

文章编号: 1002-1582(2025)05-0533-08

基于镜像重构的差动共焦快速曲面测量方法

朱子腾, 刘昱含*, 张晓程, 邱丽荣
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 针对传统差动共焦方法测量复杂曲面精度和效率难以兼顾的问题, 提出基于镜像重构的差动共焦快速曲面测量方法, 首先对待测曲面进行先导式扫描, 利用共焦曲线关于零点对称的特性进行曲线镜像重构, 减少扫描行程, 提高测量效率; 进行精扫描, 依据差动共焦曲线的过零点精确对应待测曲面特征点的特性, 保证对曲面表面的高精度定焦。方法无需复杂的硬件改造, 突破测量时对线性区间的依赖, 经实验验证, 所提方法所测面形结果的RMS值为13.8nm, 保证了测量精度, 且与传统方法所测表面误差主要特征分布接近, 测量效率提高到传统方法的2倍以上, 为复杂表面的快速精密测量提供一种新的有效途径。

关 键 词: 差动共焦测量; 曲面测量; 快速扫描; 镜像重构

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Differential confocal fast surface measurement based on mirror image reconstruction

ZHU Ziteng, LIU Yuhang*, ZHANG Xiaocheng, QIU Lirong

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In response to the difficulty of balancing accuracy and efficiency in measuring complex surfaces using traditional differential confocal methods, a proposes a differential confocal rapid surface measurement method based on mirror reconstruction is proposed. Firstly, the surface to be measured is scanned in a pilot manner, and the curve mirror reconstruction is carried out using the symmetry of the confocal curve about the zero point to reduce the scanning stroke and improve measurement efficiency; Perform precise scanning based on the zero crossing point of the differential confocal curve to accurately correspond to the characteristics of the feature points of the measured surface, ensuring high-precision focusing of the surface. This method does not require complex hardware modifications and breaks through the dependence on linear intervals during measurement. Through experimental verification, the RMS value of the surface shape results measured by this method is 13.8nm, ensuring measurement accuracy and approaching the main characteristic distribution of surface errors measured by traditional methods. The measurement efficiency is improved by more than twice that of traditional methods, providing a new and effective approach for rapid and precise measurement of complex surfaces.

Keywords: differential confocal measurements; surface measurement; Quick Scan; mirror image reconstruction

0 引 言

曲面(包含球面、非球面、自由曲面等)元件设计自由度大, 具有改善光学系统成像质量、

提高系统分辨力、提升仪器耐用性等独特优势, 因此被广泛应用于空间遥感^[1-3]、武器装备^[4, 5]、激光惯性约束核聚变等领域^[6-10]。以上领域对该类元件的精度要求均较高, 加工精度受限于测量精度,

收稿日期: 2025-04-15; 收到修改稿日期: 2025-05-26

作者简介: 朱子腾(2000—), 女, 硕士研究生, 从事精密光学测量技术与仪器研究。2820802519@qq.com

刘昱含(1996—), 男, 博士后, 博士, 从事精密光学测量技术与仪器研究。

* 通讯作者: 2449664655@qq.com

然而曲面元件曲率连续变化、形状复杂,矢高变化大,其测量点高度信息的准确获取极具挑战性,且精度要求较高,在生产中及时反馈工艺偏差极为重要,对曲面元件测量效率的要求日益显著,因此对于曲面的快速精密测量的研究尤为重要。非接触式测量法因具有测量精度和效率高、自动化程度高、对被测物体无损伤等优势,逐渐成为曲面测量的主流测量方法^[11-13],其中的差动共焦测量方法由于其高分辨、高精度特性而被广泛应用于曲面测量^[14-16]。

由于曲面表面通常具有不规则的起伏特征和较大的矢高变化率,往往难以兼顾测量精度和测量效率。王等^[17]于2000年提出的经典差动共焦测量方法通过对称布置两个针孔探测器,利用前、后焦响应信号的差值曲线实现轴向定位,其理论测量精度可达纳米级,然而,该方法受限于线性拟合区域的范围,在测量高矢高变化率曲面时,需要频繁调整测量位置,导致测量效率显著降低;张^[18]等通过在传统光路中引入电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)探测器,利用光斑尺寸与离焦量的对应关系,将轴向量程扩展至310 μm ,显著减少了轴向扫描次数,提高了测量效率,但该方法需要引入CCD,但会引入像素非均匀性、光学像差、光斑定位算法误差等新的误差源;翁等^[19]采用柔性铰链导向机构实现了5mm的超大量程测量,可以满足复杂曲面的测量要求,但其9.1nm的系统误差主要来源于铰链结构的机械振动,这一误差水平难以满足超高精度测量的需求;赖^[20]等最新提出的线扫描差动共聚焦方法虽然实现了白光干涉仪6.59倍的测量效率,但其对光源稳定性和光学系统装调精度提出了极高要求,增加了系统的实现难度和维护成本。

针对以上方法的局限性,本研究创新性地提

出了一种基于镜像重构的差动共焦快速曲面测量方法,该方法通过先导式扫描获取部分曲线数据,利用镜像重构算法生成虚拟差动共焦曲线,成功实现了轴向测量量程的扩展和扫描行程的显著缩减。系统根据先导式扫描获得的离焦量信息进行精扫描,确保了定焦精度和最终测量结果的准确性。实验数据表明,该方法无需复杂的硬件改造,突破了对差动共焦曲线线性区间的限制,使扫描行程减少,测量效率提高到传统方法的2倍以上,同时保持与传统方法相当的测量精度。本文方法解决了测量复杂曲面时精度和效率难以兼顾的问题,突破了传统差动共焦对线性区间的依赖,为复杂曲面的快速高精度快速测量提供了新的解决方案。

