面向未来互联网的智慧制造研究现状与展望

马南峰, 姚锡凡*, 王柯赛

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640

* E-mail: mexfyao@scut.edu.cn

收稿日期: 2021-06-06; 接受日期: 2021-11-01; 网络版发表日期: 2021-12-03

国家自然科学基金委员会与英国爱丁堡皇家学会合作交流(编号: 51911530245)、国家自然科学基金(批准号: 51675186)、国家留学基金管理委员会(编号: 留金美[2020]1509号)、广东省基础与应用基础研究(编号: 2021A1515010506)和湛江市科技计划(编号: 2020A01001)资助项目

摘要 现代集成制造已成为融合社会、经济、人文等方面在内的复杂大系统, 而社会系统、信息系统、物理系统融合是当今制造业的发展趋势. 智慧制造作为未来互联网的四大支柱或“四网”(人际网、物联网、务联网、内容/知识网)与先进制造技术融合而成的一种人机物协同的智能制造新模式——社会-信息-物理-生产系统受到广泛关注, 因而很有必要对如此新兴的智能制造开展综述研究, 旨在梳理其研究脉络的同时, 为未来智能制造发展提供有益的借鉴参考. 本文综合评述了面向未来互联网的智慧制造, 首先, 分析了工业互联网与未来互联网之间的关系并阐述了以“四网”与先进制造技术融合而成的智慧制造基本概念; 然后, 回顾了智慧制造研究进展并论述了制造业走向智慧化的必然性; 最后, 讨论了智慧制造与其他智能制造模式的差异和相关性, 并对智慧制造的未来研究进行了展望. 从人工智能、互联网、工业革命及制造范式的演变来看, 智慧制造是智能制造的继承与创新, 并随着新一代人工智能、未来互联网的推进而走向与人类和谐共处的可持续包容性发展.

关键词 人工智能, 智能制造, 智慧制造, 互联网, 社会信息物理生产系统

1 引言

制造业是衡量一个国家生产力水平、综合国力的重要因素, 是实现国家经济平稳高质量发展的内在驱动力, 作为国民经济的主导产业, 是供给侧结构性改革的重要领域. 建设具有世界影响力的制造业, 是维护国家领土完整、人民生命财产安全、主权独立的重要保障, 是提升我国综合国力水平, 跻身为世界强国的必经之路^[1].

20世纪50年代左右, 伴随着第一代电子计算机的

出现, 信息技术与制造业便有着千丝万缕的联系. 人们对产品需求层次的不断增加促使制造技术、信息技术快速变革; 相应地, 信息技术的进步也推动着制造业不断革新. 1969年, 美国成功研制出首个计算机网络——阿帕网, 计算机网络的出现可以有效避免产品设计制造过程中出现“信息化孤岛”, 计算机集成制造(Computer integrated manufacturing, CIM)应际而生. 但由于当时计算机普及程度低以及网络技术较差, 再加上以精益生产为代表的大量生产盛行, 对CIM的需求没有像当今对个性化定制生产那么急切^[2].

引用格式: 马南峰, 姚锡凡, 王柯赛. 面向未来互联网的智慧制造研究现状与展望. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 55–75

Ma N F, Yao X F, Wang K S. Current status and prospect of future internet-oriented wisdom manufacturing (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 55–75, doi: [10.1360/SST-2021-0232](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0232)

20世纪90年代,随着互联网的应用和Web技术的飞速发展以及生产需求转为大量定制,出现了以敏捷制造^[3]为代表的网络化制造模式,但互联网在制造业中的应用仍局限于产品协同开发和营销方面。

虽然这些制造模式在某些方面仍存在一定的局限性,但亦能较好地满足当时社会的部分需求,在各自应用领域取得了一定的成果,使企业的数字化水平和竞争力有了一定的提升,同时也为更先进制造模式的诞生奠定了坚实的基础。

进入新世纪以来,全球科技形势风起云涌,新技术、新理念、新思维、新概念等层出不穷。云计算^[4]、大数据、物联网(Internet of things, IoT)^[5]、移动互联网、区块链^[6]、5G通信技术^[7]、数字孪生(Digital twin, DT)^[8]、信息物理系统(Cyber-physical system, CPS)^[9]等新一代信息技术和人工智能(Artificial intelligence, AI)^[10]技术的迅速发展及其大范围普及应用,推动了人类社会跨越式发展。世界经济进入了以服务为导向的网络化/智能化经济^[11]时代,诞生了以制造网络^[12]、云制造^[13,14]等为代表的新兴网络化/智能化制造模式。对应地,一系列面向服务^[15,16]的制造系统和平台相继被提出,其目的是通过制造服务平台实现分布式制造资源、人力资源、服务资源等跨域、跨企业按需共享、协作使用^[17]。

当代世界,在全球化背景下,企业分工日趋精细,相互之间的合作越来越紧密,但也面临着同质化竞争、标准化制定权争夺越来越激烈的局面,各国制造企业争相朝制造价值链高端方向发展,以掌握更高的话语权、主动权并收获更高的经济效益和社会回报。为了适应激烈的市场竞争环境,发展高质量、优质服务、低成本、高效率、快速响应、交付周期短的制造业需求变得愈发强烈。然而,目前的制造业体系水平、服务质量、用户体验等难以满足产品和服务快速化、个性化、智能化的增值升级需求,为了解决制造业面临的巨大瓶颈和困难,必须对制造业进行产业智能升级、体系模式创新。

智能制造是多种新技术与应用的总和,不同的时代背景赋予了智能制造不同的含义。诞生于20世纪80年代的智能制造,英文用“Intelligent Manufacturing (IM)”表示。进入新世纪之后,以物联网、移动互联网、5G通信技术、区块链、云计算、数字孪生、CPS为代表的新一代信息技术,尤其以大数据智能、深度

学习为代表的新一代AI与先进制造技术融合正在形成新一代智能制造,相较于传统智能制造(IM),新一代智能制造呈现出“smart”的特性,多用英文“Smart Manufacturing (SM)”表示^[18]。

我国2015年发布的《中国制造2025》^[19]指出制造业正在与新一代信息技术(New IT)产生深度融合并将引发巨大的产业变革,基于CPS的智能制造^[20]在制造业能否顺利变革中起着关键性作用。基于CPS,美国提出的工业互联网与德国提出的工业4.0 (Industry 4.0)都致力于物理世界和虚拟世界的融合。工业互联网可以有效促进数据的流动、集成与信息交流共享,但仍存在着目前互联网体系固有的缺陷,且相对于前期已发展起来的消费互联网而言,未来的智能制造必将两者加以深度融合。本文所评述的智慧制造(Wisdom manufacturing, WM)^[21]正是在这种时代背景下产生的,它是现有多种制造模式、理念的融合、拓展和延伸。智慧制造是面向未来互联网,将消费互联网与工业互联网深度融合,是智能制造发展到一定阶段时的必然产物,是智能制造的继承与创新,代表新一代智能制造的发展方向^[2],而互联网是实现智慧制造的重要一环^[22]。

2 面向未来互联网的智慧制造的提出

2.1 工业互联网与未来互联网

工业互联网^[23]由美国通用电气(GE)于2012年提出,紧随其后,由五家龙头企业联手组建的工业互联网联盟将这一概念进一步推广普及,随后,多家科技业巨头纷纷加入到联盟阵营中,如英特尔、思科等。

为了进一步明确工业数字化转型方式和流程,进而为企业数字化转型决策提供参考,美国工业互联网联盟于2020年发布《工业数字化转型白皮书》^[24]。报告分析了企业数字化转型的驱动因素,描述了云计算/边缘计算、超连接^[25]、数据安全、AI、数字孪生、分布式账本^[26]、人机接口^[27]、增材制造^[28]、数据共享、工业物联网(Industrial Internet of things, IIoT)、自主机器人系统、信息技术/运营技术、工业物联网终端的微功耗发电-能量收集、服务化、新商业模式和支付技术平台等实现数字化转型的关键技术及其主要应用场景;并进一步指出数字化转型的关键是物联网技术的全面实现和“快速、高效及开放”的创新型流程

构建。

我国也成立了工业互联网产业联盟, 于2016年发布工业互联网体系架构1.0版之后, 又于2019年发布了2.0版^[29]。

工业互联网的主要目标是实现智能工业操作, 变革业务流程和创造工业成果^[30]。其本质是通过工业级网络平台将智能生产加工设备、环境感测装置、生产线、工厂、物流平台、产品供应商、生产操作员、消费者等各流程、各环节要素资源紧密连接融合起来^[31], 打破多方交流壁垒, 实现各种制造资源、服务资源、人力资源的高效共享与协作, 促进制造业与服务业之间的大融合, 推动整个生产制造链过程中信息资源共享。

与现有的互联网有所不同, 工业互联网更强调物理装置、感测设备等多方充分的连接(万物互联), 以及数据高速传输、多类型集成、分析和建模等, 其本质就是工业物联网^[32]。2017年, 美国工业互联网联盟用“工业物联网参考架构”^[33]来代替早期的“工业互联网参考架构”。

在制造领域中, “制造业+物联网”称之为基于物联网的制造(IoT-based manufacturing), 或称为制造物联网(Internet of manufacturing things, IoMT)^[34]。

通用电气提出的“工业互联网”与德国提出的“工业4.0”^[35]战略有异曲同工之妙, 被称为美国版“工业4.0”。无论是通用电气2012年提出的“工业互联网”, 还是德国2013年提出的“工业4.0”, 抑或2015年我国提出的“中国制造2025”, 其目的都是完成制造价值链中过程、设备、流程等数字化、信息化转型, 其核心是物理与信息系统虚实融合, 向智能化、智慧化生产迈进, 以最大限度提高生产力、最大程度满足用户个性化需求, 创造价值和提高社会福利。

实际上, 在提出工业互联网概念之前, 新世纪初, 人们已利用互联网开展网络化制造^[36]相关研究。20世纪80年代初发布的互联网通信协议第四版(IPv4)成为该协议第一个被广泛部署和使用的版本, 但后来随着用户规模的不断扩大、数据传输体量越来越大、数据类型越来越丰富, IPv4逐渐难以满足人们对未来网络化社会(Future networked society)的发展要求, 其暴露出的显著问题为: 地址资源有限、安全性低、部分应用实时性不高及用户体验差等, 不能适应未来互联网发展的需求, 部分研究者认为用IPv6来代替IPv4^[37,38]

是解决这一问题的有效方法。但随着互联网终端软件及应用平台的不断发展, 处理的数据类型由基础数据结构向图像、音频和视频等类型转变, 终端设备由固定场所接入的计算机设备转向互联互通的智能移动式设备, 交流对象从人际通信转向物-物通信、人-物通信等。自2005年开始, 业界普遍意识到IPv6存在着安全、整体结构、应用实施落地等方面的重大缺陷, 试图用IPv6取代IPv4体系架构的愿望难以实现, 需要重新设计能够逾越IPv6的新一代互联网, 为了区别于以IPv6为代表的“下一代互联网”叫法, 2005年左右, 许多专家学者陆续投入到“未来互联网”研究中^[39]。

随着互联网大范围普及推广应用, 用户数量和应用规模、应用场景快速扩张, 数据传输量呈指数级增长, 其原始设计在安全性、实时性、移动性和可扩展性等方面问题日益凸显^[40]。为了从根本上解决互联网存在的原始设计缺陷, 世界各国陆续制定了一系列的研究计划, 争相探索面向未来的新型网络体系架构, 试图确立在未来信息网络方面的优势。

在未来网络研究方面, 美国于2000年就启动相关项目New Arch, 始于2005年的“未来互联网设计”(Future Internet Design, FIND)资助未来网络研究项目多达50个, 涉及新型网络体系结构、路由机制、感知与测量、安全、无线移动等方面。2010年, 美国自然科学基金委员会(National Science Foundation, NSF)连续资助4个未来互联网体系结构FIA项目^[41]。相应地, 欧洲不少国家也加入到未来网络体系架构研究中, 欧盟FP7开启了面向未来互联网的研究计划FIRE(Future Internet Research and Experimentation)^[42], 旨在解决未来互联网面对的移动性、扩展性、安全性、隐私性等诸多挑战。

在亚洲, AKARI^[43]是日本情报通信研究机构(NICT)于2006年提出的未来互联网研究计划, 其目标是在2015年之前推出一个全新的网络体系架构, 以解决当时网络存在的问题, 并满足未来网络化社会的需要, 同时考虑网络的过渡和兼容性问题。

我国也较早对未来信息网络体系结构和关键技术进行了研究, 其中由中国科学院计算技术研究所提出的面向服务的未来互联网新型网络体系结构(Service Oriented Future Internet Architecture, SOFIA)项目得到国家973项目支持, 以解决传统TCP/IP网络体系在多样性和动态性方面存在的不足。与此同时, 一大批国内优秀的科研人员加入到国家未来网络创新平台CENI

(China Environment for Network Innovations)的建设中. 2021年4月, 随着“未来互联网试验设施”(FITI)高性能主干网的正式开通, 标志着我国在研究和设计未来互联网体系结构方面已具有国际领先的开放性试验环境, 作为面向未来互联网的国家重大科技基础设施, 必将为我国实施网络强国战略提供重要支撑^[44].

未来已来, “未来互联网”已成为集信息采集、数据传输、存储与计算处理于一体的网络化社会重要基础设施, 其“四网”^[45]——人际网(Internet by and for people, IbfP)、内容/知识网(Internet of contents and knowledge, IoCK)、务联网(Internet of services, IoS)、物联网(IoT)已成为支撑未来网络化社会的四大支柱技术, 如图1所示. 互联网发展过程不仅昭示着网络化社会发展的必然趋势, 而且也为此指明了方向^[21].

物联网是一种计算设备、智能感测设备、全球定位系统相互关联的系统, 具有通用唯一识别码(Universally unique identifier, UUID), 它具有通过网络传输数据的能力, 实现物与物、物与人的泛在连接, 以及对物品及过程的智能感测、辨别和控制.

物联网通过传感器技术和射频识别(Radio frequency identification, RFID)^[46]技术使计算机具备观察、识别和认知世界的能力, 并且没有因为人为增加数据造成的干扰^[5], 其架构通常分为三层——感测层、网络层与应用层, 或四层——感测层、网络层、平台工具层与应用服务层. 而被世界各国政府与研究机构广泛引用SRI Consulting Business Intelligence的物联网技术路线^[47], 其依据时间轴分为四个阶段: 供应链辅助、垂直市场应用、无所不在的寻址, 最后达到“The Physical Web”(意即让物联网上的每一个智能设备都以URL来标示).

要给每个连上物联网的对象分配唯一的标识或地址, 面向万物互联的未来社会, 就需要不计其数的IP地址, 而IPv4地址空间是极其有限的. 虽然从IPv4过渡到IPv6, IP地址长度由32位扩展到128位, 在一定程度上缓解IP地址数量有限的问题, 但IPv6仍存在着重大缺陷, 比如逻辑混乱的整体结构、含混不清的地址空间设计、极大的安全漏洞设计等^[48]. 为此人们致力于未来物联网的研究, 旨在应对物联网产生的大量结构化、半结构化及非结构化等大数据^[49]带来的挑战, 提高网

图1 (网络版彩图)未来网络化社会
Figure 1 (Color online) Future networked society.

络的可扩展性、安全性、移动性以及服务的质量^[50]。

内容/知识网对物联网感测到的数据进行提取、挖掘、推理并合成为有意义的信息、知识或智慧, 关注数据/信息/知识的处理和知识发现^[51,52]等。内容/知识网中数据是基础, 主要通过物联网感测获取。从物联网获取到的海量数据, 需要云计算技术、大数据处理与存储, 从而将数据转化为有用的信息、知识或智慧。

人际网利用 WeChat、QQ、Email、MSN、Blog、Tag、SNS 和 Wiki 等社会性交流软件及互联网, 将服务资源拓宽到社会世界, 利用集体智能(Collective intelligence, CI)^[53]实现知识交流共享、知识协同创新、知识储备沉淀、知识转移传播等。单一个体所做出的决策往往没有多数个体共同做出的决策准确, 集体智能正是一种多人协作共享或者群体互助的智能, 将众人的意见进行集中进而转化为决策的一种过程, 通过多主体的合作与竞争涌现出来的一种集体协商一致的决策模式。Web 2.0^[54]实现了用户与互联网之间的双向交互, 代表着以人为核心, 更加人性化更加自由的网络时代, 用户不仅可以在网络上获取信息, 同时用户本身也是一个信息的发布者、传播者, 可以在网络上合乎法律法规的情况下自由发布自己的内容、信息、知识等, 借助这一特性, 集体智能可以快速高效地提高社会的内容、知识多方共享。随着互联网的发展和大规模普及应用, 以社区为基础的论坛、朋友圈、创新兴趣小组等在集体智能的演化过程中扮演着越来越重要的角色, 实现“众智、众包、众帮、众扶、众筹、众创”的“共享服务、跨界融合”, 重点发挥“政、产、学、研、金、用”六位一体的集体协同力量, 实现优质、高效、快速响应、节能环保、智能地制造产品和服务用户, 提高企业的市场竞争能力^[55]。

人际网通过社会性交流软件实现知识(特别是隐性知识^[56])分享、知识获取、知识利用等, 而人是隐性知识的重要载体, 需要充分挖掘人背后蕴含的隐性知识, 综合运用物联网感测、内容/知识网分析得到显性知识并充分挖掘人背后暗藏的隐性知识, 实现对生产物理系统的实时状态监测、智能精准管控变得越来越重要, 人与制造系统的无缝集成、完美融合已成为制造智能化、智慧化的关键和研究热点。

目前国内外已经有学者开始研究人与制造系统的融合^[57,58]。随着工业 4.0 兴起而出现的“Operator

4.0”^[59,60]旨在促进人与机器的协作。Zhou 等人^[61]提出“Human-cyber-physical systems (HCPSs)”, 研究人与 CPS 的融合, 在“HCPSs”中, 物理系统是主体, 信息系统是主导, 人是主宰。进一步地, 基于“HCPSs”发展理论, 王柏村等人^[62]提出以人为本的智能制造(人本智造)的概念。姚锡凡等人^[21]提出基于社会信息物理生产系统(Social cyber-physical production system, SCPPS)的智慧制造, 充分考虑人在制造系统中的主观能动性(挖掘人的隐性知识)、群体创造性, 实现“人-机-物-环境”全要素全流程的全面感知与融合, 最终实现智慧制造。2016 年, 日本政府发布《第五期科学技术基本计划》提出超智能“社会 5.0 (Society 5.0)”^[63]战略, “超智能社会”是这样一种社会形态: “在最恰当的时间, 将最适合的产品或服务提供给最需要的人, 使每个人的各种社会需求得到充分满足, 从而构建一个生活舒适、充满活力的社会”。日本“社会 5.0”的目标就是构建超智能化、以人为中心的社会, 与本文所评述的智慧制造理念不谋而合。

通过务联网, 借助“制造即服务”的理念, 把各种分布式制造资源转变为虚拟化的服务资源, 并将各种服务资源有机组合起来汇聚成服务资源池, 提供给用户按需即取、恰到好处的服务和良好的用户体验。面向服务架构(Service-oriented architecture, SOA)^[64]的理念, 已得到广泛认同并嵌入应用到产品价值链全生命周期的各个环节, 如原材料供应、产品制造、销售、服务等。服务的概念因此得到进一步拓展, 不再局限于产品本身附带的售后服务, 更包括其他各种制造相关的资源、能源、知识、技术、流程等广义服务。在此背景下提出的制造网格^[65]、云制造便是面向服务的制造新模式。单一种类的服务一般只能应付单一类型的任务, 无法应对复杂多任务, 为此需要将复杂任务分解成各类型元任务(不能再继续被分解), 再通过服务组合、择优、遗传等各类高效算法实现服务组合优化, 高效、高质量地完成各项生产任务^[66]。基于 SOA 的服务型系统具有“松散耦合”^[67]的结构特征, 使得相互连接的单个服务或子系统独立变化和演进变成可能, 而不用进行大范围改动或彻底破坏原有系统结构, 使得对服务节点的增、删、查、改变得容易, 增强服务系统和平台的稳定性、鲁棒性及可靠性。随着未来互联网体系架构日渐完善, 当互联网及 AI 大范围普及并进一步完成大规模群体性跨越发展与应用时,

不仅“制造即服务”，而且“数据即服务”、“软件即服务”、“基础设施即服务”、“平台即服务”、“安全即服务”、“管理即服务”等，最终走向“万物皆服务”^[68]的智慧服务型社会。

工业互联网的本质是IIoT，是应用在工业上的物联网，实现“物-物”、“人-物”的相互连接，构成以数据充分传输为目的的工业级网络，虽然其可解决因感知深度不足、信息维度低、互联广度不够等原因造成的可预见性差、指导性不强、易产生信息孤岛^[69]等部分问题，但仍旧无法摆脱“TCP/IP”体系结构的束缚，存在着目前互联网体系固有的缺陷，在体验质量(Quality of experience, QoE)、流量扩展性、路由表、移动性、动态性、安全性、可管控性等方面面临难以克服的困难，网络迫切需要从传输通道向融合传输、存储和计算处理于一体的智能网络转变，因此需要以用户为中心，建立融合存储、计算和传输的面向服务的未来网络^[70]。需要指出的是，工业互联网是相对于前期已发展起来的消费互联网而言的，未来的智能制造必将两者加以深度融合。智慧制造正是面向未来互联网，将消费互联网与工业(产业)互联网深度融合，特别是将“四网”与先进制造技术融合而成的一种新型制造模式和理念。

2.2 智慧制造概念

智慧制造是一种面向未来互联网和未来AI，基于数据感测分析、内容和知识运用的人机物协同服务型

新制造模式和理念，融合“四网”和先进制造技术为客户提供个性化、可信、安全、透明、按需即取的智能化产品与服务^[71]。智慧制造可简单理解为是一种面向未来互联网、未来AI并融合“四网+先进制造技术”的服务型新制造模式，其中先进制造技术是基础，“四网”融合是关键，SCPPS^[72]是一种落地实施智慧制造的具体架构体系。

“四网”与先进技术融合而成的智慧制造框架如图2所示，智慧制造包含服务组合优化，人与物参与的普适计算。将物联网感测到的数据传输到内容/知识网并进行数据分析、提取出有用的信息、知识或智慧，为人际网提供知识技术支撑、知识储备、知识应用等，人际网充分考虑用户的个性化需求，再通过务联网将各种服务资源进行优化组合以实现优质、高效的资源配置，形成对物理生产系统的闭环控制。“四网”的本质仍是网络，而智慧制造便是面向先进制造的网络的网络(即超网络^[73])。图2中，“四网”的节点分别代表不同的含义，物联网中节点主要是各种机器、传感器、材料等组成的“物”，也有可能是操作人员或协作机器人，内容/知识网中节点代表“数据、信息、知识”等，人际网中节点代表具有智慧的“人”，务联网中节点代表各种虚拟化“服务”。图2中，物联网、内容/知识网一般为有向网络，分别表征物质、数据/信息/知识等流动方向；人际网、务联网一般为无向网络，分别表征相互交织、双向沟通的人-人关系、虚拟化服务-服务关系。

分析上述智慧制造系统的构成机理，“四网”与制

图2 (网络版彩图)“四网”与先进制造技术融合而成的智慧制造

Figure 2 (Color online) Wisdom manufacturing by integrating “four networks” and advanced manufacturing technology.

造技术融合成智慧制造的四大支柱技术, 再通过基础与总线等技术将四大支柱技术集成起来就形成整个系统的技术体系. 四大支柱技术^[74]为: 面向物联网的制造技术(制造物联化技术)、面向内容/知识网的制造技术(制造智能化技术)、面向物联网的制造技术(制造服务化技术)、面向人际网的制造技术(制造社会化技术). 制造物联化技术完成制造过程中原始数据的采集和实时状态监控; 制造智能化技术通过对物理系统(物联网)、信息系统(务联网)、社会系统(人际网)产生的大量各种类型的数据进行整理、分析并挖掘出有用的信息和知识, 为产品全生命周期管理提供技术支持; 制造服务化技术将各种资源进行服务化(虚拟化), 为制造过程中技术、资源的集成提供支持; 制造社会化技术为大规模的协同制造提供多样化源源不断的创新来源, 系统决策提供支持^[2].

3 智慧制造进展

上个世纪90年代, 随着Web技术和互联网逐渐普及应用, 出现了网络化制造模式. 进入新世纪, 伴随着SOA思想和可扩展标记语言(XML)^[75]技术的发展, 面向服务的制造模式相继被提出, 特别是随着云计算、Web 2.0、语义Web、物联网等新一代信息技术的出现与发展, 出现云制造^[14]、企业2.0(Enterprise 2.0)^[76]、语义网络化制造^[77]、物联制造^[78]等新型制造模式. 但是, 还缺乏对这些制造模式的融合研究, 而面对日趋复杂的生产制造系统, 急切需要将它们加以有效整合, 以满足新一代信息技术背景下制造业发展的需求.

2010年, 李伯虎等人^[14]延伸云计算理念而提出云制造概念. 姚锡凡等人^[79]融合面向服务架构与云计算, 于2012年提出了面向云制造服务架构, 构建了面向云制造服务架构的集成开发环境; 再结合基于物联网的制造模式^[80]等方面的研究, 于2014年6月首次给出智慧制造的定义, 认为智慧制造是融合云制造、制造物联、语义网络化制造和企业2.0等思想与理念, 集物联网、务联网、人际网和内容/知识网于一体的人机物协同的新型制造模式^[21]. 由此可见, 智慧制造概念萌芽于云制造、制造物联等方面的研究. 智慧制造的概念定义随新一代信息/人工智能技术发展而不断更新完善, 以满足制造业的发展需求. 2014年11月, 姚锡凡

等人^[81]从符号学视角出发, 建立并分析了智慧制造系统洋葱模型和阶梯模型, 指出由SCPPS构成的智慧制造是一种容纳了组织符号学所有层次的制造模式, 进一步完善了智慧制造系统体系框架.

2015年, Yao等人^[71]从社会-技术(Socio-Technical)的角度研究了实现智慧制造的关键途径和方法. 同年, 张存吉等人^[82]从个性化服务、嵌入式创新、多网络融合等角度研究智慧制造并给出国内外具有智慧制造雏形的案例, 进一步基于RFID技术对智慧车间的工件进行异常状态实时监测, 并建立了一个可以实时感知周围环境的智慧车间模型^[83].

2016年, 姚锡凡等人^[74]从系统科学角度出发, 探讨了智慧制造系统架构组成、子系统之间的相互关联作用以及其基本特征等基础性理论问题, 并提出了总体与基础技术以及面向“四网”的社会化制造技术、智能化制造技术、服务化制造技术、制造物联技术所组成的智慧制造系统技术体系框架. 同年, Zhang等人^[84]对智慧制造下的知识应用与创新进行了研究, 并指出知识的获取与应用对于企业的重要性, 消费者应参与产品制造的全过程, 促进企业与消费者的互联互通对提升产品质量与服务模式创新等方面具有重要作用. 鲁建厦等人^[85]对智慧制造的背景、特征等进行了研究综述, 对比分析了智慧制造与其他制造模式之间的关系并阐述了智慧制造的三个关键技术及其研究现状.

2017年, Yao等人^[86]研究了AI、智能制造的演化发展过程并对智能制造、智慧制造展开详细对比分析, 同时提出“主动制造”^[87]概念: 一种基于大数据分析和主动计算的新制造模式. 同年, 基于SCPPS, Zhou等人^[88]提出了智慧制造下的大数据参考架构并对几种新兴智能制造模式进行评述^[89]. 杨续昌等人^[90]初步探讨了智慧制造概念模型和运行架构, 对比分析了传统制造模式和智慧制造, 阐述了智慧模式的优越性.

2018年, 姚锡凡等人一方面研究了大批量生产、规模化定制、个性化生产的制造业模式, 指出走向个性化生产的必然性, 并从经济学视角出发, 利用学习曲线分析了长尾生产方式^[91]的特征; 另一方面, 在研究互联网演化发展的基础上, 探讨了“互联网+制造”的发展现状与展望^[92], 在总结前期研究成果的基础上出版了对制造物联网相关技术进行全面详细阐述的专著^[34]. 基于智慧制造“四网”中务联网按需提供服务的理念, 即通过在云服务平台上整合多层次、多粒度的

制造资源, 实现按需为不同用户提供全方位的一站式服务, Ren等人^[93]开展了基于务联网理念的服务组合研究, 并提出了一种基于协同效应的服务组合方法。

2019年, 姚锡凡等人^[94]从AI视角下分析了智能制造的前世今生与未来, 对以符号逻辑推理为基础的第一代智能制造(IM 1.0)和以云计算、物联网、CPS、大数据和深度学习^[95]等新一代信息技术为基础的第二代智能制造(IM 2.0/SM)进行了关联对比分析; 同时, 从螺旋动力学角度论述从面向绿色生态环境的可持续制造走向以人为本的包容性制造的必然性^[96], 并对可持续制造和包容性制造进行了对比分析; 最后梳理了“互联网+制造”和“AI+制造”在大数据驱动下走向融合的发展演化进程, 并将统一于SCPPS旗下^[97]。同年, 景轩等人^[72]通过对信息物理生产系统进行深入研究分析, 建立了SCPPS模型并探讨了CPS随着社会推进所展现出的社会化特性。基于工件的异常事件监控和刀具剩余寿命预测, Zhang等人^[98]研究了智慧制造车间主动调度问题。

2020年, 姚锡凡等人^[18]分析了新工业革命下智能制造发展现状以及未来走向融合统一的智慧制造或SCPPS的发展趋势, 揭示了制造业从“计算机+”走向

“互联网+”和“AI+”的发展规律。同年, 姚锡凡等人^[2]在总结前期研究的基础上, 出版专著《智慧制造理论与技术》, 对智慧制造进行了全面系统性整理、总结和归纳, 并指出智慧制造是融合多种先进制造模式与理念的结果, 是智能制造的继承与创新、融合与拓展, 代表一种新的智能制造理念、思想体系、新型制造模式。智慧制造研究进展“鱼骨图”如图3所示。

Kusiak^[99]认为“Smart Manufacturing”是融合利用CPS、物联网(万物互联)、云计算、面向服务的计算、AI和数据科学^[100]的制造范式。从计算机集成制造到智慧制造的演化进程^[97]就是计算机、互联网、AI与制造技术在不同时期不断融合发展的历程, 是社会、信息、物理等多异构系统不断交互耦合的演化历程。下面从AI、工业革命与制造模式的演化来分析走向智慧制造的途径。

4 制造业走向智慧化分析

4.1 从符号智能到未来人工超级智能

AI也称机器智能, 指以最少的人工干预利用计算机模仿人类智力的行为, 人们普遍认为AI起源于机器

图3 (网络版彩图)智慧制造研究进展

Figure 3 (Color online) Research progress of wisdom manufacturing.

人的发明^[101]. AI的目的就是使机器像人类一样思考并做出正确的决策, 以增强人类的智能^[102].

1956年, 几位AI与认知学专家、计算机科学家、诺贝尔经济学奖获得者、信息论创始人等在美国汉诺斯小镇Dartmouth学院召开了会议, 标志着AI正式成为一门新的交叉学科^[103]. 从1956年正式提出AI学科算起, 60多年以来, AI经历过发展缓慢的“黑暗年代”, 也经历过蓬勃发展的“春天”, 总体来说, 取得了不错的发展与进步, 成为一门广泛交叉融合的前沿科学. AI经过数十年的发展, 研究热点由最开始的机器定理证明到模拟人类专家知识、经验以解决特定问题的专家系统, 再到目前以深度神经网络为代表的新一代AI^[104], 从AI 1.0到未来AI发展过程示意图如图4所示.

由“符号主义”^[105]引导的AI 1.0到计算智能^[106](如大数据、深度学习)引导的AI 2.0^[107], AI经过几十年的徘徊与曲折前进, 取得了巨大的进步. AI 2.0是以深度学习为代表的统计学习理论与方法, 尽管深度学习具有许多优势, 但同样也存在着以下致命的弱点^[108]: 需要大量的样本(计算量大)、不可解释性(黑箱)、脆弱性(鲁棒性差)、易被欺骗和攻击等. 在2016年中国计算机大会上, 张钹等人^[109]指出AI已经历过两代研究, 现正进入“后深度学习时代”, 即第三代AI. 2017年, 一个旨在研究和发​​展可解释、易解释、能解释AI (Explainable AI)计划被美国国防高级研究计划局(DARPA)悄然开启, 其目的是发展可解释、安全可信的AI

技术^[110]. DARPA定义的可信AI^[111]: 可以将AI系统的推理过程解释给用户, 用户很清楚AI的强项与短板, 并使用户理解它们将来的行为. 这些预示着第三代AI (AI 3.0)的来临, 发展AI 3.0可从以下方面着手: 一是建立可解释性、鲁棒性高的理论与方法, 发展安全可信的强AI新技术, 可结合近年来发展迅速的分布式账本、区块链等技术推动AI的创新应用; 二是全面广泛融合“符号主义+联结主义+行为主义”(Symbolism + Connectionism + Behaviorism)^[112]等多研究派别, 推动AI与其他各学科的交叉融合, 集百家之长, 可从脑认知、神经科学^[113]和生命科学^[114]等领域寻找新一代AI的灵感; 三是把知识驱动和数据驱动^[115]结合起来, 扬长避短, 以达到互补的目的, 实现向未来混合AI^[116]时代的转变.

当然, AI在快速发展的进程中, 将继续从限定局部范围应用的“弱AI”(Weak AI)^[117]向通用普适的“强AI”(Strong AI)^[118]转变, 不断拓展人类的脑力、适应力、创造力, 应用范围将无所不在, 成为新一轮工业革命的核心技术, 正在形成推动经济社会发展的巨大引擎.

相对于现有AI, 未来AI除了具有应用范围广(无所不在)、适应能力强(无所不“能”)、可解释性高等特点外, 还具有自我意识和科学创造能力, 拥有社交技能和通用智慧的系统, 从而发展为“人工超级智能(Artificial superintelligence)”, 在某些方面的能力甚至远超过人

图 4 (网络版彩图)从AI 1.0到未来AI发展过程

Figure 4 (Color online) Development process from AI 1.0 to future AI.

类, 当然未来AI也面临着伦理、法律和哲学等方面的挑战^[119,120]。

未来AI的发展依然是以人工神经网络为基础, 智慧制造作为“四网”与先进制造技术结合的产物, “四网”的本质是“智慧化”网络, 深度神经网络的发展必将推动“四网”向更高的“智慧化”水平迈进, 且未来AI亦将推动制造技术的不断创新发展, 从而走向更先进的制造技术。综上所述, 未来AI在智慧制造的“智慧化”演进进程中具有重大作用。

4.2 从传统制造到智慧制造

4.2.1 工业革命与制造范式演化进程

物质、能量和信息是构成人类生存和社会发展的三大基本要素^[121], 制造本质上就是在信息控制作用下通过能量将原材料转化为最终产品, 并投放市场供消费者使用的全过程。物质是生产加工过程中被加工的主要部分, 能量是将物质转变为最终产品的驱动力, 信息在制造过程中起着中间纽带的作用, 使制造各方高效沟通协作^[122]。制造业历史就是人类利用物质、能量和信息进行物品生产的历史, 在人类历史上, 人类利用能量和信息将物质转化为产品能力的不同形成了不同的制造阶段, 演化出不同的制造范式。

1962年, Kuhn^[123]在《The Structure of Scientific Revolutions》中提出了范式(Paradigms)、常规科学(Normal Science)、反常(Anomaly)等概念, 指出范式是一定时期内科学共同体的思维方式和价值观, 一个新出现范式取代旧范式, 不是真理代替谬误, 其本质是思维方式及世界观的转变, 新旧两种范式不是绝然对立的, 而是在新范式出现之后两者依然可以共存。按照Kuhn所提出的范式理论, 可将制造范式定义为: 制造业全体在某一时期内关于如何生产制造的思维方法、共性认知和制造价值观。制造范式的演进往往伴随着思维方法、共性认知和制造价值观的转换, 新旧制造范式不是绝然对立的, 而是多种制造范式可以同时存在^[124]。

19世纪初, 英国人瓦特改良蒸汽机之后, 人类由此进入了“机器时代/蒸汽时代”。从工业1.0到工业2.0的变化是人类由个体手工作坊机械式(主要为蒸汽机)生产转为电力驱动的规模流水线式生产, 如1913年福特公司应用创新思维和反向逻辑推理提出在T型汽车组装过程中, 将汽车底盘以一定速度从传送带一端向另

外一端移动, 依次装上发动机、仪表、车厢、操作系统、车门、其他附件等汽车零部件, 第一条流水线使每辆汽车的生产效率提高了8倍。福特公司的方法是经验性的, 其依据是理解使整个生产线有效和高效所需的每个过程, 更重要地是理解如何使流水线本身完成其他各种分布式分工活动^[125]。

从工业2.0发展到工业3.0^[126], 高档数控机床、自动化机器人技术、功能完备的工业控制系统推动着制造业向批量化柔性制造转变, 自动化是这个阶段最典型的特征。

新世纪初开始, 随着物联网、AI 2.0、3D打印^[127]、电动汽车^[128]、云计算、大数据、CPS等新技术的不断涌现, 2013年, 在汉诺威工业博览会上, 德国正式提出“工业4.0”^[129]概念, 指出利用CPS将供应链、生产制造过程、售后服务等环节实现数字化、信息化, 最后实现快速、智能化供应个性化产品。

经过数百年的推进、发展, 工业范式历经数次变革, 从工业1.0演变为工业4.0^[129], 每一次工业革命的发生都伴随着市场需求维度的变化, 总体而言, 其维度由少变多。从工业1.0的一维(Volume)到工业2.0的二维(Volume+Variety), 再到工业3.0的三维(Volume+Variety+DeliveryTime), 最后在前期累积基础之上, 演化为目前正在兴起的四维工业4.0(Volume+Variety+Delivery-Time+CustomerDemand), 市场需求维度的变化体现着消费物联网对IIoT的需求随着时代的变化而变化, 工业4.0对IIoT的需求是在最短的交付时间内为用户提供大批量多品种的个性化定制产品。

除了市场需求维度的变化外, 工业4.0相较于工业3.0还呈现出新的技术特征, 一是人机交互不再局限于“人在环内”(Human-in-the-loop)^[130]操控生产物理系统, 而是向“人在环上”(Human-on-the-loop)^[131,132], 甚至“人在环外”(Human-outside-the-loop)方向转变, 即人在物理空间外对生产物理系统实施精准智能监测及控制^[133]。基于泛在感知、物联网、云计算、高速超可靠低延迟5G通讯^[134]等, 推断出人类意图、心理状态、情感和行为, 将人类的行为囊括进系统本身, 实现物联网中人-机-物-环境的真正互联互通^[135], 物理与信息世界的虚实交互融合^[136]、共享信息、实时智能优化决策、精准管控物理生产系统; 二是伴随着音频、图像、视频等在应用软件、人际交往中的不断普及, 处理的数据类型不再局限于制造过程中感测到的结构化

数据,而是向着半结构化数据、非结构化数据方向转变,对大量多类型的数据实时分析,快速提取所需要的信息、知识、智慧等是实现智慧制造的难点、关键点.分析的数据来源不仅包含制造过程中采集到的基础数据,更包含人际社交网中产生的各类型附加数据^[137].

工业4.0的核心是CPS,关键是实现信息系统与物理系统的虚实融合,目前实现虚实融合的方法主要有CPS^[138]、数字孪生、AR/VR/MR^[139]等.

2014年,中德双方签订《中德合作行动纲要》^[140]标志着工业4.0进入中德合作新时代,纲要指出两国政府应给予企业充分的决策自由和政策支持,以帮助企业快速推进数字化转型,这一纲要对于中德两国经济实现快速发展意义深远.周济院士归纳出智能制造三个基本范式:数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造(新一代智能制造)^[141].依照Kuhn的范式理论,三个基本范式不是绝然对立的,而是体现出制造发展过程中存在着相互依存、彼此交织、迭代升级的融合性特征,融合是目前制造业发展的主旋律^[142],智慧制造正是一种实现社会信息物理多系统的大融合新型制造模式与理念.

数字化是实现信息化、智能化、智慧化的基础,同时智能化走向智慧化具有必然性.然而,我国制造业相较于发达国家起步晚、基础薄弱,大部分企业,尤其

是广大中小型企业仍未完成数字化转型.中国企业在推进智能升级的过程中需要完成数字化、信息化“补课”,夯实基础、稳步推进,不必走西方发达国家“顺序发展”的老路,应该探寻一条适合本国国情,实现智慧制造跨越式发展的新路,对新兴发展中工业国家而言,应充分利用后发优势,采取并行推进、融合发展的路线,使三个制造范式快速完成范式转变、迭代升级,从而走向更高阶的智能制造、智慧制造,在未来激烈的制造业竞争中取得先发优势^[143].

工业革命与制造范式演化对应关系如图5所示.智慧化不一定发生在工业5.0时代,工业6.0、工业7.0都有可能,智慧化不是由工业演化模式多少决定的,而是由当时社会的智慧化水平决定的.

4.2.2 智能制造走向智慧制造必然性分析

《辞海》中对智慧一词的定义是:对事物能认识、辨析、判断处理和发明创造的能力,或曰思维能力.智慧与《易经·系辞》中“形而上者谓之道”有异曲同工之处,智能是“形而下者谓之器”.从字形上分析“慧”字最下方为一“心”字,心一般与人的情绪、悟性、创造力等有关.相较于智能,智慧更侧重于外在的情绪感知和内在的联想发明创造,使我们做出合理的感知分析和正确的决策.显然,智慧侧重于人的心/脑等相关的创造性、情商等要素,AI由初级的简单“模

图5 (网络版彩图)工业革命与制造范式演化

Figure 5 (Color online) Industrial revolution and evolution of manufacturing paradigm.

仿人”实现某一功能向具备自我编程、自迭代、外在情绪感知、自我意识觉醒、智能化决策等“拟人化”方向发展^[144], 最终达到机器本身就是“人”, 一个具备感知、响应、自决策、情绪、智能的智慧化“人”。AI的最终目的就是使机器成为真正意义上的“人”, 使其达到无“我”(There is no “I” in “AI”)^[145]的状态, 而人是智慧化的生物, AI成为“智慧化”的“人”是实现智慧制造的关键。

智能制造是AI与制造技术深度融合的结果, 通常用IM或IM 1.0表示第一代智能制造。伴随着大数据、CPS、物联网等新一代信息技术的出现, 欧美国家多用“Smart Manufacturing”^[146]来表征在工业4.0大背景下出现的新一代智能制造(SM/IM 2.0)。智慧制造便是在IM 2.0背景下, 走向SCPPS大融合的新型制造模式^[72]。智能制造与智慧制造区别如表1所示。

从分析制造业数字化、信息化的演化进程不难看出: 数字化、信息化发展到一定阶段时必然催生更智能的制造模式, 智能制造的诞生便顺理成章。从AI视角来看, 智能制造的演化过程为AI与制造技术融合的过程, IM 1.0/IM通过AI 1.0(符号智能)来实现生产过程的智能化(如生产过程调度、在线状态监测、故障诊断等), 提升了制造系统的自动化、柔性化水平。IM 2.0/SM借助AI 2.0(计算智能)实现生产过程学习建模, 再进行预测和响应, 智能化水平进一步提高。从制造业信息化的历程来看, 其发展过程实际上是智能水平

不断攀升的过程, 随着AI 1.0, 2.0分别诞生了IM和SM, 而未来AI、区块链等技术为其向更高层次——智慧层次发展提供了条件和使能。

智慧制造是智能制造发展到一定程度时的必然产物, 是智能制造的继承与创新发^[2], 代表新一代智能制造的发展方向, 智慧制造面向未来互联网与未来AI, 智慧制造随着AI、新信息技术的不断发展而发展。以深度学习驱动的AI 2.0是建立在神经网络的研究基础之上的, 神经网络的本质是复杂网络^[147], 复杂网络是由节点和边构成的, 节点本身可看作一个功能齐全的动力学系统, 这些动力学节点通过各种方式相互连接起来以后表现出整体行为的多样性特征, 特别是自适应、自演化、自组织、自同步、自涌现^[148]。智慧制造与AI为强相关关系, 即智慧制造的演化离不开AI技术的发展, 而AI的研究又离不开神经网络^[149]的研究, 神经网络的本质是由边和节点构成的复杂网络。因此, 智慧制造也将随AI技术不断推进而表现出自适应、自演化、自组织、自同步、自涌现等特性。

5 智慧制造未来研究展望

由AI技术、先进制造技术、新一代信息通信技术融合而成的智慧制造, 在智能车间建设、自动化生产加工、智能物流、供应链管理、生产计划调度等方面取得长足进展, 但受限于当前数字化信息化智能化程

表1 传统智能制造、新一代智能制造与智慧制造对比

Table 1 Comparison of traditional intelligent manufacturing, smart manufacturing, and wisdom manufacturing

对比项	传统智能制造	新一代智能制造	智慧制造
英文表示	Intelligent Manufacturing/IM ^[86,150]	Smart Manufacturing/SM ^[16,99,115,146]	Wisdom Manufacturing/WM ^[21,71]
智能等级	IM 1.0/IM	IM 2.0/SM	IM 3.0/WM
AI构成	AI 1.0/符号智能	AI 2.0/计算智能	未来AI/人工超级智能
数据类型	结构化数据	结构化数据+半结构化数据 +非结构化数据	无所不在的数据, 不限形式
集成范围	局部制造环节	大部分制造环节 ^[124,151]	全制造流程/全生命周期/全价值链
生产模式	大批量生产	大批量生产+大规模定制(重点关注) ^[18,96]	长尾生产: 大批量生产+大规模定制 +个性化生产(重点关注) ^[91]
信息交互方式	易形成信息孤岛	大部分环节互通 ^[94]	万物互连互通、互操作、可交互
控制形式	集中式控制	以集中式控制为主+少量分布式控制	按需自主分布式集散控制
主要使能技术	专家系统	大数据、IoT、DT、CPS、深度学习	后深度学习、混合强AI、SCPPS
经济模式	规模经济	规模经济+范围经济	规模经济+范围经济+体验经济

度、AI技术、制造业总体水平,与人们期望的真正智慧制造还存在着较大差距.开展面向未来互联网的智慧制造,主要围绕以下几个方面.

(1) 构建未来AI+先进制造技术相结合的智慧制造发展智慧产业、培育智能经济、构建智能工厂(Smart Factory)^[152]、智慧社会都离不开AI技术的支撑, AI的发展对企业发展、产业变革、经济增长、社会演进都将产生重大深远影响.目前的AI水平还难以承担起社会智能化、智慧化演进重担,还需要进一步发展进步,以适应社会智慧化演进的需求.第一,需要采用易解释、通用性强、认知计算能力高、安全可信的强AI技术,融合“符号主义+联结主义+行为主义”等不同研究学派,开展多学科、多层次、多维度耦合交叉研究,走向知识驱动与数据驱动的混合型强AI.第二,深度学习取得新突破,驱动AI蓬勃发展.深度学习在计算机视觉、图像处理、自然语言处理领域的应用逐渐超过传统的机器学习方法.但监督流深度学习(Supervised flow learning)仍存在需要大量标签数据进行样本训练、标签数据不足容易被迷惑、过度拟合基准数据等瓶颈问题^[153].虽然有一些方法可以减少对数据的依赖,如迁移学习^[154]、少样本学习^[155]、无监督学习^[156]和弱监督学习^[157],但是到目前为止,它们的性能还没法与监督学习相比.目前的深度学习还难以满足现实各方面要求,开启后深度学习^[158]时代十分有必要.最后,基于大数据处理的智能算法时间复杂度、空间复杂度的提升对硬件设备性能的要求也越来越高,要想实现大数据背景下状态感知、实时分析、科学决策、精准执行,硬件性能计算力的好坏直接影响算法的效率,需要大力发展高速度、大存储容量、大带宽、功能强大的超级计算设备,将量子计算^[159]结合神经网络进行研究是未来较有可能的发展趋势^[160].性能强大的硬件设备驱动高效优质的算法是实现智慧制造的有效途径.

(2) 兼容并蓄开展未来互联网研究

互联网是实现“四网”融合、AI、智慧制造的关键一环.要彻底解决现有网络体系的种种问题,对网络体系结构小规模的修修改改、终端应用层面小范围的局部优化是远远不够的,对互联网进行体系架构层面的革新才能消除目前互联网的弊端.

目前国际上提出的关于未来互联网体系架构的研究,通常分为“改良派”和“革命派”^[161].“改良派”提出在

已有互联网体系结构基础上,逐渐开展体系架构、网络协议的改进和优化来解决互联网存在的问题.“革命派”则完全抛弃现有TCP/IP体系架构的互联网,推倒一切重新设计新型互联网体系架构.“革命派”的优点是新型互联网体系可以彻底解决现有互联网体系存在的各种弊端,但同时也存在着新型网络可能不兼容既有互联网、成本代价较大等缺点,因此在网络部署和平滑过渡方面存在风险.完全的“革命派”式发展也是不切实际的,代价太高,对现有软硬件兼容性也是一种极大的挑战.因此,应该采取兼容并蓄的发展姿态,工业互联网就是迈向未来互联网的一次有效尝试,可以解决现有网络的部分问题,无论是保守的“改良派”还是激进的“革命派”都应站在全局的更高的角度,充分了解我国现有互联网国情,不应脱离实际;应充分利用市场在资源配置中的引导协调作用,政府发挥其引导职能,发展安全、扩展性强、实时性高、可管控的未来互联网,实现人、机、物、环境的互连互通.但未来网络的研究绝不止于此,应该开展更多面向未来互联网的有益研究,为智慧制造提供技术支撑.

(3) 实现多方面集成融合是智慧制造的关键

实现智慧制造需要实现以下几方面的集成.

第一方面,消费者个性化需求集成^[162].以消费者为中心,实现消费者集成是智慧制造的起点,通过智能技术把消费者的需求有机集成起来,使制造的价值倍增.在智慧制造体系中,消费者就是一个智慧元素,他们拥有智能手机、平板电脑、穿戴式移动设备等,通过高速低延时移动网络就可以有效地把消费者集成到智慧制造环境中来.进一步打通消费物联网(Consumer IoT)与IIoT,实现两端的互操作^[163]及互联互通^[164].消费者可以实时了解自己的个性化定制产品的动态,生产制造者也可以随时掌握消费者的动态需求,实现“产销”双方的有机协作、共同创新.

第二方面,智慧集成.一方面需要充分挖掘利用人际网中单个个体的隐性知识,同时应该充分集成全世界最优秀人员的智慧,形成集体智能决策的智慧池,形成“大众创业、万众创新”的氛围.

最后,多层次多系统之间的交叉融合是实现智慧制造的关键技术途径.需要打通企业内部设备层、控制层、管理层之间的纵向集成与企业之间跨域、跨行业、跨地区之间网络化协作的横向集成,最终实现贯穿产品全制造流程全生命周期价值链上的端到端集成^[165].

(4) 走向可持续包容性发展

当今世界, 全球环境恶化形势不断加剧, 如何减少制造活动带来的污染已成为一项重要的议题, 为了应对不断恶化的环境、满足社会日益增长的需求和实现经济的可持续发展, 可持续制造被提出且越来越受到重视. 近些年来, 随着AI技术的不断发展, 引起了人们对“机器换人”的担忧, 包容性发展(Inclusive development)的理念应运而生, 其目的是促进社会与经济的协调发展, 让社会中的个体享有公平的发展机会, 社会劳动、财富分配更加合理, 共享社会经济发展的有益成果.

可持续发展往往会导致强烈的社会发展与环境保护之间的权衡取舍, 主要是致力于经济的长远增长. 包容性发展主要关注的是社会发展、环境以及当代人, 包容性发展的提出是建立在包容性经济、社会福祉、社会正义和人权等概念基础之上^[166]. 从面向环境的可持续制造走向以人为本的包容性制造^[166]体现着社会制造价值观的转变.

在发展未来AI及先进制造技术的同时, 需要在更高的制造价值观上重新审视智慧制造的未来走向, 始

终秉持以人为核心的制造理念^[167], “机器换人”只是走向智慧制造的一个重要手段, 而“机器帮人”成为人类安全可信的朋友并为人类更好地服务才是智慧制造发展的终极方向, 在符合社会伦理、道德、法律的约束下发展拟人、帮人、可信、安全可靠、可持续、绿色智慧制造技术, 以满足社会可持续包容性发展的需求^[168].

6 结果与讨论

智能制造已成为各个国家争相发展的技术, 从智能制造走向智慧制造具有必然性, 智慧制造是智能制造的创新与发展, 实现SCPPS大融合是实现智慧制造的前提. 本文评述了面向未来互联网的智慧制造并详细阐述其研究进展, 从AI、互联网、工业革命及制造范式演变的角度探讨了智能制造走向智慧制造的必然性, 并对两者进行了多维度的对比分析, 最后从多个方面展望了面向未来互联网的智慧制造. 智慧制造是智能制造发展到一定阶段时的产物, 伴随着AI技术、制造技术的不断发展而迭代完善, 最终走向与人类和谐共处的可持续、包容性发展.

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 Yao X F, Zhou J J. *Wisdom Manufacturing Theory and Technology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [姚锡凡, 周佳军. 智慧制造理论与技术. 北京: 科学出版社, 2020]
- 3 Gunasekaran A. Agile manufacturing: A framework for research and development. *Int J Production Economics*, 1999, 62: 87–105
- 4 Wang L, von Laszewski G, Younge A, et al. Cloud computing: A perspective study. *New Gener Comput*, 2010, 28: 137–146
- 5 Ashton K. That ‘internet of things’ thing. *RFID J*, 2009, 22: 97–114
- 6 Nofer M, Gomber P, Hinz O, et al. Blockchain. *Bus Inf Syst Eng*, 2017, 59: 183–187
- 7 Cai Y, Qin Z, Cui F, et al. Modulation and multiple access for 5G networks. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2017, 20: 629–646
- 8 Boschert S, Rosen R. Digital twin—The simulation aspect. In: Hehenberger P, Bradley D, eds. *Mechatronic Futures*. Cham: Springer, 2016. 59–74
- 9 Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. In: *Proceedings of the Impact of Control Technology*. Washington DC, USA: IEEE, 2011. 161–166
- 10 Davenport T H, Ronanki R. Artificial intelligence for the real world. *Harvard Bus Rev*, 2018, 96: 108–116
- 11 Perren R, Kozinets R V. Lateral exchange markets: How social platforms operate in a networked economy. *J Marketing*, 2018, 82: 20–36
- 12 Tao F, Hu Y F, Zhou Z D. Study on manufacturing grid & its resource service optimal-selection system. *Int J Adv Manuf Technol*, 2008, 37: 1022–1041
- 13 Zhang L, Luo Y, Tao F, et al. Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm. *Enterprise Inf Syst*, 2014, 8: 167–187
- 14 Li B H, Zhang L, Wang S L, et al. Cloud manufacturing: A new service-oriented networked manufacturing model (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2010, 16: 1–7, 16 [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, 16]

- 15 Sosa-Reyna C M, Tello-Leal E, Lara-Alabazares D. Methodology for the model-driven development of service oriented IoT applications. *J Syst Architecture*, 2018, 90: 15–22
- 16 Tao F, Qi Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: Framework and characteristics. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2017, 49: 81–91
- 17 Bouzary H, Chen F F, Krishnaiyer K. Service matching and selection in cloud manufacturing: A state-of-the-art review. *Procedia Manuf*, 2018, 26: 1128–1136
- 18 Yao X F, Jing X, Zhang J M, et al. Towards smart manufacturing for the new industrial revolution (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2020, 26: 2299–2320 [姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造. 计算机集成制造系统, 2020, 26: 2299–2320]
- 19 Guo C X, Wang H X. The development of China's manufacturing industry and the "Made in China 2025" plan (in Chinese). *Review Econom Res*, 2015, 31: 3–13 [郭朝先, 王宏霞. 中国制造业发展与“中国制造2025”规划. 经济研究参考, 2015, 31: 3–13]
- 20 Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering*, 2017, 3: 616–630
- 21 Yao X F, Lian Z T, Yang Q, et al. Wisdom manufacturing—New humans-computers-things collaborative manufacturing mode (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2014, 20: 1490–1498 [姚锡凡, 练肇通, 杨屹, 等. 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: 1490–1498]
- 22 Tian G Y, Yin G, Taylor D. Internet-based manufacturing: A review and a new infrastructure for distributed intelligent manufacturing. *J Intell Manuf*, 2002, 13: 323–338
- 23 Li J Q, Yu F R, Deng G, et al. Industrial internet: A survey on the enabling technologies, applications, and challenges. *IEEE Commun Surv Tutorials*, 2017, 19: 1504–1526
- 24 Zhang K. Digital transformation in industry white paper (in Chinese). *Digital Economy*, 2021, 3: 8–19 [张凯. 工业数字化转型白皮书. 数字经济, 2021, 3: 8–19]
- 25 Henzinger M R. Hyperlink analysis for the web. *IEEE Internet Comput*, 2001, 5: 45–50
- 26 Maull R, Godsiff P, Mulligan C, et al. Distributed ledger technology: Applications and implications. *Strategic Change*, 2017, 26: 481–489
- 27 Piechulla W, Mayser C, Gehrke H, et al. Reducing drivers' mental workload by means of an adaptive man-machine interface. *Transportation Res Part F-Traffic Psychology Behaviour*, 2003, 6: 233–248
- 28 Tofail S A M, Koumoulos E P, Bandyopadhyay A, et al. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Mater Today*, 2018, 21: 22–37
- 29 Yu X H, Liu M, Jiang X H, et al. Industrial internet architecture 2.0 (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2019, 25: 2983–2996 [余晓晖, 刘默, 蒋昕昊, 等. 工业互联网体系架构2.0. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 2983–2996]
- 30 Lin S W, Miller B, Durand J, et al. Industrial internet reference architecture. Industrial Internet Consortium (IIC) Technical Report. 2015
- 31 Qin W, Chen S, Peng M. Recent advances in industrial internet: Insights and challenges. *Digital Commun Networks*, 2020, 6: 1–13
- 32 Sisinni E, Saifullah A, Han S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 4724–4734
- 33 Weyrich M, Ebert C. Reference architectures for the internet of things. *IEEE Softw*, 2015, 33: 112–116
- 34 Yao X F, Zhang C J, Zhang J M. The Internet of Manufacturing Things Technology (in Chinese). Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2018 [姚锡凡, 张存吉, 张剑铭. 制造物联网技术. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018]
- 35 Lasi H, Fettke P, Kemper H G, et al. Industry 4.0. *Bus Inf Syst Eng*, 2014, 6: 239–242
- 36 D'amours S, Montreuil B, Lefrancois P, et al. Networked manufacturing: The impact of information sharing. *Int J Prod Econ*, 1999, 58: 63–79
- 37 Ali A N A. Comparison study between IPv4 & IPv6. *Int J Computer Sci Issues*, 2012, 9: 314–317
- 38 Wu P, Cui Y, Wu J, et al. Transition from IPv4 to IPv6: A state-of-the-art survey. *IEEE Commun Surv Tutorials*, 2012, 15: 1407–1424
- 39 Pan J, Paul S, Jain R. A survey of the research on future internet architectures. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 26–36
- 40 Shenker S. Fundamental design issues for the future internet. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1995, 13: 1176–1188
- 41 Quan W, Zhang H K. Future internet architecture: Research status, hot topics, and development practice (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2017, 47: 804–810 [权伟, 张宏科. 未来互联网体系的研究现状、热点与探索实践. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 804–810]
- 42 Gavras A, Karila A, Fdida S, et al. Future internet research and experimentation. *SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2007, 37: 89–92
- 43 Harai H. Designing new-generation network-overview of AKARI architecture design. In: Proceedings of 2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP). Shanghai: IEEE, 2009. 1–2

- 44 Newsletter. Opening of FITI backbone network, the world's largest Internet test facility (in Chinese). China Education Network, 2021, 5: 6 [本刊讯. 全球规模最大互联网试验设施FITI主干网开通. 中国教育网络, 2021, 5: 6]
- 45 Papadimitriou D. Future Internet—The cross-ETP vision document. European Technology Platform Technical Report. 2009
- 46 Weinstein R. RFID: A technical overview and its application to the enterprise. *IT Prof*, 2005, 7: 27–33
- 47 Kasza J. Forth industrial revolution (4 IR): Digital disruption of cyber–physical systems. *World Sci News*, 2019, 134: 118–147
- 48 Ullrich J, Krombholz K, Hobel H, et al. IPv6 security: Attacks and countermeasures in a nutshell. In: *Proceedings of 8th USENIX Workshop on Offensive Technologies WOOT 14*. San Diego: USENIX Association, 2014
- 49 Sagirolu S, Sinanc D. Big data: A review. In: *Proceedings of 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*. San Diego: IEEE, 2013. 42–47
- 50 Zhang J, Huang T, Wang S, et al. Future internet: Trends and challenges. *Front Inf Technol Electron Eng*, 2019, 20: 1185–1194
- 51 Frawley W J, Piatetsky-Shapiro G, Matheus C J. Knowledge discovery in databases: An overview. *AI Mag*, 1992, 13: 57–57
- 52 Hua B L. Analysis on the relationship between data mining and knowledge discovery (in Chinese). *Infor Stud Theory Appl*, 2008, 31: 507–510 [化柏林. 数据挖掘与知识发现关系探析. 情报理论与实践, 2008, 31: 507–510]
- 53 Leimeister J M. Collective intelligence. *Bus Inform Syst Eng*, 2010, 2: 245–248
- 54 Nath K, Iswary R. What comes after Web 3.0? Web 4.0 and the future. In: *Proceedings of the International Conference and Communication System (I3CS'15)*. Shillong, 2015. 337–341
- 55 Li B H. A new generation of artificial intelligence technology leads the accelerated development of China's intelligent manufacturing (in Chinese). *Civil-military Integration on Cyberspace*, 2018, 12: 9–11 [李伯虎. 新一代人工智能技术引领中国智能制造加速发展. 网信军民融合, 2018, 12: 9–11]
- 56 Leonard D, Sensiper S. The role of tacit knowledge in group innovation. *California Manage Rev*, 1998, 40: 112–132
- 57 Peruzzini M, Pellicciari M, Gadaleta M. A comparative study on computer-integrated set-ups to design human-centred manufacturing systems. *Robotics Comput-Integrated Manuf*, 2019, 55: 265–278
- 58 Golightly D, Sharples S, Patel H, et al. Manufacturing in the cloud: A human factors perspective. *Int J Industrial Ergonomics*, 2016, 55: 12–21
- 59 Ruppert T, Jaskó S, Holczinger T, et al. Enabling technologies for operator 4.0: A survey. *Appl Sci*, 2018, 8: 1650
- 60 Romero D, Stahre J, Wuest T, et al. Towards an operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In: *Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46)*. Tianjin, 2016. 29–31
- 61 Zhou J, Zhou Y, Wang B, et al. Human–cyber–physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering*, 2019, 5: 624–636
- 62 Wang B C, Xue Y, Yan J L, et al. Human-centered intelligent manufacturing: Overview and perspectives (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2020, 22: 139–146 [王柏村, 薛媛, 延建林, 等. 以人为本的智能制造: 理念、技术与应用. 中国工程科学, 2020, 22: 139–146]
- 63 Fukuyama M. Society 5.0: Aiming for a new human-centered society. *Japan Spotlight*, 2018, 27: 47–50
- 64 Schroth C, Janner T. Web 2.0 and SOA: Converging concepts enabling the internet of services. *IT Prof*, 2007, 9: 36–41
- 65 Fu J. A practical resource-searching method for manufacturing grid. *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, 74: 335–340
- 66 Cheng Y, Tao F, Zhao D, et al. Modeling of manufacturing service supply–demand matching hypernetwork in service-oriented manufacturing systems. *Robotics Comput-Integrated Manuf*, 2017, 45: 59–72
- 67 Lobov A, Puttonen J, Herrera V V, et al. Service oriented architecture in developing of loosely-coupled manufacturing systems. In: *Proceedings of 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Daejeon: IEEE, 2008. 791–796
- 68 Duan Y, Fu G, Zhou N, et al. Everything as a service (XaaS) on the cloud: Origins, current and future trends. In: *Proceedings of IEEE 8th International Conference on Cloud Computing*. New York: IEEE, 2015. 621–628
- 69 Lv J, Shen K, Johnson S, et al. Application on information island with information visualization and software engineering. In: *Proceedings of 5th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*. Nanjing: IEEE, 2018. 598–603
- 70 Tang H, Zhang Y T, Zhao G F. Survey on services-oriented networking in future internet (in Chinese). *J Chongqing Univ Posts Telecommun (Nat Sci Ed)*, 2013, 25: 44–51, 58 [唐红, 张月婷, 赵国锋. 面向服务的未来互联网体系结构研究. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25: 44–51, 58]
- 71 Yao X, Jin H, Zhang J. Towards a wisdom manufacturing vision. *Int J Comput Integrated Manuf*, 2015, 28: 1291–1312
- 72 Jing X, Yao X F. Towards social cyber physical production systems (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2019, 45: 637–656 [景轩, 姚锡凡. 走向社会

- 信息物理生产系统. 自动化学报, 2019, 45: 637–656]
- 73 Wang J W, Rong L L, Deng Q H, et al. Evolving hypernetwork model. *Eur Phys J B*, 2010, 77: 493–498
 - 74 Yao X F, Zhang J M, Lin Y Z. The basic theory and technical framework for wisdom manufacturing systems (in Chinese). *Syst Eng Theory Practice*, 2016, 36: 2699–2711 [姚锡凡, 张剑铭, Lin YingZi. 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: 2699–2711]
 - 75 Bray T, Paoli J, Sperberg-McQueen C, et al. Extensible Markup Language (XML) 1.0 (5th Edition). 2008
 - 76 Bughin J. The rise of enterprise 2.0. *J Direct Data Digit Mark Pract*, 2008, 9: 251–259
 - 77 Guo G, Tang H M, Chen G R, et al. Model of networked manufacturing based on semantic web (in Chinese). *Computr Integr Manuf Syst*, 2009, 15: 690–697 [郭钢, 汤华茂, 陈国荣, 等. 基于语义Web的网络化制造模式研究. 计算机集成制造系统, 2009, 15: 690–697]
 - 78 Mourtzis D, Vlachou E, Milas N. Industrial big data as a result of IoT adoption in manufacturing. In: *Proceedings of 5th CIRP Global Web Conference—Research and Innovation for Future Production (CIRPe)*. Patras, 2016. 290–295
 - 79 Yao X F, Lian Z T, Li Y X, et al. Service-oriented architecture and integrated development environment for cloud manufacturing (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2012, 18: 2312–2322 [姚锡凡, 练肇通, 李永湘, 等. 面向云制造服务架构及集成开发环境. 计算机集成制造系统, 2012, 18: 2312–2322]
 - 80 Yao X F, Yu M, Chen Y, et al. Connotation, architecture and key technologies of Internet of manufacturing things (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2014, 20: 1–10 [姚锡凡, 于淼, 陈勇, 等. 制造物联的内涵、体系结构和关键技术. 计算机集成制造系统, 2014, 20: 1–10]
 - 81 Yao X F, Li B, Dong X Q, et al. Integrated framework for wisdom manufacturing systems from semiotic perspective (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2014, 20: 2734–2742 [姚锡凡, 李彬, 董晓倩, 等. 符号学视角下的智慧制造系统集成框架. 计算机集成制造系统, 2014, 20: 2734–2742]
 - 82 Zhang C J, Yao X F, Zhang Y X, et al. From NC generation to wisdom generation (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2015, 21: 1734–1743 [张存吉, 姚锡凡, 张翼翔, 等. 从“数控一代”到“智慧一代”. 计算机集成制造系统, 2015, 21: 1734–1743]
 - 83 Zhang C, Yao X, Zhang J. Abnormal condition monitoring of workpieces based on RFID for wisdom manufacturing workshops. *Sensors*, 2015, 15: 30165–30186
 - 84 Zhang C, Yao X. Innovation in wisdom manufacturing. In: *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*. Coimbatore: IEEE, 2016. 1–8
 - 85 Lu J X, Hu Q H, Dong Q Y. Wisdom manufacturing and its current research status (in Chinese). *J Zhejiang Univ Tech*, 2016, 44: 681–688 [鲁建厦, 胡庆辉, 董巧英. 智慧制造及其研究现状. 浙江工业大学学报, 2016, 44: 681–688]
 - 86 Yao X, Zhou J, Zhang J, et al. From intelligent manufacturing to smart manufacturing for industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further on. In: *Proceedings of 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)—Industrial Digitalization by Enterprise Systems*. Beijing: IEEE, 2017. 311–318
 - 87 Yao X F, Zhou J J, Zhang C J, et al. Proactive manufacturing—A big-data driven emergine manufacturing paradigm (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2017, 23: 172–185 [姚锡凡, 周佳军, 张存吉, 等. 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: 172–185]
 - 88 Zhou J, Yao X, Zhang J. Big data in wisdom manufacturing for industry 4.0. In: *Proceedings of 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)—Industrial Digitalization by Enterprise Systems*. Beijing: IEEE, 2017. 107–112
 - 89 Zhou J J, Yao X F, Liu M, et al. State-of-Art review on new emerging intelligent manufacturing paradigms (in Chinese). *Computer Integr Manuf Syst*, 2017, 23: 624–639 [周佳军, 姚锡凡, 刘敏, 等. 几种新兴智能制造模式研究评述. 计算机集成制造系统, 2017, 23: 624–639]
 - 90 Yang X C, Chen Y L. Research on wisdom manufacturing mode and operational framework (in Chinese). *Sci Technol Progress Policy*, 2017, 34: 61–66 [杨续昌, 陈友玲. 智慧制造模式及运行架构研究. 科技进步与对策, 2017, 34: 61–66]
 - 91 Yao X F, Zhang J M, Tao T, et al. From leagile manufacturing to long-tail production in industry 4.0 for upgrading manufacturing (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2018, 24: 2377–2387 [姚锡凡, 张剑铭, 陶韬, 等. 从精敏制造到工业4.0长尾生产的制造业转型升级. 计算机集成制造系统, 2018, 24: 2377–2387]
 - 92 Yao X F, Tao T, Ge D Y. State-of-the-art survey and prospect of “Internet plus Manufacturing” (in Chinese). *Manuf Tech Mach Tool*, 2018, 8: 29–34 [姚锡凡, 陶韬, 葛动元. “互联网+制造”的发展现状与展望. 制造技术与机床, 2018, 8: 29–34]
 - 93 Ren M, Ren L, Jain H. Manufacturing service composition model based on synergy effect: A social network analysis approach. *Appl Soft Computing*, 2018, 70: 288–300

- 94 Yao X F, Liu M, Zhang J M, et al. The past, present and future of intelligent manufacturing from perspective of artificial intelligence (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2019, 25: 19–34 [姚锡凡, 刘敏, 张剑铭, 等. 人工智能视角下的智能制造前世今生与未来. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 19–34]
- 95 Lecun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, 521: 436–444
- 96 Yao X F, Jing X, Zhou J J, et al. Towards next generation sustainable manufacturing—Inclusive manufacturing (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2019, 25: 2419–2432 [姚锡凡, 景轩, 周佳军, 等. 走向新一代可持续制造——包容性制造. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 2419–2432]
- 97 Yao X F, Lei Y, Ge D Y, et al. On big data driving manufacturing from “Internet Plus” to “AI Plus” (in Chinese). *China Mech Eng*, 2019, 30: 134–142 [姚锡凡, 雷毅, 葛动元, 等. 驱动制造业从“互联网+”走向“人工智能+”的大数据之道. 中国机械工程, 2019, 30: 134–142]
- 98 Zhang C, Yao X, Tan W, et al. Proactive scheduling for job-shop based on Abnormal event monitoring of workpieces and remaining useful life prediction of tools in wisdom manufacturing workshop. *Sensors*, 2019, 19: 5254
- 99 Kusiak A. Smart manufacturing. *Int J Prod Res*, 2018, 56: 508–517
- 100 Van Der Aalst W. Data science in action. In: Van Der Aalst W, eds. *Process Mining*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2016. 3–23
- 101 Hamet P, Tremblay J. Artificial intelligence in medicine. *Metabolism*, 2017, 69: S36–S40
- 102 Wang L. From intelligence science to intelligent manufacturing. *Engineering*, 2019, 5: 615–618
- 103 Zheng N N. The new era of artificial intelligence (in Chinese). *Chin J Intell Sci Technol*, 2019, 1: 1–3 [郑南宁. 人工智能新时代. 智能科学与技术学报, 2019, 1: 1–3]
- 104 Ting D S W, Pasquale L R, Peng L, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol*, 2019, 103: 167–175
- 105 Wei Z, Wu C, Chen L. Symbolism and connectionism of artificial intelligence. In: *Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS-2000)*. Tianjin: IEEE, 2000. 364–366
- 106 Ronzani D. The battle of concepts: Ubiquitous computing, pervasive computing and ambient intelligence in Mass Media. *Ubiquitous Comput Commun J*, 2009, 4: 9–19
- 107 Zhuang Y, Wu F, Chen C, et al. Challenges and opportunities: From big data to knowledge in AI 2.0. *Front Inf Technol Electron Eng*, 2017, 18: 3–14
- 108 Papernot N, McDaniel P. Deep k-nearest neighbors: Towards confident, interpretable and robust deep learning. arXiv: 1803.04765, 2018
- 109 Zhang B. Artificial intelligence is entering the post deep-learning era (in Chinese). *Chin J Intell Sci Technol*, 2019, 1: 4–6 [张钊. 人工智能进入后深度学习时代. 智能科学与技术学报, 2019, 1: 4–6]
- 110 Holzinger A, Kieseberg P, Weippl E, et al. Current advances, trends and challenges of machine learning and knowledge extraction: From machine learning to explainable AI. In: Holzinger A, Kieseberg P, Tjoa A M, et al, eds. *International Cross-Domain Conference for Machine Learning and Knowledge Extraction*. Cham: Springer, 2018. 1–8
- 111 Gunning D, Aha D. DARPA’s explainable artificial intelligence (XAI) program. *AI Mag*, 2019, 40: 44–58
- 112 Yin Y H, Xie J Y, Xu L D, et al. Imaginal thinking-based human-machine design methodology for the configuration of reconfigurable machine tools. *IEEE Trans Ind Inf*, 2012, 8: 659–668
- 113 Hassabis D, Kumaran D, Summerfield C, et al. Neuroscience-inspired artificial intelligence. *Neuron*, 2017, 95: 245–258
- 114 Özdemir V. The big picture on the “AI turn” for digital health: The internet of things and cyber-physical systems. *OMICS-A J Integrative Biol*, 2019, 23: 308–311
- 115 Tao F, Qi Q, Liu A, et al. Data-driven smart manufacturing. *J Manufacturing Syst*, 2018, 48: 157–169
- 116 Azizi A. Hybrid artificial intelligence optimization technique. In: *Proceedings of Applications of Artificial Intelligence Techniques in Industry 4.0*. Singapore: Springer, 2019. 27–47
- 117 Lu H, Li Y, Chen M, et al. Brain intelligence: Go beyond artificial intelligence. *Mobile Netw Appl*, 2018, 23: 368–375
- 118 Kulikov S B, Shirokova A V. Artificial intelligence, culture and education. *AI Society*, 2021, 36: 305–318
- 119 Kaplan A, Haenlein M. Rulers of the world, unite! The challenges and opportunities of artificial intelligence. *Business Horizons*, 2020, 63: 37–50
- 120 Haenlein M, Kaplan A. A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence. *California Manage Rev*, 2019, 61: 5–14
- 121 Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously. In: *Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Information*

Theory. Toronto: IEEE, 2008. 1612–1616

- 122 Ding H, Yuan Y. Preface: Industrial artificial intelligence (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1413 [丁汉, 袁焯. 前言——工业人工智能. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1413]
- 123 Kuhn T S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 2nd ed. Chicago: University of Chicago press, 2012
- 124 Yang Q F. Production and use integration—Fifth manufacturing paradigm driven by intelligent technology group (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 32–41 [杨青峰. 产用融合——智能技术群驱动第五制造范式. 中国科学院院刊, 2019, 34: 32–41]
- 125 Wilson J M. Henry Ford vs. assembly line balancing. *Int J Production Res*, 2014, 52: 757–765
- 126 Liu Q. Study on architecture of intelligent manufacturing theory (in Chinese). *China Mech Eng*, 2020, 31: 24–36 [刘强. 智能制造理论体系架构研究. 中国机械工程, 2020, 31: 24–36]
- 127 Schubert C, van Langeveld M C, Donoso L A. Innovations in 3D printing: A 3D overview from optics to organs. *Br J Ophthalmol*, 2014, 98: 159–161
- 128 Moons I, De Pelsmacker P. Emotions as determinants of electric car usage intention. *J Marketing Manage*, 2012, 28: 195–237
- 129 Yin Y, Stecke K E, Li D. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *Int J Production Res*, 2018, 56: 848–861
- 130 Munir S, Stankovic J A, Liang C-J M, et al. Cyber physical system challenges for human-in-the-loop control. In: *Proceedings of 8th International Workshop on Feedback Computing*. San Jose: USENIX Association, 2013
- 131 Cimini C, Pirola F, Pinto R, et al. A human-in-the-loop manufacturing control architecture for the next generation of production systems. *J Manufacturing Syst*, 2020, 54: 258–271
- 132 Nunes D S, Zhang P, Sa Silva J. A survey on human-in-the-loop applications towards an internet of all. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2015, 17: 944–965
- 133 Nothwang W D, Mccourt M J, Robinson R M, et al. The human should be part of the control loop? In: *2016 Resilience Week (RWS)*. Chicago: IEEE, 2016. 214–220
- 134 Shi Y J, Han Q M, Shen W M, et al. 5G applications of intelligent manufacturing scenarios (in Chinese). *China Mech Eng*, 2020, 31: 227–236 [史彦军, 韩俏梅, 沈卫明, 等. 智能制造场景的5G应用展望. 中国机械工程, 2020, 31: 227–236]
- 135 Zhang Y, He J, Pathan M S. An asymmetric transport protocol for internet of things. *Procedia Comput Sci*, 2017, 107: 636–641
- 136 Yang J C, Chen C H, Chang Jeng M. Integrating video-capture virtual reality technology into a physically interactive learning environment for English learning. *Comput Education*, 2010, 55: 1346–1356
- 137 Subramaniaswamy V, Vijayakumar V, Logesh R, et al. Unstructured data analysis on big data using map reduce. *Procedia Comput Sci*, 2015, 50: 456–465
- 138 Yang T, Chai T Y. Research status and prospects of distributed collaborative optimization (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1414–1425 [杨涛, 柴天佑. 分布式协同优化的研究现状与展望. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1414–1425]
- 139 Egger J, Masood T. Augmented reality in support of intelligent manufacturing—A systematic literature review. *Comput Industrial Eng*, 2020, 140: 106195
- 140 Yang J P. Interpreting the Sino-German innovation partnership (in Chinese). *Contemporary World*, 2014, 11: 21–23 [杨解朴. 解读中德创新伙伴关系. 当代世界, 2014, 11: 21–23]
- 141 Zhou J, Li P, Zhou Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing. *Engineering*, 2018, 4: 11–20
- 142 Zhou J, Li P G, Zhou Y H. Chinese Academy of Engineering proposes a new generation of intelligent manufacturing (in Chinese). *Industry City*, 2018, 2: 58–63 [周济, 李培根, 周艳红. 中国工程院提出新一代智能制造. 产城, 2018, 2: 58–63]
- 143 Zhou Y, Zang J, Miao Z, et al. Upgrading pathways of intelligent manufacturing in China: Transitioning across technological paradigms. *Engineering*, 2019, 5: 691–701
- 144 Li D, He W, Guo Y. Why AI still doesn't have consciousness? *CAAI Trans Intell Technol*, 2021, 6: 175–179
- 145 Farhadi A. There is no “I” in “AI”. *AI Society*, 2021, 36: 1–12
- 146 Kang H S, Lee J Y, Choi S S, et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *Int J Precis Eng Manuf-Green Tech*, 2016, 3: 111–128
- 147 Li Y, Tao F, Cheng Y, et al. Complex networks in advanced manufacturing systems. *J Manufacturing Syst*, 2017, 43: 409–421
- 148 Chen G R. A Talk about systems and networks (in Chinese). *Complex Syst Compl Sci*, 2010, 7: 1–4 [陈关荣. 漫谈系统与网络. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7: 1–4]

- 149 Kumar K, Thakur G S M. Advanced applications of neural networks and artificial intelligence: A review. *Int J Infor Technol Comput Sci*, 2012, 4: 57–68
- 150 Wang B, Tao F, Fang X, et al. Smart manufacturing and intelligent manufacturing: A comparative review. *Engineering*, 2020, 7: 738–757
- 151 Zang J Y, Wang B C, Meng L, et al. Brief analysis on three basic paradigms of intelligent manufacturing (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2018, 20: 13–18 [臧冀原, 王柏村, 孟柳, 等. 智能制造的三个基本范式: 从数字化制造、“互联网+”制造到新一代智能制造. *中国工程科学*, 2018, 20: 13–18]
- 152 Chen B, Wan J, Shu L, et al. Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. *IEEE Access*, 2017, 6: 6505–6519
- 153 Ren Z, Yan J, Ni B, et al. Unsupervised deep learning for optical flow estimation. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-17)*. San Francisco: AAAI Press, 2017
- 154 Torrey L, Shavlik J. Transfer learning. In: *Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques*. IGI global, 2010. 242–264
- 155 Wang Z, Wang Y, Lin Y, et al. Few sample learning without data storage for lifelong stream mining. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. New York: AAAI Press, 2020. 13961–13962
- 156 Celebi M E, Aydin K. *Unsupervised Learning Algorithms*. Berlin: Springer, 2016
- 157 Zhou Z H. A brief introduction to weakly supervised learning. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 44–53
- 158 Sang J, Yu J, Jain R, et al. Deep learning for multimedia: Science or technology? In: *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Multimedia*. New York: Association for Computing Machinery, 2018. 1354–1355
- 159 Gibney E. Physics: Quantum computer quest. *Nature*, 2014, 516: 24–26
- 160 Schuld M, Sinayskiy I, Petruccione F. Simulating a perceptron on a quantum computer. *Phys Lett A*, 2015, 379: 660–663
- 161 Anonymous. OpenFlow forum of the new forces of Internet reform (in Chinese). China Education Network, 2008, 12: 26–27 [佚名. 互联网改革新军OpenFlow论坛. 中国教育网络, 2008, 12: 26–27]
- 162 Wuttke C C, Deck B, Haussmann Y, et al. Individualized customer integration process for the design of IPSS. *Procedia CIRP*, 2019, 83: 83–88
- 163 Noura M, Atiquzzaman M, Gaedke M. Interoperability in internet of things: Taxonomies and open challenges. *Mobile Netw Appl*, 2019, 24: 796–809
- 164 Xu H, Yu W, Griffith D, et al. A survey on industrial internet of things: A cyber-physical systems perspective. *IEEE Access*, 2018, 6: 78238–78259
- 165 Sony M. Industry 4.0 and lean management: A proposed integration model and research propositions. *Prod Manuf Research*, 2018, 6: 416–432
- 166 Gupta J, Pouw N R M, Ros-Tonen M A F. Towards an elaborated theory of inclusive development. *Eur J Dev Res*, 2015, 27: 541–559
- 167 Pacaux-Lemoine M P, Trentesaux D, Zambrano Rey G, et al. Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach. *Comput Industrial Eng*, 2017, 111: 581–595
- 168 Villar L M, Oliva-Lopez E, Luis-Pineda O, et al. Fostering economic growth, social inclusion & sustainability in Industry 4.0: A systemic approach. *Procedia Manufacturing*, 2020, 51: 1755–1762

Current status and prospect of future internet-oriented wisdom manufacturing

MA NanFeng, YAO XiFan & WANG KeSai

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Contemporary integrated manufacturing has become a large complex system that integrates social, economic, and humanistic aspects. The integration of social, cyber, and physical systems is the development trend of today's manufacturing industry. As the fused result of the four future internet pillars or networks (i.e., Internet by and for people, Internet of things, Internet of services, and Internet of contents and knowledge) and manufacturing technologies, wisdom manufacturing has become an emerging smart manufacturing model of the humans-computers-things collaboration, a social-cyber-physical production system that has gained widespread attention. Accordingly, the review of such an emerging smart manufacturing model is necessary for sorting out its research context and providing a useful reference for the future development of intelligent manufacturing. This paper comprehensively reviews the future internet-oriented wisdom manufacturing. To do this, the relationship between industrial internet and future internet is first analyzed, and the basic concepts of wisdom manufacturing integrating the four networks and the advanced manufacturing technology are expounded. Subsequently, the research progress of wisdom manufacturing and the inevitability of manufacturing toward wisdom are discussed along with the difference between and relevance of wisdom manufacturing and other smart manufacturing models, as well as future research on wisdom manufacturing. From the perspectives of artificial intelligence, internet, industrial revolution, and evolution of manufacturing paradigms, wisdom manufacturing is described as the inheritance and innovative development of intelligent manufacturing, which will progress with the advancement of new-generation artificial intelligence and future internet, eventually moving toward an inclusive and sustainable development in harmony with mankind.

artificial intelligence, intelligent manufacturing, wisdom manufacturing, internet, social-cyber-physical production system

doi: [10.1360/SST-2021-0232](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0232)