

The Application of Mechanical Automation in CNC Machine Tool

Nan Li

General Technology Group Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd. Shenyang Branch, Shenyang, Liaoning, 110023, China

Abstract

The application of mechanical automation technology in the field of CNC machine tools is deepening, and has become a key factor to improve processing efficiency and product quality. This paper systematically analyzes the application status of automatic transformation of CNC machine tools, automatic loading and unloading system, online detection and adaptive control, and focuses on the intelligent development trend of remote monitoring, intelligent scheduling and predictive maintenance based on cloud platform. At the same time, the system composition, control architecture, data analysis and human-machine collaboration and other key technologies of the flexible automatic production line are deeply studied, which provides reference and reference for manufacturing enterprises to realize intelligent transformation.

Keywords

CNC machine tool; mechanical automation; on-line testing; adaptive control; flexible production line

机械自动化在数控机床中的应用探讨

李楠

通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司，中国·辽宁 沈阳 110023

摘要

机械自动化技术在数控机床领域的应用不断深化，已成为提升加工效率和产品质量的关键因素。论文系统分析了数控机床自动化改造、自动上下料系统、在线检测与自适应控制等技术的应用现状，重点探讨了基于云平台的远程监控、智能调度和预测性维护等智能化发展趋势。同时，深入研究了柔性自动化生产线的系统构成、控制架构、数据分析和人机协作等关键技术，为制造企业实现智能化转型提供参考和借鉴。

关键词

数控机床；机械自动化；在线检测；自适应控制；柔性生产线

1 引言

《中国制造 2025》明确提出要加快推进制造业数字化、网络化、智能化发展。作为先进制造业的重要装备，数控机床的自动化水平直接影响着产品质量和生产效率。近年来，随着传感技术、控制技术和网络技术的快速发展，机械自动化在数控机床领域的应用不断创新，从单机自动化向系统集成化、智能化方向演进。

2 机械自动化在数控机床中的应用

2.1 数控机床自动化改造

数控机床的自动化改造是实现机械加工智能化、高效化的重要途径。通过在数控系统中集成先进的传感技术、伺

服驱动技术和智能算法，可以显著提升机床的加工性能和自动化水平。例如，应用高分辨率编码器和直线度反馈装置，实现机床进给轴的纳米级定位和闭环控制，提高机床定位精度和重复定位精度；使用谐波减速器和力矩电机直接驱动技术，大幅提升主轴转速和加工效率；引入多轴联动控制算法、样条曲线插补算法等，优化刀具路径，削减非切削时间，缩短产品的加工周期^[1]。同时，数控机床的自动化改造还体现在对加工过程的智能监控与自适应控制。通过振动传感器实时监测主轴和刀具的振动频谱特征，判断切削状态的稳定性；利用机器视觉和激光雷达等方法动态跟踪刀具磨损，自适应调整切削参数，避免因刀具磨损过度导致的工件报废；通过嵌入知识库和专家系统，实现工艺参数的智能优化，减少对操作者经验和技能的依赖。

2.2 机床自动上下料系统

2.2.1 串联式

串联式机床自动上下料系统通过将多台数控机床串联

【作者简介】李楠（1984-），女，满族，中国辽宁抚顺人，本科，工程师，从事机械工程及自动化研究。

连接, 配备可沿轨道移动的物料台车, 实现工件在各加工单元间的自动流转。上料站将毛坯料装夹到托盘上, 再由物料车将托盘顺次送入各加工单元。数控机床通过机械手或上下料机构将工件从物料车上取下, 完成加工后再将其放回。全部加工完成后, 下料站将成品从托盘上卸下并转移至下道工序^[2]。该系统结构简单, 设备投入相对较低, 但缺乏灵活性, 适用于中小批量、加工工序较为固定的场合。当需要调整产品型号时, 整个生产线需停机换线, 设备利用率有待进一步提高。

2.2.2 并联式

并联式机床自动上下料系统采用中央物料库与多台数控机床并行连接的布局方式, 通过 AGV 小车或轨道式机器人实现工件的柔性配送。系统配备立体料库用于存储不同规格的毛坯和成品, 料库与各机床工作站之间设有缓存工位。当机床发出上料请求时, 系统根据加工任务和工序要求, 从料库中调取相应毛坯, 经由物流通道送至目标机床。同时, 机床完成加工后的工件可独立下料并运送至下一工序或成品库, 互不干扰。这种并行作业模式显著提高了设备利用率, 且可根据订单需求灵活调配加工资源, 实现多品种、小批量的柔性生产。系统通过配置可编程控制器和调度软件, 对物料运输、机床状态、加工进度等实施统一管理, 确保生产高效稳定运行。

