

# 用于扫描干涉场曝光的超精密微动台设计与控制

鲁 森<sup>1,2</sup>, 杨开明<sup>1,2\*</sup>, 朱 煜<sup>1,2</sup>, 王磊杰<sup>1,2</sup>, 张 鸣<sup>1,2</sup>, 杨 进<sup>3</sup>

<sup>1</sup>清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;

<sup>2</sup>清华大学精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084;

<sup>3</sup>东风商用车技术中心基础技术研究室, 湖北 武汉 430056

**摘要** 扫描干涉场曝光(SBIL)系统中曝光效果与工件台的运动性能密切相关。为了制作纳米精度的大面积平面光栅,工件台采用了粗微叠层结构设计,其中微动台是实现工件台运动精度的关键。基于 SBIL 原理,推导了干涉条纹周期测量精度与曝光对比度的关系。针对移动分光镜测量干涉条纹周期的方法,结合周期测量精度需求,分析了微动台定位精度指标,提出了实现微动台  $x$ 、 $y$ 、 $\theta_z$  三个自由度定位精度的控制器设计方法,并在微动台系统上进行了实验验证。结果表明,微动台  $x$  方向定位精度可达 $\pm 1.51$  nm, $y$  方向定位精度可达 $\pm 5.46$  nm, $\theta_z$  定位精度可达 $\pm 0.02$   $\mu$ rad,可以满足 SBIL 的需求和干涉条纹周期测量的精度要求。

**关键词** 测量;扫描干涉场曝光;微动台;条纹周期测量精度;相位锁定

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1012006

## Design and Control of Ultra-Precision Fine Positioning Stage for Scanning Beam Interference Lithography

Lu Sen<sup>1,2</sup>, Yang Kaiming<sup>1,2</sup>, Zhu Yu<sup>1,2</sup>, Wang Leijie<sup>1,2</sup>, Zhang Ming<sup>1,2</sup>, Yang Jin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup> Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-Precision Manufacturing Equipments and Control,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>3</sup> Basic Technology Research Department, Dongfeng Commercial Vehicle Technical Center,  
Wuhan, Hubei 430056, China

**Abstract** Exposure result of scanning beam interference lithography (SBIL) system is closely related to the movement property of the stage. The stage adopts coarse-fine dual stage mechanism to fabricate large-area plane grating with nanometer accuracy. The fine stage is the key point of the movement accuracy of the stage. According to the principle of SBIL, the relationship between interference fringe period measurement accuracy and exposure contrast is deduced. For the period measurement method of interference fringe by moving beam-splitter, the positioning accuracy index of the fine positioning stage is analyzed by considering period measurement accuracy requirements. A controller design method is proposed to realize the positioning accuracies of the degrees of freedom in  $x$ ,  $y$ ,  $\theta_z$  directions. And the experiment is conducted in the fine positioning stage system. The results show that the positioning accuracy of  $x$ ,  $y$ ,  $\theta_z$  can achieved  $\pm 1.51$  nm,  $\pm 5.46$  nm and  $\pm 0.02$   $\mu$ rad, respectively, which can satisfy the SBIL exposure requirements and the interference fringe period measurement accuracy requirements.

**Key words** measurement; scanning beam interference lithography; fine positioning stage; fringe period

收稿日期: 2017-04-05; 收到修改稿日期: 2017-06-07

基金项目: 国家科技重大专项“磁悬浮工件台关键技术研究”(2012ZX02702-006)

作者简介: 鲁 森(1987—),男,博士研究生,主要从事扫描干涉光刻系统方面的研究。

E-mail: lus13@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 朱 煜(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事面向 IC 制造装备的超精密机械系统设计、超精密测量和超精密运动控制等方面的研究。E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: yangkm@tsinghua.edu.cn

measurement accuracy; phase locking

OCIS codes 120.2650; 050.2770; 220.3740

## 1 引 言

扫描干涉场曝光<sup>[1-3]</sup>(SBIL)技术是一种类似于激光直写的光栅制作技术,它利用小干涉场(直径 2 mm)完成曝光,克服了全息曝光中干涉条纹相位非线性问题<sup>[4]</sup>。SBIL 干涉场中包含几千条干涉条纹,利用工件台的连续扫描步进运动完成对整块基底的曝光,有效地解决了激光直写和机械刻划制作效率低的问题,极大地提高了光栅的制造效率。

