

# 高精度位移测量系统的硬件在环仿真

张文涛<sup>1\*</sup>, 杜浩<sup>1,2</sup>, 熊显名<sup>1</sup>, 谢仁彪<sup>2</sup>, 王献英<sup>2</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>上海微电子装备(集团)股份有限公司, 上海 201203

**摘要** 设计了一个基于二维光栅的高精度位置测量系统的硬件在环仿真平台,分析了测量模型在编程过程中产生误差的原因,并使用该仿真平台测试了模型的精度和运算时间。结果表明,当计算频率为 20 kHz 时,测量模型的编程精度优于 0.79 nm,测量机箱引起的误差为  $8.84 \times 10^{-7}$  nm。该仿真平台能够有效地检测基于二维光栅的测量模型在编程过程中产生的误差,并测试模型运算时间。

**关键词** 测量; 精密测量; 二维光栅; 硬件在环; 光刻机

中图分类号 TH822

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204001

## Hardware-in-the-Loop Simulation of High Precision Displacement Measurement System

Zhang Wentao<sup>1\*</sup>, Du Hao<sup>1,2</sup>, Xiong Xianming<sup>1</sup>, Xie Renbiao<sup>2</sup>, Wang Xianying<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract** A hardware-in-the-loop simulation platform for high-precision position measurement system based on two-dimensional grating is designed. The reasons for the error of the measurement model in the programming process are analyzed, and the simulation platform is used to test the accuracy and operation time of the measurement model. The results show that the accuracy of the measurement model is better than 0.79 nm when the calculated frequency is 20 kHz, and the error caused by simulation platform is  $8.84 \times 10^{-7}$  nm. The simulation platform can effectively detect the errors generated by the measurement model based on the two-dimensional grating in the process of program realization, and test the operation time of the model.

**Key words** measurement; precision position measurement; two-dimensional grating; hardware-in-the-loop; lithography machine

**OCIS codes** 120.3180; 120.3930; 050.1960

## 1 引 言

集成电路产业是支撑经济社会发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性产业,是新一代信息技术产业的核心。光刻机是制造集成电路的关键设备。随着光刻节点的持续缩小及晶圆尺寸的逐步增大,运动台(motion stage)位置测量技术朝着高精度、高速度及大行程的方向持续发展。自 28 nm 光刻节点起,光刻机套刻精度要求已小于 5.7 nm。在光刻领域应用广泛的双频激光干涉仪是以激光波长为测量基准,测量光程长,容易受环境变化影响,双

频激光干涉仪的测量精度已不能满足 28 nm 节点运动台位置测量的精度要求。基于二维光栅(2D grating)的位置测量技术是以光栅栅距为测量基准,测量光程短,对环境变化不敏感<sup>[1]</sup>,将逐步替代双频激光干涉仪在光刻领域的应用。

2009 年,德国海德汉公司在二维光栅制作上取得重大突破,成功将二维平面光栅位移测量系统的测量范围扩大到 400 mm × 400 mm,并将该位移测量系统应用在 ASML 公司的 NXT:1950i 型光刻机中,相比于上一代产品 XT:1900i 型光刻机,NXT:1950i 型光刻机的累积加工误差由 4.8 nm 下降到了

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2018-10-16; 录用日期: 2018-10-24

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101007-003)

\* E-mail: glietzw@163.com

2.5 nm<sup>[2]</sup>。ASML 新型极紫外光刻 (EUVL) 产品 TWINSCAN NXE:3300B 的分辨力为 18 nm, 套刻精度为 3 nm, 产率达到 125 wph。国内上海微电子装备 (集团) 股份有限公司最新型号光刻机 SSA600/200 采用 ArF 激光光源, 特征线宽达到 90 nm, 但与国际领先水平仍有较大差距。

国内多所高校对基于光栅的位置测量技术做了大量研究工作。夏豪杰<sup>[3]</sup>对利用单二维光栅与单光源的平面微位移测量方法及测量系统进行了深入的研究。吴亚风<sup>[4]</sup>设计了一种高精度平面光栅干涉仪, 其 X 方向的最小分辨力为 1.6 nm, Z 方向的为 0.75 nm。Wang 等<sup>[5]</sup>设计了一种能够实现三维自由度位移测量的外差光栅位移测量系统, 并申请了相关专利<sup>[6]</sup>。王雪英<sup>[7]</sup>对光栅位移测量系统进行了研究, 在结构上做出了一些改进。卢炎聪等<sup>[8]</sup>设计了一种四倍光学细分的两轴外差光栅干涉仪, 理论分辨力为 0.137 nm。宗明成等<sup>[9]</sup>研制了一种对称式双光栅干涉位移测量系统, 该系统的实测分辨率为 0.8 nm, 重复性为 1.4 nm。

