面向工业互联网的社群化制造模式及3D打印测试床研发

江平宇^{*}, 史皓良, 杨茂林, 郭威, MAKANDA Inno Lorren Désir, 董华伟

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

^{*} E-mail: pjjiang@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-08-12; 接受日期: 2021-09-17; 网络版发表日期: 2021-11-05

国家自然科学基金(批准号: 51975464)资助项目

摘要 新一代信息技术与制造业的深度融合正推动着制造业向社会化、服务化、互联集成化与平台化发展, 面向工业互联网的社群化制造模式契合了当前制造业在智能化转型升级和创建新业态上的愿景. 据此, 本文在对当前制造模式演变分析的基础上给出了信息-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, 进一步探讨了社交传感器驱动的社群化资源聚类与社区/社群创成、信息-物理-社交互联驱动的社群化制造系统和社群化制造软件模型三项关键实现技术. 研发了面向社群化制造模式的3D打印测试床, 并通过测试床的应用开发和生产运行流程的介绍, 验证了社群化制造理论的可行性, 同时也为工业互联网产业应用实践提供示范导向作用.

关键词 制造模式, 工业互联网, 社群化制造, 信息-物理-社交互联, 3D打印测试床

1 引言

互联网驱动的联接与通讯行为正激发工业生产组织与运行体系的巨大变革, 而以信息物理融合系统(Cyber-physical systems, CPS)、物联网(Internet of things, IoT)、云计算(Cloud computing)、大数据分析(Big data analysis)和人工智能(Artificial intelligence, AI)等新一代信息通信技术(Information and communication technology, ICT)与制造业的不断融合, 使得以工业互联网为代表的制造业智能化转型升级成为当前世界范围内制造企业的新共识和研究热点. 国务院自2015年起先后发布了《中国制造2025》和《深化“互

联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》等国家层面的智能制造发展战略政策, 旨在构建一个数据驱动的全社会范围内人-机-物-环境等多元要素全面互联融合的工业新业态和新模式, 以振兴我国制造业, 实现制造业产品力、服务力和竞争力的提升^[1].

制造业智能化转型升级涉及到工业价值链中的资源端、需求端及整个产品生命周期活动中的多元要素. 而当前制造业正呈现出产品个性化、制造资源社会化、企业小微化、互联交互化、生产组织分散化以及制造服务化等特征^[2-4]. 在这些特征驱动下制造企业在组织架构和运行方面也进行了相应的转型升级. 例如: 海尔集团自2014年来通过将企业组织架构按“平台-小

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 88–103
Jiang P Y, Shi H L, Yang M L, et al. Research and development of social manufacturing model and 3D printing testbed for industrial internet (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 88–103, doi: [10.1360/SST-2021-0342](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0342)

微-创客”层级重构, 其中具有独立生产服务和管理的“小微”大大提升了生产服务响应能力, 实现了用户需求与资源的重构^[5]; 阿里巴巴于2020年发布了打造3年的“犀牛智造”平台, 其从传统服装制造业垂直切入, 借助云计算、AI、IoT等技术链接消费需求端与生产端. 首先在消费端通过大数据洞察消费者需求来辅助产品设计, 在生产服务端通过人工智能和IoT等技术配置构建具有超高柔性制造能力的智能化工厂, 既而实现按需研发, 按需生产. 上述生产模式契合了面向工业互联网的社群化制造模式(Social manufacturing, SocialM)理念, 该模式通过将海量分散的社会化制造资源在信息-物理-社交配置下, 利用商务社交自组织聚类形成各类资源社群/社区, 并在群体智能及利益管控机制下以资源社区为制造主体通过协同交互、信息共享和自主运行参与产品的全生命周期活动, 以达到提高个性化产品制造过程的柔性、快速响应能力和效率的目的^[6-10].

本文将从先进制造模式演变分析、作者自2011年底以来对SocialM理论研究的基础上, 进一步聚焦于体系架构、实现关键技术以及社群化3D打印测试床的研发, 呈现出社群化制造契合工业互联网下制造业在智能化转型升级和创建新业态上的应用场景.

2 面向工业互联网的社群化制造概念

2.1 制造模式演变

制造业在过去几十年中受市场、经济、政策与技术等因素的影响, 经历了从大规模生产到大规模定制的发展阶段, 目前制造业正向大规模个性化方向发展^[11]. 在不同的发展阶段, 工业界和学术界分别提出了与之匹配的各类先进制造模式. 在大规模生产阶段: 产品的大量生产依赖于自动化设备、流水线、泰勒管理方法. 制造企业通过对生产资源进行集中式管控, 实现产品的统一生产, 此时的生产模式缺乏生产柔性, 不易实现产品的个性化生产^[12]. 在大规模定制阶段: 产品生产体现为多品种、小批量的混流生产, 通过精益生产模式、成组技术、全面质量管理、并行工程等手段实现产品的柔性自动化生产. 特别从20世纪80年代后期以来, 以互联网为代表的ICT技术快速发展对产品生产模式的演变起到了巨大的推动作用. 国内外相关学者先后提出了敏捷制造^[13]、虚拟企业^[14]、网络化制造^[15]、制造网格^[16]以及应用服务商(Application

service provider, ASP)^[17]等先进生产模式, 极大推动了产品大规模定制生产模式的发展. 在大规模个性化阶段: 随着个性化用户需求的爆炸式增长以及新一代ICT技术与制造业的深度融合, 制造服务化、企业小微化、互联社会化、产品个性化等制造业新特征日益显现, 此时生产模式呈现出多样性的特征. 例如, 涌现出诸如服务与制造有机融合的服务型制造(Service-oriented manufacturing, SOM)^[18,19]; 基于“产品+服务”理念的产品服务系统(Industrial/product service system, PSS/iPSS)^[20]; 基于“制造即服务”理念和云计算思想的云制造模式(Cloud manufacturing, CMfg)^[21-24]; 面向产品个性化趋势的开放式生产(Open production, OP)^[25]、众包生产(Crowdsourcing production, CP)^[26]和模块化生产^[27]等; 面向社会化资源互联集聚趋势的工业互联网^[28]和智慧制造^[29]等模式; 以及结合工业互联网和服务型制造理念的SocialM模式^[8,10].

