

# 环境温度变化对夏克-哈特曼波前传感器 测量精度影响分析

孟庆宾<sup>1,2,3</sup> 齐月静<sup>1,2</sup> 卢增雄<sup>1,2\*</sup> 苏佳妮<sup>1,2</sup> 高斐<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094

<sup>2</sup>北京市准分子激光工程技术研究中心, 北京 100094

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 环境温度变化是影响夏克-哈特曼波前传感器(SHWS)测量精度的重要因素之一。采用 Zemax 软件热分析功能,分析了环境温度变化引起的微透镜阵列(MLA)变形及折射率变化、MLA 和电荷耦合器件(CCD)间距变化以及球面波点源与 SHWS 间距变化对 SHWS 测量精度的影响。分析计算得出,环境温度变化引起的 MLA 和 CCD 间距变化是影响 SHWS 测量精度的主要因素,环境温度在 21~24 °C 内每增加 1 °C,给测量结果带来的误差[均方根(RMS)]约为 0.52 nm。通过单模光纤衍射产生近于理想的球面波对 SHWS 测量精度进行实验验证,实验结果和仿真分析结果基本一致。

**关键词** 测量; 夏克-哈特曼波前传感器; 环境温度; 测量精度

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0810001

## Analysis of Effect of Ambient Temperature Variation on Measurement Accuracy of Shack-Hartmann Wavefront Sensor

Meng Qingbin<sup>1,2,3</sup> Qi Yuejing<sup>1,2</sup> Lu Zengxiong<sup>1,2</sup> Su Jiani<sup>1,2</sup> Gao Fei<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Ambient temperature variation is one of the key factors that affect the measurement accuracy of Shack-Hartmann wavefront sensor (SHWS). The influence of the distortion of micro-lens array (MLA) and the refractive index variation, the distance changes between MLA and charge coupled device (CCD), and the distance change between spherical point source and SHWS on measurement accuracy of SHWS are analyzed by using the thermal analysis function of Zemax software, which is caused by ambient temperature variation. The analysis and calculation show that the main factor affecting the measurement accuracy of SHWS is the distance change between MLA and CCD caused by ambient temperature variation. The measurement error is 0.52 nm root mean square (RMS) when the ambient temperature rises every 1 °C from 21 °C to 24 °C. The experiments of testing the measurement accuracy of SHWS are carried out by using a nearly perfect spherical wave generated by single mode optical fiber diffraction. The results obtained from simulation and experiment are basically identical.

**Key words** measurement; Shack-Hartmann wavefront sensor; ambient temperature; measurement accuracy

**OCIS codes** 120.5050; 120.6810; 220.4840

收稿日期: 2016-03-18; 收到修改稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02206)

作者简介: 孟庆宾(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: mengqingbin@aoe.ac.cn

导师简介: 齐月静(1977—),女,博士,研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: qiyejing@aoe.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: luzengxiong@aoe.ac.cn

# 1 引 言

夏克-哈特曼波前传感器(SHWS)具有结构简单、测量速度快、对环境振动不敏感、对测量光束的相干性和偏振态无特殊要求等优点<sup>[1]</sup>,在自适应光学<sup>[2]</sup>、人眼像差检测<sup>[3-5]</sup>、光学元件面形检测<sup>[6]</sup>、光学系统波像差检测<sup>[7]</sup>等方面有着广泛的应用。随着光学加工水平的不断提高,现今的光学系统已具备衍射极限甚至超衍射极限的成像性能,要求测量这些光学系统波像差的 SHWS 具有极高的测量精度,例如,对于 90 nm 工艺节点的深紫外光刻投影曝光物镜系统,其波像差均方根(RMS)约为 10.0 nm<sup>[8]</sup>,要求 SHWS 的测量精度小于 2.0 nm RMS。

影响 SHWS 测量精度的因素包括质心提取<sup>[9-10]</sup>、波前重建<sup>[11]</sup>、微透镜阵列(MLA)参数<sup>[12]</sup>、电荷耦合器件(CCD)参数<sup>[13]</sup>、MLA 和 CCD 的对准<sup>[14-15]</sup>、测量中环境温度的变化<sup>[16]</sup>等。前几个影响因素已有较多的研究,而环境温度变化对 SHWS 测量精度影响的研究较少。Alexander 等<sup>[16]</sup>从理论上推导了环境温度变化对球面波前曲率半径测量的影响,并和实验结果进行了对比,实验测得球面波前曲率半径随温度的变化是理论分析所得结果的 6 倍。而环境温度变化对 SHWS 波前测量精度影响的分析未见报道。在基于 SHWS 法的光学系统波像差测量中,环境温度的变化不仅会影响待测光学系统自身的像差大小,还会影响 SHWS 的测量精度。因此,分析环境温度变化对 SHWS 测量精度的影响以获得环境温度的控制要求,对保证 SHWS 的测量精度至关重要。

本文首先采用 Zemax 的热分析功能建立 SHWS 精度测量模型,获得不同温度下的光斑阵列,通过 Matlab 提取各光斑阵列的质心并重建出待测波前,通过比较不同温度下的波前变化分析环境温度变化对 SHWS 测量精度的影响。然后搭建实验装置,测量不同温度下 SHWS 的测量精度,对仿真分析结果进行验证。研究结果对高精度波像差 SHWS 测量具有重要意义。

## 2 分析计算模型

### 2.1 SHWS 精度测量原理

SHWS 精度测量原理装置如图 1 所示。作为球面波点源的单模光纤(SMF)产生近于理想的球面波  $W'$  照射在距其为  $L$  的 SHWS 上, $W'$  经 MLA 聚焦后在 CCD 上形成光斑阵列,通过质心提取和波前重建计算得到待测波前。SHWS 放置在五维(5D)调整台上,整个装置安放在光学平台上。SMF 出射波前  $W'$  的数值孔径(NA)为 0.1,偏差在  $10^{-5} \lambda$  RMS 量级<sup>[17]</sup>。当  $L$  足够大时(通常大于 1 m), $W'$  中只有很小部分波前  $W$  进入 SHWS 中(例如,当  $L = 1.0$  m, MLA 尺寸大小为 8.0 mm 时,波前  $W$  的 NA 仅为 0.004),故进入 SHWS 中的波前  $W$  基本上是理想的平面波,因此上述测量结果即为 SHWS 的误差。

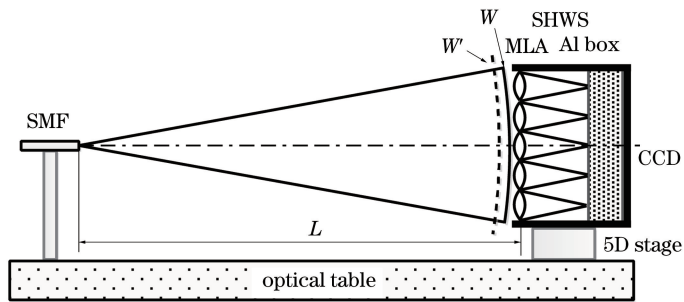


图 1 SHWS 精度测量原理装置

Fig. 1 Prototype for measuring the accuracy of SHWS

当测量环境的温度变化时,MLA 将产生变形及折射率变化,连接 SHWS 中 MLA 和 CCD 之间的铝框由于热胀冷缩将改变 MLA 和 CCD 之间的间距,SMF 支架、五轴调整台及光学平台的热胀冷缩将使球面波点源到 SHWS 的距离发生变化,这些变化将最终影响 SHWS 的测量精度。另外,环境温度变化,将引起空气折射率变化及 CCD 噪声,但可通过多次测量取平均的方式减小这两个因素的影响。

### 2.2 波前复原

采集到 SHWS 的光斑阵列后,需要进行波前复原,波前复原包括光斑阵列的质心提取和由波前的斜率

重建待测波前两个步骤。

通过迭代权重法<sup>[18]</sup>提取各个光斑的质心位置 $(x_c, y_c)$ ,从而得到波前斜率 $(S_x, S_y)$ :

$$\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \frac{1}{f} \begin{bmatrix} x_c - x_r \\ y_c - y_r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $f$  为 MLA 的焦距,  $(x_r, y_r)$  为参考光斑的质心位置。

采用模式法进行波前重建。将待测波前  $W(x, y)$  用 Zernike 多项式展开:

$$W(x, y) = \sum a_i Z_i(x, y), \quad (2)$$

式中,  $Z_i(x, y)$  代表第  $i$  阶 Zernike 多项式,  $a_i$  是第  $i$  阶 Zernike 多项式系数。对(2)式两边求导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = S_x = \sum a_i \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = S_y = \sum a_i \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (3)$$

把(3)式写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} S_x(x_1, y_1) \\ S_y(x_1, y_1) \\ S_x(x_2, y_2) \\ S_y(x_2, y_2) \\ \dots \\ S_x(x_m, y_m) \\ S_y(x_m, y_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{x1}(x_1, y_1) & B_{x2}(x_1, y_1) & \dots & B_{xn}(x_1, y_1) \\ B_{y1}(x_1, y_1) & B_{y2}(x_1, y_1) & \dots & B_{yn}(x_1, y_1) \\ B_{x1}(x_2, y_2) & B_{x2}(x_2, y_2) & \dots & B_{xn}(x_2, y_2) \\ B_{y1}(x_2, y_2) & B_{y2}(x_2, y_2) & \dots & B_{yn}(x_2, y_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{x1}(x_m, y_m) & B_{x2}(x_m, y_m) & \dots & B_{xn}(x_m, y_m) \\ B_{y1}(x_m, y_m) & B_{y2}(x_m, y_m) & \dots & B_{yn}(x_m, y_m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

即

$$\mathbf{S} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}, \quad (5)$$

式中,  $n$  为 Zernike 多项式的项数,  $m$  为 MLA 中子孔径的个数,  $\mathbf{S}$  为斜率向量,  $\mathbf{B}$  为复原矩阵,  $\mathbf{A}$  为系数向量,  $B_{xi}(x_m, y_m)$  和  $B_{yi}(x_m, y_m)$  分别为第  $i$  项 Zernike 多项式在第  $m$  个子孔径处对  $x$  和  $y$  的偏导数值, 其表达式为:

$$\begin{cases} B_{xi}(x_i, y_i) = \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x} \\ B_{yi}(x_i, y_i) = \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (6)$$

由(5)式可得 Zernike 多项式系数

$$\mathbf{A} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{S}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{B}^{-1}$  代表复原矩阵的逆矩阵。

将  $\mathbf{A}$  代入(2)式后得待测波前  $W(x, y)$ 。波前  $W(x, y)$  为二维图像, 采用均方根值作为波前偏差的评判指标, 波前 RMS 值计算公式为:

$$W_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle W^2(x, y) \rangle - \langle W(x, y) \rangle^2}, \quad (8)$$

式中,  $\langle W^2(x, y) \rangle$  为待测波前平方的平均值,  $\langle W(x, y) \rangle^2$  为待测波前平均值的平方。

## 3 结果与讨论

### 3.1 Zemax 仿真结果

在 Zemax 中建立图 1 所示的光路模型, 仿真中点光源到 MLA 距离为 1000 mm, MLA 子透镜个数为  $128 \times 128$ , 大小为  $114.1 \mu\text{m} \times 114.1 \mu\text{m}$ , CCD 像素为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ , 像元大小为  $7.1 \mu\text{m} \times 7.1 \mu\text{m}$ 。采用热分析功能分析不同温度下这些因素对 SHWS 测量精度的影响。

将环境温度为  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  时的测量结果作为参考, 分析  $21 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内测得波前相对于  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  时测得波前的

偏差。当环境温度为 21 °C 时, Zemax 探测面上得到的光斑阵列分布如图 2 所示。经质心提取和波前重建后得到的波前分布(去除平移、离焦和倾斜项)如图 3 所示。