扫描曝光过程中,工件台定位误差会导致干涉条纹与基底产生相对位移。针对该问题,Heilman 等<sup>[5]</sup>设计了条纹相位锁定系统,该系统通过激光干涉仪测量工件台的运动误差,应用声光调制器(AOM)调整干涉条纹相位,从而实时补偿工件台运动误差引起的相位误差。该设计有效地保证了扫描曝光对比度和光栅刻线相位精度,但必须将工件台位移精确转化为相位量,所以需要干涉条纹周期达到极高的测量精度<sup>[6]</sup>。

为了保证条纹周期测量与工件台位移测量基准的一致性,通常采用分光镜移动法测量干涉条纹周期,该方法需要工件台定位精度达到纳米量级<sup>[7]</sup>。为制作 300 mm×300 mm 的光栅,Konkola<sup>[8]</sup>采用了  $x$ - $y$  行程为 310 mm×470 mm 的二维运动工件台,其直线度为  $\pm 1.5 \mu\text{m}/310 \text{ mm}$ ,转角误差为  $\pm 2.4 \mu\text{rad}$ ,最高定位精度为 30 nm,最终实现干涉条纹周期测量精度为  $2.8 \times 10^{-6}$ 。姜珊<sup>[9]</sup>应用行程为 100 mm×100 mm 的二维运动工件台完成了 80 mm×70 mm 光栅的制作,该工件台定位精度仅为微米量级,因此在干涉条纹周期测量过程中需要添加一个小行程一维工件台,利用其纳米定位精度实现干涉条纹周期  $1.0 \times 10^{-5}$  的测量精度,但同时也增加了系统整体的复杂性。

粗微叠层工件台既可实现大范围平动,又能实现纳米级的定位精度,主要应用于高精密加工装备中,如光刻机等<sup>[10-12]</sup>。通常粗动台采用气浮导轨支撑,直线电机驱动;微动台采用音圈电机驱动,同样采用气浮轴承作为导轨,从而减少摩擦影响,提高响应速度<sup>[10]</sup>。Chen 等<sup>[13]</sup>利用 10 mm×10 mm 的干涉场,通过粗微叠层工件台的步进运动,采用逐场曝光的方法制作出周期为 600 nm 的光栅,曝光场之间拼接误差最高达 20 nm。所使用的微动台在  $x, y$  方向定位精度为  $\pm 10 \text{ nm}$ ,转角误差为  $\pm 0.5 \mu\text{rad}$ 。这种曝光拼接的方法没有使用条纹锁定的概念,制造精度完全受限于工件台性能,且制造效率较低。

针对上述问题,本文提出一种条纹锁定结合粗微叠层工件台的 SBIL 系统设计方案。首先,介绍 SBIL 的工作原理;然后,根据扫描曝光的周期性特点,建立 SBIL 曝光模型,通过傅里叶变换的方法,分析干涉条纹周期测量误差与曝光对比度的关系;最后,针对 SBIL 所需的大行程运动范围以及所需的周期测量精度,分析粗微叠层工件台的微动台结构及其设计原理。为了满足扫描干涉场条纹周期精度控制需求,对微动台的运动控制开展研究并进行实验验证。

## 2 SBIL 原理

图 1 为所研究的 SBIL 系统,其采用两束相干高斯光在基底上形成干涉条纹,利用工件台的扫描步进运动,对涂有光刻胶的光栅基底进行曝光。扫描曝光过程中,两种误差会引起干涉条纹漂移:一个是空气折射率的变化,主要由于环境温度、压强、湿度和空气湍流等造成;另一个是工件台的定位误差。为了克服上述误差,将工件台误差信号和条纹相位漂移误差信号实时传送到条纹锁定控制器中,通过控制算法得到 AOM 的驱动信号,实现相位锁定功能。图 2 显示了扫描步进曝光过程,由于干涉条纹的光强呈高斯分布,相邻两次扫描需要部分重叠,从而保证基底上曝光量的均匀性。

在扫描曝光过程中,通过条纹相位锁定系统保持条纹相位与工件台位置相对静止,相位锁定精度是实现曝光对比度和光栅相位精度的关键。相位锁定原理如图 3 所示(PID 为比例微分积分),相位锁定系统的核心思想是通过条纹相位移动来补偿工件台位移误差,而干涉条纹周期是联系条纹相位与工件台位移的关键参数。

