

文章编号: 0258-7025(2007)04-0519-06

# 一种测量光刻机工件台方镜不平度的新方法

何 乐<sup>1,2</sup>, 王向朝<sup>1</sup>, 马明英<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 提出一种新的步进扫描投影光刻机工件台方镜不平度测量方法。以方镜平移补偿量与旋转补偿量为测量目标, 使用两个双频激光干涉仪分别测量工件台在  $x$  和  $y$  方向的位置和旋转量; 将方镜不平度的测量按照一定的偏移量分成若干个序列, 每一个序列包括对方镜有效区域的若干次往返测量; 根据所有序列的测量结果计算出方镜的旋转补偿量; 为每一个序列建立临时边界条件, 并据此计算出每一序列所测得的方镜粗略平移补偿量; 采用三次样条插值与最小二乘法建立每一个序列间的关系, 以平滑连接所有测量序列得到精确的方镜平移补偿量。结果表明, 该方法用于测量方镜平移补偿量, 测量重复精度优于 2.957 nm, 测量旋转补偿量, 测量重复精度优于 0.102  $\mu\text{rad}$ 。

**关键词** 测量; 干涉测量; 不平度; 方镜; 工件台; 光刻机

**中图分类号** TN 305.7; TN 247 **文献标识码** A

## Non-Flatness Measurement of Wafer Stage Mirrors in a Step-and-Scan Lithographic Tool

HE Le<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-zhao<sup>1</sup>, MA Ming-ying<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup>Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** A novel in-situ non-flatness measurement method of wafer stage mirrors in a step-and scan lithographic tool is presented. According to the impact of mirror non-flatness on wafer stage's positioning, the non-flatness of the mirror is expressed as translation compensation and rotation compensation usually. The double frequency laser interferometers are used to measure the horizontal positions and rotations of the wafer stage. The whole measurement is divided into several sequences. Each sequence includes a whole measurement of the valid area of the mirror. The rotation compensation of the mirror is calculated from each measured values of the wafer stage's rotation. The coarse translation compensation of the mirror is calculated recursively by setting a temporary boundary condition in each sequence. The cubic spline interpolation method and least square method are used to smooth and connect all the coarse translation compensations of the mirror to calculate the accurate translation compensation of the mirror. Experiment results prove that by this method the measurement reproducibility of the translation compensation of mirror is better than 2.957 nm and the measurement reproducibility of the rotation compensation of mirror is better than 0.102  $\mu\text{rad}$ .

**Key words** measurement; interferometry; non-flatness; mirror; wafer stage; lithographic tool

## 1 引言

主流光刻设备普遍采用步进扫描的工作方式,

能够实现低于 100nm 的光刻工艺<sup>[1~3]</sup>, 它的关键技术之一是工件台与掩模台的同步运动控制, 其精度直接影响光刻机的套刻精度与良率<sup>[4,5]</sup>。步进扫描

收稿日期: 2006-09-07; 收到修改稿日期: 2006-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(60578051)与国家 863 计划(2002AA4Z3000)资助项目。

作者简介: 何 乐(1978—), 男, 江苏镇江人, 博士研究生, 主要从事光刻模型、设备优化算法开发等方面的研究工作。

E-mail: hele0511@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 辽宁凌源人, 研究员, 博士生导师, 研究领域为信息光电子技术。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

