

DOI: 10.16538/j.cnki.fem.20260202.401

# “数字+算法”融合驱动的智能制造研究述评与展望

刘香港, 史占中

(上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200030)

**摘要:** 智能制造在“数字+算法”驱动下成为未来制造发展的新范式,是国内外学者关注的焦点,并取得了丰富的理论成果和应用经验。本文利用文献计量分析方式,在回顾国内外核心期刊关于数字、算法、智能制造等相关文献的基础上,从技术、组织、公共环境政策三个层面总结了“数字+算法”驱动智能制造发展的影响因素;围绕智能制造产业链上中下游三个方面总结“数字+算法”驱动智能制造发展的影响机制;从新产品的引入、新工艺的开发、新市场的开拓、新资源的利用,以及新组织的创建这五种创新组合出发,总结“数字+算法”推动智能制造发展所产生的结果,从而构建起整个研究述评的框架。最后,总结已有文献研究不足,从不同角度提出了“数字+算法”推动智能制造的未来研究方向,以期与研究智能制造转型发展提供启示。

**关键词:** “数字+算法”;智能制造;理论框架;研究展望

**中图分类号:** F270 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4950(2026)05-0038-18

## 一、引言

智能制造作为未来制造领域的核心发展方向,是未来产业体系构建的关键赋能载体。其以数据要素为核心生产资料,“数字+算法”为核心驱动力,通过制造全流程的数字化重构、网络化协同与智能化升级,为产业体系的完整性、先进性与韧性提供底层支撑,更是推动制造业向高端化、智能化、绿色化转型的核心引擎(赵剑波,2020)。从技术赋能逻辑来看,智能制造的本质是通过数字技术打破制造全流程信息壁垒,实现数据全面采集与汇聚,而数据价值转化必须依赖算法深度参与,算法通过对海量制造数据的挖掘、分析与建模,将数据资源转化为生产决策依据,实现生产效率提升与流程优化;同时,算力作为数字技术与算法融合应用的基础支撑,为数据处理与算法运行提供硬件保障,形成“数据+算力+算法”三位一体的协同赋能体系(任保平和迟璐婕,2025)。因此,以算力为支撑、数据为依托的“数字+算法”的融合应用,成为智能制造发展的核心动力,正深刻改变制造业的生产方式、组织模式与价值创造逻辑(史占中,2024)。然而,《中国智能制造产业发展报告(2024—2025年度)》指出,中国智能制造虽发展迅速,但仍面

收稿日期: 2025-10-17

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(23&ZD088)

作者简介: 刘香港(1997—),男,上海交通大学安泰经济与管理学院博士研究生;

史占中(1968—),男,上海交通大学安泰经济与管理学院教授,博士生导师(通信作者, [zzshi@sjtu.edu.cn](mailto:zzshi@sjtu.edu.cn))。

临关键共性技术与核心装备受制于人、标准/软件/网络/信息安全基础薄弱、新模式成熟度不高、系统解决方案供给不足、缺乏国际性行业巨头与跨界人才等突出问题,亟须通过系统性研究予以回应。

“数字+算法”驱动智能制造相关研究现状,可将其概括为以下四个方面:(1)关于智能制造本身的相关研究。此类研究主要围绕智能制造的概念内涵、测量模型与体系结构等展开。例如吴小节等(2023)通过“2W1H”框架整合了智能制造的概念内涵、核心系统、前因后果等七大模块,系统梳理了智能制造的组成部分、技术及其应用逻辑;Santos和Martinho(2020)提出工业4.0背景下的智能制造成熟度模型,肖吉军等(2020)则构建基于AHP与DHNN的智能制造成熟度评估模型;还有研究侧重智能制造技术体系与结构解构(刘建丽和李娇,2024)。(2)数字基座的深化与融合方面,相关研究正从数据采集向虚实共生演进,多聚焦技术载体的构建与应用。一方面,依托大数据技术的工业应用,相关综述聚焦数据治理、实时流处理与多模态融合等关键技术,探讨工业数据价值释放的路径与方法(Hou,2025);另一方面,围绕赛博物理系统(CPS)与物联网(IoT)的技术融合,形成了以泛在感知网络构建为核心的研究成果,重点梳理异构融合、边缘智能与智能传感器的发展路径(Lu,2017);而数字孪生作为数字基座的集成载体,已成为研究热点,相关综述系统梳理了其在物理实体与虚拟模型动态交互、仿真优化中的应用前沿(Sun等,2025)。(3)算法在智能制造中的关键应用方面,主要聚焦算法模型的优化与部分制造环节的应用。相关研究系统梳理了智能调度算法,如改进遗传算法、粒子群算法,机器学习与深度学习模型如卷积神经网络(CNN)、长短期记忆神经网络(LSTM),以及新兴高级算法如强化学习、物理信息神经网络的优化路径,明确了此类算法在智能制造调度、质检、诊断等环节的决策优化作用(Agrawal等,2023)。(4)应用场景的拓展与集成综述。聚焦“数字+算法”在智能工厂生产组织与协同管理方面,相关研究梳理了在大数据和智能算法快速发展的背景下,智能工厂如何通过设计制造一体化协同研发模式实现生产组织与协同管理的智能化,以提升资源利用率和运营效率(孙宇祥等,2024)。

总体而言,已有研究虽在智能制造基础理论、数字基座构建、算法模型优化、单一应用场景等分支领域取得丰富成果,但“数字+算法”驱动智能制造研究的核心特征在于融合性与系统性,既强调数字技术与算法的深度耦合,也注重从全流程、多主体、跨领域视角把握智能制造的升级逻辑,区别于传统单一技术应用或局部流程优化的研究范畴。因此,现有研究仍存在以下不足:第一,缺乏从“数字+算法”深度融合视角出发的系统性综述。未能整合数字基座与算法引擎的协同逻辑,以数字与算法的融合应用为核心抓手,聚焦智能制造全流程的数字化重构与智能化升级,探究技术融合机制、模式创新路径、决策优化策略及产业转型效应的跨学科研究范畴。这种现状使得研究者难以把握当前“数字+算法”驱动智能制造研究的热点前沿,以及未来有价值的研究方向。第二,跨领域整合与产业生态协同研究不足。现有研究无论是技术融合应用视角还是转型决策视角,大多数局限于单一领域或局部问题,研究视角与理论基础繁杂,缺乏对“数字+算法”融合驱动视角下制造全流程、多主体协同的全局性把握,无法回应智能制造跨环节、跨产业与生态的现实需求。第三,关于“数字+算法”与智能制造之间的协同机理不够清晰。已有的研究述评要么是基于单纯的技术视角,要么是集中于智能制造本身来探讨数字和算法驱动智能制造的发展,从创新的角度梳理“数字+算法”驱动智能制造发展的研究较少,这难以体现关于“数字+算法”驱动智能制造的本质与作用机制。

综上,在“数字+算法”深度融合推动智能制造范式变革的背景下,开展本研究述评具有重要价值。第一,首次从融合性与系统性双维度明确界定“数字+算法”驱动智能制造的核心内涵与研究边界特征,突破传统研究碎片化的局限,整合分散于数字技术、算法优化、智能制造等不

同领域的研究成果,构建统一的知识体系框架。第二,厘清“数字+算法”协同赋能的理论逻辑,系统梳理智能制造各层面、各环节应用场景中的研究进展,揭示“数据驱动—算法优化—价值实现”的作用机制,丰富智能制造的理论研究维度。第三,识别现有研究的薄弱环节与前沿方向,明确数字与算法融合应用中存在的技术瓶颈、理论缺口与跨学科研究机会,为后续学者聚焦关键议题、开展深度研究提供清晰指引,也期望为制造企业数智化转型提供理论参考,助力其把握“数字+算法”的应用规律。

## 二、研究方法与结果分析

### (一)数据来源与研究方法

研究在中国知网CNKI中CSSCI来源期刊,围绕数字、数据、算力、算法、人工智能分别与智能制造组合检索,除去一些论坛、短评、会议总结以及主题不相关的内容,共计得到文献464篇。英文以Web of Science核心数据集,检索主题词Digital、Data、Algorithm、Computing Power、AI分别与Intelligent Manufacturing和Smart Manufacturing结合,集中于Management or Business or Economics类期刊,筛选Article以及Early Access文章,且我们注意到检索Manufacturing与Manufacture没有差别,去掉重复共计804篇文献。检索时间截至2025年12月26日。利用CiteSpace、VOSviewer等工具对此展开文献计量分析评估。

### (二)研究结果分析

1. 发文趋势。期刊统计发现,中文相关主题发文较多的是《科技管理研究》《科技进步与对策》《技术经济》《中国科技论坛》《管理世界》等期刊;英文主要发表在*Journal Of Manufacturing Technology Management*、*Technological Forecasting And Social Change*、*Ieee Transactions On Engineering Management*、*Operations Management Research*、*TQM Journal*等偏运营管理工程领域期刊,而后逐渐扩展到管理经济领域。从发文趋势来看,关于“数字+算法”驱动智能制造相关文献,国外研究相对较早且研究问题相对比较具体(Kulkarni和Kiang,1995),此后断断续续有少量研究,但大规模增长与中国节点几乎一致,都于2015年以后相关文献才开始呈现增长趋势(图1),2019年后国内外相关研究开始迅速增长,并在2023年后增幅开始进一步加大。这可能是由于大国博弈与疫情叠加,以及近些年数智技术的快速迭代发展,让产业界和学术界都充分认识到了智能制造在国家中的重要战略地位。

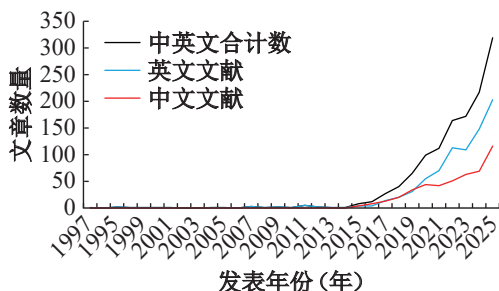


图1 中英文相关研究发文趋势

2. 研究热点。基于VOSviewer软件中英文文献计量关键词共现聚类结果如图2所示。“数字+算法”驱动智能制造的研究热点虽呈现国内外差异化特征,但表现核心逻辑的趋同性:二者均以“数字+算法”技术落地赋能为核心驱动,串联起组织制造模式转型与价值实现,最后指向智能制造的技术赋能与可持续发展的双重目标,形成多维度交织的研究热点体系。具体来看,国外研究以“Industry 4.0”为核心,在技术支撑层面,聚焦人工智能、数字孪生、智能工厂、大数据、物联网等数字载体,以及遗传算法、优化算法等算法工具的融合应用,构成智能制造的技术底座;转型与模式层面,围绕数字化转型、智能转型展开,同时延伸至服务化、商业模式创新等价值重构路径;管理与绩效层面,以管理、绩效为核心,关联动态能力、知识管理、供应链敏捷性

等议题,探讨转型的价值产出逻辑;绿色维度拓展,绿色创新、绿色供应链管理等节点的涌现。国内研究则以“智能制造”为核心锚定本土议题,既覆盖人工智能、工业机器人、工业互联网等数字技术等支撑,更突出与高质量发展、新质生产力、现代化产业体系等国家战略的联动,聚焦制造企业数字化与智能化转型、全产业链价值重构等实践落地,同时延伸至绿色创新、人机融合等衍生方向,体现政策到实践的强关联属性。

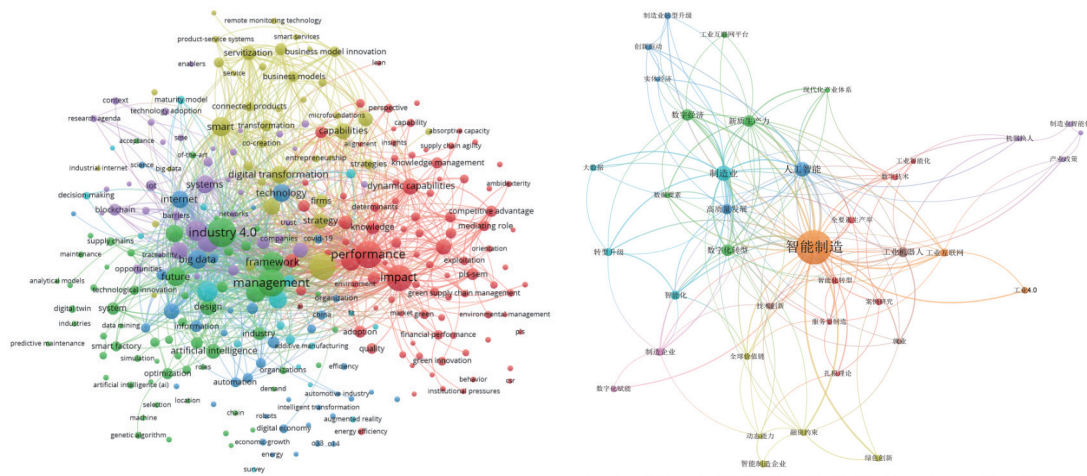


图2 中英文相关研究热点

3.研究前沿。利用CiteSpace软件对关键词进行突凸现来探索相关研究主题最新研究趋势(如图3所示)。可以发现国外“数字+算法”驱动智能制造的相关研究层次较为递进,大致分为五个阶段,体现从“技术系统架构—竞争与商业创新—落地效果评估—服务价值提升—组织管理变革”的协同趋势。具体来看,2005—2014年核心突现关键词为manufacturing systems,制造系统的基础架构研究是此阶段较为前沿主题,研究集中于制造系统的架构设计、流程优化、运营效率提升等底层基础问题,是制造业领域早期研究的核心范畴,为后续技术与模式转型的研究奠定了系统层面的理论与实践基础;2015年重点开始由系统架构转向制造企业这一微观主体,尤其是从2017年开始大量关注企业的运营策略、竞争行为等内容,研究前沿为工业4.0浪潮下,“数字+算法”驱动下智能制造向“互联产品+创新商业模式”的转型,同时通过案例研究、实证方法等对影响机制进行分析,标志制造领域从基础技术运营向竞争与商业创新的研究转向;2019年开始数字化技术的落地与评估热点成为新的前沿,大数据、信息管理等数字化技术成为研究核心,智能合约等新技术应用、成熟度模型等评估工具的研究同步升温;2021年,核心突现关键词internet of things、service innovation、operations management、productivity,表明研究向制造场景深度渗透,同时研究维度拓展至服务创新(制造服务化)与运营管理优化等,并聚焦技术应用对生产效率的影响;2023年至今,核心突现关键词organizational performance、environmental performance、market orientation、human resource management等表明研究前沿向组织表现、环境绩效、可持续制造、市场导向以及人力资源管理组织支撑的多元化协同维度延伸。

国内研究则大致以2022年为界,可将研究前沿划分为转型框架构建阶段(2015—2021年)与实践深化聚焦阶段(2022年至今)。2015—2021年是制造业转型的基础框架构建。此阶段核心突现关键词涵盖工业4.0、产业创新、大数据、智能化、转型升级、数字经济等,表明研究焦点从工业4.0的概念引入起步,逐步拓展至制造业的数字化、智能化技术应用,覆盖产业创新、企业

转型升级、商业模式重构等维度,还延伸至数字经济、就业等关联议题,最终完成了制造业数字化转型的基础研究框架与多元方向铺垫。2022至今则是制造领域的实践与战略聚焦。此阶段集中聚焦案例研究、产品创新、制造强国、数据要素等关键词,研究焦点从前期的转型框架转向落地实践,通过案例研究具象化转型路径,聚焦产品创新的技术转化效果,锚定制造强国的国家战略目标,同时深化数据要素这一数字时代制造领域核心生产要素的研究,呈现出“实践导向+战略锚定+要素深化”的集中聚焦特征。

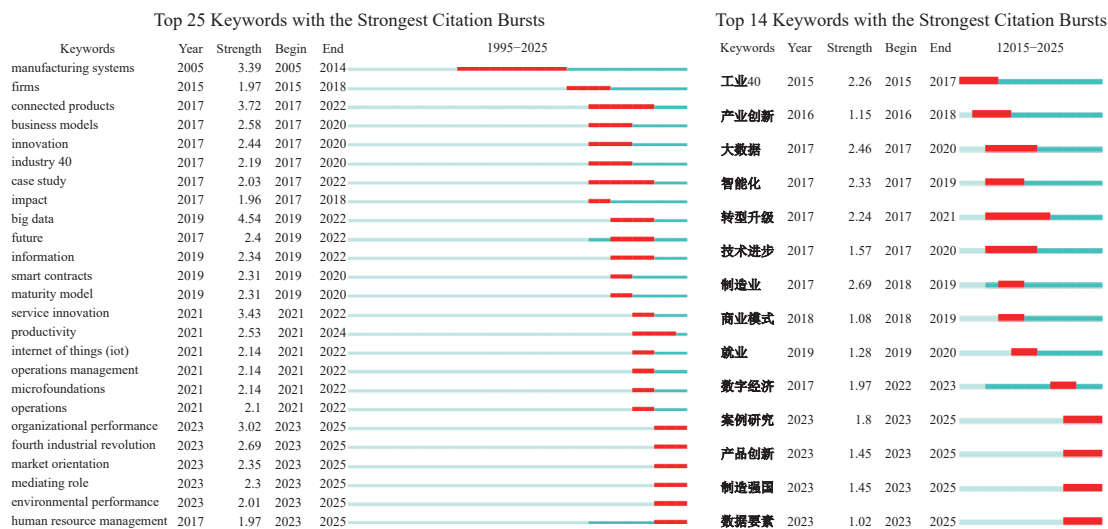


图3 中英文文献关键词涌现

4.研究演变。为进一步解析该领域研究的时间演进脉络,利用CiteSpace进一步绘制了较为详细的关键词共现时区图谱与主题聚类图。英文文献(图4)演变核心特征可归纳为:第一,从技术基础缺失与场景壁垒约束出发,指向早期#7“customer service support”的技术基础(如system、mechanical fault diagnosis)薄弱,叠加#6“technological barrier”中AI、大数据等技术的落地梗阻,构成了“数字+算法”介入智能制造领域的初始动因,即通过技术工具填补服务与制造场景的能力缺口。第二,“数字+算法”的赋能路径从单一环节技术嵌入,向制造系统全链路智能协同深化,从#5“analysing operational complexity”依托算法解析制造系统的局部复杂性,到#4“flexible manufacturing system”中AI、机器学习对制造资源的智能调度,再延伸至#3“additive manufacturing”的能效优化、#2“digital servitization”的制造服务融合,体现“数字+算法”逐步渗透至制造流程、资源配置、模式创新等全链路,形成多维度的赋能机制。第三,赋能价值从制造效率的局部优化,升维至可持续体系构建与竞争优势的系统性沉淀,#1“circular economy”中依托数字技术构建的可持续制造与供应链体系,以及#0“competitive advantage”中动态能力、供应链管理等多维度优势的形成,本质是“数字+算法”驱动从短期效率提升,向长期可持续价值与企业核心竞争力的转化结果。

中文文献的关键词共现与时间演化分析结果表明(图4),其研究演进遵循“基础技术赋能认知铺垫—价值机制的微观转化—多元化协同与高质量发展”的逻辑脉络。2015—2017年处于“基础技术赋能认知铺垫”阶段,对应图谱中#2“制造业”#4“智能化”#8“安全”等聚类,以“工业4.0”“互联网+”“大数据”为核心关键词,围绕智能技术的产业适配性与制造业宏观转型方向展开探讨,完成了领域技术框架的初步构建与产业升级的认知铺垫;2019—2022年进入价值机制的微观转化研究阶段,研究向图谱中#5“数字孪生”#3“绿色创新”等聚类延伸,“技术创新”“价

值共创”“商业模式”“产业升级”等关键词的密集关联,体现智能技术从宏观概念落地为制造流程的微观工具,推动研究聚焦于技术应用向企业价值、产业效率的转化路径;2023—2025年则迈向多元化协同与高质量发展阶段,图谱上部#0“智能制造”“#1人工智能”等核心聚类与#6“产业政策”等维度深度联动,“数字孪生”“数据要素”“治理效应”“可持续发展”等前沿主题凸显,标志研究从单一技术应用转向技术、组织、政策要素的协同联动,最终呈现出智能制造向系统性创新、可持续发展与数智治理转型的趋势。

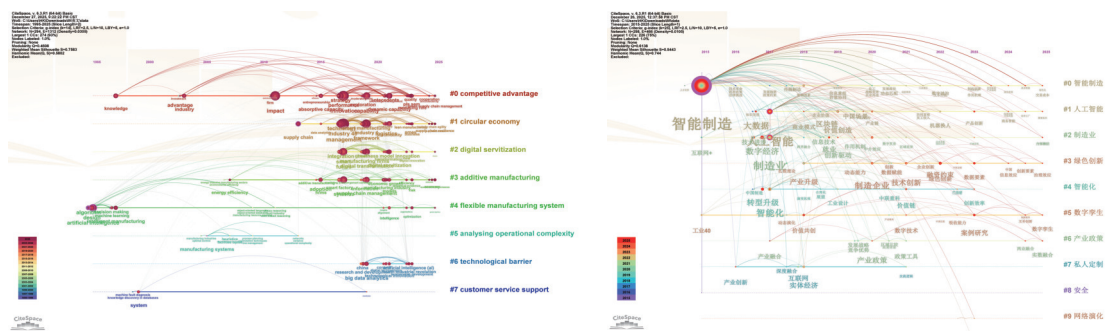


图4 中英文关键词研究主题时区图谱

梳理研究热点、研究前沿与研究演变,可以发现其均指向一个特征:本质上都是从技术细节架构开始,到智能制造能力构建与商业价值实现,再到实践落地时数字与算法治理问题的解决,体现了“数字+算法”技术与制造的逐步深度融合的趋势。

### 三、“数字+算法”驱动智能制造发展研究回顾

#### (一)“数字+算法”、智能制造等相关概念

目前学术界对数字的定义有较多不同表述且各有侧重。有学者认为数字的概念根植于建构本体论,是数字化(digitization)与数字化转型(digitalization)的交织统一(Baiyere等,2023)。前者指向信息以比特(0和1)编码的技术过程,涵盖比特串及其物质载体的存储、操纵与传输等技术属性,具有可重新编程、数据均质性、自我迭代性等特征(Yoo等,2012;陈冬梅,2020);后者聚焦数字对象嵌入社会组织语境后的应用实践,强调行动者通过解锁数字对象的潜在赋能,并重组社会与技术结构以实现特定目标,如创新、效率、价值创造等的过程(Baiyere等,2023;刘洋等,2020)。而算法则是处理数字信息的固定逻辑规则或步骤,如排序、筛选、逻辑判断等,高级算法模型更是能够自动执行特定任务,如模式识别、预测建模、数据分析、自动化控制等,以提高效率、精确度和智能化水平(Kellogg等,2020)。算力是集信息计算力、网络运载力、数据存储力于一体的综合能力,为数字经济和算法运行提供环境载体。因此,从技术创新的角度,本文认为“数字+算法”实际上是一个组合概念,它们均以数据为关键流通要素,本质上都具有技术属性。其中,数字是技术运行的基本单元逻辑,算法是处理逻辑以及推动智能化的关键,算力是运行的底层保障,彼此紧密协同,融合支撑,通过对海量数据的挖掘分析,实现价值目标。如ChatGPT、DeepSeek等人工智能即是“数据+算力+学习型算法”的智能涌现结果。

智能制造是一种人机一体化的智能系统,由智能机器人和人类专家共同构成。在制造流程中,该系统能够智能化开展诸如分析、推理、判断、构思、决策之类的活动,它借助人类与智能机器人的协同合作,拓展并在一定程度上取代人类专家在制造过程中的脑力劳动(吴小节等,2023)。通过整合信息、物质和人员等资源,它使制造自动化在观念上不断更新,并向柔性化、智

能化、高度集成化方向拓展(Senoner等,2022)。《中国智能制造产业发展报告(2024—2025年度)》进一步指出,智能制造是基于新一代信息技术与先进制造技术深度融合,贯穿于制造活动的各个环节,构建起一个具备自感知、自学习、自决策、自执行和自适应功能的复杂生态系统。

综上,智能制造本质上是由“数字+算法”所驱动,预示着工业和社会革命性变化的范围和幅度,并归纳出“数字+算法”驱动智能制造发展的以下三个特征:一是以数据为主要生产要素。企业通过收集、分析和利用生产制造过程中,数据,优化决策与资源配置,提高生产运营效率和服务质量,同时,数据驱动的决策有助于降低成本,更精准地了解市场需求(谢康等,2023; Calzolari等,2025),因此,数据成为企业核心竞争力的重要组成部分。二是以大模型算法为生产工具。这些模型包含数十亿甚至更多的参数,具有强大的特征学习和表示能力。它们通过一定的算法逻辑,将输入的数据信息转化为有价值的知识或预测结果,生成文本、图像、视频等,为各种应用场景提供决策支持或创新解决方案(Lăzăroi等,2022),使得智能制造具备更高的预测和应变能力。三是多模态技术的跨界融合。以数字(比特编码的信息载体)为基础,融合数学、计算机科学、工程学等多领域的算法逻辑,正如上文所体现的大数据、物联网等底层技术,结合自然语言处理、图像识别、推荐系统等,形成“数据采集—处理—决策—执行”的闭环。这种多技术融合为智能制造的发展提供了强大的动力,提高了整体性能,使制造系统更加智能化,实现了从制造设计到产品服务的全流程数智管理。基于以上绘制“数字+算法”驱动智能制造全流程数智管理逻辑关系如图5所示。

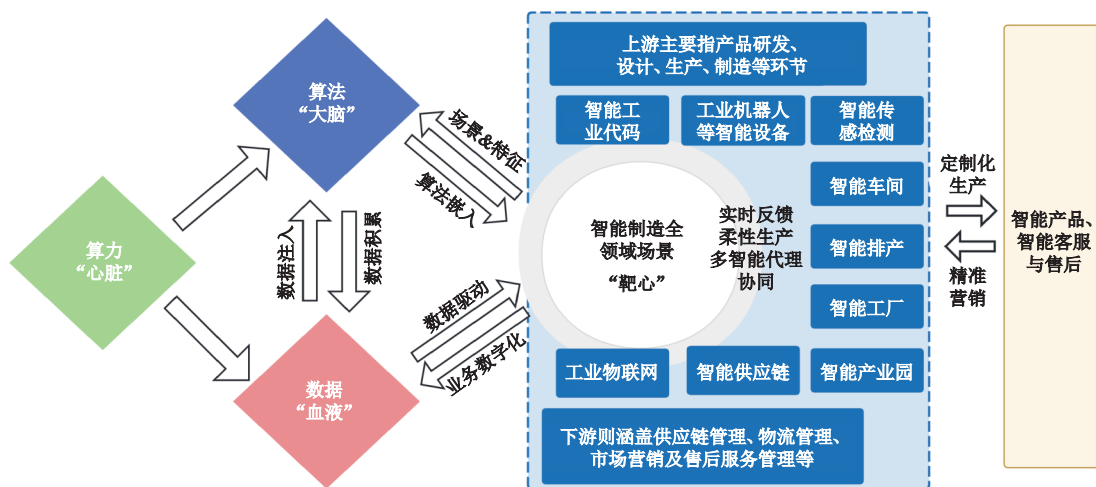


图5 “数字+算法”融合驱动智能制造全流程数智管理

## (二)既有文献的理论基础与研究方法

综合中英文相关文献来看,“数字+算法”驱动智能制造领域的理论基础与上文研究热点、研究前沿、研究演变等所体现的技术增长驱动、资源配置优化、能力构建、多主体互动与价值实现等核心阶段特征主题紧密相关,与之对应的主要是经济内生增长、微笑曲线、资源和知识基础、竞争战略、价值共创、创新生态系统、组织学习与多元治理等理论。这些理论既源自传统管理科学与经济学范式,又在数智时代下形成了新的应用内涵,共同构成了相关研究的理论支撑体系,通过解析“数字+算法”与智能制造的耦合机制,为探究技术驱动制造转型的内在规律提供了多元理论视角。

内生增长理论强调技术创新进步、知识积累等内生因素是经济长期增长的核心驱动。在智能制造领域,“数字+算法”正是内生增长动力的核心载体,算法作为技术进步的核心形态,通过

持续的迭代优化推动生产技术、管理技术的创新。微笑曲线理论核心观点是产业价值链的利润分布呈现“两端高、中间低”的U形特征,即研发设计、品牌售后等高端环节附加值高,而生产制造等中间环节附加值低,企业需向价值链两端攀升以提升盈利水平。资源基础理论认为企业竞争优势源于异质性、难以模仿且不可替代的战略资源,而“数字+算法”赋能智能制造的本质,正是通过数字技术重构资源配置逻辑,将数据、算法模型、数字平台等新型数字资源与传统生产资源深度融合,形成独特的数字资源禀赋。与之紧密关联的知识基础理论将知识视为企业最核心的战略资产,强调知识的创造、共享、整合与应用是企业能力构建的关键。在智能制造场景中,“数字+算法”构建了高效的知识管理体系:一方面,算法通过数据挖掘实现隐性知识(如工匠经验、生产诀窍)的显性化与编码化;另一方面,数字平台打破组织内部的知识壁垒,促进跨部门、跨产业链的知识共享,为制造环节的技术创新与流程优化提供知识支撑。

价值共创与网络理论则主张价值并非由企业单独创造,而是由多个利益相关者通过互动合作共同创造,共同解析多主体协同赋能智能制造的内在规律。创新生态系统理论进一步为多主体互动提供了更宏观的分析框架,该理论将产业视为由核心企业、配套企业、服务机构等构成的有机生态系统,强调系统内各主体的协同演化与共生发展。尤其是在智能制造生态中,通过搭建数字化平台实现生态内资源、知识、信息的高效流通,推动智能工厂从单一生产单元向动态价值共创转型,使生态系统从线性协作向网状协同演化,这也为多元治理提供了载体支撑。组织学习与动态能力理论强调组织学习是企业适应外部环境变化、提升核心能力的动态过程。在“数字+算法”驱动智能制造的转型过程中,组织学习能力的差异直接决定了企业对数智技术的吸收能力与转化效率。现有文献表明,组织学习能力的构建具有路径依赖性与动态演化特征,初创期企业多通过模仿学习快速掌握基础数字技术应用能力,成熟期企业则通过探索性学习实现算法模型的自主创新与技术突破。这种学习模式的差异,直接导致不同企业在智能制造转型中的适应性、创新绩效与文化重构效果呈现显著差异。多元治理理论源于公共管理领域的协同治理思想,后被拓展至产业领域,其核心在于强调政府、企业、科研机构、用户等多主体通过规则协商、利益协调形成协同治理网络,解决单一主体难以应对的复杂问题。在“数字+算法”赋能智能制造的场景中,多元治理的核心价值在于破解跨主体的数字壁垒、标准不一、利益冲突等难题,通过建立统一的数据治理规则、技术标准与利益分配机制,保障数字资源的有序流动与算法应用的合规性。

虽然以上各自提供了独特的理论视角,但什么样的学习模式和知识管理方法是最有效的,如何平衡内外部的创新能力,塑造自身的竞争优势仍待探索,这也是学者在研究演变过程中即国外#0“competitive advantage”和国内#1“人工智能”与#6“产业政策”等主题词所体现的,并一直在关注探索的问题。而组织学习能力的培养需要时间,短期内难以产生立竿见影的效果,多元治理理论在多方利益协调上可能存在复杂性和执行障碍,微笑曲线理论更多适用于成熟产业,对于新兴产业、未来产业的应用仍需进一步实证检验等。

从研究方法上来看,已有研究主要采用仿真模拟、计算优化建模、实证回归分析、准自然实验构建双重差分,以及案例研究等方法。仿真优化建模的方法,集中于运筹管理领域,利用仿真软件或开发算法构建智能制造系统的模型,模拟不同场景下数字技术和算法的应用效果,对各种方案进行评估和优化。实证回归分析方面,通过直接设计构造相关指标体系(含文本分析)或构建代理变量等形式,对地区和产业层面的智能制造水平进行测量,验证数字和算法在智能制造中的实际效果。上文的文献计量结果表明案例研究是近年来国内外重要研究方法之一,选取重点行业或者具有代表性的智能制造企业或项目,深入分析其应用数字和算法的具体价值创

造与实现的过程和成果。而采用定性定量混合方法以及扎根调查问卷等方法的研究较少。下面将结合“数字+算法”驱动智能制造发展的前因、影响机制、影响结果与边界条件等因素进一步梳理研究理论与方法的具体应用。

### (三)“数字+算法”驱动智能制造发展的前因

智能制造的创新发展并非孤立发生的,其受到多种因素的综合影响。本部分以文献计量研究热点所揭示的“技术—组织—环境”层面协同演进趋势为基础,从技术、组织、公共环境政策三个维度系统梳理影响因素。

1.技术层面。技术层面的核心理论支撑为资源基础理论与技术创新内生增长等理论。技术维度剖析奠定智能制造基础的颠覆性数字技术与核心算法,并阐释它们之间如何融合聚变,从而产生倍增效应。其目的在于将物理世界的制造活动精准映射、模拟、分析并优化于数字世界,最终再反作用于物理世界。这一过程的实现,依赖于一系列关键数字技术和核心算法的集成与协同。已有文献多数采用仿真模拟、计算优化建模等方法研究了数字、算法等技术的应用扩散与特征(Lee和Berente,2012);优化算法对资源配置与流程改进,机器学习与深度学习的模式识别与预测核心,强化学习在动态环境下的自主决策作用(张宏斌和吴锋,2020;Cameron,2024);以及工业机器人、工业互联网平台建构等对智能制造的驱动作用(Choi等,2022;Mithas等,2022)。Frank等(2019)进一步将数字技术分为基础技术和前端应用技术,其中基础技术属于通用技术,为前端技术赋予连接性和智能性,实现与集成制造系统的对接;前端应用技术聚焦用户界面设计与交互技术,将基础技术功能转化为实际产品和服务(Zhu,2004)。在智能制造过程中,前端应用技术对远程故障诊断、实时生产监控及现场作业效率提升至关重要。因此,“数字+算法”技术的不断进步不仅提高了生产的自动化和智能化水平,也为个性化定制和柔性制造提供了可能。总体来看,目前的文献主要是从技术革命视角来探讨智能制造的发展前因,强调信息技术先进化和高端化所带来的智能制造推力,而技术创新实际上也离不开市场需求拉动。只有将新技术所形成的产品和服务在市场中成功售出,获取收入与利润,企业才具备持续投入新技术创新的能力。当前产品同质化与市场竞争激烈,已有研究较少关注需求端所带来的消费需求升级对智能制造的拉动作用。

2.组织层面。“数字+算法”驱动智能制造要真正落地为生产力,企业内部的组织变革和能力建设是不可或缺的内生动力。组织维度主要依据动态能力理论与组织学习变革理论等,探讨企业为适应并利用新技术所需进行的内部变革,包括战略重构、组织调整、人才培养及供应链协同模式的演进。一方面,传统科层式的组织结构难以适应智能制造高频数据流动和敏捷响应的需求,需要通过组织重构来激发管理创新活力。企业纷纷打破原有的部门藩篱和层级隔阂,推动组织向平台化、扁平化、网络化、柔性化演进(王凤彬等,2019;胡斌和王莉丽,2020),通过流程再造实现组织“瘦身”,缩短决策链条,让数据在内部自由流动并为算法决策提供即时反馈(Kellogg等,2020)。同时,以任务为中心组建跨部门的敏捷团队代替固化的职能部门,使组织能够根据市场变化快速重组,从而提高对客户需求变化的响应速度。另一方面,企业的数字化能力培养和人才建设直接关系到智能制造能否持续推进。如有研究指出,跨学科团队建设是推动技术与管理创新的重要途径,企业通过组建由工程师、数据科学家、IT专家等多领域人才组成的团队开展协同项目,打破技术与业务边界,实现研发、设计、生产管理等环节的协同创新(张强等,2023)。还有基于数十家制造案例企业的研究表明,组织员工工作设计如多任务整合、主动决策、认知需求转向等将主导智能制造的人机协同效率,赋能型工作设计可激活人机互补优势,传统分工则易引发技术极化与价值浪费,因此需要给予员工灵活的反馈机制(Cagliano等,2019)。

3.公共环境。公共环境层面的理论支撑为制度理论与市场失灵理论等,分析政府及公共部门在宏观战略引导、产业政策支持以及创新生态培育方面所扮演的关键角色。已有文献主要是采用上市公司二手数据或政策实施实证研究政策引导、市场激励、标准制定、教育支持等多重手段,如文献计量中出现频率最高的“工业4.0”等,为“数字+算法”在智能制造中的应用所塑造的政策性环境条件,以及对产业结构的优化升级作用。各个国家均已认识到“数字+算法”在推动制造业转型升级中的重要作用,纷纷出台相关政策支持智能制造的发展,这些政策包括资金补贴、税收减免、研发资助、人才培养等,旨在鼓励企业采用先进数字技术、促进算法在制造业中的应用,提高整体行业的竞争力和创新能力(Fini等,2023;沈坤荣等,2024;余明桂等,2024)。这些宏观战略为本国智能制造的发展提供了清晰的路线图、统一的行动纲领和强大的政治意愿。此外,还有从国际层面探究全球化技术采用存在的技术转让与溢出效应影响,以及美国“脱钩”政策对我国智能制造的影响等(张化尧等,2024)。

#### (四)“数字+算法”驱动智能制造发展影响机制

“数字+算法”驱动智能制造发展的影响机制,从产业链生态视角可以分成产业链上中下游三个部分。其中,上游技术赋能机制的核心是“数字+算法”促进生产要素的数字化重构,构筑智能制造的能力基础;中游组织协同机制的关键是跨主体资源的整合联动,助力智能制造的水平提升;下游生态重构机制的重点是价值实现路径的多元化拓展,驱动智能制造完成模式创新。其内在逻辑与通过文献计量分析最后所揭示的智能制造领域研究前沿、演进趋势特征相契合。

1.上游核心生产要素的数字化重构机制。此机制的理论基础为资源基础理论与要素重构理论,核心是“数字+算法”通过对技术、数据等核心生产要素的重构与赋能,奠定智能制造的能力基础。具体包括三个子机制:一是数字建模与仿真机制,数字孪生等技术创建虚拟产品模型,在研发阶段模拟运行状况,优化材料选择,减少物理测试,最终提升研发效率与创新能力(Choi等,2022)。二是生产要素优化配置机制,“数字+算法”促进企业对工业机器人、研发投入等生产要素的精准投资,通过数据激活、整合实现资源蓄能,如美的集团通过数据测算优化流程时间,宗申集团通过工业互联网平台整合产业数据(肖静华等,2021;杜勇等,2022),最终实现智能制造的跨越式战略变革;三是技术技能匹配机制,“数字+算法”推动制造过程人员精简化、技能高级化,通过AR/VR、协作机器人等技术提升工人技能适配度,形成“操作员4.0”新型工作模式(Dornelles等,2022)。

2.中游组织形成跨主体资源的整合联动协同机制。此机制以动态能力理论与协同创新理论为支撑,核心是通过“数字+算法”打破组织内部及外部的资源壁垒,实现跨部门、跨企业的协同联动。具体包括两个子机制:一是内部协同创新机制,通过智能设计平台实现研发、设计、市场等部门实时信息共享与协同工作,提升生产制造效率与价值链数智创新能力(张明超等,2025)。二是跨组织协同机制,借助数字化平台打破企业边界,实现与供应商、合作伙伴的资源共享与能力互补,提升供应链的敏捷性与韧性,如酷特智能通过智慧系统实现客户、运营、合作等多维度协同(孙新波等,2023)。

3.下游生态价值实现路径的多元化拓展机制。此机制的理论基础为服务主导逻辑与生态系统理论,核心是“数字+算法”推动智能制造从单一产品生产向“产品+服务”的生态化转型,拓展价值实现路径。具体包括三个子机制:一是供应链智能化管理机制,依托大数据、人工智能及运筹优化算法构建全链条信息化管理体系,实现数据无缝对接与高效流转,提升供应链柔性效率(Mak和Max Shen,2021;Zhou等,2024)。二是个性化服务响应机制,通过数字化售后服务平台实现产品实时监控与预测性维护,结合数据分析精准定位市场需求,提供定制化产品与服务(李晓等,2023;Jain等,2024)。三是完善制造模式创新机制,催生平台化云制造、柔性制

造、共享制造等新型模式,推动制造业从产品销售向“制造+服务”转型,形成协同创新生态系统(和征等,2022;李庆雪等,2023;高杰等,2024)。

#### (五)“数字+算法”驱动智能制造发展影响结果

文献计量分析已表明,国内外研究均围绕“价值落地实现”为目标,而约瑟夫·熊彼特(2020)在《经济发展理论》中提出的新产品引入、新工艺开发等五种创新形式,可为解构价值实现的具体表现提供清晰抓手,因此对“数字+算法”驱动智能制造发展的影响结果归纳如下:

1.新产品的引入。新产品的引入是指采用一种新的产品,或一种产品的一种新的特性(约瑟夫·熊彼特,2020)。在这方面已有研究主要从宏观层面上关注智能制造对数字创新质量、企业创新绩效以及新产品开发等方面的影响。如王超发等验证了智能制造企业的数字化感知、抓取、资源整合重构和组织变革4个维度的能力均对其数字创新质量有显著促进作用(王超发等,2023)。Kim等(2022)发现与竞争对手提供的产品相比,数字创新强度更高的公司会推出更多新产品,这种新的产品不仅与竞争对手的产品不同,而且是与自己产品线的产品也不同。利用计算机软件,结合3D打印等快速成型技术,智能制造还能够快速生成产品设计原型,缩短产品设计周期,使企业能够更快地进行创新(Choi等,2022)。此外,基于数字化协同工作平台,在智能制造中能够使得跨部门、跨地域的团队无缝协作,共享设计资料,实时交流,及时接收用户反馈,从而为产品设计提供精准的市场导向,实现设计的快速迭代和优化,促进新产品开发(Natter等,2001)。

2.新工艺的开发(新的生产方式)。熊彼特认为采用一种新的生产方法,也就是在有关的制造部门中尚未通过经验检定的方法,不仅可以是新科学上的方法,也可以是新的商业模式(约瑟夫·熊彼特,2020)。已有研究则主要探究了新生产方式如横向分包和全球工厂、工艺流程创新、核心技术能力、商业模式创新、绿色创新发展和系统布局调度优化等。因为灵活的生产系统,智能工厂的模块化和可重构生产线,可以根据新产品的需求快速调整生产配置,支持小批量、多品种的生产模式,降低了新产品的生产成本和市场风险(Senoner等,2023)。如通过模拟仿真技术和数字孪生技术,通用电气(GE)的“数字风电场”项目系统中每台风力涡轮机的配置,在实际施工之前都在数字世界中进行了不同生产方案的充分测试,助力打造全球最高效的风电场(Choi等,2022)。在数据驱动工艺优化方面,企业利用数据和机器学习算法等,可以对生产过程中的各种参数进行实时监控与分析,从而识别出影响效率和质量的关键因素,并据此调整工艺流程,提升工艺创新绩效(Trantopoulo等,2017)。

3.新市场的开拓。开辟一个新市场,也就是有关制造部门以前不曾进入的市场,不管这个市场以前是否存在过(约瑟夫·熊彼特,2020)。智能制造通过其独特的技术优势和模式创新,能够显著促进企业开辟新的市场。已有研究主要是通过智能制造影响市场占有率、企业经营绩效、全要素生产率、销售净利率、人均产出、每股收益等体现。在“数字+算法”驱动下,智能制造系统具有较高的灵活性和敏捷性,能够快速调整生产计划以适应市场变化。算法实时监控市场动态,预测需求趋势,帮助企业快速推出新产品或调整产品特性,抢占市场先机,开拓新兴市场领域(Chen等,2020;Kellogg等,2020)。数字平台和智能供应链管理能力使企业能够高效管理跨国生产、物流和售后服务,降低国际贸易成本,快速响应全球各地的市场需求,开辟海外市场(Buckley等,2024)。Rai等(2006)研究表明,集成IT基础设施使公司能够形成供应链流程集成的更高阶能力,尤其是在卓越运营和收入增长方面,带来了显著且持续的公司市场绩效提升。余明桂等(2024)证明了人才引进政策的推出促使企业增加了工业机器人投资,促进了制造业智能化,由此而带来的经济后果是扩大了企业市场占有率,改善了企业经营绩效。

4.新资源的利用。智能制造通过技术创新和模式变革,不仅优化了既有资源的配置和利用,还开拓了新的资源利用渠道,推动了资源的深度整合和重构。传统的制造方式往往存在资源分配不均、利用效率低下等问题,而智能制造通过引入先进的数智化管理设备与系统,实现了对生产过程的精确控制和高效管理。算法通过对数据深度分析和挖掘,转化为洞察力,指导生产决策,优化资源配置,为制造业创造了新的价值源泉(Cameron, 2024)。尤其是智能制造平台促进了企业间的横向整合,使企业能够在全球范围内更高效地寻找供应商、合作伙伴,优化供应链布局,增强了供应链的韧性和灵活性(裴军等, 2023),形成资源共享、能力互补的协同制造生态系统网络(王核成等, 2024),从而拓宽了资源的来源渠道,有力推动资源的深度整合和重构。如谢康等(2023)以索菲亚的实践发展为例,表明基于数据要素重构、要素创造和要素创生三个路径,是提高企业内外资源再配置效率、促进企业高质量发展的内在机制,而Shi等(2024)对小米的分析,证明了即使资源有限的情况下,通过对资源的整合编排,也能构建出生态系统领导力,实现企业整体生产效率和竞争力的跃升。

5.新组织的创建。智能制造的特点促使企业必须构建适应智能制造生产模式的新组织。构建“既快又稳”的敏捷组织,保障对市场和客户需求的快速响应和产品的及时交付的同时,提高组织的整体健康度和员工的满意度。已有研究主要是探究所形成的新组织及其特性,强调打造强大的数字平台组织(吕文晶等, 2019),促进组织敏捷性。如钱雨等(2021)认为敏捷组织作为数字化时代的新组织范式,对其忽略可能造成管理者推进数字化转型的障碍,因此需要部署五大敏捷性要素,使组织具备快速适应环境变化能力。在组织行为管理领域,还有研究人机协同工作、人机互动模拟等新的工作形式,如Letmathe和Rößler(2022)研究表明,在执行新的制造任务时,数字动画、交互式工作说明是促进更快学习和增强绩效的有效方式,但是对于企业该如何培养员工构建人类和AI联手协作智能形式仍需进一步探究。此外小团队工作、虚拟团队、外包等组织形式打破了传统制造业的“条条框框”,企业亟须建立适应时代变革、适合自身业务的有效组织形式(Kostami, 2024)。

(六)影响边界条件。文献计量分析已表明,制度环境差异性导致国内外研究焦点分化,且研究正向“技术—组织—环境”协同范式演进,而权变理论认为企业行为与绩效的关系受环境、组织特征等权变因素调节,不存在普适性最优模式。从影响边界条件来看,已有研究主要集中在知识产权保护力度、企业开放程度、企业要素密集度以及宏观层面地区差异、环境动态性、行业差异等带来的异质性影响。在“数字+算法”驱动智能制造发展的过程中,知识产权保护力度为企业创新提供了法律保障,鼓励更多的研发投入,从而保护企业创新的市场竞争力(赵宸宇, 2021)。企业开放程度决定了技术吸纳与协同创新的能力,开放的企业往往通过合作、外包、战略联盟等方式,获取外部的知识与资源,实现技术升级(李雪松等, 2022)。企业要素密集度影响了技术转型的难度和方向,如技术密集型企业通常能够更快地吸收新技术,并通过创新提高生产效率,而劳动密集型企业可能在技术转型中面临更大的挑战(贺正楚等, 2023)。同时,地区差异、环境动态性和行业异质性等外部环境因素则通过影响资源配置、市场需求以及政策支持等方面,塑造了智能制造的整体发展格局,如Choi等(2024)证明了在环境动态性较强的行业中,主动数字化战略态势对创新导向的竞争行为与企业绩效关系的调节效应更强。因此,对于企业而言,合理识别、动态调整各边界条件的影响,制定灵活且符合自身需求的创新战略,才能在日趋复杂的市场环境中保持竞争优势。

综上,本文围绕“数字”“算法”“智能制造”等相关概念,对“数字+算法”驱动智能制造发展相关研究进行了较为全面系统的总结。构建了以技术、组织、公共环境政策三个层面为前因,涵盖智能制造上中下游智能制造能力、水平、模式的影响机制,并依据新产品的引入、新工艺的开

发、新市场的开拓、新资源的利用以及新组织的创建五种创新组合探究其影响结果,构建了比较完整的理论分析框架,明晰了现有文献关于“数字+算法”驱动智能制造发展的研究状况(如图6所示)。

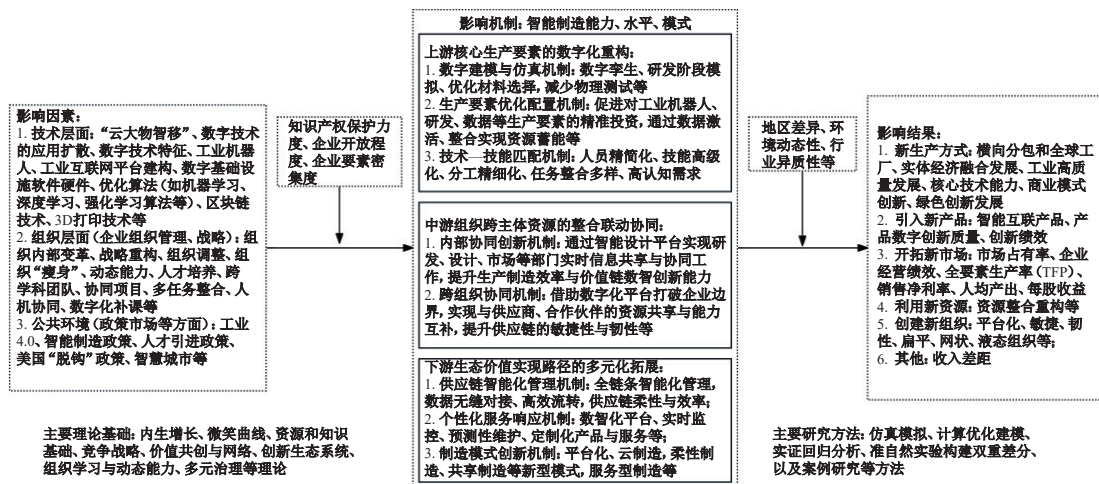


图6 “数字+算法”驱动智能制造研究整合框架

#### 四、研究结论与展望

##### (一)研究结论

从研究整体趋势来看,关于“数字+算法”驱动智能制造相关文献,国外研究相对较早且研究问题相对比较具体,但大规模增长与中国节点几乎一致,都于2015年以后相关文献才开始呈现增长趋势,近年来关注持续增加。这得益于近些年数智技术的快速迭代发展,让产业界和学术界都充分认识到了智能制造在未来制造乃至未来产业体系中的重要支撑作用。

从理论基础与研究方法来看,大多数文献使用经典理论主要与智能制造增长驱动与价值实现机制相关,主要体现在内生增长、微笑曲线、资源和知识基础、竞争战略、价值共创与网络理论、创新生态系统、组织学习与动态能力、多元治理等方面的理论,采用仿真模拟、计算优化建模、实证回归分析、准自然实验构建双重差分模型,近年来案例研究逐渐增加,多数以选取重点行业或者具有代表性的头部大型企业为例,探究“数字+算法”赋能智能制造的机制与过程,理论基础与研究方法需要进一步丰富拓展。

研究内容上来看,“数字+算法”驱动智能制造的研究热点虽呈现国内外差异化特征,但二者均以“数字+算法”技术落地赋能为核心驱动,串联起组织制造模式转型与价值实现,最后指向智能制造的技术赋能与可持续发展的双重目标,形成多维度交织的研究热点体系。本质上都是从技术细节架构开始,到智能制造能力构建与商业价值实现,再到实践落地时数字与算法治理问题的解决。体现了“数字+算法”技术与制造业的逐步深度融合的趋势。

##### (二)未来研究展望

“数字+算法”驱动智能制造发展是近年研究热点与前沿之一,尽管取得了一定的成果,但理论、机制与结果等研究仍有一些不足,本文在构建理论分析框架的基础上,提出未来研究方向如下:

第一,已有研究对象较为单一,尤其是国内案例研究过于集中在头部大型企业(戴维奇等,2026)。然而,近年来我国制造业领域在“数字+算法”驱动下,已经初步涌现出一批不同的“专精

特新”“独角兽”“瞪羚”等独特企业,他们开拓了新领域新赛道,塑造了发展的新动能新优势,代表着未来发展方向,这些企业的成长发展非常值得追踪调研。因此未来可以研究数字和算法如何赋能这些企业的数字化创新路径,挖掘其快速成长的秘密:他们是如何通过“数字+算法”对市场趋势、客户需求、生产流程等多方面数据的深度挖掘和分析,及时调整产品研发方向、生产计划和营销策略;团队特征与组织管理模式有何独特之处;这些企业又是如何在激烈拥挤的赛道中构建更具竞争力的商业模式;同时,他们的数字治理机制是什么,如何确保自身的可持续发展;未来这些企业又该如何把握机遇成长为扎根中国的世界级领先企业?也可以以“专精特新”“瞪羚”“独角兽”等企业作为大样本,展开实证研究“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的宏观特征规律等。

第二,发展或创新新的理论视角,如最佳独特性理论(Optimal Distinctiveness)、情景式AI理论(Situated AI)、数据基础观理论(Data-Based View)、权变理论等,探究“数字+算法”如何赋能构建智能制造企业的独特竞争优势。最近有学者指出尽管AI等“数字+算法”开始渗透到商业活动中,但我们对如何使用其创造独特价值的理解是有限的,因为AI等通用技术创新实际上不会带来可持续的显著性竞争优势(Barney和Reeves, 2024)。最佳独特性理论对于探讨制度和竞争压力的动态变化,以及如何有效地平衡其对合法性和独特性的需求提供了新的见解,值得进一步深入研究(Su等, 2024)。还有学者引入了情境AI理论,针对人工智能具有通用性、显性和短视性的三个战略限制,阐述企业如何将人工智能的能动性与企业过往的经验和系统结合,以及通过扎根、界定和重塑(grounding, bounding, and recasting)三种情境化活动,将这种经过转化的人工智能嵌入企业的组织能力中,来解决人工智能的战略局限性,建立AI驱动的竞争劣势(Kemp, 2024),但尚未经过有效的验证分析。数据基础观理论揭示了数字时代企业间的竞争形态从单体竞争演变为以“数据聚合者”为核心的基本原理,也尚未有效检验(魏江和应瑛, 2025),未来可以深入探索。而在“数字+算法”赋能下,智能制造产品加工与生产过程智能快速柔性响应,究竟是推动微笑曲线的形态进一步弯曲,还是使其发生了翻转形成其他新的曲线理论等都尚无定论。

第三,从技术、组织、公共环境三个层面的影响前因来看,已有研究视角存在缺口。在技术层面,已有文献集中于研究通用基础技术,而对于前端应用技术,如移动应用开发、用户界面和用户体验设计等在智能制造方面研究不足。未来可以深入研究如何基于工人个体特征(包括习惯、技能水平)和任务需求,运用机器学习等算法实现界面布局和功能的自动调整。例如,开发智能算法模型,通过收集工人操作数据,分析操作频率、误操作类型等信息,以此为依据动态调整界面元素位置和功能模块的显示顺序。在组织层面,员工如何拥抱AI时代的工作方式,如何培养员工的数字素养和企业的数据安全观,以及人类决策权与AI决策权的分配如何改变组织内部的权力关系和真正的权威?深入研究不同类型任务(如常规性任务、创新性任务、高风险任务等)的特点,确定适合人类决策和AI决策的任务边界、风险控制与责任界定。深入探究复杂系统思维下的组织结构设计与实践,如在生命周期演进过程中,组织不同生命周期阶段的模式如何衔接与切换,实现平稳过渡,以及研究技术革命与组织结构调整的长期互动关系,价值创造与组织结构的协同演化等。从公共政策环境方面,公共环境越来越强调制造业的绿色转型和可持续发展,因此,可以深入研究企业如何通过“数字+算法”实现产品生命周期的绿色化,包括设计、生产、使用和回收等环节,如何选择绿色供应商,可持续供应链的构建方法,以及全球市场对企业绿色产品的需求变化和政策法规的变化如何影响企业出海选择等。

第四,“数字+算法”驱动智能制造的影响机制有待深化。当前研究在探讨数字平台如何促进供应链上下游企业之间的资源整合、信息共享、跨领域协同等方面分析较多,但对于数字平

台治理与协同创新网络建设的治理模式探索、激励机制设计、信任建立策略等方面研究较少。因此,未来可以深化研究不同类型的数字平台最适合的治理结构和管理模式,包括开放式还是封闭式架构、中心化或去中心化的决策流程等,分析影响合作双方信任度的关键因素,探讨如何通过合理的利益分配方案激发价值生态系统中各参与方的积极性,促进数据、知识、技术等共享和交流,实现跨业务主体、跨生命周期的资源优化配置。在产业生态方面,探讨立足“数字+算法”驱动的协同逻辑,如何破解数据壁垒、赋能弱势主体、强化供应链韧性等维度重构产业生态韧性,如何以公共数据开放建设为契机,推动工业制造数据的开放共享试点,以及研究产业生态联盟中企业间的竞合关系是如何形成的,这种关系又如何随着市场环境的变化而演变等。

第五,影响结果与边界条件等方面深化。例如在开辟新市场方面,已有研究主要关注智能制造灵活的生产流程和智能设计系统对市场占有率和绩效表现的影响,而对于如何满足消费者的独特需求,进入细分市场,开辟新的客户群体,以及智能制造如何跨界融合开辟海外市场等都有待深入研究。在新组织方面,研究什么样的数字化沟通工具最适合无边界组织,如何确保信息在不同团队、项目之间的实时、准确传递,如何避免信息过载的问题;以及不同文化背景的企业在采用无边界组织时,如何像跨国公司在不同国家的分支机构之间建立统一且适应的文化那样,克服数字文化差异带来的挑战,实现较好的融合。在影响边界维度,探究“小院高墙”、中美科技经贸摩擦等危机冲击,以及“揭榜挂帅”等攻关行动、“研发对赌”式补贴等政策举措所构成的复杂环境,如何通过作用于技术跨界融合与多元化合作,影响企业对开放创新与自主创新的平衡把握;研究高度动态环境下,当市场需求或技术创新迭代周期变短,竞争压力也更大时,先动企业应该采取何种策略,维持在“数字+算法”中的领先地位,而跟随企业又该怎么样在动态竞争加剧与先动企业的夹击下构建自身的独特性获得成长等。

### 主要参考文献

- [1]陈冬梅,王俐珍,陈安霓.数字化与战略管理理论——回顾、挑战与展望[J].管理世界,2020,36(5):220-236.
- [2]戴维奇,孟伊铭,李炜文,等.数智战略研究的现有版图与未来疆域[J].外国经济与管理,2026,48(1):3-17.
- [3]杜勇,曹磊,谭畅.平台化如何助力制造企业跨越转型升级的数字鸿沟?——基于宗申集团的探索性案例研究[J].管理世界,2022,38(6):117-138.
- [4]高杰,王燕萍,谢排科,等.共享制造生态系统的协同治理研究:基于问题解决视角[J].管理世界,2024,40(9):177-203,10.
- [5]和征,张志钊,杨小红.云制造创新生态系统知识共享激励的演化博弈分析[J].中国管理科学,2022,30(7):77-87.
- [6]贺正楚,潘为华,潘红玉,等.制造企业数字化转型与创新效率:制造过程与商业模式的异质性分析[J].中国软科学,2023,(3):162-177.
- [7]胡斌,王莉丽.物联网环境下的企业组织结构变革[J].管理世界,2020,36(8):202-210,232.
- [8]李庆雪,蔡天熠,王莉静,等.先进制造企业服务创新转型演进逻辑及驱动机制研究——基于企业资源与能力视角[J].科研管理,2023,44(8):47-56.
- [9]李晓,陈雨晨,阮渊鹏,等.基于DT的售后设备预测性维护协同模式研究[J].工业工程与管理,2023,28(1):67-80.
- [10]李雪松,党琳,赵宸宇.数字化转型、融入全球创新网络与创新绩效[J].中国工业经济,2022,(10):43-61.
- [11]刘建丽,李娇.智能制造:概念演化、体系解构与高质量发展[J].改革,2024,(2):75-88.
- [12]刘洋,董久钰,魏江.数字创新管理:理论框架与未来研究[J].管理世界,2020,36(7):198-217.
- [13]吕文晶,陈劲,刘进.工业互联网的智能制造模式与企业平台建设——基于海尔集团的案例研究[J].中国软科学,2019,(7):1-13.
- [14]裴军,周娅,彭张林,等.高端装备智能制造创新运作:从平台型企业到平台型供应链[J].管理世界,2023,39(1):226-239.
- [15]钱雨,孙新波,孙浩博,等.数字化时代敏捷组织的构成要素、研究框架及未来展望[J].研究与发展管理,2021,33(6):58-74.

- [16]任保平, 迟璐婕. 数据+算法+算力的人工智能新质生产力时序变化与空间格局[J]. *厦门大学学报(哲学社会科学版)*, 2025, 75(3): 26-39.
- [17]沈坤荣, 乔刚, 林剑威. 智能制造政策与中国企业高质量发展[J]. *数量经济技术经济研究*, 2024, 41(2): 5-25.
- [18]史占中. “数字+算法”驱动未来产业创新发展[J]. *中国科技论坛*, 2023, (12): 3.
- [19]孙新波, 李祎祯, 张明超. 智能制造企业数字化赋能供应链敏捷性实现机理的案例研究[J]. *管理学报*, 2023, 20(8): 1116-1127.
- [20]孙宇祥, 何代炜, 周献中. 数智化情境下智能工厂生产组织与协同管理: 设计制造一体化协同研发模式[J]. *中国科技论坛*, 2024, (10): 152-165.
- [21]王超发, 李雨露, 王林雪, 等. 动态能力对智能制造企业数字创新质量的影响研究[J]. *管理学报*, 2023, 20(12): 1818-1826.
- [22]王凤彬, 王骁鹏, 张驰. 超模块平台组织结构与客制化创业支持——基于海尔向平台组织转型的嵌入式案例研究[J]. *管理世界*, 2019, 35(2): 121-150,199-200.
- [23]王核成, 周泯非, 郭文强, 等. 焦点企业数字化能力如何影响价值共创与生态竞争优势——吉利集团嵌入式案例研究[J]. *南开管理评论*, 2024, 27(5): 89-104.
- [24]魏江, 应瑛. 企业数据基础观的构建[J]. *中国社会科学*, 2025, (12): 53-68,200.
- [25]吴小节, 马美婷, 汪秀琼. 智能制造研究述评[J]. *研究与发展管理*, 2023, 35(6): 32-45.
- [26]肖吉军, 郑颖琦, 徐洁萍. 基于AHP与DHNN的智能制造成熟度评估模型研究[J]. *系统科学学报*, 2020, 28(2): 105-110.
- [27]肖静华, 吴小龙, 谢康, 等. 信息技术驱动中国制造转型升级——美的智能制造跨越式战略变革纵向案例研究[J]. *管理世界*, 2021, 37(3): 161-179,225,11.
- [28]谢康, 胡杨颂, 刘意, 等. 数据要素驱动企业高质量数字化转型——索菲亚智能制造纵向案例研究[J]. *管理评论*, 2023, 35(2): 328-339.
- [29]余明桂, 贺蒙蒙, 张萌萌. 人才引进政策、劳动力优化配置与制造业智能化[J]. *中国工业经济*, 2024, (5): 116-134.
- [30]约瑟夫·熊彼特著, 何畏, 易家祥译. *经济发展理论*[M]. 北京: 商务印书馆, 2020: 75-77.
- [31]张宏斌, 吴锋. 基于自动化排布算法的工厂系统布局方法[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(4): 173-180.
- [32]张化尧, 倪悦雨, 蔡方中. 美国“脱钩”政策对我国智能制造的影响研究[J]. *科学学研究*, 2024, 42(7): 1409-1418.
- [33]张明超, 孙新波, 李俊悦. 工业互联网平台赋能制造企业价值链数字创新——基于海尔卡奥斯的案例研究[J]. *科学学研究*, 2025, 43(2): 325-336.
- [34]张强, 赵爽耀, 蔡正阳. 高端装备智能制造价值链的生产自组织与协同管理: 设计制造一体化协同研发实践[J]. *管理世界*, 2023, 39(3): 127-139,10.
- [35]赵宸宇. 数字化发展与服务化转型——来自制造业上市公司的经验证据[J]. *南开管理评论*, 2021, 24(2): 149-161.
- [36]赵剑波. 推动新一代信息技术与实体经济融合发展: 基于智能制造视角[J]. *科学学与科学技术管理*, 2020, 41(3): 3-16.
- [37]Agrawal R, Majumdar A, Kumar A, et al. Integration of artificial intelligence in sustainable manufacturing: Current status and future opportunities[J]. *Operations Management Research*, 2023, 16(4): 1720-1741.
- [38]Baiyere A, Grover V, Lyytinen K J, et al. Digital “x”—Charting a path for digital-themed research[J]. *Information Systems Research*, 2023, 34(2): 463-486.
- [39]Barney J B, Reeves M. AI won't give you a new sustainable advantage[J]. *Harvard Business Review*, 2024, 102(5): 72-79.
- [40]Buckley P J, Murphree M, Anderson J. Horizontal subcontracting and the global factory[J]. *Journal of International Business Studies*, 2024, 55(7): 934-944.
- [41]Cagliano R, Canterino F, Longoni A, et al. The interplay between smart manufacturing technologies and work organization: The role of technological complexity[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2019, 39(6-8): 913-934.
- [42]Calzolari G, Cheysson A, Rovatti R. Machine data: Market and analytics[J]. *Management Science*, 2025, 71(10): 8230-8251.
- [43]Cameron L D. The making of the “Good bad” Job: How algorithmic management manufactures consent through constant and confined choices[J]. *Administrative Science Quarterly*, 2024, 69(2): 458-514.
- [44]Chen W D, Shi C, Duenyas I. Optimal learning algorithms for stochastic inventory systems with random capacities[J]. *Production and Operations Management*, 2020, 29(7): 1624-1649.

- [45]Choi I, Cantor D E, Han K, et al. Dual pathways of value creation from digital strategic posture: Contingent effects of competitive actions and environmental uncertainty[J]. *MIS Quarterly*, 2024, 48(1): 409-426.
- [46]Choi T M, Kumar S, Yue X H, et al. Disruptive technologies and operations management in the industry 4. 0 era and beyond[J]. *Production and Operations Management*, 2022, 31(1): 9-31.
- [47]Dornelles J D A, Ayala N F, Frank A G. Smart Working in Industry 4. 0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 163: 107804.
- [48]Fini R, Perkmann M, Kenney M, et al. Are public subsidies effective for university spinoffs? Evidence from SBIR awards in the university of California system[J]. *Research Policy*, 2023, 52(1): 104662.
- [49]Frank A G, Dalenogare L S, Ayala N F. Industry 4. 0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 210: 15-26.
- [50]Hou L W. Does the industrial big data environment matter? An evaluation of its effect on the production performance[J]. *Information & Management*, 2025, 62(6): 104159.
- [51]Jain T, Hazra J, Gopal R. 3D printing-as-a-service: An economic analysis of pricing and cocreation[J]. *Production and Operations Management*, 2024, 33(7): 1437-1456.
- [52]Kellogg K C, Valentine M A, Christin A. Algorithms at work: The new contested terrain of control[J]. *Academy of Management Annals*, 2020, 14(1): 366-410.
- [53]Kemp A. Competitive advantage through artificial intelligence: Toward a theory of situated AI[J]. *Academy of Management Review*, 2024, 49(3): 618-635.
- [54]Kim K, Lee J, Gopal A. Soft but strong: Software-based innovation and product differentiation in the IT hardware industry[J]. *MIS Quarterly*, 2022, 46(2): 1273-1294.
- [55]Kostami V. If you love your agents, set them free: Task discretion in online workplaces[J]. *Management Science*, 2024, 70(3): 1787-1809.
- [56]Kulkarni U R, Kiang M Y. Dynamic grouping of parts in flexible manufacturing systems—a self-organizing neural networks approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 84(1): 192-212.
- [57]Lăzăroiu G, Androniceanu A, Grecu I, et al. Artificial intelligence-based decision-making algorithms, Internet of Things sensing networks, and sustainable cyber-physical management systems in big data-driven cognitive manufacturing[J]. *Oeconomia Copernicana*, 2022, 13(4): 1047-1080.
- [58]Lee J, Berente N. Digital innovation and the division of innovative labor: Digital controls in the automotive industry[J]. *Organization Science*, 2012, 23(5): 1428-1447.
- [59]Letmathe P, Rößler M. Should firms use digital work instructions?—Individual learning in an agile manufacturing setting[J]. *Journal of Operations Management*, 2022, 68(1): 94-109.
- [60]Lu Y. Cyber physical system (CPS)-based industry 4.0: A survey[J]. *Journal of Industrial Integration and Management*, 2017, 2(3): 1750014.
- [61]Mak H Y, Max Shen Z J. When triple - A supply chains meet digitalization: The case of JD. com's C2M model[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(3): 656-665.
- [62]Mithas S, Chen Z L, Saldanha T J V, et al. How will artificial intelligence and Industry 4.0 emerging technologies transform operations management?[J]. *Production and Operations Management*, 2022, 31(12SI): 4475-4487
- [63]Natter M, Mild A, Feurstein M, et al. The effect of incentive schemes and organizational arrangements on the new product development process[J]. *Management Science*, 2001, 47(8): 1029-1045.
- [64]Park Y, Mithas S. Organized complexity of digital business strategy: A configurational perspective[J]. *MIS Quarterly*, 2020, 44(1): 85-127.
- [65]Rai A, Patnayakuni R, Seth N. Firm performance impacts of digitally enabled supply chain integration capabilities[J]. *MIS Quarterly*, 2006, 30(2): 225-246.
- [66]Santos R C, Martinho J L. An Industry 4. 0 maturity model proposal[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2020, 31(5): 1023-1043.

- [67]Senoner J, Kratzwald B, Kuzmanovic M, et al. Addressing distributional shifts in operations management: The case of order fulfillment in customized production[J]. *Production and Operations Management*, 2023, 32(10): 3022-3042.
- [68]Senoner J, Netland T, Feuerriegel S. Using explainable artificial intelligence to improve process quality: Evidence from semiconductor manufacturing[J]. *Management Science*, 2022, 68(8): 5704-5723.
- [69]Shi X W, Liang X K, Ansari S. Bricks without straw: Overcoming resource limitations to architect ecosystem leadership[J]. *Academy of Management Journal*, 2024, 67(4): 1084-1123.
- [70]Su J Q, Gao X, Tan J. Positioning for optimal distinctiveness: How firms manage competitive and institutional pressures under dynamic and complex environment[J]. *Strategic Management Journal*, 2024, 45(2): 333-361.
- [71]Sun X H, Zhang F L, Wang J J, et al. Digital twin for smart manufacturing equipment: Modeling and applications[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 137(9-10): 4929-4946.
- [72]Trantopoulos K, von Krogh G, Wallin M W, et al. External knowledge and information technology: Implications for process innovation performance[J]. *MIS Quarterly*, 2017, 41(1): 287-300.
- [73]Yoo Y, Boland R J, Lyytinen K, et al. Organizing for innovation in the digitized world[J]. *Organization Science*, 2012, 23(5): 1398-1408.
- [74]Zhou J M, Xu T, Chiao Y, et al. Interorganizational systems and supply chain agility in uncertain environments: The mediation role of supply chain collaboration[J]. *Information Systems Research*, 2024, 35(1): 184-202.
- [75]Zhu K. The complementarity of information technology infrastructure and e-commerce capability: A resource-based assessment of their business value[J]. *Journal of Management Information Systems*, 2004, 21(1): 167-202.

## A Review of Research on Intelligent Manufacturing Driven by “Digital + Algorithms” Integration and Prospects

Liu Xianggang, Shi Zhanzhong

(*Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

**Abstract:** Driven by “digital and algorithms”, intelligent manufacturing has become a new paradigm for future manufacturing development, attracting significant attention from scholars globally and yielding substantial theoretical and practical insights. Based on a review of literature on digital technology, algorithms, and intelligent manufacturing, this paper summarizes the influencing factors driving the development of intelligent manufacturing through the integration of “digital + algorithms” across three dimensions: technology, organization, and public environmental policy. It also identifies the impact mechanisms from upstream, midstream, and downstream segments of the intelligent manufacturing industry chain. Additionally, this paper explores the outcomes of “digital + algorithms” integration driving the development of intelligent manufacturing through five types of innovation: new product introduction, new process development, new market expansion, new resource utilization, and new organizational creation, thereby establishing a comprehensive review framework. Finally, it identifies limitations in existing studies and proposes future research directions from multiple perspectives, providing insights for the transformation and development of intelligent manufacturing.

**Key words:** “digital+algorithms”; intelligent manufacturing; theoretical framework; prospects

(责任编辑:王雅丽)