

哈特曼传感器检测微透镜波前方法

杨伟斌 王春艳 张为国 王金玉 夏良平 杜春雷 孙昊

Method of detecting microlens wavefront by Hartmann sensor

YANG Weibin, WANG Chunyan, ZHANG Weiguo, WANG Jinyu, XIA Liangping, DU Chunlei, SUN Hao

引用本文:

杨伟斌, 王春艳, 张为国, 等. 哈特曼传感器检测微透镜波前方法[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 380–387. DOI: 10.5768/JAO202546.0203003

YANG Weibin, WANG Chunyan, ZHANG Weiguo, et al. Method of detecting microlens wavefront by Hartmann sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 380–387. DOI: 10.5768/JAO202546.0203003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中心不重合径向剪切干涉迭代波前重构算法仿真分析

Simulation analysis of iterative wavefront reconstruction algorithm for center–offset radial shearing interference

应用光学. 2024, 45(1): 118–125 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102006>

基于波长移相剪切干涉的准直波前重构技术

Collimated wavefront reconstruction based on wavelength phase–shifting shear interferometry

应用光学. 2020, 41(1): 67–73 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0102001>

光子集成干涉成像系统微透镜排布设计与图像复原

Arrangement of microlens and image restoration technology of photon integrated interferometric imaging system

应用光学. 2022, 43(2): 213–220 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201005>

基于视觉的传感器位置记忆追踪方法

Memory tracking method of sensor location based on vision

应用光学. 2021, 42(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502005>

一种检测弱磁场的光纤传感器的研究与仿真

Research and simulation of fiber sensor for weak magnetic field detection

应用光学. 2024, 45(4): 873–878 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0408002>

基于稀疏子孔径的大口径准直波前评价

Large–aperture collimated wavefront evaluation based on sparse subaperture

应用光学. 2022, 43(1): 45–51 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0380-08

引用格式: 杨伟斌, 王春艳, 张为国, 等. 哈特曼传感器检测微透镜波前方法[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 380-387.

YANG Weibin, WANG Chunyan, ZHANG Weiguo, et al. Method of detecting microlens wavefront by Hartmann sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 380-387.



在线阅读

哈特曼传感器检测微透镜波前方法

杨伟斌¹, 王春艳¹, 张为国², 王金玉², 夏良平^{3,4}, 杜春雷^{3,4}, 孙昊¹

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 微纳制造与系统集成研究中心, 重庆 400714; 3. 长江师范学院微纳光电器件与智能感知系统重点实验室, 重庆 408100; 4. 珠海迈时光电科技有限公司, 广东 珠海 519060)

摘要: 随着微透镜的广泛应用, 微透镜光学性能的快速检测是使用者和加工人员亟待解决的关键问题。提出利用哈特曼波前传感器来检测微透镜波前, 从而快速表征其光学性能。为了验证该方法的可行性, 设计了利用哈特曼传感器测量微透镜波前的总体方案, 搭建了测量实验系统, 并对测量的误差源进行了分析。结合实验方案, 研究质心提取算法、Zernike 多项式波前重构算法, 保证光斑质心提取精度及波前重构精度, 并分析了待测透镜孔径衍射对波前检测精度的影响。结合 200 μm 的凸透镜进行波前检测实验, 得到了其波前误差和初级像差信息, 为微透镜光学性能的快速检测提供了一种全新的思路。

关键词: 微透镜; 哈特曼传感器; 质心提取; 波前重构; 光学性能

中图分类号: TN206; TH74

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0203003

Method of detecting microlens wavefront by Hartmann sensor

YANG Weibin¹, WANG Chunyan¹, ZHANG Weiguo², WANG Jinyu², XIA Liangping^{3,4},
DU Chunlei^{3,4}, SUN Hao¹

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Research Center for Micro and Nano Manufacturing and System Integration, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Key Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Devices and Intelligent Sensing System, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China; 4. Zhuhai Mai Time Electronics Technology Co., Ltd., Zhuhai 519060, China)

Abstract: With the wide application of microlens, the rapid detection of optical properties of microlens is a key problem to be solved urgently by users and processors. Hartmann wavefront sensor was used to detect the wavefront of microlens and to quickly characterize its optical properties. In order to verify the feasibility of this method, the overall scheme of measuring microlens wavefront with Hartmann sensor was designed, the measurement experiment system was set up, and the measurement error source was analyzed. Combined with the experimental scheme, the centroid extraction algorithm and the Zernike polynomial wavefront reconstruction algorithm were studied to ensure the centroid extraction accuracy and wavefront reconstruction accuracy of the spot, and the effect of aperture diffraction of the lens to be tested on the wavefront detection accuracy was analyzed. The wavefront error and primary aberration information of a 200 μm convex lens were

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-07-16

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20220201074GX); 重庆市“博士直通车”科研项目 (CSTB2022BSXM-JSX0011); 重庆市科技局项目 (CSTB2022NSCQ-LZX0056)

作者简介: 杨伟斌 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测与质量控制研究。E-mail: y1601538970@163.com

通信作者: 王春艳 (1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电仪器设计与测试研究。E-mail: 245044961@qq.com

obtained, which provided a new idea for the rapid detection of optical properties of microlenses.