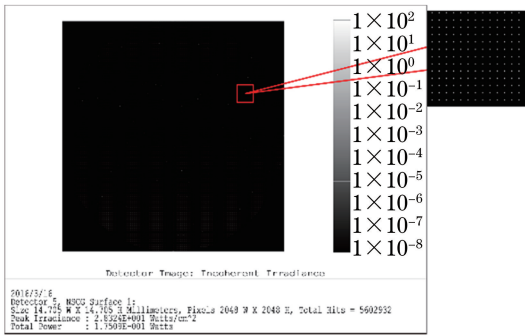


图 2 Zemax 探测面上的光斑阵列

Fig. 2 Spot array on the detector surface of Zemax

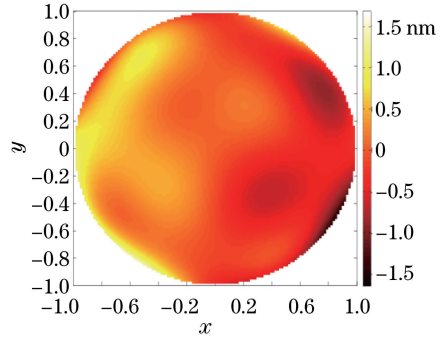


图 3 重建波前

Fig. 3 Reconstructed wavefront

### 3.2 MLA 变形及折射率变化的影响

温度变化引起的 MLA 变形及折射率变化, 将改变 MLA 中各子透镜的焦距大小。保持其他因素不变, 只分析温度变化引起 MLA 变形及折射率变化对 SHWS 测量精度的影响, 结果如图 4 所示。由图可知, 当环境温度从 21 °C 增加到 24 °C 时, MLA 变形及折射率变化给测量结果引入的误差大小约为 0.1 nm RMS。

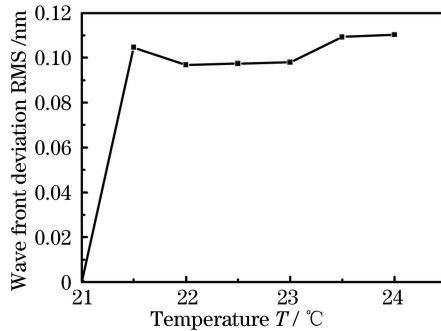


图 4 温度变化引起的 MLA 变形及折射率变化引起的波前偏差

Fig. 4 Wavefront deviation caused by MLA's shape distortion and refractive index change because of temperature variation

### 3.3 MLA 和 CCD 间距变化的影响

在 SHWS 中, MLA 与 CCD 之间采用铝质框架连接, 当环境温度发生变化时, 铝质框架的热胀冷缩将改变 MLA 与 CCD 之间的距离。当 MLA 与 CCD 之间的距离变大时, 测量光斑与参考光斑的距离将变大, 由 (1) 式可知, 这将使待测波前的斜率( $S_x, S_y$ )变大而引入测量误差; 当 MLA 与 CCD 之间的距离变小时, 情况类似。另外, 当 MLA 与 CCD 间距变化时, 从 CCD 上测得的是 MLA 的离焦光斑, 其尺寸大小比 MLA 焦面上的光斑大, 这些光斑将影响相邻光斑的分布, 从而影响光斑质心的提取精度。

保持其他因素不变, 只分析温度变化引起 MLA 与 CCD 间距变化对 SHWS 测量精度的影响, 结果如图 5 所示。由图可知, 当环境温度从 21 °C 增加到 24 °C 时, MLA 与 CCD 间距变化对 SHWS 测量精度的影响基本上呈线性关系, 环境温度达到 24 °C 时, 误差在 1.37 nm RMS。

### 3.4 球面波点源与传感器间距变化的影响

当环境温度发生变化时, 球面波点源与 SHWS 之间的距离将发生变化, 从而改变进入 SHWS 中光束的曲率半径, 使得探测面上光斑质心位置发生偏移, 产生测量误差。

保持其他因素不变, 只分析温度变化引起球面波点源与 SHWS 之间距离变化对 SHWS 测量精度的影响, 结果如图 6 所示。由图可知, 当环境温度从 21 °C 增加到 24 °C 时, 温度变化导致光纤端面与 SHWS 之间距离变化引入的误差约为 0.1~0.2 nm RMS。

为便于比较以上各个因素对 SHWS 测量精度的影响, 将图 4、图 5 和图 6 的结果画在一起, 如图 7 所示。由图可知, MLA 和 CCD 间距变化(曲线 D)是影响 SHWS 测量精度的主要因素, 而 MLA 变形及折射率变化(曲

