

走向社会信息物理生产系统

景轩¹ 姚锡凡¹

摘要 随着信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS) 融合深度和融合广度的不断增加, 信息物理生产系统 (Cyber-physical production system, CPPS) 呈现出显著的社会化趋势. 通过对信息物理生产系统相关技术的研究, 分析了信息物理生产系统的社会化演进历程, 建立了社会信息物理生产系统 (Social cyber-physical production system, SCPPS) 模型; 根据人与智能体的信息物理交互行为差异, 基于对人类社会行为特点的分析, 类比研究了智能体社会与人类社会融合的广义互联网社会特点; 归纳出信息物理系统的七种交互模式及其在社会信息物理生产系统中的应用; 总结出社会信息物理生产系统面临标准化、人性化和安全化的挑战问题.

关键词 信息物理系统, 信息物理生产系统, 社会信息物理生产系统, 物联网, 交互模式

引用格式 景轩, 姚锡凡. 走向社会信息物理生产系统. 自动化学报, 2019, 45(4): 637–656

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180274

Towards Social Cyber-physical Production Systems

JING Xuan¹ YAO Xi-Fan¹

Abstract With the increasing fusion depth and breadth of cyber and physical spaces, the cyber-physical production system (CPPS) presents a significant social trend. In this paper, through investigations on related CPPS technologies, we expound the social evolution of CPPS, and establish a social cyber-physical production system (SCPPS) model. According to the difference of cyber-physical interaction between humans and agents, we derive the behavior characteristics of the networked society of agents and humans based on an analogical analysis of the characteristics of human society. We also discuss the cyber-physical interaction models and their application in SCPPS, as well as the challenges of SCPPS in terms of standardization, humanization and security.

Key words Cyber-physical system (CPS), cyber-physical production system (CPPS), social cyber-physical production system (SCPPS), internet of thing (IoT), interaction mode

Citation Jing Xuan, Yao Xi-Fan. Towards social cyber-physical production systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(4): 637–656

信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS) 是在广泛的时空维度中, 将信息空间与物理空间的实体进行网络化的深度融合, 通常由传感-执行系统采集和执行物理信息, 通过信息网络系统进行信息的处理和传递, 通过计算控制系统进行综合决策, 实现物理系统到信息系统的映射和信息系统对物理系统的控制决策. 美国自然科学基金会最早将 CPS 定义为与网络部件密切协作的物理感知系统, 可以实现 3C (Computation, communication, control) 功能, 从而提供广泛的网络服务^[1]; 2016 年, 美国国家标准与技术研究院发布了信息物理系统框架 1.0

版本, 从研究内容和研究过程两方面架构了 CPS 理论研究框架, 指出 CPS 的概念模型是能与进行交互的系统 (System of system, SoS)^[2]; 2015 年 7 月, 欧盟发布 CyPhERS CPS 欧洲路线图和战略, 强调了 CPS 对欧洲社会各方面发展的战略意义^[3]; 德国将 CPS 作为实现工业 4.0 的支柱技术, 在 2015 年发布的 CPS 研究报告中强调了 CPS 的潜力, 分析了未来的机遇与挑战^[4].

信息革命引发的核反应在物理系统中连续释放出惊人的能量. 信息空间与物理空间的交互速度、交互范围、交互深度、交互密度急剧增加, 借助大数据科学, 信息物理系统向着知识密集型的万物智能互联方向发展; 信息的激增使人际交互更加密切, 信息物理系统的最终服务对象是人类社会, 面向服务的架构更适应于竞争激烈的网络信息化市场, 借助虚拟化技术和云雾计算等架构, 信息物理系统向着务联化的方向发展; 随着智能移动设备人均保有量的迅速提高, 信息的人均保有量、流通量、透明度增大, 借助万物互联网络和面向服务的架构体系, 人类

收稿日期 2018-05-03 录用日期 2018-08-02
Manuscript received May 3, 2018; accepted August 2, 2018
国家自然科学基金 (51675186, 51175187), 广东省科技计划项目 (2017A030223002, 2018A030321002) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (51675186, 51175187), and Science and Technology Program of Guangdong Province (2017A030223002, 2018A030321002)
本文责任编辑 陈龙
Recommended by Associate Editor CHEN Long
1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640
1. School of Mechanical and Automotive, South China University of Technology, Guangzhou 510640

的社会特性将逐渐渗透信息物理系统,使信息物理系统向着广义互联的社会化方向发展.

社会化是 CPS 发展的必然趋势,最终形成社会信息物理系统 (Social CPS, SCPS),图 1 为社会信息物理系统的演进历程. 嵌入式系统 (Embedded system, ES) 和智能体系统 (Agent) 可以认为是 CPS 的早期形式,但它们的专用性较强,交互范围有限. 信息通信技术 (Information communication technology, ICT) 的发展使 CPS 的覆盖范围迅速扩张,引发数据井喷,数据量的激增形如一把双刃剑,一方面促进了大数据科学的发展,使 CPS 由浅层信息密集系统升级为深层知识密集系统,有助于建立完整可靠的数字孪生 (Digital twin) 系统;另一方面,复杂的孪生系统给建模和控制带来了技术困难,与此同时,庞杂的数据量也引起了 IT 资源的匮乏.

基于模块化建模和网络化控制形成的离散控制系统 (Discrete control system, DCS) 可以改善复杂系统的建模和控制问题,结合人工智能技术形成的多智能体系统 (Multi agent system, MAS) 具有更好的自适应性和自组织性. 但随着移动设备和可穿戴智能设备人均保有量的快速增长,人联网

(Internet of people, IoP) 已逐渐融入物联网的脉络中, MAS 结合人的柔性经验形成的人机交互系统 (Human machine interaction, HMI) 具有更好的复杂任务处理能力和作业鲁棒性. 基于无线传感网和无线传感执行网等网络技术,形成了复杂的社会化物联网 (Internet of things, IoT).

针对 IT 资源匮乏问题,人们把目光投向了虚拟化技术 (Virtualized machine, VM),结合面向服务的架构 (Service-oriented architecture, SOA) 模式,形成云 (Cloud) 服务,实现硬件与应用的逻辑分离,从而有效提高 IT 资源的利用率. 由于服务不能脱离人类社会,资源相对集中的云计算架构已经不能满足信息物理系统的地理分散性、时效性、移动性、社会性、节能性和安全性等要求,因此需要将计算单元扩展到网络边缘,边缘计算 (Edge computing)、雾计算 (Fog computing) 和移动计算 (5G) 可以提供高性能的务联网 (Internet of service, IoS) 架构,有效平衡服务质量和用户体验感之间的矛盾,特别是随着信息透明度和共享性的增加,安全隐私和信任危机等问题日渐严峻,区块链技术可以实现去中心化、去信任化、共享化和可编程智能化,由此提高信息网络空间的安全性和可靠性,成为分布式计算架

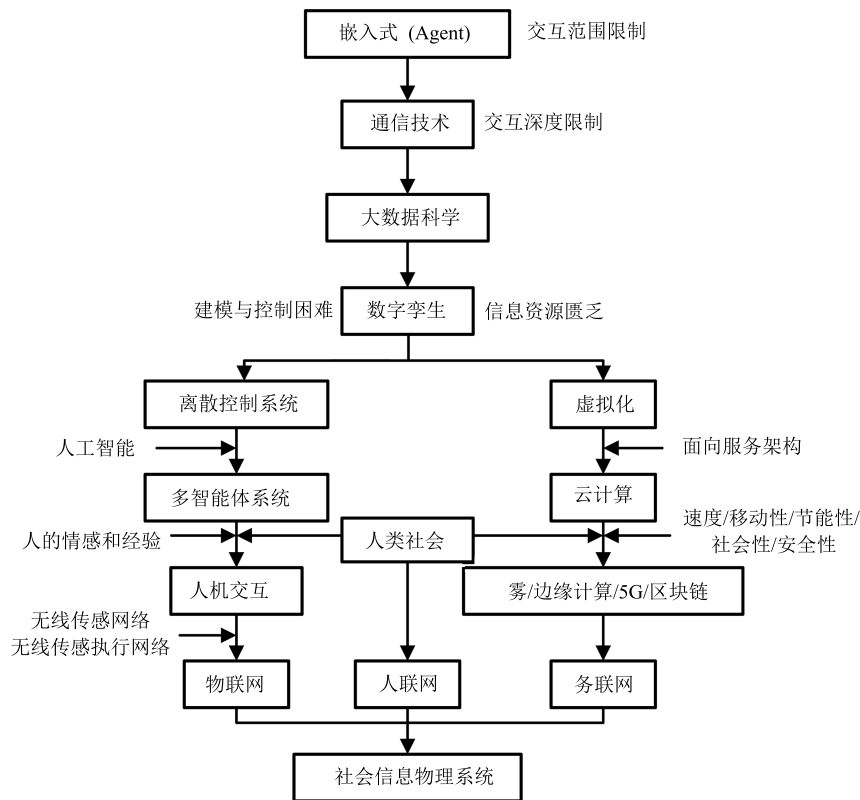


图 1 社会信息物理系统的演进过程

Fig. 1 Evolution process of social cyber-physical system

构的核心支撑技术。

IoT、IoP 和 IoS 三网交织叠加, 使物与物、人与人、人与物形成的信息物理融合系统具有广义互联的社会化特点。研究信息物理系统的社会化特点, 有助于指导信息物理系统在社会生产中的应用。

在 CPS 中, 物理世界的智能体可以在网络空间进行广泛而密切的自组织交互作业, 从而摒除了地理界限, 缩小了物理延时和复杂随机环境的干扰, 因此广泛应用于工业系统^[5]。在 2013 年的汉诺威工业博览会上, 德国正式提出基于 CPS 的工业 4.0 概念^[6], 强调从水平价值网络、垂直制造系统和端对端工程价值链三个方面提高工业系统的集成度; 2016 年, 德国人工智能研究中心 (Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, DFKI) 建立了全球第一个已投产的信息物理生产系统实验室^[7]; 2015 年, 我国提出了“中国制造 2025”战略计划, 强调了 CPS 对制造系统的重要性^[8]。由此可见, 工业系统的第四次升级需要以信息物理系统作为基础环境。智能制造的前身是计算机集成制造 (Computer integrated manufacturing systems, CIMS), 计算机技术与制造设备的集成提升了制造过程的自动化水平, 但由于早期大多采用开环控制, 并且缺乏设备间的交互, 因此通常存在及时性差、信息孤岛、设备主动性差等缺点, 影响综合制造性能^[9]。基于 CPS 的生产系统, 采用分布式传感器-执行器闭环控制, 使设备具有自适应能力, 通过网络空间的信息交互, 使设备间实现自组织协同作业, 提高制造系统整体性能。虽然 CPS 在工业系统中的应用已经取得了丰富的研究成果, 但至今没有一个统一的架构和体系标准。Monostori^[10] 研究了信息物理生产系统 (Cyber-physical production system, CPPS), 指出 CPPS 是计算机科学、通信技术和自动化制造的有机结合, 它将企业规划层、工厂管理层、过程控制层和部分设备控制层的金字塔式层级结构离散化, 从而实现制造系统的自主分布式控制。Lee 等^[11] 提出了将 CPS 应用于制造系统的 5C (Connection, conversion, cyber, cognitive, configuration) 架构, 从低到高分别实现环境感知、自我感知、同辈感知、优化决策和弹性控制; Wiesner 等^[12] 强调了生产服务化的理念, 提出了一种结合 CPS 和生产服务系统的信息物理生产服务系统概念; Ecer^[13] 指出随着人与信息模型的优化交互日益密切, 社会化的信息物理生产系统将成为发展和研究趋势; 姚锡凡等^[14] 将“四网” (物联网、务联网、内容知识网、人联网) 与制造技术深度融合, 提出了人机物协同的智慧制造模式, 形成社会信息物理生产系统 (Social cyber-physical production system, SCPPS) - 智慧制造系统的基础理论与技术体系^[15],

延伸和拓展了工业 4.0 理念下的信息物理生产系统。王飞跃提出了社会物理网络系统 (Cyber-physical-social systems, CPSS) 的概念^[16-17], 指出社会计算是社会制造的基础, 社会计算能及时获取和转化信息, 借助虚拟计算实验进行可行性验证, 平行管理和控制系统为社会制造系统提供有效的操作平台^[18]。

由此可见, 人们已从 CPS 转向更大范围的 SCPS 视角来探讨智能 (智慧) 制造, 本文对此加以综述评价。首先对基于 CPS 的智能制造-信息物理生产系统进行综述, 然后进一步拓展到基于 SCPS 的智慧制造-社会信息物理生产系统, 最后对社会信息物理生产系统面临的标准化、人性化和安全化等挑战及其关键技术进行探讨。

1 信息物理生产系统

1.1 CPPS 模型

信息物理生产系统由传感执行层、信息网络层和计算控制层组成。传感执行层负责生产系统的物理执行过程和信息感知过程; 信息网络层负责物理数据的采集、数据的预处理、数据的网络传输和传感执行层与计算控制层之间的信息交互; 计算控制层负责对生产系统的大数据进行挖掘和分析, 结合人工智能技术将庞杂的数据转化为知识模型, 并通过云技术形成云服务, 共享于生产系统中, 提高各个子系统的协同能力。制造系统的物理功能具体表现在传感执行层, 但同时与信息网络层和计算控制层的参与密不可分。制造系统的物理功能分为企业内部和企业外部两部分, 企业内部主要进行企业资源计划、生产执行管理和各部门之间的协调管理, 企业外部主要进行客户关系管理 (Customer relationship management, CRM) 和供应商关系管理 (Supplement relationship management, SRM)。信息物理生产系统的示意图如图 2 所示。

