

离散型制造业智能制造与 AI 技术融合应用综述

丁 瑞

南京天加环境科技有限公司 江苏 南京 210000

摘要：离散型制造业因“多品种、小批量”生产模式，面临效率低、适配性差等挑战。本文综述智能制造中数字孪生、AI与BI技术融合应用，先梳理关键技术定义与国内外研究现状，指出当前技术集成度不足、行业适配性弱、实施路径模糊等不足。接着阐述融合应用方法论，分析典型应用场景，如智能生产调度、质量管控升级等。最后探讨技术融合未来向人机协同深度化等趋势发展，并提出应对数据安全等挑战的对策。

关键词：离散型制造业；智能制造；AI技术；融合应用

引言：在制造业竞争愈发激烈且科技飞速发展的当下，智能制造已成为行业转型升级的关键方向。离散型制造业作为制造业重要组成部分，其产品种类多、生产批量小、工艺复杂，传统生产模式在效率、质量和成本控制上面临诸多困境。人工智能（AI）技术的兴起，为离散型制造业突破瓶颈带来新契机。将AI技术与智能制造深度融合，有望实现生产过程的智能化、柔性化和高效化，推动离散型制造业迈向新的发展阶段。

1 文献综述与理论基础

1.1 关键技术定义与内涵

（1）数字孪生：核心是构建物理实体与虚拟模型的实时映射，实现两者间的双向数据交互，依托传感器采集物理实体运行数据，同步驱动虚拟模型仿真优化，再将优化结果反向指导物理实体运行，是连接物理制造与虚拟仿真的核心纽带。（2）AI技术：涵盖机器学习、计算机视觉、生成式AI、强化学习等核心分支，在制造场景中主要用于替代人工重复性工作、挖掘数据深层价值，实现制造过程的智能化升级与精准管控。（3）BI技术：聚焦数据集成、分析与可视化核心功能，整合制造全流程多源数据，通过数据挖掘提炼有效信息并可视化呈现，为企业生产、管理、决策提供科学支撑，提升决策效率与准确性。

1.2 国内外研究现状

（1）数字孪生在制造领域的应用已形成部分实践成果，国外以西门子、GE为代表，将其应用于工艺优化与设备预测性维护，通过虚拟仿真模拟工艺参数、预判设备故障，降低生产损耗；国内也逐步推进相关应用，聚焦离散制造、流程制造等细分场景。（2）AI技术在制造场景的落地不断深化，伊顿通过AI实现供应链风险预警，宝马将AI应用于质量检测与动态排产，有效提升生产效率、降低质量缺陷率，国内企业也逐步探索AI与生产环

节的融合，推动制造智能化转型。（3）BI技术成为企业数据驱动决策的重要支撑，格力电器通过BI技术整合生产全流程数据，实现生产过程透明化、数据化，为生产调度与决策优化提供支撑，同类应用在制造业逐步普及^[1]。

1.3 现有研究的不足

（1）技术集成度不足：目前相关研究多聚焦于单一技术的独立应用，如AI在质量检测、数字孪生在设备维护中的单独应用较为成熟，但将三者深度融合，实现“感知-分析-决策-优化”闭环的案例较少，技术协同价值未充分发挥。（2）行业适配性弱：现有解决方案多为通用型，难以适配离散制造“多品种、小批量”的柔性生产需求，针对细分行业的定制化方案不足，导致技术落地效果未达预期。（3）实施路径模糊：现有研究多集中于技术应用效果分析，缺乏从方法论设计、技术选型、落地实施到效果评估的系统性框架，导致企业在推进技术融合应用时缺乏明确指引，落地难度较大。

2 离散型制造业智能制造数字孪生、AI与BI的融合应用方法论

2.1 技术融合框架设计

融合框架以“数据为核心、模型为支撑、应用为目标”，构建三层递进式架构，实现数字孪生、AI与BI技术的深度协同，适配离散型制造业柔性生产需求，具体如下：（1）数据层：以工业物联网（IIoT）为核心载体，部署各类传感器、数据采集终端，实现产线设备运行参数、工艺执行数据、生产环境数据、产品质量数据的实时采集，同时通过数据清洗、标准化处理，消除多源数据格式差异，为上层模型构建提供高质量、高时效性的数据支撑，破解离散制造数据分散、杂乱的痛点。（2）模型层：构建三位一体的协同模型体系，实现数据价值转化。1）数字孪生模型：精准构建产线、关键设备、产品的虚拟镜像，同步映射物理实体的运行状态，模拟生

产全流程场景，为后续优化提供虚拟试验载体；2) AI模型：聚焦离散制造核心痛点，搭建基于机器学习的质量预测、动态排产、故障诊断模型，以及强化学习驱动的工艺参数优化模型，实现生产过程的智能化预判与调控；3) BI模型：搭建统一数据仓库与可视化看板，整合全流程数据，实现关键指标的实时呈现与多维度分析，为决策提供直观支撑^[2]。(3) 应用层：聚焦离散型制造业核心业务场景，将三层架构的协同价值落地，涵盖智能设计、动态生产调度、全流程质量追溯、供应链协同、设备全生命周期管理等场景，破解“多品种、小批量”生产模式下的效率低、适配性差等问题。

2.2 关键方法论

(1) 数字孪生驱动的工艺优化,立足离散制造工艺复杂、试错成本高的特点,构建全流程工艺优化体系。1) 通过数字孪生虚拟镜像,模拟不同工艺参数下的生产过程,提前预判工艺缺陷,减少物理试错次数,如德国GFCastingSolutions借助数字孪生优化压铸工艺,大幅降低废品率与试错成本;2) 结合强化学习AI模型,对虚拟仿真产生的海量数据进行分析,实现工艺参数的自适应调整,如在焊接、切削等核心工序中,通过强化学习实时优化参数,提升加工精度与效率。(2) AI与BI协同的决策支持:构建“预测-呈现-调控”的闭环决策体系,提升决策的精准性与时效性。1) AI模型基于历史数据与实时数据,生成设备故障概率、质量缺陷预判、订单交付风险等预测结果,BI技术将这些结果与生产进度、资源利用率等关键指标整合,通过可视化看板直观呈现,助力管理人员快速掌握生产态势;2) 在动态排产场景中,AI算法结合订单优先级、设备负载、物料供应等多维度数据,自动生成最优排产方案,BI实时监控排产执行情况,及时反馈资源利用率与交货期偏差,为排产调整提供依据^[3]。(3) 数据治理与模型迭代:保障技术融合长期稳定运行,破解数据孤岛与模型适配性不足的问题。1) 建立统一数据平台,如采用帆软FineDataLink等工具,整合设备、工艺、供应链、管理等多领域数据,实现数据互联互通,同时建立数据分级管理机制,保障数据安全与质量;2) 引入RAG(检索增强生成)技术,整合离散制造业行业知识、生产经验数据,持续优化AI模型的行业适配性,同时结合BI呈现的模型应用效果数据,定期对数字孪生、AI、BI模型进行迭代升级,确保模型与生产实际需求同步。

3 离散型制造业数字化转型的典型应用场景

3.1 智能生产调度

(1) 搭建基于AI的动态排产系统,采用多目标博弈

模型,综合考量订单优先级、设备负载、物料供应、交货期要求等多维度因素,实现排产方案的快速生成与动态调整,当遇到紧急插单、设备故障等突发情况时,系统可在分钟级完成重新排产,最大限度减少生产中断,提升调度效率;(2) 结合数字孪生技术构建产线虚拟镜像,实时映射物理产线的设备运行状态、物料分布情况,模拟不同物料流转路径的效率差异,优化AGV物料转运路线与调度逻辑,如科捷智能通过数字孪生与AGV系统集成,实现离散产线物料流转的无人化、精准化,大幅降低物料积压与转运损耗,提升生产连续性。

3.2 质量管控升级

(1) 采用计算机视觉+AI技术,部署基于YOLOv5模型的视觉检测设备,对电子元件、机械零部件等产品的外观、尺寸、装配精度进行毫秒级检测,相较于人工检测,不仅大幅提升检测效率,还能精准识别细微缺陷,降低漏检、误检率,有效解决离散制造多品种产品检测适配性差的难题;(2) 借助BI技术整合全流程质量数据,自动生成质量日报、周报,直观呈现各工序缺陷率、缺陷类型、高发时段等关键指标,同时标注质量异常项,联动生产、设备数据追溯缺陷根因,为工艺优化提供支撑,如格力电器的质量追溯系统,通过BI可视化与数据联动,实现从原材料进场到产品出厂的全流程质量追溯,大幅提升质量管控的精准度^[4]。

3.3 预测性维护

(1) 整合数字孪生与LSTM神经网络技术,构建设备虚拟镜像与故障预测模型,实时采集设备运行参数、振动频率、温度等数据,通过模型分析预判设备潜在故障与故障发生时间,如某汽车零部件厂通过该技术,成功减少30%的非计划停机时间,降低设备维护成本与生产损失;(2) AI模型基于故障预测结果与设备历史维护数据,自动推荐针对性的维护方案、维护时间与所需备件,BI技术通过可视化看板展示设备健康度评分、维护优先级排序,助力管理人员合理安排维护计划,实现设备维护的精益化、高效化,延长设备使用寿命。

3.4 供应链协同优化

(1) 采用区块链+数字孪生技术,打通供应商、生产商、经销商等上下游主体的数据壁垒,实现物料供应、生产进度、订单交付等数据的透明化、可追溯,同时结合AI模型分析市场需求、行业趋势等多源数据,精准预测需求波动与供应链供应风险,提前制定应对方案,如马士基通过该技术实现发动机全生命周期监控与供应链协同,大幅提升供应链响应速度;(2) BI技术整合供应链各环节数据,实时监控库存水平、物料到厂进度、物

流效率等指标,动态调整库存策略,实现原材料、半成品、成品的精益化管理,如格力电器依托该模式实现“零库存”实践,减少库存积压资金占用,提升供应链资金周转效率与整体协同能力。

4 技术融合的趋势与挑战

4.1 未来发展趋势

(1) 人机协同深度化: AI技术将全面接管生产调度、质量检测、设备巡检等环节的重复性决策工作,大幅提升工作效率、降低人为误差,而人类专家将从繁琐的基础工作中解放,聚焦工艺创新、技术突破与异常问题处理,形成“AI辅助执行、人类主导创新”的协同模式。例如,工人语音助手的普及的,可实时响应操作咨询、反馈设备异常、传递生产指令,辅助工人高效完成复杂工序操作,实现人机高效联动。(2) 绿色制造常态化: 在双碳目标引领下,技术融合将成为离散制造业实现低碳转型的核心支撑。AI算法可精准分析设备运行参数、能源消耗规律,优化能源分配与使用方案,减少无效能耗;数字孪生技术则可构建生产全流程虚拟镜像,精准模拟原材料加工、生产制造、产品报废全生命周期的碳足迹,定位碳排放关键环节,为工艺改进、节能改造提供科学依据,推动行业实现绿色低碳发展。(3) 自主化工业升级: 离散制造业将逐步从传统自动化生产,向自主化、智能化生产深度跨越。借鉴特斯拉“数据飞轮”效应,通过数字孪生持续仿真优化、AI模型不断学习迭代,实现产线自主调度、设备自主故障诊断与维护、质量自主管控,形成自我感知、自我分析、自我优化、自我迭代的智能生产体系,大幅提升生产柔性与核心竞争力。

4.2 实施挑战与对策

(1) 数据安全和隐私风险: 技术融合需整合设备、工艺、供应链、客户等海量敏感数据,数据传输、存储、使用过程中易出现泄露、篡改、滥用等问题。对此,可采用分层隔离防护策略,核心敏感数据存储于本地服务器,实时操作数据通过边缘设备处理,严格管控互联网访问权限,构建“本地+边缘+云端”的全方位数据安全防护

体系,保障数据安全与隐私。(2) 技术复合型人才短缺: 行业急需兼具AI算法、数字孪生技术与离散制造工艺经验的复合型人才,当前人才供给与企业需求存在较大缺口。可通过产学研深度合作,借鉴盖勒普与上海第二工业大学的联合培养模式,定向输送“算法+工艺”双能力人才;同时加强企业内部培训,提升现有员工的技术素养,搭建多层次人才梯队^[5]。(3) 中小企业转型困境: 中小企业资金、技术实力有限,难以承担大型智能平台的部署、维护成本,转型动力不足。对此,可推广轻量化SaaS化智能平台,如捷一科技的解决方案,降低部署门槛与前期投入,提供按需付费、全程运维的服务模式,助力中小企业以低成本、高效率实现技术融合转型,缩小行业数字化差距。

结束语

离散型制造业智能制造与AI技术的融合应用,是顺应时代发展的必然趋势。通过数字孪生、AI与BI等技术的协同,有效提升了生产效率、质量管控水平和供应链协同能力。尽管目前面临数据安全、人才短缺、中小企业转型困难等挑战,但随着技术发展、人才培养机制完善以及轻量化解决方案的推广,这些问题将逐步得到解决。未来,融合应用将不断深化,推动离散型制造业迈向更高水平的智能化发展。

参考文献

- [1]冯亚芳.人工智能在制造业中的应用与挑战[J].科技经济市场,2024,(08):51-53.
- [2]张小伟.人工智能与大数据在制造业中的应用研究[J].水上安全,2024,(08):80-82.
- [3]杨文旭.人工智能在制造业智能检测中的应用研究[J].智能制造,2023,(05):45-48.
- [4]黄令.人工智能技术在制造业领域的研究概述[J].轻纺工业与技术,2020,49(10):124-125.
- [5]姬学庄,姜宏图.离散型制造企业数字化转型模式探索研究[J].中国仪器仪表,2023,(06):17-22.