

基于平面光栅尺的掩模台位置误差分析与验证

郝春晓^{1*}, 张文涛^{1,2}, 王献英², 黄逊志²

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

²上海微电子装备(集团)股份有限公司, 上海 201203

摘要 为实现掩模台水平向三自由度高精度的运动定位,掩模台测量系统需要建立准确的多自由度解耦测量模型。采用二维衍射平面光栅尺建立掩模台自由度位置测量系统,并主要分析平面光栅尺和读头产生的多个安装误差使测量掩模台位置存在偏差的原因。首先结合安装布局设计出三自由度位移模型,然后结合平面光栅尺和读头的安装误差,分析掩模台位置产生阿贝误差与余弦误差的原因,并设计补偿算法来减小掩模台位置误差,再通过 MATLAB 软件对模型进行仿真,发现耦合系数具有收敛性;最后提出一种误差校准方法,以双频激光干涉仪测量系统为基准,利用最小二乘法拟合平面光栅尺位置模型的自由度耦合系数。结果表明,该算法能有效地对掩模台的阿贝误差与余弦误差进行补偿,实现 5 nm 的测量系统不确定度。

关键词 测量;平面光栅尺;自由度;误差;校准

中图分类号 TH822

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.231202

Analysis and Verification of Position Error of Reticle Stage Based on Planar Grating

Hao Chunxiao^{1*}, Zhang Wentao¹, Wang Xianying², Huang Xunzhi²

¹ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China

Abstract To realize the horizontal positioning of a reticle stage with three degrees of freedom and high accuracy, it needs to establish an accurate multi-degree of freedom decoupling measurement model in the reticle-stage-measurement system. In this study, a two-dimensional diffraction planar grating is used to establish a reticle stage degree-of-freedom position measurement system, and the main reasons for the deviation in the position of the reticle stage are analyzed in terms of the multiple installation errors that are caused by the planar grating and read head. Firstly, the displacement model of the three degrees of freedom of the reticle stage is designed according to the installation layout; then, the installation errors of the planar grating and read head are combined to analyze the cause of the Abbe and cosine errors generated by the position of the reticle stage. A compensation algorithm is designed to reduce the position error of the reticle stage and then the model is simulated using MATLAB software, observing the convergence of coupling coefficient. Finally, a calibration error method is proposed. Using the dual-frequency laser interferometer measurement system as the benchmark and using the least squares method, the coupling coefficient of the degree of freedom of the planar grating position model is determined. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively compensate the Abbe and cosine errors of the reticle stage; thus, the uncertainty in the measurement system reaches 5 nm.

Key words measurement; planar grating; degree of freedom; error; calibration

OCIS codes 120.3180; 050.1950; 120.4640

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-05-10; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101007-003)

* E-mail: glietzw@163.com

1 引言

光刻机在集成半导体行业^[1]中起着至关重要的作用,在其运动台的运动系统中,掩模台的位置测量精度会在很大程度上影响整个光刻机的套刻精度,所以超精密测量系统是实现超精密运动控制的关键。

传统的运动台测量系统一般以激光干涉仪^[2]为核心部件,通过激光干涉仪运动位置与光程之间的关系来精密测量运动台的位置。文献[3]开发的激光测量运动台的平动精度可达 25 nm,行程为 120 mm;文献[4]研究的六自由度激光测量平台具有 5 nm 的控制精度。但这些精密测量系统会在很大程度上受到外界环境的影响^[5],尤其是文献[6]还要采用自制波长跟踪器进行补偿,以提高被测运动台的伺服精度。平面光栅尺位移测量系统^[7]以平面光栅的栅距作为位移量的测量基准,大幅减少了温度、压力等环境因素对光源波长的影响,从而大大降低了对位移测量的影响,提高了超精度测量系统的精度。所以平面光栅尺位移测量系统得到了广泛应用^[8]。

文献[9]中阐述了衍射式光栅干涉测量系统的工作原理和特点,同时详细列举了光栅干涉测量系统的一些独特优点。文献[10]采用一维光栅干涉仪对掩模台的三自由度高速运动测量系统进行了建模分析^[11],完善了基于光栅干涉仪的掩模台对位移高

速、高精度测量及定位的理论。在此基础上,本文利用两个平面光栅尺建立了超高精度的掩模台三自由度测量模型,从而搭建了掩模台的超高精度测量系统,并利用校准方法对测量系统的位置误差进行了补偿。

2 掩模台位置测量系统

2.1 测量光路

激光光源^[12](He-Ne dual-frequency laser)经过分光镜后被分成两束信号。其中的一束作为平面光栅尺测量光路的输入信号。激光器首先发出不同频率(f_1 和 f_2)的两束信号,且这两束信号的频率保持不变,经过分光镜 S1 后分成参考信号和测量信号,参考信号经过检偏器 P1 后传送至接收端,测量信号则进入光栅尺读头(read head)光路,结合多普勒效应和光学干涉原理实现位移测量,该信号经过偏振分光镜 PBS1 和检偏器 P2 后与参考信号一起被输入到接收端,计算后可得到掩模台的位移。另一束信号作为干涉仪测量系统光路的输入信号。激光器^[13]发出的两束信号 f_1 和 f_2 经过分光镜 S2 后分成参考信号和测量信号,参考信号经过检偏器 P3 后传送至接收端。测量信号经角锥棱镜 M1 和 M2 发生多次镜面反射,结合多普勒效应和光学干涉原理实现位移测量,该信号经过偏振分光镜 PBS2 和检偏器 P4 后与参考信号一起输入到接收端,进行计算后可得到掩模台的位移。