制造企业内部由智能体和管理操作人员组成, 智能体具有感知、推理、分析、通信和决策能力, 多智能体间通过协同作业, 形成生产内部的多智能体系统, 可以实现生产系统的柔性自治。人与智能体的协同作业, 可以充分结合人的鲁棒性和智能体的高效性。企业内部的人事管理 (Human relationship management, HRM) 可以优化内部人际关系和组织机制, 形成团队优势。

制造企业外部主要进行面向客户和供应商的市场资源优化, 并据此调整企业内部的相关决策。随着客户需求多样性的不断提高, 制造业逐渐呈现出长尾趋势^[19], 即制造系统将由大批量定制转换为大规模个性化生产, 因此要保持优良的客户关系, 首先要及时了解市场需求和用户意见, 其次要具有柔性程度

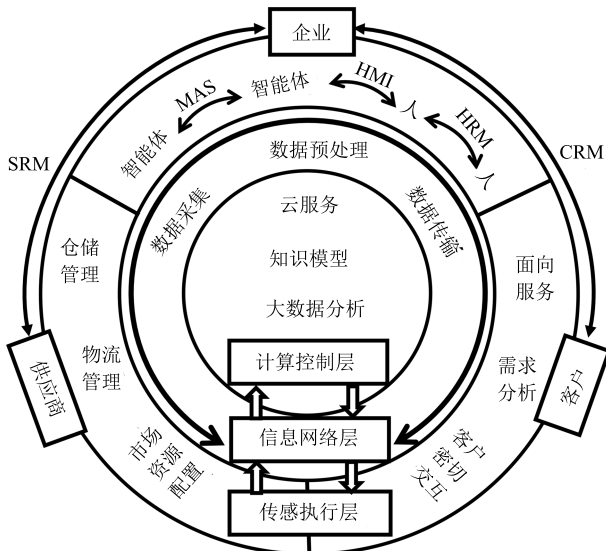


图2 信息物理生产系统

Fig. 2 Cyber-physical production system

较高的生产系统,可以根据市场反馈信息进行预测制造 (Predictive manufacturing, PM), Lee 等^[20] 提出了利用 CPS 实现预测制造的系统方法; Lam 等^[21] 通过收集特许客户的数据创建了一个客户关系挖掘系统,并通过客户的需求和行为形成市场策略; Xu 等^[22] 提出了一种实现云制造环境下的面向客户大批量定制,通过集成的神经网络、遗传算法和模糊规则提取原始数据中的语义信息,以此来指导产品设计.除此之外,提高用户参与度有助于提高用户体验感从而实现与用户的密切交互^[23],企业需要建立完整的用户体验历程图 (Customer journey map, CJM),提高生产各阶段的用户参与度,为此需要对生产系统进行模块化设计 (Modular design, MD). Bertolotti 等^[24] 利用开源部件和实时操作系统构建成熟的模块化网络嵌入式系统,并通过 CPS 将制造过程虚拟化,配置在云端形成服务,从而增强与客户的互动,提高服务质量; Stark 等^[25] 针对 CPPS 的设计,提出了一种新的架构设计方法,从而形成模块化的 CPPS,并通过虚拟化的方法进行功能校验; Tan 等^[26] 针对产品的个性化制造,提出了一种基于装配的优化组合策略,并基于 CPS 为用户提供协同设计平台,提高产品的灵活性和用户参与度.企业与供应商之间的关系管理,需要从市场资源配置、仓储管理 (Storage management, SM) 和物流管理 (Logistic management, LM) 三个方面进行,这都离不开充分、可靠、及时的信息,因此信息网络系统的协同起到了至关重要的作用. Mladineo 等^[27] 指出工业 4.0 环境下的 CPPS 架构趋于扁平化,并从信息物理生产网络的信息通信角度提出了一种动态联盟合作商的类人蚁群优化算法; Wang

等^[28] 构建了一个基于服务的云制造平台,用于废旧电子设备的再利用和再制造; Qiu 等^[29] 提出了支持物联网服务的工业园区物流服务,企业间可进行实时智能交互,从而实现实体资产和服务的高效共享. Addo-Tenkorang 等^[30] 构建了企业供应链同步网络的概念架构,结合社会网络理论进行多角度混合建模分析.

1.2 CPPS 实现技术

1) 嵌入式与智能体技术

CPS 是在嵌入式系统的基础上发展起来的,将计算控制单元嵌入执行单元,使设备具有即时响应能力.但由于简单的嵌入式系统专用性强,缺乏可重构柔性,针对大型复杂的嵌入式系统, Xilinx 和 Altera 等公司提出了现场可编程门阵列 (Field-programmable gate array, FPGA) 的嵌入式解决方案,实现了嵌入式系统的可重构^[31]. 单纯的计算控制单元嵌入仅能实现开环控制,设备没有感知能力和误差反馈能力,控制性能差,因此需要将传感单元、控制单元和执行单元集成于一体,成为具有感知、决策和执行能力的闭环控制系统,即智能体.嵌入式系统针对特定智能体与特定环境间的闭环交互,而 CPS 强调多领域智能体间通过网络交互实现复杂的物理交互. Long 等^[32] 基于嵌入式技术,将数字控制系统的功能模块化,形成可以灵活调用的数字加工网络,从而提高设备资源利用率;徐钢等^[33] 根据钢铁制造过程的特点,研究了采用嵌入式 CPS 方法的产品质量在线管控系统架构和产品质量管控模型,从而实现全流程产品质量在线动态管控与优化.

2) 通信技术

通信技术主要包括传感网络通信技术和传输网络通信技术,传感网络负责物理信息的采集和物理设备间的通信,通常采用短距离的无线通信技术,例如 RFID, NFC, Bluetooth, ZigBee, UWB, 60 GHz 等.传输网络负责信号的网络传输,通常分为有线通信和无线通信两类,有线通信依靠双绞线、同轴电缆、光纤等传播介质进行信号的网络传输;无线通信通常采用移动蜂窝技术,例如 GSM (2G), GPRS (2.5G), UMTS (3G), LTE, LTE-A (4G) 等实现移动设备的网络无线通信,以及采用 WLAN 无线局域网技术,例如 WI-FI, WiMAX 等实现局域网范围内的无线通信.随着智能移动通信设备量的激增,到 2020 年,物与物的通信量将是人与人通信量的 30 倍^[34].面向未来网络通信的泛在互联,需要具有数据流量大、覆盖范围广、支持密集异构网络、支持高速移动、能耗低、时延小等优点的新一代网络通信技术,因此 5G 网络通信技术应运而生^[35].在信息传输方面,通过超密集异构网络技术 (Ultra-

dense networks, UDN), 部署更密集的基站从而提高网络流量和传输速率^[36]; 大规模 MIMO 技术可使天线数增加至上百条, 从而有效扩大网络通信用户容量^[37]; 采用 D2D 通信能有效缓解基站通信压力^[38]; 正交频分复用技术 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 可以实现时分复用 (Time division multiple access, TDMA)、频分复用 (Frequency DMA, FDMA) 和码分复用 (Code DMA, CDMA) 等多址接入技术的兼容, 提高信息传输效率^[39]. 在网络的组织架构方面, 自组织网络技术 (Self-organized network, SON) 使信息网络具有自布置和自维护的功能, 结合网络功能虚拟化技术 (Network function virtualization, NFV) 和软件定义网络技术 (Software define network, SDN) 可以将逻辑功能从物理硬件中解耦出来, 通过软件化调用实现网络设施的可编程控制^[40]; 将内容分发网络技术 (Content distribution network, CDN) 引入虚拟代理网络, 可以实现信息的智能高效分发^[41]; 信息中心网络技术 (Information-centric network, ICN) 将信息传播从传统“推”的模式 (TCP/IP, 以主机地址为中心) 转换为“拉”的模式 (以信息为中心), 实现信息高效获取^[42].

3) 大数据科学

随着终端设备智能化水平的提高、网络技术的发展以及控制算法的改进, CPS 的重心由物理感知系统转换为信息系统与物理系统在更广时空维度、更深交互层次的融合, 因此引发了数据的井喷式增长, 由此诞生了大数据科学, 从通过理论建模来寻找事物间的因果关系转换为基于大数据挖掘分析的相关关系研究, 从而能深入挖掘表面现象下的隐藏逻辑, 提高 CPS 的融合度. Liu 等^[43] 指出建立 CPS 的控制模型时, 不能忽略由复杂大数据引起的控制混沌问题, 并据此提出了一种基于模糊反馈线性化的混沌时间序列预测算法; Venkatesan 等^[44] 针对空间数据的复杂性, 基于紧凑模式树算法提出了协同定位分类策略, 用于未知数据的标签预测. 将大数据科学用于制造系统, 不但可以高效利用生产信息从而提高生产效率, 也能用于市场信息挖掘从而实现预测制造和主动制造^[45]. Babiceanu 等^[46] 提出了一种基于大数据科学的 CPPS 架构, 提高了制造系统的复杂事件的处理能力; Chen 等^[47] 利用指令域名方法建立了工件加工的 CPS 模型, 并基于 G 代码的对数控加工过程进行定量描述, 通过对加工大数据的分析进行参数优化和设备诊断; Kuang 等^[48] 针对社交网络的数据激增问题, 综合客户信息的信息热度、发布者与用户亲密度和用户兴趣领域三方面的大数据分析预测, 提出了一种价值信息推荐机制.

4) 数字孪生

由于数据的丰富, 信息空间与物理世界的模型匹配度增高、匹配范围增大, 逐渐形成了数字孪生系统, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 在基于数字孪生的空军飞行器的发展研究中指出, 数字孪生是多物理、多领域基于物理模型、传感更新和历史数据进行统计分析与仿真的系统^[49]; Grieves^[50] 指出数字孪生由物理产品、虚拟产品和物理与虚拟空间的交互信息三部分组成; Ma 等^[51] 描绘了一个信息支持的新世界, 由信息世界和与信息世界相铰链的物理、社会和精神世界组成, 信息实体可以是物理实体在信息空间的映像, 也可以是信息世界的虚拟实体. 构建数字孪生生产系统可以提高制造系统的实时可观性和可控性, 有利于提高 CPPS 的融合广度和深度. Alam 等^[52] 提出了一种基于云的 CPS 数字孪生架构, 用于不同程度的混合计算模式识别, 利用贝叶斯信念网络构建了 CPPS 的智能交互控制器, 使系统具有较好的实时性和重构性; Tao 等^[53] 基于数字孪生研究了车间数字孪生系统, 讨论了物理车间、虚拟车间、车间服务系统和车间数字孪生数据四大成分的关键技术和集成策略, 并进一步提出了一种基于数字孪生系统的全生命周期产品设计、制造、服务方案^[54]; Schroeder 等^[55] 利用生产系统通用数字交换格式对有关数字孪生系统的属性进行建模, 有助于混合数字孪生系统中的数字格式转换. 然而, 在信息空间建立物理世界的完整模型, 形成完全的数字孪生系统是不切实际的. 一方面, 对庞大而复杂的系统进行准确建模和精确控制的难度非常大; 另一方面, 完全的数字孪生系统需要巨大的存储空间、强大的计算机处理能力和充足的网络带宽, 特别在 IT 资源弥足珍贵的大数据时代, 有选择的进行信息物理融合对于提高融合效率和经济性至关重要.

5) 离散控制系统

针对复杂系统难以进行准确建模和精确控制的问题, 学者们采用离散控制策略, 对庞杂的系统进行分解建模和分布控制, 不但提高了控制系统的整体性能, 还赋予了复杂系统灵活的自组织能力和扩展能力, 提高了系统的适应性. Misik 等^[56] 研究了大型离散系统, 总结了离散时间、连续时间离散化和多子系统解耦等理论模型. 随着无线传感网络^[57] (Wireless sensor network, WSN) 和无线传感执行网络 (Wireless sensor actuator network, WSAN) 的应用, 离散控制系统可以无限扩张至每一个智能体设备的应用边缘, 基于传感网络构建的离散网络化控制系统 (Distributed networked control system, DNCS) 可以极大程度提高信息物理系统的融合广度和融合深度. Gupta 等^[58] 从网络技术、网络

延时、网络资源调度分配、实时网络安全、网络部件集成和系统容错性等方面对网络控制系统关键技术进行了详细的总结; Mangharam 等^[59]提出了一种嵌入式虚拟机计算方法, 将控制器与物理底层设备解耦, 使控制任务可以在动态网络节点中迁移, 借助无线传感网络, 将动态网络视为控制器, 从而生成适用于信息物理系统的动态网络离散控制, 证明了系统的鲁棒性和可扩展性; Lu 等^[60]针对工业环境的实时性挑战, 从基于 WSN 的实时调度和无线信息物理协同设计两方面研究了 WSN 在工业控制中的应用; Ge 等^[61]通过网络化控制系统的集中、分布、离散三种布置方式对比, 阐述了离散网络化控制系统的优越性, 从控制、通信和计算三个方面分析了离散网络化控制系统的设计难点和研究现状, 并从图论、拓扑结构、触发方式三方面介绍了 DNCS 方法论; Adamson 等^[62]针对信息物理系统中的自适应离散化制造, 结合产品制造特征和事件驱动功能模块提出了一种基于特征的制造概念, 用以实现设备自适应控制和在离散协作制造环境中的设备资源任务匹配. 虽然离散控制策略具有一定优势, 但随着系统离散程度的增大, 系统的复杂性也急剧增加, 离散网络的信息交互出现瓶颈. García-Valls 等^[63]指出, 要使离散化的 CPS 实现更好的融合, 核心是利用通信中间件技术, 但由于中间层的引入会引起系统延时并增加系统不确定性, 因此提出了中间件的选择方法和参数的微调方法, 以适应不同领域和范围的离散化信息网络系统; Etxeberria-Agiriano 等^[64]提出了通过中间件进行离散资源和服务延时管理的协作拓扑结构, 并分析了在随机环境中的自适应性; Ishizaki 等^[65]针对离散控制系统的复杂性问题, 提出了一种可以保留控制系统空间离散特性的离散保留模型简化机制; Zarrin 等^[66]针对离散系统复杂的资源查询问题, 从底层基础、查询技术、评价指标等方面进行重新分类, 对相关技术给出了详细评述; Ren 等^[67]分析了离散控制系统因延时和丢包等问题引起的滑移模态震颤, 基于李雅普诺夫函数方法, 给出了线性矩阵不等式形式的指数稳定条件, 分析了滑移系统的震颤特性, 并研究了采样频率和外界干扰对震颤域的影响.

