

# 激光与光电子学进展

## 面向 IC 光刻的超精密运动台控制技术

刘杨, 李理\*, 陈思文, 谭久彬

哈尔滨工业大学超精密仪器技术及智能化工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 对于步进扫描投影光刻机,掩模台和工件台的同步伺服性能将直接影响整机技术指标。掩模台和工件台是典型的六自由度超精密运动台,在耦合动力学、复杂内外部干扰条件下兼顾高动态和超精密运动是其核心控制难题,研究和面向集成电路光刻的超精密运动台控制技术对于实现高端光刻机国产化具有重要意义。本文首先阐述高端光刻机对超精密运动台的伺服性能需求以及实现这些需求所面临的技术挑战,然后从解耦控制、反馈控制、前馈控制、协同控制和轨迹生成五个方面回顾光刻机超精密运动台控制相关研究成果与最新进展,并对其现存的问题和发展方向进行评述。

**关键词** 光刻机; 多自由度运动台; 超精密运动控制

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922013

### Ultra-Precision Motion Stage Control Technology for IC Lithography

Liu Yang, Li Li\*, Chen Siwen, Tan Jiubin

Key Laboratory of Ultra-Precision Intelligent Instrumentation, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

**Abstract** For the step & scan projection lithographic machines, the synchronous servo performance of the reticle and wafer stages will directly affect the technical indexes of the machine. The reticle and wafer stages are typical six degree-of-freedom ultra-precision motion stages. The core control problem is to balance high dynamic and ultra-precision motions under the conditions of coupled dynamics and complex internal and external disturbances. The research and development of ultra-precision motion stage control technology for integrated circuit lithography is of great significance to realize the domestic manufacturing of high-end lithographic machine. This paper first describes the servo performance requirements of ultra-precision motion stages for high-end lithographic machines and the technical challenges to meet these requirements. Then, this paper reviews the research results and recent progress of ultra-precision motion stage control for lithographic machines from five aspects: decoupling control, feedback control, feedforward control, trajectory generation, and cooperative control, and reviews the existing problems and development trends.

**Key words** lithographic machine; multi-degree-of-freedom motion stage; ultra-precision motion control

## 1 引言

集成电路(IC)是信息技术的核心基础,随着5G、物联网、人工智能等新一代信息技术快速发展,其重要性日益凸显。自20世纪50年代诞生至今,

IC之所以能够一直按照摩尔定律向更高集成度发展,光刻技术起到了极为关键的支撑作用。光刻机是IC制造的核心设备,是当代最高端装备的典型代表,也是一个国家先进科技生产力的集中体现,具有重要的战略价值。目前,荷兰ASML公司EUV

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-04-17; 录用日期: 2022-04-19

通信作者: hitlili@hit.edu.cn

光刻机分辨率已达 13 nm, 处于国际领先地位<sup>[1]</sup>。但我国 IC 制造所需高端光刻机依赖进口, 使我国科技发展面临巨大隐患。因此, 我国十分重视 IC 及其装备产业的发展, 《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》将极大规模集成电路制造技术及成套工艺列为国家科技重大专项之一<sup>[2]</sup>, 《中国制造 2025》也将 IC 及专用装备列为重点突破发展领域之一<sup>[3]</sup>。近年来, 随着美国对华为公司进行芯片制裁, 高端光刻机已成为国人广泛关注的“卡脖子”装备, 其国产化进程已刻不容缓。

光刻是 IC 制造的核心工艺, 其主要功能是将掩模版上的 IC 图案通过光学系统曝光到覆盖着光阻剂的晶圆上。目前高端光刻机均采用步进扫描投影的曝光方式, 步进扫描投影光刻机同时需要高性能的光学系统和运动系统<sup>[4]</sup>。运动系统主要包括掩模台和工件台, 掩模版位于掩模台上, 晶圆位于工件台上。在曝光过程中, 工件台和掩模台进行同步扫描运动, 同步伺服性能将直接影响整机技术指标。如图 1 所示, 工件台是典型的基于宏微复合结构的六自由度(DOF)运动台, 可满足步进扫描方向大范围、高动态、超精密运动需求, 同时其他自由度也可进行小范围超精密运动调整。随着整机技术指标不断提升, 工件台所要达到的伺服性能指标也不断提高。工件台步进扫描方向需在高速、高加速运动条件下同时实现纳米级伺服精度和毫秒级稳定时间, 这对伺服误差调控水平提出了极高的要求。

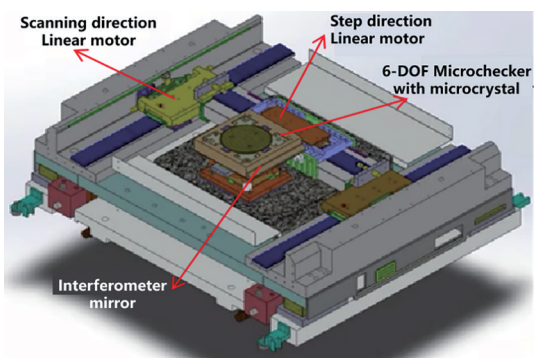


图 1 步进扫描投影光刻机工件台示意图

Fig. 1 Sketch diagram of step & scan projection lithography machine

### 1.1 光刻机运动台伺服性能需求

光刻机整机有三大技术指标, 分别为关键尺寸(CD)、套刻精度和产率。此外, 光刻机还有三大运动性能指标, 分别为工件台和掩模台同步运动误差的滑移平均(MA, 误差的低频部分)、滑移标准偏差

(MSD, 误差的高频部分), 以及工件台、掩模台的运动稳定时间(包括匀速和定位稳定时间)。近年来, 随着整机技术指标的不断提升, 光刻机对运动性能指标的要求也不断提高。

1) CD 的减小对 MSD 指标要求更高。近年来, 随着芯片性能的不断提升, 要求光刻机能够形成的 CD 不断变小。而 MSD 会对 CD 产生影响, 导致成像模糊<sup>[5]</sup>。因此, 需要提升 MSD 来保证光刻机的 CD。据报道, CD 为 38 nm 的光刻机要求 MSD 在 7 nm 左右<sup>[6]</sup>。

2) 套刻精度的提升对 MA 指标要求更高。为了保证上下两层电路连接可靠, 如果使用双重图形技术, 套刻误差要小于 CD 的 15%<sup>[7]</sup>。而套刻误差受 MA 影响, 因此需要提升 MA 以保证光刻机的套刻精度。据报道, CD 为 38 nm 的光刻机的套刻误差在 4 nm 左右<sup>[4]</sup>, MA 应控制在 1 nm 以内<sup>[6]</sup>。

3) 产率的提升对运动稳定时间指标以及运动台最大运动速度、加速度指标提出更高的要求。据报道, 在 2010 年, 光刻机产率超过 180 片晶圆每小时, 考虑上下片时间, 平均每个晶圆曝光只需 20 s, 一次曝光大概只耗时 0.2 s<sup>[6]</sup>。这要求运动台必须高速、高加速运动, 经指标分解, 工件台的最大步速度需达到 2 m/s、最大扫描速度需达到 0.5 m/s、最大运动加速度需达到 30 m/s<sup>2</sup>、运动稳定时间要小于 10 ms<sup>[8]</sup>。

### 1.2 光刻机运动台控制核心挑战

为满足光刻机对运动台极高的伺服性能需求, 运动台结构特性以及传感器、执行器、驱动器和控制系统等硬件的性能都需要满足极高要求。在此基础上, 超精密运动控制技术是光刻机运动台能否同时实现高动态和超精密运动目标的关键。然而光刻机运动台自身动力学特性以及所受的内外干扰都十分复杂, 目标的实现面临着巨大挑战。

1) 光刻机运动台属于复杂机电系统, 难以建立准确的数学模型用于控制方法设计。首先, 步进扫描投影光刻机的工件台和掩模台都是六自由度运动台, 各自由度的动力学特性相互耦合<sup>[9-10]</sup>。其次, 运动台是由诸多机械模块以各种形式连接构成, 各个模块自身的结构模态以及各模块之间的连接形式都会对运动台整体结构模态产生影响。再次, 运动台的实际模型常常随运动位置变化<sup>[11]</sup>。最后, 近年来工件台有大型化、轻量化的发展趋势, 导致工件台柔性程度进一步增加<sup>[11]</sup>。上述因素都增加了

运动台的建模难度,而超精密运动控制方法一般依赖系统模型信息<sup>[12-14]</sup>,模型不确定性会导致控制性能下降。

2) 光刻机运动台伺服过程中会受到内外部大量干扰的影响。首先,运动台执行器中存在大量依赖于位置和速度的磁干扰力<sup>[15]</sup>,配线配管也会产生线缆力<sup>[16]</sup>。其次,实际运动控制系统会受到测量噪声、电磁干扰以及地面和气膜振动的影响。最后,运动台高速、高加速的运动反力还会引起机械结构振动<sup>[17]</sup>。上述干扰中的低频部分会增大 MA,高频部分会增大 MSD,在此条件下,始终保证纳米控制精度对运动控制系统的干扰补偿或抑制能力提出了极高的要求。

综上所述,为保证芯片制造质量和效率,光刻机超精密运动台需在高动态运动的情况下实现毫秒级的运动稳定时间和纳米级的运动精度,而运动台在自身耦合动力学模型和内外部复杂干扰的条件下实现上述目标,技术难度非常高。因此现阶段,如图 2 所示,多自由度超精密运动台通常采用解耦、反馈与前馈相结合的控制结构,辅之以轨迹规划、整形以及多轴协同控制技术,通常可以满足光刻机对运动台的功能和性能需求<sup>[18]</sup>。本文接下来将从解耦控制、反馈控制、前馈控制、轨迹生成和协同控制五个方面回顾光刻机超精密运动台控制相关研究成果与最新进展,并对其现存的问题和发展方向进行评述。

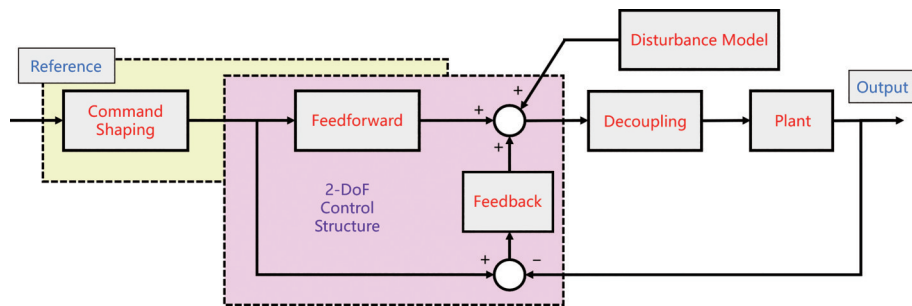


图 2 先进运动控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of advanced motion control system

## 2 解耦控制技术

为满足光刻机步进扫描曝光和调焦调平的功能需求,工件台和掩模台都需要具有六自由度运动功能。图 3 为六自由度运动台控制系统基本框图。其中,运动台各自由度的控制力或力矩和各执行器出力之间存在一个转换关系,称之为控制解耦;运动台各自由度位

置和各传感器测量值之间也存在一个转换关系,称之为测量解耦。通过控制解耦和测量解耦,期望使各自由度从控制力或力矩到实际位置的传递函数矩阵主对角线占优,进而可针对各自由度单独进行反馈和前馈控制。控制解耦根据解耦矩阵中是否含有诸如传递函数这样的动态元素可分为静态控制解耦和动态控制解耦,测量解耦也可以称作测量解算。

