

文章编号 1004-924X(2026)09-1400-11

基于灵敏度矩阵的高阶非球面自动干涉检测

郭乃泉^{1,2,3}, 周 满^{1,2,3}, 张 鑫^{1,2,3}, 李明茁^{1,2,3}, 胡海翔^{1,2,3*}, 薛栋林^{1,2,3*}

(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;

3. 光学系统先进制造国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 高阶非球面高精度干涉检测是超精密光学加工的关键环节。传统手动干涉检测依赖专家经验, 效率低且难以满足批量化检测需求。为此, 基于刚体运动学与 Fringe Zernike 像差理论, 推导了旋转对称面形的五自由度灵敏度函数严格表达式, 对高阶非球面采用数值求积完成 Zernike 投影积分, 避免了常规解析方法的低阶近似截断, 仅需面形矢高参数即可完成建模, 且无需经验标定或完整光学系统建模; 针对传统最小二乘法无法解决面形误差与失调像差耦合的问题, 提出一种加权最小二乘反演策略, 通过增加权重因子对关键模态动态调整, 有效抑制了面形误差对位姿反演的耦合污染, 提高了检测精度。实验结果表明, 已知失调量验证中五自由度校正误差不超过 3.5%, 未知失调量验证中传统方法无法正常收敛, 光路失调引入的 RMS 误差为 0.113 λ , 加权最小二乘经 2 次迭代后收敛, 光路失调引入的 RMS 误差为 0.004 λ ($\lambda=632.8$ nm)。该方法为高阶非球面批量化干涉检测提供了高效可靠的解决方案。

关键词: 非球面检测; 灵敏度矩阵; 加权最小二乘; 自动对准

中图分类号: TN247; TH744 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20263409.1400 CSTR: 32169.14.OPE.20263409.1400

Automatic null testing of high-order aspheric surfaces based on sensitivity matrix

GUO Naiquan^{1,2,3}, ZHOU Man^{1,2,3}, ZHANG Xin^{1,2,3}, LI Mingzhuo^{1,2,3},

HU Haixiang^{1,2,3*}, XUE Donglin^{1,2,3*}

(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;

3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: hhx@ciomp.ac.cn; xuedl@ciomp.ac.cn

Abstract: High-precision interferometric testing of high-order aspheric surfaces is a critical step in ultraprecision optical fabrication. Conventional manual interferometric testing relies heavily on expert experience, suffers from low efficiency, and fails to meet the requirements of batch inspection. To address these limitations, exact five-degree-of-freedom sensitivity functions for rotationally symmetric surfaces are derived based on rigid-body kinematics and Fringe Zernike aberration theory. For high-order aspherics, Zernike

收稿日期: 2026-02-14; 修订日期: 2026-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62127901, No. 62305333)

projection integrals are evaluated using numerical quadrature, thereby avoiding the low-order truncation inherent in conventional analytical approaches. The proposed model requires only sag equation parameters as input and eliminates the need for empirical calibration or complete optical system modeling. To resolve the coupling between surface figure errors and misalignment-induced aberrations that cannot be effectively separated by standard least-squares methods, a weighted least-squares inversion strategy is introduced. In this approach, weight factors are applied to dynamically regulate the contributions of critical modes, thereby suppressing the influence of inherent figure errors on pose estimation and improving overall testing accuracy. Experimental results demonstrate that, in known-misalignment verification, correction errors for all five degrees of freedom remain within 3.5%. In unknown-misalignment verification, the conventional method fails to converge, yielding a misalignment-induced residual of $\text{RMS}=0.113\lambda$, whereas the proposed weighted least-squares method converges within two iterations and reduces the residual to $\text{RMS}=0.004\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$). The proposed method provides an efficient and reliable solution for batch interferometric testing of high-order aspheric surfaces.

Key words: aspheric testing; sensitivity matrix; weighted least-squares; automatic alignment

1 引言

非球面光学元件广泛应用于光刻、精密测量及医学成像等高端光学系统^[1-3]。随着高阶非球面的日益普及,面形计量精度要求持续提升^[4]。菲索干涉结合计算机生成全息图(Computer-Generated Hologram, CGH)零位补偿技术已成为非球面面形检测的主流方案^[5-8],但该技术对位姿失调极为敏感,微弧度量级的位姿失准可能会引入较大的系统误差,污染面形测量结果^[9-11]。传统手工对准依赖经验反复试错,费时费力且难以满足非球面批量检测的效率需求,故亟需实现检验光路的自动化对准与检测^[12-13]。

位姿失调量较小的情况下,位姿偏差与波前像差近似线性,可通过灵敏度矩阵建立定量映射模型,根据检测的像差信息反演失调量,并驱动调整机构进行闭环调整。建模与反演是其中的两个核心环节。建模方法中,经验标定法通过单步长标定获取各轴灵敏度,原理直观但步长选取敏感且配置变更时需重新标定,通用性较差^[12-13]。数值光线追迹法^[14]依赖完整的光学系统建模,工作量大,不适于频繁切换配置的生产场景。解析法^[15-17]多采用低阶项近似,引入高阶项时需级数截断,导致误差增大,且投影积分难以获得准确结果,不适用于高阶非球面。位姿反演解耦多采用普通最小二乘法,但该方法未考虑实测 Zernike 系数中面形误差与失调像差的耦合——粗加工

阶段低阶面形误差显著,精加工阶段高阶面形误差突出,等权处理将导致位姿校正量偏离真实值,导致自动干涉检测时出现收敛速率慢或者振荡发散等问题。

针对上述不足,本文提出一种适用于高阶非球面的闭环自动检测方法。基于刚体运动学推导适用于旋转对称面形的灵敏度函数严格表达式,对高阶非球面采用数值求积完成 Zernike 投影积分,兼具解析推导的严谨性与数值计算的灵活性,仅需面形参数即可完成建模,无需经验标定或完整系统建模。同时,引入加权最小二乘算法,依据不同需求调节 Zernike 系数权重,有效抑制面形误差对位姿反演的影响。将上述算法与计算机控制方法结合,实现检验光路的闭环自动检测,为高阶非球面批量化检测提供高效可靠的自动对准方案。

