

集成电路制造装备运动系统 LPV 动力学建模与控制综述^{*}

黄涛^{1,2} 于春运^{1,2} 陈宏枢³ 鲁森^{4†}

(1. 重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

(2. 重庆大学 高端装备机械传动全国重点实验室, 重庆 400044)

(3. 重庆大学 国家卓越工程师学院, 重庆 400044) (4. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘要 运动系统是实现集成电路制造装备高速、高精度、强稳定性运动的核心子系统。随着集成电路制造领域对性能与生产效率要求的不断提升,集成电路制造装备运动系统应具备极高的精度、迅速的响应能力,以及优异的稳定性和鲁棒性。而集成电路制造装备运动系统存在的多自由度和刚柔耦合特性、非线性和时变动力学特性、测量噪声和参数不确定性等问题,对集成电路制造装备运动系统动力学建模与控制带来严峻挑战。线性变参数(Linear Parameter-Varying, LPV)理论为上述问题的解决提供了新方案。本文首先简要概述集成电路制造装备运动系统及其建模与控制问题,其次从建模、辨识、控制三个方面综述集成电路制造装备运动系统 LPV 建模与控制方法及其应用,最后对集成电路制造装备动力学建模与控制研究进行总结与展望。

关键词 集成电路制造装备, 高精度运动系统, 线性变参数, 动力学建模, 运动控制

中图分类号: TP13

文献标志码: A

A Review of LPV Dynamic Modeling and Control for Integrated Circuit Manufacturing Equipment Motion System^{*}

Huang Tao^{1,2} Yu Chunyun^{1,2} Chen Hongshu³ Lu Sen^{4†}

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

(2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(3. National Elite Institute of Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(4. Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Motion system is the core subsystem of integrated circuit (IC) manufacturing equipment for achieving high-speed, high-precision, and strong stability. With increasing performance and production efficiency requirements of IC manufacturing, the motion system of IC manufacturing equipment should have extremely high precision, high response speed, as well as strong excellent robustness and stability. However, its dynamic modeling and control was seriously challenged by the multi-degree-of-freedom and rigid-flexible coupling characteristics, nonlinear and time-varying dynamic characteristics, measurement noise, and parameter uncertainty. The linear parameter-varying (LPV) theory provides a new solution approach to the above problems, this paper briefly surveys the motion system of IC manufacturing e-

2024-10-19 收到第 1 稿, 2024-11-04 收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52475510, 52105578), 中央高校基本科研业务费资助项目(2023CDJKYJH035), National Natural Science Foundation of China (52475510, 52105578), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023CDJKYJH035)。

[†] 通信作者 E-mail: lusenxyz@tsinghua.edu.cn

quipment and its modeling and control problems. Secondly, it reviews the LPV modeling and control methods of the motion system of IC manufacturing equipment from the three aspects of modeling, identification, and control. Finally, it summarizes and prospects the research on dynamic modeling and control of IC manufacturing equipment motion system.

Key words integrated circuit manufacturing equipment, high-precision motion system, linear parameter-varying, dynamic modeling, motion control

引言

集成电路产业是现代工业文明的“大脑”，是引领新一轮科技革命和产业变革的关键力量，是衡量国家综合实力的重要指标。集成电路制造装备作为集成电路产业的基础与核心，推动了信息技术、人工智能、5G 通信、自动驾驶等前沿领域的高速发展。高精度运动系统是集成电路制造装备的核心子系统，其性能直接决定了集成电路器件的生产效率和精度，其难度不断挑战人类技术极限，密切关系到国家的经济、国防安全和科技自主性。特别是精密/超精密运动系统的动力学建模与控制领域核心技术对于科技进步、国民经济、国家安全具有极为重要的战略意义，但由于该技术的重要性和特殊性，发达国家长期对我国实行技术封锁，使其成为一项我国亟待解决的“卡脖子”技术问题。

实际工况下，集成电路制造装备运动系统要求满足苛刻的精度、响应速度、鲁棒性、稳定性等关键性能指标。但面临机械振动、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、刚柔耦合等共性基础问题的严峻挑战。传统建模与控制方案往往针对单一或某几个问题，难以同时解决上述所有问题，长期缺乏解决上述问题的统一理论与技术框架。LPV 系统具有将非线性和时变系统描述为依赖于一组可变参数的线性模型的优势，这使其在集成电路制造装备的动力学建模与控制中展现出巨大的潜力。LPV 理论与技术框架能够在保持系统性能的同时，灵活应对系统的动态变化，从而提升制造设备的精度、稳定性和响应速度。因此，基于 LPV 理论与技术的动力学建模与控制方法逐渐成为研究热点^[1-3]。

故本文简述了集成电路制造装备运动系统及其动力学建模与控制问题。在此基础上，全面梳理和概述了近年来集成电路制造装备运动系统 LPV

动力学建模、辨识与控制的研究现状，并总结了其未来发展方向。

具体地，在 LPV 动力学建模方面，根据系统调度变量空间的不同描述方式，综述网格型(Grid Representation)、多胞体型(Polytope Representation)、仿射参数型(Affine Parameter Representation)、线性分式变换型(Linear Fractional Transformation, LFT)四种构型的 LPV 模型。在 LPV 系统辨识与参数估计方面，按辨识方法的不同，综述局部辨识、全局辨识和在线辨识三种 LPV 系统辨识与参数估计方法及研究现状。在 LPV 综合控制策略方面，综述基于网格型、多胞体型和 LFT 的三种 LPV 控制方法及其在集成电路制造装备运动系统的应用。

综上所述，本文简述了集成电路制造装备运动系统，及其建模与控制领域存在的挑战与问题，从而引出 LPV 建模与控制新方案。全面梳理和总结了 LPV 动力学建模、辨识、控制与应用方面的研究现状。同时，通过分析比较国内外在此领域的研究成果和进展，初步探讨了 LPV 建模与控制的未来发展方向，旨在为后续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。

1 集成电路制造装备运动系统

高精度运动系统是集成电路制造装备核心子系统，其性能直接影响装备整机精度、效率和可靠性等关键技术指标，如图 1 所示。动力学建模与运动控制技术是高精度运动系统的关键基础技术，属于世界科技研究前沿，在集成电路制造领域具有核心关键作用^[4-6]。

1.1 集成电路制造装备运动系统简介

集成电路制造装备普遍采用压电驱动柔性铰链机构^[7]、滚珠丝杠^[8]、直线电机^[9]、平面电机^[10]

