

文章编号 1004-924X(2025)23-3658-14

基于相位测量偏折术的复杂曲面测量系统

徐志强, 王建立, 李宏壮, 马鑫雪*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 智能波前传感与控制省重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要:为实现对复杂曲面的高精度测量,建立了基于相位测量偏折术的条纹反射法测量系统,对由相机、显示屏和待测件三者构成的测量系统的结构设计、系统标定及检测算法等进行了研究。根据待测件尺寸及面形特征精选优质显示屏和相机,分别对所选显示屏和相机进行各自标定。利用高精度关节臂测量机确定三者空间位置关系,并结合计算机辅助优化CODEV仿真分析法标定系统。最后,利用积分重构算法实现复杂曲面的高精度检测。实验结果表明,该测量系统取得了与LUPHOScan和ZYGO-CGH相当的测量精度,对于波前RMS的测量精度优于 $\lambda/50$ 。该测量系统结构简单、动态范围大、抗干扰能力强,提高了复杂曲面测量效率和测量精度,满足检测精度要求,为该类零件的加工和装配提供保障,从而有效提升装备性能。

关键词: 光学测量; 复杂曲面; 条纹反射; 相位测量偏折术; 积分重构

中图分类号: O436; TP394.41 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253323.3658 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253323.3658

Complex surface measurement system based on phase measuring deflectometry technique

XU Zhiqiang, WANG Jianli, LI Hongzhuang, MA Xinxue*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: maxinxue@ciomp.ac.cn

Abstract: To enable high-precision measurement of complex surfaces, a fringe reflection measurement system based on phase measuring deflectometry was developed. The study addressed the system's structural design, calibration procedures, and metrology algorithms for a configuration comprising a camera, a display screen, and the tested object. High-performance display screens and cameras were selected according to the object's size and surface geometry. Instrument-specific calibrations were performed for the chosen display and camera, and the spatial relationships among the three components were established using a high-precision articulated-arm measuring device. System calibration was completed by combining computer-aided optimization with CODE V simulation analysis. Finally, an integral reconstruction algorithm was implemented to obtain high-precision surface measurements. Experimental results indicate that the pro-

收稿日期: 2025-06-30; 修订日期: 2025-08-25.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2023YFF0722900); 国家自然科学基金资助项目 (No. 62305327, No. 62105327)

posed system achieves measurement performance comparable to LUPHOScan and ZYGO&CGH, with wavefront RMS accuracy exceeding $\lambda/50$. The system features a simple architecture, large dynamic range, and strong immunity to interference, thereby enhancing measurement efficiency and accuracy for complex surfaces and satisfying industrial processing and assembly requirements while improving equipment performance.

Key words: optical metrology; complex surface; fringe reflection; phase measuring deflectometry; integral reconstruction

1 引言

随着光学制造技术的持续迭代升级,行业对光学元件及系统的精度标准提出了更高的要求,复杂曲面凭借其独特优势,愈发成为设计领域的优选。在成像系统中,它能够精准校正像差、显著提升成像质量,同时有效减少系统单元数量与整体质量;在高性能照明系统设计中,复杂曲面赋予设计者更大的自由度,不仅能大幅提高光能利用率,更能打破系统对照明方向性的严苛限制,让照明方案设计更具灵活性。因此,复杂曲面光学元件的应用范围正不断拓展,已广泛应用于航空航天、超精密仪器等高端制造领域^[1-5]。

复杂曲面属于非轴对称、形态不规则且构造灵活的曲面类型,不仅自身形状复杂度高,对精度的要求也极为严苛,缺乏明确的基准面作为检测参照,实施高精密检测已成为制约其发展与应用的核心障碍^[6-10]。因此,对于复杂曲面光学元件,在实现高精度检测的同时,进一步降低检测成本与操作难度,仍是当前光学检测领域亟待攻克的难题^[11]。干涉测量法虽可完成光学表面测量,但它依赖于结构复杂且成本高昂的补偿光学元件,极大限制了其大规模推广应用。另一种技术是让曲率传感器沿曲面表面移动,通过追踪测量路径差异实现检测。除此之外,研究人员通过测量反射或透射光束偏转来获取表面信息,其中,夏克-哈特曼法是光束偏转测量中的重要方法,但该方法在动态测量范围与测量点数量上存在局限,难以满足复杂曲面的高精度检测需求。Markus等提出了相位测量偏折术(Phase Measuring Deflectometry, PMD),为突破这一技术瓶颈提供了解决方案^[12-14]。

目前,复杂曲面测量已形成多样化技术体系,主要包括三坐标测量机、激光轮廓扫描仪等设备,以及干涉测量法、结构光扫描法等方法^[15-16]。其中,三坐标测量机精度高但速度慢、易损伤软质表面;激光轮廓扫描仪测量较快但精度略低、易受光线影响;机器人光学测量系统适应性强但系统复杂;LUPHOScan, Nanomefos等纳米级精度设备对曲面特性有严格要求;ZYGO&CGH对表面粗糙度敏感、测量范围小。综合对比表明,基于光学干涉原理的结构光扫描技术综合优势突出,其中基于PMD条纹反射法尤为突出。作为灵活、高效且高精度的检测手段,它能有效降低成本、大幅提升测量效率,满足行业对复杂曲面测量的严苛要求,在该领域具有重要应用前景。

为实现基于PMD条纹反射法在复杂曲面测量中的精准应用,本文将多维度几何光学原理与先进数值计算方法进行深度融合。首先,通过理论建模将复杂曲面测量转化为几何光学三角关系求解,简化了测量模型的核心逻辑;随后,引入面形先验约束机制与斜率数据的迭代优化策略,同时结合远场近似条件对高阶项计算进行合理简化。在保证测量精度的同时提升了算法效率,有效解决了传统条纹反射技术中易出现的相位歧义问题,为高精度复杂曲面测量提供了可靠的技术支撑,为该技术的工程化应用奠定了基础。

2 系统构成及工作原理

2.1 硬件构成

基于PMD条纹反射法的测量系统主要由显示屏、相机和待测件构成,具有结构简单、成本低

的显著优势。其中,显示屏用于生成正弦条纹图案,相机则负责采集经待测件反射后的变形条纹。该系统的空间布局需依据待测件的面形特点设计,具体可分为以下两类^[17]:一类是大凸面;另一类是非大凸面,如近平面、凹面或小曲率凸面。如图 1(a)所示,待测件为大凸面,检测时将相机和显示屏放置于待测件的顶点曲率中心附近,显示屏垂直于待测件,确保投射的条纹光覆盖整个待测区域,使待测件边界的反射光能够完整进入相机视场;相机接收并记录经大凸面反射的变形条纹图像,通过后续算法解算表面形貌。如图 1(b)所示,待测件为非大凸面时,相机与显示条纹的显示屏同样置于待测面顶点曲率中心附近,仅需微调待测件的倾斜、扭摆角度,使相机能够清晰捕捉到来自显示屏的反射条纹图像,显示屏平行于待测件表面摆放,保证条纹光均匀覆盖待测区域。通过面形分类优化进行布局,既保证了测量系统的适应性,又提高了复杂曲面检测的效率与精度。

