

工业互联网场景下运营管理研究综述

王康周, 王冬冬, 豆 垒, 薛 林

(兰州大学 管理学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 工业互联网作为新一代信息技术与工业制造深度融合的全新工业生态, 对提高企业运营效率、推动制造业高质量发展具有重要意义。综合分析了工业互联网场景下运营管理相关文献, 发现: 1) 工业互联网平台的研究大多数是通过定性方法分析其在不同行业的应用场景及平台生态, 而通过定量方法探究工业互联网平台的深层次运营及协调机制是今后需重点关注的问题; 2) 通过数字化、网络化和智能化来提高产品质量、降低成本、优化业务流程等, 实现价值创造, 而工业互联网下制造企业、顾客等多主体的价值共创机理和模式是重要的研究问题; 3) 现有研究聚焦工业互联网技术和模型算法对生产运营中单一活动进行优化, 而工业互联网环境下“研-制-维”一体化协同流程的构建方法以及多级闭环决策体系与智能决策方法需要深入探究; 4) 现有研究已明确工业互联网下供应链可以通过互联互通、可视性、实时性及可追溯性提升运营绩效, 并探讨了技术采纳对其策略选择及协调机制的影响, 未来可以将关注点转向下游客户端。

关键词: 工业互联网 (IIoT); 价值创造; 运营管理; 供应链管理

中图分类号: F406.11; F279.23; F273.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)02-0001-13

Operational Management in the Context of Industrial Internet of Things: A Review

WANG Kangzhou, WANG Dongdong, DOU Lei, XUE Lin

(School of Management, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Industrial Internet of Things (IIoT), as a new industrial ecosystem integrating advanced information technologies with manufacturing, holds significant importance for enhancing operational efficiency and promoting high-quality development in the manufacturing sector. A comprehensive analysis of literature related to operational management in the IIoT context reveals several key findings. 1) Research on IIoT platforms often employs qualitative methods to analyze their application scenarios and ecosystems across various industries. However, it is essential to focus on quantitative methods to explore operational and coordination mechanisms in depth. 2) Existing studies on value creation suggest enhancing product quality, reducing costs, and optimizing business processes through digitalization, networking, and intelligence. Thereby, it highlights the importance of understanding value co-creation mechanisms and patterns among multiple stakeholders, including manufacturing enterprises and customers. 3) Current research primarily concentrates on optimizing individual activities in production operations using IIoT technologies, mathematical models and algorithms. Nevertheless, there exists a critical need to investigate methods for constructing integrated collaborative processes with the cycle of “research, manufacturing and maintenance” within the IIoT environment, along with exploring multi-level closed-loop decision-making systems and intelligent decision-making methods. 4) It is demonstrated that supply chain management in IIoT can improve operational performance through interconnection, visibility, real-time capabilities, and traceability, while the impact of technology adoption on strategy selection and coordination mechanisms is also explored. Future attention may shift towards downstream clients in supply chain management.

Key words: industrial internet of things (IIoT); value creation; operational management; supply chain management

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72171105); 教育部人文社会科学青年基金资助项目 (21YJC630133); 中央高校基本科研业务费资助项目 (21ljzjbkyjh008)

作者简介: 王康周 (1982—), 男, 甘肃省人, 教授, 博士, 主要研究方向为服务型制造、共享制造、运营与供应链管理等。

当前,以数字化、网络化、智能化为主要特征的第四次工业革命,推动了制造业转型的进程。工业互联网(industrial internet of things, IIoT)是第四次工业革命的重要基石,引领第四次工业革命的发展方向,推动企业价值创造模式、运营决策机制和供应链组织形式的深刻变革^[1]。工业互联网将大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术与工业制造深度融合,实现工业设备、生产线、工厂、企业以及整个供应链的互通互联,不仅提升工业生产的效率、质量和创新能力,降低工业生产的成本、风险和资源消耗,还促进企业转型升级和产业结构优化。随着工业互联网与工业制造各环节的深度融合,我国已形成较为完整的工业互联网生态体系,工业互联网在电力、钢铁、石化等流程制造业和电子电器、机械设备、航空航天等离散制造业均得到了广泛应用。根据中国工业互联网研究院发布的《中国工业互联网产业经济发展白皮书(2022年)》数据显示,2021年底,我国工业互联网产业规模已经突破4万亿元,占GDP比重达到3.58%。截至2023年底,我国具有一定影响力的工业互联网平台超过340家,接入设备总量超过9600万台套。从行业看,45个国民经济大类开展工业互联网实践,“5G+工业互联网”项目数超过1万个,在钢铁、装备、电子等行业率先发展,并向公共服务、社会民生等领域加快推展和加速延伸。

不同于智能制造侧重工业制造过程的智能决策,工业互联网侧重于将工业设备、生产线、企业内外各种资源进行连接和融合,从而进行全流程的智能决策与优化。此外,与以往企业数字化、网络化、智能化相比,工业互联网下企业的“三化”有本质区别。首先,工业互联网下企业的数字化专注于制造业和工业领域,强调通过物联网技术连接设备、传感器,实现设备之间的实时通信、数据的实时监测和分析,并实现企业内外各个环节和要素的数字化管理;而传统的数字化侧重于企业内部流程和信息管理的优化。其次,工业互联网场景下的网络化强调人、机、物以及全要素的互联互通,构建起覆盖全产业链、全价值链的工业生态体系;而传统的网络化则是通过互联网技术,实现企业部门之间的协同合作,加强与合作伙伴及客户之间的联系。最后,在企业智能化方面,工业互联网平台基于实时性和协同性的特征,可以提供全流程的智能化运作和决策支持;而传统的企业智能化只能实现各环节独立的智能化运作和管理。

工业互联网通过将工业设备、产品和服务与互联网相连接,实现了工业数据的全面感知、自由流动和智能分析,从而有效提升了企业运营绩效和业务增长。然而,工业互联网的广泛应用同时造成了企业运营管理复杂性的增加,并引发了一系列的问题。首先,工业互联网如何赋能企业运营转型升级并实现价值创造,是需要解决的关键问题。其次,需要探讨企业如何利用工业互联网的数据分析和智能决策能力,提升各运营环节的效率和效果。最后,工业互联网平台的应用也推动了关联企业之间形成协同创新和合作共赢的生态系统。供应链上下游企业之间如何通过工业互联网平台实现信息共享、资源整合、业务协作,并形成相应的利益分配机制,同样值得关注。

1 文献筛选

随着工业互联网的发展,越来越多的研究从运营管理角度,探讨了工业互联网的应用价值,为企业提供高效的运营管理实施方案。本文基于中国知网数据库和Web of Science核心集,搜索并筛选了工业互联网下运营管理的相关文献。

在中国知网上以SU=(工业互联网)*(研发+生产+调度+库存+物流+维护+维修+供应链)为检索词,检索出共计653篇CSSCI/北大核心期刊文章;在Web of Science核心合集数据库中以TS=(IIoT*) AND TS=(Research And Development* OR R&D* Production* OR Scheduling* OR Stock* OR Logistics* OR Maintenance* OR Repair* OR Supply Chain*)为检索词,检索出共计1896篇SCI/SSCI文献,其中最早的文献出现在2014年。如图1所示,国内外关于工业互联网下运营管理问题的研究在2014~2023年之间的发文量呈现出总体明显上升趋势。利

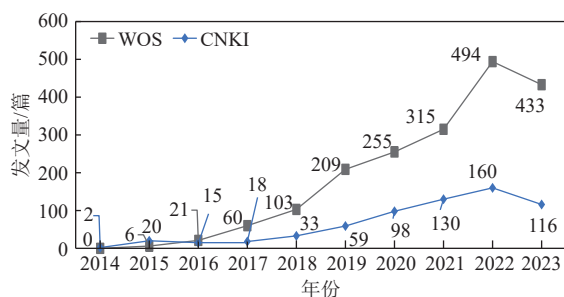


图1 “工业互联网”主题下运营管理相关研究年度分布

Figure 1 Annual distribution of studies related to operational management with the topic of IIoT

用 VOSviewer 软件对涉及工业互联网下运营管理研究的关键词进行可视化图谱分析, 如图 2、图 3 所示, 中文文献出现频率较高的关键词包括工业互联网、工业互联网平台、数字经济(数字化)、协同制造(网络化)、智能制造(智能化)、价值共创、高质量发展、产业链等; 而英文文献出现频率较高的关

关键词有 industrial internet of things、blockchain、internet of things、edge computing、machine learning、deep learning、data models、digital twin、big data、optimization 等。可以看出中文文献更侧重于工业互联网相关技术的应用及效益,而英文文献则更侧重于工业互联网下具体的运营优化技术和决策模型。

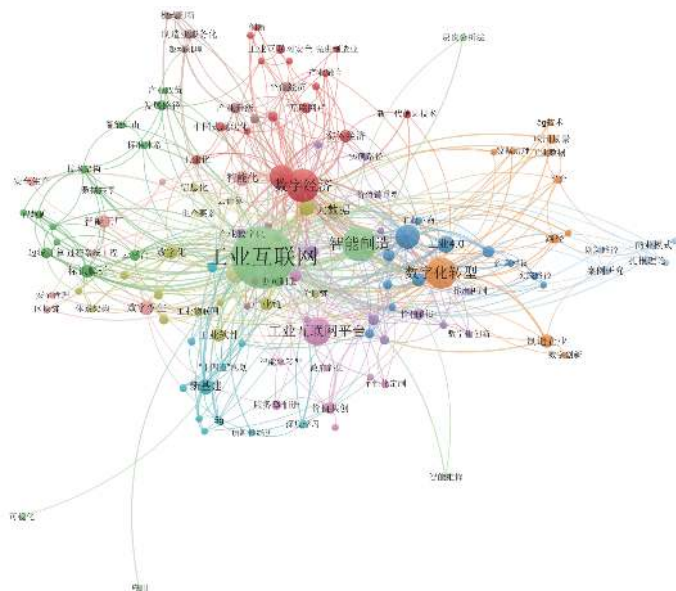


图 2 “工业互联网”主题下运营管理相关文献研究热点 (中文文献)

Figure 2 Research hotspots in literature related to operational management with the topic of IIoT (CNKI)

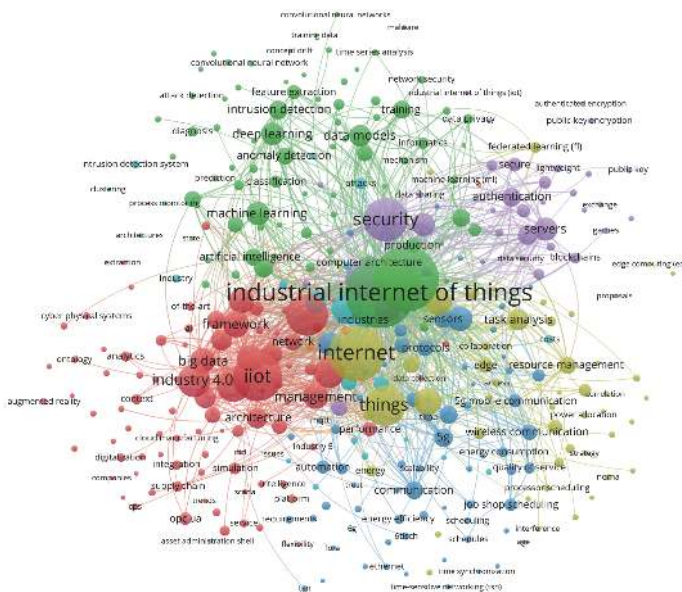


图3 “工业互联网”主题下运营管理相关文献研究热点(英文文献)

Figure 3 Research hotspots in literature related to operational management with the topic of IIoT (WoS)

根据国内外研究热点，相关文献集中于工业互联网的应用价值及其相关技术下的运营优化决策。

由于本文聚焦于企业运营管理，以及非纯技术层面的问题，因此剔除了一些相关性较弱的主题，包括

高质量发展、产业链,以及具体的工业互联网技术如边缘计算、大数据、数字孪生等,从而能够更加集中地探讨工业互联网对企业运营管理的影响。在分析工业互联网平台相关文献之后;先针对企业价值创造,从数字化、智能化和网络化 3 个维度筛选相关文献;再分别基于企业各运营环节及供应链视角,对涉及运营优化及决策问题的相关研究进行筛选,共整理出 60 余篇文献。

2 工业互联网平台研究

工业互联网平台作为工业互联网的核心组成部分,是制造业数字化、网络化、智能化转型的关键基础设施。随着工业互联网平台的发展,越来越多不同行业中的相关参与者,如制造企业、软件开发商、系统集成商和其他开发者等,加入工业互联网平台,逐渐构筑覆盖技术创新、资源整合和动态配置、平台服务、用户参与、多方协作等领域的平台生态。目前,关于工业互联网平台的研究,学者们主要从平台应用、平台生态两个方面展开。

2.1 工业互联网平台应用

工业互联网平台在各个行业得以应用取决于工业互联网平台架构的安全性、高效性及全面性。目前,工业互联网平台的基本架构主要由基础设施层(infrastructure as a service, IaaS)、平台层(platform as a service, PaaS)、应用层(software as a service, SaaS)三大层级构成。平台企业需结合自身行业特点在三大层级的基础上构建平台架构,从而促进其应用,如海尔 COSMO 平台的架构基于三大层级增加了业务模式层^[2],促使其在电子、船舶、运输、化工等行业得以应用。

随着工业互联网平台在各个行业的应用,研究者们深入不同领域,以探究工业互联网在特定行业中的实际应用。根据现有文献,工业互联网平台在航空设备制造业^[3]、半导体行业^[4]、石油化工行业^[5]、家电行业^[2]及烟草行业^[6]等领域发挥重要作用,为各个行业带来高效、智能的生产和管理模式。

在航空设备制造业中,航天云网 INDICS 平台是航天科工打造的以云制造为特色的工业互联网平台,提供智能制造、云制造、协同制造等公共服务^[3]。该平台将分散的制造资源集中起来,通过对用户的制造服务需求和资源提供商的产能进行匹配,进而突破空间对于制造企业生产经营方式的限

制。在半导体行业中,默克公司和 Palantir 公司分别整合了各自在设备制造工艺和安全数据平台方面的专长,创建了一个智能数据平台 Athnia,供半导体制造商和材料供应商在安全的环境中协作^[4]。该平台收集半导体供应链上企业的材料、工艺和制造数据,然后利用大数据和人工智能对供应链的质量或性能偏差进行分析。与企业数据库相比,该平台的优势在于可以整合各供应商的数据,并将数据安全地传递给制造商。在石油化工行业中,石化盈科 ProMACE 平台旨在成为面向石油及化工行业的全产业链可控工业互联网平台,成为新一代信息通信技术与石油化工行业深度融合的基础设施^[5]。该平台为企业建立智能工厂、智能油气田等行业应用提供支持,为石油化工等流程型制造行业的研发设计、生产制造等环节提供支持。

在家电行业中,海尔 COSMO 平台通过对设备的大数据分析,把握客户需求,从而进行以用户为中心的大规模定制^[2]。此外,该平台还通过精益生产及网络协同制造实现生产制造过程的高精度、高效率。而且,该平台还为用户提供综合解决方案的服务。用户可以应用该平台实现与生产制造全流程的实时虚拟交互。在烟草行业中,卷烟制造工业互联网平台通过对制丝、包装等生产过程中人、机、物等要素的数据进行收集、建模和仿真,对烟草生产线进行数字化改造,从而实现了烟草原料的追溯、烟草加工的监控、烟草产品的检测和烟草物流的管理,提升了烟草制造的质量和效率,保障了烟草产品的安全和规范^[6]。

此外,为确保工业互联网平台能够得到更好的应用,可通过对平台的成熟度^[7]、安全性及应用水平^[8]等方面进行评价,从而根据薄弱环节确定平台改进的方向,进而促使其他企业加入平台形成平台生态。

2.2 工业互联网平台生态

在工业制造领域,随着工业大数据、工业互联网、工业人工智能等先进数字技术与制造业的深度融合发展,制造模式正逐步从平台化向生态化方向发展。

为了确保平台生态良性发展,需要厘清利益相关者加入平台生态的动机、构建平台生态及平台生态下的策略选择等问题。首先,对于利益相关者加入平台生态的动机方面,平台应实施相应的安全防

护措施, 从而确保工业互联网平台数据、系统等的安全性, 增加企业加入平台的意愿, 推动生态系统的建设及完善, 最终使平台更快地获得生态效益^[9]。此外, 平台还可通过降低制造企业对接的信息化成本、减少向企业收取的交易费用、提高供需企业的匹配率等方式, 吸引更多的制造企业加入平台, 不断扩大生态系统的规模^[10]。其次, 构建平台生态方面, 孙新波等^[11]通过案例研究方法, 以海尔COSMO平台为研究对象, 探究工业互联网平台赋能促进数据化商业生态系统构建机理, 发现了工业互联网平台通过组织赋能、结构赋能和场域赋能, 实现数据价值节点部署、数据价值链条培育及数据价值网络架构的生态战略任务, 最终构建开放、共创及共赢的数据化商业生态系统。而孙新波等^[12]从过程角度探究工业互联网平台赋能智能制造生态系统构建的内部机理, 发现其遵循平台嵌入、平台聚合到平台撬动的过程, 通过工业互联网平台为载体打造与链接智能价值节点、智能价值链条与智能价值网络, 最终构建智能制造生态系统。最后, 平台生态系统下的策略选择方面, Zhao 等^[9]通过博弈论的方法探究平台在生态系统演变的不同阶段的策略选择问题。在平台的初建阶段, 平台企业倾向于实施激励策略和提供增值服务, 主要目的是吸引其他企业加入平台生态系统。在平台的发展及深化阶段, 平台企业倾向于实施治理策略^[13], 主要目的是加强对现有进入平台的企业的激励和约束, 进而促进其与新进入者之间的良性竞争, 从而提高生态系统的整体竞争力。

综上所述, 鲜有学者通过定量的研究方法对在工业互联网平台生态系统下各利益相关者之间的协调机制展开探讨。这一问题是在未来值得深入探究的问题之一。

3 工业互联网下价值创造研究

随着新一代信息技术, 如大数据、物联网、人工智能等快速发展, 工业互联网已经成为许多企业提升竞争力的重要手段, 对企业的价值创造活动具有重要作用^[14]。工业互联网下, 人机物全要素安全可靠互联, 不同环节的企业可以集中资源、知识和技术, 从而打通从设计、生产、流通、消费到服务的全价值链, 实现工业设备、产品、流程、系统和服务的全面互联, 有利于提高制造企业在数字化、

网络化、智能化过程中整体价值链的效率和竞争力。本节从工业互联网赋能企业数字化、网络化和智能化3个方面梳理工业互联网下的价值创造机理, 如图4所示。

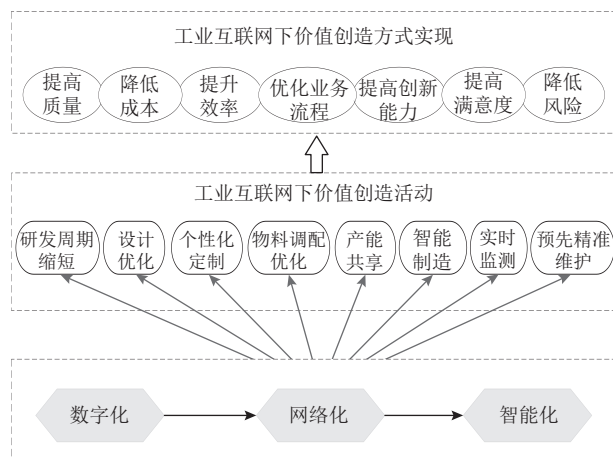


图4 工业互联网下数字化、网络化、智能化的价值创造机理
Figure 4 Mechanisms of value creation through digitization, networking and intelligence in IIoT

3.1 数字化价值创造研究

工业互联网下的数字化要求企业将数据作为重要资源进行收集、分析和利用。这意味着企业需要转变为数据驱动模式, 在决策和规划中更加注重数据的价值和应用^[15]。

工业互联网下企业数字化主要通过研发周期缩短、产品设计优化、个性化定制、物料调配优化、产能共享、智能制造、实时监测、预先精准维护等活动实现价值创造。例如, 在研发周期缩短、产品设计优化和个性化定制方面, 随着企业数字化不断推进, 大量工业传感器被广泛应用, 产生大量的数据, 这些数据可转化成对企业有价值的资源要素, 为缩短研发周期、优化产品设计、个性化定制等活动提供支持, 进而降低企业平均生产成本, 提高产品质量、生产效率和顾客满意度^[14, 16]。在物料调配优化方面, 刘诚等^[15]提出, 工业互联网下数据作为一种新的资源要素, 不仅可以参与生产活动, 还可以在不同环节流动, 实现不同环节之间物料调配的统筹协调, 提高资源配置效率。在产能共享方面, 工业互联网下企业的数字化使得制造企业可以突破组织乃至产业链边界, 实现分散化研制资源的整合, 形成“数字生态共同体”, 有利于实现数据驱动的产能共享, 进而优化业务流程以及提高企业创新能力^[17-18]。在智能制造方面, 工业互联网下共享制

造平台通过高效的供需匹配与生产调度,提高智能制造的水平,快速适应外部需求^[18]。在实时监测与预先维护方面,李浩等^[19]提出,制造企业在数字化下,动态获取设备运行过程中产生的多维异质数据,并预先精准维护,从而提高运维效率、设备可靠性,降低设备失效风险。可见,工业互联网为企业数字化赋能,并在企业数字化过程中起着催化剂的作用,助力制造业企向价值链两端攀升,实现价值创造^[20]。

3.2 网络化价值创造研究

网络化是工业互联网场景下的重要特征,工业互联网下企业的网络化主要通过研发周期缩短、产品设计优化、个性化定制、物料调配优化、产能共享、智能制造等活动实现价值创造。

例如,在研发周期缩短和产品设计优化方面,企业网络化能够基于工业互联网分布式协同环境,通过网络化连接物理世界与虚拟世界,促进异质分布数据资源的深度整合,有利于缩短研发周期、优化产品设计,驱动研发模式和生产方式变革,带动研发、生产效率的提升,提高创新能力,降低成本^[21]。在个性化定制方面,通过网络化协同,顾客可以参与到产品设计活动中,企业根据顾客的差异化需求,实行产品的在线定制,从而有利于提高顾客满意度,提升产品质量,进而提升企业竞争力^[22-23]。在物料调配优化方面,工业互联网下企业网络化使得资源配置场所逐渐从线下转到线上,以工业互联网平台为中心,统筹物料调配,帮助企业提高运营效率、拓展业务范围^[22, 24]。在产能共享方面,研究表明制造企业网络化需要恰当选择水平差异化、垂直差异化的升级路径,通过企业网络实现创新协同、产能共享,实现品质和服务的提升^[18]。在智能制造方面,张亚斌等^[24]指出,企业通过融入智慧型网络组织实现网络化,有利于突破物理距离、时间成本及信息不对称的约束,改变企业传统生产组织方式和空间组织方式,通过组织协同创新、提高智能制造水平来驱动成员提高生产和创新效率。

3.3 智能化价值创造研究

工业互联网是企业智能化的重要载体,工业互联网下企业的智能化主要通过产品设计优化、个性化定制、物料调配优化、产能共享、智能制造、实时监测、预先精准维护等活动实现价值创造。

例如,在产品设计优化方面,工业互联网下智

能化促进企业协同集聚,实现人机协同,通过与设计、生产、管理等环节加速融合,优化产品设计及业务流程,显著提高制造业企业的创新能力和创新效率^[25]。在个性化定制方面,发现工业互联网下,服务型制造企业通过虚拟仿真、可视化模拟等技术的应用,进行个性化定制,提高产品质量、生产效率、顾客满意度以及降低生产成本^[23, 26]。在物料调配优化方面,王昶等^[27]提出,企业智能化通过增强集成互联和协同融合能力,帮助企业提高资源配置效率。在产能共享方面,李婉红等^[28]指出智能化通过实现柔性生产管理模式,助力制造企业进行产能共享,实现高效生产,破解低端产能过剩与高端供给不足的难题,有效节约资源,降低能耗,进而提升企业环境绩效。在智能制造方面,制造企业充分利用工业互联网技术,使得制造装备和制造过程达到动态感知、交互执行,实现生产过程、产品及服务的智能化,有利于提高资源整合的能力,提升智能制造水平,提高新创能力,快速适应外部需求的变化^[29]。在实时监测和预防性维护方面,工业互联网下企业的智能化使得企业可以在线实时监测设备状态、实施预防性维护活动,创新智能服务模式,提高运维效率及客户的满意度,降低设备失效风险^[30]。

上述研究通过数字化、网络化和智能化来提高产品质量、优化业务流程、提高满意度等方面,实现价值创造,对于厘清工业互联网下价值创造的机理具有重要意义,而企业如何依次实现数字化、网络化和智能化不同阶段的跨越和转型,以及制造企业、顾客等多主体的价值共创的机理和模式还需深入剖析和研究。此外,实践中还需进一步创新商业模式,如借助于工业互联网推动共享商业模式的发展,从而提高资源的利用效率和企业的盈利能力。

4 工业互联网下运营决策与优化

在工业互联网的广泛应用中,运营决策与优化是企业关注的核心议题,贯穿于研发、生产制造、库存、物流、维护等前端到后端的多个环节,如图 5 所示。前端研发与生产制造决策不再仅仅依赖传统的经验和计划,而是基于工业互联网下数据的全面感知。中间的库存决策与物流优化不再是简单的库存量和运输路线的规划,而是通过工业互联网实现库存和物流的实时动态管理。后端运维决策在工业互联网的支持下迎来智能化的时代,设备和生产线

的运行状态通过传感器实时传输至云端, 通过大数据和人工智能分析实现对设备健康状况的实时监测和预测。

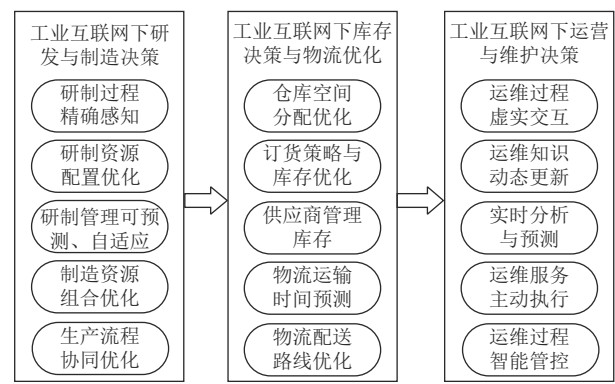


图 5 工业互联网下的运营决策与优化

Figure 5 Operational decision-making and optimization in IIoT

4.1 研发与生产制造决策

工业互联网下制造企业的研发、生产制造决策研究主要聚焦于通过优化产品设计、优化研发与制造资源配置、可预测与自适应的研制管理、优化生产要素服务组合、协同优化生产流程等。

例如, 在优化产品设计、研发与生产资源配置方面, 工业互联网下企业将新一代信息技术与各制造环节融合, 支持研发、制造全过程的精确感知、自主分析和综合决策, 有利于优化产品设计, 提升研发制造资源配置效率^[26]。在可预测与自适应的研制管理方面, 工业互联网环境下高端装备设计制造一体化协同的本质是决策信息的生成、聚合和共享, 需要对整个生产系统进行状态感知、实时分析、自主决策、精准执行, 最终实现可预测、自适应的研制管理^[31-32]。在优化生产制造要素组合方面, 结合教与学优化算法 (teaching-learning-based optimization, TLBO) 和禁忌搜索算法 (tabu search, TS), 优化全局时间消耗和成本消耗, 形成一个生产制造要素资源组合的优化方案^[32]。在协同优化生产制造流程方面, 张文强等^[33]基于工业互联网平台调用历史数据, 并结合 SimRank 算法评估服务间的协作有效性, 以最短的时间和成本为目标, 对整个生产制造流程进行优化。Kalagnanam 等^[34]基于工业互联网的传感器数据, 在优化框架内结合机器学习使用这些数据提供实时的指导控制, 并优化石油生产流程。

4.2 库存决策与物流优化

工业互联网下制造企业的库存与物流决策研究

主要聚焦于仓库空间分配、订货策略、供应商管理库存、物流运输时间预测、物流线路优化等方面。针对仓库存储空间分配问题, Zhang 等^[35]利用物联网技术下仓库内物品的可视性和可追溯性, 将生产规划与仓库中库位分配原则相结合, 以提高空间利用率并降低库存成本。订货策略与库存方面, Li 等^[36]根据产品销售的实时数据来确定最优订货数量, 以最小化库存成本, 通过同时考虑销售情况和订货数量来最大化企业的收益。供应商管理库存方面, Weissshuhn 等^[37]将经典的供应商管理库存概念扩展到终端消费者, 制造商直接为消费者服务, 并在产品中应用物联网技术, 实时收集和传输消费端的使用和库存信息数据, 从而实现自动化补货。随着企业竞争的加剧和客户需求不确定性的增加, 数据驱动决策通过非参数信息的鲁棒库存管理方法来优化订货量, 有利于提高精准度^[38]。物流运输时间方面, 利用工业互联网基础设施收集的大数据, 可以准确预测货运的行驶时间, 以支持实时物流管理。如借助于工业互联网收集的数据, 如车辆探测器、电子标签、GPS 等, 对货运行驶时间进行预测并优化物流决策^[39]。物流配送路径方面, Wang 等^[40]借助工业互联网技术来优化配送路线, 最大限度地减少顾客的等待时间和包裹配送成本。

4.3 运营与维护决策

工业互联网下运营与维护决策研究主要聚焦于运维过程虚实交互协作、运维知识动态更新、运维实时分析与预测、运维服务主动执行、运维过程智能管控等方面, 是层层递进的。如针对复杂产品运维过程虚实交互协作和运维知识动态更新难度大的问题, 黄彬彬等^[30]提出, 企业可以借助工业互联网平台构建一种虚实空间交互融合的复杂产品运维管理协作机制, 根据运维现场的运行状态、异常预警数据, 采用产品故障与退化的诊断预测模型获取复杂产品的故障、寿命以及退化状态等信息; 在虚拟空间中对复杂产品的维护方法进行仿真、验证和优化, 并与维修过程实时交互, 动态更新维修知识, 优化复杂产品运维过程。在运维实时分析与预测方面, 数据驱动的复杂产品服务系统根据具体服务场景, 动态获取复杂设备产品使用运行过程中产生的多维异质数据, 并实时分析与预测, 提高运维决策的准确性^[19, 26]。运维服务主动执行方面, Pei 等^[41]提出设备制造商可先通过工业互联网平台获得设备的

运行数据,进而分析数据以获得有关设备故障风险的预测信息,然后主动执行维护活动以减少故障,从而提高设备的可靠性。运维过程智能管控方面,基于工业物联网数据可实时更改、动态更新的特点,设计故障上报信息与故障样本库的数据交互模式,实现用户与运维人员业务过程行为聚合的智能优化、运维过程智能管控^[30]。

综上所述,现有研究集中于企业借助工业互联网技术和算法模型对其单一运营活动进行优化。而复杂产品由于规模大、技术含量高等特征,运营环节之间需要进行有效协调与一体化管理,未来可以通过多种算法模型,提出研发、运营及维护多运营环节的一体化管理决策办法。此外,现有研究较少关注制造业企业之间的互联互通,而互联互通可以突破组织的边界,提高资源的利用率,如借助工业互联网平台将闲散的制造资源、产能等汇聚在一起提供共享服务,这是未来需要进一步地深入探究的问题。

5 工业互联网下供应链管理

工业互联网平台是连接供应链各成员的重要纽带,能够实时监测和管理从采购、生产到配送各节点的运营状态,并通过大数据分析、人工智能等技术,提供优化建议和决策支持。这使得供应链能够更迅速、精准地响应市场变化,从而提升其敏捷性和适应性,增强其竞争力和创新力^[42]。同时,工业互联网平台也促进了供应链企业间的协同运作,在工业互联网的支持下,供应链上下游企业能够通过全要素共享实现协同决策^[43]。

为了解工业互联网技术对供应链管理的影响,对文献进行了梳理。如图 6 所示,首先归纳了研究中工业互联网下供应链 4 个方面的绩效提升;其次,梳理了工业互联网下供应链策略选择的相关研究,对供应链企业在引入工业互联网相关技术后,如何作出最优的策略选择进行了总结;最后,由于工业互联网相关技术投资会带来供应链企业间利益分配问题,因此回顾了工业互联网技术对供应链协调机制的影响研究,明确了工业互联网下供应链企业如何有效开展合作。

5.1 工业互联网下供应链的绩效提升

工业互联网为供应链绩效提升带来了新的机

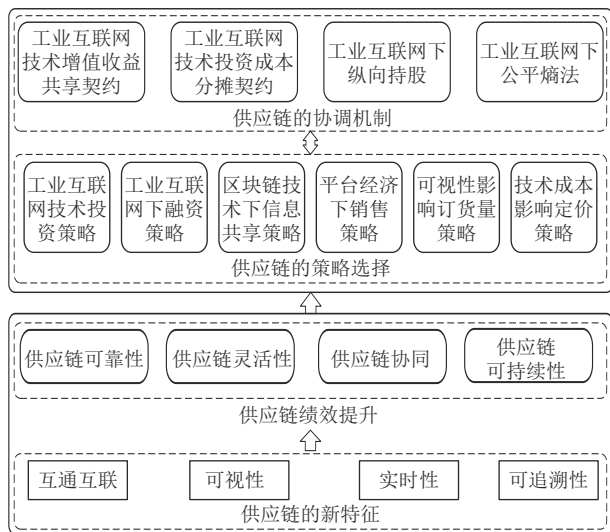


图 6 工业互联网下的供应链管理

Figure 6 Supply chain management in the industrial internet

遇,针对这一主题,学术界基于实证分析、案例研究等方法,深入探讨了供应链如何通过工业互联网平台及相关技术提升供应链的协同、透明、灵活和创新能力,并进一步分析工业互联网场景下供应链提升绩效的路径和内在机理。结合工业互联网相关技术,通过互联互通、可视性、实时性以及可追溯性等新特征,从各节点企业、供应链以及社会层面,供应链可以实现以下 4 个方面运营绩效的提升。1) 工业互联网相关技术能够打破供应链内部的信息壁垒,对供应链的各个环节和节点的状态、位置、数量、质量等进行实时监测、追踪和展示,从而使供应链具备可视性特征,使供应链企业可以及时发现和解决供应链运作过程中出现的问题,提高供应链的可靠性和安全性^[44-46]。2) 借助工业互联网相关技术,供应链企业还可以通过优化采购、生产、交付及回收各环节,提高产品质量,缩短交货时间,增加供应链各环节的灵活性^[47]。3) 供应链各节点企业能够借助工业互联网平台自动捕获、传输、共享并处理相关运营数据和信息,实现供应链中企业内外部业务流程同步和协同创新。张强等^[17]提出,借助新一代信息技术,能够实现供应链企业之间的资源协同、流程协同以及组织协同,为供应链合作伙伴开展协同创新提供了实现路径。4) 产品供应链还可以通过工业互联网相关技术,监测和控制能源消耗、排放物、废弃物等环境因素,减少供应链的环境影响,提高供应链的可持续发展能力和社会形象^[48]。

5.2 工业互联网下供应链的策略选择

虽然工业互联网能够给供应链带来众多收益, 但相关技术的采用, 如传感器、物联网、区块链技术, 需要投入大量硬件设备、软件和系统集成的费用, 这些费用影响企业投资回报率并可能超过企业的预算^[45, 49]。此外, 工业互联网相关技术的可靠性、稳定性、兼容性和安全性也是影响企业采纳与否的关键因素^[50]。最后, 供应链企业的技术采纳意愿还会受到同行业或供应链其他企业的影响^[51]。因此, 众多学者研究了工业互联网相关技术的投资决策以及投资主体的选择问题。在投资决策方面, Niu 等^[46]指出, 供应链在选择是否自主开发物联网技术并提供承诺交货时间 (planned delivery time, PDT) 的物流服务时, 需要综合考虑市场竞争、市场潜力、PDT 成本和运营成本等因素。只有当市场竞争激烈, 并且 PDT 成本较低时, 供应链企业会选择自主投资物联网技术, 并向消费者提供 PDT 物流服务。在投资主体方面, Ben-Daya 等^[52]认为工业互联网技术中的物联网可以实时监测和提升产品质量, 从而降低零售商的质量损耗率, 延长产品的保质期和销售期。因此, 在易逝产品供应链中通常由零售商投资物联网技术。

工业互联网下, 供应链具备数据共享、协同创新以及智能化、可追溯性等新特征, 从而重塑了供应链企业的策略选择行为。不少学者基于博弈论模型研究了工业互联网下供应链企业的策略选择问题, 包括融资策略^[53]、信息共享策略^[54]、销售模式选择^[55]、订货量决策^[56]以及定价策略^[57]等。在融资策略方面, 王道平等^[53]认为区块链技术在供应链中的应用可以提高对产出不确定性的预测能力, 缓解信息不对称, 降低征信成本, 提高融资效率。在信息共享策略方面, 工业互联网下的供应链信息共享结合了区块链技术, 基于去中心化、透明安全、实时更新等特征, 提高了信息共享的效率和信任。在销售模式的选择方面, 姜亚奇^[55]发现, 供应链引入基于大数据分析、物联网、云计算等技术的平台营销模式后, 制造商更倾向于通过代销模式销售产品, 以提高平台经济下的收益水平。此外, 对于食品、农产品等易逝产品供应链, 结合工业互联网平台相关技术如无线射频识别、物联网, 能够实时监测和分析产品或工业设备的温度、湿度等状态数据的特征, 探讨了工业互联网技术对产品订货量以及

批发价格决策的影响。Hassini 等^[57]提出可以利用物联网技术对食品质量进行实时监控, 以有效减少食品浪费。由于产品损耗的减少, 供应链中零售商可以降低订货量以控制库存成本。汪旭晖等^[56]则认为当物联网投资技术成本较低时, 技术采纳带来的收益会使产品的批发价格降低, 反而会刺激零售商增加订货量。

5.3 工业互联网下供应链的协调机制

在供应链环境下, 工业互联网技术的创新和应用不仅能够提升企业自身的效率和质量, 还能够带动上下游企业以及各环节的协同与优化, 形成正向的网络效应和规模效应。但这也导致了一些企业可以通过享受技术投资企业带来的外部性收益, 而不必自己进行技术创新, 从而造成“搭便车”问题^[56]。为有效解决“搭便车”导致的物联网技术投资效率低下问题, 并在供应链中进行资源的合理分配, 部分文献研究了供应链企业间的利润分配问题以及协调机制。

供应链中通常由上游生产企业投资工业互联网相关技术, 以提高对产品质量的可追溯性, 从而提高下游零售企业的订货量和库存管理效率。在传统批发价格契约下, 上游企业会通过提高批发价格弥补物联网技术投资带来的成本, 这进一步加剧了双重边际效用, 降低了供应链运营效率^[36]。为提高上游企业物联网技术的投资积极性, 零售商可以通过收益共享契约来协调供应链中的利润分配, 将一定比例的销售收益交付给上游企业, 从而提高供应链运作绩效^[58]。针对物联网技术在供应链中的应用普遍存在上游投资、下游获利的问题, 基于物联网技术投资的成本分摊契约, 即由下游企业分担一部分的物联网技术投资成本, 也能够协调供应链企业之间的利润分配。

此外, 在非契约协调方面, 王旭坪等^[59]针对农业数字化技术的高成本和供应链企业间连接的稳定性较差的现象, 将纵向持股策略引入到现代农业供应链中, 并指出纵向持股策略能有效降低物联网数字化技术的投资成本, 提高农产品的品质和供应链的连接的稳定性, 实现供应链企业的利润最大化和帕累托改进。冯佳欣^[60]则认为, 可以通过公平熵确定不同企业在粮食供应链中的资源重要性权重, 进而对投资物联网大数据技术后的增值利润进行合理分配, 以达到供应链协调的目标。秦绪伟等^[61]提

出,工业互联网的主要功能是对工业设备的健康水平进行实时监测,使得设备供应商可以掌握信息优势,从而造成供应链上下游企业之间的信息不对称,并建议供应商利用工业互联网技术及时向用户披露服务努力信息,以消除信息不对称造成的低效,从而达到供应链协调的目的。

综上所述,目前文献重点关注了供应链主体企业与供应商、零售商之间的决策互动及协调机制,但对于供应链重要组成部分的顾客端关注较少。工业互联网可以通过大数据、人工智能、区块链等技术,实现顾客与企业之间更加高效、及时和安全的沟通,因此可以进一步探索供应链主体企业与客户端的互动关系。

6 结论与展望

工业互联网的相关研究主要集中在 4 个方面。

1) 工业互联网平台研究主要分析了平台应用及生态; 2) 工业互联网价值创造研究主要从数字化、网络化和智能化 3 个方面探讨了实现价值创造的机理; 3) 企业运营研究聚焦于工业互联网下企业在研发、生产、库存、物流、运维等各环节的运营决策与优化问题; 4) 供应链管理研究分析了供应链协调创新、可靠性、灵活性以及可持续性 4 个方面的绩效提升,并探讨了供应链中各主体企业的投融资、信息共享、销售决策以及协调问题。

未来研究可以从以下几个方面展开。

研究企业如何依次实现数字化、网络化和智能化不同阶段的跨越和转型,构建以平台企业、制造企业、终端用户等多主体参与的价值共创机理和模式还需深入探究。面向工业互联网平台运营效率与效果的提升需求,研究工业互联网平台生态中参与主体的收益分配与风险分担模型,探索新型产业组织形式下的平台运营管理模式与协调机制的特征,建立工业互联网平台的运营管理与协调机制理论与方法体系。

针对生产制造和运维环节制造资源配置不均、协同生产效率低、质量管理难等瓶颈问题,探究制造资源汇聚、调度、匹配、调控方法以及面向产业集群供需的制造服务能力共享、协同生产、质量保障方法,实现工业互联网环境下资源高效利用与协同生产。针对各环节间的高效协调问题,可以提出

工业互联网环境下“研-制-维”协同流程的构建方法、多级闭环决策体系与智能决策方法^[62],以满足复杂产品全生命周期一体化运作的需要。

进一步探讨工业互联网下的客户参与及产品和服务定制化。结合工业互联网下产品的智能识别与定价,多品种变批量定制化的特征^[63],研究工业互联网技术与数据的应用模式与方法,探索工业互联网环境下的客户参与模式,建立供应链与客户端之间更紧密的互动机制,提高客户体验与忠诚度,降低客户获取与维护的成本。

参考文献:

- [1] 延建林,孔德婧.解析“工业互联网”与“工业 4.0”及其对中国制造业发展的启示[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(7): 141-144.
YAN Jianlin, KONG Dejing. Analysis of 'Industrial Internet' and 'Industry 4.0' and their implications for the development of China's manufacturing industry[J]. *China Engineering Science*, 2015, 17(7): 141-144.
- [2] 李君,邱君降,窦克勤.工业互联网平台参考架构、核心功能与应用价值研究[J]. *制造业自动化*, 2018, 40(6): 103-106, 126.
LI Jun, QIU Junjiang, DOU Keqin. Research on the reference architecture, core function and application value of industrial internet platform[J]. *Manufacturing Automation*, 2018, 40(6): 103-106, 126.
- [3] 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.
LYU Wenjing, CHEN Jin, LIU Jin. Intelligent manufacturing and firm-level platform building in industrial internet: a case study on Haier[J]. *China Soft Science*, 2019(7): 1-13.
- [4] 王京.平台生态系统演化机理研究——以云制造产业为例[J]. *中国软科学*, 2021(11): 29-35.
WANG Jing. Research on the evolution mechanism of platform ecosystems: a case study of cloud manufacturing industry[J]. *China Soft Science*, 2021(11): 29-35.
- [5] FENG N, ZHANG Y, REN B, et al. How industrial internet platforms guide high-quality information sharing for semiconductor manufacturing? An evolutionary game model[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 183: 109449.
- [6] 李奇颖,赵阳,阿孜古丽·吾拉木,等.卷烟制造工业互联网平台建设与应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(12): 3427-3434.
LI Qiyang, ZHAO Yang, AZIGULI Wulamu, et al. Construction and application of industrial internet platform in cigarette manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(12): 3427-3434.
- [7] MENON K, KARKKAINEN H, LASRADO L. Towards a maturity modeling approach for the implementation of industrial internet[C]//Proceeding of the 20th Pacific Asia conference on information systems (PACIS 2016). Chiayi: AIS, 2016[2023-12-20]. <https://aisel.aisnet.org/pacis2016/38/>.

- [8] 李君, 周勇, 邱君降, 等. 制造企业工业互联网平台应用水平与绩效评价体系构建与实践[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(7): 1843-1859.
- LI Jun, ZHOU Yong, QIU Junxiang, et al. Construction and practice of evaluation system for application level and performance of industrial internet platforms in manufacturing enterprises[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(7): 1843-1859.
- [9] ZHAO H, WANG H, JIN S, et al. Evolutionary game and simulation analysis of collaborative innovation mechanisms of industrial internet platform-based ecosystem[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 4884.
- [10] 王庭昱, 王康周, 王冬冬. 共享制造系统中企业数量规模演化分析[J]. 工程管理科技前沿, 2024, 43(2): 10-19.
- WANG Tingyu, WANG Kangzhou, WANG Dongdong. Analysis on the evolution of firm quantity scale in shared manufacturing system[J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2024, 43(2): 10-19.
- [11] 孙新波, 张明超, 王永霞. 工业互联网平台赋能促进数据化商业生态系统构建机理案例研究[J]. 管理评论, 2022, 34(1): 322-337.
- SUN Xinbo, ZHANG Mingchao, WANG Yongxia. Case study on the mechanism of industrial internet platform Enablement to promote the construction of digital business ecosystem[J]. Management Review, 2022, 34(1): 322-337.
- [12] 孙新波, 张明超. 工业互联网平台赋能智能制造生态系统构建——基于海尔卡奥斯的案例研究[J]. 经济管理, 2023, 45(11): 5-26.
- SUN Xinbo, ZHANG Mingchao. Industrial internet platform enables smart manufacturing ecosystem construction: a case study based on Haier COSMOPlat[J]. Business and Management Journal, 2023, 45(11): 5-26.
- [13] JOVANOVIĆ M, SJODIN D, PARIDA V. Co-evolution of platform architecture, platform services, and platform governance: Expanding the platform value of industrial digital platforms[J]. Technovation, 2022, 118: 102218.
- [14] EHRET M, WIRTZ J. Unlocking value from machines: business models and the industrial internet of things[J]. Journal of Marketing Management, 2017, 33(1-2): 111-130.
- [15] 刘诚, 夏杰长. 线上市场、数字平台与资源配置效率: 价格机制与数据机制的作用[J]. 中国工业经济, 2023(7): 84-102.
- LIU Cheng, XIA Jiechang. Online markets, digital platforms, and resource allocation efficiency: the roles of price mechanism and data mechanism[J]. China Industrial Economics, 2023(7): 84-102.
- [16] RYMASZEWSKA A, HELO P, GUNASEKARAN A. IoT powered servitization of manufacturing—an exploratory case study[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 192: 92-105.
- [17] 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): 127-140.
- ZHANG Qiang, ZHAO Shuangyao, CAI Zhengyang. Production self-organization and collaborative management in the intelligent manufacturing value chain of high-end equipment: collaborative research and development practice of design and manufacturing integration[J]. Management World, 2023, 39(3): 127-140.
- [18] 晏鹏宇, 杨柳, 车阿大. 共享制造平台供需匹配与调度研究综述[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(3): 811-832.
- YAN Pengyu, YANG Liu, CHE Ada. Review on supply and demand matching and scheduling in shared manufacturing platforms[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2022, 42(3): 811-832.
- [19] 李浩, 王昊琪, 程颖, 等. 数据驱动的复杂产品智能服务技术与应用[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 757-772.
- LI Hao, WANG Haoqi, CHENG Ying, et al. Data-driven intelligent service technology and application for complex products[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 757-772.
- [20] MOSCH P, MAJOCCHO P, OBERMAIER R. Contrasting value creation strategies of industrial-IoT-platforms—a multiple case study[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 263: 108937.
- [21] DASH A, PANT P, SARMAH S P, et al. The impact of IoT on manufacturing firm performance: the moderating role of firm-level IoT commitment and expertise[J]. International Journal of Production Research, 2023: 1-26.
- [22] 王海军, 张悦. 企业模块化协同创新及网络化资源管理: 基于海尔的探索性研究[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(21): 97-105.
- WANG Haijun, ZHANG Yue. Corporate modularity-based collaborative innovation and networking resources management: analysis on an exploratory case of Haier[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2018, 35(21): 97-105.
- [23] 王康周, 彭波, 江志斌. 新一代信息通信技术在装备制造业服务化中的作用: 基于我国4家企业的案例研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(18): 2259-2267.
- WANG Kangzhou, PENG Bo, JIANG Zhibin. The role of next-generation information and communication technologies in the servitization of equipment manufacturing: a case study of four Chinese enterprises[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2259-2267.
- [24] 张亚斌, 马莉莉. 大数据时代的异质性需求、网络化供给与新型工业化[J]. 经济学家, 2015(8): 44-51.
- ZHANG Yabin, MA Lili. Heterogeneous demand, networked supply, and new industrialization in the era of big data[J]. Economist, 2015(8): 44-51.
- [25] 刘虎沉, 王鹤鸣, 施华. 智能质量管理: 理论模型、关键技术与研究展望[J]. 中国管理科学, 2024, 32(3): 287-298.
- LIU Huchen, WANG Heming, SHI Hua. Intelligent quality management: theoretical models, key technologies, and research prospects[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(3): 287-298.
- [26] 王康周, 彭波, 江志斌. 新信息技术驱动的制造服务化价值创造过程: 基于徐工的探索性案例研究[J]. 管理评论, 2021, 33(11): 275-285.
- WANG Kangzhou, PENG Bo, JIANG Zhibin. Value creation process of manufacturing servitization driven by new information technology: an exploratory case study based on XCMG[J]. Management Review, 2021, 33(11): 275-285.

- [27] 王昶, 邓婵, 何琪, 等. 工业互联网使用如何促进中小企业智能化转型: 驱动因素与赋能机制[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(3): 103-113.
WANG Chang, DENG Chan, HE Qi, et al. How does the use of industrial internet promote the intelligent transformation of small and medium-sized enterprises: driving factors and empowerment mechanism[J]. Science and Technology Progress and Policy, 2024, 41(3): 103-113.
- [28] 李婉红, 李娜. 绿色技术创新、智能化转型与制造企业环境绩效——基于门槛效应的实证研究[J]. 管理评论, 2023, 35(11): 90-101.
LI Wanhong, LI Na. Green technology innovation, intelligent transformation, and environmental performance of manufacturing enterprises—an empirical study based on the threshold effect[J]. Management Review, 2023, 35(11): 90-101.
- [29] 董晓松, 曹雯莉, 吴雪. 制造业智能产品生态系统协同机制与升级路径研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(6): 8-19.
DONG Xiaosong, CAO Wenli, WU Xue. Research on the collaborative mechanism and upgrade path of the intelligent product ecosystem in the manufacturing industry[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2023, 37(6): 8-19.
- [30] 黄彬彬, 张映锋, 黄博, 等. 数字孪生驱动的复杂产品智能运维服务体系与核心技术[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 250-260.
HUANG Binbin, ZHANG Yingfeng, HUANG Bo, et al. Digital twin-driven intelligent operation and maintenance service system and core technology for complex products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 250-260.
- [31] 刘心报, 胡俊迎, 陆少军, 等. 新一代信息技术环境下的全生命周期质量管理[J]. 管理科学学报, 2022, 25(7): 2-11.
LIU Xinbao, HU Junying, LU Shaojun, et al. Total quality management throughout the life cycle in the environment of next-generation information technology[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(7): 2-11.
- [32] 谢润彬, 康国胜, 刘建勋, 等. 工业互联网环境下位置感知的生产要素资源服务组合优化[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-14 (2023-03-27)[2023-12-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230325.1422.002.html>.
XIE Runbin, KANG Guosheng, LIU Jianxun, et al. Optimization of production factor resource service composition with location awareness in the industrial internet environment[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-14 (2023-03-27)[2023-12-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230325.1422.002.html>.
- [33] 张文强, 康国胜, 刘建勋, 等. 工业互联网环境下面向生产要素需求的服务推荐方法[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2023 (2023-02-27)[2023-12-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230227.1340.019.html>.
ZHANG Wenqiang, KANG Guosheng, LIU Jianxun, et al. Service recommendation method for production factor demand in the industrial internet environment[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023 (2023-02-27)[2023-12-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230227.1340.019.html>.
- [34] KALAGNANAM J, PHAN D T, MURALI P, et al. AI-based real-time site-wide optimization for process manufacturing[J]. *Informa Journal on Applied Analytics*, 2022, 52(4): 363-378.
- [35] ZHANG G, SHANG X, ALAWNEH F, et al. Integrated production planning and warehouse storage assignment problem: an IoT assisted case[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 234: 108058.
- [36] LI L, TANG O, ZHOU W, et al. Backroom effect on perishable inventory management with IoT information[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 61(12): 4157-4179.
- [37] WEISSHUHN S, HOBERG K. Designing smart replenishment systems: internet-of-things technology for vendor-managed inventory at end consumers[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 295(3): 949-964.
- [38] 郑依. 基于数据驱动的库存管理——报童问题研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2021.
- [39] CHEN Y T, SUN E W, CHANG M F, et al. Pragmatic real-time logistics management with traffic IoT infrastructure: big data predictive analytics of freight travel time for Logistics 4.0[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 238: 108157.
- [40] WANG J, LIM M K, ZHAN Y, et al. An intelligent logistics service system for enhancing dispatching operations in an IoT environment[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 135: 101886.
- [41] PEI J, YAN P, KUMAR S. No permanent friend or enemy: impacts of the IIoT-based platform in the maintenance service market[J/OL]. *Management Science*, 2023 (2023-03-10)[2023-12-20]. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2023.4733>.
- [42] 石大千, 李雪琴, 李丹丹. 智慧供应链建设如何提升企业绩效?——基于供应链韧性优化视角的分析[J/OL]. *中国管理科学*: 1-13 (2023-11-19)[2023-12-20]. <https://doi.org/j.cnki.issn1003-207x.2023.0482>.
SHI Daqian, LI Xueqin, LI Dandan. How does the Cconstruction of smart supply chain improve firm performance?—an analysis based on the perspective of supply chain resilience optimization[J/OL]. *Chinese Journal of Management Science*: 1-13 (2023-11-19)[2023-12-20]. <https://doi.org/j.cnki.issn1003-207x.2023.0482>.
- [43] 王如玉, 梁琦, 李广乾. 虚拟集聚: 新一代信息技术与实体经济深度融合的空间组织新形态[J]. *管理世界*, 2018, 34(2): 13-21.
WANG Ruyu, LIANG Qi, LI Guangqian. Virtual agglomeration: a new form of spatial organization in the deep integration of next-generation information technology and the real economy[J]. *Management World*, 2018, 34(2): 13-21.
- [44] ZELBST P, YANG L, GREEN K, et al. Linkages between technologies and supply chain performance: benefits, power and risk reduction[J/OL]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2024, 29(1): 207-218.
- [45] 陈鲁燕. 数字化能力与供应链鲁棒性关系研究[D]. 太原: 山西大学, 2023.
- [46] NIU B, ZHANG J, MU Z. IoT-enabled delivery time guarantee in logistics outsourcing and efficiency improvement[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 61(12): 4135-4156.

- [47] 甘敏. 声誉视角下大数据服务商参与的绿色供应链决策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [48] MANAVALAN E, JAYAKRISHNA K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 925-953.
- [49] 颜波, 石平, 丁德龙. 物联网环境下的农产品供应链风险评估与控制[J]. *管理工程学报*, 2014, 28(3): 196-202.
- YAN Bo, SHI Ping, DING Delong. Risk assessment and control of agricultural product supply chain in the internet of things environment[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, 28(3): 196-202.
- [50] 张李浩, 范体军. 供应链企业投资 RFID 技术的成本分摊研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(4): 25-35.
- ZHANG Lihao, FAN Tijun. Cost allocation study of supply chain enterprises' investment in RFID technology[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(4): 25-35.
- [51] 金加和, 郭明, 陈熹, 等. RFID 信息技术采纳对上市公司的长期影响: 基于全球视角的实证研究[J]. *管理工程学报*, 2018, 32(1): 212-219.
- JIN Jiahe, GUO Ming, CHEN Xi, et al. Long-term impact of RFID information technology adoption on listed companies: an empirical study from a global perspective[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2018, 32(1): 212-219.
- [52] BEN-DAYA M, HASSINI E, BAHROUN Z, et al. Optimal pricing in the presence of IoT investment and quality-dependent demand[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 324(1-2): 869-892.
- [53] 王道平, 朱梦影, 周玉. 区块链环境下基于产出不确定的供应链融资策略研究[J]. *管理评论*, 2023, 35(3): 257-266.
- WANG Daoping, ZHU Mengying, ZHOU Yu. Research on supply chain financing strategy based on output uncertainty in the blockchain environment[J]. *Management Review*, 2023, 35(3): 257-266.
- [54] WANG Z, WANG T, HU H, et al. Blockchain-based framework for improving supply chain traceability and information sharing in precast construction[J]. *Automation in Construction*, 2020, 111: 103063.
- [55] 姜亚奇. 基于制造商绿色创新导向的平台供应链决策博弈分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [56] 汪旭晖, 杜航. 基于物联网采纳的生鲜农产品冷链物流决策——成本收益分析视角[J]. *系统工程*, 2016, 34(6): 89-97.
- WANG Xuhui, DU Hang. Cold chain logistics decision-making of fresh agricultural products based on the internet of things adoption: from the perspective of cost-benefit[J]. *Systems Engineering*, 2016, 34(6): 89-97.
- [57] HASSINI E, BEN-DAYA M, BAHROUN Z. Modeling the impact of IoT technology on food supply chain operations[J/OL]. *Annals of Operations Research*, (2023-08-18)[2023-12-20]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-023-05464-6>.
- [58] 颜波, 叶兵, 张永旺. 物联网环境下生鲜农产品三级供应链协调[J]. *系统工程*, 2014, 32(1): 48-52.
- YAN Bo, YE Bing, Zhang Yongwang. Coordination of fresh agricultural products three-level supply chain in the internet of things environment[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(1): 48-52.
- [59] 王旭坪, 樊文平, 阮俊虎, 等. 考虑纵向持股的现代农业供应链运营决策与协调优化研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(10): 165-176.
- WANG Xuping, FAN Wenping, RUAN Junhu, et al. Research on operational decision-making and coordination optimization of modern agricultural supply chain considering vertical shareholding[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(10): 165-176.
- [60] 冯佳欣. 大数据环境下的粮食双渠道供应链利润分配研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [61] 秦绪伟, 朱怡美, 蒋忠中, 等. 设备供应商服务性能合同设计及其信号传递机制[J/OL]. *中国管理科学*: 1-16 (2023-06-09)[2023-12-20]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.12281>.
- QIN Xuwei, ZHU Yimei, JIANG Zhongzhong, et al. Design of equipment supplier service performance contracts and their signal transmission mechanism[J/OL]. *Chinese Journal of Management Science*: 1-16 (2023-06-09)[2023-12-20]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.12281>.
- [62] 国家自然科学基金委员. 关于发布未来工业互联网基础理论与关键技术重大研究计划 2023 年度项目指南的通告[R/OL]. (2023-08-14)[2023-12-20]. <https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab442/info90019.htm>.
- [63] 国家自然科学基金委员. 关于发布未来工业互联网基础理论与关键技术重大研究计划 2021 年度项目指南的通告[R/OL]. (2021-08-04)[2023-12-20]. <https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab442/info81562.htm>

(责任编辑: 刘敏仪)