1 测量原理

本文提出了一种基于镜像重构的差动共焦快速曲面测量方法。如图1所示,系统采用典型的差动共焦光路结构:激光光源由激光器发出,光束由扩束镜经偏振分光镜(Polarizing Beam Splitter, PBS)后通过1/4波片进入物镜后垂直照射到被测样品表面,反射光束经1/4波片和偏振分光镜(PBS)进入测量光路,测量光束经汇聚镜后被分光镜(Beam Splitter, BS)等分成两路光束进入光电探测部分,分别被位于准直镜焦点一前一后等量离焦的点探测器1、2探测接收,在探测器前方放置针孔进行空间滤波,并设置模拟开关用于调节探测器增益,采用MAXIM公司的模拟开关MAX4730,它是一款单刀/双掷开关,具有3.5 Ω 的低导通电阻和0.45 Ω 的平坦度,通过A₀管脚实现NO和NC两个通道的调节,从而实现5倍和10倍两档放大倍数的切换。本文方法需先对待测曲面进行先导式扫描,先导式扫描的量程范围较

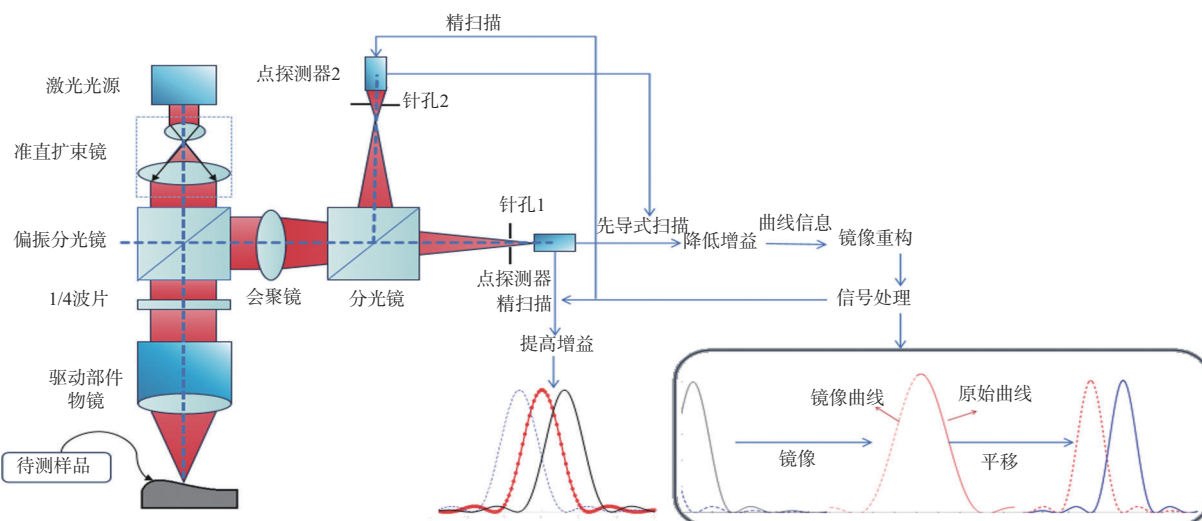


图1 基于镜像重构的差动共焦快速曲面测量光路原理

大,扫描行程短,为使得光通量更大,需降低探测器增益,之后对曲线进行镜像重构和平移得到虚拟的差动共焦曲线,计算零点位置得到离焦量;而在进行精扫描测量时,则需提高探测器增益,保证测量精度。根据先导式扫描得到的离焦量进行精扫描,当被测件在物镜焦点附近沿测量光束光轴方向进行移动扫描时,两路探测器得到响应信号 I_1 和 I_2 由采集电路板放大滤波后送入计算机处理,前后焦两个点探测器轴向反向离焦获得共焦曲线,点探测器1、2分别探测得到焦前响应信号和焦后响应信号,将其差动相减得到差动共焦响应信号,最终对处理得到的光强响应曲线求零点得到曲面高度信息。

如果点探测器不存在轴向偏移时,将光强进行归一化处理得到共焦响应公式为^[21]

$$I(u) = \left[\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right]^2 \quad (1)$$

式中, u 表示点探测器的归一化轴向位移量。

如图2所示,当两个点探测器存在轴向偏移量 $-m$ (前焦探测器)或 m (后焦探测器)时,得到前焦和后焦的轴向响应曲线,两者相减得到差动响应曲线

$$I(u) = \left[\frac{\sin(u/2 - u_m/4)}{(u/2 - u_m/4)} \right]^2 - \left[\frac{\sin(u/2 + u_m/4)}{(u/2 + u_m/4)} \right]^2 \quad (2)$$