2.2 工作原理

基于 PMD 条纹反射法的测量系统通过捕捉

$$\begin{aligned} w_x(x_m, y_m) &= \frac{\frac{x_m - x_s}{d_{m2s}} + \frac{x_m - x_c}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s} - w(x_m, y_m)}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c} - w(x_m, y_m)}{d_{m2c}}}, \\ w_y(x_m, y_m) &= \frac{\frac{y_m - y_s}{d_{m2s}} + \frac{y_m - y_c}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s} - w(x_m, y_m)}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c} - w(x_m, y_m)}{d_{m2c}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x_m 和 y_m 表示待测表面的坐标,可从已标定的反射镜的像(亮区)中获得; x_c 和 y_c 表示相机坐标,可从检测装置的几何测量中获得; x_s 和 y_s 表示屏幕亮点的坐标,可由数字相移技术与相位展开算法计算得到; z_{m2s} 和 z_{m2c} 分别表示反射镜和屏幕、反射镜和相机之间的 z 坐标差值; d_{m2s} 和 d_{m2c} 分别表示反射镜和屏幕、反射镜和相机之间的距离; z_{m2s} 、 z_{m2c} 、 d_{m2s} 和 d_{m2c} 可从几何测量及标定中得到。当被测镜的面形形状 $w(x_m, y_m)$ 远小于标定平面与相机或显示屏间的距离时,即 $w(x_m, y_m) \ll z_{m2s}$ 或 $w(x_m, y_m) \ll z_{m2c}$,基于三角测量原理的远场近似成立,被测面上 B 点的斜

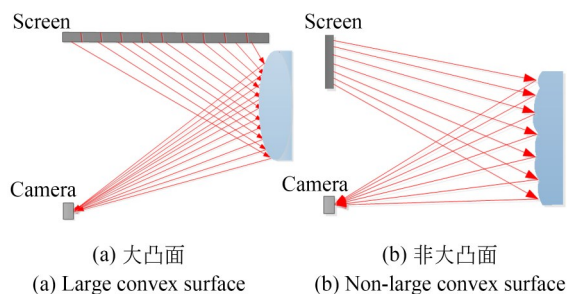


图 1 基于 PMD 条纹反射法的测量系统硬件构成
Fig. 1 Hardware composition of fringe reflection measurement system based on PMD

物体表面反射/透射光的相位变化,实现物体形状与结构信息的高精度提取,进而完成表面高度与坡度的定量测量。系统工作原理如图 2 所示(以非大凸面待测件为例)。反射光线 R 通过相机标定算法确定,入射光线 I 则由显示屏坐标点与待测件表面反射点的空间连线计算得到。基于三角反射定律,可求解待测镜面上任意反射点 B 的法线方向。当已知屏幕亮点 A 的坐标、相机光心 C 的位置以及待测镜面上对应点 B 的位置时, B 点的曲面斜率为:

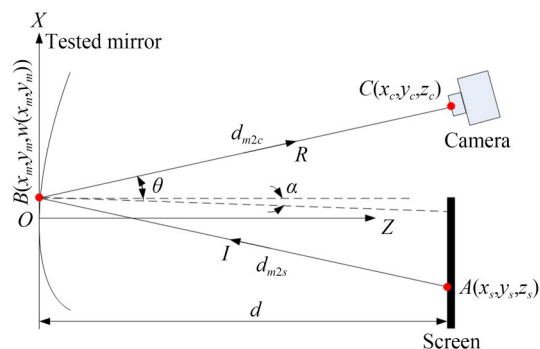


图 2 基于 PMD 条纹反射法的测量系统工作原理
Fig. 2 Working principle for fringe reflection measurement system based on PMD

率为:

$$\begin{aligned} w_x(x_m, y_m) &= \frac{1}{2} \left(\frac{x_m - x_s}{z_{m2s}} + \frac{x_m - x_c}{z_{m2c}} \right), \\ w_y(x_m, y_m) &= \frac{1}{2} \left(\frac{y_m - y_s}{z_{m2s}} + \frac{y_m - y_c}{z_{m2c}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: z_{m2s} 和 z_{m2c} 分别表示标定平面到显示屏像素点和相机针孔的 z 方向距离。在斜率计算中,初始面形估计值的选取至关重要,通常采用理想表面模型或其他检测手段获取的面形数据作为迭代起点。具体迭代流程如下:(1)代入初始值,将初始面形估计 $w_0(x_m, y_m)$ 代入公式,计算得到待测面点 (x_m, y_m) 处的 x, y 向斜率数据;(2)斜率-面形迭代更新,利用首次计算的斜率值,通过积分重构算法反推新的面形估计值,即将由斜率计算得到的面形 $w_1(x_m, y_m)$ 代入公式,得到另外一组斜率;(3)循环优化,重复上述过程,通过多轮迭代使面形估计值逐步收敛至真实形貌,从而得到待测件面形。通过初始值约束与数据反馈机制的迭代策略,有效解决了非线性优化中的初值敏感性问题。当迭代残差满足精度要求时,最终得到的面形数据既能保证几何连续性,又能与光学测量数据高度吻合,为复杂曲面的高精度三维重建提供了关键算法保障。

当待测表面采样点密度满足重构要求时,结合微分几何积分算法即可实现整个待测镜面的高精度三维形貌重建^[18-19]。

3 系统的实现

3.1 精选显示屏和相机

高精度的 PMD 条纹反射检测依赖于精确的标定技术,其中显示屏和相机的选择至关重要。首先需根据被测件的面形特征,利用 Zemax/CODEV 光学软件建立并优化测量系统模型。其次,根据成像系统的衍射极限(Airy 斑直径 $d=1.22\lambda f/\#$)确保像素尺寸 $s \geq d$,满足测量精度要求。

3.1.1 显示屏的选型标准与筛选流程

(1)硬件性能指标

高分辨率与微缩点间距,确保条纹图像的光学投射精度。

(2)动态亮度调节能力

配备 0~100% 连续可调背光系统,适应不同反射率待测件和远场检测场景,提高基于 PMD 条纹反射法的测量系统的适用范围。

(3)液晶面板平整度筛选

批量校准与基准建立:采购同尺寸、同分辨率、同点间距的显示屏,以显示屏外框三边为基准面,用 ZEISS 三坐标测量机(精度为 $0.9 \mu\text{m} + L/350$,测量范围为 $9127 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$)建立全局坐标系。显微标定与数据采集:校准显微镜头,如图 3 所示,确保测量视场畸变 $\leq 0.1\%$ 。以一次测量为例,通过 MATLAB 生成含 9 个特征标定点的标定图,使用显微镜头逐点采集标定点在基准坐标系下的三维坐标,测量过程如图 4 所示,典型数据见表 1。筛选标准:面板表面起伏 $\leq 2 \mu\text{m}$ 的显示屏纳入测量系统。