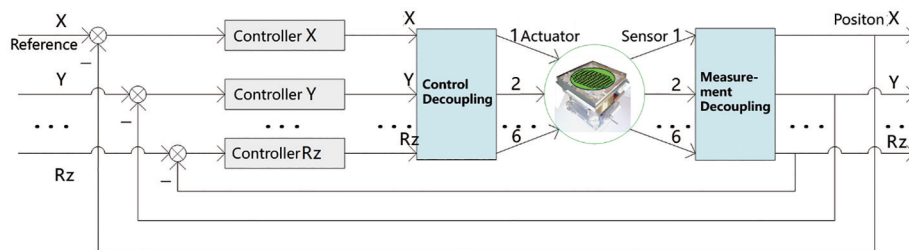


图 3 六自由度运动控制系统基本框图

Fig. 3 Basic block diagram of 6-DOF motion control system

### 2.1 静态控制解耦

ASML 公司的 Butler<sup>[6]</sup>提出了六自由度运动台控制解耦的通用方法,包括建立增益调度和增益平衡两个转换矩阵。在晶圆曝光过程中,需要对运动

台曝光区域的六自由度位置进行精确控制,所需的曝光区域六自由度位置反馈由干涉仪测量系统提供。由于运动台的曝光区域和运动台质心通常并不重合,增益调度矩阵负责将运动台曝光区域各选

辑轴实现精确伺服所需的控制力或力矩转换为运动台质心坐标系下的等效力或力矩。增益平衡矩阵则进一步将运动台质心坐标系下的等效力或力矩转化为物理轴各执行器的出力。增益调度矩阵与运动台质心到运动台曝光区域的相对位置有关,晶圆曝光过程中运动台的曝光区域不断变化,增益调度矩阵也随之不断发生变化。增益平衡矩阵与运动台质心及其执行器布局直接相关,运动台质心偏差和执行器安装偏差会影响增益平衡矩阵的准确性,进而影响解耦性能。为此,需要对增益平衡矩阵进行校准,哈尔滨工业大学陈震宇<sup>[19]</sup>使用教学优化算法对掩模台增益平衡矩阵进行了校准。

## 2.2 动态控制解耦

增益调度和增益平衡相结合的控制解耦方法是一种静态解耦方法,两个解耦矩阵中不含有传递函数等动态元素。对于运动台是刚体的情况,通过静态解耦方法可以实现完全解耦,即各自由度从控制力或力矩到实际位置的传递函数矩阵非主对角线上元素为零。而对于运动台并不是理想刚体的情况,例如工件台执行器与 Chuck(微动台动子)之间的非刚性连接等情况,静态解耦方法无法实现完全解耦。因此,埃因霍温大学 Heertjes 等<sup>[20]</sup>提出了一种反馈形式的动态解耦方法,理论上对于非刚体的运动台也能实现完全解耦,在实际应用效果上可在静态解耦基础上进一步减小运动台各自由度之间的动力学耦合。清华大学 Li 等<sup>[21]</sup>也将动态反馈解耦方法应用于工件台中。除了反馈形式的动态解耦方法,清华大学 Jiang 等<sup>[22]</sup>提出一种前馈形式的动态解耦方法,其本质是一种多自由度耦合系统的逆模型前馈控制方法。值得指出的是,上述动态解耦方法都采用了数据驱动的优化方法进行参数整定。

## 2.3 测量解耦

在光刻机运动台中,测量系统主要包含宏动台模块的光栅尺测量系统、宏动台模块和微动台模块之间的差动测量系统以及运动台的精度基准——干涉仪测量系统。在各测量系统建立起从各传感器输出到各自由度位置的测量解耦矩阵的基础上,光栅尺测量系统以及差动测量系统测量解耦矩阵的校准都需要是以干涉仪测量系统为基准进行,而干涉仪测量系统自身的校准需要在光刻机整机中进行。在公开文献中,针对差动测量解耦矩阵,哈尔滨工业大学陈震宇<sup>[19]</sup>提出了一种优化算法的校

准方法。

## 3 反馈控制技术

在光刻机运动台控制中,反馈控制的基础功能是实现闭环系统稳定,单独的 PD 控制器就可以实现该目标。在此基础上,反馈控制应尽可能提升对低频干扰的抑制能力,提升开环系统低频段频率特性的幅值,PI 控制器和干扰观测器有助于实现该目标。另外,在实现上述两个目标的同时,应尽可能保证高频伺服误差不被放大,因此低通滤波器、陷波器以及一些非线性环节经常在反馈控制器中使用。根据反馈控制量与伺服误差及其积分或导数之间关系,反馈控制方法可分为线性反馈控制方法与非线性反馈控制方法。其中,逆模型干扰观测器属于线性反馈控制范畴,自整定或迭代反馈整定 (IFT) 技术主要用于对线性或非线性反馈控制器参数进行优化。

### 3.1 线性反馈控制

传统电机伺服通常采用三环控制结构,从内到外依次是电流环、速度环和位置环,位置/速度环利用位置/速度误差计算控制量,计算得到的控制量又作为速度/电流环的参考输入,最终电流环计算得到控制量经过功率放大作用在电机上。在光刻机运动台的反馈控制中,通常只使用位置环和电流环控制。电流环通常集成在电机驱动器中,由于电流环的带宽比位置环带宽大得多,通常可将电流环近似看作单位增益。这样从控制板卡计算得到的数字控制量到电机出力之间的环节可看成是一个固定的增益,是 DA 系数、电机驱动器电压电流系数以及电机出力系数的乘积。当然,所忽略的动力学特性会造成一定的相位滞后,有时需要进行一定的时延补偿。在光刻机运动台控制中,回路成形方法被广泛应用于反馈控制器设计,回路成形控制器由 PID 控制器、低通滤波器以及陷波器组成<sup>[23]</sup>,其中陷波器主要用于抑制可能引起残余振动的高频谐振<sup>[24]</sup>。通常 PID 控制器也可替换为 PI 环节和超前校正环节的串联,后者额外具有一阶低通滤波器的作用。Butler<sup>[25]</sup>在位置反馈的基础上引入了加速度反馈,加速度反馈可以增大被控对象的虚拟质量,增强反馈控制对外部干扰的抑制能力。值得指出的是,加速度反馈控制方法在实现上述目标的同时并不影响原有的位置环控制。除频域方法以外,面向线性系统的鲁棒控制理论也被应用于光刻机超

精密运动台的反馈控制器设计, 飞利浦公司的 van de Wal 等<sup>[26]</sup>使用  $H_\infty$  优化和  $\mu$  分析方法设计了多输入多输出 (MIMO) 反馈控制器, 埃因霍温大学 Oomen 等<sup>[27]</sup>提出了高性能的数据采样最优控制设计框架, 并将其应用于  $H_\infty$  回路成形反馈控制器设计中。此外, 光刻机超精密运动台时常表现出位置依赖的模型特性, 因此可以描述为线性变参数 (LPV) 系统, 清华大学的 Yang 等<sup>[23]</sup>指出运动台的机械结构模态会随位置变化, 代尔夫特理工大学的 Wassink 等<sup>[28]</sup>设计了 LPV 反馈控制器实现了更好的伺服性能。

### 3.2 非线性反馈控制

线性 PID 控制仍然是超精密运动控制中主流的反馈控制技术, 它具有较强的鲁棒性且参数易于整定, 但由于“水床”效应, 即反馈控制的低频干扰抑制以高频噪声放大为代价的现象, 线性 PID 控制方法以及其他线性反馈控制方法的伺服性能都存在一定的局限性。为此, Heertjes 等<sup>[29]</sup>提出一种非线性 PID 控制方法, 它具有与位置误差相关的非线性增益, 当位置误差小于一定阈值时非线性 PID 退化为线性 PID, 当位置误差较大时, 非线性 PID 又具有比线性 PID 更大的增益, 因此非线性 PID 具有比线性 PID 更强的干扰抑制能力, 但同时又不会将高频噪声放大, 克服了“水床”效应。同样针对“水床”效应, Heertjes 等<sup>[30]</sup>还提出了切换控制方法, 取得了良好效果。线性反馈控制方法的局限性还体现在暂态性能和稳态性能之间的折中问题, 众所周知, 积分控制可以消除常值稳态误差但同时会使位置响应的超调量变大, 为解决这一问题, Hunnekens 等<sup>[31]</sup>提出一种变增益积分控制方法, 该方法将位置误差经过饱和环节之后的输出量进行积分, 当位置误差小于一定幅值时, 变增益积分控制器表现为含有积分环节的线性控制器, 它具有消除常值稳态误差的能力, 而当位置误差大于一定幅值时, 饱和函数可起到限制积分量的作用, 此时变增益积分控制器具备很强的抗干扰能力又不会产生过大的位置超调。同样针对该问题, Heertjes 等<sup>[32]</sup>还提出一种积分滑模控制方法, 其实质与变增益积分控制方法相似。近来, Heertjes 等<sup>[33]</sup>提出一种混合积分增益方法, 在提升反馈控制对低频干扰抑制能力的同时避免了放大高频伺服误差以及增大超调和调整时间。提到滑模控制, 哈尔滨工业大学王一光<sup>[34-35]</sup>将滑模控制方法应用到工件台中, 斯威本科技大学的 Zheng 等<sup>[36]</sup>将快速非奇异终端滑模控制方法应用到直线电机驱动平台

中。此外, 加州大学伯克利分校的 Zheng<sup>[37]</sup>对频率成形滑模控制方法进行了广泛且深入的研究, 提出了基于根轨迹和  $H_\infty$  理论的频率成形滑模控制器设计方法, 还将频率成形滑模控制方法与扩张状态观测器结合使用实现了良好的性能。图 4 为非线性反馈控制系统框图, 其只在已有的线性反馈控制系统基础上增加一个非线性误差传递通道, 一方面增加了控制系统设计自由度、提升了潜在性能极限, 另一方面没有过度增加控制系统复杂度、易于实现。

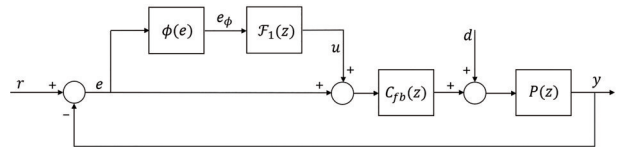


图 4 非线性反馈控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of nonlinear feedback control system

### 3.3 反馈整定技术

反馈控制器性能取决于其控制参数, 对反馈控制参数人为整定费时费力而且无法实现最优性能。为此, Yang 等<sup>[23]</sup>使用了遗传算法对反馈控制参数进行优化, Hunnekens 等<sup>[31-32, 38]</sup>分别使用了基于梯度的二阶 quasi-Newton 算法、Levenberg-Marquardt 算法和 Gauss-Newton 算法对变增益积分控制器中的饱和和长度参数、积分滑模控制器中的饱和长度和切换增益参数、切换控制器中的切换长度参数进行优化, Li 等<sup>[39]</sup>也使用了 Gauss-Newton 算法对变增益离散滑模控制器中的参数进行优化。另外, Li 等<sup>[40]</sup>为了加快参数整定算法的收敛速度, 提出了基于 Aitken 加速的迭代参数整定算法, 并将该算法用于变增益控制器的参数整定。需要指出的是, Heertjes 等提出的参数整定算法都是以误差范数为优化目标, 同时依赖一定的模型信息, 而 Li 等的参数整定算法则是直接以 MA 和 MSD 作为优化目标, 虽然也依赖一定的模型信息但可通过单位脉冲响应实验获得。上述自整定技术都是对反馈控制器的部分重要参数进行优化, 而 IFT 技术一般是对反馈控制器的全部参数进行优化。Heertjes 等<sup>[41]</sup>针对 IFT 方法可能使闭环系统失稳的问题提出了具有频域约束的 IFT 方法, 避免了反馈控制参数在稳定域边界附近取值。传统 IFT 方法需要在每次迭代中进行三次实验以消除对模型的依赖, Li 等<sup>[42]</sup>针对该问题提出了一种新的 IFT 方法, 该方法通过一个两次循环的迭代算法进行参数整定, 所需的模型信息同样可通过单位脉冲响应实验获得。