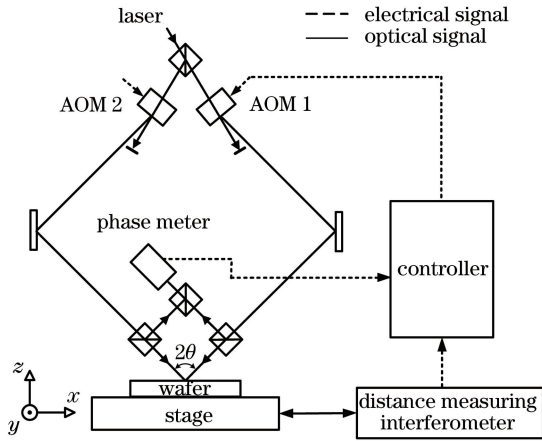


图 1 SBIL 系统  
Fig. 1 SBIL system

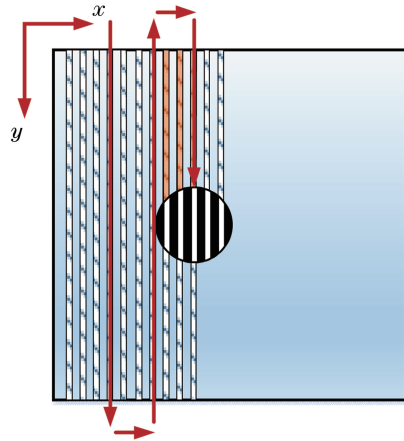


图 2 SBIL 扫描步进曝光过程  
Fig. 2 Scanning and step exposure process of SBIL

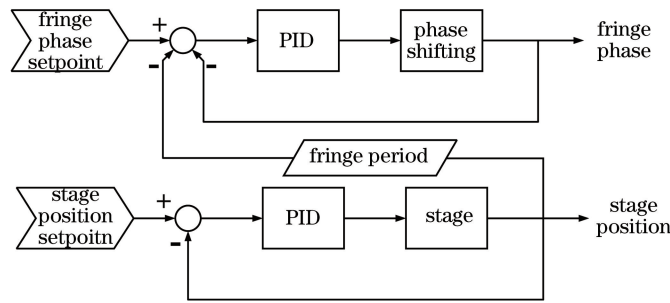


图 3 条纹锁定控制原理  
Fig. 3 Fringe phase-locking control principle

### 3 SBIL 周期测量误差与曝光对比度关系

为得到最大曝光对比度,在扫描曝光过程中,工件台的步进量必须为条纹周期  $p$  的整数倍。但实际条纹周期测量值  $p_m$  与真实值  $p$  之间存在一定的相对误差,假定

$$p_m = p(1 + \delta), \quad (1)$$

则该相对误差  $\delta$  将有可能造成曝光对比度下降。Chen<sup>[14]</sup>在空间域内通过数值模拟的方法得到了曝光对比度与周期测量误差之间的关系,未得到二者的闭合形式关系;Montoya<sup>[15]</sup>利用傅里叶变换的方法推导了曝光对比度与周期测量误差之间的数学关系,但未考虑干涉条纹沿  $y$  轴扫描的过程,而是直接以光强乘以时间代替单次扫描的曝光量。本节将采用傅里叶变换的方法推导曝光对比度与相对误差之间的关系,并给出单次扫描曝光量的具体表达式。

SBIL 利用两束高斯激光的束腰位置,在基底表面( $z=0$ )形成干涉条纹。激光波长为  $\lambda$ ,束腰半径为  $r$ ,激光入射方向与  $z$  轴夹角为  $\theta$ ,则在基底表面的电场分布  $E_1$  和  $E_2$  可表示为:

$$\begin{cases} E_1 = A_1(x, y) \exp [i(kx \sin \theta + kz \cos \theta)] \\ E_2 = A_2(x, y) \exp [i(-kx \sin \theta + kz \cos \theta)] \end{cases}, \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} A_1(x, y) = A_1 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \\ A_2(x, y) = A_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \\ k = \frac{2\pi}{\lambda} \end{cases}。 \quad (3)$$

干涉条纹光强分布可表示为:

$$I(x, y) = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^* = (A_1^2 + A_2^2) \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \left[1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right)\right], \quad (4)$$

式中干涉条纹周期  $p$  以及干涉条纹的光强对比度  $\gamma$  分别可以表示为:

$$\begin{cases} p = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \\ \gamma = \frac{2A_1(x, y)A_2(x, y)}{[A_1(x, y)]^2 + [A_2(x, y)]^2} \end{cases} \quad (5)$$

工件台以速度  $v$  沿  $y$  轴匀速扫描,完成单次扫描的曝光量为:

$$D_1(x) = \int I(x, y) \frac{dy}{v} = \frac{\sqrt{\pi}r(A_1^2 + A_2^2)}{v} \exp\left(-\frac{2x^2}{r^2}\right) \left[1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right)\right], \quad (6)$$