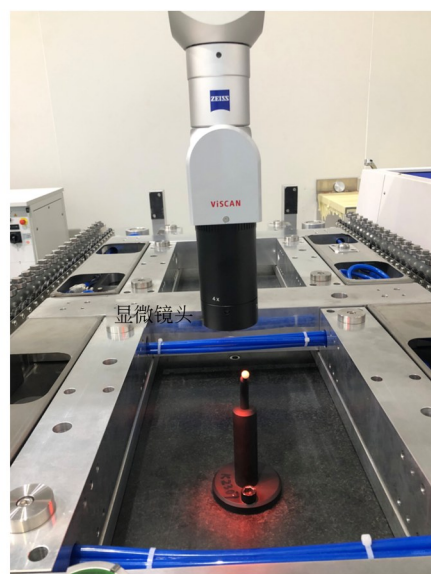


图 3 显微镜头校准

Fig. 3 Calibration of microscope lens

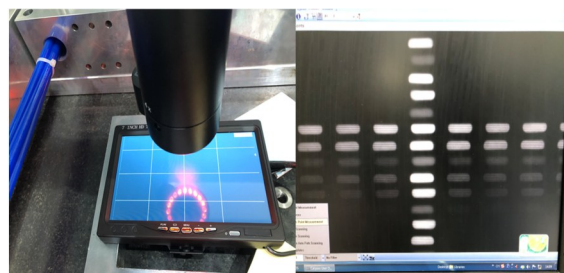


图 4 显示屏像素标定

Fig. 4 Calibration of display screen pixel

表 1 显微镜镜头测量值与两次测量平均值

Tab. 1 Microscope measurement values and average of two measurements (mm)

标定点	第一次测量值	第二次测量值	两次测量平均值
1(250,120)	(412.068 2, -618.778 4, -519.483 2)	(412.068 4, -618.778 7, -519.484 2)	(412.068 3, <u>-618.778 55</u> , -519.483 7)
2(500,120)	(412.394 4, -654.920 6, -519.375 7)	(412.394 9, -654.921 3, -519.373 7)	(412.394 65, -654.929 5, -519.374 7)
3(750,120)	(412.719 2, -691.063 5, -519.174 6)	(412.720 1, -691.064 0, -519.174 4)	(412.719 65, -691.063 75, -519.174 5)
4(250,300)	(437.852 1, -618.544 6, -519.490 6)	(437.842 3, -618.546 9, -519.490 2)	(437.847 2, -618.545 75, 519.490 4)
5(500,300)	(438.168 1, -654.687 7, -519.344 5)	(438.169 5, -654.687 5, -519.344 4)	(438.168 8, <u>-654.687 6</u> , -519.344 45)
6(750,300)	(438.496 3, -690.830 0, -519.130 7)	(438.496 3, -690.829 7, -519.129 9)	(438.496 3, -690.829 85, -519.123 03)
7(250,480)	(463.616 9, -618.311 6, -519.489 9)	(463.618 3, -618.312 5, -519.490 3)	(463.617 6, -618.312 05, -519.490 1)
8(500,480)	(463.943 0, -654.453 3, -519.324 2)	(463.946 3, -654.454 1, -519.324 5)	(463.944 65, -654.453 7, -519.324 35)
9(750,480)	(464.269 3, -690.595 6, -519.095 2)	(464.270 8, -690.596 5, -519.094 4)	(464.270 05, -690.596 05, -519.094 8)

3. 1. 2 相机选型

(1)F#光圈系数的定量设计

基于PMD条纹反射法的测量系统的相机F#值需根据待测件尺寸、测量距离及光学系统景深综合确定。

(2)关键参数要求

需选择分辨率高,像素小且噪声小的相机。

(3)孔径像差抑制

采用小孔光阑前置滤波技术抑制孔径像差,即在相机前端加入一个外部小孔,通过限制入射光束孔径角,将点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的弥散斑直径控制在1像素以内,以去除孔径成像像差的影响。本文在相机镜头前端加装精密的小孔光阑,将镜头转化为针孔相机模型,能够满足几何光学近轴近似条件($\sin \theta \approx \theta$)。

3. 2 系统标定

在基于PMD条纹反射法的测量系统应用中,系统标定是制约测量性能的核心瓶颈,其标定精度直接影响三维形貌重建的准确性^[20-21]。系统误差主要源于两个关键方面:光线空间定位精度和像面定位精度,两者共同决定测量系统的最终精度。

3. 2. 1 全局坐标系构建与几何标定架构

标定系统采用FARO激光跟踪仪建立全局坐标系,鉴于非球面元件边沿常预制基准面,选择将坐标系原点定于待测件顶点曲率中心,Z轴与光轴重合,确保加工-检测坐标系的一致性。

3. 2. 2 关键组件标定技术

相机标定坐标系采用世界坐标系映射,定义相机坐标系为世界坐标系初始基准,通过靶标标定建立像素坐标与世界坐标的转换关系。

入射光线的三维标定流程如图5所示,具体步骤如下:

(1)基于格雷码-相移复合编码技术实现亚像素级相位跟踪,建立相机-显示屏像素对应关系;

(2)采用Zernike多项式拟合理想面形,结合反射光线方程计算理论反射点;

(3)使用高精度激光跟踪仪(精度 ± 0.02 mm)采集显示屏特征点三维坐标,通过罗德里格矩阵完成全局坐标统一;

(4)利用空间直线两点式方程,求解显示屏像素点与镜面反射点的连线向量作为入射光线。

鉴于罗德里格矩阵在大角度变换下的数值稳定性优势,采用以下转换链:

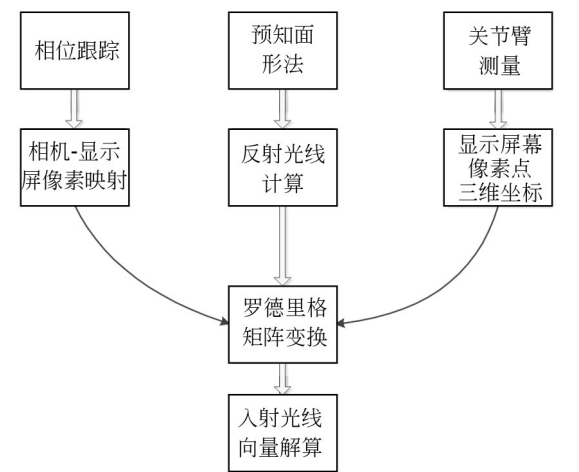


图5 入射光线三维标定流程

Fig. 5 Flowchart of three-dimensional calibration of incident light

- (1) 屏幕像素坐标→相机坐标系:通过相机内参矩阵与畸变系数解算;
- (2) 相机坐标系→全局坐标系:基于罗德里格矩阵的旋转平移变换。

本文采用预知面形法镜面采样点标定原理,通过构建理论面形约束模型,有效解决复杂曲面矢高不确定性问题。具体步骤如下:

- (1) 数学建模:利用标定得到的反射光线参数方程与非球面理想面形方程建立方程组;
- (2) 交点求解:通过牛顿迭代法求解方程组的实数解,获取镜面采样点三维坐标,迭代收敛阈值设为 1×10^{-6} mm;
- (3) 误差抑制:通过预设面形参数的先验约束,将初始采样点误差控制在一定范围内。

由于采用离轴配置,检测系统对系统几何的校准要求较高。本文采用基于CODEV光迹追踪软件与计算机辅助优化相结合的闭环标定方案进行标校过程^[22-23],如图6所示。首先,搭建检测实验系统,预标校系统几何参数,获取初始光轴偏移量与倾角;然后,在CODEV光迹追踪软件中构建