式中, u 表示样品归一化轴向位移量; u_m 表示探测器归一化离焦量。

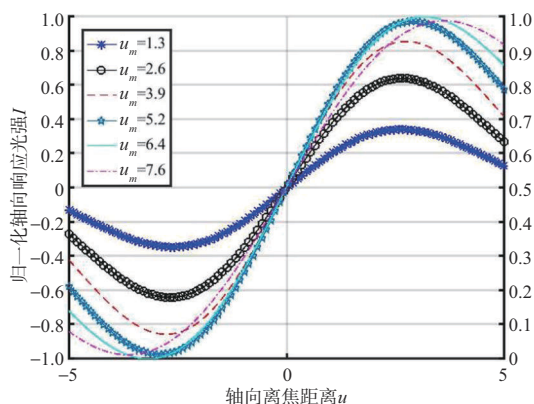


图2 针孔不同离焦距离的轴向响应曲线

1.1 针孔最佳离焦量

根据差动共焦理论,测量物镜的NA、光源的波长、轴向响应曲线近似线性段的最大斜率和探测器的信噪比是影响差动共焦的轴向分辨力的关键因素,且差动共焦的轴向分辨力 r_u 可以表示为^[22]

$$r_u = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \text{NA}^2} \cdot \frac{1}{\text{SNR} \cdot k_{\max}} \quad (3)$$

式中, $k_{\max}$ 为差动共焦轴向响应曲线最大斜率,即轴向响应曲线的过零点斜率,其表达式为

$$k_{\max} = \left| \frac{\partial I_D(0, u, u_d)}{\partial u} \right|_{u_d=0} \quad (4)$$

根据公式仿真得到针孔不同离焦量下差动共焦轴向响应曲线如图2所示,由图中可以看出,差动共焦传感器轴向响应曲线的形状会随着针孔离焦量的改变而改变,过零点的斜率随着针孔离焦量的增大而增大,近似线性区间的宽度随着针孔离焦量的增大而减小,由图可以看出,当针孔的离焦量逐渐增大时,轴向响应曲线的过零点斜率增大,从而使轴向分辨力减小。因此,综合考虑近似线性段的范围和轴向测量分辨力,选择轴向归一化离焦距离 $u_m = \pm 5.2$ 时,差动共焦传感器的轴向分辨力 r_u 为

$$r_u = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \text{NA}^2} \cdot \frac{1}{\text{SNR} \cdot k_{\max}} = 0.00098 \mu\text{m} \quad (5)$$

根据差动共焦曲线的零点位置即可以得到被测样品的焦点位置。轴向离焦量影响差动共焦曲线过零点斜率,继而影响定焦灵敏度,选择最佳离焦量 $u_m = \pm 5.2$ 使定焦灵敏度最大,仿真公式得到差动共焦响应曲线如图3所示。

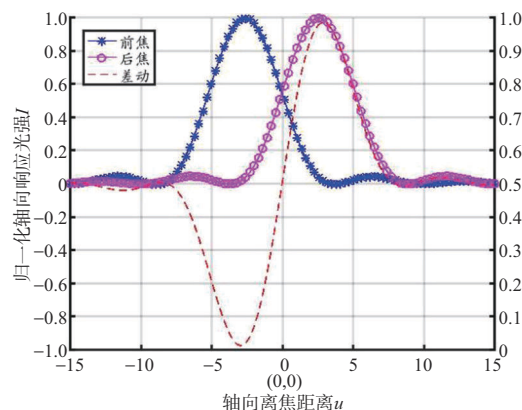


图3 差动共焦响应曲线

1.2 差动共焦测量线性范围区间

差动共焦测量方法在对待测点进行测量时,其线性拟合效果的评价需要综合考虑拟合优度(可决系数)、曲线斜率和线性拟合区间宽度这三个关键参数。这三个参数之间存在相互制约的关系:拟合优度直接反映了测量结果的误差水平,曲线斜率决定了系统的轴向分辨能力,而线性拟合区间宽度则直接影响测量的有效范围。在实际应用中,为了获得最优的测量性能,需要在保证较高拟合优度和较大斜率的前提下,尽可能扩大线性拟合区间的宽度,从而实现测量精度、分辨力和量程之间的最佳平衡。这种平衡对于提升差动共

焦测量系统的整体性能至关重要。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中, y_i 为第 i 点实际对应的强度; $\bar{y}$ 为所有采样点强度的平均值; $\hat{y}_i$ 为拟合直线的第 i 点对应的强度。 R^2 的取值范围为 $[0, 1]$, R^2 越接近 1 的时候, 说明直线拟合精度越高。选取 0.997 为接受阈值, 即当 R^2 大于 0.997 时, 选定区域可用于拟合求解焦点位置。选取差动共焦轴向响应曲线单调区域的 60% 作为最优线性拟合区间, 此时, 线性归一化范围为 $[-1.9, 1.9]$, 可决系数为 99.7%, 归一化最大非线性误差为 $(\Delta u)_{\max} = 0.0784^{[23]}$ 。

2 基于镜像重构的差动共焦快速曲面测量原理

在测量过程中, 对待测表面某一采样点进行测量时, 物镜会在一定高度范围内进行轴向扫描, 此时前、后两个点探测器会分别采集到两路共焦响应信号。将这两路信号进行差分处理, 即可得到差动共焦曲线。该曲线的线性区间对测量精度至关重要——只有当零点位置恰好位于差动共焦曲线的线性范围内时, 才能通过曲线的单调拟合区域准确计算出零点位置, 如图 4 (b) 所示。然而在实际测量中, 由于被测表面的高度差异或初始定位偏差, 零点位置可能偏离线性区间, 导致出现图 4 (a) 和图 4 (c) 所示的两种情况: 零点位于线性区间的上方或下方, 此时探测器仅能获取非阴影部分的曲线片段, 传统的差动共焦方法因无法利用非线性区域进行精确解算, 将直接导致测量失效。针对这一局限性, 本文提出的改进方法通过对有限的共焦曲线信息进行镜像重构、平移等处理, 即使零点不在标准线性区间内, 也能有效计算离焦量。该方法利用镜像重构技术扩展有效测量范围, 显著减少了物镜的往复扫描行程, 实现了曲面轮廓的高效快速测量, 其整体流程如图 5 所示。

