

半导体装备系统动力学与控制专刊序^{*}

孙煜^{1†} 宋法质² 徐云浪³ 李雪平⁴

(1. 复旦大学 工程与应用技术研究院, 上海 200433)

(2. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

(3. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

(4. 重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要 围绕集成电路半导体装备的 LPV 动力学建模与控制、精密运动系统的建模与高精度运动控制、精密设备的主动隔振与抑振、晶圆机械手结构设计与减振、高精度传感装置研制、精密系统温度控制等方面, 本专刊介绍了集成电路半导体装备系统动力学与控制领域一些研究成果。

关键词 半导体装备动力学, 精密运动系统, 主动振动控制, 晶圆机械手, 光栅尺, 精密温度控制
中图分类号: TP23 **文献标志码**: A

Preface to the Special Issue: System Dynamic and Control of Semiconductor Equipment^{*}

Sun Yu^{1†} Song Fazhi² Xu Yunlang³ Li Xueping⁴

(1. Academy of Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(2. Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrumentation Engineering, Harbin 150001, China)

(3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

(4. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract This special issue intends to LPV dynamics modelling and control of IC semiconductor equipment, modelling and high-precision motion control of motion systems, active vibration isolation and vibration suppression of precision equipment, structural design and vibration damping of wafer manipulators, development of high-precision sensing devices, and temperature control of precision systems.

Key words dynamic of semiconductor equipment, precision motion system, active vibration control, wafer manipulators, granting ruler, precision temperature control

序言

光刻机是集成电路制造中技术难度最高、最复杂、最昂贵的核心设备, 其制造集成了先进系统动力学与控制、先进光学、先进材料等顶尖科学技术,

目前荷兰阿斯麦公司生产的极紫外光刻机被誉为人类有史以来制造的最复杂机器。近年来, 随着中美贸易摩擦的发展, 以先进光刻机为代表的高端集成电路制造装备被发达国家严格限制出口到我国, 使先进制程的半导体装备成为我国集成电路领域

2024-11-10 收到第 1 稿, 2024-11-25 收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(62304045), 上海市扬帆计划资助项目(23YF1401600), Natural Science Foundation of China(62304045), Shanghai Sailing Program (23YF1401600).

[†] 通信作者 E-mail: sunyu_aet@fudan.edu.cn

发展的“卡脖子”问题。在半导体装备的研制中,机械系统动力学与控制起着至关重要的作用:精密系统动力学与减振、隔振技术能够隔离大地振动,为集成电路生产提供一个稳定环境;精密运动控制技术能够实现精密扫描、精密定位,保障套刻精度、分辨率等光刻机核心指标;精密测量技术能进行亚纳米级位移测量,是闭环控制的基础;精密执行器、驱动控制技术能够降低系统延迟,提升控制精度。

为了促进半导体装备系统动力学与控制的发展,增强科学研究与产业研究的交流融合,打造产学研用交流平台,及时总结相关领域的前沿研究成果,助力我国在半导体装备领域不断突破“卡脖子”技术,特组织“半导体装备系统动力学与控制专刊”,共包含11篇论文(含1篇综述论文),涉及集成电路制造装备LPV动力学建模与控制、精密运动系统的建模与高精度运动控制、精密设备的主动隔振与抑振、晶圆机械手结构与减振、高精度传感装置研制、精密系统温度控制等方面,旨在展示半导体装备动力学与控制研究中的创新性研究成果和工程应用。

重庆大学黄涛等^[1]的《集成电路制造装备运动系统LPV动力学建模与控制综述》对线性变参数(Linear Parameter-Varying, LPV)理论进行了综述。从集成电路制造装备运动系统面临的挑战与问题出发,引出LPV在解决现有问题上的优势,从建模、辨识、控制三个方面分析比较国内外在此领域的研究成果和进展,探讨了LPV建模与控制的未来发展方向,指出LPV方法为运动系统的机械振动、摩擦力、机械间隙、迟滞、蠕变、时变位置、时变负载、多自由度间串扰、刚柔耦合等问题提出了新的研究思路,为集成电路制造装备运动系统动力学建模、高性能控制等领域研究提供参考。