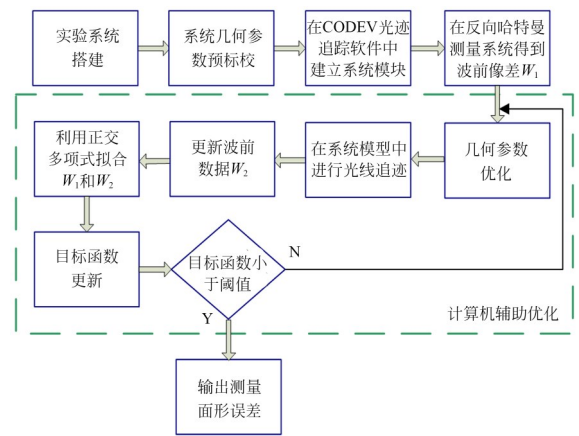


图6 计算辅助优化模块标校流程

Fig. 6 Flowchart of calibration process performed by calculation-assisted optimization module

光学系统模型,建立包含显示屏、待测件及相机的全链路光学模型;在测量系统中获得波前像差 W_1 ;接着进行几何参数迭代优化;在光学系统模型中进行光线追迹,获得更新的波前像差 W_2 ;利用正交多项式拟合 W_1 和 W_2 ,更新目标函数;最后进行收敛性判定,若目标函数小于阈值 ϵ ,输出测量面形误差 W_{surf} ;否则,继续优化系统几何参数,重复几何参数迭代优化及以后步骤,直到目标函数小于阈值。

针对误差传递机制两大关键维度的第二维度,光线在探测器上成像的定位精度可看作相机光斑的定位误差,即质心提取问题。造成光斑强度分布变化、影响质心精度的主要因素有:原理误差,包括探测器离散不完全采样和探测器有限分辨率造成的截断误差;噪声干扰,包括探测器内部的暗电流噪声、光子起伏噪声和读出噪声等;外界背景杂散光和质心算法误差。此外,成像像差也会导致光斑理论质心与实际质心不重合的现象,即质心偏移。为了实现光线在探测器上成像的高定位精度,需要消除以上误差,具体如下如表2所示。

表 2 影响质心精度的误差及解决方法	
Tab. 2 Errors affecting accuracy of center of mass and their solutions	
误差种类	解决方法
原理误差	当光斑尺寸大于 4×4 像素时可忽略不计
噪声	通过局部阈值法削弱噪声
环境误差	暗室条件下进行检测
计算误差	通过光斑拟合辅助减小质心提取误差
像差	在预知面形的情况下,通过Zemax软件仿真进行元器件位姿分析调整

在完成标定工作后,通过光学软件进行仿真分析预知显示屏、相机和待测件三者位置,确保显示屏发出的光能完全覆盖待测件,且待测件反射出来的光能完全打到相机靶面上。

本文通过高精度激光跟踪仪构建测量系统的三维坐标关联体系,融合计算机辅助优化与 CODEV 仿真分析,形成“硬件精准定位+软件迭代优化”的协同机制,对包括待测件在内的系统元件偏移以及倾斜参量进行逆向优化,最终实现标定参数的全局最优求解,有效规避了传统标定方法中局部误差累积的问题,进而有效校正标定误差。相比传统标定方法,本文的标定方法校准系统精度更高,硬件校准更加高效,能够消除系统误差,为本文实现高精度测量提供保障。此外,该标定方法具有抗干扰能力强的特点,即使在温度有变化和空气扰动的环境下依然高效可行。

3.3 系统工作过程

该测量系统以显示屏投射相移条纹作为光源,经待测件反射后由相机采集变形条纹,主要通过相位求解、相位展开、波前斜率计算及面形重构来实现复杂曲面的高精度测量,其工作流程如图 7 所示。

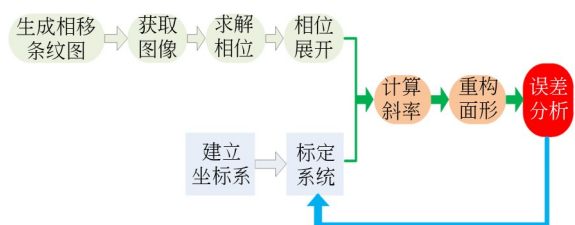


图 7 测量系统工作流程

Fig. 7 Workflow of measurement system

首先,在显示屏上同步生成水平与竖直方向的正弦相移条纹;然后,通过激光跟踪仪建立全局坐标系,精确标定显示屏、相机与待测件的空间位置关系,并调整光学系统共轴性,确保相机光轴与待测件表面法线重合;在测量模式下,拍摄经待测件反射后的变形条纹图像;在参考模式下,移除待测件后采集原始参考条纹(消除系统本底误差);每组图像采集 ≥ 10 帧并进行时域平均,抑制环境噪声。

最后进行数据处理与波前重构。第 1 步,相位求解:考虑到探测器二次非线性响应影响、相

移误差对精度影响、测量精度及处理速度等因素,本文采用八步相移算法替代传统的二步相移和四步相移,以减少相移误差导致的相位测量噪声,从而有效抑制探测器二次非线性响应影响及相移误差对精度影响;第 2 步,相位展开:为了兼顾稳定性和精度,采用二维离散傅里叶变换(2D-DFT)和漫水填充解包裹相结合的方法进行相位展开;第 3 步,斜率计算与面形重构:通过 3.2 所述标定方法得到的标定参数及光学几何关系计算表面斜率;在面形重构时,本文采用模式法和区域法相结合的方式对波前进行重构。在区域法中,为了更好地实现局部迭代初始化和全局最小二乘优化,本文利用最小二乘微分积分算法与 Southwell 算法相结合的区域法来实现波前重构^[19,24],该方法是基于 PMD 条纹反射法高精度测量的关键。第 4 步,采用 Zernike 多项式拟合的方法分析波前像差,输出 PV 和 RMS 关键指标。

4 实验与测量结果

4.1 实验装置及设备

实验设备中:工作站品牌是 LenovoP350;显示屏用于显示相移条纹图,尺寸为 11.6 寸,分辨率是 $1\,920 \times 1\,080$,像元尺寸是 $0.133\,5\text{ mm}$;相机采用 Flir 的 BFS-U3-51S5M-C,分辨率是 $2\,248 \times 2\,048$,像元尺寸是 $3.45\text{ }\mu\text{m}$;镜头采用大恒图像的 HN-1228-6M-C2/3B,焦距是 12 mm , $F/\#$ 是 2.8;小孔是 Thorlabs 的 SM1D12CZ,分度圆环调节式,每个格是 0.5 mm ,实验中将其调节到 1 mm ;坐标测量仪采用海克斯康的 ROMER75 系列关节臂测量机,测量精度优于 $16\text{ }\mu\text{m}$ 。

4.2 实验结果及分析

本文展示了具有代表性的 3 个不同类型待测件的测量实验,并与权威的 ZYGO&CGH, LU-PHOScan 等测量方法相比较。实验室环境如下:温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,相对湿度为 $20\% \sim 70\%$,平均气压为 97.79 kPa 。

待测件 1 是离轴量为 35 mm 、尺寸为 50 mm 的离轴抛物镜,如图 8 所示。首先,根据待测件尺寸及面形特征精选优质显示屏和相机;接着,分



图8 离轴量为 35 mm、尺寸为 50 mm 的离轴抛物镜
Fig. 8 Off-axis parabolic mirror with an off-axis distance of 35 mm and a size of 50 mm