### 3.4 干扰观测器技术

逆模型干扰观测器属于线性反馈控制范畴,在超精密运动控制系统中常常用来提升对中低频干扰的抑制能力,ASML公司的Hoogerkamp等<sup>[16]</sup>使用逆模型干扰观测器有效抑制了线缆力的不利影响。逆模型干扰观测器,如图5所示,通常需要被控对象的逆模型以及一个低通滤波器,在被控对象标称模型确定后,剩余的设计任务就是选取合适的低通滤波器实现良好的干扰抑制性能。低通滤波器选用典型的二阶振荡环节会在转折频率处放大运动台的模型不确定性,无法实现良好的干扰抑制性能。哈尔滨工业大学付雪微<sup>[43-44]</sup>根据期望的干扰抑制特性反推所需的低通滤波器实现了更好的干扰抑制性能。上海交通大学Liu等<sup>[45]</sup>提出一种改进的低通滤波器设计方法,通过引入新的设计参数实现了更好的干扰抑制性能。Liu等<sup>[46]</sup>还指出模型不确定性会影响逆模型干扰观测器的干扰抑制性能,因此使用继电器反馈技术对被控对象模型进行了更精确的辨识。加州大学伯克利分校的Zheng<sup>[37]</sup>将干扰观测器设计问题描述为一个基于鲁棒控制理论的 $H_\infty$ 优化问题,传统的干扰观测器只适用于单入单出(SISO)系统,而其设计的干扰观测器还适用于MIMO系统。

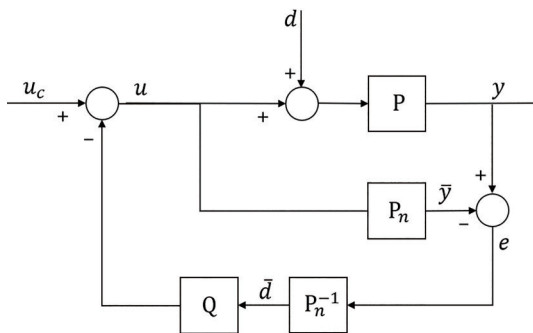


图5 逆模型干扰观测器框图

Fig. 5 Block diagram of inverse model disturbance observer

## 4 前馈控制技术

超精密运动台的绝大部分伺服误差都是通过前馈补偿而消除的,在反馈控制保证闭环系统稳定的基础上,应尽可能通过前馈补偿去减小伺服误差,这一准则已经成为超精密运动控制领域的一个共识。超精密运动台伺服误差的主要来源为参考轨迹以及干扰、噪声和振动等,前馈控制的目的是补偿参考轨迹和干扰引起的伺服误差以提升响应速度和伺服精度。前馈控制方法包括逆模型前馈

控制方法、干扰补偿方法、基于参数辨识的前馈控制方法、自适应前馈控制方法、迭代学习控制(ILC)方法和迭代前馈整定(IFFT)方法等。其中,ILC方法和IFFT方法都属于基于迭代学习的前馈控制范畴。

### 4.1 逆模型前馈控制技术

最传统的用于补偿参考轨迹动态滞后误差的前馈控制方法为逆模型前馈控制方法,当前馈控制器充分逼近被控对象逆模型时,该方法可实现理想的控制性能。Devasia<sup>[47]</sup>指出当模型不确定性超出一定的范围时,逆模型前馈控制方法会使控制性能恶化,因此Devasia提出一种改进的逆模型前馈控制方法,该方法只在模型不确定性足够小的频率范围内对模型求逆。Wu等<sup>[48]</sup>在考虑模型不确定性的情况下提出了鲁棒逆模型前馈控制方法,在标准逆模型前馈控制器中额外引入了一个具有频率依赖特性的幅值调节系数,当模型不确定性相位的幅值小于 $90^\circ$ 时,总可以选取幅值足够小的调节系数使该方法能够在反馈控制的基础上进一步提升控制性能。此外,Wu等还给出了该幅值调节系数的鲁棒最优设计值。考虑运动系统结构模态的影响,Boerlage等<sup>[49]</sup>提出了一种包含加速度前馈和结构模态逆模型前馈的前馈控制器,结构模态逆模型前馈可以利用 $H_\infty$ 方法进行设计,对比只使用加速度前馈,控制性能有了很大的提升。除模型不确定以外,影响模型求逆精度的另一主要因素是模型的非最小相位零点。对于非最小相位系统,直接求逆会使逆模型不稳定。Butterworth等<sup>[50]</sup>回顾了三种适用于非最小相位系统的模型求逆技术,包括忽略非最小相位零点的模型求逆技术、零相位误差模型求逆技术以及零幅值误差模型求逆技术。上述三种模型求逆方法都属于近似求逆方法,将会影响前馈补偿效果<sup>[51]</sup>。Li等<sup>[52]</sup>提出一种数据/模型混合驱动的零相位误差前馈控制方法,通过在传统零相位误差逆模型的基础上引入了一个零相位滤波器用于幅值调节,并以数据驱动的方式对该滤波器进行设计,得到了比传统零相位误差逆模型精度更高的逆模型。

### 4.2 干扰补偿技术

最传统的用于干扰补偿的前馈控制方法就是对干扰进行测量然后进行查表补偿,Butler<sup>[15]</sup>对掩模台中的磁干扰力进行了测量,磁干扰力可分为位置依赖干扰和速度依赖干扰两种,位置依赖干扰最

常见的就是直线电机中的定位力,微动台的执行器为音圈电机,不存在定位力,但音圈电机中的永磁体和周围的铁磁材料相互作用也会产生位置依赖干扰,位置依赖干扰常用的测量方法是在反馈控制条件下让电机在满行程范围内低速匀速运动并记录反馈控制量作为干扰的测量值,然后建立干扰随位置变化的补偿表,在下次运动时可对干扰进行查表进行补偿。另外,运动台高速运动时会受到涡流引起磁干扰力的影响,这种磁干扰力既与位置相关也与速度相关,运动台低速运动时,这种磁干扰力并不显著,无法测量,为此 Butler 提出了一种高速运动测量方案。Xia 等<sup>[53]</sup>采用相似的方案对工件台平面电机中的低频磁干扰力进行了测量与补偿。基于上述研究工作, Mu 等<sup>[54]</sup>对永磁同步直线电机中的定位力进行了迭代测量和补偿。

#### 4.3 参数化前馈控制技术

目前,参数化固定结构前馈控制方法是前馈控制中的主流,它由固定的前馈控制器结构(基函数向量)和待定的前馈控制参数构成,在前馈控制器结构确定后通常需要对前馈控制参数进行估计。基于参数辨识的前馈控制方法、自适应前馈控制方法和 IFFT 方法都属于参数化固定结构前馈控制方法,三种方法的区别在于前馈控制参数的估计方式不同。基于参数辨识的前馈控制方法,顾名思义是采用参数辨识方法对前馈控制参数进行离线估计<sup>[55-57]</sup>。例如,为补偿直线电机中的定位力, Liu 等<sup>[57]</sup>设计一种基于神经网络的前馈控制器,神经网络基函数选取为径向基函数, Liu 等使用一种非线性回归子集选择方法对径向基函数进行选择并对神经网络权值进行估计。自适应前馈控制方法是更为先进的前馈控制方法,它利用估计误差对参数进行实时在线调整。Butler<sup>[58]</sup>提出一种用于参考轨迹补偿的自适应前馈控制方法,前馈控制器的基函数为参考轨迹及其一至四阶导数,前馈控制参数根据实际出力 and 出力估计值之间的偏差进行在线估计。Li 等<sup>[59]</sup>将 Butler 提出的自适应前馈控制方法与滑模控制方法进行结合,实现了良好的控制性能。Zhao 等<sup>[60]</sup>又将 Butler 提出的自适应前馈控制方法用于定位力补偿,前馈控制器的基函数为定位力的各级谐波函数,谐波函数的频率值通过实验获得。除上述方法外,自适应鲁棒控制方法中也包含自适应前馈控制部分以及用于参数更新的自适应律,但不同的是,自适应鲁棒控制以减小控制误差为目

标,通常无法得到前馈控制参数的准确估计值<sup>[61-62]</sup>。相比其他前馈控制方法,自适应前馈控制方法最大的不足是参数估计值的暂态响应可能影响伺服性能甚至使控制系统失稳。IFFT 方法与自适应前馈控制方法类似,不同之处在于 IFFT 方法是在迭代域中对参数进行离线整定,可通过多次实验更好地满足充分激励条件。最后需要说明的是,参数化固定结构前馈控制方法由于结构限制不能完全重构理想的前馈控制量,而 ILC 方法为非参数化非固定结构前馈控制方法,理论上可实现更好的跟踪性能。

#### 4.4 迭代学习控制技术

ILC 是一种在重复工况下能够通过学习来提升控制性能的智能控制方法,它主要是通过学习先前迭代周期的控制误差来改善当前迭代周期的控制性能。ILC 方法在学习过程中对不同迭代周期的工况具有严格的重复性约束:1)控制系统实际模型保持不变;2)控制系统的初始状态相同;3)控制系统参考轨迹完全重复;4)控制系统不含有噪声等非重复干扰。另外,在学习过程结束后,ILC 方法得到控制量只能在与学习过程相同的工况下应用。在满足上述重复性约束的情况下,ILC 方法有能力补偿未知的重复干扰和一定范围内模型不确定性导致的伺服误差。ILC 方法理论上对学习过程中不同迭代周期的工况有着严格的重复性约束,而光刻机工件台和掩模台在曝光过程中的运动通常具有重复性,如图 6 所示,因此 ILC 方法在光刻机超精密运动台中得到了较为广泛的应用。

在超精密运动台控制中,ILC 方法一般用作前馈补偿器,在反馈控制使闭环系统稳定的基础上通过补偿参考轨迹和干扰来提升运动精度和运动响应速度。ILC 方法与反馈控制系统的结合方式一般有两种:一种是串联结构,该结构下 ILC 方法用于修正参考轨迹或跟踪误差;另一种是并联结构,该结构下 ILC 方法用于修正控制量<sup>[63-64]</sup>,如图 7 所示。Fine 等<sup>[64]</sup>指出,对比并联结构,在串联结构下 ILC 方法的收敛速度更快。

光刻机运动台伺服误差按性质可分为系统误差和随机误差,系统误差包括动态滞后误差、动态耦合误差和非随机干扰误差。系统误差的一个主要特点是与运动台位置、速度等运动状态直接相关,在重复运动条件下可以呈现出高度一致的变化规律。对于系统误差,理论上存在一个理想补偿量