综上所述, 从制造模式的演变趋势来看, 一方面, 个性化产品的多样化、定制化需求的不断增长, 引导制造业向以客户为中心的服务型制造发展. 另一方面, 新一代ICT技术与制造技术的快速发展与深度融合, 拓展了企业与社会化服务资源互联融合、协同交互与共享的深度与广度. 据此可知, 未来制造模式是以用户需求为中心, 适应制造业产品个性化、制造资源社会化、企业小微化、互联交互化、生产组织分散化以及制造服务化特征的制造模式, 海量分散的社会化制造资源借助新一代ICT技术进行交互、协作和共享来完成产品的制造活动.

2.2 社群化制造模式

社群化制造的英文术语“Social Manufacturing”源于2011年后期的美国商业资讯网(Business Wire)及随后的经济学人杂志(Economist)上基于3D打印的社会化应用前景新闻报道. 随后, SocialM在学术界也得到了广泛和深入的研究, SocialM被定义为一种面向制造业服务化、企业小微化、资源社会化、互联交互化、产品个性化、分布式等新特征的一种新型SOM模式^[8]. 作者及所在课题组自2011年底开始从SocialM定义、制造服务机理、社群化资源分类、社交行为与社群关系建模等进行了深入研究^[30-33], 相关成果在由Springer出版的学术专著中做了系统性的表述^[7]. 此外, 王飞跃指出社会制造能够帮助传统制造企业向具有主动感知客户需求

和快速响应的智能制造型企业转变^[34,35]。Xiong等人^[36]从系统组成和应用模式的角度对面向个性化产品需求的社群化制造平台进行分析和研究。Mohajeri等人^[37]研究了SocialM实现的系统架构和关键使能技术。Hama-lainen等人^[38]通过调研,认为制造业正逐渐向“公司-个人”合作的形式转变,提出了企业将制造外包给个人和提供服务的社群化制造平台概念。

综上所述,社群化制造契合了制造业发展特征和创建制造业智能化新模式和新业态的机遇。但目前研究较多集中在概念、机理等理论层面,而针对SocialM的应用实现与场景方面的研究相对较少。为更好地诠释社群化制造模式的内涵,本文首先对SocialM相关概念和术语进行定义。

产消者(Prosumer): 个性化产品生产方式改变了消费者的角色,产消者指在产品全生命周期活动中通过社交软件/社交网络参与到个性化产品设计、生产、销售、运维等活动,并与制造服务提供商和需求商进行协作交互,从而获取个性化产品或制造服务以及参与感和价值体现的角色集合。产消者具有服务供体和服务受体双重身份,并能根据自身拥有的资源特征在SocialM中扮演不同的角色。从制造服务的角度看,产消者即为一类制造服务集成方,通过整合社会化制造资源来为个性化产品生产提供服务。

社会化制造资源(Socialized manufacturing resources, SMRs): 指在SocialM下参与到产品全生命周期活动中的各类有形和无形制造资源的总和,具有对外提供专业化制造服务的能力,SMR的“代理”是产消者。社会化制造资源包括有形的设计资源、生产资源、物流资源、仓储资源、运维资源和无形的能力资源、客户资源等。SMRs具有社会化、分散化和专业化等特点:有形的SMRs一方面可来自于传统大中型企业的小微化重组,大中型企业将其内部制造资源分解和重组为若干具有独立制造服务能力小微企业,使其能够快速响应动态的市场需求;另一方面也可来自于细分市场的新兴小微企业、初创公司或具有专业技能的个人。而无形的能力资源、客户资源即可来自不同类别企业也可来自具有某角色的人。

社群化制造社群(SocialM grouping, SMG): 指依据制造兴趣分类及其社交活动而聚集在一起的各种产消者集群。制造社群的配置与运行主体是“代理”各种产消者角色的“人”节点以及“人与人”节点之间交互下

的强、弱甚至模糊社群关系。

社群化制造社区(SocialM communities, SMCs): 指以SMRs为节点,由社群关系、兴趣和利益约束关系连接而成、且具备资源物理属性的群体网络。其具有较稳定的群体结构、较一致的群体意识和行为规范,是个体资源节点之间关系的逻辑上聚合。社区是社群的子集,是社群的物理体现。多个SMRs可依据资源类型及能力相似性或围绕产品订单集聚化形成的利益共同体,以成员整体资源能力对外提供制造服务,可分为资源/能力导向的社区和产品导向的社区。资源/能力导向型社区通过相似资源/能力的SMRs自组织形成,以社区为整体对外提供生产服务,在利益均衡分配机制下,社区成员分工明确且相互协作,实现资源、能力和信息的协同和共享;产品导向型社区围绕产品/订单BOM形成,社区成员之间交互协作,共同完成产品订单的生产任务。

信息-物理-社交互联(Cyber-physical-social inter-connections): 指在SocialM下的产消者、SMRs、SMCs等各类多层次制造资源主体在信息、物理和社交三个空间维度上建立的互联互通关系。其中物理空间的互联是实现信息空间和社交空间互联的基础。各类制造资源主体间的互联内容包括数据/信息/知识互联、业务互联、服务互联等泛在互联互通的时空关系。信息-物理-社交互联为订单驱动的多层级生产主体间的协同交互提供了基础支撑,帮助多层级的制造资源主体实现数据/信息/知识的交互与共享、业务协作和服务流程管控等。

