

分布式柔性智能制造系统联动管控架构与方法研究 进展及展望

李明星^{1,2,3}, 张凯^{1,2,3}, 苏意芬⁴, 屈挺^{1,2,3}, 钟润阳⁵, 黄国全^{6,7}

(1. 暨南大学 广东省大湾区智慧物流国际科技合作基地, 519070, 广东珠海; 2. 暨南大学 智能科学与工程学院, 519070, 广东珠海; 3. 暨南大学 物联网与物流工程研究院, 519070, 广东珠海; 4. 暨南大学 管理学院, 510632, 广东广州; 5. 香港大学 数据与系统工程系, 香港特别行政区; 6. 香港理工大学 工业与系统工程系, 香港特别行政区; 7. 香港理工大学 先进制造研究院, 香港特别行政区)

摘要: 工业互联网环境下, 订单驱动广域多企业制造单元形成的分布式柔性智能制造系统中, 存在“外部随机需求与内部多源扰动并发下异质制造单元间动态协同管控”的共性科学问题。围绕系统的“智能化集成管控、自组织结构优化、自适应运作控制”三大核心难题, 学者们展开了广泛而深入的研究, 本文系统性地总结和梳理了近年来面向工业 4.0 分布式柔性智能制造系统的联动管控架构与方法研究进展。首先, 从信息架构、资源架构、管控架构三个层面梳理了面向制造系统联动的架构体系; 其次, 分析了分布式柔性智能制造系统配置方法研究现状, 包含跨主体多级联动结构优化配置、不确定性扰动下系统重构/重配置、资源能力评估/系统结构评估等; 随后, 从多环节多单元联动运作管控决策、系统运作状态感知与扰动分析评估、多源扰动环境下的自适应联动决策三个方面分别阐述了分布式柔性智能制造系统联动运作决策方法的研究现状; 最后, 探讨了未来进一步拓展与深化工业互联网分布式柔性智能制造系统联动管控的理论、架构与方法的重要方向, 为智能制造系统科学与协同管控提供新的思路。

关键词: 工业 4.0; 工业互联网; 智能制造; 扰动; 制造系统配置; 运作管控

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A **文章编号:** XXXX-XXXX(XXXX)XX-0001-23

Synchronization Architectures and Methods for Distributed Flexible Smart Manufacturing Systems: Research Progress and Prospects

LI Mingxing^{1,2,3}, ZHANG Kai^{1,2,3}, SU Yifen⁴, QU Ting^{1,2,3}, ZHONG Ray Y.⁵, HUANG George Q.^{6,7}

(1. Guangdong International Cooperation Base of Science and Technology for GBA Smart Logistics, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 2. School of Intelligent Systems Science and Engineering, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 3. Institute of Physical Internet, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 4. School of Management, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 5. Department of Data and Systems Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China; 6. Department of Industrial and Systems Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 7. Research Institute for Advanced Manufacturing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: The coordinated management and control are a critical scientific challenge in Distributed Flexible Smart Manufacturing Systems (DFSMS) in the context of industrial internet. These systems, formed by order-driven cross-enterprise intelligent manufacturing units, operating under the concurrency of external stochastic demands and internal multi-source disturbances that hinder dynamic coordination among heterogeneous units. Extensive research has been done by focusing on three core challenges: intelligent system integration, self-organizing structural optimization, and adaptive operational control. This paper systematically reviews and synthesizes recent advancements in synchronization architectures and methodologies for Industry 4.0 DFSMS, including: (1) Synchronization architectures, examined through informational, resource-oriented, and management perspectives; (2) Synchronized manufacturing system configuration methods, encompassing cross-entity multi-level structural optimization, reconfiguration under uncertainties, and resource/structural capability assessment; and (3) Synchronized operations management and control methods, including multi-process, multi-unit coordination, system state perception with disturbance analysis, and adaptive decision-making under multi-source disturbances. Moreover, future research directions are discussed for theoretical, architectural, and methodological extensions to advance synchronization in industrial internet-based DFSMS. This comprehensive review establishes new paradigms and critical insights for intelligent manufacturing system science and collaborative management.

Key words: Industry 4.0; Industrial Internet; smart manufacturing; disturbances; manufacturing system configuration; operations management and control

工业 4.0 背景下, 为了稳定、高效地满足多样化的客户需求, 许多产品结构采取了模块化设计理念, 而相应制造企业则按照专业化分工组织, 此类大型制造系统往往具有“分布式组织、模块化生产、单元化决策、柔性化组合、动态化协同”的一般性特点^[1-2], 称之为“分布式柔性智能制造系统 (Distributed Flexible Smart Manufacturing Systems, DFSMS)”。该系统在工业互联网平台的多企业、开放式资源体系支撑下, 具有多个服务能力各异、运作决策独立、且应对扰动能力有限的分布式异质生产与物流单元。然而, 由于缺乏有效的

分布式异质单元动态协同管控方法,在内外多源扰动并发环境下,各单元在资源约束下更易出现“能力结构相斥、产能匹配失衡、运作关系脱节、决策计划失调和执行控制欠优”的问题,难以快速满足种类、数量、时间、定制化程度等方面均高度随机的客户订单/需求^[3-4]。因此,如何在高度随机的需求和多源扰动频发的环境下进行分布式异质制造单元的动态协同管控,成为此类系统高效运作的关键^[5-6]。其中,系统的“智能化集成管控、自组织结构优化、自适应运作控制”成为核心难题,如图1所示。

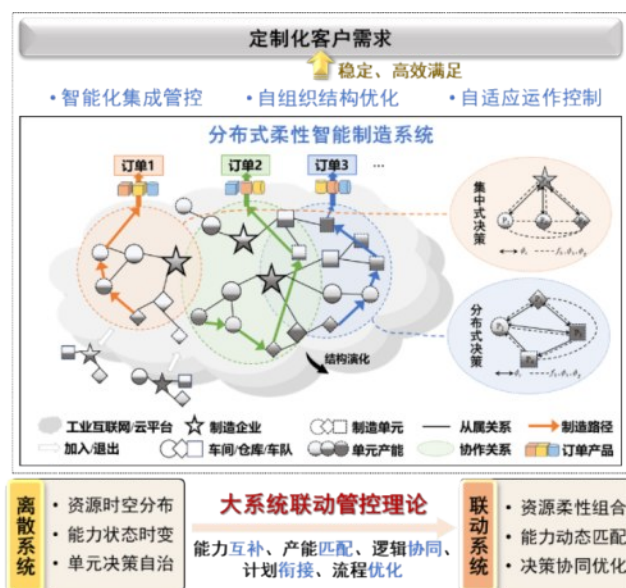


图1 工业互联分布式柔性智能制造系统

Fig. 1 Distributed Flexible Smart Manufacturing Systems (DFSMS) under industrial internet environments

针对上述难题,国内外学者展开了广泛而深入的研究,其中,工业互联智能制造系统架构融合了物联网、数字孪生、云/边缘计算、大数据、人工智能等前沿工业4.0技术,是实现智能化管控的基础^[7-8]。同时,考虑到外部需求高度随机,系统内部多源扰动频发,加之广域多企业制造单元多利益主体存在的复杂时变竞争关系,面向DFSMS的系统配置/运作决策也是学界广泛关注的研究领域^{[2][9]}。通过“智能集成-结构配置-运作控制”三阶段将资源时空分散、单元决策自治的分布式“离散”系统,升级为资源联动配置、单元动态协调的分布式“联动”系统。

本文在中国知网和Web of Science检索相关文献,并对2015年到2025年发表的相关论文进行统计。如图2所示,文献数量呈稳定增长趋势。其中,英文期刊《INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY》发文数量最多为38,中文期刊《计算机集成制造系统》发文数量最多为87。

鉴于相关统计数据,本文系统性地总结和梳理了近年来分布式柔性智能制造系统联动管控架构与方法



图2 2015-2025年发表的相关论文统计

Fig.2 Quantitative analysis of publications from 2015 to 2025

的研究现状。具体：

(1)从面向云物联动的分布式多层级信息架构、面向数实联动的制造资源架构、跨尺度跨层级联动管控机制架构三个层面分别梳理了面向DFSMS系统联动的架构体系；

(2)从跨主体多级联动结构优化配置、不确定性扰动下系统重构/重配置、资源能力评估/系统结构评估三个方面分析了DFSMS系统结构联动配置方法研究现状；

(3)从多环节多单元联动运作决策、系统运作状态感知与扰动分析评估、多源扰动环境下的自适应联动决策三个方面分别阐述了分布式柔性智能制造系统联动运作决策方法的研究现状。

此外,本文探讨了工业互联分布式柔性智能制造系统联动管控的理论、架构与方法未来发展与研究的重要方向,为智能制造系统科学与协同管控提供新的思路。本文所总结的制造系统联动管控理论相关研究响应了我国《“十四五”智能制造发展规划》中指出需重点突破“复杂环境下动态生产管控与全流程智能决策”的需求,同时也是在工业4.0革命性技术突破的驱动下,对生产要素进行创新性配置与协同管控的重要理论方法,有助于推动制造业深度数字化转型,对我国发展高效能、高质量的“新质生产力”具有重要战略意义。

1 联动管控架构体系与方法

本文在对近十年工业互联分布式智能制造系统联动管控领域相关研究成果的分析、总结与梳理的基础上,凝练形成了如图3所示面向制造系统联动管控理论框架,涵盖“信息-资源-管控”三维融合式联动架构,分布式柔性智能制造系统联动配置方法与运作决策方法。

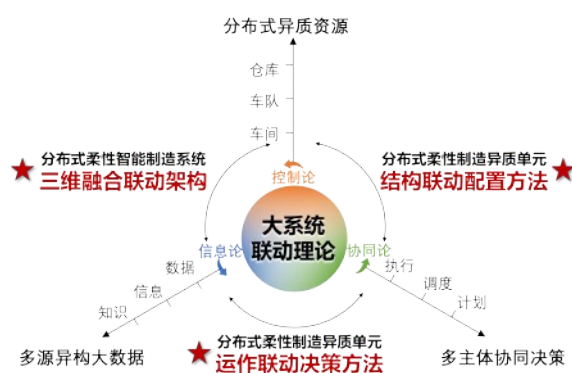


图3 智能制造系统联动管控理论框架

Fig. 3 Theoretical framework for synchronization of smart manufacturing systems

首先,分布式异质制造单元的智能化集成是各单元在随机需求与扰动环境中高效协同的前提,而系统资源时空分布、体系开放的特性,对多层级分布式单元的封装与耦合提出了新的挑战。考虑到各单元能力异质、状态时变和组合柔性的特点,如何建立资源能力/状态/结构的多维高保真映射并确保其可靠可追溯,也是难点之一。而各单元运作决策自治但面向不同业务又存在动态耦合关系,形成了系统在不同运作阶段、不同决策层级运作协同管控机制设计的难点。为此,学者们从信息、资源、管控等不同层面建立了联动架构。

其次,社群化制造资源能力动态波动对分布式柔性系统多级多阶段联动决策的最优性产生持续的非线性影响。因此,在不确定需求下分布式系统须动态纳入和解散广域、异质资源,并结合联动运作需求构建动态协同的系统结构配置方案。国内外学者提出了系统联动配置方法,从理论上解决了分布式柔性系统在联动结构配置方面存在的难题。

最后,分布式柔性制造系统联动运作管控的核心在于多自治单元运作状态和外部运行环境扰动的主动感知及其与动态执行过程的自适应融合,国内外学者通过解决多单元多环节联动决策、系统状态感知与扰动评估、多源扰动下自适应决策三个核心难点,使得系统受扰后通过多自治单元局部寻优与跨域联动抗扰决策,减小系统受扰程度并保证系统处于最优运作状态。