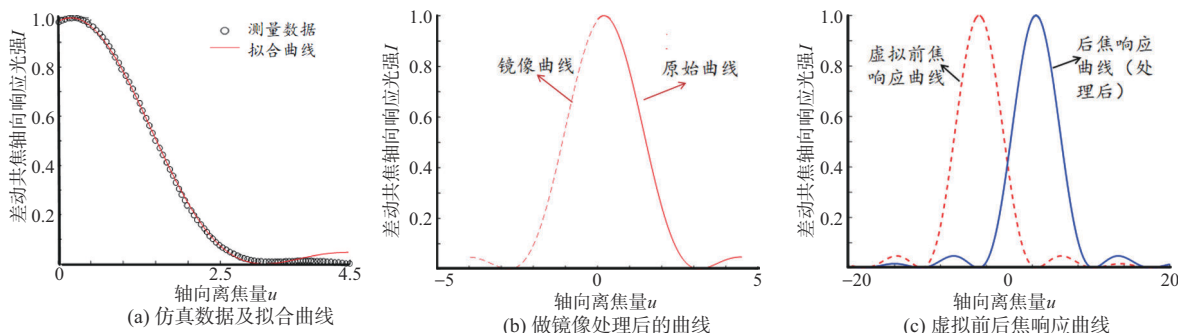


图 6 先导式扫描仿真图

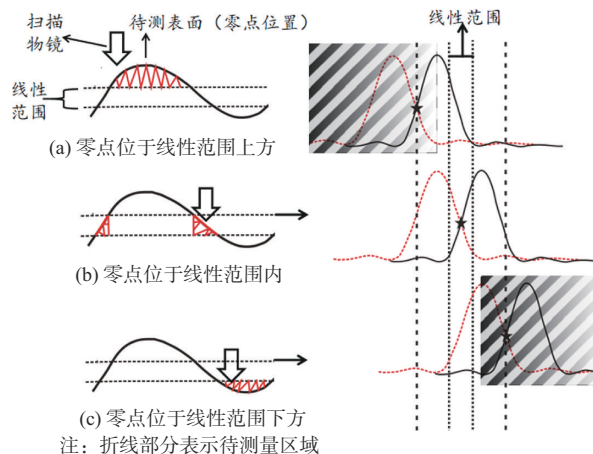


图 4 零点与线性范围不同位置关系示意图

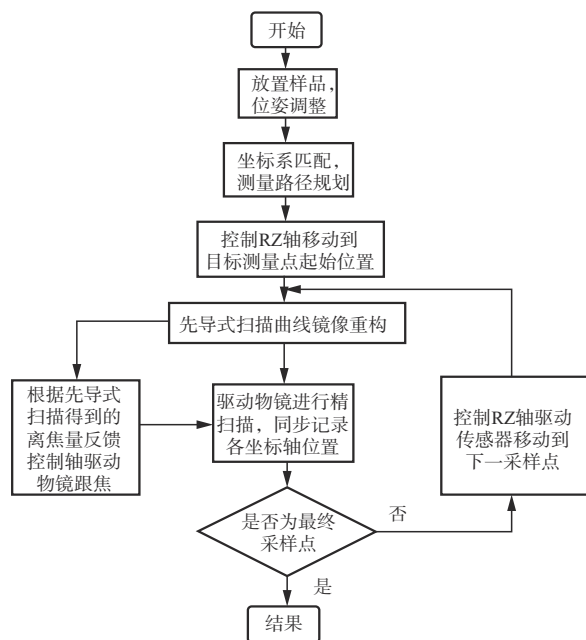


图 5 镜像重构的差动共焦快速曲面测量流程图

2.1 先导式扫描曲线镜像重构方法

在差动共焦测量过程中, 当被测表面高度超出预设线性范围时, 传统方法会因无法获取完整的共焦曲线而导致测量失效。针对这一问题, 本文提出基于先导式扫描曲线的镜像重构方法, 通过利用共焦曲线的对称特性来扩展有效测量量程。如图 6 (a) 所示, 当物镜扫描范围未能覆盖差动曲线零点

时,系统仅能获取非完整的共焦曲线片段(以零点位于线性区间左侧为例)。由于共焦曲线具有严格的对称性,前焦响应曲线 $I(u, -u_m)$ 关于 $u = -u_m/2$ 对称,后焦响应曲线 $I(u, u_m)$ 关于 $u = u_m/2$ 对称,这一特性为曲线重构提供了理论基础。具体实现时,首先对实测的部分曲线进行多项式拟合,确定其变化趋势后,再基于上述对称轴进行镜像重构,即可生成完整的共焦响应曲线。考虑到两个点探测器的针孔偏移量大小相等、方向相反且光学参数一致,系统可进一步通过平移操作生成虚拟的共焦响应曲线。将重构得到的前后焦虚拟曲线进行差分运算后,就能获得完整的虚拟差动共焦曲线,从而准确计算出原本位于测量盲区内的零点位置。这种方法突破了传统差动共焦对线性区间的依赖,实现了量程的线性扩展,不仅避免了机械结构的复杂改造,还显著提升了系统对超量程样品的适应能力。