对(6)式进行傅里叶变换,可以表示为:

$$\hat{D}_1(\omega) = \frac{\sqrt{\pi}r(A_1^2 + A_2^2)}{2\pi v} \left\{ \frac{\sqrt{2\pi}r}{2} \exp\left(-\frac{\omega^2 r^2}{8}\right) \cdot \left[ 2\pi\delta(\omega) + \gamma\pi\delta\left(\omega - \frac{2\pi}{p}\right) + \gamma\pi\delta\left(\omega + \frac{2\pi}{p}\right) \right] \right\}, \quad (7)$$

对(7)式进行分析可以发现,  $D_1(x)$  中的交流量分布在  $\omega = -2\pi/p$  和  $\omega = 2\pi/p$  两个频率上,而  $D_1(x)$  中的直流量分布在  $\omega = 0$ ,如图 4 所示。

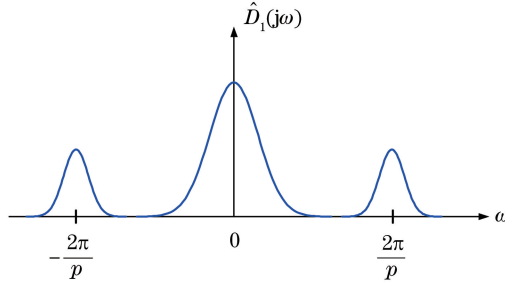


图 4  $D_1(x)$  傅里叶变换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the Fourier transform of  $D_1(x)$

假定相邻两次扫描间的步进量为  $S$ ,则经过  $n$  次扫描后,基底上光刻胶的总曝光量可表示成单次扫描与脉冲序列的卷积形式,即:

$$D(x) = D_1(x) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nS). \quad (8)$$

式中  $*$  表示卷积,对(8)式进行傅里叶变换:

$$\hat{D}(\omega) = \hat{D}_1(\omega) \left[ \frac{2\pi}{S} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{S}\right) \right], \quad (9)$$

从(9)式可以看出,总曝光量等于周期为  $2\pi/S$  的脉冲序列对  $\hat{D}_1(\omega)$  进行采样后,再乘以系数  $2\pi/S$ 。在  $\delta \ll 1$  的情况下<sup>[11]</sup>,

$$\frac{2\pi}{p} - \frac{2\pi}{p_m} \approx \frac{2\pi\delta}{p}, \quad (10)$$

$$\Gamma = \frac{2\hat{A}(\omega) |_{\omega=2\pi\delta/p}}{\hat{D}(0)} = \gamma \exp\left[-\frac{(2\pi\delta/p)^2 r^2}{8}\right], \quad (11)$$

式中  $\gamma$  为干涉条纹光强对比度,当两束高斯光光强相等,即  $A_1 = A_2$  时,  $\gamma = 1$ 。当条纹周期真实值  $p$  为 251 nm,束腰半径  $r$  为 0.7 mm 时,可得  $\Gamma/\gamma$  与  $\delta$  的关系曲线如图 5 所示。从曲线关系可以得出,要得到 0.95 以上的曝光对比度,干涉条纹周期测量误差必须小于  $3.655 \times 10^{-7}$ 。

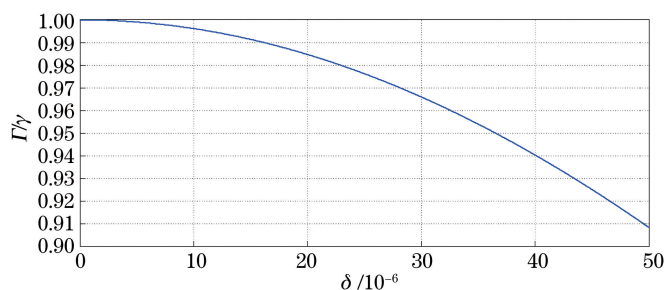


图 5 曝光对比度随周期测量误差的变化曲线

Fig. 5 Exposure contrast versus period measurement error

#### 4 微动台结构设计与控制研究

SBIL 对比度直接影响光栅掩模槽形,根据上节分析结果,为得到 0.95 以上的曝光对比度,干涉条纹周期测量精度必须达到  $3.655 \times 10^{-7}$ 。应用移动分光镜的方法测量干涉条纹周期时,安装在工件台上的分光镜对两束相干光进行合光,在点探测器表面上形成干涉,该点探测器也安装在工件台上。控制工件台沿着垂直于条纹的方向运动特定位移,使两相干光之间产生光程变化,从而干涉场会产生对应的相位移动。干涉条纹移动周期的个数通过计算点探测器输出的正弦信号得到,最终将工件台位移与对应的移动周期个数相除,得到干涉条纹周期。在测量过程中,要实现  $1 \times 10^{-7}$  量级的周期测量精度,必须采用具有纳米级定位精度的工件台<sup>[7]</sup>。