目前, 国内基于二维光栅的高精度运动台位置测量技术尚未成熟, 本文设计了一种针对高精度运动台位置测量系统的仿真平台, 使用仿真机箱模拟光栅尺的输出数据, 替代实际环境下的二维光栅及读数头, 排除外界环境对运动台位置测量精度的影响, 搭建仿真平台是为了检测位置测量模型在程序实现过程中产生的误差, 并验证测量模型的运算时间是否满足运动台控制系统的要求。

## 2 二维光栅位移测量原理

二维光栅测量原理如图 1 所示, 包括由激光器 (laser)、光纤、读数头 (measurement head)、二维光栅及光电接收器组成的测量装置及由激光计数卡和计算板卡组成的数据处理模块。

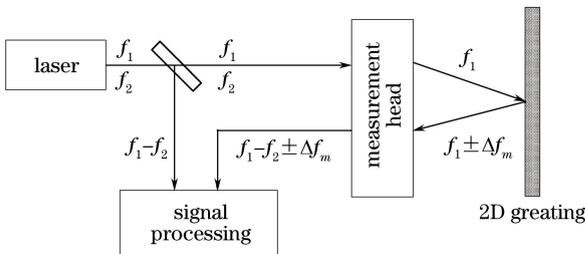


图 1 二维光栅系统测量原理示意图

Fig. 1 Measuring principle of 2D grating system

二维光栅被固定在运动台上, 跟随运动台移动, 将读数头固定在空间位置不变的框架上。激光器产

生包含两种频率  $f_1$  和  $f_2$  的激光, 频率为  $f_1$  的激光作为测量光束入射至二维光栅, 在光栅上发生衍射, 其中一束衍射光返回至读数头。当光栅跟随运动台移动时, 由于多普勒效应, 衍射光的频率会发生变化:

$$\Delta f_m = \frac{v}{\lambda} (\sin \theta + \sin \alpha_m), \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为入射角,  $\alpha_m$  为  $m$  级衍射光的衍射角,  $v$  为运动台的移动速度,  $\lambda$  为激光中心波长。

当入射光束与光栅栅线方向垂直时, 入射角和衍射角满足衍射方程:

$$\sin \theta + \sin \theta_m = \frac{m\lambda}{p}, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为入射角,  $\theta_m$  为衍射角,  $p$  为光栅栅距,  $m$  为衍射级次。

联立(1)式和(2)式即可得到衍射光的频率变化  $\Delta f_m$

$$\Delta f_m = \frac{mv}{p}. \quad (3)$$

将测量光束的衍射光 (频率为  $f_1 \pm \Delta f_m$ ) 与参考光束 (频率为  $f_2$ ) 进行干涉后得到频率为  $f_1 - f_2 \pm \Delta f_m$  的测量信号, 经过光电转换后输入到激光计数卡。没有频率变化的参考信号 (激光频率为  $f_1 - f_2$ ) 同样经过光电转换后输入到激光计数卡。经过对测量信号和参考信号的处理就可以检测出测量信号和参考信号的频率差  $\Delta f_m$ , 经过倍频后即可得到表示运动台位置变化的计数值。

在实际应用中, 选择栅距为  $1 \mu\text{m}$  的二维光栅, 通过在衍射光路中增加角锥棱镜使第一次衍射的衍射光再次入射至光栅发生二次衍射, 实现光学四倍频, 配合 1024 倍的电子细分, 基于二维光栅的位移测量的理论分辨力可以达到 0.244 nm。

## 3 硬件在环仿真平台

将基于二维光栅的位置测量系统用于运动台定位, 是运动台位置闭环控制中的测量环节。运动台伺服控制系统如图 2 所示, 在运动台的两侧分别固定一块二维光栅, 每块光栅对应一个读数头, 每个读数头都可以测量对应的光栅在 X 和 Y 方向上的位置变化, 两个读数头组合起来就能计算得到运动台在 X 和 Y 方向上的位移及运动台绕 Z 轴旋转的角度。光栅尺测量机箱 (measurement rock) 将计算的运动台的位置和姿态数据传送至运动台控制机箱 (motion stage control rock), 运动台控制机箱结合

