

# 点衍射干涉仪波前参考源标定算法的研究

张宇<sup>1,2</sup> 金春水<sup>1</sup> 马冬梅<sup>1</sup> 王丽萍<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 为了提高双光纤点衍射干涉仪的检测精度, 需要对干涉仪装置中两个波前参考源(WRS)的系统误差进行标定。设计了波前参考源的标定过程及标定算法, 通过沿被检光学系统光轴四次旋转  $90^\circ$  求出波前参考源的沿轴旋转非对称误差, 沿倾斜轴四次旋转  $90^\circ$  求出波前参考源的沿倾斜轴旋转非对称误差, 然后利用两者之差采用最小二乘法求出波前参考源的旋转对称误差, 将对称误差和非对称误差相累加求出波前参考源的系统误差。采用计算机模拟了标定算法的整个流程, 当波前参考源沿光轴和倾斜轴旋转的旋转公差在  $\pm 1^\circ$  范围内时, 采用 36 项泽尼克多项式进行标定的测试误差均方根值小于  $0.01 \text{ nm}$ , 在标定精度允许的范围。通过模拟验证了标定算法的正确性并给出波前参考源的旋转公差范围。

**关键词** 测量; 标定算法; 波前参考源; 相移点衍射干涉仪

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0308001

## Study of Calibrating Algorithm for Wavefront Reference Source of Point Diffraction Interferometer

Zhang Yu<sup>1,2</sup> Jin Chunshui<sup>1</sup> Ma Dongmei<sup>1</sup> Wang Liping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to improve the measuring accuracy of double fibers point diffraction interferometer, system errors of two wavefront reference sources (WRS) should be calibrated. A calibrating process and calibrating algorithm of WRS are designed. The non-axisymmetric errors of WRS about optical axis are obtained through rotating the tested optical system around optical axis by four times. The non-axisymmetric errors of WRS about oblique axis are obtained through rotating the tested optical system around oblique axis by four times. Then the axisymmetric errors of WRS are gotten by the least squares, and the system errors of WRS are equal to the sum of the axisymmetric errors and non-axisymmetric errors. The process of calibrating algorithm is simulated by computer. When the rotating tolerances of WRS are in the range of  $\pm 1^\circ$ , the root mean square value of measuring error is less than  $0.01 \text{ nm}$  using the 36 terms of Zernike polynomials, which is in the range of calibrating accuracy. The validity of calibrating algorithm is verified and the rotating tolerances of WRS are given by simulating the calibration.

**Key words** measurement; calibrating algorithm; wavefront reference source; phase shifting point diffraction interferometer

**OCIS codes** 120.4630; 120.6650; 120.7280; 220.4241

## 1 引言

极紫外光刻(EUVL)技术是建立在传统光学光

刻基础上的下一代光刻技术, 最大限度地继承了目前光学光刻的发展成果。作为光刻机核心单元之一

收稿日期: 2011-10-09; 收到修改稿日期: 2011-11-03

基金项目: 应用光学国家重点实验室(09Q03FQ090)资助课题。

作者简介: 张宇(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 521zhangyu2008@163.com

导师简介: 金春水(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事紫外、极紫外光学技术等方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

的投影光刻物镜,为了实现光刻分辨率及临界尺寸控制的要求,光学系统波像差的均方根(RMS)值应小于 $\lambda/20$ 。针对以 13.5 nm 极紫外(EUV)射线为工作波长的 EUVL 微缩投影物镜,其系统波像差的 RMS 值应小于 0.675 nm,这对检测技术提出了前所未有的挑战。以针孔(亚微米量级)衍射产生的近乎理想的球面波为参考波面的点衍射干涉技术<sup>[1,2]</sup>消除了常规干涉技术参考波面误差的影响,能够实现极高精度的波面误差的检测,已成为 EUV 微缩投影光刻物镜系统波像差检测的首选,同时高精度的检测手段也为 EUVL 系统向更小线宽方向发展提供了有利保障。

在美国、德国、日本等 EUV 光刻技术领先的国家,开展点衍射干涉技术研究的机构比较多,其波像差检测重复精度的 RMS 值能够达到 0.1 nm,甚至更小,并且已应用于实际 EUV 光刻微缩投影物镜系统波像差的检测与装调<sup>[3~6]</sup>。国内,北京理工大学<sup>[7,8]</sup>、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[9]</sup>等科研单位也开展了点衍射干涉仪的基础研究。

