

# 光学学报

## 基于光学偏折的微小透镜双曲面同步测量

阮旻, 孔明, 窦进超, 禹静, 华杭波, 王狮凌, 刘维\*

中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 针对自由曲面微小透镜检测中无法同时高精度检测前后表面的问题, 提出一种基于光学偏折的微小透镜前后曲面同步测量方法。该方法基于高精度的透射波前检测系统建立理想光线追迹模型, 并在利用光学偏折高精度测得的含有被测微小透镜面形信息的透射波前像差基础上, 以被测微小透镜的前后两个曲面为优化变量, 进行数值迭代优化求解, 最终基于优化结果重构出被测微小透镜各表面面形误差。对所提出的面形测量方法进行仿真与实验验证, 并通过 Zygo 干涉仪进行比对实验, 结果显示对于口径为 6 mm 的微小透镜, 所提方法的检测结果与比对实验的检测结果高度一致, 面形偏差的均方根误差值仅为几十纳米。

**关键词** 测量; 透射元件; 自由曲面面形检测; 光学偏折技术; 微小透镜

中图分类号 TH742

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221973

### 1 引言

随着光学设计水平的提高和制造业水平的进步, 光学系统朝着复杂化、微型化以及集成化的方向发展, 自由曲面微小透镜及透镜组能够产生或者消除特定的像差并提供复杂光线出射方向, 已被广泛运用于照明<sup>[1-2]</sup>、成像<sup>[3-4]</sup>和显示<sup>[5-6]</sup>等领域。复杂曲面微小透镜由于具有尺寸小、面形复杂度高等特点, 对其高精度的面形检测方法提出了更高的要求, 现阶段针对微小透射元件面形检测的方法主要有探针法、干涉法、扫描显微镜法和相位检测法等<sup>[7]</sup>。

三坐标测量法是一种典型的探针法<sup>[8]</sup>, 其采用单点扫描的形式对元件表面的三维坐标进行采样, 获得被测表面的全局数据, 但其检测精度只有微米量级, 同时探针法易受外界干扰, 接触式的测量存在易划伤被测表面的风险, 而且对尺寸较小的透镜难以实现稳定夹持, 导致其不适用于表面完整性要求极高的微小自由曲面的高精度测量。干涉法是当前国际公认的非接触式高精度面形检测方法, 但目前运用干涉法来检测自由曲面的技术还处于从非球面干涉检测的成功应用向自由曲面拓展的阶段<sup>[9]</sup>。复杂且昂贵的补偿光学器件降低了干涉法面形测量的通用性, 而且其较小的测量动态范围也限制了其对于大动态范围的自由曲面面形的检测。此外, 在现阶段利用干涉法检测透射元件面形时, 无法一次检测出元件前后表面的面形误差, 往往需要一些辅助手段并进行多次实验, 例如黑化或者粗糙化处理非被侧面, 以此减弱非被侧面在检测系统

中的影响, 在对微小透镜检测结束后非被侧面的清洗和还原有很大的难度, 这些辅助手段将会显著增加透镜受损的风险, 影响检测结果的精度。此外, 由于透镜尺寸较小, 在干涉仪测量时没有接收到足够的光强信息, 无法实现有效测量, 从而对技术人员操作水平和仪器都提出了更高的要求。获取微观面形三维轮廓的测量技术还有扫描显微镜测量技术和激光扫描共聚焦显微测量技术。扫描显微镜测量技术具有放大倍率高、横向分辨率高等优点, 因此被广泛应用于元件的微观形貌检测, 根据测量原理不同可以分为扫描探针显微镜测量法<sup>[10]</sup>和扫描电子显微镜测量法。扫描探针显微镜测量法通过相互作用的物理原理来获取表面形貌, 分辨率可达原子量级, 其中扫描隧道显微镜基于量子隧道效应<sup>[11]</sup>, 只适用于导电性的导体或半导体样品检测, 且对测量环境的要求严格, 仪器造价高昂; 原子力显微镜基于探针和样品之间的原子相互作用力来实现表面形貌重构<sup>[12]</sup>, 并不局限于导体的样品测评, 但是由于其测量范围有限, 测量速度较低, 难以应用于双表面、大动态范围的微小透镜测量。激光扫描共聚焦显微镜在传统光学显微镜的基础上采用共轭聚焦装置<sup>[13]</sup>, 使得位于物镜焦平面上的待测样品可以同时聚焦在光源针孔和检测针孔, 再使用光电倍增管收集经待测样品反射后的光能, 结合扫描技术可获取待测样品的微观信息, 但是该方法需要逐点扫描, 且系统极易受物镜数值孔径(NA)影响, 不适用于复杂曲面微观面形的检测。

光学偏折术作为一种相位检测法, 具有高精度、大

收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2022-12-27; 录用日期: 2023-01-03; 网络首发日期: 2023-02-07

通信作者: \*liuw@cju.edu.cn

动态范围、非接触和全场检测的优点,已经成为面形检测领域的研究热点。美国亚利桑那大学 Su 等<sup>[14]</sup>使用基于光学偏折术原理的 SCOTS 系统成功检测了多种小尺寸的镜面物体和大口径的天文望远镜主镜片,但该系统要对包括被测元件在内的系统结构参数进行复杂的预标定工作。目前国内四川大学<sup>[15]</sup>、天津大学<sup>[16]</sup>、电子科技大学<sup>[17]</sup>和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[18]</sup>等单位亦对光学偏折的编码方式、条纹移相方式、条纹获取方式以及反射表面三维形貌重构等进行了一定的研究。在微小面形检测领域,德国纽伦堡大学利用显微相位偏折测量系统实现了高分辨率的反射面形检测<sup>[19]</sup>,国内针对反射面微观形貌和粗糙度的测量也提出了同轴<sup>[20]</sup>和离轴<sup>[21]</sup>测量系统,在提高稳定性的同时有效提高了测量灵敏度,可测表面斜率范围达到了亚弧度量级。现阶段对于透射元件或系统的质量评价主要是基于被测物的透射波前像差测量结果<sup>[22]</sup>,但是在高精度的微小透镜制作过程中,波前像差的检测结果并不能直接指导加工过程,因此针对微小透镜面形的在线检测技术已经成为微小透镜工业化生产的关键。