为同时实现 SBIL 所需的大行程运动,工件台采用粗微叠层结构的设计,工件台结构如图 6 所示。音圈电机的定子固连在粗动台上,动子固连在微动台上。曝光过程中,将运动轨迹  $x_{ref}$  输入到微动台控制器,使微动台跟随输入轨迹运动。粗动台控制器的参考输入为零,通过电涡流传感器测量粗动台与微动台之间的相对位移  $x_{diff}$ ,并作为粗动台控制的反馈信号,从而实现粗动台跟随微动台运动,其对接关系如图 7 所示。粗动台完成所需的  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  大行程运动,精度仅需达到微米量级;微动台行程很小,用于补偿粗动台的误差,并实现周期测量所要求的纳米级运动精度。在此方案下,工件台的运动性能由微动台决定,而粗动台控制性能要求远低于微动台,微动台的控制性能是实现整个工件台系统控制性能指标以及扫描干涉场光刻条纹周期测量精度的关键。

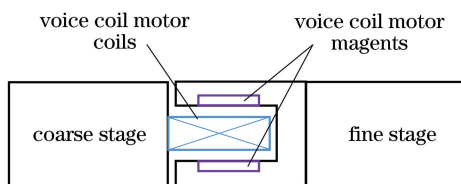


图 6 粗微叠层工件台结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of coarse-fine dual stage structure

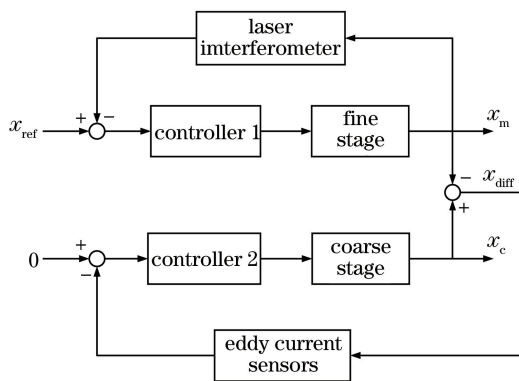


图 7 粗微叠层对接关系框图

Fig. 7 Block diagram of coarse-fine dual stage docking scheme

为了满足扫描干涉场光刻条纹锁定精度要求,同时克服转角误差引起的曝光对比度降低问题,设计了具有  $x, y, \theta_z$  三个自由度的微动台,其运动行程指标为:  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mrad}$ 。微动台结构如图 8 所示,其动子与定子间采用平面气浮支撑,驱动单元为 4 个动铁式音圈电机。音圈电机在小行程内可产生较大的推力,具有良好的动态响应性能,同时具有体积紧凑、散热量低的优点。微动台采用分辨率达  $0.6 \text{ nm}$  的 Agilent 激光干涉仪作为位移测量传感器。控制系统采用基于 VME(VersaModule Eurocard)总线的背板工控机,软件系统基于实时操作系统 Vxworks 实现,采样频率为  $5 \text{ kHz}$ 。如图 9 所示,微动台及测量系统整体放置在主动隔振平台上,从而减少地面振动对工件台运动精度的影响。