光刻机采用平面镜干涉仪测量工件台的水平位置<sup>[6]</sup>。干涉仪发出测量光束入射工件台侧面的方镜,经反射回到干涉仪的接收器,由多普勒原理算出工件台的位置变化并实时反馈到运动控制系统,以确保工件台与掩模台的同步运动<sup>[7,8]</sup>。由于加工限制,方镜的表面存在不平度,使测量光束的光程发生变化,导致干涉仪的测量值与真实值存在偏差。即使实现工件台与掩模台的高精度同步控制,这种偏差也会导致实际曝光位置的偏移,使套刻精度与良率明显降低<sup>[9,10]</sup>。为解决这一问题,必须高精度地测量方镜不平度,并作为前馈参数提供给工件台运动控制系统,使曝光过程中工件台与掩模台以一致的匀速直线运动进行扫描<sup>[11]</sup>。由于工件台的垂向移动范围很小,方镜面形对工件台垂向运动的影响可以忽略,通常只测量方镜水平方向上的不平度。早期的测量方法<sup>[12~15]</sup>是利用三参考平面法结合外置工具对方镜不平度进行测量,易受到测量环境、机器结构等影响,难以测量出方镜工作时的不平度。Saburo Kamiya<sup>[16]</sup>提出先离线测量方镜不平度,安装后再用干涉仪测量工作状态下方镜不平度的粗略曲线,最后将二者叠加得到方镜不平度。由于单序列测量点过少的缺陷,该结果并不能精确地表示方镜工作时的不平度。J. Montoya 等<sup>[17]</sup>提出由采样数据解析出方镜不平度的方法,由于受到干涉仪测量系统的约束,建立稳定的逆传递函数比较困难,同时也难以消除来自工件台自身非正交性和基底不平度的影响,在长期的运作中稳定性较差。

为此本文提出一种新的工件台方镜不平度测量方法,以方镜平移补偿量与方镜旋转补偿量为测量目标,采用多序列的方法对工件台位置和旋转量进行测量,通过样条插值与最小二乘原理平滑连接所有测量序列,并计算出精确的方镜不平度。

## 2 测量原理

### 2.1 方镜不平度计算原理

图 1 给出了工件台干涉仪测量系统的示意图。其中,  $x$  方向干涉仪测量工件台的  $x$  坐标与绕  $z$  轴的旋转量  $R_x$ ,  $y$  方向干涉仪测量  $y$  坐标与绕  $z$  轴的旋转量  $R_y$ 。理论上,由  $x$  方向干涉仪和  $y$  方向干涉仪测得的旋转量相同。受到方镜不平度的影响,实测的  $R_x$  与  $R_y$  存在差值,通过该差值可确定方镜的不平度。

以  $y$  方向干涉仪为例,图 2 给出了方镜不平度

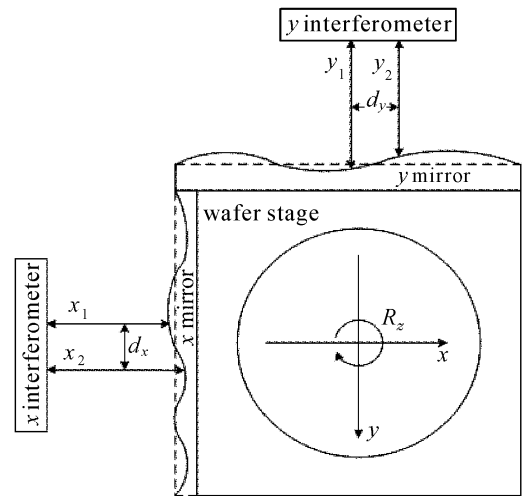


图 1 工件台干涉仪测量系统示意图  
Fig. 1 Interferometer measurement system of a wafer stage

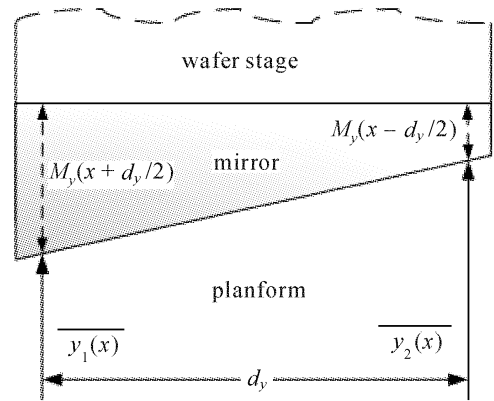


图 2 方镜不平度对测量结果的影响  
Fig. 2 Impact of mirror non-flatness on the measurement of wafer stage's horizontal position

对干涉仪测量的影响。用  $M$  表示方镜不平度的影响,工件台的实际  $y$  坐标为

$$y_A(x) = \frac{\overline{y_1(x)} + \overline{y_2(x)}}{2} + \frac{M(x + d_y/2) + M(x - d_y/2)}{2} = \overline{y(x)} + M_y(x), \tag{1}$$

