

文章编号 1004-924X(2025)12-1831-11

## 基于空间约束的差动共焦离轴非球面 自适应测量方法

马维阔, 邱丽荣, 李奕豪, 赵维谦, 刘昱含\*

(北京理工大学 光电学院 复杂环境智能感测技术工信部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 离轴非球面形状不对称且其表面曲率变化非线性, 给面形高精度测量带来挑战。为解决现有离轴非球面面形测量方法高度依赖待测件初始调整位姿和曲率变化难适应的问题, 本文提出了一种基于空间约束的差动共焦离轴非球面自适应测量方法, 以实现对离轴非球面的无初始位姿依赖、曲率变化自适应、高精度测量。首先, 根据平移-回转扫描测量原理和差动共焦技术抗表面倾角精准定焦的性能, 从规划测量点和待测点之间的距离和倾角两个维度出发, 构建了空间约束模型, 基于该模型, 对等面积准则下的螺旋扫描路径规划算法进行优化, 实现对离轴非球面测量路径的曲率自适应动态调整。使用该方法对离轴非球面和 20° 倾斜平面进行测量实验, 将测量结果与 Zygo 干涉仪的测量结果点对点作差, 面形差别的均方根 (Root Mean Square, RMS) 值均优于 10 nm, 对应 3 $\sigma$  优于 5 nm, 满足离轴非球面的高精度测量要求。

**关键词:** 空间约束; 差动共焦; 离轴非球面; 自适应测量; 路径规划

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9

**文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20253312.1831

**CSTR:** 32169.14.OPE.20253312.1831

## Adaptive measurement of off-axis aspheric surfaces of differential confocal based on spatial constraints

MA Weikuo, QIU Lirong, LI Yihao, ZHAO Weiqian, LIU Yuhan\*

(MIIT Key Laboratory of Complex-field Intelligent Exploration, School of Optics and Photonics,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: 2449664655@qq.com

**Abstract:** The asymmetrical shape of the off-axis aspheric surface and the nonlinear change of its surface curvature bring challenges to the high-precision measurement of surface shape. In order to solve the problem that existing off-axis aspheric surface shape measurement methods were highly dependent on precise initial alignment of the test piece and showed poor adaptability to curvature variations, we proposed a spatially-constrained differential confocal adaptive measurement method to achieve adaptive and high-precision measurement of off-axis aspheric surfaces without initial pose dependence. First, based on the translation-rotation scanning measurement principle and the demonstrated performance of differential confocal technology in anti-surface inclination accurate fixed focusing, we developed a spatial constraint model incorporating both distance and tilt angle parameters between designed measurement points and actual test locations.

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2025-04-22.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. 2023CX01006)

This model enabled optimized spiral scanning path planning with curvature-adaptive adjustment capability for off-axis aspheric surfaces. Experimental verification demonstrated surface form accuracy with root mean square (RMS) errors below 10 nanometers and  $3\sigma$  values under 5 nanometers compared to Zygo interferometer references, meeting the requirements of high-precision measurement of off-axis aspheric surfaces.

**Key words:** spatial constraints; differential confocal; off-axis aspherical; adaptive measurement; path planning

## 1 引 言

在光学系统中,离轴非球面的应用能够减小系统体积、减轻系统重量、有效校正像差、扩展视场角度,提升成像质量<sup>[1-3]</sup>,广泛应用于航空航天、光学检测、激光加工等领域<sup>[4-6]</sup>。近年来,各领域对光学系统的要求不断提高,对离轴非球面的精度要求也更为严格,进而对其测量精度提出更高要求<sup>[7]</sup>。

目前,离轴非球面的主要测量方法分为坐标测量法和非坐标测量法两类<sup>[8-9]</sup>。非坐标测量法主要包括干涉测量法、结构光测量法和夏克-哈特曼波前测量法<sup>[10-12]</sup>。干涉测量法通过分析待测面与参考面之间的相位差或者光程差,提取待测表面的形貌特征,其测量精度可达到  $1/100\lambda$ ,但该方法在测量时需确保待测面与参考面严格对准,且需要添加与待测表面一一对应的补偿器,因此成本高且通用性差<sup>[13]</sup>;结构光测量法通过将已知光学图案(如条纹等)投射到待测表面,通过分析投射图案在待测表面上的变形,获取待测表面形貌信息,该方法测量精度通常在微米量级,难以满足更高精度的测量需求<sup>[14]</sup>;夏克-哈特曼波前测量法利用微透镜阵列对待测表面反射的波面进行分割,通过 CCD 像面上光斑位置与理想光斑的偏移量计算子波前的斜率,进而重建波前并获取待测面形,该方法受到微透镜尺寸和数量的限制,测量大口径、大曲率变化的离轴非球面时,易出现 CCD 像面上光斑混叠的情况,导致波前无法恢复,从而测量失败<sup>[15]</sup>。综上所述,虽然干涉测量法能实现对大口径、大曲率变化离轴非球面的高精度测量,但使用的补偿器与待测表面一一对应,成本高且通用性差,剩余非坐标测量法难以实现对大口径、大曲率变化的离轴非球面的高精度测量。

坐标测量法通过逐点扫描待测表面,精确记

录待测表面各点坐标,进而构建出待测表面的完整面形<sup>[16]</sup>,由于其自由度高,对表面形貌的适应性更强,更多用于复杂曲面的高精度测量中<sup>[17-19]</sup>。为确保精确和高效地测量,坐标测量法在应用中不仅需要合适的测量原理,还依赖于合适的路径规划方法,通过合理规划测量路径,优化测量效率与精度。因此,选取合适的测量原理和路径规划方法对实现大口径、大曲率变化离轴非球面的高精度测量极为重要。