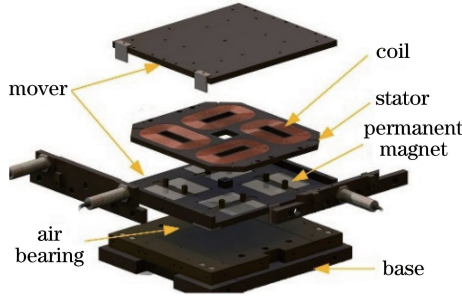


图 8 微动台内部结构示意图

Fig. 8 Internal structure diagram of fine positioning stage

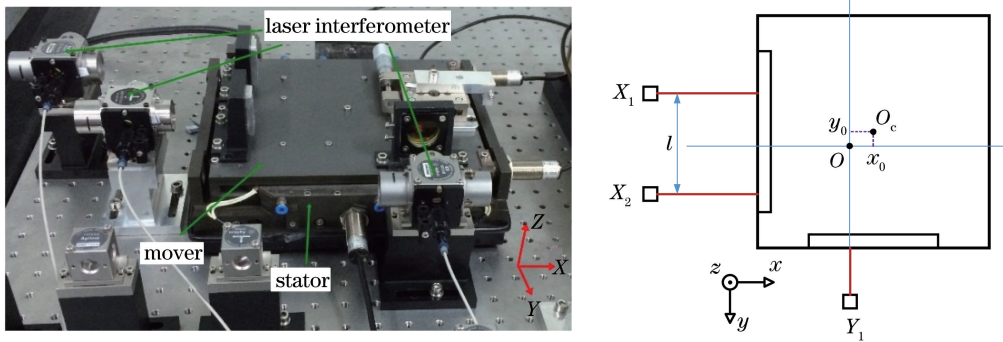


图 9 微动台系统布局

Fig. 9 System overview of fine positioning stage

对微动台的控制一般将其多输入多输出(MIMO)模型解耦成多个单输入单输出(SISO)模型,再分别设计 SISO 控制器其进行控制<sup>[16]</sup>。为方便控制,将  $y$  自由度的两个电机串联成一体。如图 10 所示,对微动台在  $x, y, \theta_z$  三个自由度上进行解耦,获得微动台解耦的  $3 \times 3$  模型,再分别对各个自由度设计控制器。利用文献[17]中的解耦方法,获得激光干涉仪读数  $\mathbf{x}_m = [x_1 \ x_2 \ y_1]^T$  与音圈电机出力  $\mathbf{F} = [F_{x1} \ F_{x2} \ F_{y1}]^T$  之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{x1} \\ \mathbf{F}_{x2} \\ \mathbf{F}_{y1} \end{bmatrix} = s^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -m(y + y_0)/J \\ 1/2 & 0 & -m(y + y_0)/(2J) + 1/d \\ 0 & 1 & -m(x + x_0)/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1/l & 1/l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}(s) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中  $m$  为工件台质量,  $J$  为工件台转动惯量,  $d$  为线圈中心到微动台中心在出力方向的距离,  $l$  为  $x$  轴两路激光干涉仪测量点之间的距离,  $(x, y)$  为微动台位移,  $(x_0, y_0)$  为初始时刻微动台质心  $O_c$  与激光干涉仪测量中心  $O$  之间的相对位置。由(12)式可推导出微动台的理论模型为:

$$\mathbf{H}(s) = \mathbf{T}^{-1}(s). \quad (13)$$

微动台控制系统的误差模型为:

$$\mathbf{E}(s) = \frac{1}{1 + \mathbf{C}(s)\mathbf{G}(s)\mathbf{H}(s)\mathbf{D}(s)}. \quad (14)$$

由于理论模型与实际模型存在偏差,需要通过模型辨识的方法获取可用于控制的微动台模型。在闭环条件下

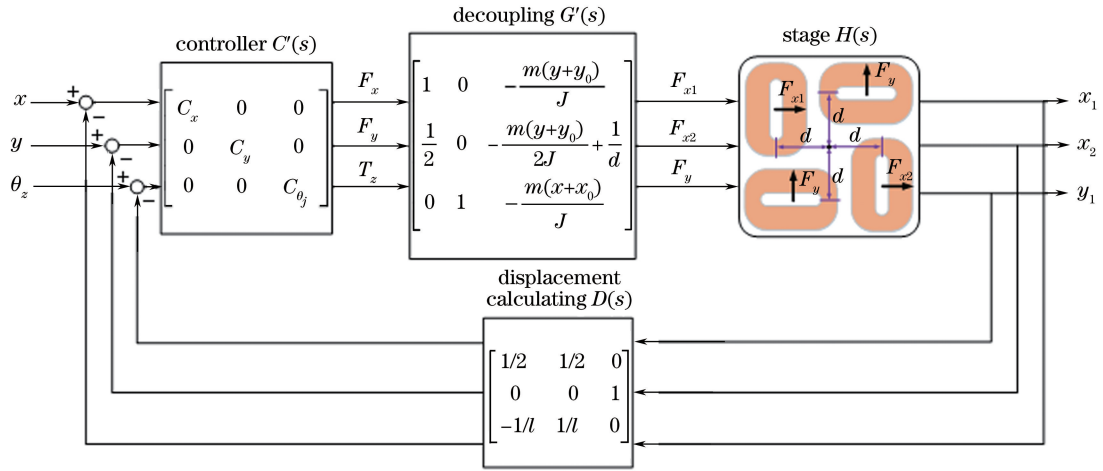


图 10 微动台三自由度解耦控制框图

Fig. 10 Three degree of freedom decoupling control block diagram of fine positioning stage

分别对各个自由度进行模型辨识,然后针对各辨识模型特点分别进行控制器的设计。由于三个运动自由度的控制器设计过程类似,本文只对  $x$  自由度的设计过程进行详细描述,并给出最终三个自由度的控制结果。

