

激光与光电子学进展

光刻机运动台控制方法研究进展

姜龙滨¹, 丁润泽¹, 丁晨阳^{1*}, 杨晓峰^{2**}, 徐云浪²

¹复旦大学工程与应用技术研究院上海市超精密运动控制与检测工程研究中心, 上海 200433;

²复旦大学微电子学院专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433

摘要 光刻机是支撑集成电路芯片制程不断减小的关键设备,而高性能的光刻机需要高加速度和高精度的运动台作为支撑。为了达到光刻机的各项工作指标,高性能的运动台控制方法必不可少。本文针对光刻机运动台的主流控制方法进行了梳理和介绍,首先介绍了运动台的工作原理及基本控制架构,然后从前馈控制、反馈控制、冗余驱动/冗余测量等方面对运动台控制方法进行具体介绍,旨在为光刻机运动台控制方法的进一步发展提供参考。

关键词 光刻机; 运动台; 前馈控制; 反馈控制

中图分类号 TN305

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922003

Research Progress on Stage Control Methods for a Lithography Machine

Jiang Longbin¹, Ding Runze¹, Ding Chenyang^{1*}, Yang Xiaofeng^{2**}, Xu Yunlang²

¹Shanghai Engineering Research Center of Ultra-Precision Motion Control and Measurement, Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

²State Key Laboratory of ASIC and System, School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract A lithography machine is a key equipment to support the continuous reduction of the size of the integrated circuit. High-performance lithography machine requires high-acceleration and high-precision motion stages. To meet the requirements of the lithography machine, high-performance stage control methods are essential. This paper sorts out and introduces the mainstream control methods of motion stages in the lithography machine. First, the working principle and basic control structure of motion stages are introduced. Then, the control methods of the motion stage are introduced in detail from the aspects of feedforward control, feedback control and over-actuation/over-sensing, to provide a reference for the further development of control methods of lithography machine motion stages.

Key words lithography machine; motion stage; feedforward control; feedback control

1 引言

现代信息技术的发展离不开集成电路(IC)芯片领域的长足进步。集成电路芯片在几十年间按照摩尔定律发展,为人类在信息领域的科技进步打

下了坚实的基础。半导体工艺中的一道关键工艺步骤为光刻,而进行光刻工艺是通过光刻机来实现的^[1-3]。光刻机的作用是通过曝光的方式,将掩模内的集成电路版图转移到硅片面的光刻胶中,完成光刻工艺。考虑到高产率的要求,光刻机要在保证极

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA1200600)、中国博士后科学基金(2021TQ0070)、复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室开放基金(2021KF007)

通信作者: *dingcy@fudan.edu.cn; **xf_yang@fudan.edu.cn

高精度的情况下每小时加工约 280 片直径为 300 mm 的硅片^[4]。在浸没式光刻工艺中,将某种液体充满投影物镜最后一个透镜的下表面与硅片之间以增加光学系统的数值孔径,这样可以将 193 nm 光刻延伸到 45 nm 节点以下。在目前最先进的极紫外 (EUV) 光刻机中, EUV 光由高功率二氧化碳激光所产生,其波长为 13.5 nm^[5]。结合双重图形光刻技术 (DPT) 能够将 IC 的最小尺寸做到 7 nm 以下^[6], 从而不断突破超精密加工领域的技术极限, 继续维持摩尔定律有效。

光刻机的曝光方式经历了接触式、接近式和投影式三个阶段。早期的光刻机主要是接触式光刻机和接近式光刻机。为了解决接近/接触式光刻机存在的掩模和光刻胶污染、易损坏掩模版和光刻胶层以及光刻分辨率低等问题, 1973 年 Perkin Elmer 公司推出了世界上第一台扫描投影光刻机^[7-8]。与

接近式光刻机不同, 扫描投影光刻机在工作过程中将掩模上的图形投影成像到硅片面。随着集成电路行业不断发展, 扫描投影光刻机的曝光方式先后经历了扫描投影曝光、重复投影曝光和步进扫描投影曝光等几个发展阶段。目前, 步进扫描投影光刻机已经成为集成电路制造的主流机型, 当前最先进的 EUV 光刻机就是采用步进扫描投影的曝光方式^[9]。

如图 1 所示, 步进扫描投影光刻机主要由照明系统、投影物镜系统、运动台系统、隔振系统、对准系统和调平调焦系统等分系统组成。为了达到光刻的高精度指标, 高性能的超精密运动台是必不可少的。运动台系统是光刻机的核心子系统之一, 按照所承担的功能不同, 可以分为承载掩模的掩模台和承载硅片的工件台两种。由于光刻工艺对精度要求极高, 工件台和掩模台的控制精度要求也就非常高。

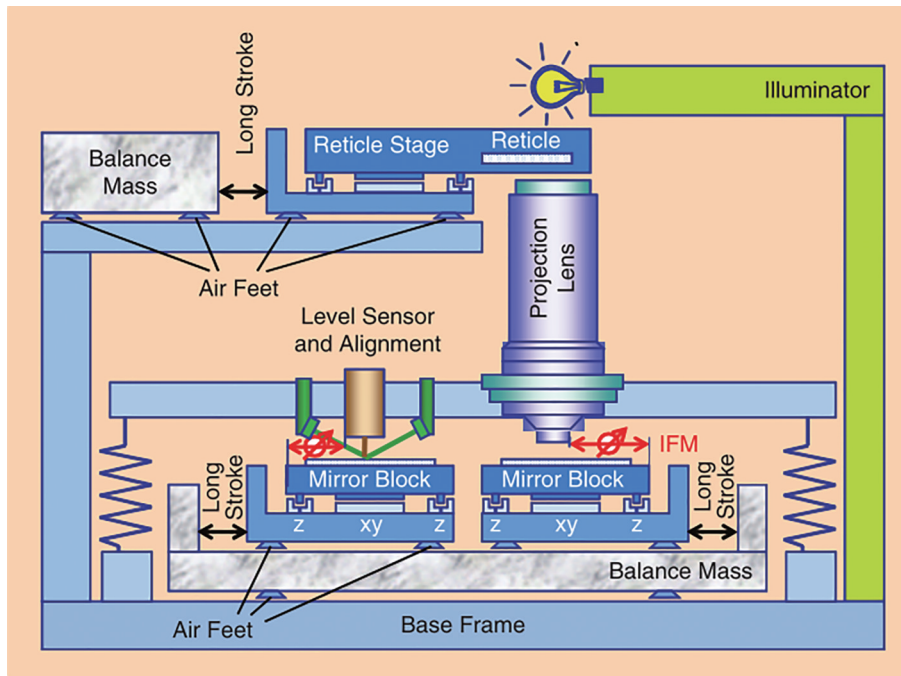


图 1 步进扫描投影光刻机结构的示意图^[10]

Fig. 1 Schematic diagram of step and scan projection lithography machine^[10]

在最初光刻机运动台设计中, 只采用单层结构。随着集成电路特征尺寸的不断缩小, 为了实现更加精密的加工, 现有的光刻机运动台一般采用宏动台和微动台结合的叠层结构设计。其中, 宏动台实现大行程运动, 微动台跟随宏动台运动并做六自由度的小行程、纳米级的高精度运动^[11]。