为实现离轴非球面的高精度面形测量,研究人员对测量路径规划方法进行了广泛的研究。Phuc Nguyen 等人提出了一种基于极值搜索算法的表面轮廓测量路径规划方法<sup>[20]</sup>,该方法通过持续监测轮廓测量过程中的误差,以误差梯度变化最小作为目标函数,计算下一个测量点的采样坐标,迭代完成整个待测表面的测量路径规划,然而,该方法的实时误差监测的计算依赖准确获取待测表面测量位姿,且在测量大曲率变化的表面时,所需计算量大幅增长,测量效率随之降低,且当响应时长过长时会引入运动轴的机械停滞误差,从而影响测量精度;张阳等人提出了一种基于测量点轴向和法向超声能量集中的测量路径规划方法<sup>[21]</sup>,该方法首先通过全局粗扫描获取少量特征点的信号强度,之后通过轴向和法向的精细调整,不断增强其余采样点接收到的信号强度,生成符合曲面局部曲率特征的二次扫描轨迹,然而,全局粗扫描时需要已知待测表面的测量位姿,且当测量大口径、大曲率变化的曲面时,规划测量点数有限的全局粗扫描难以适应待测曲面曲率变化的需要,从而影响测量精度。

综上所述,现有路径规划方法存在初始调整位姿依赖、曲率变化难适应的问题。基于此,本文利用差动共焦测量技术的高分辨力、抗倾角性能<sup>[22-25]</sup>,基于空间约束模型,提出了差动共焦离轴非球面自适应测量方法。该方法通过对传感器

和待测点之间的相对距离和传感器与待测点法向的夹角两个维度进行约束,构建空间约束模型,保证待测点始终在传感器的可测范围之内;结合等面积采样准则优化螺旋路径的曲率适应性,实现对离轴非球面曲率自适应的高精度测量。

## 2 原理分析

针对现有路径规划方法初始位姿依赖和曲率变化难适应的问题,本文提出了一种基于空间约束的差动共焦离轴非球面自适应测量方法,该方法根据平移-回转扫描测量原理和激光差动共焦技术抗倾角性能分析,构建测量过程中规划测量点和待测点之间的距离和倾角两个维度的空间约束模型,使用空间约束模型反馈调节测量过程中传感器的位置,避免因初始调整位姿不合适造成超出传感器量程的问题;基于螺旋扫描的特点,使用了等效面积的概念,以等面积为准则,根据已测点的位置信息对后续采样点进行动态规划,进一步减少对初始位姿的依赖,使用该方法规划测量路径时,在高曲率区域,螺旋线间距会相对缩小,即采样密度提升,确保局部轮廓的高精度测量,在低曲率区域采样间距相对扩大,进而减少冗余采样点,提升测量效率。因此,该方法实现了对离轴非球面的无初始位姿依赖、曲率变化自适应、高精度测量。

### 2.1 平移-回转扫描测量原理

平移-回转扫描测量原理如图1所示,扫描系

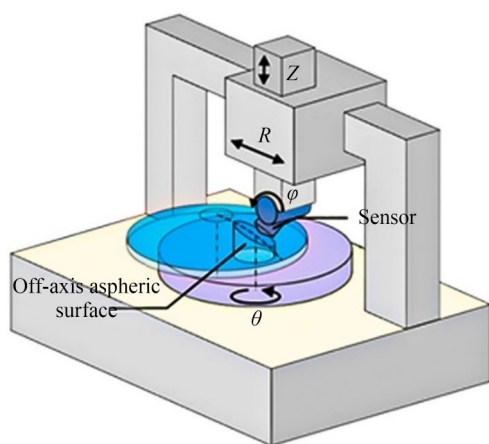


图1 平移-回转扫描测量原理图

Fig. 1 Translation-rotation scanning principle diagram

统主要由R轴直线导轨、Z轴直线导轨、精密回转主轴、高精度旋转传感器轴和测量传感器组成。在对待测表面进行测量时,将待测面放置于精密回转主轴上,实现稳定的旋转运动,测量传感器安装固定在竖直轴气浮导轨上,沿Z轴向上下移动,通过R轴气浮导轨进行水平移动,通过传感器转轴调整传感器与待测表面的角度,从而实现对待测表面不同位置的测量。

由系统采集到的数据:R轴位移为 $r_k$ ,Z轴位移为 $z_k$ ,主轴采集旋转角度为 $\theta_k$ ,传感器转轴倾角为 $\varphi_k$ ,传感器采集到的距离值为 $L_k$ ,可得待测点在空间直角坐标系O-XYZ的坐标,坐标转换几何关系示意图如图2所示,当主轴旋转角度取零时,空间直角坐标系的X方向与系统R轴方向重合,坐标转换结果如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) \times [\sin(\varphi_k) \times (l + L_k) + r_k] \\ \sin(\theta_k) \times [\sin(\varphi_k) \times (l + L_k) + r_k] \\ \cos(\varphi_k) \times (l + L_k) + z_k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $l$ 为传感器轴中心到物镜的距离。

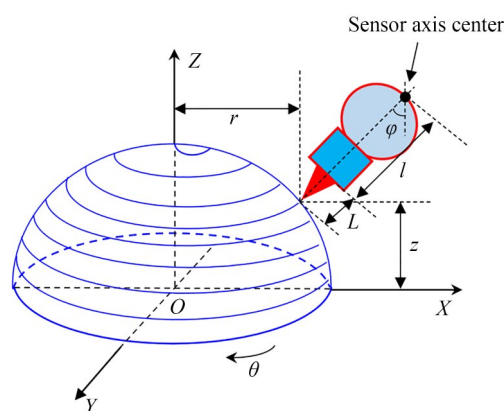


图2 坐标转换几何关系示意图

Fig. 2 Schematic of coordinate transformation geometry

### 2.2 激光差动共焦技术抗倾角性能分析

测量传感器使用激光差动共焦测量传感器,其光路原理如图3所示。激光器发出的激光通过一个分光棱镜(Beam Splitting, BS)、偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)和1/4波片(Quarter-Wave Plate, QWP)后,通过测量物镜聚焦到被测表面,此后反射光束即携带了样品表面测量点的高度信息。反射光束沿原光路路径通

