

# 智能化技术在机械设计制造及其自动化中的应用研究

蔺 宁

济南市莱芜区科技创新协调服务中心 山东 济南 250000

**摘 要:**为解决传统机械设计制造迭代周期长、加工精度低、生产柔性不足、品控不稳定等行业痛点,本文以智能化技术为核心研究对象,梳理人工智能、数字孪生、物联网、智能数控等关键技术理论。从设计、加工、质检、设备运维四大环节剖析智能化技术的具体应用,总结技术应用优势,剖析当前转型成本高、技术融合差、复合型人才短缺、行业标准缺失等问题,并提出针对性优化对策,同时预判行业未来发展趋势,为机械制造智能化升级提供理论与实践参考。

**关键词:**智能化技术;机械设计制造及其自动化;应用

**引言:**随着工业推进与制造业高质量发展背景下,传统机械设计制造串行作业模式、刚性生产体系的弊端日益凸显,难以适配多品种、小批量的市场化生产需求。智能化技术的迭代革新,为机械设计制造及其自动化领域转型升级提供了核心支撑。为推动行业数字化、智能化、绿色化发展,本文系统研究各类智能技术在机械制造全流程的应用场景,梳理现存发展瓶颈并制定优化方案,助力制造产业突破发展局限,实现提质、增效、降本的高质量发展目标。

## 1 相关核心理论与智能化技术概述

### 1.1 机械设计制造及其自动化基础概述

(1) 机械设计制造及其自动化的核心内涵与技术体系。该学科以机械系统设计、制造工艺规划与自动化集成为核心,融合力学、材料科学、控制理论与先进制造技术,涵盖产品全生命周期管理,其技术体系正向数字化、网络化与智能化方向快速发展。(2) 传统机械设计制造的流程特点与核心短板。传统流程依赖经验公式与串行开发模式,其显著短板为设计迭代周期长、工艺参数固化、对突发扰动响应迟缓,易导致资源浪费与品控不稳,难以适应动态多变的市场环境<sup>[1]</sup>。(3) 机械自动化智能化升级的核心需求。行业亟需突破传统刚性产线局限,提升系统自感知、自决策与自执行能力,以此实现多品种、小批量柔性生产,并满足高端制造对微米级精度与纳秒级响应的苛刻要求。

### 1.2 智能化核心关键技术

(1) 人工智能与机器学习技术。依托深度神经网络与强化学习算法,系统能挖掘高维数据隐含规律,实现工艺参数自适应优化与设备预测性维护,显著提升复杂工况下的自主决策水平。(2) 数字孪生与仿真技术。通过构建高保真虚拟模型,映射物理实体全生命周期状

态,支持加工过程虚拟试切与碰撞检测,结合实时数据驱动实现动态迭代优化,有效降低物理试错成本。(3) 物联网与大数据技术。借助5G与工业以太网实现多源异构数据低延时采集与汇聚,运用分布式存储与流式计算框架进行数据清洗与特征提取,为智能管控提供高可靠性数据底座。(4) 智能数控与自动化控制技术。基于开放式CNC系统与伺服闭环控制原理,融合前馈补偿与自适应调参策略,实现纳米级插补精度与微秒级动态响应,保障复杂曲面加工质量。

### 1.3 智能化技术应用于机械制造的核心优势

(1) 优化设计流程,缩短产品研发周期,降低设计失误率。基于AI的生成式设计可自动完成多方案迭代寻优,仿真前置验证大幅减少物理样机试制次数,研发周期普遍缩短30%以上。(2) 实现生产自动化、精准化,大幅提升生产加工效率。智能排产与自适应加工联动,结合在线检测闭环调控,非计划停机减少,设备综合效率显著提升。(3) 实时监控生产状态,提升产品质量稳定性与一致性。基于统计过程控制与多传感器融合监测,实现微缺陷早期预警与根源追溯,降低质量波动,保障批次产品高度一致。(4) 助力柔性生产与绿色制造,适配多元化市场需求。产线可按订单动态重组,加工参数实时优化,有效降低能耗与废品率,推动制造业向可持续方向演进。

## 2 智能化技术在机械设计制造及其自动化中的具体应用

### 2.1 智能化技术在机械设计环节的应用

(1) 智能参数优化设计:基于遗传算法、粒子群优化及多目标优化理论,构建以质量最小化、刚度最大化、固有频率最优为综合目标函数的参数寻优模型,在强度约束与疲劳寿命限制下自动迭代确定零部件最优结