Key words: microlens; Hartmann sensor; centroid extraction; wavefront reconstruction; optical property

引言

微透镜及其阵列器件是光学透镜微型化、芯片化发展的必然趋势,在光通信、光整形、光探测等领域应用广泛。微透镜的检测方法目前主要有探针测量^[1-2]和干涉测量^[3]两种。基于探针的接触测量法难以保证透镜中心位置的获取,需要多次重复测量,且对光学元件表面易造成损伤^[4-5];干涉非接触测量精度较高,但结构复杂,对环境要求较为苛刻、价格昂贵^[6-7]、测试效率低。哈特曼传感器^[8]具有体积较小,精度较高,动态影响可以通过多次采样取平均来消除的特点,目前被广泛使用。

目前多名学者曾在利用哈特曼传感器测量透镜性能方面进行过研究,如西安工业大学的田爱玲等人^[9]对口径为 3 mm 的透镜进行测量,利用 Zernike 多项式重构波前,得到了待测透镜的波前及像差参数;长春光学精密机械与物理研究所的王晶等人^[10]提出了一种夏克哈特曼扫描拼接检测平面镜面形的方法;成都光电技术研究所的戴勋义^[11]提出了一种扫描哈特曼法检测大口径望远镜像质

的方法。以上研究均针对大口径透镜进行检测,利用哈特曼传感器测量小尺寸透镜目前还没有成熟技术。本文在前人研究的基础上,重新设计测试方案,首次利用该方法测试并分析其可行性,主要针对更小口径的微透镜进行波前测试研究。重点研究了测量方案,分析方案中误差产生及消除的办法,并结合实际测试,实现了对口径为 200 μm 凸透镜的光学性能检测。

1 测量总体方案设计

1.1 总体方案

测试系统总体方案光路图如图 1 所示,主要由测量光路和参考光路两部分构成。测量光路包括发射激光器、激光扩束器、分光棱镜、平面反射镜;参考光路包括发射激光器、激光扩束器、分光棱镜、标准透镜、待测透镜和平面反射镜。需保证所使用的两个平面反射镜面型偏差一致,经干涉仪测试的标准透镜的面型偏差对测量精度不产生影响,或作为系统误差剔除。

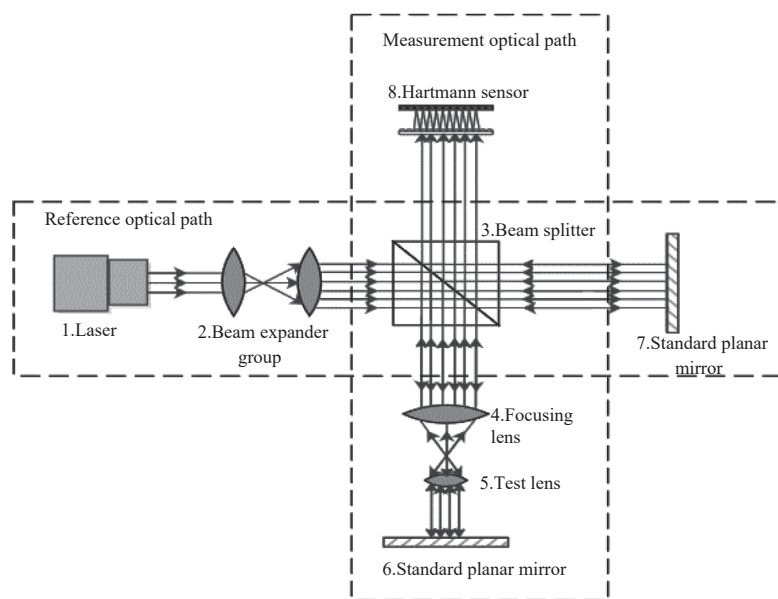


图 1 测试系统总体方案光路图

Fig. 1 Optical path diagram of overall scheme for test system

1.2 具体方案

图 1 中,波长 632.8 nm 激光器 1 发出的光束经扩束镜组 2 进行扩束、准直,通过分光棱镜 3 后,透射光直接入射到标准平面反射镜 7 并按原路返回,经分光棱镜 3 反射后入射至哈特曼传感器 8 获

得参考光路波像差。经分光棱镜 3 反射的光束经聚焦透镜 4 会聚后入射至待测小透镜 5,聚焦透镜 4 焦点与待测透镜 5 焦点重合。经待测透镜 5 出射的平行光束经标准平面反射镜 6 反射后按原路返回,经分光棱镜 3 透射后入射至哈特曼传感器获得