2000 年左右, 为了提高产率和经济效益, 硅片直径从 200 mm 升级到 300 mm, 这样使得芯片制造

成本降低了 30%^[12]。在光刻机中, 直径更大的硅片需要更大的工件台来承载, 对于单个硅片需要曝光更多的场。在硅片直径增大的情况下, 为了保证光刻机的产率不降低, 工件台需要具备更快的运动速度。早期光刻机中的工件台为单工件台, 在完成一次硅片曝光之后, 需要将曝光后的硅片取下, 然后工件台回到起点重新装载新的硅片, 这样的设计增加了曝光的等待时间, 限制了产率。此外, 为了满

足集成电路特征尺寸不断减小的需求,还需要工件台具备更高的定位精度。然而在只有单个工件台的情况下,同时满足更大尺寸、更快速度和更高的定位精度等多个条件是非常困难的。

为解决单工件台方案存在的上述问题,2001年ASML推出了TWINSCAN系列双工件台系统。如图2所示,双工件台在工作时,其中一个工件台在曝光位进行硅片曝光,另一个工件台在测量位对新的硅片进行对准和调焦调平^[13]。与单工件台相比,双工件台测量与曝光同时进行,使得光刻机可以实现更高的产率。此外,由于硅片曝光时间一般大于测量时间,因此相比于单工件台,双工件台光刻机可以采用更多的对准标记进行对准,并且能够进行硅片形貌的测量,能实现更高精度的对准和调焦调平,这有益于制造更小特征尺寸的芯片。

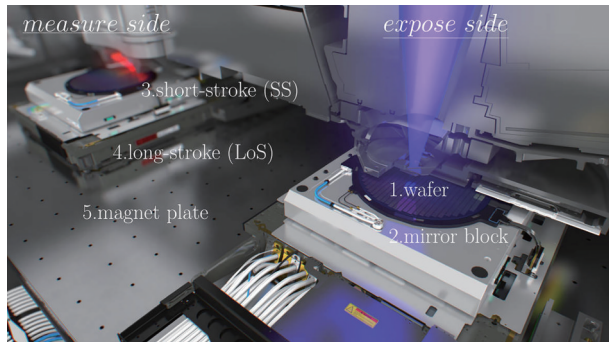


图2 光刻机双工件台示意图^[14]

Fig. 2 Schematic diagram of two wafer stages of lithography machine^[14]

光刻机运动台能达到预期的高精度指标,必须有先进运动控制技术作为支撑。本文聚焦于光刻机超精密运动台中的运动控制技术,首先介绍了光刻机的基本工作原理和运动台的基本机构,然后梳理了运动台中正在应用的前馈控制、反馈控制、冗余驱动/冗余测量等控制技术,并介绍了目前针对光刻机运动台控制技术发展的一些最新成果,旨在为光刻机运动台超精密运动控制技术的发展提供参考。

2 光刻机运动台概述和国内外研究现状

2.1 运动台工作原理与性能指标要求

光刻机的基本工作原理如图3所示。在光刻开始前,待刻硅片被送到工件台上,工件台上特殊的吸盘将硅片牢固吸附在台体上,与此同时,掩模台

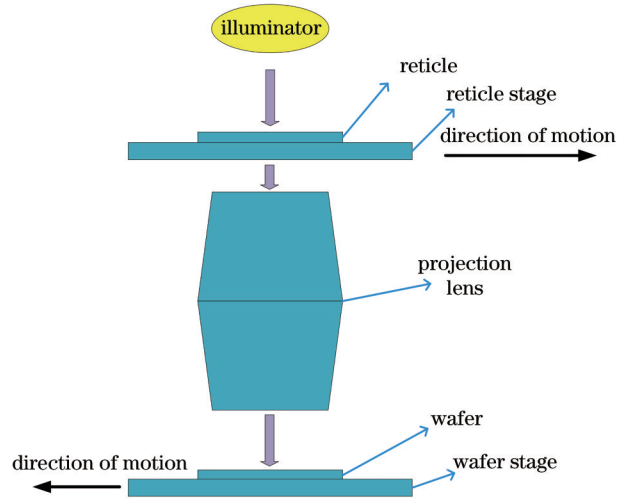


图3 光刻机工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of lithography machine working principle

也会将相应的掩模版吸附住。在光刻工艺中,光源产生具有特定强度的照明光场,经过整形等处理后照射在掩模版上^[15],光线通过掩模进入投影物镜,最终照射在硅片上。硅片上覆盖的光敏材料(光刻胶)被曝光,将掩模上的电路版图转移到硅片上。在对硅片曝光之前,工件台和掩模台开始加速运动且二者速度方向相反。在曝光开始时,二者的速度达到合适的比例。

光刻机工件台的运动轨迹如图4所示,在一次扫描曝光过程中,曝光狭缝的位置保持不变,工件台和掩模台保持一定的速率比进行相反方向的匀速扫描运动,保持极高的同步运动精度,使得掩模上的电路版图能快速地转移到硅片上的曝光场。在当前场的扫描曝光完成后,工件台还需要步进运动到下一曝光场进行重复扫描运动,如此循环地完成硅片上所有视场的曝光。光刻机的掩模台和工件台是两个相对独立的运动分系统,每个运动台又分为宏动部分和微动部分,要想实现高质量高精度

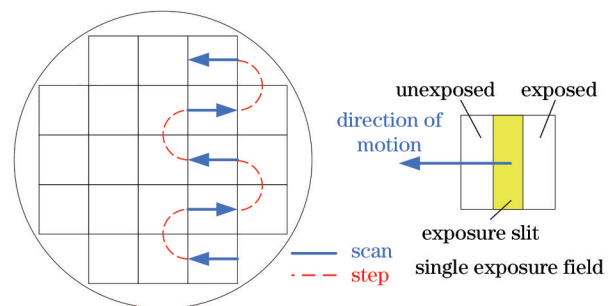


图4 光刻机工件台的运动轨迹示意图

Fig. 4 Schematic diagram of motion track of wafer stage

的光刻效果,除了保证单个运动台的运动精度,还必须保证二者具有较高的同步运动精度,这需要高精度的控制方法来实现。

随着半导体工业的不断发展,在摩尔定律的推动下,芯片制程越来越小。同时,为了经济效益的最大化,半导体领域对于生产装备的生产效率也提出了越来越高的要求。芯片制程与生产效率反映在对光刻机的要求上,主要表现为三大性能指标,分别是:

- 1) 光刻分辨率,反映了光刻机能清晰投影最小图像的能力;
- 2) 套刻精度,由于芯片在生产过程中要进行多次曝光,套刻精度反映了不同层在曝光时的重复定位精度;
- 3) 产率,反映了光刻机的生产效率,产率越高,单位时间内能够加工的硅片数越多,经济效益越高。

光刻机的三大主要性能指标,对运动台的性能产生了极高的要求,主要体现在两方面:

- 1) 六自由度高精度运动,掩模台与工件台要严格跟踪事先规划的运动轨迹,实现六自由度的高精度运动,从而保证曝光的精度;
- 2) 高速度、高加速度,尽可能缩短单次曝光的时间,从而提高产率。

要保证光刻机的产率和曝光质量,光刻机运动台应该满足特定的参数指标。

1) 轨迹跟踪误差的移动平均误差(MA),曝光期间运动台的移动平均误差决定了电路版图在硅片上的成像位置。MA的定义式^[10]为

$$E_{MA} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) dt, \quad (1)$$

式中: T 代表曝光周期的时间长度; $e(t)$ 表示以时间 t 为因变量的位置误差数据。

2) 轨迹跟踪误差的移动标准误差(MSD),它反映了运动台的高频抖动误差导致成像模糊的程度,MSD的定义式^[10]为

$$E_{MSD} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [e(t) - E_{MA}]^2 dt}。 \quad (2)$$

在曝光周期时长 T 内,MSD代表定位误差的高频部分,而MA代表误差的低频部分。

根据上述要求可知,光刻机运动台应该具备高精度、高速度和高加速度的性能,但是高加速度运动必定会产生较大的冲击力,导致机械系统出现振

动,继而对高运动精度造成不利影响。因此,为了处理好高加速度和高精度之间的矛盾,必须开发高性能的控制方法。要实现运动台高性能运动的目标,运动控制系统应满足如下条件:

- 1) 高跟踪精度,实现光刻分辨率指标的必然要求;
- 2) 高响应速度,对给定指令能够快速响应;
- 3) 低整定时间,达到指定位置后的残余振荡小,能够迅速执行下一步指令;
- 4) 强鲁棒性,系统稳定性好,对外界扰动抑制能力强,对系统摄动不敏感。

其中,第一条是实现高性能运动从而满足光刻机高精度指标的重中之重;第二、第三条是从光刻机高产率的角度出发,对运动控制系统提出的要求;第四条是实现工业化生产可靠性的必要保证,同时,在有一定外部扰动的情况下,保证运动台的跟踪精度。

2.2 运动台控制的国内外研究现状

国际上能够生产高性能光刻机的公司主要有荷兰ASML、日本Nikon和Canon,其中ASML公司占据着最多的高端市场份额,并且是唯一一家能制造高端极紫外光刻机的企业。荷兰在光刻机研制领域技术积累雄厚,其主要研究机构有埃因霍温理工大学和代尔夫特大学。日本是另一个光刻机研制的主要国家,东京大学等研究机构在这一方向开展了相关研究。我国的高端芯片缺口越来越大,必须逐步实现高端芯片的国产化,这就需要国产化的高性能光刻设备。国内的光刻设备研制与国外先进水平还存在一定的差距,从20世纪70年代开始,清华大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、复旦大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、上海微电子装备有限公司等科研单位相继开始进行光刻机研制的相关工作,也取得了一定的研究成果。

光刻机的高精度指标受到许多因素影响,而运动台系统的运动控制精度是其中重要的一部分。在运动台控制的实际应用中,经典控制策略占据主流。经典控制策略中最具有代表性的方法是PID控制,PID控制的结构简单且易于实现,但不能有效减小系统不确定性因素对于控制性能的影响。虽然众多学者在PID控制领域不断创新,但是PID控制本身存在局限,难以在运动台的扫描跟踪控制方面做出更大提高。

随着光刻机性能需求的进一步提升,现代控制策略与智能控制策略在光刻机工件台控制系统中也有了长足的发展,形成了更加完善的控制策略。现代控制策略以系统状态控制分析为主,控制系统分析设计精确,应用广泛,常用的有鲁棒控制、滑模控制、自适应控制和预测控制等。智能控制策略将智能算法延伸到控制领域,具有实时推理决策能力,适用于各种复杂控制系统中,常见的有神经网络、模糊控制及迭代学习控制等。

3 基于解耦的运动台控制基本结构

为了使运动台实现高精度的运动,高性能的运动控制方法必不可少。在实际应用中,针对单个运动台,其六自由度的控制一般先采用静态解耦的方法,将六自由度的多输入多输出(MIMO)系统控制问题转化为六个单输入单输出(SISO)系统的控制问题,每个SISO的控制问题对应一个自由度的控制。除了上述基于解耦的多输入多输出系统控制方法之外,目前也有学者提出了不使用解耦而直接进行多输入多输出控制的方法,从理论上可以实现更好的控制性能,但是该方法相关的研究文章较少,设计过程复杂,实际应用较少,因此本文不展开介绍此方法。

为了使读者能够更好地理解基于静态解耦的多输入多输出系统控制方法,以如下一个实现水平方向三自由度运动台控制的例子展开介绍^[10]。图5所示为一个龙门结构的三自由度运动台,可以在 x 轴与 y 轴两个方向的平动和绕着 θ 轴方向的转动。其中,在 x 方向有一个电机来实现 x 方向的平动。在 y 方向有两个电机实现 y 方向的平动和 θ 方向的转动。同时,其测量系统由三轴激光干涉仪

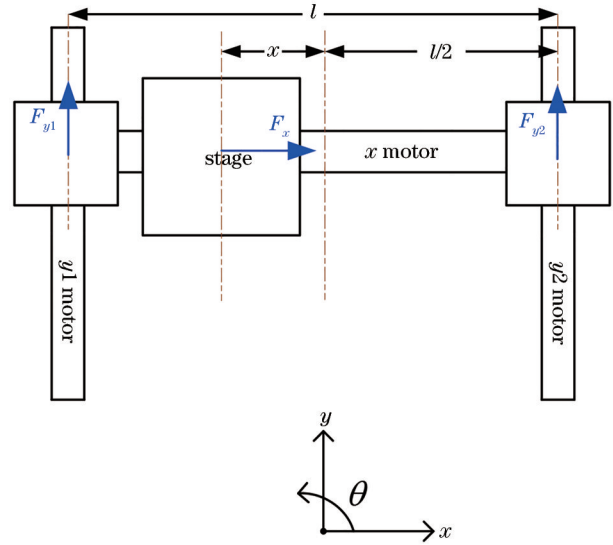


图5 三自由度运动系统示意图^[10]

Fig. 5 Schematic diagram of 3-DoF motion system^[10]

组成。

针对这样一个三自由度运动台系统,其基于解耦的多输入多输出控制方法如图6所示。在基于解耦的控制架构中,首先人为定义运动方向(称为逻辑轴),例如 x 轴、 y 轴、 θ 轴。然后基于上述运动方向设计控制器。控制器的输出经过电机解耦变换,被分配到运动台的各个电机上(称为物理轴),从而使运动台按照逻辑轴运动方向进行运动。通过与电机解耦变化类似的传感器解耦变换,将传感器的物理实际测量值转换为运动台在逻辑轴上的运动位移或角度。本文以电机解耦变换为例进行解耦介绍。由图5可知, x 轴单个电机驱动运动台在 x 轴方向进行运动,不需要进行变换。由于 y 方向与 θ 方向是用两个 y 轴电机共同进行控制,需要进行解