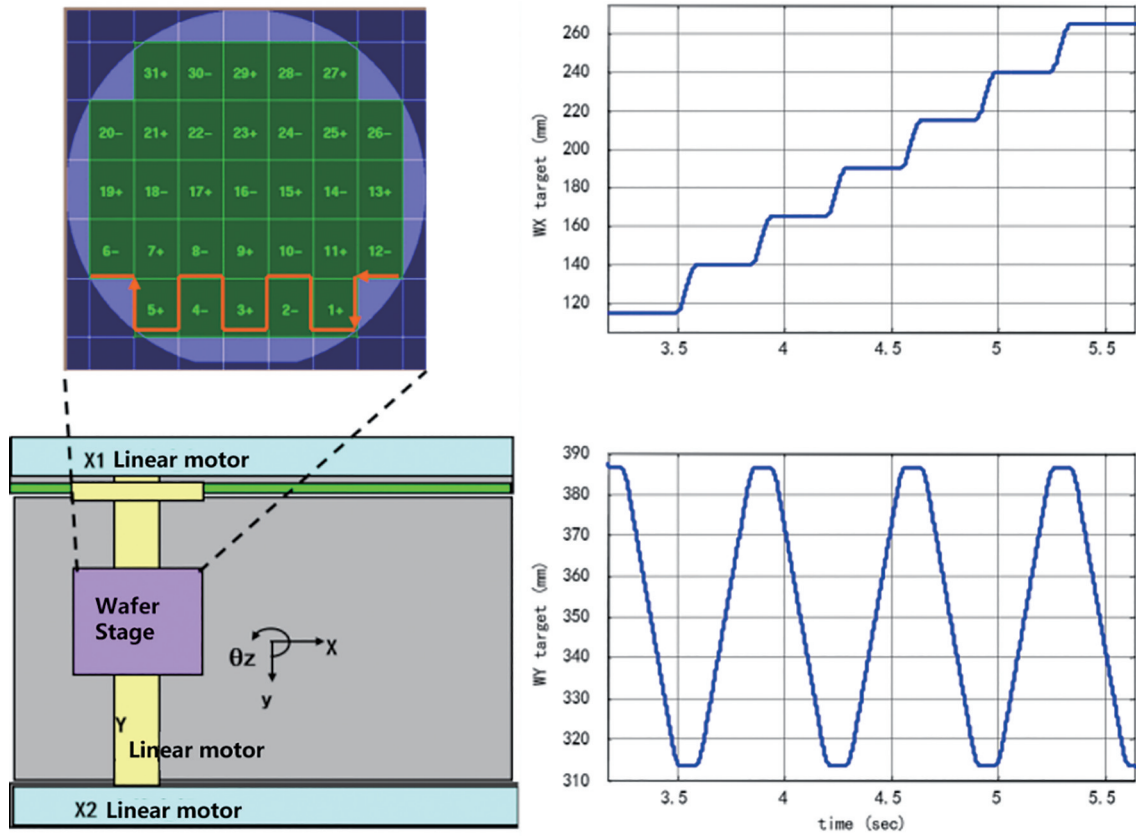


图 6 光刻机曝光过程中工件台水平向的步进扫描运动轨迹

Fig. 6 Horizontal step scanning trajectory of the wafer stage during lithography exposure

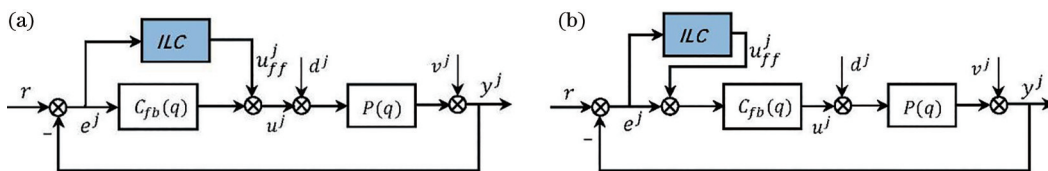


图 7 基于 ILC 的二自由度控制系统结构图。(a)串联结构;(b)并联结构

Fig. 7 Structure diagram of two DOF control system based on ILC. (a) Series structure; (b) parallel structure

可将其全部消除,以致伺服误差中只含有随机误差,因而获取理想补偿量是伺服误差补偿的终极目标。ILC 的主要思想是,在重复运动条件下通过对先前实验的伺服误差进行不断学习进而改善伺服性能。由于系统误差在重复运动条件下呈现出高

度一致的变化规律,其绝大部分可通过迭代学习而补偿,而无需对运动台和干扰进行准确建模。体现在实际效果上,随着重复运动实验的不断进行,迭代学习补偿致力于更新得到理想补偿量并使伺服误差不断减小,如图 8 所示。

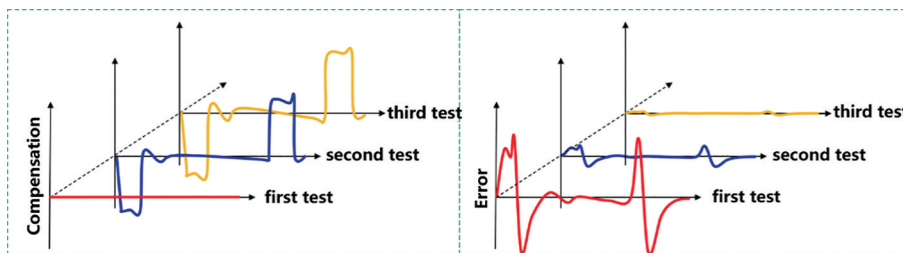


图 8 迭代学习补偿效果示意图

Fig. 8 Sketch diagram of ILC compensation effect



虽然 ILC 对运动台的模型精度需求大大降低,但过大的模型误差仍然会影响 ILC 的稳定性,而稳定性是 ILC 能够在实际中应用的前提条件。为此,国内外一些学者将鲁棒控制理论与 ILC 相结合并应用于光刻机运动台中,致力于增强 ILC 方法的鲁棒性,使其在面临较大模型误差时不至于发散。典型的方法有  $\mu$  分析方法<sup>[65]</sup>、 $\mu$  综合方法<sup>[66-67]</sup>和  $H_{\infty}$  方法<sup>[66-67]</sup>等。这类方法的一个显著缺点是设计过程较为复杂,而且为了保证方法具有足够的鲁棒性而使学习带宽和学习效率过于保守。除上述方法外,鲁棒逆模型 ILC 方法因设计过程简单应用更为广泛。最传统鲁棒逆模型 ILC 方法通过使用鲁棒滤波器而增强鲁棒性,但使用鲁棒滤波器同时会降低学习带宽。Dijkstra<sup>[68]</sup>与 Hashimoto 等<sup>[69]</sup>将学习滤波器中含有常值学习系数的鲁棒逆模型 ILC 方法应用于工件台中,减小常值学习系数可以增强鲁棒性但同时会极大降低学习效率。此外,Liu 等<sup>[70]</sup>将学习滤波器中含有低通滤波器和时间超前环节的鲁棒逆模型 ILC 方法应用于工件台中,并提出基于奈奎斯特图的时间超前环节整定方法。相比于前两种方法,该方法补偿效果和学习效率都更好,但实验结果表明如果高频模型误差过大则该方法存在长期学习发散的风险,这是不使用鲁棒滤波器的 ILC 方法的共同缺陷。

除模型误差以外,随机干扰是影响 ILC 方法性能的另一主要因素,在实际中随机干扰主要来源于未完全被隔离的地面振动、由运动台高加速运动冲击而导致的机械振动、各种来源的电磁噪声和气膜扰动等。由上面分析可知,ILC 方法主要用于补偿系统误差,而随机误差无法通过补偿方法消除,但随机误差会在迭代学习过程中不断累积而增大,影响最终的伺服精度。为抑制随机误差在迭代学习过程中的累积效应,一个直观办法就是将随机误

差与系统误差分离,进而只针对系统误差进行学习。为此,信号分析与处理方法被用于迭代学习补偿之中,如 Lin 等<sup>[71]</sup>采用了主成分分析方法、Merry 等<sup>[72]</sup>采用的小波滤波方法、Mishra 等<sup>[73]</sup>采用的子空间投影方法等。另外,Mishra 等<sup>[74]</sup>还提出了分段 ILC 方法,在某个时间段内,如果运动误差中随机误差比系统误差更为显著,则不进行迭代学习。Heertjes 等<sup>[75]</sup>提出一种含有非线性学习滤波器的 ILC 方法,当伺服误差小于一定阈值时令学习滤波器为零,随机误差不会进入学习过程。上述方法实现理想效果的一个基本假设是系统误差与随机误差在频域上或时域上是完全可分的,然而实际情况中随机误差通常存在于全频域且存在于任何时间段内,所以上述方法对随机误差累积的抑制效果有限。

ILC 方法还要求参考轨迹具有重复性,如果参考轨迹发生变化,通常需要重新进行学习,否则 ILC 方法性能将显著下降。然而,光刻机超精密运动台有时需要根据实际曝光需求对参考轨迹进行微调,如工件台的扫描运动位移和速度会随着晶圆尺寸和曝光剂量的变化而变化。针对该问题,Rotariu 等<sup>[76]</sup>提出了一种分段 ILC 策略,该策略只对加减速段相同、匀速段长短不同的一类 S 型参考轨迹具有较高任务灵活性。对于重复性参考轨迹,使用 ILC 方法经过多次迭代可以得到一个收敛的前馈控制量,当参考轨迹发生变化时,Heertjes 等<sup>[77]</sup>和 Yu<sup>[78]</sup>利用学习得到的前馈控制量构造了一个更适用于新参考轨迹的前馈控制量。

#### 4.5 参数化前馈的迭代整定技术

与 ILC 方法相比,IFFT 方法具有更强的任务灵活性,如图 9 所示,而且 IFFT 方法是基于数据的前馈控制方法。IFFT 方法与 ILC 方法同属基于迭代学习的前馈控制方法,但 IFFT 方法(图 10)更新

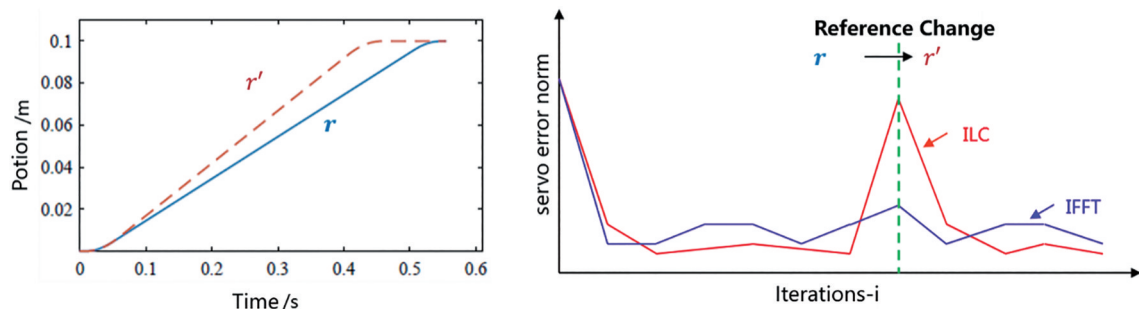


图 9 参考轨迹变化情况下 ILC 与 IFFT 的控制效果图

Fig. 9 Control effects of ILC and IFFT with reference trajectory changes

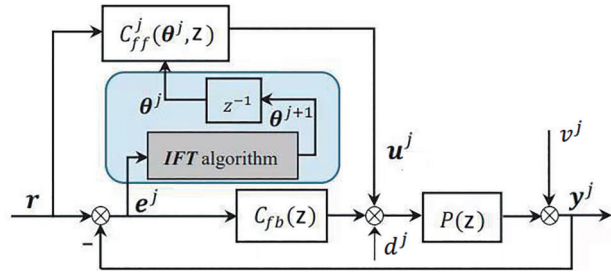


图 10 基于 IFFT 的二自由度运动控制结构

Fig. 10 Two degrees of freedom motion control structure based on IFFT

的是参数化固定结构前馈控制器的参数,而 ILC 方法更新的是前馈控制量。van der Meulen 等<sup>[79]</sup>和 Song 等<sup>[80]</sup>使用了基于梯度的 IFFT 方法,每个迭代周期需要进行两次不同的实验才可以实现前馈控制参数的无偏估计。如果只进行一次实验,则前馈控制参数的估计值会存在偏差<sup>[81]</sup>。为了在实现无偏估计的同时减少每个迭代周期的实验次数,Boeren 等<sup>[82]</sup>提出了基于辅助变量的 IFFT 方法,该方法将每个迭代周期所需实验次数降低为一次。Song 等<sup>[83]</sup>也使用了辅助变量 IFFT 方法,除了实现无偏估计,Song 等还期望前馈控制参数估计值的方差更小。Song 等提出一种高阶 IFFT 方法,成功减小了前馈控制参数估计值的方差,但学习效率明显下降。Li 等<sup>[84]</sup>提出了一种基于卡尔曼滤波的 IFFT 方法,实现了前馈控制器参数的一致无偏估计。IFFT 方法相对于 ILC 方法最主要的缺点是:IFFT 方法是参数化固定结构前馈控制方法,其跟踪性能受限于前馈控制器结构,对于重复性参考轨迹 IFFT 方法的跟踪性能不如 ILC 方法。Boeren 等<sup>[85]</sup>、Li 等<sup>[86]</sup>和 Stearns<sup>[87]</sup>将 IFFT 方法与 ILC 方法结合使用,Boeren 等和 Li 等对两种方法进行切换使用,而 Stearns 利用 ILC 方法对 IFFT 方法使用后残余的重复性误差分量进行补偿。

