

基于工业4.0的机床自动化改造与升级策略研究

徐军峰¹ 殷俊² 张伟民³

1. 宁波海天精工股份有限公司 浙江 宁波 317600
2. 宁波海天精工股份有限公司 浙江 宁波 317600
3. 宁波海天智联科技有限公司 浙江 宁波 317600

摘要: 本文聚焦工业4.0背景下机床自动化改造与升级策略。阐述工业4.0核心技术体系及对机床自动化新要求,分析企业生产现状,明确自动化改造目标与指标,并依据重要性排序改造需求。探讨改造技术选型,涵盖数控系统升级、工业机器人应用、传感器与检测技术、网络通信技术。研究系统集成与优化策略,包括架构设计、数据采集分析、系统优化。研究旨在为企业 提供机床自动化改造的全面指导,助力制造业向智能化、网络化、柔性化转型。

关键词: 工业4.0; 机床自动化; 改造; 升级策略

1 工业 4.0 与机床自动化概述

工业4.0与机床自动化如图所示

1.1 工业4.0的核心技术体系

工业4.0以“智能工厂”与“智能生产”为两大支柱,构建了以物联网(IoT)、大数据、云计算、人工智能(AI)、数字孪生、5G通信等新一代信息技术为核心的融合生态。其核心技术体系可归纳为三大维度:数字化与互联互通,通过传感器、RFID、边缘计算等技术实现设备、产品、人员的全要素连接,形成实时数据采集与交互网络;智能化与自适应控制,依托AI算法与机器学习模型,实现生产过程的动态优化、预测性维护与自主决策;柔性化与定制化生产,通过模块化设计、虚拟仿真与云端协同,满足小批量、多品种、个性化需求的快速响应能力^[1]。

1.2 工业4.0对机床自动化的新要求

在工业4.0背景下,机床自动化正从“单机自动化”向“网络化协同”与“智能化决策”演进,具体体现为以下五方面新要求:(1)全生命周期数据贯通。机床需集成从设计、加工到运维的全流程数据接口,支持数字孪生技术的实时映射与仿真验证;(2)动态自适应加工能力。基于AI的加工参数优化算法,需使机床能够自主识别工件材质、刀具状态及环境变量,实时调整加工策略;(3)云端协同与资源调度。通过工业互联网平台,实现机床与上下游设备、物流系统的无缝对接,支持远程监控与跨企业资源调度;(4)安全可信的自主运行。在开放网络环境下,机床需具备抵御网络攻击的能力,并符合功能安全(ISO13849)与信息安全(IEC62443)标准;(5)人机共融的交互模式。通过增强现实(AR)、自然语言处理(NLP)等技术,构建直观易用

的操作界面,降低对高技能工人的依赖。

2 工业 4.0 的机床自动化改造需求分析

2.1 企业生产现状

在当下工业4.0浪潮逐步席卷的大环境中,许多企业仍处于传统机床生产模式主导的阶段。现有的机床设备多为基础型号,自动化程度偏低。大量生产环节依赖人工操作,从零件的上料、加工参数的手动调整,到加工完成后的卸料,整个流程需要工人全程紧密监控与频繁干预。这种生产模式导致生产效率较为低下,以某机械制造企业为例,单批次零件加工周期相较于行业内自动化程度较高的企业延长了30%-50%。人工操作的一致性难以保障,产品质量波动明显^[2]。据企业内部质量检测数据显示,因人为操作因素导致的产品次品率高达8%-12%。在人力成本方面,由于需要大量人工参与生产,人力成本在企业总成本中占比达35%-40%,且随着劳动力市场供需变化,人力成本呈逐年上升趋势,严重压缩了企业的利润空间。

2.2 自动化改造目标与指标

2.2.1 生产效率提升目标

通过机床自动化改造,期望能大幅缩短零件加工周期。具体指标为在改造完成后的一年内,将单批次零件加工时间缩短40%-50%。引入自动化上下料系统,实现机床加工过程的无缝衔接,减少人工上下料等待时间,使机床实际加工时间占比从当前的40%-50%提升至70%-80%。借助自动化生产线的集成,实现多台机床协同作业,进一步提高整体生产效率,预计生产线整体产能提升50%-60%。

2.2.2 产品质量优化目标

降低产品次品率是自动化改造的重要目标之一。利

用自动化控制系统精确控制加工参数,减少人为因素导致的参数偏差,将产品次品率降低至3%~5%。引入先进的在线检测设备,实时监测加工过程中的产品质量,对出现的质量问题及时反馈并调整,确保产品质量的稳定性和一致性,提升企业产品在市场中的竞争力。