社群化制造网络(SocialM network, SMN): 指一个融合SMRs, SMG和SMCs,且使用SMG和SMCs节点及其交互关系构成的动态可加入与退出、拓扑可变的工业互联网网络。理论上,社群化制造网络包含有无限个SMG、SMCs和社群化制造系统。

社群化制造系统(SocialM systems, SMS): 指支撑订单驱动的产品全生命周期制造活动的主体,其包括来自不同SMCs及其SMRs动态互联所构成的基于资源/能力服务订单与产品订单的强社群关系SMN。各个节点包括设计节点、生产节点、运行维护节点等。以生产节点为例,其可由具有支撑生产过程的多层级制造主体(设备、产线/车间、工厂等)构成,在社群化生产过程中提供专业化的生产服务。本文第4节介绍的3D打印机测试床在承接订单的前提下,既作为极短

B2C (Business to consumer)供应链条件下的社群化制造系统, 又可作为B2B (Business to business)生产零部件的节点置于长供应链下的社群化制造系统中, 用来提供增材制造的生产服务能力。

社群化制造(Social manufacturing, SocialM): 指建立在海量的SMRs的信息-物理-社交互联以及社群化资源自组织和协同交互与信息共享的基础上, 涵盖产品全生命周期活动分布式产消者深度参与的一种面向未来的服务型制造新模式。如图1所示, 在该模式下, 分散的SMRs在网络社交传播、制造社交行为及其情境的驱动下自组织聚类形成各类SMG和SMCs, 并在订单驱动的利益均衡和管控机制下, 以SMCs为主体自主参与到个性化产品的制造活动中。SocialM模式依托于大数据分析、群体智能、物联网、RFID和CPS等新一代ICT技术来实现社群化制造运行过程中商务社交情境分析、数据/信息/知识共享、资源能力-需求匹配、生产智能规划、自治生产运行与控制以及动态资源调度等复杂资源协同交互问题。

3 社群化制造模式的体系架构与实现技术

3.1 社群化制造体系架构与运行逻辑

SocialM集聚海量分散的SMG、SMCs和SMRs, 通

过订单驱动的利益均衡与管控机制整合资源服务能力来为个性化产品的生产制造提供服务。据此, 本文从SocialM系统构建与运行的角度, 建立了社群化制造六层体系架构, 如图2所示。

社会化资源层: 主要包括分散的“人-机-物”SMRs, 特定的产消者拥有各类有形和无形的制造资源。如: 订单、能力、生产加工设备资源、仓储物流资源、网络通信资源、材料与传感器环境资源等。通过采用统一的信息模型对资源进行形式化描述, 并借助统一的信息接口实现资源的虚拟化封装、描述与信息共享。

节点配置层: 借助CPS、社交传感器与ICT等技术, 对多层级的制造资源主体(设备层、产线/车间层、企业层)中的“人-机-物”资源进行智能化配置和封装, 形成具备自感知、自交互与自运行能力的CPS节点。以实现多制造资源主体间的信息-物理-社交互联, 为社群化生产运行过程中的协同交互与资源信息共享提供支撑。

社区层: 通过对虚拟化封装和CPS配置后的多层级社会化制造资源SMRs主体间的生产上下文进行生产关系挖掘, 结合资源服务能力和生产喜好构建基于生产喜好的强社群关系资源网络, 并通过聚类算法对强社群关系网络进行聚类进一步创成基于生产喜好和服务能力的社区集合。

图1 (网络版彩图)社群化制造模式概念及输入-处理-输出模型示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the social manufacturing concept and the input-processing-output model.

图2 (网络版彩图) 社群化制造模式体系架构

Figure 2 (Color online) Architecture of the social manufacturing model.

社群层: 根据订单驱动的制造历史、制造兴趣、弱与模糊社群关系等构建包含SMRs、社区集合、SMG的弱社群关系网络, 无限可拓展的弱社群关系网

络构成了社群化制造网络. 其中, 产消者作为资源节点协作交互的代理角色, 在不同的制造社群中可扮演不同的服务角色. 以角色属性向量(Prosumer attribute

vector, PAV)对SocialM中产消者进行描述如下:

$P := \{SMR, Demand, Capable_of, Role_inSMC, Relation\}$, 其中, *SMR*—产消者拥有的SMRs集合; *Demand*—制造需求; *Capable_of*—对其具有的制造服务能力描述; *Role_inSMC*—社群/社区中扮演的角色(如设计、生产、运维等); *Relation*—社群中与其他的资源节点和社群强弱关系或模糊关系集。

社群化制造系统层: 依托资源服务或产品订单, 通过组合不同SMCs及其SMRs构成了社群化制造系统, 其中, 社区内与社区间的SMRs竞争、合作与利益博弈可完成社群化制造系统的节点选择。在订单任务和工作流的驱动下, 社群化制造系统在H2H/H2M/M2H/M2M交互下借助群体智能与数据知识共享等技术实现资源节点的自治与协同运行。

应用层: 客户、制造商、供应商等SMN中的资源节点依托订单驱动的社群化制造系统, 借助社群化制造服务软件完成SocialM下的产品全生命周期业务活动, 包括商务社交、“需求-能力”匹配、资源自组织、生产协同运行以及信息共享等。