待测透镜波像差,将第二次获得的波前减去第一次获得的波前,即可得到待测透镜的波像差。

1.3 指标分解

根据光通信耦合的实际需求,口径 200 μm 的透镜波前检测精度要求保证均方根 (root-mean-square, RMS) 误差 $\leq 1/16 \lambda$ 。分析哈特曼传感器主要参数,设计完成该传感器检测系统的搭建,基准波长为 632.8 nm,质心算法精度须达到 0.02 pixel,波前检测的 RMS 达到 $1/20 \lambda$ 。

2 测量误差来源分析

测试系统误差来源主要有两个方面:一方面是哈特曼传感器自身的检测误差,主要包括质心提取误差 σ_1 和波前重构误差 σ_2 ;另一方面是微透镜孔径衍射效应带来的误差 σ_3 。需对 3 个部分进行分析,保证微透镜波前的检测精度。

2.1 质心提取方法及精度

哈特曼传感器在检测微透镜波前时,通过 CCD 采集激光光斑图像^[12],由于像差的存在,该光斑是一个弥散圆,形状不规则,需对光斑质心提取算法进行研究。根据光斑特点,采用加权灰度平均质心提取算法来实现光斑质心的有效提取^[13]。其计算表达式为

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{i,j} I_{i,j}^w}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{i,j}^w} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{i,j} I_{i,j}^w}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{i,j}^w} \quad (2)$$

式中: $M \times N$ 为 CCD 的分辨率; $x_{i,j}, y_{i,j}$ 为 (i, j) 处的 x 坐标和 y 坐标; $I_{i,j}^w$ 为 (i, j) 处像素灰度值的 w 次幂, w 为像素灰度值的幂指数; x_c, y_c 为光斑质心的 x 和 y 坐标。

CCD 获取的是包含噪声的灰度图像,在对光斑质心提取之前,需对图片进行预处理,降低背景噪声的影响^[14]。分别使用全局阈值法、自适应高斯阈值法和自适应均值阈值法对同一光斑质心提取多组数据,利用最小二乘法求出各自平均值。再利用 3 种方法对分布光斑质心提取 20 次,与各自的平均值相减,得出各自残余误差。根据贝塞尔公式计算标准差,求出光斑质心的提取标准差,如图 2 所示。 w 在 2~3 之间取值进行质心提取,精度最高,为了减小计算量, w 通常取整数。当像素灰度值的幂指数为 2 时,质心提取精度相较于于传

统质心法 ($w=1$) 有了很大的提高,且指数由 2 增加到 3 时精度相差不大,因此指数 w 取 2 即可。自适应均值阈值化在像素灰度值指数为 2 时,质心提取精度最高,即 $\sigma_1 = 0.018 \text{ pixel}$ 。

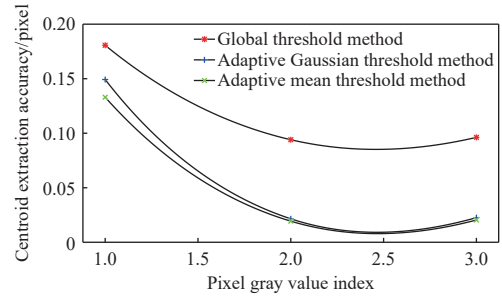


图 2 光斑质心提取误差图

Fig. 2 Error diagram of spot centroid extraction

2.2 波前重构方法及精度

带有畸变的入射波前经微透镜阵列分割后,在焦面上形成一个不规则光斑阵列,计算每个光斑质心位置 (x_c, y_c) 与其理想位置 (x_0, y_0) 的偏移量,其与微透镜焦距 f' 的比值为子孔径范围内的波前平均斜率^[15],如式(3)所示:

$$\begin{cases} G_x = \frac{\Delta x}{f'} = \frac{x_c - x_0}{f'} \\ G_y = \frac{\Delta y}{f'} = \frac{y_c - y_0}{f'} \end{cases} \quad (3)$$

式中: G_x 为 x 方向斜率; G_y 为 y 方向斜率; (x_c, y_c) 为计算得到的光斑质心位置; (x_0, y_0) 为光斑质心理想位置; f' 为微透镜阵列焦距。

Zernike 正交多项式的每一项都有明确的物理意义,并与初级像差具有一一对应关系,对进一步分析透镜的其他像差具有很好的指导作用^[16],因此利用 Zernike 正交多项式对波前进行重构。首先计算哈特曼传感器 CCD 像面多个子孔径质心的偏移量,得到其波前斜率的变化信息,使用 Zernike 正交多项式进行波面拟合^[17],如式(4)所示:

$$W = \sum_{k=1}^K a_k Z_k(x, y) \quad (4)$$

式中: K 为 Zernike 多项式阶数; a_k 表示 Zernike 系数; $Z_k(x, y)$ 表示第 k 项 Zernike 多项式。用式(4)分别对 x, y 求偏导数,得到两个方向上的波前斜率:

$$\begin{cases} G_x = \sum_{k=1}^K a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \\ G_y = \sum_{k=1}^K a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (5)$$