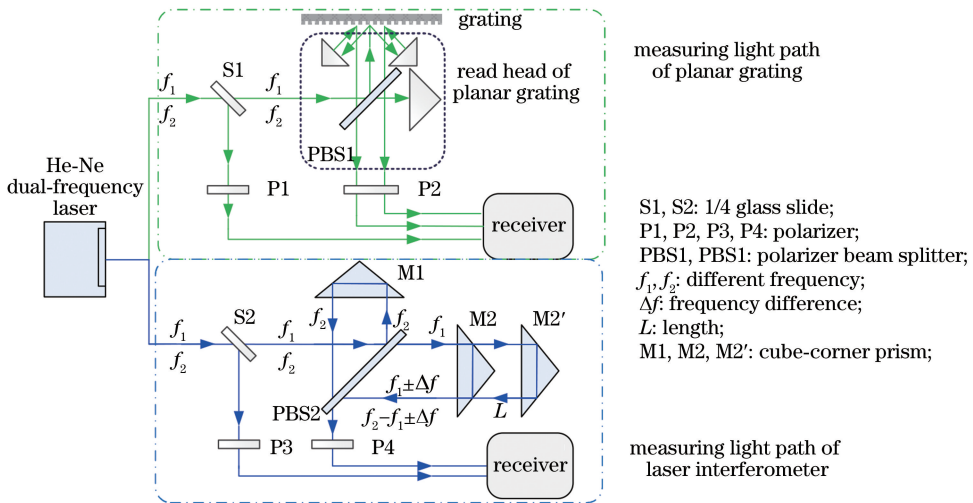


图1 平面光栅尺与激光干涉仪的测量光路图

Fig. 1 Schematic of measurement optical paths of planar grating and laser interferometer

2.2 测量系统的安装布局

掩模台位置测量系统主要有两种:一种是以平面光栅尺作为核心部件,沿着 X 向等距离安装平面

光栅尺,根据两个平面光栅尺在 X_1 、 Y_1 和 X_2 、 Y_2 方向产生的莫尔条纹数计算掩模台的位移;然后分析由安装和制造误差等产生的阿贝误差和余弦误差,

并将其补偿到掩模台自由度的耦合误差中,最后建立平面光栅尺的位置测量模型,用于测量 x 、 y 和 R_z 这三个自由度;另一种是以双频激光干涉仪^[14]作为核心部件,基于位置运动引起光程的变化,在 X 、 Y 向各采用三轴激光建立激光干涉仪的位置测量模型^[14],用于测量 x 、 y 、 R_{zx} (R_{zy})、 R_x 和 R_y 五个自由度,其中 R_{zx} 和 R_{zy} 为一个自由度。

3 测量模型

3.1 坐标系定义

掩模台坐标系(RSC)附着于掩模台上,原点定义为掩模台上表面的中心,垂直向上远离物镜方向为 Z 向的正方向,沿扫描方向指向照明模块的方向为 Y 向的正方向, X 向由右手法则确定。

掩模台零位坐标系(RSZS)定义为台六自由度为 0 的情况下的台坐标系。理想情况下,台零位坐标系原点与物镜光轴中心重合。

掩模台位置:台六自由度位置可分为平移量 x 、 y 、 z 以及旋转倾斜量 R_x 、 R_y 、 R_z 。掩模台的平移量 x 、 y 、 z 定义为零位坐标系原点在掩模台坐标系下的位移量;掩模台的倾斜、旋转量 R_x 、 R_y 、 R_z 定义为掩模台绕零位坐标系的 X 、 Y 、 Z 轴转过的角度,定义在掩模台零位坐标系下,其正、负方向满足右手定则。

3.2 测量模型

掩模台平面光栅尺主要对掩模台水平方向的自由度进行测量;平面光栅尺被安装在掩模台的两侧,两个读头分别测量三个自由度(图 2)。

$$\begin{cases} x = \varphi_1 + \xi_{R_x 2x} \times R_x + \xi_{R_y 2x} \times R_y + \xi_{R_z 2x} \times R_z + \zeta_{R_y, y 2x} \times R_y \times y \\ y = \varphi_2 + \xi_{R_x 2y} \times R_x + \xi_{R_y 2y} \times R_y + \xi_{R_z 2y} \times R_z + \zeta_{R_x, y 2y} \times R_x \times y \\ R_z = \varphi_3 + \xi_{R_x 2R_z} \times R_x + \xi_{R_y 2R_z} \times R_y + \xi_{R_z 2R_z} \times R_z + \zeta_{R_x, y 2R_z} \times R_x \times y \end{cases}, \quad (1)$$