2.2.3 成本控制目标

从人力成本来看,通过自动化改造,预计可减少一线操作工人数量30%~40%,相应降低人力成本20%~30%。在设备维护成本方面,采用智能化的设备监控系统,提前预警设备故障,实现预防性维护,降低设备突发故障导致的维修成本,预计设备维修成本降低25%~35%。并且,由于生产效率提升和产品质量改善,单位产品的综合成本预计下降15%~20%。

2.2.4 柔性生产目标

为满足市场日益多样化的订单需求,自动化改造需提升企业的柔性生产能力。实现机床在不同产品型号和工艺之间的快速切换,切换时间从当前的平均2~3小时缩短至30分钟~1小时。通过构建数字化生产管理系统,可对生产任务进行快速编排和调度,使企业能够灵活应对小批量、多品种的生产订单,提高企业对市场变化的响应速度。

2.3 改造需求优先级排序

2.3.1 高优先级需求

自动化上下料系统改造:这是提升生产效率最直接有效的方式。快速实现自动化上下料,能立即减少人工操作时间,提高机床利用率。减少人工频繁接触机床,降低安全风险。若不优先改造,企业在提升生产效率方面将难以取得显著突破,无法满足日益增长的订单交付需求。针对影响产品质量的关键加工工序,如精密零件的铣削、磨削等环节,进行自动化控制升级。通过精确控制加工参数,可直接降低产品次品率,提升产品质量,对企业产品市场口碑和竞争力影响重大。若不及时升级,企业将因产品质量问题面临客户流失风险。

2.3.2 中优先级需求

智能化设备监控系统安装:虽然设备故障不会立即影响生产,但长期来看,突发设备故障会导致生产停滞,造成巨大损失。安装智能化设备监控系统,可提前发现设备潜在问题,实现预防性维护。不过,相较于直接影响生产效率和质量的高优先级需求,其紧迫性稍低。构建数字化生产管理系统有助于提升企业柔性生产能力,优化生产调度。但在企业生产效率和产品质量问题尚未得到较好解决时,该系统发挥的作用有限。且其建设和实施需要一定时间和成本投入,所以列为中优先级。

2.3.3 低优先级需求

非关键辅助设备自动化改造:如零件清洗、包装等非关键辅助设备的自动化改造,对企业核心生产指标提升作用相对较小。在企业资源有限的情况下,可先集中资源解决关键问题,待高、中优先级需求满足后,再考虑此类改造,以进一步完善自动化生产体系。车间环境智能化改善;包括车间照明、温度湿度自动调节等智能化改善,虽然能提升员工工作舒适度和设备运行环境稳定性,但对企业生产效率、质量和成本控制的直接影响不明显,因此列为低优先级需求。

3 工业4.0的机床自动化改造技术选型

3.1 数控系统升级

在机床自动化改造中,数控系统升级是核心环节之一。传统数控系统功能相对单一,难以满足工业4.0对机床高精度、高速度和智能化控制的要求。当前,可选用基于PC架构的开放式数控系统,这类系统具有良好的开放性和扩展性。例如,德国的SINUMERIK840Dsl数控系统,它采用了先进的数字化驱动技术,能够实现多轴联动控制,定位精度可达 $\pm 0.001\text{mm}$,极大地提升了加工精度。其开放性允许用户根据自身需求开发个性化的控制功能,便于与企业的生产管理系统集成^[1]。

3.2 工业机器人应用

工业机器人在机床自动化改造中主要用于上下料、物料搬运以及加工辅助等任务。在上下料环节,关节型工业机器人应用较为广泛。以ABBIRB6640工业机器人为例,它具有较高的负载能力和运动精度,负载可达230kg,重复定位精度为 $\pm 0.08\text{mm}$ 。能够快速、准确地将工件从料库搬运至机床工作台,并在加工完成后将成品搬运至指定位置,大大缩短了上下料时间,提高了机床的利用率。此外,协作机器人也逐渐在机床自动化中崭露头角,如UR10e协作机器人,它可以与操作人员在同一工作空间内协同作业,安全性高,且编程简单,易于部署,适用于一些小批量、多品种生产场景下的机床辅助加工任务,如零件的装配、打磨等。

3.3 网络通信技术

工业4.0强调设备之间的互联互通和数据共享,因此网络通信技术在机床自动化改造中至关重要。目前,工业以太网是机床自动化通信的主流选择,如PROFINET工业以太网。它具有高速、实时性强的特点,传输速率可达100Mbps甚至更高,能够满足机床与数控系统、工业机器人、传感器以及企业管理系统之间大量数据的快速传输需求。通过PROFINET,机床可以实时将加工数据、设备状态等信息上传至企业的制造执行系统(MES),同

时接收来自MES的生产任务和工艺参数等指令,实现生产过程的全面数字化管理。无线通信技术如Wi-Fi和蓝牙也在一些场景中得到应用,用于实现移动设备与机床之间的便捷通信,方便操作人员对机床进行远程监控和调试。

4 工业 4.0 的机床自动化系统集成与优化策略研究

4.1 系统集成架构设计

在工业4.0的机床自动化进程中,合理的系统集成架构设计是基石。一个典型的架构包含设备层、控制层、管理层以及网络层。设备层涵盖了各类机床设备、工业机器人、传感器等基础硬件,它们负责生产操作与数据采集。例如,高精度的数控车床,其定位精度可达 $\pm 0.001\text{mm}$,能满足精密零件加工需求;具备高负载能力的工业机器人,负载能力可达230kg,可快速搬运大型工件,二者协同工作,完成复杂零件的加工与搬运。控制层则通过先进的数控系统、可编程逻辑控制器(PLC)等,对设备层的运行进行精准调控。像西门子的SINUMERIK数控系统,能够依据预设程序,实现对机床多轴运动的精确控制,其控制精度可达 $\pm 0.0001\text{mm}$,确保加工精度。管理层由制造执行系统(MES)、企业资源计划系统(ERP)等构成,主要承担生产计划制定、任务分配以及数据分析等职能,实现生产流程的全局把控。据统计,引入MES系统后,企业生产计划完成率平均可提升20%~30%。网络层至关重要,它利用工业以太网、无线通信等技术,将各层设备与系统紧密相连,工业以太网传输速率可达100Mbps甚至更高,保障数据的高速、稳定传输,达成设备间的互联互通与信息共享,为智能化生产奠定坚实基础。

4.2 数据采集与分析

数据采集是机床自动化系统智能化的源头。在机床运行过程中,各类传感器发挥关键作用。位移传感器可实时监测机床工作台的位置,分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$;力传感器能精准测量切削力大小,测量精度可达0.1%FS;温度传感器则负责采集机床关键部位的温度数据等。这些传感器将采集到的大量原始数据,通过数据采集卡或工业网关,传输至数据处理中心^[4]。数据采集需确保准确性、实时性与完整性。在数据采集后,便是深入的数据分析

环节。运用大数据分析技术、机器学习算法等,对采集的数据进行挖掘。还可利用数据分析设备运行状态,预测设备故障,实施预防性维护,据相关研究,采用预防性维护策略可减少设备停机时间30%~50%,提高生产效率。

4.3 系统优化策略

系统优化策略旨在提升机床自动化系统的整体性能。从硬件角度,定期对机床设备进行维护与升级,更换老化零部件,采用新型材料制造的刀具,如陶瓷刀具可使切削速度提高30%~50%,提升机床的加工精度与效率。在软件方面,持续优化数控系统的控制算法,提高其响应速度与控制精度。从生产流程来看,运用精益生产理念,优化生产布局,减少物料搬运距离,合理安排生产任务,据实践经验,可降低生产周期15%~30%。加强系统的可靠性与安全性设计,通过冗余技术确保系统在部分设备故障时仍能正常运行,采用加密技术保障数据传输与存储的安全,全方位提升机床自动化系统在工业4.0环境下的竞争力。

结束语

本文围绕这一主题展开深入研究,从现状分析到策略制定,为企业在机床自动化改造中提供了系统性的思路与方法。通过合理的技术选型与系统集成优化,企业能够显著提升生产效率、产品质量与柔性生产能力,降低成本,增强市场竞争力。未来,随着技术的不断进步,机床自动化将迈向更高水平,为制造业的转型升级注入强大动力,推动制造业实现高质量发展。

参考文献

- [1]程恒超,杨鑫.非标自动化设备设计中的标准化技术应用[J].集成电路应用,2024,41(01):100-101.
- [2]容刚.谈非标自动化机械设备的設計[J].装备机械,2023,(04):60-62.
- [3]王志刚,刘伟.智能制造背景下机械制造生产线持续改进策略研究[J].机械工程与自动化,2020,38(2):45-48.
- [4]李伟.工业4.0与智能制造技术研究[J].制造技术与自动化,2021,39(2):123-129.