

机电一体化与智能制造

冯流洋

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450015

摘要: 机电一体化是智能制造的基础, 涵盖机械本体、传感检测、控制驱动及信息处理四大核心技术。智能制造对机电一体化提出全要素互联与全生命周期优化需求, 推动技术融合与升级。本文分析机电一体化核心技术体系及其向智能制造的演进逻辑, 阐述智能制造核心技术支撑体系, 探讨机电一体化与智能制造在技术体系、生产模式、核心装备及人才培养等方面的协同发展方向, 为制造业转型升级提供参考。

关键词: 机电一体化; 智能制造; 技术融合; 协同发展

引言: 制造业是国家经济的基石, 机电一体化作为关键技术, 通过机械、电子、控制等多学科融合, 提升了设备性能与智能化水平。随着信息技术发展, 智能制造成为制造业转型升级的新方向, 强调数据流动与智能决策。机电一体化与智能制造的衔接, 建立在技术融合与创新基础之上, 不仅推动制造系统向更高层次发展, 还对提升生产效率、产品质量及企业竞争力具有重要意义。

1 机电一体化的核心技术体系

1.1 机械本体技术

机械本体技术是机电一体化系统的物质基础, 涵盖结构与材料工程两大核心领域。结构优化设计需兼顾力学性能与功能集成, 通过拓扑优化、多学科协同设计等手段实现轻量化与高刚度平衡。精密传动机构采用谐波减速器、直线电机等新型元件, 突破传统齿轮传动的精度限制, 满足微米级定位需求^[1]。材料工程领域聚焦功能梯度材料与智能材料应用, 形状记忆合金、压电陶瓷等材料通过能量转换实现自感知与自驱动功能。模块化设计理念推动机械系统向标准化、可重构方向发展, 通过接口统一化设计实现不同功能单元的快速组合, 显著提升系统适应性与维护效率。

1.2 传感检测技术

传感检测技术构建机电系统的感知神经网络, 多源信息融合成为关键发展方向。力觉传感器采用应变片与光纤光栅复合结构, 实现三维力/力矩的动态测量, 分辨率突破毫牛级。视觉传感器融合深度学习算法, 突破传统图像处理特征提取瓶颈, 在复杂环境下保持毫米级识别精度。多模态传感器通过时空同步技术实现数据对齐, 利用卡尔曼滤波等算法完成多源信息融合, 显著提升系统对动态环境的适应能力。无线传感网络采用自组织拓扑结构, 通过能量收集技术延长节点寿命, 支持大规模设备群的实时监测。

1.3 控制驱动技术

控制驱动技术实现机电系统的运动精确调控, 智能控制算法与新型执行机构协同发展。模型预测控制通过滚动优化策略处理多变量耦合问题, 在非线性系统中展现优异动态性能。自适应控制算法利用在线参数辨识技术, 自动补偿系统参数漂移与环境扰动。执行机构领域, 直线电机与音圈电机凭借高加速度特性, 在半导体制造领域替代传统旋转电机。压电陶瓷驱动器通过逆压电效应实现纳米级位移输出, 在超精密加工领域展现独特优势。多电平逆变技术提升电力电子变换效率, 宽禁带半导体器件的应用使开关频率突破兆赫兹级。

1.4 信息处理技术

信息处理技术构建机电系统的决策中枢, 边缘计算与数字孪生成为技术焦点。嵌入式处理器采用异构计算架构, 集成ARM内核与DSP单元, 满足实时控制与复杂算法的并行处理需求。现场可编程门阵列(FPGA)通过硬件重构能力, 实现传感器信号的预处理与加密传输。数字孪生技术建立物理系统的虚拟映射, 通过数据驱动模型实现状态预测与健康监测。工业以太网采用时间敏感网络(TSN)协议, 在统一网络架构下实现控制数据与信息数据的确定性传输, 支撑分布式协同控制需求。

2 机电一体化向智能制造的演进逻辑

2.1 机电一体化与智能制造的技术衔接点

机电一体化与智能制造的衔接建立在数据流动与智能决策双向贯通的基础之上。机械系统的数字化建模技术为智能制造提供物理实体映射基础, 通过三维参数化设计实现设备几何特征与工艺参数的关联存储, 使设备信息在虚拟与现实之间精准对应^[2]。传感检测技术的升级推动数据采集维度扩展, 多光谱传感器与惯性测量单元的融合应用, 让设备运行状态数据覆盖振动、温度、应力等多物理场, 为智能制造提供全面丰富的数据支持。

控制驱动技术的开放化改造构建起智能决策的执行通道,OPCUA协议的普及实现不同厂商设备间的语义互操作,为制造系统的横向集成创造有利条件,促进各环节协同运作。信息处理技术的边缘化部署缩短决策链路,嵌入式AI芯片在现场层的实时推理能力,使设备具备初步自主优化能力,提升系统响应速度与智能化水平。

2.2 智能制造对机电一体化系统的升级需求

智能制造环境对机电一体化系统提出全要素互联与全生命周期优化的新要求。机械本体需具备动态重构能力,模块化设计标准向功能单元级延伸,通过快速更换执行模块灵活适应多品种生产需求,提高生产灵活性。传感检测系统向多源异构数据融合方向发展,时间同步精度需达到微秒级以满足运动控制与视觉检测的协同需求,确保数据采集的准确性与及时性。控制驱动架构需支持模型驱动的开发范式,数字孪生技术要求控制器具备虚拟调试功能,在物理设备投产前完成工艺验证,降低开发成本与风险。信息处理能力向知识自动化演进,设备健康管理系统需集成故障预测算法,通过振动频谱分析实现剩余使用寿命预测,为设备维护提供科学依据。

2.3 演进过程中的技术融合路径

技术融合遵循从局部优化到全局协同的渐进路径。硬件层面通过智能传感器与执行器的深度集成,构建具备环境感知能力的自主单元,如集成功能协作机器人末端执行器,提升设备在复杂环境下的自主作业能力。软件层面采用模型驱动的工程方法,将机械设计模型、控制算法模型与工艺参数模型进行关联映射,实现跨学科协同优化,打破学科壁垒,提高系统整体性能。网络层面推动工业互联网平台与现场总线的融合,5G低时延特性支持AR远程运维与AGV集群调度,TSN网络保障关键控制数据的确定性传输,构建高效稳定的网络环境。系统层面构建CPS(信息物理系统)架构,通过虚拟实体与物理实体的双向迭代,实现制造系统的自感知、自决策与自执行能力升级,推动智能制造向更高层次发展。

3 智能制造的核心技术支撑体系

3.1 智能感知与数据采集技术

智能感知技术通过多模态传感器阵列实现制造环境全要素覆盖。视觉感知领域,高分辨率工业相机与3D成像技术结合,在毫米级精度下完成零件尺寸测量与缺陷识别,深度学习算法的引入使系统具备自适应特征提取能力,可根据不同零件特征自动调整识别策略^[1]。力学感知方面,六维力传感器采用应变片与光纤光栅复合结构,实时捕捉加工过程中的切削力波动,为工艺参数优化提供动态输入,助力提升加工质量。环境感知技术集

成温湿度、气压、粉尘浓度等多参数传感器,构建车间微环境数字模型,支持精密加工设备的环境补偿控制,确保设备在稳定环境下运行。数据采集系统向高速率、大容量方向发展,时间同步精度达到纳秒级,满足多传感器数据的时空对齐需求,分布式采集架构支持千量级节点同时在线,数据吞吐量突破GB/s级,为智能制造提供强大的数据支持。

3.2 工业通信与网络技术

工业通信网络构建起制造系统的神经网络,形成有线无线融合的立体化架构。有线通信领域,工业以太网通过TSN时间敏感网络技术实现控制数据与信息数据的确定性传输,确定性延迟控制在5微秒以内,支持运动控制与视觉检测的协同作业。现场总线技术向标准化演进,OPCUA协议打破厂商壁垒,实现设备语义互操作,设备语义解析时间缩短至10毫秒,数据字典统一管理提升系统集成效率。无线通信方面,5G专网利用网络切片技术为制造场景提供专属资源通道,URLLC超可靠低时延特性支持AGV集群调度与远程操控,端到端时延控制在1毫秒以内,毫米波频段应用突破5GB/s级传输速率瓶颈。无线传感网络采用自组织拓扑结构,能量收集技术延长节点寿命,单个节点覆盖范围达50米,支持设备状态实时监测与预测性维护。

3.3 智能决策与控制技术

智能决策技术依托数据驱动与模型融合实现制造系统自主优化。数字孪生技术构建物理设备的虚拟映射,通过机理模型与数据模型的联合仿真,在虚拟空间完成工艺验证与参数优化,缩短产品开发周期。机器学习算法在质量管控领域展现优势,支持向量机与神经网络模型通过历史数据训练,实现加工缺陷的在线预测与工艺窗口动态调整。控制技术向分层递阶方向发展,边缘层采用模型预测控制处理多变量耦合问题,车间层通过分布式协同算法实现多机调度优化,企业层利用大数据分析支撑战略决策。自适应控制技术通过在线参数辨识自动补偿系统漂移,鲁棒控制算法提升设备在动态环境下的稳定性,形成闭环控制与开环优化相结合的混合决策体系。

4 机电一体化与智能制造的协同发展方向

4.1 技术体系的协同优化

技术体系协同聚焦多学科交叉融合与全流程贯通。机械设计与控制算法的协同优化通过参数化建模实现,结构拓扑优化与控制带宽匹配算法联合迭代,提升设备动态响应特性,使设备能够快速准确地响应控制指令^[4]。传感检测与信息处理的深度融合推动边缘智能发展,轻

量化AI模型在现场层完成特征提取与异常检测,减少数据传输延迟,提高系统实时性。工业网络架构向扁平化演进,TSN网络与5G专网构建混合传输通道,实现控制指令的确定性传输与监测数据的按需回传,优化网络资源利用。数字孪生技术贯穿产品全生命周期,物理模型与数据模型在设计、生产、运维阶段持续迭代,形成闭环优化机制,不断提升产品性能与质量。

4.2 生产模式的协同变革

生产模式变革以客户需求为驱动构建柔性化制造系统。模块化生产单元通过快速换模技术实现多品种混线生产,机械接口标准化与电气接口统一化设计缩短产线重构时间,提高生产灵活性,快速响应市场变化。分布式协同制造依托工业互联网平台实现资源动态调配,设备健康状态与订单优先级数据驱动生产计划实时调整,优化生产流程,提高生产效率。预测性维护体系整合振动分析、油液监测等多源数据,通过机器学习模型预测设备故障趋势,将非计划停机时间降低,保障设备稳定运行,减少生产损失。质量管控模式向全过程追溯转变,RFID标签与区块链技术结合,记录原材料批次、工艺参数、检测结果等全要素信息,支持质量问题的快速定位与根源分析,提升产品质量管控水平。

4.3 核心装备的协同创新

核心装备创新聚焦自主感知与智能决策能力提升。智能机床集成力/位混合控制技术,通过压电陶瓷微位移执行器实现纳米级补偿,加工精度突破微米级壁垒,提高加工精度与质量。协作机器人采用力觉传感器与视觉伺服控制,在人机协作场景下自动调整运动轨迹与作用力,安全性与适应性显著增强,拓展机器人应用范围。增材制造设备融合多物理场仿真技术,通过温度场与应力场耦合分析优化打印路径,减少零件变形与内部缺陷,提升增材制造质量。智能物流装备利用SLAM导航算法与多传感器融合定位,在复杂动态环境中实现AGV集

群自主路径规划与避障,提高物流运输效率与准确性。

4.4 人才培养的协同适配

人才培养体系重构以跨学科能力为核心构建。课程体系融合机械设计、自动控制、计算机科学等多学科知识,设置智能传感技术、工业网络通信、数字孪生建模等前沿课程。实践教学平台搭建虚实结合的仿真环境,通过数字孪生系统完成设备调试与工艺验证,降低实训成本与安全风险^[5]。产学研协同机制推动企业真实项目融入教学过程,学生参与技术攻关与系统开发,培养解决复杂工程问题的能力。继续教育体系面向在职工程师开展智能技术培训,模块化课程支持个性化能力提升,满足制造企业转型升级的人才需求。

结束语

机电一体化与智能制造的深度融合,正引领制造业迈向新的发展阶段。通过技术体系协同优化、生产模式变革、核心装备创新及人才培养适配,制造系统实现了从局部优化到全局协同的跨越。这一过程中,数据驱动、模型融合与跨学科协同成为关键驱动力,不仅提升了制造系统的智能化水平,还为制造业的高质量发展注入了新的活力,推动制造业在全球竞争中占据优势地位。

参考文献

- [1]渠文智.机电一体化系统在智能制造中的应用探析[J].消费电子,2025(6):161-163.
- [2]吴波.简析机械制造领域智能化技术与机电一体化融合发展[J].中国设备工程,2025(14):42-44.
- [3]王欣瑞,王伟.基于智能制造的机电一体化设备轧花新工艺研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(6):174-177.
- [4]朱志兴.机电一体化在智能制造中的角色与挑战[J].数码设计,2024(2):96-98.
- [5]朱永海.机电一体化在智能制造中的应用[J].集成电路应用,2023,40(3):168-169.