点衍射干涉仪不使用参考球面而使用小孔衍射产生的近乎理想的球面波作为参考波面,理论上可以实现极高精度的波面误差检测。除去随机噪声、空气扰动和机械振动<sup>[10]</sup>造成的随机误差<sup>[11~13]</sup>外,点衍射干涉仪的两个主要误差来源是参考波面误差<sup>[14,15]</sup>和几何结构产生的误差<sup>[16]</sup>。参考波面误差是由小孔加工的形状和尺寸误差所引起的,几何结

构误差是由装调引起的。这两种误差在测量过程中都可以认为是不变的系统误差。通过环境控制将随机误差减小到一定程度后,系统误差就是主要的误差来源。设法测量出系统误差的大小,校准干涉仪对提高干涉仪的测量精度有十分重要的意义<sup>[17]</sup>。

本文对波前参考源(WRS)系统误差的标定算法进行设计并对标定过程进行了模拟,验证标定方法可行性的同时并给出标定过程中机械运动的公差范围。

## 2 算法设计

图 1 所示为双光纤点衍射干涉仪的工作原理:短相干激光器出射的光经中性密度滤光片衰减以及 $\lambda/2$ 波片改变线偏振光偏振方向后,经过分光系统偏振分光棱镜(PBS<sub>1</sub>),出射的两束共光路的正交线偏振光共同经过 PBS<sub>2</sub> 分光后,产生的参考光和测试光分别由耦合透镜 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 耦合到带有电动偏振控制器的参考光纤和测试光纤中,测试 WRS 出射的光经被检光学系统照射到参考 WRS 的反射面后被反射,调整角锥棱镜 R<sub>1</sub> 使测试球面波与参考球面波光程匹配从而产生干涉,利用压电陶瓷(PZT)移动对偏摆误差不敏感的角锥棱镜 R<sub>2</sub> 实现移相过程,并且加入平面反射镜 M<sub>2</sub> 使得对移相过程中的横移误差不敏感,利用光电探测器采集干涉图,送入计算机利用移相算法进行数据处理和分析,即得到被检光学系统的波像差。

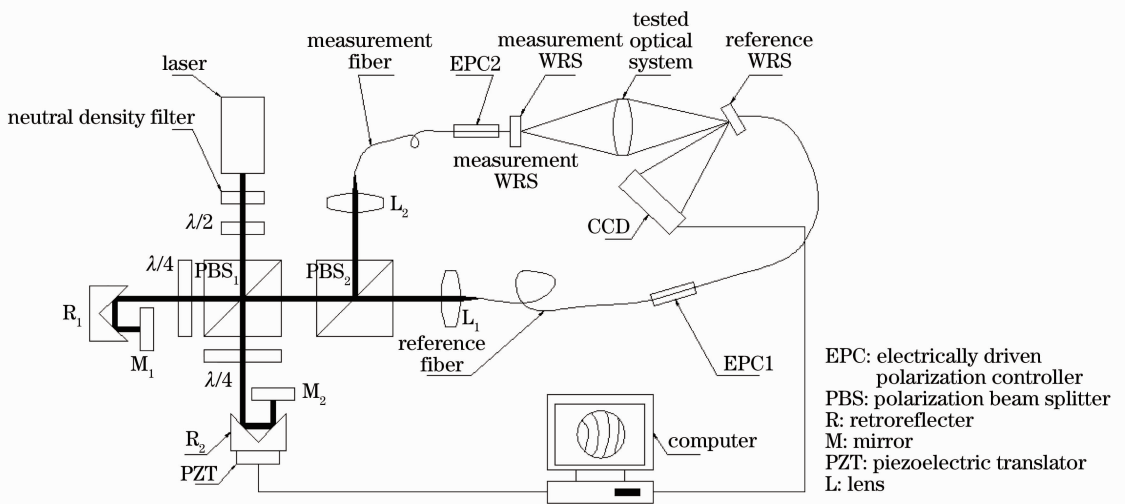


图 1 双光纤点衍射干涉仪原理图

Fig. 1 Principle of double fibers point diffraction interferometer

对于双光纤点衍射干涉仪来说,两个 WRS 的精度是十分重要的,它直接影响干涉仪最终的检测精度,因此在对光学系统波像差进行检测之前,需要

对其系统误差进行标定。WRS 的系统误差是指小孔衍射出的波前与理想球面波的微小偏差,它主要是由小孔加工的形状和尺寸误差所引起的。在标定

过程中需要对两个 WRS 分别进行标定,这样对提前预知并提高干涉仪的检测精度有重要的意义。

在 WRS 的标定过程中,被测结果由两部分构成,一部分是被检光学系统的波像差  $W(x,y)$ ,另一部分是 WRS 的系统误差  $V(x,y)$ ,可表示为