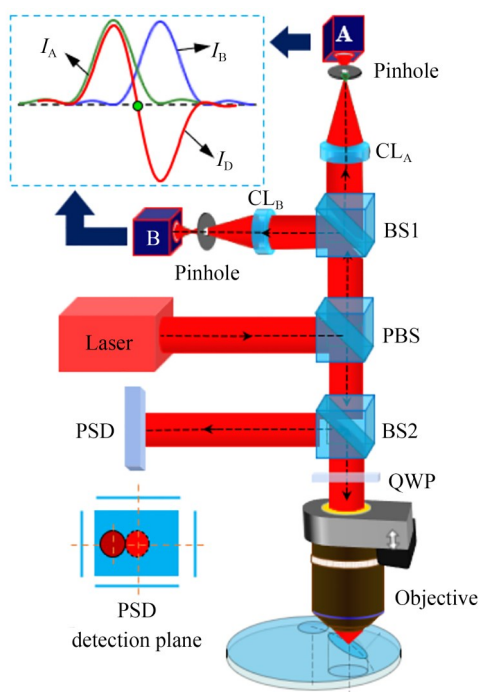


图3 差动共焦测量传感器光路原理图

Fig. 3 Optical schematic of the differential confocal sensor

过测量物镜,经过原PBS和BS后,被分束成两路光,分别通过汇聚透镜(Converging Lens, CL)后经过针孔进入探测器A和探测器B,得到对应的光强信息。通过音圈电机驱动物镜的往返运动,探测器A和探测器B会得到不同位置的光强变化,生成前焦光强响应 $I_A(u, +u_M)$ 和后焦光强响应 $I_B(u, -u_M)$ 。

根据菲涅耳衍射积分公式和共焦非相干三维成像理论,前焦光强响应 $I_A(u, +u_M)$ 如公式(2)所示,后焦光强响应 $I_B(u, -u_M)$ 如公式(3)所示<sup>[25]</sup>:

$$I_A(u, +u_M) = \frac{\cos^4 \beta \sin^2 [\cos \beta (2u + u_M)/4]}{[(M-1) \sin^2 \beta + 1] [\cos \beta (2u + u_M)/4]^2}, \quad (2)$$

$$I_B(u, -u_M) = \frac{\cos^4 \beta \sin^2 [\cos \beta (2u - u_M)/4]}{[(M-1) \sin^2 \beta + 1] [\cos \beta (2u - u_M)/4]^2}, \quad (3)$$

其中: $\beta$ 为待测点的法线与测量物镜轴线的夹角, $u_M$ 为探测器的归一化轴向偏移量, $M$ 为物镜焦距与像镜焦距的比值。

为抑制表面平整度和局部倾角对反射率的影响,将光强响应 $I_A(u, +u_M)$ 和 $I_B(u, -u_M)$ 进行

归一化处理,可得到具有高轴向分辨力和高动态范围的差动共焦光强响应 $I_D(u, u_M)$ ,如公式(4)所示:

$$I_D(u, u_M) = \frac{I_A(u, +u_M) - I_B(u, -u_M)}{I_A(u, +u_M) + I_B(u, -u_M)}. \quad (4)$$

不同倾角下的归一化差动共焦响应曲线几乎重合,如图4所示,不同角度下的光强响应曲线与 $\beta$ 为0时的重合度差值图如图5所示。

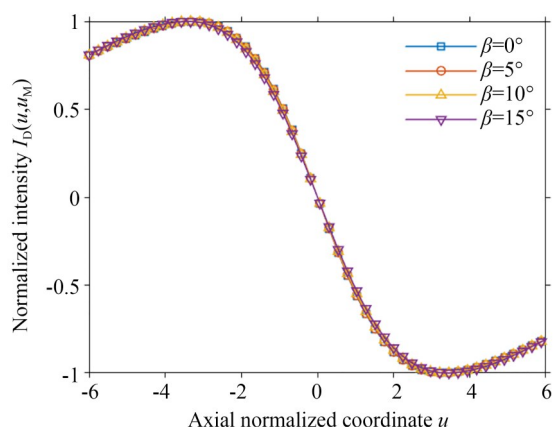
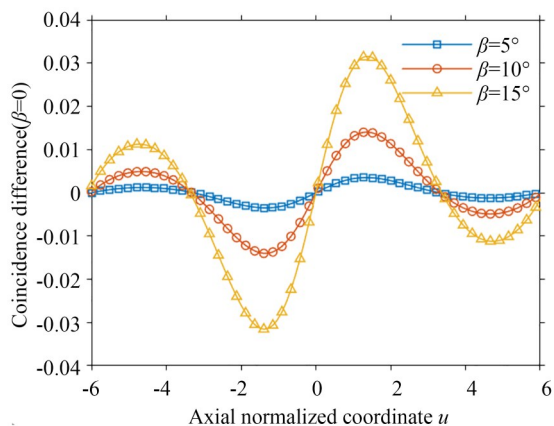


图4 不同倾角下轴向归一化响应光强曲线图

Fig. 4 Normalized axial response intensity of different angle

图5 对比 $\beta$ 为0时的不同角度重合度差值图Fig. 5 Angle-dependent coincidence difference ( $\beta=0$ )

由图5可知, $\beta$ 为 $15^\circ$ 时的归一化差动共焦响应曲线与 $\beta$ 为 $0^\circ$ 时最大相差不足4%,且在零点处完全重合,因此可根据这一特性完成高精度测量。

然而,探测器可接收到的光线范围受到数值孔径NA的限制,能够接收光线的最大入射角 $\beta_{\max}$ 如公式(5)所示:

$$\beta_{\max} = \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right), \quad (5)$$

其中: $n$ 为物镜镜头的折射率,现多使用K9玻璃制作差动共焦传感器物镜镜头,其折射率为1.516 3,NA通常在0.8左右,当NA为0.8时, $\beta_{\max}$ 为 $32^\circ$ 。