哈特曼波前传感器采用的子孔径数目为 M , 得到 $2 \times M$ 个测量值。在所有的测量值中, 有一半是

x 方向上的斜率, 另一半是 y 方向上的斜率, 波前斜率的矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Z_{11}(x,y)}{\partial x} & \frac{\partial Z_{12}(x,y)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_{1K}(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_{21}(x,y)}{\partial x} & \frac{\partial Z_{22}(x,y)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_{2K}(x,y)}{\partial x} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_{M1}(x,y)}{\partial x} & \frac{\partial Z_{M2}(x,y)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_{MK}(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_{11}(x,y)}{\partial y} & \frac{\partial Z_{12}(x,y)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_{1K}(x,y)}{\partial y} \\ \frac{\partial Z_{21}(x,y)}{\partial y} & \frac{\partial Z_{22}(x,y)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_{2K}(x,y)}{\partial y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_{M1}(x,y)}{\partial y} & \frac{\partial Z_{M2}(x,y)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_{MK}(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{x1} \\ G_{x2} \\ \vdots \\ G_{xM} \\ G_{y1} \\ G_{y2} \\ \vdots \\ G_{yM} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)可以简写为

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}' \mathbf{a} \quad (7)$$

式中: 矢量 $\mathbf{B}$ 为斜率矢量; $\mathbf{a}$ 是 Zernike 多项式系数, 可表示为拟合系数列向量。则系数矩阵 $\mathbf{a}$ 可由 $\mathbf{Z}'$ 的伪逆矩阵得到:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{Z}'^T \mathbf{Z}')^{-1} \mathbf{Z}'^T \mathbf{B} \quad (8)$$

将求得的系数代入式(4), 即可得到还原波前。当采用的 Zernike 阶数偏低时, 高阶像差被解释成低阶像差, 重构精度较低。当采用的 Zernike 阶数偏高时, 低阶像差被解释为高阶像差, 重构精度也随之下降。设定一组随机 Zernike 系数, 利用 MATLAB 仿真生成一个已知波面, 分别利用 12 阶、15 阶、18 阶、21 阶、28 阶和 36 阶 Zernike 多项式进行重构, 其重构误差与 Zernike 多项式阶次的关系如表 1 所示。

表 1 Zernike 多项式不同阶次的重构误差

Table 1 Reconstruction errors of different orders of Zernike polynomial

多项式阶次	12	15	18	21	28	36
RMS/ λ	0.062 0	0.051	0.050 3	0.048 0	0.049 2	0.047 0
PV/ λ	0.097 8	0.082	0.083 0	0.081 4	0.079 6	0.076 5

待测波面经微透镜阵列进行分割, 采样点数的多少也会对拟合精度造成影响。微透镜紧密排列, 构成面积为 $7 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的阵列。当微透镜子孔径减小时, 阵元个数增多, 故采样点数增多, 检

测精度提高, 但是哈特曼传感器的动态范围会降低; 当子孔径增大时, 采样点数减少, 检测精度降低, 动态范围增大。

子孔径的大小和数量存在制约关系, 且口径小、曲率低的透镜加工难度较大。因此综合考虑, 最终选择哈特曼微透镜阵列, 其中每个子孔径尺寸为 $160 \mu\text{m}$, 焦距为 1.3 mm 。通过菲涅耳数和艾里斑直径所占像素数来进一步判断哈特曼传感器的性能, 系统的菲涅耳数为 6.7, 哈特曼传感器具备较高的灵敏度并且焦斑间的串扰可以忽略, 艾里斑直径为 $13 \mu\text{m}$, 直径所占像素数为 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$, 达到质心计算的精度要求。采用 36 阶 Zernike 多项式进行拟合, 依次增加采样点数, 哈特曼传感器检测到的波前直径覆盖 15、20、25、27 以及 31 个子透镜, 采样点数对波前拟合精度的影响如表 2 所示。当多项式阶数确定时, 采样点数的增多会在一定程度上提高拟合精度。但采样点数的多少并不是提高拟合精度的决定因素, 当采样点数增加到一定数量后, 拟合精度会趋于稳定。最终采用 36 阶 Zernike 多项式、采样点数为 585 个来进行拟合, 拟合后的均方根误差 $\text{RMS} = 0.047 \lambda$, 即 $\sigma_2 = 0.047 \lambda$ 。

表 2 采样点数对拟合误差的影响

Table 2 Influence of sampling numbers on fitting errors

采样点数	170	276	431	585	679
RMS/ λ	0.081	0.062 0	0.051 3	0.047 0	0.046 8
PV/ λ	0.102	0.096 8	0.083 3	0.076 5	0.076 6