2.2.3 工件库

工件库是数控机床自动化生产的核心缓存单元, 主要由立体货架、堆垛机和出入库输送系统构成。货架采用模块化设计, 可根据工件种类灵活配置不同规格的托盘位。堆垛机采用高精度伺服驱动, 配备防碰撞和定位校准装置, 确保工件安全、准确存取。系统设置双向缓存区, 实现工件入库预处理和出库分拣, 有效解决生产节拍与物流配送不匹配的问题。工件库通过实时监控各存储单元状态, 动态优化存取路径, 缩短响应时间^[3]。同时, 系统建立工件信息管理数据库, 记录每件产品的加工历程、质检数据和库存信息, 为生产计划制定和产能评估提供数据支撑, 是打造智能制造单元的重要支撑设施。

2.3 在线检测与自适应控制

2.3.1 动态测量

动态测量技术通过在数控机床上集成多类型传感装置, 实现加工过程关键参数的实时监测。主轴单元配备测温传感器和振动加速度计, 监控轴承温升和振动特性; 进给轴安装高精度光栅尺和角度编码器, 实现位移和速度的闭环反馈。刀具状态监测采用声发射传感器和电流检测, 捕捉切削力变化和功率波动。工件尺寸测量则利用接触式测头和激光扫描仪, 获取加工表面轮廓数据。这些测量数据经过滤波处理和特征提取后, 输入控制系统进行分析比对。当测量参数偏离设定范围时, 系统根据内置的补偿模型自动调整加工参数, 如进给速度、主轴转速等, 确保加工精度和表面质量始终处

于最佳状态^[4]。

2.3.2 刀具磨损检测

刀具磨损检测采用多源信息融合方案, 通过整合光学、力学和电学信号实现刀具状态评估。系统在刀具架上布置高速 CCD 相机, 捕捉刀具前后刀面的微观磨损形貌; 在刀柄处安装三向测力仪, 监测切削力的动态变化规律; 主轴电机的功率信号则反映切削负载水平。这些检测信号经过噪声抑制和数据同步后, 输入评估模型进行特征融合。系统建立刀具寿命数据库, 记录不同材料、不同工艺条件下的磨损演变过程, 用于预测剩余使用寿命。当检测到刀具磨损超过阈值时, 系统自动发出预警信号, 并根据加工任务紧急程度决定是否进行刀具更换, 有效避免因刀具过度磨损造成的工件质量波动。

2.3.3 自适应切削参数优化

自适应切削参数优化基于多目标决策原理, 通过建立加工效率、表面质量和刀具寿命的综合评价模型, 实现切削参数的动态调整。系统采集主轴电流、切削力、振动等过程信号, 结合工件材料特性和加工质量要求, 构建切削参数与加工性能的映射关系。在粗加工阶段, 系统以最大材料去除率为目标, 通过调节每齿进给量和切削深度, 在保证加工稳定性的前提下提高加工效率。精加工过程则重点优化表面粗糙度, 系统根据振动信号特征动态调整主轴转速, 避开加工系统的固有频率, 抑制切削颤振。同时, 采用自学习算法不断更新工艺参数库, 积累优化经验, 提升参数调整的准确性。

2.4 智能化与网络化

2.4.1 基于云平台的远程监控

基于云平台的远程监控系统构建了数控机床运行状态的实时感知与分析体系。各机床工作站通过以太网接入监控平台, 上传设备运行参数、加工状态和报警信息。云平台设置多级数据缓存机制, 确保海量设备数据的高速读写。系统采用分布式计算架构, 对生产数据进行实时分析和可视化展示, 包括设备开动率、故障分布、能耗水平等关键指标。操作人员可通过移动终端远程查看机床运行状况, 及时处理异常情况。平台还建立了设备健康评估模型, 通过分析历史运行数据预测潜在故障, 制定预防性维护计划, 有效降低设备非计划停机时间, 提升产线稼动率, 如图 1 所示。



图 1 基于云平台的远程监控

2.4.2 智能化调度与排产

智能化调度与排产系统基于约束满足理论,结合订单交期、设备产能和工艺要求建立多维度优化模型。系统按照产品族对订单进行分类,评估各工序加工时间和设备负荷状况,生成初始排产方案。在实际生产过程中,系统通过实时采集工序进度和设备状态信息,动态调整作业计划。当出现紧急插单、设备故障等扰动因素时,系统根据任务优先级和工艺路线灵活性,快速重构生产计划,确保关键订单按期交付。同时,系统对历史排产数据进行挖掘分析,总结不同产品组合的最优调度策略,不断提升计划执行效率,实现生产资源的均衡利用和产能的最大限度发挥。