## 5 协同控制技术

光刻机运动系统主要由工件台和掩模台两个超精密运动台构成,在晶圆曝光过程中,工件台和掩模台需要进行同步扫描运动<sup>[88-90]</sup>。另外,光刻机工件台和掩模台都基于宏微复合结构<sup>[91-93]</sup>,可在扫描(步进)方向上实现大范围纳米精度运动。工件台/掩模台同步运动控制以及宏动台/微动台复合运动控制的主要研究工作在于设计有效的协同控制策略。图 11 为运动台初始化过程中微动跟随宏

动的控制框图,图 12 为步进扫描曝光过程中宏动跟随微动的控制框图。

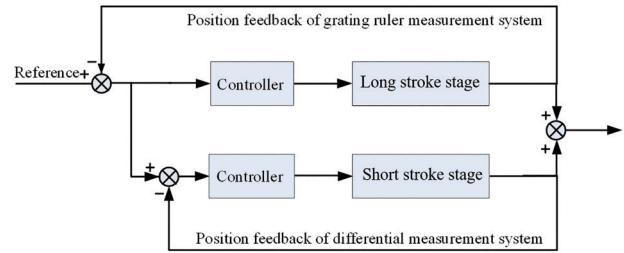


图 11 微动跟随宏动控制框图

Fig. 11 Control block diagram of micromotion following macromotion

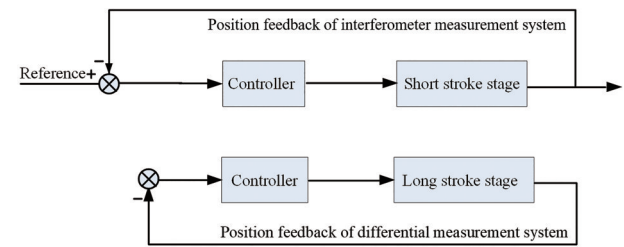


图 12 宏动跟随微动控制框图

Fig. 12 Control block diagram of macromotion following micromotion

掩模台和工件台的同步控制方式主要有三种:第一种是独立并行方式,第二种是主从随动方式,第三种是交叉耦合方式<sup>[94-95]</sup>。在独立并行方式中,掩模台和工件台各自跟踪理想参考轨迹。掩模台与工件台的动态特性与响应要保持一致,需要一个同步补偿器来调节,预报前馈补偿、零相位误差跟踪方法可以使用。但由于外部干扰、未建模动态等不确定性因素存在,两者之间的控制特性保持一致将比较困难。在主从随动方式中,响应速度慢(低带宽)的伺服系统作为 Master、响应速度快(高带宽)的伺服系统作为 Slave。当外部干扰、未建模动态等不确定性因素存在时,同步性能主要依赖于 Slave 来获得,需要先进的同步控制策略。扫描光刻机运动台同步控制多数采用 Master-Slave 方式,其中工件台所受干扰多,重视控制系统的鲁棒性,作为 Master;掩模台所受干扰少,重视系统的跟踪性能,作为 Slave。在掩模台和工件台同步控制设计中,同步滤波器的设计是核心问题,如图 13 所示。掩模台在跟踪工件台时,为了使工件台的振动不会对掩模台起到增幅作用及补偿系统延迟,插入同步滤波器。对同步滤波器进行整定,可极大改善同步控制精度,同时也可减少机器的非均一性,吸收机

差。Mishra 等<sup>[96]</sup>还将 ILC 方法应用在工件台和掩模台的同步运动控制中。Mishra 等采用掩模台跟踪工件台的主从式同步运动控制策略：在工件台中，ILC 方法只对自身的跟踪误差进行学习来提升自身的跟踪性能；而在掩模台中，ILC 方法则对两个运动台的同步运动误差进行学习来提升两个运动台的同步运动性能。针对同样的问题，Yu<sup>[78]</sup>采用了交叉耦合式的同步运动控制策略，使用 ILC 方法同时实现了两个运动台同步运动性能以及各自跟踪性能的提升。

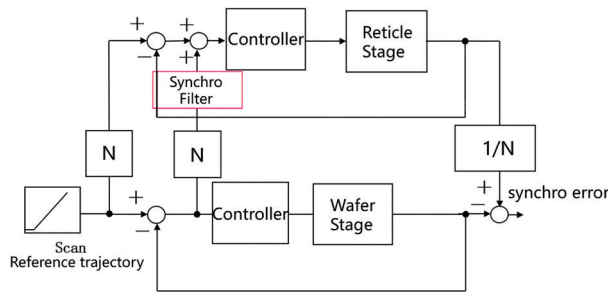


图 13 掩模台和工件台同步控制框图

Fig. 13 Block diagram of synchronous control between reticle stage and wafer stage

## 6 轨迹生成与整形技术

参考轨迹生成是光刻机运动台控制的基本功能模块，光刻机运动台水平向主要进行步进扫描运动，所需的参考运动轨迹可采用 5 阶 S 曲线进行描述，垂向运动主要负责硅片表面形貌测量和补偿，所需的参考运动轨迹可采用多项式曲线进行描述。

轨迹整形技术主要用于减少由于参考轨迹激发运动台机械谐振模式而产生的残余振动。

### 6.1 轨迹规划方法

在不添加额外器件减少空间压力的基础上，结合超精密运动平台发展趋势，如何通过运动轨迹规划的方式实现终端残余振动抑制，是超精密运动控制中的一个重点研究问题。在众多轨迹规划方法中，S 形运动轨迹规划方法因其物理意义明确、实现容易等优点获得了广泛的应用，该轨迹规划方法也是本文接下来的重点研究内容。

相比于阶跃运动轨迹，S 形运动轨迹明显更顺滑、自然，自然柔顺的运动轨迹作用效果明显优于突变的运动轨迹<sup>[97-99]</sup>。但是考虑到参考轨迹规划时间的影响，最初的 S 形运动轨迹是通过 bang-bang 或 bang-cruise-bang<sup>[100]</sup>方法获得，也被称为梯形速度曲线，如图 14 所示。该轨迹规划方法相当于约束被控对象以常值加速度运动，但是在加速度切换时却依然存在突变，易激励柔性环节造成残余振动。因此，实际工程中常使用基于时间脉冲延时的 3 阶 S 曲线<sup>[101-103]</sup>。按照曲线规划的方法可以看出，加速度变化具有了过渡过程，因此速度规划曲线是光滑的。虽然加速度变化时具有了过渡过程，但是过渡过程并不是光滑的，因此为了进一步提高加速度轨迹的自然柔顺特性，Nguyen 等<sup>[104]</sup>提出基于高阶时间脉冲延时的 S 形运动轨迹规划方法，并证明了 4 阶及更高阶的 S 曲线可以获得更高的定位精度。光刻机中的超精密运动平台要求高速、高加速条件下的高定位精度，也就是约束对台体的冲击更小，

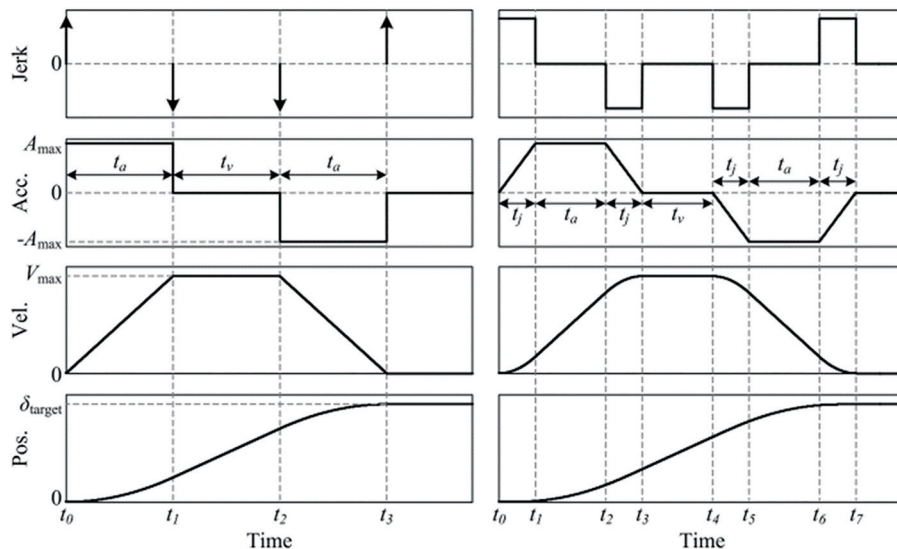


图 14 梯形速度曲线和 3 阶 S 曲线示意图

Fig. 14 Sketch diagram of trapezoidal velocity curve and third-order S-curve

武志鹏等<sup>[105]</sup>提出 5 阶 S 曲线,并应用于光刻机扫描、步进两种工况当中,获得了更好的实验效果。但是越高阶的 S 形运动轨迹计算越复杂、时间成本越高,而且高阶 S 形运动轨迹之间作用效果差异较小,再结合高速、高加速运动工况与采样时间等实际约束,一般不会研究 5 阶及以上阶次的 S 曲线规划方法。另外具体的阶次的选择也要根据实际工况而定。此外,也有学者将延时脉冲替换为延时三角函数的方式获得无限阶次的 S 曲线,例如 Li 等<sup>[106]</sup>提出 Twin-Sin 运动轨迹规划方法。该轨迹规划方法在加加速度轨迹规划阶段采用正弦函数替换延时脉冲,然后向上积分获得位置参考轨迹,并通过实验验证了该方法相较于传统梯形速度轨迹和同阶次 S 曲线的优越性。但是 Twin-Sin 运动轨迹中加加速度仍然有突变部分, Lee 等<sup>[107]</sup>针对这个问题提出 Smooth Jerk 运动轨迹规划方法。该方法基于余弦函数构造,理论上可以得到无限微分的加加速度运动轨迹。但是前述方法均是以对称的方式设计的,即加速和减速时间是一样的,而实际生活中常利用快启动、慢到达的方式实现最终残余振动抑制的目的,所以借鉴这个思想, Tsay 等<sup>[108]</sup>提出一种非对称 3 阶 S 形运动轨迹规划方法,实现了高加速度启动、低加速度停止的运动轨迹规划,并通过实验验证了该方法的有效性。