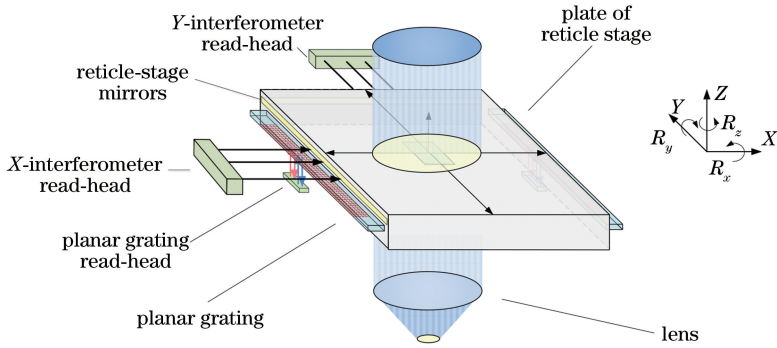


图 2 掩模台的平面光栅尺与激光干涉仪的安装布局图

Fig. 2 Installation layout of planar grating and laser interferometer of reticle stage

式中: φ_1 为光斑在平面光栅尺 x 向移动的位移; φ_2 为光斑在平面光栅尺 y 向移动的位移; φ_3 为光斑在平面光栅尺 R_z 向移动的位移; $\xi_{R_x 2x}$ 为倾斜自由度 R_x 对 x 向的耦合误差系数; $\xi_{R_y 2x}$ 为倾斜自由度 R_y 对 x 向的耦合误差系数; $\xi_{R_z 2x}$ 为旋转倾斜自由度 R_z 对 x 向的耦合误差系数; $\zeta_{R_y, y 2x}$ 为倾斜自由度 R_y 和 y 向自由度 y 对 x 向的耦合误差系数; $\xi_{R_x 2y}$ 为倾斜自由度 R_x 对 y 向的耦合误差系数; $\xi_{R_y 2y}$ 为倾斜自由度 R_y 对 y 向的耦合误差系数; $\xi_{R_z 2y}$ 为倾斜自由度 R_z 对 y 向的耦合误差系数; $\zeta_{R_x, y 2y}$ 为倾斜自由度 R_x 和 y 向自由度 y 对 y 向的耦合误差系数; $\xi_{R_x 2R_z}$ 为倾斜自由度 R_x 对 R_z 向的耦合误差系数; $\xi_{R_y 2R_z}$ 为倾斜自由度 R_y 对 R_z 向的耦合误差系数; $\xi_{R_z 2R_z}$ 为 x 向自

由度 x 对 R_z 向的耦合误差系数; $\zeta_{R_x, y 2R_z}$ 为倾斜自由度 R_x 和 y 向自由度 y 对 R_z 向的耦合误差系数;

4 误差分析

4.1 误差定义

4.1.1 阿贝误差

非入射点处光栅平面的旋转或倾斜导致入射光束产生的光斑在光栅上移动的位移变化称为阿贝误差。具体而言:当光栅平面绕着入射到平面光栅尺上的点倾斜或旋转时,入射光束产生的光斑在光栅上移动的位移不发生改变,无误差产生。而当光栅平面绕着入射到平面光栅尺上的点倾斜或旋转时,如图 3(a)所示,入射光束产生的光斑在光栅上移动

的位移将发生改变,变化量 $\Delta l = A_{rm} \cdot \alpha$,其中 A_{rm} 为阿贝臂, α 为平面旋转角。

4.1.2 余弦误差

入射光束的旋转或倾斜引起光斑在光栅上的位

移变化称为余弦误差,如图 3(b)所示。当垂直于光栅平面的一束光旋转一定角度时,光斑在光栅上移动的位移变为 $d' = d / \cos \beta$,其中 d' 为实际位移, d 为名义位移, β 为余弦角。

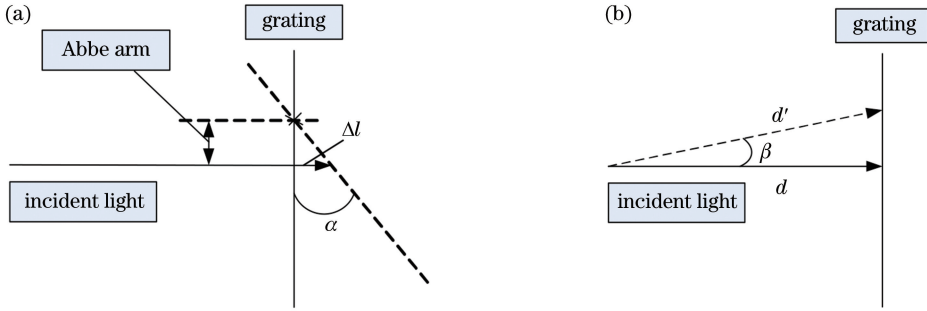


图 3 模型误差解析图。(a)阿贝误差;(b)余弦误差

Fig. 3 Analytical diagrams of model errors. (a) Abbe error; (b) cosine error

4.2 误差分析

理想情况下,当掩模台处在零位时,读头垂直发出测量光束,并照射到平面光栅尺平面上产生光斑,光斑在光栅尺上移动的位移应该是 0;当掩模台运动时,光斑在平面光栅尺上移动的位移即为掩模台的名义位置,也是实际位置。但在实际情况下,掩模台的运动平面是曲面,且各个自由度之间会互相影响,也就是说光斑在平面光栅尺上移动的位移并不是严格按照单方向运动的,即平面光栅尺平面与掩模台实际位移平面之间存在自由度耦合误差,从而导致掩模台的名义位置和实际位置存在一定偏差。

在分析误差之前,首先认为,当 X 向和 Z 向中,单方向产生一定的位移时,由于 X、Z 向垂直于 Y 向,根据其正交性,在 Y 向并不会产生自由度耦合误差;又因为平面光栅尺是增量式测量部件,所以 Y 向也不会产生耦合误差。因此,只有 R_x 、 R_y 和 R_z

单向或者平移与旋转耦合作用时才会产生耦合误差。下面就以一个平面光栅尺为例分析 Y 向耦合误差。

4.2.1 旋转倾斜耦合误差

1) $\xi_{R_x, 2y}$

如图 4 所示,坐标系 O-XYZ 是其掩模台实际运动的坐标系 RSC,坐标系 O_1 -XYZ 是光斑在平面光栅尺 1 运动的平面光栅尺坐标系 PGC1。理想情况下,当平面光栅尺标准平面 PGS 与掩模台标准平面 RSS 共面时,即使掩模台产生一定的旋转角 R_x ,光斑在平面光栅尺测量平面 PGM 上移动的位移也会等于掩模台测量平面 RSM 移动的位移,即图 4 所示的 $B_1C_1 = BC = B_2C_2$,不会产生位移误差。但是,当平面光栅尺测量平面 PGM 与掩模台测量平面 RSM 不共面时,即在 z 向存在 ΔZ 的高度差,同时掩模台绕 x 方向产生一定的旋转角 R_x ,这时光斑在平

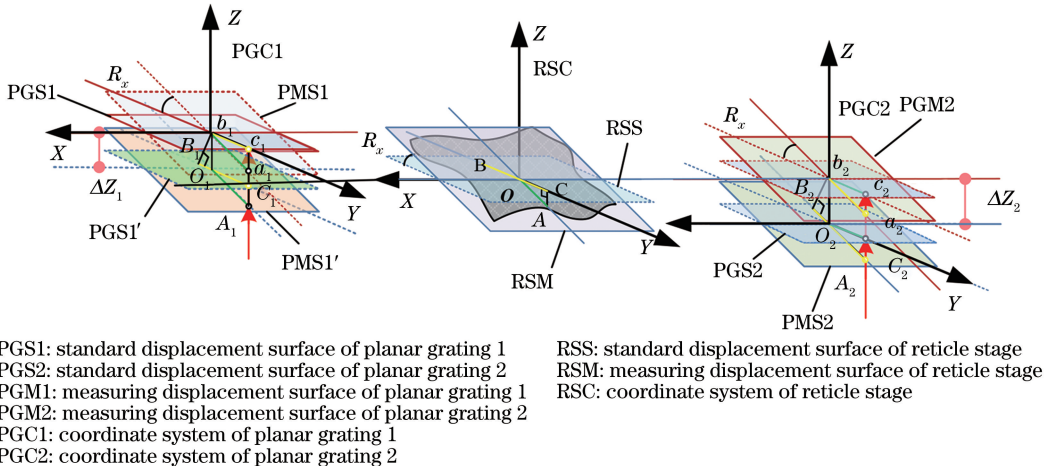


图 4 自由度 R_x 对 y 向自由度的误差分析图

Fig. 4 Error analysis diagrams of degree of freedom R_x with respect to degree of freedom in y direction

面光栅尺测量平面 PGM 上移动的位移与掩模台测量平面 RSM 移动的位移不相等,即 $b_1c_1 \neq BC \neq b_2c_2$,从而导致测量掩模台位置出现一定偏差。

2) $\xi_{R_z,2y}$

从图 5 可以看出,平面光栅尺在掩模台坐标系 RSC 下的布局决定了掩模台标准平面 RSS 与平面光栅尺标准平面 PGS 产生 X 向的一段物理空间位移。平面光栅尺标准平面 PGS1 和平面光栅尺标准平面 PGS2 分别于掩模台中心 O 产生 X 向位移,即 dX_1 和 dX_2 。当平面光栅尺测量平面 PGM

相对于掩模台坐标系 RSC 下产生一定的旋转倾斜 R_z 时,就会产生阿贝臂。理想情况下,当两个平面光栅尺基于掩模台零位坐标系 RSZS 的物理位移相等时,即 dX_1 和 dX_2 相等时,也就是平面光栅尺标准平面 PGS1 和平面光栅尺标准平面 PGS2 产生的阿贝臂相等,就不会产生阿贝误差;但在现实情况下, dX_1 和 dX_2 是不相等的,从而导致平面光栅尺测量平面 PGM1 和平面光栅尺测量平面 PGM2 产生的阿贝臂不相等,因此就会产生阿贝误差。

