

# 光学学报

## 基于光斑图像法的运动平行度测量与优化

刘星<sup>1,2</sup>, 许孝忠<sup>1,2</sup>, 魏涛<sup>3</sup>, 魏劲松<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所微纳光电子功能材料实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>苏州科技大学材料科学与工程学院, 苏州市微纳光电材料与传感器重点实验室, 江苏 苏州 215009

**摘要** 运动平行度是运动台的核心参数之一,对运动台性能有直接影响。提出一种基于光斑图像的测量方法用于精确测量运动平行度。在理论推导和分析的基础上,搭建了一套精度优于 50 nm 的运动平行度测量系统。在此测量系统上对运动台进行运动平行度测量,运动平行度误差为 11.66  $\mu\text{m}$ 。在根据上述结果对运动台进行优化后,最佳运动平行度误差可以达到 6.22  $\mu\text{m}$ 。为了验证所提方法的可行性,使用位移传感器再次测量运动平行度。位移传感器测量结果与光斑图像法测量结果的均方根误差优于 248 nm,即两种测量结果基本一致。

**关键词** 测量; 表面测量; 运动平行度; 光斑图像法; 图像处理; 光学系统

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1912005

### Measurement and Optimization of Movement Parallelism Based on Spot Image Method

Liu Xing<sup>1,2</sup>, Xu Xiaozhong<sup>1,2</sup>, Wei Tao<sup>3</sup>, Wei Jingsong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Materials Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Key Laboratory for Nanophotonic and Nanoelectronic Materials and Its Devices, Suzhou 215009, Jiangsu, China

**Abstract** Movement parallelism is one of the key parameters of motorized stages, and it can directly affect the performance of the stages. A spot image method for accurately measuring the movement parallelism is proposed. In addition, based on theoretical research and analysis, a measurement system with a precision better than 50 nm is set up. Utilizing this measurement system, movement parallelism of the motorized stage is measured, and the movement parallelism error is 11.66  $\mu\text{m}$ . After optimizing the motorized stage according to the above results, the optimal movement parallelism error can reach 6.22  $\mu\text{m}$ . In order to verify the feasibility of the proposed method, a displacement sensor is applied to re-measure the movement parallelism. The root-mean-square error between the measurement results of the displacement sensor and that of spot image method is lower than 248 nm. In other words, the two measurement results are basically the same.

**Key words** measurement; surface measurement; movement parallelism; spot image method; image processing; optical system

## 1 引言

运动台被广泛应用在光刻、微纳结构表征和先进材料分析等领域中<sup>[1-8]</sup>。运动平行度是运动台性能的

核心参数之一<sup>[9]</sup>。当前运动台的运动平行度已接近物理极限,单纯提高机械系统的精度代价昂贵,因此通过高精度测量进行优化补偿是提升运动台运动平行度的关键。运动平行度常用的测量方法有三坐标测量

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-04-08; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51672292,61627826)

通信作者: \*weijingsong@siom.ac.cn

机<sup>[10-11]</sup>、激光三角法<sup>[12-13]</sup>、激光干涉仪法<sup>[14-18]</sup>和像散法等<sup>[19-25]</sup>。Huang等<sup>[26]</sup>研制了一种无阿贝误差的三坐标测量机用于量块平面度测量,该测量机的测量精度高,但在测量精密结构时,接触式测量容易划伤样品。Ouyang等<sup>[27]</sup>将激光三角法用于钢板平面面形测量,具有测量范围大、成本低的特点,但测量精度偏低。Andrushchak等<sup>[28]</sup>将激光干涉仪法用于光学平面平整度的测量,具有测量分辨率高、量程大的特点,但对激光光源稳频和使用环境的要求较为苛刻,抗干扰能力差、成本高。Liang等<sup>[29]</sup>将像散法用于运动台的运动平行度测量中,完成了小范围(10 mm×10 mm)运动平行度的测量,其测量精度为±100 nm,但像散法使用时要求被测面反射率完全相同且被测面不能倾斜,否则会引入较大的误差,进而影响其应用范围。

本文提出一种运用光斑图像来测量运动平行度的方法,进行了理论分析、仿真优化和光斑图像处理算法设计,并根据仿真优化后的参数进行了样机搭建。对离焦距离与光斑图像进行分类映射标定,提高了测量系统的分辨率。同时,进行了稳定性与精度验证实验,实验结果表明,测量系统在180 min运行时间内的稳定性误差优于43 nm,系统精度优于50 nm。最后,进行运动台的运动平行度测量和优化,优化前运动平行度误差为11.66 μm,根据测量结果使用高精度垫片垫平后运动平行度误差为6.22 μm,与优化前运动平行度误差相比减小了46.66%。为了验证光斑图像法测

量系统的可行性,使用位移传感器对运动台的运动平行度进行测量,位移传感器与光斑图像法测量结果的均方根误差优于248 nm,即两种测量结果基本一致。所提运用光斑图像法测量运动平行度的方法具有非接触、低成本、高精度,以及不受被测面的反射率和倾斜影响的优点。

## 2 理论基础与测量系统

### 2.1 理论基础

为了使得离焦距离与光斑图像成线性关系,采用偏置光斑的方式,如图1(a)所示,不同的离焦距离对应不同的光斑半径,可探测范围为离焦距离 $\Delta x_0$ ( $x_0$ 的增量),即远焦光斑与焦点光斑间的距离。为了更好地分析离焦距离与光斑半径的映射关系,对测量光路进行数学建模,如图1(b)所示。从样品表面反射的光束经过物镜和透镜后到达相机的传感器表面,物镜的焦距为 $f_0$ ,透镜的焦距为 $f_1$ , $x_0$ 与 $x'_0$ 为物镜的物距和像距。 $U_0$ 与 $U'_0$ 为物镜的物方孔径角与像方孔径角, $r_0$ 为光束进入物镜的半径值, $l$ 为物镜与透镜的距离, $U_1$ 与 $U'_1$ 为透镜的物方孔径角与像方孔径角, $r_1$ 为光束进入透镜的半径值, $x_1$ 与 $x'_1$ 为透镜的物距与像距, $m$ 为透镜到相机的距离, $r$ 为相机探测到的光斑半径值。在测试时,待测样品放置在测量系统的左侧且测量区间始终在离焦距离 $\Delta x_0$ 内,从待测样品表面反射的光束通过物镜与透镜进入相机,当待测样品沿粗箭头方向移动时,相机采集到的光斑半径在不断变大。