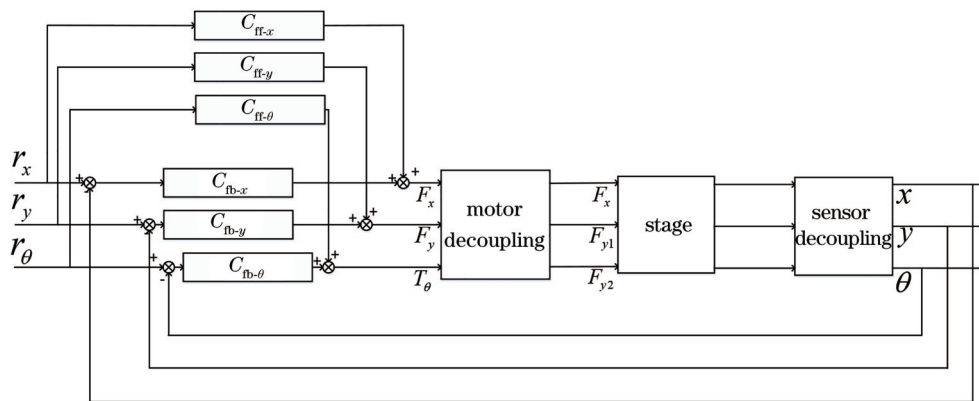


图6 基于解耦的多输入多输出控制示意图^[10]

Fig. 6 Schematic diagram of multi-input multi-output control based on decoupling^[10]

耦变换。

本案例是运动台解耦控制的一个经典案例,采用了常见的静态解耦策略,在文献[10]中有相关论述。静态解耦方法在工程实际中得到了广泛应用,此处对该经典方法进行详细介绍。假设图5中两个y轴电机之间的距离为*l*,运动台的质心在*x*轴上的实际位置为*x*。则*F_y*、*T_θ*和*F_{y1}*、*F_{y2}*之间的关系可以写成:

$$F_y = F_{y1} + F_{y2}, \quad (3)$$

$$T_\theta = -F_{y1} \left(\frac{l}{2} - x \right) + F_{y2} \left(\frac{l}{2} + x \right). \quad (4)$$

将式(3)、(4)写成矩阵形式,可以得到:

$$\begin{pmatrix} F_y \\ T_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -\left(\frac{l}{2} - x\right) & \left(\frac{l}{2} + x\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{y1} \\ F_{y2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

式(5)经过矩阵运算可以得到:

$$\begin{pmatrix} F_{y1} \\ F_{y2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{l+2x}{2l} & -\frac{1}{l} \\ \frac{l-2x}{2l} & \frac{1}{l} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_y \\ T_\theta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

基于上述分析,本例中的三自由度运动台的电机解耦变换可以表示为

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_{y1} \\ F_{y2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l+2x}{2l} & -\frac{1}{l} \\ 0 & \frac{l-2x}{2l} & \frac{1}{l} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ T_\theta \end{pmatrix}. \quad (7)$$

传感器解耦矩阵可类比上述分析,可通过几何分析与代数运算得到。使用上述的解耦方法,可以将MIMO控制问题,转化成多个SISO控制问题,即把光刻机运动台的六自由度运动控制转化成六个单自由度的控制问题。

针对单个运动自由度,光刻机运动台的控制一般采取前馈与反馈搭配的控制架构,如图7所示,图中的*C_{ff}*表示前馈控制器,*C_b*表示反馈控制器,plant

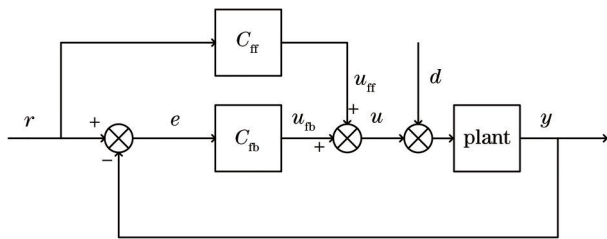


图7 单自由度运动的控制方框图

Fig. 7 Block diagram of single degree of freedom motion control

表示被控对象(运动台)。将运动台的单个运动自由度控制问题分解为一个跟踪问题和一个调节问题。运动控制系统包括一个反馈控制器和一个前馈控制器。其中,反馈控制器用来解决调节问题,其功能在于稳定系统并提供足够强的鲁棒性以及扰动抑制能力。但由于反馈控制的性能不足,例如时间延迟造成的性能下降,暂态性能与稳态性能之间的矛盾等,仅仅使用反馈控制器对于光刻机运动控制系统来说是远远不够的。因此,在使用反馈控制器的基础上,使用前馈控制器来解决跟踪问题,能够大大弥补反馈控制器的不足。一般来说,前馈控制器中包含被控对象(即运动台)的一些模型先验信息。由于这些先验信息的应用,系统的响应速度、整定时间、跟踪精度都能被显著改善。光刻机运动控制系统采用这种前馈与反馈搭配的控制架构来满足前述的各项性能指标。

根据图7的单自由度运动的控制方框图,记前馈控制器为*C_{ff}*(*s*),反馈控制器为*C_b*(*s*),被控对象为*P*(*s*),则从参考轨迹*r*到跟踪误差*e*的传递函数可以写为

$$e(s) = S(s) [1 - P(s)C_{ff}(s)]r(s) - S_p(s)d(s). \quad (8)$$

其中

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s)C_b(s)}, \quad (9)$$

$$S_p(s) = \frac{P(s)}{1 + P(s)C_b(s)}, \quad (10)$$

式中:*S*(*s*)被称为输入灵敏度函数;*S_p*(*s*)被称为过程灵敏度函数。

由上述分析可知,跟踪误差由两个部分产生,一个是对参考轨迹的跟踪不够完美,另一个是对外界扰动的抑制不够充分。这也对应了控制系统中的两大问题,即跟踪问题和调节问题。跟踪性能要求被控对象能对给定参考指令进行完美的执行。调节性能要求在外界扰动的影响下,系统的响应要尽量保持不变。

光刻机运动台的运动控制系统利用前馈来解决跟踪问题。原因分析如下:如式(8)所示,若*C_{ff}*(*s*)与*P⁻¹*(*s*)相等,则由跟踪参考轨迹带来的误差被消除。因此,必须引入前馈控制来提升运动台的跟踪性能,需要提出更优的前馈控制方法,从而不断减小跟踪误差。光刻机运动台中的调节问题,一般利用反馈控制器来解决。反馈控制器在足够宽的频段

范围内提供足够强的扰动抑制能力,从而使得外界扰动对跟踪性能的影响尽可能小。反馈控制器与前馈控制器结合,从而保证运动精度满足指标要求。下面,本文从前馈控制和反馈控制两个方面对目前的光刻机运动台的运动控制研究进展进行介绍。