2 原理

2.1 旋转对称面形的灵敏度函数

试探法无需准确模型,通过参数调整可实现快速干涉检测,但被控对象改变后,原有控制参数可能导致收敛效率降低,甚至振荡发散。机器学习等算法过于复杂,且需要大量的数据做支撑,而非球面光学元件多为定制产品,实现难度较大。为此,本文从干涉检测原理出发,建立像差与失调量之间的定量关系模型,提高系统稳

定性。

干涉检测获得的波像差 $W(x, y)$ 包含被检镜实际面形误差 $W_m(x, y)$ 与位姿失调引入的误差 $W_a(x, y)$, 即:

$$W(x, y) = W_m(x, y) + W_a(x, y). \quad (1)$$

为从测量数据中分离失调误差, 提高控制精度, 需要建立位姿失调与波前像差之间的定量关系。设被检镜位姿参数矢量为 $\boldsymbol{p} = [t_x, t_y, t_z, \theta_x, \theta_y]^T$, 其中 t_x, t_y, t_z 为沿各坐标轴的平移量, θ_x, θ_y 为绕 x 轴和 y 轴的旋转角。波前像差采用 Fringe Zernike 多项式表征, 系数矢量记为 \boldsymbol{c} 。在小失调范围内, 两者满足线性关系:

$$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{J} \cdot \Delta \boldsymbol{p}, \quad (2)$$

其中: $J_{ij} = \partial c_i / \partial p_j$, 表示第 j 个位姿参数对第 i 个 Zernike 系数的影响。

灵敏度矩阵是自动干涉检测的核心, 一般旋转对称光学表面由非球面矢高方程描述:

$$z = f(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum A_{2i}(x^2 + y^2)^i, \quad (3)$$

其中: $c = 1/R$ 为顶点曲率, κ 为圆锥常数, A_{2i} 为高阶非球面系数。

基于刚体运动学与表面法线投影, 可推导波前对全部 5 个位姿参数的灵敏度函数。当被检镜发生微小刚体位移时, 其表面各点产生位移矢量, 该位移在表面法线方向的投影即为波前的光程变化。设表面上一点 (x, y, f) 处的法线矢量为:

$$\boldsymbol{n} = \frac{\left(-\frac{\partial f}{\partial x}, -\frac{\partial f}{\partial y}, 1\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}. \quad (4)$$

对于平移自由度, 位移矢量为常矢量 $\boldsymbol{d} = (d_x, d_y, d_z)$, 波前变化为位移与法线的内积:

$$\Delta W = \boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{n}. \quad (5)$$

对于旋转自由度, 绕 x 轴转动 θ_x 时, 表面点的位移矢量为 $\boldsymbol{d} = \theta_x \times (0, -f, y)$, 同理绕 y 轴转动可得相应位移。将上述位移分别投影至法线方向, 并对旋转对称面形 $f(r)$ 作极坐标展开, 即得各自自由度的灵敏度函数。设表面法线 z 分量为

$n_z = 1 / \sqrt{1 + \nabla f^2}$, 则 3 个平移自由度对应的灵敏度函数为:

$$\frac{\partial W}{\partial t_x} = -\frac{n_z \cdot \partial f}{\partial x}, \quad \frac{\partial W}{\partial t_y} = -\frac{n_z \cdot \partial f}{\partial y}, \quad \frac{\partial W}{\partial t_z} = n_z. \quad (6)$$

两个旋转自由度对应的灵敏度函数为:

$$g_{\theta_x} = y \cdot n_z + f \cdot \frac{\partial f}{\partial y} \cdot n_z, \quad g_{\theta_y} = -x \cdot n_z - f \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \cdot n_z. \quad (7)$$

式(6)和式(7)中, f 及其偏导数均由式(3)确定, 适用于任意旋转对称面形, 未做任何近似截断。

灵敏度矩阵元素通过将上述灵敏度函数投影至 Zernike 基底获得, 即:

$$J_{ij} = \frac{(2 - \delta_{m,0})(n_i + 1)}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} g_j(\rho, \varphi) \cdot Z_i(\rho, \varphi) \cdot \rho d\rho d\varphi, \quad (8)$$

其中: $g_j = \partial W / \partial p_j$ 为灵敏度函数, n_i 和 m_i 分别为 Zernike 多项式的径向阶数和角向阶数, δ_{m_i} 为 Kronecker 函数 ($m_i = 0$ 时取 1, 否则取 0), $\rho = r/a$ 为归一化径向坐标, a 为光瞳半径。

对上述模型进行退化验证。当 $\kappa = 0$, $A_{2i} = 0$ 时, 模型退化为球面, 所得倾斜和离焦灵敏度与经典球面像差理论一致; 当 $R \rightarrow \infty$, $A_{2i} = 0$ 时, 模型退化为平面, 平移灵敏度均为零, 仅旋转产生与光瞳半径成正比的倾斜响应, 与已有文献结论相符。

对于高阶非球面镜, 式(8)的投影积分不存在闭式解, 本文采用数值计算。高阶非球面的灵敏度矩阵呈现密集耦合特性: 横向平移 t_x 与转动 θ_y 在倾斜与彗差上产生相似响应, 轴向平移 t_z 同时激励离焦与球差, 难以通过单一 Zernike 模态对各运动轴进行准确解耦, 需利用多个 Zernike 模态联立超定方程组, 通过最小二乘法联合反演求解位姿失调量。

2.2 加权最小二乘反演解算

为准确反演位姿失调量, 引入最小二乘法 (Least Squares, LS), 依据灵敏度矩阵 \boldsymbol{J} 和 Zernike 系数对位姿失调量进行反演计算。标准最小二乘给出的位姿校正量为:

$$\Delta \boldsymbol{p} = \boldsymbol{J}^+ \boldsymbol{c}, \quad (9)$$

其中: \boldsymbol{J}^+ 为 \boldsymbol{J} 的伪逆。然而, 干涉测量获得的

Zernike 系数 c 并非仅由失调引起,还包含被检镜本身的面形误差。由于被检镜的真实面形在检测前未知,标准最小二乘在总体 RMS 最小意义下求解位姿校正量,无法对不同 Zernike 模态进行差异化处理。然而,不同模态中失调贡献占比存在差异;以 CGH 零位补偿为例,设计球差已被完全补偿,实测球差主要源于失调;而离焦同时包含失调与面形固有成分,耦合程度更高。这种差异为权重的差异化选取提供了物理依据。

为此,引入对角权重矩阵 W 对不同 Zernike 模式进行差异化加权,位姿校正量由加权最小二乘 (Weighted Least Squares, WLS) 给出:

$$\Delta p = (J^T W J)^{-1} J^T W c. \quad (10)$$

这等价于最小化加权残差 $|W^{1/2}(c - J\Delta p)|^2$ 。本文采用二级权重策略:对失调贡献占主导的模态赋高权重 W ,其余设为 1。关键模态依据检测光路的补偿设计判定,无需面形先验信息。 W 仅需满足远大于其余模态权重的条件,即可有效抑制耦合偏差,对具体取值不敏感。该策略在优先

保证目标模态校正精度的同时,还可改善灵敏度矩阵的条件数,提高反演的数值稳定性。

本文选取 6 个低阶 Zernike 项作为反馈信号,遵循 Fringe 索引约定,分别为倾斜、离焦、彗差和初级球差。活塞项不参与反演,当需要针对特定面形提高可观测性时,可根据加工需求添加相应高阶项。

2.3 自动干涉检测策略

为实现元件的自动干涉检测,同时提高系统的普适性,本文基于灵敏度矩阵模型与加权反演方法,提出一种自动干涉检测控制策略,控制策略如图 1 所示。

自动干涉检测系统主要包括图像采集模块、位姿调整机构、面形解算模块、位姿解耦模块及多轴协同控制器等。图像采集模块主要用于干涉条纹图的采集,并将处理后干涉检测信息发送至面形解算模块,解算当前面形。根据当前面形等信息,位姿解耦模块进行元件位姿解耦,并将解耦后位姿信息发送至多轴协同控制器,控制位

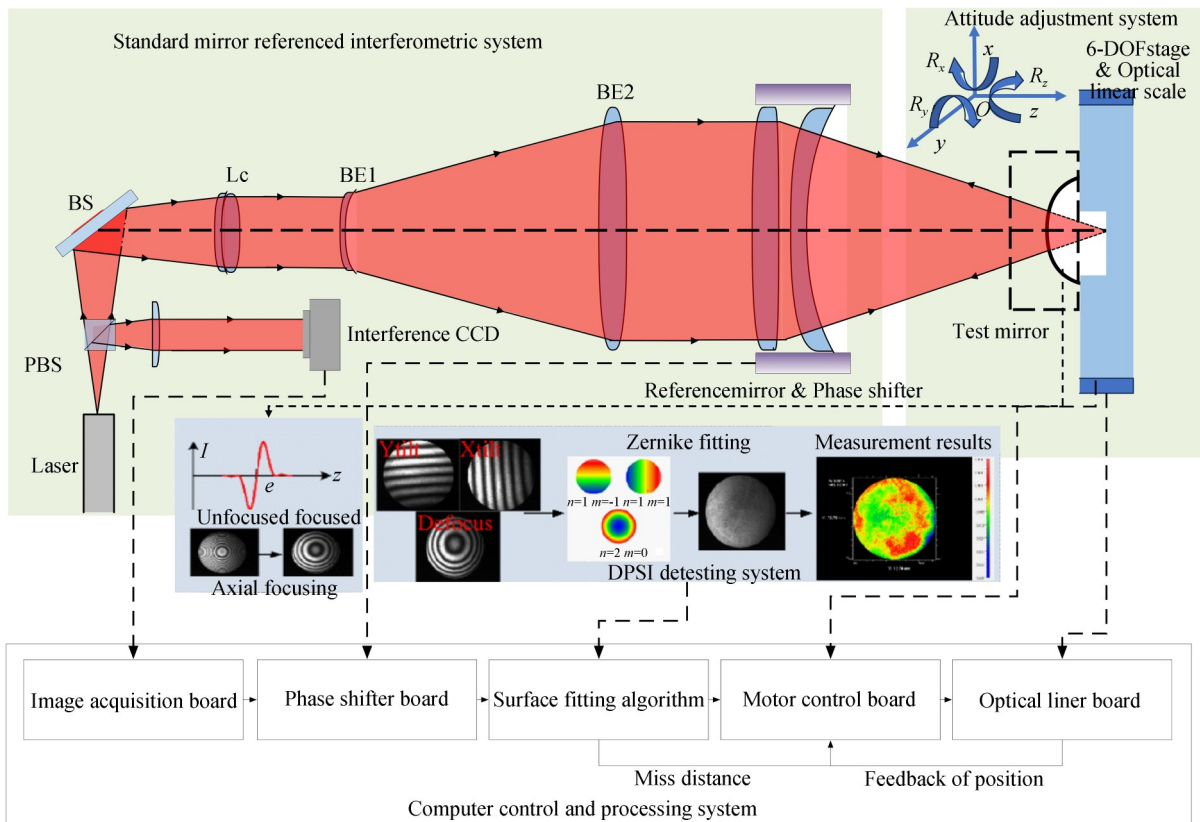


图 1 自动干涉测量系统总体方案

Fig. 1 Schematic overview of automated interferometric measurement system

姿调整机构进行位姿调整。控制流程如图 2 所示,控制系统以干涉检测结果作为输入,通过面形分析获取当前位姿信息,并进行解耦。但测量中,不可避免引入测量噪声、相位解算误差等,为提高位姿解算精度,引入一致性评价剔除异常值,取多次测量的平均值作为输入 $c^{(k)}$ 。