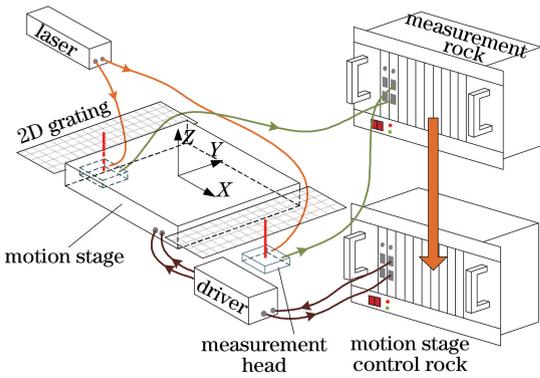


图 2 运动台伺服控制系统

Fig. 2 Motion stage servo control system

上层下发的目标位置和运动台的实际位置给出控制命令,控制伺服驱动器使运动台定到某一位置。

二维光栅位置测量系统的硬件在环仿真是指利用光栅尺的数学模型模拟激光计数卡输出的计数值,以模型算法替代实际的二维光栅及读数头,排除环境(温度、空气压力、震动等)对运动台位置测量精度的影响,检测基于二维光栅的运动台位置测量模型在实现过程中的误差,验证测量模型的运算时间是否满足需求。

硬件在环仿真流程如图 3 所示,根据运动台的行程范围和运动台能够达到的最大速度及加速度设定运动台的“名义位置”,然后将“名义位置”通过运动台位置与读数头的位移关系即光程模型转化为计数值,接下来由计数值通过光栅尺测量模型计算得到运动台的位置,最后比较“名义位置”和“实际位置”的差异,得到光栅测量模型在实现过程中的误差。在实现过程中,不对光程模型做任何简化处理,然而为了减

少测量模型运算时间,满足运动台控制系统对获取位置数据的时间的要求,对测量模型进行了近似和简化,这是测量模型精度损失的原因之一。

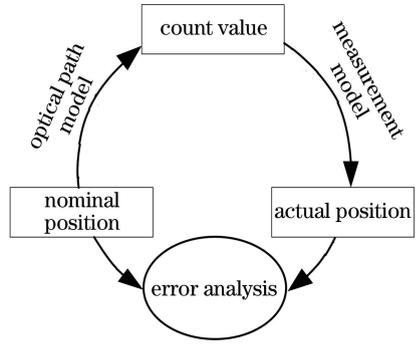


图 3 仿真流程图

Fig. 3 Flow chart of simulation

### 3.1 测量机箱

硬件在环仿真平台由测量机箱和仿真机箱两个计算机箱组成,如图 4 所示,仿真机箱输出表示运动台位置的计数值,其中 NCBS 表示仿真机箱的数值计算板卡,A/D 表示模数转换器,MCB 为测量控制板卡,SCB 为控制板卡,NCBM 为测量机箱的数值计算板卡。测量机箱则是光栅测量系统将在实际应用中使用的运算机箱,负责计算运动台位置和姿态。测量机箱的功能是获取原始数据,计算运动台位置,并将计算结果发送到运动台的控制机箱。NCBM2 通过数据总线接收计数值,在同步板卡(SBC)提供的采样信号的控制下运算光栅尺的测量模型,计算运动台的位置,然后将运动台的位置数据通过高速串行通道发送给运动台的控制机箱。