$$T(x,y) = W(x,y) + V(x,y). \quad (1)$$

式中  $W(x,y)$ ,  $V(x,y)$  和  $T(x,y)$  分别代表被检光学系统的波像差, WRS 的系统误差和测量得到的数据,  $(x,y)$  是定义在 CCD 上的坐标。

而 WRS 的系统误差又分为两部分,一部分是旋转非对称误差,另一部分是旋转对称误差,前一部分由沿轴旋转 WRS 得到,后一部分由倾斜旋转 WRS 得到的数据与前一部分数据经计算得到。

## 2.1 单个波前参考源的标定

### 2.1.1 旋转非对称误差的计算

将测试 WRS 沿被测光学系统的光轴旋转,如图 2(b)所示,每次旋转  $90^\circ$ ,旋转四次后回到初始位置,即图 2(a)。用  $V_\phi(x,y)$  和  $T_\phi(x,y)$  分别代表 WRS 旋转角度  $\phi$  时的系统误差和测量数据,

$$T_\phi(x,y) = W(x,y) + V_\phi(x,y). \quad (\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ) \quad (2)$$

通过旋转平均可以消除 WRS 旋转非对称误差,从而得到被检光学系统波像差和 WRS 的旋转对称分量之和

$$\begin{aligned} \bar{T}(x,y) &= \frac{T_0(x,y) + T_{90}(x,y) + T_{180}(x,y) + T_{270}(x,y)}{4} = \\ &= \frac{4W(x,y) + 4V_{\text{sym}}(x,y) + [V_0^{\text{as}}(x,y) + V_{90}^{\text{as}}(x,y) + V_{180}^{\text{as}}(x,y) + V_{270}^{\text{as}}(x,y)]}{4} = \\ &= W(x,y) + V_{\text{sym}}(x,y), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $V_{\text{sym}}(x,y)$  是 WRS 旋转对称误差,  $V_\phi^{\text{as}}(x,y)$  是 WRS 的旋转非对称误差。

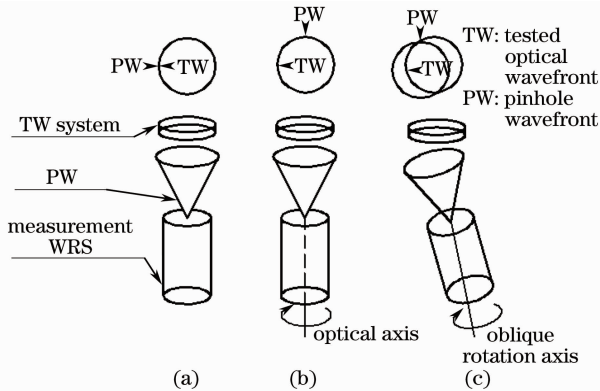


图 2 WRS 标定过程示意图。(a)初始位置;(b)测试 WRS 沿光轴旋转;(c)测试 WRS 沿倾斜轴旋转

Fig. 2 Schematics of WRS calibration. (a) Initial position; (b) measurement WRS rotates around optical axis; (c) measurement WRS rotates around oblique rotation axis

由(2)式减去(3)式,被检光学系统的波像差  $W(x,y)$  可以消除,得到 WRS 的旋转非对称分量为

$$T_\phi(x,y) - \bar{T}(x,y) = V_\phi(x,y) - V_{\text{sym}}(x,y) = V_\phi^{\text{as}}(x,y). \quad (4)$$

### 2.1.2 旋转对称误差的计算

WRS 的旋转对称误差是沿倾斜轴旋转 WRS 求解得到的,此倾斜轴通过 WRS 的小孔,但是和被

检光学系统的光轴有一定的角度,每次旋转  $90^\circ$ ,旋转四次后回到初始位置,如图 2(c)所示。四次倾斜旋转之后求平均,利用原始位置测试结果减去倾斜旋转平均结果即得到 WRS 沿倾斜轴旋转的旋转对称误差,计算方法同 WRS 沿光轴旋转非对称误差的求解。

