

智能制造技术在机械制造业中的应用与优化

张卫丰, 张 鹏

(济南京华邦威聚氨酯设备有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 为解决机械制造过程中存在的生产效率低、设备响应迟缓、信息系统割裂等问题, 本文对智能制造技术在机械制造业中的应用路径与优化策略进行了系统研究, 提出基于智能感知、制造数据闭环控制、智能决策系统与产线自动化的技术集成方案, 构建面向未来的制造优化模型。同时, 围绕平台化架构构建、流程智能重组、数据安全治理与多维协同机制设计, 提出具有可行性的系统优化路径, 以期对机械制造业的智能化转型升级提供理论支撑和工程实践参考。

关键词 智能制造技术; 机械制造业; 智能感知; 智能决策; 智能装备

中图分类号: TH164

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.008

0 引言

机械制造作为国民经济的重要基础产业, 正面临从传统加工向智能生产体系转型的深刻变革。随着工业 4.0 与中国制造 2025 战略的持续推进, 制造模式正由标准化、批量化向柔性化、定制化加速演进。传统制造体系在应对复杂任务、数据驱动决策与资源协同方面逐渐显现出局限性。推动智能制造技术深度融合至机械制造全过程, 已成为提升行业核心竞争力与构建高效制造生态系统的关键路径。

1 机械制造业的技术瓶颈与需求

1.1 当前机械制造的核心痛点

当前机械制造业在快速迭代的产业环境中暴露出多方面的结构性技术瓶颈。首先, 生产系统的柔性制造能力严重不足, 难以有效响应多品种、小批量及个性化定制的市场需求。其次, 加工设备信息化水平偏低, 关键工艺参数采集滞后, 导致产品质量波动大、可控性差。再次, 企业内部普遍存在数据孤岛问题, 设计、工艺、制造与物流等环节之间的信息传递断层, 制约了生产流程的协同优化。最后, 传统车间依赖人工管理和操作, 制造过程透明度不足, 实时调度响应能力差, 严重制约了生产效率与资源利用率的提升。以上问题共同构成机械制造业向智能化、高效化发展的主要障碍, 亟需通过系统性技术革新加以破解, 以实现制造过程的可视化、精准化与自适应调控。

1.2 对智能制造的需求分析

面对生产精度、效率与灵活性同步提升的需求, 机械制造业对智能制造技术表现出高度依赖性。首先, 制造流程需借助数字建模与实时感知实现动态调

度与过程闭环控制, 以保障复杂工序的工艺一致性与产品质量稳定性。其次, 智能感知系统可提升设备状态监控的实时性与精准性, 为预防性维护与故障预测提供数据支撑, 降低非计划性停机风险。再者, 通过集成制造执行系统 (MES) 与企业资源计划系统 (ERP), 可实现产供销一体化管理, 增强企业内部资源协同能力。最后, 大数据与人工智能技术的引入, 有助于构建基于数据驱动的决策模型, 提升工艺优化与资源配置效率。由此可见, 智能制造不仅是技术升级的手段, 更是推动机械制造体系深度重构与价值链延伸的核心引擎^[1]。

2 智能制造技术在机械制造业中的应用路径

2.1 智能感知与状态监测技术的嵌入

在机械制造领域, 智能感知与状态监测技术的嵌入为制造系统提供了高度实时性与高精度的信息获取能力。通过在关键设备部位部署多源传感器, 如温度、振动、压力、位移、电流与噪声传感器, 能够实时采集加工过程中的多维数据, 并实现对设备运行状态的全生命周期监控。以数控机床为例, 通过集成基于 MEMS 技术的振动传感器, 其测量频率可达 1 kHz 以上, 可识别轴承早期疲劳损伤, 误差检测精度达到 ± 0.005 mm。此外, 结合分布式光纤传感与无线传感网络技术, 可实现多节点状态同步采集, 有效构建设备运行的状态画像。在信号处理层, 引入基于时频域联合分析的 Hilbert-Huang 变换与快速傅里叶变换算法, 提高对复杂信号的解构能力。在系统集成方面, 状态数据通过工业以太网 (如 PROFINET 或 EtherCAT) 上传至工业云平台, 实现远程监控与大数据融合分析。智能感知技术的深度

嵌入显著提高了设备的感知灵敏度、健康评估准确率以及生产过程的透明度，为后续智能决策提供了数据基础^[2]。

2.2 智能决策与制造执行系统优化

智能决策系统与制造执行系统（MES）的深度融合已成为实现机械制造流程优化与资源精准配置的关键支撑。智能决策模块通常以人工智能算法为核心，结合历史数据与实时数据进行多维分析与自适应决策推演。在典型的制造调度场景中，引入基于遗传算法与粒子群优化算法，可实现生产工序的最优排列组合，将设备利用率提高至 92% 以上，平均换型时间降低至原有水平的 65%。MES 系统则在执行层提供作业指令下发、设备联控与质量反馈的闭环功能，实现计划与执行之间的高效联动。通过与企业资源计划（ERP）、产品生命周期管理（PLM）等系统的数据接口集成，MES 可获取上下游的制造需求与资源状态，实现跨系统数据互通与流程协同。例如：在多品种混流装配线中，借助基于 BOM 动态配置与订单驱动模型，可完成复杂任务的在线分解与实时分配，显著提升定制化生产能力。智能决策与 MES 系统的联动优化不仅强化了制造系统的敏捷性与应变能力，也为实现动态制造计划、实时质量控制和资源高效利用提供了强有力的支撑。

2.3 智能装备与产线自动化改造

智能装备的引入与产线自动化的系统重构已成为机械制造升级的核心手段。通过部署具备自适应控制能力的高精度五轴联动数控机床，设备在执行多轴联动复杂工艺时可实现轮廓误差控制精度达到 $\pm 0.002\text{ mm}$ 。与此同时，基于工业以太网通信协议的设备互联体系构建了高效的数据传输通道，使多机协同加工模式得以实现，产线作业节拍缩短 15% 以上。在自动化改造方面，采用协作型工业机器人（如带有力控反馈系统的六轴机器人）可在装配、焊接、搬运等环节替代人工操作，其重复定位精度达 $\pm 0.03\text{ mm}$ ，并通过视觉识别与路径规划算法实现复杂结构识别与动态路径调整。除此之外，通过引入柔性夹具与可重构工装，生产系统在应对多品种切换时无需更换关键硬件部件，可将平均换型时间控制在 7 分钟以内。智能装备系统的部署还需集成实时监控与控制接口，确保设备运行状态在闭环逻辑下保持稳定性与高效性，全面提升产线的可靠性、适应性与智能化水平。

2.4 制造数据的闭环控制与预测性维护

制造数据的闭环控制体系构建基于多层级数据采集、融合与反馈机制，可实现对全过程工艺参数的实

时干预与动态修正。在数据采集层，通过部署高精度工业数据采集模块（如 NI cDAQ 系列），采样率可达 100 kS/s，确保对刀具磨损、主轴负载、电流波动等关键变量的高频监测。在控制层，基于模型预测控制与模糊控制算法融合的控制策略，可对加工过程中的非线性扰动进行动态补偿，使关键工艺输出稳定性提升 22%。数据在执行层经由 PLC 控制器与智能执行单元闭环传输后反馈至云端决策模块，实现参数自适应调节。在设备维护方面，采用基于深度学习算法（如 LSTM 时序预测模型）的预测性维护系统，通过历史状态数据建模预测故障趋势，准确率可达 93% 以上。维护策略由预警机制转变为主动干预，使设备平均无故障运行时间（MTBF）提高至 500 小时以上，显著降低维修频次与备件消耗。制造数据闭环控制系统不仅能优化生产稳定性，也能显著提升制造资源的响应效率与生命周期价值^[3]。

3 智能制造在机械制造中的优化策略

3.1 技术集成与平台化建设

智能制造系统的可持续运行依赖于多种关键技术的集成协同与平台化架构的有序构建。面向机械制造的典型工业应用场景，通过构建统一的工业数据中台，实现设计、工艺、生产与管理系统的贯通，平台的数据接入吞吐量应达到 104 条 /s 以上，支持百万级工单并发处理能力。在系统集成层，需打通 CAD/CAM、MES、SCADA 与 ERP 系统间的数据交互接口，采用 OPC UA 等标准化通信协议保证跨平台通信的稳定性与安全性。在设备接入层，通过部署 IoT 边缘网关与工业协议转换器，可兼容 Modbus、Profibus 等主流协议，确保异构设备的高效接入。平台构架需具备微服务架构与容器化部署能力，使功能模块实现解耦与快速迭代，在支持多租户并行操作的同时，确保系统响应时延低于 200 ms。在安全层面，引入基于访问控制矩阵的权限分级模型与工业防火墙集成机制，可有效隔离平台核心控制域与外部访问路径，防止数据泄露与系统入侵。技术集成与平台化建设是实现智能制造系统规模化部署与可扩展性的基础保障。

3.2 制造流程的智能再设计

制造流程的智能再设计旨在通过嵌入式算法、虚拟建模与实时反馈机制重构生产逻辑，从而实现生产流程的自适应、高效率与闭环控制。首先，采用基于 BPMN 标准的流程建模方法，对制造环节中的工艺节点、数据流与决策点进行结构化重组。通过在设计阶段引入数字孪生建模工具，对工艺路径与资源配置方案进

行动态仿真与优化,使产品生命周期中的初始工艺方案优化率提高至30%以上。在调度控制层,引入基于启发式搜索与Q-learning强化学习算法的动态调度模型,具备自适应调整能力,可在任务负荷波动范围 $\pm 20\%$ 内保持产能利用率稳定在95%以上。在执行环节,结合实时状态识别与工艺参数自适应调控技术,确保工序切换过程中刀具路径自动校正误差小于 $\pm 0.01\text{ mm}$,显著提升工艺一致性与加工稳定性。制造流程的智能再设计不仅体现于物理过程的重构,还涵盖信息流、决策流与控制流的深度协同,是推动机械制造系统迈向智能自优化的关键路径^[4]。

3.3 智能制造人才与组织体系建设

实现智能制造体系的持续演进,需依赖多维度人才结构与组织协同机制的系统构建。在人才构成方面,应建立以“复合型工程技术人才+智能系统开发人才+数据科学与分析人才”为核心的技术梯队。根据《中国智能制造人才发展报告》,截至2023年,制造业对复合型高端技术人才的缺口超过400万人,其中机械与自动化工程领域复合背景人才比例不足15%。为应对该挑战,需通过产教融合机制引导高校设置以工业AI、边缘控制、工业网络安全为导向的交叉学科课程体系,推动知识体系向工程应用转化。在组织架构设计中,应以任务导向构建横向扁平化与纵向智能决策协同的双层组织模型,提升组织响应灵敏度与决策效率。在人才管理体系中,需嵌入基于关键绩效指标(KPI)与机器学习模型驱动的能力评估系统,实现人才能力建模、动态评价与精准匹配。人才结构与组织机制的同步升级,是实现机械制造企业向智能制造生态体系跃迁的组织保障。

3.4 数据治理与安全防护体系

在高度数字化的智能制造环境中,构建完善的数据治理与安全防护体系是保障制造系统运行稳定性与信息可信度的关键措施。数据治理需从数据质量控制、主数据管理、标准化建模及权限控制等多个维度同步推进。基于数据质量分析平台,可对数据完整性、一致性与实时性进行指标化度量,合规性检查覆盖率需达98%以上。主数据管理体系需构建统一数据主键编码规则与语义建模规范,避免因冗余与冲突引发信息交互混乱。在安全防护层面,应部署工业防火墙、入侵检测系统(IDS)与数据加密模块,构建纵深防御体系。根据工业控制系统(ICS)安全等级防护框架,智能制造系统应至少满足三级防护要求,在物理层、协议层与应用层均实现访问隔离与行为审计。在实际部署中,

通过引入基于AI的异常行为识别算法(如Isolation Forest)进行多维行为分析,设备入侵识别准确率可达95%以上。高强度数据治理策略与系统安全机制共同支撑了智能制造环境下的数据可信性、可控性与持续可用性^[5]。

3.5 与信息技术深度融合的协同机制

智能制造的发展必须依赖与新一代信息技术的深度融合与协同机制的系统化设计。在融合架构上,需构建多技术协同体系,以5G低时延通信、区块链可信数据机制、边缘计算实时处理能力为核心,实现制造系统从集中式控制向分布式智能转型。在5G网络环境下,设备间通信延迟控制在1 ms以内,满足高频率设备调度与多传感器并发数据传输需求。区块链技术的嵌入则通过哈希链与智能合约实现生产数据的可信记录与多节点共识机制,关键数据不可篡改率达100%。边缘计算平台在控制层实现边缘侧实时响应,通过多核心ARM架构嵌入式模块进行计算分发,可降低中心处理压力约35%,并保障敏感数据在本地实时处理闭环内运行。协同机制需嵌入统一API架构,保障各类系统(PLM、ERP、WMS)间无缝集成,并通过中台式架构提升资源共享效率与服务弹性。信息技术的深度融合与协同机制是推动智能制造系统由局部智能向整体智能跃迁的系统引擎。

4 结束语

智能制造技术正逐步成为机械制造业实现高质量发展的关键支撑力量。通过智能感知、智能决策、自动化装备与数据闭环控制等技术路径,制造过程的效率、精度与柔性显著提升。同时,平台化架构、流程重构与人才体系的协同优化,为行业提供了持续演进的内在驱动力。在多技术融合与系统集成的推动下,机械制造业正加速迈向智能化、数字化与可持续发展的新时代。

参考文献:

- [1] 吴永新.新时代背景下机械智能制造现状研究[J].中国金属通报,2022(01):136-138.
- [2] 周峰.机械制造工艺与机械设备加工工艺研究[J].模具制造,2025,25(01):184-186.
- [3] 韦再峰.现代机械加工中智能制造技术的应用与技术分析[J].模具制造,2025,25(01):187-189.
- [4] 程永康,赵晨悦,胡小波.智能制造技术在机械设计制造领域中的应用[J].内燃机与配件,2025(01):106-108.
- [5] 李艳.先进制造技术与机械制造工艺优化措施分析[J].中国机械,2025(01):74-77.