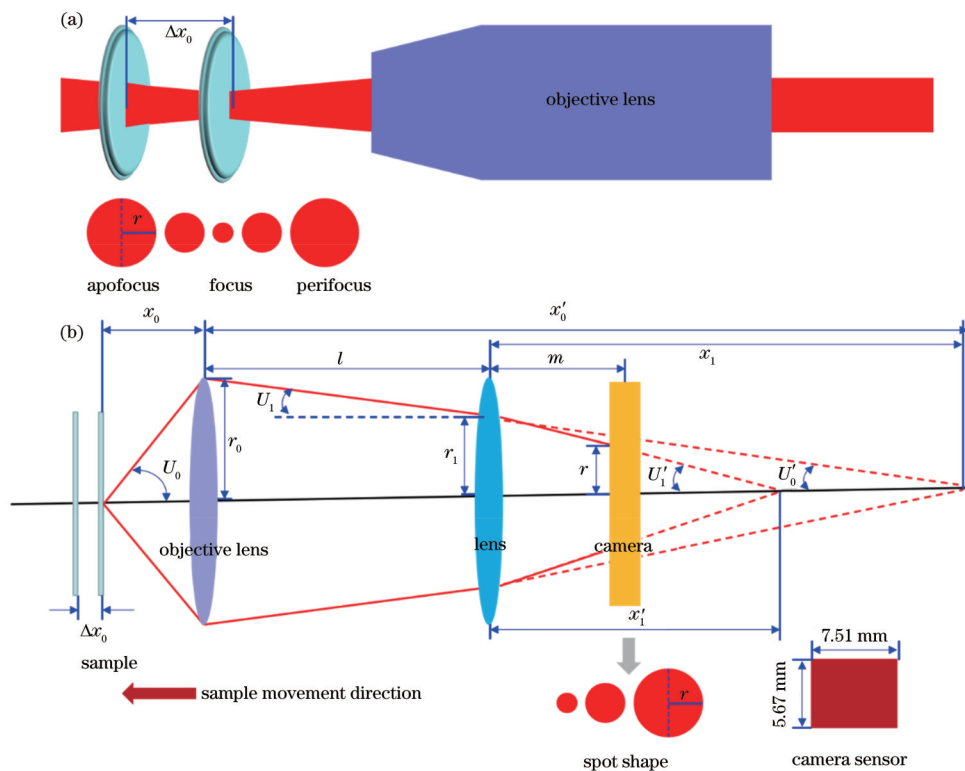


图1 理论模型。(a)偏置光斑示意图;(b)光路原理图

Fig. 1 Theoretical model. (a) Schematic diagram of biased light spot; (b) schematic diagram of optical path

由正切算法可得

$$\begin{cases} \tan U_0 = \frac{r_0}{x_0} \\ \tan U'_0 = \frac{r_0}{x'_0}, \\ \tan U'_1 = \frac{r_1}{x'_1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\tan U'_0 = \frac{r_0}{f_0} - \tan U_0, \quad (2)$$

$$\tan U'_1 = \frac{r_1}{f_1} + \tan U_1. \quad (3)$$

由图 1 中几何关系可得

$$\tan U_1 = \tan U'_0, \quad (4)$$

$$r_1 = r_0 - l \tan U'_0, \quad (5)$$

$$r = \left( \frac{r_1}{\tan U'_1} - m \right) \tan U'_1. \quad (6)$$

由式(6)可得光斑半径为

$$r = \left[ r_0 - l r_0 \left( \frac{1}{f_0} - \frac{1}{x_0} \right) \right] \left( 1 - \frac{m}{f_1} \right) - m r_0 \left( \frac{1}{f_0} - \frac{1}{x_0} \right). \quad (7)$$

运动台的运动平行度测量需要大范围与高精度的线性区间,此时需设置离焦距离满足  $15 \mu\text{m} \leq \Delta x_0 \leq$

$20 \mu\text{m}$ 。相机参数为:分辨率为  $4024 \text{ pixel} \times 3036 \text{ pixel}$ ,相机传感器尺寸为  $5.67 \text{ mm} \times 7.51 \text{ mm}$ ,如图 1(b)所示。考虑到相机传感器尺寸,光斑半径  $r$  最大不能超过相机传感器最小边的  $1/2(2.835 \text{ mm})$ ,同时考虑光斑半径过小不利于光斑图像的处理,因此设置光斑半径  $r$  最小为  $0.25 \text{ mm}$ 。根据上述条件和测量光路数学模型,考虑光路长度,给定测量光路的初始参数,即  $r_0 = 4.5 \text{ mm}$ ,  $l = 350 \text{ mm}$ ,  $f_0 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $x_0 = 2.483 \text{ mm}$ ,  $f_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $m = 150 \text{ mm}$ 。

为使系统参数满足离焦距离与光斑半径要求,对系统参数进行优化,将初始参数代入测量光路的数学模型中,分析  $f_1$ 、 $m$  对离焦距离和光斑半径的影响,如图 2(a)、(b)所示。在图 2(a)中可以看出:当  $f_1 = 125 \text{ mm}$  时,光斑半径先减小后增大且斜率小,因此探测区间小且分辨率低;当  $f_1 \geq 150 \text{ mm}$  时,在相同离焦距离内光斑半径随着  $f_1$  的增大而增大,同时光斑半径需满足在阴影区域内,因此可得  $f_1 = 175 \text{ mm}$  为最优参数。在图 2(b)中可以看出,光斑半径随着  $m$  的增大而减小,曲线斜率即系统分辨率随着  $m$  的增大而增大,同时光斑半径需满足在阴影区域内,因此可得  $m = 160 \text{ mm}$  为最优参数。经过参数优化后整个测量系统的线性区间宽度为  $18 \mu\text{m}$ ,最大光斑半径为  $2.730 \text{ mm}$ ,最小光斑半径为  $0.260 \text{ mm}$ 。