2.4.3 机床预测性维护

预测性维护系统通过分析机床关键部件的性能退化规律,实现故障预警和维护决策。主轴系统采集温度、振动和电流信号,构建轴承寿命预测模型;进给系统监测丝杠副和导轨的位置误差和背隙变化,评估机械传动精度;冷却系统记录油温、压力和流量数据,判断润滑效果。系统建立各部件的健康指标体系,设定预警阈值,当性能指标出现异常趋势时提前发出预警。维护计划根据部件状态和生产任务制定,在保证设备可靠性的同时降低维护成本。通过积累维护经验和故障案例,系统不断完善预测模型的准确性,提升维护效率和设备使用寿命。

3 机械自动化在自动化生产线中的应用

3.1 柔性自动化生产线构成

柔性自动化生产线由加工单元、物流系统、质检站和中央控制系统有机组成。加工单元包含多台数控机床,配备工件快换系统和刀具管理系统,可根据产品需求灵活切换工艺。物流系统采用AGV小车和机器人组成的混合传输网络,实现原料、半成品和成品的定向配送。质检站配置三坐标测量仪和轮廓检测仪,对关键工序实施全检或抽检。中央控制系统负责协调各单元运行,处理工艺数据和质量信息,动态调整生产节拍。系统设置缓存工位和备用设备,能够快速响应工艺变更和设备故障,保证生产线连续稳定运行。

3.2 生产线自动化控制系统

生产线控制系统采用分层分布式架构,实现从现场设备到管理层的纵向集成。底层控制网络通过现场总线连接各执行机构和传感器,实时采集工艺参数和设备状态。中间层设置多台工业控制器,负责单元级的运动控制和工艺协调,执行加工程序和物料调度。管理层部署生产执行系统,对接企业资源规划平台,完成订单分解和资源调配。系统采用冗

余设计确保关键控制节点的可靠性,配置工业防火墙保障网络安全。通过建立统一的数据交换标准,实现不同厂家设备的互联互通,支持生产线的横向扩展和产能提升。

3.3 产线数据采集与分析

产线数据采集与分析系统通过部署多层次数据采集节点,构建生产过程的完整数据链。现场层采用高速数据采集模块,捕获设备运行参数、工艺数据和质量信息。系统建立统一的数据模型,对原始数据进行清洗、分类和标准化处理,形成结构化数据库。分析引擎从设备效率、质量控制、能源消耗等维度展开深度分析,生成各类统计报表和趋势图表。通过关联分析发现工艺参数、设备状态与产品质量之间的内在关系,为工艺优化提供依据。系统还建立产线运行效率评价体系,识别产能瓶颈,指导产线改进和升级方向。

3.4 人机协作与交互

人机协作系统通过融合视觉定位、力反馈控制等技术,实现操作人员与自动化设备的安全高效配合。系统在关键工位设置协作机器人,配备多模态传感器和安全防护装置,能够感知人员位置和动作意图。操作界面采用分级授权机制,为不同岗位人员提供相应的操作和管理功能。通过直观的图形化界面展示设备状态和工艺参数,支持手势和语音等自然交互方式。在复杂工序和异常处理时,系统可根据现场情况切换手动或自动模式,由操作人员介入处理。同时建立标准作业指导书数据库,为操作人员提供实时指导,确保工艺规范执行。

4 结语

机械自动化技术的深入应用为数控机床和自动化生产线带来了显著提升。通过自动上下料系统提高了设备利用率,在线检测与自适应控制确保了加工质量,智能化与网络化则实现了生产过程的高效协同。未来,随着新一代信息技术的发展,机械自动化将向更高层次演进,推动制造业向数字化、网络化、智能化方向转型升级。

参考文献

- [1] 廖丰政.机械自动化的技术要点与数控技术应用[J].时代汽车,2023(23):19-21.
- [2] 李鸿源.机械自动化在数控机床中的应用[J].黑龙江科学,2022,13(8):162-164.
- [3] 吕甜甜.人工智能在机械自动化领域的应用分析[J].中国设备工程,2021(23):22-23.
- [4] 杨啟鑫.数控铣床金属构件加工工艺机械自动化控制技术研究[J].内燃机与配件,2021(18):117-118.