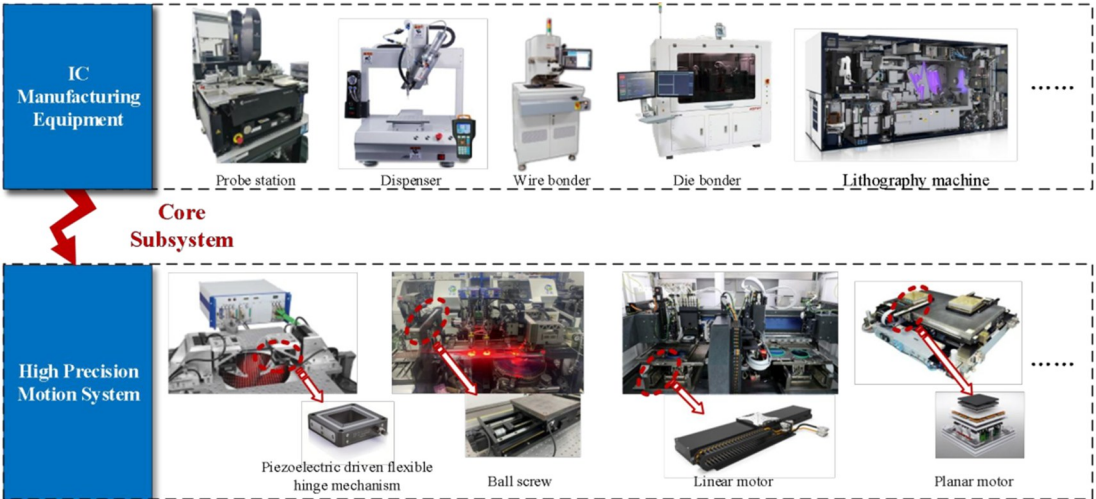


图 1 典型集成电路制造装备及其高精度运动系统
Fig. 1 Typical IC manufacturing equipment and its high-precision motion system

等运动系统实现高精度定位和伺服运动,如小行程运动台常采用压电陶瓷为驱动元件,通过压电效应,压电材料在电压作用下产生形变,进而驱动柔性铰链实现微小角度或线性位移^[11]。其特点包括分辨率高、响应快、无机械摩擦和体积小,适用于精密操作和纳米级运动控制。压电驱动柔性铰链机构广泛应用于对准系统、微操作平台和硅片检测等集成电路制造装备^[12,13],能够提供极高的运动精度和稳定性。滚珠丝杠是一种将旋转运动转换为直线运动的机械传动装置,依靠滚动摩擦代替滑动摩擦,实现高效、平稳的传动。其特点包括结构简单、精度高、寿命长等,适用于需要大行程微米级精度运动控制的应用场合^[14]。滚珠丝杠广泛用于硅片处理、封装、精密装配等集成电路制造装备^[15,16],能够提供微米级精度的直线运动和稳定的重复定位性能。直线电机是一种将电能直接转化为直线运动机械能的机电装置,省去传统旋转电机的机械传动装置。直线电机具有高加速度、高精度、无机械摩擦磨损、响应速度快等特点^[17],适用于要求高动态性能的应用场景^[18],广泛应用于硅片传送、焊线、点胶、固晶、检测等集成电路制造装备^[19-22],能够提供高精度的直线运动控制。平面电机是一种能够在二维平面上实现自由运动的机电装置,利用电磁感应原理,将电能转换为动子在 X - Y 平面内的平面运动的机械能^[23]。与传统电机不同,它无机械传动部件,减少了摩擦和磨损^[24]。平面电机的特点包括多自由度运动、高精度、无摩擦、响应速度快,广泛应用于光刻机、硅片传送、检测等集成电路设备^[11,25,26],特别适合用于高精度、高速度的定位任务。

总之,集成电路制造装备的压电驱动柔性铰链机构、滚珠丝杠、直线电机、平面电机等运动系统是实现集成电路制造过程高精度定位和伺服运动的基础机械载体。

1.2 集成电路制造装备运动系统建模与控制问题

上述集成电路制造装备运动系统要求具备高精度、高动态、强鲁棒性和稳定性,但其机械结构特点和工作原理,决定了其普遍存在非线性、时变、耦合等特性,导致机械振动、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^[27-38],降低了高精度运动系统精度及稳定性,限制了系统响应速度,影响了设备的可靠性与预期寿命,是集成电路制造装备运动系统领域亟待解决的共性基础问题,如图 2 所示。

针对以上集成电路制造装备运动系统的共性问题,由于过去缺乏对科学问题和技术问题的综合分析凝练,方法论上通常采用单一分离的解决方案,缺乏统一的解决框架体系。但实际工况下,集成电路装备运动系统的精度、响应速度、鲁棒性、稳定性总是被上述共性问题耦合影响,单一的解决方法往往难以在实际工程中取得良好效果。传统的高精度动力学建模方法,如牛顿-欧拉法、拉格朗日法、凯恩法、旋量理论在解决上述共性基础问题时,存在计算复杂、效率低、准确性低、模型维度高等缺点。特别是针对高精度动力学系统建模中的不确定性或模型误差问题,如外部扰动、参数变化、非线性因素、不确定性因素等均需处理为参数摄动、模型摄动、混合摄动。但系统的鲁棒性和性能是一对矛