构拓扑、尺寸链分配及材料匹配方案,实现轻量化与高性能设计的协同统一。例如,在汽车底盘结构件设计中,采用拓扑优化与尺寸优化两级策略,可在保证承载能力前提下实现减重20%以上,显著提升燃油经济性或续航里程。(2)虚拟仿真与智能建模:依托数字孪生技术构建机械产品高保真多物理场耦合虚拟模型,集成有限元分析、多体动力学与计算流体力学,在产品定型前全面模拟实际运行工况下的应力应变场、热力耦合效应及振动模态响应,对装配干涉、应力集中、共振风险进行早期预警与规避,将设计缺陷发现节点大幅前移,从而有效压缩物理样机试制次数,缩短研发迭代周期<sup>[2]</sup>。

(3)智能模块化设计:运用知识图谱技术系统整理企业历史设计经验、标准件参数与工艺规范,构建可扩展的设计知识库与案例检索系统,通过基于实例的推理算法实现相似工况下设计方案的快速匹配与参数重用;同时引入迁移学习机制,支持已有模块在新产品需求下的自适应调整,使系列化产品设计效率提升40%以上,并显著降低人为失误引发的设计变更频率。

## 2.2 智能化技术在机械制造加工环节的应用

(1)智能数控加工:采用具备工况自感知能力的开放式智能数控系统,实时融合主轴负载、切削温度、刀具振动等多源传感信号,在加工过程中动态决策并自适应调整进给速度、主轴转速及切削深度等关键参数,有效应对毛坯余量不均、材料硬度波动及刀具磨损等时变扰动,确保复杂曲面整体叶轮、薄壁结构件等难加工特征的高质高效加工。(2)柔性智能生产:以制造执行系统为调度核心,将工业机器人、自动导引运输车、智能机床与在线检测设备集成构建柔性制造单元,通过工艺路线动态重构与任务负载均衡算法,支持多品种混流生产及十分钟级快速换型,满足汽车零部件、航空航天小批量结构件等场景的敏捷制造需求,同时实现设备利用率与订单交付率的同步提升。(3)智能物料管控:基于射频识别与二维码技术实现物料全程唯一标识与追踪,集成自动化立体仓库、自动导引运输车及智能分拣系统,与生产计划系统联动实现物料需求精准触发、自动拣选与准时配送,有效消除产线物料等待与积压浪费,确保多品种混流生产模式下物料齐套率维持在98%以上<sup>[3]</sup>。

## 2.3 智能化技术在质量检测与控制环节的应用

(1)机器视觉智能检测:配置高分辨率工业面阵或线阵相机,结合改进型YOLO或U-Net等深度学习目标检测与分割算法,对工件关键尺寸、表面划痕、气孔、裂纹及装配完整性进行全自动、全数检测,检测节拍可低至0.5秒/件,微米级尺寸测量重复精度稳定控制在 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内,彻

底取代传统人工抽检,极大降低漏检率与误判率。(2)大数据质量分析:构建覆盖加工全流程的多源异构质量数据湖,系统采集切削力、振动、声发射、温度等多维传感数据与最终检测结果,通过关联规则挖掘、随机森林特征重要性排序及因果推断模型,精准定位质量缺陷的工艺根因,驱动工艺参数反向迭代优化,形成"数据采集→异常检测→根因定位→参数调优"的完整质量改进闭环。(3)实时闭环质量控制:建立统计过程控制与在线补偿联动的管控机制,对关键工序能力指数与规格偏差实施毫秒级监控,一旦过程偏移超过预设阈值,自动触发补偿执行机构(如刀具偏置伺服调整、冷却液流量调节),将质量波动遏制在萌芽阶段,确保持续保持工序能力指数在1.33以上,保障批次产品高度一致性。

## 2.4 智能化技术在设备运维环节的应用

(1)智能故障诊断:融合振动时频域特征、油液磨粒浓度及温度场分布等多源监测信息,采用深度残差网络或卷积神经网络等深度学习模型进行端到端故障模式识别,精准辨识轴承磨损、齿轮断齿、转子不平衡及润滑失效等典型故障,诊断准确率稳定保持在95%以上,并可在故障萌芽期即发出预警信号。(2)预测性维护:构建设备全生命周期性能退化轨迹模型,融合长短时记忆网络对关键部件剩余寿命进行区间概率预测,依据设备健康指标变化趋势自动生成最优维护策略与备件采购计划,推动维护模式从事后维修、定期保养向按需预测性维护转型,将非计划停机时间降低40%~60%,显著延长设备有效服役周期<sup>[4]</sup>。(3)设备智能管控:基于OPCUA通信协议构建车间设备互联互通网络,建立统一的设备数据采集与监控平台,以数字孪生驾驶舱形式实时呈现设备运行状态、综合效率、故障报警及维保进度等信息,支持远程参数配置、程序下发与生产任务自动调度,实现从单机人工操作向集群智能管控的跨越式升级。

## 3 智能化技术在机械设计制造及其自动化应用现存问题与优化对策

### 3.1 智能化技术应用现存主要问题

(1)技术应用成本偏高:智能传感器、工业机器人及数字化管理系统的软硬件采购与部署费用高昂,配套的车间网络改造、数据存储设施建设等隐性成本进一步加重企业负担,导致资金实力薄弱的中小企业望而却步,形成智能化转型的"高门槛"困境。(2)技术融合度不足:当前智能化系统多采用专用通信协议与数据接口,与传统数控机床、老旧生产线等设备之间缺乏标准化交互机制,形成"信息孤岛"效应,数据采集不完整、指

令下发延迟等问题普遍存在,严重制约系统级协同管控效能的发挥。(3)专业人才储备短缺:既懂机械制造工艺又掌握人工智能、大数据分析等信息技术技能的复合型人才供给严重不足,企业现有人才梯队多偏重单一领域知识,对新技术的消化吸收与二次开发能力薄弱,成为制约智能化深度落地的关键瓶颈。(4)行业标准与体系不完善:智能生产流程中的设备互联规范、质量在线检测标准、数据安全与隐私保护要求等尚未形成统一行业准则,各家供应商产品互操作性差,企业在标准选择上无所适从,阻碍了产业链上下游的协同推进与规模化推广。

### 3.2 智能化技术应用优化对策

(1) 分级推进智能化改造:根据企业固定资产规模、产品工艺复杂度及核心生产痛点,制定阶梯式改造路径规划。鼓励中小企业优先采用低成本、轻量级、模块化的智能方案(如边缘计算网关+云端SaaS服务平台),以单点工序智能化为切入点逐步扩展,实现按需部署、渐进投入、稳健收益的良性转型。(2) 强化技术集成与适配:研发面向异构设备的通用数据采集中间件与多协议转换网关,兼容OPCUA、Modbus、Profibus等主流工业通信标准,构建统一数据中台实现跨品牌、跨代际设备的信息互通;同步推动设备厂商开放API接口,降低系统集成难度与二次开发成本<sup>[5]</sup>。(3) 完善人才培养体系:推动高校机械工程专业与计算机、数据科学学科深度交叉融合,增设智能制造方向核心课程与实训模块;鼓励企业与职业院校共建联合实训基地,通过定向委培、在岗研修、技能竞赛等多渠道培养路径,系统性壮大复合型技术人才供给规模。(4) 健全行业规范与标准:联合行业协会、科研院所与链主龙头企业,分领域分阶段制定智能生产互联互通、在线检测精度评定、设备远程运维安全等方面的统一技术标准,建立标准动态更新与互认机制,引导行业从无序竞争迈向有序协同发展。

### 3.3 智能化技术在机械制造领域的未来发展趋势

(1) 深度集成化:人工智能决策引擎、数字孪生映

射模型与物联网感知网络将实现全方位、深层次融合,构建具备自感知、自学习、自决策、自执行能力的智慧工厂大脑,推动生产组织模式从单工序自动化向全流程无人化智能生产范式跃升。(2) 绿色智能化:依托智能排产算法优化能源分配结构、基于大数据挖掘分析设备能耗规律、借助数字孪生技术实现碳足迹全生命周期追踪,形成覆盖设计、制造、运维全链路的节能降碳系统化解方案,有力支撑“双碳”目标下的绿色制造转型进程。(3) 定制化柔性智能生产:融合用户需求精准感知、在线工艺自适应调整与分布式制造资源动态调度等前沿技术,构建高柔性混流生产线,以接近批量化的经济性成本实现单件定制化高效生产,全面适配个性化消费升级与细分市场快速响应的时代需求。

### 结束语

本文系统探究了智能化技术在机械设计制造及自动化全流程的应用价值与实践路径,明确了智能技术对优化设计、提升产能、保障质量、高效运维的重要作用。针对行业智能化转型的各类痛点问题,提出分级改造、技术集成、人才培育、完善标准的优化策略。未来,机械制造将朝着深度集成化、绿色智能化、定制柔性化方向发展,持续深化智能技术落地应用,可有效推动传统制造业转型升级,赋能智能制造产业长效发展。

### 参考文献

- [1] 司加振.人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用[J].中国设备工程,2025,8(11):59-61.
- [2] 梁霖声,夏腾辉,陈福东.人工智能在机械设计制造及自动化中的应用分析[J].机电产品开发与创新,2025,38(3):83-86.
- [3] 李江.机械设计制造中的数字化与智能化技术分析[J].集成电路应用,2024,41(1):180-184.
- [4] 张菁慧.人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(9):46-48.
- [5] 王建国,李娜.智能化机械设计制造及其自动化技术应用研究[J].机械设计与制造,2023,35(8):256-260.