将 $c^{(k)}$ 代入式(8)进行解耦计算,可获得 5 个自由度的位姿校正量 $\Delta p^{(k)}$,并将校正值发送至多轴协同控制器,控制各个电机旋转,实现元件的位姿调整。相比单轴调整,多轴协同避免了各轴耦合导致的收敛速度慢或者振荡发散问题。

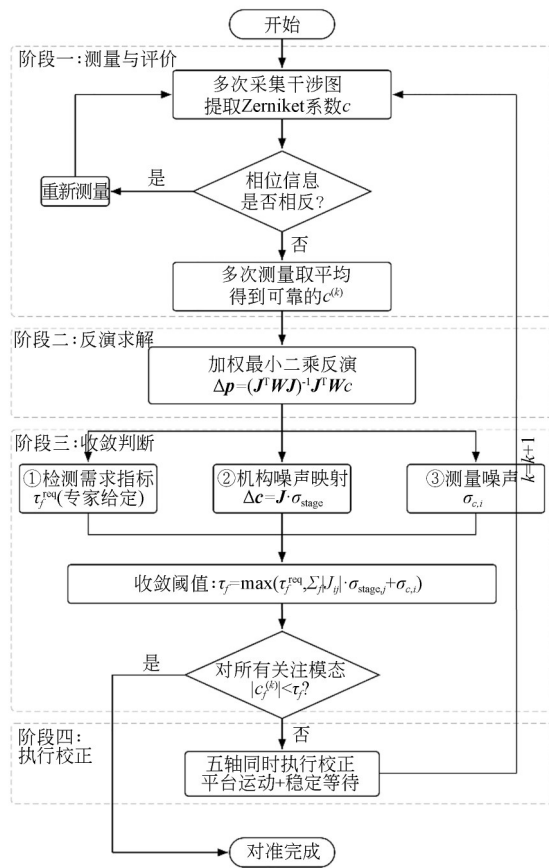


图 2 闭环对准流程

Fig. 2 Flowchart of closed-loop alignment strategy

受环境噪声、面形精度与检测方法等限制,干涉检测结果与理想值难以完全一致,会在理想值附近振荡。为此设计合适的收敛阈值作为自动干涉检测的终止判据。收敛阈值由检测需求、机构定位精度与测量重复性三者联合确定。根据检测需求,得到 Zernike 模态允许的残余上界

τ_i^{req} 。调整机构各轴存在有界的定位误差 $|\delta_j| \leq \sigma_{stage,j}$, 该位姿域噪声经灵敏度矩阵映射至波前域后,第 i 个 Zernike 模态上的波前不确定度为:

$$\sigma_{stage,i}^c = \sum_{j=1}^5 |J_{ij}| \sigma_{stage,j}. \quad (11)$$

经多次测量求平均后,第 i 个 Zernike 系数的残余测量噪声记为 $\sigma_{c,i}$ 。三者联合确定各模态的收敛阈值:

$$\tau_i = \max(\tau_i^{req}; \sigma_{stage,i}^c + \sigma_{c,i}). \quad (12)$$

当 $|c_i^{(k)}| < \tau_i, \forall i \in \mathcal{S}$ 时,终止干涉检测,其中 \mathcal{S} 为相关模态的索引集合。式(12)表明,当硬件性能较高时,收敛阈值由检测需求决定,避免过度调整;反之则由硬件决定。

3 仿真验证

3.1 仿真条件

基于 MATLAB 构建数值仿真平台,被检非球面曲率半径 $R = 194.85 \text{ mm}$,圆锥常数 $\kappa = 0$,高阶系数 $A_4 = -5.78 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-3}$, $A_6 = 2.18 \times 10^{-12} \text{ mm}^{-5}$, $A_8 = -2.80 \times 10^{-16} \text{ mm}^{-7}$,口径半径 $a = 98 \text{ mm}$,检测波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。初始失调量设为 $t_x = 10 \mu\text{m}$, $t_y = 10 \mu\text{m}$, $t_z = 20 \mu\text{m}$, $\theta_x = 7.2''$, $\theta_y = 7.2''$ 。

设计两组仿真:首先是无面形误差和噪声,验证 WLS 算法正确性;随后添加面形误差和噪声,对比 LS 与 WLS。

3.2 无误差 LS 与 WLS 仿真验证

在无误差条件下对灵敏度模型与反演算法进行验证,LS 与 WLS 单次反演结果如表 1 所示。

如图 3 所示,无面形误差条件下 LS 与 WLS 单次反演校正结果完全一致。校正前波前 RMS

表 1 无噪声单次反演结果

Tab. 1 Single-step inversion results without noise

Degree of freedom	Degree of freedom	LS inversion deviation/%	LS inversion deviation/%
$t_x/\mu\text{m}$	10.00	2.65×10^{-12}	5.45×10^{-12}
$t_y/\mu\text{m}$	10.00	7.99×10^{-13}	2.68×10^{-12}
$t_z/\mu\text{m}$	20.00	0	0
$\theta_x/('')$	7.20	1.11×10^{-12}	3.73×10^{-12}
$\theta_y/('')$	7.20	3.69×10^{-12}	7.61×10^{-12}