3.2 实现社群化制造模式的关键技术

3.2.1 社交传感器驱动的社会化资源聚类、SMCs社区与SMG社群创成

SocialM作为一种基于海量SMRs集聚的制造模式, 信息-物理-社交互联的SMRs依赖其资源类型和能力相似性、强社群关系自组织形成SMCs社区, 以SMCs成员的整体资源能力对外提供生产服务能力; 以弱社群关系及其制造兴趣分类等生成SMG社群。因此, SocialM运行过程中需首要解决的关键问题就是对海量SMRs进行强社群关系聚类和SMCs社区创成, 进而通过产消者角色“代理”的“人”与“人”间的强、弱或模糊社群关系生成各种SMG社群。其中, 结合新一代ICT技术的一种软硬件结合体——社交传感器(Social sensors, $S^2ensors$)则支持SocialM中SMRs/SMCs/SMG间的协同交互、分析与决策功能。以下从 $S^2ensors$ 的定义、功能模块以及其驱动的SMCs社区与SMG社群创成进行说明。

社交传感器($S^2ensors$): 指一种软硬件集成的交互媒介, 其用于辅助SocialM中个性化产品制造过程中的协同交互, 能对生产交互情境中的社交上下文及各类生产交互数据进行采集、计算、分析、处理和存储。

如图3所示, S^2ensor 硬件部分用于实现交互数据的采集、显示和存储。它可由移动终端、可穿戴物理传感器(如虚拟现实VR/增强现实AR)、嵌入式物理传感器(如摄像头、重力传感器、陀螺仪、麦克风等)等组成; $S^2ensors$ 软件部分由传感、数据/文本分析、知识库、智能应用和转换等单元组成。传感单元用于主动捕获生产交互中的社交上下文或物理传感数据; 数据/文本分析单元通过数据处理和自然语言处理方法实现社交上下文与生产数据的标准化和可用性; 智能应用单元通过调用各种智能算法(如数理统计、机器学习、深度学习等)对数据和文本进行分析和预测, 形成制造知识库, 提供决策辅助; 转换单元提供数据和知识的传输、转换接口和协议, 用于实现上层数据的互通和应用。

在SMCs社区与SMG社群创成方面, 产消者利用 $S^2ensors$ 进行商务交互, 将多层级SMRs的类型与能力相似性、产消者属性与强、弱社群关系等进行关联。其中, 这种关联关系包括社交关系、服务关系与供应关系等, 是通过交互数据和上下文进行感知、处理与学习完成的。在此基础上, 分散的SMRs、各种产消者等能据此通过聚类方式形成各类动态的SMCs社区和SMG社群, 并在利益均衡与商务社交关系机制下进行协同交互与制造服务提供。

3.2.2 信息-物理-社交互联驱动的社群化制造系统

在SocialM中, 社群化制造系统SMS是实现资源与能力服务订单、产品订单及其制造活动的重要载体, 也是体现SMRs和SMCs制造服务能力的关键。为适应SocialM小微化、社会化、互联化和服务化等特征, SMS依托订单并建立在信息-物理-社交互联基础之上, 且面向服务、面向“人-机-物”资源能力共享、面向用户交互参与等。其中, 以“人-机-物”资源为核心的信息-物理-社交融合工业互联网作为其网络载体; 以设备/产线/车间/工厂多层级制造资源SMRs“任务-资源-产品/工件”为核心的统一流程与知识模型为信息载体, 来实现多层级SMR节点内的资源数据共享与知识重用; 以多SMCs下分布式“人-机-物”制造资源的群体协作优化和自治运行, 来完成产品订单、资源与能力服务订单驱动的制造任务。社群化制造系统SMS的体系架构如图4所示, 其核心思想体现在前述订单驱动的“工业互联网-SMRs节点配置与执行-多SMCs群体自

图3 (网络版彩图)社交传感器驱动的社群化动态社群SMG与社区SMCs的创建

Figure 3 (Color online) Social sensor-driven the creation of dynamic social manufacturing group and social manufacturing communities.

治与协同”三方面. 其中, 社群化特征将突出地体现在:

(1) 跨设备/产线/车间/工厂层面: SMS作为制造服务能力的提供者, 通过 S^2 sensors与客户、供应商及其他SMRs/SMCs/SMG等围绕订单进行以H2H为主、H2M/M2H为辅的商务社交;

(2) 设备/产线/车间/工厂内层面: 以设备为中心的“人-机-物”资源的H2M/M2H/M2M为主、H2H为辅的制造社交与自治协作, 通过群体协商交互的方式对订单实现排产和动态调控.

应指出的是, 广义的社群化制造系统还涉及到产品设计、产品运维环节, 本文暂不做讨论.

3.2.3 社群化制造软件模型

在传统制造模式下, 企业的运作依赖CAD/CAE/CAPP/CAM、PDM/PLM、DCS/MES、ERP/CRM/SCM等信息化系统. 同样, SocialM运作也需要依靠软件来实现. 与传统制造模式不同, SocialM的运作依赖于海量分散的SMRs、产消者以及多层次制造资源SMRs主体通过资源自组织、社交与信息共享等自主

形成的SMCs、SMG及其订单驱动的SMS. 这就需要开发一种更灵活、更开放且可重构与可互操作的分布式自治软件模型来支撑SocialM. 据此, 一种以商务社交WebAPP为总控入口、且基于云原生的功能WebAPP软件模型被用来支撑面向SocialM的产品全生命周期活动. 其中, 商务社交WebAPP的使用者是代理某个“产消者”角色的“人”. 图5展示了该社群化制造服务软件模型及其三层架构.

服务支撑层: 为社群化制造软件提供服务器计算资源、网络设备资源、数据库存储资源以及操作系统等硬件环境. 同时提供各类底层资源协议传输和转换的中间件, 用于各类SMRs/SMCs/SMG/SMS接入.