6) 多智能体系统

随着群体智能研究的不断深入以及人工智能(AI)领域的飞跃式发展, 诞生了多智能体系统, 智能体间通过协同合作将复杂的物理作业分解、并行执行, 提高了系统作业效率, 系统不需要在信息空间建立完整而详细的计算模型, 节省了计算资源. 智能体具有感知、控制和执行能力, 结合 AI 技术可以通过学习提高作业性能和环境适应性, 通过多智能体的自适应和自组织使整个系统更具灵活性和自

治性, 因此成为现代生产系统的研究重点. 多智能体系统的难点在于如何描述智能体复杂网络内部的隐含关系; 如何权衡离散与集中机制从而实现复杂系统的可控性; 如何实现复杂网络的高效信息物理交互等. Cao 等^[68]从一致收敛、编队控制、系统优化、系统评价方面系统介绍了多智能体系统的研究现状; Valckenaers 等^[69]针对复杂动态系统, 提出了基于自适应和自组织规则的合弄控制架构 (ADaptive holonic Control aRchitecture for distributed manufacturing systems, ADACOR), 并讨论了在不削弱个体能力的前提下实现子系统间的自适应和自组织交互; Barbosa 等^[70]在合弄控制的研究基础上, 基于生物进化理论, 设计了考虑行为和结构向量的二维自组织机制, 使系统能根据紧急任务进行进化和自组织; Sanislav 等^[71]提出了包含多个智能体子系统的架构, 用于监测和预防系统硬件失效, 从而保证 CPS 的可靠性; Taboun 等^[72]提出了嵌入式智能无线传感网络, 智能传感节点可以获知局域网网络拓扑结构、通信端口状态、任务状态和任务等级等, 并通过与聚类节点之间的智能通信, 实现高效的数据路由和集聚; Verma 等^[73]设备通信域分为设备域、网络域和应用域, 设备通过 P2P (Peer-to-peer) 模型在设备域中通信, 用户域设备间通过 client/server 模型进行通信, 并综合介绍了设备通信的特点、标准和数据流量应用类型. 基于多智能体技术的生产系统不但可以发挥智能设备生产效率高和通信实时性强的特点, 还可以实现生产过程动态组织、调度和扩展, 提高生产系统自治化程度和柔性. Xu 等^[74]基于智能工厂的研究现状, 提出了基于大数据的智能生产线模式识别、拓扑建模、预测方法和基于深度神经网络的诊断方法, 以及基于云的机器自组织配置机制; Zhang 等^[75]针对车间生产系统, 构建了任务资源调度自组织模型和动态环境自适应模型, 从而实现车间多智能体的动态协同; Jiang 等^[76]研究了基于多智能体的离散系统优化调度策略.

7) 人机协同

虽然多智能体系统具有一定自治性, 但不能缺少人的监督、干预和管理, CPPS 是人、物和信息三者的有机融合^[77]. 多智能体系统的高效性和人的柔性事物处理能力相结合, 可以完成系统性更强、复杂度更高的任务, 因此人机协同系统成为 CPS 的另一个研究热点. 人机交互能力是人机协同系统的关键, 目前的主要交互方式有感官交互和生物电波交互. Castelli 等^[78]提出了一种基于机器学习混合高斯算法的视觉识别方法, 较大程度缩减了识别响应时间; Vafadar 等^[79]提出了一种基于视觉的手势识别方法, 通过对时空卷积、运动轨迹图像和特征空间

特征三种算法的对比, 得出时空卷积算法具有明显优势; Xu 等^[80] 设计了一种基于注视的人机协同系统, 通过实验证明, 人机对视有助于提高语言和行为的一致性和同步性; Rascon 等^[81] 利用多方面位到达估计, 设计了远距离声源定位系统, 用于复杂声环境下的有效人机交互; Alonso-Martín 等^[82] 将人机交互触觉特征的识别过程, 转换为利用机器学习对接触音频信号进行特征识别的过程, 有效提高了交互系统的准确性和经济性; Gastaldo 等^[83] 采用压电树脂材料, 利用机器学习算法对具有连续张量形态的原始接触数据进行分析, 从而实现接触模式识别; Cherubini 等^[84] 提出了一种多交互模式的通用控制架构, 使控制模式在多交互模式间平稳转换, 实现复杂环境下的人机交互可靠性; Katona 等^[85] 利用脑电图实现人脑对机器的控制, 设计了控制系统以及脑电波的用户可视化界面; Saproo 等^[86] 通过神经信号, 将计算系统与大脑皮层计算进行生物耦合, 从而实现机器计算与人脑计算的协同; Ma 等^[87] 基于眼动电图和脑电图混合的方法实现人机交互, 眼动电图进行眼部运动监测, 脑电图进行时间关联电位监测, 从而协助有运动障碍的病人的日常生活; Karunanayaka 等^[88] 通过大量生物实验研究, 指出温度的变化将引起味觉的变化, 并据此提出了一种基于热传感的热味觉传感技术; Frank 等^[89] 针对多智能体在人机协同环境下的评估和控制挑战, 对移动设备采用视觉和惯性的混合传感, 从而提高系统执行力、灵活度和计算效率. 除了传统的感官交互, 为了与具有复杂情感的人类进行深度有效的交互, 越来越多的研究倾向于人机情感交互. Esposito 等^[90] 指出, 为了实现可信赖的人机交互, 必须结合社会行为和情感数据对心理因素和计算方法进行综合研究; Cooney 等^[91] 通过实验证明, 触觉交互是人机情感交互的重要组成部分; Hossain 等^[92] 提出了一种基于视觉和声音的情感识别方法, 采用多方位回归进行声音特征识别和多尺度集合分析变换进行人脸特征识别. 目前主流的人机交互技术有虚拟现实 (Virtual reality, VR)、增强现实 (Augment reality, AR) 和混合现实 (Mixed reality, MR) 等. VR 技术通过将物理实体镜像映射于信息空间内, 实现物理实体与信息实体在信息空间的沉浸式虚拟交互, 从而提升感官体验感; Matsas 等^[93] 指出人机协同可以提高制造过程的主动性和自适应性, 并采用虚拟现实的方法提高生产过程人机协同能力和用户满意度. AR 技术通过将信息空间的物体映射于物理空间, 借助虚拟传感器技术^[94], 实现物理实体与信息实体在物理空间的真实交互. Tabbacher 等^[95] 设计了一种基于卡曼滤波和龙伯格观测算法的虚拟传感器, 结合速度传感信号来实现电动汽车传动系

统的容错控制; Brizzi 等^[96] 针对虚拟环境下的信号失真问题, 提出了一种 AR 远程工业装配方案, 实验证明 AR 解决方案提高了任务执行的准确性和效率, 同时降低了操作技术要求. MR 技术结合多种交互方式和交互技术, 实现 CPS 的多方位深度融合; Soete 等^[97] 通过混合现实技术实现视觉应用与数字采集监控应用的协同, 并用于计算机集成制造系统的自动化物流过程; Wang 等^[98] 研究了人机协同系统用于工业装配的分类和现状, 并探究了基于 CPPS 和云计算的人机共融系统用于装配的特性、关键技术及应用. 虽然目前已有较为成熟的理论基础和技术支持, 但复杂工业系统人机协同的实时性、可靠性、安全性、经济性依然是未来发展的挑战. Hu 等^[99] 指出实时信任对于建立可靠的人机协同系统至关重要, 因此根据心理生理测量技术, 提出了一种基于经验的实时信任度传感模型, 用于获取人的实时反应信息; Rezazadegan 等^[100] 通过对人机交互环境下风险因素辨识方法和控制系统设计的综合评述, 指出风险评价方法不但要考虑风险分析函数还要进行人的可靠性分析, 安全控制系统的设计需要综合考虑临近检测、碰撞避让、对接和顺应控制等情形; Peng 等^[101] 针对隐私安全问题, 提出了一种基于行为生物特征和语音命令的连续身份认证系统.

8) 物联网

美国 MIT 提出的 Auto-ID 架构, 基于无线射频识别 RFID 技术实现物体的网络物联, 是最早的物联网形式^[102]; 国际电信联盟 (ITU) 于 2005 年首次提出物联网 (IoT) 的概念, 指出 IoT 是实现物与物在任意空间进行实时泛在互联的技术^[103]. 欧盟于 2009 年发布的《物联网的战略研究路线图》将 IoT 定义为动态的基于标准的、可进行互操作的通信协议且具有自配置能力的全球化网络基础架构^[104]. 我国 2010 年 3 月的政府工作报告指出, 物联网是通过信息传感设备, 按照约定的协议, 把任何物品与互联网连接起来, 进行信息交换和通信, 以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络^[105]. 由此可见, IoT 的内涵与 CPS 有较程度的交叠, 都需要建立物理空间与信息空间的映射关系, 都需要具有物理感知、网络通信、监测控制、决策执行等能力, 通过物体在信息空间的交互操作, 在物理空间产生实际效益. IoT 与 CPS 也有不同之处, IoT 着重于物理实体的识别与信息的网络层交互^[106]; CPS 则强调面向服务的物联网架构, 其实质是物联网 (IoT) 与务联网 (IoS) 的有机融合体, 不仅需要进行物理信息的网络交互, 而且要对复杂的信息事务进行及时的物理反馈与执行^[107]. Cheng 等^[108] 基于事件驱动的面向服务架构, 构建了情境感知的 CPS 协调平台; Shokrollahi 等^[109] 基于富集服务 (Rich Service) 架

构,提出了一种大规模设备可扩展的动态 IoT 策略; Batalla 等^[110]提出了一种基于 ID 的物联网通信接入标准 (IDSECOM),从而能够系统、灵活地联结设备与服务.另外,物联网的研究重点在于如何使物与物在信息空间形成彼此互联的网络;而 CPS 的本质属性是系统的系统,重点研究如何使属于不同系统的物体实现可靠的网络连接,并实现高效的物理交互作业.

9) 虚拟化技术与云架构

针对大数据时代 IT 资源日趋紧张的问题,目前最行之有效的解决方法是利用虚拟化技术打破物理计算资源和网络数据资源的固态壁垒,使硬件、软件以及数据资源可以在网络间动态迁移、弹性部署,充分提高 IT 资源的利用率,实现信息与物理的动态融合,有助于缓解数据激增与计算资源稀缺之间的矛盾. Binu 等^[111]介绍了两种主要的虚拟化技术; Ahmad 等^[112]指出,虚拟机的迁移技术对于动态虚拟资源负荷重布置至关重要,并从带宽优化、服务合并、能源和内存优化等方面对现有的虚拟机迁移技术进行了综合评述; Manohar 等^[113]指出虚拟化技术是云计算的基础,通过位于物理设备和操作系统之间的虚拟机监控器 (VMM/hypervisor) 进行物理资源配置,构建独立虚拟环境.云计算基于虚拟化技术和面向服务的架构技术,充分展现了共享-分布的哲学思想,IT 资源的共享,不但缩减了数据冗余,更为用户提供便利的服务;分布式的计算存储能力,提高了事务的并行处理能力,保证了运行的可靠性.基于云的共享性和分布性,结合大数据科学,可以充分利用广泛时空维度的网络资源,提供丰富、经济且便利的服务,更符合面向服务的价值理念,因此具有广阔的应用前景^[114]. Morariu 等^[115]基于大规模定制化的制造业发展趋势,介绍了一种虚拟化的制造执行系统,利用并行操作实现智能资源配置和自动扩展; Shu 等^[116]提出了一种云集成的 CPS 架构 (CCPSA),为复杂工业应用中面临的虚拟资源管理、云资源调度和生命周期管理等挑战给出了解决方案; Li 等^[117]构建了一个资源-云交互和用户-云交互的双闭环的智能工厂架构,基于云中反馈的大数据进行综合分析,实现系统均载控制; Dehury 等^[118]结合云计算和物联网技术提出了一种高效处理实时数据和科学数据的服务架构,利用 Docker 创建的虚拟环境提供软件服务 (Software as a service, SaaS); Mourtzis 等^[119]基于云计算,结合物联网和大数据分析提出了一种云信息物理融合系统 (CBCPS),并介绍了在制造系统中的设计方法; Colombo 等^[120]详细介绍了基于云的 CPS 在面向服务架构的制造系统中的架构、关键技术和应用.

