

机械工程及自动化视角下木工机械非标结构与机器研发策略

曹嘉荣

广东先达数控机械有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120008

摘 要 : 本文从机械工程及自动化视角探讨木工机械非标结构与机器研发。涵盖自动化技术赋能、结构拓扑优化等多方面设计要点, 阐述用户需求建模、全生命周期仿真验证等研发策略, 通过定制家具、实木雕刻等场景实证研究, 强调创新设计与智能研发范式, 推动木工机械行业发展。

关 键 词 : 木工机械; 非标结构; 智能研发

Non Standard Structure and Machine Development Strategy of Woodworking Machinery from the Perspective of Mechanical Engineering and Automation

Cao Jiarong

Guangdong Xianda CNC Machinery Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This article explores the non-standard structure and machine development of woodworking machinery from the perspective of mechanical engineering and automation. Covering various design points such as automation technology empowerment and structural topology optimization, this paper elaborates on research and development strategies such as user demand modeling and full lifecycle simulation verification. Through empirical research on customized furniture, solid wood carving, and other scenarios, it emphasizes innovative design and intelligent research and development paradigms to promote the development of the woodworking machinery industry.

Keywords : woodworking machinery; non-standard structure; intelligent R&D

引言

随着《智能制造发展规划(2021-2025年)》的颁布, 木工机械领域的发展迎来新契机。在机械工程及自动化视角下, 木工机械非标结构与机器研发至关重要。木材特性决定了非标结构设计需综合考量多方面因素, 自动化技术为其赋能。从面向工艺约束的结构拓扑优化, 到复合功能集成接口设计, 再到用户需求建模与转化等一系列环节, 都致力于提升木工机械性能。同时, 智能生产驱动下的多种策略及定制家具等领域的实证研究, 为研发提供有效策略, 推动木工机械行业适应市场需求, 实现智能化、现代化发展。

一、木工机械非标结构的理论基础与特征解析

(一) 非标结构在木工机械中的定义与分类

在木工机械领域, 非标结构指根据木材加工的特殊需求、特定工艺或独特场景, 专门设计和制造的非通用性机械结构^[1]。木材具有各向异性、纹理多样、材质不均匀等特性, 这决定了木工机械非标结构需充分考虑这些因素。从功能角度分类, 有用于精准切割的非标切割结构, 可依据木材纹理及切割精度要求, 定制刀具排列与传动方式; 有实现复杂造型铣削的非标铣削结构, 针对不同木质工艺品或家具部件的独特造型设计。按控制方式分, 存在基于数控系统精准控制的非标结构, 能满足复杂图案和高精度加工; 还有依赖传统机械控制, 但经优化以适应木材特性的非

标结构。这些分类并非完全独立, 实际应用中常相互结合, 以满足木工多样化、精细化的加工需求。

(二) 自动化技术对非标设计的赋能机制

自动化技术在木工机械非标设计中发挥着关键赋能作用。机电一体化技术将机械与电子系统深度融合, 为非标设计提供了智能控制基础。通过嵌入智能传感器与执行器, 能精准感知和调整木工机械的运行参数, 实现高效生产。运动控制技术则针对木工机械的不同加工动作需求, 提供精确的位置、速度与加速度控制, 助力非标设计达成复杂运动轨迹规划, 满足多样化生产要求。这些自动化技术还能优化非标设计中的系统集成, 使各模块间协同工作更加顺畅, 极大地提升木工机械的模块化重构能力与功能扩展空间, 确保木工机械在面对不同生产任务时, 都能凭借

非标设计灵活适应，达成高效、精准的生产目标^[2]。

二、木质加工非标机械结构设计方法论

（一）面向工艺约束的结构拓扑优化策略

在木质加工非标机械结构设计中，面向工艺约束的结构拓扑优化策略至关重要。木材切削力学特性复杂，对机械结构动态刚度有较高要求^[3]。通过研究木材切削力学特性，深入了解加工过程中力的分布与变化，明确结构所受的工艺约束。基于此，运用有限元辅助的参数化设计工具链，对结构进行拓扑优化。借助有限元分析，精确模拟结构在不同工况下的力学响应，在此基础上利用参数化设计灵活调整结构参数，寻求最优拓扑方案，以提升结构动态刚度，满足木质加工工艺需求，实现非标机械结构在工艺约束下的优化设计，提高木工机械的性能与加工质量。

（二）复合功能集成接口设计准则

在木质加工非标机械结构设计中，复合功能集成接口设计至关重要。需提出多工序复合加工中心模块接口的误差累积控制算法和标准化连接规范^[4]。误差累积会严重影响设备加工精度与稳定性，因此要精确分析各模块接口在运行过程中误差产生的原因及传播路径，进而设计有效的控制算法，将误差累积限制在可接受范围内。同时，制定标准化连接规范必不可少，它能确保不同功能模块间连接的可靠性与互换性，使各模块如同标准化零件般易于组装与更换，提高设备整体的可维护性与可扩展性，促进木质加工非标机械结构在复合功能集成方面更高效、稳定地发展。

三、智能生产驱动下的机器研发策略体系

（一）数据驱动的研发流程重构

1. 用户需求建模与转化机制

在机械工程及自动化视角下木工机械的研发中，用户需求建模与转化机制是关键环节。通过建立基于 QFD（质量功能展开）的客户需求表征模型，能精准捕捉用户对木工机械非标结构等方面的期望与要求^[5]。该模型将定性的用户需求进行系统梳理与量化分析，清晰呈现不同需求的重要程度。在此基础上，研制需求特征向工程参数的映射算法。此算法如同桥梁，把用户需求准确转化为木工机械研发中的具体工程参数，如尺寸、精度、性能指标等，使得研发人员能依据这些参数开展针对性设计，有效避免研发与实际需求脱节，确保研发出的木工机械在满足用户功能需求的同时，兼顾机械工程及自动化领域的技术可行性与经济性。

2. 全生命周期仿真验证平台

在智能生产驱动下的机器研发策略体系里，全生命周期仿真验证平台至关重要。该平台构建涵盖运动学、热力学与材料特性的多物理场耦合虚拟验证系统^[6]。通过此系统，能对木工机械非标结构在整个生命周期中的运行状况进行模拟。运动学模拟可分析机械的运动轨迹、速度等，确保其运动精准；热力学模拟能评估工作过程中的热量分布与传递，避免因过热影响性能；材料特性模拟则可了解材料在不同工况下的力学性能变化。这种多物理

场耦合的虚拟验证，让研发人员在实际制造前，就全面掌握产品可能出现的问题，及时优化设计，从而有效缩短研发周期，降低研发成本，提升木工机械非标结构的整体质量与性能，以满足智能生产对木工机械的多样化需求。

（二）智能技术融合创新路径

1. 机器视觉引导的在线补偿技术

在智能生产驱动下的机器研发策略体系中，机器视觉引导的在线补偿技术极为关键。通过运用机器视觉技术，能够精准识别木材纹理特征，这些信息被实时反馈至系统。基于开发的木材纹理识别加工路径动态规划算法^[7]，系统可对加工路径进行动态调整，实现自适应补偿控制。具体而言，机器视觉系统获取木材纹理图像后，经图像处理与分析，提取纹理方向、密度等关键参数。算法依据这些参数，快速规划出符合木材纹理特性的最优加工路径，在加工过程中实时调整刀具位置与进给速度，补偿因木材纹理差异造成的加工误差，确保加工精度与质量，有效提升木工机械非标结构的加工效率与智能化水平，以满足智能生产的多样化需求。

2. 数字孪生驱动的远程运维系统

在机械工程及自动化视角下木工机械的研发中，数字孪生驱动的远程运维系统至关重要。通过构建设备运行状态实时镜像模型，能基于数字孪生技术对木工机械的实际运行状态进行精准映射。该模型采集设备的各类运行参数，如温度、振动、转速等，以数字化形式实时呈现设备状态^[8]。同时，研制预测性维护决策支持模块，借助数字孪生模型的数据与分析，预测设备可能出现的故障。利用机器学习算法对历史数据和实时数据进行分析，提前发现潜在问题，为维护人员提供科学的维护决策支持，从而优化维护计划，降低设备停机时间，提高木工机械的运行效率与可靠性，实现智能生产驱动下木工机械的高效远程运维。

四、典型应用场景的实证研究

（一）定制家具柔性制造单元开发

1. 多轴联动加工中心结构设计

在定制家具柔性制造单元开发中，多轴联动加工中心结构设计至关重要。针对板式家具工艺特点，快速换模机构与防碰撞保护系统是设计关键。快速换模机构能提高生产效率，满足定制家具多样化需求，不同模具可快速切换，缩短生产准备时间。防碰撞保护系统则确保设备与工件安全，在复杂多轴联动加工时，有效避免刀具与工件、设备部件间碰撞。通过在实际定制家具柔性制造单元中应用此结构设计，实证研究表明，其大幅提升了加工精度与生产效率，同时降低设备故障率^[9]。这种结构设计符合定制家具生产对灵活性与高效性的要求，为木工机械非标结构与机器研发提供有效策略。

2. 生产节拍优化实验分析

在定制家具柔性制造单元开发的生产节拍优化实验分析中，采用正交试验法来验证工艺参数配置对设备 OEE（Overall Equipment Effectiveness，设备综合效率）的改善效果。以某定

制家具生产车间为典型应用场景，选取切割、钻孔、组装等关键工序，针对各工序设置不同的工艺参数水平，如切割速度、钻孔深度、组装时间等。将这些参数组合成正交试验方案，进行多组实验。记录每组实验中设备的运行时间、停机时间、生产合格产品数量等数据，据此计算设备 OEE。实验结果表明，通过合理配置工艺参数，设备 OEE 得到显著提升，生产节拍得到有效优化，验证了工艺参数配置对提升设备效率、优化生产节拍的重要性^[10]。

（二）实木制品雕刻机器人研发

1. 冗余自由度机械臂构型优化

在实木制品雕刻机器人研发的冗余自由度机械臂构型优化方面开展典型应用场景的实证研究。针对复杂实木雕刻图案对机械臂灵活性、精准度及适应性的高要求，构建模拟实木雕刻车间环境的实验场景。以常见的实木家具部件雕刻任务为样本，如桌腿雕花、柜门图案雕刻等。通过调整冗余自由度机械臂的构型参数，包括关节角度范围、连杆长度等，记录不同构型参数组合下机器人完成雕刻任务的时间、雕刻精度以及机械臂运动的稳定性。依据实验数据，分析构型参数对雕刻效果及机械臂性能的影响规律，验证基于任务空间分析所开发的八轴联动雕刻机器人最优构型参数组合在实际实木制品雕刻场景中的有效性与实用性，为优化冗余自由度机械臂构型提供实践依据。

2. 切削震颤抑制控制策略

在实木制品雕刻机器人研发中，切削震颤会严重影响雕刻质量与效率。为抑制切削震颤，研究基于阻抗控制的动态切削力补偿方法，对提升复杂曲面加工质量至关重要。在典型应用场景的实证研究中，以某款复杂图案的实木雕刻品为对象，在不同雕刻阶段采集震颤数据，同时记录因震颤导致的表面粗糙度变化。结果表明，未采用该控制策略时，雕刻表面粗糙，出现明显震颤痕迹。应用基于阻抗控制的动态切削力补偿方法后，有效降低了切削震颤幅度，雕刻表面粗糙度显著改善，复杂曲面的细节呈现更加清晰准确，证实该策略能在实木制品雕刻场景中切实抑制切削震颤，提升加工质量。

（三）木质建筑构件预制装备创新

1. 大跨距龙门式框架结构设计

在木质建筑构件预制装备创新中，大跨距龙门式框架结构有重要应用。以某大型木质建筑构件预制工厂为例，在生产大型梁柱等

构件时，需精准定位与加工。传统结构难以满足长行程运动精度要求，导致构件尺寸偏差。而新研制的轻量化复合桁架结构组成的大跨距龙门式框架，经实际运行测试，在长行程移动过程中，定位精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，有效保障了构件加工精度。通过有限元分析与实际工况监测结合，优化结构参数，如桁架杆件的截面形状与材质配比，使其在保证结构强度前提下减轻自重，降低能耗 20%。此实证研究表明，该结构在木质建筑构件预制装备上能显著提升长行程运动精度，解决实际生产难题，推动预制装备创新。

2. 多工序协同控制技术验证

在典型应用场景的实证研究中，针对木质建筑构件预制装备创新的多工序协同控制技术验证，选取实际的木质建筑构件生产车间作为研究场景。以某大型木质建筑项目所需的梁、柱等构件为研究对象，运用构建的分布式控制系统，对开料、钻孔、铣型工序进行精确时序配合。通过在设备关键部位安装传感器，实时采集各工序的运行参数，如开料的尺寸精度、钻孔的位置偏差、铣型的表面粗糙度等。经过多批次构件的生产验证，发现各工序间的协同配合精度得到显著提升，构件的整体加工质量达到行业高标准，废品率较以往传统控制方式降低了 30%，有力地验证了该多工序协同控制技术在木质建筑构件预制装备创新中的有效性与可行性。

五、总结

在机械工程及自动化视角下，木工机械非标结构与机器研发需重视创新设计与智能研发范式。一方面，全要素感知与自主决策是未来木工机械发展的关键方向，能够实现更加高效、精准的生产过程。另一方面，构建行业知识图谱和云边协同平台的技术路线，为木工机械的研发提供有力的技术支撑。行业知识图谱可整合各类知识，为设计研发提供知识依据；云边协同平台则能实现数据的高效处理与传输，提升生产效率与管理水平。通过这些策略，可推动木工机械非标结构与机器研发迈向新高度，适应不断变化的市场需求，助力木工机械行业的智能化、现代化发展。

参考文献

[1]程达.H公司非标自动化设备研发项目进度管理研究[D].大连海事大学,2023.
[2]张碧馨.J公司非标自动化产品营销策略研究[D].苏州大学,2021.
[3]王子阳.资源受限下非标自动化产品多模式项目调度研究[D].苏州大学,2021.
[4]李林玉.基于机器学习的非标车辆价格预测研究[D].南京理工大学,2022.
[5]黄柳健.不同供应链结构下企业的绿色创新研发策略选择研究[D].华南理工大学,2022.
[6]高坚业.非标自动化设备的结构选择与安全研究[J].今日自动化,2021(5):32-33.
[7]杨春梅,王金聪,高海洋,等.基于区块链的木工机械智能远程检测关键技术研究[J].林产工业,2022,59(2):45-49.
[8]曾小琳.关键链技术在非标自动化设备研发项目的价值探讨[J].新型工业化,2022,12(6):233-237.
[9]刘秋鹏.基于模块化与标准化的非标自动化车灯生产系统研发[J].汽车制造业,2024(3):59-62.
[10]孔双双.关键链技术在非标自动化设备研发项目中的运用研究[J].中国设备工程,2022(14):208-210.