2.3 衍射效应对波前检测的影响

由式(1)和式(2)可知,光斑质心的提取精度与光斑的光强分布有关,被测微透镜在测量光路中会发生明显的衍射现象。光线经微透镜发生衍射之后,焦平面上的光斑强度呈高斯分布,且存在次级衍射峰,使光斑质心位置发生偏移导致波前重构误差。因此哈特曼传感器检测到的相位信息包含微透镜衍射效应带来的相位改变,质心偏移量如图3所示。以被测口径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的微透镜为例,采用 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 的理想平行光入射,其在焦平面上的质心位置如图3(a)所示,红色为理想无衍射光斑质心,蓝色为有衍射光斑质心。为了分析衍射效应对光斑质心偏移量的影响,分别对口径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的微透镜进行分析,结果如图3(b)所示,透镜口径越小,其衍射效应越明显,相应的质心偏移量就越大。

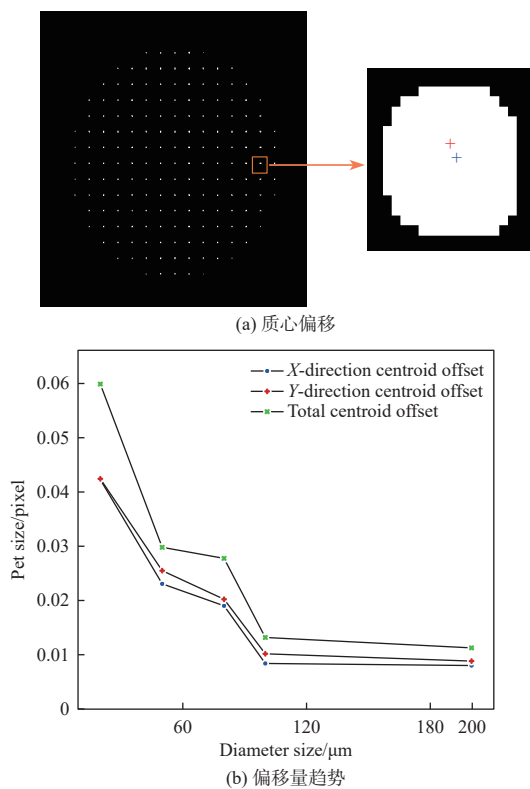


图3 质心偏移量图

Fig. 3 Centroid offset diagrams

以口径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 透镜为例,使用36阶Zernike多项式对其理论计算的波前进行还原,如图4所示。图4(a)为不考虑衍射时的波前还原图,波前PV为 $2.526\text{ }39\lambda$,RMS为 0.706λ ;图4(b)为考虑衍射时的波前还原图,波前PV为 $2.564\text{ }79\lambda$,RMS为 $0.713\text{ }97\lambda$,衍射所带来的波前误差 $\sigma_3=0.007\text{ }9\lambda$ 。

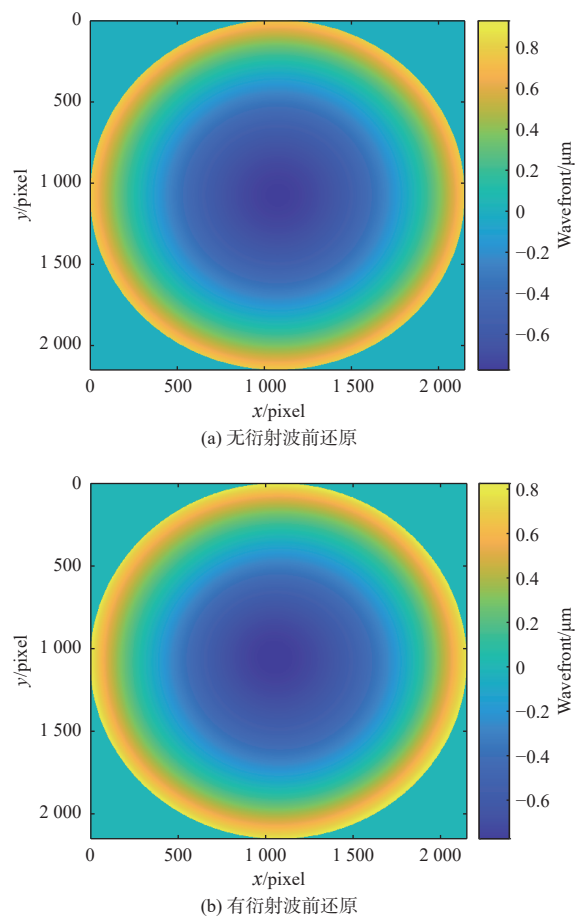


图4 波前还原图

Fig. 4 Wavefront restoration diagrams

总误差由合成公式表示:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 0.048\lambda < \frac{\lambda}{20} \quad (9)$$