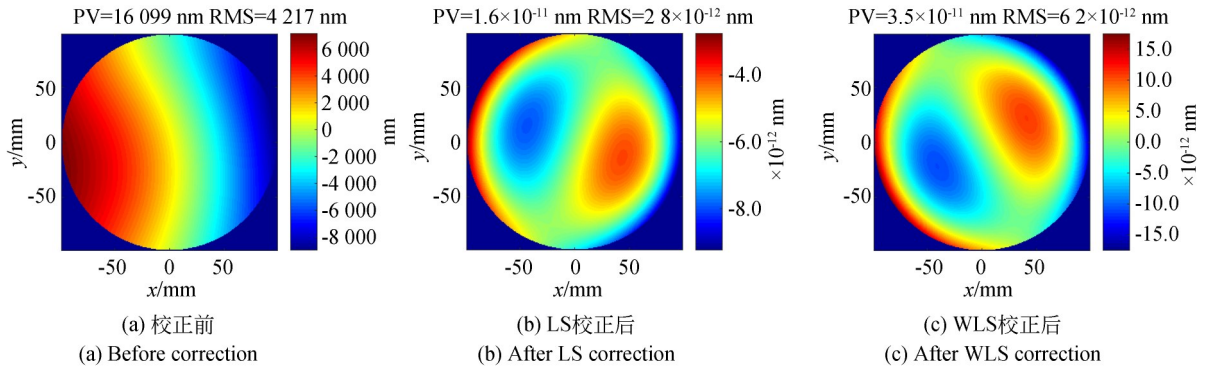


图 3 无面形误差条件下单次反演校正结果

Fig. 3 Single-step correction without surface figure error

为 4 217 nm,校正后 LS 与 WLS 的残余波前 RMS 分别为 2.8×10^{-12} nm 与 6.2×10^{-12} nm,均达到机器精度量级,验证了灵敏度模型与反演算法的正确性。图 3(b)、(c)中残余波前呈现类彗差图案,其幅值为 10^{-12} nm 量级,是浮点运算舍入误差的空间分布,不具有物理意义。两者在无误差条件下的等价性符合理论预期。

3.3 含误差的 LS 与 WLS 仿真验证

仿真中附加面形误差 $Z_4 = 0.15\lambda$;测量误差 $\sigma_c = 0.005\lambda$;平移机构误差 $\sigma_t = 0.1 \mu\text{m}$,旋转误

差忽略。WLS 权重矩阵中 Z_9 权重为 100,其余为 1。收敛判据 $|Z_9| < 0.020\lambda$,LS 迭代 10 次,WLS 收敛即停。

图 4 为闭环迭代过程中的波前演变。LS 经 10 次迭代后总波前 PV = 49 nm,RMS = 10 nm;WLS 经 1 次迭代收敛,总波前 PV = 210 nm,RMS = 53 nm。LS 总波前偏小原因在于 t_z 过度校正将面形固有 power 一并消除,但同时引入了系统性球差残余;WLS 准确保留了面形固有的 power,总波前接近面形本身的 190 nm。

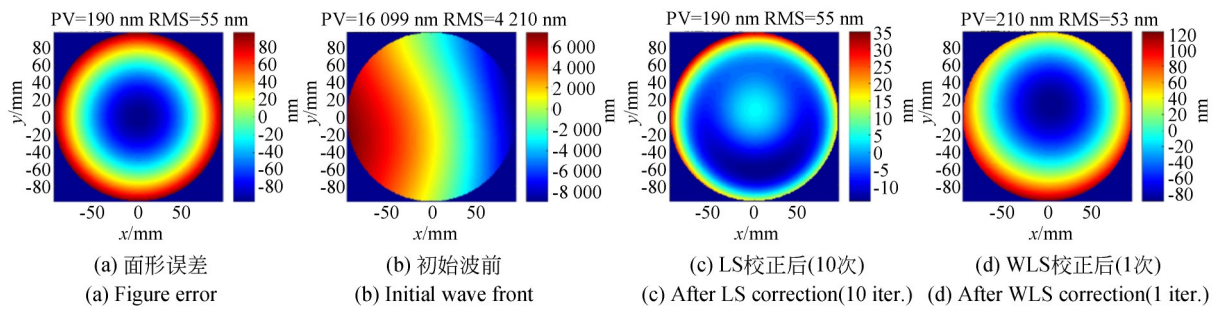


图 4 面形演变

Fig. 4 Wavefront evolution

图 5 为 $|Z_9|$ 收敛曲线。WLS 第 1 次迭代即将球差降至约 2 nm,远低于阈值;LS 的球差稳定在 14~17 nm,10 次迭代均未满足收敛条件。

图 6 为残差面形。LS 残差 PV = 178 nm,RMS = 49 nm,可见明显的球差;WLS 残差 PV = 72 nm,RMS = 21 nm,无明显球差残余,RMS 降低 57%。

LS 产生球差偏差的原因在于 t_z 同时激励

离焦与球差。面形固有的 power 被误归因于 t_z 失调后,算法过度校正 t_z ,按两个模态的灵敏度之比同步引入球差残余。该偏差具有确定性,不随迭代次数的增加而减小。WLS 对 Z_9 赋高权重后抑制了 t_z 的过度校正,球差残余降至噪声水平。WLS 残差中残留的倾斜分量为位移机构误差经灵敏度放大的物理下限,与算法无关。

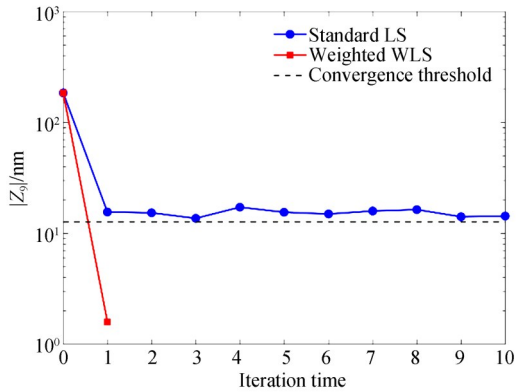
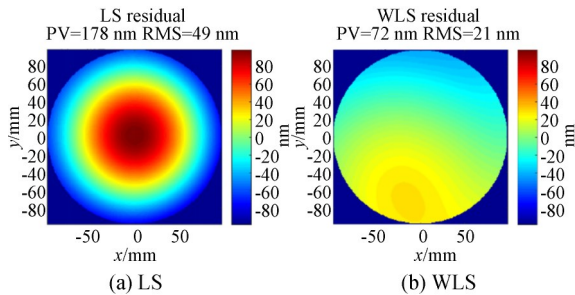
图 5 球差 $|Z_9|$ 收敛曲线Fig. 5 Convergence of spherical aberration $|Z_9|$ 

