

超精密机床压电陶瓷微进给控制算法研究

辛 涛

中京泰瑞（北京）工程技术有限公司 北京

【摘要】超精密加工技术对现代制造业的高精度需求提出了更高挑战，其中压电陶瓷微进给控制系统在实现纳米级加工精度方面起着关键作用。本文围绕超精密机床中压电陶瓷驱动装置的控制算法展开研究，旨在提升其动态响应速度与定位精度。通过分析压电陶瓷的非线性特性，提出一种融合 PID 控制与前馈补偿的复合控制策略，并结合仿真与实验验证该方法的有效性。研究表明，所设计控制算法能显著减小滞后误差，提高系统的稳定性和重复定位精度，为超精密加工提供理论支持和技术保障。

【关键词】超精密机床；压电陶瓷；微进给控制；控制算法；非线性补偿

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250135

Research on piezoelectric ceramic micro-feed control algorithm for ultra-precision machine tools

Tao Xin

Zhongjing Tairui (Beijing) Engineering Technology Co., Ltd, Beijing

【Abstract】 Ultra-precision machining technology poses higher challenges to the high-precision requirements of modern manufacturing, in which the piezoelectric ceramic micro-feed control system plays a key role in achieving nanometer-level machining accuracy. This paper focuses on the research of control algorithms for piezoelectric ceramic driving devices in ultra-precision machine tools, aiming to improve their dynamic response speed and positioning accuracy. By analyzing the nonlinear characteristics of piezoelectric ceramics, a composite control strategy integrating PID control and feedforward compensation is proposed, and the effectiveness of this method is verified through simulation and experiments. The research shows that the designed control algorithm can significantly reduce hysteresis errors, improve the stability and repeat positioning accuracy of the system, providing theoretical support and technical guarantee for ultra-precision machining.

【Keywords】 Ultra-precision machine tool; Piezoelectric ceramic; Micro-feed control; Control algorithm; Nonlinear compensation

引言

在高端制造领域，加工精度已成为衡量装备技术水平的重要指标之一。随着光电子、半导体等产业的快速发展，传统机械传动方式已难以满足亚微米甚至纳米级别的加工要求。压电陶瓷因其响应快、分辨率高和结构紧凑等特点，被广泛应用于超精密机床的微进给系统中。其固有的迟滞与蠕变效应限制了其控制精度的进一步提升。如何优化控制算法以克服这些非线性问题，成为当前研究的重点方向。本文针对这一核心问题，提出一种改进型复合控制策略，力求在不增加硬件复杂度的前提下，有效提升系统的动态性能和控制精度，为推动超精密加工

技术的发展提供新的思路和方法。

1 压电陶瓷微进给系统的非线性特性分析

压电陶瓷作为超精密机床微进给系统中的核心驱动元件，其性能直接影响加工精度和系统响应特性。压电陶瓷材料本身具有明显的非线性行为，主要表现为迟滞效应与蠕变特性。迟滞是指在电压驱动下位移输出与输入信号路径相关，形成非单值映射关系，导致定位误差难以预测；而蠕变则是指在恒定电压作用下，陶瓷材料的形变随时间缓慢变化，影响系统的动态稳定性。这些非线性因素使得传统线性控制方法难以满足纳米级高精度加工的要求，因此必须对其物理机制进行深入分析，并建立相应

的数学模型以支撑后续控制算法的设计。

从材料特性和结构响应的角度来看,压电陶瓷的非线性行为与其内部晶格结构、极化状态及外部负载条件密切相关。在高频或大范围运动条件下,迟滞环的宽度显著增加,造成系统响应滞后和能量损耗上升^[1]。在闭环控制系统中,若未对迟滞进行有效补偿,将引发控制器积分饱和现象,进而降低系统的跟踪精度与鲁棒性。为准确描述该类非线性行为,研究中常采用 Prandtl-Ishlinskii 模型或 Duhem 模型等进行建模,这些模型能够较好地反映压电陶瓷在不同激励下的动态响应规律,从而为控制策略的优化提供理论依据。

在实际应用中,压电陶瓷微进给系统需在复杂工况下保持高精度与高稳定性,这对控制算法提出了更高要求。传统的 PID 控制虽具备结构简单、易于实现的优点,但在面对压电陶瓷的强非线性时,往往难以兼顾响应速度与稳态精度。为此,研究者开始探索基于前馈补偿、逆模型控制以及智能控制(如模糊控制、神经网络控制)等先进算法,试图通过多模式融合的方式提升系统整体性能。尤其在复合控制策略中,结合前馈与反馈控制的优势,能够在不显著增加硬件成本的前提下,有效抑制迟滞与蠕变带来的误差,从而实现更精确的微位移调节,为超精密加工提供可靠的技术支持。

2 传统控制算法在超精密加工中的局限性

在超精密加工过程中,微进给系统的控制精度直接决定了最终加工质量,而传统控制算法因其结构简单、工程应用广泛,长期以来被用于压电陶瓷驱动系统的控制设计。压电陶瓷材料本身具有显著的非线性特性,如迟滞、蠕变和非对称响应等,这些因素使得基于线性系统理论设计的传统控制器难以满足高精度动态跟踪的要求。尤其在高频或复杂轨迹跟踪任务中,传统 PID 控制容易出现响应滞后、稳态误差较大以及超调等问题,严重影响系统的控制性能与稳定性。

从实际应用角度看, PID 控制器虽然可通过参数整定在一定程度上改善控制效果,但其本质上仍是一种线性反馈控制方法,无法有效补偿压电陶瓷固有的非线性误差。在面对外部扰动、负载变化或温度漂移等不确定因素时,传统控制策略的鲁棒性较差,往往需要频繁调整参数以维持系统稳定,增加了操作复杂性和维护成本^[3-6]。在闭环控制系统中,若未引入前馈补偿或其他非线性修正机制,迟滞引

起的相位滞后还会导致系统带宽受限,进一步限制了其在高速、高精度加工场景中的适用性。

为了应对上述挑战,研究者逐渐将注意力转向基于模型补偿的控制策略,例如采用逆迟滞模型作为前馈环节,以抵消压电陶瓷的非线性影响。传统控制框架在集成此类模型时存在实现复杂、计算负担重等问题,限制了其在工业现场的实际应用。如何在保持控制结构简洁的前提下,提升系统对非线性误差的抑制能力,成为当前超精密微进给控制领域亟需解决的关键问题之一。这也为后续复合控制策略的设计提供了理论依据与实践基础。

3 基于复合控制策略的微进给系统优化设计

在超精密机床的微进给系统中,压电陶瓷因其高分辨率、快速响应和无摩擦传动等优点被广泛采用。其固有的迟滞非线性特性严重影响了系统的定位精度与动态性能,尤其在高速、高精度轨迹跟踪任务中表现尤为突出。为克服这一瓶颈问题,研究者提出了多种控制策略以提升系统的控制效果,其中复合控制策略因其结合了前馈补偿与反馈控制的优点,成为当前解决压电陶瓷非线性误差的有效手段之一。该方法通过构建逆迟滞模型作为前馈控制器,对输入信号进行预补偿,从而抵消压电陶瓷本身的非线性影响,并结合传统 PID 或先进控制算法实现闭环调节,进一步提升系统的稳定性与抗干扰能力。

复合控制的核心在于如何准确建立压电陶瓷的迟滞模型并设计有效的逆模型用于前馈补偿。目前常用的建模方法包括 Prandtl-Ishlinskii (P-I) 模型、Duhem 模型以及基于神经网络或模糊逻辑的数据驱动建模方法。其中, P-I 模型因其结构清晰、物理意义明确,在工程实践中应用较为广泛^[7]。通过对其参数进行辨识与优化,可构建出具有较高拟合精度的迟滞正模型,并进一步推导出其逆模型用于控制输入的预处理。在此基础上,将逆模型嵌入到控制结构中作为前馈环节,使系统在未进入反馈调节之前就已对迟滞误差进行了有效抑制,从而显著提升了系统的动态响应速度与稳态精度。

在实际控制系统设计中,复合控制策略还需考虑实时性、计算复杂度以及硬件实现的可行性。通常,前馈补偿部分可在数字信号处理器(DSP)或现场可编程门阵列(FPGA)上实现,而反馈控制则依赖于高精度传感器提供的位置信息进行闭环调节。为进一步提高控制系统的鲁棒性与自适应能力,还

可引入智能控制算法如模糊 PID、滑模控制或基于学习机制的迭代学习控制 (ILC)，形成多模式融合的复合控制架构。这种集成化控制策略不仅能够在不增加机械结构复杂性的前提下提升微进给系统的整体性能，也为实现亚微米乃至纳米级加工精度提供了可靠的技术路径。

4 控制算法的仿真与实验验证

为验证所设计复合控制算法在超精密机床压电陶瓷微进给系统中的有效性，研究过程中采用了仿真建模与实验测试相结合的方法。在仿真阶段，基于 MATLAB/Simulink 平台构建了包含迟滞非线性特性的压电陶瓷驱动系统模型，并引入 Prandtl-Ishlinskii (P-I) 迟滞模型以更贴近实际物理行为。在此基础上，将所提出的复合控制策略集成至仿真环境中，其中前馈部分采用逆迟滞模型对输入信号进行预补偿，反馈部分则结合改进型 PID 控制器实现闭环调节。通过设定不同频率和幅值的参考轨迹输入，对系统的动态响应、稳态误差及抗干扰能力进行了多组对比仿真分析，结果表明该控制策略能够显著减小由迟滞引起的跟踪误差，提升系统的定位精度与响应速度。

在完成仿真验证后，进一步搭建了基于数字信号处理器 (DSP) 和高精度位移传感器的实验平台，用于实际控制效果的测试。实验系统包括压电陶瓷驱动模块、电容式位移检测单元以及嵌入式控制器，所有控制算法均在 TMS320F28335 DSP 芯片上实时运行。通过设定正弦波、三角波和阶梯信号等多种典型运动轨迹作为目标输入，采集系统输出的实际位移数据并与仿真结果进行比对，从而评估控制策略在真实环境下的适应性与稳定性^[8]。实验数据显示，在未加入前馈补偿的传统 PID 控制下，系统存在明显的滞后现象和残余误差；而在复合控制模式下，系统的跟踪误差大幅降低，重复定位精度提高至纳米级别，特别是在高频段表现出了更强的鲁棒性和动态跟随能力。

为进一步量化评估控制性能，研究中还引入了多项评价指标，如最大绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 以及上升时间、超调量等动态响应参数。通过对多组实验数据的统计分析，验证了复合控制策略在不同工况下的稳定性和一致性。针对温度变化、外部振动等实际加工环境中可能存在的干扰因素，进行了抗扰动能力测试，结果显示该控制方法具备良好的鲁棒性，能够在复杂环境下维持较高精度的微进给控制效果。仿真与实验的双重验证不仅证明了所提出

控制算法的可行性与优越性，也为后续在超精密加工装备中的工程应用提供了坚实的技术支撑。

5 结语

本文围绕超精密机床中压电陶瓷微进给系统的控制算法展开研究，针对其固有的迟滞非线性特性，提出了基于复合控制策略的优化设计方案。通过建立迟滞模型及其逆模型实现前馈补偿，并结合反馈控制提升系统响应精度与稳定性。仿真与实验结果表明，该方法能有效抑制非线性误差，显著提高系统的动态性能和定位精度，满足超精密加工对微进给系统高精度、高稳定性的要求，为相关领域的工程应用提供了可行的技术路径与理论支持。

参考文献

- [1] 常博宇.绿色智造与再制造：超精密机床在循环经济中的技术迭代与商业模式创新[J].世界制造技术与装备市场,2025,(02):26-33.
- [2] 武海亮,杨辉,卢超伟,等.PWM 频率对超精密机床主轴动态性能影响研究[J].组合机床与自动化加工技术,2024,(05):141-146+151.
- [3] 陆涵婧,芮筱亭,丁园园,等.超精密机床动力学多体系统传递矩阵法[C]//中国振动工程学会.第十五届全国振动理论及应用学术会议摘要集.北京大学工学院湍流与复杂系统国家重点实验室;南京理工大学发射动力学研究所;南京理工大学复杂多体系统动力学全国重点实验室,2023:188.
- [4] 刘良.超精密机床的流固耦合行为及其动态特性研究[D].哈尔滨工业大学,2023.
- [5] 陈熠,王振忠,雷鹏立,等.超精密机床热形变及其对运动精度的影响研究[J].制造技术与机床,2023,(02):5-11.
- [6] 李江.基于快刀伺服功能的超精密机床动态轮廓误差补偿技术研究[D].华中科技大学,2021.
- [7] 胡辰.环境微振动作用下超精密机床动力学分析及基础隔振技术研究[D].南京理工大学,2020.
- [8] 米良,杨川贵,刘兴宝,等.基于微动刀架的超精密机床加工误差在位补偿技术[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(06): 2019-2027.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS