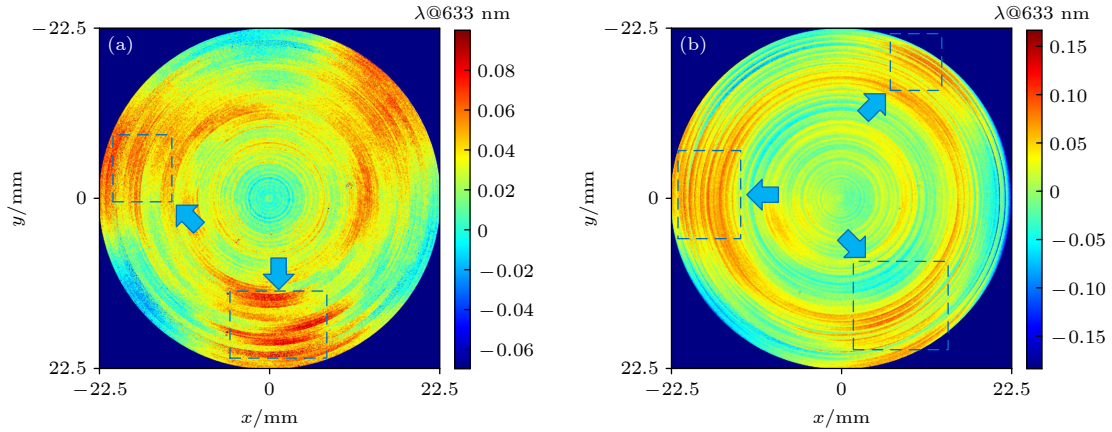


图 10 方案 2 和 3 的测量结果中比较明显的拼接缝位置, 如图中箭头和虚线框指向处所示 (a) 方案 2; (b) 方案 3
Fig. 10. Stitching seam positions in the measurement results of Method 2 and 3: (a) Method 2; (b) Method 3.

如图 11 所示为方案 1—3 的测量结果相对于参考测量结果的 PV_r , 可以看到方案 1 的测量结果具有最小的 PV_r 值, 在本文实验中相对其他方案测量精度可提升接近 30%.

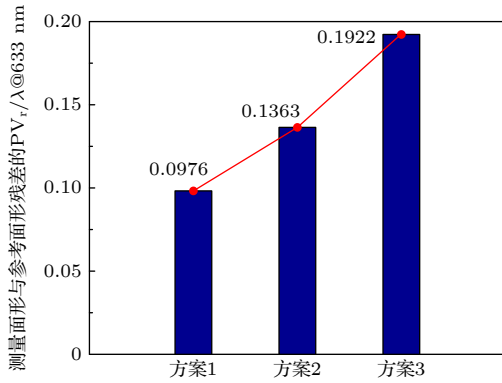


图 11 方案 1—3 的测量结果相对于参考测量结果的 PV_r
Fig. 11. Comparison of PV_r values of residuals between measurement results of Method 1-3 and reference results.

进一步分析测量过程中全口径与子孔径的泽尼克多项式拟合情况. 图 12 呈现了全口径与各子孔径的部分泽尼克多项式系数曲线, 分别展示了对环形子孔径面形原始测量值直接拟合所得的泽尼克系数 (拟合结果包含面形特征与测量误差), 以及通过本文全局优化拟合计算得到的泽尼克系数 (仅反映测量误差), 两种拟合结果的差异源于其表征特征的来源不同, 验证了本文所提出方法的误差解耦能力. 此外可以看到, 在全口径和各子孔径面形的原始测量值中包含同类型的像差项, 因此若不对同类型像差项中的面形特征和测量误差进行解耦, 将无法计算并得到准确的面形测量结果; 存

在误差耦合情况的像差项不能直接扣除, 而基于重叠区域分析和拼接的方案中, 作为参考基准的首个子孔径面形的原始测量值同样可能包含较高阶的测量误差并存在误差耦合 (如图 12 所示第一个子孔径分别计算出各阶球差、彗差、像散、三叶草像差特征的面形分量和测量误差), 导致对正确面形测量结果的获取产生干扰; 本文所提出的方法则实现了面形特征与测量误差的分离并得到了更为准确的测量面形.