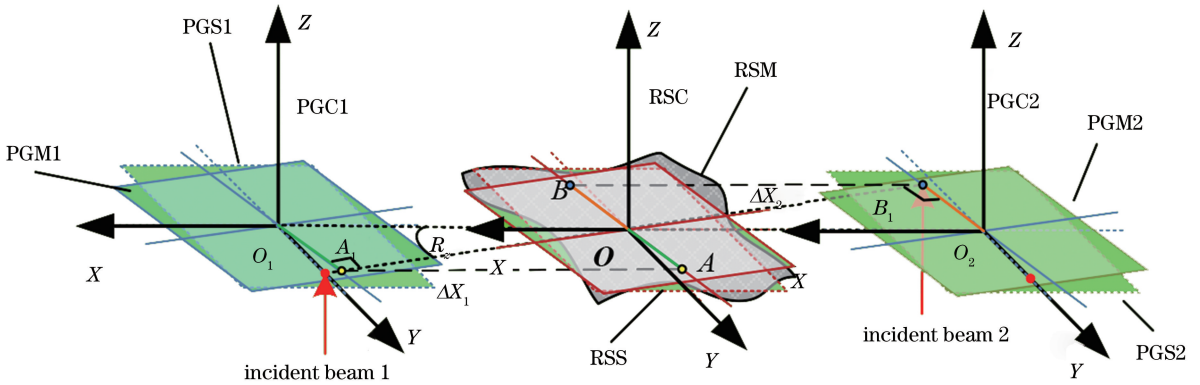


图 5 自由度 R_z 对 y 向自由度的误差分析图

Fig. 5 Error analysis diagrams of degree of freedom R_z with respect to degree of freedom in y direction

4.2.2 $\xi_{R_y,2y}$

1) 测量光束入射角存在 dR_x 的旋转角,同时平面光栅尺存在 R_y 的旋转角

如图 6 所示,理想情况下,测量光束 1 (incident beam 1) 和测量光束 2 (incident beam 2) 分别垂直入射到平面光栅尺标准平面 PGS1 和 PGS2 上,即不存在余弦误差;无论是掩模台标准平面 RSS,还是掩模台测量平面 RSM,在绕 Y 向产生旋转角 R_y ,且

两个平面光栅尺坐标 PGC 原点相对于掩模台坐标 RSC 原点的 X 向位移相同时,即 $dX_1 = dX_2$,会产生大小相等、方向相反的阿贝臂,但不会产生阿贝误差。但如果两个测量光束分别产生 dR_{x_1} 和 dR_{x_2} 旋转角入射到光栅平面,即存在余弦误差时,掩模台标准平面 RSS 再产生旋转角 R_y ,就会导致两个平面光栅尺测量平面 PGM1 和 PGM2 产生的阿贝臂不等,最终导致位置偏差,从而出现位移误差。

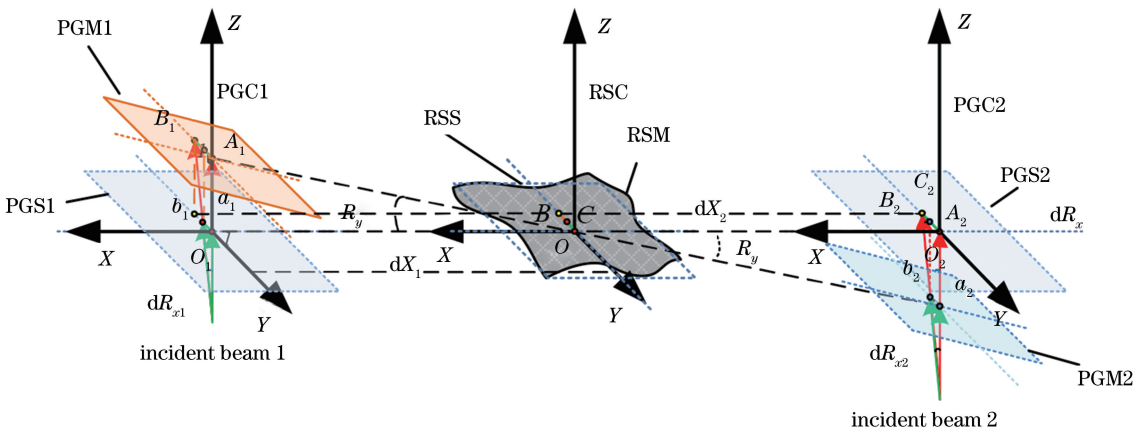


图 6 自由度 R_y 对 y 向自由度的误差分析图

Fig. 6 Error analysis diagrams of degree of freedom R_y with respect to degree of freedom in y direction

2)平面光栅尺产生 dR_y 的安装误差,同时旋转 R_z 自由度

如图 7 所示,理想情况下,掩模台标准平面 RSS 与平面光栅尺标准平面 PGS1、PGS2 共面,即使同时具有 R_y 的旋转角时,光斑在平面光栅尺上沿 Y 向移动的位移与掩模台移动的位移相等,即 $AC=DO$,所以不会对 Y 向位移产生误差;但是在

实际情况下,掩模台测量平面 RSM 与平面光栅尺测量位移面 PGM 产生存在 ΔZ 的垂向安装误差,导致光斑在平面光栅尺上沿 Y 向移动的位移与掩模台实际移动的位移不相等,从而产生的阿贝臂不相等,即 $DB \neq EO$,加之又存在 dR_z 的相对旋转安装误差,导致在 R_y 上产生耦合误差 $(EO-DB) \times dR_z$ 。

