

HCPS 视角下智能制造的发展与研究

王柏村^{1,2}, 易兵³, 刘振宇⁴, 周源^{+,5}, 周艳红⁶

(1. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 2. 密西根大学机械工程系, 美国 安娜堡 48109;

3. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;

4. 浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室, 杭州 310058;

5. 清华大学公共管理学院, 北京 100084; 6. 华中科技大学生命科学与技术学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于“以人为本”和“两化融合”的理念, 人-信息-物理系统 (Human-cyber-physical system, HCPS) 为认识和发展新一代智能制造提供了理论支撑。为了更好的理解 HCPS 和智能制造之间的关系以及把握智能制造的发展趋势, 首先, 详细分析了 HCPS 的系统组成与内涵, 在此基础上, 讨论了智能制造的发展演进和新一代智能制造的主要特征。基于 HCPS 视角综述了智能制造的相关研究进展, 包括新一代人工智能、新一代智能制造、智能制造与其他系统融合等方面。最后, 从人、信息系统、物理系统及系统集成等角度提出发展建议, 以期为我国相关领域践行 HCPS 理念与发展智能制造技术提供参考。

关键词: 人-信息-物理系统; 新一代人工智能; 新一代智能制造; 研究进展; 发展建议

中图分类号: TH16; TP2 文献标识码: A

Evolution and State-of-the-art of intelligent manufacturing from HCPS perspective

WANG Baicun^{1,2}, YI Bing³, LIU Zhenyu⁴, ZHOU Yuan^{+,5}, ZHOU Yanhong⁶

(1. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor 48109, MI, USA;

3. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075;

4. State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

5. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084;

6. College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Human-cyber-physical system (HCPS) can provide the theoretical support to understand and develop intelligent manufacturing (IM), according to the concepts of *Human-oriented Development* and *Integration of Industrialization and Information Technology*. To better understand the relationship between HCPS and IM as well as grasp IM development trends, firstly, HCPS was analyzed in detail including the definition, connotation and system elements, followed with discussions on IM evolution and characteristics of new-generation intelligent manufacturing (NGIM). Then, the state-of-the-art of NGIM were reviewed from HCPS perspective. Finally, relevant suggestions for China's intelligent manufacturing development were proposed covering perspectives from human, cyber systems, physical systems, and system integration. It's expected this work can provide a reference for understanding and adoption of intelligent manufacturing and HCPS.

Keywords: HCPS; AI2.0; new-generation intelligent manufacturing; state-of-the-art; policy suggestions

收稿日期: XXXX-XX-XX;

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2017-ZD-08); 国家自然科学基金面上项目(71974107, 51975589); 中国博士后国际交流计划派出项目(20180025); 湖南省自然科学基金(2018JJ3663)。 **Foundation items:** Projects supported by Strategic Research Program of the Chinese Academy of Engineering(No. 2017-ZD-08), National Natural Science Foundation of China(No. 71974107, 51975589), China International Postdoctoral Exchange Fellowship Program(No. 20180025), and Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2018JJ3663).

0 引言

当今世界，面对新一轮工业革命，世界各国尤其是发达国家都在积极采取行动，以确保本国在未来工业/制造业竞争中的领先地位。分析这些国家的工业/制造业战略计划，至少可总结出两个共同点，一是，多数国家将发展智能制造作为构建未来制造业竞争优势的关键举措；二是，多数国家结合本国国情提出了认识人类社会特别是工业/制造业演进发展和代际划分的独特视角，并作为推进本国战略计划的理论基础（如德国、日本、韩国等）。纵观不同国家或学者对工业/制造业演进发展代际划分的方式，其主要视角可概括为“二-三-四-五”：

- “二”代表 Erik 和 McAfee 提出的第二次机器革命（The Second Machine Age）^[1]：（以蒸汽机、内燃机以及电力为代表的工业革命属于第一次机器革命；计算机、软件、大数据、机器智能等则属于第二次机器革命的范畴。
- “三”代表美国 GE 公司提出的三次浪潮（Three Waves）^[2]：第一次浪潮——工业革命，第二次浪潮——互联网革命，第三次浪潮——工业互联网。
- “四”代表德国提出的工业 4.0（Industry 4.0）^[3]：前三次工业革命的主要特征分别是机械化、电气化、信息化；第四次工业革命（工业 4.0）将推动制造业向智能化和服务化转型。
- “五”代表日本提出的社会 5.0（Society 5.0）^[4]：5 次社会革命分别是狩猎社会、农业社会、工业社会、信息社会以及现在超智能社会（社会 5.0）。