在上述仿真和实验验证分析中, 本文所提出的方法均实现了待测镜面形特征与子孔径测量误差的解耦, 并完成了像差扣除、获得了高精度测量结果. 在仿真分析中, 通过量化的全口径面形与子孔径测量误差的泽尼克多项式系数拟合结果, 展示了对两者的分离能力; 在实验分析中, 展示了所提出方法在实际非球面待测镜测量场景中的测量能力, 相较于传统测量方法得到了更为准确的测量结果, 在本文实验中 PV_r 精度提升近 30%. 此外, 本文方法也展示了其无需依赖重叠区域即可完成拼接测量的特性. 上述结果展示了其在实际非球面测量场景中的有效性与适用性.

4 结 论

针对大非球面度、大陡度非球面光学元件环形子孔径拼接测量中影响显著的面形特征与测量误差的耦合问题, 本文提出了一种基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的非球面测量误差解耦技术. 通过构建全口径与子孔径泽尼克多

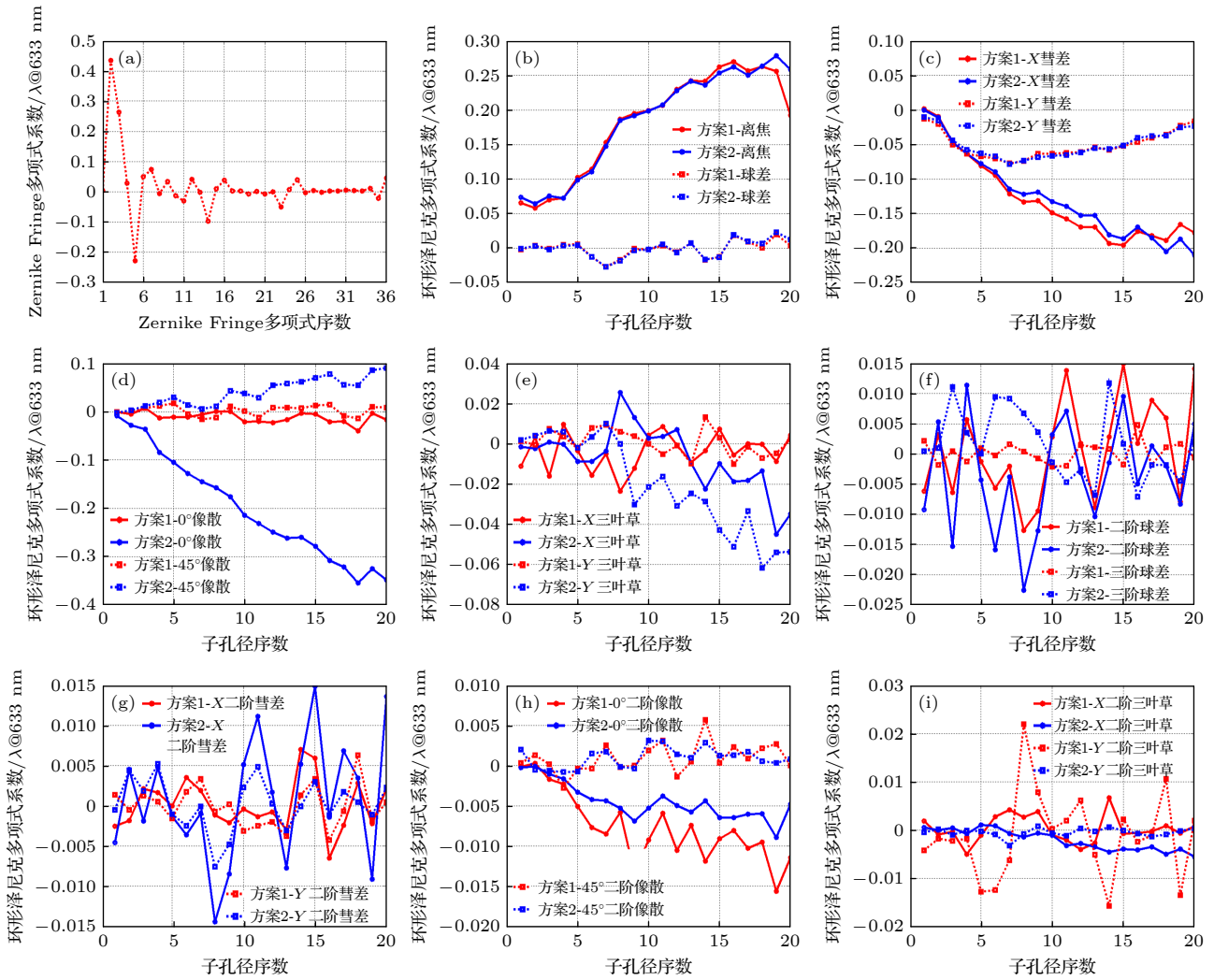


图 12 全口径和各子孔径泽尼克多项式系数曲线 (a) 全口径 36 项 Zernike Fringe 多项式系数; (b) 子孔径离焦和球差项系数; (c) 子孔径彗差项系数; (d) 子孔径像散项系数; (e) 子孔径三叶草像差项系数; (f) 子孔径高阶球差项系数; (g) 子孔径二阶彗差项系数; (h) 子孔径二阶像散项系数; (i) 子孔径二阶三叶草像差项系数

Fig. 12. Zernike polynomial coefficient curves for full aperture and subapertures: (a) 36-term Zernike polynomial coefficients in full-aperture; (b) defocus and spherical aberration coefficients in subapertures; (c) coma coefficients in subapertures; (d) astigmatism coefficients in subapertures; (e) trefoil aberration