单纯规划平滑 S 形运动轨迹是基于实际物理约束而建立的,如限位器的安装位置、最大运行速度、驱动器最大出力等,但是没有对被控对象的动力学特性进行分析。因此,这样规划出来的运动轨迹很难实现零残余振动或最大程度残余振动抑制的目的。所以,需要在考虑了被控系统柔性模态之后,可以进一步对运动轨迹参数进行整定。Aspinwall<sup>[109]</sup>提出利用有限傅里叶级数拟合力函数,并基于残余振动包络线对傅里叶级数的项系数进行整定,最终实现残余振动的有效抑制。但是在相同工况下,该方法未对轨迹规划时间进行约束。Meckl 等<sup>[110]</sup>提出一种基于加速时间整定的 S 形运动轨迹规划方法,该方法通过在频域中对 S 形运动轨迹进行分析,调整运动轨迹加、减速的规划时间进而实现控制系统对轻阻尼系统残余振动抑制的目的。Shao 等<sup>[111]</sup>提出一种基于高、低频模型对 4 阶 S 形运动轨迹进行参数整定的方法,该方法首先对二维运动平台的模型进行分频,同时分别辨识其高、低频模型,然后对 4 阶 S 曲线的相关时间参数进行整定,实现了最优

运动轨迹设计。Kim 等<sup>[112]</sup>提出一种基于电机固有模型的最优 S 形运动轨迹参数整定方法,该方法通过分析对电机电压、电流、加加速度的约束,利用三维状态空间分析获得了最优的运动轨迹参数,实验结果验证了该方法相较于传统方法在定位能力方面的优越性。Ha 等<sup>[113]</sup>提出了一种基于鲁棒零极点配置的非对称 S 形运动轨迹规划方法。该方法在非对称 S 曲线<sup>[114]</sup>轨迹规划的基础上添加了平滑度和非对称度两个参数。并利用轻阻尼系统可以忽略阻尼作用效果的假设,基于柔性系统的模态信息和零极点配置思想,对 S 形运动轨迹的参数进行整定,达到了残余振动最大程度抑制的效果。值得注意的是,该方法通过运动轨迹非对称的特性,基于多重零点匹配极点提高了运动轨迹在定位时对模型不确定性的鲁棒性。但是,该方法一般用于长行程的工况,所以 Ha 等<sup>[115]</sup>又提出了针对短行程轻阻尼系统的非对称 S 形运动轨迹参数整定方法,并通过仿真验证了该方法在残余振动抑制方面的作用。

## 6.2 轨迹整形技术

输入整形技术是一种开环控制方法,由一系列不同幅值和时滞的脉冲序列组成,脉冲幅值和延迟时间需要根据系统机械特性求解。整形技术设计原理示意图如图 15 所示,其中蓝色线、黑色线、红色线分别为脉冲 A1、脉冲 A2 和系统整体激励响应。在应用时,将期望的参考输入与整形脉冲序列进行卷积后作为新的系统参考输入来驱动系统,也就相当于在不同时刻添加脉冲激励作为新的参考输入,使得因多个延时脉冲激励而造成的残余振荡最终可以恰好相互抵消,从而达到有限时间后输出的残余振荡为零的目的。整形器作用在参考输入的流程如图 16 所示。输入整形器在控制系统中的应用可以看作将参考输入与一个  $n$  维的脉冲序列卷积,将整形后的参考输入与被控系统开环串联,其结构示意图如图 17 所示。

20 世纪 50 年代, Smith<sup>[116-117]</sup>构建了 POSICAST 控制策略,文中最先提出了 ZV (Zero Vibration) 整形器。然后在 1990 年, Singer 等<sup>[118-119]</sup>提出了基于时

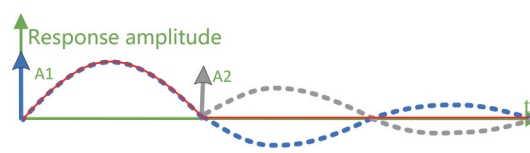


图 15 整形技术设计原理示意图

Fig. 15 Sketch diagram of shaping technology design principle

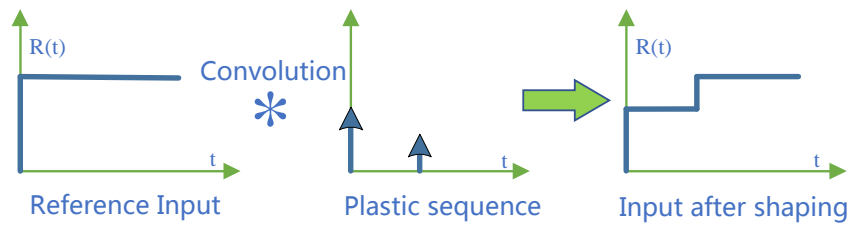


图 16 输入整形流程图

Fig. 16 Flow chart of input shaping

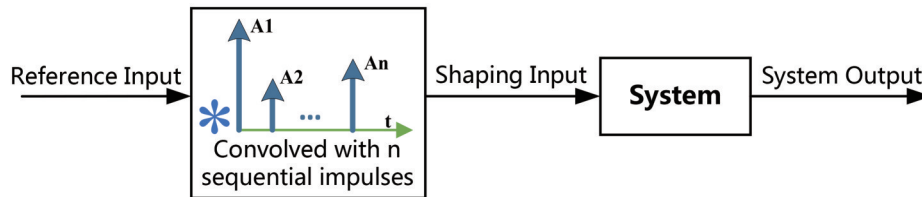


图 17 整形技术应用结构示意图

Fig. 17 Structure sketch diagram of shaping technology application

滞脉冲的滤波器,也就是目前标准意义上的输入整形器,简化了整形器的设计同时提高了其鲁棒性<sup>[120-121]</sup>。接下来近 30 年的发展,输入整形技术被广泛地应用于航天器、起重设备、精密制造设备、精密测量设备等含有柔性环节的运动控制系统当中<sup>[122-125]</sup>。从提高输入整形器对指定谐振频率扰动鲁棒性角度出发,Singer 等<sup>[121]</sup>在 ZV 整形器的基础上添加了一个在系统共振频率处残余振荡百分比对频率导数幅值为零的约束条件,构建了 ZVD (Zero Vibration and Derivative) 整形器。该方法实现了在共振频率处残余振荡为零,同时其周围频率激振的幅值也趋近于零,从而增强了输入整形器对频率辨识不准确而带来的干扰的抑制效果。基于相同的思想,在系统共振频率处残余振荡百分比对频率高阶幅值为零的约束条件行程 ZVDk 系列整形器<sup>[126]</sup>,如 ZVDD、ZVDDD 等,可以继续增强输入整形器的鲁棒性。在控制系统对残余振动约束有一定容忍度时,EI (Extra-insensitive) 整形器<sup>[127]</sup>约束共振频率处的残余振动幅值非零,但是在容忍度范围以内。相比于 ZVD 输入整形器,EI 整形器具有相同的延时时间,但是具有了更强的鲁棒性能。当选择更多共振抑制频率时,EI 整形器可以扩展为多峰 EI (M-EI) 整形器<sup>[128]</sup>,使输入整形器的鲁棒性更强。为了能够提高输入整形器对指定频率范围振动抑制的鲁棒性,文献<sup>[129-130]</sup>提出了 SI (Specified-Insensitivity) 整形器设计方法,该方法通过预估共振频率扰动的范围,并在预估区间内设置多个频率

采样点,进而约束采样点处振动幅值在容忍度之内。

无论是 ZVDk 整形器还是 M-EI 整形器都是以牺牲延时时间来提高鲁棒性的,所以大量学者针对小时滞的输入整形器进行了广泛且深入的研究。Kuo 等<sup>[131]</sup>提出基于极小化极大最优理论的整形器参数整定方法,该方法结合误差和速度的二次型建立指标函数,通过约束最大化目标函数和最小化整形器延时时间的方式实现最小时滞与最优输出的兼容。在被控对象共振频率扰动是高斯分布的假设条件下,Chang 等<sup>[132]</sup>基于高斯函数和残余振动幅值建立评价函数,同样利用最优的方式整定整形器参数,获得时间最优的输入整形器。此外,许多柔性系统具有多个主要振动模态,Singhose 等<sup>[133]</sup>提出利用多个单模态抑制输入整形器卷积的方式实现多模态的振动抑制。而 Hyde 等<sup>[134-135]</sup>提出基于各阶模态建立约束方程组的整形器参数整定方法,具体是通过已建立的约束方程组构建评价函数,然后通过优化的方式求取整形器参数最优解。随着研究的深入,输入整形器的应用逐步从线性定常系统拓展到非线性系统,Kozak 等<sup>[136]</sup>提出一种基于输入整形技术的并联机器人残余振动抑制方法,该方法通过将被控系统非线性动力学模型泰勒展开实现线性化,然后根据运动方向上的共振频率和阻尼率设计 ZV 整形器,最后进行了实验验证。但是,这些方法均是基于预测被控模型模态信息而设计的,不能随被控对象模型变化而修正自身参数,例如时变负

载、外界干扰影响等情况。针对这个问题, Tzes 等<sup>[137-138]</sup>提出了自适应输入整形器设计方法, 该方法基于级联 ZV 输入整形器, 并实时在线辨识系统频率, 进而整定整形器参数, 最后实验验证了该方法相比于陷波滤波方法具有更强的残余振动抑制效果。但是在线辨识共振频率需要系统在一个控制周期内完成数据采集、传输、计算等操作, 这会占用控制单元较多的通信、计算资源, 对控制系统计算能力、硬件成本等提出了挑战。Magee 等<sup>[139]</sup>提出一种可以任意时间延时的最优滤波器(OATF), 同时可以认为是三脉冲输入整形器的一种。该方法在选定的延时时间条件下, 根据系统共振模态的频率特性选取幅值参数, 最终实现残余振动的最大程度抑制。Rhim 等<sup>[140-143]</sup>在 OATF 的基础上提出了基于系统响应输出的输入整形器参数整定方法, 该方法利用理想输出和实际输出的差别来自适应整定输入整形器参数, 相较于在线参数整定方法具有更好的收敛性和稳定性, 作者在龙门式机器人上对该方法进行了实验验证。

## 7 结束语

关于光刻机超精密运动台的控制问题, 由于技术保密等原因, 国内外文献报道的相关成果并不十分丰富。目前, 国外相关研究主要集中在荷兰的埃因霍温理工大学、代尔夫特理工大学和 ASML 公司、美国的加州大学伯克利分校、日本的尼康公司等, 国内相关研究主要集中在清华大学、哈尔滨工业大学、复旦大学、华中科技大学和中国科学院所属研究机构等。下面将对本文提供的国内外文献进行简要分析。

单自由度运动控制是多自由度运动控制和多运动台协同运动控制的基础, 目前单自由度运动控制通常采用反馈与前馈相结合的二自由度控制结构。为最大化运动性能, 应尽可能地使用前馈控制进行误差补偿, 反馈控制则主要用于稳定闭环系统并对前馈控制无法补偿的残留误差进行抑制。在目前的实际应用中, 反馈控制通常采用基于回路成形的线性反馈控制方法, 而前馈控制通常采用基于机理建模的参数化固定结构前馈控制方法。在此基础上, 有必要将干扰观测器和非线性反馈控制环节纳入到现有成熟的反馈控制系统中, 作为线性反馈控制技术的重要补充, 用来提升中低频段干扰抑制能力, 避免单纯线性反馈控制的水床效应。与此

