

工业大数据在智能制造中的价值释放路径与基础设施支撑需求

刘亚乾

内蒙古自治区大数据中心 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 随着新一代信息技术与制造业深度融合,智能制造已成为全球制造业转型升级的核心方向。作为智能制造的关键使能要素,工业大数据正从“资源”向“资产”乃至“资本”演进,在提升生产效率、优化资源配置、驱动产品创新和服务模式变革等方面展现出巨大潜力。然而,工业大数据的价值释放并非自动实现,其过程复杂且高度依赖于底层基础设施的有效支撑。本文系统梳理了工业大数据的内涵特征及其在智能制造体系中的战略地位,深入剖析了当前工业大数据价值释放过程中面临的主要障碍,并在此基础上,构建了涵盖数据采集、传输、存储、处理、分析、应用与治理全生命周期的价值释放路径模型。进一步的从感知层、网络层、平台层、安全层和治理层五个维度,详细阐述了支撑该价值释放路径所需的新型基础设施体系。

关键词: 工业大数据; 智能制造; 价值释放; 基础设施; 数据治理; 数字孪生

引言

当今世界百年变局与科技产业变革交织,物联网等新一代信息技术重塑全球制造业格局。智能制造作为制造业高级形态,是各国抢占竞争制高点的战略选择。中国“十四五”、“十五五”规划均明确要构建智能制造生态体系,推动制造业发展。在智能制造中,数据成为驱动创新增长的“新石油”,工业大数据蕴含巨大潜能。但从“拥有”到“创造价值”充满挑战,许多制造企业积累海量数据却陷入“数据沉睡”,原因在于对工业大数据价值释放逻辑路径缺乏认知,且基础设施体系不健全,存在感知、网络、算力等多方面瓶颈。因此,深入探究其价值释放路径及对基础设施的支撑需求,意义重大且现实迫切。本文旨在系统回答核心问题,为构建工业大数据价值生态提供思路。

1 工业大数据的内涵、特征与战略地位

1.1 内涵界定

工业大数据是指在工业研发设计、生产制造、经营管理、运维服务等全生命周期各环节中,由人、机、物、环境等要素交互所产生的,是与大数据同样具有体量大(Volume)、类型多(Variety)、速度快(Velocity)、价值密度低(Value)和真实性(Veracity)“5V”特征的数据集合。它不仅包括传统的结构化数据(如ERP、MES系统中的交易记录),更涵盖了海量的非结构化和半结构化数据,如设备传感器时序数据、机器视觉图像、音频日志、工艺文档、供应链信息等。

1.2 核心特征

相较于互联网大数据,工业大数据呈现出独特的“3B”特征:一是规模大(Big):现代智能工厂每秒可产生TB级甚至PB级的数据流。二是质量差(BadQuality):工业现场环境复杂,数据易受噪声干扰,存在缺失、错误、不一致等问题。三是碎片化(Broken):数据分散在运营技术(OT)与信息技术(IT)系统的不同层级和部门,形成“数据烟囱”。此外,工业大数据还具有强关联性(数据间存在复杂的物理、化学、逻辑关系)、高时效性(对实时响应要求高)和强专业性(需领域知识进行解读)等特点。

1.3 在智能制造中的战略地位

工业大数据是智能制造的“血液”和“神经”。它通过与先进制造技术、自动化技术、人工智能技术的深度融合,赋能智能制造的三大核心支柱:(1)智能生产:通过实时监控与分析,实现生产过程的自感知、自决策、自执行与自优化。(2)智能产品:赋予产品在线监测、远程诊断、预测性维护等智能服务功能,催生服务型制造新模式。(3)智能供应链:打通上下游信息壁垒,实现需求精准预测、库存动态优化和物流智能调度^[1]。可以说,没有高质量的工业大数据作为输入,智能制造就是无源之水、无本之木。其价值释放的程度,直接决定了智能制造的深度与广度。

2 工业大数据价值释放的主要障碍

尽管前景广阔,但工业大数据的价值释放仍面临多重障碍:(1)数据采集与感知瓶颈:大量老旧设备缺乏数字化接口,无法接入网络;现有传感器精度、可靠

性不足,导致源头数据质量堪忧。(2)数据孤岛与集成难题:企业内部IT系统(如ERP、CRM)与OT系统(如PLC、SCADA)长期独立建设,数据标准不一、协议各异,难以实现有效融合。(3)分析能力与业务脱节:数据分析团队往往缺乏深厚的工业领域知识,而一线工程师又不熟悉先进的数据分析工具,导致分析结果“好看不好用”,无法解决实际业务痛点。(4)基础设施支撑不足:传统IT架构难以应对工业大数据的高并发、低时延、高可靠要求;边缘计算、云边协同等新型计算范式尚未普及。(5)数据安全与隐私顾虑:工业数据涉及核心工艺、商业秘密乃至国家安全,企业在数据共享与开放方面顾虑重重,制约了数据价值的跨域释放。(6)治理体系缺失:缺乏统一的数据标准、元数据管理、数据质量评估和数据资产确权机制,使得数据难以被有效管理和利用。这些障碍相互交织,共同构成了阻碍工业大数据价值变现的“最后一公里”难题。