2 “信息-资源-管控”联动架构体系

分布式柔性智能制造系统内部具有多源异构的信息、分布多地的资源、多种形式的管控机制,其智能化集成管理有赖于多种新兴技术的共同支撑。对当前关于系统联动架构的研究进行调研后,总结如表1所示,表内文献按照年份进行排序,观察随着时间发展,技术集成更多元,架构结构更丰富^[10-26]。因此,本文提出了“信息-资源-管控”三维融合式信息架构,融合云平台、物联网、数字孪生、区块链、大数据、多级计算架构、工业互联网多种技术赋能信息与资源联动管理,以及跨尺度跨层级的管控架构支撑联动决策,进而实现信息互通、资源共享、管控协调,详见图4。

2.1 面向云物联动的分布式多层级信息架构

信息互通是整体架构的基础,为此构建了云物联动的分布式多层级信息架构,该架构需要物联网技术和云平台的共同赋能,为后续资源管理和运作管控奠定基础,该小节内容对应表1中支撑技术列。

物联网技术是指通过部署一系列即插即用、自配置和可扩展的泛在工业物联网设备对分布式制造资源全要素的运行数据进行实时采集,是支撑分布式资源集成管理的关键技术,也是协调不同制造系统高效运行的前提。目前有大量学者针对物联网技术的应用开展深入研究,例如,刘轩等^[14]将传统的AUTOM标准物联网信息基础架构扩展为支持多层级、多阶段的生产-物流齐套联动信息架构。QU等^[27]提出了云制造下基于物联网的生产物流联动系统,其借助IoT捕获实时动态的执行情况。

云平台主要提供标准化服务组件和云服务应用,其借助智能网关实时接收通过物联网收集的运行数据,保证物理资源信息和虚拟资源信息的实时映射,然后将虚拟资源作为服务提供给用户,是实现分布式资源集成管理的关键平台。针对云平台也有大量研究,如YANG等^[25]提出了软件定义云制造,重点在云制造环境中实现快速重构,以实现灵活的资源调度和发挥资源潜力并响应各种变化。

云物技术共同赋能分布式多层级信息架构。物联网技术实时收集分布式资源数据并传输至云平台进行存储和共享。云平台将收集的实时数据进行集成、分类并提供给用户查阅。若发现异常数据,可精准反馈至对应的物联网设备,减少技术员排查异常的时间。因此,云物技术能确保信息精准映射,是确保制造系统互联互通的起点。

2.2 面向数实联动的制造资源架构

在云物技术提供精准信息映射的基础上,围绕资源的多尺度建模、运行规律挖掘、多维度追溯、柔性化组合以及服务联动需求,构建了数字资源与实体资源联动的制造资源架构。该架构需要数字孪生技术、大数据技术、区块链技术、多级计算架构和工业互联网等关键技术共同支撑,为后续的资源动态配置与运作管控奠定基础,该小节内容对应表1中的支撑技术列。

数字孪生技术可针对资源进行多尺度建模(如逻辑关系、时空关系、拓扑关系等模型),其具有的“虚-实”实时同步、高保真映射和实时反馈控制等功能促进分布式资源在多维度的可视化和控制,不仅极大的拓宽了分布式资源管理的维度,而且奠定了资源多维度联动管控的基础。该技术是当前的研究热点,例如:周达坚等^[11]针对产-运-存实时联动需求,提出了跨单元的数字孪生联动信息架构,实时物理环境与虚拟模型的动态精准映射和控制。ZHANG等^[28]将数字孪生的基本框架扩展到基于数字孪生的优态控制框架。

大数据技术能够从多源异构数据中挖掘孪生资源全生命服务周期运行与受控规律,充分发挥资源潜力,帮助深入挖掘促进系统联动的新要素。大量学术针对该技术进行深入研究,例如,聂庆玮等^[13]提出了基于数据驱动的网络化制造系统总体架构,构建了以工业云大数据中心为核心的网络化制造系统云边运行体系。YANG等^[29]提出了基于优态控制策略的大数据赋能智能联动,利用大数据挖掘不确定性因素影响度与系统状态之间的关系。

区块链技术解决了孪生资源共享和管理的难题,通过分布式账本存储孪生体及其交互记录,确保数据的多维可追溯性;分布式存储机制及链式验证机制,强化数据安全,确保孪生资源信息可信,是保证系统安全联动的关键技术。例如,LI等^[30]基于区块链技术开发了具有高安全性、可扩展性和结构良好的云系统的分布式点对点网络。ZHANG等^[22]设计了一个基于区块链和数字孪生的生产物流可信联动服务框架,重点将区块链在资源管理中的效率与数字孪生技术在生产控制中的精确性相结合。

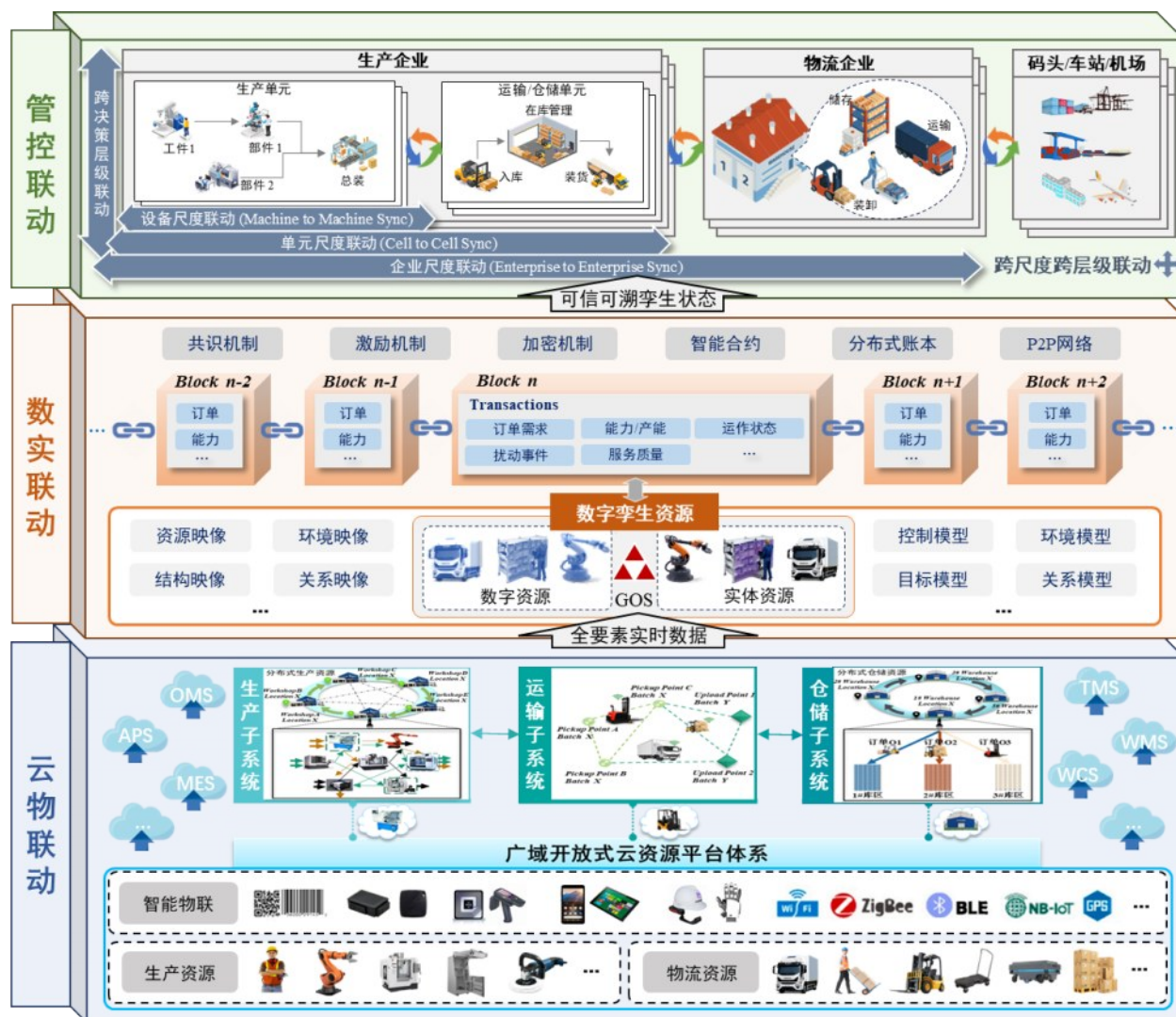


图4 “信息-资源-管控”联动架构体系

Fig. 4 “Information-Resource-Management” integrated Architecture for Synchronization

多级计算架构可减少孪生资源柔性化组合的计算压力同时实现可观优化效果,当前研究较多的计算类型主要有三种:边缘计算、雾计算和云计算。三种计算需要相互协调,相互配合,是提高系统联动决策效率的重要手段,为跨尺度跨层级管控的提供计算支撑。例如,常丰田等^[31]提出了边-云协调下智能制造单元的物联网网络配置方法。王时龙等^[15]将雾计算与边缘计算等新使能技术引入工业互联网中,提出了一种工业互联网新模式—雾制造。PAN等^{[17][32]}提出边缘计算、雾计算和云计算及其动态形成的多级分布式决策系统,从而使用最经济的计算资源进行联动决策与控制。

工业互联网平台比较重视软件服务,能够将各种孪生资源紧密连接起来,有助于形成跨设备、跨系统、跨工厂的资源服务联动,为跨尺度跨层级管控提供平台支撑。例如,江平宇等^[16]提出了面向工业互联网的社群化制造模式,深入分析了信息-物理-社交互联驱动的社群化制造模式体系架构和运行逻辑。HUANG^[23]提出了工业互联网平台驱动的供应链联动重构方法,解决以频繁的突发事件为特征的颠覆性环境对供应链运营的挑战。

不同技术具有不同的功能,它们共同赋能制造资源架构。数字孪生技术对资源进行多尺度建模后,借助区块链技术将模型进行封装并发布至工业互联网平台,平台对孪生资源模型进行统一管理。为增强系统联动,大数据技术通过挖掘平台上孪生资源的运行规律,挖掘联动的新要素;多级计算架构可利用最经济的计算资源对平台上孪生资源进行柔性化组合。因此,多种技术融合对制造资源实现可视化、安全、共享、柔

性组合等多方面的管理。

2.3 跨尺度跨层级联动管控机制架构

分布式柔性智能制造系统的管控既要保证分布式异质单元在不同运作阶段的自主交互和协同运作(横向管控),还要保证各异质单元在不同决策层级的联动响应(纵向管控)。为此,在云物技术提供信息精准映射,数实技术提供资源多方面管理的基础上,构建了跨尺度跨层级联动管控机制架构,该小节内容对应表1中的管控架构列。

在“设备-单元-企业”多结构层级的实时数据驱动下,针对“生产-运输-存储”多个运作阶段,构建“多层次实时数据融合-动态干扰触发-联动决策执行”的多阶段联动管控机制,并且利用基于共享参数与耦合参数、关联目标和约束方程构建多级迭代式联动决策模型,实现不同运作阶段动态协同。例如,周达坚等^[11]提出对多个具有独立决策且联动运作的“产-运-存”决策单元以全局优化、分布式控制的模型进行系统性协调。

在多结构层级、多周期数据的实时驱动下,构建面向“配置规划-计划执行”的多层次多周期最优控制机制,通过建立基于管控层级目标分解与响应耦合的跨时域跨协同模型,实现不同决策层级动态协同。例如,屈挺等^[33]提出生产系统“三态分级引导、多段联动控制”的优态运行控制框架。ZHANG 等^[28]提出了优态控制方法以帮助生产系统在不确定因素影响下保持最佳状态。