式中 σ 为总体误差。按照以上误差分配方案,总体检测误差为 0.048λ ,略低于预期 $1/20\lambda$ 的检测精度要求,满足高精度检测条件。

3 实验验证

3.1 实验测试

按照图1所述的波前像差检测方案,搭建了如图5所示的检测光路。开始检测前,需将准直镜组2的两片透镜焦点重合放置,调整各元件位置使所有元件的光轴重合,对除待测透镜以外的光学元件的波前像差进行测试。测试时,通过放置聚焦透镜和待测透镜,移除标准平面反射镜7或对其进行遮挡,对所有光学元件的波前像差进行测试,二者相减可得到待测透镜波前像差的相对测量结果。由于待测透镜5口径较小,直接测量时入射到哈特曼传感器8的采样点数较少,影响测量精度,因此通过准直镜4扩束增加采样点

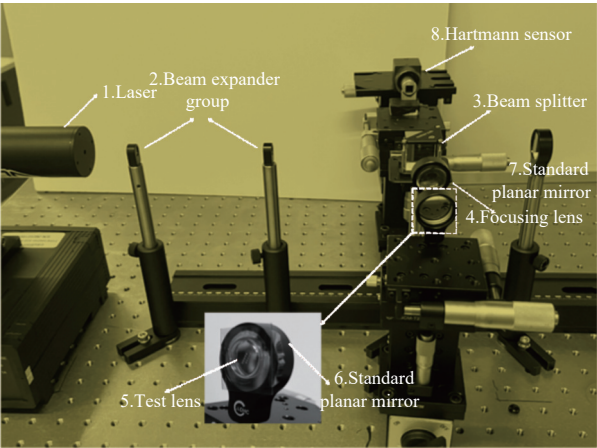


图 5 测试实验现场

Fig. 5 Test experiment site

数来提高测量精度。通过观察哈特曼传感器 8 上的光斑大小, 确定聚焦透镜 4 和待测透镜 5 焦点位置是否重合。由于微米级透镜轻微倾斜会导致光斑形状发生很大变化, 可以通过 Zemax 等仿真软件对其各个方向倾斜以及离焦情况进行仿真, 从而进行针对性调整。另外, 标准平面反射镜 6 应

该尽量靠近待测透镜 5, 二者间距保证在 3 mm 左右, 效果最佳。

3.2 数据分析

实验光斑图如图 6 所示, 其中参考光路采集到的光斑图像如图 6(a)所示, 测量光路采集到的光斑图像如图 6(b)所示。将哈特曼传感器获得的波前斜率信息利用 Zernike 多项式进行拟合, 待测透镜的 Zernike 多项式前 36 项系数如表 3 所示。根据波前系数拟合出的波前像差如图 7 所示, 其波前误差值 RMS 为 69 nm, PV 为 266.8 nm。

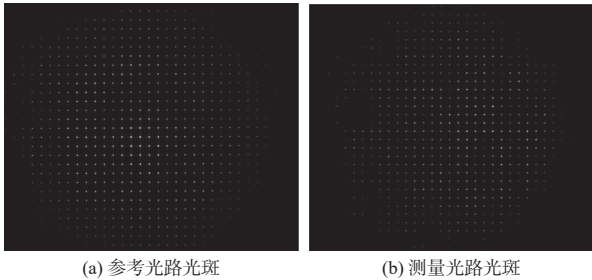


图 6 实验光斑图

Fig. 6 Experimental spot diagrams

表 3 待测透镜 Zernike 系数

Table 3 Zernike coefficients of lens under test

Zernike系数	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
计算结果	-0.006	-0.108 9	-0.070 6	0.010 9	0.062 2	0.008 2	0.015 4	0.013 4	-0.001
Zernike系数	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18
计算结果	-0.009 4	-0.002 1	-0.002 2	-0.010 6	0.005	-0.002 5	-0.001 8	0.001 8	0.002
Zernike系数	Z19	Z20	Z21	Z22	Z23	Z24	Z25	Z26	Z27
计算结果	0.000 2	-0.002 8	-0.000 2	0.000 6	0.007	0.009	0.001 5	-0.001	0.001 3
Zernike系数	Z28	Z29	Z30	Z31	Z32	Z33	Z34	Z35	Z36
计算结果	0.000 4	-0.001	0.001 6	-0.000 2	0.000 3	0.000 5	0.000 7	0.000 2	-0.001 7