绕  $z$  轴的实际旋转量为

$$R_{zy_A}(x) = \frac{\overline{y_2(x)} - \overline{y_1(x)}}{d_y} + \frac{M(x - d_y/2) - M(x + d_y/2)}{d_y} = \overline{R_{zy}(x)} + MR_{zy}(x), \tag{2}$$

式中  $\overline{y_1}$  和  $\overline{y_2}$  为  $y$  方向的干涉仪两束测量光各自的测量平均值;  $d_y$  为两个测量光束的间距;  $\overline{y}$  和  $\overline{R_{zy}}$  分别为测得的位置平均值和旋转量平均值;  $M_y$  和

$MR_{zy}$  分别为  $y$  方向方镜的平移补偿量和旋转补偿量。由于工件台是刚体,工件台实际的  $R_{zx_A}$  与  $R_{zy_A}$  始终相等。以工件台坐标零点为零位,设在该点上  $MR_{zx}(0) = 0$ ,沿  $x$  方向测量并始终保持  $R_{zx}$  为 0,由式(2)得

$$MR_{zy}(x) = -\overline{R_{zy}(x)}, \quad (3)$$

通过式(3)可测得  $y$  方向方镜相对于  $x$  方向方镜零点的旋转补偿量。此外,根据  $R_{zx} = 0$  可得

$$\begin{aligned} \overline{R_{zy}(x)} + \overline{R_{zy}(x+d_y)} = \\ \frac{2}{d_y} \left( \frac{M(x+3d_y/2) + M(x+d_y/2)}{2} - \right. \\ \left. \frac{M(x+d_y/2) + M(x-d_y/2)}{2} \right), \quad (4) \end{aligned}$$

再由式(1)得

$$M_y(x+d_y) = M_y(x) + \frac{\overline{R_{zy}(x+d_y)} + \overline{R_{zy}(x)}}{2} d_y, \quad (5)$$

式(5)表示了计算方镜平移补偿量的递推公式,根据初始值与测量的工件台旋转量,可计算出方镜的平移补偿量。

## 2.2 方镜不平度测量方案

如图 3 所示,采用干涉仪测量光束的间距  $d_y$  作为步进距离完成对方镜不平度的一次测量过程,称为一个测量序列。每一个测量序列包括对方镜有效区域的  $K$  次往返测量,对往返测量的结果求几何平均以消除系统误差。考虑到干涉仪测量光束间距较大,在一个测量序列中的测量点 ( $N = \text{floor}[(x_{\text{end}} - x_{\text{start}})/d_y] + 1$ ) 较少,故采用多序列测量方案以增加测量点数量。如图 3 所示,测量序列起始点之间的偏移为  $L$ ,序列的数量由  $n = \text{floor}(d_y/L) + 1$  确定。考虑到测量序列的起始位置存在固定位置偏移,因此所有测量序列可合并到一次测量中完成。整个测量过程描述为:

1) 将工件台移至  $x = x_{\text{start}}, y = 0$  位置,利用  $x$  方向干涉仪测量工件台的旋转量  $R_{zx}$ ,再利用闭环

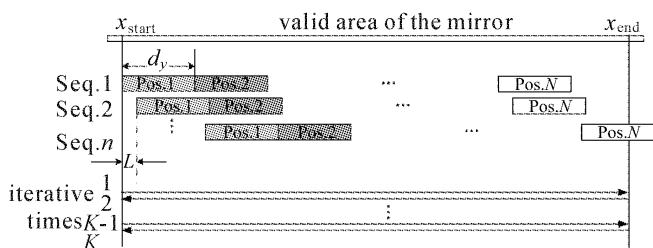


图 3 测量序列与测量序列之间的位置偏移

Fig. 3 Measurement sequences and the position offsets among them

控制系统锁定工件台的旋转量  $R_{zx}$  为零;

2) 利用闭环控制系统将测量光束  $y_1$  所测点锁定于  $x$  轴,然后利用测量光束  $y_2$  进行测量;

3) 工件台沿  $x$  轴步进距离  $L$  到达下一个测量点,重复步骤 2;

4) 测完最后一个测量点后,将  $y_1$  与  $y_2$  的角色互换,将测量光束  $y_2$  所测点锁定于  $x$  轴,利用测量光束  $y_1$  进行反方向测量;

5) 按照以上步骤,进行  $K$  次迭代测量并求几何平均值,完成对测量数据的采集。

## 2.3 方镜不平度计算优化

根据测量方案,方镜上共有  $N \times n$  个被测点。每一个测量点的位置表示为

$$x(i, j) = x_{\text{start}} + id + jS, \quad (6)$$

式(6)中满足  $0 \leq jS < d, x_{\text{start}} < x(i, j) < x_{\text{end}}$ 。将测量数据代入式(3)求出  $y$  方向方镜的旋转补偿量。将测量数据分配到每一个测量序列,为每一个序列建立初值:  $M_y[x(1, j)] = 0$ 。再根据式(5)可计算出  $y$  方向方镜的  $n$  组粗略平移补偿量。鉴于实际初始条件的差异,这  $n$  组平移补偿量之间存在不一致性,如图 4 所示。

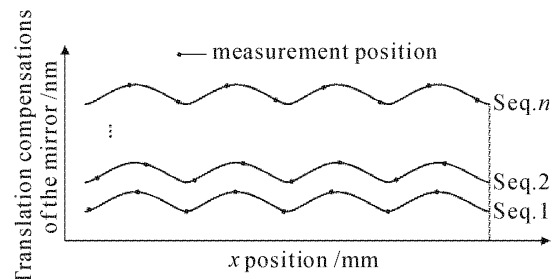


图 4 不同测量序列计算出方镜平移补偿量

Fig. 4 Translation compensations of the mirror calculated by different sequences

为得到精确的方镜平移补偿量,将所有序列平滑连接以消除初值差异。先定义插值数据

$$M_y = AM_{y_i} + BM_{y_{i+1}} + CS_i + DS_{i+1}, \quad (7)$$

式中  $A = \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j}, B = 1 - A, C = \frac{1}{6}(A^3 - A)(x_{j+1} - x_j)^2, D = \frac{1}{6}(B^3 - B)(x_{j+1} - x_j)^2, S$  为三次样条插值函数,满足  $M_y = AS_j + BS_{j+1}$ 。利用式(7)得到统一测量点坐标后的各序列测量值。给每一个序列定义一个偏移量  $O_i$ ,以  $\overline{M_y}(x_{kj})$  与  $\overline{M_y}(x_{rj})$  表示在序列  $k$  和序列  $r$  中方镜在位置  $j$  上平移补偿量的三次样条插值,依据最小二乘原理定义

$$R = \sum_{j=1}^n \{ \{ [M_y(x_{kj}) - O_k] - [\overline{M_y(x_{rj})} - O_r] \}^2 + \{ [\overline{M_y(x_{kj})} - O_k] + [M_y(x_{rj}) - O_r] \}^2 \}, \quad (8)$$

将式(8)对 $(O_k - O_r)$ 进行偏导,求得使 $R$ 最小的结果

$$O_k - O_r = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n [M_y(x_{kj}) - \overline{M_y(x_{rj})}] + [\overline{M_y(x_{kj})} - M_y(x_{rj})], \quad (9)$$

设定初始值 $O_1 = 0$ ,由式(9)求出所有序列的偏移量。将这些偏移量叠加到对应的平移补偿量序列,再连接各个序列就得到精确的方镜平移补偿量。

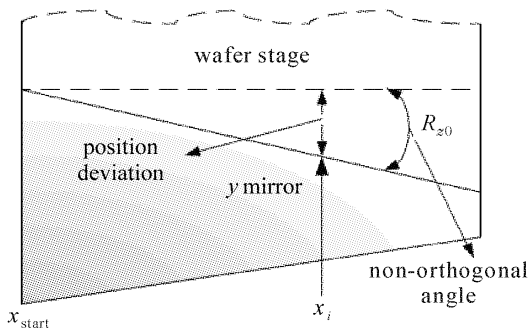


图5 工件台相邻侧面非正交性的影响

Fig. 5 Impact of non-orthogonality between the neighboring side faces of a wafer stage

考虑到如图5所示的工件台相邻侧面非正交性影响,对所有测量的 $R_{zy}$ 求平均得到非正交性夹角

$R_{z0}$ ,利用非正交性夹角与相对 $x_{start}$ 位移的乘积求出每一测量点的位置偏移。将所求结果加到已计算的方镜不平度上,得到精确的工件台 $y$ 方向方镜旋转偏移量和平移偏移量为

$$MR_{zy}(i) = -\overline{R_{zy}(i)} + R_{z0},$$

$$M_y(i+1) = M_y(i) + \frac{\overline{R_{zy}(i+1)} + \overline{R_{zy}(i)}}{2}d + O_i + (x - x_{start})R_{z0},$$

$$R_{z0} = \text{mean}(R_{zy}), \quad (10)$$

其中,函数 $\text{mean}()$ 表示求几何平均值。

### 3 实验与分析

在洁净室中以工件台实验平台对该方法进行验证。 $x$ 方向方镜有效长度为250 mm, $y$ 方向方镜有效长度为200 mm;干涉仪两测量光束 $x_1$ 与 $x_2$ 的间距 $d_x = 25.161367074$  mm, $y_1$ 和 $y_2$ 的间距 $d_y = 25.151661072$  mm;设置工件台步进间距为0.500000000 mm。计算出 $x$ 方向有51个测量序列,每个序列有10个测量点; $y$ 方向有51个测量序列,每个序列有8个测量点。设置每一个测量序列往返测量10次。首先计算每一点的测量平均值,考虑到浮点数舍入误差造成测量点间隔不均匀,以及不同序列间测量点坐标不一致,先采用三次样条插值法

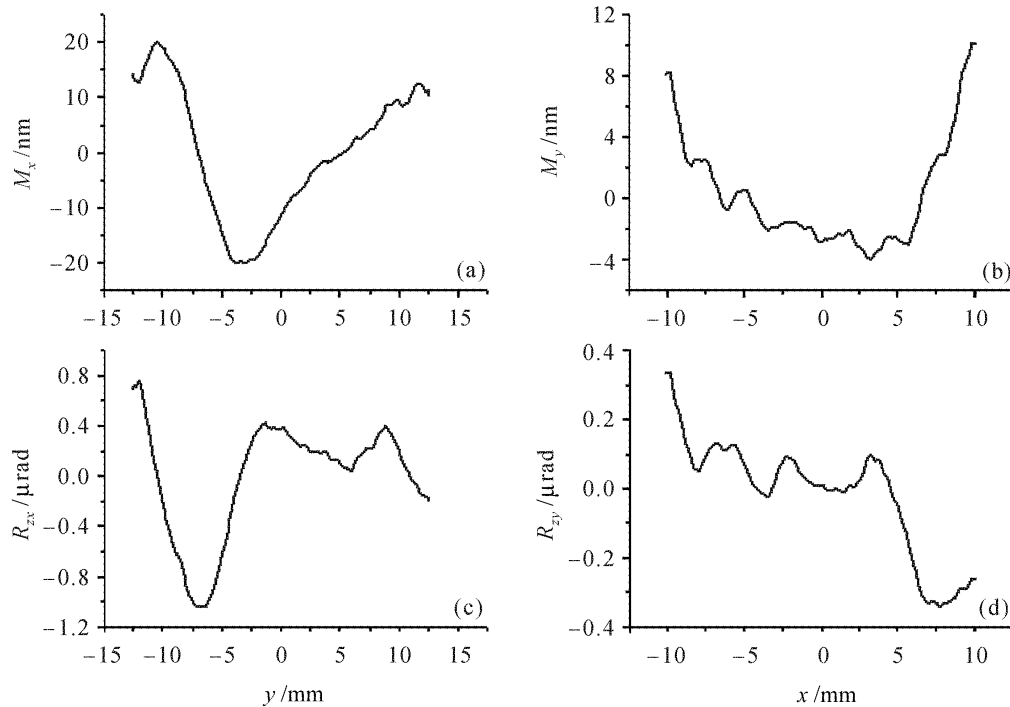


图6 方镜不平度的测量结果

(a),(c)分别为 $x$ 方向方镜的平移补偿量和旋转补偿量;(b),(d)分别为 $y$ 方向方镜的平移补偿量和旋转补偿量

Fig. 6 Measurement results of non-flatness of the mirror

(a),(c) the translation compensation and rotation compensation of the  $x$  mirror respectively;  
(b),(d) the translation compensation and rotation compensation of the  $y$  mirror respectively

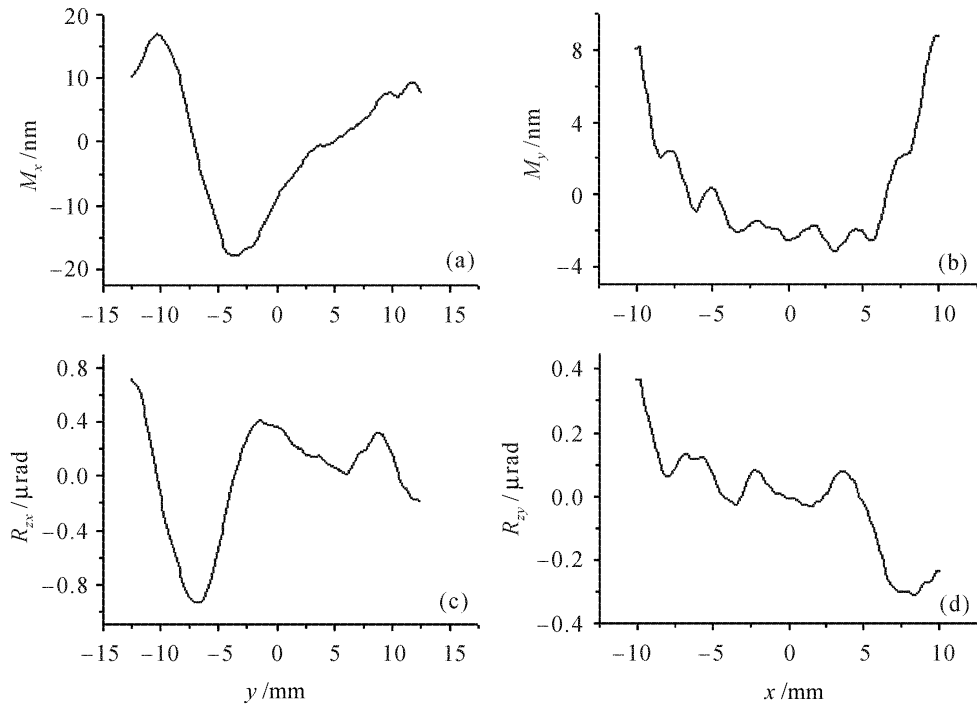


图 7 方镜不平度数次测量的平均结果

(a),(c)分别为  $x$  方向方镜平移补偿量和旋转补偿量的平均结果;  
 (b),(d)分别为  $y$  方向方镜平移补偿量和旋转补偿量的平均结果

Fig. 7 Average values of the several measurements with the same condition

(a), (b) the average values of the translation compensation and rotation compensation of the  $x$  mirror respectively;  
 (c), (d) the average values of the translation compensation and rotation compensation of the  $y$  mirror respectively