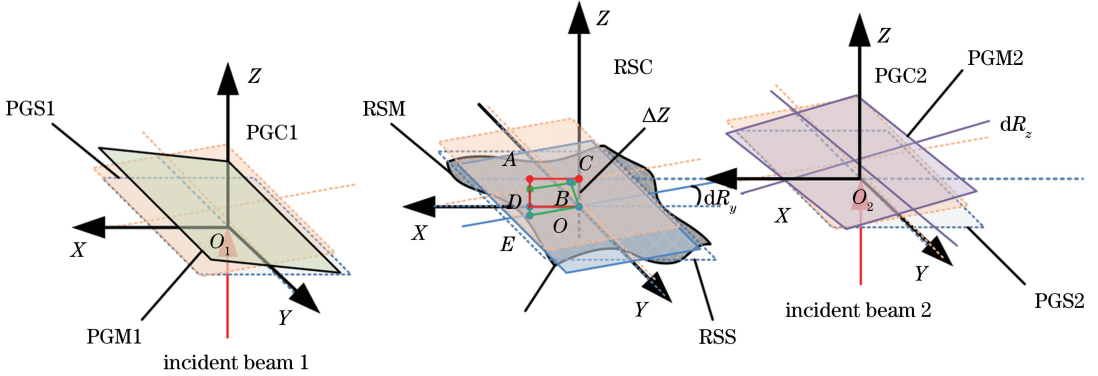


图 7 自由度 R_z 对 y 向自由度的误差分析图

Fig. 7 Error analysis diagrams of degree of freedom R_z with respect to degree of freedom in y direction

4.2.3 高阶误差

如图 8 所示,理想情况下,平面光栅尺标准位移面 PGS 与掩模台标准位移面 RSS 共面时,即同时绕 X 轴旋转产生 R_x 旋转角时,光斑在平面光栅尺测量平面 PGM 上移动的 Y 向位移与掩模台测量平面 RSM 移动的位移相等。但是当平面光栅尺测量位移面 PGM 与掩模台测量平面 RSM 不共面时,即

存在 dR_{x1} 旋转安装误差时,再同时绕 x 轴进行旋转(此处认为平面光栅尺与掩模台是一个整体),就会产生 R_x 旋转角,导致光斑在平面光栅尺 1 测量平面 PGM1 和平面光栅尺 2 测量平面 PGM2 产生的阿贝臂不等,产生阿贝误差,因而光斑在平面光栅尺测量平面 PGM 上移动的 Y 向位移与掩模台移动的位移不等,导致位置误差的产生。

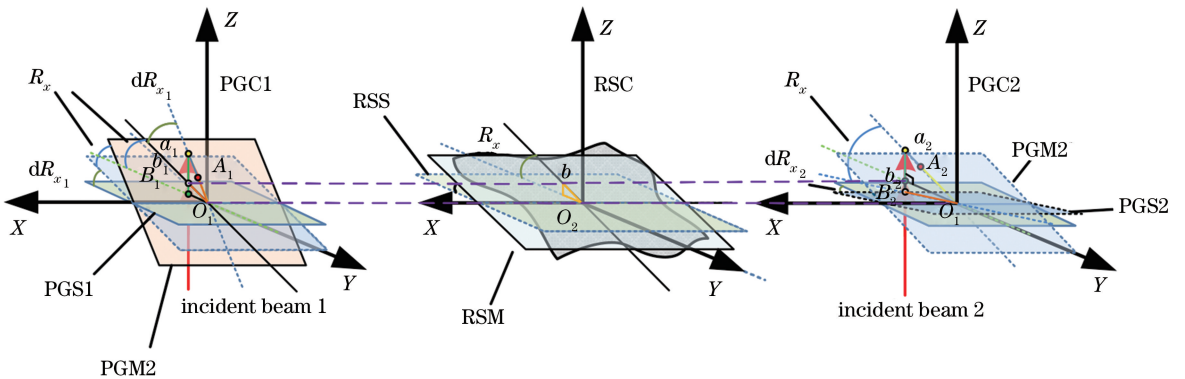


图 8 自由度 y 和 R_x 对 y 向自由度误差分析图

Fig. 8 Error analysis diagrams of degrees of freedom y and R_x with respect to degree of freedom in y direction

5 仿真与实验验证

本次测量校准需要的数据处理方法是最小二乘法,所以先介绍该方法。

最小二乘法(又称最小平方方法)是一种数学优化技术^[15],它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。利用最小二乘法可以简便地求得未知

的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。最小二乘法还可用于曲线拟合。其他一些优化问题也可通过最小化能量或最大化熵用最小二乘法来表达。

5.1 仿真方法

本次模型仿真使用 MATLAB 软件,根据(1)式建立理想位置与测量位置模型,具体过程如下:设置

掩模台处于不同姿态,利用测量系统测量掩模台不同姿态引起的 X、Y 位置变化,再用最小二乘法多次循环测校,拟合掩模台平面光栅尺测量模型的相应系数,以达到消除姿态变化对掩模台 X、Y 和 R_z 位置影响的目的。表 1 是仿真下的掩模台三自由度范围。其中每个姿态下测量的次数为 30 次,并且水平向(X 和 Y)的重复性为 3 nm,水平向伺服精度为 5 nm。

表 1 掩模台自由度行程范围

Table 1 Ranges of degree of freedom of reticle stage

Degree of freedom	Range	Step
X	1.6 mm	5
Y	240 mm	3
R_z	1.6 mrad	3

5.2 仿真结果

由图 9(a)所示的仿真结果可知,测量步数大于 17 步后,各系数误差收敛至 3.2×10^{-11} ,该值与 R_x 、 R_y 、 R_z 、 x 相乘并叠加后,误差小于 1.7×10^{-4} nm。