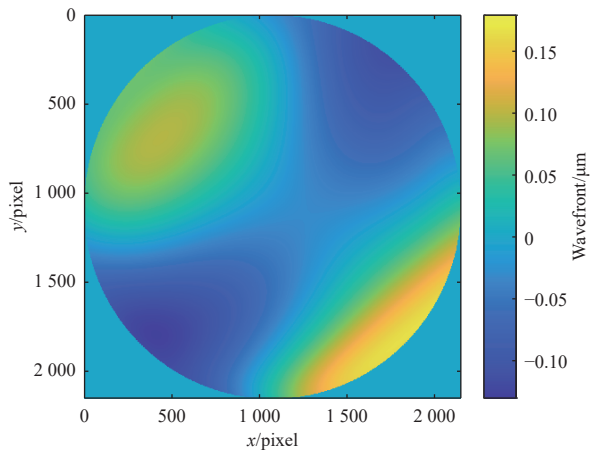


图 7 波前像差图

Fig. 7 Wavefront aberration diagram

Zernike 多项式每一项的系数表示透镜的不同像差, 如表 4 所示。图 8 则表示拟合后透镜的初级像差, 证明了通过哈特曼传感器检测微透镜光学性能的有效性。

表 4 待测微透镜各种像差一览

Table 4 List of aberrations of microlenses to be tested

像差	离焦	0°像散	45°像散	X方向彗差和倾斜
大小/ μm	0.010 9	0.062 2	0.008 2	0.015 4
像差	Y方向彗差和倾斜	球差和离焦	0°三叶像散	
大小/ μm	0.013 4	-0.001	-0.009 4	