对  $x$  自由度模型进行辨识时,在闭环条件下输入 100~1500 Hz 的激励信号,得到如图 11 所示的辨识模型结果。从图中可以看出,系统在 400 Hz 以下幅频特性接近理想的双积分模型,即近似为  $-40 \text{ dB}/(^{\circ})$  斜率的直线。但与理想的双积分模型相比,相频曲线存在较大的相位滞后,且滞后量随频率的增加而增大,说明系统中存在较大的时滞。在 400 Hz 以上幅频特性有多个共振、反共振峰,表明系统 400 Hz 以上有多阶弹性模态。

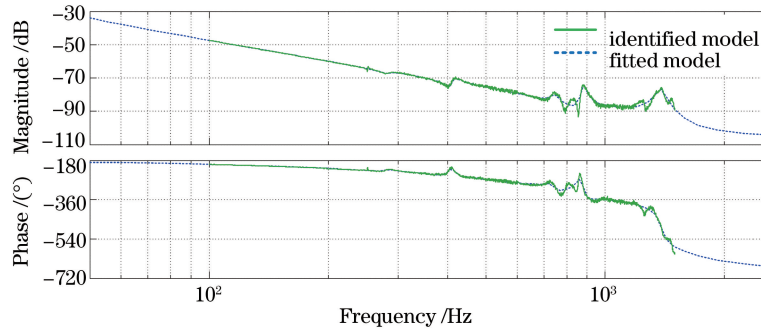


图 11  $x$  自由度模型的辨识和拟合结果

Fig. 11 Identified and fitted results of  $x$  degree of freedom model

为了保证微动台  $x$  自由度闭环稳定,控制器采用简便、易行的 PID 控制器结构。在此基础上,增加陷阶滤波器抑制微动台机械谐振,同时加入超前环节实现相位超前量,保证相位裕度。基于以上分析设计  $x$  自由度控制器为

$$C(s) = 0.22854 \times \frac{(1 + 2.4s) [1 + 0.000032s + (0.00016s)^2]}{(1 + 0.000065s)(1 + 0.00016s)(1 + 0.00016s)} \quad (15)$$

图 12 为  $x$  自由度模型开环传递函数 Bode 图,从图中可以看出,当前控制器参数下,控制带宽为 215 Hz,幅值裕度为 6.74 dB,相位裕度为  $36.6^{\circ}$ ,可以满足控制性能要求。

采用上述方法分别得到  $x, y, \theta_z$  三个自由度的控制器,并在微动台系统上进行控制实验,各自由度的定位误差如图 13 所示。表 1 列出了各自由度定位误差的统计数据,其中,  $x$  方向定位精度决定了干涉条纹周期测量精度,而  $x$  方向定位精度均方根(RMS)值可达 1.51 nm,峰峰值达 11.28 nm,完全可以满足干涉条纹周期测量精度要求。同时,  $y$  方向定位精度 RMS 值可达 5.46 nm,峰峰值达 38.19 nm;  $\theta_z$  方向定位精度 RMS 值可达  $0.02 \mu\text{rad}$ ,峰峰值达  $0.17 \mu\text{rad}$ ,完全可以满足 SBIL 过程的动态性能需求。

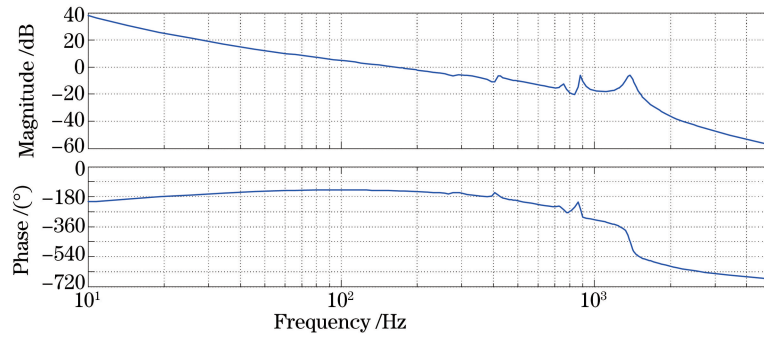


图 12 开环传递函数 Bode 图

Fig. 12 Bode diagram of open loop transfer function

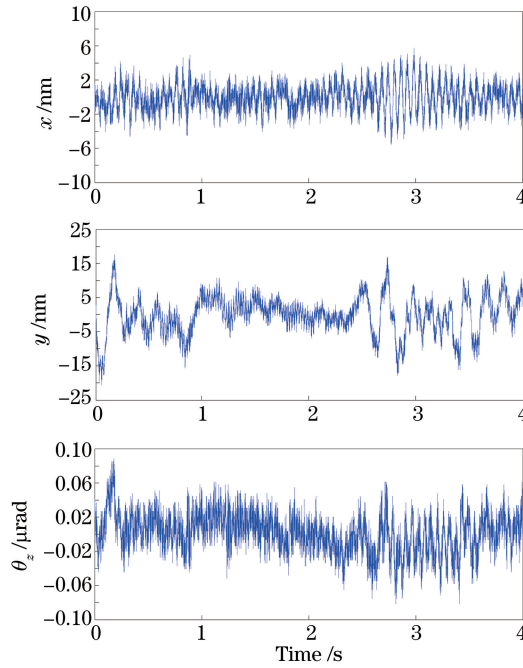


图 13 闭环控制下  $x, y, \theta_z$  自由度的定位误差

Fig. 13 Positioning errors in degrees of freedom of  $x, y, \theta_z$  with close-loop control