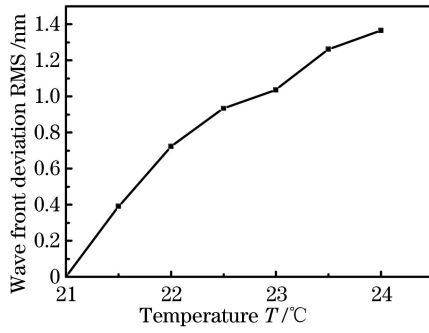


图 5 MLA 与 CCD 间距变化引起的波前偏差

Fig. 5 Wavefront deviation caused by the distance change between MLA and CCD

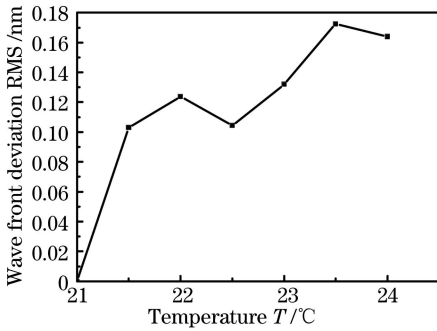


图 6 球面波点源与 SHWS 间距变化对波前偏差的影响

Fig. 6 Effect of distance variation between spherical point source and SHWS on the wavefront deviation

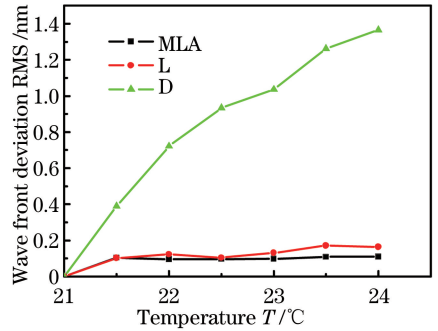


图 7 各个因素对 SHWS 测量精度的影响比较

Fig. 7 Comparison of the influence of each factor on the measurement accuracy of SHWS

线 MLA)、球面波点源与传感器间距变化(曲线 L)对 SHWS 测量精度的影响基本相同,约为 0.1 nm RMS。

### 3.5 环境温度变化对 SHWS 测量精度的影响

将上述温度变化产生的三个影响因素同时加入仿真模型中,得到 SHWS 测量精度随温度变化关系如图 8 所示。该结果与图 5 类似,基本上呈线性关系。当环境温度从 21 °C 增加到 24 °C 时,温度变化引入的误差约为 1.70 nm RMS。

对图 8 的测量点做线性拟合,拟合直线的斜率为 0.52,即温度变化 1 °C 对 SHWS 测量精度引入的误差为 0.52 nm RMS。

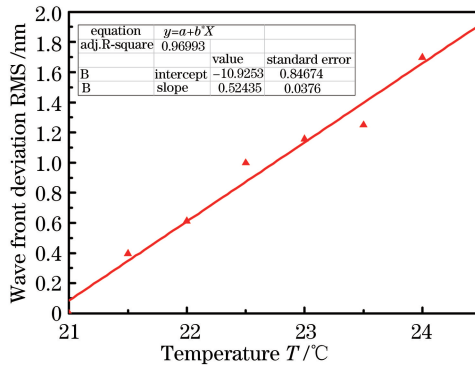


图 8 环境温度变化对 SHWS 测量精度的影响

Fig. 8 Effect of ambient temperature variation on the measurement accuracy of SHWS

## 4 实验结果与分析

图 9 为 SHWS 精度测量实验装置图。单模光纤出射的近乎理想的球面波照射到距离光纤端面约为 1 m

远的 SHWS 上,光波波长为 532 nm,采用 Imagine Optic 公司型号为 HASO3-128GE2 的 SHWS,其详细参数如表 1 所示。MLA 子透镜个数为  $128 \times 128$ , MLA 周期大小为  $114.1 \mu\text{m} \times 114.1 \mu\text{m}$ , MLA 的焦距为 4.0 mm, CCD 像素个数为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。SHWS 放置在五维调整台上,整个装置放置在光学平台上,采用杭州路格科技有限公司型号为 L95-2+ 的温湿度记录仪记录环境温度,测量不同温度下 SHWS 的测量结果。图 10 为环境温度为  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  时, CCD 上得到的光斑阵列,经质心提取和波前重建得到的波前如图 11 所示。