图 6 残差面形

Fig. 6 Residual figure

4 实验验证

4.1 实验条件

实验基于 Fizeau 干涉检测平台开展, 实验装置如图 7 所示。ZYGO HD 型移相干涉仪水平放置, 检测光束依次经像移器、标准镜后, 由 45° 折转镜反射转为竖直向下, 通过 CGH 后入射至被检镜表面。被检镜为某高阶偶次非球面, 安装于六轴精密调整平台。控制系统通过上位机分别与 ZYGO 干涉仪和六维精密位移台进行信息交互, 完成干涉检测与位姿调整的闭环控制。干涉仪采集干涉图并拟合 Fringe Zernike 系数, 从中提取相关系数用于反演求解五自由度位姿校正量, 并控制位移机构进行位姿调整。该非球面经 CGH 补偿后球差应接近零, 因此收敛判据为 $|Z_9| < \tau_i$ 。WLS 权重矩阵中 Z_9 赋较高权重。

实验分为两部分: 实验一从已知失调位置出发, 验证灵敏度模型与反演算法的实际精度; 实验二从未知失调位置出发, 对比 LS 与 WLS 的收敛性能。

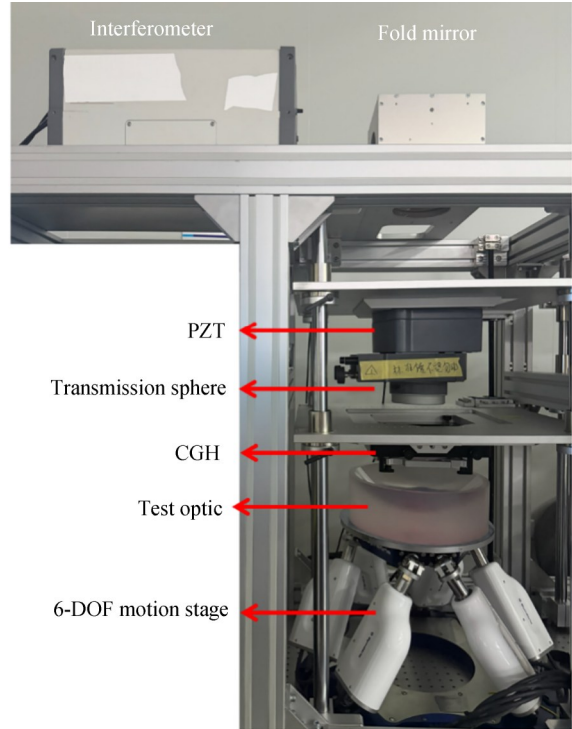


图 7 干涉检测实验装置

Fig. 7 Experimental setup for interference detection

4.2 已知失调量闭环校正

实验前先将被检镜手动精调至最佳对准状态, 如图 8 所示。此时的测量结果作为基准面形, 面形精度为 $\text{RMS} = 0.033\lambda$ 。后续所有校正结果均以此面形作为参照。

从已对准的初始位置出发, 人为施加失调量 $t_x = 10 \mu\text{m}$, $t_y = 10 \mu\text{m}$, $t_z = 20 \mu\text{m}$, $\theta_x = 0.002^\circ$,

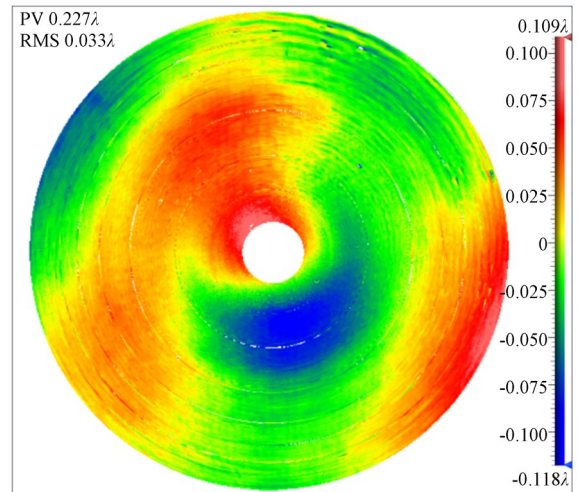


图 8 基准面形

Fig. 8 Reference surface

$\theta_y = 0.002^\circ$, 随后启动 WLS 闭环对准。经 2 次迭代后平台回到初始位置, 各自由度的校正结果如表 2 所示。可见五自由度校正误差均不超过 3.5%, 其中轴向平移 t_z 的误差仅 0.44%。结果表明, 灵敏度矩阵的计算精度和反演算法在实际系统中是可靠的。

4.3 未知失调量下标准 LS 与 WLS 对比

从完全未知的失调状态出发, 分别采用 WLS 和标准 LS 进行闭环对准。两次实验的初始失调分别为 WLS 初始波前 RMS $\approx 31.1\lambda$, LS 初始波前 RMS $\approx 30.9\lambda$, 可看作相同初始失调。

表 2 已知失调量校正结果

Tab. 2 Correction results for known misalignment

校正结果	$t_x/\mu\text{m}$	$t_y/\mu\text{m}$	$t_z/\mu\text{m}$	$\theta_x/(\circ)$	$\theta_y/(\circ)$
设定失调量	10.00	10.00	20.00	0.002	0.002
累计校正量	10.054	9.793	19.913	0.001 93	0.001 97
误差/%	0.54	2.07	0.44	3.50	1.50