复旦大学金煜等^[2]的《基于改进型PSO的SINDy建模应用:微动致动器》针对微致动器存在的迟滞、蠕变等非线性特性,提出一种非线性系统动力学的稀疏辨识(Sparse Identification of Non-linear Dynamics, SINDy)的建模方法。首先,通过SINDy算法建立正交候选非线性元素数据库;然后,由稀疏回归算子结合正则化对构建的模型进行稀疏惩罚,获得简化后的包含输入与输出的模型框架表达式;最后,通过实验验证了论文提出的方法不仅能够降低了建模成本和模型复杂度,还能够显著

提高了非线性模型的拟合精度。

中南大学余少强^[3]等的《伯努利晶圆传输机械手指的结构优化与吸附力研究》探讨了晶圆传输机器人的机械手指设计对于晶圆传输可靠性的影响。首先,针对晶圆搬运过程中的无损高刚度要求和轻量化设计目标,提出了一种超薄机械手指结构,该结构基于伯努利排气负压原理,整体厚度仅为5 mm,并装有6个吸盘。工作时,供给气体从吸盘圆筒侧面喷口高速喷出,形成旋转气流致负压,从而吸附晶圆。接着,深入分析了晶圆吸附的理论与方法,包括弹性接触理论、伯努利负压理论以及晶圆吸附过程的力学分析。通过理论推导和仿真分析,揭示了晶圆吸附力与供气压力成正比,与晶圆吸盘间隙满足指数分布规律的特性。最后,通过Fluent软件对机械手指的联合气路进行仿真分析,进一步验证了设计的有效性。这项研究成果不仅为晶圆传输机器人的机械手指设计提供了新的思路,也为后续研究晶圆吸附力自适应调节方法、实现晶圆的无损搬运奠定了理论基础。

哈尔滨工业大学高殿淳^[4]的《面向二维轨迹跟踪的精密运动台定量反馈交叉耦合控制方法》对H桥型精密双轴运动台的二维轨迹跟踪技术及基于定量反馈理论的交叉耦合轮廓控制方法进行了研究。首先基于双轴运动台的动力学模型,为解耦后的单轴系统设计了前馈反馈相结合的复合控制方法,为耦合控制提供前提条件。接着,基于切线逼近的轮廓误差模型,对交叉耦合控制策略的框图进行求解,获得了有无交叉耦合控制器的轮廓误差传递函数,并建立了等效反馈回路。然后,使用定量反馈的方法为时变等效受控对象设计了交叉耦合控制器,并与传统交叉耦合控制方法比较,验证了其在提升跟踪精度的同时,其满足任意轨迹输入的优势。上述研究成果一方面对二维轨迹跟踪控制方法提供了新思路,使其能满足任意轨迹输入,在另一方面为离线设计方法,降低了传统方法的调试难度,比较具有工程价值。

沈阳工业大学张艺镗等^[5]的《基于变论域模糊迭代学习的直线电机位置控制》研究了直线电机在不同类型位置跟踪信号下的位置控制策略。建立了表贴式永磁同步直线电机模型,实现正弦位置跟踪;设计了迭代学习控制策略,引入模糊控制器实时修正迭代学习控制参数,并设计了二级模糊控制

器用于生成伸缩因子,实现了模糊控制器论域的自整定;实验证明变论域模糊迭代学习控制策略能够有效提升电机的位置跟踪精度.在电机跟踪余弦位置信号时,电机位置存在初始误差会导致每个迭代周期开始阶段产生振荡,导致控制系统收敛速度过慢.为此,设计了一种带有改进型自适应遗忘因子的变论域模糊迭代学习控制策略,减小了每个迭代周期开始阶段的位置跟踪误差.上述研究从新的视角提出了直线电机位置控制中的问题,并为直线电机位置控制策略的设计提供了创新思路.