为保证测量过程中50%以上的回光且留有足够的容错空间,可约束 $\beta$ 在测量过程中始终小于 $\beta_{\max}$ 的一半。因此,当使用NA为0.8的K9玻璃制作的物镜时,可取约束阈值角 $\beta_m$ 为 $15^\circ$ ,此时激光差动共焦能够保持高精度、高分辨率的测量能力,可实现对大口径、大曲率变化离轴非球面的精确测量。

### 2.3 基于空间约束的等面积螺旋扫描路径规划算法

在测量过程中,需要满足传感器和待测点之间相对距离和与待测点法向夹角两个维度的空间约束。空间约束的示意图如图6所示,图中使用ROZ坐标系表述, $R$ 方向为平移-回转系统中 $R$ 轴的移动方向,即系统水平方向; $Z$ 方向为系统 $Z$ 轴移动方向,即系统竖直方向。距离约束通过约束激光差动共焦传感器的零点实现,即保证音圈电机驱动物镜上下振动过程中,探测器探测到的响应光强曲线包含零点。因此,规划测量路径的规划测量点位置 $N_k(x_k, y_k, z_k)$ 与待测点实际位置 $N'_k(x'_k, y'_k, z'_k)$ 之间的距离不超过音圈电机扫描范围的一半,即满足公式(6):

$$\gamma = \sqrt{(x_k - x'_k)^2 + (y_k - y'_k)^2 + (z_k - z'_k)^2} < \frac{L_{\text{eff}}}{2}, \quad (6)$$

其中, $L_{\text{eff}}$ 是音圈电机扫描范围,即传感器量程。

倾角约束即保证测量过程中,待测表面法线方向与物镜光轴的夹角需要在传感器抗倾角范围之内。通过调整传感器轴的转角 $\varphi$ 限制位置探测器PSD的探测光斑与表面中心的距离,以保证传感器物镜光轴方向与待测表面的法线方向的夹角 $\beta$ 始终小于约束阈值角 $\beta_m$ ,即满足公式(7):

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta d}{f_0}\right) < \beta_m, \quad (7)$$

其中: $\Delta d$ 是位置探测器PSD探测光斑的圆心到表面中心的距离, $f_0$ 是物镜焦距。

$S'_k$ 可表示为母线分别为 $len_k$ 和 $len'_k$ 的等效

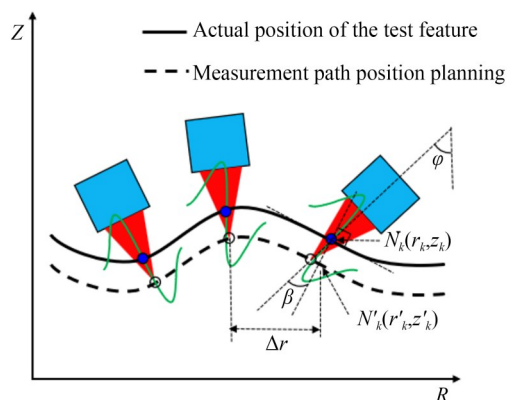


图6 空间约束示意图

Fig. 6 Schematic diagram of spatial constraints

基于空间约束模型,本文提出了优化的等面积螺旋扫描路径规划算法。测量轨迹的投影为螺旋线,将采样点 $N_k$ 为顶点的两个包络面积 $S_{k-1}$ 和 $S_k$ 的平均值定义为其所参与包络的等效面积 $\bar{S}_k$ ,采样时路径规划的原则为每两段螺旋线所包络的等效面积是相同的。为方便计算等效面积 $\bar{S}_k$ ,将待测曲面分段展开,如图7所示。 $N_k$ 的ROZ坐标为 $(r_k, z_k)$ ,以原点为圆心, $r_k$ 为半径的圆弧表达式为公式(8):

$$x^2 + y^2 = r_k^2. \quad (8)$$

定义第 $k$ 段螺旋线 $\phi_k(\theta)$ 与第 $k$ 条圆弧所包络的面积为 $S'_k$ ,第 $k+1$ 段螺旋线 $\phi_{k+1}(\theta)$ 与第 $k$ 条圆弧所包络的面积为 $S''_k$ ,则包络面积为公式(9):

$$S_k = S'_k + S''_k. \quad (9)$$

结合图7,等效面积 $\bar{S}_k$ 的表达式如公式(10)所示:

$$\bar{S}_k = \frac{S_{k-1} + S_k}{2} = \frac{S'_{k-1} + S''_{k-1} + S'_k + S''_k}{2}. \quad (10)$$

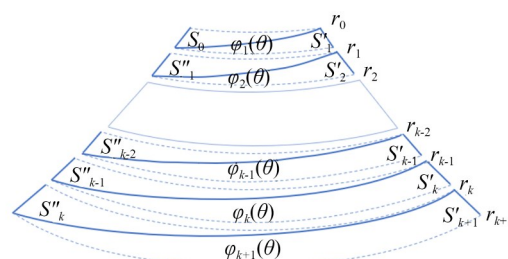


图7 包络面积示意图

Fig. 7 Schematic diagram of envelope area

圆锥体的面积之差,等效圆锥体示意图如图 8 所示,计算可表示为公式(11):

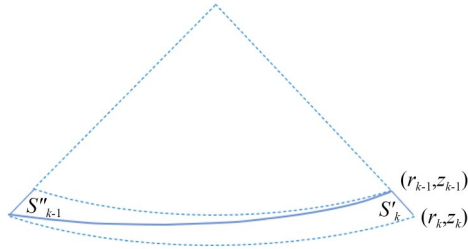


图 8 等效圆锥体示意图

Fig. 8 Schematic diagram of equivalent cone

$$S'_k = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} (len_k'^2 - len_k'^2) d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{(\Delta z_k)^2}{(\Delta r_k)^2} \right) \left[ r_k^2 - \left( r_{k-1} + \frac{\theta}{2\pi} \Delta r_k \right)^2 \right] d\theta. \quad (11)$$