coefficients in subapertures; (f) higher-order spherical aberration coefficients in subapertures; (g) second-order coma coefficients in subapertures; (h) second-order astigmatism coefficients in subapertures; (i) second-order trefoil aberration coefficients in subapertures.

项式的全局优化模型, 同步拟合全口径面形特征与局部测量误差, 实现二者解耦合并提升拼接测量精度. 仿真与实验结果表明, 该方法可有效地分离待测镜面形特征与子孔径测量误差并准确扣除测量误差, 避免传统方法中参考基准误差与子孔径误差累积问题, 实现面形测量精度提升, 在本文实验中 PV_r 精度较传统方法可提高近 30%. 此外, 该技术无需依赖于子孔径重叠区域, 可减少子孔径数量, 提升测量效率. 该方法展示了其实现测量误差解耦的解算能力, 并在实际大陡度非球面光学元件的测量中展现了其应用潜力, 未来将进一步优化提升计

算与测量精度, 并针对测量误差占比大、子孔径误差特征连续或一致、像差组成不满足稀疏假设等场景开展性能优化, 同时改进全局拟合函数、约束条件及迭代计算方法, 拓展技术的适用性.

参考文献

- [1] Zhang L 2016 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [张磊 2016 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [2] Kitchel M F 2009 *Proc. SPIE* **7389** 738916
- [3] Yan L S 2015 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: China University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese

- Academy of Science)) (in Chinese) [闫力松 2015 博士学位论文 (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))]
- [4] Kim C J 1982 *Appl. Opt.* **21** 4521
- [5] Yan L S, Wang X K, Luo X, Zheng L G, Zhang X J 2013 *Infrared Laser Eng.* **42** 1793 (in Chinese) [闫力松, 王孝坤, 罗霄, 郑立功, 张学军 2013 *红外与激光工程* **42** 1793]
- [6] Wang N 2013 *M. S. Thesis* (Chengdu: China University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences)) (in Chinese) [王宁 2013 硕士学位论文 (成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所))]
- [7] Liu Y M, Lawrence G N, Koliopoulos C L 1988 *Appl. Opt.* **27** 4504
- [8] Melozzi M, Pezzati L, Mazzoni A 1993 *Opt. Eng.* **32** 5
- [9] Fleig J, Dumas P, Murphy P E, Forbes G W 2003 *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies* San Diego, California, United States, August 3–8, 2003 p296
- [10] Wang X K, Zhang X J, Wang L H, Zheng L G 2006 *Opt. Precis. Eng.* **14** 527 (in Chinese) [王孝坤, 张学军, 王丽辉, 郑立功 2006 *光学精密工程* **14** 527]
- [11] Wang X K, Zheng L G, Zhang X J 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 2022 (in Chinese) [王孝坤, 郑立功 张学军 2010 *光学学报* **30** 2022]
- [12] Chen S Y, Xue S, Wang G L, Tian Y 2017 *Opt. Commun.* **390** 61
- [13] Hou X, Wu F, Yang L, Wu S B, Chen Q 2006 *Appl. Opt.* **45** 3442
- [14] Wen Y, Cheng H 2015 *Optik* **126** 2236
- [15] Hao Q, Ning Y, Hu Y 2018 *Metrol. Meas. Tech.* **38** 1 (in Chinese) [郝群, 宁妍, 胡摇 2018 *计测技术* **38** 1]
- [16] Hou X, Wu F, Yang L, Chen Q 2007 *Opt. Express* **15** 12890
- [17] Henselmans R 2009 *Ph. D. Dissertation* (Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven)
- [18] <https://metrology.mahr.com/en-us/news-events/newsroom/item/testing-double-sided-optical-elements-with-the-marsurfl-260-aspheric-3d/> [2025-6-30]
- [19] <https://www.taylor-hobson.com.cn/products/non-contact-3d-optical-profilers/luphos/> [2025-6-30]
- [20] <https://www.optipro.com/optical-measuring/ultrasurf-5x/> [2025-6-30]
- [21] Lu Y J, Tang F, Wang X Z, Guo F D 2018 *Chin. J. Laser.* **45** 0404002 (in Chinese) [卢云君, 唐锋, 王向朝, 郭福东 2018 *中国激光* **45** 0404002]
- [22] Hou X, Wu F, Yang L, Wu S B, Chen Q 2005 *Opto-Electron. Eng.* **32** 20 (in Chinese) [侯溪, 伍凡, 杨力, 吴时彬, 陈强 2005 *光电工程* **32** 20]
- [23] Beisswanger R, Weckerle M, Pruss C, Reichelt S 2022 *Opt. Express* **30** 25803
- [24] Gronle A, Pruss C, Herkommer A 2022 *Opt. Express* **30** 797
- [25] Niu K, Tian C 2022 *J. Opt.* **24** 123001
- [26] Zhai T B 2020 *M. S. Thesis* (Shanghai: Donghua University) (in Chinese) [翟天保 2020 硕士学位论文 (上海: 东华大学)]
- [27] Mahanjan V N 1981 *J. Opt. Soc. Am. A* **71** 75
- [28] Hou X, Wu F, Yang L, Chen Q 2006 *Appl. Opt.* **45** 8893
- [29] Fan X H 2019 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: China University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences)) (in Chinese) [樊孝贺 2019 博士学位论文 (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))]
- [30] Zhu L M 2009 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [朱黎明 2009 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [31] Qiao Y J, Tan J B, Wang W B 2008 *J. Optoelectron. Laser* **19** 1497 (in Chinese) [乔玉晶, 谭久彬, 王伟波 2008 *光电子·激光* **19** 1497]
- [32] Xue D, Zheng L, Zhang X 2005 *Optical Design and Testing II* Beijing, China, November 8–11, 2004 p752
- [33] Robbins H, Monro S 1951 *Ann. Math. Stat.* **22** 400
- [34] Bertsekas D P, Tsitsiklis J N 2000 *SIAM J. Optim.* **10** 627
- [35] Forbes G W 2007 *Opt. Express* **15** 5218
- [36] Wang X J 2023 *M. S. Thesis* (Hefei: Hefei University of Technology) (in Chinese) [王秀娟 2023 硕士学位论文 (合肥: 合肥工业大学)]
- [37] He L, Wu Z H, Kang Y, Su Z D 2016 *Laser Optoelectron. Prog.* **53** 122201 (in Chinese) [何丽, 武中华, 康燕, 苏志德 2016 *激光与光电子学进展* **53** 122201]
- [38] Evans C J 2009 *Opt. Eng.* **48** 043605

Aspherical measurement error decoupling technology based on global optimal fitting of full-aperture surface shape features and local measurement errors^{*}

WANG Weihao WANG Yongjie WANG Yahui

WU Zhou ZHANG Wenxi[†]

(*Department of Optical Precision Measurement Technology, Aerospace Information Research Institute,*

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(Received 1 July 2025; revised manuscript received 17 August 2025)

Abstract

Aspheric optical elements are essential in high-end manufacturing and scientific research. As precision demands increase, the coupling of surface features and measurement errors during high-asphericity and high steepness element measurement based on annular subaperture stitching limits the development of high-precision measurement.