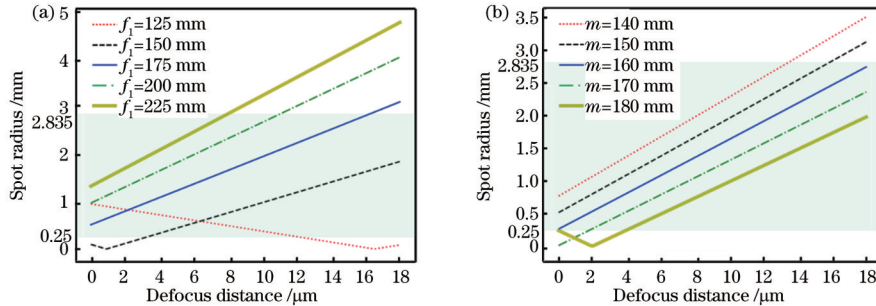


图 2 仿真曲线。(a)不同  $f_1$  时离焦距离与光斑半径的关系;(b)不同  $m$  时离焦距离与光斑半径的关系

Fig. 2 Simulation curve. (a) Relationship between defocus distance and spot radius for different  $f_1$ ; (b) relationship between defocus distance and spot radius for different  $m$

由于使用相机作为探测器,因此整个光斑图像的半径测量结果是以 pixel ( $1 \text{ pixel} = 1.867 \mu\text{m}$ ) 为单位。光斑图像处理流程如图 3 所示。首先,根据采集到的光斑图像,计算半径为  $r_c = 134 \text{ pixel} (0.25 \text{ mm})$  的区域灰度均值  $g_0$ 。当  $g_0 > 200$  时光斑图像为小光斑,反之为大光斑。小光斑的半径小且灰度均值大,边缘清晰,采用固定阈值进行边缘检测。大光斑半径大且灰度均值小,边缘模糊,采用自动阈值进行边缘检测。最后,进行光斑拟合求得光斑半径  $r$  与灰度均值  $g$ 。该方法计算精度高,计算量小。

## 2.2 测量系统

测量系统光路如图 4(a)所示,其中 PZT 为压电陶瓷。由激光器发出波长为  $658 \text{ nm}$  的激光,激光经扩束镜(BE)、1/2 波片(WP)、偏振分光棱镜(PBS)、1/4 波

片和反射镜 1(M1)反射后进入物镜(数值孔径为  $NA = 0.8$ )并到达样品表面。然后,激光经样品表面反射沿原光路返回到达偏振分光棱镜、反射镜 2(M2)和透镜(L),最终到达相机传感器表面。

运动平行度的测量过程分为 4 步:1)粗调调焦机构上下移动使得光斑半径为相机传感器短边长度的  $1/4$ ;2)控制运动台的运动范围为  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ,找到光斑最大位置,并使运动台静止不动,粗调电机上下移动使得光斑半径为相机短边可探测范围的  $3/5$ ;3)再次让运动台运动,运动范围设为  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ,如图 4(b)所示,在运动中相机实时采集图像,将采集到的光斑图像通过映射得出离焦距离,如图 4(c)、(d)所示;4)根据离焦距离绘制运动平行度三维测量图,如图 4(e)所示。

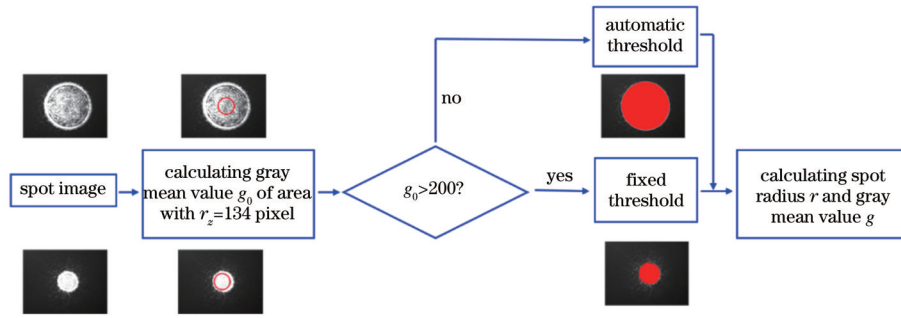


图 3 光斑图像处理流程

Fig. 3 Flow chart of spot image processing

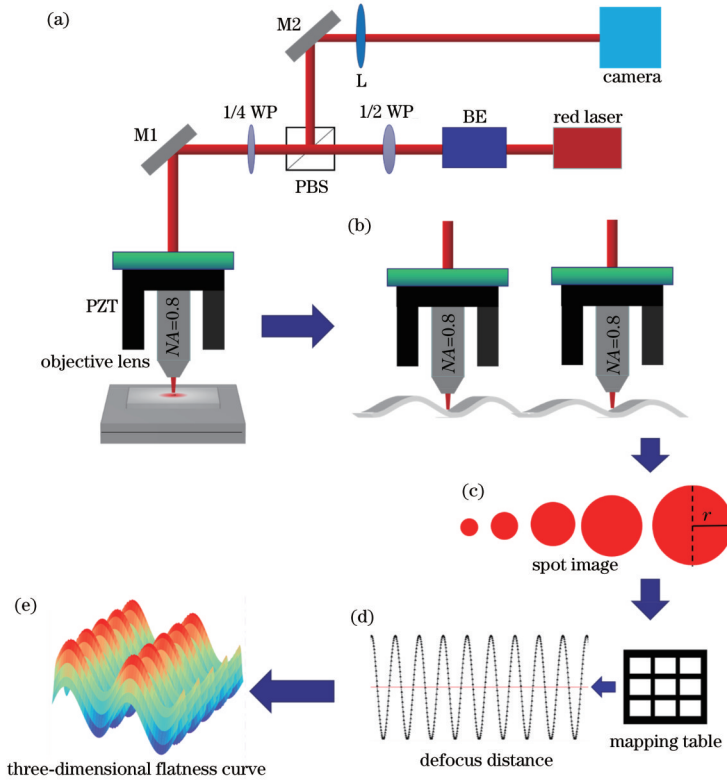


图 4 测量流程。(a)系统光路图;(b)运动台的扫描运动;(c)光斑图像采集;(d)将光斑图像映射到离焦距离;(e)运动平行度三维图  
Fig. 4 Measurement process. (a) Diagram of system optical path; (b) scanning motion of motorized stage; (c) acquisition of spot images; (d) mapping spot images to defocus distance; (e) three-dimensional picture of movement parallelism