图 3 中,圆 A 是被检光学系统圆孔径,圆 B 是与圆 A 相切的圆且包含在圆 A 当中,  $O_A$  为沿光轴旋转的圆心,  $O_B$  为沿倾斜轴旋转的圆心。求解旋转对称误差的重要依据是针对  $O_A$  和  $O_B$  两个不同的坐标系,可以用不同的泽尼克(Zernike)多项式的线性组合来表达重合区域的 WRS 的波像差,并且两组表达式表达的波像差相等,利用这个特性就能计

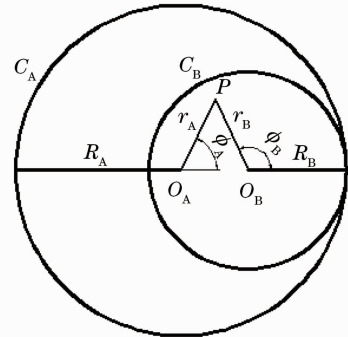


图 3 求解旋转对称误差的几何图形

Fig. 3 Geometry for the determination of symmetric errors

算 WRS 的旋转对称误差。

多项式的线性组合来表示 WRS 的波像差,并将其拆分成旋转对称误差和旋转非对称误差之和:

在圆 A 和圆 B 内,分别用各自坐标系的 Zernike

$$\begin{cases} V_A = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm(n-2k)}^{\pm n} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) + \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) \\ V_B = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm(n-2k)}^{\pm n} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right) + \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right) \end{cases} \quad (5)$$

在圆 A 和圆 B 的重合区域, WRS 的波像差相等:

$$\sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) + \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right) + \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right), \quad (6)$$

式中  $C_{nm}^{(A)}$  和  $C_{nm}^{(B)}$  为 Zernike 系数,  $Z_{nm}$  为 Zernike 多项式,  $n$  为多项式的阶数,  $m$  为与角度有关的参数, 当  $n$  为奇数时  $k = 0, \dots, (n-1)/2$ , 当  $n$  为偶数时  $k = 0, \dots, n/2, l = 0, 1, \dots$ 。

其中圆 A 及圆 B 的旋转非对称误差已求解完毕, 将已知项写在右边, 未知项写在左边, 得到

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) - \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right) &= \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^{(B)} Z_{nm} \left( \frac{r_B}{R_B}, \phi_B \right) - \\ &\sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^{(A)} Z_{nm} \left( \frac{r_A}{R_A}, \phi_A \right) = V_{as}^{dif}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $V_{as}^{dif}$  为圆 B(沿倾斜轴)和圆 A(沿光轴)的旋转非对称误差之差。这样(7)式右边就是圆 B(沿倾斜轴)和圆 A(沿光轴)的旋转非对称误差之差, 方程左边为圆 A 和圆 B 的旋转对称误差之差。

现在对重合区域的各像素点采用最小二乘法求解圆 A 及圆 B 的旋转非对称误差:

$$[Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}] \cdot [C_{nm}^{(A)}, C_{nm}^{(B)}] = V_{as}^{dif}, \quad (8)$$

式中 Zernike 多项式已知, Zernike 系数为待求未

知数。

$$\begin{aligned} [Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}]^T \cdot [Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}] \cdot [C_{nm}^{(A)}, C_{nm}^{(B)}] &= \\ [Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}]^T V_{as}^{dif}, \\ [C_{nm}^{(A)}, C_{nm}^{(B)}] &= \{ [Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}]^T \cdot [Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}] \}^{-1} \cdot \\ [Z_{nm}^{(A)}, Z_{nm}^{(B)}]^T V_{as}^{dif}. \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式即可精确求出圆 A 和圆 B 旋转对称误差的 Zernike 多项式系数, 采用 36 项 Zernike 多项式进行计算, 未知项分别为 0, 3, 8, 15, 16, 17, 24,