$S''_k$  的面积可用圆台侧面积积分形式表示,如公式(12)所示:

$$S''_k = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \left( \sqrt{\Delta r_{k+1}^2 + \Delta z_{k+1}^2} \frac{\theta - 2k\pi}{2\pi} \right)^2 d\theta. \quad (12)$$

结合公式(9)、公式(11)和公式(12),  $S_k$  面积可表述为公式(13):

$$S_k = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left( 1 + \frac{\Delta z_k^2}{\Delta r_k^2} \right) \left[ r_k^2 - \left( r_{k-1} + \frac{\theta}{2\pi} \Delta r_k \right)^2 \right] d\theta + \left( r_k \theta + \frac{\Delta r_{k+1}}{4\pi} \theta^2 \right) \sqrt{\Delta r_{k+1}^2 + \Delta z_{k+1}^2} d\theta. \quad (13)$$

结合公式(10)和公式(13),可得  $\bar{S}_k$  的面积可表述为公式(14):

$$\bar{S}_k = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \left( 1 + \frac{\Delta z_{k-1}^2}{\Delta r_{k-1}^2} \right) \left[ r_k^2 - \left( r_{k-1} + \frac{\Delta r_k}{2\pi} \right)^2 \right] d\theta + \frac{\pi}{2} \int_0^{2\pi} \Delta r_k \left( r_k + \frac{\theta \Delta r_k}{4\pi} \right) \left( 1 + \frac{\Delta z_{k-1}^2}{\Delta r_{k-1}^2} \right) \sqrt{1 + \frac{\Delta z_k^2}{\Delta r_k^2}} d\theta + \frac{\pi \sqrt{\Delta r_k^2 + \Delta z_k^2} (r_{k-1} + r_k)}{2}. \quad (14)$$

当采样点距离较小时,可认为公式(15)成立:

$$\frac{\Delta z_k}{\Delta r_k} \approx \frac{\Delta z_{k-1}}{\Delta r_{k-1}}. \quad (15)$$

于是,  $\bar{S}_k$  可表示为公式(16):

$$\begin{aligned} \bar{S}_k &= r_{k-1} \Delta r_k \left( \Delta z_k / \Delta r_k \right)^2 + 8\pi^2 \left( \Delta z_k / \Delta r_k \right)^2 r_k + \sqrt{\Delta r_k^2 + \Delta z_k^2} (r_{k-1} + r_k) - \left[ 1 + \left( \Delta z_k / \Delta r_k \right)^2 \right] r_{k-1} \Delta r_k + \frac{\pi^2}{3} \sqrt{1 + \left( \Delta z_k / \Delta r_k \right)^2} (\Delta r_k)^2 - \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left( \Delta z_k / \Delta r_k \right)^2 \right] [(r_k)^2 - (r_{k-1})^2]. \end{aligned} \quad (16)$$

测量过程中,需保证  $\bar{S}_{k+1} = \bar{S}_k$  可得公式(17):

$$A \cdot (\Delta r_{k+1})^2 + B \cdot \Delta r_{k+1} + C = 0, \quad (17)$$

其中,  $A, B, C$  均为测量过程中的已知量,其值分别为公式(18)、公式(19)和公式(20):

$$A = \frac{\pi^2 \sqrt{1 + (\Delta z_k / \Delta r_k)^2}}{3}, \quad (18)$$

$$B = \pi^2 \sqrt{1 + (\Delta z_k / \Delta r_k)^2} r_k, \quad (19)$$

$$C = \frac{\pi \left[ 1 + (\Delta z_k / \Delta r_k)^2 \right] [(r_k)^2 - (r_{k-1})^2]}{2} - \frac{\pi \cdot [1 + \Delta z_k / \Delta r_k^2] \Delta r_{k-1}^2}{6} - \frac{\pi \left[ 1 + (\Delta z_k / \Delta r_k)^2 \right] \Delta r_{k-1}}{2} + \frac{\pi \sqrt{\Delta r_k^2 + \Delta z_k^2} (r_{k-1} + r_k)}{2}. \quad (20)$$

由于  $A, B, C$  均为已知量,且测量过程中  $R$  轴单方向运动,所以  $\Delta r_{k+1}$  只有唯一可能,即每次  $R$  轴的运动量是确定的。

于是可根据  $\Delta r_{k+1}$  计算出  $\Delta z_{k+1}$ ,如公式(21)所示:

$$z_{k+1} = z_k + \frac{r_{k+1} - r_k}{r_k - r_{k-1}} (z_k - z_{k-1}). \quad (21)$$

由于离轴非球面的曲率具有连续性,因此传感器转轴角度可使用上一个采样点的角度变动与之前每次角度变化参数的平均值之和,如公式(22)所示:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{1}{k-2} \sum_{i=2}^k (\varphi_i - \varphi_{i-1}). \quad (22)$$

综上,采样路径可表示为公式(23):

$$\begin{cases} \theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta \\ r_{k+1} = r_k + \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ z_{k+1} = z_k + \frac{r_{k+1} - r_k}{r_k - r_{k-1}}(z_k - z_{k-1}) \\ \varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{1}{k-2} \sum_{i=2}^k (\varphi_i - \varphi_{i-1}) \end{cases}, \quad (23)$$

其中,  $\Delta\theta$  为主轴角速度与间隔时间的乘积。

在此基础上,对口径为 100 mm、离轴量为 50 mm、曲率半径为 1 000 mm、圆锥常数为 -1 的离轴非球面进行仿真测量,仿真测量的结果如图 9(a)所示。算法的仿真测量误差如图 9(b)和图 9(c)所示,算法带来的误差值低于 2 nm,满足高精度测量需求,因此该算法可用于大口径、大曲率变化离轴非球面的纳米级精度测量。

