

互联开放式协同制造系统研究进展分析

唐敦兵,张毅

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要: 互联开放式协同制造方法不仅提升了用户个性化需求的响应速度,而且促进了制造商闲置制造资源的高效利用与增加经济创收。通过对近 5 年来国内外相关文献的综述,从制造模式、技术框架以及关键技术等方面阐述了互联开放式协同制造系统的研究现状。重点围绕分布式制造资源云端化接入、制造任务与制造资源匹配、分布式制造资源优化配置、制造服务互信协作等关键技术,分析了已取得的研究成果,也指出了现存的一些挑战。针对上述挑战,提出了一些未来研究思路。

关键词: 云制造;服务化封装;制造服务匹配;制造资源优化配置;区块链

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)04-0001-05

Analysison Research Progress of Interconnected Open Collaborative Manufacturing System

TANG Dunbing, ZHANG Yi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The interconnected and open collaborative manufacturing method not only efficientimproves the response speed of users' personalized needs, but also promotes the utilization of manufacturers' idle manufacturing resources and increases economic income. By reviewing the relevant literature in recent five years, this paper expounds the research status of interconnected open collaborative manufacturing system from the aspects of manufacturing mode, technical framework and key technologies. Focusing on the key technologies such as cloud access of distributed manufacturing resources, matching between manufacturing tasks and manufacturing resources, optimal allocation of distributed manufacturing resources, mutual trust and cooperation of manufacturing services, this paper analyzes the research results and points out some existing challenges. In regard to above challenges, some future research ideas are put forward.

Keywords: cloud manufacturing; service encapsulation; manufacturing service matching; optimal allocation of manufacturing resources; blockchain

0 引言

受经济全球化和市场多元化影响,社会 and 用户对于产品的需求愈发趋于多样化、个性化和动态化,造成产品种类不断增加、批量不断缩小,需求响应周期越来越短,迫使制造企业智能化转型升级。传统的以企业为主导地位的设计制造模式已经愈发跟不上互联网时代的节奏^[1]。互联网技术的发展打破了用户与企业之间信息不对称的局面,用户不再满足于被动选择产品的角色,而是希望可以参与到整个制造过程中去,个性化定制和广泛的用户参与成为制造业的新特征。

在这种趋势下,越来越多的制造企业意识到垂直集中式的组织结构已无法适应当前用户主导、灵活多变的市场

需求,开始逐渐向“平台型组织”和扁平化生产经营方式变革。传统大而全的企业业务架构亦开始向专而精转型,不再追求覆盖产品设计、制造、装配、销售等产品全生命周期活动,而是聚焦于核心业务能力,将非核心业务外包/众包,使企业能及时响应市场变化并占据领先地位。

与此同时,日益细分的全球化市场需求促使分散的社会化制造服务资源不断涌现,产业链制造环节呈现出深度剥离的趋势,制造资源逐渐向产业链的上下游投放。海量的社会化制造资源与迅速发展的互联网、物联网和物流网无缝连接,形成复杂的网络化协同制造系统,通过对外提供广泛的、专业化的生产性服务和产品服务,实时满足不同的个性化定制需求。

在过去的几十年里,中国制造业不断融入“全球化”的发展过程,逐步积累建立起了高效垂直分工和水平分工

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075257);国家重点研发计划项目(2020YFB170500);江苏省重点研发计划项目(BE2021091)

第一作者简介: 唐敦兵(1972—),男,湖北仙桃人,教授,工学博士,现任南京航空航天大学无锡研究院院长,南京航空航天大学机电学院博士生导师,江苏省高校青蓝工程“智能制造技术与装备”科技创新团队带头人。长期致力于智能制造技术领域的研究,获国家万人计划科技创新领军人才、德国洪堡学者称号,入选江苏特聘教授、江苏省杰出青年基金、江苏省 333 人才工程(第二层次),获霍英东教育基金会青年教师基金、教育部新世纪优秀人才支持计划。获国家科技进步二等奖 1 项、省部级奖励 4 项。

体系的产业链和供应链。目前我国是全世界唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类的国家。同时,得益于新一代网络技术、通信技术、传感技术和人工智能技术等的高速发展,互联网正在不断地深化改变制造业的生产模式。《中国制造 2025》中明确提出^[2],要充分发挥互联网在生产要素配置中的优化和集成作用,加快制造与服务的协同发展,推动商业模式创新和业态创新,促进生产型制造向服务型制造转变。在工业互联网环境下,利益相关者网络的组织架构(含用户、设计商、制造商、服务商及其他利益攸关方等)发生了巨大的变化,逐步向着“互联、融合、协作”的方向发展,利益相关者之间不再是层级式供应链关系,逐渐形成一种去中心化的、分布式利益相关者共创价值的互联开放式协同创新模式。

1 当前制造模式面临的挑战

从市场营销学和消费心理学的角度来看,价值是用户对某一营销供应品相对于其他的竞争营销品所带来的收益(感知得利)和成本(感知得失)之间差异的评价。互联网时代下用户价值意识逐步提高,如何满足用户个性化、多样化、动态化的需求已经成为制造企业提升市场竞争力的重要手段。

为适应互联网时代下快速多变的市场需求,国内外学者提出了敏捷制造^[3]、云制造^[1]、物联制造^[4]、社群化制造^[5]等网络化制造模式。这些制造模式的共同特点是以快速响应市场需求和提高制造商(企业群体)竞争力为主要目标,基于互联网和云服务平台,构建面向特定需求的制造生态系统,实现企业间的协同和社会化资源的共享与集成,进而高效、高质量、低成本地为市场和用户提供所需的产品和服务。但是由于平台运营商对分散制造资源进行集中运营管理、调度和配置,使责、权、利的高度集中,可能引发个体与群体利益不均衡,需求与产能匹配不均衡等问题。

目前,互联网环境下动态多变的供需关系和利益相关者网络组织架构,使得产品的生产流程不再是以某个(或几个)生产者的集中管控形式为主导,具备不同知识与能力的利益相关者们将为实现相同目标需求而进行自组织交互、协作、融合,共同创造价值,整个制造过程也由个体内部活动拓展为利益相关者间的协作行为。这一显著趋势完全颠覆了封闭集中式的制造理念,但是由于用户和利益相关者的无序、随机参与,使得原有的过程管理与调控方法不再适用于当前的互联网环境。虽然这种以开放式创新为特点的“互联网+”制造形态已经得到了充分的认可^[6-8],但是仍然缺乏有效的理论方法和智能化技术。因此,必须要找到一种全新的制造模式来适应这种“由传统向互联、开放、共享、协同转变”的模式变动。

2 互联开放式协同制造关键技术

2.1 分布式制造资源云端化接入

互联开放式协同制造是通过工业互联网,将地理位置

上分散的制造企业及其各种制造资源集成在一起,形成一个逻辑上集中、物理上分散的虚拟资源池,并通过制造任务与资源池中制造资源模块的匹配与调度,实现对定制化服务需求的快速响应。因此,分布式制造资源的云端化接入成为互联协同制造首先要解决的问题。

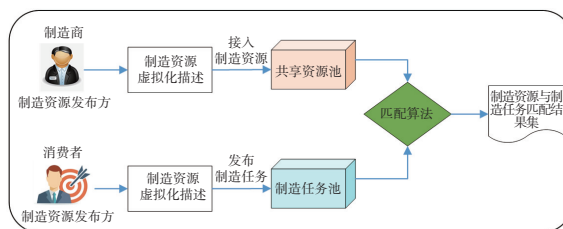
在制造资源虚拟化方面,李孝斌等^[9]提出并构建了一种基于语义服务建模本体的机床装备资源描述框架;高长元等^[10]结合面向对象的思想与 XML 技术对制造资源进行建模。赵旭等^[11]研究网络化协作加工设备的属性构成,并对网络化协作加工设备进行描述与建模。BHATTACHARYA A 等^[12]阐述了如何利用本体模型来定义语义和关系来表征电子学习、业务建模支持和制造过程细节的对象/模块,展示了如何将这些不同的本体模型链接起来,从而实现跨平台兼容性。QIAN C 等^[13]提出了一种异构异能制造资源通用化建模方法,采用本体建模技术来建立面向增材与减材制造资源的服务化封装模型,实现多类型制造资源标准化接入至协同制造平台,方便了对分布式制造资源的访问与调用。

在制造资源数据接入方面,张霖等^[14]对制造资源进行归类,并对不同类型资源构建相应的感知及虚拟接入方式。张宪民等^[15]提出通过传感网(WSN、TSN等)与物联网(RFID、无线数据通信等)突破现场设备工业协议不标准问题,实现设备层静态属性与动态服务属性两类数据的获取。柴卓等^[16]提出通过多接入边缘计算技术(容器、NB-IoT 协议)解决大规模传感网高频次、高带宽的实时传输与处理,实现产线层数据获取与集成。赵龙乾^[17]、满君丰等^[18]通过云边协同与边缘网关技术(MQTT 协议等)保证海量工业数据的远程传输和安全,实现云资源层数据融合。

通过上述研究发现,基于 RFID 技术、传感器技术、自动化控制技术和信息管理技术的融合应用,使得分布式制造资源数据往云端的实时高效接入成为现实。然而上述制造资源接入方法仍存在不足之处:1)制造资源描述的真实性与准确性无法考证;2)如何保证数据在互联开放环境下传输的安全性与私密性。以上问题可能对协同制造运营环境的安全造成威胁。

2.2 制造任务与制造资源匹配

现阶段,广泛且分散的闲置制造资源与资源需求方之间缺乏互通性与关联性,无法为其提供精准的制造服务,间接造成了网络协同制造过程供需结构错配、制造成本上升。如图 1 所示,学者们提出了制造任务与制造资源匹配方法,从共享资源池中准确选择出合适且优质的制造资源为消费者提供所需的个性化制造服务。



在制造任务与制造资源的匹配方面,通常采用的是基于语义的匹配方法,而目前研究热点主要是寻求高效合理的匹配算法。LIU J 等^[19]考虑到历史信息对服务推荐的指导作用,构建了基于 QoS 预测的服务推荐模型,通过聚类算法和信任感知方法构建出候选资源池。李慧芳等^[20]考虑云制造资源的多样性与复杂性特点,通过服务资源本体间的概念相似度构建初始候选资源集,之后构建 QoS 匹配函数求取综合匹配度得到最优候选资源。ZHANG M 等^[21]讨论了容量约束下的聚合资源的匹配问题,针对客户需求,以最小化任务总成本以及任务时间为目标提出一种基于遗传算法的最优服务资源匹配方法。郭云欣^[22]针对汽车生产车间的协同制造资源与制造任务的匹配,在减少制造成本和加工时间的同时,以提高制造质量、降低资源负荷为优化目标,提出基于粒子群算法参数优化的改进萤火虫算法,运用于任务与资源的匹配。李新等^[23]通过构建制造资源本体与制造任务本体之间的映射进行匹配求解,将二者的匹配分为状态、领域、功能、服务以及综合 5 个匹配维度去衡量资源与任务之间的匹配度。李成海

等^[24]则在现有基于 Web 的服务资源描述及发现框架下,建立了服务资源属性的标准化分类描述模型,规范了服务资源检索关键词,构建服务资源属性集字典和检索同义词字典,通过规范化后的检索词与服务资源属性字典的匹配算法实现对服务资源的综合匹配。

综上所述,用于制造资源与制造任务匹配的主流方法可以描述为:首先建立制造资源与制造任务的标准化描述模型,然后基于语义关联关系计算两者间匹配度,获得匹配结果。然而,上述匹配方法的计算复杂度高,仅适用于制造资源数量少、属性少的案例场景中,且匹配效率较低。

2.3 分布式制造资源优化配置

服务组合是结合多种制造服务构建增值服务的重要技术,其主要目的是对分布式供应商提供的制造资源和制造服务进行集中化组织与配置,来满足消费者高度定制化制造需求,如图 2 所示。在这一过程中,需要研究一种制造资源优化配置方法,用于求解满足个性化任务需求的最优化且优质的制造服务组合方案。

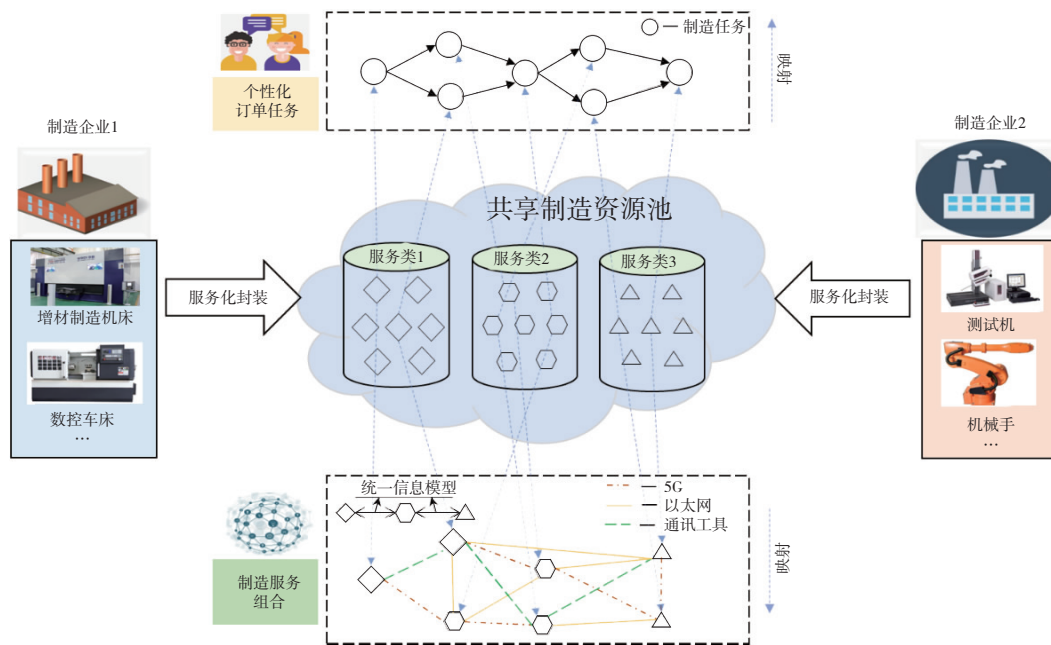


图 2 分布式制造资源优化配置

从文献综述来看,目前主要方法包括 3 种类型:基于启发式算法、基于数据驱动、基于复杂网络。基于启发式算法的资源配置方法:LI F 等^[25]提出了一种基于改进蚁群算法的多任务两级调度模型,优化目标是获取一个不仅对单个任务快速完成有益,而且对整个云平台有益的调度解。LAILI Y J 等^[26]提出了云制造环境下混合任务的多阶段集成调度模型,包括订单优先级分配、供应商和生产过程选择以及生产线调度。与传统的分离调度模型相比,实验证明所提出的集成调度模型获取的多目标解具有更好的性能表现,尤其在多个复杂订单的同时调度情况下。王天日等^[27]针对多用户的个性化任务需求,将制造服务之间的竞争与合作协同效应引入云服务调度模型中,构建了以最大化用户平均满意度和云服务协同效应为优化目

标的服务选择与调度模型,并提出了一种集成灰狼优化与模拟退火的优化算法对该模型进行求解,实验证明该方法显著提高了 Pareto 解的质量。NASERI A 等^[28]则在基于 QoS 优选服务组合的基础上,提出了一种新的混合方法实现高效服务优选组合,采用粒子群优化算法求解适应度函数选择最佳服务。基于数据驱动的资源配置方法:ZHOU L F 等^[29]提出了一种基于动态数据驱动仿真的调度方法,基于候选服务的服务时间、物流时间和子任务队列状态分别设计了 3 种单一调度规则和 3 种组合调度规则,然后在 Simio 软件中构建并仿真了所提出调度策略模型;最终通过云制造中的数控加工实例,验证了该方法的有效性。基于复杂网络的资源配置方法:ZHANG Y 等^[30]提出了社会化制造环境下制造资源柔性配置方法,通过本

体技术实现资源-任务间的语义匹配,采用 NSGA-III 算法选择满足多目标优化的制造服务组合。基于历史合作数据构建制造资源协同网络模型,并基于 Louvain 算法挖掘协同网络中关系紧密的制造社区,用于快速响应个性化订单需求与生产异常情况。表 1 中列出常用的制造资源优化配置算法。

表 1 常用的制造资源优化配置算法

算法名称	算法机制
蚁群算法	基于信息素的更新机制,获得最优解
遗传算法	基于基因种群的迭代优化,获得最优解
灰狼算法	基于灰狼的捕食猎物策略,获得最优解
粒子群算法	基于鸟群的觅食行为策略,获得最优解
离散事件仿真	基于实时数据驱动仿真环境,选择最佳调度规则
复杂网络	基于资源节点间合作紧密程度划分制造社区

2.4 分布式制造资源互信协作

互联开放式协同制造系统的主要特点是按需服务,根据用户的动态需求提供服务,实现分布式制造资源和制造能力的共享与整合。云制造为制造业的转型升级提供了便利和动力,但在实现资源的共享、整合和协同的过程中也显现出新的安全问题。由于制造资源的分散性和开放性,云服务平台中制造资源的真实性和安全性难以保障,协同交易信息的完整性和可信性也使得部分企业用户持有怀疑的态度。针对上述问题,安全、透明、可信任的制造资源交易环境成为当前分布式制造系统的迫切需求。结合区块链的去中心化和不可篡改性优点,研究者们将区块链技术引入开放式协同制造环境中,实现一种安全可信的云制造服务交易平台。

区块链本质上是一种去中心化的分布式账本,核心组件是智能合约和共识机制^[31]。其通过共识机制来生成和存储数据,利用智能合约作为底层技术支撑,从而赋予区块链更强的扩展性和更高的灵活性^[32]。徐杨杨等^[33]针对云制造中资源分配的问题提出了基于区块链的云制造资源分配方法,设计了面向云制造的制造资源校验合约和制造资源交易合约,为虚拟化制造资源交易提供了一种安全可靠的协同机制。陈婷灵^[34]研究了区块链中共识算法实现分布式节点的信息对称问题,然后研究了数据的可信储存,利用加密和混合链实现云制造中交易信息的防伪溯源,并基于所提出的共识算法和溯源算法实现云制造服务交易可信平台。王强等^[35]针对当前云制造服务平台制造服务交易过程中存在的安全和信任问题,提出了一种基于区块链的制造服务可信交易方法,设计了基于智能合约的制造服务匹配及交易流程,有效提高了云制造服务平台的可信度和系统的整体效率。杜兰等^[36]利用区块链技术提出了基于区块链的智慧云制造系统安全架构(BCSCMS),从信息保密性、完整性、可追溯性和匿名性 4 个维度论证了该框架的安全性。董蓉等^[37]提出了交易区块链体系结构,分析了交易区块链基础架构模型,提出了记账节点的基本组成,设计了云制造服务平台中信息数据记录的方法与过程,保证了云服务平台中信息的安全性和可靠性。

AGHAMOHAMMADZADEH E 等^[38]提出了基于区块链技术的服务组合模型,作为一种新型的制造架构,通过将原始的服务组合问题划分为多个子问题,每个子问题包含服务/任务池的一部分,从而克服了集中化机制。LI Z 等^[39]针对第三方信任运营相关的主要问题,提出了一种基于区块链技术开发的分分布式对等网络体系结构,以提高云制造系统的安全性和可扩展性。伍星等^[40]提出了一种基于 QoS 值的改进 PBFT 算法 Q-PBFT,在满足安全性的前提下提高了云制造服务平台的通信效率。李芳等^[41]提出将资源调度算法写入制造资源链的智能合约中,研究了基于双链式结构的云制造系统,实现了制造资源调度速度的提升。YU C X 等^[42]提出了一种基于区块链的云制造架构,以增强信息透明度和分散性。LI Z 等^[43]提出了一种基于区块链技术的用于注塑模具再设计的云制造知识共享系统,在该系统中,私有云被用于存储注塑模具再设计知识,区块链为实现系统提供标准和协议,确保在去信任环境中的安全性。

综上所述,学者们将区块链技术运用在分布式制造系统中,并在解决制造资源真实性和交易信息可信性等问题上取得了研究成果。但仍存在以下不足:1)已部署上链的智能合约是不可逆转的,其潜在的安全问题一旦触发就难以被修复,可能造成重大经济损失。因此,如何设计一种考虑制造实体协同智能合约的安全保障机制成为亟待解决的问题;2)目前共识算法的评价指标各异,主要侧重于社会学角度的公平性和去中心化、容错性和安全性等,如何结合协同制造需求和分布式工厂应用场景,针对制造服务性能的自适应评价需求,实现共识机制算法的设计与优化,成为另一亟待解决的问题。

3 总结与展望

随着“中国制造 2025”战略的稳步实施,我国制造业的数字化网络化水平显著提高,部分车间、产线、设备具备了对外界物联互通的能力,这也为互联开放式协同制造模式提供了良好的发展土壤。因此,学者们从制造模式、技术框架、关键方法对网络协同制造进行了大量研究。本文通过对近 5 年来的国内外相关文献进行综述,阐述当前互联开放式协同制造领域的研究现状。首先,分析了当前已有制造模式所存在的挑战之处。其次,从分布式制造资源云端化接入、制造任务与制造资源匹配、分布式制造资源优化配置、制造服务互信协作 4 个关键技术方面切入,分析了学者们所提出的相关技术方法或算法模型的创新点与不足之处。

在未来的研究中,可从以下几方面进行探索:1)使用机器学习模型提取制造任务与制造资源描述模型的特征,基于该特征实现二者的智能匹配,这样可显著提升匹配效率与精度;2)使用知识图谱挖掘制造过程历史数据中隐藏的制造实体间语义关联关系,以提升制造资源优化配置模型的决策水平;3)研究一种考虑制造实体协同智能合约的安全保障机制,并结合制造场景设计高效的共识算法。

参考文献:

- [1] 李伯虎,张霖,王时龙,等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1):1-7,16.

- [2] 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.
- [3] YUSUF Y Y, SARHADI M, GUNASEKARAN A. Agile manufacturing: the drivers, concepts and attributes[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 62(1/2): 33-43.
- [4] 姚锡凡, 于森, 陈勇, 等. 制造物联网的内涵、体系结构和关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 1-10.
- [5] 江平宇, 丁凯, 冷杰武, 等. 服务驱动的社群化制造模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1637-1649.
- [6] CURLEY M. Twelve principles for open innovation 2.0[J]. Nature, 2016, 533(7603): 314-316.
- [7] FLORES R L, BELAUD J P, LANN J M L, et al. Using the collective intelligence for inventive problem solving[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(23): 9340-9352.
- [8] 李嘉, 张朋柱, 刘璇. Web 2.0 环境下一种新型群体支持系统的设计研究[J]. 信息系统学报, 2015(1): 14-26.
- [9] 李孝斌, 尹超, 尹胜. 云制造环境下机床装备资源特性分析与语义描述方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(9): 2164-2171.
- [10] 高长元, 祁凯. 网络环境下制造资源建模研究[J]. 统计与决策, 2011(3): 48-51.
- [11] 赵旭, 唐健均, 谭清中. 基于 Neo4j 的网络化协作加工设备资源建模方法研究[J]. 现代制造工程, 2018(2): 55-63.
- [12] BHATTACHARYA A, TIWARI M K, HARDING J A. A framework for ontology based decision support system for e-learning modules, business modeling and manufacturing systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5): 1763-1781.
- [13] QIAN C, ZHANG Y F, LIU Y, et al. A cloud service platform integrating additive and subtractive manufacturing with high resource efficiency[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118379.
- [14] 张霖, 罗永亮, 陶飞, 等. 制造云构建关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(11): 2510-2520.
- [15] 张宪民, 薛栋栋, 郑家和, 等. 智能制造中基于 OPC UA 的多源异构数据传输与解析技术[J]. 机电工程技术, 2021, 50(1): 1-7.
- [16] 柴卓, 杨卉. 多接入边缘计算 MEC 技术及业务发展对策研究[J]. 信息通信, 2020, 33(5): 222-223.
- [17] 赵龙乾. 基于云边协同计算架构的资源分配和任务调度方法研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2020.
- [18] 满君丰, 赵龙乾, 彭成, 等. 云边协同计算架构下大规模工厂接入的任务调度[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2282-2294.
- [19] LIU J, CHEN Y L. A personalized clustering-based and reliable trust-aware QoS prediction approach for cloud service recommendation in cloud manufacturing[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 174: 43-56.
- [20] 李慧芳, 董训, 宋长刚. 制造云服务智能搜索与匹配方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1485-1493.
- [21] ZHANG M, LI C Q, SHANG Y L, et al. Research on resource service matching in cloud manufacturing[J]. Manufacturing Letters, 2018, 15: 50-54.
- [22] 郭云欣. 面向汽车生产车间的协同制造资源配置与优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [23] 李新, 董朝阳. 基于本体映射的云制造资源与加工任务智能匹配[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11): 157-160.
- [24] 李成海, 黄必清. 基于属性描述匹配的云制造服务资源搜索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6): 1499-1507.
- [25] LI F, LIAO T W, ZHANG L. Two-level multi-task scheduling in a cloud manufacturing environment[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 127-139.
- [26] LAILI Y J, LIN S S, TANG D Y. Multi-phase integrated scheduling of hybrid tasks in cloud manufacturing environment[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101850.
- [27] 王天日, 张敏敏, 刘娟, 张鹏志等. 考虑云制造服务协同的多用户任务调度优化研究[J/OL]. 计算机集成制造系统 (2022-01-21) [2022-05-18]. <https://read.cnki.net/web/Journal/Article/JSJJ20211123000.html>.
- [28] NASERI A, JAFARI NAVIMIPOUR N. A new agent-based method for QoS-aware cloud service composition using particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(5): 1851-1864.
- [29] ZHOU L F, ZHANG L, REN L, et al. Real-time scheduling of cloud manufacturing services based on dynamic data-driven simulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5042-5051.
- [30] ZHANG Y, TANG D B, ZHU H H, et al. A flexible configuration method of distributed manufacturing resources in the context of social manufacturing[J]. Computers in Industry, 2021, 132: 103511.
- [31] 袁勇, 倪晓春, 曾帅, 等. 区块链共识算法的发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2011-2022.
- [32] 欧阳丽炜, 王帅, 袁勇, 等. 智能合约: 架构及进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(3): 445-457.
- [33] 徐杨杨, 王艳. 区块链在云制造资源分配的研究[J/OL]. 计算机科学与探索, (2022-01-14) [2022-05-10]. <http://fest.ceaj.org/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=2668>.
- [34] 陈婷灵. 基于区块链的云制造服务交易可信机制的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [35] 王强, 刘长春, 周保茹. 基于区块链的制造服务可信交易方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3247-3257.
- [36] 杜兰, 陈琳琳, 张丽, 等. 基于区块链的智慧云制造系统安全架构[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(11): 34-38.
- [37] 董蓉, 苑明海, 周灼. 基于区块链的云制造信息数据记录技术[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(5): 97-101.
- [38] AGHAMOHAMMADZADEH E, FATAHI VALILAI O. A novel cloud manufacturing service composition platform enabled by Blockchain technology[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(17): 5280-5298.
- [39] LI Z, BARENJI 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.
- [40] 伍星, 范玉顺, 郜振锋. 云制造服务场景下基于 QoS 值的改进 PBFT 算法[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-16 [2022-05-10]. <http://www.doc88.com/p-98061769900809.html>.
- [41] 李芳, 程友凤. 基于双链式结构的云制造系统内资源调度[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-20 [2022-05-10]. <https://read.cnki.net/web/Journal/Article/JSJJ20220318001.html>.
- [42] YU C X, ZHANG L P, ZHAO W F, et al. A blockchain-based service composition architecture in cloud manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 33(7): 701.
- [43] LI Z, LIU L, BARENJI A V, et al. Cloud-based manufacturing blockchain: secure knowledge sharing for injection mould redesign[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 961-966.

收稿日期: 2022-05-20