本文针对微小透镜前后表面无法高精度同步测量的问题,基于光学偏折技术检测高精度透射波前,提出一种数值迭代优化算法实现微小透镜双曲面面形的同步重构。通过对检测系统的理想模型进行光线追迹,获取携带微小透镜面形信息的波前像差,以此波前像差的最小值为目标函数,以两个待测面形为优化变量进行数值迭代优化求解,从而实现被测微小透镜前后面形的高精度同步重构。针对求解过程中前后表面相

互影响的问题,通过改变实验中被测元件的位姿,多次测量同一被测元件,增加优化过程中的有效方程数,成功检测出被测微小透镜各个表面的面形误差,并通过与 Zygo 干涉仪的检测结果进行对比,证明所提出的基于光学偏折技术的微小透镜面形检测方法的可行性与高精度性。

## 2 基本原理

### 2.1 基于光学偏折技术的微小透镜双曲面检测系统

基于光学偏折的微小透镜检测系统如图 1 所示,包括高亮投影屏、具有前后待测曲面的微小透镜、显微物镜以及针孔 CCD 相机。其中  $W_{\text{test}}$  为实际系统中检测的波前,  $W_{\text{ideal}}$  为光线追迹模型中的波前,  $d_{t2s}$  为被测微小透镜与高亮投影屏的间距。当高亮投影屏某一像素被点亮后,光线经过被测微小透镜和显微物镜,在相机的 CCD 探测面上成像为一个光斑点。由此可以确定高亮投影屏发光像素、被测微小透镜测量区域和 CCD 成像像素点的唯一对应关系。在实际操作中,为提高测量的效率和精度,高亮投影屏投影经调制的相移正弦条纹,由 CCD 相机获取经过被测微小透镜和显微物镜的变形条纹图像。对 CCD 相机获取的变形条纹进行解调,可获得由被测微小透镜面形引入的相位分布信息,根据标定的系统结构参数,可计算得到被测面形引入的实际光斑分布  $(u_{\text{test}}, v_{\text{test}})$ 。为了获得被测元件相比于理想面形的面形误差,在光线追迹软件中建立与实际实验系统结构参数相同的理想透射元件检测模型。利用光线追迹算法可获得理想模型下投影屏的光斑分布  $(u_{\text{ideal}}, v_{\text{ideal}})$ 。

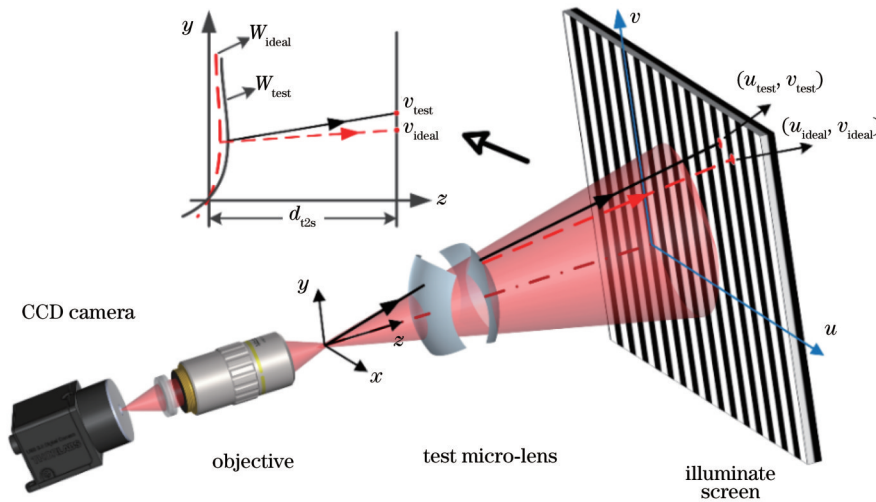


图 1 基于计算机辅助光学偏折的自由曲面微小透镜检测系统示意图

Fig. 1 Schematic of freeform micro-lens measurement system based on computer-aided deflectometry

由于出射光线的方向是经过微小透镜的波法线方向,实际系统中检测到的波前  $W_{\text{test}}$  与光线追迹模型的波前  $W_{\text{ideal}}$  之间的斜率偏差  $(\Delta T_x, \Delta T_y)$  可表示为

$$\begin{cases} \Delta T_x = \frac{\partial W_{\text{surf}}(x, y)}{\partial x} = \frac{u_{\text{test}} - u_{\text{ideal}}}{d_{t2s}} \\ \Delta T_y = \frac{\partial W_{\text{surf}}(x, y)}{\partial y} = \frac{v_{\text{test}} - v_{\text{ideal}}}{d_{t2s}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $W_{\text{surf}}(x, y)$  为面形误差造成的波前像差;  $(x, y)$  为系统出瞳处的坐标。通过对斜率偏差  $(\Delta T_x, \Delta T_y)$  进行积分<sup>[23]</sup>, 可计算得到由面形误差引入的透射波前像差  $W_{\text{surf}}(x, y)$ 。

为获取透射像差与被测微小透镜的前后两个曲面面形存在的对应关系, 在获得微小透镜高精度透射波前像差的基础上, 提出一种基于光学偏折的多面形数值迭代优化求解算法, 通过构建检测系统的理想光线追迹模型, 以微小透镜具有的面形为优化变量, 以实际系统与理想系统模型间存在的透射波前像差为目标函数进行数值迭代优化求解, 由此可实现待测元件的前后曲面面形的同步精确重构。

## 2.2 微小透镜多曲面数值迭代优化算法

如图 1 所示, 在基于光学偏折技术的微小透镜高精度透射像差检测系统中, 将靠近 CCD 相机的微小透镜表面定义为第一表面, 同时为不失一般性, 可假设微小透镜由第一表面和第二表面两个自由曲面组成。所测得的波前像差  $W_{\text{meas}}$  是受被测微小透镜或系统中各个表面面形误差以及系统参数综合影响的函数, 可表示为

$$W_{\text{meas}} = F(S_{\text{first}}, S_{\text{second}}, \dots, S_{\text{sys}}), \quad (2)$$

式中:  $S_{\text{first}}$  与  $S_{\text{second}}$  为微小透镜第一表面和第二表面的面形误差;  $S_{\text{sys}}$  为系统参数(包括结构位置参数、折射率等参数);  $F$  为函数映射关系。在光线追迹模型中, 将被测元件的初始面形误差设置为 0 ( $S_{\text{first}}^* = 0, S_{\text{second}}^* = 0$ ), 通过光线追迹算法获得的波前像差  $W_{\text{meas}}^*$  可表示为

$$W_{\text{meas}}^* = F(S_{\text{first}}^*, S_{\text{second}}^*, \dots, S_{\text{sys}}). \quad (3)$$

因此, 由式(1)计算得到的波前像差  $W_{\text{surf}}$  可理解为

$$W_{\text{surf}} \approx W_{\text{meas}} - W_{\text{meas}}^*. \quad (4)$$

由于需要进行高精度检测的透射元件表面已经经过高精度研磨与抛光, 其表面的面形斜率较为连续, 因此可用 Zernike 多项式、Chebyshev 多项式以及 Legendre 多项式等自由曲面表达式表示其表面面形, 从而可以将自由曲面的求解简化为相关多项式求解。以 Zernike 自由曲面多项式表征为例, 可将测量系统中多个被测表面的面形误差表示为

$$\begin{cases} S_{\text{first}} = \sum_{i=1}^N A_i Z_i \\ S_{\text{second}} = \sum_{i=1}^N B_i Z_i \\ \vdots \\ S_{\text{first}}^* = \sum_{i=1}^N A_i^* Z_i \\ S_{\text{second}}^* = \sum_{i=1}^N B_i^* Z_i \\ \vdots \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $A_i$  与  $B_i$  分别为被测微小透镜第一表面和第二表面的面形误差对应的第  $i$  项 Zernike 系数;  $Z_i$  为第  $i$  项 Zernike 项;  $N$  为所用的 Zernike 项数;  $A_i^*$  和  $B_i^*$  分别为理想模型中设定的第一表面和第二表面的面形误差对应的第  $i$  项 Zernike 系数。

由式(4)、(5)可知, 通过对光线追迹模型中第一表面和第二表面的面形误差对应的 Zernike 系数  $\{A_i^*\}$  和  $\{B_i^*\}$  进行优化, 使计算得到的波前像差  $W_{\text{surf}}$  逼近零值, 即实验中测得波前像差  $W_{\text{meas}}$  与模型中波前像差  $W_{\text{meas}}^*$  相等时, 光线追迹模型中赋值的第一表面和第二表面的面形误差  $S_{\text{first}}^*$  与  $S_{\text{second}}^*$  即为被测透射元件第一表面和第二表面的面形误差  $S_{\text{first}}$  与  $S_{\text{second}}$ 。在光线追迹过程中, 每一条光线追迹结果都可认为是一个关于第一表面和第二表面面形误差的方程, 即

$$W_{\text{surf}} = F(S_{\text{first}}, S_{\text{second}}, \dots, S_{\text{sys}}) \approx \{D_{\text{OP}, t}\}_{t=1, 2, \dots, T}, \quad (6)$$

式中:  $D_{\text{OP}, t}$  为第  $t$  条追迹光线上理想波前与实际波前在出瞳处的光程差;  $T$  为追迹光线的数量。为增加迭代求解过程中的有效方程数, 提高优化结果的精度, 实验中通过改变被测微小透镜在系统中的相对位置实现不同系统结构位置参数下的多次波前像差测量, 故优化目标函数可表示为

$$O[(A_i^*, B_i^*)]_{i=1, 2, \dots, N}, [P_j]_{j=1, 2, \dots, M} = \min \sum_{j=1}^M \left\{ [W_{\text{surf}}^{(P_j)}]^2 + c \right\}, \quad (7)$$

式中:  $P_j$  为第  $j$  个位置的参数状态;  $M$  为检测次数;  $c$  为附加约束, 用于约束解空间。在  $P_j$  的位置参数状态下, 优化目标函数可表示为

$$O(A_i^*, B_i^*) = \min \left[ (W_{\text{meas}} - W_{\text{meas}}^*)^2 + c \right] = \min \left[ \sum_{i=1}^N \alpha^2 (C_i - C_i^*)^2 + c \right], \quad (8)$$

式中:  $C_i$  与  $C_i^*$  分别为实验测得波前  $W_{\text{meas}}$  与模型获得波前  $W_{\text{meas}}^*$  的第  $i$  项 Zernike 系数;  $\alpha^2$  为对应的优化权重。因此被测微小透镜的第一、第二表面的面形误差为

$$(A_i, B_i) = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^N \left[ (W_{\text{surf}}^{(P_j)})^2 + c \right] \right\}. \quad (9)$$

根据求得的多项式系数  $\{A_i\}$  和  $\{B_i\}$ , 即可得到被测微小透镜两个表面的面形数据。图 2 为基于数值迭代重构优化算法的微小透镜多曲面面形重构流程图, 详细介绍了自由曲面微小透镜面形误差的计算过程。本文以前后两个表面的微小透镜为例说明多曲面面形的计算原理。通过增加优化变量的数量, 即增加待测曲面的数量, 该方法同样适用于由多个曲面构成的透射元件的测量。