由图 9(b)所示的仿真结果可得,测量步数大于 17 步后,系数误差收敛至 4×10^{-10} ,该数值与 $y \times R_x$ 相乘后,误差小于 5.616×10^{-6} nm。

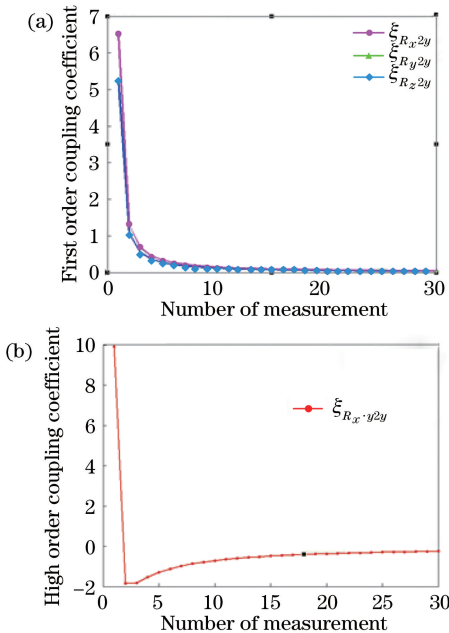


图 9 Y 向耦合系数仿真结果。(a)一阶耦合系数;

(b)高阶耦合系数

Fig. 9 Simulation results of Y-direction coupling coefficient. (a) First-order coupling coefficient; (b) high-order coupling coefficient

通过模型的仿真测试可以发现,当采样点数大于等于 27 时,三自由度的耦合系数无限逼近于一个

定值,并且在实验中也可以实现。

5.3 实验过程

首先,根据图 10 搭建实验系统,利用平面光栅尺的闭环反馈(PID)与加速度前馈控制策略,分别测量出水平向自由度;然后,将激光干涉仪测量系统^[16]作为参照测量系统,将其测量的三自由度作为理想位置值,将平面光栅尺测量系统测量^[17]的三自由度作为实际位置值,两者的差值就是存在安装误差和制造误差等情况时产生的自由度耦合误差;最后,利用仿真方法多次循环测校,对耦合系数进行校准。

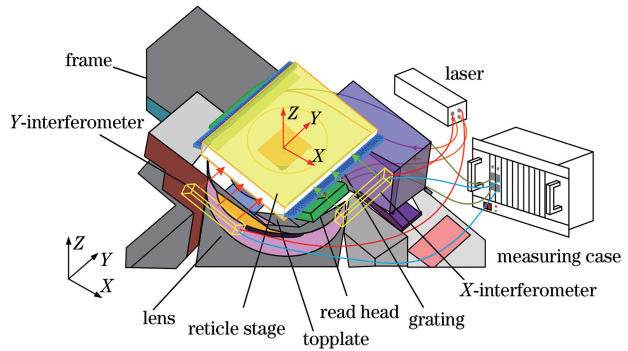


图 10 掩模台测量的实验系统

Fig. 10 Experimental system for reticle stage measurement

激光干涉仪测量系统的 3σ 值为 35 nm,在同一个位置上采集 405 次取平均值,目的是去掉部分重复性的干扰。

5.4 实验结果

从表 2 可以看出:平面光栅尺模型经上述方法测量校准后,其值已收敛至一定量级上;有些系数会变大,有些则会减小,这主要是因为耦合是相对的,当其中一项耦合误差变大时,其对应的自由度的影响就会减小,最终达到一种平衡。本次实验根据仿真结果设定校准连续循环组数为 3,每组进行 9 次,共 27 次。

从表 3 可以看出:去掉部分重复性后的干涉仪的精度约为 $0.2 \mu\text{m}$,而平面光栅尺模型经三次校准后,精度约为 5 nm,与第一次校准精度相比,三次校准后的精度明显提高。实验证明,该方法确实可以在很大程度上提高平面光栅尺的测量精度。

6 结 论

本文结合误差分析设计出基于平面光栅尺测量掩模台三自由度的位置模型算法。该算法充分考虑了掩模台位置与平面光栅尺平面旋转或倾斜所产生的阿贝误差与余弦误差对测量光斑移动位移的影

表 2 平面光栅尺的三自由度耦合系数

Table 2 Coupling coefficients of three degrees of freedom of planar grating

Degree of freedom coefficient / (mm · mrad ⁻¹)	1	2	3
$\xi_{R_x 2x}$	-0.381	-0.365	-0.367
$\xi_{R_y 2x}$	-55.667	-55.653	-55.496
$\xi_{R_z 2x}$	-22.860	-22.843	-22.849
$\zeta_{R_x y 2x}$	-0.128	-0.090	-0.115
$\xi_{R_x 2y}$	43.853	43.850	43.834
$\xi_{R_y 2y}$	3.943	3.922	3.924
$\xi_{R_z 2y}$	-7.063	-7.049	-7.069
$\zeta_{R_x y 2y}$	-14.843	-14.758	-14.764
$\xi_{R_z 2R_x}$	1.636	1.773	1.773
$\xi_{R_z 2R_y}$	0.607	0.682	0.682
$\xi_{R_z 2x}$	3.622	3.965	3.965
$\zeta_{R_x y 2R_x}$	-2.966	-4.096	-4.096

