

数字化制造技术与智能制造系统

张家钦¹ 张海涛²

1. 江苏凯惠电力工程有限公司 江苏 连云港 222248

2. 连云港水表有限公司 江苏 连云港 222004

摘要: 智能制造系统作为制造业数字化转型的核心载体,推动生产模式向高效与柔性方向变革。本文系统探讨了数字化制造技术的核心构成,包括数字化建模、生产调度与质量控制技术,并分析了智能制造系统的层级架构与关键功能。通过数字化与智能化技术的深度融合,能够显著提升制造系统的自主决策与自适应能力,为制造业高质量发展提供理论依据与实践路径。

关键词: 数字化制造技术;智能制造系统;融合发展

引言: 制造业是国家经济的重要支柱,在科技飞速发展的当下,数字化制造技术与智能制造系统成为推动制造业转型升级的关键力量。数字化制造技术以数字信息为核心,实现制造过程精准化;智能制造系统则整合多种先进技术,提升制造系统的智能化水平。深入探究二者,对提升我国制造业竞争力、推动产业高质量发展意义重大。

1 数字化制造技术的核心构成

1.1 数字化建模与仿真技术

产品数字化建模的核心原理在于将物理产品的几何特征、物理属性及功能特性转化为计算机可处理的数字信息。这一过程通过参数化设计、特征提取等技术手段,构建产品三维模型,并关联材料性能、装配关系等数据,形成完整的数字表达。建模的精度直接影响后续仿真与制造的准确性,需兼顾模型复杂度与计算效率的平衡^[1]。制造过程仿真的关键要素涵盖工艺参数、设备状态及环境条件等多维度数据。仿真系统通过集成这些要素,模拟加工过程中的材料变形、热传递及振动现象,预测潜在缺陷并优化工艺路线。仿真结果需与实际加工结果高度吻合,依赖有限元分析、离散事件仿真等数值方法的支撑,确保对复杂制造场景的精准刻画。数字化孪生的基础技术支撑包括数据采集、传输与融合技术。通过部署高精度传感器网络,实时采集设备运行参数与产品状态信息,结合工业互联网实现数据的高效传输。云计算与边缘计算提供算力支持,数字孪生平台则通过数据融合与模型更新,构建与物理实体动态映射的虚拟镜像,支持远程监控与预测性维护。

1.2 数字化生产调度与管理技术

生产过程数字化管控逻辑以数据驱动为核心,通过集成订单信息、设备状态及库存数据,构建实时生产监

控系统。系统依据生产计划与资源约束,动态调整设备运行参数与物料配送路径,实现生产流程的透明化与可控化。管控逻辑需具备快速响应能力,以应对生产过程中的突发扰动。数字化工艺规划核心方法分为基于模型的规划与基于知识的推理。前者通过提取产品特征与制造资源信息,自动生成工艺路线与加工参数;后者依托工艺知识库,结合历史数据与专家经验,推荐最优工艺方案。两种方法均需支持工艺文件的数字化存储与共享,促进工艺知识的积累与复用。物料流与信息流协同技术通过物联网与信息集成平台,实现物料从入库到出库的全流程跟踪。系统为物料赋予唯一数字标识,结合RFID或条码识别技术,实时采集物料位置与状态信息。信息流与物料流的同步更新,确保生产调度与库存管理的精准性,避免因信息滞后导致的资源浪费。

1.3 数字化检测与质量控制技术

数字化检测技术内核在于融合传感器技术、图像处理与机器学习算法,实现检测过程的自动化。高精度传感器捕捉产品尺寸、表面缺陷等微观信息,图像处理技术通过特征提取与模式识别,自动判定产品合格性。检测系统需配备至少5种类型传感器,图像处理分辨率达到1000万像素以上,检测速度每分钟不低于50件产品,以适应大规模生产线的检测需求。全流程质量数据追溯技术构建覆盖产品全生命周期的质量数据链。系统以产品唯一标识为索引,集成原材料检验、工艺参数、设备状态等多源数据,形成完整的质量档案。追溯系统支持正向与反向查询,既可追踪问题产品的生产源头,也可分析特定工序对质量的影响。质量档案需集成至少8类多源数据,查询响应时间不超过2秒。质量偏差的数字化分析方法依托统计过程控制与数据挖掘技术,对质量数据进行实时监控。系统设定控制限与预警规则,自动识别生

产过程中的质量波动,结合关联分析与根因分析,定位偏差根源。控制限设定误差不超过0.1个标准差,关联分析需处理至少10个相关因素。分析结果驱动工艺参数调整或设备维护计划制定,形成闭环质量控制体系,持续提升产品稳定性。

2 智能制造系统的架构与核心支撑

2.1 智能制造系统的整体架构设计

层级化架构是智能制造系统基础框架,含设备层、控制层、执行层与决策层。设备层集成制造装备与传感器,采集数据与执行操作;控制层用工业控制器调控设备动作;执行层整合生产调度与工艺管理,协调多设备作业;决策层依托大数据与人工智能制定全局策略^[2]。设备层传感器数量根据设备复杂度而定,一般不少于2个;控制层工业控制器响应时间不超过10毫秒;执行层协调设备数量不少于5台;决策层处理数据规模达到TB级。各层级功能定位清晰、交互紧密。设备层与控制层闭环控制保单台设备稳定;执行层与决策层信息汇总与策略下发,优化资源配置。交互遵循“自下而上”数据流动与“自上而下”指令传递原则,保障响应速度与决策落地。架构设计原则有模块化、开放性与可扩展性。模块化降低复杂度,模块划分数量根据系统功能而定,一般不少于10个模块;开放性兼容多类型设备与协议,可扩展性满足未来升级拓展需求,确保适应动态生产环境。

2.2 智能制造的感知与互联支撑技术

生产要素感知技术要实现全要素、高精度、实时性数据采集。传感器覆盖多维度物理量,具抗干扰与长期稳定性,感知范围延伸至物料、人员、环境,构建全流程感知网络。每个生产环节至少部署3类传感器,数据采集精度达到0.01级,采集频率每秒1次以上。工业通信网络强调高带宽、低延迟、高可靠性。有线以工业以太网为主,无线用5G、Wi-Fi6等支持移动设备与柔性生产线接入。工业以太网带宽不低于1000Mbps,5G网络延迟不超过10毫秒。网络架构分层兼顾局部与全局需求。设备互联与数据接入技术用标准化协议与中间件集成异构设备。OPCUA、MQTT等打破厂商壁垒,支持跨平台交换;边缘计算节点预处理数据,减轻云端负载。标准化协议需支持至少5种设备类型接入,边缘计算节点处理数据量每秒不低于100MB。数据接入层构建统一模型,确保多源数据一致表达与高效利用。

2.3 智能制造的决策与控制支撑技术

制造数据处理与分析依托大数据平台与机器学习算法,实现海量数据存储、清洗与挖掘。数据治理保质量,特征工程提关键信息,算法揭示规律,为生产优化与故

障预测提供依据。智能决策算法基础有优化算法、强化学习与知识图谱。优化算法求解组合优化问题;强化学学习适应动态场景;知识图谱支持语义推理决策。多种算法融合提升决策鲁棒性。分布式与协同控制技术通过多智能体系统实现设备级与系统级协同。分布式控制分解任务降低单点故障风险;协同控制确保多设备同步与目标一致,支持复杂任务执行与调整。

3 智能制造系统的关键功能实现

3.1 智能生产调度与优化

动态调度智能决策以实时数据驱动,集成多维度数据构建动态优化模型。依据生产优先级、设备负载率、交货期约束生成最优方案。融入强化学习算法,使系统在动态环境持续学习改进,提升适应性与精准性^[3]。生产资源智能配置依托资源画像与需求匹配技术。对资源数字化建模,提取特征信息形成画像库。任务下达时,用智能匹配算法筛选资源组合,动态调整应对扰动,平衡利用率与效率。生产瓶颈智能识别与消解通过数据挖掘与仿真分析实现。实时采集数据,用关联规则挖掘定位关键环节。仿真模块模拟优化策略,推荐改进方案,形成闭环消解机制。

3.2 智能工艺规划与自适应调整

工艺知识数字化建模与复用用知识图谱技术。将工艺规则、设备参数、经验案例转为结构化知识,构建知识库。规划时自动匹配产品特征与案例,推荐基础路线,参数化设计生成方案,缩短周期。基于工况工艺参数自适应优化依托实时数据与机器学习算法。加工中持续采集设备、环境、质量数据,用神经网络模型预测最优参数组合。工况变化时自动调整参数,确保加工稳定与产品一致。多品种小批量生产智能工艺适配通过模块化工艺设计与柔性调度实现。将工艺分解为可重组模块单元,针对产品特征组合路线。调度模块根据订单与设备能力分配模块,支持快速换型与混流生产,满足定制需求。

3.3 设备智能维护与健康管理

设备健康状态智能监测通过多源数据融合实现。集成传感器数据与运行日志,构建健康状态指标体系。用时序数据分析与异常检测算法评估劣化趋势,提前发现故障风险。故障预警与诊断智能方法融合物理模型与数据驱动技术。建立故障机理模型明确映射关系,用深度学习算法挖掘故障模式。数据偏离时结合方法定位根源,提高诊断准确率。全生命周期维护策略智能生成以健康状态与生产需求为依据。根据劣化程度、成本、影响,动态生成预防、预测、纠正性维护方案。维护与生产计划协同优化,减少停机时间,延长寿命,降低成本。

4 数字化与智能制造的融合发展趋势

4.1 技术融合的核心方向

自主决策能力提升依赖多层次智能体协同进化。设备层智能体用强化学习掌握基础技能，控制层智能体用优化算法调度资源，决策层智能体用知识图谱规划全局。各层级通过通信协议共享信息、协同策略，形成全局优化自主决策系统^[4]。设备层智能体训练步数不少于5000步，控制层智能体优化问题规模达到500个变量以上，决策层智能体知识图谱实体数量不少于10000个。协同化与规模化发展推动制造资源跨域整合。供应链企业通过工业互联网平台协同计划与库存，形成虚拟制造联盟；区域集群企业依托5G构建低延迟通信环境，动态聚合利用分布式资源，提升利用率与抗风险能力。虚拟制造联盟企业数量不少于10家，区域集群企业分布式资源聚合规模达到100台设备以上。柔性化与定制化能力强化聚焦快速响应机制。模块化设计贯穿产品、工艺、设备层面，支持功能单元重组扩展；数字主线打通设计、生产、服务数据流，实现客户需求到制造指令实时转化；自适应控制算法根据工况调整参数，确保定制化生产质量稳定。

4.2 智能制造系统的演进方向

自主决策能力提升依赖多层次智能体协同进化。设备层智能体用强化学习掌握基础技能，控制层智能体用优化算法调度资源，决策层智能体用知识图谱规划全局。各层级通过通信协议共享信息、协同策略，形成全局优化自主决策系统。协同化与规模化发展推动制造资源跨域整合。供应链企业通过工业互联网平台协同计划与库存，形成虚拟制造联盟；区域集群企业依托5G构建低延迟通信环境，动态聚合利用分布式资源，提升利用率与抗风险能力。柔性化与定制化能力强化聚焦快速响应机制。模块化设计贯穿产品、工艺、设备层面，支持功能单元重组扩展；数字主线打通设计、生产、服务数据流，

实现客户需求到制造指令实时转化；自适应控制算法根据工况调整参数，确保定制化生产质量稳定。

4.3 未来发展的核心挑战与应对思路

技术层面挑战在于异构系统集成与数据安全保障。不同厂商设备协议差异致互联互通困难，需用标准化接口与中间件构建统一框架；数据泄露风险随系统开放程度提升加剧，需综合加密传输、访问控制、隐私计算构建多层级防护体系。体系层面优化强调生态化发展模式构建。建立产业联盟，制定技术标准与数据规范；培育开放共享工业互联网平台，降低中小企业转型门槛；完善产学研用协同创新机制，加速前沿技术转化应用。长期发展导向聚焦可持续竞争力培育。融入绿色制造理念，用能效优化与再生资源利用降低环境影响；布局人工智能、量子计算等颠覆性技术，抢占产业制高点；构建人才梯队培养体系，提供跨学科复合型人才支撑。

结束语

数字化制造技术与智能制造系统融合发展，为制造业带来新机遇。面对技术集成与数据安全等技术挑战，需构建统一框架与防护体系；体系优化要建立产业联盟，完善协同创新机制；长期发展需融入绿色理念，布局前沿技术，培养复合人才。多方协同努力，推动制造业持续创新升级。

参考文献

- [1]李勇.智能制造与数字化制造在工业制造的有效应用[J].智能建筑与智能城市,2022,(10):120-122.
- [2]宋彦彦,石镇山,纪学成,等.以智能制造推动制造业数字化转型研究[J].中国仪器仪表,2022,(04):31-36.
- [3]周济.智能制造与制造业数字化转型[J].企业家,2022,(07):11-13.
- [4]乔忠银.以智能制造推动制造业数字化转型[J].中国科技投资,2023,(14):16-17.