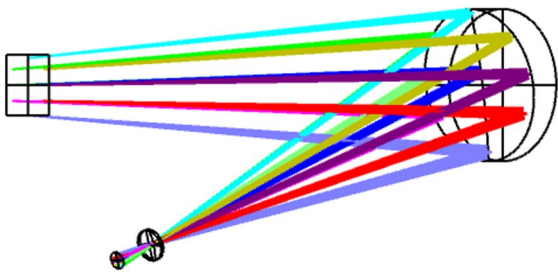


图9 CODEV 光学模型构建
Fig. 9 Optical model construction with CODEV

别对所选显示屏和相机进行标定;然后,构建 CODEV 光学模型,如图 9 所示,通过 CODEV 光

迹追踪软件&计算辅助优化相结合的闭环标定方法,得到屏幕与待测件距离为 206.22 mm,屏幕倾斜角度为 0°,屏幕与相机距离为 150 mm,中心偏离距离为 50 mm,相机倾角为 18°。最后,根据位置和角度搭建测量实验装置,如图 10 所示。

在显示屏上分别显示竖直和水平方向各 8 组的相移正弦条纹,如图 11 所示。依次照明待测件表面,相机拍摄到从待测件逐一反射回来的图像如图 12 所示。竖直和水平方向的截断相位图如图 13 所示。竖直和水平方向的相位展开如图 14 所示。基于 PMD 条纹反射法的测量系统的测量结果如图 15 所示。ZYGO&CGH 的测量结果如图 16 所示。



图10 测量实验装置
Fig. 10 Measurement experimental setup

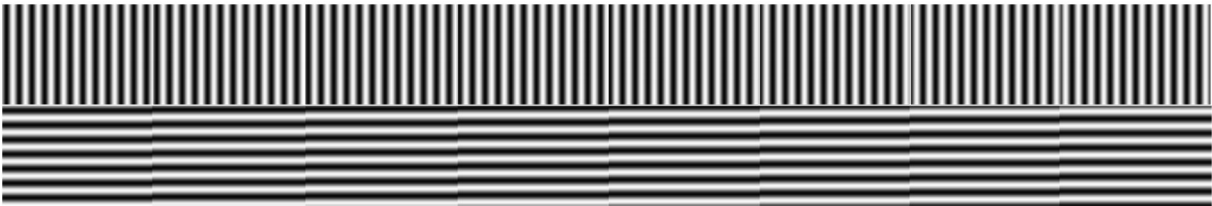


图11 显示屏上显示的竖直和水平两个方向条纹
Fig. 11 Horizontal and vertical stripes displayed on screen

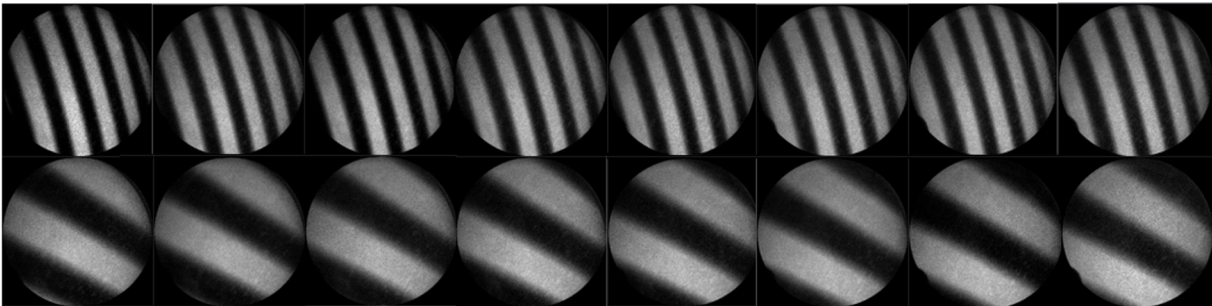


图12 相机拍摄到从待测件逐一反射回来的图像
Fig. 12 Camera captures images reflected back one by one from tested object

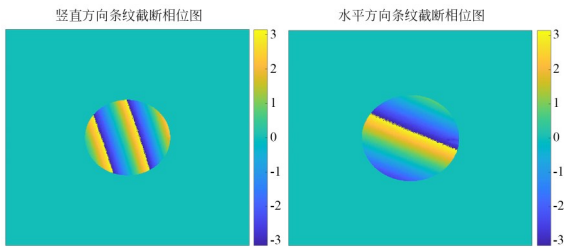


图 13 竖直和水平方向的截断相位
Fig. 13 Vertical and horizontal truncated phase

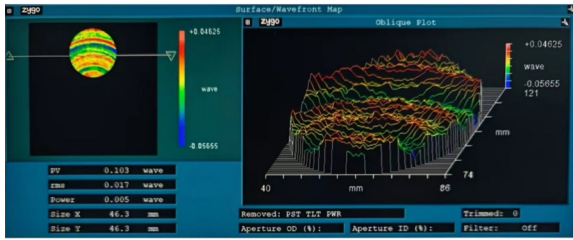


图 16 ZYGO&CGH测量结果
Fig. 16 Measurement results by ZYGO & CGH

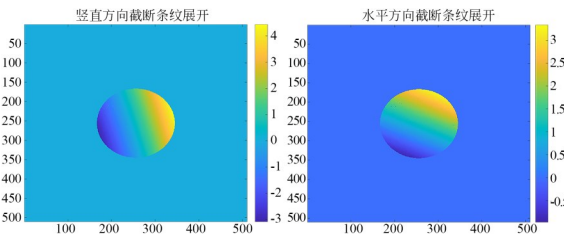


图 14 竖直和水平方向的相位展开
Fig. 14 Vertical and horizontal phase unwrapping

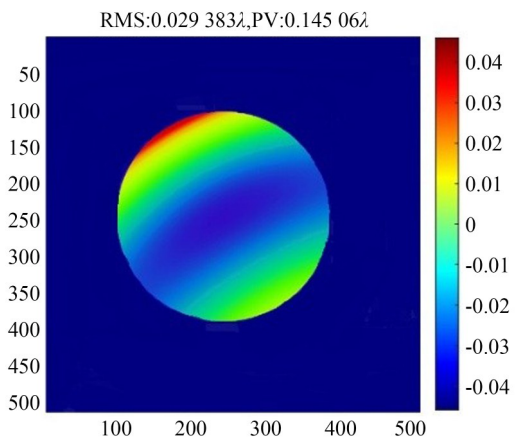


图 15 基于PMD条纹反射法的测量结果
Fig. 15 Measurement results of fringe reflection measurement system based on PMD

基于 PMD 条纹反射法的测量系统得到： $RMS=0.029\ 383\lambda$, $PV=0.145\ 06\lambda$ 。ZYGO&CGH 测量得到： $RMS=0.017\lambda$, $PV=0.103\lambda$ 。对于波前 RMS 的测量精度达到 $1.2\lambda/100$ 左右。

待测件 2 是矢高 9.27 mm、尺寸为 75 mm 的凸透镜,如图 17 所示。相机拍摄到从待测件逐一反射回来的图像如图 18 所示。竖直和水平方向的截断相位图如图 19 所示。竖直和水平方向的相位展开如图 20 所示。基于 PMD 条纹反射法的测量系统测量结果如图 21 所示。LUPHO-Scan 测量结果如图 22 所示。



图 17 矢高 9.27 mm、尺寸为 75 mm 的凸透镜
Fig. 17 Convex lens with a height of 9.27 mm and a diameter of 75 mm