横向管控确保分布式异质单元不同阶段的联动,纵向管控确保异质单元不同决策层级的联动,两者结合构成了立体式的联动管控。

总体上来看,架构内的三个层级功能各异且互联互通。信息架构向资源架构提供全要数实时数据,资源架构向管控架构提供可信可溯孪生资源状态,管控架构进行立体式管控后,将决策结果反馈到信息和资源架构内。其解决了以往研究架构只关注某种技术或某个管控层级的问题,实现了从单方面管控到多方面管控的跨越。

表1 DFSMS联动架构体系相关研究

Table 1 Researches on synchronization architectures for DFSMS

文献	年份	架构命名	支撑技术	架构层级	管控架构
[10]	2014	基于AUTOM的RFID实时信息架构	物联网	3层:物流对象、智能网关、企业信息系统	企业尺度联动 无跨层级联动 单元尺度联动
[14]	2017	生产物流齐套联动信息架构	物联网	5层:智能设备层、智能网关层、协议层、服务层、应用层	企业尺度联动 有跨层级联动
[11]	2019	孪生数据驱动的“产-运-存”联动决策信息架构图	数字孪生	3层:物理对象层、虚拟模型层、联动服务应用层	企业尺度联动 有跨层级联动 设备尺度、企业尺度联动
[15]	2020	雾制造架构	数字孪生/雾-边计算	5层:物理设备层、数字孪生模型层、边缘节点层、雾节点层、企业云决策层	有跨层级联动

续表					
文献	年份	架构命名	支撑技术	架构层级	管控架构
[19]	2020	物联网边缘计算赋能的协同追踪架构	物联网/边缘计算	3 层：智能制造资源层、边缘计算层、云计算层	企业尺度联动 无跨层级联动
[20]	2020	数字孪生控制架构	数字孪生	3 层：物理实体感知层、虚拟仿真层、联动控制层	企业尺度联动 有跨层级联动
[12]	2021	基于数字孪生的多单元联动决策架构	数字孪生	4 层：物理对象层、虚拟对象层、联动服务层、联动应用层	单元尺度联动 有跨层级联动
[16]	2021	社群化制造模式体系架构	物联网/CPS 等	6 层：社群化资源层、节点配置层、社区层、社群层、社群化制造系统层、应用层	企业尺度联动 有跨层级联动
[17]	2021	基于云-雾-边协同的数字孪生控制架构	云-雾-边协同计算	2 层：物理层与虚拟层	单元尺度联动 有跨层级联动
[18]	2023	基于数字孪生的物流配送调度优化决策架构	数字孪生	2 层：物理实体层、虚拟孪生层	设备尺度联动 有跨层级联动
[13]	2023	工业云大数据驱动的网络化制造系统运行架构	物联网/大数据	4 层：分布式工厂/资源层、网关集群、工业云大数据中心、分布式云产线	企业尺度联动 无跨层级联动
[25]	2023	软件定义的云制造（SDCM）架构	物联网/边缘计算/云平台等	6 层：物理实体层、智能网关层、软件定义虚拟环境层、软件定义网络层、柔性制造服务层、制造应用层	设备尺度联动 无跨层级联动
[21]	2024	数字孪生驱动的多级联动控制系统框架	数字孪生	4 层：物理实体层、数字映射层、多粒度控制层、服务使能层	单元尺度联动 有跨层级联动
[22]	2024	基于区块链与数字孪生的生产物流可信联动服务基础架构	区块链/数字孪生	4 层：广域物理资源层、区块链资源管理层、数字孪生镜像层、可信智能联动应用层	企业尺度联动 有跨层级联动
[24]	2024	预制装配式建筑数字孪生架构	数字孪生	5 层：物理实体层、数字化建模层、数据共享层、虚实交互层、智能服务层	企业尺度联动 无跨层级联动

续表

文献	年份	架构命名	支撑技术	架构层级	管控架构
[26]	2024	工业互联网赋能的智能服务管理系统 (SSMS)	物联网/工业互联网/云-边协同/数字孪生/大数据等	6层:柔性制造资源层、全要素感知互联能力层、边云协同工业互联网平台层、数据分析与智能服务能力层、数字孪生系统集成管理层、社群化制造服务网络协同层	企业尺度联动 无跨层级联动
[23]	2025	基于工业互联网的工业装配供应链 (ASCI) 信息控制架构	工业互联网	5层:物理资源层、基础设施服务层 (IaaS) 层、平台服务 (PaaS) 和控制机制层、软件服务 (SaaS) 层	企业尺度联动 有跨层级联动

3 分布式柔性智能制造系统联动配置方法

实现跨主体、多层级的资源整合与高效协同,以应对复杂产品制造与动态市场变化,已成为提升分布式柔性智能制造系统整体运行效能的核心议题。如何构建一个能够分布式资源协同、管理复杂依存关系、优化系统整体性能的联动配置优化体系,是当前先进制造领域亟待突破的关键科学问题。现有研究已从结构配置优化、扰动下配置重构及系统性能评估等角度进行了探索,本节聚焦于三大方向:(1)跨主体多级联动结构优化配置方法;(2)不确定性扰动下系统重构/重配置方法;以及(3)资源能力评估/系统结构评估方法。相关文献总结如表2所示。

3.1 跨主体多级联动结构优化配置方法

“跨主体多级联动结构优化配置”指的是在复杂的制造环境中,不同类型的主体(如自动化设备、机器人、传感器、软件系统、乃至人力资源和外部协作方)在不同层级(从底层的感知控制、到边缘计算、再到平台服务、企业应用乃至产业链协同)之间,如何通过有效的信息交互、物理协作、服务组合和决策协同,形成一个高效、稳定、可优化的整体联动结构。本节将主要依据所研究的联动主导架构范式(如基于平台、基于智能体、基于数字孪生)对相关文献进行分类梳理,同时关注不同架构下联动实现的规模层级(如单元内、工厂间、生态系统级)和核心机制(如数据共享、服务组合、协同决策)。表2对多级系统和平台采用不同技术与方法实现结构优化配置的相关文献进行了归纳。

工业互联网平台(IIP)和云平台为实现广泛的资源连接、数据汇聚、服务协同和应用创新提供了核心基础设施,成为驱动跨主体多级联动的重要范式。BAO等探讨了基于工业互联网的智能制造系统向社群化智能制造系统扩展,其设计策略强调“基于平台的社群化制造服务和网络化协作”,旨在通过平台促进更广泛范围设备、单元、企业及协作方的联动^[26]。ZHANG等构建了面向综合产业生态系统的网络化协同制造平台模型,该模型基于制造链、价值链和产业链的“三链”融合思想,为实现产业生态系统内多视角、多流程、多运营商之间的多维度联动提供了理论框架^[51]。企业级工业互联网平台在实践中也展现出强大的联动配置能力,吕文晶等以海尔COSMOPlat为例,分析了其作为企业级工业互联网平台的多层次联动结构,连接用户与多行业企业,通过工业模型和组件实现平台资源聚集与跨企业协同集约,支持大规模定制的全流程联动配置^[56]。谢润彬等研究了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问题,将生产任务分解并从平台上选择不同主体的生产要素资源服务进行联动组合优化,以实现全局时间和成本最优^[58]。

多智能体系统(MAS)通过将系统中的各个单元或资源抽象为具有自主决策和协作能力的智能体,利用智能体之间的交互、协商和协作机制来优化系统的“联动”结构和行为。KIM等介绍的模块化工厂试验台采用协调员代理、工作站代理和工作站执行器的三层代理架构,通过代理间的异步信息共享和分布式决策,实现了模块化工作站、装配流程、控制程序和车间网络的联动配置与管理^[36]。TANG等提出了云辅助边缘决策制造架构CASOMA-IPE,将系统建模为多智能体系统,通过云智能体与流程智能体间基于合同网协议的联动协商,实现生产任务在不同流程智能体间的动态分配^[38]。RODRIGUES等介绍了一种基于智能体的分散式实时服务重构方法,资源智能体与产品智能体通过包含WtR、HtR和DRS三阶段的服务重构模块,利用

语义匹配和多标准函数评估,并通过协作交互协议确保系统级服务结构的分布式联动优化^[39]。

数字孪生技术^{[61][64]}通过构建物理实体和过程的虚拟模型,并实现虚实之间的实时交互、数据融合、仿真分析和闭环优化,为复杂制造系统的“联动”结构优化配置提供了新的视角和强大工具。BIN 等提出了一种用于智能制造加工生产线的数字孪生模型,其“重构优化模块”采用遗传算法和启发式搜索策略,对生产线的操作参数和流程进行联动优化配置^[40]。ZHU 等研究了基于数字孪生的人机协作智能制造系统的动态重构优化,通过 NSGA-II 算法优化人与机器人间的任务联动,实现生产成本、时间和空闲时间的最优^[42]。TANG 等提出了数字孪生驱动的多资源约束下资源分配选址系统,通过共享平台整合供需信息,利用数字孪生对多资源调度方案进行模拟优化,体现了跨主体信息联动和资源优化配置^[53]。。

现有研究通过跨主体多级联动结构优化配置方法实现大规模、跨主体的资源整合与协同优化,将物理分散、功能异构的制造要素有效组织起来,提升系统整体的配置效率与运行性能。然而,随着联动范围的扩大与层级的增加,系统的互操作性、协同决策效率以及整体稳定性和安全性都面临更高要求,且构建成本与维护难度也相应增大。未来发展将趋向于构建更为开放、灵活与智能化的联动配置体系。研究重点将聚焦于探索普适性的交互协议与标准,发展高效的分布式协同决策算法,并深度融合新一代人工智能技术,以实现联动结构的自适应演化与自主优化,最终迈向按需组织、即插即用的社群化制造生态。

表 2 DFSMS 联动配置方法相关研究

Table 2 Researches on synchronized system configuration method for DFSMS

文献编号	配置对象	主题	采用的方法	支撑的技术
[34]	制造系统	配置	架构设计(即插即用、数字线程、微服务)	雾计算,数字线程,微服务
[35]	柔性智能制造系统	配置	模糊聚类,改进的 Jaccard 相似系数,粒子群优化(PSO)	数学建模,模糊集理论,相似性分析
[37]	可重构柔性作业车间(RFJS)	配置	优化器(SMAO),三层编码	可重构制造系统(RMS)原理,元启发式算法
[41]	航空航天生产系统	配置	遗传算法,离散事件仿真,描述性统计,统计过程控制	数字制造工具,云计算,物联网(IoT)
[43]	柔性制造系统(FMS)	配置	基于逻辑的 Benders 分解(LBBD)	MILP 求解器(FICO Xpress)
[30]	社群化智能制造系统(SSMS)	配置	设计科学研究(DSR)范式,协作探究,系统架构设计	网络通信技术、边缘/云计算、大数据、AI、数字孪生、
[44]	智能柔性装配系统	配置	基于可配置虚拟工作站技术的框架	可配置虚拟工作站技术,IT 基础设施
[51]	网络化协同制造平台(NCMP)	配置	基于三链(制造链,价值链,产业链)的 NCMP 模型,系统构建与要素分析	工业平台,工业 AI
[53]	智能制造任务的动态资源	配置	瓶颈流程发现,多目标鲁棒优化,智能优化算法, TOPSIS 决策方法	数字孪生,传感器,大数据分析,机器学习,共享平台
[54]	智能制造协同系统(SMCS)	配置	系统工程分析	信息系统,数字工厂
[15]	雾制造(FMfg)	配置	自相似分形数字孪生(DT)建模,人机物虚实融合管控,边缘/雾/云智能决策	DT,雾/边缘计算,工业互联网, 5G,智能传感器
[55]	异地分布式工厂的产业链网络	配置	产业链网络化协同模型,SWOT 分析	信息通信技术(ICT),信息系统 (PLM、ERP、MES)
[56]	企业级工业互联网平台(海尔 COSMOPlat)	配置	探索性案例研究,技术平台理论分析	云计算,大数据,物联网(IoT), AI
[57]	分布式工厂中的微型制造单元	配置	分布式工厂构建与生产调度集成模型,多目标粒子群优化(MOPSO)算法	无

续表

文献编号	配置对象	主题	采用的方法	支撑的技术
[58]	工业互联网环境下生产要素资源	配置	多目标优化模型, TLBO-TS 混合算法	智能设备, 云计算, 大数据, AI
[59]	智能工厂多目标分布式柔性作业车间	配置	多目标分布式柔性作业车间协同调度模型, 高维多目标模因(HMOMA)算法	无
[22]	开放生产物流可信同步服务平台 (BCDT-PLTSS)	配置	BCDT-PLTSS 框架, DT 精确建模, 基于分析目标级联(ATC)的同步服务	区块链, 数字孪生 (DT), 物联网 (IoT), 产品服务系统模式 (PSS)
[60]	车间物流和制造系统	配置	混合整数规划(MIP)模型, 约束规划(CP)模型, 毕业智能制造系统(GiMS)票证	数字孪生
[12]	多单元联动运作系统	配置	基于数字孪生(DT)的多单元联动决策架构/机制/模型, 多级目标级联(ATC)	数字孪生, 物联网
[33]	“生产-物流”仓储联动运作系统	配置	“三态分级引导、多段联动控制”框架, 多级目标级联(ATC)	物联网 (IoT)
[61]	流线型智能制造系统	配置	四元 CMC0(配置设计-运动规划-控制开发-优化解耦)设计架构, 启发式算法	数字孪生技术
[64]	异构社群化制造资源 (SMRs) 管理与协作平台	配置	混合领域驱动设计 (HDDD) 方法, 基于时间着色 Petri 网 (TCPN) 的工作流	区块链, 数字孪生, P2P 网络, 智能合约
[67]	制造环境中的制造资源	配置	优化配置架构, 多级服务封装与聚合, 灰色关联分析(GRA), Louvain 算法, 模糊综合评价(FCE)	物联网 (IoT)
[70]	智能云制造环境下的生产物流	配置	改进的基于教学的优化算法 (iTLBO), 数字孪生 (DT) 决策框架	数字孪生, 云计算/云制造, 物联网, 大数据
[50]	智能制造系统	重配置	深度强化学习, 深度 Q 网络	数字孪生, AI
[52]	固定工位装配系统	重配置	智能协同机制, Petri 网工作流分析, 灰色关联分析, 匹配策略	数据驱动技术, 制造执行系统 (MES), 高级计划与排程 (APS)
[23]	装配供应链 (ASCI)	重配置	同步重构供应链 (SyncRSC) 解决方案	物联网, 数字孪生, 图神经网络, 多级目标级联(ATC)
[65]	动态分布式可重构流水车间 (DRFSP)	重配置	基于元启发式的动态重调度, IGglo 算法	无
[66]	社群化自组织协同设计师社群 (DC)	评估	DC 增长过程模型, DC 交互/能力模型, DC 韧性/关键成员评估指标	共享经济, 复杂网络理论
[68]	社群化制造环境中制造系统的制造服务能力	评估	加工服务能力 (M-capability) 模型, 生产服务能力 (P-capability) 评估模型	粗糙集 (RS) 理论, 粒子群优化算法
[69]	社群化制造中的动态服务匹配策略	评估	计算实验评估框架, 四种服务匹配策略设计, BP 神经网络	云计算, IoT, 多智能体

3.2 不确定性扰动下系统重构/重配置方法

制造系统在实际运行过程中,不可避免地会遭到来自内部(如设备老化、突发故障、人员变动等)和外部(如市场需求急剧变化、客户订单紧急变更、原材料供应中断、自然灾害或疫情等突发事件)的各类不确定性扰动。这些扰动往往会打破系统原有结构稳态,甚至导致生产中断,造成重大经济损失。系统重构/重配置(Reconstruction/Reconfiguration)是应对此类扰动的关键手段,它指的是制造系统根据感知到的内外部环境变化,主动或被动地调整其物理结构(如设备布局、产线组成)、逻辑功能(如控制算法、工艺流程)、资源分配(如任务指派、物料调度)或操作参数,以维持或尽快恢复期望的性能水平,甚至抓住变化带来的机遇实现性能跃升的过程。表2涵盖了在不确定性扰动下系统重构与重配置的相关研究。

需求变化是驱动制造系统进行重构/重配置的主要外部因素之一^{[34]-[38]}。当前有大量文献对人机协作系统、特定装配系统、供应链和物流层面等重构进行深入研究。

首先,需求变化驱动人机协作系统和特定装配系统的重构。ZHU 等研究的基于数字孪生的人机协作智能制造系统,在生产任务变化时通过 NSGA-II 动态地重新联动分配人机任务^[42]。GUO 在文献^[49]和文献^[60]均关注毕业典礼智能制造系统(GiMS)框架下联动导向的定点装配车间重构,通过数学模型优化装配岛数量及任务队列,实现客户需求变化、装配岛配置和生产活动分配之间的联动同步交互,以应对需求波动。新兴智能技术在需求驱动的联动重构中发挥着重要作用。HUANG 提出一种基于 DRL 的数字孪生驱动下 RMT 动态重构规划方法,通过 DQN 在线寻求最优的 RMT 联动重构策略以响应需求和生产变化^[50]。TANG 等建立的鲁棒优化模型旨在应对市场需求变化等不确定因素,通过优化资源联动分配策略以最小化最坏情况下的性能损失^[53]。

其次,需求变化驱动供应链和物流层面的联动重构^{[65][69][70]}。HUANG 和 QU 等针对装配供应链在突发事件下的分散式动态重构问题,提出了 SyncRSC 解决方案,通过三态引导的多级机制和基于 GAT 与 ALC 的优化,实现多级别中断下的联动重构^[23]。蒋红飞^[12]和 QU^[33]提出的基于数字孪生/物联网的高动态生产系统联动决策机制,在面临外部订单变动等动态干扰时,会根据影响程度触发不同层级的联动重构/重配置方式。MORGAN 等综述了可重构制造系统如何通过“编排器”在需求变化等扰动下,通过重新路由产品流等方式自主实现对抗扰动的联动自适应^[62]。LU 描述的网络化自组织制造系统,其自配置能力使其能够快速适应小批量生产和频繁切换的生产需求,通过联动重构响应变化^[63]。

设备故障、资源意外不可用、内部流程中断等突发事件是驱动制造系统进行重构/重配置的重要内部因素^{[36][38][39]}。当前有大量文献针对生产系统、供应网络等联动重构进行深入研究。

首先,故障驱动的生产系统联动重构,重构对象多样包含机器人、生产线、生产任务和人员等。GKOURNELOS 等提出的基于模型的柔性生产系统重构框架,通过数字孪生的在线信息,使移动机器人平台能够在线规划路径以避开动态障碍物,实现对动态环境的联动适应^[46]。ALSAFI 等提出的基于本体的重构代理,能够处理组件可用性变化(如传送带故障)产生的多种生产场景,并根据可用资源联动生成备用配置^[47]。PEREZ 提出的自重构算法,能根据生产时间识别故障,并通过联动修改专用模块的工作速度或重构生产顺序以应对故障^[48]。QIAN 提出的智能协同机制,在出现组件交付延迟、操作员缺勤等异常情况时,通过 Petri 网分析、灰色关联分析和匹配策略将选定任务与操作员进行联动重匹配^[52]。

其次,故障驱动供应网络的联动重构,重构对象不再局限与单个企业内部,而是扩展到其供应网络的企业。MORGAN 等综述了工业 4.0 智能可重构机器如何通过 PHM 系统自主执行维护或修复(自愈),或在机器故障时通过“编排器”节点重新路由产品流等方式实现对抗扰动的联动自适应^[62]。YANG 等讨论的设计师社群在面临设计师退出等负面事件时,能够通过吸纳新节点和激活新链接进行联动重组,维持其功能^[66]。ZHANG 和 QU 的动态配置策略中,当生产物流设备故障等意外事件发生时,若扰动较大,系统将动态配置外部智能云资源,实现生产物流资源的联动重构^[70]。

系统重构与重配置通过主动调整物理结构、逻辑功能或资源分配,维持生产连续性、增强了对大规模个性化定制等市场需求的响应速度、保障了系统运行韧性。当前研究已深度融合数字孪生、多智能体及深度强化学习等技术,为高效重构提供了有力工具。但该方法也面临现实挑战,物理层面的重构往往伴随高昂的时间与经济成本,决策系统必须在极短时间内处理复杂信息以生成最优方案,且整个过程高度依赖于系统自身的模块化与数字化基础。未来的研究方向将更侧重于发展系统的“预测性”与“自主性”,从被动响应转向主动预判并提前调整,借助人工智能算法使系统实现更高水平的“自愈”与“自适应”。

3.3 资源能力评估/系统结构评估方法

资源能力评估与系统结构评估是智能制造系统设计、优化、运行和维护过程中的基础性环节,对于确保系统高效、稳定、可靠地运行具有至关重要的意义。此处的资源能力评估指的是对制造系统中所涉及各类资源,如物理设备(机床、机器人、AGV 等)、信息系统(MES、ERP、PLM 等)、软件工具、算法模型、人力资源乃至外部协作方(如供应商、服务商)等,在执行特定任务或处于特定环境条件时所表现出的功能、性能、质量、效率、成本、可靠性、可用性、健康状态以及发展潜力等进行全面、客观的量化或定性评价的过程。系统结构评估则是指对由这些资源通过特定的联动方式组织起来的制造系统的整体架构、布局方式、流程设计、

连接关系、信息交互模式、协同决策机制等的合理性、有效性、效率、柔性、鲁棒性、可扩展性、可维护性以及综合性能表现进行评价。表2总结了针对资源能力评估和系统结构评估方法的研究。

本节将主要依据评估的核心对象(例如,是侧重于评估单个资源的核心能力,还是评估特定联动机制的性能,或是评估整个系统结构的综合表现)和采用的主要评估技术或方法(例如,是基于数学模型和仿真推演,还是基于实时数据驱动和人工智能分析,或是基于多标准决策理论和语义本体技术),并结合评估过程如何支撑或评价联动的效能,对相关文献进行梳理和评述。

对制造系统中各类核心资源个体能力的准确评估,是后续进行资源选择、任务分配、服务组合以及构建高效“联动”结构的基础。大致可以分为对内部资源和外部资源评估。

首先,针对内部资源能力的评估,其关注的内容包含单元状态^[34]、设备能力^{[35][37]}等。较多文献使用基于智能技术和本体模型的资源能力评估方法。TANG等提出的CASOMA-IPE架构中,IPE使用加工设备本体模型和预定义规则推断设备当前状态和健康状况,流程智能体则评估自身空闲时间余量和任务适用性,用于联动任务分配^[38]。RODRIGUES等的基于智能体的服务重构方法中,WtR阶段通过监控服务QoS等指标评估当前服务能力,HtR阶段则使用语义匹配评估新服务配置与资源上下文的技术可行性^[39]。针对特定类型资源或特定能力维度的评估方法也各有侧重^{[42][43]}。例如,LMAZ等在FMC重构的数学规划模型中,通过调查机器利用率和循环时间等系统性能度量评估FMC当前性能是否达标,以决定何时重构^[45]。PEREZ等在描述其分布式制造单元时,列出了单元组件的额定/最大/最小工作速度作为其基本操作能力参数^[48]。

其次,在社群化制造和云制造等新兴模式下,对外部协作资源能力的评估尤为重要。不仅需要量化评估指标^{[53][67]},还需要关注不同方面的能力包含服务能力^{[58][68]}、可信度、社群韧性等。SANG等给出的智能工厂多目标分布式柔性作业车间协同调度模型中,通过考虑工序加工时间、设备功率、废品率等参数,间接反映了对设备加工能力的评估^[59]。ZHANG和QU提出的BCDT-PLTSS平台框架中,“BCR节点可信度评估”模块综合考虑历史表现、履约记录等多维度因素,采用规范化或层次分析等方法评估社群化制造资源节点的可信度^[22]。YANG等在研究社群化自组织协同设计师社群韧性时,建立了DC设计能力模型,并通过一系列物理特性指标(如能力多样性、冗余度、鲁棒性等)定量评估社群的整体设计能力和韧性^[66]。ZHANG和QU在其数字孪生驱动的生产物流资源优化配置方法中,“生产物流资源综合评估服务”用于评估云物流系统中分布式生产物流资源的QoS(如利用率、性能、容量、响应速度、故障率等),为资源优化提供数据支持^[70]。

对资源能力和系统结构的精确评估,是实现智能联动配置与优化的基石。现有研究已将评估维度从传统的成本、时间拓展至柔性、鲁棒性、可信度等更复杂的非功能属性,并综合运用了数学建模、人工智能与语义本体等多样化技术手段,从而支撑更加精准和客观的分析与决策。然而,现有评估方法仍存在局限:许多模型依赖静态数据,难以实现对资源状态的动态评估;“协同效率”这类定性指标的精确量化仍是难题;研究也多聚焦于特定对象,缺乏综合性的、一体化的评估框架。未来的发展将趋向于数据驱动的、综合且具备预测能力的评估体系。通过实时数据和新一代AI技术,评估方法将能实现对资源和系统状态的在线动态预测,并构建可统一评价异构资源与复杂联动结构的综合模型,最终使评估能力成为一种内嵌的智能服务,持续驱动系统的自适应与自优化。

4 分布式柔性智能制造系统联动运作决策方法

在分布式柔性智能制造系统运行过程中,面向多环节多单元联动决策及多源扰动下的快速响应与控制,已成为系统稳定高效运行的核心挑战。针对此,研究状态感知、扰动分析与调度重构等角度提出了多种解决路径:(1)聚焦于运行状态相对稳定或扰动可控的情形,强调异构制造资源之间的静态协同机制与多环节任务的有序联动执行。(2)围绕系统运行过程中的状态感知与扰动建模问题,探索多源数据驱动下的异常识别与扰动等级评估方法,为动态调度提供支持。(3)面向扰动已显著影响系统状态的复杂环境,研究任务重调度与资源响应机制,形成具备自适应能力的联动优化策略。

相关文献总结如表3所示,按照本章出现顺序排序,便于横向纵向理解。此外,针对扰动表现形式与对

系统运行的影响,本文将常见扰动归为三类:(1)突发型扰动,指对生产过程具有显著即时冲击的事件,如设备故障、紧急插单、关键人员缺勤等,此类扰动常造成局部任务中断与资源调度重构;(2)累积型扰动,指系统在运行过程中由于处理时间波动、生产节拍变化等因素逐步积累偏移,其影响具有延迟性和隐蔽性,会影响整体调度鲁棒性与协同效率;(3)混合型扰动,则体现为突发事件与渐进式波动共同作用,例如同时考虑设备故障、紧急插单与时间波动的复杂扰动情境。通过该分类有利于初步判断各类方法在不同扰动场景下的适用性。

4.1 多环节多单元联动运作决策方法

在静态或扰动可控的环境下,分布式制造系统的研究主要聚焦于通过构建稳定高效的多单元静态协同机制,实现多环节任务的有序联动与资源互联。如表3所示,文献^[71-74]围绕可信调度机制、边-云-端协同架构及分布式资源共享平台的构建,提出多种提升系统协同执行能力与响应效率的路径。

王凌等面向多工人-机器人协同的能效调度问题,提出集成工件排序、资源类型选择与数量配置的多目标优化模型,设计双阶段协同反馈优化算法(TPCFO),通过多策略初始化、多层全局搜索与多操作局部搜索机制协同优化最大完工时间与能耗指标,验证了算法在高维调度空间中的收敛性与搜索性能,适用于复杂人机协同场景下的静态高效调度求解^[71]。Yang等针对个性化批量定制背景下的分布式制造系统,提出云-边-端一体化的深度学习协同部署架构,分别构建中央更新、本地增量学习与中间特征转发等三类机制,并设计垂直、水平与分段分布式推理框架,实现异构算力与任务需求下的多层联动响应,增强智能体在动态环境中的适配性与决策效率^[72]。Liu等提出服务型制造场景下的基于区块链的数字孪生平台架构(imseStudio),平台通过资源服务化与任务匹配模块,在多组织制造节点之间实现任务协商、智能匹配与执行监控,系统具备多智能体代理式部署、任务分配链条可视化与任务执行可信追溯等特性,适用于社群化制造场景下的高频任务扰动管理^[73]。Li等提出基于区块链与数字孪生的制造资源共享平台架构,聚焦社群化制造社区中数字孪生的知识产权保护与资源可重构部署机制,通过领域驱动设计(DDD)与智能合约实现数字孪生代码的溯源、授权与共享,提升小微企业间制造服务协同效率,为社会制造提供了具备可扩展性与可信性的基础设施支持^[74]。

上述联动机制以多单元功能协同为核心,具备逻辑清晰、可拓展性强等优势,适用于结构稳定、调度任务可预期的制造环境。但在实际系统运行中,扰动难以完全规避,资源状态和任务节奏常发生非预期偏移。为此,引入状态感知与扰动建模机制,成为实现系统智能决策能力演进的关键方向。

4.2 系统运作状态感知与扰动分析评估方法

多类扰动的共同影响会导致系统状态偏移、任务执行受阻等问题,影响调度稳定性与资源协同效率。为实现复杂动态环境下的智能联动决策,必须构建具备状态感知、扰动建模与等级评估能力的智能调度支持体系。如表3所示,现有研究^[75-82]主要围绕扰动状态的特点与等级划分、系统响应架构设计等方向开展探索,形成较为系统的方法体系。

针对扰动信息在时序上呈现碎片化、在逻辑上具有复杂演化行为的问题,研究者们普遍关注多维扰动状态的结构化建模,以支持系统对扰动影响路径的识别与刻画。Wang等针对离散制造车间中异常状态难以及时识别的问题,提出了基于深度图神经网络的链接预测模型(LAGNN),能够同时学习制造要素之间的拓扑依赖关系与时间演化特征,实现对潜在异常状态的链路预测^[75]。Zhou等提出基于时间快照网络的多层级扰动建模方法,构建渐进型与突发型扰动的演化模型,并引入鲁棒性评价指标实现扰动影响的量化评估,为智能车间中扰动识别、预警与分级控制提供了理论支撑^[76]。

为了将扰动感知结果有效转化为调度控制依据,相关研究进一步在扰动等级划分与系统响应机制两个方面展开深入探索。

在扰动影响程度的量化评估方面,汤洪涛等结合工业大数据技术,提出面向柔性作业车间的历史数据聚类方法,通过基于扰动属性的聚类策略区分不同扰动环境下的调度样本,实现调度规则对扰动情境的识别与适应性划分^[77]。Zhang等针对复杂生产物流系统中动态扰动对系统状态偏移的影响,提出基于GA-DNN的UFID评估方法,通过构建融合系统状态、作业关系与扰动属性的多维数据立方体,并结合特征选择

与深度分类模型,实现扰动强度的量化分级,并结合分类结果选择最优调度路径,实现面向多源扰动下的生产与仓储一体化联动调度决策^[78]。Li 等提出面向 CPMS 高动态扰动环境的联动调度架构,构建作业状态与资源状态联合的多维系统状态空间,基于 IIoT 与数字孪生构建多级指令队列,并引入任务“可执行性”指标以动态判断调度指令的触发条件,实现了任务优先级、资源负载、设置成本等因素驱动下的扰动响应感知机制^[79]。

另一方面,为实现“感知—评估—反馈”闭环控制机制,多项研究从系统架构层面提出协同响应设计方案。Qiao 等提出基于 CPS 的四阶段闭环调度框架,构建包含设备、产品与过程数据的实时采集系统,结合性能指标偏差判据实现对突发与累积扰动的在线识别与响应判定,为后续调度调整提供状态依据^[80]。张映锋等提出面向智能制造场景的底层制造资源建模与协同控制方法,构建基于 CPS 的状态感知与多级监管机制,实现制造资源对任务过程状态与干扰事件的主动感知与反馈响应,并协同优化中引入基于控制论的变粒度自适应控制策略,并通过任务队列的重排序机制最小化任务拖期总成本,增强了系统的实时调节能力与资源适配性^[81]。Lin 等提出以数字线程为基础的云-雾-边多层协同机制,构建融合生产任务、过程、资源、状态与特征五维要素的建模框架,实现对多源扰动数据的动态追踪与响应模型生成,为后续生产自适应调整提供数据基础^[82]。

上述状态感知与扰动建模方法,强化了系统对运行偏离的早期识别能力,为调度机制智能化提供了感知基础。然而,现有方法在感知精度、模型可解释性以及部署成本等方面仍存在局限,需在方法实用性与系统集成效率之间进一步平衡与优化。

4.3 多源扰动环境下的自适应联动决策方法

面对多源扰动场景,分布式制造系统需具备高效的调度响应与联动控制能力。相关研究聚焦于扰动分级响应机制构建、联动调度路径重构等,强调系统在复杂动态环境中的自适应性鲁棒性提升。根据研究所采用的核心技术路径,如表 3 所示,现有研究^[83-97]主要可归纳为强化学习与多智能体机制、数字孪生技术、智能优化算法方法及其他方法。

强化学习及其多智能体扩展因具备环境感知与策略自适应能力,成为扰动响应调度中重要的智能方法^{[83]-[84]}。Lei 等面向智能工厂中生产-物流协同任务的动态分配问题,构建基于智能互联资源(SCR)自治交互的分布式任务协同机制,融合强化学习中的 Q-learning 算法实现任务步进调度,显著提升多扰动场景下任务完工效率与资源利用水平^[85]。Kim 等结合多智能体系统(MAS)与深度强化学习(DQN),构建柔性制造系统中的分布式智能调度架构,提出局部状态感知-局部协商-全局学习的三阶段运行机制,强化智能体在多扰动下的自主任务选择与协调能力,实现系统在订单波动与资源限制场景下的动态适应与调度重构^[86]。

数字孪生为制造系统提供高保真建模与虚实同步能力,广泛用于扰动建模与任务调整阶段^{[82][87]}。Pan 等构建了一种多层级数字孪生驱动的成套任务同步优化机制,提出融合云-雾-边-端结构的信息感知与控制架构,边缘层用于实时捕捉车间级扰动并进行微粒度调整,雾层协调部门级决策,云层实现全局优化与策略分发,并引入基于目标级联法(ATC)多层协同优化算法,分别构建车间调度、包装同步与仓储规划模型,并通过遗传算法实现子问题求解与动态调整^[88]。Zhang 等聚焦社群化制造环境下生产-配送-仓储协同决策问题,构建基于区块链与数字孪生的可信同步决策框架,融合多层级扰动响应策略与协同优化算法,实现跨企业生产物流资源的动态重构与系统成本的全局最优协调^[89]。

除强化学习外,各类进化式智能优化算法^{[90]-[96]}因具备可调参数空间大、多目标优化能力强的优势,在复杂扰动场景下得到广泛应用。汤洪涛等在聚类基础上,构建了基于改进随机森林算法的调度规则挖掘模型,引入贝叶斯投票机制与相似树淘汰策略,提高了调度规则的泛化能力与执行效率,实现复杂扰动场景下的实时规则切换与动态调度优化^[77]。Qiao 等针对扰动触发的调度调整需求,设计融合 GA 特征筛选与 KNN 在线匹配的自适应调度方法,挖掘状态-策略映射关系,实现基于知识库的联动调度优化,并通过半导体生产线实验验证方法有效性^[80]。