### 3 实验与讨论

#### 3.1 离焦距离与光斑图像

为了更好地反映离焦距离与光斑图像之间的关系,建立离焦距离与光斑图像的实际映射关系,通过压电陶瓷(运动行程为  $54.7 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $2 \text{ nm}$ )的上下运动,得到不同离焦距离下的光斑图像,如图 5(a)~(h)所示。通过光斑图像处理得出离焦距离与光斑灰度均值、光斑半径的关系,图 6(a)为离焦距离与光斑灰度均值的对应关系,可以发现拟合函数 1 的导数越大,测量系统分辨率越高。图 6(b)所示为离焦距离与光斑半径的对应关系,可以发现离焦距离与光斑半径的拟合函数 2 所示的曲线和图 2(b)所示的仿真曲线基

本一致。对拟合函数 1 与拟合函数 2 进行求导,导数函数的曲线如图 6(c)所示,拟合函数与导数函数的系数如表 1 所示。

拟合函数 1 的表达式为

$$f_1(x) = -A_1x^9 + B_1x^8 - C_1x^7 + D_1x^6 - E_1x^5 + F_1x^4 - G_1x^3 + H_1x^2 - I_1x + J_1, \quad (8)$$

拟合函数 2 的表达式为

$$f_2(x) = -A_2x^3 + B_2x^2 + C_2x + D_2, \quad (9)$$

导数函数 1 的表达式为

$$f_1'(x) = -A_3x^8 + B_3x^7 - C_3x^6 + D_3x^5 - E_3x^4 + F_3x^3 - G_3x^2 + H_3x - I_3, \quad (10)$$

导数函数 2 的表达式为

$$f_2'(x) = -A_4x^2 + B_4x + C_4. \quad (11)$$



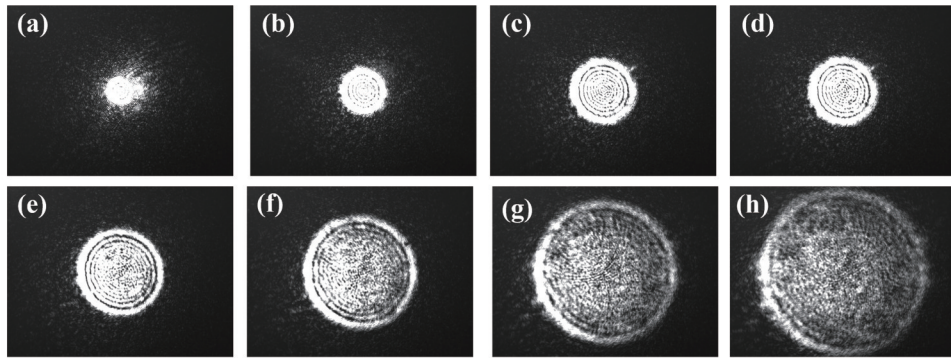


图 5 离焦距离与光斑图像。(a)离焦距离为 0 的光斑图;(b)离焦距离为  $3\ \mu\text{m}$  的光斑图;(c)离焦距离为  $6\ \mu\text{m}$  的光斑图;(d)离焦距离为  $6.348\ \mu\text{m}$  的光斑图;(e)离焦距离为  $9\ \mu\text{m}$  的光斑图;(f)离焦距离为  $12\ \mu\text{m}$  的光斑图;(g)离焦距离为  $15\ \mu\text{m}$  的光斑图;(h)离焦距离为  $17.34\ \mu\text{m}$  的光斑图

Fig. 5 Defocus distance and spot image. (a) Spot image with defocus distance of 0; (b) spot image with defocus distance of  $3\ \mu\text{m}$ ; (c) spot image with defocus distance of  $6\ \mu\text{m}$ ; (d) spot image with defocus distance of  $6.348\ \mu\text{m}$ ; (e) spot image with distance of  $9\ \mu\text{m}$ ; (f) spot image with defocus distance of  $12\ \mu\text{m}$ ; (g) spot image with defocus distance of  $15\ \mu\text{m}$ ; (h) spot image with defocus distance of  $17.34\ \mu\text{m}$

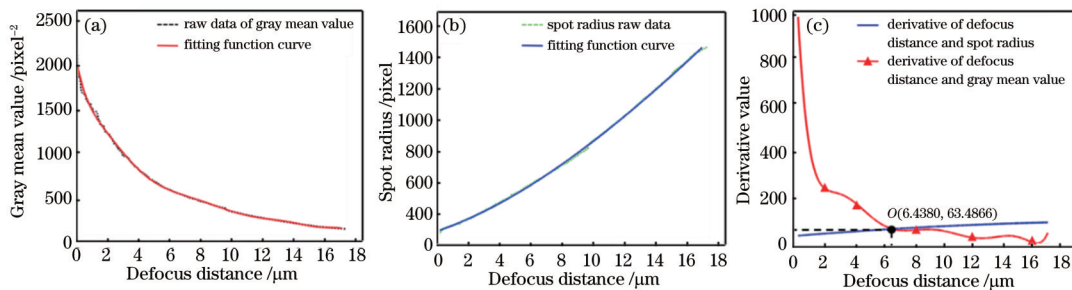


图 6 离焦距离与光斑图像的函数关系。(a)离焦距离与光斑灰度均值的拟合函数曲线;(b)离焦距离与光斑半径的拟合函数曲线;(c)拟合函数的求导曲线

Fig. 6 Function relationship between defocus distance and spot image. (a) Fitting function curve of defocus distance and spot gray mean value; (b) fitting function curve of defocus distance and spot radius; (c) derivative curves of fitting functions

表 1 拟合函数与导数函数的系数

Table 1 Coefficients of fitting functions and derivative functions

Coefficient	Fitting function 1 ( $i=1$ )	Fitting function 2 ( $i=2$ )	Derivative function 1 ( $i=3$ )	Derivative function 2 ( $i=4$ )
$A_i$	0.000014426722003240	0.035966	0.00012984049802916	0.10790
$B_i$	0.001186899767229283	5.595450	0.00949519813783426	5.19090
$C_i$	0.041129495524157286	34.53800	0.28790646866910100	34.5380
$D_i$	0.779618900546933333	297.7664	4.67771340328160000	
$E_i$	8.785642015492380000		43.9282100774619000	
$F_i$	59.97781052539600000		239.911242101584000	
$G_i$	243.8104238874240000		731.431271662272000	
$H_i$	580.0614833259150000		1160.12296665183000	
$I_i$	973.8482258709920000		973.848225870992000	
$J_i$	2090.196725693620000			

采用分类映射的方式来提高测量分辨率。从图 6 (c)中计算导数相同的位置点即两个导数函数曲线的交点  $O$ , 根据离焦距离  $6.438\ \mu\text{m}$  找到对应的灰度均值  $556.536\ \text{pixel}^{-2}$  与光斑半径  $622.372\ \text{pixel}$ , 对应结果如图 7(a)、(b)所示。当  $r \leq 622.372\ \text{pixel}$  时, 导数函数 1

大于导数函数 2, 采用光斑灰度均值映射, 如图 7(a)中的阴影部分所示。当  $r > 622.372\ \text{pixel}$  时, 导数函数 2 大于导数函数 1, 采用光斑半径(像素值)映射, 如图 7(b)中的阴影部分所示。从图 7(a)、(b)中可以得出, 测量系统的最大线性区间为  $17.293\ \mu\text{m}$ 。具体分类映

射处理流程图如图 7(c)所示,并采用桶排序算法实现快速映射。

灰度均值映射的计算公式为

$$g = \frac{G_i}{\pi r^2}, \quad (12)$$

$$\Delta x = \phi(g), \quad r \leq 622.372 \text{ pixel}, \quad (13)$$

光斑半径映射的计算公式为

$$\Delta x = \theta(r), \quad r > 622.372 \text{ pixel}, \quad (14)$$

式中:  $G_i$  为光斑图像内的灰度总和;  $\phi$  为光斑灰度均值映射因子,即每个灰度均值  $g$  与离焦距离  $\Delta x$  的映射;  $\theta$  为光斑半径(像素值)映射因子,即每个光斑半径  $r$  与离焦距离  $\Delta x$  的映射。

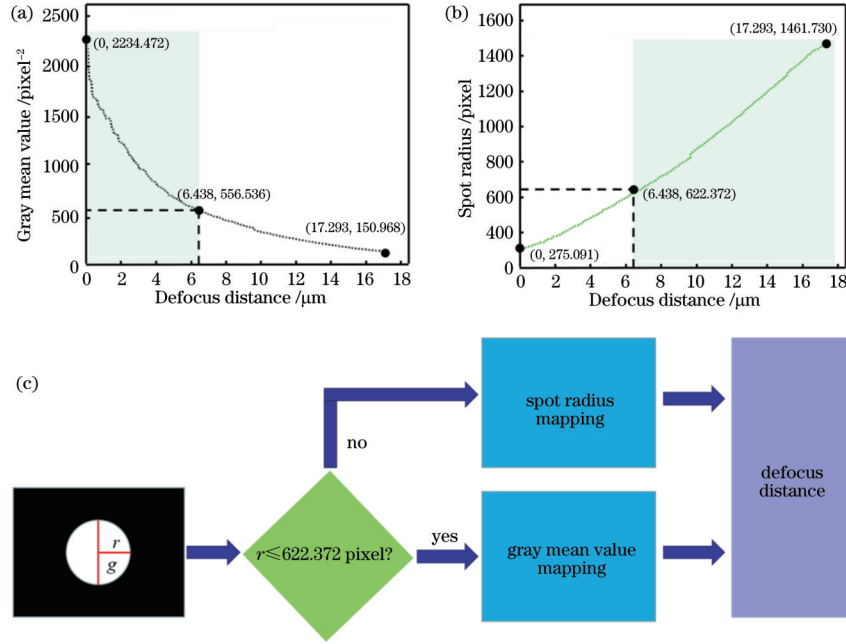


图 7 离焦距离与光斑图像映射。(a)离焦距离与光斑灰度均值映射;(b)离焦距离与光斑半径映射;(c)分类映射处理流程图  
Fig. 7 Mapping of defocus distance to spot image. (a) Mapping of defocus distance to spot gray mean value; (b) mapping of defocus distance to spot radius; (c) flow chart of classification mapping processing

### 3.2 测量系统的稳定性误差与精度

测量系统的稳定性误差主要来源于光斑图像的稳定性。控制运动台静止不动,持续采集光斑图像 180 min,实验数据如表 2 所示。从表 2 中可以得出,整个光斑半径(像素值)的极大值与极小值之间的差(简称为极差)随着测量时间的增大而增大,最后稳定在

3.65 pixel,测量最大值稳定在 1098.55 pixel,测量最小值稳定在 1094.90 pixel。将测量最大值和测量最小值代入映射中可得最大值对应的离焦距离为 12.839 μm,最小值对应的离焦距离为 12.796 μm。求得整个测量系统 180 min 的稳定性误差为 43 nm (12.839~12.796 μm)。

表 2 光斑图像测量  
Table 2 Spot image measurement

Test result	1 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
Average	1097.08	1097.00	1096.45	1096.71	1096.89	1096.75	1096.51
Maximum	1097.94	1097.94	1097.94	1098.55	1098.55	1098.55	1098.55
Minimum	1096.25	1095.62	1095.24	1095.24	1095.24	1094.90	1094.90
Range	1.69	2.32	2.70	3.31	3.31	3.65	3.65

对测量系统进行精度实验。由于物镜固定在压电陶瓷上,因此控制压电陶瓷可以使物镜与运动台台面间产生微小的距离变化,以此来模拟离焦距离变化。如图 8(a1)~(a3)所示,将三组不同的方波信号输入到压电陶瓷中,使得压电陶瓷产生 150、100、50 nm 距离的位移。同时,将采集的光斑图像进行如图 3 所示的光斑图像处理,求得光斑半径,如图 8(b1)~(b3)所示,可以发现光斑半径(像素值)的变化与输入波形的变化基本一致。然后,将光斑半径(像素值)进行如图 7(c)

所示的映射得出离焦距离,如图 8(c1)~(c3)所示。在三组位移下,相应的离焦距离和最大噪声波动为:1)当压电陶瓷运动 150 nm 时,离焦距离为 159 nm (8.730~8.571 μm)、最大噪声波动为 30 nm (8.570~8.540 μm);2)当压电陶瓷运动 100 nm 时,离焦距离为 117 nm (8.571~8.454 μm)、最大噪声波动为 8 nm (8.462~8.454 μm);3)当压电陶瓷运动 50 nm 时,离焦距离为 40 nm (8.420~8.380 μm)、最大噪声波动为 26 nm (8.446~8.420 μm)。实验结果表明,该测量系

统可以测量出 50 nm 的距离变化。

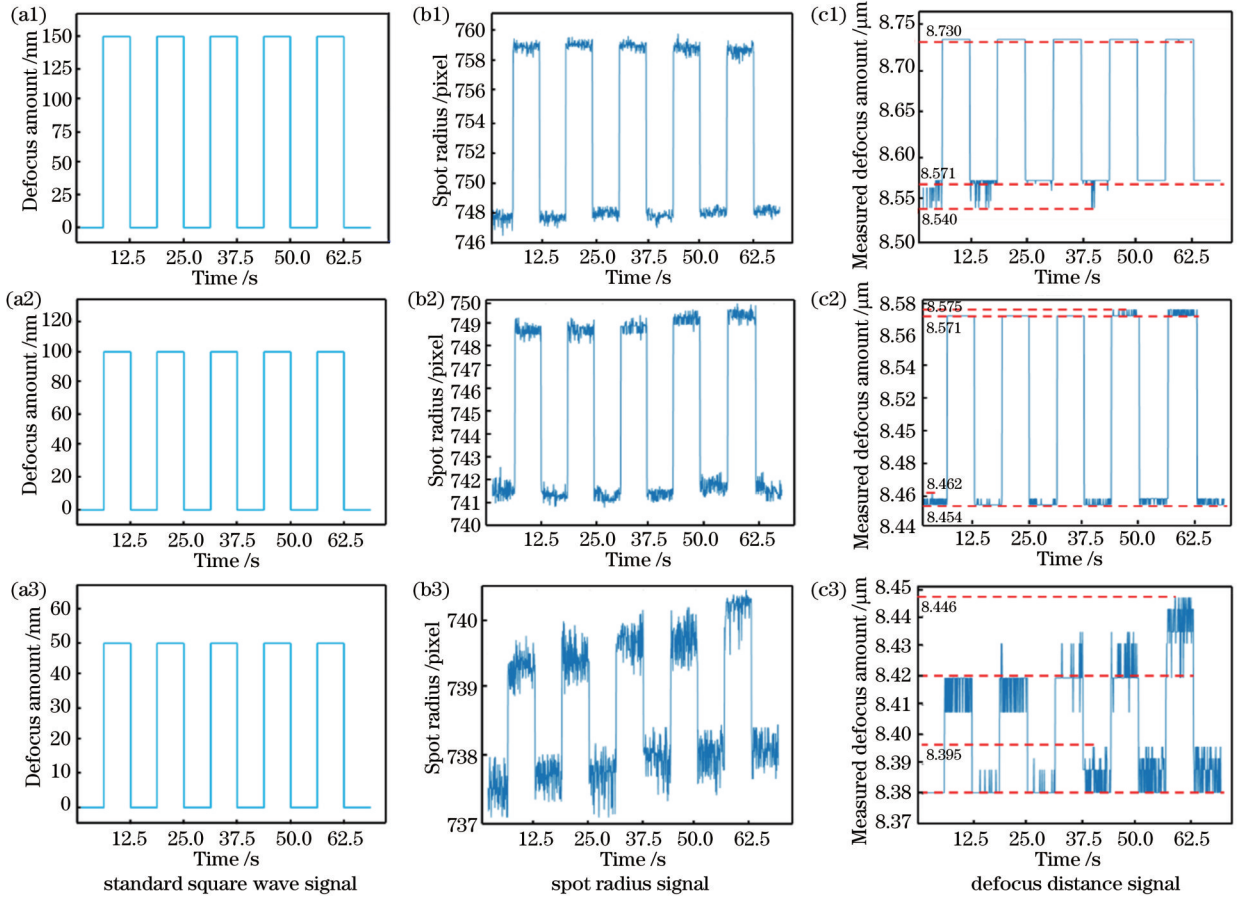


图 8 测量系统精度验证图。(a1)~(c1)压电陶瓷运动距离为 150 nm；(a2)~(c2)压电陶瓷运动距离为 100 nm；(a3)~(c3)压电陶瓷运动距离为 50 nm

Fig. 8 Precision verification diagram of measuring system. (a1)~(c1) Moving distance of piezoelectric ceramics is 150 nm; (a2)~(c2) moving distance of piezoelectric ceramics is 100 nm; (a3)~(c3) moving distance of piezoelectric ceramics is 50 nm

为了验证光斑图像法测量系统的实际测量精度，使用测量精度为 0.6 nm 的台阶仪(美国, KLA-Tencor, D-100)进行实际测量精度验证实验。首先，使用磁控溅射镀膜机(德国, Leybold, Z550s)在测试样品上制作一个高度为 500 nm 的台阶，测试样品如图 9 (a)所示。然后，在测试样品上标注测量位置线，使用台阶仪与光斑图像法测量系统对测试样品测量位置线