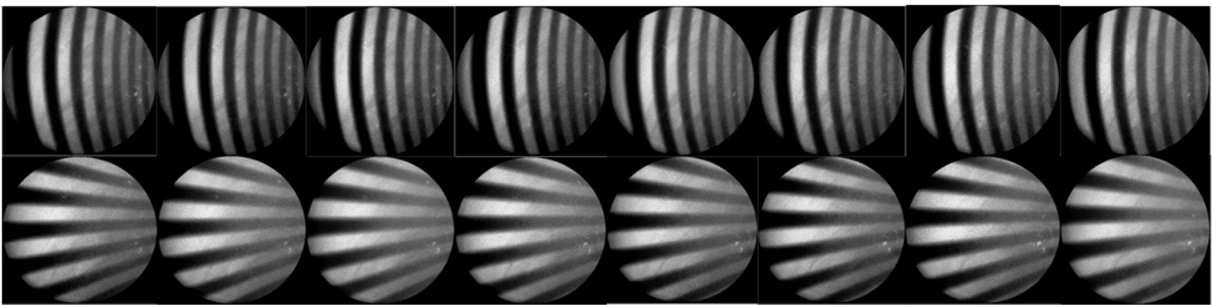


图 18 相机拍摄从待测件逐一反射回来的图像
Fig. 18 Camera captures images reflected back one by one from tested object

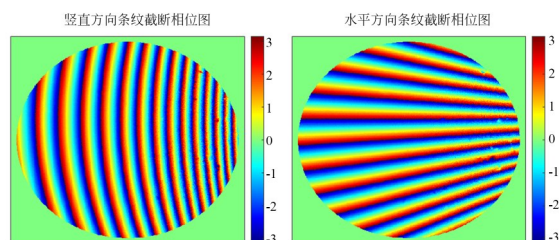


图 19 竖直和水平方向的截断相位

Fig. 19 Vertical and horizontal truncated phase

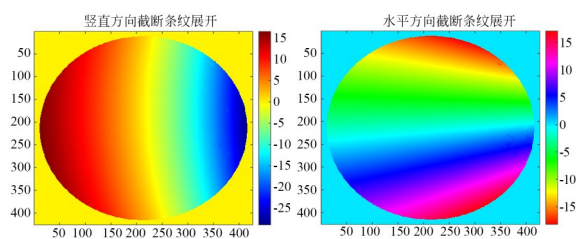


图 20 竖直和水平方向的相位展开

Fig. 20 Vertical and horizontal phase unwrapping

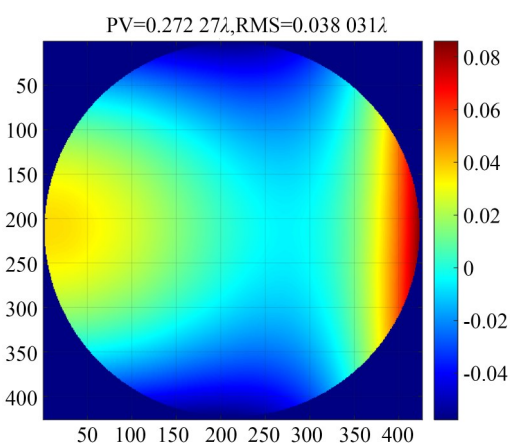


图 21 基于 PMD 条纹反射法测量系统的测量结果

Fig. 21 Measurement results of fringe reflection measurement system based on PMD

基于 PMD 条纹反射法的测量系统得到: $RMS=0.038\ 031\lambda$, $PV=0.272\ 27\lambda$ 。LUPHO-Scan 测量得到: $RMS=0.022\lambda$, $PV=0.273\lambda$ 。对于波前 RMS 的测量精度达到 $1.6\lambda/100$ 左右。

待测件 3 是 $156\text{ mm} \times 155\text{ mm}$ 自由曲面反射镜,如图 23 所示。相机拍摄到从待测件逐一反射回来的图像如图 24 所示。竖直和水平方向的截断相位图如图 25 所示。竖直和水平方向的相位展开如图 26 所示。基于 PMD 条纹反射法的测量系统测量结果如图 27 所示。

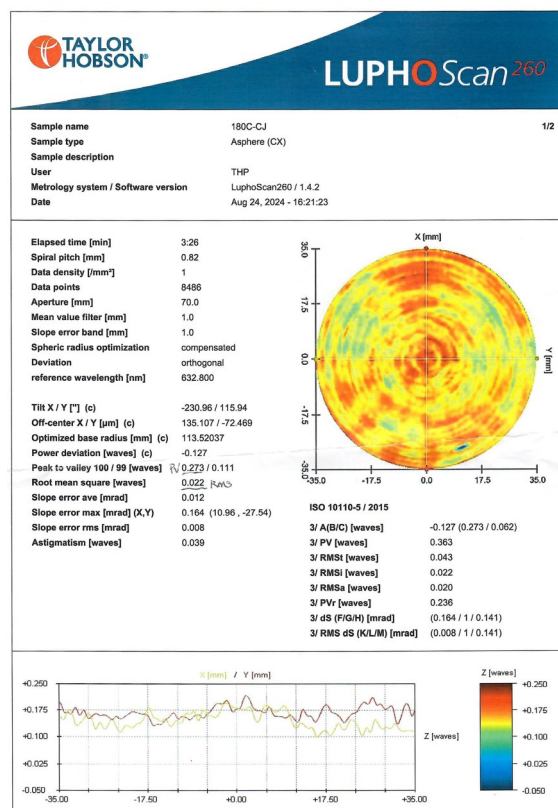
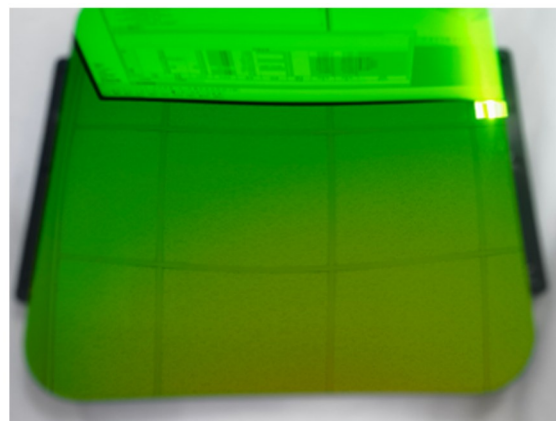


图 22 LUPHOScan 测量结果

Fig. 22 Measurement results by LUPHOScan

图 23 $156\text{ mm} \times 155\text{ mm}$ 自由曲面反射镜Fig. 23 $156\text{ mm} \times 155\text{ mm}$ free-form surface reflector

该自由曲面反射镜因膜层特性无法在 LUPHOScan 检测,所以进行 5 次重复测量,以说明基于 PMD 条纹反射法的测量系统具有重复性和再现性。5 次测量结果如图 28 所示,5 次测量 RMS 值、PV 值及测量不确定度如表 3 所示。由表可以看出,测量系统的不确定度水平较