WLS 权重设置中 Z_9 权重 100, 其余为 1。

图 9 和图 10 分别为 WLS 和 LS 闭环对准过程中的波前演变。

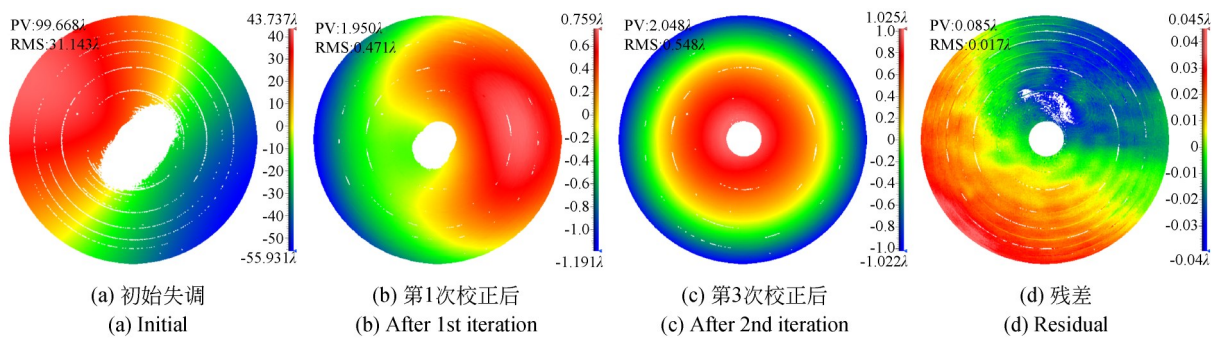


图 9 WLS 闭环对准过程中的波前演变

Fig. 9 Wavefront evolution during WLS alignment

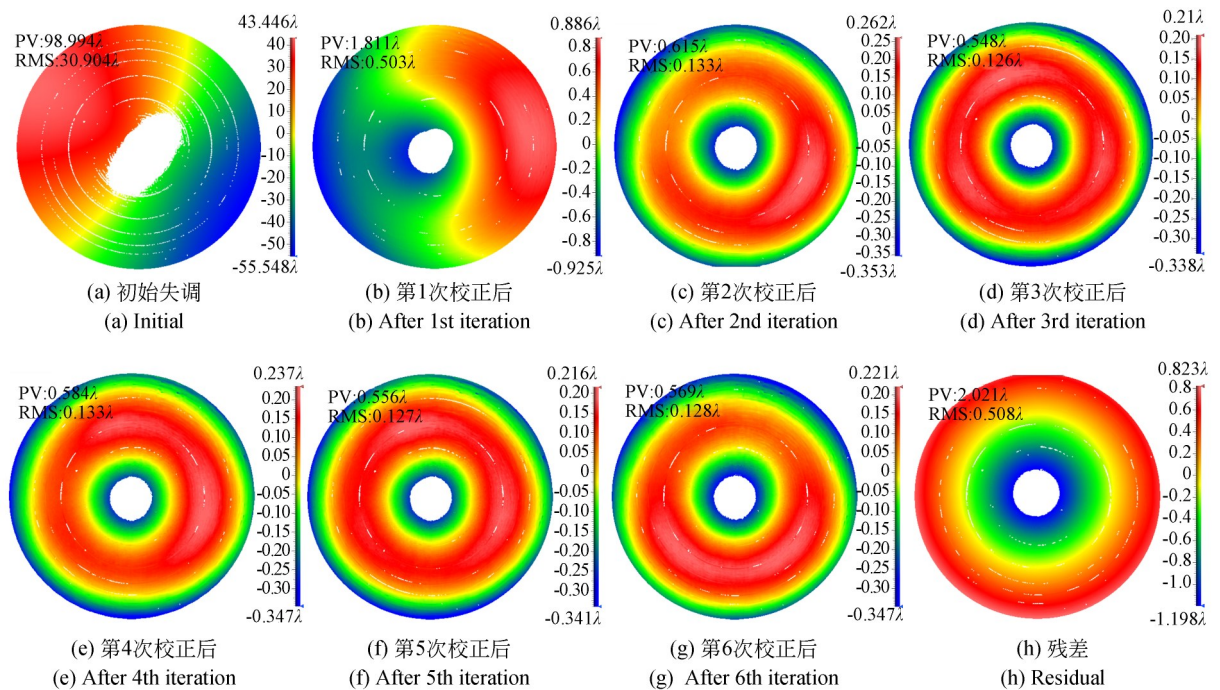


图 10 LS 闭环对准过程中的波前演变

Fig. 10 Wavefront evolution during LS alignment

上述迭代过程仅扣除 piston 项,完整展示了各自由度像差从大失调状态逐步收敛的过程。其中,最后的图 9(d)中剩余 tilt 较为明显,与带有噪声时误差相近,其主要原因是位移机构位移的精度所影响与算法无关。

为定量评价最终对准精度,需将校正结果与 4.1 节基准面形在相同处理条件下进行对比。图 11 为按相同方式扣除 piston, tilt 与离焦后的残差面形。WLS 残差 RMS = 0.004λ, 与基准面形的高阶分布一致,对准精度达到与精调一致的水平。LS 残差 RMS = 0.113λ, 球差环带结构仍然明显,与仿真结果一致。

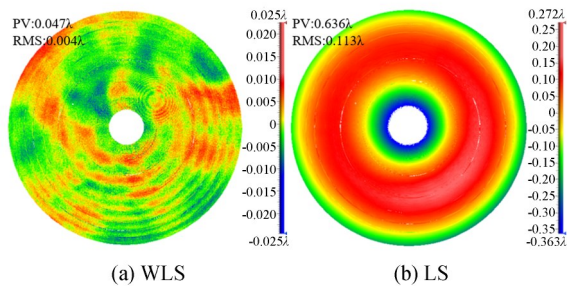


图 11 扣除 piston, tilt 与离焦后的最终残差面形

Fig. 11 Final residual surface figure after removing piston, tilt and defocus

5 结 论

本文针对高阶非球面干涉检测中的自动对准问题,提出了一种基于统一灵敏度建模与加权最小二乘反演的自动干涉检测方法。首先,建立了适用于一般旋转对称非球面的统一灵敏度模型,以面形矢高方程为输入,解析推导五自由度位姿偏差到 Fringe Zernike 系数的灵敏度函数,并