根据式(1),同时为了提高拟合的准确性,共焦曲线用 sinc^2 进行曲线拟合^[24],如图6(a)所示,并将数据进行归一化处理,然后使用质心法作为补充,以验证结果的准确性或处理不规则数据。

由式(1)建立非线性拟合模型,即

$$I(u) = \left(\frac{\sin(bu + c)}{bu + c} \right)^2 \quad (7)$$

式中, b 和 c 为待拟合的参数。

利用高斯-牛顿迭代法进行非线性拟合,该方法利用泰勒级数的展开多次迭代,不断代替原非线性回归模型,通过多次反复的迭代修正其线性回归模型的模型系数,最后实现最小化非线性函数的平方和。

对于所测点集 $M = \{(u_1, I_1), (u_2, I_2) \cdots (u_m, I_m)\}$, β 代表一个参数组 (b, c) ,且 β 使得 (u_i, I_i) ($i=1 \cdots m$) 满足 $I=f(u, \beta)$,则误差平方和为 $S(\beta)$,其最小值表示为

$$\arg \min_{\beta} S(\beta) = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^m [I_i - f(u_i, \beta)]^2 \quad (8)$$

在之后的每次迭代中, β 都会被一个新的估计值 $\beta + \delta$ (指步长)所取代,为了确定 δ ,需要首先通过雅克比矩阵 J 估计 $f(u_i, \beta + \delta)$ 的值

$$f(u_i, \beta + \delta) \approx f(u_i, \beta) + J_i \delta_i \quad (9)$$

式中

$$J_i = \frac{\partial f(u_i, \beta)}{\partial \beta} \quad (10)$$

当其导数为0时,误差平方和 $S(\beta)$ 取得最小值,那么

$$S(\beta + \delta) \approx \sum_{i=1}^m [I_i - f(u_i, \beta) - J_i \delta]^2 \quad (11)$$

之后将 $S(\beta + \delta)$ 对 δ 求偏导得

$$(J^T J) \delta = J^T [I - f(\beta)] \quad (12)$$

式中, J 为雅克比矩阵,经过多次参数修正和迭代,即可求得最佳拟合参数组 β 。

得到最佳参数组后,即可找到峰值点,之后利用质心验证其峰值点,质心法^[25]也称为加权平均法,是一种通过计算数据的加权平均来确定数据中心位置的方法。在峰值检测中,质心法可用于估算数据分布的“中心”,通常被用来估计峰值的位置。对于所测点集 $M = \{(u_1, I_1), (u_2, I_2) \cdots (u_m, I_m)\}$,质心位置 u_{centroid} 可以通过以下公式计算

$$u_{\text{centroid}} = \frac{\sum (u_i, I_i)}{\sum I_i} \quad (13)$$

式中, I_i 作为权重 u_i 的位置,反映了数据点的强度和重要性,计算得到峰值位置。取两种方法得到峰值点横坐标的平均值作为最终结果 u_{max} 。以此为轴做拟合镜像处理,如图6(b)所示,根据选择的两探测器的离焦量,将拟合镜像之后的曲线进行平移,得到虚拟的前焦响应曲线,如图6(c)所示。将处理后得到的前后焦曲线进行求差运算,得到差动共焦曲线,得到被测面的高度信息。

以上可知,利用本文方法进行先导式扫描时,仅需覆盖部分前(后)焦曲线片段(如前焦或后焦的一半),即可通过拟合和镜像重构生成完整曲线。理论上,扫描行程可缩减至 $u_m/2$ (仅需覆盖峰值一侧至曲线对称轴附近)。

2.2 自适应精扫描测量方法

在差动共焦曲面测量过程中,针对每个采样点的高度信息获取,采用先导式预扫描与精扫描相结合的测量策略。在先导式扫描阶段,物镜沿轴向扫描一定范围,同时采集前后焦探测器的响应信号并生成差动共焦曲线。此时需通过实时信号分析判断扫描行程是否已覆盖差动曲线的零点位置,这一判断直接决定了后续测量流程的优化空间——若先导式扫描范围已包含零点,则系统可直接基于线性拟合区间计算该采样点的精确高度,省去冗余的精扫描步骤,显著提升测量效率;反之,若先导式扫描信号未覆盖零点,则需结合梯度分析法快速计算离焦量,并以此动态调整精扫描的定位区间,确保在最小化物镜运动行程的前提下捕获零点位置。为实现这一智能判断,系统采用基于梯度变化的软件判别算法:对先导式扫描获得的前后焦响应曲线进行分段梯度计算(以六个数据点为单元简化运算),通过分析梯度值的突变特征识别曲线单调性变化趋势,从而区分零点是否存在于当前扫描区间。该方

法的流程如图7所示,其核心在于将传统固定式扫描策略转化为动态自适应的测量过程,既避免了全局精扫描的时间消耗,又通过预扫描信号的实时解析确保了测量可靠性,尤其适用于具有高度跳变的复杂曲面高效检测。