中国电子科技集团公司第四十五研究所王三霞等^[6]的《半导体加工设备主动隔振仿真和实验研究》研究了半导体精密加工设备的主动隔振理论、仿真和实验.明确了隔振机构内部的参数特性,并根据实验室中设备的安装情况建立了二级隔振仿真模型,设计了自抗扰控制和绝对速度反馈控制联合的主动控制策略,通过仿真验证了控制策略的有效性.利用气浮装置、检波器、位置传感器、洛伦兹力电机等在实验室中的隔振测试台中实现了该主动控制策略,实验结果证明了该方案的有效性,根据传递率和顺应度两个隔振重要指标,可以证明该方案优于常用的方案.上述研究成果丰富了大型精密半导体设备主动隔振方案.

中国电子科技集团公司第四十五研究所陈曦等^[7]的《基于加速度计前馈控制的主动抑振方法》研究了超精密运动台测量基准在高速高加速运动激励下的动力学特性以及基于加速度计的主动抑振方法.首先,实验发现测量基准的谐振频点与其模态强相关.其次,利用加速度计的高灵敏度特性获取测量基准的振动信号,设计驼峰滤波器、超前滞后补偿算法进行数据处理,解决补偿信号相位失真与信号延时的问题.最后,研究了前馈控制器设计对伺服系统控制精度影响,额外的滤波可以更灵活有效抑制固有频率以外的高频振动.从而实现谐振信号有效衰减,大幅度提升纳米级运动台的伺服精度.上述研究成果一方面丰富了超精密系统的运动控制学,另一方面也可以为基于加速度计前馈控制的振动抑制提供新思路.

中南大学李嘉俊等^[8]的《SCARA 型晶圆传输机器人结构与减振优化》研究了晶圆传输机器人的关键结构设计及其减振优化.首先,针对晶圆传输过程中的精度与效率需求,设计了一款融合平

面 3 关节直驱旋转与垂直升降功能的 SCARA 型四自由度晶圆传输机器人.其次,对机器人手的超薄机械手指进行了模态分析,并通过引入均匀轮形筋结构实现手指结构尺寸的优化,一阶模态频率显著提高 42.79%.最后,研究进一步扩展至晶圆传输机器人手的整体结构优化,特别对底座部分进行了针对性的设计改进,优化后的底座一阶与二阶模态频率分别提高 52.03% 和 30.55%.通过上述结构优化措施,晶圆传输机器人手的整体低阶模态得到实质性增强,从而改善了其运动控制性能,为晶圆传输机器人在实际作业环境中的稳定运作与高度可靠性奠定了坚实基础.本研究不仅丰富了晶圆传输设备的设计与优化理论,也为高精度半导体制造装备结构设计研发展开了新的视角.

中国地质大学(武汉)文国军等^[9]的《基于稳定域性能优化的精密温控回路自整定方法》研究了半导体装备精密温控系统的闭环控制回路控制器参数整定方法.首先,通过分析系统温控原理和对扰动的抑制作用建立闭环控制回路,并对关键部件进行模型辨识以建立系统的闭环传递函数.然后,根据系统的闭环传递函数,基于稳定边界轨迹法,推导回路控制器的稳定域范围.最后,提出了系统设定值追踪和扰动抑制性能的评价指标,并对稳定域进行网格划分,通过计算和比较网格点控制器参数对应的系统性能指标来确定最优控制器参数.上述研究成果一方面丰富了控制系统参数整定方法,另一方面也为半导体装备精密温控系统的串级控制回路控制器参数整定提供了思路.

湖北工业大学付佳倩等^[10]的《直线伺服系统位移跟踪误差的分析与迭代补偿》针对非线性摩擦力引起的电机位移跟踪误差量化不清晰、补偿设计困难的问题,提出一种基于误差相关系数更新的迭代前馈整定策略.首先,采用“黏滞摩擦+库仑摩擦”非线性摩擦力模型,分析直线伺服系统中电机位移跟踪误差产生机理,其次,建立电机非线性摩擦引起的位移跟踪误差到速度、加速度、库仑摩擦的映射关系,并通过迭代前馈整定方法有效补偿跟踪误差,最后,通过仿真和实验分析证明了基于误差相关系数进行迭代前馈整定的有效性.

