

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.230254

面向智能制造的生产运作管理：挑战、科学问题、 关键研究及部分新进展

江志斌^{1,2}, 周利平²

(上海交通大学 1. 安泰经济与管理学院; 2. 中美物流研究院, 上海 200030)

摘要: 简要介绍智能制造的互联、集成、服务、定制、时变等管理特征; 分析了这些特征对生产运作管理提出的挑战, 包括面向数字供应网络的多维度集成、柔性及网络化的生产、自组织优化配置制造资源、去中心化的自主决策与协同控制、学习型运作管理、强大的自优化与适应能力、前瞻性决策等。从价值创造机理、资源组织与重构机理以及生产计划调度体系 3 个方面提炼亟待解决的科学问题; 进一步从融合机理、资源重构方法、生产计划与调度方法以及物流运行管理方法提出关键研究内容。最后介绍了若干智能制造生产运作管理研究新进展, 为生产管理研究和实践提供新思路。

关键词: 智能制造; 生产运作管理; 挑战; 科学问题; 关键研究

中图分类号: F407; C931

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)01-0001-09

Production and Operation Management for Intelligent Manufacturing: Challenges, Scientific Issues, Key Research, and Latest Development

JIANG Zhibin^{1,2}, ZHOU Liping²

(1. Antai College of Economics & Management;

2. Sino-US Global Logistics Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper briefly introduces management characteristics of interconnection, integration, services, customization, and time-varying in intelligent manufacturing. The challenges these characteristics pose to production and operation management is analyzed, including multi-dimensional integration for digital supply networks, flexible and networked production, self-organizing optimization of manufacturing resources, decentralized autonomous decision-making and collaborative control, learning operation management, powerful self optimization and adaptability, forward-looking decision-making, etc. Subsequently, three aspects are identified as scientific issues that need to be addressed: value creation mechanism, resource organization and reconfiguration mechanism, and production planning and scheduling systems. Additionally, four key research directions are proposed: integration mechanism, resource reconfiguration methods, production planning and scheduling methods, and logistics operation and management methods. Finally, this paper highlights latest development in intelligent manufacturing production and operation management, providing new ideas for production management theories and practice.

Key words: intelligent manufacturing; production and operation management; challenges; scientific issues; key research directions

随着自动化技术、信息通讯技术 (information and communications technology, ICT)、互联网技术

和人工智能技术的飞速发展, 全球制造业正从自动化向智能化迈进^[1-3]。目前世界各国都将智能制造作

收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (71931007)

作者简介: 江志斌 (1958—), 男, 安徽省人, 教授, 博士, 主要研究方向为生产与服务运作管理、服务型制造、供应链与物流管理。

为重振制造业的重要抓手^[2]，德国在 2011 年提出《工业 4.0》发展战略，美国先后启动《先进制造伙伴计划》和《美国先进制造业领导力战略》，日本连续多年发布《制造业白皮书》。以智能制造为抓手，推动中国制造业提质增效、由大变强是中国制造业面临的重要问题。《中国制造 2025》明确提出：以新一代 ICT 与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向，实现制造业由大变强的历史跨越^[4]。

智能制造是数字经济与实体经济融合的重要模式，是提升国家整体制造业水平不可忽略的增长引擎，不仅涉及先进制造技术和信息技术，而且需要生产管理创新。生产管理伴随生产活动而诞生，历史上多次产业革命带来的技术变革与生产方式革新促使生产运作管理方法不断进步^[5]。在工业 4.0 背景下，如何把握新环境下的智能制造特征，形成与 ICT 相匹配和融合并支撑智能制造系统高效运行的生产运作管理论及方法，对提升我国智能制造生产管理至关重要。为此，本文首先探索智能制造的管理特征，分析智能制造生产运作管理面临的挑战，厘清智能制造生产运作管理亟待解决的科学问题，并提出关键研究内容。最后介绍若干智能制造生产运作管理研究新进展，为生产管理研究和实践提供新思路。

1 智能制造的管理特征

智能制造系统的主要特征有互联、集成、服务、定制、时变等^[6-7]，这些特征有助于发挥 ICT 的作用，适应企业内外部环境变化，进行更加合理的运作管理决策。具体来看，智能制造系统具有以下主要特征。

物理世界与数字世界的无缝衔接。由互联和具有自主决策能力的机器等制造资源动态组成制造系统，并映射到数字空间。通过在分布式制造基础设施中的机器等制造资源快速集成、反馈和控制循环，从而能够定制输出、优化分配资源，并在构建、组装和生产的物理和虚拟世界(数字空间)之间提供无缝接口^[6]。新一代智能制造正是制造业这一发展趋势的典型表现，智能工厂则是新一代智能制造的主要载体^[8]。智能工厂不仅仅是简单的自动化，而是由物联网、大数据、云计算、边缘计算、

人工智能等 ICT 赋能的敏捷系统^[9]，可以在更广泛的网络中进行自我性能优化，能够在实时或近实时的情况下适应和学习新情况，并自主运行整个生产过程^[10]。智能工厂可以在工厂内运作，也可以连接到由生产系统构成的全球网络，甚至更广泛地连接到数字供应网络。此外，智能工厂不一定是全自动工厂，人通过可穿戴设备和人机交互终端与机器和环境互联，从而接入数字空间，发挥人的智力工作作用^[11]。

面向智能生产的企业多维度集成。智能制造要打破企业运行各环节信息孤岛的局限，实现企业智能生产的多维度集成。横向集成是企业之间通过价值链以及信息网络所实现的一种资源整合，是为了实现各企业间的无缝合作，推动企业间研产供销、经营管理与生产控制、业务与财务全流程的无缝衔接和综合集成，以实现产品开发、生产制造、经营管理等在不同企业间的信息共享和业务协同，合作提供实时产品与服务。不仅如此，在企业内部，还要突破不同层级业务活动的隔离和自上而下的单向分解与控制局限，实现跨越层次的纵向集成，打通从设计、采购、制造、销售和服务全链路业务过程，实现企业内部所有环节信息无缝衔接。端到端集成^[12]是指贯穿整个价值链的工程化数字集成，是在所有终端数字化的前提下实现的基于价值链与不同公司之间的一种整合，从而最大限度地实现个性化定制。端到端集成可以是内部的纵向集成，也可以是外部的企业与企业之间的横向集成，关注点在流程的整合上，比如提供用户订单的全程跟踪协同流程，将用户、企业、第三方物流、售后服务等产品全生命周期服务的端到端集成，个性化定制等。

制造服务化趋势日益显现。在智能制造系统范式中，制造服务化是智能制造的重要特征之一，制造企业由单纯提供产品向提供产品加服务(产品服务系统，product service system, PSS)拓展，由聚焦制造管理到制造与服务融合管理。制造服务化不仅通过服务化提升制造(制造企业向价值链高端的服务拓展，从而获得更大利润空间)，而且通过制造服务化促进服务(创新服务模式、提高服务效率和质量)，是先进制造业和现代服务业深度融合的重要途径。ICT 智能制造系统的广泛应用为制造服务化提供新的发展机遇，使得未来服务化与之前的服务化大相径庭。很多 PSS 的服务是基于互联网技术、

大数据技术、物联网技术以及云计算技术的高附加值服务。

个性化定制制造成为趋势。在新一代 ICT 技术的赋能下, 互联网、物联网、数字化设计与协同等将广泛应用于智能制造系统, 促进企业从设计、采购、生产、销售和服务等全流程的高效协同与管理, 大规模定制与个性化定制制造将成为趋势。面对市场需求的复杂性, 企业需要快速定制化设计与制造产品, 要求制造系统能够快速重构, 供应链敏捷化组织与供应原材料和零部件, 需要产品研发设计、制造系统及供应链的协同。

智能制造系统是复杂时变系统。智能制造系统是一个系统之系统 (system of systems), 技术、客户需求、持续优化和创新等驱动因素推动制造业发展, 使之将传统的零散孤立的制造过程转换为灵活、互联、敏捷的多子系统集成的大系统。智能制造是多个子系统高度协同的结果, 多系统的协同能够保障生产和物流组织的高度协同, 但同时也引起了协同复杂性, 包括复杂系统组分复杂性与治理复杂性, 需要采用从集中控制到多子系统、多主体之间协同的策略, 从而应对制造管理大系统和整体

复杂度。此外, 智能制造系统还是动态时变的, 系统的内外部环境复杂多变, 如客户需求、市场竞争、政策变化等外部环境, 以及生产环境、物料准备、设备状态等内部环境, 其时变性和随机性较强, 需要系统可进化和自学习。

2 智能制造生产运作管理面临的挑战

生产运作管理理论与方法伴随生产活动而诞生, 在产业革命中逐步升华与发展。生产运作管理是立足于社会组织的最基本活动, 旨在高效、灵活、准时、清洁地生产合格产品或提供满意的服务。工业 4.0 与智能制造为生产运作管理提供新的场景与平台、先进的工具与方法。为实现智能制造系统的这些特征, 需要与之相适应的生产运作管理方法。然而, 目前的研究主要停留于刚性和柔性化的生产组织方法、静态或自适应的动态生产调度方式、从单一工厂角度进行优化、在给定场景下基于假设的经典运筹学方法, 丰富的大数据没有得到充分利用, 无法适应智能制造互联、集成、服务、定制、时变等特征。因此, 如图 1 所示, 智能制造生产运作管理面临着新的挑战。