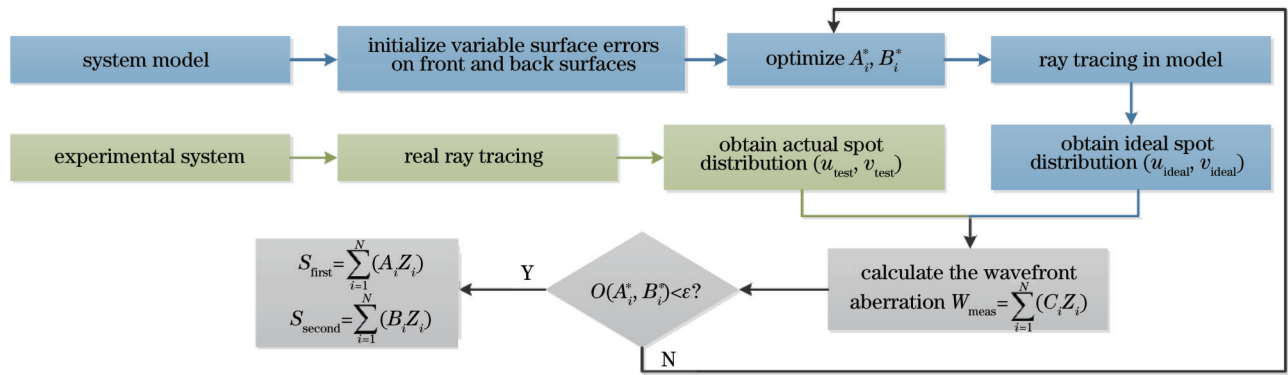


图 2 基于光学偏折术的微小透镜多曲面面形检测流程图

Fig. 2 Flow chart for micro-lens multisurface testing based on deflectometry

### 3 仿真验证

为验证基于光学偏折术的微小透镜双曲面面形同步测量技术的可行性与高精度性,设计了直径为 1 mm 的自由曲面微小透镜作为待测样品,其自由曲面面形由 Zernike 多项式 37 项系数来表征。根据图 1 所示的自由曲面微小透镜检测系统结构,在光线追迹软件中建立对应的逆向光路的光线追迹模型,用理想点光源代替针孔 CCD 相机,用成像平面代替投影屏,为简化模型,进行光路等效处理,如图 3 所示,其中显微物镜

初始位置与被测微小透镜前表面的距离为 15 mm,投影屏到被测透镜后表面的距离为 20 mm。为保证成像质量,仿真系统中显微物镜采用优化好的黑箱物镜模型( $NA=0.2$ ,放大倍数为  $4\times$ ,工作距离为 17 mm),理想模型中 CCD 相机、显微物镜、待测微小透镜和投影屏中心处于同一光轴并保持良好的共轴状态。在光线追迹模型中建立的理想透射元件为自由曲面透镜,两个表面的距离为 0.3 mm,材质为光学玻璃 BK7(折射率为 1.517,单面反射率为 4.219%)。

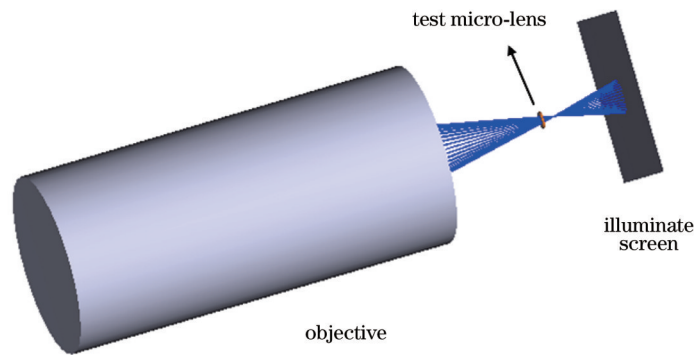


图 3 系统光线追迹模型示意图

Fig. 3 Schematic of the system ray tracing model

在系统光线追迹模型第一表面与第二表面设置的面形如图 4(e)、(f)所示,对应的峰谷(PV)值分别为  $92.646\ \mu\text{m}$  和  $90.834\ \mu\text{m}$ 。为了实现准确和全口径测量,将被测的自由曲面微小透镜放在 4 个不同的位置,包括初始位置[图 4(a)]、围绕  $x$  轴[图 4(b)]和  $y$  轴[图 4(c)]旋转  $10^\circ$ (表示为“ $T_x 10^\circ$ ”“ $T_y 10^\circ$ ”)和翻转[图 4(d)]的 4 个位姿,并对 4 个位姿的微小透镜进行波前重建,得到 4 个模拟波前的信息。从上述 4 个位置的重构波前可以看出,4 个位置的不同几何参数导致了所获得的波前之间有明显差异。基于 4 个位姿得到的波前信息,在经过数千次迭代优化后,同时重构被测微小透镜的前后表面面形,如图 4 所示。图 4(g)、(h)所示的

重构前后表面对应的 PV 值分别为  $92.072\ \mu\text{m}$  和  $91.241\ \mu\text{m}$ 。在经过 5 个优化周期后,目标函数基本不再下降,说明已达到饱和,这意味着所提出的微小透镜前后表面同时重构的方法是快速并且稳定的。从图 4(e)、(f)和图 4(g)、(h)可以看出,标称表面轮廓和重建表面具有较好的一致性,相应的均方根(RMS)误差值仅为几十纳米,实现了亚微米级的测试精度。图 4(i)、(j)分别为前后表面的标称表面轮廓和重建表面之间的残差,可以看出残差的 RMS 值在亚微米量级。因此,所提出的自由曲面微小透镜数值迭代优化算法在基于光学偏折术的自由曲面微小透镜面形测量中具有较高的精度。