10) 移动边缘计算架构

由于智能设备的发展趋于便携轻量化,更多的智能设备具有了移动属性,采用云架构进行移动计算会造成数据迁移过于频繁,从而引起网络资源不足、及时性差、能耗多、用户服务质量下降等问题^[121];另外,由于云计算的资源共享特性会引起网络安全方面的威胁^[122],因此需要将资源集中的云架构转换为资源可以动态迁移的云雾架构,采用云雾结合的计算架构更有助于满足 CPS 融合的移动性、及时性、经济性和安全性^[123]. Kumar 等^[124]基于离散计算环境,提出了一种边缘计算架构,可以将网络计算单元延伸到智能手机、传感节点、穿戴设备等移动的计算节点; El-Sayed 等^[125]指出由于未来控制环境的离散化程度逐渐增高,边缘计算可以实现更节能高效的信息物理融合,必将成为未来 CPS 的主流趋势; Osanaiye 等^[126]面向资源和服务效益,提出一个雾计算架构,并针对虚拟资源迁移安全性问题,提出了一种预拷贝在线迁移方法,从而有效缩短宕机时间和资源迁移时间,提高服务质量; Wu 等^[127]构建了一个用于信息制造系统设备诊断和检测的雾计算架构,有很高计算扩展能力,可以实现远距离实时传感和监测; Georgakopoulos 等^[128]指出未来的 CPPS 需要将云计算与边缘计算相结合,从而提高制造系统的组织能力.随着移动设备和可穿戴设备的普及,高速移动通信 5G 时代已经到来,利用云雾结合的计算架构将更有利于大规模移动 CPS 的网络化融合. Vilalta 等^[129]提出了一个高度离散化的雾计算架构 (TelcoFog),可以布置在网络边缘提供标准化的经济的 5G 服务; Yang 等^[130]针对提高服务质量、优化网络资源,提出了一种软件定义网络的云雾结合计算架构.

11) 区块链技术

区块链技术 (Blockchain) 是一种去中心化、去信任化、基于数据共享和共识更新的分布式组织方式,最初作为比特币数字加密的核心技术^[131],通过加密的链式结构存储和验证数据,保证了数据的可靠性和安全性;基于共识算法实现分布式节点对数据的共识更新,增强系统高效性和共享性的同时,提高了篡改系统的成本;利用可编程特性对系统进行柔性智能操作,增强了系统的实用性和灵活性.区块链的分布性、共享性、安全性、可编程性等特点符合现代社会 CPS 的发展趋势,因此越来越广泛地应用于金融^[132]、政府管理^[133]、能源^[134]、医疗^[135]、工业^[136]等多个社会系统中.袁勇等^[137-138]对区块链的研究现状和核心技术进行了详细综述,提出了区块链系统的六层基础架构 (数据、网络、共识、激励、合约、应用),并指出了区块链的平行社会发展趋势; Petersen 等^[139]强调了区块链技术在制造系统与物流系统中的应用; Preuveneers 等^[140]针对以客户为

中心的、数据驱动的网络生产系统中存在的安全和信任问题,提出了基于区块链技术的制造企业信任交互的离散认证和关系管理方法。Huckle 等^[141]从自由意志和社会哲学的角度探讨了区块链技术的应用,指出区块链是自由意志表达的有效工具,有助于实现社会主义。

2 走向社会信息物理生产系统

随着智能化水平的提高、ICT 技术的发展、计算架构的灵活高效化,智能设备可以在更广的范围和更深的层次进行信息物理交互,形成了快速、高效、知识密集型的物联社会;智能体的服务对象是人类社会,面向服务的架构要求服务与需求的高度匹配,因此物联社会必须通过务联网与人类社会进行密切的人机交互;随着智能移动设备人均保有量的提高、客户与企业的交互密度和深度的增加,人类社会的信息和特性越来越明显地植入物联社会,形成了广义互联的 SCPS。Atzori 等^[142]提出了与人类社会概念类似的社会物联网 (Social IoT, SIoT) 概念,并提出了物联社会关系的构建和管理准则;王飞跃等^[17, 143]基于软件定义的系统 and 知识自动化的研究,提出了以人为本、面向物理世界和 Cyberspace 融合的社会物理网络系统 (CPSS) 概念,指出智慧社会系统将由牛顿系统向莫顿系统转化,给出了基于 ACP (Artificial societies, computational experiments, parallel execution) 的智慧 CPSS 实现方法;Chen 等^[144]基于社会物联网 (SIoT) 提出了一种接入服务推荐策略,通过仿真实验证明了社会物联网具有较好的精确性、动态性和稳定性;Shen 等^[145]针对信息物理离散网络的目标搜索问题,提出了一种以人为中心的社会感知策略,不需要通过频繁的信息采集来定位,而是基于机器学习来预测用户的日常路线,提高了扩展性、定位效率和精度;Ahmad 等^[146]将 CPS 与 IoT 相结合,构建由链接信息域、社会信息域、移动信息域构成的智能网络社会系统架构;Ding 等^[147]提出了社会传感概念,借助集成硬件和软件的中间媒介实现客户、制造商和股东的在社会制造系统中的交互。

实际上,社会信息物理系统理念可以追溯到更早的时期。早在 20 世纪 60 年代,社会心理学家 Stanley Milgram 就提出了六度分离理论^[148],即处于人联网中的任意两个人,可以通过至多五个人建立关联关系。这一理论又被成为小世界理论,由此可以得出信息化之前的人联网已经具有复杂而密集的相关关系。随着通信技术的发展和移动智能设备的普及,信息化的人联网空间分布性增强,可以获取更广泛的个体动态信息,密集性增强,使信息的传达更具实时性和可靠性。随着传感技术、智能体技术和物联网技术的发展,物质的物理交互趋于信息化和

网络化,逐渐形成具有一定自适应性和自组织性的物质社会。人联网、务联网和物联网的集成交互形成了社会化的 CPS,将物质世界与信息世界融合为一个虚实结合的 SCPS。

生产过程是人 与生产设备通过信息物理交互实现原材料物理化学转变的社会化活动,是 SCPS 的一种体现形式。生产系统附属于人类社会,为人类社会提供服务,随着人类生活水平和市场综合服务水平的提高,生产模式趋向于大规模个性化,这不但要求生产系统具有较高的智能化和柔性化,而且要求生产系统与人类社会密切交互,形成 SCPPS^[149]。SCPPS 由物理层、信息层和社会层组成,如图 3 所示。物理层实现真实的物理生产交互,通过泛在传感采集物理交互信息,并传输到信息层。信息层可以实现虚拟化的生产交互,人际交互形成的人联网可以实现信息化的客户关系管理、供应商关系管理和人力资源管理;智能体交互形成的物联网可以实现智能化的制造执行系统、企业资源管理和市场资源配置;人机交互形成的务联网结合人联网和物联网的优势,通过泛在计算和大数据科学形成知识密集型的智能制造体系。社会层基于 CPS 的社会化交互,结合人的柔性经验和智能体的理性高效,形成具有组织规则的广义互联社会,进而影响信息物理生产系统中的个体行为,因此,需要对 CPS 的社会化特征进行研究,并用于指导 CPSS 在社会生产中的应用,形成智慧制造系统。

2.1 社会特征

社会是在一定环境下个体间相关关系的总和。在信息物理深度融合的大数据时代,个体的概念从人扩展到了智能体,凡能进行环境感知并实现特定信息物理交互的智能体都是社会中的一员,都具有社会效应,也都对整体社会行为有影响。因此 CPS 的社会化特点研究是实现 SCPPS 的必要条件。

1) 人类社会

人与外界交互的本质就是信息与物理的交互,人体通过五官进行物理信息的获取与转换,在大脑中进行信息处理形成对外界的内在认知,并将认知信息存储于记忆中,在与外界频繁的物理交互过程中,不断修正内在认知系统,与外界物理系统保持一致。由于人的个性化差异,对外界以及对自我的内在认知也存在差异,因此,当人处于社会环境时,会产生更加频繁的认知修正,从而影响个体在群体中的社会表现,进而形成群体才具有的社会现象。

社会关系的研究从学科角度可以分为追求效益价值最大化的经济社会、追求权利价值最大化的政治社会和追求情感价值最大化的人文社会。人与外界的交互过程就是在遵循既定规则的前提下,为了追求内在认知的效益、权利和情感加权总价值最大

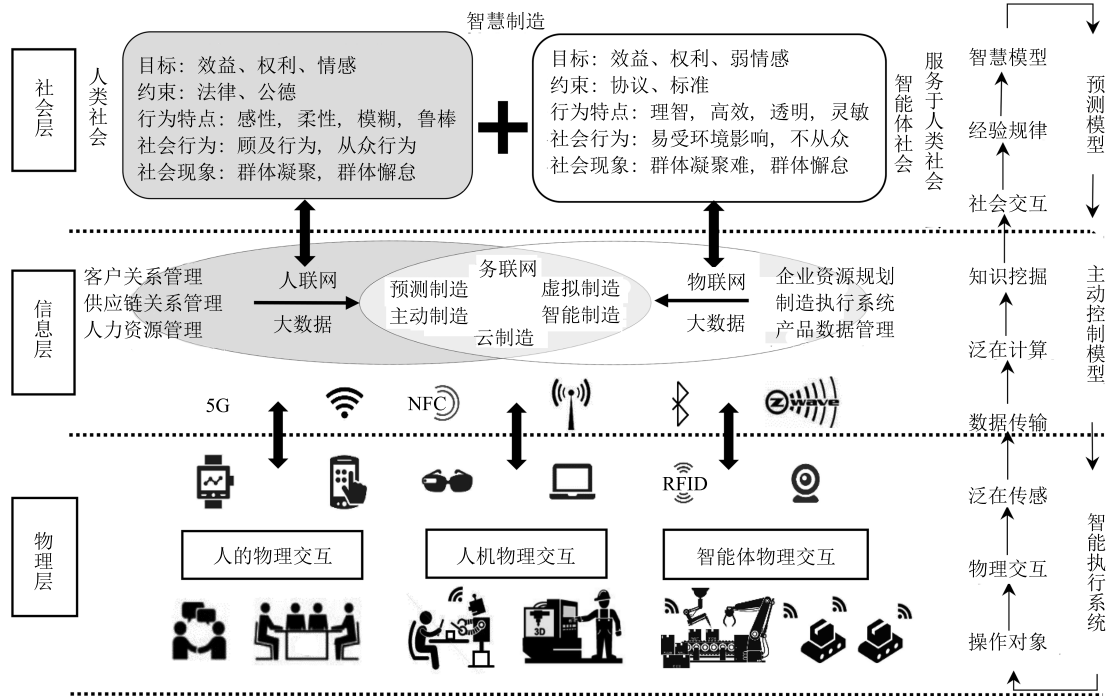


图3 社会信息物理生产系统

Fig. 3 Social cyber-physical production system

化,不断调整自我与外界保持一致并倾向于拓宽内在认知范围的过程.因此个体在群体中的社会表现包括顾及行为和从众行为,群体社会化现象可以分为群体凝聚和群体懈怠.

顾及行为是因为外界原因改变个体内在认知的社会表现,可能是由于个体对外界认知不足,在与外界个体交互的过程中改变了自己的原有认知;也可能是由于内在认知对于不同环境、个体和事件下的价值权重不同.研究表明^[150],处于群体中的个体效益权值和权利权值趋于减小,情感权值趋于增加,一方面使个体的社会行为具有利他性,促进群体协作;另一方面可能使个体行为理性减弱从而削弱群体协作能力.

从众行为是个体调整自身行为与群体行为保持一致的社会表现,可能是个体拓宽内在认知范围的倾向所致;也可能是因为这种群体行为是实现个体内在价值最大化的社会共识;还可能是迫于个体认知与群体行为差异较大的压力,被动调整个体行为但不改变原有内在认知.

群体凝聚是由于群体中的个体在彼此交互的过程中,不但能实现自身内在认知的价值满足,而且能与群体行为保持一致,使群体价值达到最大化的社会现象.在这一过程中,个体内在认知不断增加情感权重,并最终趋向于与社会整体认知的一致化.

群体懈怠是由于责任分散,使处于社会群体中的个体分工不明确,导致为了确保个体内在认知的

效益价值和权利价值最大化而产生的社会责任逃避行为,从而产生整体的社会懈怠现象.

2) 智能体社会

智能体与人体类似,物理空间在信息空间的映射可以作为智能体的内在认知系统,它与外界物理世界交互的过程,也可以视为不断改变内在认知信息系统与外界保持一致的过程.但它与人类信息物理系统存在显著区别,人类和智能体的信息物理系统对比图,如图4所示.人体的所有行为都必须由内在认知系统通过神经递质信号触发,而智能体由于缺乏物理化的内在认知系统,缺乏神经递质调节系统,智能体的行为可以通过外界信息网络直接控制,因此智能体行为更容易受到社会环境影响;由于智能

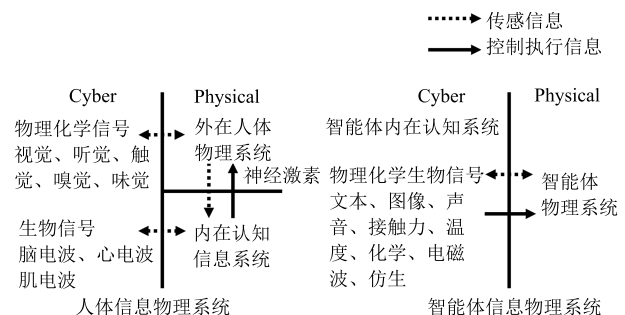


图4 人类和智能体的信息物理系统对比图

Fig. 4 Cyber-physical interaction system comparison between human and agent

体的内在认知暴露于信息空间中,使得智能体社会具有信息透明度高、密集度高、可得性强和传递时间短等特点,因此智能体社会的响应速度远远高于人类社会,知识的密集度和共享性也使得智能体社会具有更强的事物处理能力;由于人类情感的模糊性和复杂性难以模拟,因此智能体通常缺乏追求人文社会情感价值最大化的愿望;虽然智能体也以提升内在认知价值为目标,但由于智能体的专用性限制,往往缺乏主动拓宽认知范围的倾向。

基于以上区别,智能体的社会表现和群体社会化现象也与人类社会有所区别。因为智能体极易受到环境影响,因此在群体中的顾及行为往往表现在与外界交互时引起认知变化;由于不同环境下,不同人和事引起的权值调节柔性低、范围小,因此智能体的环境适应性往往较差。智能体社会没有明显的从众行为,首先因为智能体缺乏主动拓宽内在认知范围的倾向,不会具有猎奇心理;其次由于信息传递的高密度、准确性和快速性,智能体行为更具理性,盲目性减弱;另外智能体不会出于群体压力而做出违背内在认知的行为。由于缺乏物理化的神经激素调节机制,智能体的情感交互趋于简单化和程序化,缺乏与人类情感交互类似的模糊性和深邃性,导致智能体社会难以形成适应性和鲁棒性较强的群体凝聚现象,智能体社会的良好协作,往往体现在一定社会协议下的效益价值和权利价值的协调统一。虽然智能体追求效益和权利的价值最大化与人类社会相似,但情感价值体系的缺乏使智能体趋向于利己主义,因此在分工不明确、协议规则不严密智能体社会中,智能体可能表现出群体懈怠的社会现象,甚至会导致智能体社会的秩序紊乱。

通过对人类社会和智能体社会的对比可以发现,智能体社会的优点包括信息传递和响应快速、精确、透明,事物处理能力强,社会行为更具理性,避免了人类社会的不确定性和盲目从众行为;数据量大、来源广,有利于利用大数据科学实现数据深层关系挖掘分析,呈现学科交叉的知识密集型社会;但智能体缺乏与人类相似的情感价值体系,因此社会行为往往缺乏鲁棒性,难以形成群体凝聚力。通过 CPS 技术将人类社会与智能体社会相融合,形成新的兼具人的模糊性和智能体的高效性的广义互联社会,将更有助于构建更加和谐和完善的社会体系。

2.2 交互模式

通过人类社会与智能体社会的对比分析,得出集成人与物的广义互联社会可以实现更理想的社会表现。为了进一步研究社会化的信息物理系统在制造系统中的应用,首先对广义互联社会的基本信息物理交互模式进行总结。如图 5 所示,有 7 种基本

信息物理交互模式。

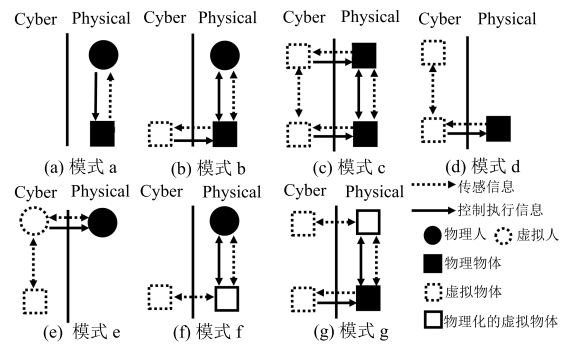


图 5 信息物理交互的 7 种基本模式

Fig. 5 Seven fundamental interaction mode of cyber-physical system

图 5(a) 表示人在物理空间,通过感官获取物的信息并对物执行物理操作的过程,是最原始的人与物的交互模式(模式 a);图 5(b) 表示在信息空间构建物的虚拟模型,使物具有感知、控制和执行能力,实现人机在物理空间的信息和行为交互,是人与智能体在物理环境下的交互模式(模式 b);图 5(c) 表示在信息空间建立物体的信息模型,通过物理传感得到物理交互信息,并在信息空间进行处理,输出各自的执行信息,从而完成在物理空间的行为交互,在信息空间构建了智能体的完整数字模型,因此属于数字孪生交互模式(模式 c);图 5(d) 表示在信息空间构建物的虚拟模型,在虚拟空间与虚拟物体间进行信息交互,通过虚拟信息控制物体的物理行为,通常用于物体物理交互行为的模拟仿真(模式 d);图 5(e) 表示在信息空间构建人的虚拟信息,将人沉浸在虚拟空间中与虚拟物体进行信息交互,通过虚拟信息控制人的物理感受和行为,属于虚拟现实的交互模式(模式 e);图 5(f) 表示将信息空间虚拟构造的物体映射于物理空间,在物理空间与人进行信息交互,并且可以通过人的物理操作改变物理化虚拟物体的状态,属于增强现实的人机交互模式(模式 f);图 5(g) 表示将信息空间虚拟构造的物体映射于物理空间,在物理空间与智能体交互,并且可以通过智能体的物理操作改变物理化虚拟物体的状态,属于增强现实的智能体交互模式(模式 g)。

SCPPS 通过以上交互模式的组合,可以实现更加丰富、高效、可靠、及时的信息物理交互。结合模式 a, b, c 可以在物理空间完成复杂的人际交互、人机交互任务和多智能体交互。Ang 等^[151] 基于工业 4.0 概念,将 CautoD 方法运用于船舶设计制造的全过程;Lou 等^[152] 针对需求设计,提出了一种基于生理心理信号的产品概念设计方法,通过脑电波获取客户的心理信息,并运用于训练基于用户满意度调查狩猎模型。

结合模式 d 和模式 e 可以在虚拟空间实现沉浸式的远程信息交互, 依据信息交互结果, 改变人和物的物理状态. Galambos 等^[153] 借助基于虚拟现实技术的 VirCA 平台, 克服由于制造系统的异构性和地理分散性造成的系统业务流程编制和整体协作困难的问题; Berg 等^[154] 综合研究了 VR 在设计初期阶段的应用, 研究表明 VR 系统可以鉴别传统设计不能发现的设计问题并找到可行方案, 此外, 沉浸式的虚拟环境有助于提升团队的凝聚力和协作力; Carulli 等^[155] 提出了一种结合客户声音的虚拟设计方法, 充分考虑个性化需求, 缩减设计开支.

结合模式 f 和模式 g 可以实现虚拟空间在物理空间的叠加, 从而在物理空间实现虚拟与现实的混合交互. Doshi 等^[156] 利用 AR 技术提供的可视化信号提高人工电焊的定位精度; Cheng 等^[157] 提出了一种将自动化虚拟计量技术集成于云物联制造系统的工业 4.1 模型, 从而实现产品制造零缺陷; Putman 等^[158] 为减小试运行对工件的损耗, 将虚拟化的加工工件与物理制造系统进行交互, 实现虚拟工件与物理制造系统的实时无损虚拟加工.

结合模式 d, e, f 和 g 可以实现在物理空间的远程物理交互, 经过模式 d 和模式 e 将远程物理实体虚拟化, 再利用模式 f 和模式 g 将虚拟化的实体叠加于本地现实物理环境. Mourtzis 等^[159] 针对产品服务系统, 设计了一个基于云计算的增强现实设备维护监测方法, 监测系统由无线传感网支持, 并与增强现实系统一起架构于云环境; Liu 等^[160] 为了提高信息物理加工工具与人的协同工作能力, 利用增强现实技术设计了一个人机直觉协同智能窗口, 可以实现实时控制、增强现实机器仿真、增强现实过程监测和增强现实过程优化; Turner 等^[161] 指出离散事件仿真与虚拟现实技术相结合的工业应用更有助于提高工业系统的信息物理融合度, 将成为未来发展的主流趋势.

2.3 研究进展

在 SCPPS 中, 更有利于集成广泛的社会资源、形成系统的生产脉络, 从而驱动面向服务的大规模个性化生产. 人联网有助于企业内部的人事管理以及企业外部的客户关系管理和供应商关系管理. Fainshmidt 等^[162] 通过对 209 家企业的数据分析发现, 创造可信赖的内部组织环境可以促进成员合作的适应性和协调性, 从而提高企业动态竞争力; Luo 等^[163] 通过品牌社区的人际交互研究, 发现不同的群体交互模式将影响群体关系的和谐度, 进而影响用户的群体认同感; Wang 等^[164] 从跨企业合作的角度, 分析了人际关系对供应链整合的影响, 研究发现考虑情感、沟通和信任的人际关系对供应链整合

有积极作用. 物联网有助于实现无人车间的多智能体协同生产, 也有助于售后产品的质量监控和维护. Pticek 等^[165] 提出了机器网络 2.0 的概念, 即智能设备可以形成基于设备需求、语境和环境状态的智能体社会网络, 通过物联社会为智能设备提供混合服务; Ding 等^[166] 指出实现社会制造的关键在于对跨企业间的事件实时监控和加工任务、运输任务的动态派遣, 并提出了一种基于 RFID 的社会制造系统, 通过工业应用证明社会制造系统具有更高的柔性 and 效率, 同时有助于提高跨企业合作的生产透明度. 通过人与物的社会化互联可以完成物理强度大、地理分散广、实时动态性好、精度要求高、知识密度大、环境适应性强、作业鲁棒性强的制造任务, 并且使制造业整体呈现出经济社会的效益性、政治社会的组织性和人文社会的和谐性. Leng 等^[167] 提出了一种基于社会交互环境的关系匹配方法, 根据交互关系高效解决跨企业的制造问题; Chen 等^[168] 通过对制造企业的 GRI (Global report initiative) 指数分析发现, 提升企业的社会效益有助于提升企业的经济效益; Jiang 等^[169] 提出了一种基于 CPS 和服务制造的社会制造范式, 并指出社会制造将带来生产模式的转变从而推动社会创新.

李克强总理在 2014 年夏季达沃斯论坛开幕式上提出, 中国要大力推动“大众创业、万众创新”^[170], 为实现万众创新, 就需要将 SCPS 应用于制造业中, 使每个社会个体都可以参与设计制造, 充分发挥群体的创新创造力. 特别是新兴的 3D 打印技术, 有利于实现社会化制造. Yoo 等^[171] 从生产-消费连接角度指出 3D 打印是专业制造转向社会制造的新范式, 满足用户偏好的同时可以提高资源利用率. 云雾结合的计算架构将 IT 资源延伸至社会的基本单元, 借助大数据挖掘技术和泛在计算技术, 有利于实现知识密集型的服务化社会制造. Yang 等^[172] 在物联网云制造环境下, 构建了集成设计制造的开放式创新平台, 基于社会关系网进行多方协同制造; Patel 等^[173] 提出了一种物联数据的动态分析策略, 可以根据动态应用需求权衡选择云计算和边缘计算, 实现高效物联. 软件定义万物 (Software define everything, SDx) 技术的发展, 将硬件设施的管控权推向社会基本单元, 有利于发掘多层次和细粒度的社会创造潜力. 将产品设计和制造过程软件化, 可以在目标客户端实现个性化制造服务^[174-175]; GE 公司设计的云制造操作系统 predix 得到了广泛的工业应用, 便于工程师开发各种用途的 APPs, 获取设备数据并通过云进行数据分析^[176].

2.4 挑战问题

信息物理生产系统的社会化不但可以提高生产

系统的经济效益, 形成良好的社会生产体制, 促进和谐平衡的社会生产氛围, 还可以充分发掘广大群众的创造潜能和生产热情, 从而有力推进 SCPPS 的发展. 然而信息物理生产系统在社会化的进程中还存在诸多挑战.

1) 社会信息物理生产系统的标准化

在 SCPPS 的发展过程中, 虽然已有一些专用的标准化方法^[177], 但尚未形成统一的标准化体系. 另外, 由于在信息物理生产系统的社会化过程中, 会产生庞杂的异构数据^[178]、异种智能体间的服务协作^[179]、信息物理交互模式复杂多样化^[180] 以及社会生产模式的个性化导致的产品互用性差等问题, 因此需要从信息采集的数据结构标准化、异种智能体间和人际交互的网络通信和协作机制标准化、信息物理交互模式标准化、社会生产过程和产品标准化等方面制定社会化的信息物理生产标准, 并形成系统连贯的标准化体系.

2) 社会信息物理生产系统的人性化

构建和谐融洽的 SCPPS, 需要智能体社会具备人文社会的情感优势, 实现智能体与外界社会的深层情感交互, 从而使智能体表现出更具社会适应性的顾及行为和群体凝聚现象. 然而人类情感的神经激素调节机制难以通过建模编程进行模拟, 因此使智能体实现深度、柔性的情感交互成为挑战.

目前的人工智能可以使智能体具有认知能力、学习能力和环境适应能力, 但软件化的内在认知系统与人类物理化的内在认知系统仍有较大差异, 因此如何构建智能体物理化的内在认知系统成为研究热点. 中国科学院设计的寒武纪一号^[181] 和寒武纪二号^[182] 是用于加速神经网络的高性能芯片; IBM 提出的 TrueNorth 芯片, 仿生神经突触, 设计了硬件化的脉冲神经网络^[183].

除此之外, 智能体人性化的关键问题在于如何实现情感信息的认知和加工^[184], 如何设计更具人性化的自然交互界面, Hui 等^[185] 提出了一种无界面交互 (Disappearing user interfaces, DUIs) 模式, 用于增强人类的直觉感知能力; Tian 等^[186] 指出, AI2.0 时代的来临将助力人机交互在行为视觉、听觉感知和定位、自然语言交互、自主学习、大范围信息处理、智能学习平台、全方位感知和推理机等方面的发展. 与此同时, 仿生交互的研究为人机交互提供更多思路, 例如 Bu 等^[187] 基于仿生学设计了一种可伸缩静电-光量子的智能皮肤, 可以实现机械手多维触觉和姿态感知; Persaud 等^[188] 对生物嗅觉进行了研究, 通过对化学传感和生物脑功能的研究, 开创了仿神经嗅觉研究领域.

3) 社会信息物理生产系统的安全问题

智能体具有响应速度快、计算能力强、知识密

集度高、信息透明度高、服务共享性好等特点, 智能体的社会化, 以及人机社会化协作能大大提高人类社会的生产效率, 然而随着信息物理系统的社会化融合深度和广度的不断增加, 引发的信息物理交互可靠性问题^[189]、网络环境安全威胁和隐私信息泄露风险日趋严重^[190].

信息物理交互可靠性问题的研究重点包括数据智能的可信度和交互过程的安全性两方面. 如何实现数据到智能的可视化, 并形成可靠的评价体系是提高数据智能可信度的有效方法. 提高智能体交互过程安全性的关键在于提高智能体传感和控制的快速性、准确性、稳定性和鲁棒性, 轻量化的结构设计和柔性部件有助于增加交互过程的可控性和安全性.

网络环境安全和隐私安全的研究重点包括对密码学^[191] 和信息网络架构体系的研究. Coutinho 等^[192] 指出人工智能的强大算力可能对加密系统造成威胁, 因此提出了一种对抗神经密码系统 (Adversarial neural cryptography, ANC), 可以在线学习威胁并自主调整加密策略. 软件定义网络技术^[193] 可以动态调整网络结构, 更有利于构建高效安全的网络体系; 采用区块链形式的信息网络架构体系可以在提高网络信息安全性的同时降低安全维护成本^[194].

另外, 由于智能体社会的进一步发展, 人工智能研究的伦理道德安全问题^[195] 将成为 SCPPS 未来发展的一个严峻挑战, 健全的法律体系是保障人工智能伦理道德安全的关键^[196].

3 结束语

本文阐述了 CPS 从智能体、嵌入式系统到由 IoT, IoP, IoS 形成的 SCPS 的演进过程, 分析了 CPS 在生产系统发展中的核心支撑作用, 对 CPPS 社会化演进过程中的相关技术进行了综合评述, 并构建了 SCPPS 框架模型.

基于人类社会的个体行为特点和群体社会现象, 结合人与智能体的区别分析了智能体物联社会的特点. 通过对人类社会特点的研究发现, 个体在群体中的社会表现包括顾及行为和从众行为, 群体社会化现象可以分为群体凝聚和群体懈怠. 通过人类与智能体的交互方式对比发现, 人类存在物理化的内在认知, 因此在社会活动中更具感性和柔性, 智能体则更具理性和刚性. 智能体社会具有响应速度快、计算能力强、知识密集度高、信息透明度高、服务共享性好等优势, 可以避免人类社会的盲目从众行为和消极情绪引起的群体懈怠等不良现象; 但由于内在认知系统外化, 行为鲁棒性较差, 缺乏情感体验, 不易形成稳定的群体凝聚.

由于人机协作形成的广义互联社会可以兼具人

的鲁棒性和智能体的高效性, 形成更佳完善的社会信息物理系统. 为此, 分析了人与智能体信息物理交互的 7 种基本模式, 并阐述了它们在社会生产系统中的应用现状.

通过以上分析发现, SCPPS 的未来挑战包括如何建立标准化的体系结构, 如何实现更具人性化的社会人际交互活动, 如何确保社会化信息物理生产系统的安全性、隐私性和合法性等方面.

References

- Lee E A. Cyber-physical systems — are computing foundations adequate? *Position Paper for NSF Workshop on Cyber*, 2006: 6–14
- Cyber Physical Systems PWG. Framework for Cyber-Physical Systems Release 1.0 [Online], available: https://s3.amazonaws.com/nist-sgcps/cpspwg/files/pwgglobal/CPS_PWG_Framework_for_Cyber_Physical_Systems_Release_10_Final.pdf, March 21, 2018
- The European Union's Seventh Framework Programme. CyPhERS. Cyber-Physical European Roadmap and Strategy [Online], available: <http://cyphers.eu/sites/default/files/d6.1+2report.pdf>, March 21, 2018
- Acatech. Living in a networked world [Online], available: http://www.cyphers.eu/sites/default/files/acatechSTUDI_EagendaCPSengANSICHT.pdf, March 21, 2018
- Thoben K D, Wiesner S A, Wuest T. Industrie 4.0 and smart manufacturing — a review of research issues and application examples. *International Journal of Automation Technology*, 2017, **11**(1): 4–16
- Kagermann H, Wahlster W, Helbig J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry, Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- Weyer S, Meyer T, Ohmer M, Gorecky D, Zühlke D. Future modeling and simulation of CPS-based factories: an example from the automotive industry. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(31): 97–102
- Li L. China's manufacturing locus in 2025: with a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0". *Technological Forecasting and Social Change*, 2018, **135**: 66–74
- Zhang Y F, Zhang G, Wang J Q, Sun S D, Si S B, Yang T. Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, **28**(8): 811–822
- Monostori L. Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 2014, **17**: 9–13
- Lee J, Bagheri B, Kao H A. A Cyber-Physical Systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, **3**: 18–23
- Wiesner S, Marilungo E, Thoben K D. Cyber-physical product-service systems — challenges for requirements engineering. *International Journal of Automation Technology*, 2017, **11**(1): 17–28
- Ecer G. Soziotechnisches potenzial cyber-physischer systeme. *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2015, **110**(3): 142–144
- Yao Xi-Fan, Lian Zhao-Tong, Yang Yi, Zhang Yi, Jin Hong. Wisdom manufacturing: new humans-computers-things collaborative manufacturing model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, **20**(6): 1490–1498 (姚锡凡, 练肇通, 杨屹, 张毅, 金鸿. 智慧制造 — 面向未来互联网的人机物协同制造新模式. *计算机集成制造系统*, 2014, **20**(6): 1490–1498)
- Yao X F, Zhou J J, Lin Y Z, Li Y, Yu H N, Liu Y. Smart manufacturing based on Cyber-Physical Systems and beyond. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017: 1–13
- Wang Fei-Yue. Software defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 1–8 (王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华. *自动化学报*, 2015, **41**(1): 1–8)
- Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *Social Learning*, 2010: 85–88
- Wang Fei-Yue. From social computing to social manufacturing: The coming industrial revolution and new frontier in cyber-physical-social pace. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, **6**(27): 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**(27): 658–669)
- Yao X F, Lin Y Z. Emerging manufacturing paradigm shifts for the incoming industrial revolution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **85**(5–8): 1665–1676
- Lee J, Jin C, Bagheri B. Cyber physical systems for predictive production systems. *Production Engineering*, 2017, **11**(2): 155–165
- Lam H Y, Ho G T S, Wu C H, Choy K L. Customer relationship mining system for effective strategies formulation. *Industrial Management and Data Systems*, 2014, **114**(5): 711–733
- Xu Y P, Chen G X, Zheng J L. An integrated solution-KAGFM for mass customization in customer-oriented product design under cloud manufacturing environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **84**(1–4): 85–101
- Hsiao W P, Chiu M C. A mass personalization methodology based on co-creation. *Moving Integrated Product Development to Service Clouds in the Global Economy*, 2014, **1**: 698–705
- Bertolotti I C, Hu T T. Modular design of an open-source, networked embedded system. *Computer Standards and Interfaces*, 2015, **37**: 41–52
- Stark R, Kind S, Neumeyer S. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals*, 2017, **66**(1): 169–172
- Tan C B, Hu S J, Chung H, Barton K, Piya C, Ramani K, et al. Product personalization enabled by assembly architecture and cyber physical systems. *CIRP Annals*, 2017, **66**(1): 33–36
- Mladineo M, Veza I, Gjeldum N. Solving partner selection problem in cyber-physical production networks using the HUMANT algorithm. *International Journal of Production Research*, 2017, **55**(9): 2506–2521

- 28 Wang X V, Lopez N B N, Ijomah W, Wang L H, Li J H. A smart cloud-based system for the WEEE recovery/recycling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, **137**(6): 061010
- 29 Qiu X, Luo H, Xu G Y, Zhong R Y, Huang G Q. Physical assets and service sharing for IoT-enabled supply Hub in industrial park (SHIP). *International Journal of Production Economics*, 2015, **159**: 4–15
- 30 Addo-Tenkorang R, Helo P T, Kantola J. Concurrent enterprise: a conceptual framework for enterprise supply-chain network activities. *Enterprise Information Systems*, 2017, **11**(4): 474–511
- 31 Noseworthy J, Leeser M. Efficient communication between the embedded processor and the reconfigurable logic on an FPGA. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2008, **16**(8): 1083–1090
- 32 Long Y H, Zhou Z D, Liu Q, Chen B Y, Zhou H L. Embedded-based modular NC systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **40**(7–8): 749–759
- 33 Xu Gang, Zhang Xiao-Tong, Li Min, Xu Jin-Wu. Online monitoring and control method of product quality based on embedded cyber-physical system models. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **53**(12): 94–101
(徐钢, 张晓彤, 黎敏, 徐金梧. 基于嵌入式 CPS 模型的产品质量在线管控方法. *机械工程学报*, 2017, **53**(12): 94–101)
- 34 Lien S Y, Liao T H, Kao C Y, Chen K C. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, **11**(1): 27–32
- 35 Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, **18**(3): 1617–1655
- 36 Kamel M, Hamouda W, Youssef A. Ultra-dense networks: a survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, **18**(4): 2522–2545
- 37 Gao Z, Dai L L, Mi D, Wang Z C, Imran M A, Shakir M Z. MmWave massive-MIMO-based wireless backhaul for the 5G ultra-dense network. *IEEE Wireless Communications*, 2015, **22**(5): 13–21
- 38 Noura M, Nordin R. A survey on interference management for device-to-device (D2D) communication and its challenges in 5G networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, **71**: 130–150
- 39 Farhang-Boroujeny B, Moradi H. OFDM inspired waveforms for 5G. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, **18**(4): 2474–2492
- 40 Thembelihle D, Rossi M, Munaretto D. Softwarization of mobile network functions towards agile and energy efficient 5G architectures: a survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, **2017**: Article ID 8618364
- 41 Su Z, Xu Q C. Content distribution over content centric mobile social networks in 5G. *IEEE Communications Magazine*, 2015, **53**(6): 66–72
- 42 Liang C C, Yu F R, Zhang X. Information-centric network function virtualization over 5G mobile wireless networks. *IEEE Network*, 2015, **29**(3): 68–74
- 43 Liu L, Zhao S L, Yu Z L, Dai H J. A big data inspired chaotic solution for fuzzy feedback linearization model in cyber-physical systems. *Ad Hoc Networks*, 2015, **35**: 97–104
- 44 Venkatesan M, Arunkumar T, Prabhavathy P. A novel Cp-Tree-based co-located classifier for big data analysis. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 2015, **15**(2–3): 191–211
- 45 Yao Xi-Fan, Zhou Jia-Jun, Zhang Cun-Ji, Liu Min. Proactive manufacturing — a big-data driven emerging manufacturing paradigm. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, **23**(1): 172–185
(姚锡凡, 周佳军, 张存吉, 刘敏. 主动制造 — 大数据驱动的新兴制造范式. *计算机集成制造系统*, 2017, **23**(1): 172–185)
- 46 Babiceanu R F, Seker R. Manufacturing cyber-physical systems enabled by complex event processing and big data environments: a framework for development. In: *Proceedings of the 2015 Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. Cham: Springer, 2015, **594**: 165–173
- 47 Chen J H, Yang J Z, Zhou H C, Xiang H, Zhu Z H, Li Y S, et al. CPS modeling of CNC machine tool work processes using an instruction-domain based approach. *Engineering*, 2015, **1**(2): 247–260
- 48 Kuang L, Tang X, Yu M Q, Huang Y J, Guo K H. A comprehensive ranking model for tweets big data in online social network. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, **2016**: 46
- 49 Glaessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. In: *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2012.
- 50 Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, White Paper, 2015.
- 51 Ma J H, Ning H S, Huang R H, Liu H, Yang L T, Chen J J, et al. Cybermatics: a holistic field for systematic study of Cyber-Enabled new worlds. *IEEE Access*, 2015, **3**: 2270–2280
- 52 Alam K M, El Saddik A. C2PS: a digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access*, 2017, **5**: 2050–2062
- 53 Tao F, Zhang M, Cheng J J, Qi Q L. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, **23**(1): 1–9
- 54 Tao F, Cheng J F, Qi Q L, Zhang M, Zhang H, Sui F Y. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, **94**(9–12): 3563–3576
- 55 Schroeder G N, Steinmetz C, Pereira C E, Espindola D B. Digital twin data modeling with automationML and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(30): 12–17
- 56 Misik S, Cela A, Bradac Z. Distributed systems — a brief review of theory and practice. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(25): 318–323
- 57 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, **38**(4): 393–422

- 58 Gupta R A, Chow M Y. Networked control system: overview and research trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(7): 2527–2535
- 59 Mangharam R, Pajic M. Distributed control for cyber-physical systems. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2013, **93**(3): 353–387
- 60 Lu C Y, Saifullah A, Li B, Sha M, Gonzalez H, Gunatilaka D, et al. Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 2016, **104**(5): 1013–1024
- 61 Ge X H, Yang F W, Han Q L. Distributed networked control systems: a brief overview. *Information Sciences*, 2017, **380**: 117–131
- 62 Adamson G, Wang L H, Moore P. Feature-based control and information framework for adaptive and distributed manufacturing in cyber physical systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, **43**: 305–315
- 63 García-Valls M, Calva-Urrego C, De La Puente J A, Alonso A. Adjusting middleware knobs to assess scalability limits of distributed cyber-physical systems. *Computer Standards and Interfaces*, 2017, **51**: 95–103
- 64 Etxeberria-Agiriano I, Calvo I, Noguero A, Zulueta E. Towards middleware-based cooperation topologies for the next generation of CPS. *International Journal of Online Engineering*, 2012, **8**: 20–27
- 65 Ishizaki T, Sandberg H, Kashima K, Imura J I, Aihara K. Dissipativity-preserving model reduction for large-scale distributed control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, **60**(4): 1023–1037
- 66 Zarrin J, Aguiar R L, Barraca J P. Resource discovery for distributed computing systems: a comprehensive survey. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2018, **113**: 127–166
- 67 Ren L T, Xie S S, Zhang Y, Peng J B, Zhang L D. Chattering analysis for discrete sliding mode control of distributed control systems. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, **27**(5): 1096–1107
- 68 Cao Y C, Yu W W, Ren W, Chen G R. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 427–438
- 69 Valckenaers P, Van Brussel H, Holvoet T. Fundamentals of holonic systems and their implications for self-adaptive and self-organizing systems. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops. Venice, Veneto, Italy: IEEE, 2008. 168–173
- 70 Barbosa J, Leitão P, Adam E, Trentesaux D. Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: the ADACOR evolution. *Computers in Industry*, 2015, **66**: 99–111
- 71 Sanislav T, Zeadally S, Mois G, Fouchal H. Multi-agent architecture for reliable cyber-physical systems (CPS). In: Proceedings of the 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications. Heraklion, Greece: IEEE, 2017. 170–175
- 72 Taboun M S, Brennan R W. An embedded multi-agent systems based industrial wireless sensor network. *Sensors*, 2017, **17**(9): 2112
- 73 Verma P K, Verma R, Prakash A, Agrawal A, Naik K, Tripathi R, et al. Machine-to-machine (M2M) communications: a survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, **66**: 83–105
- 74 Xu X Y, Hua Q S. Industrial big data analysis in smart factory: current status and research strategies. *IEEE Access*, 2017, **5**: 17543–17551
- 75 Zhang Y F, Qian C, Lv J X, Liu Y. Agent and cyber-physical system based self-organizing and self-adaptive intelligent shopfloor. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(2): 737–747
- 76 Jiang Z Q, Jin Y, Mingcheng E, Li Q. Distributed dynamic scheduling for cyber-physical production systems based on a multi-agent system. *IEEE Access*, 2017, **6**: 1855–1869
- 77 Dworschak B, Zaiser H. Competences for cyber-physical systems in manufacturing — first findings and scenarios. In: Proceedings of the International Conference on Digital Enterprise Technology — DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution. Stuttgart, Germany: Elsevier, 2014. 345–350
- 78 Castelli F, Michieletto S, Ghidoni S, Pagello E. A machine learning-based visual servoing approach for fast robot control in industrial setting. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, **14**(6): 1–10
- 79 Vafadar M, Behrad A. A vision based system for communicating in virtual reality environments by recognizing human hand gestures. *Multimedia Tools and Applications*, 2015, **74**(18): 7515–7535
- 80 Xu T, Zhang H, Yu C. See you see me: the role of Eye contact in multimodal human-robot interaction. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2016, **6**(1): Article No. 2
- 81 Rascon C, Meza I, Fuentes G, Salinas L, Pineda L A. Integration of the multi-DOA estimation functionality to human-robot interaction. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, **12**(2): 8
- 82 Alonso-Martín F, Gamboa-Montero J J, Castillo J C, Castro-González A, Salichs M Á. Detecting and classifying human touches in a social robot through acoustic sensing and machine learning. *Sensors*, 2017, **17**(5): 1138
- 83 Gastaldo P, Pinna L, Seminara L, Valle M, Zunino R. A tensor-based approach to touch modality classification by using machine learning. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, **63**: 268–278
- 84 Cherubini A, Passama R, Fraise P, Crosnier A. A unified multimodal control framework for human-robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, **70**: 106–115
- 85 Katona J, Kovari A. EEG-based computer control interface for brain-machine interaction. *International Journal of Online Engineering*, 2015, **11**(6): 43–48
- 86 Saproo S, Faller J, Shih V, Sajda P, Waytowich N R, Bohannon A, et al. Cortically coupled computing: a new paradigm for synergistic human-machine interaction. *Computer*, 2016, **49**(9): 60–68

- 87 Ma J X, Zhang Y, Cichocki A, Matsuno F. A novel EOG/EEG hybrid human-machine interface adopting eye movements and ERPs: application to robot control. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, **62**(3): 876–889
- 88 Karunanayaka K, Johari N, Hariri S, Camelia H, Bielawski K S, Cheok A D. New thermal taste actuation technology for future multisensory virtual reality and internet. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, **24**(4): 1496–1505
- 89 Frank J A, Krishnamoorthy S P, Kapila V. Toward mobile mixed-reality interaction with multi-robot systems. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, **2**(4): 1901–1908
- 90 Esposito A, Esposito A M, Vogel C. Needs and challenges in human computer interaction for processing social emotional information. *Pattern Recognition Letters*, 2015, **66**: 41–51
- 91 Cooney M D, Nishio S, Ishiguro H. Importance of touch for conveying affection in a multimodal interaction with a small humanoid robot. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2015, **12**(1): 1550002
- 92 Hossain M S, Muhammad G. Audio-visual emotion recognition using multi-directional regression and Ridgelet transform. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2016, **10**(4): 325–333
- 93 Matsas E, Vosniakos G C, Batras D. Prototyping proactive and adaptive techniques for human-robot collaboration in manufacturing using virtual reality. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, **50**: 168–180
- 94 Mancisidor A, Zubizarreta A, Cabanes I, Portillo E, Jung J H. Virtual sensors for advanced controllers in rehabilitation robotics. *Sensors*, 2018, **18**(3): 785
- 95 Tabbache B, Benbouzid M E H, Kheloui A, Bourgeot J M. Virtual-sensor-based maximum-likelihood voting approach for fault-tolerant control of electric vehicle powertrains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, **62**(3): 1075–1083
- 96 Brizzi F, Peppoloni L, Graziano A, Di Stefano E, Avizzano C A, Ruffaldi E. Effects of augmented reality on the performance of teleoperated industrial assembly tasks in a robotic embodiment. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2018, **48**(2): 197–206
- 97 Soete N, Claeys A, Hoedt S, Mahy B, Cottyn J. Towards mixed reality in SCADA applications. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, **48**(3): 2417–2422
- 98 Wang X V, Kemény Z, Váncza J, Wang L H. Human-robot collaborative assembly in cyber-physical production: classification framework and implementation. *CIRP Annals*, 2017, **66**(1): 5–8
- 99 Hu W L, Akash K, Jain N, Reid T. Real-time sensing of trust in human-machine interactions. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(32): 48–53
- 100 Rezazadegan F, Geng J, Ghirardi M, Menga G, Muré S, Camunocoli G, et al. Risked-based design for the physical human-robot interaction (pHRI): an overview. *Chemical Engineering Transactions*, 2015, **43**: 1249–1254
- 101 Peng G, Zhou G, Nguyen D T, Qi X, Yang Q, Wang S Q. Continuous authentication with touch behavioral biometrics and voice on wearable glasses. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, **47**(3): 404–416
- 102 Shen Su-Bin, Fan Qu-Li, Zong Ping, Mao Yan-Qin, Huang Wei. Study on the architecture and associated technologies for internet of things. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Nature Science)*, 2009, **29**(6): 1–11
(沈苏彬, 范曲立, 宗平, 毛燕琴, 黄维. 物联网的体系结构与相关技术研究. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, **29**(6): 1–11)
- 103 Kafle V P, Fukushima Y, Harai H. Internet of things standardization in ITU and prospective networking technologies. *IEEE Communications Magazine*, 2016, **54**(9): 43–49
- 104 Vermesan O, Friess P, Guillemin P, Gusmeroli S, Sundmaeker H, Bassi A, et al. Internet of Things Strategic Research Roadmap. The Cluster of European Research Projects, Technical Report, 2009.
- 105 Wen Jia-Bao. Report on Government Work [Online], available: <http://www.gov.cn/2010lh/content1555767.htm>, May 25 2018
(温家宝. 2010年政府工作报告 [Online], available: <http://www.gov.cn/2010lh/content1555767.htm>, 2018年5月25日)
- 106 Romaniuk R S. IoT — review of critical issues. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2018, **64**(1): 95–102
- 107 Ma H D. Internet of things: objectives and scientific challenges. *Journal of Computer Science and Technology*, 2011, **26**(6): 919–924
- 108 Cheng B, Zhu D, Zhao S, Chen J L. Situation-aware IoT service coordination using the event-driven SOA paradigm. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2016, **13**(2): 349–361
- 109 Shokrollahi S, Shams F. Rich Device-Services (RDS): a service-oriented approach to the internet of things (IoT). *Wireless Personal Communications*, 2017, **97**(2): 3183–3201
- 110 Batalla J M, Gajewski M, Latoszek W, Krawiec P, Mavroustakis C X, Mastorakis G. ID-based service-oriented communications for unified access to IoT. *Computers and Electrical Engineering*, 2016, **52**: 98–113
- 111 Binu A, Kumar G S. Virtualization techniques: a methodical review of XEN and KVM. In: Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Computing and Communications. Kochi, India: Springer Verlag, 2011. 399–410
- 112 Ahmad R W, Gani A, Hamid S H A, Shiraz M, Yousafzai A, Xia F. A survey on virtual machine migration and server consolidation frameworks for cloud data centers. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, **52**: 11–25
- 113 Manohar N. A survey of virtualization techniques in cloud computing. In: Proceedings of the 2013 International Conference on VLSI, Communication, Advanced Devices, Signals and Systems and Networking. Bengaluru, Karnataka, India: Springer Verlag, 2013. 461–470

- 114 Mell P, Grance T: *The NIST Definition of Cloud Computing: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*. Nova Science Publishers, Inc, USA, 2012. 97–101
- 115 Morariu O, Borangiu T, Raileanu S. VMES: virtualization aware manufacturing execution system. *Computers in Industry*, 2015, **67**: 27–37
- 116 Shu Z G, Wan J F, Zhang D Q, Li D. Cloud-integrated cyber-physical systems for complex industrial applications. *Mobile Networks and Applications*, 2016, **21**(5): 865–878
- 117 Li D, Tang H, Wang S Y, Liu C L. A big data enabled load-balancing control for smart manufacturing of industry 4.0. *Cluster Computing*, 2017, **20**(2): 1855–1864
- 118 Dehury C K, Sahoo P K. Design and implementation of a novel service management framework for IoT devices in cloud. *Journal of Systems and Software*, 2016, **119**: 149–161
- 119 Mourtzis D, Vlachou E. Cloud-based cyber-physical systems and quality of services. *The TQM Journal*, 2016, **28**(5): 704–733
- 120 Colombo A W, Bangemann T, Karnouskos S, Delsing J, Stluka P, Harrison R, et al. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- 121 Wang P, Gao R X, Fan Z Y. Cloud computing for cloud manufacturing: benefits and limitations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, **137**(4): 040901
- 122 Mezgár I, Rauschecker U. The challenge of networked enterprises for cloud computing interoperability. *Computers in Industry*, 2014, **65**(4): 657–674
- 123 Hu P F, Dhelim S, Ning H S, Qiu T. Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, **98**: 27–42
- 124 Kumar V S, Marathe M V, Parthasarathy S, Srinivasan A. Distributed algorithms for end-to-end packet scheduling in wireless ad hoc networks. *ACM Transactions on Algorithms*, 2016, **12**(3): Article No. 28
- 125 El-Sayed H, Sankar S, Prasad M, Puthal D, Gupta A, Mohanty M, et al. Edge of things: the big picture on the integration of edge, IoT and the cloud in a distributed computing environment. *IEEE Access*, 2017, **6**: 1706–1717
- 126 Osanaiye O, Chen S, Yan Z, Lu R X, Choo K K R, Dlodlo M. From cloud to fog computing: a review and a conceptual live VM migration framework. *IEEE Access*, 2017, **5**: 8284–8300
- 127 Wu D Z, Liu S P, Zhang L, Terpenney J, Gao R X, Kurfess T, et al. A fog computing-based framework for process monitoring and prognosis in cyber-manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, **43**: 25–34
- 128 Georgakopoulos D, Jayaraman P P, Fazia M, Villari M, Ranjan R. Internet of things and edge cloud computing roadmap for manufacturing. *IEEE Cloud Computing*, 2016, **3**(4): 66–73
- 129 Vilalta R, Lopez V, Giorgetti A, Peng S P, Orsini V, Velasco L, et al. TelcoFog: a unified flexible fog and cloud computing architecture for 5G networks. *IEEE Communications Magazine*, 2017, **55**(8): 36–43
- 130 Yang P, Zhang N, Bi Y G, Yu L, Shen X S. Catalyzing cloud-fog interoperability in 5G wireless networks: an SDN approach. *IEEE Network*, 2017, **31**(5): 14–20
- 131 Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [Online], available: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, April 2, 2018
- 132 Gomber P, Kauffman R J, Parker C, Weber B W. On the fintech revolution: interpreting the forces of innovation, disruption, and transformation in financial services. *Journal of Management Information Systems*, 2018, **35**(1): 220–265
- 133 Nordrum A. Govern by blockchain dubai wants one platform to rule them all, while Illinois will try anything. *IEEE Spectrum*, 2017, **54**(10): 54–55
- 134 Kang J W, Yu R, Huang X M, Maharjan S, Zhang Y, Hossain E. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(6): 3154–3164
- 135 Zhang J, Xue N, Huang X. A secure system for pervasive social network-based healthcare. *IEEE Access*, 2016, **4**: 9239–9250
- 136 Li Z, Wang W M, Liu G, Liu L, He J D, Huang G Q. Toward open manufacturing: a cross-enterprises knowledge and services exchange framework based on blockchain and edge computing. *Industrial Management and Data Systems*, 2018, **118**(1): 303–320
- 137 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Blockchain: the state of the art and future trends. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(4): 481–494
(袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望. 自动化学报, 2016, **42**(4): 481–494)
- 138 Yuan Yong, Zhou Tao, Zhou Ao-Ying, Duan Yong-Chao, Wang Fei-Yue. Blockchain technology: from data intelligence to knowledge automation. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(9): 1485–1490
(袁勇, 周涛, 周傲英, 段永朝, 王飞跃. 区块链技术: 从数据智能到知识自动化. 自动化学报, 2017, **43**(9): 1485–1490)
- 139 Petersen M, Hackius N, Kersten W. Blockchain for manufacturing and logistics: basics, benefits, and use cases. *ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2016, **111**(10): 626–629
- 140 Preuveneers D, Joosen W, Ilie-Zudor E. Trustworthy data-driven networked production for customer-centric plants. *Industrial Management and Data Systems*, 2017, **117**(10): 2305–2324
- 141 Huckle S, White M. Socialism and the blockchain. *Future Internet*, 2016, **8**(4): 49
- 142 Atzori L, Iera A, Morabito G, Nitti M. The social internet of things (SIoT) — when social networks meet the internet of things: concept, architecture and network characterization. *Computer Networks*, 2012, **56**(16): 3594–3608
- 143 Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Yuan Yong, Wang Tao, Lin Yi-Lun. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(5–6): 460–469
(王飞跃, 王晓, 袁勇, 王涛, 林懿伦. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然. 科学通报, 2015, **60**(5–6): 460–469)

- 144 Chen Z K, Ling R C, Huang C M, Zhu X. A scheme of access service recommendation for the social internet of things. *International Journal of Communication Systems*, 2016, **29**(4): 694–706
- 145 Shen H Y, Liu J W, Chen K, Liu J W, Moyer S. SCPS: a social-aware distributed cyber-physical human-centric search engine. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, **64**(2): 518–532
- 146 Ahmad A, Paul A, Rathore M M, Chang H. Smart cyber society: integration of capillary devices with high usability based on cyber-physical system. *Future Generation Computer Systems*, 2016, **56**: 493–503
- 147 Ding K, Jiang P Y. Social Sensors (S2ensors): a kind of hardware-software-integrated mediators for social manufacturing systems under mass individualization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **30**(5): 1150–1161
- 148 Milgram S. The small world problem. *Psychology Today*, 1967, **2**(1): 60–67
- 149 Yao Xi-Fan, Zhang Jian-Ming, Lin Ying-Zi. The basic theory and technical framework for wisdom manufacturing systems. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2016, **36**(10): 2699–2711
(姚锡凡, 张剑铭, Lin Ying-Zi. 智慧制造系统的基础理论与技术体系. *系统工程理论与实践*, 2016, **36**(10): 2699–2711)
- 150 Szolnoki A, Xie N G, Ye Y, Perc M. Evolution of emotions on networks leads to the evolution of cooperation in social dilemmas. *Physical Review E*, 2013, **87**(4): 042805
- 151 Ang J H, Goh C, Li Y. Smart design for ships in a smart product through-life and industry 4.0 environment. In: Proceedings of the 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016. 5301–5308
- 152 Lou S H, Feng Y X, Tian G D, Lv Z H, Li Z W, Tan J R. A cyber-physical system for product conceptual design based on an intelligent psycho-physiological approach. *IEEE Access*, 2017, **5**: 5378–5387
- 153 Galambos P, Csapó A, Zentay P, Fülöp I M, Haidegger T, Baranyi P, et al. Design, programming and orchestration of heterogeneous manufacturing systems through VR-powered remote collaboration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, **33**: 68–77
- 154 Berg L P, Vance J M. An industry case study: investigating early design decision making in virtual reality. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2016, **17**(1): 011001
- 155 Carulli M, Bordegoni M, Cugini U. An approach for capturing the voice of the customer based on virtual prototyping. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, **24**(5): 887–903
- 156 Doshi A, Smith R T, Thomas B H, Bouras C. Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, **89**(5–8): 1279–1293
- 157 Cheng F T, Tieng H, Yang H C, Hung M H, Lin Y C, Wei C F, et al. Industry 4.1 for wheel machining automation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, **1**(1): 332–339
- 158 Putman N M, Maturana F, Barton K, Tilbury D M. Virtual fusion: a hybrid environment for improved commissioning in manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 2017, **55**(21): 6254–6265
- 159 Mourtzis D, Vlachou A, Zogopoulos V. Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: a product-service system approach. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, **139**(6): 061011
- 160 Liu C, Cao S, Tse W, Xu X. Augmented reality-assisted intelligent window for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, **44**: 280–286
- 161 Turner C J, Hutabarat W, Oyekan J, Tiwari A. Discrete event simulation and virtual reality use in industry: new opportunities and future trends. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2016, **46**(6): 882–894
- 162 Fainshmidt S, Frazier M L. What facilitates dynamic capabilities? The role of organizational climate for trust. *Long Range Planning*, 2017, **50**(5): 550–566
- 163 Luo N, Zhang M L, Hu M, Wang Y. How community interactions contribute to harmonious community relationships and customers' identification in online brand community. *International Journal of Information Management*, 2016, **36**(5): 673–685
- 164 Wang B, Childerhouse P, Kang Y F, Huo B F, Mathrani S. Enablers of supply chain integration: interpersonal and interorganizational relationship perspectives. *Industrial Management and Data Systems*, 2016, **116**(4): 838–855
- 165 Pticek M, Podobnik V, Jezic G. Beyond the internet of things: the social networking of machines. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, **2016**: Article ID 8178417
- 166 Ding K, Jiang P Y, Su S L. RFID-enabled social manufacturing system for inter-enterprise monitoring and dispatching of integrated production and transportation tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, **49**: 120–133
- 167 Leng J W, Jiang P Y. Mining and matching relationships from interaction contexts in a social manufacturing paradigm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, **47**(2): 276–288
- 168 Chen L J, Feldmann A, Tang O. The relationship between disclosures of corporate social performance and financial performance: evidences from GRI reports in manufacturing industry. *International Journal of Production Economics*, 2015, **170**: 445–456
- 169 Jiang P Y, Ding K, Leng J W. Towards a cyber-physical-social-connected and service-oriented manufacturing paradigm: social manufacturing. *Manufacturing Letters*, 2016, **7**: 15–21
- 170 Ye J M. Optimization path of industrial real estate development under the mass entrepreneurship and innovation environment. *Boletín Tecnico*, 2017, **55**(14): 231–235
- 171 Yoo B, Ko H, Chun S. Prosumption perspectives on additive manufacturing: reconfiguration of consumer products with 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, **22**(4): 691–705

- 172 Yang C, Lan S L, Shen W M, Huang G Q, Wang X B, Lin T Y. Towards product customization and personalization in IoT-enabled cloud manufacturing. *Cluster Computing*, 2017, **20**(2): 1717–1730
- 173 Patel P, Intizar Ali M, Sheth A. On using the intelligent edge for IoT analytics. *IEEE Intelligent Systems*, 2017, **32**(5): 64–69
- 174 Thames L, Schaefer D. Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia CIRP*, 2016, **52**: 12–17
- 175 Calvo I, López F, Zulueta E, González-Nalda P. Towards a methodology to build virtual reality manufacturing systems based on free open software technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2017, **11**(3): 569–580
- 176 Weber A. GE “predix” the future of manufacturing. *Assembly*, 2017, **60**(3): GE70–GE76
- 177 Trappey A J C, Trappey C V, Govindarajan U H, Sun J J, Chuang A C. A review of technology standards and patent portfolios for enabling cyber-physical systems in advanced manufacturing. *IEEE Access*, 2016, **4**: 7356–7382
- 178 Jirkovsky V, Obitko M, Marik V. Understanding data heterogeneity in the context of cyber-physical systems integration. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(2): 660–667
- 179 Guan Y Q, Ji Z J, Zhang L, Wang L. Controllability of heterogeneous multi-agent systems under directed and weighted topology. *International Journal of Control*, 2016, **89**(5): 1009–1024
- 180 Sztipanovits J, Koutsoukos X, Karsai G, Kottenstette N, Antsaklis P, Gupta V, et al. Toward a science of cyber-physical system integration. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1): 29–44
- 181 Chen T S, Du Z D, Sun N H, Wang J, Wu C Y, Chen Y J, et al. DianNao: a small-footprint high-throughput accelerator for ubiquitous machine-learning. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. Salt Lake City, UT, USA: ACM, 2014. 269–284
- 182 Luo T, Liu S L, Li L, Wang Y Q, Zhang S J, Chen T S, et al. DaDianNao: a neural network supercomputer. *IEEE Transactions on Computers*, 2017, **66**(1): 73–88
- 183 Akopyan F, Sawada J, Cassidy A, Alvarez-Icaza R, Arthur J, Merolla P, et al. TrueNorth: design and tool flow of a 65 mW 1 million neuron programmable neurosynaptic chip. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2015, **34**(10): 1537–1557
- 184 Cavallo F, Semeraro F, Fiorini L, Magyar G, Sinčák P, Dario P. Emotion modelling for social robotics applications: a review. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, **15**(2): 185–203
- 185 Hui T K L, Sherratt R S. Towards disappearing user interfaces for ubiquitous computing: human enhancement from sixth sense to super senses. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2017, **8**(3): 449–465
- 186 Tian Y H, Chen X L, Xiong H K, Li H L, Dai L R, Chen J, et al. Towards human-like and transhuman perception in AI 2.0: a review. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 2017, **18**(1): 58–67
- 187 Bu T Z, Xiao T X, Yang Z W, Liu G X, Fu X P, Nie J H, et al. Stretchable triboelectric-photonic smart skin for tactile and gesture sensing. *Advanced Materials*, 2018, **30**(16): 1800066
- 188 Persaud K C. Towards bionic noses. *Sensor Review*, 2017, **37**(2): 165–171
- 189 Deng Liang-Chen, Liu Yan-Li, Yu Yi-Xin, Bai Tian-Yuan. Reliability assessment of distribution network CPS considering whole fault processing. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, **37**(12): 22–29
(邓良辰, 刘艳丽, 余贻鑫, 柏天缘. 考虑故障处理全过程的配电网信息物理系统可靠性评估. *电力自动化设备*, 2017, **37**(12): 22–29)
- 190 Sajid A, Abbas H, Saleem K. Cloud-assisted IoT-based SCADA systems security: a review of the state of the art and future challenges. *IEEE Access*, 2016, **4**: 1375–1384
- 191 Styugin M. Establishing systems secure from research with implementation in encryption algorithms. *International Journal of Network Security*, 2018, **20**(1): 35–40
- 192 Coutinho M, de Oliveira Albuquerque R, Borges F, Villalba L J G, Kim T H. Learning perfectly secure cryptography to protect communications with adversarial neural cryptography. *Sensors*, 2018, **18**(5): 1306
- 193 Lee W, Kim N. Security policy scheme for an efficient security architecture in software-defined networking. *Information*, 2017, **8**: 65
- 194 Khan M A, Salah K. IoT security: review, blockchain solutions, and open challenges. *Future Generation Computer Systems*, 2018, **82**: 395–411
- 195 De Graaf M M A. An ethical evaluation of human-robot relationships. *International Journal of Social Robotics*, 2016, **8**(4): 589–598
- 196 Pagallo U. When morals ain’t enough: robots, ethics, and the rules of the law. *Minds and Machines*, 2017, **27**(4): 625–638



景 轩 华南理工大学机械与汽车工程学院博士研究生. 主要研究方向为智能制造系统.

E-mail: bingguoyouling@163.com

(JING Xuan Ph.D. candidate at South China University of Technology. Her main research interest is intelligent manufacturing system.)



姚锡凡 华南理工大学机械与汽车工程学院教授. 主要研究方向为数字制造与计算机控制, 智能制造. 本文通信作者.

E-mail: mexfyao@scut.edu.cn

(YAO Xi-Fan Professor at South China University of Technology. His research interest covers digital manufacturing, computer control, and intelligent manufacturing. Corresponding author of this paper.)