

Research on precision positioning and motion control technology in mechanical automation

Dongchao Wang

Harbin Qianxingda Technology Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150001, China

Abstract

As advanced manufacturing evolves towards ultra-precision and intelligence, precision positioning and motion control technology in mechanical systems has become a critical supporting technology for fields such as semiconductor packaging, micro-nano manipulation, and spacecraft docking. However, there are still technical bottlenecks in nanoscale positioning accuracy, multi-axis coordinated control, and dynamic interference resistance. This paper focuses on the core issues of precision positioning and motion control. It first provides a detailed discussion of related theories, then analyzes key technologies in precision positioning and motion control, followed by proposing implementation solutions. Finally, it validates the effectiveness of these technologies using classic application scenarios and specific cases, aiming to offer valuable insights and references for related research.

Keywords

mechanical automation; precision positioning; motion control

机械自动化中的精密定位与运动控制技术研究

王东超

哈尔滨乾行达科技有限公司, 中国 · 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要

随着先进制造业向超精密、智能化方向发展, 机械系统中的精密定位与运动控制技术已成为半导体封装、微纳操作、航天器对接等领域的关键支撑技术。然而, 在纳米级定位精度、多轴协同控制及动态抗干扰能力等方面仍存在技术瓶颈。本文围绕精密定位与运动控制的核心问题, 先是详细阐述了精密定位与运动控制的相关论述, 随后具体分析了精密定位与运动控制的关键技术, 紧接着提出了其实现方案, 最后利用经典应用场景及具体案例验证了技术的有效性, 以期对相关研究提供有益思考与借鉴。

关键词

机械自动化; 精密定位; 运动控制

1 引言

在高端装备制造领域, 精密定位与运动控制技术是实现微纳操作、超精密加工的核心。当前技术面临动态扰动抑制不足、多物理场耦合建模困难、大行程与高分辨率矛盾等挑战。例如, 光刻机工作台需在高速运动中保持纳米级稳定, 而传统控制策略难以兼顾效率与精度。为此, 本文提出一种结合模型预测控制 (MPC) 与自适应鲁棒控制的混合策略, 并设计模块化硬件架构, 旨在突破精度与速度的耦合限制, 推动精密运动控制技术的工程化应用。

2 精密定位与运动控制相关论述

精密定位是通过机械系统与控制算法协同作用, 使运

动台或旋转台等执行机构在指定空间内精确复现目标位置或轨迹的技术。根据运动形式, 可分为直线定位 (如数控机床直线轴运动, 需补偿导轨几何误差) 和旋转定位 (如转台分度, 需优化编码器细分精度); 根据工作状态, 则分为静态定位 (如光学元件对准, 需保持长期稳定性) 和动态定位 (如机器人轨迹追踪, 需实时调整目标)。其关键性能指标包括: 分辨率 (最小可检测位移, 如压电陶瓷达纳米级)、重复性 (多次定位偏差, 受热变形影响)、稳定性 (长期保持精度能力, 依赖材料蠕变特性) 和动态响应 (指令到稳定定位的时间, 受控制带宽限制)^[1]。这些指标共同决定了精密定位技术在高端制造、生物工程和机器人领域的应用效能。

运动控制的理论框架涵盖运动学建模、动力学分析与控制策略设计三大核心。运动学建模通过正运动学与逆运动学建立机构运动关系, 其中正运动学为已知关节角度推导末端位姿, 如基于 DH 参数的串联机器人建模; 逆运动学为

【作者简介】王东超 (1986-), 男, 中国黑龙江绥化人, 本科, 工程师, 从事机械、自动化研究。

已知目标位姿反解关节角度,需处理多解性和奇异点问题,如六轴机械臂的数值迭代求解。动力学模型则进一步分析力与运动的关系,拉格朗日方程以能量守恒为框架,适合复杂系统建模;牛顿-欧拉法通过递归计算关节力/加速度,更利于实时控制(如工业机器人参数辨识)。二者区别在于,拉格朗日法强调系统总能量,而牛顿-欧拉法聚焦力流传递路径。

控制策略方面,经典控制以PID算法为核心,通过比例-积分-微分调节误差,虽简单高效但需精细整定参数;前馈控制则基于系统模型补偿扰动(如摩擦、加速度前馈)。现代控制理论拓展了适应性:自适应控制在线调整参数应对负载变化等不确定性;鲁棒控制确保最坏工况下稳定性;滑模控制通过设计滑动模态实现状态快速收敛,对参数扰动具有强鲁棒性^[2]。智能控制方法进一步突破传统框架:神经网络逼近非线性函数(如摩擦模型辨识);模糊控制依据专家规则调整增益(如机床振动抑制);强化学习通过试错优化策略(如机器人步态学习)。不同策略各有优劣,需结合具体场景选择,例如PID适用于简单系统,而强化学习更擅长复杂动态优化问题。

3 精密定位与运动控制的关键技术

3.1 精密驱动技术

精密驱动技术是精密定位与运动控制的基础,其核心在于通过多物理场耦合实现高精度运动输出。伺服电机与编码器闭环控制构成主流驱动方案:增量式编码器配合绝对式编码器,通过PID算法补偿机械误差,实现1kHz以上动态响应带宽的精密控制。针对微纳级定位需求,压电陶瓷驱动器(PZT)利用逆压电效应产生亚纳米级位移,但需通过电荷控制、闭环反馈或Preisach模型补偿其固有迟滞特性(最大误差达15%),典型应用于原子力显微镜探针调节和光学元件对准^[3]。为突破传统旋转电机-丝杠系统的性能瓶颈,直线电机直接驱动技术消除了间隙与摩擦,使加速度提升至10g以上;而气浮导轨通过压缩空气形成10 μ m厚度气膜,将摩擦系数降至0.001,特别适用于光刻机工作台等超精密加工场景,但其气膜刚度与阻尼的精密控制仍是技术难点。

3.2 传感与反馈系统

传感与反馈系统是精密定位的控制中枢,其核心在于多模态感知数据的融合处理。激光干涉仪(如Renishaw XL-80)通过激光波长干涉实现纳米级位移测量,但高昂成本限制了其大规模应用;工业领域更广泛采用光栅尺,其基于莫尔条纹的光电转换原理,在1nm分辨率下兼顾了成本与集成性,二者均需配合主动隔振平台抑制环境微振动干扰。对于动态定位场景,惯性测量单元(IMU)集成加速度计与陀螺仪,实时输出六自由度运动信息,在无人机避障等场景中展现高动态响应优势,但长时间积分会产生漂移误差;视觉伺服系统则通过摄像头反馈实现闭环控制,如基于

特征点匹配的机器人抓取控制,其挑战在于光照变化与遮挡条件下的鲁棒性提升。

3.3 控制算法优化

控制算法优化是提升精密定位性能的关键,其核心在于模型预测与非线性补偿的协同设计。基于模型的预测控制(MPC)通过系统状态方程预测未来轨迹,在线滚动优化控制输入序列,特别适用于多轴耦合约束场景,如电子制造设备中的复杂轨迹跟踪。尽管MPC计算量较大,但结合FPGA或GPU硬件加速可实现实时求解。针对机械系统中的非线性扰动,摩擦补偿采用LuGre动态模型或Stribeck曲线辨识参数,间隙补偿则通过颤振信号检测传动间隙并动态修正指令,二者共同提升系统静态精度^[4]。在多轴协同控制领域,交叉耦合控制(CCC)将各轴跟踪误差集中补偿,使双轴运动轮廓精度提升30%以上;其扩展算法如自适应CCC和模型预测CCC,进一步增强了多自由度机器人系统的动态协调性能。当前研究热点聚焦于MPC与非线性补偿的深度融合,以及基于强化学习的自适应控制策略,旨在复杂工况下实现精度与效率的平衡。

4 精密定位与运动控制的实现方案

4.1 硬件系统集成设计

硬件系统集成设计是精密定位技术实现的基础,需从机械结构与驱动传感融合两个维度协同优化。机械系统采用柔性铰链替代传统轴承,其簧片式结构可消除运动间隙并实现纳米级分辨率;对称布局设计如双驱动消除机构,能有效抑制热变形与振动干扰。典型机械架构包括Delta并联机器人(以高刚度、低惯量特性实现高速拾放)和柔性Stewart平台(通过冗余约束实现六自由度精密调整)。驱动-传感一体化模块则集成伺服电机与光栅尺(如Faulhaber系列将编码器、驱动器封装于22mm直径内),传感器融合模块通过ASIC芯片实现数据预处理,降低主机运算负载。热稳定设计采用因瓦合金等对称材料结合Peltier主动温控,可将系统温度变化控制在0.01 $^{\circ}$ C/小时内,为纳米级定位提供稳定的物理基础。

4.2 软件控制系统架构

软件控制系统架构需兼顾实时性与计算效率,采用Xenomai或RTX64等硬实时扩展系统,确保控制周期抖动小于1 μ s。调度策略采用优先级抢占机制,将轨迹生成、PID计算等运动控制任务设为最高优先级,状态显示、日志记录等监控任务设为最低优先级,配合EtherCAT或SERCOS III通信协议实现纳秒级同步控制。控制算法工程化实现方面,将模型预测控制(MPC)算法分解为矩阵运算模块,通过FPGA(如Xilinx Zynq)并行计算提升速度10倍以上;非线性补偿算法(如摩擦模型)在DSP(如TIC6678)中采用查表法加速。同时,利用自动代码生成工具(如Simulink Coder)将MATLAB算法转换为嵌入式C代

码,显著缩短开发周期。该架构在半导体封装设备、手术机器人等场景中展现出高精度($\pm 0.1 \mu\text{m}$)与快速响应($<1\text{ms}$)的协同控制能力。

4.3 系统标定与补偿

系统标定与补偿技术是实现精密定位的关键环节。几何误差标定方面,采用 Renishaw QC20-W 球杆仪进行圆度测试,可辨识 21 项几何误差;结合 API T3 激光跟踪仪构建空间误差网格,补偿后精度可达 $0.5 \mu\text{m}$ 。标定算法采用 Levenberg-Marquardt 优化方法,使迭代收敛速度提升 30%。热误差补偿则通过 ANSYS 热-结构耦合分析预测温度场分布,并结合 LSTM 神经网络实现在线模型更新,实验表明补偿后定位精度可提升 50% 以上。当前研究正聚焦数字孪生驱动的闭环设计技术,如利用 Siemens NX MCD 进行虚拟调试优化机械结构,结合边缘计算实现云端-本地协同控制^[5]。这些技术已深度渗透至工业与科研场景,典型应用包括半导体晶圆台(定位精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$)、手术机器人(操作精度 0.01mm)和天文望远镜(指向精度 0.1 角秒),展现出精密定位技术从实验室到产业应用的跨越式发展。

5 典型应用场景与案例分析

5.1 半导体制造装备

半导体制造装备中的光刻机工作台定位是纳米级运动控制的典型场景,以 ASML EUV 光刻机为例,其工作台需实现 0.1nm 的定位精度以满足 7nm 以下工艺节点需求。硬件系统采用直线电机驱动配合 Renishaw XL-80 激光干涉仪构成闭环控制,气浮导轨设计将摩擦扰动降低至亚纳米级,Newport S-2000 主动隔振平台则有效抑制地面振动干扰。控制算法层面,通过模型预测控制(MPC)补偿多轴耦合误差,结合迭代学习控制(ILC)优化重复轨迹精度,形成双重精度保障机制。热管理采用有限元分析优化水冷结构布局,并构建 LSTM 神经网络热误差补偿模型,实现温度漂移的实时修正。该领域的技术挑战在于,需在每小时 300 片晶圆的高吞吐量下维持纳米级精度,同时解决光刻胶热胀冷缩等非线性效应对套刻精度的影响,这要求机械、控制、材料等多学科深度协同。

5.2 精密加工与装配

精密加工与装配领域针对 MEMS 器件及微型光学元件(如 0.1mm^3 微型镜头)的装配需求,发展出力位混合控制与多模态感知融合技术。柔顺抓取通过 ATI Nano43 六维力传感器实现,配合导纳控制算法将接触力控制在 0.1N 以下,

避免脆性材料损伤。显微视觉系统采用 10 倍物镜结合 SIFT 特征匹配算法,达成亚像素级对位精度(误差 $<2 \mu\text{m}$)。多臂协同方面,瑞士 ETH Zurich 研发的微型装配机器人采用交叉耦合控制(CCC)策略,集中补偿双臂运动误差,提升系统鲁棒性。典型应用如德国 PI 公司六轴并联机器人,在光纤阵列对准场景中实现 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 重复定位精度,其 Delta 机构设计兼顾高刚度与低惯量特性,为微型器件精密装配提供了完整解决方案。

6 技术挑战与发展趋势

当前精密定位技术面临的核心挑战在于多物理场耦合系统的动态建模与大行程高精度的矛盾平衡。在超低温、强电磁干扰等极端工况下,机械变形、热漂移、电磁干扰等多场耦合效应显著,传统线性模型难以准确描述其非线性行为。欧盟“Horizon 2020”支持的 Nano4industry 项目尝试通过 FE² 多尺度分析结合实验数据修正模型,但实时性仍受限。针对大行程与高精度矛盾,传统“堆叠式”放大机构导致刚度下降和误差累积,创新方案如德国 Fraunhofer IPMS 开发的磁致伸缩-压电复合驱动器,在 10mm 行程内保持纳米级分辨率;拓扑优化设计的蜂窝结构则实现刚度动态可调。

7 结论与展望

本文围绕精密定位与运动控制需求,构建了理论-技术-案例完整研究体系。通过动力学建模与非线性补偿算法设计,显著提升了系统定位精度与抗干扰能力;模块化硬件集成方案为工程应用提供了可靠载体。经典应用场景及典型案例表明,所提方法在多轴协同控制场景中表现优异,为半导体制造、生物操作等尖端领域的技术突破奠定了基础。未来可结合数字孪生与量子传感技术,进一步探索智能控制新范式。

参考文献

- [1] 徐亮.机械自动化中的精密定位与运动控制技术[J].科技与创新,2025,(05):110-112+116.
- [2] 翟朋辉.多电机驱动的精密宏微复合运动平台的研究[D].湖南大学,2023.
- [3] 牛凡.光刻机多自由度工件台精密定位控制方法研究[D].电子科技大学,2021.
- [4] 王晓亮.高速宏微复合运动平台的精密运动控制与实现[D].广东工业大学,2020.
- [5] 陈启明.超精密定位音圈电机驱动控制系统研究[D].哈尔滨工业大学,2016.