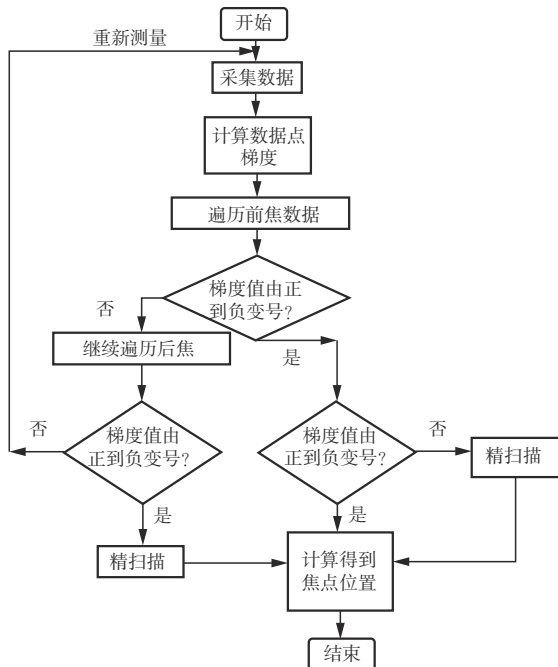


图7 精扫描的测量流程图

3 实验验证

为验证本文方法能够对曲面实现高精度快速测量,进行如下实验,分别为:定焦精度验证实验和曲面测量实验,采用如图8所示的自由曲面测量仪(仪器所用传感器为自研的激光差动共焦传感器)进行实验。该系统为极坐标测量系统,传感器波长 $\lambda=632.8\text{nm}$,测量物镜数值孔径 $\text{NA}=0.8$ 、焦距 f_0 为 1.8mm 、放大倍数 $N=100\times$ 的测量物镜。本文使用自主研发的音圈气浮位移台作为物镜驱动器,具有 4mm 同轴驱动行程和 0.5nm 量级运动分辨力,该音圈气浮位移台在 $100\mu\text{m}$ 范围内具有 150Hz 的往

返运动频率。测量环境为超净间实验室,控制实验温度、湿度和大气压强相对稳定,测量仪下方为气浮隔振平台减少振动影响,(温度: $23^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$;相对湿度: $65\pm 5\%\text{RH}$;大气压强: $101\pm 10\text{kPa}$;)

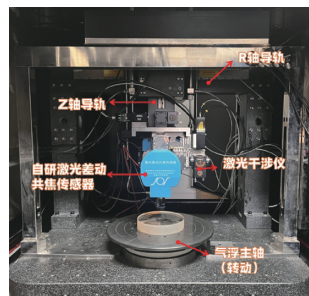


图8 自由曲面测量仪示意图

3.1 定焦精度验证实验

对自由曲面(有效孔径为 $\Phi 100\text{mm}$ 的离轴非球面,曲率半径 500mm ,离轴偏移量 4mm ,二次非球面系数 -1)进行测量。

验证使用本文方法测量时的定焦精度,本文方法的测量精度和效率会受到轴向扫描间距影响,不同轴向扫描间距在测量时会得到不同数量的测量点结果,理想条件下,在不同的归一化轴向扫描间距 δ 条件下,对上述自由曲面样品进行实验,记录其定焦偏差。这里, $\delta=4k\delta z\sin^2(\alpha/2)$,其中 δ 为物方轴向扫描间距, $\sin\alpha$ 为物方物镜数值孔径,对差动共焦测量系统的测量结果与理论位置之间偏差的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)进行, RMSE的计算方法如下式所示

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}} \quad (14)$$

将均方根误差(RMSE)作为两种方法(传统方法和本文方法)定焦精度的衡量依据。定焦精度随轴向归一化扫描间距 δ 变化的实验结果如图9所示。

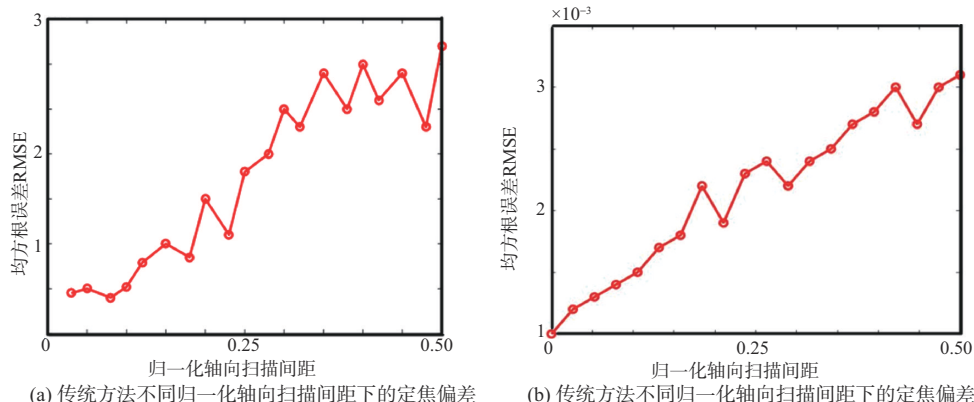


图9 传统方法与本文方法不同归一化轴向扫描间距定焦偏差

从图 9 中得出, 本文方法与传统方法的定焦精度均随与归一化轴向扫描间距呈正相关, 轴向分辨率与归一化轴向扫描间距呈负相关, 且定焦精度接近。

3.2 曲面测量实验

为避免环境因素影响, 分别采用传统差动共焦测量方法和本文方法对该曲面进行 10 次重复测量, 在利用本文方法进行测量时, 首先进行先导式扫描进行离焦量计算, 再进行自适应精扫描, 并对比测量精度和测量效率, 验证本文方法的可行性。

测量结果如表 1 所示, 分别计算传统方法与本文方法 PV、RMS 和测量所用时间的平均值, 利用传统方法标定的结果平均 PV 值为 78 nm, 平均 RMS 值为 13 nm, 测量所用平均时间为 1272.8s, 10 次重复测量的总时间为 12728s; 利用本文方法 10 次重复测量结果残差的 PV 平均值为 81.4nm, RMS 值为 13.8nm, 测量所用平均时间 (精扫描) 为 531.4s, 10 次重复测量总时间为 5904s, 其中, 测量序号为 1 的测量总时间 (先导式扫描+精扫描) 为 1120s, 小于传统方法测量时间, 利用本文方法测量时测量序号 2-9 的测量则无需进行先导式扫描。

表 1 传统方法与本文方法 10 次重复测量结果对比

测量序号	传统/本文峰谷值 PV/nm	传统/本文均方根值 RMS/nm	传统/本文测量时间 t/s
1	78/83	12/13	1279/1120(先导式扫描 590s+精扫描 530s)
2	80/79	11/15	1268/523
3	76/83	13/12	1260/550
4	77/79	11/15	1278/530
5	78/81	14/16	1273/521
6	79/80	14/14	1275/533
7	81/82	15/14	1279/540
8	77/82	13/14	1269/528
9	78/82	12/13	1270/534
10	78/83	15/12	1277/525

由以上实验结果可知, 本文方法的测量结果的 RMS 值为 13.8nm, 符合精度要求, 且测量效率提高到了传统方法的 2.16 倍 (10 次重复测量总时间计算), 且与传统方法测得的表面误差主要特征分布接近 (如图 10 (a)、(b) 所示)。实验结果表明, 本文方法可以实现对 $\Phi 100\text{ mm}$ 口径自由曲面的高精度测量, 且测量效率为传统方法的 2.16 倍。

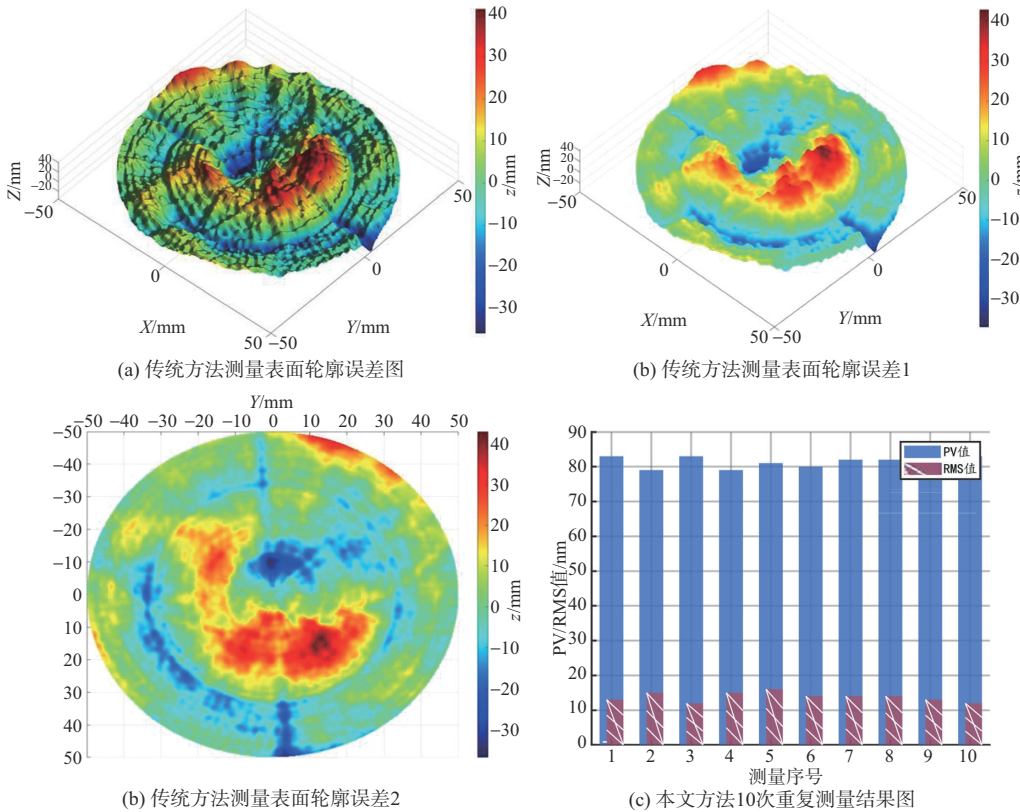


图 10 传统方法与本文方法测试结果对比

4 结 论

本文提出基于镜像重构的差动共焦曲面快速测量方法, 通过对待测曲面进行先导式扫描, 对

测得的曲线进行镜像重构, 提高了测量效率, 保证了定焦精度和测量精度。实验表明, 本文研究的方法测量结果 RMS 值为 13.8nm, 测量误差在允许范围内, 且与传统方法测得的表面误差主要特

