

智能制造背景下机电加工生产线的自动化改造关键技术研究

葛晓炜¹ 汤杭东² 严康²

1. 浙江英洛华装备制造有限公司 浙江东阳 322100

2. 浙江联宜电机有限公司 浙江东阳 322100

摘要: 在智能制造技术迅猛发展的产业变革背景下, 机电加工生产线作为制造业实现精密化、高效化生产的核心载体, 其自动化改造已成为提升制造企业核心竞争力的必然路径。本文以机电加工生产线的功能定位为切入点, 系统分析了在智能制造框架下推进生产线自动化改造的战略意义, 重点从感知检测、智能控制、信息集成、柔性制造及数字孪生等方面, 深入研究了支撑自动化改造的关键技术体系。通过剖析各关键技术的技术原理、应用场景及实施要点, 明确了不同技术在生产线改造中的协同作用机制, 为制造企业制定科学合理的自动化改造方案提供理论支撑与实践参考。研究表明, 多技术融合应用是实现机电加工生产线从传统自动化向智能自动化跨越的核心, 能够有效解决生产效率低下、柔性不足、质量波动等问题, 推动制造业向高质量、智能化发展转型。

关键词: 智能制造; 机电加工生产线; 自动化改造; 关键技术; 数字孪生; 信息集成

前言

随着《中国制造2025》战略推进以及世界范围内制造业竞争愈发激烈, 智能制造已经成为制造业发展的主要推动力。在此环境下对机电生产线进行自动化改造既是当下面临生产痛点的解决之道, 也是推动制造业迈向高质量发展的重要步骤。自动化改造并非简单的设备更换, 其涉及众多领域的变革, 包括感知技术、控制技术、信息系统集成技术、柔性制造技术以及数字孪生技术等。本文借助梳理机电加工生产线功能作用, 在智能制造大环境下, 从自动化改造的必要性着手, 深入研究支持改造的重要技术体系, 希望给制造企业提供能够效仿的技术路径以及实施思路, 促使机电加工生产线向着智能化、高效率化、柔性化方向发展。

一、机电加工生产线的作用

(一) 确保产品加工精度与质量稳定性

机电加工生产线凭借标准设备和工艺流程, 可以减少人工操作产生误差。生产线上的精密加工设备, 如加工中心、磨床等, 具有高精度的定位与运动控制能力, 可以做到对零部件尺寸公差、形位公差进行精确掌控^[1]。而且, 生产线还设有在线检测设备, 可即时监控加工过程中零部件的尺寸偏差、表面质量等重要指标, 进而及时调节加工参数, 避免不合格的产品出现。相比于分散式的人工加工方式, 自动化生产线上产品的合格率能提高15%~30%, 以此保证产品质量的一致性和稳定性。

(二) 提高生产效率与产能规模

在传统分散加工模式中, 零部件需在不同机器之间人工搬运, 存在大量等待时间与工序衔接间隙, 导致生产效率较低。机电加工生产线利用自动化输送设备将各个加工位置之间的零部件不断进行运输, 可减少各道工序中间歇停留的时间; 同时生产线采取多工位同步工作, 连续作业的形式可以全天候运行24个小时不间断生产。

二、智能制造下机电加工生产线自动化改造的意义

(一) 应对市场需求变化, 增强企业柔性制造能力

目前市场对机电产品的需求为多品种、小批量、短周期, 传统的刚性生产线不能快速应对产品型号改变, 需要数小时甚至数天才能完成换模、调参, 导致生产周期长, 生产成本低。经自动化改造后, 机电加工生产线能引入柔性制造技术, 如模块化设备、可重构工装、智能调度系统等, 进而做到加工参数即刻改动、工装夹具自动替换以及生产过程的柔韧适应^[2]。比如, 采用机器人上下料的柔性生产线, 在10~30min便可以实现不同产品之间的切换, 更加符合市场的个性化需求, 可以在短时间内生产不同型号的产品。

(二) 减少生产能耗与资源浪费, 推动绿色制造实现

智能制造提倡绿色、低碳、可持续的发展思路, 传统机电加工生产线因为设备老旧、工艺陈旧、能源管理粗放, 存在能耗高、原材料浪费严重等问题。自动化改造期间, 依靠智能能耗监测体系改进加工工艺, 同时采用高精度设备能够减少废料, 从而达到能源和资源的有

效利用。

(三) 提升设备管理水平, 减少设备故障停机时间

设备是机电加工生产线的核心资产, 传统的设备管理方式多采用事后维修或者定期维修, 存在维修不及时、故障停机时间过长、过度维修增加成本等问题。自动化改造时, 在设备上安装感知设备, 如振动传感器、温度传感器、电流传感器等, 能够实时收集设备运转时的各种数据, 比如转速、温度、振动幅值等, 通过数据分析模型预测设备潜在故障, 实现预测性维护。

三、智能制造下机电加工生产线自动化改造的关键技术

(一) 智能感知与在线检测技术

智能感知与在线检测是生产线“状态感知、质量监控”的基础, 通过多类型传感器与检测设备, 实时采集设备状态、加工参数及产品质量数据, 为后续控制与决策提供数据支撑。

1. 多维设备状态感知技术

对设备主要部分, 即主轴、轴承、刀具等安装传感器, 获取重要工作参数。使用压电或者加速度传感器检测振动, 并用信号处理方法取得最大值、均方根等特征数值; 根据设备的不平衡、轴承的损坏状况进行判断; 通过红外线或者铂电阻传感器测定电机和主轴的温度以预测超负荷或缺油的情况; 采用电能表和电流传感器测量电量情况并作为节约电力的参考依据^[3]。三类感知技术结合起来可以达到设备状态全方位监测的目的, 从而为预测性维护打下基础

2. 加工过程中的参数感知技术

实时采集切削力、切削温度、加工精度等关键参数。切削力感知使用压电式测力仪, 装在夹具或刀柄部位, 动态调节进给速度和切削深度, 防止刀具崩刃; 切削温度感知采用热电偶或者红外热像仪, 控制切削温度在正常范围内, 降低刀具因过热造成的磨损; 加工精度感知用接触式测头, 实时检测工件的尺寸偏差, 自动修正刀具的位置, 保证公差符合要求, 比如外径公差 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

3. 在线产品质量检测技术

代替传统离线抽样检测, 做到100%全检。机器视觉系统由工业相机、镜头和光源构成, 依靠图像预处理、特征提取以及缺陷识别, 在0.5s内完成表面缺陷检测, 精度达到0.01mm; 激光扫描检测利用三维扫描仪得到点云数据, 同CAD模型比较, 检测复杂曲面的形位误差, 精度可达到 $\pm 0.005\text{mm}$; 超声检测经由探头剖析反射信

号, 识别工件内部裂纹、气孔等瑕疵, 保证内部质量^[4]。

(二) 智能控制与协同调度技术

智能控制与协同调度是生产线自主决策、高效运行的核心, 通过分层控制架构与优化算法, 协调设备、工位与系统, 提升运行效率。

1. 分层分布式控制技术研究

整体采用设备层、单元层、系统层的三级架构。其中, 设备层以PLC、CNC为核心, 控制单台设备动作, 如主轴启停、刀具更换, 通过工业以太网协议交互数据; 单元层以PAC为核心, 协调加工单元内多设备工序衔接与物料转运, 分解生产任务并监测设备状态; 系统层以MES为核心, 接收ERP订单, 制定生产计划下发至单元层, 同步监控生产进度与质量数据, 实现全流程管控。

2. 智能调度优化技术

利用算法进行生产任务及设备资源的优化配置。其中, 静态调度使用遗传算法以及粒子群优化法完成订单需求和工艺限制之下的最适规划, 使总生产时间缩短15%~20%; 动态调度则依靠滚动的时段、强化学习的方法面对设备损坏或者突发事件等问题, 1~2分钟内调整计划, 保障生产连续。两类算法结合, 可以做到事前规划和事中调整的全周期调度优化。

3. 智能控制算法

打破传统的PID控制限制, 增强自适应性。模糊控制把操作经验转变成模糊规则, 采用切削力偏差以及变化率调节进给速度, 提高精度10%~15%。神经网络控制依靠样本训练出参数映射实时抵消切削负荷的波动, 并使主轴转速控制在 $\pm 5\text{r/min}$ 以内。模型预测控制根据动力学模型预测系统的输出情况, 在前置位置时调节进给电机的扭矩从而降低定位误差20%~30%。

(三) 信息集成与工业互联网技术

打破信息孤岛, 实现设备、系统与企业间的互联, 构建数据驱动的管理体系。

1. 工业通信协议与接口技术

保障数据实时传输与兼容: 实时工业以太网协议, 如PROFINET、EtherCAT等实现设备层与单元层低延迟交互, 周期 $\leq 1\text{ms}$; OPC UA协议统一信息模型, 实现MES、ERP与设备的跨厂商互联, 支撑“数据上行一指令下行”双向交互; 边缘网关解决老旧设备接口兼容问题, 转换模拟或数字信号为标准化数据, 接入工业互联网平台。

2. 工业互联网平台架构与关键技术

采用“云—边—端”的三级架构。其中, 边缘层

布置网关、控制器对设备的数据做实时处理, 预警故障并且上传重要的信息到本地; 平台层运用分布式存储 (Hadoop) 以及大数据分析 (Spark), 存储3 ~ 5年的历史数据, 并找出参数跟质量的联系; 应用层基于微服务架构来开发各种应用比如设备管理、生产调度等实现可视化以及业务管控。

3. 数据安全与隐私保护技术

在该过程中需要构建纵深防御体系, 其中传输加密用TLS/SSL, 存储加密用AES-256、RSA, 防止数据窃取与篡改; 访问控制用RBAC/ABAC, 以此划分用户权限, 避免数据越权访问^[5]。网络保护则采用工业防火墙、IDS/IPS系统, 阻断SQL注入、DDoS等攻击, 保证数据安全。

(四) 柔性制造与机器人应用技术

适应市场的多品种、小批量需求, 提升生产线柔性 with 自动化水平, 减少人工依赖。

1. 模块化与可重构设备技术

通过标准化模块组合适配多产品加工: 模块化加工设备拆解为基础与功能模块, 30 ~ 60分钟完成模块更换, 设备利用率提升40% ~ 50%; 可重构工装夹具用液压定位销与气动夹紧块, 1 ~ 2小时完成换型, 替代传统4 ~ 8小时调整; 柔性输送模块采用AGV小车或者SLAM技术, 自主规划路径, 工位适配时间减少60% ~ 70%。

2. 工业机器人技术应用

替代人工完成多工序作业: 机器人加工用6轴关节或并联机器人搭载工具, 加工复杂曲面, 定位精度 $\pm 0.05\text{mm}$, 设备成本降低30% ~ 40%; 机器人上下料用SCARA机器人, 5 ~ 10秒/件完成转运, 生产线节拍提升20% ~ 30%, 结合视觉引导适应工件偏差; 机器人装配与检测通过力控传感器监测装配力, 视觉系统检测间隙 ($\leq 0.1\text{mm}$), 保障装配精度。

3. 人机协作技术

人机协作技术能够实现人机安全高效协同。安全防护用激光扫描仪与碰撞检测技术, 人员进入工作区域时机器人降速, 一般在0.2m/s, 碰撞力 $\leq 50\text{N}$ 时立即停机; 任务分配优化结合人机优势, 机器人负责重复性操作, 人员处理复杂缺陷, 检测效率提升30% ~ 40%, 降低劳动强度。

(五) 数字孪生与虚拟调试技术

建立虚实映射体系, 让生产线预演、优化、调试做到全流程数字化, 节约物理成本。

1. 数字孪生模型构建技术

首先, 构建多维度一致性模型。几何建模采用CAD或者点云, 使其误差 $\leq 0.1\%$, 物理建模靠多体动力学、有限元分析等, 模仿设备运动、受力以及温度变化。行为建模需要联系PLC程序和历史数据, 模仿设备的启停、故障等行为, 保证虚拟模型跟物理生产线几乎完全一致。

2. 虚实映射与数据同步技术

实时数据采集通过边缘网关采用MQTT协议传送到平台, 虚拟模型每秒钟更新一次, 同步误差小于等于100ms; 双向控制用OPCUA协议, 虚拟模型向物理设备发指令, 支持远程调试、参数调整。

3. 虚拟调试与优化技术研究

虚拟调试在虚拟环境验证PLC程序与机器人轨迹, 避免干涉, 物理调试时间缩短40% ~ 60%。故障模拟在虚拟模型中复现设备故障, 优化诊断流程, 准确率提升至90%, 处理时间缩短20% ~ 30%。工艺优化用NSGA-II算法, 模拟参数影响, 寻找质量和效率之间的最优组合, 合格率提升5% ~ 10%, 效率提升10% ~ 15%。

结束语

总之, 智能制造推动着制造业发生变革, 在机电加工生产线上实现自动化改造, 已经成为企业在寻求新的突破、促进高质量发展当中必须选择的道路。本文明确了生产线的重要作用及改进的意义, 建立了智能感知、智能控制、信息集成、柔性制造、数字孪生五大关键技术系统。五大技术呈现了数据驱动、协同融合的特征, 是解决传统生产线问题、实现向智能化转变的基本方法。

参考文献

- [1] 吴善科. 机电设备的电气自动化改造及维护分析[J]. 消费电子, 2021(5): 86-87.
- [2] 赵子民. 机电设备电气自动化改造方法及维护实践探析[J]. 模具制造, 2025(6): 228-230.
- [3] 张尚雷. 机电设备的电气自动化改造与维护策略探究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(3): 5-7.
- [4] 高万松. 机电设备电气自动化改造及维护[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(7): 52-54.
- [5] 张巍. 机电设备自动化改造维护现状及问题分析[J]. 今日自动化, 2022(1): 93-95.