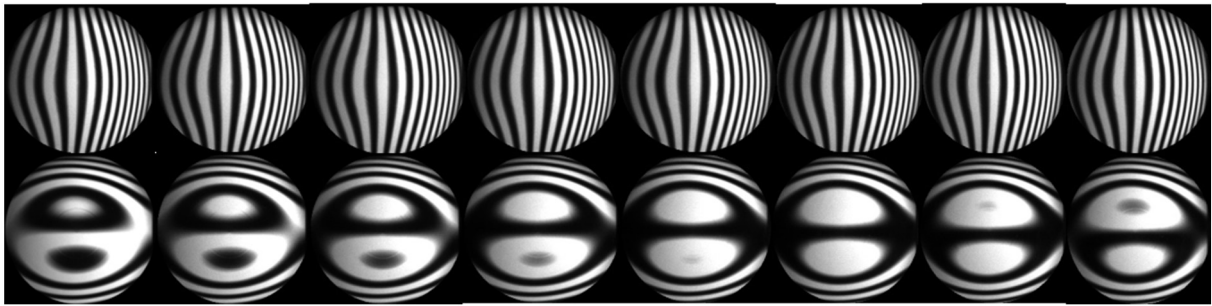


图 24 相机拍摄从待测件逐一反射回来的图像

Fig. 24 Camera captures images reflected back one by one from tested object

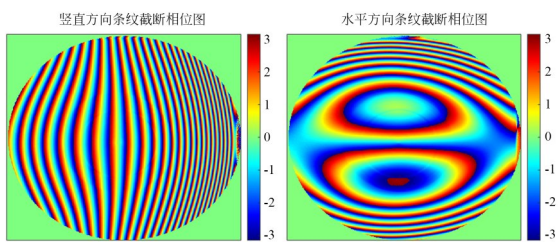


图 25 竖直和水平方向的截断相位

Fig. 25 Vertical and horizontal truncated phase

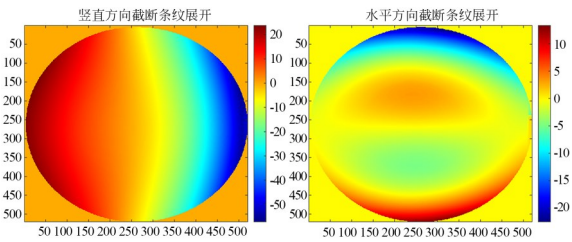


图 26 竖直和水平方向的相位展开

Fig. 26 Vertical and horizontal phase unwrapping

低,数据重复性好,测量结果可靠性高,测量系统具有较好的稳定性,能满足高精度光学元件的检测需求。5次测量 RMS 和 PV 的平均值与图 27 测量结果的 RMS 和 PV 差值分别为 $0.000\ 282\lambda$ 和 $0.003\ 056\lambda$,可以看出在面形分布、RMS 和 PV 值上具有一致性。测量结果 $RMS=0.168\ 64\lambda$, $PV=0.959\ 55\lambda$,满足检测精度要求。

对比测量实验结果证明了 PMD 条纹反射法测量复杂曲面的可行性、可靠性、稳定性和准确性,表明基于 PMD 条纹反射法的测量系统具有高精度测量复杂曲面的能力。

表 3 5 次测量 RMS 值、PV 值及测量不确定度

Tab. 3 Five measurements of RMS values, PV values and measurement uncertainties

指标	RMS	PV
1	$0.168\ 94\lambda$	$0.962\ 57\lambda$
2	$0.168\ 98\lambda$	$0.962\ 82\lambda$
3	$0.168\ 75\lambda$	$0.962\ 15\lambda$
4	$0.169\ 02\lambda$	$0.963\ 03\lambda$
5	$0.168\ 92\lambda$	$0.962\ 46\lambda$
5 次平均值	$0.168\ 922\lambda$	$0.962\ 606\lambda$
标准差/s	$0.000\ 033\lambda$	$0.000\ 16\lambda$
扩展不确定度/U	$0.000\ 091\lambda$	$0.000\ 44\lambda$
测量结果	$(0.168\ 92 \pm 0.000\ 091)\lambda (k=2.776, \text{置信水平为 } 95\%)$	$(0.962\ 61 \pm 0.000\ 44)\lambda (k=2.776, \text{置信水平为 } 95\%)$

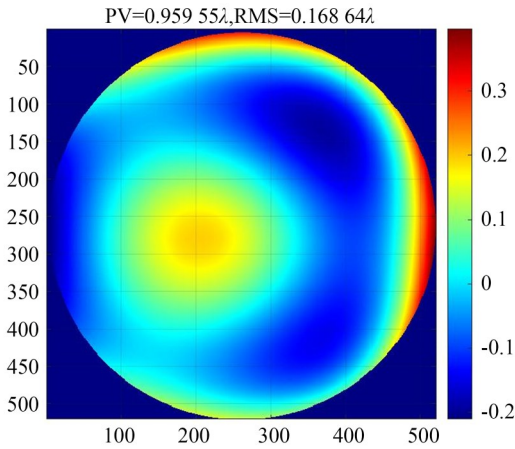


图 27 基于 PMD 条纹反射法的测量系统测量结果

Fig. 27 Measurement results of fringe reflection measurement system based on PMD

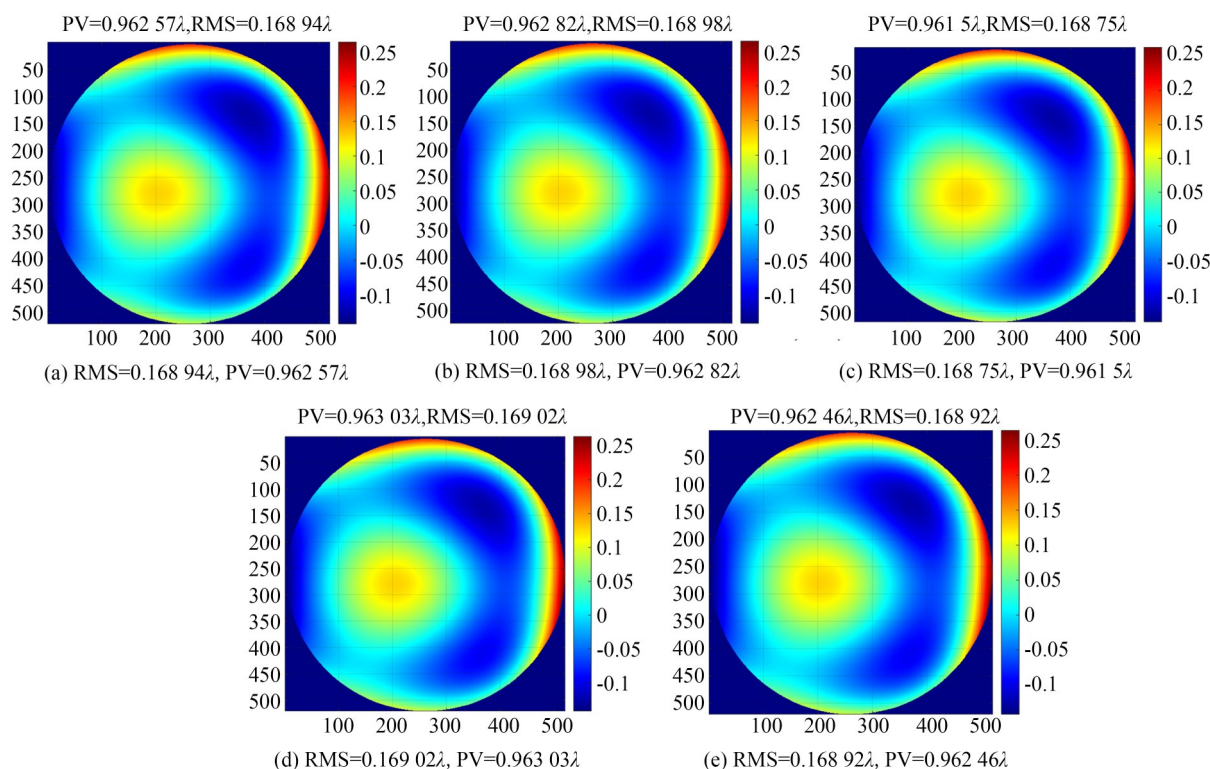


图 28 基于 PMD 条纹反射法的测量系统 5 次测量待测件 3 的结果

Fig. 28 Results of 5 measurement results of tested 3 using fringe reflection measurement system based on PMD