领域功能层: 社群化制造软件希望打破CAX/PLM/MES/ERP等信息系统的制约, 通过构造独立的领域WebAPP集合来实现SMRs/SMCs/SMG/SMS配置与运行的场景流管控及其节点功能. 这些独立的领域WebAPP集合按产品全生命周期活动、制造功能分类等进行组织, 并细分为可扩展的节点功能WebAPP子集、场景流管控WebAPP子集两部分, 通过在业务管

图 4 (网络版彩图)信息-物理-社交互联驱动的社群化制造系统

Figure 4 (Color online) Cyber-physical-social interconnection driven social manufacturing system.

控层中基于产消者权限控制的领域WebAPP应用商店实现集成。

运作管控层: 按SocialM运作管控机制将社群化制造软件划分为作为系统总控入口的商务社交WebAPP、SMRs/SMCs/SMG/SMS管理WebAPP、管控功能实现层的领域WebAPP集合的领域应用商店WebAPP三类。其中:

(1) 商务社交WebAPP是体现SocialM分布、自治特征的关键,也是社群化制造所有其他WebAPP的总控入口。除具有建群、即时通讯功能外,它既能随时启动各种需要运行的WebAPP,也能通过集成的人工智能算法来实现对社交数据和工业数据的分析与挖掘,帮助构建SMCs/SMG;

(2) SMRs/SMCs/SMG/SMS管控WebAPP则用于实现对商务社交WebAPP“使用者”分别管辖的SMRs、SMCs、SMG及其订单驱动 SMS 进行基于工作流的

管理,包括通过领域应用商店WebAPP对所需领域WebAPP集合的调用。该WebAPP采用面向上述“使用者”权限约束下的受限社群化制造网络空间形式实现成员控制、资源发现与组织、订单处理、多源异构制造数据处理机制、信息与知识共享机制、服务过程监控与管理机制、网络信息与安全机制等,并采用动态网络图模型实时显示当前的社群/社区资源组织节点与网络;

(3) 领域应用商店WebAPP则用来管控领域功能层的所有独立的WebAPP集合。通过运行上述两种管控WebAPP并使用其中的交互操作,可随时调用领域应用商店所管控的功能WebAPP集合。

门户入口: 使用Web浏览器并启动商务社交WebAPP的URL链接,由不同的产消者通过此总控入口运行社群化制造软件。

社群化制造软件模型满足自组织、自协同、自运

图 5 (网络版彩图)社群化制造软件模型架构
Figure 5 (Color online) The architecture of social manufacturing software model.

作的分布式软件模型的要求，它与平台型软件模型有着本质性的区别。

4 面向社群化制造模式的3D打印测试床研发

4.1 测试床概述

SocialM是一种适应大规模个性化生产环境的服务型制造模式，并支持人人创业之社会形态。如前所述，SocialM涉及到产品全生命周期中的设计、采购、生产、运维及服务过程中的各类业务活动，其中以设备、产线、车间及工厂为核心的多层级制造资源节点智能化配置与运行是SocialM运行过程中最重要的组成部分。虽然阿里的犀牛工厂在某种程度上展现了社群化制造的雏形，但需要进行更深度的实验验证。据

此，本文基于SocialM体系架构和关键实现技术，从硬件和软件环境两方面综合考虑，研发了面向社群化制造模式中个性化共享3D打印服务及其B2C极短供应链条件下的“设计-生产-服务”一体化3D打印测试床。该测试床可作为产线级SMR或多设备单元SMRs被集成到SMCs和SMN中，并与SMG关联。当接收3D打印件订单时，其作为订单驱动ed的SMS来使用，以便为面向工业互联网的SocialM理论验证和技术开发提供测试和实验环境以及应用示范。

图6展示了测试床的平面布局图以及在社群化制造服务软件中运行逻辑。测试床的基本组成资源包括：两台3D打印机(作为测试床的制造能力提供者)，两台桌面式机械手和传送带单元(负责3D打印件的流转和搬运)，视觉检测单元(负责3D打印件的质量检测)以及桌面式自动立体库(负责3D打印件的存储与管理)。此

图 6 (网络版彩图) 社群化制造 3D 打印测试床概览

Figure 6 (Color online) Overview of the 3D printing testbed for social manufacturing.

外测试床还配备了两台可视化面板和各类监测传感器(能耗、温湿度、噪声、RFID等)以实现测试床中各类设备资源和在制品工件的状态感知、监测与生产运行辅助。

如图6所示,测试床中的各类分散资源首先通过CPS配置、虚拟化封装,作为测试床的产线级SMR与图5所示的社群化制造软件集成。其中,通过商务社交WebAPP并结合自身的制造服务能力和生产喜好加入到不同的SMCs中,并通过社群关系形成SMG;在“需求-能力”匹配的基础上,测试床转化成3D打印件订单驱动的SMS并通过使用基于应用商店WebAPP管控方式的领域功能WebAPP集提供制造服务;总体上则通

过SMRs/SMCs/SMG/SMS管控WebAPP管理测试床的各种配置与运行信息。

4.2 使能测试床的社群化制造WebAPP开发

据此,在社群化制造软件模型架构的基础上作者研发了使能测试床运行的云原生商务社交WebAPP、SMRs/SMCs/SMG/SMS管理WebAPP、应用商店WebAPP、领域功能WebAPP集。各WebAPP的功能分解如图7所示。

商务社交WebAPP的使用角色是各种产消者,包括测试床的管理者。其作为分布式SMRs、SMCs、SMG和SMS运行管控的总入口,也是使能测试床运行

图 7 (网络版彩图)使能测试床的社群化制造WebAPP开发
Figure 7 (Color online) WebAPP development for social manufacturing testbed.

的关键，相应的功能模块包括即时通讯、群组管理、个人空间、社交数据分析挖掘以及智能推荐等。测试床的管理者能够与其他的SMRs以及SMCs、SMG、SMS中的成员围绕着产品生命周期中的业务活动进行实时通讯交互。同时，商务社交WebAPP的后台集成了各类社交数据挖掘和分析算法，通过对交互数据分析，挖掘资源能力和生产喜好，帮助构建SMCs和SMG。此外，在商务社交WebAPP的页面中集成了SMRs/SMCs/SMG/SMS管控WebAPP和应用商店WebAPP，用户能够从商务社交WebAPP中快速找到相关的应用。

SMRs/SMCs/SMG/SMS管控WebAPP在社群/社区创成与资源自组织机制、开放式API接口、资源共享与服务管理机制、数据与知识共享机制以及产消者角色与权限管理等机制的保障下，帮助产消者实现SMRs、SMCs、SMG与SMS的配置与管理。同时能通过节点与网络组织图将SMN中的各类资源的组织关系进行动态可视化显示。此外，在具体应用方面通过开发博客、订单管理、资源信息空间等应用模块帮助产消者进行订单需求发布、资源能力管理、工作流程管理等功能应用。

应用商店WebAPP能够对测试床运控过程中的所有领域功能WebAPP集进行配置、部署与管控，测试床的管理者在商务社交WebAPP和SMRs/SMCs/SMG/SMS管控WebAPP的交互操作过程中可以随时调用、使用测试床运控的各类领域功能WebAPP。

领域功能WebAPP集由应用商店WebAPP管理，是使能SMRs/SMCs/SMG/SMS运行与控制的功能软件，其涉及到“设计-生产-服务”过程中的各类领域功能，包含设计应用(拓扑优化WebAPP、3D模型在线预览WebAPP)，3D打印应用(3D打印工艺编排WebAPP、生产计划WebAPP)，生产过程监控WebAPP，基于视觉的3D打印质量控制WebAPP以及库存管理WebAPP等。测试床的领域功能WebAPP集的开发及应用需依赖于包括数据知识管理模块、节点资源配置模块、通信互联配置模块、Web服务管理模块、场景建模分析模块以及底层设备驱动等资源服务的支撑。

4.3 测试床生产运行流程

测试床的运行以商务社交WebAPP为入口，其作为具有增材制造能力的产线级SMR，在SMN中与其他

的产消者,通过协同交互与自治运行提供3D打印服务.测试床的生产运行流程可从两个方面展开介绍:一是从社群化制造服务软件的运行全局角度看,测试床作为具备多种服务资源的SMRs,主要负责个性化3D打印全生产流程的运行与管控环节;二是从测试床内部3D打印生产运行角度看,其对应的是SMRs内部的订单生产与运行管控过程,即以“订单-生产-物流-质检-仓储-外协”等生产环节为中心的多CPS智能资源节点进行协作、交互与共享的过程.

此外,测试床在执行生产订单任务之前,需要依次通过社群化资源配置、资源描述与封装、商务社交与竞价博弈、“需求-能力”匹配、制造资源社群创成等步骤构建以3D打印件订单为核心的SMS.随后在订单规划的基础上,测试床结合自身的制造服务能力,各个资源节点借助社交传感器通过群体智能算法驱动的自治运行和协同交互完成3D打印件订单的生产任务.最后在个性化3D打印件制造完成后,参与其中的制造主体和产消者对各个环节的制造服务实际情况进行评价,评价结果可形成经验知识,为之后的资源匹配和生产运行

提供参考和改进建议,形成整个制造环节的闭环控制.

测试床在获取3D打印件订单后,其SMS内部的生产运行流程如图8所示,具体如下:

(1) 测试床以产线级SMS身份接收3D打印件订单信息后,首先向测试床内部的各类设备级CPS资源节点发起任务资源请求,以获取各设备级资源节点的实时状态信息、任务列表以及运行数据;

(2) 以任务需求和资源状态数据为输入,通过生产计划应用生成最优的协同生产计划,并以动作指令的方式下达给各设备级资源节点;

(3) 生产计划下达后,3D打印机作为核心制造能力的提供者首先进行打印任务的执行,打印任务完成之后主动向机械手&传送带节点发送运输指令;

(4) 机械手&传送带节点通过协同运行将打印件运至视觉检测节点,执行完成后进行结果反馈;

(5) 视觉检测节点执行检测任务后根据质量检测结果向SMS进行反馈,若打印质量不合格SMS需据此更新生产计划;若打印合格则向立体仓库发送自动存储指令;

图 8 (网络版彩图)测试床生产运行流程

Figure 8 (Color online) The production and operation process of the 3D testbed.

(6) 立体仓库节点接受到存储指令后, 自动执行货物存储任务, 并更新立体仓库状态;

(7) 循环以上步骤直至所有的3D打印件订单任务都完成, 并存储至立体仓库. 若其中涉及外协产品交互, 则需向外协移动机器人发送跨SMS运输指令.

图9展示了测试床运行过程中各类WebAPP在社群化软件服务软件框架中的集成与运行界面.

5 挑战与问题

5.1 标准化体系建设与产业生态推广

标准化体系建设能够对工业互联网产业生态推广起到引领规范和顶层设计的作用, 其也是产业发展的核心竞争力. SocialM需要从三个方面进行标准化体系建设和产业生态推广: 一是需要从制造资源和能力布局方面, 引导当前的制造企业由集中生产模式向分布式组织架构转型; 二是促进企业智能化转型, 构建以人-机-物资源为核心的信息-物理-社交互联物理资源环境; 三是拓展社群化制造服务软件与各类SMRs的对接, 推动资源能力的协同与共享, 加快整合各类资源要素, 实现全要素的互联互通.

5.2 订单竞争与共享间均衡

SocialM中产品订单如何在利益均衡分配机制下, 实现SMRs和SMCs之间订单竞争与共享也是当前SocialM运行过程中需要解决的重要问题. 个性化产品需求者发布订单后, 通过对制造社区成员的服务能力、服务质量、历史服务评价等因素进行资源与任务的博弈与优化, 以实现各个成员的利益最大化.