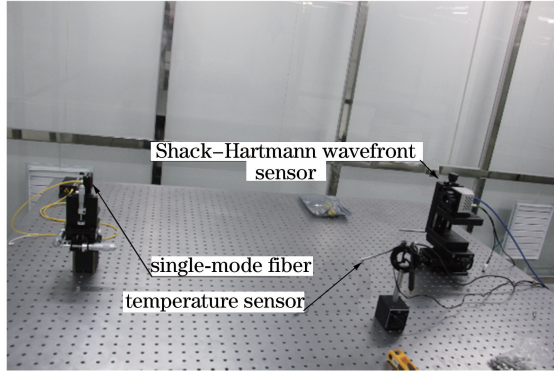


图 9 SHWS 精度测量实验装置图

Fig. 9 Experiment setup for measuring the accuracy of SHWS

表 1 SHWS 参数

Table 1 Specifications of the SHWS

Specification	Value
Number of microlenses	$128 \times 128$
Microlenses pitch	$114.1 \mu\text{m} \times 114.1 \mu\text{m}$
Focal length of the microlenses	4.0 mm
Number of pixels	$2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$

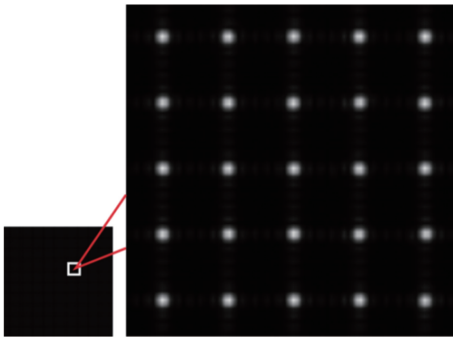


图 10 CCD 上的光斑阵列分布

Fig. 10 Distribution of the spots array on the CCD

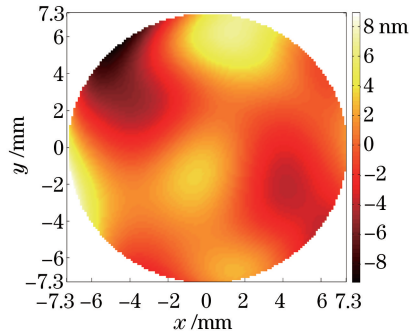


图 11 温度为  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  时测得的波前分布

Fig. 11 Wavefront distribution measured at  $21 \text{ }^\circ\text{C}$

以每小时低于  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  的速度缓慢增加室内温度,以保证整个设备各部分温度一致。取 1 min 内多个测量结果的平均值作为该温度下的波前测量值。测得  $21 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内的波前相对于温度为  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  时的波前偏差,结果如图 12 中实验数据曲线所示。由图可见,波前 RMS 偏差与温度的变化关系基本上是线性的。采用最小二乘法进行波前 RMS 偏差与温度值的线性拟合,拟合直线斜率为 0.74,即温度每变化  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,给 SHWS 测量精度引入的误差为 0.74 nm RMS。在 3.5 节中仿真分析所得拟合直线斜率为 0.52,将仿真数据和实验测量得到的波前偏差进行对比,结果如图 12 所示。当环境温度从  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  增加到  $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$  时,仿真分析和实验测量结果基本吻合,而环境温度增加到  $23, 23.5, 24 \text{ }^\circ\text{C}$  时,两者结果相差 0.5 nm RMS。误差主要来源于仿真中没有考虑温度变化对空气折射率变化以及 CCD 各像元变形的影响,当温度偏离  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  较小时,仿真分析和实验测量结果的偏差较小,而当温度偏离  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  较大时,仿真分析和实验测量结果就会出现较大的偏差。

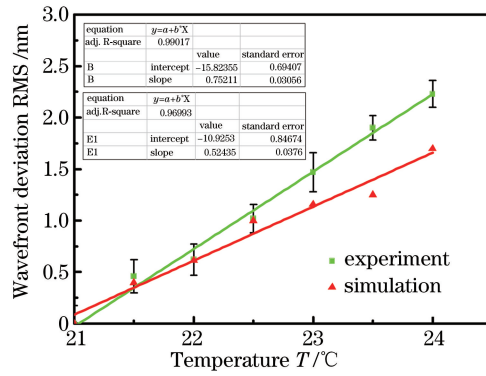


图 12 仿真分析与实验测量得到的波前偏差对比

Fig. 12 Comparison of the wavefront deviation obtained by simulation analysis and experimental measurement