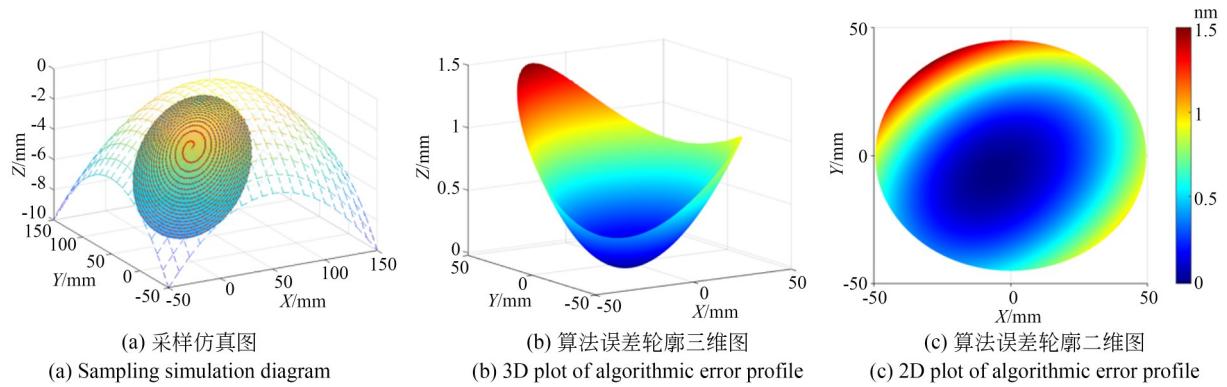


图 9 算法仿真图

Fig. 9 Algorithm simulation schematic diagram

### 3 实验结果及分析

测量实验使用如图 10 所示的激光差动共焦曲面测量系统。

系统中的激光差动共焦传感器选用波长为

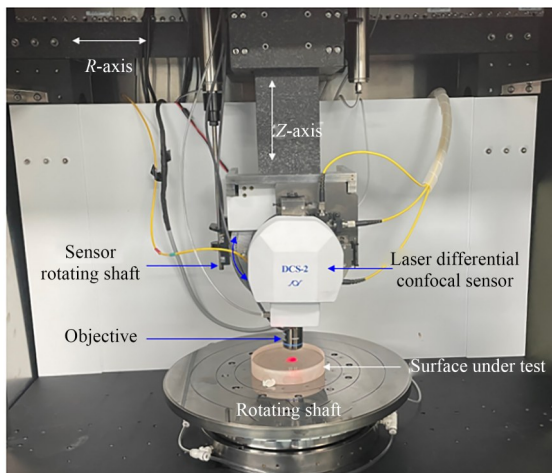


图 10 激光差动共焦曲面测量系统

Fig. 10 Laser differential confocal surface measurement system

633 nm 的激光光源和数值孔径  $NA$  为 0.8、焦距为 1.8 mm、放大倍数为  $100\times$ 、材质为 K9 玻璃的测量物镜。在测量时,将待测离轴非球面放置于主轴上,主轴带动待测面进行旋转运动, $R$  轴和  $Z$  轴分别驱动传感器进行水平和竖直方向的移动,传感器轴驱动传感器进行转动,实现测量方向接近待测点法线方向的转动,通过激光差动共焦传感器进行轴向定焦扫描,逐点获取待测表面的面形轮廓信息。

选取一个直径为 150 mm、曲率半径为 1000 mm、离轴偏移量为 5 mm、二次非球面系数为 -1、材料熔融石英玻璃、表面有镀铝膜的离轴非球面作为被测样品,使用本文方法进行测量,表面面形残差测量结果如图 11(a)所示,测量的误差峰谷(Peak to Valley, PV)值为 94 nm,RMS 值为 12 nm;用 Zygo 干涉仪对该离轴非球面进行测量,结果如图 11(b)所示,测量所得 PV 值为 91 nm,RMS 值为 11 nm;将本文方法测量结果与 Zygo 干涉仪测量结果点对点作差,得到面形差别图如图 11(c)所示,面形差别图 RMS 值为 3 nm,

故两者面形接近,图中有较为明显的条纹状,说明面形差别主要由测量方法的原理导致。为避免偶然误差的影响,使用本文方法对所用离轴非球面进行 10 次重复测量,具体结果如表 1 所示,为方便表述,在表中本文测量结果与 Zygo 干涉仪测量结果的面形差别图对应 PV 值写作  $PV_0$ , RMS 值写作  $RMS_0$ , 10 次重复测量所得平均 PV 值为 94 nm, 平均 RMS 值为 12 nm, 与 Zygo 测量结果的面形差别图 RMS 平均值为 3 nm, 其  $3\sigma$  值小于 5 nm, 说明所用方法满足离轴非球面的高精度测量需求,且具有良好重复性。

在大倾角情况下,斜面表面反射光线的偏折和光路变化类似于离轴非球面产生的光线行为。因此,为验证该方法对离轴非球面大倾角区域的

有效性,选取直径为 100 mm、材料为熔融石英玻璃的平面为待测件,将其放置于角位移台上,调整倾斜角度为  $20^\circ$ ,模拟离轴非球面进行测量。该倾斜平面表面轮廓残差测量结果如图 12(a)所示,测量的 PV 值为 82 nm, RMS 值为 14 nm; 用 Zygo 干涉仪对该平面进行测量,结果如图 12(b)所示,测量所得 PV 值为 78 nm, RMS 值为 10 nm; 将本文方法测量的结果与 Zygo 干涉仪测量结果点对点作差,得到面形差别图如图 12(c)所示,面形差别图 RMS 值为 5 nm, 故两者面形接近,图中有较为明显的条纹状,说明面形差别主要由测量方法的原理导致。为避免偶然误差的影响,相同条件下进行 10 次重复测量,具体结果如表 2 所示。

表 1 离轴非球面 10 次重复测量结果  
Tab. 1 Results of 10 repeated measurements for the off-axis aspheric surface (nm)

| Count     | PV | RMS | $PV_0$ | $RMS_0$ |
|-----------|----|-----|--------|---------|
| 1         | 94 | 12  | 10     | 3       |
| 2         | 97 | 14  | 13     | 5       |
| 3         | 95 | 12  | 12     | 3       |
| 4         | 96 | 12  | 12     | 3       |
| 5         | 94 | 11  | 10     | 4       |
| 6         | 95 | 11  | 11     | 2       |
| 7         | 92 | 12  | 9      | 3       |
| 8         | 93 | 13  | 10     | 4       |
| 9         | 95 | 12  | 11     | 4       |
| 10        | 93 | 11  | 10     | 3       |
| Mean      | 94 | 12  | 11     | 3       |
| $3\sigma$ | 5  | 3   | 4      | 3       |

表 2  $20^\circ$  倾斜平面 10 次重复测量结果  
Tab. 2 Results of 10 repeated measurements for the  $20^\circ$  tilted surface (nm)

| Count     | PV | RMS | $PV_0$ | $RMS_0$ |
|-----------|----|-----|--------|---------|
| 1         | 82 | 14  | 14     | 5       |
| 2         | 85 | 14  | 16     | 7       |
| 3         | 81 | 13  | 13     | 4       |
| 4         | 83 | 15  | 14     | 5       |
| 5         | 82 | 13  | 13     | 6       |
| 6         | 86 | 16  | 15     | 6       |
| 7         | 85 | 15  | 16     | 7       |
| 8         | 82 | 14  | 14     | 5       |
| 9         | 84 | 13  | 15     | 5       |
| 10        | 81 | 13  | 14     | 7       |
| Mean      | 83 | 14  | 14     | 6       |
| $3\sigma$ | 5  | 3   | 3      | 3       |

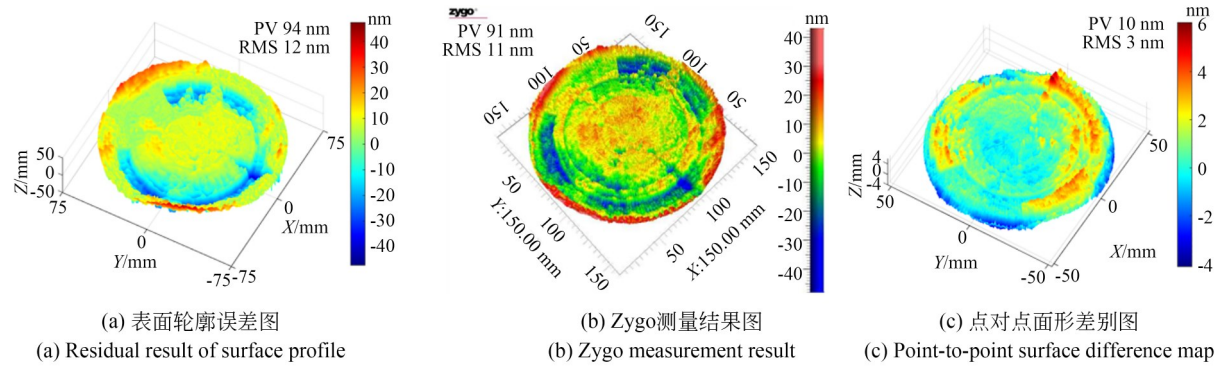


图 11 离轴非球面轮廓测量结果

Fig. 11 Off-axis aspheric surface profile measurement results

在表 2 中,本文测量结果与 Zygo 干涉仪测量结果的面形差别图 PV 值写作  $PV_0$ , RMS 值写作  $RMS_0$ , 10 次重复测量平均 PV 值为 83 nm, 平均

RMS 值为 14 nm, 与 Zygo 测量结果的面形差别图平均 RMS 值为 6 nm, 其  $3\sigma$  值小于 5 nm, 说明所用方法满足高精度测量需求, 且具有良好重复性。

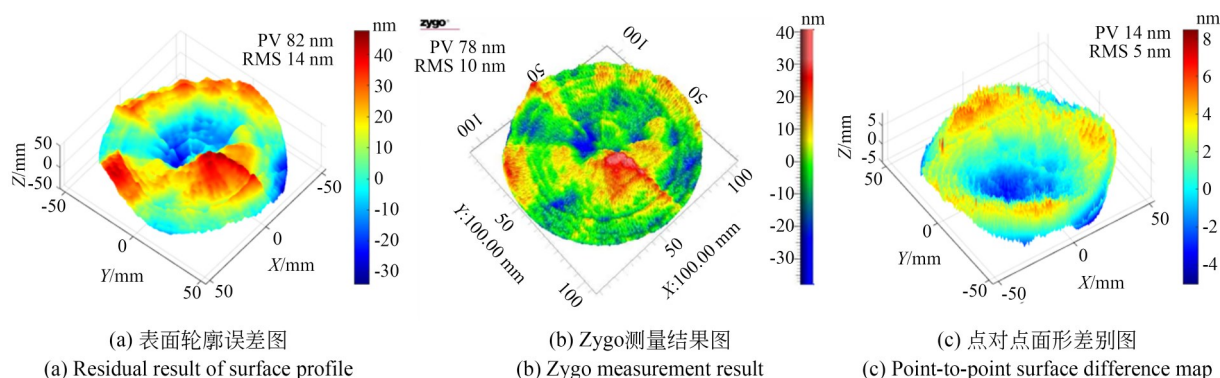


图 12  $20^\circ$  倾斜平面轮廓测量结果

Fig. 12 Profile measurement results of  $20^\circ$  tilted surface

## 4 结 论

本文提出了一种基于空间约束的差动共焦离轴非球面自适应测量方法, 该方法以平移-回转扫描原理为基础, 根据激光差动共焦技术的高分辨、抗倾角性能, 构建规划测量点和待测点之间的距离和倾角两个维度的空间约束模型, 以减少对待测表面初始调整姿态的依赖, 确保扫描过程中待测点始终在可测量范围内; 基于空间约束模型, 提出等效面积优化等面积准则下的螺旋扫描算法, 在测量过程中动态规划测量点, 逐点实现对待测表面的全局采样, 完成对待测表面的全口径、曲率自适应测量; 使用该方法对直径为 150 mm、曲率半径为 1 000 mm 的