征分布接近,测量效率提高到传统方法的2倍以上,该方法解决了测量曲面时可能由于量程范围较小而曲面矢高变化率较大导致精度和效率降低的问题,突破了传统差动共焦对线性区间的依赖,实现了量程的线性扩展,不仅避免了机械结构的复杂改造,还显著提升了系统对超量程样品的适应能力。核心在于将传统固定式扫描策略转化为动态自适应的测量过程,既避免了全局精扫描的时间消耗,又通过预扫描信号的实时解析确保了测量可靠性,尤其适用于具有高度跳变的复杂曲面高效检测。然而,本研究仍存在一些不足之处:首先,镜像重构算法对曲面曲率突变区域的适应性有待进一步提高,在极端曲率变化情况下可能出现重构误差;其次,系统对高反射率表面的测量稳定性需要进一步优化;未来的研究工作将着重从以下几个方向展开:(1)研究多模态传感信息融合技术,增强系统对不同反射特性表面的适应性;(2)优化实时处理算法,进一步提升系统的测量速度和稳定性,以满足工业在线检测的需求。这些改进将有望使该方法在精密光学制造、微电子检测等领域获得更广泛的应用。

参考文献:

- [1] Yang T, Zhu J, Hou W, et al. Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction process[J]. Opt Express, 2014, 22(8):9193—205.
- [2] Lei C, Cheng D, Xu C, et al. Optical design for off-axis three-mirror two-channel imaging system with freeform surfaces[C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2016. Beijing, China: IEEE, 2016.
- [3] Gannon C, Liang R. Using spherical harmonics to describe large-angle freeform lenses[J]. Appl Opt, 2018, 57(28):8143-7.
- [4] Cheng D, Wang Y, Huated d H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounisplay using free-form optics tiling[J]. Optics Letters, 2011, 36(11):2098—100.
- [5] Zwick S, Heist S, Franzl Y, et al. Wide-band phase-shifting fringe projector on the basis of a tailored free-form mirror[J]. Opt Eng, 2013, 52(2):023001-023001.
- [6] Kumar S, Tong Z, Jiang X Q. Advances in the design and manufacturing of novel freeform optics[J]. Int J Extreme Manuf, 2022, 4(3):33.
- [7] Sieber I, Yi A, Li L K, et al. Design of freeform optics for an ophthalmological application[C]//Proceedings of the Conference on Optical Modelling and Design III. Brussels, Belgium: Spie-Int Soc Optical Engineering: Bellingham, 2014.
- [8] Wang M, Zhao G, Shi Q, et al. Design methods and applications of freeform surface imaging optical systems[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8):0822012
- [9] Yang T, Duan Y, Cheng D, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1):0108001
- [10] Ye J F, Chen L, Li X H, et al. Review of optical freeform surface representation technique and its application[J]. Opt Eng, 2017, 56(11):110901(1—15)
- [11] Zhu R, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1):0112001
- [12] Li Z, Zhang X, Yu Y. Precise surface form measurements of off-axis aspheric freeform optics[M]. SPIE, 2023.
- [13] Liu Y H, Zhang X C, Fu Y, et al. A normal tracking differential confocal measurement method for multiple geometric parameters of hemispherical shell resonator with a common reference[J]. Meas Sci Technol, 2024, 35(4):045013
- [14] Zhang X, Qiu L, Zhao W, et al. Free-form surface measurement with laser differential confocal precise positioning[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 183:112325.
- [15] Yu S, Wang Z, Qiu L, et al. Development of laser scanning lateral differential confocal microscopic system[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(22):2211002
- [16] Yang Z, Yang S, Li R, et al. Nonholonomic spherical stitching measurement method for large-aperture angles based on differential confocal precise surface fixation[J]. Optics and Laser Technology, 2024, 168:109892
- [17] Fusheng Wang, Jiubin Tan, Weiqian Zhao. Optical probe using differential confocal technique for surface profile[C]//Process Control and Inspection for Industry. Beijing, Peoples R China: Spie-Int Soc Optical Engineering: Bel IEEE, 2000.
- [18] Zhang X, Liu Y, Fu Y, et al. Free-form measurement method based on differential confocal sensing and CCD image[J]. Measurement, 2024, 237:115134
- [19] 翁川, 尹自强. 一种二级曲面测量装置的设计及其不确定度的标定[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10):39—48.
Weng Chuan, Yin Ziqiang. Design of a two-stage surface measuring device and its uncertainty calibration[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10):39—48.
- [20] Lai D, Kong L, Lian G, et al. Differential confocal measurement method of linear scanning based on dual linear array camera[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2):98—303.
- [21] Sun R, Qiu L, Yang J, et al. Laser differential confocal radius measurement system[J]. Appl Opt, 2012, 51(26):6275—81.
- [22] 李志刚, 赵维谦. 高精度激光差动共焦超长焦距测量方法与技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(06):10.
Li Zhigang, Zhao Weiqian. Research on measurement method and technology of high-precision laser differential confocal ultralong focal length[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(06):10.
- [23] Luo J, Liu Z, Liu Y, et al. Differential confocal profile tracking measurement method based on Kalman prediction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3):25—32.
- [24] Tan J B, Liu C G, Liu J, et al. Sinc² fitting for height extraction in confocal scanning[J]. Meas Sci Technol, 2016, 27(2):6.
- [25] 李臣亮, 胡新奇. 计算扩展目标夏克-哈特曼波前传感器图像偏移量的相关函数质心法研究[J]. 光学学报, 2017, 37(09):311—6.
Li Chenliang, Hu Xinqi. Study on centroid method of correlation function for calculating subimage offset of extended target shak-hartmann wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(09):311—6