同时, 有必要在现有参数化前馈控制器中拓展基于数据模型的补偿结构, 形成数据与机理融合的运动台误差补偿方案, 从原理上提升控制系统的前馈补偿能力。但参数化前馈控制方法的性能严重依赖于运动台动力学和所受干扰的建模精度, 无法实现极限补偿效果。因此, 应将非参数化前馈控制技术诸如迭代学习控制等纳入到现有成熟的前馈控制系统中, 作为重复运动条件下前馈控制技术的重要补充。迭代学习控制应在快速补偿重复性误差的同时尽可能抑制非重复性误差的学习累积, 并考虑在非重复运动条件下与参数化前馈控制方法的联合应用问题。此外, 虽然轨迹规划与整形本质上是一种前馈控制技术, 但应该看到其在运动控制中的独特作用, 在未来应得到更广泛的应用。总之, 应该建立更加完善的运动控制架构, 结合晶圆曝光实际场景, 充分考虑实际物理约束, 实现现有硬件条件下反馈抑制与前馈补偿的性能极限。多自由度运动控制的核心在于动力学解耦, 而高性能动力学解耦的关键在于获取准确的运动台相关机器常数, 如执行器、传感器布局参数、运动台质心位置等。实际上, 不仅是解耦, 参数化前馈控制方法想要实现高性能, 也需要掌握大量准确的运动台机器常数, 如运动台质量、宏微动运动台间的阻尼、刚度系数等。另外, 反馈控制想要实现高性能也需要对反馈控制器参数进行整定。目前, 无论在反馈控制领域还是前馈控制领域, 基于自整定和迭代学习整定的控制器参数优化和校准方法都是领域内的热点研究方向。然而面向整机应用, 需要进一步建立完善的运动台测校方案, 与现有运动控制架构相配合, 应系统地梳理测校项, 整理测校流程和数据处理方法, 开发测校软件、固件, 实现机器常数在线测校及测校自动化。控制模型的准确构建以及机器常数的精准测校都有赖于对运动台乃至光刻机整机的深刻认识, 掌握面向控制的系统辨识技术、多领域(光、机、电、磁、热、控、软)联合仿真乃至构建运动台及整机的数字孪生模型对于深刻理解运动台运动误差形成机理至关重要, 是运动控制数字化发展的重要方向。借助数字化设计、仿真与控制技术, 以往控制系统设计滞后于机械系统设计的单线程开发模式, 可以向机械&控制联合设计、联合优化迈进, 满足下一代光刻机轻质柔性运动台更高动态、更高精度的运动性能需求。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2015.  
The Central People's Government of the People's Republic of China. Outline of the national medium- and long-term program for scientific and technological development[R]. Beijing: The Central People's Government of the People's Republic of China, 2015.
- [3] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2015.  
The Central People's Government of the People's Republic of China. Circular of the State Council on the issuance of Made in China 2025[R]. Beijing: The Central People's Government of the People's Republic of China, 2015.
- [4] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of VLSI[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] Butler H, George R A, Baselmans J. Scanning stage technology for exposure tools[J]. *Microlithography World*, 1999, 8: 8-16.
- [6] Butler H. Position control in lithographic equipment [applications of control][J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2011, 31(5): 28-47.
- [7] 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.
- [8] 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. The Netherlands: Delft University Press, 2014.
- [9] Dirx N, van de Wijdeven J, Oomen T. Frequency Response Function identification for multivariable motion control: optimal experiment design with element-wise constraints[J]. *Mechatronics*, 2020, 71: 102440.
- [10] de Rozario R, Oomen T. Multivariable nonparametric learning: a robust iterative inversion-based control approach[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(2): 541-564.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Oomen T. Advanced motion control for precision mechatronics: control, identification, and learning of complex systems[J]. *IEEE Journal of Industry Applications*, 2018, 7(2): 127-140.
- [14] Boeren F, Lanzon A, Oomen T. Iterative identification and control using non-normalized coprime factors with application in wafer stage motion control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 28(2): 413-424.
- [15] Butler H. Magnetic disturbance compensation for a reticle stage in a lithographic tool[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(6): 559-565.
- [16] Hoogerkamp M, Waiboer R R, van Dijk J, et al. Attenuation of disturbances introduced by dynamic links in precision motion systems using model-based observers[J]. *Mechatronics*, 2014, 24(6): 640-647.
- [17] Butler H, de Hoon C. Fractional-order filters for active damping in a lithographic tool[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(4): 413-419.
- [18] Iwasaki M, Seki K, Maeda Y. High-precision motion control techniques: a promising approach to improving motion performance[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2012, 6(1): 32-40.
- [19] 陈震宇. 多自由度精密运动平台机械参数软测量方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Chen Z Y. Soft-sensor method for mechanical parameters of multi-DOF ultra-precision motion stage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [20] Heertjes M, van Engelen A. Minimizing cross-talk in high-precision motion systems using data-based dynamic decoupling[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(12): 1423-1432.
- [21] Li M, Mao C H, Zhu Y, et al. Data-based iterative dynamic decoupling control for precision MIMO motion systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial*

- Informatics, 2020, 16(3): 1668-1676.
- [22] 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.
- [23] Yang J, Zhu Y, Yin W S, et al. LFT structured uncertainty modeling and robust loop-shaping controller optimization for an ultraprecision positioning stage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 7013-7025.
- [24] Hoogendijk R, Heertjes M F, van de Molengraft M J G, et al. Directional Notch filters for motion control of flexible structures[J]. Mechatronics, 2014, 24(6): 632-639.
- [25] Butler H. Acceleration feedback in a lithographic tool [J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(4): 453-464.
- [26] van de Wal M, van Baars G, Sperling F, et al. Multivariable  $H_{\infty}/\mu$  feedback control design for high-precision wafer stage motion[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(7): 739-755.
- [27] Oomen T, van de Wal M, Bosgra O. Design framework for high-performance optimal sampled-data control with application to a wafer stage[J]. International Journal of Control, 2007, 80(6): 919-934.
- [28] Wassink M G, van de Wal M, Scherer C, et al. LPV control for a wafer stage: beyond the theoretical solution[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(2): 231-245.
- [29] Heertjes M F, Schuurbijs X G P, Nijmeijer H. Performance-improved design of N-PID controlled motion systems with applications to wafer stages[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1347-1355.
- [30] Heertjes M F, Sahin I H, van de Wouw N, et al. Switching control in vibration isolation systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 626-635.
- [31] Hunnekens B, van de Wouw N, Heertjes M, et al. Synthesis of variable gain integral controllers for linear motion systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(1): 139-149.
- [32] Heertjes M, Verstappen R. Self-tuning in integral sliding mode control with a Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Mechatronics, 2014, 24(4): 385-393.
- [33] Heertjes M F, Perdiguero N I, Deenen D A. Robust control and data-driven tuning of a hybrid integrator-gain system with applications to wafer scanners[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2019, 33(2): 371-387.
- [34] 王一光. 滑模变结构控制在扫描光刻系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Wang Y G. Sliding mode variable structure control and its application to wafer scanner[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [35] Wang Y G, Chen X L, Li X J. Modified robust sliding-mode control method for wafer scanner[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(3): 1-9.
- [36] Zheng J C, Wang H, Man Z H, et al. Robust motion control of a linear motor positioner using fast nonsingular terminal sliding mode[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(4): 1743-1752.
- [37] Zheng M. Advanced learning, estimation and control in high-precision systems[D]. Berkeley: UC Berkeley, 2017.
- [38] Heertjes M F, Nijmeijer H. Self-tuning of a switching controller for scanning motion systems[J]. Mechatronics, 2012, 22(3): 310-319.
- [39] Li M, Yang K M, Zhu Y, et al. State/model-free variable-gain discrete sliding mode control for an ultraprecision wafer stage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6695-6705.
- [40] Li M, Zhu Y, Yang K M, et al. A data-driven variable-gain control strategy for an ultra-precision wafer stage with accelerated iterative parameter tuning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(5): 1179-1189.
- [41] Heertjes M F, van der Velden B, Oomen T. Constrained iterative feedback tuning for robust control of a wafer stage system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 56-66.
- [42] Li M, Zhu Y, Yang K M, et al. Convergence rate oriented iterative feedback tuning with application to an ultraprecision wafer stage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1993-2003.
- [43] 付雪薇. 有铁芯直线电机推力波动的分析与补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Fu X W. Analysis and method research of compensation for force ripple of iron linear motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [44] Fu X W, Yang X F, Chen Z Y. A new linear motor force ripple compensation method based on inverse model iterative learning and robust disturbance observer[J]. Complexity, 2018, 2018: 1-19.



- [45] Liu C, Wu J H, Xiong Z H. High-acceleration and high-precision point-to-point motion control based on disturbance observer with improved Q-filter[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2015, 229(7): 587-598.
- [46] Liu C, Wu J H, Liu J, et al. High acceleration motion control based on a time-domain identification method and the disturbance observer[J]. Mechatronics, 2014, 24(6): 672-678.
- [47] Devasia S. Should model-based inverse inputs be used as feedforward under plant uncertainty? [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(11): 1865-1871.
- [48] Wu Y, Zou Q Z. Robust-inversion-based 2-DOF-control design for output tracking: piezoelectric actuator example[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(5): 1059-1082.
- [49] Boerlage M, Steinbuch M, Lambrechts P, et al. Model-based feedforward for motion systems[C]// Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003, June 25, 2003, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2003: 1158-1163.
- [50] Butterworth J A, Pao L Y, Abramovitch D Y. Analysis and comparison of three discrete-time feedforward model-inverse control techniques for nonminimum-phase systems[J]. Mechatronics, 2012, 22(5): 577-587.
- [51] van Zundert J, Oomen T. On inversion-based approaches for feedforward and ILC[J]. Mechatronics, 2018, 50: 282-291.
- [52] 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.
- [53] Xia B Z, Yuan C P, Tian Y, et al. Disturbance estimation and compensation for planar motors on the long-stroke stage of a wafer stage[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(4): 1-10.
- [54] Mu H H, Zhou Y F, Wen X, et al. Calibration and compensation of cogging effect in a permanent magnet linear motor[J]. Mechatronics, 2009, 19(4): 577-585.
- [55] Blanken L, van den Meijdenberg I, Oomen T. Inverse system estimation for feedforward: a kernel-based approach for non-causal systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(15): 1050-1055.
- [56] Kasemsinsup Y, Romagnoli R, Heertjes M, et al. Reference-tracking feedforward control design for linear dynamical systems through signal decomposition [C]//2017 American Control Conference (ACC), May 24-26, 2017, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2017: 2387-2392.
- [57] Liu Y, Xu X D, Chen Z Y, et al. RBFNN based linear motor cogging force identification for lithography machines[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(28): 650-655.
- [58] Butler H. Adaptive feedforward for a wafer stage in a lithographic tool[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 875-881.
- [59] Li X J, Wang Y G. Sliding-mode control combined with improved adaptive feedforward for wafer scanner [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103: 105-116.
- [60] Zhao S, Tan K K. Adaptive feedforward compensation of force ripples in linear motors[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(9): 1081-1092.
- [61] Wang Z, Hu C X, Zhu Y, et al. Neural network learning adaptive robust control of an industrial linear motor-driven stage with disturbance rejection ability [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2172-2183.
- [62] Xu L, Yao B. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(4): 444-452.
- [63] Fine B T. Practical iterative learning control: intuitive methods for precision motion control[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2009.
- [64] Fine B T, Mishra S, Tomizuka M. Model inverse based Iterative Learning Control using finite impulse response approximations[C]//2009 American Control Conference, June 10-12, 2009, St. Louis, MO, USA. New York: IEEE Press, 2009: 931-936.
- [65] 姜晓明. 迭代学习控制方法及其在扫描光刻系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Jiang X M. Iterative learning control and its applications to wafer scanner systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [66] de Roover D, Bosgra O H. Synthesis of robust multivariable iterative learning controllers with application to a wafer stage motion system[J]. International Journal of Control, 2000, 73(10): 968-979.
- [67] Zheng M H, Wang C, Sun L T, et al. Design of