表 1  $x, y, \theta_z$  定位误差统计

Table 1 Statistics of positioning error in  $x, y, \theta_z$

Motion direction	Positioning error	
	RMS	Peak-peak
$x$ /nm	1.51	11.28
$y$ /nm	5.46	38.19
$\theta_z$ / $\mu$ rad	0.02	0.17

## 5 结 论

干涉条纹周期测量精度是决定 SBIL 性能的重要参数。根据 SBIL 原理,分析了周期测量精度与曝光对比度的关系。为了实现所需的条纹周期的精确测量,开展了微动台的结构设计与控制方法研究,并进行了相关控制实验。得到如下结论:1)为保证 SBIL 对比度达到 0.95,条纹周期测量精度必须达到  $3.655 \times 10^{-7}$ ; 2)采用音圈电机驱动和平面气浮支撑的微动台结构,具有良好的动态特性与可控性,为实现纳米定位精度提供了硬件基础;3)采用陷阵滤波器和超前相位环节,有效地提高了微动台的控制性能,最终实现了  $x, y$  自由度的纳米级定位精度和  $\theta_z$  转角的亚纳弧级定位精度。超精密微动台纳米级定位精度的实现,保证了极高的



条纹周期测量精度,对采用 SBIL 制作纳米级相位精度的平面光栅具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Schattenburg M L, Chen C, Everett P N, *et al.* Sub-100 nm metrology using interferometrically produced fiducials[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1999, 17(6): 2692-2697.
- [2] Pati G S, Heilmann R K, Konkola P T, *et al.* Generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2002, 20(6): 2617-2621.
- [3] Chen C G, Konkola P T, Heilmann R K, *et al.* Nanometer-accurate grating fabrication with scanning beam interference lithography[C]. *SPIE*, 2002: 126-134.
- [4] Ferrera J, Schattenburg M L, Smith H I. Analysis of distortion in interferometric lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1996, 14(6): 4009-4013.
- [5] Heilmann R K, Konkola P T, Chen C G, *et al.* Digital heterodyne interference fringe control system[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2001, 19(6): 2342-2346.
- [6] Chen C G, Konkola P T, Heilmann R K, *et al.* Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2001, 19(6): 2335-2341.
- [7] Jiang Shan, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.* An accurate method for measuring interference fringe period in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0705001.  
姜 珊, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期精确测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0705001.
- [8] Konkola P T. Design and analysis of a scanning beam interference lithography system for patterning gratings with nanometer-level distortions[D]. Berkeley: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [9] Jiang Shan. Study on measurement and adjustment of interference fringe for scanning beam interference lithography system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
姜 珊. 扫描干涉场曝光系统干涉条纹测量与调整方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [10] Yang Kaiming. Studies on dynamic model and motion control of precision stage[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.  
杨开明. 精密工作台动力学模型及其运动控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [11] Yang Yibo. Identification & decoupling control system design for coarse-fine stages[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.  
杨一博. 粗精动平台的系统辨识与解耦控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [12] Butler H. Position control in lithographic equipment: an enabler for current-day chip manufacturing[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2011, 31(5): 28-47.
- [13] Chen C H, Yen J Y, Chen L S, *et al.* Stitching technology using hybrid actuators in nano imprint[C]. *New York: 2nd International Conference on Micro- and Nanosystems*, 2008: 683-687.
- [14] Chen C G. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Berkeley: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [15] Montoya J. Toward nano-accuracy in scanning beam interference lithography[D]. Berkeley: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [16] Heertjes M, Hennekens D, Steinbuch M. MIMO feed-forward design in wafer scanners using a gradient approximation-based algorithm[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(5): 495-506.
- [17] Mu Haihua, Zhou Yunfei, Zhou Yanhong. Coupling mechanism analysis and dynamic modeling for Lorentz motor motion control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(15): 95-100.  
穆海华, 周云飞, 周艳红. 洛仑兹电机运动控制耦合机理分析及动力学建模[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(15): 95-100.