桂林电子科技大学杜浩等^[11]的《反射式增量光栅尺位移测量系统研究》研究了半导体装备增量式光栅尺在采用反射式光栅光电信号转换、幅值细

分处理条件下的设计方案. 首先,研究了反射式光栅尺读数头光束与光栅平面的几何对应关系. 其次,建立了光斑位移与运动平台的光学仿真模型,分析表明可以通过对光斑的光电信号采集细分处理获得光栅平面的位移数据. 最后,设计了反射光栅光信号处理的位移测量实验平台,开展了反射式增量光栅尺测量系统原理验证实验. 通过对光栅反射光斑信号的光电信号检测,以及光电信号的幅值细分、误差补偿算法处理,实现了微米级精度的光栅尺位移测量. 上述研究成果一方面丰富了高精度微小位移的测量方案,另一方面也可以为基于反射式光栅的光栅尺测量系统设计提供新思路.

参考文献

- [1] 黄涛,于春运,陈宏枢,等. 集成电路制造装备运动系统 LPV 动力学建模与控制综述[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):5—17.
HUANG T, YU C Y, CHEN H S, et al. A review of LPV dynamic modeling and control for integrated circuit manufacturing equipment motion system [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):5—17.
- [2] 金煜,孙煜,于健博,等. 基于改进型 PSO 的 SINDy 建模应用:微动致动器[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):18—28.
JIN Y, SUN Y, YU J B, et al. SINDy modeling application based on improved PSO: micro-actuators [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):18—28.
- [3] 余少强,周海波,徐云浪,等. 伯努利晶圆传输机械手指的结构优化与吸附力研究[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):29—36.
YU S Q, ZHOU H B, XU Y L, et al. Research on structure optimization and adsorption force of bernoulli wafer transfer manipulator [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):29—36.
- [4] 高殿淳,黄嘉聪,吴锡鹏,等. 面向二维轨迹跟踪的精密运动台定量反馈交叉耦合控制方法[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):37—44.
GAO D C, HUANG J C, WU X P, et al. A quantitative feedback cross-coupling control method for precision motion stages oriented to two-dimensional trajectory tracking [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):37—44.
- [5] 张艺镔,张涛,李勇,等. 基于变论域模糊迭代学习的直线电机位置控制[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):45—53.
ZHANG Y Q, ZHANG T, LI Y, et al. Position control of pmlsm based on variable universe fuzzy iterative learning [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):45—53.
- [6] 王三霞,柳滨,张乾,等. 采用自抗扰控制的半导体加工设备主动隔振研究[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):54—60.
WANG S X, LIU B, ZHANG Q, et al. Research on simulation and experiment of active vibration isolation of semiconductor processing equipment [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):54—60.
- [7] 陈曦,张乾,肖楠,等. 基于加速度计前馈控制的主动抑振方法[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):61—69.
CHEN X, ZHANG Q, XIAO N, et al. Active vibration suppression method based on accelerometer feedforward control [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):61—69.
- [8] 李嘉俊,周海波,徐云浪,等. SCARA 型晶圆传输机器人结构设计与减振优化[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):70—78.
LI J J, ZHOU H B, XU Y L, et al. Structural design and vibration reduction optimization of SCARA wafer transfer robot hand [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):70—78.
- [9] 文国军,杨自强,董河. 基于稳定域性能优化的精密温控回路自整定方法[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):79—86.
WEN G J, YANG Z Q, DONG H. Precision temperature control loop self-tuning method based on stability region performance optimization [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):79—86.
- [10] 付佳倩,李珊瑚,胡俊宇. 直线伺服系统位移跟踪误差的分析与迭代补偿[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):87—95.
FU J Q, LI S H, HU J Y. Quantitative analysis and iterative compensation of the motor tracking error in linear motion systems [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):87—95.
- [11] 李昊文,杜浩,熊培元. 反射式增量光栅尺位移测量系统研究[J]. 动力学与控制学报,2024,22(12):96—102.
LI H W, DU H, XIONG P Y. Research on reflective incremental optical encoder displacement measurement system [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024,22(12):96—102.