表 3 激光干涉仪与平面光栅尺的位置精度对比

Table 3 Comparison of position accuracy between laser interferometer and planar grating

mm

Instrument	Physical location					3σ
	-120	-60	0	60	120	
Laser interferometer	-119.999	-59.999	-1.04485 × 10 ⁻⁷	60.000094	120.000092	1.818 × 10 ⁻⁴
Planar grating 1	-120.000009	-59.999998	-4.811 × 10 ⁻⁶	60.000013	120.000004	3.812 × 10 ⁻⁶
Planar grating 2	-120.000003	-60.2312021	-1.316 × 10 ⁻⁵	60.000006	120.000003	3.897 × 10 ⁻⁵
Planar grating 3	-120.2312021	-60.2312021	-1.429 × 10 ⁻⁷	60.000001	120.2312021	4.892 × 10 ⁻⁶

响,能保证掩模台在倾斜与旋转时,测量精度约为 5 nm,远远超出干涉仪的测量精度,且在同等较为理想的环境状态下,其测量精度可达到更优值。

参 考 文 献

[1] Zhang X, Liu H B, Gu W, *et al.* A survey on the development of global lithography machines and the localization of lithography equipment [J]. *Wireless Internet Technology*, 2018(19): 110-111, 118.
张霞, 刘宏波, 顾文, 等. 全球光刻机发展概况以及光刻机装备国产化[J]. *无线互联科技*, 2018(19): 110-111, 118.

[2] Wu T T. Development and experimental study of a multi-degree-of-freedom simultaneous measurement system for two-dimensional stage[D]. *Anhui: Hefei University of Technology*, 2018: 20-28.
伍婷婷. 二维工作台多自由度同时测量系统的研制及实验研究[D]. *安徽: 合肥工业大学*, 2018: 20-28.

[3] Liu C H, Jywe W Y, Hsu C C, *et al.* Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76 (5): 055110.

[4] Zhang Z P, Menq C H. Laser interferometric system for six-axis motion measurement [J]. *Review of*

Scientific Instruments, 2007, 78(8): 083107.

[5] Mao S. Key technologies study of dynamic displacement calibration for high speed heterodyne laser interferometer based on the same measurement trajectory [D]. *Harbin: Harbin Institute of Technology*, 2017: 56-82.
毛帅. 基于共测量轨迹的快速外差激光干涉仪动态校准关键技术[D]. *哈尔滨: 哈尔滨工业大学*, 2017: 56-82.

[6] Chi F, Zhu Y, Zhang Z P, *et al.* Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0408004.
池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0408004.

[7] Huang M H, Wang H, Chen X, *et al.* Research on the error compensation system of linear encoder's measuring precision [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2017(12): 81-84.
黄明辉, 王晗, 陈新, 等. 光栅尺测量精度误差补偿系统研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017 (12): 81-84.

[8] Wu Y F. Design and research on heterodyne planer grating encoder with nanometer resolution [D].

- Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 42-63.
- 吴亚风. 高精度平面光栅干涉仪的设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 42-63.
- [9] Shang P, Xia H J, Fei Y T. Research status and developing trends of diffraction grating interferometer measurement system[J]. Optical Technique, 2011, 37(3): 313-316.
- 尚平, 夏豪杰, 费业泰. 衍射式光栅干涉测量系统发展现状及趋势[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 313-316.
- [10] Wang J. Research on 3-DOF grating interference measurement model of mask table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 40-59.
- 王静. 掩模台三自由度光栅干涉测量模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 40-59.
- [11] Chen J B. Design and experimental study of ultra-precision displacement measurement for grating interferometer positioning system based on stripe phase shift [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 61-82.
- 陈家宝. 基于条纹相移的光栅干涉仪定位系统超精密位移测量方法与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 61-82.
- [12] Dang B S, Xiong X M, Wang X Y, *et al.* Ultra-precision encoder system for displacement measurement[J]. Laser Journal, 2018, 39(9): 42-46.
- 党宝生, 熊显名, 王献英, 等. 超精密光栅尺位移测量系统[J]. 激光杂志, 2018, 39(9): 42-46.
- [13] Cheng J S. Study on interferometer measurement error model in wafer stage[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 30-45.
- 程吉水. 工件台激光干涉仪测量误差模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 30-45.
- [14] Teng W, Zhou Y F, Mu H H, *et al.* An algorithm on laser measurement model of ultra-precision motion stage and error compensation[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(12): 1492-1497.
- 滕伟, 周云飞, 穆海华, 等. 超精密运动台激光测量模型及误差补偿算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1492-1497.
- [15] Li S W, Luo K, Wang Y C, *et al.* Voltage calibration coefficients extracting based on the least squares method[J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(6): 16-20.
- 李世文, 罗凯, 王莹澈, 等. 基于最小二乘法的数据采集电压校准系数提取方法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(6): 16-20.
- [16] Zhang W Y, Song J. The principle of stepper wafer stage positioning based on the dual-frequency laser interferometer and fault diagnosis[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2016, 45(Z1): 27-30.
- 张文雅, 宋健. 基于双频激光干涉仪的投影光刻机工作台定位原理与故障分析[J]. 电子工业专用设备, 2016, 45(Z1): 27-30.
- [17] Zhang W T, Du H, Xiong X M, *et al.* Hardware-in-the-loop simulation of high precision displacement measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204001.
- 张文涛, 杜浩, 熊显名, 等. 高精度位移测量系统的硬件在环仿真[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204001.