离轴非球面和倾斜角度为  $20^\circ$  的平面的表面形貌分别进行 10 次重复测量, 将测量结果与 Zygo 干涉仪测量结果点对点作差, 所得面形差别图 RMS 值均小于 10 nm, 两者所得  $3\sigma$  值均小于 5 nm。实验结果表明, 本文所用方法可实现对离轴非球面的高精度测量, 且具有良好的重复性。

### 作者贡献声明:

马维阔: 测量方法的提出, 论文构思和撰写;  
邱丽荣: 实验指导、论文指导;  
李奕豪: 测量实验的设计, 数据分析及处理;  
赵维谦: 项目管理, 提供实验所需资源;  
刘昱含: 论文审核与编辑。

### 参考文献:

- [1] CAO J J, CHANG J, WANG W X, *et al.* Design of off-axis aspheric four-mirror non-axial mechanical zoom optical system with large relative aperture[J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 29119-29131.
- [2] LU K, WANG R Y, LI D H, *et al.* 基于视线标定立体偏折术的离轴非球面形检测[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(13): 1304006.
- [3] LI F Z, 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.
- [4] 赵亮, 李朝荣. 航天遥感光学系统设计与研究[J]. *光电技术应用*, 2015, 30(5): 22-25, 50.  
ZHAO L, LI C R. Design and research on aerospace remote sensing optical system[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2015, 30(5): 22-25, 50. (in Chinese)
- [5] YAN L S, ZHU D Y, LI M, *et al.* Research on compensating stitching testing for convex aspherical surface [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126162.

- [6] WANG X. Fabrication and testing of an off-axis aspheric surface with abnormal shape[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 9(43): 2959-2964.
- [7] ZABOROWSKI W, HARMATYS W, GĄSKA A. The importance of differences in results obtained from measurements with various measuring systems and measuring modes in industrial practice[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(23): 12412.
- [8] GIBLER D M, MILLER S V, LITTLE E K. The importance of correct measurement: a response to palmer[J]. *International Studies Quarterly*, 2020, 64(2): 476-479.
- [9] GUO Q, FU W Y. An improved measurement method of size of mechanical parts based on monocular vision[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1453(1): 012053.
- [10] 陈宝华, 吴泉英, 唐运海, 等. 大离轴量非球面反射镜的加工方法[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1095-1102.  
CHEN B H, WU Q Y, TANG Y H, *et al.* Processing method of large off-axis aspheric mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1095-1102. (in Chinese)
- [11] 钟波, 陈贤华, 王健, 等. 高精度离轴非球面透镜的制造与检测[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 210-217.  
ZHONG B, CHEN X H, WANG J, *et al.* Fabrication and test of high-precision off-axis aspheric lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 210-217. (in Chinese)
- [12] 温凌峰, 姚亚斌, 周启彪, 等. 离轴非球面反射镜设计与超精密加工技术[J]. 新技术新工艺, 2017(2): 75-78.  
WEN L F, YAO Y B, ZHOU Q B, *et al.* Design and technology of ultra-precision machining for off-axis aspheric mirror[J]. *New Technology & New Process*, 2017(2): 75-78. (in Chinese)
- [13] LI Z, GRÖGER S. Experimental study of non-measured points on surface measurement using structured illumination microscopy[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2022: 763-778.
- [14] GUO W J, ZHAO L P, TONG C S, *et al.* Adaptive centroid-finding algorithm for freeform surface measurements[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): D75-D83.
- [15] BEVERAGE J L, SHACK R V, DESCOUR M R. Measurement of the three-dimensional microscope point spread function using a Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Journal of Microscopy*, 2002, 205(1): 61-75.
- [16] 孙鹏飞, 张求知, 李文强, 等. 单目多角度空间点坐标测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2801-2807.  
SUN P F, ZHANG Q Z, LI W Q, *et al.* Monocular multi-angle measurement method for spatial point[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(12): 2801-2807. (in Chinese)
- [17] WISNIEWSKI H J, STALCUP T E, SMYTHE R A, *et al.* Interferometric metrology probe for highly sloped freeform optics[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(32): 8482-8490.
- [18] QI X Y, ZHOU C L, DING Y P, *et al.* Novel absolute phase measurement method with few-patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 154: 107031.
- [19] KUDO R, KITAYAMA T, TOKUTA Y, *et al.* High-accuracy three-dimensional aspheric mirror measurement with nanop profiler based on normal vector tracing method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 159-162.
- [20] NGUYEN P, LEE C. Freeform surface profiling by iterative learning-extremum seeking control[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(11): 5633-5646.
- [21] ZHANG Y, CHEN K, GUO P, *et al.* Profile tracking for multi-axis ultrasonic inspection of model-unknown free-form surfaces based on energy concentration[J]. *Measurement*, 2021, 172: 108867.
- [22] WANG W B, ZHENG X, LIU Y H, *et al.* Steep freeform measurement method based on a normal transverse differential confocal[J]. *Optics Express*, 2022, 30(23): 41804-41820.
- [23] QIU L R, SU Y H, XU K M, *et al.* A high-precision multi-dimensional microspectroscopic technique for morphological and properties analysis of cancer cell[J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1): 129.
- [24] WANG L X, WANG Y, MA X X, *et al.* Measurement of laser differential confocal geometrical

parameters for ICF capsule[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4(2): 025401.

[25] TANG Y Q, LIU Y H, WANG W B, *et al.*

Freeform measurement method based on differential confocal and real-time comparison[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12732-12750.

#### 作者简介:



马维阔(2000—),男,河北廊坊人,硕士研究生,2022年于河北工业大学获得学士学位,现就读于北京理工大学光电学院,主要从事光学精密测量方面的研究。E-main: 969837135@qq.com

#### 通讯作者:



刘昱含(1996—),男,黑龙江大庆人,博士,2024年于北京理工大学获得博士学位,现为北京理工大学光电学院博士后,主要从事精密光电测试技术与仪器领域方面的研究。E-main: 2449664655@qq.com