## 5 结 论

采用 Zemax 热分析功能建立仿真分析模型,并用 Matlab 进行波前复原,分析了环境温度变化引起的 MLA 变形及折射率变化、MLA 和 CCD 间距变化以及球面波点源与 SHWS 间距变化,对 SHWS 测量精度的影响。当环境温度从 21 °C 增加到 24 °C 时,上述三者给测量结果引入的误差分别为 0.1 nm RMS、1.4 nm RMS、0.16 nm RMS。通过单模光纤衍射产生近于理想的球面波对不同温度下 SHWS 的测量精度进行测量,采用最小二乘法进行波前 RMS 偏差与温度值的线性拟合,结果表明,环境温度增加 1 °C,给测量结果引入的误差为 0.74 nm RMS,与理论仿真分析得到的 0.52 nm RMS 基本一致。研究结果对高精度波像差 SHWS 测量具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 Platt B C, Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. J Refract Surg, 2001, 17(5): S573-S577.
- 2 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, et al. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese academy of sciences[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900106.  
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900106.
- 3 Zheng Xianliang, Liu Ruixue, Xia Mingliang, et al. Temporal properties study of ocular wave aberrations with high frequency sampling[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0733001.  
郑贤良, 刘瑞雪, 夏明亮, 等. 高频采样下人眼波像差特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0733001.
- 4 Bao Hua, Rao Changhui, Zhang Yudong, et al. An automatic defocus compensation method for human eye Hartmann-Shack wave-front aberrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3082-3089.  
鲍华, 饶长辉, 张雨东, 等. 一种可用于人眼像差哈特曼-夏克测量仪的自动离焦补偿方法[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3082-3089.
- 5 Xie Hongsheng, Yang Lebao, Li Dayu, et al. Influence of chromatic aberration on Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3), 030801.  
解洪升, 杨乐宝, 李大禹, 等. 人眼色差对夏克-哈特曼波前探测器的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3), 030801.
- 6 Zhu X, Hu S, Zhao L. Wafer focusing measurement of optical lithography system based on Hartmann-Shack wavefront testing[J]. Opt Lasers Eng, 2015, 66: 128-131.
- 7 Augustin M, Müllerpfeiffer S, Falkenstörfer O. Experience using a double pass Shack-Hartmann set-up on a DUV high NA high performance lens[C]. SPIE, 2008, 7102: 71020P.
- 8 Lu Zengxiong, Qi Yuejing, Qi Wei, et al. Optimized analysis of random point array illumination source for nanometer accuracy wavefront error testing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0612007.  
卢增雄, 齐月静, 齐威, 等. 纳米精度波像差检测随机点源阵列照明优化分析[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0612007.
- 9 Thomas S, Fusco T, Tokovinin A, et al. Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor

- [J]. Mon Not R Astron Soc, 2006, 371(1): 323-336.
- 10 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al.* A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.  
李 晶, 巩 岩, 呼新荣, 等. 哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316002.
- 11 Wang J, Li Y. Comparison of wavefront reconstruction with modal method and zonal method for the inspection of catadioptric projection optics using Hartmann wavefront sensor[C]. SPIE, 2011, 8197: 81970A.
- 12 Clare R M, Lane R G. Comparison of wavefront sensing using subdivision at the aperture and focal planes[J]. Palmerston North, 2003: 187-192.
- 13 Neal D R, Copland J, Neal D. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy[C]. SPIE, 2002, 4779: 148-160.
- 14 Pfund J, Lindlein N, Schwider J. Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor[J]. Appl Opt, 1998, 37(1): 22-27.
- 15 Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Study on Hartmann wavefront analyzer calibration method[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0108003.  
王艳萍, 王茜茜, 马 冲. 哈特曼波前分析仪校准方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108003.
- 16 Alexander C, Uwe S, Fritz R, *et al.* Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts [J]. Appl Opt, 2005, 44(30): 6419-6425.
- 17 Sommargren G E. Phase shifting diffraction interferometry for measuring extreme ultraviolet optics[J]. OSA Trends in Optics and Photonics, 1996, 4: 108-112.
- 18 Baker K L, Moallem M M. Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wave-front sensors[J]. Opt Express, 2007, 15(8): 5147-5159.