3 工业大数据价值释放的路径

为系统性破解上述障碍,本文提出一个覆盖数据全生命周期的“五阶螺旋式”价值释放路径模型。该模型强调价值释放是一个循环迭代、逐级深化的过程。

3.1 阶段一:数据汇聚

核心任务是打破数据孤岛,构建统一的数据湖或数据仓库。通过部署工业物联网网关、OPCUA等通用协议,实现对设备、产线、车间、工厂乃至供应链的全域、全要素数据的全面、实时、可靠采集^[2]。此阶段的关键在于建立统一的数据接入标准和元数据管理体系。

3.2 阶段二:数据治理

原始数据必须经过清洗、转换、标注、融合等治理过程,才能成为高质量的“数据燃料”。此阶段需建立覆盖数据全生命周期的质量管控体系,包括数据血缘追踪、一致性校验、异常检测等,并明确数据的所有权、使用权和收益权,为后续的合规使用奠定基础。

3.3 阶段三:洞察发现

利用统计分析、机器学习、深度学习等技术,从治理后的数据中挖掘隐藏的模式、关联和规律。应用场景包括:基于历史数据的设备故障根因分析、产品质量缺陷的成因追溯、能耗优化的潜力点识别等。此阶段的目标是从数据中提炼出可解释、可行动的业务洞察。

3.4 阶段四:智能决策

将洞察转化为具体的、可执行的决策指令。这通常需要构建数字孪生(DigitalTwin)模型,对物理世界的运行状态进行高保真映射和仿真推演。例如,通过数字孪生体模拟不同的排产方案,自动选择最优解;或根据

预测性维护模型的结果,自动生成维修工单并调度备件。此阶段实现了从“事后分析”到“事前预测”和“事中控制”的跃迁。

3.5 阶段五:价值闭环

将智能决策付诸实践,并通过反馈机制持续优化整个系统。例如,优化后的生产参数被下发到设备控制器,执行后产生的新数据又回流到数据湖,用于验证和修正原有的分析模型。这种“感知-分析-决策-执行-反馈”的闭环,形成了一个自我进化、持续增值的良性循环,最终体现在成本降低、效率提升、质量改善、服务创新等可量化的商业价值上。

4 支撑价值释放路径的基础设施体系需求

高效的工业大数据价值释放,离不开坚实、敏捷、安全的新型基础设施体系。本文将归纳为“五层一体”的支撑架构。

4.1 感知层:构建泛在、精准、可靠的“神经末梢”

感知层核心需求是实现物理制造世界全面、精准、低成本的感知。这首先要求企业对存量设备进行大规模的数字化改造,通过加装各类传感器、边缘智能网关或采用软件定义的方式,唤醒大量处于“沉默”状态的“哑设备”,消除数据采集的盲区。其次,大力发展适用于高温、高压、强振动、强电磁干扰等恶劣工业环境的高可靠性、高精度、长寿命的新型传感器,确保从源头捕获的数据真实、准确、完整^[3]。最后,亟需推广时间敏感网络(OPCUAoverTSN)等统一的、面向未来的工业通信架构,从根本上简化不同品牌、不同类型设备的接入复杂度,为构建一个无缝互联、泛在感知的工业物联网奠定物理基础。

4.2 网络层:打造高速、稳定、确定性的“信息高速公路”

网络层肩负着数据高效、可靠传输的重任,在工业场景中,其性能要求远超普通互联网。工业控制指令、机器视觉检测等关键业务对网络的时延、抖动和可靠性有着近乎苛刻的要求。因此,构建确定性网络成为当务之急,时间敏感网络(TSN)和超高可靠低时延通信(5G)等技术能够为这些关键业务流提供微秒级时延和99.999%以上可靠性的传输保障。在此基础上,需要构建“中心云+区域云+边缘节点”的多层次、协同化网络架构。这种云网边端协同的模式,既能利用部署在车间现场的边缘节点就近处理高时效性数据,有效降低带宽压力和响应时延;又能通过强大的中心云进行跨地域、跨工厂的全局数据融合与复杂AI模型训练,从而在性能、成本与灵活性之间取得最佳平衡。此外,5G/6G网络切片

技术的应用,可以为视频监控、智能搬运机器人(AGV)调度、增强显示(AR)远程专家指导等不同服务等级协议(SLA)需求的业务,提供逻辑隔离、按需定制的虚拟专用网络。

4.3 平台层:构筑弹性、智能、开放的“数据引擎”

平台层是整个基础设施体系的“数据引擎”与智能中枢。它需要一个功能强大、架构先进的工业大数据平台作为核心支撑。该平台在部署架构上,应支持公有云、私有云、边缘云的灵活混合,以满足企业对数据主权、安全合规以及极致性能的差异化需求。在功能层面,平台应内嵌从数据集成、治理、存储、计算到高级分析、可视化及应用开发的全栈式工具链,并提供低代码/无代码的开发环境,大幅降低业务专家和技术人员之间的协作门槛,让数据价值的创造不再局限于专业的数据科学家^[4]。更为关键的是,平台必须是AI原生的,能够深度集成主流的人工智能框架,支持从模型的自动化训练、一键式部署到在线推理和持续学习的全流程,并能与数字孪生、知识图谱等前沿技术无缝融合,为构建高阶的智能应用场景提供源源不断的动力。

4.4 安全层:建立主动、可信、纵深的“免疫系统”

面对日益严峻的网络安全威胁,必须构建一个主动防御、内生可信、纵深防护的安全体系。这意味着安全能力不应是事后附加的补丁,而应内生于芯片、操作系统、网络设备等基础设施的底层,实现从硬件可信根到上层应用的全栈式安全保障。在安全理念上,必须摒弃传统的“城堡与护城河”式边界防护思维,全面转向零信任架构,即默认不信任任何内部或外部的访问请求,对每一次访问都进行严格的身份认证、细粒度的权限控制和持续的行为审计。针对工业数据本身的安全与隐私保护,应积极采用联邦学习、多方安全计算、同态加密等隐私增强计算(Privacy-Enhancing Computation, PEC)技术,使得在不共享原始数据的前提下,也能安全地进行跨企业、跨行业的联合建模与分析,从而在保障数据主权和隐私的同时,充分释放数据的聚合价值。

4.5 治理层:夯实标准、规范、协同的“制度基石”

如果说技术架构是骨架,那么治理体系就是灵魂,为

整个基础设施体系的健康、有序运行提供规则和秩序。首先,亟需在国家 and 行业层面建立统一、完善的数据标准体系,覆盖数据格式、接口协议、元数据定义、数据质量评价指标等关键环节,从根本上解决“数据方言”不通、难以互通互认的难题。其次,必须探索并构建清晰的数据产权制度,通过法律法规或行业公约,明确数据资产的登记、确权、价值评估、流通交易和收益分配机制,激发企业投入数据治理和参与数据要素市场的内生动力。最后,应大力倡导共建共享的生态文化,鼓励龙头企业、顶尖科研院所与领先的平台服务商携手,共同建设开源社区、共性技术平台和公共服务设施,将先进的数据治理方法论、工具和最佳实践普惠至广大中小企业,从而整体性地提升我国制造业的数据素养和数字化转型能力。

5 结语

工业大数据是驱动智能制造进阶的核心引擎,其价值释放遵循“汇聚-治理-洞察-决策-闭环”路径,依赖“五层一体”新型基础设施体系。未来,前沿技术发展将拓展其内涵外延,提升价值释放水平。但技术之外,人才、组织、文化等软性因素同样关键。制造企业需将数据驱动理念融入战略、架构与流程,培养复合型人才,才能在智能制造赛道行稳。政府应加强顶层设计,攻关关键共性技术,完善数据要素市场基础制度,出台操作性法规政策,营造鼓励创新、包容审慎的环境,通过多种方式降低企业数字化转型门槛。如此,才能释放工业大数据动能,为中国迈向制造强国提供坚实支撑。

参考文献

- [1]林国军.工业大数据在智能制造中的应用价值研究[J].信息记录材料,2023,24(04):98-100.
- [2]黎俊杰.基于大数据的工业互联网智能制造优化策略[J].无线互联科技,2025,22(06):47-50.
- [3]张卫,王兴康,石涌江,等.工业大数据驱动的智能制造服务系统构建技术[J].中国科学:技术科学,2023,53(07):1084-1096.
- [4]张照祺.工业大数据在智能制造中的应用研究[J].中国战略新兴产业,2022,(26):99-101.