The coupling of surface features and measurement errors refers to that for high-steepness aspheric element to be measured, the measurement errors caused by retrace errors correspond to higher-order aberration features, which are likely to be consistent with the surface features, and this coupling makes it impossible to eliminate measurement errors by subtracting Zernike terms during full-aperture surface stitching measurement, because this would lead to the incorrect subtraction of surface features. The traditional overlapping-region based subaperture stitching method encounters two major problems: the error of the first subaperture, which serves as the reference, cannot be decoupled, and the error accumulation caused by a large number of subapertures will seriously affect measurement accuracy, especially when measuring high-steepness aspheric element.

To solve the error coupling problem, this work proposes an aspherical measurement error decoupling technology based on global optimal fitting of full-aperture surface shape features and local measurement errors. This method takes advantage of the continuity of the full-aperture surface shape features of the aspheric surface of all subapertures and the discontinuity of the measurement errors of each subaperture. The method uses full-aperture circular and subaperture annular Zernike polynomials to build a global optimization model, where the former represents surface features and the latter describes subaperture errors; in addition, an L1 regularization term is added. By integrating these polynomials to create a global optimization function and solving for Zernike coefficients, the full-aperture surface shape features and the measurement errors of each subaperture can be solved separately (corresponding to the coefficients of the Zernike polynomials), and error decoupling and enhanced accuracy can be achieved. Furthermore, processing errors can globally avoid error accumulation in the traditional method and reduce the number of subapertures for higher measurement efficiency.

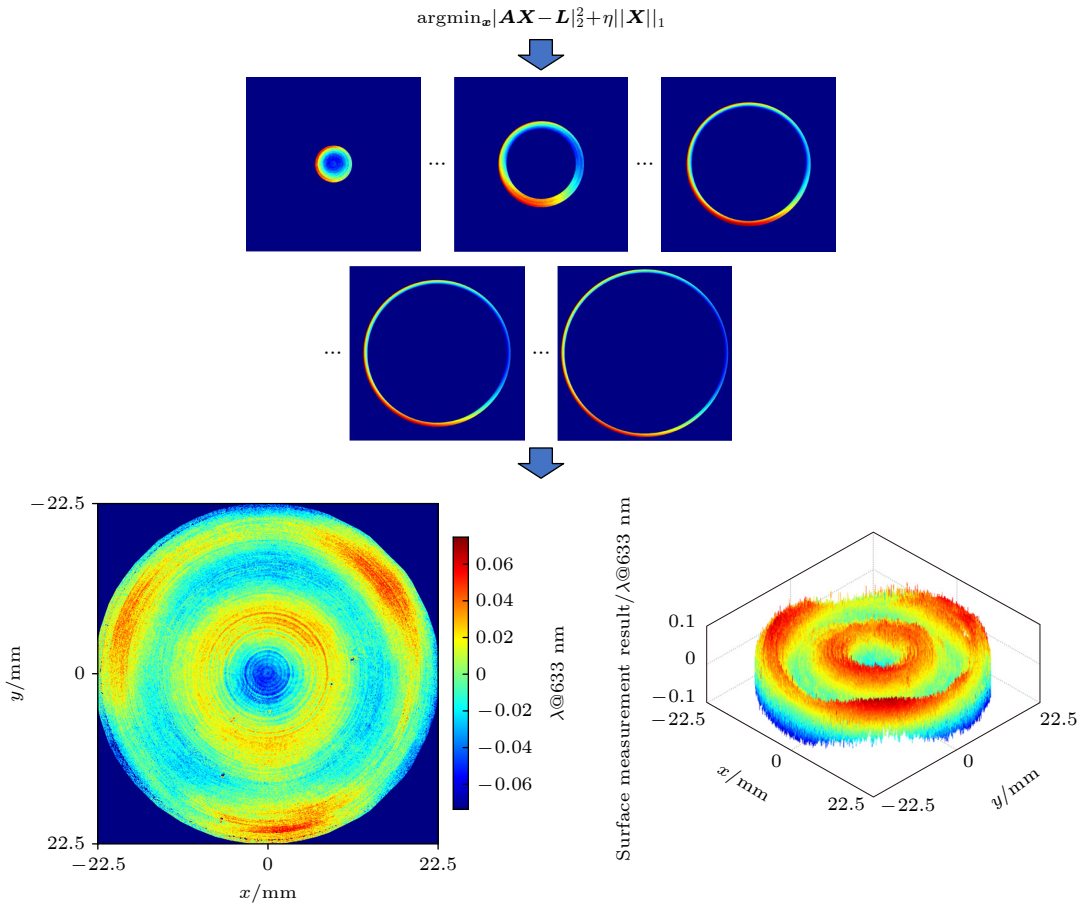
Simulation and experimental validations are demonstrated in this paper. In the simulation experiment, the full-aperture surface features of the aspheric surface to be measured and the measurement errors of each subaperture are generated separately by using Zernike polynomials and the method proposed in this paper. The results are shown below. The full-aperture surface shape features and the subaperture measurement errors are solved separately; the correct surface measurement results after measurement error decoupling are obtained; the