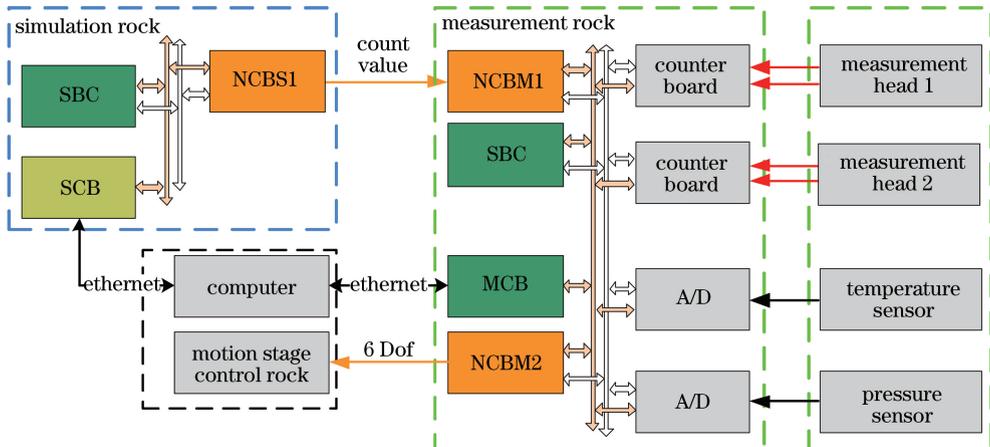


图 4 仿真平台结构示意图

Fig. 4 Structural sketch of simulation platform

搭建仿真平台(图 5)是为了验证测量模型在程序实现过程中的误差和模型计算需要的时间是否满

足要求,所以并不使用实际的二维光栅和读数头,而是使用仿真机箱模拟计数卡的输出数据。仿真过程

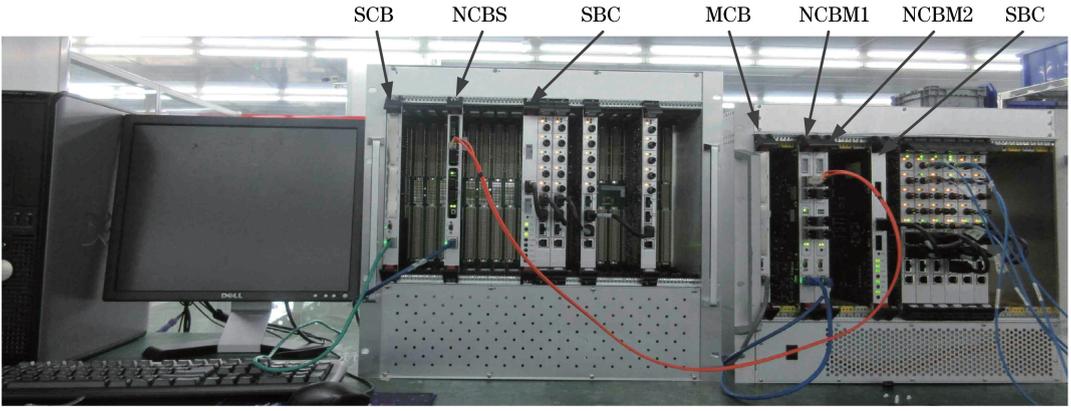


图 5 硬件在环仿真平台

Fig. 5 Hardware-in-the-loop simulation platform

中测量机箱实际使用的板卡有测量控制板卡、两块数值计算板卡(NCBM1、NCBM2)和同步板卡 SBC。数值计算板卡 NCBM1 用来接收仿真端的数据, NCBM2 负责运算测量模型。

机箱背板提供两个总线通道:控制总线 and 数据总线。控制总线用于测量控制板卡下发命令给其他板卡,数据总线用于机箱内除测量控制板卡之外其他板卡的数据传递。光栅尺测量模型较为复杂,对计算板卡的数据处理能力有较高的要求。仿真平台使用的计算板卡的处理芯片是 PowerPC 芯片,主频达到 1.4 GHz,有较强的数据计算能力,板卡上集成了高速的串行数据通信接口,能够与其他板卡进行全双工通信,通讯速率可以达到 1 Gbps。

### 3.2 仿真机箱

仿真机箱是由控制板卡、同步板卡和数值计算板卡组成。仿真机箱的数值计算板卡将计数值发送至 NCBM1。

## 4 测量模型

测量模型是要建立激光计数卡输出的计数值和运动台位置的关系。当运动台移动时,入射至光栅上的光斑会随之移动,以光斑在光栅上移动的距离为媒介,首先说明读数头输出的计数值和光斑位移的关系,然后介绍运动台位置和光斑位移之间的关系表达式,最终获得计数值和运动台位置的关系式

即测量模型。

由于光栅尺测量系统采用两个读数头组合的方式测量运动台的位置,能够测量出运动台水平向三个自由度  $X$ 、 $Y$  和  $R_z$ ,而垂向的三个自由度  $Z$ 、 $R_x$  和  $R_y$  在计算测量模型时使用设定的“名义位置”。

### 4.1 位移模型

在实际应用中,运动台的姿态需要不断调整,旋转( $R_z$ )、倾斜( $R_x$  和  $R_y$ )均不为零,所以从读数头出射的激光束相对平面光栅并不是完全垂直,而是有一定的角度。定义光栅坐标系的  $X$  轴、 $Y$  轴分别平行于二维光栅周期结构排列的两个方向, $Z$  轴服从右手定则,入射光束的方向如图 6 所示,其与坐标轴  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$  的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和运动台的  $R_z$ 、 $R_x$ 、 $R_y$  直接相关。