此外,部分研究也探索了分布式制造系统联动运作管控的新机制。屈挺等提出面向高动态扰动场景的

“三态映射+多段联动”优态运行架构,构建“理论优态 - 实际优态 - 实际状态”动态匹配机制,结合多等级联动控制策略与 ATC 建模方法,引导生产 - 物流多单元在状态偏离时进行任务同步与配置重构,提升系统运行一致性与全局目标鲁棒性^[33]。阴艳超等面向智能数控车间提出基于云边协同的多工序预测控制方法,构建以 EdgeXFoundry 为核心的边缘节点系统,结合规则引擎实现状态异常的本地识别与响应,并部署长短期记忆神经网络(LSTM)模型对质量参数进行周期预测,实现多工序任务的实时协同调控,提升系统响应效率与加工质量保障能力^[97]。

本节所述方法普遍具备较强的自适应性与动态调控能力,适用于扰动频发、高度动态的制造场景。然而,此类方法在算法复杂性控制、求解器收敛效率以及调度结果的鲁棒性保障方面仍面临挑战,还需在精度、效率与可部署性之间实现更优权衡。

表 3 DFSMS 联动运作决策方法相关研究

Table3 Researches on synchronized operation decision method for DFSMS

序号	对象	扰动类型	系统运作感知与扰动评估方法	约束条件	优化目标	调度方法
[71]	多工人多机器人的人机协同能效车间	无	无	工序顺序、资源一致性、加工能力限制与资源独占性	最小化最大完工时间和总能耗	双阶段协同反馈优化方法
[72]	面向大规模个性化制造的智能机器人云边端协同系统	无	无	资源异构性、计算延迟控制需求	提升智能机器人深度学习模型的性能	云-边-端分层部署与协同更新机制
[73]	服务型制造的区块链-数字孪生协同平台系统	无	无	资源异构性、服务匹配规则、数据可信性要求	提升服务制造的可信性与效率	基于规则的链下匹配与协同机制
[74]	面向社群化制造的区块链-数字孪生资源共享平台	无	无	资源异构性、部署环境适配性	数字孪生知识产权保护、提升资源共享的可扩展性	基于领域驱动设计(DDD)与智能合约的共享与可重构部署机制
[75]	制造知识图谱驱动异常检测系统	累积型扰动	基于深度图神经网络的链接预测模型(LAGNN)与特征提取网络	无	提升异常预测准确性	无
[76]	智能制造车间	混合型扰动	基于时序快照网络的多层级扰动建模与鲁棒性指标评估方法	隐含加工优先级与设备负荷	提升系统鲁棒性与扰动识别能力	无
[77]	柔性作业车间动态调度系统	混合型扰动	基于扰动属性的历史数据聚类与环境识别方法	工序顺序	最大完工时间、总拖期、机器总负荷	基于改进随机森林算法的挖掘模型
[78]	生产-物流系统	突发型扰动	遗传算法 - 深度神经网络(GA-DNN)	工序顺序、交货期	最小化系统总成本、生产成本和存储成本	大数据驱动的最优态控制策略下的同步决策方法
[17]	生产、运输与仓储联动的分布式制造系统	突发型扰动	基于动力学的三级动态影响范围分类、数字孪生系统	工序顺序、货位容量等	订单完成时间、系统总成本	基于云-雾-边的数字孪生控制框架、协同优化(CO)、多学科设计优化(MDO)

续表

序号	对象	扰动类型	系统运作感知与扰动评估方法	约束条件	优化目标	调度方法
[79]	基于 CPMS 的生产-物流系统	混合型扰动	基于工业物联网与数字孪生构建多级指令队列	工序顺序、交货期等	最小平均订单流动时间、最大准时交付率	基于乱序执行思想的同步任务分配与实时调度机制
[80]	智能制造场景下基于 CPPS 的自适应调度系统	混合型扰动	基于阈值的干扰识别方法	工序顺序	提升生产线总体调度性能	基于 GA-KNN(GA-K-Nearest Neighbors)的自适应调度算法
[81]	智能制造场景下的底层制造资源控制系统	未明确扰动	CPS 感知下的多级监管控制机制	工序顺序、资源占用	最小化任务拖期总成本	基于控制论的变粒度自适应协同控制策略
[82]	数字孪生离散制造车间	混合型扰动	基于数字线程模型进行干扰响应模型	工序顺序、加工能力限制	总完工时间、设备空闲时间	云-雾-边协同策略
[83]	多机器人系统(MRS)驱动的智能工厂	累积型扰动	信息物理 MRS 模型(CPMRS)	无明确约束	生产有效率、平均无故障时间	社会学习、强化学习
[84]	基于工业互联网平台的制造服务协同链系统(MSCC)	突发型扰动	构建服务鲁棒性标签体系	时间窗、成本等	最大化 MSCC 鲁棒性	基于非对称信息的多智能体强化学习框架(AIMARL)
[85]	智能工厂中的生产-物流系统	突发型扰动	基于工业物联网状态感知的智能互联资源数据建模机制	资源独占性、工序顺序等	最小化完工时间,最大化资源利用率	基于 Q 学习(Q-learning)的强化学习调度机制
[86]	柔性制造系统	累积型扰动	基于深度强化学习(DQN)的状态感知-Q 值更新机制	工艺顺序、交货期等	最小完工时间与最大资源利用率	多智能体协商、深度强化学习(DQN)调度框架
[87]	零件智能制造车间	突发型扰动	基于数字孪生云平台的产品全生命周期监控系统	无明确约束	无明确目标	基于调度云平台的生产调度方式
[88]	生产-物流系统	突发型扰动	无	设备能力、容量等	最小化系统总成本与配套偏差	基于目标级联法(ATC)多层协同优化
[89]	社群化制造环境中的生产-配送-仓储协同系统	突发型扰动	基于区块链与数字孪生的三层实时感知架构	容量、时间窗等	最小化系统总成本	基于协同优化(CO)框架的多子系统分布式迭代调度策略
[11]	包含生产、运输与存储联动的工业园区系统	混合型扰动	基于 DT 的多维感知与三层反馈机制	容量、订单齐套要求等	最小化系统成本与库存时间、最大资源利用率	基于目标级联法(ATC)的生产-运输-存储三层协同优化模型
[90]	柔性作业车间	突发型扰动	时间弹性指标 $\rho(t)$ 和完整性修正系数	工序顺序、设备可用性等	最大化 $\rho(t)$	融合维护与重调度的图模型和增强型鸽群优化算法(PIOLC)
[91]	柔性作业车间订单动态调度	突发型扰动	无	工序顺序、加工能力限制等	最小化完工时间、机器等待时间、总拖期时间以及工件偏差时间	基于改进灰狼算法的自适应动态调度方法
[92]	工业互联网平台制造服务协同链	混合型扰动	无	服务选择	完工时长、成本、鲁棒性	改进人工蜂群算法(EMOABC)

续表

序号	对象	扰动类型	系统运作感知与扰动评估方法	约束条件	优化目标	调度方法
[93]	含物料配送的生产-物流系统	突发型扰动	扰动强度判定与等级分类机制	AGV载重、时间窗等	最小化车辆数、路径长度和碳排放等	基于数字孪生的动态调度优化机制、改进的蚁群优化算法
[94]	柔性作业车间	突发型扰动	无	工序顺序、单台加工等	总能耗、最大完工时间	改进的自适应形状估计进化算法(AGE-MOEA)
[95]	柔性装配系统-混合装配单元生产线(HACL)	突发型扰动	物联网(IoT)支持的智能票据系统(GMS)	工序顺序、资源可用性等	最小化积压作业和机器设置数量	基于遗传算法的同步机制
[96]	软件定义云制造(SDCM)	累积型扰动	无	任务并发能力、时延约束	最小化最大完成时间、满足时延约束	基于融合GA、Dijkstra最短路径算法和排队算法的集成调度方法
[33]	多阶段生产-物流联动系统	混合型扰动	三态动态映射机制与基于阈值的分级扰动响应	设备负载、资源能力	最小化库存等待与最大化生产-配送同步性	基于目标级联法(ATC)的两层级联动调度模型
[97]	智能数控车间	未明确扰动	基于EdgeXFoundry的云边协同框架实时感知系统状态	工艺加工约束	提升响应效率与加工质量	基于长短期记忆神经网络(LSTM)的云边预测模型

5 未来展望与研究重点

(1) 面向工业制造元宇宙的联动管控架构

工业元宇宙将深度融合以虚拟现实/增强现实、AI、IoT、区块链、数字孪生为代表的新型信息通信技术与实体工业经济,实现虚实共融协同发展^[98]。在工业制造元宇宙中,原有复杂DFSMS的结构、性质、要素及其演化机理在革命性技术驱动下将会发生巨大变化,因此,在架构层面,研究基于区块链和隐私计算的可溯可信联动管控架构与方法;在配置/运作决策方法层面,深入探索元空间中DFSMS的“配置结构进化-运作机制进阶-执行状态修复”循环优态演进方法,研究虚实共融工业元宇宙内跨时空联动管控机制与方法,研究基于虚拟现实/增强现实的分布式智能制造单元联动执行控制架构与方法等方向;形成社会、经济、技术生产交融的联动制造系统,实现数字技术与实体工业深度融合新范式。

(2) 新一代人工智能驱动的智辅化联动管控

新一代人工智能如大模型(DeepSeek, ChatGPT等)基于超大规模数据、参数和算力涌现极强的生成能力、泛化能力和交互能力^[99]。随着物联网技术在制造业的深度普适化应用,工业数据趋于指数级增长态势,为大模型的应用研究奠定基础。面向工业互联网“行业+细分”制造资源与业务的持续深化融入对智辅化联动管控技术的需求,在架构层面,可进一步研究生成式AI融入的“信息-资源-管控”联动架构,探索AI与人机物智能融合机理;在配置/运作决策方法层面,可进一步研究面向基于行业数据继续预训练与典型决策场景微调的大模型“训-推”框架构建方法,研究适配复杂制造业务需求解析与精准表达的“用户-模型”高效交互方法,研究面向短周期知识更新和长周期知识迭代的决策大模型能力持续强化方法等,实现新一代人工智能驱动的智辅化联动管控。

(3) 迈向工业5.0的智能制造系统联动管控

工业5.0强调价值驱动的智能制造,包含以人为本、可持续性、韧性三个核心要素^[100]。近年来,政治冲突、新冠疫情、自然危机等不确定性事件给工业制造带来了极大负面影响,而各种技术创新不断涌现导致系统内要素的交互协作模式不断演变,为DFSMS的智能化管控带来新的挑战。因此,在架构层面,需进一步研究以人为本、人机共融的联动架构,融入制造系统中人的个性、复杂性/动态性、与价值实现的考量;在配置/运作决策方法层面,研究在复杂内外部环境考虑可持续性(碳足迹、能耗等)和成本/效率的多目标联动

配置与运作决策方法;研究以系统运行稳定性与韧性为目标的联动配置与管控机制与方法,形成以人为本、可持续性、韧性联动的发展生态。

(4) 面向区域经济发展的工贸一体化联动管控

响应我国“完善区域一体化发展机制,构建跨行政区合作发展新机制”的部署,面向我国粤港澳大湾区、长三角经济圈等经济区域,以区域工贸一体化协同运作为对象,深入分析联动理论框架在更加广域、开放、复杂的分布式智能系统下的关键难点;在架构层面,研究可支撑广域空间中存在制造资源错配、要素流动阻滞、乃至制度体制差异(如粤港澳)的复杂大型 DFSMS 的多尺度数字孪生控制平台,推动区域工业生产、运输/配送、销售等关键环节的可见、可感、可控,研究面向广域制造系统运作的多阶段、多层次、立体式管控架构体系;在联动配置与决策层面,深入研究包括“多类管控目标、多阶运作过程、多重执行单元和多维交互参数”的联动式运作系统多尺度状态模型和面向全生命周期的在线优态控制方法。

6 结 论

在我国智能制造发展规划的引导和工业 4.0 革命性技术突破的驱动下,如何对生产要素进行创新性配置与协同管控,对我国推动制造业深度数字化转型,发展高效能、高质量的“新质生产力”具有重要战略意义。针对订单驱动广域多企业智能制造单元形成的分布式柔性智能制造系统(DFSMS)中存在的“外部随机需求与内部多源扰动并发下异质制造单元间动态协同管控”的共性科学问题,本文从面向 DFSMS 系统联动的架构体系、系统结构联动配置方法与系统联动运作决策方法三个方面总结和梳理了近年来工业互联分布式柔性智能制造系统联动管控架构与方法的研究现状。在未来,可研究探索面向工业制造元宇宙的联动管控架构,新一代人工智能驱动的智辅化联动管控,面向工业 5.0 的智能制造系统联动管控与面向区域经济发展的工贸一体化联动管控等重点方向,进一步拓展与深化工业互联分布式柔性智能制造系统联动管控的理论、架构与方法。

参考文献:

- [1] ZHANG X, MING X. A smart system of Customer-product Interaction Life Cycle (CILC) in industrial Internet era for mass personalization from industrial practice survey: identification, definition, acquisition and parsing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024,35(2): 727-756.
- [2] Q IN Z, LU Y. Self-organizing manufacturing network: A paradigm towards smart manufacturing in mass personalization [J]. Journal of Manufacturing Systems 2021, 60: 35-47.
- [3] 蔡磊,李文锋,罗云. 个性化定制车间生产-物流协同调度框架与算法研究[J]. 机械工程学报 2022, 58(7): 214-226.
- CAI L, LI W, LUO Y. Framework and algorithm of customized workshop production-logistics collaborative scheduling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(7): 214-226.
- [4] LI M, GUO D, LI M, et al. Operation twins: production-intralogistics synchronisation in Industry 4.0[J]. International Journal of Production Research, 2023,61(15): 5193-5211.
- [5] 江平宇,杨茂林,李卫东,刘加军,郭威,李普林. 集体智慧研究综述及其社群化制造应用探索[J]. 中国机械工程 2020, 31(15): 14.
- JIANG P, YANG M, LI W, et al. CI Literature Review and Its Application Exploration in Social Manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(15).
- [6] 臧冀原,刘宇飞,王柏村,苗仲桢,薛源,李培根. 面向 2035 的智能制造技术预见和路线图研究[J]. 机械工程学报 2022, 58(4): 285-304.
- ZANG J, LIU Y, WANG B, et al. Technology forecasting and roadmapping of intelligent manufacturing by 2035 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(4): 285-308.
- [7] HU Y, JIA Q, YAO Y, et al. Industrial internet of things intelligence empowering smart manufacturing: A literature review [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024,11(11): 19143-19167.
- [8] LI Y, ZHANG Y. Digital twin for Industrial Internet[J]. Fundamental Research 2024, 4(1): 21-24.
- [9] 赖李媛君,张霖,任磊,王凌. 工业互联网智能调度建模与方法研究综述[J]. 计算机集成制造系统 2022, 28

- (7): 15.
- LAI L, ZHANG L, REN L, et al. Overview on intelligent scheduling models and methods for industrial Internet-of-things [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2022, 28(7): 1966.
- [10] 宁晓菊, 陈艳, 朱伟军, 等. 基于 RFID 的工业园区 SHIP 智能物流管理系统[J]. *制造业自动化*, 2014, 36(02): 10-13.
- NING X, CHEN Y, ZHU W et al. RFID-based smart logistics management system for supply hub in industrial park (SHIP) [J]. *Manufacturing Automation*, 2014, 36(02): 10-13.
- [11] 周达坚, 屈挺, 张凯, 等. 数字孪生驱动的工业园区“产—运—存”联动决策架构、模型与方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(06): 1576-1590.
- ZHOU D, QU T, ZHANG K, et al. Digital twin driven decision-making architecture model and method for synchronized production-transportation-storage system in industrial park[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, 2019, 25(6): 1576-1590.
- [12] 蒋红飞, 屈挺, 张凯, 等. 基于数字孪生的高动态生产系统联动决策方法[J]. *工业工程*, 2021, 24(02): 57-67.
- JIANG H, QU T, ZHANG K. A synchronized decision-making method for highly dynamic production system based on digital-twin[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2021, 24(2): 57.
- [13] 聂庆玮, 朱海华, 唐敦兵, 等. 数据驱动的网络化制造系统研究框架及其主体性分析[J]. *中国科学:技术科学*, 2023, 53(07): 1062-1083.
- NIE Q, ZHU H, TANG D, et al. Analysis of the conceptual framework and subjectivity principle of a data-driven networked manufacturing system[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2023, 53(7): 1062-1083.
- [14] 刘轩, 屈挺, 吴强, 等. 基于物联网的“生产—物流”动态齐套联动问题分析及其解决方案[J]. *工业工程*, 2017, 20(03): 35-44.
- LIU X, QU T, WU Q, et al. Internet-of-thing-based dynamic kitting synchronization of production and logistics: analysis and solution[J]. *Ind Eng J*, 2017, 20(3): 35-44.
- [15] 王时龙, 王彦凯, 杨波, 等. 基于层次化数字孪生的工业互联网制造新范式——雾制造[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(12): 3070-3080.
- WANG S, WANG Y, YANG B, et al. Fog manufacturing: New paradigm of industrial internet manufacturing based on hierarchical digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25: 3070-3080.
- [16] 江平宇, 史皓良, 杨茂林, 等. 面向工业互联网的社群化制造模式及 3D 打印测试床研发[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, 52(01): 88-103.
- JIANG P Y, SHI L H, YANG M L, et al. Research and development of social manufacturing model and 3D printing testbed for industrial internet[J]. *Sci. Sin. Technol*, 2022, 52: 88-103.
- [17] PAN Y H, QU T, WU N Q, et al. Digital Twin Based Real-time Production Logistics Synchronization System in a Multi-level Computing Architecture[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 246-260.
- [18] ZHANG Z, QU T, ZHAO K, et al. Optimization Model and Strategy for Dynamic Material Distribution Scheduling Based on Digital Twin: A Step towards Sustainable Manufacturing[J]. *Sustainability*, 2023, 15(23): 16539.
- [19] ZHAO Z, LIN P, SHEN L, et al. IoT edge computing-enabled collaborative tracking system for manufacturing resources in industrial park[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 43: 101044.
- [20] PAN Y H, WU N Q, QU T, et al. Digital-twin-driven production logistics synchronization system for vehicle routing problems with pick-up and delivery in industrial park[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, 34(7-8): 814-828.
- [21] ZHANG Y, QU T, LI M, et al. Digital twin-based multi-granularity synchronisation for production-warehousing under batch processing mode[J]. *International Journal of Production Research*: 1-20.
- [22] ZHANG Z, QU T, ZHAO K, et al. Enhancing trusted synchronization in open production logistics: A platform framework integrating blockchain and digital twin under social manufacturing [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 61: 102404.
- [23] HUANG H, QU T, QIU X, et al. Industrial internet platform-driven decentralised multi-level synchronised reconfiguration of assembly supply chains[J]. *International Journal of Production Research*: 1-23.
- [24] XIAO J, MA S, WANG S, et al. Fine-grained digital twin sharing framework for smart construction through an incentive

- mechanism[J]. *International Journal of Production Economics*, 2024,276: 109382.
- [25] YANG C, LIAO F, LAN S, et al. Flexible Resource Scheduling for Software-Defined Cloud Manufacturing with Edge Computing[J]. *Engineering*, 2023,22: 60–70.
- [26] BAO Y, ZHANG X, WANG C, et al. Further expansion from smart manufacturing system (SMS) to social smart manufacturing system (SSMS) based on industrial internet[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024,191: 110119.
- [27] QU T, LEI S P, WANG Z Z, et al. IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016,84: 147–164.
- [28] ZHANG K, QU T, ZHOU D, et al. Digital twin-based opti-state control method for a synchronized production operation system[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020,63: 101892.
- [29] YANG C, LAN S, WANG L, et al. Big data driven edge-cloud collaboration architecture for cloud manufacturing: a software defined perspective[J]. *IEEE access*, 2020,8: 45938–45950.
- [30] LI Z, BARENCI A V, HUANG G Q. Toward a blockchain cloud manufacturing system as a peer to peer distributed network platform[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018,54: 133–144.
- [31] 常丰田, 周光辉, 李锦涛, 等. 边-云协同下智能制造单元的物联网协调配置方法[J]. *西安交通大学学报*, 2022,56(06): 184–194.
- CHANG F, ZHOU G, LI J, et al. Coordinated configuration method for internet of things network of smart manufacturing cells under edge-cloud collaboration[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022,56(6): 184–194.
- [32] PAN Y, ZHONG R Y, QU T, et al. Multi-level digital twin-driven kitting-synchronized optimization for production logistics system[J]. *International Journal of Production Economics*, 2024,271: 109176.
- [33] 屈挺, 张凯, 闫勉, 等. 物联网环境下面向高动态性生产系统优态运行的联动决策与控制方法[J]. *机械工程学报*, 2018,54(16): 24–33.
- QU T, ZHANG K, YAN M, et al. Synchronized decision-making and control method for opti-state execution of dynamic production systems with internet of things[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018,54(16): 24–33.
- [34] WANG J, XU C, ZHANG J, et al. A collaborative architecture of the industrial internet platform for manufacturing systems [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020,61: 101854.
- [35] ZHANG X, MING X, BAO Y. A flexible smart manufacturing system in mass personalization manufacturing model based on multi-module-platform, multi-virtual-unit, and multi-production-line[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022,171: 108379.
- [36] KIM D Y, PARK J W, BAEK S, et al. A modular factory testbed for the rapid reconfiguration of manufacturing systems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019,31(3): 661–680.
- [37] PANG Z, YANG B, CHEN R, et al. A multi-phase scheduling method for reconfigurable flexible job-shops with multi-machine cooperation based on a Scout and Mutation-based Aquila Optimizer[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023,46: 116–134.
- [38] TANG H, Di Li, WAN J, et al. A Reconfigurable Method for Intelligent Manufacturing Based on Industrial Cloud and Edge Intelligence[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020,7(5): 4248–4259.
- [39] RODRIGUES N, OLIVEIRA E, O P L. Decentralized and on-the-fly agent-based service reconfiguration in manufacturing systems[J]. *Computers in Industry*, 2018,101: 81–90.
- [40] BIN Z, SIANG Y S, BAI Y, et al. Development of Digital Twin Technology Based Intelligent System for the Manufacturing Processing Line: 2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCOREd)[C]: IEEE, 2024.
- [41] JACKSON K, EFTHYMIU K, BORTON J. Digital Manufacturing and Flexible Assembly Technologies for Reconfigurable Aerospace Production Systems[J]. *Procedia CIRP*, 2016,52: 274–279.
- [42] ZHU Q, HUANG S, WANG G, et al. Dynamic reconfiguration optimization of intelligent manufacturing system with human-robot collaboration based on digital twin[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022,65: 330–338.
- [43] DOBROVOCZKI P, KOVÁCS A, SAKATA H, et al. Integrated system configuration and layout planning for flexible manufacturing systems[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024,77: 384–397.
- [44] RAHARNO S, YOSEPHINE V S. Intelligent flexible assembly system for labor-intensive factory using the configurable virtual workstation concept[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2024,18(1):

- 465-478.
- [45] LMAZ E Y, EROL R Z. A mathematical programming model for reconfiguration of flexible manufacturing cells[J]. *Engineering Optimization*, 2014,47(2): 184-203.
- [46] GKOURNELOS C, KOUSIN, BAVELOS A C, et al. Model based reconfiguration of flexible production systems[J]. *Procedia CIRP*, 2019,86: 80-85.
- [47] ALSAFI Y, VYATKIN V. Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010,26(4): 381-391.
- [48] PEREZ H B, JUAREZ I L, ALANIS P C G, et al. Reconfiguration Distributed Objects in an Intelligent Manufacturing Cell [J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2016,14(1): 136-146.
- [49] GUO D, LI M, LING S, et al. Synchronization-oriented reconfiguration of FPAI under graduation intelligent manufacturing system in the COVID-19 pandemic and beyond[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021,60: 893-902.
- [50] HUANG J, HUANG S, MOGHADDAM S K, et al. Deep Reinforcement Learning-Based Dynamic Reconfiguration Planning for Digital Twin-Driven Smart Manufacturing Systems With Reconfigurable Machine Tools[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024,20(11): 13135-13146.
- [51] ZHANG X, MING X, BAO Y, et al. System construction for comprehensive industrial ecosystem oriented networked collaborative manufacturing platform (NCMP) based on three chains [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 52: 101538.
- [52] QIAN C, ZHANG Y, JIANG C, et al. A real-time data-driven collaborative mechanism in fixed-position assembly systems for smart manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020,61: 101841.
- [53] TANG Q, WU B. A digital twin-driven multi-resource constrained location system for resource allocation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024,130(9-10): 4359-4385.
- [54] ZHANG X, MING X. Reference subsystems for Smart Manufacturing Collaborative System (SMCS) from multi-processes, multi-intersections and multi-operators[J]. *Enterprise Information Systems*, 2020,14(3): 282-307.
- [55] 王伟, 孙炳能, 刘博, 等. 基于异地工厂互联的产业链网络化协同[J]. *机械设计与研究*, 2021,37(3): 172-176, 181. WANG W, SUN B N, LIU B, et al. Industrial Chain Network Collaboration Based on Interconnection of Geographically Distributed Factories [J]. *Journal of Machine Design and Research*, 2021, 37(03): 172-176, 181.
- [56] 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(07): 1-13. LV W, CHEN J, LIU J. Intelligent Manufacturing and Firm-Level Platform Building in Industrial Internet: A Case Study of Haier [J]. *China Soft Science*, 2019(07): 1-13.
- [57] 柳春锋, 李峥, 王居凤. 分布式工厂中微型制造单元多目标优化[J]. *计算机应用*, 2023,43(12): 3824-3832. LIU C F, LI Z, WANG J F. Multi-objective optimization of minicells in distributed factories [J]. *Journal of Computer Applications*, 2023, 43(12): 3824-3832.
- [58] 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]. *计算机集成制造系统*, 2024,30(8): 2923-2935. XIE R B, KANG G S, LIU J X, et al. Location aware service composition optimization for production factor resource under industrial Internet [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2024, 30(08): 2923-2935.
- [59] SANG Y, TAN J. Intelligent factory many-objective distributed flexible job shop collaborative scheduling method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022,164: 107884.
- [60] GUO D, ZHONG R Y, RONG Y, et al. Synchronization of Shop-Floor Logistics and Manufacturing Under IIoT and Digital Twin-Enabled Graduation Intelligent Manufacturing System[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023,53(3): 2005-2016.
- [61] LIU Q, LENG J, YAN D, et al. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021,58: 52-64.
- [62] MORGAN J, HALTON M, QIAO Y, et al. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021,59: 481-506.
- [63] LU Y, XU X, WANG L. Smart manufacturing process and system automation - A critical review of the standards and envisioned scenarios[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020,56: 312-325.

- [64] LI M, FU Y, CHEN Q, et al. Blockchain-enabled digital twin collaboration platform for heterogeneous socialized manufacturing resource management[J]. International Journal of Production Research, 2023,61(12): 3963-3983.
- [65] YANG S, WANG J, LI W, et al. Integrated optimisation of dynamic scheduling and reconfiguration for distributed reconfigurable flowshops via iterated greedy algorithm[J]. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 2025,12(1): 2467782.
- [66] YANG M, JIANG P. Socialized and self-organized collaborative designer community-resilience modeling and assessment [J]. Research in Engineering Design, 2019,31(1): 3-24.
- [67] ZHANG Y, ZHANG D, WANG Z, et al. An optimal configuration method of multi-level manufacturing resources based on community evolution for social manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020,65: 101964.
- [68] CAO W, JIANG P, JIANG K. Demand-based manufacturing service capability estimation of a manufacturing system in a social manufacturing environment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015,231(7): 1275-1297.
- [69] XUE X, WANG S, ZHANG L, et al. Evaluating of dynamic service matching strategy for social manufacturing in cloud environment[J]. Future Generation Computer Systems, 2019,91: 311-326.
- [70] ZHANG Z, QU T, ZHANG K, et al. Digital twin-based production logistics resource optimisation configuration method in smart cloud manufacturing environment[J]. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2024,6(4): e12118.
- [71] 王凌, 李瑞, 陈靖方. 面向人机协同能效车间调度的群智能优化算法 [J]. 中国科学:技术科学, 2024, 54(09): 1676-92.
- WANG L, LI R, CHEN J. A swarm intelligence optimization algorithm for human-robot collaborative energy-efficient shop scheduling[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2024,54(09):1676-1692.
- [72] YANG C, WANG Y, LAN S, et al. Cloud-edge-device collaboration mechanisms of deep learning models for smart robots in mass personalization[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022,77: 102351.
- [73] LIU X, JIANG Y, WANG Z, et al. imseStudio: blockchain-enabled secure digital twin platform for service manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 2023,61(12): 3984-4003.
- [74] LI M, LI Z, HUANG X, et al. Blockchain-based digital twin sharing platform for reconfigurable socialized manufacturing resource integration[J]. International Journal of Production Economics, 2021,240: 108223.
- [75] WANG S, GUO Y, HUANG S, et al. A deep graph neural network-based link prediction model for proactive anomaly detection in discrete manufacturing workshop[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025,79: 301-317.
- [76] ZHOU Y, ZHOU G, ZHANG C, et al. Multi-level modeling and robustness evaluation of disturbances in intelligent workshop with temporal snapshot network[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023,71: 20-33.
- [77] 汤洪涛, 费永辉, 陈青丰, 等. 基于工业大数据的柔性作业车间动态调度 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(9): 2497.
- TANG H, FEI Y, CHEN Q, et al. Flexible job shop dynamic scheduling based on industrial big data[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020,26(9):2497.
- [78] ZHANG K, QU T, ZHANG Y, et al. Big data-enabled intelligent synchronisation for the complex production logistics system under the opti-state control strategy[J]. International Journal of Production Research, 2022,60(13): 4159-4175.
- [79] LI M, QU T, LIU B, et al. Out-of-Order Architecture for Real-Time Data-Driven Resilient Planning and Scheduling of Cyber-Physical Manufacturing Systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025.
- [80] QIAO F, LIU J, MA Y. Industrial big-data-driven and CPS-based adaptive production scheduling for smart manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 2021,59(23): 7139-7159.
- [81] 张映锋, 郭振刚, 钱成, 等. 基于过程感知的底层制造资源智能化建模及其自适应协同优化方法研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 1-10.
- ZHANG Y, GUO Z, QIAN C, et al. Investigation on Process-aware Based Intelligent Modeling of Bottom Layer Manufacturing Resources and Self-adaptive Collaborative Optimization Methodology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(16):1-10.
- [82] LIN Z, LIU Z, YAN J, et al. Digital thread-driven cloud-fog-edge collaborative disturbance mitigation mechanism for adaptive production in digital twin discrete manufacturing workshop[J]. International Journal of Production Research, 2024: 1-29.

- [83] NIE Z, CHEN K, KIM K J. Social-Learning Coordination of Collaborative Multi-Robot Systems Achieves Resilient Production in a Smart Factory[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024.
- [84] LUO X, PAN C, LIU Z, et al. A novel multi-agent reinforcement learning framework for robust exception handling of manufacturing service collaboration based on asymmetric information[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025, 79: 364–382.
- [85] LEI J, HUI J, CHANG F, et al. Reinforcement learning-based dynamic production-logistics-integrated tasks allocation in smart factories[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(13): 4419–4436.
- [86] KIM Y G, LEE S, SON J, et al. Multi-agent system and reinforcement learning approach for distributed intelligence in a flexible smart manufacturing system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 57: 440–450.
- [87] 刘志峰, 陈伟, 杨聪彬, 等. 基于数字孪生的零件智能制造车间调度云平台 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(第 6): 1444.
- LIU Z, CHEN W, YANG C, et al. Intelligent manufacturing workshop dispatching cloud platform based on digital twins [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1444.
- [88] PAN Y, ZHONG R, QU T, et al. Multi-level digital twin-driven kitting-synchronized optimization for production logistics system[J]. International Journal of Production Economics, 2024, 271: 109176.
- [89] ZHANG Z, QU T, HUANG G, et al. Towards a trusted synchronized decision-making method for social production logistics systems based on blockchain and digital twin [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2025, 94: 102965.
- [90] FENG Q, HAI X, LIU M, et al. Time-based resilience metric for smart manufacturing systems and optimization method with dual-strategy recovery[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 65: 486–497.
- [91] 朱赟海, 罗陆锋, 卢清华, 等. 面向订单扰动的柔性作业车间动态调度方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(3): 984.
- ZHU Y, LUO L, LU Q, et al. Flexible job shop dynamic scheduling method for order disturbance[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025, 31(3): 984.
- [92] WANG L, LUO Z, TANG H, et al. A novel model for dynamic manufacturing service collaboration on industrial internet [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(12): 11788–11799.
- [93] ZHANG Z, QU T, ZHAO K, et al. Optimization model and strategy for dynamic material distribution scheduling based on digital twin: a step towards sustainable manufacturing[J]. Sustainability, 2023, 15(23): 16539.
- [94] 吕岩, 徐正军, 李聪波, 等. 考虑扰动事件的机械加工工艺参数与车间动态调度综合节能优化 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 242–55.
- LV Y, XU Z, LI C, et al. Comprehensive Energy Saving Optimization of Processing Parameters and Job Shop Dynamic Scheduling Considering Disturbance Events[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 242–255.
- [95] ZHAO Z, XIE X, CHEN Q, et al. Graduation-inspired manufacturing system and synchronization mechanism for hybrid assembly cell lines[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 198: 110648.
- [96] YANG C, LIAO F, LAN S, et al. Flexible resource scheduling for software-defined cloud manufacturing with edge computing[J]. Engineering, 2023, 22: 60–70.
- [97] 阴艳超, 梁珉清, 张万达, 等. 基于云边协同的智能数控车间自调控系统研究与实现 [J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(3): 828.
- YIN Y, LIANG M, ZHANG W, et al. Research and implementation of intelligent NC workshop self-regulation system based on cloud-edge collaboration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025, 31(3): 828.
- [98] KUSIAK A. Manufacturing metaverse[J]. Journal of intelligent manufacturing, 2023, 34(6): 2511–2512.
- [99] YANG J, WANG Y, WANG X, et al. Generative AI empowering parallel manufacturing: Building a “6S” collaborative production ecology for manufacturing 5.0 [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024, 54(11): 6522–6536.
- [100] HUANG S, WANG B, LI X, et al. Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution [J]. Journal of manufacturing systems, 2022, 64: 424–428.