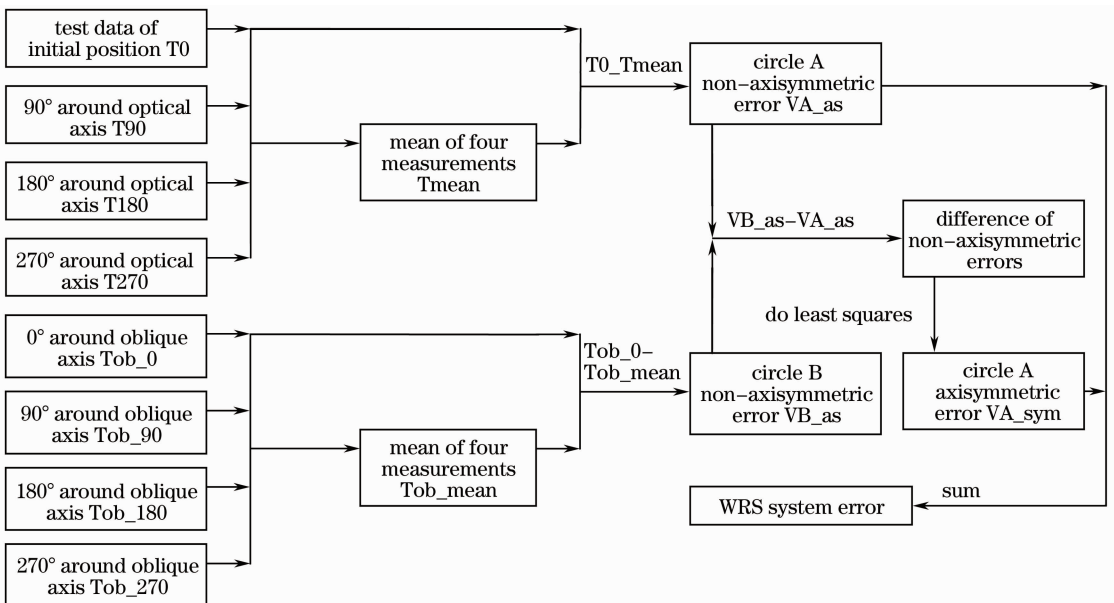


图 4 WRS 标定方法流程图

Fig. 4 Flow chart of WRS calibration

27,28,35,36 项,这样就求出了圆 A 及圆 B 的旋转对称误差。

过程结束。

将沿光轴旋转对称误差和旋转非对称误差相加最终得到 WRS 的系统误差,至此单个 WRS 的标定

单个 WRS 的系统误差标定方法可以用图 4 的流程图来表示。

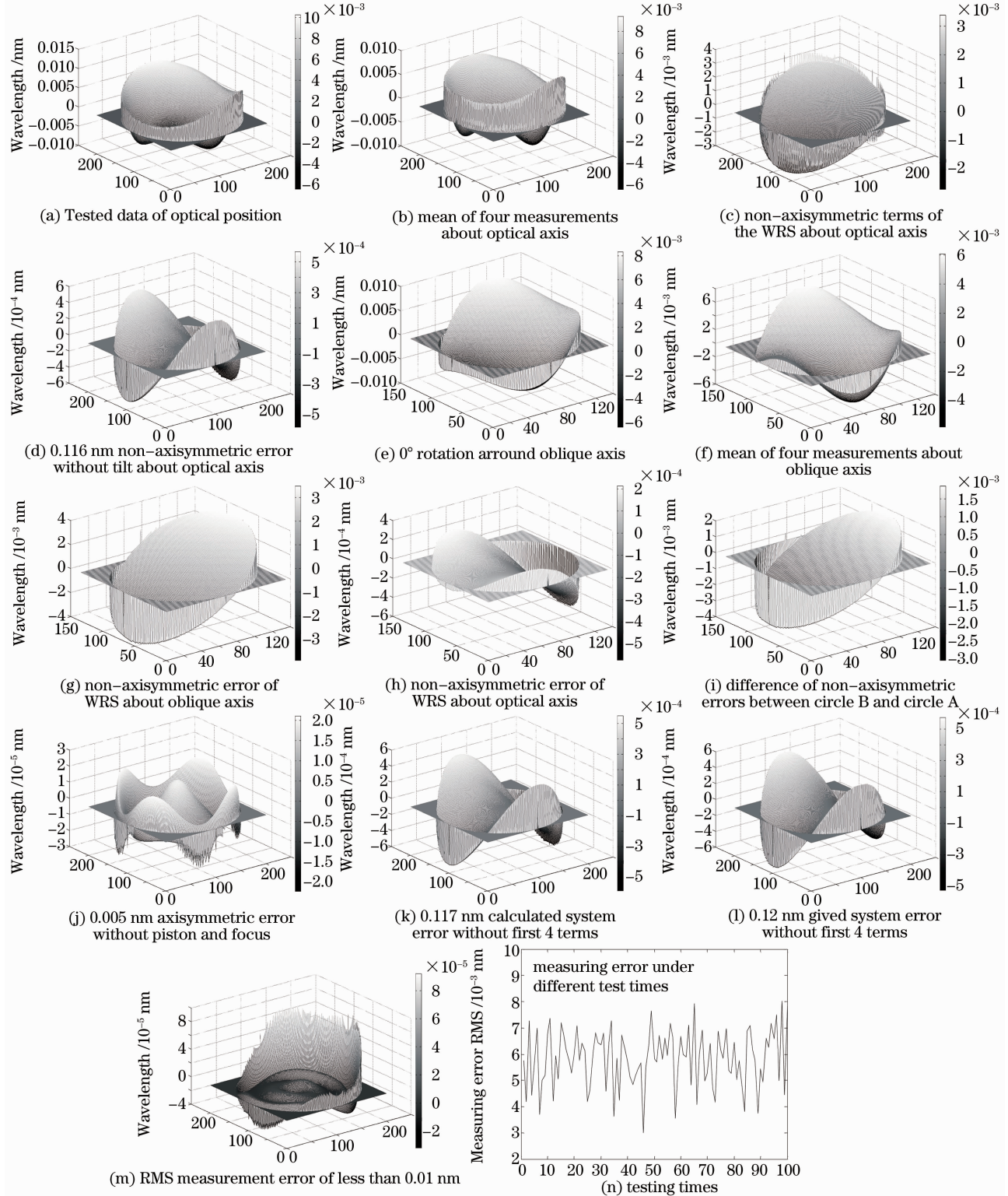


图 5 WRS 模拟过程

Fig. 5 Simulation of WRS calibration

## 2.2 干涉仪 WRS 的测试流程

双光纤点衍射干涉仪 WRS 的测试流程如下:

1) 首先标定测试 WRS: 四次沿轴旋转测试 WRS 求解旋转非对称误差, 四次沿倾斜轴旋转求解 WRS 旋转对称误差, 将旋转非对称误差和对称误差累加即求得测试 WRS 的系统误差;

2) 调节测试 WRS 的位置使其出射的球面波经被检光学系统聚焦到参考 WRS 小孔附近的 8 个对称位置上, 对每个位置分别进行测试 WRS 的标定, 最后将 8 个位置的结果取平均作为测试 WRS 标定出来的最终的系统误差, 这样做可以有效地消除由于波前参考源小孔反射镜表面粗糙引起的误差, 及反射光没有打回小孔中心造成的误差;

3) 将测试 WRS 和参考 WRS 位置对调, 标定参考 WRS, 方法同上。