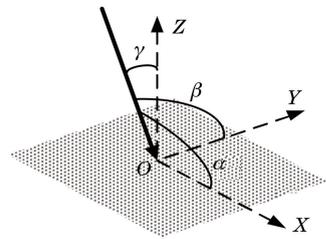


图 6 光束入射角度示意图

Fig. 6 Schematic of laser beam incident angle

以其中一个读数头的  $Y$  向为例,考虑运动台的姿态以后,光斑的位移  $\Delta y_1$  和计数值的关系可以表示为

$$\Delta y_1 = \frac{p}{8\pi} \cdot \Delta\varphi_{y1} \cdot R - \frac{2p}{8\pi} \cdot \left[ \sqrt{k^2 - \left( -\frac{2\pi}{p} + \sin R_x \cdot k \right)^2} - (-\sin R_y \cdot \cos R_x \cdot k)^2 \right. \\ \left. - \sqrt{k^2 - \left( \frac{2\pi}{p} + \sin R_x \cdot k \right)^2} - (-\sin R_y \cdot \cos R_x \cdot k)^2 \right] \cdot Z, \quad (4)$$

式中,  $\Delta\varphi_{y1}$  为激光计数卡输出的计数值,  $R$  为电子细分倍率,  $k$  为波数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

同理,  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  和  $\Delta y_2$  也有类似的表达式。

#### 4.2 位置模型

当光栅上光斑的位移与激光相位的关系确定后,即可计算得到两个读数头对应的光斑位移,即  $\Delta x_1$ 、 $\Delta y_1$ 、 $\Delta x_2$  和  $\Delta y_2$ 。实际应用中,二维光栅和读数头都不在理想的位置上,即存在安装误差。位置模型就是要建立光斑位移与运动台位置、姿态和安装误差的关系。

光斑的位移描述在运动台坐标系下,运动台坐标系的原点位于运动台中心,坐标轴  $X$  轴平行于平面光栅尺的  $X$  向栅格方向, $Y$  轴与  $X$  轴垂直,运动台坐标系跟随运动台移动。运动台的位置  $S$  描述在运动台零位坐标系下,运动台零位坐标系是运动台位置全为零时的运动台坐标系,此坐标系的空间位置不跟随运动台移动。图 7 中, $\Delta x$  和  $\Delta y$  是运动台分别在  $X$  向和  $Y$  向的位移。

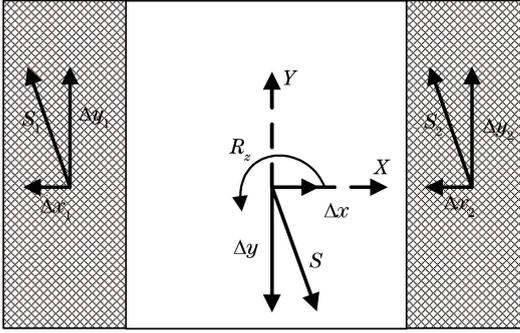


图 7 运动台位移示意图

Fig. 7 Displacement schematic of motion stage

仍以光栅尺的  $Y$  向为例,光斑的位移  $\Delta y_1$  可以表示为

$$\Delta y_1 = t_y^T (\mathbf{P}_s - \mathbf{P}_0). \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{P}_s$  表示运动台移动后光斑的位置,  $\mathbf{P}_0$  表示光斑在运动台零位坐标系下的初始位置,  $t_y$  表示运动台坐标系下光栅尺  $Y$  向的方向向量。计算  $\mathbf{P}_s$  的过程中会引入运动台的位置  $S$ , 这样就建立了光斑的位移与运动台位置的关系。同理,可以得到位移  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  和  $\Delta y_2$  与运动台位置的表达式。

可以通过位移模型得到光斑位移与计数值的关系,通过位置模型可以得到光斑位移与运动台姿态和安装误差之间的关系。使两者推导的位移相等即可得到运动台位置与计数值之间的关系,即基于二维光栅的运动台位置测量模型:

$$Y = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2} + f(X, Y, Z, R_x, R_y, R_z). \quad (6)$$