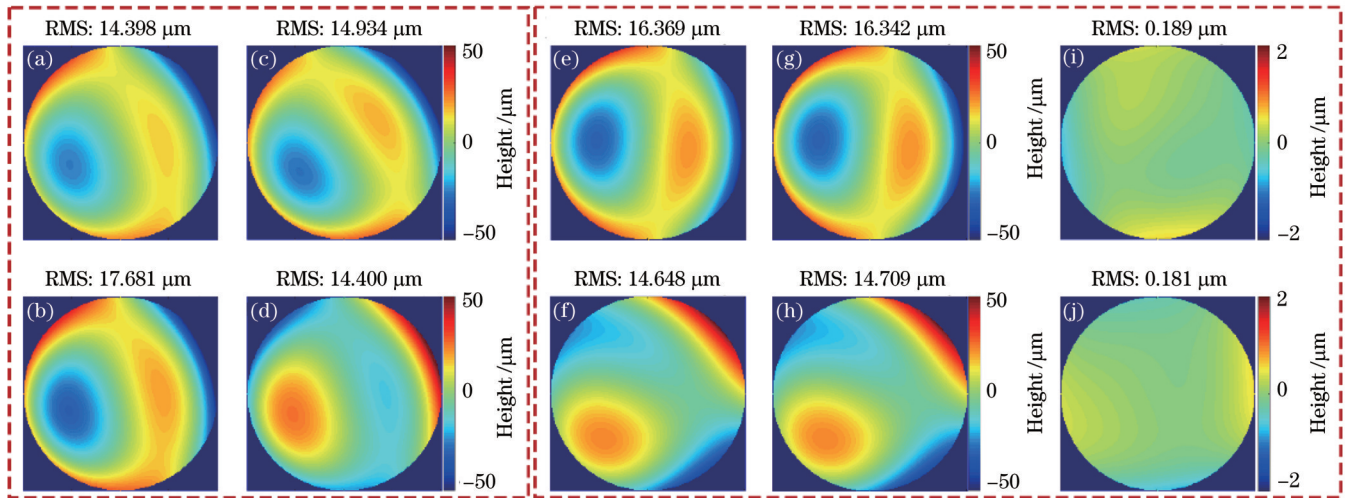


图 4 微小透镜双曲面重构结果。(a)初始位置波前;(b)绕 $x$ 轴旋转 $10^\circ$ 波前;(c)绕 $y$ 轴旋转 $10^\circ$ 波前;(d)翻转位置波前;(e)前表面设计面形;(f)后表面设计面形;(g)重构前表面;(h)重构后表面;(i)前表面残差;(j)后表面残差

Fig. 4 Reconstruction results of micro-lens double-surfaces. (a) Original wavefront; (b) wavefront at the  $T_x 10^\circ$ ; (c) wavefront at the  $T_y 10^\circ$ ; (d) wavefront at the flip position; (e) nominal front surface of tested micro-lens; (f) nominal rear surface of tested micro-lens; (g) reconstructed front surface of tested micro-lens; (h) reconstructed rear surface of tested micro-lens; (i) residual error of front surface; (j) residual error of rear surface

## 4 实验测量

为了验证所提出的基于光学偏折的微小透镜双曲面测量方法的可行性,搭建了基于光学偏折的微小透镜双曲面测量实验系统,如图 5 所示。高亮投影屏与被测微小透镜、显微物镜和 CCD 相机成同轴放置,且

高亮投影屏平面垂直于 CCD 相机和显微物镜的光轴,被测微小透镜位于高亮投影屏和显微物镜之间,且在显微物镜工作距离之内。通过三维调整架移动被测微小透镜的位置,使前端装有小孔的 CCD 相机可以获得完整清晰的待测微小透镜成像,以及经被测微小透镜透射的变形正弦条纹图像。

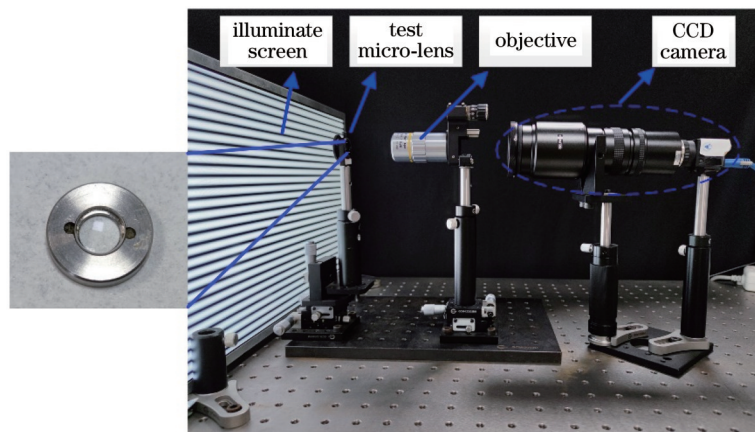


图 5 实验系统和被测微小透镜

Fig. 5 Photo of experiment system and micro-lens

在实验检测系统中,为提高目标函数的收敛精度,在所搭建的面形检测实验系统中采用精密平移台移动被测微小透镜元件,以此获得不同入射角度下的透射波前像差。为了消除由系统自身结构引入的波像差,并获得由被测微小透镜加工误差引入的波像差,采用高精度的三坐标测量机(测量精度达 $5.0 \mu\text{m}$ ,分辨率为 $0.078 \mu\text{m}$ )对该检测系统的结构位置参数进行预标定,获取实际系统中各个器件的位姿信息,并建立与实

际系统对应的理想检测系统模型。基于光学偏折术的透射元件波前检测系统中实测系统与光线追迹模型之间的建模误差即为系统结构误差。已有科研人员<sup>[22,24]</sup>对系统结构误差的分析和消除进行了详细的分析和处理。本实验利用相应的结构误差校正方法对模型化系统中的结构位置参数进行校正,使得理想模型中各个元件的结构位置参数都达到最优值。在实验系统中,由于显微视场很小,再加上微小透镜口径较小,通光口

径较小,普通显示屏无法提供足够的光强信息以满足测量需求,因此选用数倍亮度于普通显示屏的高亮投影屏来提高图像质量和系统信噪比,选用的高亮液晶显示器(LCD)投影屏亮度为 $2000\text{ cd/m}^2$ ,分辨率为 $1920\text{ pixel}\times 1080\text{ pixel}$ ,像素尺寸为 $0.248\text{ mm}\times 0.248\text{ mm}$ ; CCD相机的像素为 $1328\text{ pixel}\times 1048\text{ pixel}$ ,像元尺寸为 $3.63\text{ }\mu\text{m}\times 3.63\text{ }\mu\text{m}$ ;选用的长工作距离显微物镜 $NA=0.28$ ,工作距离为 $34\text{ mm}$ ,可为测量波前提供足够的空间,该显微物镜的放大倍数为 $10\times$ ,波长范围为 $436\sim 656\text{ nm}$ ,搭载高精度二维平移移动平台以实现显微物镜的微调,适配实验要求。在实际检测实验中,被测微小透镜的直径为 $6\text{ mm}$ ,厚度为 $1\text{ mm}$ ,折射率为 $1.51$ 。

利用所搭建的基于光学偏折的显微微小透镜双曲面测量实验系统进行微小透镜的透射波前检测,其中

显微物镜与待测微小透镜中心之间的距离为 $30\text{ mm}$ ,待测微小透镜中心与高亮投影屏的距离为 $90\text{ mm}$ 。为实现精确的全孔径测量,将被测微小透镜放置在4个不同位置,即初始位置、 $T_x10^\circ$ 、 $T_y10^\circ$ 和翻转位置,被测微小透镜的4个位置采集的条纹信息如图6(a)~(d)所示,4个位置的波前信息如图6(e)~(h)所示,经过计算机辅助校正相应的结构误差,得到校正后的4个位姿的波前信息,利用自由曲面微小透镜数值迭代优化算法,以微小透镜自由曲面前后两个曲面的面形为优化变量,将实际系统与理想系统模型间存在的4个透射波前像差作为目标函数进行数值迭代重构优化求解,进行前后两个表面同步重构,得到的前后表面如图6(i)、(j)所示,重构前后表面对应的PV值分别为 $0.308\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.096\text{ }\mu\text{m}$ 。