上的台阶进行 5 次测量，测量数据如图 9 (b)所示。最后，计算出台阶仪测量的台阶高度的平均值为 494.6 nm、标准差为 3.3 nm，光斑图像法测量系统测量的台阶高度的平均值为 491.4 nm、标准差为 9.6 nm、A 类不确定度为 22.185 nm (置信概率为 0.99)。两种方法的测量结果基本一致，验证了光斑图像法测量系统实际测量精度的正确性。

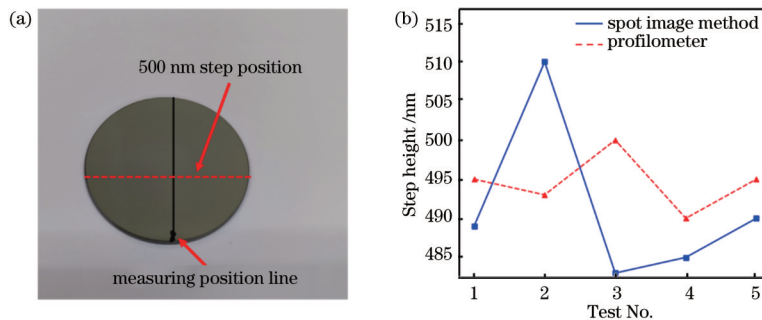


图 9 测试样品的台阶高度测量。(a)测试样品；(b)台阶高度测量结果

Fig. 9 Step height measurement of test sample. (a) Test sample; (b) step height measurement result



### 3.3 运动台运动平行度测量及优化

在运动台运动平行度测量过程中,设置运动台速度为 4 mm/s,实验温度为 $(20\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 。为了验证光斑图像法测量系统的可行性,同时采用位移传感器(日本,KEYENCE,CI-P015)进行测量,该方法的测量精度为 250 nm。两种测量方法对运动台运动平行度分别进行三次测量,再计算三次测量的平均值,并以平均值作为测量结果,其他实验条件完全相同。图 10(a)为光斑图像法测得的运动平行度的三维图。可以看出,整个运动平行度的误差为  $11.66\ \mu\text{m}$ ,整个平面成  $34.36'' [\arctan(11.66/70000)]$  的倾斜。图 10(b)为位移传感器测得的运动平行度的三维图,运动平行度误差为  $11.80\ \mu\text{m}$ 。可以看出,位移传感器测得的运动平

行度与光斑图像法测量的运动平行度基本一致,两组运动平行度测量数据的均方根误差为 248 nm。

运动平行度是运动台的核心参数之一,运动平行度误差越小,性能越好,因此有必要对运动平行度进行优化。根据图 10(a)求得的倾斜角,利用高精度垫片(高度为  $5\ \mu\text{m}$ )对运动台的台面进行垫平。图 10(c)为优化后光斑图像法测得的运动平行度的三维图。可以得出,整个运动平行度的误差为  $6.22\ \mu\text{m}$ ,比优化前运动平行度的误差减小了 46.66%。图 10(d)为优化后位移传感器测得的运动平行度三维图,运动平行度误差为  $6.30\ \mu\text{m}$ 。可以看出,优化后位移传感器测得的运动平行度与光斑图像法测得的运动平行度基本一致,两组运动平行度测量数据的均方根误差为 181 nm。

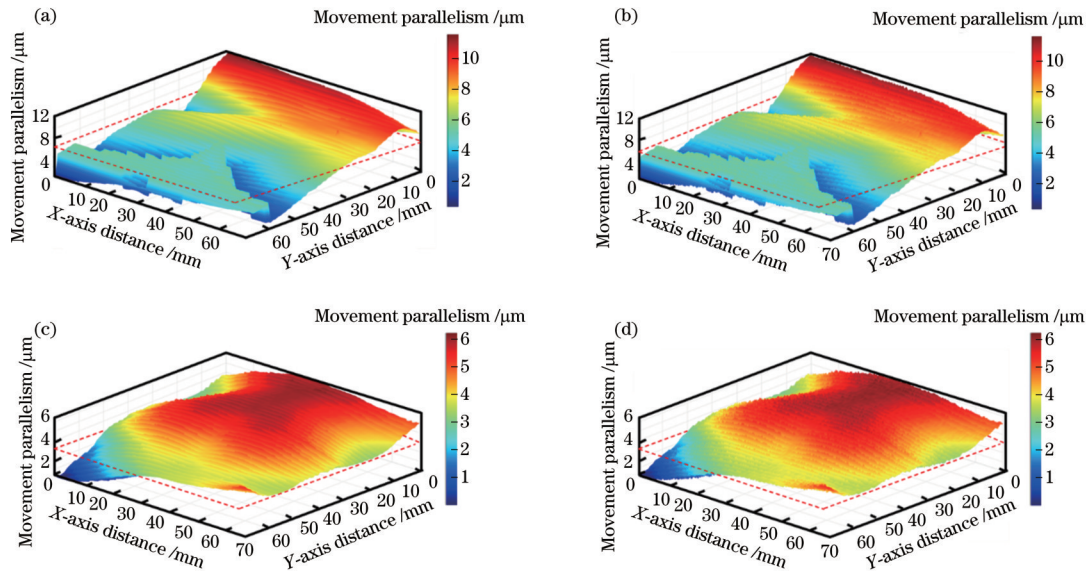


图 10 运动平行度三维图(虚线框平面为基准平面)。(a)优化前光斑图像法测量结果;(b)优化前位移传感器测量结果;(c)优化后光斑图像法测量结果;(d)优化后位移传感器测量结果

Fig. 10 Three-dimensional diagram of movement parallelism (dashed box plane is reference plane). (a) Measurement result of spot image method before optimization; (b) measurement result of displacement sensor before optimization; (c) measurement result of spot image method after optimization; (d) measurement result of displacement sensor after optimization