测量模型的表达式展开之后非常复杂,包含多

个余弦函数的乘积项、二次根式及其他自由度的高次项,计算量很大,计算时间较长,然而在每个伺服周期内都要更新运动台位置数据,即光栅尺测量机箱需要在  $50 \mu s$  的计算周期内完成读取数据、计算模型、打包并发送数据和处理其他上层的命令等全部工作。未简化的测量模型不能满足时间上的要求,故实际应用中使用测量模型的泰勒展开式取其近似值。 $Y$  向光栅尺测量模型的一阶泰勒展开式为

$$Y = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2} + A_{rx} R_x + B_{ry} R_y + C_{rz} R_z + D_x X + E_{yrx} Y R_x + Z R_x + F_y Y + G_z Z \quad (7)$$

式中,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $R_x$ 、 $R_y$  和  $R_z$  为运动台上一周期的位置和姿态,  $A_{rx}$ 、 $B_{ry}$ 、 $C_{rz}$ 、 $D_x$ 、 $E_{yrx}$ 、 $F_y$  和  $G_z$  为和安装误差有关的系数。

## 5 仿真过程及结果分析

光栅尺测量模型的模型误差是否满足要求仍需要验证,验证的方法是进行光栅尺测量模型的模型在环仿真。

### 5.1 模型在环仿真

模型在环的仿真思路与上文提到硬件在环的仿真思路类似,通过光程模型将“名义位置”转换为计数值,然后将计数值代入简化过的光栅尺测量模型计算运动台位置和姿态,比较计算结果和名义位置的差异,可以得到泰勒展开后的光栅尺测量模型的误差。

依据运动台的实际应用场景设定名义位置,初始位置为  $P_{start}(0, 0, 0, 0, 0, 0)$ , 即初始时刻运动台的位置和姿态均为零,当运动台的各自由度移动到最大行程时为终止位置,  $X$  向移动 2 mm,  $Y$  向移动 165 mm,  $Z$  向移动 1 mm, 其他自由度的终止位置均为 1 mrad, 即终止位置  $P_{end}$  为  $(0.002, 0.165, 0.001, 0.001, 0.001, 0.001)$ , 然后根据运动台能够达到的最大加速度和速度生成名义位置曲线。光栅尺测量模型的模型在环仿真结果如图 8 所示。

运动台在  $X$ 、 $Y$  和  $R_z$  方向的速度变化过程都是加速、匀速、减速。由图 8 可以看出,模型在环仿真得到的运动台的位置与名义位置的变化趋势基本一致,图中绿色实线表示模型在环计算结果与“名义位置”的差值,  $X$  向的差值  $x_{em}$  随运动台  $X$  向位置的增大而增加,但运动台  $X$  向位置不再变化后,  $x_{em}$  仍会继续增大,但增大的速度有所降低。  $Y$  向的差值  $y_{em}$  呈现一种先增大后减小的变化趋势,在

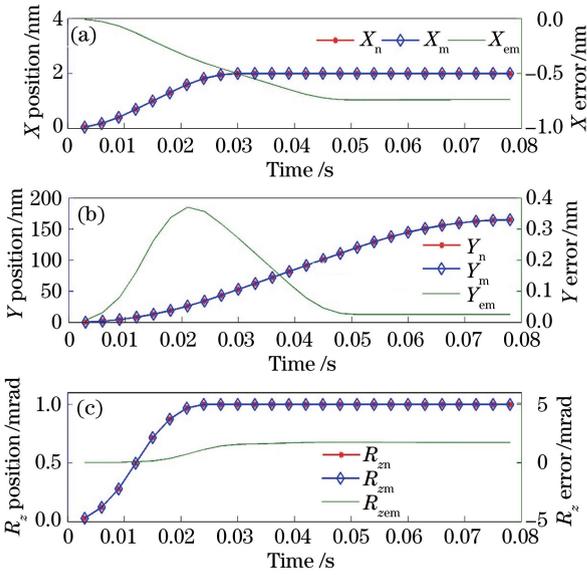


图 8 模型在环仿真结果。(a) X 轴模型误差;  
(b) Y 轴模型误差;(c)  $R_z$  轴模型误差

Fig. 8 Model-in-the-loop simulation results. (a) X-axis model error; (b) Y-axis model error; (c)  $R_z$ -axis model error

0.02 s时刻达到峰值,然后持续降低,到 0.05 s 时  $y_{em}$  变化非常缓慢。运动台旋转  $R_z$  的差值  $R_{zem}$  先缓慢增大然后不变,转折点在 0.03 s 附近。