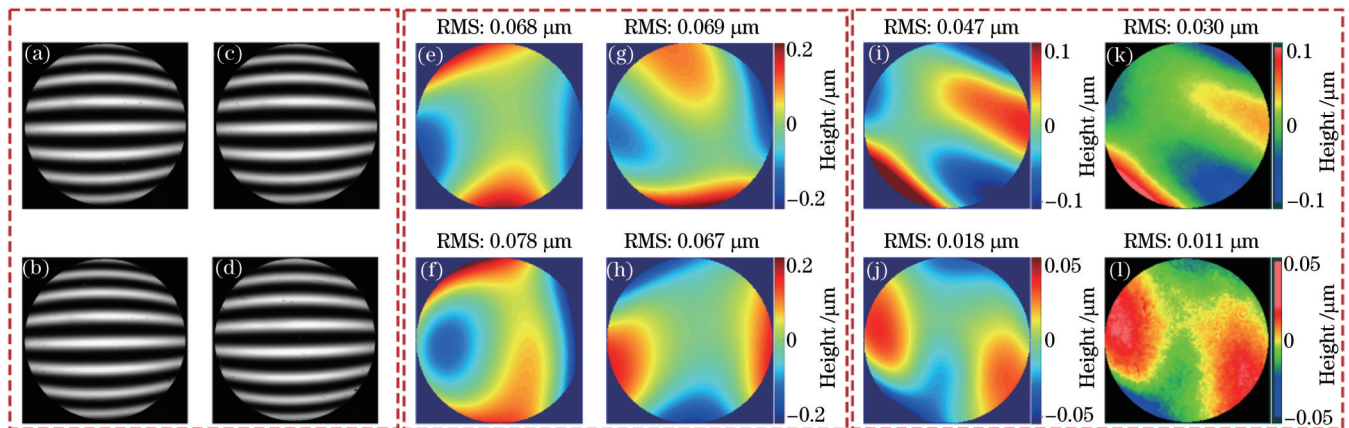


图6 微小透镜双曲面重构实验结果。(a)在初始位置采集的 $x$ 方向条纹;(b)在 $T_x10^\circ$ 采集的 $x$ 方向条纹;(c)在 $T_y10^\circ$ 采集的 $x$ 方向条纹;(d)在翻转位置采集的 $x$ 方向条纹;(e)初始位置波前;(f) $T_x10^\circ$ 波前;(g) $T_y10^\circ$ 波前;(h)翻转位置波前;(i)前表面重构结果;(j)后表面重构结果;(k)Zygo测量的前表面;(l)Zygo测量的后表面

Fig. 6 Reconstruction results of micro-lens double-surfaces in the experiment. (a) Acquired fringes in  $x$  direction at the original position; (b) acquired fringes in  $x$  direction at the  $T_x10^\circ$ ; (c) acquired fringes in  $x$  direction at the  $T_y10^\circ$ ; (d) acquired fringes in  $x$  direction at the flip position; (e) transmitted wavefront at the original position; (f) transmitted wavefront at the  $T_x10^\circ$ ; (g) transmitted wavefront at the  $T_y10^\circ$ ; (h) transmitted wavefront at the flip position; (i) reconstructed front surface of tested micro-lens; (j) reconstructed rear surface of tested micro-lens; (k) measured front surface of tested micro-lens by Zygo interferometer; (l) measured rear surface of tested micro-lens by Zygo interferometer

为验证所提出测量方法的准确性,利用Zygo干涉仪对被测微小透镜进行了测量,测得的前后表面面形如图6(k)、(l)所示,对应的PV值分别为 $0.200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.062\text{ }\mu\text{m}$ 。由图6对比可知,经所提自由曲面微小透镜数值迭代优化算法重构得到的前后两个表面的面形结果与Zygo干涉仪测得结果的RMS误差分别为 $17\text{ nm}$ 和 $7\text{ nm}$ ,所提出的基于光学偏折的微小透镜双曲面测量方法无论是在形状上或者是在数值上都与Zygo干涉仪测量结果具有良好的一致性。重建得到的前后表面在去掉前4项低阶项后的第5~15项Zernike系数( $Z_5\sim Z_{15}$ )如表1给出,与Zygo干涉仪的测量结果相比,大部分Zernike系数较为接近,误差在5%以内,具有较好的一致性。此外,所提方法测得的高阶

系数如 $Z_{13}$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$ 与Zygo的测量结果相差稍大,对高阶球差、像散等像差影响下的重建效果稍差,有待后续优化完善算法,进一步提高重构精度。综上可见,所提微小透镜双曲面测量方法具有高精度和可行性。

## 5 结 论

针对微小透镜元件前后曲面的高精度、同步检测需要,提出一种基于光学偏折的自由曲面微小透镜双曲面面形的数值迭代优化同步重构方法。通过对测量系统的预标定获得系统元件结构位置参数,建立对应的理想模型进行光线追迹,调整被测微小透镜的位姿,在多个不同位姿状态下获取对应的波前信息,并利用相应的结构误差校正方法减小由系统结构引入的光线

表 1 实验结果的 Zernike 系数比较

Table 1 Comparison of Zernike fringe coefficients of experiment

unit: mm

Zernike fringe coefficient	Reconstruction front surface	Reconstruction rear surface	Zygo measured front surface	Zygo measured rear surface
$Z_5$	$2.7540 \times 10^{-5}$	$3.4181 \times 10^{-5}$	$2.8090 \times 10^{-5}$	$3.0180 \times 10^{-5}$
$Z_6$	$6.0533 \times 10^{-5}$	$-2.4578 \times 10^{-5}$	$6.0510 \times 10^{-5}$	$-2.4480 \times 10^{-5}$
$Z_7$	$-3.2533 \times 10^{-5}$	$-5.4239 \times 10^{-7}$	$-3.1060 \times 10^{-5}$	$-5.4000 \times 10^{-7}$
$Z_8$	$-6.3719 \times 10^{-5}$	$-2.9232 \times 10^{-6}$	$-6.3470 \times 10^{-5}$	$-2.9500 \times 10^{-6}$
$Z_9$	$4.9454 \times 10^{-6}$	$-7.6977 \times 10^{-6}$	$4.6100 \times 10^{-6}$	$-8.1200 \times 10^{-6}$
$Z_{10}$	$8.2940 \times 10^{-5}$	$-1.2219 \times 10^{-5}$	$7.8870 \times 10^{-5}$	$-1.3560 \times 10^{-5}$
$Z_{11}$	$-1.6124 \times 10^{-5}$	$3.3964 \times 10^{-7}$	$-1.7420 \times 10^{-5}$	$3.9000 \times 10^{-7}$
$Z_{12}$	$-1.5612 \times 10^{-5}$	$-1.0878 \times 10^{-5}$	$-1.2910 \times 10^{-5}$	$-1.2230 \times 10^{-5}$
$Z_{13}$	$-2.0249 \times 10^{-7}$	$-4.9644 \times 10^{-6}$	$-1.2300 \times 10^{-6}$	$-3.5700 \times 10^{-6}$
$Z_{14}$	$-1.5036 \times 10^{-5}$	$6.1225 \times 10^{-6}$	$-2.2600 \times 10^{-6}$	$3.8100 \times 10^{-6}$
$Z_{15}$	$2.0350 \times 10^{-6}$	$6.4506 \times 10^{-6}$	$1.2000 \times 10^{-6}$	$4.8100 \times 10^{-6}$

像差,得到由被测微小透镜加工误差引入的透射波像差。为验证所提方法的可行性,对 6 mm 的微小透镜进行实验检测,同时利用 Zygo 干涉仪对其进行对比实验。实验结果表明,所提出的微小透镜双曲面面形的数值迭代同步重构方法可以达到亚微米量级的测量精度,满足同时高精度检测微小透射元件前后表面的需要。该检测方法具有系统结构简单、测量动态范围大以及精度高等特点,可满足各种复杂光学与工业微小透镜双曲面的同步高精度检测。

## 参 考 文 献

- [1] 刘展宇,王沛沛,金志樑,等.用于LED集鱼灯稳定照明的自由曲面透镜设计[J].光学学报,2021,41(5):0522003.  
Liu Z Y, Wang P P, Jin Z L, et al. Free-form lens design for LED fishing lamp with stable illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522003.
- [2] 段文举,朴明旭,全向前,等.适于扩展光源的紧凑型双自由曲面匀光透镜设计[J].光学学报,2022,42(15):1522001.  
Duan W J, Piao M X, Quan X Q, et al. Design of compact double freeform surface lens with uniform illumination for extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1522001.
- [3] 张艺蓝,史浩东,王超,等.基于自由曲面的空间光学系统偏振像差分析[J].光学精密工程,2021,29(12):2783-2796.  
Zhang Y L, Shi H D, Wang C, et al. Analysis of polarization aberration of space optical system based on freeform surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(12): 2783-2796.
- [4] 刘亮志,郭亮,陈志涛,等.基于负焦距透射结构的自由曲面准直透镜设计[J].激光与光电子学进展,2022,59(17):1722005.  
Liu L Z, Guo L, Chen Z T, et al. Design of optical system with freeform surfaces based on negative focus transmission structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(17): 1722005.
- [5] Hua H, Javidi B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [6] 芮丛珊,曾春梅,冯志强,等.离轴反射式头戴显示光学系统的自由曲面设计方法[J].红外与激光工程,2022,51(10):245-255.  
Rui C S, Zeng C M, Feng Z Q, et al. Design method of freeform surface for off-axis reflective head-mounted display

optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 245-255.

- [7] 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):0112001.  
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0112001.
- [8] 田晓春.基于三坐标测量机测量复杂曲面轮廓的极坐标测量法研究[J].铁道技术监督,2020,48(11):19-21.  
Tian X C. Research on the polar coordination method of measuring complex surface scope with three-coordination measurement machine[J]. Railway Quality Control, 2020, 48(11): 19-21.
- [9] 张磊,吴金灵,刘仁虎,等.光学自由曲面自适应干涉检测研究新进展[J].中国光学,2021,14(2):227-244.  
Zhang L, Wu J L, Liu R H, et al. Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces[J]. Chinese Optics, 2021, 14(2): 227-244.
- [10] Kwon O, Seol D H, Qiao H M, et al. Recent progress in the nanoscale evaluation of piezoelectric and ferroelectric properties via scanning probe microscopy[J]. Advanced Science, 2020, 7(17): 1901391.
- [11] 张钰,何林.石墨烯体系中自旋和赝自旋的扫描隧道显微镜研究[J].物理实验,2020,40(11):1-13.  
Zhang Y, He L. Spin and pseudospin of graphene based on scanning tunneling microscopy[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(11): 1-13.
- [12] Ankudinov A V, Khalisov M M. Contact stiffness measurements with an atomic force microscope[J]. Technical Physics, 2020, 65(11): 1866-1872.
- [13] Bawart M, Jesacher A, Bernet S, et al. Remote focusing in confocal microscopy by means of a modified Alvarez lens[J]. Journal of Microscopy, 2018, 271(3): 337-344.
- [14] Su P, Khreishi M, Su T Q, et al. Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. Optical Engineering, 2013, 53(3): 031305.
- [15] 王雪敏,李大海,鄂可伟,等.PMD光学元件面形测量中的镜头畸变校正研究[J].光学与光电技术,2016,14(3):28-35,41.  
Wang X M, Li D H, E K W, et al. Lens distortion correction research on the surface measurement using PMD[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(3): 28-35, 41.
- [16] Zhang H W, Ji L S, Liu S G, et al. Three-dimensional shape measurement of a highly reflected, specular surface with structured light method[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7724-7732.

- [17] 岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 相位测量偏折术中高质量条纹的获取[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1112004.  
Yue H M, Li R, Pan Z P, et al. High quality fringe patterns captured from phase measuring deflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1112004.
- [18] 袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0212004.  
Yuan T, Zhang F, Tao X P, et al. Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0212004.
- [19] Häusler G, Richter C, Leitz K H, et al. Microdeflectometry: a novel tool to acquire three-dimensional microtopography with nanometer height resolution[J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 396-398.
- [20] Gu H T, Wang D D, Gu Z X, et al. High-accuracy deflectometric microscope system with a large slope range[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2011-2014.
- [21] Gu Z X, Wang D D, Ruan Y, et al. Design and error calibration of an on-axis deflectometric microscope system[J]. Applied Optics, 2022, 61(10): 2856-2863.
- [22] Wang D D, Xu P, Gong Z D, et al. Transmitted wavefront testing with large dynamic range based on computer-aided deflectometry[J]. Journal of Optics, 2018, 20(6): 065705.
- [23] Southwell W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. Journal of the Optical Society of America, 1980, 70(8): 998-1006.
- [24] 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.

## Double-Surface Simultaneous Measurement of Micro-Lenses Based on Deflectometry

Ruan Yang, Kong Ming, Dou Jinchao, Yu Jing, Hua Hangbo, Wang Shiling, Liu Wei\*

*College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China*

### Abstract

**Objective** As optical systems become increasingly complex, miniaturized, and integrated, complex surface micro-lenses have been widely used in lighting, imaging, and other fields. Freeform micro-lens measurement is beneficial to the evaluation and processing of high-precision micro-lenses. However, the micro-lens has front and rear surfaces, and the large dynamic range characteristics of the surfaces and the requirement for high-precision inspection limit the versatility and efficiency of the existing micro-lens measurement techniques. Since the two surfaces of the micro-lens on freeform surfaces fail to be simultaneously measured with high accuracy during the detection, we propose a method based on deflectometry to solve the above problem.

**Methods** In order to address the problem that the front and rear surfaces of the micro-lens cannot be measured simultaneously with high accuracy, a numerical iterative optimization algorithm for the simultaneous double-surface reconstruction of the micro-lens based on the high-precision transmission wavefront by deflectometry has been proposed. First, it is necessary to obtain the high-precision transmission wavefront aberration of the micro-lens to get the correspondence between the transmission aberration and the front and rear surfaces of the micro-lens under test. Then, wavefront aberrations with micro-lens surface information are obtained by tracing the ideal model of the measurement system through ray. After that, with the minimum wavefront aberration as the objective function, the numerical iterative optimization is performed with the two surfaces to be measured as the optimization variables to achieve the high-precision simultaneous reconstruction of the front and rear surfaces of the micro-lens. In addition, in order to solve the problem that the front and rear surfaces affect each other during the solution process, the error of each surface of the micro-lens under test is measured by changing the position of the tested element in the experiment and measuring the same tested element several times, so as to increase the number of effective equations in the optimization process. The flow chart of the surfaces of the micro-lens testing is given in Fig. 2.

**Results and Discussions** In this paper, the proposed surface measurement method is simulated and experimentally verified. Experimental validation is carried out by testing a convex lens with an aperture of 6 mm through the Zygo interferometer, and the results are similar to the root-mean-square (RMS) errors of less than dozens of nanometers. In the simulation validation section, we design a freeform micro-lens with a diameter of 1 mm as the element to be tested, and the freeform surface is characterized by 37 coefficients of Zernike polynomial. According to the structure of the freeform micro-lens measurement system shown in Fig. 1, the corresponding ray tracing model of the inverse optical path is established in the ray tracing software. The ideal point light source is replaced by the pinhole CCD camera, and the imaging plane is replaced by the projection screen as shown in Fig. 3. The peak-to-valley (PV) values are 92.646  $\mu\text{m}$  and 90.834  $\mu\text{m}$ ,



respectively, as shown in Fig. 4(e) and Fig. 4(f) of the surfaces set on the front and rear surfaces. The measured freeform micro-lens is placed in four different positions, including the initial position [Fig. 4(a)], position after rotation of  $10^\circ$  around the  $x$ -axis [Fig. 4(b)] and  $y$ -axis [Fig. 4(c)] (denoted as  $T_x10^\circ$  and  $T_y10^\circ$ ), and flip [Fig. 4(d)]. The wavefront reconstruction is performed for the micro-lens in the four positions to obtain the wavefront information of the four simulations. The PV values of the reconstruction of the front and rear surfaces shown in Fig. 4(g) and Fig. 4(h) are  $92.072\ \mu\text{m}$  and  $91.241\ \mu\text{m}$ , respectively. The nominal surface and the reconstructed surface have great consistency, and the RMS values are within a few tens of nanometers of error, which achieves sub-micron accuracy. In the experimental section, Fig. 5 shows the photo of the experiment system and micro-lens. The obtained wavefront information of the four positions of the micro-lens with calibrated structural errors is used to reconstruct the front and rear surfaces simultaneously by using the numerical iterative optimization algorithm of the freeform micro-lens, and the reconstructed front and rear surfaces are shown in Fig. 6(i) and Fig. 6(j). The reconstructed PV values of the front and rear surfaces are  $0.308\ \mu\text{m}$  and  $0.096\ \mu\text{m}$ , respectively. The RMS deviations from the results measured by the Zygo interferometer are  $17\ \text{nm}$  and  $7\ \text{nm}$ , respectively. Table 1 shows that most of the Zernike coefficients ( $Z_5$ - $Z_{15}$ ) are within an error of 5% and have great consistency.

**Conclusions** In this paper, in order to realize high-precision and simultaneous inspection of the front and rear surfaces of the micro-lens, a numerical iterative optimal simultaneous reconstruction method of the surfaces of the freeform micro-lens based on deflectometry is proposed. The experimental results show that the numerical iterative simultaneous reconstruction method of the two surfaces of the micro-lens can achieve sub-micron measurement accuracy and realize the high-precision measurement of the front and rear surfaces of the micro-lens at the same time. The measurement method is characterized by a simple system structure, large measurement dynamic range, and high accuracy, and it can achieve simultaneous high-precision detection of various complex optical and industrial double-surfaces of micro-lenses.

**Key words** measurement; transmission element; freeform surface testing; deflectometry; micro-lens