^{*} Project supported by the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 2023132).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangwx@aircas.ac.cn

calculated results are compared with the true values of the Zernike coefficients of the surface shape features and measurement errors used in the simulation to verify the accuracy. The simulation shows effective fitting of Zernike polynomial coefficients and error decoupling. In the experimental verification, an aspheric measurement system is built, and a high-steepness aspheric element is used as the measurement target (a convex aspheric surface, a rotationally symmetric quadratic surface with a diameter of 45 mm, a vertex curvature radius of 150 mm, a conic constant of -48 , an asphericity of $63.2 \mu\text{m}$, and a maximum asphericity gradient of $19.12 \mu\text{m}/\text{mm}$). The method proposed in this work and the traditional methods are compared with each other, and a profilometer is used to obtain the measurement results as reference result. Experiments show that the error decoupling in measurement of high-asphericity and high steepness elements is achieved with the proposed method, and the PV_r accuracy of measurement is $0.0976\lambda@633 \text{ nm}$, improved by nearly 30% compared with traditional methods.

The proposed method provides a practical solution for high-precision measurement of high-asphericity and high steep components in solving the problem of measurement error coupling. Future research will further explore the application value of the proposed method in aspheric processing, especially in achieving performance optimization in various specific measurement scenarios.



Keywords: optical surface measurement, asphere, subaperture stitching, global stitching

PACS: 07.60.Ly, 07.85.Fv, 02.60.Pn

DOI: [10.7498/aps.74.20250866](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250866)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250866](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250866)



基于全口径面形特征与局部测量误差全局优化拟合的非球面测量误差解耦技术

王炜豪 王永杰 王亚慧 伍洲 张文喜

Aspherical measurement error decoupling technology based on global optimal fitting of full-aperture surface shape features and local measurement errors

WANG Weihao WANG Yongjie WANG Yahui WU Zhou ZHANG Wenxi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 210701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250866

CSTR: 32037.14.aps.74.20250866

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250866>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于平行平板电极的非球面双液体透镜的仿真与实验分析

Simulation and experimental analysis of aspherical double-liquid lens based on parallel plate electrode

物理学报. 2023, 72(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230994>

基于平面电极的非球面双液体透镜的设计与分析

Design and analysis of aspherical double-liquid lens based on planar electrode

物理学报. 2023, 72(15): 154206 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230758>

光电倍增管时间测量误差补偿方法研究

Method of compensating for time measurement error of photomultiplier tube

物理学报. 2022, 71(22): 222901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221193>

基于全局拟合的多普勒差分干涉仪成像漂移检测方法

A method of monitoring image shift based on global fitting Doppler heterodyne interferometer

物理学报. 2025, 74(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250027>

一种基于离散数据从局部到全局的网络重构算法

Discrete data based local-to-global network reconstruction algorithm

物理学报. 2021, 70(8): 088901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201756>

基于分段边缘拟合的测风多普勒差分干涉仪成像热漂移监测方法

Thermal imaging drift monitoring of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for wind measurement based on segmented edge fitting

物理学报. 2022, 71(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212086>