运动台 X 向位置不再变化后,  $x_{em}$  继续增大是因为受到 Y 向位置变化的影响,0.02 s 左右,  $y_{em}$  逐渐减小是因为运动台的旋转倾斜不再变化,到 0.05 s 时,运动台 X 向运动停止,只有运动台的 Y 向位置继续变化,然后  $y_{em}$  趋于稳定。测量模型的表达式为

$$Y = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2} + A_{rx} \cdot R_x + B_{ry} \cdot R_y + C_{rz} \cdot R_z + f(X, Y, Z) \quad (8)$$

式中运动台的旋转倾斜系数  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  对 Y 的影响系数  $A_{rx}$ 、 $B_{ry}$ 、 $C_{rz}$  是通过定义的读数头、光栅的安装误差计算的,在仿真中设计的  $R_x$ 、 $R_y$  和  $R_z$  的名义位置变化曲线比较相似,这导致这三者对 Y 向的影响叠加,使得  $y_{em}$  曲线在 0.02 s 附近产生了峰值。

测量模型存在误差的原因是多方面的,首先光栅尺测量模型非常复杂,计算需要的时间远远超出了运动台的伺服周期的要求,所以使用测量模型的泰勒展开式取其近似值,降低运算量;其次,模型的运算是迭代的过程,当前周期的计算会使用到上一周期的计算结果,造成误差的累积;另外,运动台的速度越高,每个计算周期内运动台的位置变化量就越大,这样就造成在使用上一周期计算的运动台位置来计

算当前周期的位置时引入了更大的误差;最后由于光栅和读数头等光学部件不能安装在理想位置,测量模型存在由安装误差引起的精度损失。根据模型在环的仿真结果,运动台水平向位置的测量误差在  $10^{-10}$  m 量级,不足 1 nm,满足测量系统的要求。

## 5.2 硬件在环仿真

使用设计硬件在环仿真机箱进行位置测量系统的硬件进行在环仿真,NCBM1 接收 NCBS1 计算的计数值,通过数据总线发送给 NCBM2,NCBM2 接收原始数据并进行光栅尺测量模型的运算。硬件在环名义位置的设定与模型在环一致,设置测量模型计算的频率为 20 kHz,仿真的结果如图 9 所示,可以看出硬件在环的计算位置 X、Y 和  $R_z$  与“名义位置”基本一致,两者差值的变化趋势与模型在环的仿真结果非常相似,将模型在环与硬件在环的结果进行对比,可以得到由硬件在环仿真平台引起的误差,如图 10 所示,  $x_{ehm}$ 、 $y_{ehm}$  和  $R_{zehm}$  此误差的变化趋势仍与自由度的变化有关,这是由硬件在环中数据的传递过程与模型在环数据传递过程不能完全相同导致的。

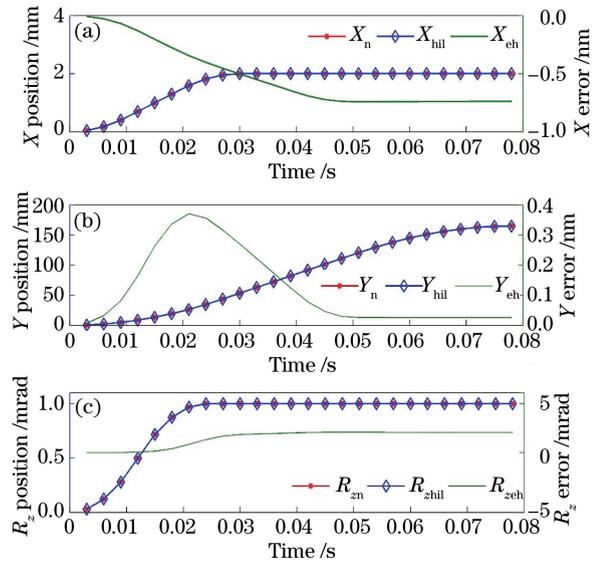


图 9 硬件在环仿真结果。(a) X 轴模型误差;  
(b) Y 轴模型误差;(c)  $R_z$  轴模型误差

Fig. 9 Hardware-in-the-loop simulation results. (a) X-axis model error; (b) Y-axis model error; (c)  $R_z$ -axis model error

计算模型在环仿真与硬件在环仿真结果差值的三倍标准差的最大值为 Y 向的  $8.84 \times 10^{-7}$  nm,与 0.244 nm 的理论分辨力相比,由硬件设备产生的误差可以忽略。

在保证测量精度的情况下测试模型运算需要的时间,为了使得仿真时传输数据消耗的时间和实际

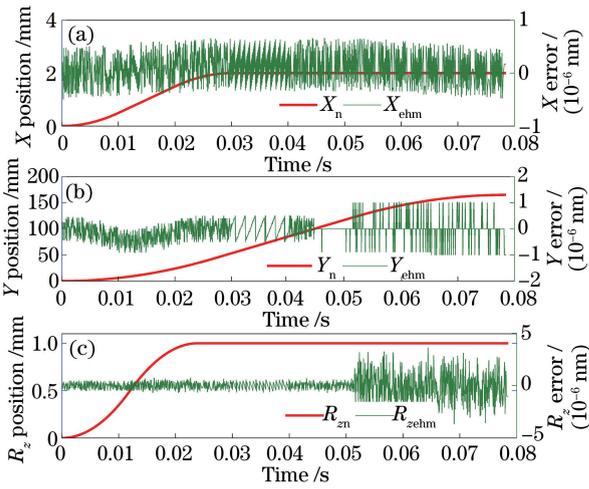


图 10 模型在环仿真与硬件在环仿真结果对比。

(a) X 轴误差; (b) Y 轴误差; (c)  $R_z$  轴误差

Fig. 10 Comparison of model-in-the-loop and hardware-in-the-loop simulation results. (a) X-axis error; (b) Y-axis error; (c)  $R_z$ -axis error

测量时传输数据消耗的时间相同,NCBM1 必须将接收的计数值、温度、压力等数据按照测量机箱实际使用的数据时序依次放置到总线上,模拟实际应用中激光计数卡和 A/D 转换板卡放置数据的过程。

每次计算 2000 个周期,共计算 42 次,保存各函数最长消耗的时间,如表 1 所示,获取原始数据所需的时间最长,约为 16  $\mu$ s,计算测量模型的时间为 11  $\mu$ s 左右,总计消耗的时间约为 39  $\mu$ s,小于计算周期 50  $\mu$ s,符合系统的要求。

表 1 模型运算过程时间表

Table 1 Model operation process schedule

Function	Time / $\mu$ s
Read raw data	16.04
Measurement model calculation	11.31
Sent position data	11.16
Total time	38.51

## 6 结 论

以光栅测量系统为研究对象,详细分析了运动台位置测量原理,搭建了硬件在环仿真测试平台。通过将“名义位置”与测量机箱输出的运动台实时位置进行对比分析,可以检测基于二维光栅的运动台位置测量模型在软件实现过程中的产生误差为 0.79 nm,通过与模型在环仿真的对比,得到测量机箱产生的误差为  $8.84 \times 10^{-7}$  nm,误差非常小,可以忽略。同时,在该仿真平台可以验证光栅尺测量模型的运算时间满足运动台伺服控制的需求。

[1] Zhou W L. Technology and application of grating interferometer in high precision measurement [J]. Tooling Engineering, 1994, 28(1): 37-42. 周维来. 光栅干涉仪在高精密测量中的技术和应用 [J]. 工具技术, 1994, 28(1): 37-42.

[2] Castenmiller T, van de Mast F, Kort T D, *et al.* Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401N.

[3] Xia H J. Research on precise 2-D plane grating measurement system and key technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006: 83-100. 夏豪杰. 高精度二维平面光栅测量系统及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006: 83-100.

[4] 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: 51-68. 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: 51-68.

[5] Wang L J, Zhang M, Zhu Y, *et al.* A novel heterodyne grating interferometer system for in-plane and out-of-plane displacement measurement with nanometer resolution [C]. Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, 2014: 173-177.

[6] Zhu Y, Wang L J, Zhang M, *et al.* Displacement measuring system for three-degree-of-freedom heterodyne grating interferometer: CN103759657A [P]. 2013-03-20[2018-08-01]. 朱煜, 王磊杰, 张鸣, 等. 一种三自由度外差光栅干涉仪位移测量系统: CN103759657A [P]. 2013-03-20 [2018-08-01].

[7] Wang X Y. Research of high-precision displacement measurement system based on the principle of diffraction and interference [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 30-53. 王雪英. 基于衍射干涉原理的高精度光栅位移测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 30-53.

[8] Lu Y C, Zhou C H, Wei C L, *et al.* Quadruple optically subdivided two-axis heterodyne grating interferometer: CN105203031A [P]. 2015-09-30 [2018-06-20]. 卢炎聪, 周常河, 韦春龙, 等. 四倍光学细分的两轴外差光栅干涉仪: CN105203031A [P]. 2015-09-30 [2018-06-20].

[9] Gao J L, Zong M C. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904003. 高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉仪位移测量系统的研制[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904003.