参考文献:

- [1] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面形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)

通过平面镜与球面镜的退化验证了模型的正确性。在此基础上,提出加权最小二乘反演策略,通过动态调整关键模态的权重,抑制面形固有像差对反演结果的耦合影响。然后,以球差为关键模态进行验证。无噪声情况下反演精度达到机器精度量级,含面形误差与噪声条件下加权最小二乘仅 1 次迭代即可满足收敛条件,残差 RMS 较标准最小二乘降低 57%,标准最小二乘因离焦与球差经 t_z 耦合产生不可消除的系统偏差。实验结果表明,已知失调量情况下,五自由度校正误差不超过 3.5%;未知失调量情况下,传统方法无法正常收敛,光路失调引入的误差为 RMS = 0.113λ,加权最小二乘经 2 次迭代收敛,光路失调引入的误差为 RMS = 0.004λ,实验结果与仿真预测一致。

该方法以面形矢高方程为唯一输入,无需经验标定或完整光学系统建模。其理论框架对面形类型无限制,离轴非球面与自由曲面仅需替换相应的矢高方程即可直接适用。本文实验针对旋转对称高阶非球面进行了验证,后续工作将进一步拓展至离轴非球面与自由曲面的实验验证,并探索将干涉检测无缝融入闭环加工流程,为“熄灯式”光学制造奠定基础。

作者贡献声明:

- 郭乃泉:测量方法提出,论文构思与撰写;
周 满:自动化软件撰写;
张 鑫:测量数据整理与分析;
李明茁:测量数据审核;
胡海翔:测量方法指导,论文指导;
薛栋林:论文审核。

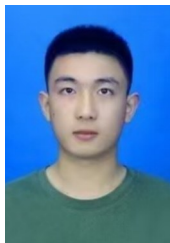
- [2] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014(1): 26-46.
SHI T, YANG Y Y, ZHANG L, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014(1): 26-46. (in Chinese)
[3] 刘锋伟, 吴永前, 陈强, 等. 大口径光学非球面镜先进制造技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200203.

- LIU F W, WU Y Q, CHEN Q, *et al.* Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200203. (in Chinese)
- [4] 陈善勇, 薛帅, 熊玉朋, 等. 面向制造的光学面形超精密测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 0312011.
- CHEN SH Y, XUE SH, XIONG Y P, *et al.* Research progress of ultra-precision measurement of optical surfaces for manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312011. (in Chinese)
- [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] MACGOVERN A J, WYANT J C. Computer generated holograms for testing optical elements [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(3): 619.
- [7] WYANT J C, BENNETT V P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2833.
- [8] 冯婕, 邓超, 邢延文. 用于凹非球面的计算全息设计及其误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110902.
- FENG J, DENG CH, XING T W. Design and error analysis of the computer-generated helogram used for concave aspheric surface testing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110902. (in Chinese)
- [9] 李锐钢, 郑立功, 薛栋林, 等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 533-538.
- LI R G, ZHENG L G, XUE D L, *et al.* Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 533-538. (in Chinese)
- [10] 郝群, 刘一鸣, 胡摇, 等. 光学非球面面形误差和参数误差干涉测量[J]. *光学学报*, 2023, 43(15): 1522003.
- HAO Q, LIU Y M, HU Y, *et al.* Interferometric measurement of optical aspheric surface form error and parameter error [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1522003. (in Chinese)
- [11] 李佳, 程强, 王孝坤, 等. 计算全息检测技术的精度溯源研究现状分析(内封面文章)[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(8): 140-154.
- LI J, CHENG Q, WANG X K, *et al.* Analysis of the current status of research on accuracy traceability based on computational holographic detection technology (inner cover paper) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(8): 140-154. (in Chinese)
- [12] LEE H, DALTON G B, TOSH I A J, *et al.* Computer-guided alignment II: Optical system alignment using differential wavefront sampling [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15424.
- [13] 李凌, 张家福, 陶鑫, 等. 高洁净度超光滑非球面的自动化干涉检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(5): 20240059.
- LI L, ZHANG J F, TAO X, *et al.* Automated interferometry test of high-cleanliness ultra-smooth aspherical surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(5): 20240059. (in Chinese)
- [14] ZHANG L, LIU D, SHI T, *et al.* Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-null interferometric testing [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(35): 8501.
- [15] WANG D D, YANG Y Y, CHEN C, *et al.* Misalignment aberrations calibration in testing of high-numerical-aperture spherical surfaces [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(14): 2024.
- [16] 胡摇, 陶鑫, 郝群. 猫眼波前定位虚实结合干涉非球面参数误差测量[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 20220497.
- HU Y, TAO X, HAO Q. Virtual-real combination interferometry for aspheric surface parameter error measurement with cat-eye-wavefront positioning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220497. (in Chinese)
- [17] 薛栋林, 郑立功, 王淑平, 等. 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 380-385.
- XUE D L, ZHENG L G, WANG SH P, *et al.*

Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method [J]. *Optics*

and Precision Engineering, 2006, 14 (3) : 380-385. (in Chinese)

作者简介:



郭乃泉(2001—),男,安徽淮北人,硕士研究生,2023年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,主要从事自主检测以及自动控制方面的研究。E-mail: guo23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



胡海翔(1990—),男,安徽淮南人,博士,研究员,2012年于中国科学技术大学获得学士学位,2017年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事先进光学制造技术、皮米精度光学制造技术及装备、超大口径光学加工诊断与决策、宽动态高精度大口径光学检测技术方面的研究。E-mail: hhx@ciomp.ac.cn

通讯作者:



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,研究员,博士生导师,主要从事光学检测和空间光学系统设计等方面的研究。E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn