

网络制造环境下数控车床加工工艺优化研究

丁 航 孙晓燕 刘荣来

济南大学机械学院 山东济南 250022

摘 要：随着制造业的数字化、智能化转型步伐加快，网络制造逐渐成为推动数控加工工艺优化的重要技术支撑。数控车床作为机械制造中最具代表性的基础设备之一，其加工效率、精度及智能化水平直接关系到企业的竞争力。本文以网络制造环境为背景，分析了数控车床加工工艺在信息化、协同化和智能化条件下的优化路径。通过探讨网络制造平台的体系结构、信息交互机制和智能优化算法在工艺设计与过程控制中的应用，提出基于数据驱动的加工参数优化与动态调度策略。研究结果表明，网络制造条件下的工艺优化可显著降低加工成本、提高设备利用率并增强工艺柔性，为数控加工的高质量与智能化发展提供了有力支撑。

关键词：网络制造；数控车床；工艺优化；智能制造；数据驱动

引言

制造业的全球化竞争和智能化升级使得传统数控加工方式面临效率、精度与资源协同等多重挑战。网络制造作为新一代信息技术与制造技术融合的产物，正推动制造体系由单机运行向网络协同演化。其核心在于通过互联网、物联网及云计算技术，实现制造资源的共享与动态优化配置，从而在更大范围内实现生产要素的协同与价值最大化。本文结合网络制造的体系特征，对数控车床加工工艺优化的关键环节进行系统研究，旨在为制造企业的数字化转型提供参考。

一、网络制造环境下的数控加工特征分析

（一）网络制造的体系结构与运行模式

网络制造（Networked Manufacturing）是信息化与制造业深度融合的产物，是智能制造的重要实现路径。其核心理念是以网络通信为基础，通过制造资源的虚拟化、服务化和智能化，实现跨地域、跨企业的资源动态配置与协同生产。网络制造体系通常由资源层、网络层、应用层和控制层四个部分构成。

资源层是系统的物理基础，涵盖数控机床、机器人、传感器、控制系统、物流设备以及生产管理软件等。这一层的任务是提供可被虚拟化、可调用的制造资源，为上层提供数据与服务支撑。网络层则通过工业互联网、5G通信和物联网技术，实现制造资源的互联互通与实时

数据传输，构建起一个开放、可扩展的制造网络。应用层是系统的“智能中枢”，包括制造云平台、调度管理系统、数据分析与优化模块，负责生产计划的智能生成、任务分配及工艺优化。控制层则承担着系统的协调与监控功能，通过嵌入式算法与智能控制技术，对设备运行状态、加工质量、能源消耗等进行实时监测与动态调整。

这种体系结构使制造过程由传统的线性、封闭模式转变为开放、协同的网络模式。各设备不再独立运行，而通过网络实现数据共享和任务协同，进而构建柔性化、智能化的制造生态系统。

（二）数控车床加工在网络环境下的变化

在网络制造模式下，数控车床的角色由“独立加工单元”转变为“网络节点”，成为智能制造系统中的重要执行终端。通过嵌入传感器与通信模块，数控车床能够实时采集主轴负载、刀具磨损、切削温度、振动信号等运行数据，并将其上传至云端平台。这些数据经由云计算与人工智能算法分析后，能够实现工艺参数的动态优化。例如，系统可根据刀具磨损程度自动调整切削深度和进给速度，以延长刀具寿命并提升表面质量。

此外，网络环境下的数控车床可与其他加工设备、检测仪器、物流系统实现多机协同加工。当某台设备故障或维护时，系统可自动重新分配任务，确保生产连续性与资源利用最大化。通过这种智能调度，生产过程的柔性化和稳定性显著提高。同时，设备运行数据被实时记录，为后续的设备健康管理（PHM）、能耗分析和工艺追溯提供了重要依据，实现从“经验管理”向“数据驱动决策”的转变。

作者简介：丁航（1978.11-）女，汉，山东，研究生，实验师，研究方向：机械工程及网络制造。

在教学与培训中，网络化数控系统还可实现远程监控与虚拟操作，学生和技术人员可通过云平台了解设备运行状态、分析加工参数、模拟工艺调整，从而提升实践教学的智能化与互动性。

（三）网络制造对工艺优化的促进作用

网络制造的最大优势在于实现制造信息的互通共享与智能决策优化。通过对设备运行、工艺参数、生产调度等多源数据的集成与分析，系统能够识别传统工艺设计中的瓶颈问题，促进从“经验导向”向“数据驱动”的科学优化转变。例如，通过分析不同工件材料、刀具类型与切削参数间的关联规律，系统可以自动推荐最佳工艺参数组合，提高生产效率与产品一致性。

借助人工智能与机器学习算法，网络制造平台能够对加工过程进行实时监控与异常识别，提前预测可能的设备故障或加工偏差，执行自适应控制或智能修正。这种主动式优化机制显著提升了工艺的稳定性与产品的精度。同时，网络制造平台还可实现工艺知识的积累与共享，形成企业级乃至行业级的知识库与案例库。教师、工程师或操作人员可通过云端访问典型工艺案例，获取最佳实践经验，实现知识的复用与传承。

二、网络制造环境下的数控工艺数据管理与分析

（一）工艺数据采集与集成机制

工艺数据是实现工艺优化与智能决策的基础资源。网络制造环境下，数控机床通过嵌入式多源传感器与智能监测模块，对生产过程中关键参数进行实时采集，包括主轴转速、进给速度、切削力、刀具温度、振动信号以及加工环境温湿度等信息。这些数据经由工业以太网或5G通信网络传输至数据中心，实现对设备状态和工艺过程的全方位监控。为了实现数据共享与互操作，系统需建立统一的数据标准和接口规范，确保不同品牌与型号设备间的数据兼容与互联。

在数据集成层面，工艺数据不仅与制造执行系统（MES）对接，还需与企业资源计划系统（ERP）和产品生命周期管理系统（PLM）相融合，构建覆盖设计、加工、检测、物流等环节的全流程数据链。通过建立工艺数据库与知识图谱，可实现工艺经验的数字化沉淀与可视化管理，打通从生产现场到管理决策的“数据孤岛”。这种集成机制使得企业能够实时掌握设备健康状态、加工质量与生产进度，为后续的工艺分析、预测性维护及优化决策提供坚实的数据支撑。

（二）基于数据驱动的工艺分析与优化

在网络制造条件下，工艺优化正由传统的“经验驱

动”向“数据驱动”转变。通过引入大数据分析、机器学习与人工智能算法，系统可从海量加工数据中挖掘规律，识别影响加工质量与效率的关键变量。例如，利用多元回归分析可揭示切削参数与表面粗糙度之间的定量关系；采用神经网络算法可构建刀具磨损预测模型，动态评估刀具寿命与更换时机。系统在运行过程中不断学习历史数据，优化模型精度，实现对复杂工况的自适应调整。

当实时监测数据与模型预测值出现偏差时，系统可自动修正工艺参数，如调整转速、进给率或切削深度，以维持加工质量的稳定。这种闭环控制机制不仅提高了工艺鲁棒性，还显著减少了人工干预和试错成本。

此外，基于大数据的能耗与设备运行分析还能揭示生产过程中的潜在低效环节，指导企业优化工艺路径与资源配置。例如，通过能耗模型评估不同加工策略的能源使用情况，企业可在保证质量的前提下降低能耗，实现绿色制造与降本增效。

综上所述，数据驱动的工艺分析与优化机制，使制造过程具备了“感知—分析—决策—反馈”的自循环能力，不仅提升了加工精度与生产效率，也为网络制造向智能化、柔性化方向发展奠定了坚实基础。

三、数控车床加工工艺优化的关键技术研究

（一）基于人工智能的工艺参数优化

在网络制造环境中，人工智能（AI）算法已成为工艺优化的关键支撑技术。传统数控加工中，工艺参数（如主轴转速、进给速度、切削深度等）往往依赖工程师的经验设定，难以应对复杂多变的工况。而人工智能算法则能够在多目标、多约束条件下实现参数的全局优化。例如，利用遗传算法（GA）和粒子群优化算法（PSO），系统可在加工精度、刀具磨损与切削效率之间寻求最优平衡，实现工艺参数的动态调整。

强化学习（RL）模型在此过程中发挥了自学习与自适应能力的优势。通过持续接收加工过程中的实时反馈（如表面粗糙度、温度变化、振动信号等），系统能够不断更新优化策略，使数控机床在复杂零件加工中始终保持最佳状态。实践表明，基于AI的工艺优化能显著减少试切次数，降低人工调试时间，提升设备利用率和生产节拍，从而实现从“经验设定”向“智能决策”的根本性转变。

（二）加工路径与刀具轨迹优化

加工路径与刀具轨迹的设计直接影响到零件表面质量、加工效率与能耗水平。在网络制造平台的支持下，系统可结合CAD/CAM模型与实际工艺数据，利用算法

自动生成最优路径规划。通过三维仿真与虚拟加工分析,系统能提前识别可能出现的过切、刀具干涉或残留区域,并在加工前自动修正路径,从而减少报废风险,提高产品合格率。

在路径规划过程中,算法综合考虑刀具负载均衡、运动平滑性和机床动态性能,优化刀具的进给轨迹,减少空程时间与无效运动。针对高速切削与复杂曲面加工,系统可结合动态补偿与误差预测模型,实时修正因振动、热变形或刀具磨损引起的误差,实现高精度加工。此类智能路径优化不仅提升了设备运行稳定性,还显著延长了刀具寿命,降低了整体制造成本。

(三) 基于云计算的工艺知识共享与学习

网络制造的另一核心特征是“知识共享与协同学习”。依托云计算平台,企业可建立工艺知识数据库,对不同零件结构、材料类型、加工设备及参数设置等信息进行结构化管理。系统将历史生产数据与优化经验以知识单元的形式存储在云端,形成可复用的工艺知识图谱。

通过云端机器学习与案例推理(CBR)机制,系统能够自动从大量历史数据中提取规律,生成针对新任务的智能推荐方案。例如,当用户上传新的零件模型时,系统会自动匹配相似案例,提供最优切削参数、刀具选择及加工路径建议。这不仅提高了工艺设计与决策效率,也实现了经验的数字化传承与共享。

同时,不同企业、院校与研发机构可通过云平台共享工艺案例,实现多方协同优化与持续学习。这种开放式的知识生态极大地促进了制造资源的标准化与智能化重构,使网络制造从单一的生产模式升级为具备“学习、优化与演化”能力的智能系统。

四、网络协同与过程控制的实现路径

(一) 智能调度与协同控制机制

网络制造条件下的工艺优化离不开智能调度系统的支持。系统通过实时获取设备状态、任务进度和资源占用情况,实现加工任务的动态分配与负载均衡。当某台设备出现异常时,系统可自动重排任务或切换加工单元,保证生产连续性。协同控制机制使不同车间、不同设备间的信息互通,实现跨区域制造资源的协作。通过多智能体系统(MAS)技术,各设备节点在网络中自主协同,形成分布式决策体系,提高生产响应速度与柔性。

(二) 工艺过程监控与质量反馈系统

过程监控是保障工艺优化成果稳定实施的重要手段。系统通过视觉检测、声发射监测与力信号分析,实时识别刀具磨损、工件变形等问题。数据经网络传输至云端分析模块后,生成质量反馈报告,为后续工艺调整提供依据。通过建立加工质量的在线追踪机制,企业可实现“加工—检测—优化”的闭环控制,大幅提升质量一致性与可追溯性。

结语

网络制造为数控车床加工工艺的优化提供了全新的技术平台与发展路径。通过信息互联、数据共享与智能决策,制造过程由静态经验型向动态数据驱动型转变,工艺优化实现了科学化与实时化。研究表明,基于网络制造的工艺优化不仅提升了加工效率与质量,还在资源配置、能耗控制及设备维护等方面展现出显著优势。未来的发展应聚焦三方面:一是深化人工智能与数字孪生技术的融合,实现虚实结合的工艺仿真与预测优化;二是完善制造云平台的标准化建设,推动工艺数据跨企业共享;三是强化安全管理与信息防护,为网络制造体系提供可靠保障。随着工业互联网的持续演进,网络化、智能化的数控加工将成为制造业转型升级的重要方向,为建设现代化工业体系奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 吴峰, 才裕生, 李琪. 数控车床在石油化工设备零件加工中的精度提升研究[J]. 中国机械, 2024, (35): 56-59.
- [2] 王有吉. 数控车床加工中螺纹切削技术的误差控制研究[J]. 中国机械, 2024, (35): 64-67.
- [3] 刘振利. 数控车床双工序加工夹具设计应用及找正方法[J]. 世界制造技术与装备市场, 2024, (06): 62-64.
- [4] 黄宏班, 陈德志, 黄振金. 采用数控车床加工双线梯形螺纹的方法研究[J]. 南方农机, 2024, 55(23): 161-164.
- [5] 胡万超. 数控车床加工过程中切削参数对表面粗糙度的影响[J]. 农机使用与维修, 2024, (11): 107-109. DOI: 10.14031/j.cnki.njwx.2024.11.028.