

机械设计制造及自动化关键技术分析

吴天昊

宁夏紫光天化蛋氨酸有限责任公司 宁夏 中卫 755000

摘要: 本文围绕机械设计制造及自动化展开研究,阐释学科内涵、系统架构与应用优势,梳理优化设计、精密加工、机电控制、数字化运维四大核心关键技术,剖析现阶段高端技术受限、企业落地困难、复合型人才缺失、绿智融合不足等现实问题,针对性提出技术攻关、降本落地、人才培养、工艺融合优化策略,预判智能化、绿色化、微型化、国产化行业发展趋势,助力机械制造行业提质增效、突破技术瓶颈,推动智能制造产业长效发展。

关键词: 机械设计制造; 自动化; 关键技术

引言: 智能制造全面推进背景下,机械设计制造及自动化成为工业制造转型升级核心支撑,依托机电一体化技术打破传统人工制造短板。当下工业生产对设备加工精度、生产效率、柔性化生产要求持续提升,传统机械制造模式难以适配现代生产需求。基于此,本文结合行业生产实际,梳理该专业基础理论与核心架构,拆解各类核心关键技术,深挖技术落地痛点,制定优化方案并研判未来走向,为机械自动化技术迭代、行业规模化应用提供理论参考。

1 机械设计制造及自动化基础理论与核心概述

1.1 机械设计制造及自动化基本内涵

(1) 机械设计制造核心定义与应用范畴: 机械设计制造是以力学、材料科学为基础,研究机械产品设计、加工、装配及运行维护的工程技术学科。其应用范畴涵盖从简单机构到复杂装备的全生命周期,包括方案设计、强度校核、工艺规划、生产制造与质量控制,广泛应用于交通、能源、医疗、国防等领域。(2) 机械自动化技术核心原理: 机械自动化通过计算机、传感与控制技术,使机械系统能按预设程序自主完成动作与任务。其核心在于将检测信号、逻辑判断与执行驱动闭环结合,实现对位置、速度、力等参数的自动调节,替代人工操作。(3) 机电一体化融合发展核心逻辑: 机电一体化强调机械、电子、控制、计算机与检测技术的深度融合。其逻辑在于: 机械本体提供结构支撑,电子与控制实现智能决策,传感器形成反馈通道,从而构建出功能集成、结构紧凑且具备自适应能力的高性能系统。

1.2 机械自动化系统组成架构

(1) 机械本体执行系统: 包括机身、传动件(齿轮、丝杠、同步带)、导轨、工作台及末端执行器(如夹爪、刀具),负责承载并完成既定运动与力输出。(2) 信息感知与检测系统: 由位置、速度、力、视觉等

传感器及信号调理电路组成,实时采集系统运行状态与工艺参数,为控制提供数据依据^[1]。(3) 自动控制与驱动系统: 以PLC、微控制器或运动控制卡为核心,结合伺服电机、步进电机或液压驱动单元,按照控制算法对执行系统进行精准闭环调控。(4) 辅助运维集成系统: 包括润滑、冷却、排屑、故障诊断及人机交互界面,保障系统长期稳定运行,降低停机风险。

1.3 技术应用核心优势与行业应用场景

(1) 技术应用核心优势: 精度高(微米甚至纳米级定位)、自动化程度高(减少人工干预)、生产稳定性强(一致性好且可24小时连续运行),同时具备快速换产与数据追溯能力。(2) 装备制造行业应用场景: 应用于数控机床、工业机器人、航空航天部件加工、汽车发动机生产线等场景,实现复杂零部件的精密成形与装配。(3) 轻工、重工及智能制造生产线应用场景: 轻工领域如食品包装、医药灌装自动化线;重工领域如冶金轧钢、矿山破碎装备;智能制造生产线则融合AGV、MES与数字孪生技术,实现柔性排产与全流程协同。

2 机械设计制造及自动化核心关键技术

2.1 现代化机械优化设计关键技术

(1) CAD/CAM计算机辅助设计技术: 基于SolidWorks、NX、CATIA等三维建模平台,完成产品数字化几何定义、虚拟装配与干涉检查,并通过CAM模块自动生成刀具轨迹与数控代码,实现设计制造一体化。该技术显著缩短开发周期,提高设计复用率,支持复杂曲面与异构装配体的快速迭代,为后续仿真分析提供精确几何模型。(2) 有限元仿真优化设计技术: 运用有限元方法对机械结构进行线性/非线性静力学、模态、谐响应及瞬态动力学分析,精确预测应力分布、弹性变形与固有频率。结合拓扑优化算法,在满足强度、刚度及动态性能约束下自动删减低效材料,实现结构减重与抗

振性能提升^[2]。该技术还支持多物理场耦合分析（如流固耦合、热力耦合），为高端装备可靠性设计提供科学依据。（3）模块化、轻量化机械结构设计技术：将整机分解为独立功能模块（动力模块、传动模块、执行模块），统一接口尺寸与连接方式，支持快速换型与变型设计，降低零部件种类与管理成本。同时采用高强钢、铝合金、碳纤维复合材料以及薄壁加强筋、点阵填充等工艺，降低运动部件惯量，提升系统响应速度与能源利用效率。轻量化设计还延伸至增材制造领域，实现拓扑优化与点阵结构的一体化成型。

2.2 精密化机械制造加工关键技术

（1）超精密切削与磨削加工技术：采用单晶金刚石刀具或CBN砂轮，在超精密机床上配合高刚度空气静压主轴、液体静压导轨及恒温恒湿隔振环境，实现亚微米至纳米级材料去除。用于光学透镜、精密模具、反射镜等零件加工，表面粗糙度可达 $Ra \leq 0.01\mu m$ ，形状精度达亚微米级。近年来与原位测量、误差补偿技术深度结合，提升加工一致性。（2）数控一体化加工成型技术：依托五轴联动加工中心、车铣复合机床，将车、铣、钻、镗等多工序集成于一次装夹中完成，结合在线测头测量与自适应补偿算法，消除多次定位误差^[3]。显著提高叶轮、机匣、整体叶盘等复杂零部件的位置精度与形位公差等级，减少辅助时间与工装数量，是高柔性制造的核心手段。（3）新型材料成型与特种加工技术：针对高温合金、钛合金、硬质合金及碳纤维复合材料等难加工材料，采用电火花加工、激光切割与焊接、超声波加工、水射流切割及增材制造等非传统工艺。其中激光粉末床熔融、电子束熔融等技术可实现微细结构、异形流道、整体构件及梯度材料的精确成型，为航空航天、医疗器械等领域提供关键制造能力。

2.3 机电一体化自动控制关键技术

（1）PLC可编程逻辑控制技术：以模块化PLC为核心控制器，通过梯形图、功能块或结构化文本编写逻辑程序，对开关量与模拟量进行顺序控制、定时计数、逻辑运算及简易闭环调节。该技术具备强抗干扰能力、高可靠性及丰富的工业通信接口（如Profinet、EtherCAT、ModbusTCP），广泛用于自动化生产线、物流分拣及过程控制领域。近年来，PLC与边缘计算融合，实现本地数据处理与云端协同。（2）伺服驱动与闭环反馈控制技术：采用永磁同步伺服电机配合高分辨率编码器或光栅尺，构成位置、速度、力矩三闭环调节系统。通过PID参数整定、前馈补偿及陷波滤波算法，实现微米级定位精度与毫秒级动态响应，支持电子齿轮、电子凸轮等多轴

精确同步运动。现代伺服系统还集成振动抑制与负载观测器，显著提升高速高精加工条件下的稳定性。（3）传感器实时检测与智能调控技术：集成功力传感器、激光位移计、工业相机、温度传感器等多类传感元件，实时采集工件位置、加工负载、环境温度等工况信息。控制器运行模糊PID、自适应控制或模型预测算法，动态调节执行器输出，使系统具备对外部扰动与负载变化的鲁棒性^[4]。该技术还支持基于视觉的在线缺陷检测与自动补偿，实现加工过程的自适应闭环优化。

2.4 智能集成与数字化运维关键技术

（1）工业物联网数据互联互通技术：基于OPCUA、MQTT、ModbusTCP等协议，将PLC、CNC、工业机器人、AGV及智能仪表接入工业云平台或边缘网关，实现异构系统数据采集、协议转换、边缘处理与实时上传，打通信息孤岛，为生产管控、质量追溯及能耗优化提供统一数据底座。结合5G低延迟通信，支持移动设备与远程运维。（2）设备故障智能诊断与预警技术：采集振动频谱、电机电流、温度序列、声发射等状态信号，利用小波包分解、深度神经网络或支持向量机等算法提取故障特征，对轴承磨损、齿轮断齿、刀具破损、润滑劣化等早期异常进行在线识别、趋势分析与预警，指导预测性维护，减少非计划停机，延长设备寿命，并可生成健康报告与维修建议，实现设备全生命周期管理。（3）数字化生产线协同集成技术：通过MES与ERP、WMS、PLM深度集成，结合AGV协同调度、工位触摸屏报工、视觉质量检测及数字孪生模型，实现生产订单自动分解、物料准时配送、工艺参数下发、质量数据全程追溯与整线节拍动态平衡。数字孪生模型支持生产过程仿真与瓶颈分析，显著提升柔性制造与多品种混流生产能力。

3 机械设计制造及自动化关键技术现存问题、优化策略与未来发展趋势

3.1 当前自动化设计制造技术应用现存问题

（1）高端核心技术受制于人，自主研发能力不足：高端数控系统、工业仿真软件、精密传感器等长期依赖进口，高速电主轴、高精度光栅尺等核心部件存在“卡脖子”风险，自主知识产权积累薄弱，国产装备在精度保持性与可靠性方面仍有差距。（2）设备运维成本高，中小型企业落地难度大：自动化产线初期投入大，后期维护依赖原厂技术支持，备件周期长、故障停机损失高。中小企业受限于资金与技术力量，难以承担智能化改造与后续运维费用，导致数字化普及率偏低。（3）技术适配性差，复合型专业技术人才短缺：通用自动化方

案难以适应多品种小批量、频繁换产的生产需求,现场调试周期长。同时,行业缺乏既懂机械设计又精通控制算法与软件编程的复合型人才,严重制约新技术的快速落地与应用推广。(4)智能化、绿色化技术融合程度较低:多数产线仍停留在基础自动化和单机节能层面,人工智能算法、数字孪生与绿色制造工艺(如干式切削、余料回收、低能耗热处理)尚未深度集成,整体能效水平与自适应调节能力明显不足。

3.2 机械设计制造自动化关键技术优化改进策略

(1)加大核心技术研发,突破零部件技术壁垒:设立国家级专项攻关计划,重点突破高性能伺服驱动、高分辨率编码器、实时工业以太网芯片等核心部件。鼓励产学研协同创新,加速国产CAE/CAM软件生态建设,提升高端装备自主保障能力。(2)简化设备架构,降低产业化落地应用成本:开发模块化、可重构的自动化单元,减少非标设计与定制开发工作量。推广国产替代元器件与标准化通信协议,利用边缘计算降低对高端控制器的依赖,形成面向中小企业的轻量化、低门槛解决方案^[5]。(3)搭建人才培养体系,补齐专业人才短板:在高校推进“机械+控制+软件”跨学科课程体系,建设校企联合实训基地与产业学院。开展在职人员数字化技能培训,建立行业认证标准,通过产教融合加速复合型人才供给。(4)推进绿色工艺、智能算法与传统技术融合:将节能电机、能量回馈、微量润滑等绿色技术嵌入标准设备;研发基于强化学习的智能调控算法,实现能耗与产能动态优化。建立全生命周期绿色制造评价体系,推动环保与经济效益协同。

3.3 行业技术未来发展趋势

(1)智能化:人工智能与机械自动化深度融合:深度学习用于工艺参数优化、视觉质量检测与预测性维护,边缘AI使设备具备自学习、自适应能力。未来将实现生产现场少人化乃至无人值守,推动智能车间与黑灯工厂普及。(2)绿色化:低碳节能、无污染制造工艺普

及:干式切削、低温冷风加工、可降解切削液等技术逐步替代传统湿切。产品轻量化设计与再制造技术广泛应用,配合可再生能源驱动,助力碳达峰与碳中和目标实现。(3)集成化、微型化:一体化设备与微型机械发展:机电软控高度集成,出现更多一体化关节、微型传感器与执行器。MEMS工艺推动微纳加工装备、可穿戴制造设备及便携式自动化工具创新,满足生物医疗、消费电子等新兴领域需求。(4)国产化:自主可控成套装备技术全面落地:从高端数控系统、工业机器人到MES软件形成完整国产解决方案,关键零部件国产化率大幅提升。在航空航天、船舶、轨道交通等战略领域实现全链条自主安全可控,彻底突破外部技术封锁。

结束语

综上,机械设计制造及自动化多项关键技术贯穿产品设计、加工、运维全流程,有效提升制造精度与生产效率,赋能多行业智能制造升级。现阶段行业仍面临核心技术、成本、人才多重发展桎梏,唯有落实技术攻坚、成本优化、人才培养、绿智融合多项举措,贴合行业发展趋势革新技术体系,才能破解发展难题。未来需持续深耕自主化智能技术,推动绿色制造落地,助力我国机械制造业摆脱技术制约,实现高质量可持续发展。

参考文献

- [1]徐伟.机械设计制造及其自动化关键技术研究与应用[J].现代机械工业,2022,4(1):118-122.
- [2]陈海生.实现我国制造业由大变强的几大技术支撑体系[J].科技创新与战略,2021,9(7):55-58.
- [3]吕爱英.人工智能在机械设计制造及自动化中的应用分析[J].中国设备工程,2024,28(8):269-271.
- [4]熊俊.机械设计制造及其自动化技术在智能制造领域的应用研究[J].玩具世界,2024,11(3):71-73.
- [5]陈华信,贾绍华.机械设计制造及其自动化在智能制造领域的应用[J].上海包装,2024,6(2):27-29.