- arbitrary-order robust iterative learning control based on robust control theory[J]. *Mechatronics*, 2017, 47: 67-76.
- [68] Dijkstra B G. Iterative learning control, with applications to a wafer-stage[D]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
- [69] Barton K L, Alleyne A G. A norm optimal approach to time-varying ILC with application to a multi-axis robotic testbed[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(1): 166-180.
- [70] Liu Y, Li L, Yang X F, et al. Enhanced Kalman-filtering iterative learning control with application to a wafer scanner[J]. *Information Sciences*, 2020, 541: 152-165.
- [71] Lin C Y, Sun L T, Tomizuka M. Robust principal component analysis for iterative learning control of precision motion systems with non-repetitive disturbances[C]//2015 American Control Conference (ACC), July 1-3, 2015, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Press, 2015: 2819-2824.
- [72] Merry R, van de Molengraft R, Steinbuch M. Iterative learning control with wavelet filtering[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2008, 18(10): 1052-1071.
- [73] Mishra S, Tomizuka M. Projection-based iterative learning control for wafer scanner systems[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(3): 388-393.
- [74] Mishra S, Coaplen J, Tomizuka M. Precision positioning of wafer scanners segmented iterative learning control for nonrepetitive disturbances applications of control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, 27(4): 20-25.
- [75] Heertjes M, Tso T. Nonlinear iterative learning control with applications to lithographic machinery[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(12): 1545-1555.
- [76] Rotariu I, Steinbuch M, Ellenbroek R. Adaptive iterative learning control for high precision motion systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1075-1082.
- [77] Heertjes M F, van de Molengraft R M J G. Set-point variation in learning schemes with applications to wafer scanners[J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(3): 345-356.
- [78] Yu S W. Enhanced iterative learning control with applications to a wafer scanner system[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2011.
- [79] van der Meulen S H, Tousain R L, Bosgra O H. Fixed structure feedforward controller design exploiting iterative trials: application to a wafer stage and a desktop printer[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2008, 130(5): 051006.
- [80] Song F Z, Liu Y, Xu J X, et al. Iterative learning identification and compensation of space-periodic disturbance in PMLSM systems with time delay[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(9): 7579-7589.
- [81] Boeren F, Oomen T. Iterative feedforward control: a closed-loop identification problem and a solution[C]//52nd IEEE Conference on Decision and Control, December 10-13, 2013, Firenze, Italy. New York: IEEE Press, 2013: 6694-6699.
- [82] Boeren F, Blanken L, Bruijnen D, et al. Optimal estimation of rational feedforward control via instrumental variables: with application to a wafer stage[J]. *Asian Journal of Control*, 2018, 20(3): 975-992.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] Boeren F, Bareja A, Kok T, et al. Frequency-domain ILC approach for repeating and varying tasks: with application to semiconductor bonding equipment [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2716-2727.
- [86] Li M, Zhu Y, Yang K M, et al. Data-based switching feedforward control for repeating and varying tasks: with application to an ultraprecision wafer stage[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(11): 8670-8680.
- [87] Stearns H M. Iterative methods for high precision motion control with application to a wafer scanner system[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2011.
- [88] Evers E, van de Wal M, Oomen T. Beyond decentralized wafer/reticle stage control design: a double-Youla approach for enhancing synchronized motion[J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 83:

- 21-32.
- [89] Heertjes M F, Temizer B, Schneiders M. Self-tuning in master-slave synchronization of high-precision stage systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(12): 1706-1715.
- [90] Li L L, Hu S, Zhao L X, et al. A new synchronization control method of wafer and reticle stage in step and scan lithographic equipment[J]. *Optik*, 2013, 124(24): 6861-6865.
- [91] van Zundert J, Oomen T, Verhaegh J, et al. Beyond performance/cost tradeoffs in motion control: a multirate feedforward design with application to a dual-stage wafer system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(2): 448-461.
- [92] Zhu H Y, Pang C K, Teo T J. Integrated servomechanical design of a fine stage for a coarse/fine dual-stage positioning system[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 329-338.
- [93] Salton A T, Chen Z Y, Zheng J C, et al. Constrained optimal preview control of dual-stage actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(2): 1179-1184.
- [94] Lambregts C J H, Heertjes M F, van der Veeck B J. Multivariable feedback control in stage synchronization [C]//2015 American Control Conference (ACC), July 1-3, 2015, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Press, 2015: 4149-4154.
- [95] Looijen V A, Heertjes M F. Robust synchronization of motion in wafer scanners using particle swarm optimization[C]//2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications, August 21-24, 2018, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE Press, 2018: 1102-1107.
- [96] Mishra S, Yeh W, Tomizuka M. Iterative learning control design for synchronization of wafer and reticle stages[C]//2008 American Control Conference, June 11-13, 2008, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 3908-3913.
- [97] Lewin C. Motion control gets gradually better[J]. *Machine Design*, 1994, 66(21): 90-94.
- [98] Zang Q, Huang J, Liang Z. Slosh suppression for infinite modes in a moving liquid container[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 217-225.
- [99] Zang Q, Huang J. Dynamics and control of three-dimensional slosh in a moving rectangular liquid container undergoing planar excitations[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(4): 2309-2318.
- [100] Haschke R, Weitnauer E, Ritter H. On-line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 22-26, 2008, Nice, France. New York: IEEE Press, 2008: 3248-3253.
- [101] Piazzoli A, Visioli A. Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(1): 140-149.
- [102] Erkorkmaz K, Altintas Y. High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(9): 1323-1345.
- [103] Macfarlane S, Croft E A. Jerk-bounded manipulator trajectory planning: design for real-time applications [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(1): 42-52.
- [104] Nguyen K D, Ng T C, Chen I M. On algorithms for planning S-curve motion profiles[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2008, 5(1): 99-106.
- [105] 武志鹏, 陈兴林. 精密硅片台步进扫描运动的 5 阶 S 曲线规划[J]. *光电工程*, 2012, 39(8): 99-104.  
Wu Z P, Chen X L. Fifth-order S-curve trajectory planning for step and scan operation of precision wafer stage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 99-104.
- [106] Li H Z, le M D, Gong Z M, et al. Motion profile design to reduce residual vibration of high-speed positioning stages[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(2): 264-269.
- [107] Lee A Y, Choi Y. Smooth trajectory planning methods using physical limits[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(12): 2127-2143.
- [108] Tsay D M, Lin C F. Asymmetrical inputs for minimizing residual response[C]//IEEE International Conference on Mechatronics, 2005. ICM '05, July 10-12, 2005, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2005: 235-240.
- [109] Aspinwall D M. Acceleration profiles for minimizing residual response[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1980, 102(1): 3-6.
- [110] Meckl P H, Arestides P B. Optimized s-curve motion profiles for minimum residual vibration[C]//Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.98CH36207), June 26, 1998, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press,

- 1998: 2627-2631.
- [111] Shao H M, Liao D Z, Cheung J W F. System identification and profile planning for high accuracy servo system[M]//Xiong C H, Huang Y A, Xiong Y L, et al. Intelligent robotics and applications. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2008, 5314: 410-419.
- [112] Kim Y O, Ha I J. Time-optimal control of a single-DOF mechanical system considering actuator dynamics[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(6): 919-932.
- [113] Ha C W, Rew K H, Kim K S. Robust zero placement for motion control of lightly damped systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3857-3864.
- [114] Rew K H, Kim K S. A closed-form solution to asymmetric motion profile allowing acceleration manipulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2499-2506.
- [115] Ha C W, Rew K H, Kim K S, et al. Tuning the S-curve motion profile in short distance case[C]//2013 American Control Conference, June 17-19, 2013, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2013: 4975-4980.
- [116] Smith O J M. Posicast control of damped oscillatory systems[J]. Proceedings of the IRE, 1957, 45(9): 1249-1255.
- [117] Smith O J M. Feedback control systems[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1958.
- [118] Singer N C, Seering W P, Pasch K A. Shaping command inputs to minimize unwanted dynamics: US4916635[P]. 1990-04-10.
- [119] Singhose W, Seering W, Singer N. Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(2): 654-659.
- [120] Singer N C, Seering W P. Experimental verification of command shaping methods for controlling residual vibration in flexible robots[C]//1990 American Control Conference, May 23-25, 1990, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 1990: 1738-1744.
- [121] Singer N C, Seering W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112(1): 76-82.
- [122] Yurkovich S, Tzes A P, Hillsley K L. Controlling coupled flexible links rotating in the horizontal plane [J]. Proceedings of the American Control Conference, 2009: 362-367.
- [123] Jones S D, Ulsoy A G. An approach to control input shaping with application to coordinate measuring machines[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1999, 121(2): 242-247.
- [124] Khalid A, Huey J, Singhose W, et al. Human operator performance testing using an input-shaped bridge crane[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 128(4): 835-841.
- [125] Fortgang J, Singhose W, Marquez J J, et al. Command shaping for micro-mills and CNC controllers[C]//Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005, June 8-10, 2005, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2005: 4531-4536.
- [126] Ha M T, Kang C G. Experimental analysis of natural frequency error to residual vibration in ZV, ZVD, and ZVDD shapers[C]//2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), October 30-November 2, 2013, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2013: 195-199.
- [127] Singhose W, Derezhinski S, Singer N. Extra-insensitive input shapers for controlling flexible spacecraft [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1996, 19(2): 385-391.
- [128] Singhose W E, Porter L J, Singer N C. Vibration reduction using multi-hump extra-insensitive input shapers[J]. Proceedings of the American Control Conference, 1995: 3830-3830.
- [129] Singer N C, Seering W P. An extension of command shaping methods for controlling residual vibration using frequency sampling[C]//Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12-14, 1992, Nice, France. New York: IEEE Press, 1992: 800-805.
- [130] Vaughan J, Yano A, Singhose W. Performance comparison of robust negative input shapers[C]//American Control Conference, June, 11-13, 2008, Seattle, WA, USA. IEEE Press, 2008: 3257-3262.
- [131] Kuo Y L, Singh T. Minimax design of prefilters for maneuvering flexible structures[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August 5-8, 2002, Monterey, California. Virginia: AIAA Press, 2002: 1-8.
- [132] Chang T, Godbole K, Hou E. Optimal input shaper design for high-speed robotic workcells[J]. Journal of Vibration and Control, 2003, 9(12): 1359-1376.
- [133] Singhose W, Crain E, Seering W. Convolved and

- simultaneous two-mode input shapers[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 1997, 144(6): 515-520.
- [134] Hyde J M, Seering W P. Inhibiting multiple mode vibration in controlled flexible systems[C]//1991 American Control Conference, June 26-28, 1991, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 1991: 2449-2454.
- [135] Hyde J M, Seering W P. Using input command pre-shaping to suppress multiple mode vibration[C]// Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 9-11, 1991, Sacramento, CA, USA. New York: IEEE Press, 1991: 2604-2609.
- [136] Kozak K, Ebert-Uphoff I, Singhose W. Locally linearized dynamic analysis of parallel manipulators and application of input shaping to reduce vibrations [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(1): 156-168.
- [137] Tzes A, Englehart M, Yurkovich S. Input preshaping with frequency domain information for flexible-link manipulator control[C]//Guidance, Navigation and Control Conference, August 14-16, 1989, Boston, MA. Virginia: AIAA Press, 1989: 3565.
- [138] Tzes A P, Yurkovich S. Adaptive precompensators for flexible-link manipulator control[C]//Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control, December 13-15, 1989, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 1989: 2083-2088.
- [139] Magee D P, Book W J. Optimal filtering to minimize the elastic behavior in serial link manipulators[C]// Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No. 98CH36207), June 26-26, 1998, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 1998: 2637-2642.
- [140] Rhim S, Book W J. Adaptive command shaping using adaptive filter approach in time domain[C]// Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251), June 2-4, 1999, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 1999: 81-85.
- [141] Rhim S, Book W J. Noise effect on adaptive command shaping methods for flexible manipulator control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(1): 84-92.
- [142] Rhim S, Book W J. Adaptive time-delay command shaping filter for flexible manipulator control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(4): 619-626.
- [143] Park J H, Rhim S S. Extraction of optimal time-delay in adaptive command shaping filter for flexible manipulator control[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2008, 14(6): 564-572.