

智能制造时代机械设计制造及其自动化技术研究

陈佰全

郑州机电工程研究所 河南郑州 450000

摘要: 智能制造时代, 机械设计制造及其自动化技术深度融合信息技术, 实现生产网络化、自动化与智能化。其技术特征涵盖数字化设计、智能化制造系统架构及数据驱动的自动化升级。关键技术包括智能感知与识别、决策与控制、数字孪生与虚拟调试等。该技术显著提升生产效率、产品质量, 降低生产成本, 推动制造业向个性化、绿色化、服务化转型。

关键词: 智能制造时代; 机械设计制造; 自动化技术

引言

在全球制造业竞争加剧、科技迅猛发展的当下, 智能制造成为产业升级的核心方向。机械设计制造及其自动化作为制造业的根基, 正经历深刻变革。传统模式在效率、精度、灵活性等方面面临诸多挑战, 难以满足市场多样化需求。智能制造融合信息技术与制造技术, 为机械设计制造带来全新机遇, 深入研究其技术, 对提升我国制造业竞争力意义重大。

一、智能制造时代机械设计制造的技术特征

(一) 数字化设计技术革新

(1) 基于MBD(模型定义)的全三维设计: 打破传统二维图纸与三维模型分离模式, 将产品几何形状、尺寸公差、工艺要求等信息集成到单一三维模型中, 实现设计数据的统一管理, 减少信息传递偏差, 提升设计效率。(2) 虚拟仿真与数字孪生技术: 在虚拟环境中构建产品与生产系统的数字孪生体, 通过仿真模拟产品性能、加工过程及生产线运行状态, 提前发现设计缺陷与生产瓶颈, 降低物理试错成本。(3) 协同设计平台的云化应用: 依托云端平台实现多团队、跨地域协同设计, 设计人员可实时共享模型、同步修改进度, 解决传统设计中版本混乱、沟通滞后问题, 缩短设计周期。

(二) 智能化制造系统架构

(1) 工业互联网与设备互联互通: 通过工业互联网将机床、机器人、传感器等设备接入统一网络, 实现设备间数据实时交互与远程监控, 打破“信息孤岛”, 为系统协同运行奠定基础。(2) 自适应加工与柔性生产线: 生产线可根据产品类型、批量变化自动调整设备参数与

工序流程, 适配多品种、小批量生产需求, 提升制造系统的灵活性与适应性。(3) 基于AI的工艺规划与优化: 利用AI算法分析海量工艺数据, 自主生成最优加工方案, 并实时优化工艺参数, 解决传统工艺规划依赖经验、效率低的问题, 提升加工精度与效率^[1]。

(三) 数据驱动的自动化升级

(1) 工业大数据采集与分析: 通过部署各类传感器采集生产全流程数据, 结合大数据分析技术挖掘数据价值, 为生产优化、质量管控提供数据支撑。(2) 智能传感器与边缘计算应用: 智能传感器实现高精度、多维度数据采集, 边缘计算节点就近处理实时数据, 降低数据传输延迟, 保障设备控制的实时性。(3) 预测性维护与质量闭环控制: 基于设备运行数据与AI算法预测故障风险, 提前开展维护; 同时通过质量数据实时分析, 形成“检测-反馈-优化”的质量闭环, 提升产品合格率。

二、智能制造时代机械设计制造及其自动化技术

(一) 智能感知与识别技术

(1) 多模态传感器融合技术: 整合振动、温度、视觉、声学等不同类型传感器数据, 通过数据融合算法消除单一传感器的检测偏差, 实现全面精准的状态感知。例如在重型机床监测中, 将振动传感器捕捉的设备震颤数据、温度传感器采集的主轴温升数据, 与声学传感器记录的异响信号融合分析, 可精准识别齿轮磨损、轴承老化等故障, 故障诊断准确率较单一传感器提升45%以上。(2) RFID与机器视觉应用: 在零部件生产全流程中, 通过RFID标签存储物料规格、加工工序等信息, 实现物料自动追溯; 机器视觉系统则借助高清相机与AI算法, 完成零部件尺寸检测、表面缺陷识别等任务。如汽车零

部件生产线中，RFID技术可实时追踪发动机缸体流转状态，机器视觉可在0.5秒内完成缸体表面划痕、气孔等缺陷检测，检测效率较人工提升10倍，漏检率控制在0.1%以下。

（二）智能决策与控制技术

（1）基于深度学习的工艺参数优化：构建深度学习模型，输入海量历史工艺数据（如切削速度、进给量、材料硬度等）与产品质量数据，模型通过迭代训练自主学习参数间的关联规律，输出最优工艺方案。以航空发动机叶片加工为例，该技术可将叶片加工的切削参数优化后，使加工效率提升25%，同时叶片表面粗糙度从 $Ra1.6\mu m$ 降至 $Ra0.8\mu m$ ，满足高精度制造需求^[2]。（2）分布式控制系统（DCS）升级：传统DCS升级为具备边缘计算能力的智能分布式系统，采用“云-边-端”架构实现控制功能分散部署，减少数据传输延迟。例如在化工机械生产线上，升级后的DCS可将各设备控制节点的实时数据在边缘端预处理，仅将关键决策数据上传至云端，使系统响应速度从秒级降至毫秒级，同时支持多生产线协同控制，提升整体生产效率18%。

（三）数字孪生与虚拟调试技术

（1）物理-虚拟空间映射机制：通过高精度建模技术，在虚拟空间构建与物理设备、生产线完全一致的数字孪生体，借助实时数据传输实现两者状态同步。映射过程中，采用三维激光扫描获取物理设备几何参数，结合传感器实时数据更新虚拟模型的运行状态，确保虚拟体与物理体的误差小于0.1mm，为后续调试、优化提供精准的虚拟环境。（2）虚拟调试缩短研发周期案例：某新能源汽车电池壳生产线研发中，通过数字孪生技术在虚拟环境中完成设备布局、工序流程、控制逻辑的调试，提前发现机械干涉、程序漏洞等问题。相较于传统物理调试，虚拟调试将研发周期从6个月缩短至3个月，同时减少物理样机制作成本300万元，投产后生产线故障率较预期降低50%^[3]。

（四）增材制造与智能加工技术

（1）金属3D打印工艺优化：针对钛合金、高温合金等金属材料，优化激光功率、扫描速度、层厚等打印参数，结合实时监测技术（如红外测温、X射线成像）控制打印过程中的应力分布，减少零件变形与内部缺陷。例如在航空航天领域，优化后的钛合金构件3D打印工艺，使零件致密度从98%提升至99.8%，力学性能达到锻件标准，满足飞行器轻量化、高强度的设计要求。

（2）智能CNC系统的自适应控制：在CNC系统中集成传感器与自适应算法，加工过程中实时采集切削力、主轴转速等数据，算法自动调整进给速度、切削深度等参数，避免刀具过载或加工不足。如在模具钢加工中，当系统检测到切削力超过阈值时，自动降低进给速度，使刀具寿命延长30%；当检测到材料硬度不均时，动态调整切削参数，保证零件加工精度稳定在 $\pm 0.003mm$ 以内^[4]。

三、典型应用场景与案例分析

（一）船舶制造领域智能化实践

（1）船体钢板冲压线智能排产系统：某船舶重工引入基于遗传算法的智能排产系统，整合船舶分段建造需求、冲压设备产能、模具更换时长等数据，自动生成最优生产序列。当紧急分段订单插入时，系统10分钟内完成排产调整，避免传统人工排产2-3小时的延误，使冲压线设备利用率从72%提升至90%，单日产能增加80套船体钢板冲压件。（2）船体焊接机器人集群协同控制：某造船厂在船体分段车间部署40台焊接机器人，通过工业互联网实现集群协同。中央控制系统根据船体焊缝分布需求，动态分配机器人任务，实时校准运动轨迹防干涉。应用后，船体分段焊接周期从520秒缩短至380秒，焊缝合格率从98.2%提升至99.8%，减少人工补焊工作量58%。

（二）航空航天装备柔性制造

（1）复杂曲面零件的智能加工：某航空制造企业针对发动机涡轮叶片（复杂曲面零件），采用智能CNC加工中心结合三维扫描反馈技术。加工中，激光扫描仪实时采集叶片曲面数据，与数字模型比对，AI算法自动修正切削参数，解决传统加工中曲面精度偏差问题。该技术使叶片加工精度误差控制在 $\pm 0.005mm$ 内，合格率达82%提升至99%，生产周期缩短30%。（2）装配线的数字孪生应用：某航天企业为火箭箭体装配线构建数字孪生系统，虚拟模型实时映射物理装配过程。通过虚拟调试提前优化装配工序，例如模拟箭体对接时的机械应力分布，调整夹具位置，避免物理装配中的部件损伤。应用后，箭体装配周期从45天缩短至28天，装配故障发生率降低70%。

（三）精密仪器制造的质量追溯

（1）基于区块链的工艺数据管理：某医疗精密仪器厂商采用区块链技术存储产品全流程工艺数据，从零部件加工参数到最终装配检测结果，均上传至不可篡改的区块链平台。客户可通过扫码查询完整追溯信息，监管部门也能快速核验数据真实性。该系统使质量追溯时间

从2小时缩短至5分钟，数据可信度提升至100%，有效应对医疗设备的质量监管要求。(2) AI驱动的缺陷检测系统：某光学精密仪器企业引入AI视觉检测系统，通过训练百万级缺陷样本模型，可识别镜头表面的微划痕、气泡等微小缺陷。检测时，高清相机拍摄镜头图像，AI系统0.3秒内完成分析，较人工检测效率提升20倍，漏检率从5%降至0.1%，确保光学仪器的成像精度。

四、智能制造时代机械设计制造及其自动化技术挑战与发展对策

(一) 核心挑战分析

(1) 异构系统集成难度：不同厂商的设备（如机床、机器人）、软件系统（如CAD、MES）存在接口协议不统一、数据格式差异大的问题，导致数据无法顺畅流转。例如设计端三维模型数据难以直接对接生产端设备控制系统，需人工二次转换，不仅增加操作成本，还易引发数据偏差，阻碍全流程智能化协同。(2) 工业软件自主可控问题：高端工业软件（如CAE仿真软件、智能数控系统软件）长期依赖进口，存在技术壁垒与供应链风险。进口软件不仅授权费用高昂，还可能在核心功能上受限，难以满足国内特殊制造场景的定制化需求，同时数据存储与传输的安全性也无法完全保障。(3) 复合型人才短缺困境：智能制造需兼具机械设计、自动化技术、数据分析、AI算法等多领域知识的复合型人才。当前行业内，传统技术人员缺乏数字化、智能化技术能力，而新兴技术人才对机械制造工艺理解不足，导致人才供需错配，制约技术落地与创新。

(二) 关键技术突破路径

(1) 边缘-云端协同计算架构：通过边缘节点就近处理设备实时数据（如加工参数、传感器信号），降低数据传输延迟，保障控制响应速度；云端平台则承担海量数据存储、复杂模型训练与全局资源调度，实现“边缘实时控制+云端全局优化”的协同模式，打破异构系统数据壁垒。(2) 开源工业软件生态建设：依托国内科研机构与企业，搭建开源工业软件平台，开放核心算法与接口标准，吸引开发者参与软件迭代升级。通过开源模式降低软件使用门槛，同时汇聚行业资源攻克关键技术（如高端仿真算法、智能控制逻辑），逐步实现工业软

件自主可控^[5]。(3) 产学研用协同创新机制：推动高校、科研院所与制造企业深度合作，高校根据企业需求设置复合型专业课程，科研院所联合企业开展技术攻关，企业为学生提供实践平台，形成“人才培养-技术研发-产业应用”的闭环，解决复合型人才短缺与技术落地难题。

(三) 标准化与安全体系构建

(1) 智能制造标准体系框架：围绕数据接口、设备互联、工艺流程、质量检测等核心环节，制定统一的国家标准与行业标准，明确技术参数与规范要求，实现不同系统、设备间的兼容互通，为智能制造全流程提供技术依据，降低集成成本。(2) 工业互联网安全防护策略：构建“终端防护-网络隔离-数据加密-风险预警”的多层安全防护体系，在设备终端部署安全防护软件，通过工业防火墙实现生产网络与外部网络隔离，对传输数据进行加密处理，同时建立安全监测平台，实时识别网络攻击与数据泄露风险，保障工业系统稳定运行。

结束语

智能制造为机械设计制造及其自动化技术开辟了全新发展路径，在提升生产效能、优化产品质量等方面成效显著。然而，异构系统集成、工业软件自主可控及复合型人才短缺等问题，仍是前行路上的阻碍。未来，需持续突破关键技术，完善标准化与安全体系，强化产学研用协同。如此，方能推动机械制造业在智能制造浪潮中实现高质量发展，铸就制造业新辉煌。

参考文献

- [1] 刘涵. 人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用分析[J]. 新型工业化, 2020(11): 53-54.
- [2] 邹相宝. 人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用[J]. 集成电路应用, 2020(9): 45-47.
- [3] 张绪勇. 机械设计制造及其自动化的特点优势与发展趋势探究[J]. 设备工程, 2021(14): 101-102.
- [4] 傅建红. 自动化技术在机械设计与制造中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2020, 49(06): 28-30.
- [5] 罗逸敏. 浅析提高机械设计制造及其自动化的有效途径[J]. 内燃机与配件, 2020(23): 182-183.