

基于人工智能技术的机械自动化应用

崔少红

河北赛格机电有限公司 河北 沧州 061500

摘要:为破解传统机械自动化流程固化、柔性不足、运维滞后等生产痛点,本文剖析机器视觉、深度学习、大数据感知等AI核心技术,阐释人工智能与机械自动化融合机理,围绕机械加工、设备运维、装配仓储三大场景梳理落地应用,结合企业实证案例验证应用效益。同时剖析设备适配、成本、人才、工况适配四类现存问题,针对性提出优化方案,并预判行业发展趋势。研究证实AI可提升生产精度与效率,助力制造业柔性化、智能化转型升级。

关键词:人工智能技术;机械自动化;应用

引言:智能制造成为现代制造业核心发展方向,传统机械自动化受固定程序、刚性生产模式限制,难以适配当下多品种、小批量、高精度制造需求,生产能耗高、故障预警能力弱、人工依赖度高等弊端日益凸显。人工智能具备自主感知、动态决策、闭环优化核心优势,可重塑机械自动化运行架构。基于此本文立足行业生产实际,探究AI与机械自动化融合路径、落地应用、现存短板,为制造企业智能化产线改造、提质降本提供理论参考与实践依据。

1 相关核心概念与基础技术原理

1.1 机械自动化核心概念概述

(1)传统机械自动化定义、运行架构与核心特征:传统机械自动化基于机械传动、电气继电器与固定程序控制,采用“传感器-控制器-执行器”开环或局部闭环架构,核心特征为重复性高、流程固化、依赖刚性生产线,适用于大规模标准化生产。(2)现代智能机械自动化内涵、功能升级要求:现代智能机械自动化深度融合感知、计算与通信技术,要求系统具备环境自适应、任务可重构、实时决策与自主优化能力,实现从单机自动向系统智能的功能升级。(3)传统机械自动化应用局限性分析:传统方式面对多品种小批量生产时调整成本高、周期长;缺乏故障自诊断与动态响应能力;难以满足复杂工况下柔性、敏捷与协同制造的需求。

1.2 本文依托人工智能核心技术

(1)机器视觉技术:图像识别、工件检测、定位匹配技术原理:通过工业相机采集图像,经预处理、特征提取与深度学习分割,实现目标分类、缺陷检测及模板匹配定位,为机械手提供亚像素级位姿引导。(2)机器学习与深度学习算法:故障预测、自主调控算法逻辑:利用历史运行数据训练分类、回归及时序预测模型(如CNN、LSTM),构建设备退化趋势映射与剩余寿命预

测,并基于强化学习生成参数自整定策略^[1]。(3)智能传感与大数据分析技术:工业数据采集、工况研判技术:部署多类型传感节点实时采集振动、温度、电流等高频数据,结合大数据平台进行清洗、融合与流处理,通过聚类及关联规则挖掘实现工况识别与异常预警。

1.3 人工智能与机械自动化融合机理

(1)AI技术对机械自动化控制模块的赋能机制:将视觉、预测等AI模型嵌入PLC或边缘控制器,替代传统定值逻辑,使控制模块具备感知自适应与动态补偿能力,提升响应精度与鲁棒性。(2)人工智能优化机械决策、执行、反馈全流程原理:以实时数据驱动深度学习代理模型进行在线决策,生成最优执行参数,并利用反馈误差持续更新模型,形成闭环迭代优化,缩短响应延迟、降低能耗。(3)人机协同智能自动化运行底层架构:构建“云端训练-边缘推理-端侧执行”协同架构,人类通过增强现实、自然交互界面实现任务分配与异常介入,智能系统承担常规决策,形成安全、高效的人机混合运行模式。

2 人工智能技术在机械自动化中的典型应用

2.1 AI技术在机械加工自动化中的应用

(1)基于机器视觉的工件自动分拣与对位加工:部署工业相机和环形光源采集图像,采用YOLOv5、FasterR-CNN等算法识别工件类别、颜色及位姿,驱动并联或串联机械臂高速抓取分拣;通过视觉伺服反馈进行亚像素级边缘匹配,引导数控机床完成钻孔、铣削、激光切割等对位动作,定位误差 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,提升多品种混线加工柔性。(2)AI自适应数控加工:在主轴、刀具及夹具处集成三向振动、热电偶和切削力传感器,实时采集多模态数据。采用深度确定性策略梯度(DDPG)等深度强化学习算法动态优化进给率、转速和切深。当模型预测到颤振或刀具加速磨损时自动降参规避,工况

稳定后逐步恢复。加工效率提升15%~20%，刀具寿命延长30%以上^[2]。（3）精密零件智能打磨修型：融合三维结构光扫描与六维力传感器，重建复杂曲面余量分布；基于阻抗控制与深度策略网络规划磨具轨迹和法向接触力。系统自适应不同铸造或锻造毛坯的初始偏差，实现恒力打磨与自适应修型，精度 $\pm 0.02\text{mm}$ ，避免过磨/欠磨缺陷，减少人工返修工作量。

2.2 AI技术在机械设备运维自动化中的应用

（1）机器学习驱动设备潜在故障提前预警：采集振动加速度、声发射、电流、温度等历史数据，提取时频域统计特征与波形指标，训练孤立森林、LSTM自编码器或单类支持向量机模型。系统在边缘侧实时计算重构误差或异常得分，当得分超过自适应阈值时，可在轴承微裂纹、齿轮点蚀或转子不平衡等故障萌芽期提前2~7天发出预警，准确率超过92%，实现从事后维修向预测性维护的跨越^[3]。（2）自动化生产线设备智能诊断、自主检修调控：构建卷积神经网络与知识图谱相融合的层次化诊断模型，输入实时工况数据流即可在秒级内定位故障部件及原因（如电机绕组匝间短路、气动回路泄漏、传送带跑偏）。结合边缘控制器与PLC，系统自主下达调控指令——切换冗余泵组或电机、调整生产节拍、旁路故障工位，保障产线非中断运行，平均修复时间缩短40%以上。（3）机械传动、液压系统损耗智能监测与优化：在齿轮箱、轴承座和液压阀组处部署油液颗粒传感器、铁谱分析探头以及温度振动复合传感器。利用高斯过程回归或长短时记忆网络预测磨损趋势与剩余寿命。通过贝叶斯优化动态调整润滑周期、工作压力及流量设定值，使齿轮传动效率提升8%~12%，液压系统待机能耗与工作能耗综合降低10%~15%。

2.3 AI技术在机械装配与物流自动化中的应用

（1）工业机械臂AI自主精准装配作业：结合2D/3D视觉引导与力位混合控制，机械臂可识别散乱堆放的零部件并自主规划抓取位姿。采用深度模仿学习从人工演示中学习装配技能，完成齿轮压装、螺纹紧固、卡簧安装等复杂动作，重复定位精度达 $\pm 0.02\text{mm}$ 。系统支持多品种混线装配，换产时间缩短70%，显著降低人工示教成本。（2）车间智能输送机械自动化调度、路径规划：基于数字孪生模型与深度Q网络，实时感知AGV/传送带/悬挂链的载荷状态、位置及任务优先级。算法动态规划全局路径与局部避障策略，自动解决交叉路口死锁与交通拥堵，实现物料准时配送。调度响应时间降至毫秒级，运输效率提升30%以上，空驶率降低25%，能源消耗下降12%^[4]。（3）成品机械产品智能质检、分类入库自动化

流程：搭建多光谱成像与线激光3D轮廓检测系统，利用UNet、EfficientNet等缺陷检测网络识别表面划痕、毛刺、气孔、尺寸超差等缺陷。不合格品由分流机构自动推入返修线，合格品按类别、批次及优先级由码垛机器人进行智能码放入库。单件质检节拍不超过2秒，检测准确率 $\geq 99.5\%$ ，实现无人化终检与仓储交接。

2.4 应用案例实证分析

（1）制造企业AI智能机械生产线项目概况：某汽车零部件企业引入AI智能机械生产线，涵盖五台数控机床、六轴协作机械臂、AGV车队及中央边缘服务器。产线用于发动机缸盖的铣削、打磨、装配及终检，原为人工与半自动设备混合产线，年产能10万件，人员35人。

（2）项目应用落地流程与实施效果：分三阶段实施：①部署视觉、力觉与振动传感网络，采集三个月运行数据；②训练故障预测、参数优化及分拣模型，嵌入PLC与工控机；③整线联调、人员培训及试运行。实施后，设备综合效率由65%提升至83%，故障停机率降低56%，废品率从3.2%降至1.0%。（3）应用前后生产效率、能耗、误差数据对比：应用前，单件加工周期6.5分钟，产线日产量320件；应用后周期缩短至4.7分钟，日产量提升至440件（增幅37.5%）。单位产品电耗从 $2.4\text{kW}\cdot\text{h}$ 降至 $1.85\text{kW}\cdot\text{h}$ （降幅23%）。关键尺寸加工误差由 $\pm 0.05\text{mm}$ 缩小至 $\pm 0.012\text{mm}$ ，装配对位成功率由91%提升至99.7%。

3 基于人工智能技术的机械自动化应用现存问题、优化对策与发展展望

3.1 人工智能赋能机械自动化现存应用问题

（1）软硬件适配问题：老旧机械设备多采用专用控制器、封闭式现场总线及模拟量信号传输，缺乏标准化数据接口与边缘算力支撑。AI改造时面临驱动协议不兼容、传感器信号无法有效采集、智能模块物理嵌入困难等问题，导致改造成本高企且周期漫长。（2）技术成本问题：高端智能控制系统依赖进口高算力工控机、高精度3D视觉传感器、实时以太网交换设备及专用AI加速芯片，单条生产线智能化改造成本通常超过百万元。中小制造企业因资金有限难以承担，严重制约AI技术的大规模普及应用。（3）运维与人才问题：人工智能与机械自动化的交叉学科知识要求较高，既熟悉设备工艺、又掌握算法部署与模型调优的复合型运维人才严重短缺。企业普遍缺乏自主维护AI模型的能力，系统故障后依赖原厂支持，导致停机时间延长。（4）工况适配问题：实际机械作业环境存在强振动、粉尘、电磁干扰、光照剧烈变化等不利因素，导致视觉图像质量下降与传感数据失真。预训练模型在未知异常工况下泛化能力不足，频

繁出现误报或漏报,影响自动化运行的可靠性。

3.2 人工智能机械自动化应用优化对策

(1) 推行模块化改造方案,降低老旧机械升级适配难度:开发标准化数据采集单元与边缘智能网关,支持Modbus、PROFINET、OPCUA、EtherCAT等多种协议转换,以“即插即用”方式连接老旧设备控制器及传感器,实现数据采集、边缘推理与指令下发,显著降低改造门槛。(2) 研发轻量化开源AI算法,压缩项目落地建设成本:采用模型剪枝、知识蒸馏、权重量化等技术压缩深度学习模型,使其可部署于ARM架构或低功耗边缘计算平台(如树莓派、JetsonNano)。推广开源算法框架与行业预训练模型,减少企业从头开发投入,力争将单条产线智能化成本控制在较低水平。(3) 搭建校企人才培养体系,补齐复合型工程人才短板:高校增设“智能机械工程”交叉学科,联合企业建立实训基地与订单式培养机制。推行“理论授课+项目实操+认证考核”模式,鼓励企业内部培养既懂机械工艺、又会算法编程、能独立调试的AI自动化工程师。(4) 优化算法模型,提升极端工况下自动化运行稳定性:引入域自适应学习、对抗训练及多模态融合方法,增强模型对噪声、遮挡、光照变化的鲁棒性^[5]。部署边缘-云协同推理机制:边缘端执行实时轻量推理,云端负责重校准与异常复核。当信号质量恶化时自动启用备用逻辑或人工远程接管,确保系统安全。

3.3 行业未来发展趋势展望

(1) 多算法融合,全域无人化机械自动化生产线发展:未来将深度融合计算机视觉、力觉感知、自然语言处理及大语言模型推理能力,实现从原材料入库、加工装配、质量检测到成品出库的全流程无人化运行。生产线具备自学习、自决策与自重构能力,可灵活适应多品种变批量柔性制造需求。(2) 数字孪生+AI协同驱动机

械智能化迭代升级:构建高保真物理模型与实时数据驱动的数字孪生体,AI算法在虚拟环境中完成控制策略预训练、工艺参数优化及故障模拟演练,再将成熟模型无缝迁移至实际设备。虚实闭环加速算法迭代,缩短新技术验证周期80%以上。(3) 绿色低碳AI机械自动化、小型化智能装备发展方向:AI算法将被用于能耗实时监测与动态优化、轻量化结构拓扑优化设计及余热回收智能控制。同时大力发展模块化、可移动、低功耗的小型智能装备,降低制造、运行与全生命周期碳足迹,推动机械自动化向可持续方向转型。

结束语

综上,人工智能为机械自动化突破传统发展瓶颈提供核心技术支撑,全面优化加工、运维、仓储全生产流程,有效提升产能、压缩误差、降低生产能耗。当下行业仍面临软硬件适配差、成本高昂、复合型人才短缺等现实阻碍,依托模块化改造、轻量化算法、校企育才、模型优化可有效破解难题。未来依托数字孪生、大模型赋能,机械自动化将朝着全域无人、绿色低碳、柔性协同方向进阶,赋能制造行业长效高质量发展。

参考文献

- [1] 夏付欣.人工智能技术在机械设计制造及其自动化中的应用[J].造纸装备及材料,2022,51(4):111-113.
- [2] 曾昊.人工智能在机械加工装备中的应用探讨[J].内燃机与配件,2021,17(23):205-209.
- [3] 王皓.基于创新转变视角下的智能机械制造和加工模式研究[J].内燃机与配件,2022,8(19):100-102.
- [4] 罗利河.基于人工智能技术的机械制造全过程控制系统设计[J].现代电子技术,2022,45(15):182-186.
- [5] 罗慈航.探究机械制造中智能机器人数控技术的应用[J].科技资讯,2022,20(15):11-14.