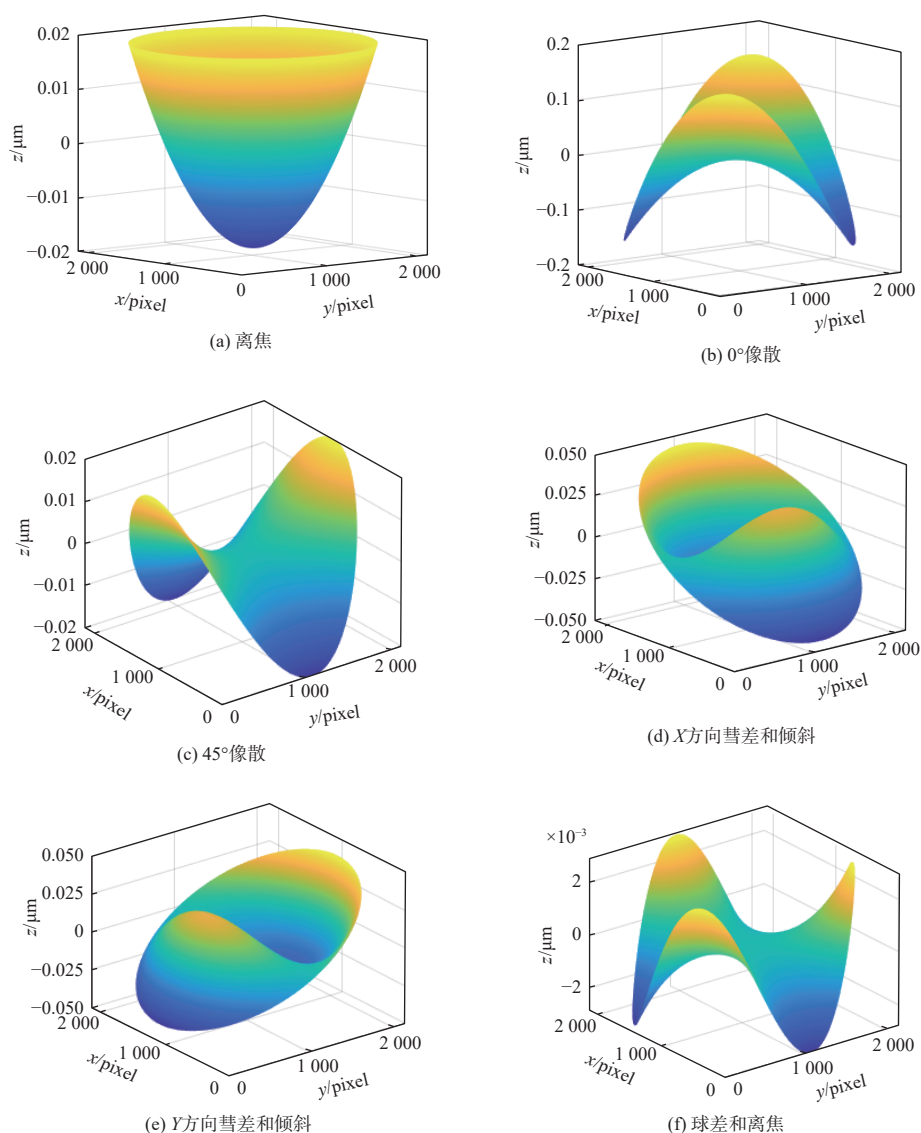


图8 透镜的初级像差图

Fig. 8 Primary aberration diagrams of lens

4 结论

本文研究了利用哈特曼传感器测量微透镜光学性能的有效性,分析了该方法的主要误差来源及减小措施。通过对口径为 $200\ \mu\text{m}$ 的凸透镜进行检测,波前误差值 RMS 为 $69\ \text{nm}$, PV 值为 $266.8\ \text{nm}$,略低于干涉仪检测结果(RMS 为 $43\ \text{nm}$, PV 值为 $157\ \text{nm}$)。测试表明:通过选取合适的透镜聚焦及提高其采样点数,利用自适应均值阈值化的方法对图像进行预处理,采用加权灰度平均质心提取算法进行计算,利用哈特曼传感器可实现对微透镜光学性能的有效测量。后续可以通过提高采样点数以及质心提取、波前重构精度,进一步提高检测精度。相信改善实验条件并实现量产后,可达到和干涉仪相当的检测精度,即可实现对微光学

元件的高精度检测。

随着微透镜及其阵列的广泛应用,该方法可以有效检测其光学性能,并为微透镜的生产提供质量保障,具有广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] 林家春, 滕辰, 李晗晓, 等. 基于粗糙度轮廓仪的圆柱齿轮齿廓形状偏差测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 15-22.
LIN Jiachun, TENG Chen, LI Hanxiao, et al. Measurement of profile shape deviation of cylindrical gear based on roughness profiler[J]. Journal of Instrumentation and Meter, 2020, 41(12): 15-22.
- [2] 周亮, 王振环, 孙东辰, 等. 现代精密测量技术现状及发

- 展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1869-1878.
- ZHOU Liang, WANG Zhenhuan, SUN Dongchen, et al. The current situation and development of modern precision measurement technology[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 38(8): 1869-1878.
- [3] 朱日宏, 孙越, 沈华南, 等. 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 Rihong, SUN Yue, SHEN Huanan, et al. Progress and prospect of optical freeform surface detection methods[J]. *Journal of Optics*, 2021, 41(1): 161-178.
- [4] LU E H, ZHANG R T, LIU J, et al. Observation of ground surface roughness values obtained by stylus profilometer and white light interferometer for common metal materials[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2022, 54(6): 587-599.
- [5] GHODRATI S, KANDI S G, MOHSENI M. Nondestructive, fast, and cost-effective image processing method for roughness measurement of randomly rough metallic surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(6): 998-1013.
- [6] MA X, WANG J, WANG B, et al. Research on optical metrology for complex optical surfaces with focal plane wavefront sensing[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1142.
- [7] 付翔宇, 王道档, 吴振东, 等. 用于在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2): 78-84.
- FU Xiangyu, WANG Daodang, WU Zhendong, et al. Compact transient interferometry system for on-line measurement[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 41(2): 78-84.
- [8] ZHAO M, ZHAO W, YANG K, et al. Shack-Hartmann wavefront sensing based on four-quadrant binary phase modulation[J]. *Photonics*, 2022, 9(8): 575.
- [9] 田爱玲, 张宏, 李慧玲, 等. 重构 Zernike 多项式在微透镜测量中的应用[J]. *西安工业大学学报*, 2011, 31(2): 120-124.
- TIAN Ailing, ZHANG Hong, LI Huiling, et al. Application of reconstructed Zernike polynomial in microlens measurement[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2011, 31(2): 120-124.
- [10] 王晶, 王孝坤, 胡海翔, 等. 夏克哈特曼扫描拼接检测平面镜 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(10): 67-73.
- WANG Jing, WANG Xiaokun, HU Haixiang, et al. Shack-Hartmann scanning splicing detection of flat mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 67-73.
- [11] 戴勋义. 基于扫描哈特曼的大型望远镜像质检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2020.
- DAI Xunyi. Research on large telescope image quality detection technology based on scanning Hartman[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [12] YU L, LI D, RUAN Y, et al. Wavefront aberration measurement deflectometry for imaging lens tests[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(15): 7857.
- [13] YANG X, XIE J, LIU R, et al. Centroid extraction of laser spots captured by infrared detectors combining laser footprint images and detector observation data[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2129.
- [14] GU D, LIU X. Shack-Hartmann wavefront sensor based on Kalman filter[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(9): 093106.
- [15] ZHAO M, ZHAO W, WANG S, et al. Centroid-predicted deep neural network in Shack-Hartmann sensors[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 1-10.
- [16] CHENG X, YAN L, LIU L, et al. Fabrication-error analysis of injection-molded aspheric elements using typical aberration terms in transmitted wavefront with Shack-Hartmann wavefront-sensing measurement[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(12): 123102.
- [17] 魏平, 李新阳, 罗曦, 等. 夏克-哈特曼波前传感器数字仿真平台的设计和验证[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 141-150.
- WEI Ping, LI Xinyang, LUO Xi, et al. Design and verification of Shake-Hartman wavefront sensor digital simulation platform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 141-150.