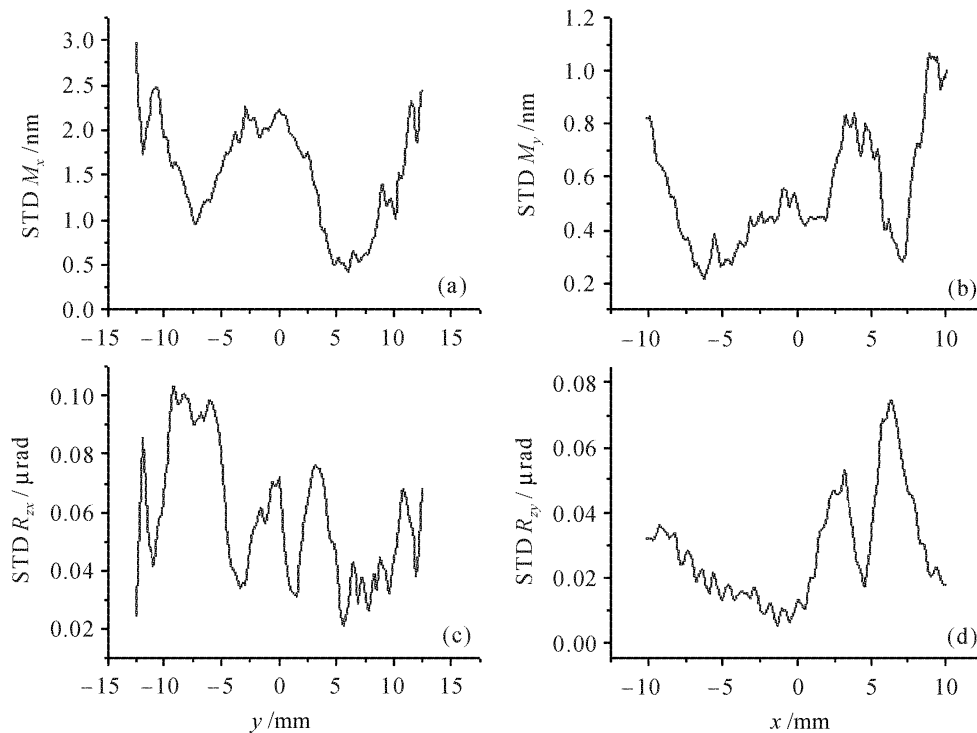


图 8 方镜不平度数次测量结果的标准差分布

(a),(c)分别为  $x$  方向方镜平移补偿量和旋转补偿量的标准差分布;  
 (b),(d)分别为  $y$  方向方镜平移补偿量和旋转补偿量的标准差分布

Fig. 8 Layout of standard deviations of the several measurements

(a), (b) the standard deviations of the translation compensation and rotation compensation of the  $x$  mirror respectively;  
 (c), (d) the standard deviations of the translation compensation and rotation compensation of the  $y$  mirror respectively

对每一个序列的测量点进行插值归整,然后计算出方镜的平移补偿量与旋转补偿量。

图 6 给出了测得的工件台方镜平移补偿量和旋转补偿量,其中  $x$  方向方镜的最大平移补偿量跨度为 40.052 nm,最大旋转补偿量跨度为 1.799  $\mu\text{rad}$ ;  $y$  方向方镜的最大平移补偿量跨度为 14.203 nm,最大旋转补偿量跨度为 0.678  $\mu\text{rad}$ 。图 7 和图 8 分别给出了同样实验条件下,实验间隔为 60 min 时,6 次实验的平均结果以及实验结果的标准差分布(STD)。其中,  $x$  方向方镜最大的平移补偿量标准差为 2.957 nm,平均平移补偿量标准差为 1.534 nm,最大的旋转补偿量标准差为 0.102  $\mu\text{rad}$ ,平均旋转补偿量标准差为 0.058  $\mu\text{rad}$ 。  $y$  方向方镜最大的平移补偿量标准差为 1.065 nm,平均平移补偿量标准差为 0.537 nm,最大的旋转补偿量标准差为 0.075  $\mu\text{rad}$ ,平均平移补偿量标准差为 0.028  $\mu\text{rad}$ 。实验结果表明,该方法用于测量方镜面形平移补偿量,在实验间隔为 60 min,同条件下 6 次测量的重复精度优于 2.957 nm,用于测量平移补偿量,同条件下 6 次测量的重复精度优于 0.102  $\mu\text{rad}$ 。

在实际应用过程中,测量系统受到环境影响,会产生随机的漂移导致测量数据不准确。目前该方法中采用数据滤波来消除这种影响,滤波的基本原则是滤掉明显超过上一次测量值两倍或小于上一次测量值二分之一的原始数据,再使用过滤后的原始数据平均值进行计算。除此以外,还可以结合临近测量点加权平均的方法进一步消除环境的影响。目前,本实验室将神经网络用于优化临近点和权值的选择,由于受到实验设备和条件的限制,此方法需要进一步实验验证。