4 前馈控制

4.1 加速度前馈

加速度前馈是运动台控制中一种经典的前馈控制方法。加速度前馈的表达式可以写为

$$u_{ff} = m\ddot{r}, \quad (11)$$

式中: m 为被控对象在这个自由度上的质量或转动惯量; \ddot{r} 为参考位移轨迹 r 的二阶导数即加速度信号。加速度前馈控制的控制架构如图8所示。

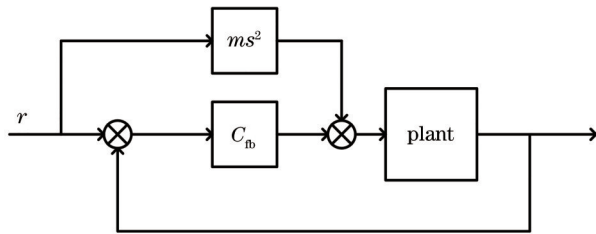


图8 加速度前馈的控制框图

Fig. 8 Block diagram of acceleration feedforward control

从物理的角度来理解,质量与加速度相乘为力,也就是说加速度前馈将运动台按照该轨迹运动所需要的力直接通过前馈的方式施加给运动台,从而达到提升跟踪性能的效果。加速度前馈结构简单,通过系统辨识的方法获取被控对象的质量和转动惯量就能够实现。但是该方法不能解决系统其他动态特性(例如系统非刚体特性引入的柔性动力学特性)引起的问题。

4.2 加速度-加加加速度前馈

加速度前馈把运动台当作一个完美的刚体模型,然而在实际应用中,运动台在高频率段不再保持纯刚体的特性,而会出现一些柔性动力学特性。这会导致在加减速过程中,运动台本身因为受到电机驱动力而发生微小的弹性形变或微振动。为了将运动台的柔性动力学特性考虑在前馈控制器的设计中,加速度-加加加速度(Acceleration-snap)前馈提供了一种解决办法^[16-17]。

与加速度前馈方法相比,加速度-加加加速度前馈考虑了由于电机推力造成的运动台弹性形变^[14],进一步通过前馈控制提升运动跟踪性能。在实际

应用中,Acceleration-snap前馈需要使用参考轨迹的四阶导数。可通过规划更高阶次的轨迹来获取参考轨迹的四阶导数,这也说明了Acceleration-snap前馈需要配合更复杂的轨迹规划算法共同使用。虽然Acceleration-snap前馈考虑了运动台的弹性形变,但是其对于参考轨迹的高频信号有非常大的放大作用,而这会造成一定的负面影响。

4.3 迭代学习控制

迭代学习控制作为一种常见的、数据驱动的前馈控制方法,由日本学者Arimoto等^[18]于1984年提出,广泛应用于光刻机运动台的前馈控制^[19-22]。

迭代学习控制通过多次实验的迭代来学习得到一个良好的前馈信号使得跟踪误差不断减小。典型的迭代学习控制具有如图9所示的控制结构。

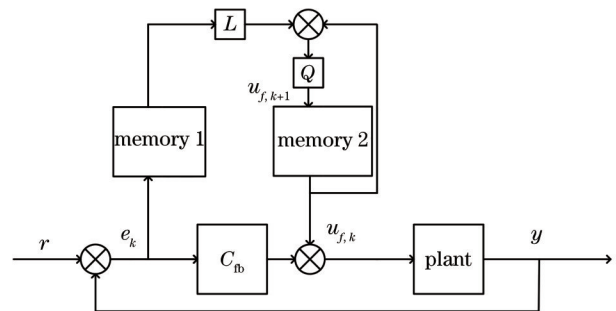


图9 迭代学习控制的控制方框图

Fig. 9 Block diagram of iterative learning control

其中, L 和 Q 分别为两个滤波器,称为学习滤波器和鲁棒滤波器,其使用前提是参考轨迹 r 保持不变。在这种情况下,根据上一次实验所得到的跟踪误差 e_k 和前馈控制量 $u_{f,k}$ 来计算出下一次的前馈控制量 $u_{f,k+1}$,可以表示为

$$u_{f,k+1} = Q(u_{f,k} + Le_k), \quad (12)$$

式中: k 为迭代次数。根据式(12)可以得到第 $(k+1)$ 次迭代时的误差为

$$e_{k+1} = Q(1 - SPL)e_k + S(1 - Q)r, \quad (13)$$

式中: S 和 P 如前文定义,分别为灵敏度函数和被控对象的传递函数。理论上,当 $Q(1 - SPL)$ 的范数小于1时,跟踪误差随着迭代次数的不断增加而减小。这就是迭代学习控制的基本原理。

迭代学习控制能够极大地改善控制性能,但其也有较为明显的缺点。迭代学习控制主要针对参考轨迹固定的情况,当参考轨迹发生改变时,迭代学习的控制性能会发生损失,需要重新进行学习。

4.4 迭代前馈参数整定

除了迭代学习控制外,还有一种基于数据驱动

的前馈控制方法——迭代前馈参数整定^[23-24]。在这种方法中,前馈控制器的结构是给定的,只是其中的参数采用数据驱动迭代的方式进行优化,以期取得最优的控制效果,即实现最小的跟踪误差^[25-27]。基于迭代前馈参数整定的方法,其结构一般为有限脉冲响应结构或无限脉冲响应结构^[28-30]。

有限脉冲响应结构的前馈控制器可以表示为

$$F_F = \sum_{i=0}^{n_f} a_i z^{-i}, \quad (14)$$

式中: a_i 为需要优化的参数; z 为 z 变换的算子。这种结构的好处在于其分母为1,本身是稳定的,且 F_F 关于参数 a_i 是线性的,这使得有限脉冲响应的迭代前馈参数整定问题可以很容易地转化为一个凸优化问题,从而利用凸优化理论进行解决。但是由于其结构较为简单,无法有效地对被控对象的谐振峰进行拟合,其性能仍有改善的空间。

鉴于有限脉冲响应结构的迭代前馈参数整定方法的局限性,基于无限脉冲响应的方法被提出。在这种方法中,前馈控制器可以表示为

$$F_I = \frac{\sum_{i=1}^{n_N} \beta_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^{n_D} \gamma_j z^{-j}}, \quad (15)$$

式中: β_i 和 γ_j 为需要利用迭代前馈整定方法进行学习的参数。与有限脉冲响应方法相比,无限脉冲响应方法结构较为复杂,能够更好地对被控对象的模型进行拟合,从而达到更好的控制效果。但是前馈控制器 F_I 与其参数之间不再是线性关系,导致其相应的参数迭代优化问题无法通过凸优化理论解决。而非凸优化问题较为复杂,使用梯度法、牛顿法等方法不能使参数收敛到最优的情况。同时,前馈控制器 F_I 在参数的整定过程中,有可能会出现不稳定的情况。

5 反馈控制

5.1 基于频域整形的反馈控制器设计

基于频域整形的反馈控制器设计,其理论基础是经典控制理论中以Nyquist定理、Bode判据为基础的频域设计方法。在光刻机运动台控制领域,这种方法是工业界常见的一种反馈控制器设计方法。该方法基于频域辨识所得到的辨识结果,期望在满足各种限制的情况下(如在频域获取尽量低的灵敏度函数和过程灵敏度函数以便得到更好的跟踪性