至此, 整个标定过程结束。

## 3 算法模拟验证

为了验证 WRS 标定算法的正确性及给出旋转公差精度, 需要对上述标定算法进行计算机模拟:

1) 首先给出被检光学系统及 WRS 的 Zernike 多项式系数, 然后根据 Zernike 系数拟合出各自的光程差(OPD)图;

2) 对 WRS 的波像差以 A 为圆心, 依次旋转  $90^\circ$ , 根据标定算法求出 WRS 沿轴旋转非对称误差;

3) 对 WRS 的波像差以 B 为圆心, 依次旋转  $90^\circ$ , 根据标定算法求出 WRS 沿倾斜轴旋转非对称误差;

4) 利用 36 项 Zernike 多项式, 用最小二乘法求出 WRS 沿轴旋转和沿倾斜轴旋转的旋转对称误差 Zernike 多项式系数, 最终求出 WRS 沿轴旋转对称误差;

5) 将旋转对称误差与旋转非对称误差相累加得到 WRS 的系统误差, 将其与初始给定值相比较, 得到测试误差。

由于波像差中的平移、倾斜和离焦对小孔衍射波前质量无意义, 并且在旋转过程中, 由于一些未知的刚体运动可能产生额外的平移、倾斜和离焦, 这样计算出来的这几项像差可能不准确, 所以在模拟过程中去除这几项, 实际计算过程中也将去除这几项。

初始模拟条件为: 被检光学系统的波像差的 RMS 值为 1.38 nm, 通过 Matlab 模拟出 WRS 衍射出的球面波的波像差 RMS 值为 1.09 nm, 去除 Zernike 系数前四项平移、倾斜和离焦的 WRS 系统