## 4 结 论

提出了一种在线测量工件台方镜不平度的新方法。以双频激光干涉仪作为测量工具,采用多序列的方式测量工件台的水平位置与绕  $z$  轴的旋转量,根据测量结果计算出多组方镜的粗略不平度,以三次样条插值法统一各序列的测量点并借助最小二乘原理平滑连接各组测量值,得到精确的方镜不平度。实验结果表明,使用该方法测量方镜平移补偿量,测量重复精度优于 2.957 nm;测量旋转补偿量,测量重复精度优于 0.102  $\mu\text{rad}$ 。此外,该方法也可用于测量光刻机中掩模台方镜的不平度以及其他高精度定位平台的方镜不平度。

## 参 考 文 献

- 1 R. Rubingh, Y. van Dommelen, S. Tempelaars *et al.*. Performance of a high productivity 300 mm dual stage 193 nm 0.75 NA TWINSCAN™ AT: 1100B system for 100 nm applications [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2003, **2**(1):8~18
- 2 Atsushi Otake, Emi Araya, Hikaru Momose *et al.*. Design and development of novel monomers and copolymers for 193-nm lithography [J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2004, **17**(4):475~482
- 3 Itaru Fujita, Fumio M. Sakai, Shigeyuki Uzawa. Next-generation scanner to sub-100-nm lithography [C]. *SPIE*, 2003, **5040**:811~821
- 4 Philip D. Henshaw, Donald P. DeGloria, Sandra A. Kelly *et al.*. Real-time stage position measurement with nanometer-scale accuracy [C]. *SPIE*, 1997, **3051**:913~921
- 5 Boudewijn G. Sluijk, Tom Castenmiller, Richard du Croo de Jongh *et al.*. Performance results of a new generation of 300-mm lithography systems [C]. *SPIE*, 2001, **4346**:544~557
- 6 K. C. Fan, M. J. Chen. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages [J]. *Precision Engineering*, 2000, **24**:15~23
- 7 Tao Zhu, Yanqiu Li. Study on control strategy of wafer stage and reticle stage of EUVL [C]. *SPIE*, 2006, **6149**:512~515
- 8 Manohar Virdee. Absolute noncontacting method to characterize x-ray mirrors with large radii with nanometre accuracy [C]. *SPIE*, 1993, **2088**:170~174
- 9 Mark Williams, Peter Fail, Paul M. Bischoff *et al.*. Six degrees of freedom Mag-Lev stage development [C]. *SPIE*, 1997, **3051**:856~867
- 10 M. A. van den Brink, J. M. D. Stoeldraijer, H. F. D. Linders *et al.*. Overlay and field by field leveling in wafer steppers using an advanced metrology system [C]. *SPIE*, 1992, **1673**:330~346
- 11 C. J. Evans, A. D. Davies, T. Schmitz *et al.*. Interferometric figure metrology; enabling in-house traceability [C]. *SPIE*, 2001, **4450**:81~93
- 12 G. Schulz, J. Grzanna. Absolute flatness testing by the rotation method with optimal measuring-error compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19):3767~3780
- 13 E. A. Rudenchik, I. E. Kozhevnikov, N. P. Cheragin *et al.*. Method for absolute calibration of reference plates for interferometric inspection of surfaces [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2001, **90**(1):127~135
- 14 Liang Qian, Shi Xiangchun, Fu Wenqiang. Misalignment property analysis of corner cube reflector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):306~310  
梁 倩,施翔春,付文强.立方反射镜失调特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):306~310
- 15 Zhang Yaoning, Cheng Zuhai. Interference measurements for roughness of laser mirrors [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(2):141~144  
张耀宁,程祖海.激光镜镜面粗糙度的干涉测量[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(2):141~144
- 16 Saburo Kamiya. Method and apparatus for correcting linearity errors of a moving mirror and stage [P]. *United States Patent*, 5790253, 1998-08-04
- 17 J. Montoya, R. K. Heilmann, M. L. Schattenburg. Measuring two-axis stage mirror non-flatness using linear/angular interferometers [C]. *ASPE*, 2004, **34**:382~385