## 4 结 论

提出了一种基于光斑图像的运动平行度测量方法,并进行了数学建模、仿真优化和光斑图像处理算法设计。根据仿真优化结果,搭建测量系统样机。建立光斑图像与离焦距离的对应关系,通过使用分类映射,提高了测量系统的分辨率。实验结果表明,整个测量系统的线性区间为  $17.293\ \mu\text{m}$ ,系统精度优于 50 nm,180 min 下的系统稳定性优于 43 nm。最后,利用所建的测量系统进行运动平行度测量和优化。优化前运动平行度误差测量结果为  $11.66\ \mu\text{m}$ ,根据测量结果使用高精度垫片垫平,优化后运动平行度误差测量结果为  $6.22\ \mu\text{m}$ ,与优化前运动平行度相比误差减小了 46.66%。为了验证光斑图像法测量系统的可行性,使用位移传感器对运动平行度进行测量,运动平行度测量数据的均方根误差优于 248 nm。所提光斑图像测

量运动平行度方法具有非接触、低成本、高精度,以及不受被测面反射率与倾斜的影响的优点。

### 参 考 文 献

- [1] Chen G D, Zheng J L, Wang Z W, et al. Fabrication of micro/nano multifunctional patterns on optical glass through chalcogenide heat-mode resist AgInSbTe[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 867: 158988.
- [2] Chen G D, Liu X, Wei T, et al. Nanoscale-patterned Cr films by selective etching using a heat-mode resist: implications for X-ray beam splitter[J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(1): 1047-1055.
- [3] 龚春阳, 范杰, 邹永刚, 等. 基于金属掩模的全息光刻微纳光栅制备工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1203001.  
Gong C Y, Fan J, Zou Y G, et al. Fabrication of holographic lithography micro-nano gratings using metal



- mask[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1203001.
- [4] 陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823018.  
Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823018.
- [5] Zhou X L, Miao H C, Li F X. Nanoscale structural and functional mapping of nacre by scanning probe microscopy techniques[J]. Nanoscale, 2013, 5(23): 11885-11893.
- [6] Lima E A, Bruno A C, Carvalho H R, et al. Scanning magnetic tunnel junction microscope for high-resolution imaging of remanent magnetization fields[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(10): 105401.
- [7] Dong Y H, Yang H B, Zhang L, et al. Ultra-uniform nanocrystalline materials via two-step sintering[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(1): 2007750.
- [8] Cao M S, Bo Y M, Gao H B. Combined feedforward control and disturbance rejection control design for a wafer stage: a data-driven approach based on iterative parameter tuning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 181224-181232.
- [9] Zhang K, Chen Z M, Geng Y Y, et al. Nanoscale-resolved patterning on metal hydrazone complex thin films using diode-based maskless laser writing in the visible light regime[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(5): 051401.
- [10] Cappetti N, Naddeo A, Vilecco F. Fuzzy approach to measures correction on Coordinate Measuring Machines: the case of hole-diameter verification[J]. Measurement, 2016, 93: 41-47.
- [11] Ren M J, Sun L J, Liu M Y, et al. A weighted least square based data fusion method for precision measurement of freeform surfaces[J]. Precision Engineering, 2017, 48: 144-151.
- [12] Ma X F, Cai Z Q, Yao B, et al. Analysis of factors affecting measurement accuracy and establishment of an optimal measurement strategy of a laser displacement sensor[J]. Applied Optics, 2020, 59(33): 10626-10637.
- [13] Yang H W, Tao W, Liu K M, et al. Irradiance distribution model for laser triangulation displacement sensor and parameter optimization[J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 095106.
- [14] Li J K, Feng Q B, Bao C C, et al. Method for simultaneously and directly measuring all six-DOF motion errors of a rotary axis[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(1): 011203.
- [15] Yang H X, Weichert C, Köchert P, et al. Nonlinearity of a double-path interferometer qualified with a non-constant moving speed[J]. Optics Letters, 2016, 41(23): 5478-5481.
- [16] Zhao C Y, Li Y, Yao Y X, et al. Random residual neural network-based nanoscale positioning measurement [J]. Optics Express, 2020, 28(9): 13125-13130.
- [17] Bae W, Kim Y, Moon Y H, et al. Simultaneous thickness variation and surface profiling of glass plates using Fizeau interferometer with elimination of offset phase error[J]. Optics Communications, 2021, 480: 126500.
- [18] Lou Y T, Li Z Y, Yan L P, et al. A phase differential heterodyne interferometer for simultaneous measurement of straightness error and displacement[J]. Optics Communications, 2021, 497: 127195.
- [19] Vo Q S, Duan Y T, Zhang X D, et al. Non-contact method of thickness measurement for a transparent plate using a laser auto-focus scanning probe[J]. Applied Optics, 2019, 58(35): 9524-9531.
- [20] Zheng J G, Wei Q, Yu L Y, et al. Simple optical method for small angular displacement measurement based on the astigmatic effect[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(3): 030801.
- [21] Duan Y T, Vo Q S, Zhang X D, et al. Novel method of measuring optical freeform surface based on laser focusing probe without calibrating focus error signal[J]. Measurement, 2019, 148: 106961.
- [22] Křen P. Optical mirror referenced capacitive flatness measurement and straightness evaluation of translation stages[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(4): 044017.
- [23] Li X C, Zhang Z Y, Hu H F, et al. Noncontact on-machine measurement system based on capacitive displacement sensors for single-point diamond turning[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 044105.
- [24] Xu F H, Zhang Y X, Zhang L X. An effective framework for 3D shape measurement of specular surface based on the dichromatic reflection model[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126210.
- [25] 张小兵, 刘海江. 基于数字全息图的密封平面表面形貌测量及其模型重建[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0912001.  
Zhang X B, Liu H J. Measurement and model reconstruction of topography of sealing plane based on digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0912001.
- [26] Huang Q X, Wu K, Wang C C, et al. Development of an abbe error free micro coordinate measuring machine [J]. Applied Sciences, 2016, 6(4): 97.
- [27] Ouyang Q, Wen C, Song Y D, et al. Approach for designing and developing high-precision integrative systems for strip flatness detection[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 8429-8438.
- [28] Andrushchak A S, Voronyak T I, Yurkevych O V, et al. Interferometric technique for controlling wedge angle and surface flatness of optical slabs[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(4): 342-347.
- [29] Liang X, Bai Z, Wei J S. Movement flatness error measurement based on an astigmatic method[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4347-4352.