5 结 论

为了解决复杂曲面的高精度测量,本文提出了基于 PMD 条纹反射法,介绍了该测量系统的结构和工作原理,研究了测量系统的标定方法及检测算法,实现了复杂曲面的高精度测量。实验结果表明:基于 PMD 条纹反射法的测量系统的精度与 LUPHOScan 和 ZYGO&CGH 相当,对于波前 RMS 的测量精度优于 $\lambda/50$,有效提高了复杂曲面的测量效率和测量精度。该测量系统结构简单、动态范围大、抗干扰能力强且低成本,与国外测量设备如 LUPHOScan 和 ZYGO&CGH 相比具有

价格上的优势。由于该方法在大口径、高斜率区域的复杂曲面测量中,受光学系统视场-分辨率矛盾及偏折光线可探测性的影响更为显著,未来将重点研究大视场高精度成像系统的开发、多视角融合技术的引入等,逐步扩展其应用场景。

作者贡献声明:

徐志强:方法设计,论文审核与修订;

王建立:总体方案设计;

李宏壮:实验设计;

马鑫雪:算法执行,数据整理和分析,论文构思和撰写。

参考文献:

- [1] 霍嘉燧,李冕豪,王子川,等.全景内窥成像技术及应用[J].中国光学(中英文),2023,16(1):44-60.
- HUO J Y, LI M H, WANG Z CH, *et al.* Panoramic endoscopic imaging technology and it's applications[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 44-60. (in Chinese)

- [2] 王梦晖,赵高兴,时其然,等.自由曲面成像光学系统的设计方法及其应用[J].光学学报,2023,43(8):222-242.
- WANG M H, ZHAO G X, SHI Q R, *et al.* Design methods and applications of freeform surface imaging optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 222-242. (in Chinese)
- [3] WEI S L, ZHU Z B, FAN Z C, *et al.* Multi-sur-

- face catadioptric freeform lens design for ultra-efficient off-axis road illumination[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A779.
- [4] 熊玉朋, 陈适宇, 黄铖, 等. 基于自由曲面光学元件的大视场光学成像系统[J]. 光学精密工程, 2024, 32(9): 1261-1272.
XIONG Y P, CHEN SH Y, HUANG CH, *et al.* Large field optical imaging system based on freeform surface optics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(9): 1261-1272. (in Chinese)
- [5] 张云进, 项华中, 王亚琼, 等. 渐进多焦点自由曲面镜片优化重构[J]. 光学精密工程, 2023, 31(6): 813-821.
ZHANG Y J, XIANG H ZH, WANG Y Q, *et al.* Optimization and reconstruction of progressive addition free-form surface lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(6): 813-821. (in Chinese)
- [6] DOU J C, WANG D D, YU Q Y, *et al.* Deep-learning-based deflectometry for freeform surface measurement [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(1): 78-81.
- [7] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 214-228.
MA G Q, LIU L, YU ZH L, *et al.* Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 214-228. (in Chinese)
- [8] 沈毅君, 任杰骥, 黄诺帝, 等. 曲面轮廓的接触式坐标测量研究进展[J]. 极端制造, 2023, 5(2): 022006.
SHEN Y J, REN J Y, HUANG N D, *et al.* Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(2): 022006. (in Chinese)
- [9] 刁晓飞, 范芯蕊, 康岩辉. 高精度面形坐标测量方法研究进展与应用[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(2): 101-110.
DIAO X F, FAN X R, KANG Y H. Advances and applications in high-precision surface coordinate measurement methods[J]. *Metrology Science and Technology*, 2024, 68(2): 101-110. (in Chinese)
- [10] YI B W, QIAO F, HUANG N D, *et al.* Adaptive sampling point planning for free-form surface inspection under multi-geometric constraints [J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 95-101.
- [11] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 161-178.
ZHU R H, SUN Y, SHEN H. Progress and prospect of optical freeform surface shape detection methods [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 161-178. (in Chinese)
- [12] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [C]. *Optical Metrology in Production Engineering*. Strasbourg, France. SPIE, 2004: 366.
- [13] TANG Y, SU X Y, WU F, *et al.* A novel phase measuring deflectometry for aspheric mirror test[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19778-19784.
- [14] GE R H, LI D H, ZHANG X W, *et al.* Phase measuring deflectometry based on calibration of the entrance pupil center of the camera lens[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): 1156-1163.
- [15] 王耀南, 谢核, 邓晶丹, 等. 智能制造测量机器人关键技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(16): 1-18.
WANG Y N, XIE H, DENG J D, *et al.* Overview of key technologies for measurement robots in intelligent manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(16): 1-18. (in Chinese)
- [16] 张祥朝, 牛兴漫, 郝思远, 等. 光学曲面的偏折测量技术: 原理、挑战与展望(特邀)[J]. 光学精密工程, 2025, 33(5): 677-701.
ZHANG X CH, NIU X M, HAO S Y, *et al.* Deflectometric measurement technology for optical surfaces: principles, challenges, and prospects (invited) [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(5): 677-701. (in Chinese)
- [17] SU P, KHREISHI M A H, SU T Q, *et al.* Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 031305.
- [18] SU P, PARKS R E, WANG L R, *et al.* Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [19] 吴振东, 王道档, 阮旻, 等. 计算机辅助光学偏折测量技术研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 173-188.

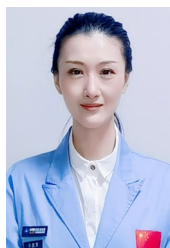
- WU ZH D, WANG D D, RUAN Y, *et al.* Review of research on computer-aided deflectometric measurement technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 173-188. (in Chinese)
- [20] FENG S J, ZUO C, ZHANG L, *et al.* Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.
- [21] GENG Z C, TONG Z, JIANG X Q. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2 (2): 211.
- [22] WANG D D, ZHANG S, WU R M, *et al.* Computer-aided high-accuracy testing of reflective surface with reverse Hartmann test [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19671-19681.
- [23] WANG D D, YIN Y M, DOU J C, *et al.* Calibration of geometrical aberration in transmitted wavefront testing of refractive optics with deflectometry [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 1973-1981.
- [24] LANG W, ZHANG X C, CHEN Y N, *et al.* Deterministic form-position deflectometric measurement of monolithic multi-freeform optical structures via Bayesian multisensor fusion [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(2): 260.

作者简介:



徐志强(1993—),男,内蒙古人,博士,高级工程师,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事波前传感与图像信号处理方向的研究。E-mail: xuzq_cimp@163.com

通讯作者:



马鑫雪(1987—),女,黑龙江人,博士,副研究员,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事计算光学、波前传感技术及光学检测等方面的研究。E-mail: maxinxue@ciomp.ac.cn