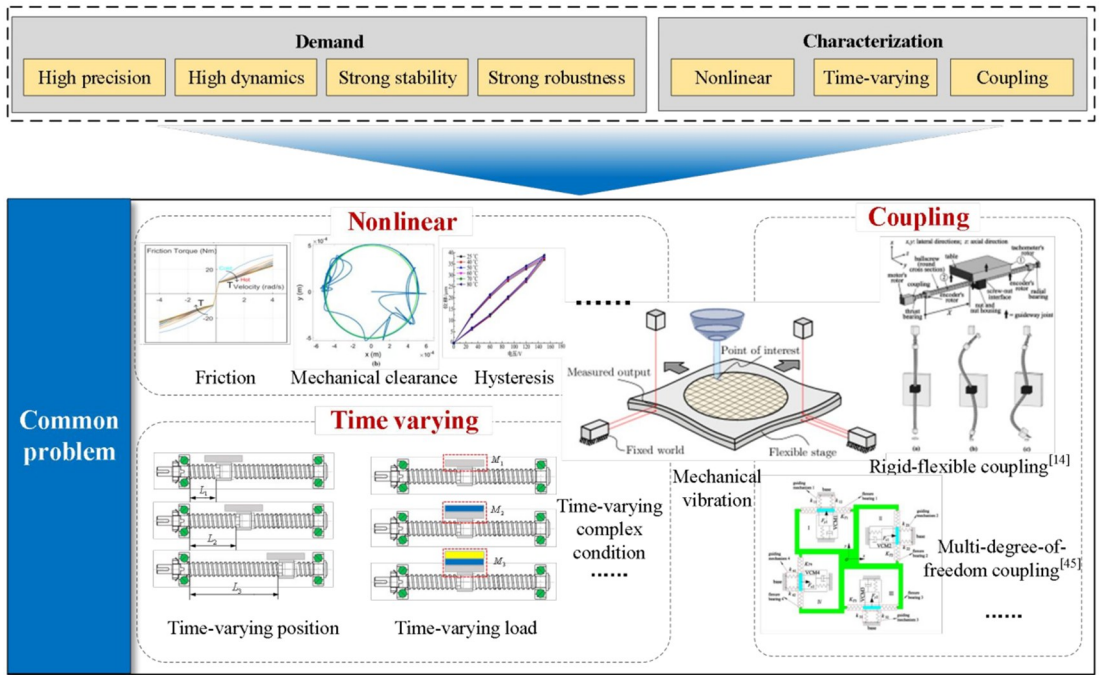


图2 集成电路制造装备运动系统的共性问题

Fig. 2 Common problems of motion system for IC manufacturing equipment

盾的关系,为了保证闭环系统的鲁棒性,集成电路制造装备运动系统的控制性能提升通常会受到限制。

1.3 集成电路制造装备运动系统 LPV 建模与控制新方法

为了解决上述集成电路制造装备运动系统共性基础问题,研究经历了线性时不变(Linear Time Invariant, LTI)模型^[39, 40]—线性时变(Linear Time Varying, LTV)模型—线性变参数模型^[1]的递进式发展过程。LPV方法的核心在于LPV模型参数随工况(可用调度变量表示)变化,从而可精确描述时变特性;以有限维线性数学表达式,在局部小范围近似系统非线性特性;同时适用于多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)模型结构,描述系统内部复杂的耦合动力学关系。因此可同时解决实际工况多问题复合情形提供统一的系统框架,提高模型准确性,降低建模与控制的保守性,提升控制性能,有效解决非线性、时变、耦合的多特性复合高精度建模与控制,实现高精度运动控制系统高精度、快响应、强鲁棒性与强稳定性的综合性能。

因此,第2~4节将分别综述LPV方法在集成电路制造装备运动系统动力学建模、系统辨识与参数估计、综合控制策略方面的研究与应用。

2 LPV 动力学建模

由于集成电路制造装备运动系统存在非线性特性、参数摄动、刚柔耦合动力学特性等因素,导致高精度运动系统精确建模困难。LPV模型为解决上述问题提供了一种新的解决思路,20世纪90年代,Shamma和Athans首次提出了LPV模型^[41],其状态空间模型标准表达形式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}[\boldsymbol{\rho}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}[\boldsymbol{\rho}(t)]\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}[\boldsymbol{\rho}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}[\boldsymbol{\rho}(t)]\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量, $\mathbf{y}(t)$ 为输出向量, $\mathbf{u}(t)$ 为输入向量, $\mathbf{A}[\boldsymbol{\rho}(t)]$ 、 $\mathbf{B}[\boldsymbol{\rho}(t)]$ 、 $\mathbf{C}[\boldsymbol{\rho}(t)]$ 、 $\mathbf{D}[\boldsymbol{\rho}(t)]$ 分别为系统的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵和传递矩阵。此模型具有简单的线性结构,特别适合系统参数与工况(如位置、负载、温度等)相关的系统。其参数表达为可测或可计算时变信号的函数,该时变信号被称为调度变量 $\boldsymbol{\rho}(t)$ (Scheduling Variables),是一个反映工况的参数向量,可精确描述时变特性和近似描述非线性特性^[42]。

LPV模型能够适应时变非线性系统,根据系统动态的复杂性和建模方法的不同,为了在精度、计算复杂度以及控制设计之间找到平衡点,LPV模型发展出多种不同的构型,以适应系统的特性以及控制需求。具体地,LPV模型可以根据系统的调

度参数空间的不同描述方式分为网格型、多胞体型、仿射参数型、线性分式变换型四种构型,如图 3 所示。

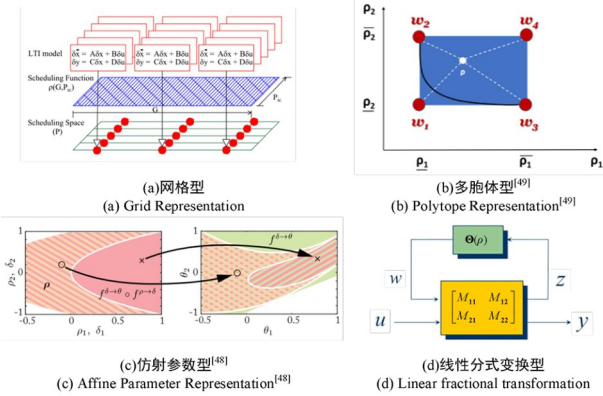


图 3 LPV 动力学模型构型

Fig. 3 LPV dynamic model configuration

2.1 网格型模型

网格型模型将参数空间划分为离散的网格点,在每个网格点上建立一个局部的线性模型。具体地,不同工况条件表达为一个随时间变化的参数空间 $\boldsymbol{p}(t)$,可离散化为 n 个网格点 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$,如图 3(a)所示,第 i 个网格点的局部 LTI 状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}(\rho_i)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}(\rho_i)\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}(\rho_i)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}(\rho_i)\boldsymbol{u}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{A}(\rho_i)$ 、 $\boldsymbol{B}(\rho_i)$ 、 $\boldsymbol{C}(\rho_i)$ 、 $\boldsymbol{D}(\rho_i)$ 分别为系统在网格点 i 的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵和传递矩阵。网格点调度变量 ρ_i 与局部 LTI 模型集合一一对应^[43],得到系统在每个局部工况下的 LTI 模型,在网格点之间的区域,采用插值方法(如线性插值、多项式插值等)或逼近方法来获得参数空间 $\boldsymbol{p}(t)$ 中任意点的模型^[44]。如 Lu 等建立了考虑微动台交叉轴应力刚化效应的网格型变参数动力学模型^[45];Hans 等通过建立了 EUV 光刻机硅片台与位置相关的网格型 LPV 模型,补偿了柔性动力学特性,提升了模型精度^[3];Capat 建立了 EUV 光刻机可调反射镜运动系统的网格型 LPV 模型,精确反映了位置相关的动态特性^[46];Shi 等建立了超声波电机中压电陶瓷温度相关的网格型 LPV 模型,很好地表示了压电陶瓷非线性温度依赖性^[47]。

然而,当参数空间维度较高时,网格点数量会呈指数增长,导致模型复杂度增加,尤其是在高维系统中,网格划分的数量和插值计算非常复杂。由

于网格型 LPV 模型计算量随网格划分呈几何倍数增加,因此不适用于调度变量数量较多,和模型精度要求较高的情况。

2.2 多胞体模型

多胞体 LPV 模型表达形式为调度变量取值范围 $(\rho_i) \leq \rho_i \leq \bar{\rho}_i$ 顶点映射的凸函数,其中多胞体具有 $n = 2^k$ 个顶点, k 为可测量调度变量个数,每个顶点所围成的区域为一个凸集^[48, 49],式(1)所示 LPV 模型的多胞体表达形式为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{C} & \boldsymbol{D} \end{bmatrix} \in \text{Co} \{ \omega_1, \dots, \omega_n \} : \quad (3)$$

$$= \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i \omega_i \mid \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \right\}$$

式中, $\omega_1, \dots, \omega_n$ 是多胞体模型的顶点, Co 表示 $\omega_1, \dots, \omega_n$ 的凸胞集合, ω_i 是凸胞中的任一顶点系统,矩阵 $\omega_i := \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_i & \boldsymbol{B}_i \\ \boldsymbol{C}_i & \boldsymbol{D}_i \end{bmatrix}$ 。如图 3(b)中的 2 个调度变量,其对应的四个顶点分别为

$$\begin{cases} \omega_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}(\rho_1, \rho_2) & \boldsymbol{B}(\rho_1, \rho_2) \\ \boldsymbol{C}(\rho_1, \rho_2) & \boldsymbol{D}(\rho_1, \rho_2) \end{bmatrix} \\ \omega_2 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}(\rho_1, \bar{\rho}_2) & \boldsymbol{B}(\rho_1, \bar{\rho}_2) \\ \boldsymbol{C}(\rho_1, \bar{\rho}_2) & \boldsymbol{D}(\rho_1, \bar{\rho}_2) \end{bmatrix} \\ \dots \\ \omega_4 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2) & \boldsymbol{B}(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2) \\ \boldsymbol{C}(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2) & \boldsymbol{D}(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

2.3 仿射参数模型

LPV 仿射参数模型参数与调度变量之间是仿射函数关系^[50],式(1)所示 LPV 模型的仿射参数 LPV 模型形式为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{S} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}(\rho) & \boldsymbol{B}(\rho) \\ \boldsymbol{C}(\rho) & \boldsymbol{D}(\rho) \end{bmatrix} = \boldsymbol{S}_0 + \sum_{i=1}^n p_i \boldsymbol{S}_i, \\ \boldsymbol{S}_i &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_i & \boldsymbol{B}_i \\ \boldsymbol{C}_i & \boldsymbol{D}_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $p_i = p_i[\boldsymbol{p}(t)]$ 是调度参数 $\boldsymbol{p} = [\rho_1, \dots, \rho_k]^T$ 的仿射参数函数,将其提出可得到 $\boldsymbol{S}_0$ 与 $\boldsymbol{S}_i$, $\boldsymbol{S}_0$ 为仿射参数为零时的常值系统矩阵, $\boldsymbol{S}_i$ 为第 i 个仿射参数 p_i 对应的常值系统矩阵。调度参数 $\boldsymbol{p}$ 反映系

统的位置、负载或速度等工况, p_i 随 $\mathbf{p}$ 变化, LPV 仿射参数模型的系统矩阵 $\mathbf{S}$ 随着参数 p_i 的变化进行线性变化, 使得系统动态模型始终贴合实际系统的行为。

仿射参数模型可以转化为多胞体模型^[51,52], 多胞体 LPV 模型的 n 个顶点系统 $\omega_1, \dots, \omega_n$ 与仿射参数依赖模型的 n 个动态系统矩阵 $\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_n$ 映射关系为

$$\begin{cases} \omega_1 = \mathbf{S}_0 + \underline{\rho}_1 \mathbf{S}_1 + \underline{\rho}_2 \mathbf{S}_2 + \dots + \underline{\rho}_n \mathbf{S}_n \\ \omega_2 = \mathbf{S}_0 + \underline{\rho}_1 \mathbf{S}_1 + \underline{\rho}_2 \mathbf{S}_2 + \dots + \underline{\rho}_n \mathbf{S}_n \\ \dots \\ \omega_n = \mathbf{S}_0 + \bar{\rho}_1 \mathbf{S}_1 + \bar{\rho}_2 \mathbf{S}_2 + \dots + \bar{\rho}_n \mathbf{S}_n \end{cases} \quad (6)$$

综上所述, 多胞体模型、仿射参数模型可以相互转化, 模型形式也相对简单, 得到了广泛应用, 如 Zhang 等建立了音圈电机驱动的高精度 X-Y 平台多胞体 LPV 模型^[53]; Narita 选取转子角速度作为调度变量, 建立了磁悬浮轴承的多胞体 LPV 模型^[54]; Deng 等建立了滚珠丝杠传动系统的仿射参数 LPV 模型, 并将其转换为多胞体模型, 反映了与位置、负载相关的变动力学特性^[55]; Kramar 建立了感应电机的仿射参数 LPV 模型, 并将其转换为多胞体模型, 反映了转速的非线性^[56]。但是由于要求模型参数与调度变量符合凸集的凸函数映射关系, 导致不是所有的系统都可以被这两种模型所表示, 其应用场景较为局限。

2.4 线性分式变换模型

线性分式变换模型是继传递函数和状态空间表达式之后一种新的模型描述。John Doyle、Packard、周克敏等著名学者认为 LFT 的采用的是后现代控制理论的重要标志^[57], LFT 形式的 LPV 模型表示为 LTI 系统模型 $\mathbf{M}$ 与对角调度变量矩阵 Θ 互连的系统^[58], 如图 3(d) 所示, 其表达式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{F}_u(\mathbf{M}, \Theta) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}_u(\mathbf{M}, \Theta) := \mathbf{M}_{22} + \mathbf{M}_{21} \Theta (\mathbf{I} - \mathbf{M}_{11} \Theta)^{-1} \mathbf{M}_{12} \end{cases} \quad (7)$$

式中, u 与 y 为系统的输入输出, $\mathbf{M}$ 为 LTI 模型, Θ 为调度变量构成的对角矩阵, 反映调度变量如何影响系统的动态特性, $\Theta = \text{diag}\{\theta_1 \mathbf{I}_{r_1}, \dots, \theta_k \mathbf{I}_{r_k}\}$, w 和 z 为 Θ 的输入和输出。式(7)将可测量调度变

量通过 LFT 方法“拉出”, 从而将整体 LPV 模型变为 LTI 模型 $\mathbf{M}$ 和对角化可测量参数矩阵 Θ 的 LFT 表达^[59]。

线性分式变换模型建模的数学推导和对应的控制分析困难, 但由于其计算量小、适应性广等优点, 对时变非线性刚柔耦合 LPV 系统的集成电路制造装备高精度运动系统动力学建模具有重大研究价值。如黄涛等针对具有柔性结构的 MIMO 硅片台振动不确定性问题, 提出了一种 LFT 结构不确定性状态空间建模方法^[60]; Wassink 等选取位置为调度变量, 建立了硅片扫描仪 LFT-LPV 模型^[1]; 朱煜等建立了光刻机工件台与位置相关的最小结构不确定性的 LFT 模型表示^[2]。

3 LPV 系统辨识与参数估计

真实工况集成电路制造装备运动系统具有时变、非线性、刚柔耦合等动态行为和特性, 精确辨识 LPV 模型存在计算复杂度高、难以兼顾计算速度与精度、测量噪声导致的 Cramer-Rao 下界等巨大挑战。按辨识方法的不同, LPV 系统辨识与参数估计方法可分为局部辨识、全局辨识及在线辨识^[61], 如图 4 所示。

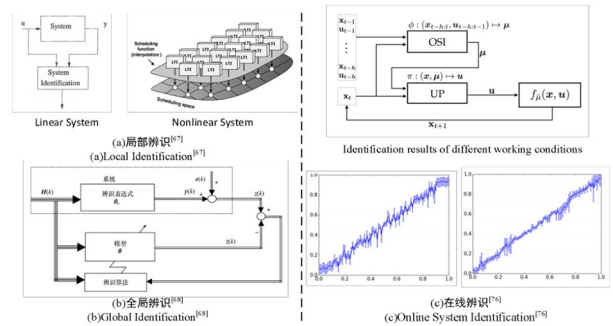


图 4 LPV 动力学模型系统辨识与参数估计方法
Fig. 4 System identification and parameter estimation method of LPV dynamics model

3.1 LPV 系统局部辨识

LPV 系统局部辨识先在不同特定工作点/网格点 p_i 进行辨识获取系统的局部 LTI 模型集, 再由不同工作点处 LTI 模型插值得到最终 LPV 模型^[62], 如图 4(a) 所示。特别是近年来, 局部辨识方法突破了线性模型构型制约, 采用非线性优化算法, 提高了辨识的准确性。如 Ebrahimkhani 等提出了围绕时变轨迹的 LPV 近似值来识别一类非线性系统的辨识方法^[63]; Turk 等提出了一种新的非线性

性最小二乘 LPV 系统辨识方法,用于工业滚珠丝杠副的辨识^[64];Annemiek 等提出了单输入单输出开环 LPV 系统非参数辨识的局部有理方法^[65];Fin 等通过结合调度变量、系统可能操作的操作点数量、围绕其对应操作点识别的每个局部模型的模型顺序等过程信息,识别出非线性过程的 LPV 模型^[66]。

局部辨识方法获得的模型精度与局部工作点位置及数量的选取有极大关系。局部工作点的选取依赖于工程经验,大量的局部工作点对应大量重复的辨识实验,降低了辨识的效率。更严重的是局部辨识方法受到在固定工作点静态辨识的限制,缺失了对系统的部分动态特性。

3.2 LPV 系统全局辨识

LPV 系统全局辨识在整个工作空间/参数空间 $\rho(t)$ 内进行辨识,即利用系统在不同工作条件下的实验数据来确定系统的 LPV 数学模型,如图 4(b)所示。与局部辨识不同,全局辨识只需要在工作空间内 $\rho(t)$ 连续变化过程中持续施加激励,就可以根据调度变量连续变化的数据和系统的输入-输出数据,仅经过一次辨识就可得到 LPV 系统模型^[62,67,68]。如 Bamieh 等推导了持续激励条件下多项式依赖 LPV 模型参数估计算法^[69];BAO 等提出基于贝叶斯神经网络的状态空间 LPV 模型辨识方法^[70];蔡宇等针对调度变量连续变化的 LPV 振动系统,提出基于调度变量数据和系统的激励响应数据的全局 LPV 系统辨识方法^[71];刘鑫等提出了一种鲁棒全局辨识策略,引入粒子滤波器递归逼近获得 LPV 全局模型^[72]。

全局辨识方法在理论分析与计算上比局部辨识方法更加困难,但该方法效率较高,可通过单次辨识获取系统总体动态特性,获得高精度 LPV 全局模型。

3.3 LPV 系统在线辨识

上述离线局部/全局系统辨识没有时间的限制,主要考虑辨识精度的问题。为实现实时自适应控制策略,需要在运行过程中根据新的数据实时地调整时变参数,即需要满足在线系统辨识(Online System Identification, OSI),如图 4(c)所示。经典在线系统辨识有递归最小二乘法、极大似然估计等,或基于模型的预测法,如卡尔曼滤波器等^[73-75]。

同时人工智能技术的发展提升了在线辨识的收敛速度和辨识精度,如 Yu 等提出了基于深度学习的在线辨识算法^[76];杜其通等提出了神经网络粒子群在线辨识算法^[77]。但在线辨识计算速度与计算精度相互矛盾,工程应用困难,特别是变位置/速度/负载的 LPV 模型在线辨识方法(或参数估计)还有待进一步研究。

在线辨识可实现无法测量的时变调度参量在线递推估计,并设计在线观测器为 LPV 变增益控制奠定基础。因此,LPV 系统在线辨识具有很高的研究和应用价值。

4 LPV 综合控制策略

集成电路制造装备运动系统存在非线性特性、时变特性、耦合等特性。传统控制策略将上述特性描述为不确定性,导致控制器设计存在保守性。LPV 综合控制方法突破了不确定性建模+鲁棒控制的保守性,在保证系统鲁棒性与稳定性的前提下同时提升了系统的动态性能与精度。LPV 控制方法可分为基于网格的 LPV 控制、基于多胞体的 LPV 控制和基于 LFT 的 LPV 控制^[48],其控制原理如图 5 所示。

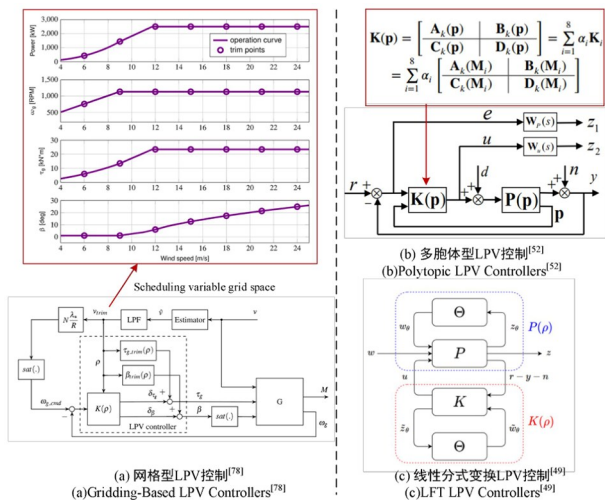


图 5 LPV 综合控制方法
Fig. 5 LPV comprehensive control method

4.1 网格型 LPV 控制

网格型 LPV 控制是一种基于网格型 LPV 模型的控制方法^[78]。首先,调度变量空间可划分为网格,网格点可以均匀分布,也可以在系统动态变化较为剧烈或对控制性能要求较高的区域根据需要增加额外点,以提高局部的精度。针对网格点的局

部 LTI 模型设计对应调度参数工作点 ρ_i 的最优鲁棒控制器. 其次, 通过局部控制器的插值或切换, 实现全局工作空间的调度参数变增益控制, 最终得到一个随调度变量 $\rho(t)$ 连续变化的全局控制器, 并确保全局稳定性. 如 Chen 针对光刻机快速转向镜运动系统每个局部 LTI 模型设计对应线性控制器, 并基于奇异值分解(SVD)的插值方法构造全局 LPV 控制器^[79]; 赵川等建立了磁悬浮平面电机的网格型 LPV 模型, 通过查表法设计控制器使其具有较好的抗偏载性能^[80]; Broens 等建立了位置相关的平面电机 LPV 模型, 设计了网格型顺序闭环 LPV 控制器, 提高了平面电机的跟踪精度^[81].

网格型 LPV 控制适用性较广, 无需依赖多胞体或 LFT 表示, 且由于网格划分不受限于凸形区域, 因此可以灵活地将非线性元素纳入控制设计. 但该方法网格点数量随着维度的增加呈指数增长, 需要大量存储空间, 因此仅适用于少调度变量的情况.

4.2 多胞体 LPV 控制

基于多胞体的 LPV 控制是在调度变量空间中, 将系统参数视为在一个多胞体内变化, 并在该多胞体的每个顶点处设计控制器. 系统在整个调度变量空间内的行为通过这些顶点的凸组合来表示和控制. 这种方法的关键是利用多胞体的凸性, 在全局工况下确保鲁棒控制器的性能. 由于多胞体 LPV 模型调度参数集属于一个多顶点凸集, 调度变量空间 LPV 系统控制器设计问题通常转化为求解凸胞顶点的一组线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)^[82]. 即整个 LPV 系统的分析可以转化为对这些顶点的分析, 将求解无穷多个 LMI 的问题简化为求解有限顶点的 LMI 问题^[83-85]. 但顶点个数随着参数的数量呈指数增长, 因此其工程适用性限制为在几个调度参数的情况. 如黄涛等建立了滚珠丝杠传动系统的多胞体 LPV 模型, 并设计了对应增益调度 H_∞ 控制器, 提升了轨迹跟踪精度和控制系统鲁棒性^[52]. Butcher 建立了直线永磁同步电机系统多胞体 LPV 模型, 采用迭代学习控制提高轨迹跟踪精度^[86].

基于多胞体的 LPV 控制适用于多胞体或仿射参数依赖形式的 LPV 模型. 但不是所有 LPV 系统都能表达为这两种形式, 对不能表达为多胞体的 LPV 系统, 多胞体的 LPV 控制不适用.

4.3 线性分式变换 LPV 控制

线性分式变换 LPV 控制通过 LFT 方法将调度变量“拉出”, 得到对角结构化参数矩阵, 类似于结构奇异值 μ 分析与综合方法, 从而将问题转化为标准鲁棒控制器设计问题^[87]. 特别是当调度变量集为空时, 控制器求解退化为基于 LFT 的 μ 分析与综合问题. LFT-LPV 控制器综合主要依赖于基于 LMI 的 S 过程优化问题求解^[88]. 因为不再需要针对一组参数值求解一组 LMI, LFT-LPV 控制器综合所需 LMI 维数通常小于多胞体方法中的 LMI 维数. 如 Wassink 等建立了光刻机硅片台的位置依赖 LFT-LPV 控制器, 提高了位置跟踪性能^[1]; Broens 等使用了一种依赖响应数据的 LFT-LPV MIMO 控制器, 增强了平面电机的轨迹跟踪性能与鲁棒性^[89].

综上所述, LFT-LPV 综合控制方法与结构奇异值 μ 分析与综合控制方法具有相似 LFT 结构, 结构化了调度参数矩阵与不确定性参数矩阵. 一方面调度参数描述了过去只能用不确定性描述的非线性特性、时变特性、耦合特性, 降低了系统的保守性, 另一方面仍然保留了对外部扰动和系统不确定性的结构化描述, 保证了系统的鲁棒性. 并基于 LMI 理论、多目标优化、调度参数约束及结构奇异值 μ 分析与综合方法联立求解控制器, 可获取全局最优解.

5 总结与展望

集成电路制造装备运动系统存在机械振动、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, 使得集成电路制造装备稳定高性能控制面临严峻挑战. 线性变参数(LPV)动力学建模与控制方法为上述问题的解决提供了一种新方案. 本文综述了 LPV 方法在集成电路制造装备运动系统动力学建模、系统辨识与参数估计、综合控制策略的研究与应用. 未来 LPV 技术在集成电路制造装备的建模方面, 面向不断提升的模型精度需求, 需要对高精度运动系统的非线性、时变、耦合、不确定性、外部扰动等复杂特性综合建模, 提升模型的精度与计算效率. 在控制方面, 面向不断提升的运动系统精度、响应速度、稳定性、鲁棒性等控制性能需求, 需要进一步研究 LPV 控

制方法,实现 MIMO 鲁棒稳定高性能的综合控制。总之,LPV 建模与控制对于突破集成电路制造装备高性能发展的“卡脖子”问题具有重大研究价值。

参考文献

- [1] GROOT WASSINK M, 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.
- [2] YANG J, YIN W S, ZHU Y, et al. Structured uncertainty modeling of position-dependent model variations for an ultra-precision stage [C]//2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). New York: IEEE, 2012.
- [3] BROENS Y, BUTLER H, KAMIDI R, et al. Active compensation of position dependent flexible dynamics in high-precision mechatronics [EB/OL]. 2024: arXiv: 2408.03642. <http://arxiv.org/abs/2408.03642>.
- [4] 杨叔子,丁汉,李斌. 高端制造装备关键技术的科学问题[J]. *机械制造与自动化*, 2011, 40(1): 1–5.
- YANG S Z, DING H, LI B. Scientific problems originated from key techniques of advanced manufacturing equipments [J]. *Machine Building & Automation*, 2011, 40(1): 1–5. (in Chinese)
- [5] 胡楚雄,周冉,付宏,等. 集成电路装备光刻机发展前沿与未来挑战[J]. *中国科学:信息科学*, 2024, 54(1): 130–143.
- HU C X, ZHOU R, FU H, et al. Development frontier and future challenges of lithography machines for integrated circuit manufacturing [J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2024, 54(1): 130–143. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006–2020) [R/OL]. (2006-02-09) [2024-10-19]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm.
- [7] MOHITH S, UPADHYA A R, NAVIN K P, et al. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review [J]. *Smart Material Structures*, 2021, 30(1): 013002.
- [8] PAHK H J, LEE D S, PARK J H. Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(1): 51–63.
- [9] LEE M G, KIM K, GWEON D-G. Novel linear motor for high precision stage of semiconductor lithography system [C]//Proceedings of the ASPE 2002 Annual Meeting. [S.l.: s.n.], 2002.
- [10] ZHU Y, HU C X, HU J C, et al. Accuracy-and simplicity-oriented self-calibration approach for two-dimensional precision stages [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(6): 2264–2272.
- [11] 姜龙滨,丁润泽,丁晨阳,等. 光刻机运动台控制方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922003.
- JIANG L B, DING R Z, DING C Y, et al. Research progress on stage control methods for a lithography machine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922003. (in Chinese)
- [12] ROBICHAUD A, DESLANDES D, CICEK P V, et al. A system in package based on a piezoelectric micro-machined ultrasonic transducer matrix for ranging applications [J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2590.
- [13] 隆志力,吴运新,韩雷,等. 热超声键合换能系统阻抗/导纳模型[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 14–19.
- LONG Z L, WU Y X, HAN L, et al. Impedance/admittance model of ultrasonic transducer system in thermosonic bonding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 14–19. (in Chinese)
- [14] HUANG T, KANG Y T, DU S J, et al. A survey of modeling and control in ball screw feed-drive system [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(5): 2923–2946.
- [15] BECKERT E, HOFFMANN A, SAFFERT E. Development of a vertical wafer stage for high-vacuum applications [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57: 207–212.
- [16] MATSUBARA A, FUJITA T, KONO D, et al. Nano-positioning drive with piezoelectric actuator integrated into support bearing unit of ball screw [C]//Proceedings of the 35th International MATADOR Conference. London: Springer London, 2007: 323–326.
- [17] SUN G H, WU L G, KUANG Z A, et al. Practical tracking control of linear motor via fractional-order

- sliding mode [J]. *Automatica*, 2018, 94: 221—235.
- [18] SHAO K, ZHENG J C, WANG H, et al. Tracking control of a linear motor positioner based on barrier function adaptive sliding mode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(11): 7479—7488.
- [19] LI J, LIU Y J, SUN L N, et al. Mechanism and control of linear positioning for IC wire bonders [C]//2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology. New York: IEEE, 2005.
- [20] JIE D G, SUN L N, LIU Y J, et al. Design and simulation of a macro-micro dual-drive high acceleration precision XY-stage for IC bonding technology [C]//2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology. New York: IEEE, 2005.
- [21] ZHANG L Y, GAO J, CHEN Y, et al. A high-efficiency searching time reduction method for VCM soft-landing operation during chip bonding [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(9): 9215—9226.
- [22] 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/OL]. *动力学与控制学报*, 2024:1—7[2024-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1409.O3.20241023.1432.002.html>. DOI:10.6052/1672-6553-2024-096.
- LI H W, DU H, XIONG P Y. Study on the displacement measurement system of reflective incremental scale [J/OL]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024: 1—7[2024-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1409.O3.20241023.1432.002.html>. DOI: 10.6052/1672-6553-2024-096. (in Chinese)
- [23] JANSSEN J W, SMEETS J P C, OVERBOOM T T, et al. Overview of analytical models for the design of linear and planar motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(11): 8206207.
- [24] WANG R L, ZHANG L, YANG K. Overview of the development of planar motor technology [J]. *Energies*, 2024, 17(16): 3955.
- [25] GUO L, ZHANG H, GALEA M, et al. Multiobjective optimization of a magnetically levitated planar motor with multilayer windings [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3522—3532.
- [26] 伍强, 李艳丽, 刘显和. 现代光刻机的发展历程与未来展望[J]. *微纳电子与智能制造*, 2022, 4(1): 30—56.
- [27] 李恒, 朱煜, 胡金春, 等. 平面 3-DOF 电磁微动台设计及其解耦控制[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(6): 1427—1431, 1436.
- LI H, ZHU Y, HU J C, et al. Planar 3-DOF magnetic micro-motion stage and its decoupling control [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(6): 1427—1431, 1436. (in Chinese)
- [28] 孙中奎, 金晨. 时滞系统非线性动力学研究进展[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(8): 6—18.
- SUN Z K, JIN C. Advances in nonlinear dynamics for delayed systems [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(8): 6—18. (in Chinese)
- [29] 余东东, 杨开明, 朱煜, 等. 三自由度气浮平面电机非线性运动控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(增刊1): 236—241.
- YU D D, YANG K M, ZHU Y, et al. Nonlinear motion control of a three-degree-of-freedom air-bearing planar motor [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2012, 32(S1): 236—241. (in Chinese)
- [30] 蒋毅, 朱煜, 杨开明, 等. 超精密六自由度微动台耦合动力学建模及分析[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(30): 5451—5457.
- JIANG Y, ZHU Y, YANG K M, et al. Coupled dynamic modeling and analysis of ultra-precision 6-DOF fine stage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(30): 5451—5457. (in Chinese)
- [31] NGUYEN T L, RO S K, PARK J K. Study of ball screw system preload monitoring during operation based on the motor current and screw-nut vibration [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 131: 18—32.
- [32] ORKISZ P, SAPIŃSKI B. Vibration reduction system with a linear motor: operation modes, dynamic performance, energy consumption [J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1910.
- [33] YOUSEFI H, HIRVONEN M, HANDROOS H, et al. Application of neural network in suppressing mechanical vibration of a permanent magnet linear motor [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(7): 787—797.
- [34] SU L Y, HUANG G X, HUANG R R, et al. Design of a compact long-stroke high-precision rigid-flexible coupling motion stage driven by linear mo-

- tor [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(12): 5859—5870.
- [35] SU L Y, ZHANG C H, YANG Z J. Combined thermal and wear analysis of linear rolling guide subjected to rigid-flexible coupling motion stage [J]. *Machines*, 2023, 11(3): 358.
- [36] XU N N, TANG W C, CHEN Y J, et al. Modeling analysis and experimental study for the friction of a ball screw [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 87: 57—69.
- [37] HUANG W W, WANG X Y, MENG Y X, et al. Design, modeling and control of high-bandwidth nano-positioning stages for ultra-precise measurement and manufacturing: a survey [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(6): 062007.
- [38] 桑瑞涓, 龚坚, 路宽, 等. 高维非线性动力系统降维理论综述[J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(9): 1—15.
- SANG R J, GONG J, LU K, et al. Dimension reduction theory review of high-dimensional nonlinear dynamical systems [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(9): 1—15. (in Chinese)
- [39] ZATARAIN M, RUIZ DE ARGANDOÑA I, ILLARRAMENDI A, et al. New control techniques based on state space observers for improving the precision and dynamic behaviour of machine tools [J]. *CIRP Annals*, 2005, 54(1): 393—396.
- [40] ERKORKMAZ K, HOSSEINKHANI Y. Control of ball screw drives based on disturbance response optimization [J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(1): 387—390.
- [41] SHAMMA J S, ATHANS M. Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, 35(8): 898—907.
- [42] 王东风, 朱为琦. 线性参数变化系统建模与控制研究进展[J]. *自动化学报*, 2021, 47(4): 780—790.
- WANG D F, ZHU W Q. Advances in modeling and control of linear parameter varying systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(4): 780—790. (in Chinese)
- [43] VAFAMAND N, KHAYATIAN A. Model predictive-based reset gain-scheduling dynamic control law for polytopic LPV systems [J]. *ISA Transactions*, 2018, 81: 132—140.
- [44] 黄涛, 杜双江, 张钊, 等. 滚珠丝杠传动系统线性变参数动力学模型试验建模方法[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(9): 98—106.
- HUANG T, DU S J, ZHANG Q, et al. Experimental modeling of linear parameter varying dynamics model of ball screw drive system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(9): 98—106. (in Chinese)
- [45] LU S S, TIAN C, YAN P. Adaptive extended state observer-based synergetic control for a long-stroke compliant microstage with stress stiffening [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(1): 259—270.
- [46] CAPAT M. LPV modelling and predictive control of adjustable mirrors in an EUV lithography system [D]. Eindhoven, Netherlands: Eindhoven University of Technology.
- [47] SHI W J, WANG Y R, ZHAO H, et al. LPV modelling and identification of nonlinear temperature dependence for ultrasonic motor [C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). New York: IEEE, 2018.
- [48] HOFFMANN C, WERNER H. A survey of linear parameter-varying control applications validated by experiments or high-fidelity simulations [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(2): 416—433.
- [49] ATOUI H, SENAME O, MILANÉS V, et al. LPV-based autonomous vehicle lateral controllers: a comparative analysis [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 13570—13581.
- [50] COX P B, WEILAND S, TÓTH R. Affine parameter-dependent Lyapunov functions for LPV systems with affine dependence [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(11): 3865—3872.
- [51] AL-TAIE F, WERNER H. Balanced truncation for temporal- and spatial-LPV interconnected systems based on the full block S-procedure [J]. *International Journal of Control*, 2019, 92(10): 2396—2407.
- [52] HUANG T, DENG P, ZHANG W G, et al. Polytopic LPV modeling and gain scheduling H_∞ control of ball screw with position — and load — dependent variable dynamics [J]. *Precision Engineering*, 2024, 87: 1—10.
- [53] ZHANG Z, YAN P, JIANG H, et al. A discrete time-varying internal model-based approach for high

- precision tracking of a multi-axis servo gantry [J]. ISA Transactions, 2014, 53(5): 1695—1703.
- [54] NARITA M, CHEN G, TAKAMI I. Gain scheduling controller synthesis for active magnetic bearing based on parameter dependent LMI with convexity condition [C]//2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). New York: IEEE, 2017.
- [55] DENG P, ZHANG J H, ZHOU R J, et al. LPV modeling and gain scheduling H infinity control of ball screw with varying dynamics [C]//2023 China Automation Congress (CAC). New York: IEEE, 2023.
- [56] KHAMARI D, MAKOUF A, DRID S. Control of induction motor using polytopic LPV models [C]//2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA). New York: IEEE, 2011.
- [57] ZHOU K M, DOYLE J C, GLOVER K. Robust and optimal control [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [58] KASSARIAN E, SANFEDINO F, ALAZARD D, et al. Linear fractional transformation modeling of multibody dynamics around parameter-dependent equilibrium [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31(1): 418—425.
- [59] SADEGHZADEH A, SHARIF B, TÓTH R. Affine linear parameter-varying embedding of non-linear models with improved accuracy and minimal overbounding [J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(20): 3363—3373.
- [60] 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.
- [61] BOMBOIS X, GHOSH D, SCORLETTI G, et al. LPV system identification for control using the local approach [J]. International Journal of Control, 2021, 94(2): 390—410.
- [62] LIU Q, GROSS J, PFEIFFER S, et al. A local approach for the LPV identification of an actuated beam using piezoelectric actuators and sensors [J]. Mechatronics, 2014, 24(4): 289—297.
- EBRAHIMKHANI S, LATAIRE J. Identification of nonlinear systems via LPV model identification around a time-varying trajectory [J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 5140—5145.
- [64] TURK D, SINGH T, SWEVERS J. Linear parameter-varying system identification of an industrial ball screw setup [C]//2018 IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). New York: IEEE, 2018.
- [65] VAN DER MAAS A, VAN DER MAAS R, VOORHOEVE R, et al. Frequency response function identification of LPV systems: a 2D-LRM approach with application to a medical X-ray system [C]//2016 American Control Conference (ACC). New York: IEEE, 2016.
- [66] JIN X, HUANG B, SHOOK D S. Multiple model LPV approach to nonlinear process identification with EM algorithm [J]. Journal of Process Control, 2011, 21(1): 182—193.
- [67] TÓTH R. Modeling and identification of linear parameter-varying systems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [68] 侯媛彬, 汪梅, 王立琦. 系统辨识及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HOU Y B. System identification and its MATLAB simulation [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [69] BAMIEH B, GIARRE L. Identification of linear parameter varying models [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2002, 12(9): 841—853.
- [70] BAO Y J, VELNI J M, SHAHBAKHTI M. Epistemic uncertainty quantification in state-space LPV model identification using Bayesian neural networks [J]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(2): 719—724.
- [71] 蔡宇, 刘旭, 程英豪. 线性变参数振动系统的全局辨识[J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 114—122.
- CAI Y, LIU X, CHENG Y H. Global identification of linear parameter-varying vibration systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(23): 114—122. (in Chinese)
- [72] LIU X, HAN G J, YANG X Q. Robust global identification of LPV errors-in-variables systems with incomplete observations [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(6): 3799—3807.
- [73] BORGES J, VERDULT V, VERHAEGEN M, et al. Separable least squares for projected gradient i-

- dentification of composite local linear state-space models [C]//Proceedings of the 16th international symposium on mathematical theory of networks and systems. Heverlee, Netherlands; Katholieke Universiteit Leuven, 2004.
- [74] NOVARA C, RUIZ F, MILANESE M. Direct identification of optimal SM-LPV filters and application to vehicle yaw rate estimation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(1): 5—17.
- [75] COX P B, TÓTH R, PETRECZKY M. Towards efficient maximum likelihood estimation of LPV-SS models [J]. Automatica, 2018, 97: 392—403.
- [76] YU W H, TAN J, LIU C K, et al. Preparing for the unknown: learning a universal policy with on-line system identification [EB/OL]. 2017; arXiv: 1702.02453. <http://arxiv.org/abs/1702.02453>.
- [77] 杜其通, 刘朝雨, 闵剑, 等. 基于人工神经网络的动力学参数辨识法[J]. 高技术通讯, 2020, 30(5): 495—500.
- DU Q T, LIU C Y, MIN J, et al. Dynamic parameter identification method based on artificial neural network [J]. High Technology Letters, 2020, 30(5): 495—500. (in Chinese)
- [78] WANG S, SEILER P. Gridded-based LPV control of a Clipper Liberty wind turbine [J]. Wind Energy, 2018, 21(11): 1106—1120.
- [79] CHEN N H, WEN J T. LPV control design for precision motion systems [C]//2014 American Control Conference. New York; IEEE, 2014.
- [80] 赵川, 孙凤, 金俊杰, 等. 混合磁悬浮系统零功率抗偏载控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 360—369.
- ZHAO C, SUN F, JIN J J, et al. Research on zero power and resisting eccentric load control method of hybrid magnetic levitation system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8): 360—369. (in Chinese)
- [81] BROENS Y, BUTLER H, TÓTH R. LPV sequential loop closing for high-precision motion systems [C]//2022 American Control Conference (ACC). New York; IEEE, 2022.
- [82] DENG P, HUANG T, ZHANG W G, et al. LPV interpolation modeling and modal-based pole placement control for ball screw drive with dynamic variations [J]. ISA Transactions, 2024, 152: 477—486.
- [83] TAKARICS B, SZÖLLÖSI A, VANEK B. Tensor product type polytopic LPV modeling of aeroelastic aircraft [C]//2018 IEEE Aerospace Conference. New York; IEEE, 2018.
- [84] NGUYEN A T, CHEVREL P, CLAVEAU F. Gain-scheduled static output feedback control for saturated LPV systems with bounded parameter variations [J]. Automatica, 2018, 89: 420—424.
- [85] LIU T J, DU X, SUN X M, et al. Robust tracking control of aero-engine rotor speed based on switched LPV model [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 382—390.
- [86] BUTCHER M, KARIMI A. Linear parameter-varying iterative learning control with application to a linear motor system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 412—420.
- [87] KAPSALIS D, SENAME O, MILANES V, et al. LPV/LFT control design equipped with a command governor for different steering scenarios [J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54(8): 142—147.
- [88] APKARIAN P, GAHINET P. A convex characterization of gain-scheduled H_∞ controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(5): 853—864.
- [89] BROENS Y, BUTLER H, TÓTH R. Frequency domain auto-tuning of structured LPV controllers for high-precision motion control [EB/OL]. 2024; arXiv: 2403.05878. <http://arxiv.org/abs/2403.05878>.