5.3 系统安全与隐私问题

SocialM依赖于海量的社会化制造资源深度互联与融合. 其生产过程中会采集来自个性化产品需求者和多层级制造主体(设备、产线/车间、企业与供应链)的协同交互中的各类数据和信息, 其中涉及到资源隐私以及各类商业机密和知识产权保护等问题; 如何在工业互联网的基础上利用区块链技术来保证制造过程中数据访问安全性、采集实时性与可靠性也是SocialM实施的重大挑战之一.

6 结束语

本文结合当前工业互联网下制造业特征及制造模

图9 (网络版彩图)3D打印测试床运行过程WebAPP界面展示

Figure 9 (Color online) The screenshot of the WebAPP interface during the running of the 3D printing testbed.

式演变趋势背景, 在SocialM理论研究的基础上进一步深入探讨了SocialM的体系架构和三个关键实现技术, 分别包括: 社交传感器驱动的社会化资源聚类及社群/社区创成、信息-物理-社交互联驱动的社群化制造系统以及社群化制造软件模型。此外, 针对SocialM缺乏生产测试环境的问题, 从硬件和软件环境两方面综合考虑, 研发了面向社群化制造模式中个性化共享3D打

印服务及其B2C极短供应链条件下的“设计-生产-服务”一体化测试床。为SocialM的理论验证和技术开发提供了测试和验证环境。SocialM是能够适应未来制造业发展趋势的一种制造新模式, 其研究能够为当前中国制造在实施面向工业互联网及服务型制造战略时提供系统性的理论参考和解决方案, 也能为未来企业智能化转型升级提供技术导向和应用示范的作用。

参考文献

- 1 Zhou J. Intelligent manufacturing—Main direction of “Made in China 2025” (in Chinese). *China Mech Eng*, 2015, 26: 2273–2284 [周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向. *中国机械工程*, 2015, 26: 2273–2284]
- 2 Jiang P Y, Leng J W, Ding K. Analyzing and delimiting overlapping concept boundaries of social manufacturing (in Chinese). *Comput Integra Manuf Sys*, 2018, 24: 829–837 [江平宇, 冷杰武, 丁凯. 社群化制造模式的边界效应分析与界定. *计算机集成制造系统*, 2018, 24: 829–837]
- 3 Jiang P Y, Ding K, Leng J W. Social manufacturing: Drivers, research status, and trends (in Chinese). *Indust Eng J*, 2016, 19: 1–9 [江平宇, 丁凯, 冷杰武. 社群化制造: 驱动力、研究现状与趋势. *工业工程*, 2016, 19: 1–9]
- 4 Jiang P Y, Ding K, Leng J W, et al. Service-driven social manufacturing paradigm (in Chinese). *Compu Integra Manuf Sys*, 2015, 21: 1637–1649 [江平宇, 丁凯, 冷杰武, 等. 服务驱动的社群化制造模式研究. *计算机集成制造系统*, 2015, 21: 1637–1649]
- 5 Yu F F, Yan L. The innovation effect of user innovation in the innovation community and improvement strategy: A study of haier open innovation platform (in Chinese). *Sci Sci Manag S T*, 2017, 38: 55–67 [余菲菲, 燕蕾. 创新社区中用户创新的创新效应及意见探究: 以海尔HOPE创新平台为例. *科学学与科学技术管理*, 2017, 38: 55–67]
- 6 Jiang P Y, Ding K. Socialization trend analysis of manufacturing mode based on multi-dimensional evolution model (in Chinese). *Comput Integra Manuf Sys*, 2016, 22: 2245–2255 [江平宇, 丁凯. 基于多维度演化模型的制造模式社群化趋势分析. *计算机集成制造系统*, 2016, 22: 2245–2255]
- 7 Jiang P Y. Social Manufacturing Paradigm: Concepts, Architecture and Key Enabled Technologies. 2019
- 8 Jiang P, Ding K, Leng J. Towards a cyber-physical-social-connected and service-oriented manufacturing paradigm: Social manufacturing. *Manufacturing Lett*, 2016, 7: 15–21
- 9 Leng J, Jiang P, Liu C, et al. Contextual self-organizing of manufacturing process for mass individualization: A cyber-physical-social system approach. *Enterprise Inf Syst*, 2020, 14: 1124–1149
- 10 Jiang P, Leng J, Ding K, et al. Social manufacturing as a sustainable paradigm for mass individualization. *Proc Institution Mech Engineers Part B-J Eng Manufacture*, 2016, 230: 1961–1968
- 11 Esmaeilian B, Behdad S, Wang B. The evolution and future of manufacturing: A review. *J Manufacturing Syst*, 2016, 39: 79–100
- 12 Hounshell D A. From the American System to Mass Production 1800–1932. *Social Stud Sci*, 1991, 21: 191
- 13 Kidd P T. Agile manufacturing: A strategy for the 21st century. In: *Proceedings of the IEEE Colloquium on Agile Manufacturing (Digest No. 1995/179)*. London: IEEE, 1995. 1–6
- 14 Martinez M T, Foulletier P, Park K H, et al. Virtual enterprise – organisation, evolution and control. *Int J Production Economics*, 2001, 74: 225–238
- 15 Fan Y S. Connotation and key technologies of networked manufacturing (in Chinese). *Comput Integra Manuf Sys*, 2003, 7: 576–582 [范玉顺. 网络化制造的内涵与关键技术问题. *计算机集成制造系统*, 2003, 7: 576–582]
- 16 Tao F, Zhao D, Hu Y F, et al. Correlation-aware resource service composition and optimal-selection in manufacturing grid. *Eur J Operational Res*, 2010, 201: 129–143
- 17 Smith M A, Kumar R L. A theory of application service provider (ASP) use from a client perspective. *Inform Manage-Amster*, 2004, 41: 977–1002
- 18 Sun L Y, Li G, Jiang Z B, et al. Service-embedded manufacturing: Advanced manufacturing paradigm in 21st century (in Chinese). *China Mech Eng*, 2007, 19: 2307–2312 [孙林岩, 李刚, 江志斌, 等. 21世纪的先进制造模式——服务型制造. *中国机械工程*, 2007, 19: 2307–2312]

- 19 Gao J, Yao Y, Zhu V C Y, et al. Service-oriented manufacturing: A new product pattern and manufacturing paradigm. *J Intell Manuf*, 2011, 22: 435–446
- 20 Meier H, Völker O, Funke B. Industrial product-service systems (IPS2). *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 52: 1175–1191
- 21 Li B H, Zhang L, Wang S L, et al. Cloud manufacturing: A new service-oriented networked manufacturing model (in Chinese). *Comput Integra Manuf Sys*, 2010, 16: 1–7 [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. *计算机集成制造系统*, 2010, 16: 1–7]
- 22 Zhong R Y, Lan S, Xu C, et al. Visualization of rfid-enabled shopfloor logistics big data in cloud manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 84: 5–16
- 23 Liu Y K, Wang L H, Wang X, et al. A revisit to cloud manufacturing (in Chinese). *China Mech Eng*, 2018, 29: 2226–2237 [刘永奎, 王力羣, 王曦, 等. 云制造再探讨. *中国机械工程*, 2018, 29: 2226–2237]
- 24 Xun X. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robot Comput Integra Manuf*, 2012, 28: 75–86
- 25 Lager T, Tano K, Anastasijevic N. Open innovation and open production: A case of a technology supplier/user collaboration in the process industries. *Int J Innov Mgt*, 2015, 19: 1550022
- 26 Momme J. Framework for outsourcing manufacturing: Strategic and operational implications. *Comput Industry*, 2002, 49: 59–75
- 27 Bask A, Lipponen M, Rajahonka M, et al. The concept of modularity: Diffusion from manufacturing to service production. *J Manuf Technol Manag*, 2010, 21: 355–375
- 28 Yao X F, Yu M, Cheng Y, et al. Connotation, architecture and key technologies of internet of manufacturing things (in Chinese). *Comput Integra Manuf Sys*, 2014, 20: 1–10 [姚锡凡, 于淼, 陈勇, 等. 制造物联网的内涵、体系结构和关键技术. *计算机集成制造系统*, 2014, 20: 1–10]
- 29 Yao X, Jin H, Zhang J. Towards a wisdom manufacturing vision. *Int J Comput Integrated Manufacturing*, 2015, 28: 1291–1312
- 30 Shi H, Yang M, Jiang P. Social production system: A three-layer smart framework for implementing autonomous human-machine collaborations in a shop floor. *IEEE Access*, 2021, 9: 26696–26711
- 31 Jiang P, Leng J, Ding K. Social manufacturing: A survey of the state-of-the-art and future challenges. In: *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*. Piscataway: IEEE, 2016. 12–17
- 32 Cao W, Jiang P Y. Cloud machining community for social manufacturing. *Appl Mech Mater*, 2012, 220–223: 61–64
- 33 Jiang P, Ding K. Social manufacturing: A new way to enable outsourcing productions. In: *Proceedings of International Conference on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM)*. Taipei: ICIDM, 2012. 12–14
- 34 Wang F Y. From social computing to social manufacturing: The coming industrial revolution and new frontier in cyber-physical-social space (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2012, 6: 658–669 [王飞跃. 从社会计算到社会制造: 一场即将来临的产业革命. *中国科学院院刊*, 2012, 6: 658–669]
- 35 Wang F Y, Shang X, Qin R, et al. Social manufacturing: A paradigm shift for smart prosumers in the era of societies 5.0. *IEEE Trans Comput Soc Syst*, 2019, 6: 822–829
- 36 Xiong G, Wang F Y, Nyberg T R, et al. From mind to products: Towards social manufacturing and service. *IEEE/CAA J Autom Sin*, 2018, 5: 47–57
- 37 Mohajeri B. Paradigm shift from current manufacturing to social manufacturing. Dissertation for the Master's Degree. Finland: Aalto University, 2015. 60–75
- 38 Hamalainen M, Karjalainen J. Social manufacturing: When the maker movement meets interfirm production networks. *Business Horizons*, 2017, 60: 795–805

Research and development of social manufacturing model and 3D printing testbed for industrial internet

JIANG PingYu, SHI HaoLiang, YANG MaoLin, GUO Wei, MAKANDA Inno Lorren Désir & DONG HuaWei

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

The deep integration of the new generation of information technology and manufacturing is driving manufacturing to socialization, service-oriented, interconnected integration, and platform-oriented development. The industrial internet-oriented social manufacturing model fits the current manufacturing industry's vision of intelligent transformation and the creation of new business formats. Based on the analysis of the evolution of the current manufacturing model, this paper presents the system architecture and operating logic of the social manufacturing model driven by information-physical-social interconnection and explores three key implementation technologies, including Social sensor-driven resource clustering and community creation, cyber-physical-social interconnection driven social manufacturing system and software model of social manufacturing. Developed a 3D printing testbed for social manufacturing and verified the feasibility of the social manufacturing theory by introducing testbed application development and the production operation process. At the same time, it also provides a demonstration and guiding role for the application and practice of the industrial internet.

manufacturing model, industrial internet, social manufacturing, cyber-physical-social interconnection, 3D printing testbed

doi: [10.1360/SST-2021-0342](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0342)