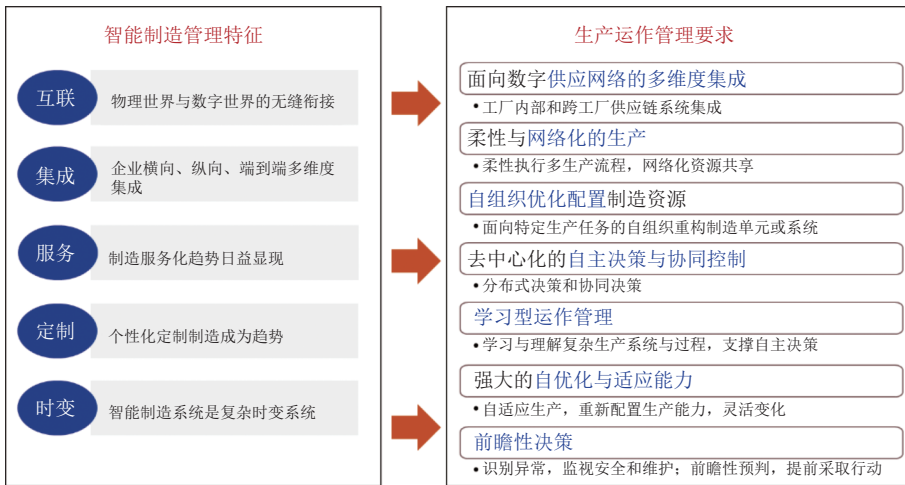


图 1 智能制造生产运作管理面临的挑战

Figure 1 Challenges of production and operation management for intelligent manufacturing

面向数字供应网络的多维度集成。从线性的、顺序的供应链操作转变为互联的、开放的网络化操作系统, 即数字供应网络。通过工厂内部供应链和跨工厂供应链系统的水平集成, 驱动组织运行; 通过互联的制造系统进行垂直集成; 并通过整个价值链进行端到端的整体整合。集成系统范围内的物理

设施、操作和人力资产的数据, 通过数字孪生和其他跨越整个制造网络的活动, 来驱动制造、维护、库存跟踪、操作的数字化^[7]。

柔性 & 网络化的生产。柔性意味着生产系统能够执行不同的生产流程, 要求加工单元具有非常高的可用性。网络化意味着产品制造的所有相关信息

都是不同系统之间实时共享，特别是关于机器故障、订单延迟、零件丢失、人员或资源的信息。

自组织优化配置制造资源。智能工厂是一个系统之系统 (system of systems) 的自组织环境，面向特定生产任务的自组织的生产单位，寻找订单所需的设备和人员，并规划所需的运行时间。而工厂则是一个独立但相互关联的多个子系统或生产单元，每个子系统与机器都具有高度的柔性、效率和自主性。未来的工厂最终成为一个大型系统，由众多的独立运作但又成为整体的小系统组成。

去中心化的自主决策与协同控制。智能制造价值链是分布式的，且依赖复杂的信息和物流，因此需要新的方法来降低制造管理系统的复杂性。在分散式决策模型中，每个独立的网络实体都做出自己的决策，需要价值链合作伙伴之间的协同，提供先进的算法来实现制造业资产全局和局部优化，以对不可预见的变化做出更快和更有效的响应，从而实现订单执行、生产、物料管理、供应链管理和生命周期管理方面的改进。

学习型运作管理。智能制造系统中的机器不仅是被管理对象，还能够从完成的任务中学习并优化设置，然后将这些信息与其他机器共享。通过深度学习产生越来越多的详细、准确和有意义的设备和过程的数字化模型，从而实现能够体现更细微差别和有数据根据的计划；设备获得自主决策权力，在

更高的认知水平上对事件做出响应，并随着时间的推移获得智能。

强大的自优化与适应能力。由于更强大的计算和分析能力以及更广泛的智能资产生态系统，采用物联网和数据，控制系统可以获得它们所需的实时灵活性，无需人为交互或中断过程就能适应生产，能够重新配置生产能力，以大批量生产的效率进行小批量生产，能够适应以前很难做到的变化，并自行实现最优化。

前瞻性决策。被动地响应变化和系统干扰，困难且耗时。因此，需要利用智能制造系统强大的计算和数据分析能力，要求在问题出现之前预测并采取行动，包括识别异常、进货和补充库存、识别和预测质量问题、监视安全和维护问题。

3 智能制造生产运作管理亟待解决的科学问题

目前关于智能制造的研究和应用偏于从 ICT 角度，而生产运作管理角度的研究匮乏。为了应对上述需求和倍增智能制造系统的效率，需要发展面向智能制造资源组织与配置、生产活动管理与控制的生产运作管理理论方法，亟待解决以下 3 个科学问题。具体如图 2 所示。

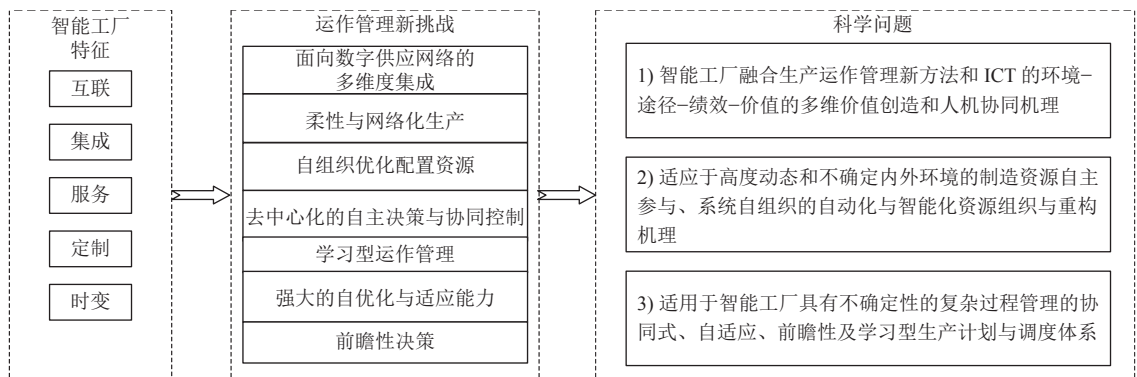


图 2 智能制造生产运作管理亟待解决的科学问题

Figure 2 Urgent scientific issues of production and operation management in intelligent manufacturi

科学问题 1：智能工厂融合生产运作管理新方法和 ICT 的环境-途径-绩效-价值的多维价值创造和人机协同机理。

智能工厂的主要目的是在新市场环境下为企业创造更高的价值。根据凯捷管理顾问公司研究报

告，预计五年内智能工厂可能会使得全球经济增加 5 000 亿到 1.5 万亿美元的价值，未来效率的同比增长率是自 1990 年以来增长率的 7 倍^[15]。智能制造的这一巨大价值创造，不仅与企业 ICT 程度有关，即关键流程 (生产、库存管理、质量、计划和预测) 的数字化

程度, 以及机器人、物联网、人工智能、大数据分析等数字技术的使用量, 而且与企业运作管理的转型与创新有关, 尤其是两者融合有关。一个企业实施智能工厂情况如何(成熟度)没有统一的标准可循, 而且企业实施智能工厂是一个逐步渐进过程, 在不断增长的智能化(自我认知)、不断增长的自主性(自行运转)以及不断增加的协同(自我分布)进程中完善, 不是过去那种一步到位的工厂现代化的方法^[7]。企业如何明确其实施智能工厂的动机, 如资产效率、质量、成本、安全性和可持续性; 如何开始或扩大智能工厂计划的决定应该与组织的特定需求相一致; 如何在企业不同发展阶段选择合适程度的智能工厂, 并采用合适的运作管理方法, 目前也没有参考依据。为此, 需要研究融合生产运作管理方法和 ICT 的创造价值的机理, 亦即在工厂所处的什么样的市场、产品、生产组织方式、制造工艺等企业内外环境和情景下, 通过何种途径(在何种技术使能下, 采取与之适应的何种运作管理方法), 通过工厂的哪种绩效提升(效率、成本、质量、响应变化能力、交期、服务水平等), 创造多大的什么样的价值(价值构成及大小), 并探究这一价值形成随着企业实施智能工厂进程演变的规律, 从而为企业实施智能制造选择合适的运作管理方法和 ICT 提供依据。

科学问题 2: 适应于高度动态和不确定内外环境的制造资源自主参与、系统自组织的自动化与智能化资源组织与重构机理。

智能工厂的根本动因是适应企业内外需求高度动态变化, 包括企业对于产品在品种和数量上的需求变化, 极端情况是定制化产品需求; 还包括企业主动引导的市场变化, 如进入新市场和投放新产品。内部变化包括工厂整合新的工艺、过程或设备, 生产设备和生产线产能变化以及生产过程中的干扰等。智能工厂对于系统变化的响应速度和实时性要求之高, 超出面向多品种小批量制造的柔性制造柔性能力(事先确定备选方案并根据变化选择合适方案), 要求多层次(构建新的生产线或制造单元, 重构生产线或制造单元重新配置, 配置机器加工参数等)快速有效组织和配置制造资源。为此, 要研究物联网支撑的、利用数字孪生技术并通过面向数字供应网络的多维度集成实现的, 制造资源自主参与、系统自组织的自动化和智能化资源组织与

重构的机理, 从而形成敏捷与网络化的生产所需要的强大的自优化与适应能力。包括如何根据变化及程度确定重构目标、采用什么样层次的重构优化决策、如何形式化描述制造资源及如何实现重构过程的自动推理和演算, 为制造资源的鲁棒性、自适应性和预见性、高度实时性的自动化组织与重构提供理论方法。

科学问题 3: 适用于智能工厂具有不确定性的复杂过程管理的协同式、自适应、前瞻性及学习型生产计划与调度体系。

传统的生产计划与调度体系是一种集中计划和控制, 物料需求和生产计划是系统地建立在对数量、期限和能力的连续规划的基础上, 适应于大规模生产或多品种生产稳定的生产环境。从智能工厂生产运作管理的角度, 由于作为生产系统输入的产品品种和需求的高度动态变化及不确定性, 以及生产系统本身的变化和不确定性(如制造与采购提前期、制造周期、设备加工能力等参数), 生产环境多变且不确定, 因此, 传统生产计划与调度体系不再适用。要打破销售、制造、采购及设计各制造环节信息孤岛的局限, 实现内部供应链各环节以及跨工厂的横向集成。不仅如此, 还要突破生产计划与调度层次的隔离和自上而下的单向分解与控制局限, 实现跨越层次的纵向集成。通过纵横向各环节和上下层次自主决策和彼此之间协调, 实现分布式协同优化计划与调度模式。此外, 由于产品需求、产品结构变化、设备能力、提前期等系统输入和系统参数的变化或不确定, 涉及需求预测、库存管理、物流需求计划、车间作业计划和调度控制、制造物流管理等环节基于机理模型的集中式优化与控制决策方法不再适用, 要发展基于制造资源互联、大数据分析、机器学习、数字孪生等 ICT 的新的生产计划方法和应对当前和未来变化和干扰的自适应和前瞻(主动式)调度方法, 从而形成适用于智能工厂复杂过程管理的协同式、自适应性、前瞻性及学习型生产计划与调度体系。

4 智能制造生产运作管理的关键研究方向

4.1 新信息技术与运作管理理论方法的融合机理
智能制造生产运作管理与 ICT 的耦合形式多样

且形态各异,其耦合产生的价值具有复杂的内涵。一方面,对于不同行业、场景、产品类型的智能工厂,两者耦合的程度、作用方式不同,耦合产生价值的条件也不同,因此其组织制造资源和生产活动,将原材料变为产品进而创造价值的方式与途径是不同的。另一方面,运作管理对应人的能力,信息技术对应机器的智能化水平,智能工厂中的人机关系不再是单纯的指令与被指令的关系,而是更加复杂的相互协作的价值共创关系。为此,需要合理地量化度量智能制造生产运作管理与 ICT 耦合产生的价值,并研究不同智能制造系统中二者耦合形成的价值创造途径与条件。此外,人在智能工厂中作用方式变化,人的智力工作会更加重要。在复杂的制造场景下,通过可穿戴设备或人机交互设备,人与机器交互及与环境交互,深度融合进行决策,为生产运作管理与 ICT 耦合提供更好的决策支持。

具体来看,首先要从运营管理能力与数字化水平多维度定量建立智能制造企业成熟度和多维价值衡量体系,针对不同的耦合环节,提取涉及资产效率、资源利用率、质量、经济效益、安全性和可持续性、客户满意度、竞争力等方面的价值指标。其次,需要研究生产运作管理与 ICT 耦合的智能制造多维度价值增值路径与影响因素,依据两者的关联形态,定量刻画两者在生产配置、运行及产出等多个环节上耦合产生的价值作用要素、作用途径、影响指标与影响强度。此外,研究复杂人机关联形态与价值协同机理,利用形式化方法定义人类智能与计算机智能的协同场景,包括对人类知识与智能算法在不同生产场景的关联形态、协同途径的形式化描述。

4.2 动态环境下的制造资源敏捷化重构方法

智能制造环境下市场需求的动态变化、制造企业自身能力的变动、内部不确定性的增大,传统面向稳定的产品生产的资源配置与生产组织优化方法无法支撑智能制造实际场景的高度动态变化与系统的不确定性,即便是柔性制造系统(在实现确定的柔性方案中根据情况和需求变化选择或切换)也不足以适应。一方面动态变化和不确定性的内外部制造环境对生产资源制造和配置提出新的要求,需要自适应并实时或近实时的学习新的环境条件,自组织地完成制造资源的动态配置,实现面向变化的快速响应。另一方面,由于在智能制造系统中,物联

网、大数据、人工智能等新信息技术实现制造资源、人、加工工件(通过装载的智能托盘)互联而且具有自主决策功能,使得资源和系统高效动态组织和重构成为可能。为此,需要从产品制造需求特征、生产系统特征与外部条件出发,研究动态环境下的制造资源敏捷化重构方法。

具体来看,面对智能工厂动态变化的制造环境,包括产品种类的变化、需求量的变化、设备能力变化等,研究制造系统动态重构架构与重组机制,提出描述基于制造资源自主参与、系统自动重构的智能生产单元重构过程的逻辑描述模型,用于系统分析和运行控制执行。其次,为实现复杂制造系统敏捷与实时的重构,满足高端动态变化的产品制造需求,需要研究考虑可重构的智能制造资源自组织动态配置决策优化方法。

4.3 网络化协同生产计划与自适应前瞻性调度

网络化制造、全球运维、服务型制造等场景提高了智能制造网络各环节横向集成、计划调度跨层次纵向集成等要求,催生了企业间协同式计划调度决策的新需求。此外,互联的制造主体和资源具有自主交互和决策能力,使得其以自治的方式参与计划调度决策成为可能。同时,为应对高度动态变化环境与系统不确定性,需要发展前瞻性及学习型计划与调度新方法。因此,研究协同式、前瞻性、数据驱动及学习型生产计划调度体系,实现比传统调度模式更好的扰动响应能力和异常解决能力是生产运作管理未来的发展方向之一。

具体来看,智能制造面对的是由企业内部供应链及其外部上下游工厂和并行工厂形成的供应链网络,产品需求高度变化,需要研究定型产品智能制造网络的生产计划分布式协同决策方法。另外,针对定制化产品制造模式下,产品的 BOM 结构和提前期不确定,需要研究考虑这些关键参数不确定的渐进式生产计划方法。此外,需要利用智能制造实时获取数据的优势,研究基于自主决策和协调机制研究实时自适应重调度方法,以便发生新的变更和扰动时能够及时调整调度计划。考虑到在复杂制造环境中人的智能和经验优势,需要研究考虑人的智能并借鉴人的调度经验的基于人机协同混合增强智能的调度方法。

4.4 敏捷与自适应物流系统运行管理方法

物流是智能制造生产组织过程中不可或缺的部分

分。由于智能制造资源动态重组、面向多种产品甚至定制产品生产计划与调度的高度动态变化以及生产过程的大量不确定性, 工厂物流结构必须从传统的刚性、封闭的物流系统结构向开放式、敏捷性、可重构体系转变; 从集中决策到互联的物流系统资源(生产机器、制造单元、智慧托盘、AGV、智能移动机器人、协同机器人、自动分拣、存储系统等构件以及附加了RFID的工件)自主和分散式决策控制模式转变; 从按照事先制定的计划执行到视情况而变、甚至超前预判的自适应调度控制转变。因此, 需要研究敏捷与自适应物流系统运行管理方法。

具体来看, 为了适应智能工厂开放式、敏捷性、可重构物流系统与控制架构需要, 需要研究面向产品加工制造任务的智能工厂车间物流开放式敏捷化重组与控制系统架构, 以及与之相配合的基于自治与协调的智能工厂物流决策优化方法。此外, 智能制造物流运行计划要通过根据场景和任务派遣和调度具体的物流活动来实现, 为了应对上述物流计划执行过程中不可避免出现的变化(生产数量增减、时间变更、制造工艺变更等)和干扰(物流设备故障、系统死锁、路径拥堵等), 需要研究基于自治和协调的物流系统运行自适应调度控制方法。

5 智能制造生产运作管理若干研究新进展

5.1 面向智能制造的服务型制造供应链绩效研究

制造服务化是制造企业为实现业务差异化、增加收益流, 并推动产业转型升级而采取的关键战略与商业模式, 制造服务化如何影响企业供应链的总体绩效是重要的研究方向。已有文献研究制造服务化对于企业财务绩效、组织效率、创新能力和客户价值增长等有正面的影响^[14-16], 但也有文献研究制造服务化对于企业财务绩效的负面影响^[17-18]。近几年, 文献[19]和[20]采用田野实验的方法研究物流运输服务中引入人经验的算法后人机协同的效率、员工激励、物流成本等绩效的变化, 得出在物流运输服务中人机协同的最佳节点, 并进一步研究服务化对传统制造企业的牛鞭效应的影响, 揭示制造商提供的服务对需求可变性和公司内部牛鞭效应(需求扭曲)的影响。研究发现, 制造企业的产品互补型服务和产品替代型服务对降低牛鞭效应的不同方

面有不同效果, 产品互补型服务(例如维修服务)利于帮助企业降低下游传导上来的需求波动性, 而产品替代型服务(例如租赁服务)则利于降低企业内生产波动性对需求波动性的偏差, 即企业内部的牛鞭效应。此外, 以上研究还揭示了制造服务化带来的客户信息共享是平滑下游需求的机制, 而制造服务化带来的生产效率提升是降低企业内牛鞭效应的机制。该研究的结论揭示了制造服务化在供应链层面带来的优势, 即通过不同的服务解决供应链上的低效率问题。

5.2 智能制造可重构制造系统配置优化研究

在可重构的智能制造系统中, 生产线和设备可以根据产品种类、批量大小等需求快速变化而进行灵活的调整和重新配置。面向典型的可重构制造流水线系统, 文献[16]研究考虑需求不确定性, 建立最小化配置成本、重构成本、期望库存和延期成本的随机整数规划模型, 以进行可重构流水线配置优化与生产计划的联合决策优化。由于可重构机床的模块化特性, 重构决策不仅涉及机床配置的转移, 还需要将配置变化后的机床转移到新的工序上, 使得整数规划模型中将包含大量的配置和重构决策, 且这些变量均为整数变量, 随着工序数、配置数和规划周期的增多, 问题规模和求解难度急剧增大, 导致常规的商用求解器求解效率降低。该研究通过对新模型进行线性松弛, 利用列生成算法求得松弛后模型的最优解, 并将该最优解中包含的变量重新约束为整数变量, 进而大大缩减原模型中包含的变量数, 提高求解速度。结果表明, 在需求不确定的情况下, 该模型能较好地降低配置和重构成本以及总成本, 同时研究提出的列生成算法在求解该类整数规划问题时有较大的效率优势。

5.3 定制产品智能制造网络的生产计划与交付协同优化决策研究

随着工业4.0的不断发展, 智能工厂通过采用网络化生产模式, 从而实现多工厂生产的响应速度快、成本低、灵活性和弹性高等优点。然而在多工厂生产环境下, 制造商在收到来自不同地区的订单后必须将多个订单分配给具有不同生产能力、处理时间、生产和库存成本以及地点的异质工厂, 同时安排生产完成后的运输交付。目前有很多学者研究生产与运输集成调度问题^[21-25], 以便快速有效地组织生产和运输, 实现需求的快速响应。为了解决智

能制造供应链网络生产和交付集成调度的难点,文献 [26] 针对按订单生产的复杂的生产分销网络,考虑订单的可拆分性,聚焦于多工厂协同生产、库存和两阶段交付的集成问题,目标是 최소화生产成本、运输成本、延期成本和库存成本完成生产和交付综合调度决策。首先研究将问题建立为一个混合整数规划模型,并通过证明该问题为 NP 难且不存在近似算法具有恒定的最坏情况比率来分析其求解难度。而后基于为每个作业选择一个可行调度的思想,研究将该问题重新构建为带约束的集合划分问题,其为一个二元整数线性规划模型。为解决此二元整数线性规划模型,研究提出列生成和迭代两次列枚举结合的算法,以应对大规模整数规划中变量和约束数量巨大引起计算困难的问题。算法首先通过松弛部分复杂约束并利用列生成求解松弛问题,然后进行第一次列枚举并在第一次列枚举的集合下求原问题并进行第二次列枚举,而后对最终的列枚举整数规划问题。最终,基于中国一家定制家具企业实际数据,研究进行了大量的数值实验,并将提出的算法与 4 种方法进行对比以证明算法的优越性,并分析各种参数对算法和各个成本的影响。

5.4 智能柔性装配系统的排产与零部件投料联合调度优化研究

生产物流是智能制造系统的重要组成部分,是对工厂内部原材料、半成品、在制品、成品等所有物料全过程的流动管理,旨在保障生产各环节的物料按照既定时间、数量和质量要求。在智能工厂中,通常采用自动导向车 (AGV) 替代传统人力执行物料搬运任务。理论上,AGV 替代人工,可以大幅降低人力成本、减少因人导致的不确定事件、提高供料的稳定性。但很多企业智能装配线的生产和物流配送活动各自为政,导致生产和物流活动脱节,出现因物料配送不及时而导致停线的情况。已有文献研究流水线或装配线车间的生产与物流配送协同计划^[27-29],但这些研究没有考虑 AGV 的充电过程。在当前很多实际工厂中,都是采用阈值策略来进行 AGV 充电管理,当低于某一阈值就必须访问充电站充电并直至充满才可离开。该规则降低了 AGV 的使用率,容易造成投料不及时。由于不同的订单对于产品的定制化程度和需求数量不同,AGV 的一次投料所能完成的产品数量是不同的。目前有研究通过构建单装配线多工作站与多投料机

器人协同调度优化模型,以所有订单的总完工时间最短为目标,以订单生产顺序、物料配送作业的分解、各投料机器人的物料配送作业执行顺序、各投料机器人的开始和结束充电时间为决策,并考虑供料机器人的载重量和电池容量约束。基于该模型,提出最优的供料数量决策,分析最优充电决策的结构性质以及生产和物流配送活动的耦合机理,并提出基于“分解-合并”的启发式迭代求解算法。该算法以拉格朗日松弛技术为基础,通过对生产与物流耦合约束的松弛,将复杂的协同调度优化问题分解为易于处理的排产子问题和物流配送子问题,设计合并子问题解的局部搜索算子以提升解的质量,并在次梯度算法框架下通过迭代搜索到高质量的原问题解。

6 结束语

制造强国建设是我国重大战略,物联网、大数据、云计算、人工智能等 ICT 赋能的智能制造为我国强国建设带来了历史机遇。在工业 4.0 背景下,ICT 提高了智能制造系统的互联和透明性,改变了系统中信息交互和工作的方式,进而需要生产管理也进行相应的变革。这要求智能制造的生产运作管理具有互联、集成、服务、定制和时变等特征。历史上数次工业革命都有相应的生产运作管理方法的变革与创新,智能制造需要先进制造与信息技术和生产管理创新双轮驱动。但相比于智能制造 ICT 的发展和应用,当前智能制造生产运作管理的相关研究还相对滞后。本文主要介绍智能制造生产运作管理面临的挑战、科学问题、关键研究和部分新进展,旨在为国内外同行在相关领域的研究提供思路。

参考文献:

- [1] WANG S, WAN J, ZHANG D, et al. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination[J]. *Computer Networks*, 2016, 101: 158-168.
- [2] ZHONG R Y, XU X, KLOTZ E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 616-630.
- [3] EGGER J, MASOOD T. Augmented reality in support of intelligent manufacturing—a systematic literature review[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 140: 106195.
- [4] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU Ji. Intelligent manufacturing — Main direction of "Made

- in China 2025"[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [5] 张曙. 工业 4.0 和智能制造 [J]. *机械设计与制造工程*, 2014, 43(8): 1-5.
ZHANG Shu. The industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2014, 43(8): 1-5.
- [6] FOGAL D, RAUSCHECKER U, LANCTOT P, et al. IEC white paper: Factory of the future[EB/OL]. (2015-10-11). <https://www.iec.ch/basecamp/factory-future>.
- [7] BURKE R, LAAPER S, HARTIGAN M, et al. The smart factory: Responsive, adaptive, connected manufacturing[EB/OL]. (2017-08-31). <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/smart-factory-connected-manufacturing.html>.
- [8] 卢秉恒, 邵新宇, 张俊, 等. 离散型制造智能工厂发展战略 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(4): 44-50.
LU Bingheng, SHAO Xinyu, ZHANG Jun, et al. Development strategy for intelligent factory in discrete manufacturing[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 44-50.
- [9] LI B H, HOU B C, YU W T, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18: 86-96.
- [10] HARTWEG E. Smart factories-self-organizing production units[C/OL]/25th Annual Conference on POMS Impact and Vision: Reaching New Hights. Atlanta, USA: 2014 (2014-05-12). https://www.pomsmeetings.org/ConfProceedings/051/FullPapers/final_full_paper.htm.
- [11] 常建永. 浅谈智能制造的核心价值与新特点 [J]. *工业技术创新*, 2016, 3 (5): 1031-1033.
CHANG Jianyong. On core value and new characteristics of intelligent manufacturing[J]. *Industrial Technology Innovation*, 2016, 3 (5): 1031-1033
- [12] CHU Y L, LENG P K, FU H C, et al. Research on key technologies of service quality optimization for industrial IoT 5G network for intelligent manufacturing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(3-4): 1071-1080.
- [13] ROSSMANN M, KHADIKAR A, LE FRANC P, et al. Smart factories: how can manufacturers realize the potential of digital industrial revolution[EB/OL]. (2017-12-10). <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/05/smart-factories-how-can-manufacturers-realize-the-potential-of-digital-industrial-revolution.pdf>.
- [14] BUSTINZA O F, PARRY G C, VENDRELL-HERRERO F. Supply and demand chain management: The effect of adding services to product offerings[J]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2013, 18(6): 618-629.
- [15] GRUBIC T. Servitization and remote monitoring technology: A literature review and research agenda[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2014, 25(1): 100-124.
- [16] CHOO A, NARAYANAN S, SRINIVASAN R, et al. Introducing goods innovation, service innovation, or both? Investigating the tension in managing innovation revenue streams for manufacturing and service firms[J]. *Journal of Operations Management*, 2021, 67(6): 704-728.
- [17] BAINES T, LIGHTFOOT H. Lean enterprise models as a framework for servitization and value proposition design[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(2): 283-295.
- [18] SZÁSZ L, DEMETER K, BOER H, et al. Servitization of manufacturing: The effect of economic context[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2017, 28(8): 1011-1034.
- [19] NIU Y, JIANG Z. Servitization in cross-border relationships: investigating the effects of global supply chain dependence on the servitization level of the manufacturers[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2023, 44(1): 260-291.
- [20] NIU Y, JIANG Z, WANG K. Preparation of Papers for IFAC Conferences & Symposia: Exploring servitization from value creation path: a systematic review on empirical investigation[J/OL]. *IFAC-Papers Online*, 2019, 52 (3) : 1222-1228 (2019-08). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.365>.
- [21] CUI F, GENG N, JIANG Z, et al. A stochastic programming approach for configuration optimization of reconfigurable manufacturing systems[C]/2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Singapore: IEEE, 2020.
- [22] CHEN Z L, PUNDOOR G. Order assignment and scheduling in a supply chain[J]. *Operations Research*, 2006, 54(3): 555-572.
- [23] STEINRÜCKE M. Integrated production, distribution and scheduling in the aluminium industry: A continuous-time MILP model and decomposition method[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(19): 5912-5930.
- [24] HE Z, GUO Z, WANG J. Integrated scheduling of production and distribution operations in a global MTO supply chain[J]. *Enterprise Information Systems*, 2019, 3(4): 490-514.
- [25] HAN D, YANG Y, WANG D, et al. Integrated production, inventory, and outbound distribution operations with fixed departure times in a three-stage supply chain[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 125: 334-347.
- [26] LIU K, JIANG Z, ZHOU L. Integrated multi-plant collaborative production, inventory, and hub-spoke delivery of make-to-order products[J/OL]. *IIEE Transactions*, 2023 (2023-10-16). <https://doi.org/10.1080/24725834.2023.2272261>.
- [27] ANWAR M F, NAGI R. Integrated scheduling of material handling and manufacturing activities for just-in-time production of complex assemblies[J]. *International Journal of Production Research*, 1998, 36(3): 653-681.
- [28] ELMI A, TOPALOGLU S. Scheduling multiple parts in hybrid flow shop robotic cells served by a single robot[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 27(12): 1144-1159.
- [29] FAZLOLLAHTABAR H. Scheduling of multiple autonomous guided vehicles for an assembly line using minimum cost network flow[J]. *Applied Intelligence*, 2018, 11: 185-193.