能与扰动抑制效果,在时域满足超调、整定时间等指标),尽量提高系统的开环带宽。这里的开环带宽定义为开环系统 $P(s)C_b(s)$ 的频率响应函数第一次穿越0 dB线时的频率。虽然更高的开环带宽可以让系统具有更强的扰动抑制能力和更快的响应速度,但是开环带宽受到系统限制,不能将其设计过大。

在低频段内,被控对象的特性可以通过一个双积分环节来描述,如下式所示。这是我们期望的系统特性,这种情况下的运动易于控制。

$$P(s) = \frac{1}{ms^2}. \quad (16)$$

在高频率段,系统特性与双积分环节具有较大偏差,系统的柔性模态使频率响应函数在幅值图上出现谐振峰。由经典控制理论中的Bode判据分析可知,若系统的开环带宽过高,则很难满足系统的稳定条件。也就是说,系统的高频特性大大限制了系统的开环带宽。而反馈控制器的设计目标,就是在多种性能指标的权衡之下,尽量选取一个带宽较大的控制器。

光刻机运动台控制器的结构基于PID控制,可以看作是传统PID控制的改进,其结构可以用如下传递函数来描述^[14],

$$C_b(s) = C_{PID}(s) \cdot C_{lp}(s) \cdot \prod_{i=1}^n C_{n,i}(s), \quad (17)$$

$$C_{PID}(s) = k_p \cdot \left(\frac{\omega_i}{s} + 1 + \frac{s}{\omega_d} \right), \quad (18)$$

$$C_{lp}(s) = \frac{\omega_{lp}^2}{s^2 + 2\beta_{lp}\omega_{lp}s + \omega_{lp}^2}, \quad (19)$$

$$C_{n,i}(s) = \frac{\omega_{z,i}^2 \cdot s^2 + 2\beta_{z,i}\omega_{z,i}s + \omega_{z,i}^2}{\omega_{p,i}^2 \cdot s^2 + 2\beta_{p,i}\omega_{p,i}s + \omega_{p,i}^2}, \quad (20)$$

式中: $C_b(s)$ 表示反馈控制器。控制器中的参数可根据表1的经验公式确定。 $C_{n,i}(s)$ 是陷波滤波器,其系数一般要根据系统的频率响应实验测试结果调整。

表1 控制参数的经验计算公式^[14]

Table 1 Empirical calculation formula of control parameters^[14]

Parameter	Calculated value
k_p	$0.52 m\omega_b^2$
ω_i	$0.35\omega_b$
ω_d	$0.55\omega_b$
ω_{lp}	$6.4\omega_b$
β_{lp}	0.83

综上所述,该控制器的主要参数都基于期望开环带宽 ω_b 进行设计。一旦确定了期望开环带宽 ω_b ,控制器的各项参数也随之确定,需要知道的系统先

验信息只有被控对象的质量,而这很容易通过频域辨识方法得到,因此控制器设计非常简单。期望开环带宽 ω_b 应基于所要达到的性能指标和频域辨识结果依据经验进行选取。选取较小的 ω_b 所设计的反馈控制器的响应能力以及扰动抑制能力都较差,但是闭环控制系统一般易于稳定。反之,选取较大的 ω_b 会得到较为激进的控制器,由于系统高频特性的存在,控制系统容易发生失稳。

5.2 非线性PID反馈控制

非线性PID反馈控制器基于非线性控制理论进行设计,能实现比线性控制方法更好的控制性能。荷兰埃因霍温理工大学的Deenen等^[31]提出了一种基于非线性积分器的PID控制方法,其结构如图10所示,图中 e 为跟踪误差。

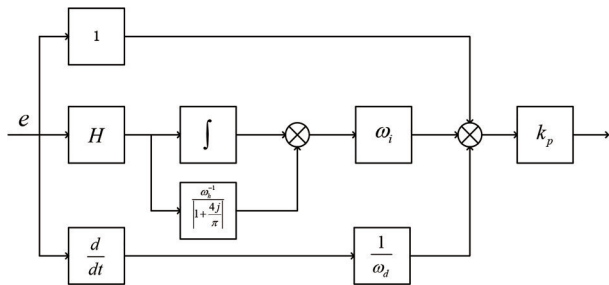


图10 非线性PID控制器结构示意图^[14]

Fig. 10 Block diagram of nonlinear PID controller^[14]

从图10可以看出,非线性PID基本上保留了线性PID的结构,其比例环节、微分环节与线性PID控制器保持一致,然而积分环节变成了非线性。图10中 H 是一个非线性环节,根据跟踪误差和控制器输出的情况在比例模式与积分模式两种状态下进行切换。当 H 工作在积分模式时,该非线性PID控制器本质上为一个PI²D控制器。当 H 工作在比例模式时,该非线性控制器为一个PID控制器。综上,该方法的非线性体现在 H 根据判断条件在两种模式下进行切换。使用这种非线性PID控制器突破了线性控制理论的约束(如Bode积分、水床效应等),可以在幅值相同的情况下带来更小的相位延迟,这对于提高控制带宽、改善暂态性能和稳态性能之间的矛盾很有帮助。

在运动台控制领域,除了非线性PID控制之外,滑模控制、自适应鲁棒控制等非线性控制方法也有诸多应用。滑模控制的思想在于使被控对象按照预先设定的状态轨迹(即滑模面)进行运动,能够很好地处理模型不确定性和外部扰动对跟踪误差的影响,但是其本身仍然存在设计较为保守的问

题^[32-33]。自适应鲁棒控制方法既可以通过参数自适应更新的方式处理参数不确定性,又可以利用鲁棒控制的方式处理其他不确定性和外部扰动^[34-35]。

6 基于冗余驱动/冗余测量的控制

光刻机运动台的柔性动力学特性,限制了传统控制方法的性能,继而降低了光刻机的生产效率。具体来讲,传统闭环控制的带宽必须要远低于运动台的一阶谐振频率。若闭环控制带宽设置过高,则系统的稳定性无法保证,甚至会导致系统失稳。由于传统的控制架构并没有很好的办法突破柔性动力学特性的限制,在冗余驱动/冗余测量的方法出现之前,一般通过改进机械结构来减小运动台的柔性动力学特性对运动性能的影响,例如被动式阻尼器^[36-38]等。但柔性动力学特性是被控对象本身的固有属性,因此单纯依靠改进机械结构来抑制其影响是远远不够的。

基于冗余驱动/冗余测量的方法为解决柔性动力学特性的问题提供了新的思路,可以进一步提升控制性能。这种方法的核心思想在于:利用比被控刚体自由度数更多的执行器和传感器,通过传感器/执行器位置优化使其尽量不激发系统的柔性模态,或者通过多余的执行器和传感器,把系统的柔性模态看作刚体自由度之外的新自由度进行主动控制,从而达到抑制柔性动力学特性的效果^[39-41]。

2003年,Schneiders等^[39]提出利用冗余驱动结合冗余测量的方法,改变以往机械结构与控制系统分开设计的传统思想,通过机电系统结构与控制的联合优化设计,在使运动系统轻量化的同时,提升系统的运动性能。这种方法主要包括抑制模态的振动控制系统设计与传感器、执行器布局优化两部分内容。以图11所示的双输入单输出(DISO)系统为例进行分析,绘制出图12所示的双输入单输出控制框图。以 x_1 为系统输出, F_1 和 F_2 为系统输入, b 为阻尼系数, k 为弹簧刚度,得到开环传递函数 H_{ol} ,表

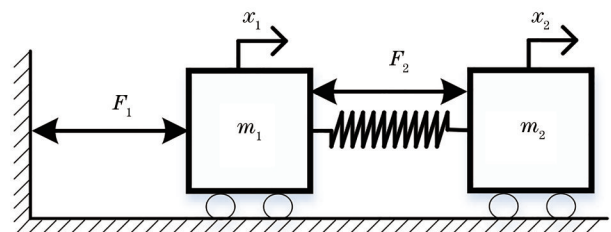


图11 单自由度柔性系统示意图^[39]

Fig. 11 Schematic diagram of single degree of freedom flexible system^[39]

示为

$$H_{ol} = \frac{\left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) m_2 s^2 + bs + k}{s^2 [m_1 m_2 s^2 + b(m_1 + m_2)s + k(m_1 + m_2)]} C_{1o} \quad (21)$$

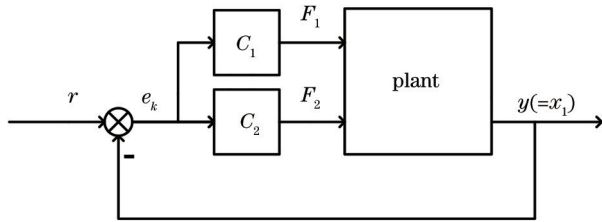


图 12 双输入单输出系统的控制框图^[39]
Fig. 12 Block diagram of DISO control^[39]

Schneiders 等研究了开环情况下两个执行器 (C_1, C_2) 对于该简单系统谐振峰的抑制效果。 C_1, C_2 在开环情况下, 二者满足下式时, 能够产生零极点抵消, 抑制谐振。

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = K \quad (22)$$

此后, Schneiders 等^[40]提出了一种利用执行器位置优化、反馈设计、前馈设计相结合的前馈驱动方法。利用模态分析方法将各个振型分解为刚体模态和柔性模态, 进而建立数学模型。执行器的位置优化采取的准则是执行器布局应使所关心模态的能控性最大。能控性低, 表示执行器布局位置在所关心模态的节点附近, 几乎不可能控制该模态; 能控性高, 意味着模态可以很容易地受到输入的影响, 并且可以通过反馈控制有效地添加阻尼以抑制该模态。Schneiders 等提出的上述方法采用了如图 13 所示的前馈与反馈结合的控制框图。其中, 反馈控制器采用常规的环路整形方法进行设计。该方法在传统前馈控制器后加入一个静态增益 K_{ff} , 通过优化 K_{ff} 尽可能减小前馈输入对所关心模态造成的激发。这一方

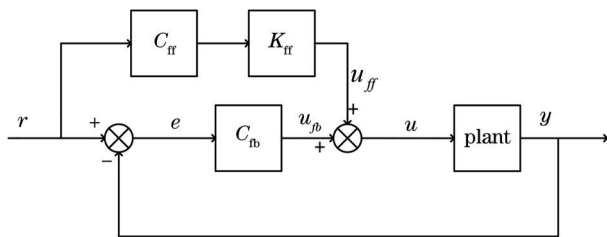


图 13 前馈与反馈结合的控制方框图^[40]
Fig. 13 Block diagram of feedforward and feedback combined control^[40]

案兼顾了执行器的位置布局优化和前馈控制参数优化, 实现了对运动控制系统柔性模态的控制。

van der Wielen 等^[42]指出了光刻机运动台的运动是一种间歇性的运动, 每次加减速都会带来残余振荡, 然后阐述了冗余驱动的好处在于可以减小残余振荡, 缩短位置误差收敛所需的稳定时间, 提高产率。

基于冗余驱动/冗余测量的控制方法, 可以使刚体自由度的闭环控制带宽突破柔性动力学特性的限制, 进一步提升运动控制的性能。通过使用该技术, 运动台的柔性动力学特性对于闭环控制带宽的限制大大减小, 这反过来也降低了运动台系统对于机械结构设计的要求, 机械系统可以设计得更加轻量化, 从而能够提高光刻机运动台的加速度, 进一步提高产率^[43]。

使用冗余驱动/冗余测量技术对运动台的柔性模态进行控制, 能够大大提高系统模态的阻尼与刚度, 使其对系统的影响大大减小。在具体实现过程中, 首先要通过系统辨识方法对含有柔性动力学特性的运动台参数模型进行较为精确的辨识^[44-45]。依据辨识得到的模型, 可以通过不同的方法来设计控制器从而实现对柔性模态的控制, 例如 H_∞ 控制^[46]、基于观测器的极点配置方法^[47]以及 μ 综合控制方法^[48]等。

7 结束语

光刻机的持续发展为集成电路芯片制程的不断减小提供了有力保证。集成电路行业对精度和产率提出了越来越高的要求, 作为实现光刻的关键设备, 光刻机需要高速度、高加速度、高精度的运动系统作为支撑, 而这样的运动系统离不开高性能的控制方法。

本文针对光刻机运动台中常见的控制方法以及学术界的理论成果进行了梳理和介绍, 聚焦于前馈控制、反馈控制、冗余驱动/冗余测量等方面, 分别介绍了数种在光刻机运动台系统中常见的控制方法。本文旨在通过对于上述控制方法的介绍, 使读者能够对于光刻机运动台的控制技术有基本的了解, 并为其进一步的发展提供参考。

参 考 文 献

- [1] Owa S, Nagasaka H. Immersion lithography: its potential performance and issues[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 724-733.
- [2] Wu B, Kumar A. Extreme ultraviolet lithography

- and three dimensional integrated circuit: a review[J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(1): 011104.
- [3] Ito T, Okazaki S. Pushing the limits of lithography[J]. *Nature*, 2000, 406(6799): 1027-1031.
- [4] Schmidt R M, Schitter G, Rankers A, et al. The design of high performance mechatronics: high-tech functionality by multidisciplinary system integration[M]. 2nd ed. Delft: Delft University Press, 2014.
- [5] Erdmann A, Fühner T, Evanschitzky P, et al. Optical and EUV projection lithography: a computational view[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 132: 21-34.
- [6] Peeters R, Lok S, Mallman J, et al. EUV lithography: NXE platform performance overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9048: 90481J.
- [7] Markle D. New projection printer[J]. *Solid State Technology*, 1974, 17(6): 50-53.
- [8] Bruning J H. Optical lithography: 40 years and holding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6520: 652004.
- [9] 王向朝, 戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Wang X Z, Dai F Z. *Integrated Circuit and Lithographic Tool*[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [10] Butler H. Position control in lithographic equipment: an enabler for current-day chip manufacturing[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2011, 31(5): 28-47.
- [11] 刘丹, 程兆谷, 高海军, 等. 步进扫描投影光刻机工件台和掩模台的进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(5): 14-20.
- Liu D, Cheng Z G, Gao H J, et al. Progress of wafer stage and reticle stage for step-and-scan-lithography system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(5): 14-20.
- [12] Schmidt R H M. Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2012, 370(1973): 3950-3972.
- [13] 孙生生, 王丹, 齐月静, 等. 用于光刻调焦调平的反射式投影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1522002.
- Sun S S, Wang D, Qi Y J, et al. Design of reflective projection optics used in lithographic focusing and leveling system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1522002.
- [14] Heertjes M F, Butler H, Dirx N J, et al. Control of wafer scanners: methods and developments[C]//2020 American Control Conference (ACC), July 1-3, 2020. Denver, CO, USA. New York: IEEE, 2020: 19830881.
- [15] 马晓喆, 张方, 黄惠杰. 光刻机照明光场强度分布校正技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2005001.
- Ma X Z, Zhang F, Huang H J. Correction technology for illumination field intensity profile in photolithography machine[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2005001.
- [16] Boerlage M, Tousain R, Steinbuch M. Jerk derivative feedforward control for motion systems[C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference, June 30-July 2, 2004, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 4843-4848.
- [17] Chang B H, Hori Y. Trajectory design considering derivative of jerk for head-positioning of disk drive system with mechanical vibration[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(3): 273-279.
- [18] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1984, 1(2): 123-140.
- [19] Fu X W, Yang X F, Zanchetta P, et al. Frequency-domain data-driven adaptive iterative learning control approach: with application to wafer stage[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10): 9309-9318.
- [20] Liu W K, Ding R Z, Yang X F, et al. A parallel inverse-model-based iterative learning control method for a master-slave wafer scanner[C]//IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 18-21, 2020, Singapore. New York: IEEE Press, 2020: 41-46.
- [21] Mishra S, Topcu U, Tomizuka M. Iterative learning control with saturation constraints[C]//2009 American Control Conference, June 10-12, 2009, St. Louis, MO, USA. New York: IEEE, 2009: 943-948.
- [22] Dijkstra B G, Bosgra O H. Noise suppression in buffer-state iterative learning control, applied to a high precision wafer stage[C]//Proceedings of the International Conference on Control Applications, September 18-20, 2002, Glasgow, UK. New York: IEEE, 2002: 998-1003.
- [23] Song F Z, Liu Y, Xu J X, et al. Data-driven iterative feedforward tuning for a wafer stage: a high-order approach based on instrumental variables[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4): 3106-3116.
- [24] Boeren F, Oomen T, Steinbuch M. Iterative motion feedforward tuning: a data-driven approach based on

- instrumental variable identification[J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 37: 11-19.
- [25] Dai L Y, Li X, Zhu Y, et al. Feedforward tuning by fitting iterative learning control signal for precision motion systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(9): 8412-8421.
- [26] Boeren F, Bruijnen D, van Dijk N, et al. Joint input shaping and feedforward for point-to-point motion: automated tuning for an industrial nanopositioning system[J]. *Mechatronics*, 2014, 24(6): 572-581.
- [27] Li L, Liu Y, Li L Y, et al. Kalman-filtering-based iterative feedforward tuning in presence of stochastic noise: with application to a wafer stage[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(11): 5816-5826.
- [28] Jiang Y, Zhu Y, Yang K M, et al. A data-driven iterative decoupling feedforward control strategy with application to an ultraprecision motion stage[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(1): 620-627.
- [29] Li M, Zhu Y, Yang K M, et al. An integrated model-data-based zero-phase error tracking feedforward control strategy with application to an ultraprecision wafer stage[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 4139-4149.
- [30] Boeren F, Bruijnen D, Oomen T. Enhancing feedforward controller tuning via instrumental variables: with application to nanopositioning[J]. *International Journal of Control*, 2017, 90(4): 746-764.
- [31] Deenen D A, Heertjes M F, Heemels W P M H, et al. Hybrid integrator design for enhanced tracking in motion control[C]//2017 American Control Conference (ACC), May 24-26, 2017, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2017: 2863-2868.
- [32] Shtessel Y, Edwards C, Fridman L, et al. *Sliding mode control and observation: volume 10* [M]. New York: Springer New York, 2014.
- [33] Edwards C, Shtessel Y B. Adaptive continuous higher order sliding mode control[J]. *Automatica*, 2016, 65: 183-190.
- [34] Yao B, Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form[J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 893-900.
- [35] Ding R, Ding C, Xu Y, et al. Neural-network-based adaptive robust precision motion control of linear motors with asymptotic tracking performance[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022: 1-18.
- [36] Verbaan K, van der Meulen S, Steinbuch M. Broadband damping of high-precision motion stages[J]. *Mechatronics*, 2017, 41: 1-16.
- [37] Verbaan C A M, Rosielle P C J N, Steinbuch M. Broadband damping of non-rigid-body resonances of planar positioning stages by tuned mass dampers[J]. *Mechatronics*, 2014, 24(6): 712-723.
- [38] Verbaan C A M, Peters G W M, Steinbuch M. The advantage of linear viscoelastic material behavior in passive damper design-with application in broadband resonance dampers for industrial high-precision motion stages[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 386: 242-250.
- [39] Schneiders M G E, van de Molengraft M J G, Steinbuch M. Introduction to an integrated design for motion systems using over-actuation[C]//2003 European Control Conference (ECC), September 1-4, 2003, Cambridge, UK. New York: IEEE Press, 2003: 3249-3254.
- [40] Schneiders M G E, van de Molengraft M J G, Steinbuch M. Benefits of over-actuation in motion systems[C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference, June 30-July 2, 2004, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 505-510.
- [41] Schneiders M G E, van de Molengraft M J G, Steinbuch M M. Modal framework for closed-loop analysis of over-actuated motion systems[C]//Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress, January, 2004, Anaheim, CA, USA. New York: ASME Press, 2004.
- [42] van der Wielen A M, Delbressine F L M, Schellekens P H J. Overactuation: a solution for the accuracy-throughput speed contradiction in parallel axis positioning systems[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(11): 1732-1743.
- [43] Oomen T, van Herpen R, Quist S, et al. Connecting system identification and robust control for next-generation motion control of a wafer stage[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(1): 102-118.
- [44] Huang T, Yang K M, Cheng R, et al. Closed-loop subspace identification of MIMO motion system with flexible structures for motion control[C]//Volume 4A: Dynamics, Vibration, and Control, November 11-17, 2016, Phoenix, Arizona, USA. New York: ASME Press, 2016.
- [45] Voorhoeve R, de Rozario R, Aangenent W, et al. Identifying position-dependent mechanical systems: a

- modal approach applied to a flexible wafer stage[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(1): 194-206.
- [46] Doyle J, Glover K, Khargonekar P, et al. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems[C]//1988 American Control Conference, June 15-17, 1988, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE Press, 1988: 1691-1696.
- [47] Huang T, Yang K M, Zhu Y, et al. Pole assignment control of MIMO motion systems with flexible structures and its application to an ultraprecision wafer stage[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2273-2284.
- [48] Huang T, Yang K M, Zhu Y, et al. LFT-structured uncertainty state-space modeling for state feedback robust control of the ultra-precision wafer stage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8567-8577.