误差为 0.12 nm, 假设 WRS 沿光轴和倾斜轴单次旋转的角度在  $90^\circ \pm 1^\circ$  范围内, 在此基础上进行算法的模拟计算, 图 5 为第一步到第五步的模拟过程。

采用 36 项 Zernike 多项式对 WRS 的系统误差进行标定的过程和算法是正确可行的; 在求解 WRS 的旋转非对称误差和旋转对称误差过程中, 当 WRS 沿光轴和倾斜轴旋转的旋转公差在  $\pm 1^\circ$  范围内时, 100 次仿真结果的测试误差的 RMS 值均小于 0.01 nm, 满足标定精度要求。

## 4 结 论

设计了波前参考源系统误差的标定算法, 通过沿被检光学系统光轴四次旋转求平均得波前参考源的沿轴旋转非对称误差, 通过沿倾斜轴四次旋转求平均得波前参考源沿倾斜轴的旋转非对称误差, 利用两者之差并采用最小二乘法计算出波前参考源的沿轴旋转对称误差, 旋转对称误差和旋转非对称误差相累加就可以得到波前参考源的系统误差。通过计算机模拟给出波前参考源及被检光学系统的波像差, 当波前参考源沿光轴和倾斜轴旋转的旋转公差在  $\pm 1^\circ$  范围内时, 采用标定算法计算出其测试误差的 RMS 值小于 0.01 nm, 满足标定精度要求。通过模拟验证了标定算法的正确性, 并且给出了标定精度允许范围内的波前参考源的旋转公差范围, 为下一步标定装置的设计及实验的搭建提供了理论支持和实验依据。

### 参 考 文 献

- 1 K. Otaki, T. Yamamoto, Y. Fukuda *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(1): 295~300
- 2 K. Otaki, K. Ota, I. Nishiyama *et al.*. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: design, fabrication, and evaluation[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(6): 2449~2457
- 3 Kazuya Ota, Tokahiro Yamamoto, Yusuke Fukuda *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors[C]. *SPIE*, 2001, **4343**: 543~550
- 4 Seiji Takeuchi, Osamu Kakuchi, Kenji Yamazoe *et al.*. Visible light point-diffraction interferometer for testing of EUVL optics [C]. *SPIE*, 2006, **6151**: 61510E
- 5 M. A. Johnson, D. W. Phillion, G. E. Sommargren *et al.*. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems[C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690P
- 6 G. E. Sommargren, D. W. Phillion, M. A. Johnson *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL [C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 316~328
- 7 Nie Liang, Han Jun, Yu Xun *et al.*. Phase shifting interferograms processing for fiber point-diffraction

- interferometer[C]. *SPIE*, 2008, **7155**: 71551G
- 8 Liu Ke, Li Yanqiu. High precision alignment of phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1845~1849  
刘克, 李艳秋. 相移点衍射干涉仪的高精度对准[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1845~1849
- 9 Shao Jing, Ma Dongmei. Testing the criterion wavefront diffracted by point diffraction interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508003  
邵晶, 马冬梅. 点衍射干涉仪基准波前测试技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508003
- 10 Peter J. de Groot. Vibration in phase-shifting interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2): 354~365
- 11 J. Schwider, R. Burow, K. E. Elssner *et al.*. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- 12 Katherine Creath. Error sources in phase-measuring interferometry[C]. *SPIE*, 1992, **1720**: 428~435
- 13 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029~2034  
苗二龙, 张健, 谷勇强等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~2034
- 14 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffractive in extreme ultraviolet region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2849~2854  
卢增雄, 金春水, 张立超等. 极紫外三维小孔矢量衍射波面质量分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2849~2854
- 15 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2321~2324  
马强, 刘伟奇, 李香波等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2321~2324
- 16 Xing Tingwen, He Guoliang, Shu Liang. Measurement errors in the 193 nm phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(2): 67~72  
邢廷文, 何国良, 舒亮. 193 nm 移相点衍射干涉仪的测量误差分析[J]. *光电工程*, 2009, **36**(2): 67~72
- 17 D. W. Phillion, G. E. Sommargren, M. A. Johnson *et al.*. Calibration of symmetric and non-symmetric errors for interferometry of ultraprecise imaging systems[C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690R

栏目编辑:何卓铭