近年来，我国高度重视智能制造的发展，例如：“制造强国”战略明确提出以推进智能制造为主攻方向^[5]；《新一代人工智能发展规划》明确提出智能制造是重要的应用方向^[6]。与此同时，无论是“两次机器革命”、“三次浪潮”、“四次工业革命”、或是“五个社会阶段”，由于国情和发展阶段不同，以及要解决的主要问题不同，这些演进发展和代际划分的方式并不完全适合我国国情，要深入理解智能制造、推动智能制造持续健康快速发展，必须结合时代发展趋势，提出适合中国国情的智能制造范式演进视角，进而研判智能制造的未来发展方向、提前谋划，加快推进中国制造的智能转型。

综上，本文将秉承中国特色的“两化融合”以及“以人为本”思想，分析人-信息-物理系统（HCPS）的内涵与系统组成；基于 HCPS 视角分析智能制造的发展演进、技术体系及技术特征；同时综述 HCPS 视角下智能制造的研究进展；最后，基于 HCPS 视角提出我国智能制造发展的若干建议。

1 人-信息-物理系统（HCPS）的内涵与系统组成

从系统构成看，HCPS 是以人为中心、由人-物理系统（HPS）进化而来（如图 1），是由人、信息系统和物理系统有机集成的综合智能系统，包括 HPS、人-信息系统（HCS）、信息-物理系统（CPS）等子系统，是当代和未来世界有效解决形形色色问题的一种普适形态和观念，覆盖人类生产和生活的方方面面^[7]，其具体组成要素如表 1 所示。其中，物理系统是主体，是制造活动能量流与物质流的执行

者；信息系统是主导，是制造活动信息流的核心，辅助或者代替人类对物理系统进行感知、认知、分析决策与控制，使物理系统以最优的方式运行；人是整个系统的主宰和关键，一方面，人是物理系统和信息系统的创造者，信息系统的“智能”是由人赋予的，另一方面，人也是系统的使用者、运营者和管理者。因此，无论物理系统还是信息系统都是为人类服务的，例如：相比于传统 HPS 中人对机械系统的直接作用，在 HCPS 中，部分劳动者从枯燥、繁琐的体力劳动中解脱出来，物理系统（机械）可更好更快地完成大量机械工作（即机械自动化），同时信息系统也有效提高了脑力劳动的自动化水平（即知识自动化），解放了人类的部分脑力劳动。

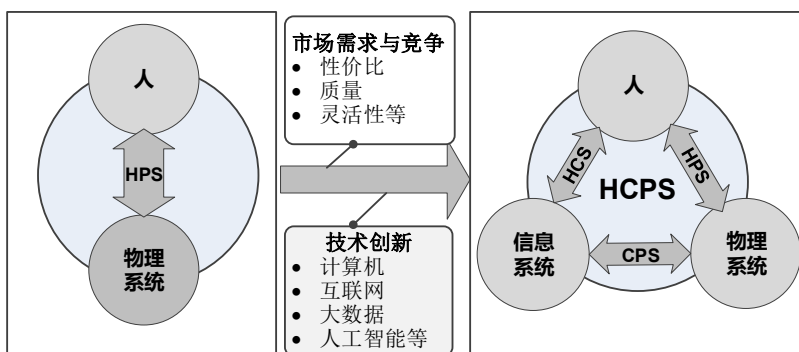


图 1 从 HPS 到 HCPS

表 1 人-信息-物理系统（HCPS）的组成要素

维度	子维度	具体内容
人	人的角色	设计者、操作者、使用者、管理者、代理人等
	人的因素	工具性因素、环境性因素、认知与决策因素、文化因素等
	组织形式	个体、部门、企业、企业联盟和网络等
	人才层次	普通员工、技能人员、专业技术人员和创新型人才等
信息系统	感知	声、力、振动、热、电流、磁、光学、成像、速度等
	通讯	电报、电话、光纤、无线和移动通讯等
	网络	局域网、广域网、互联网、移动互联网和物联网等
	存储	印刷介质、磁性介质、激光和半导体介质等
	数据库	本地数据、分布式数据、在线数据、云和大数据
	信息基础设施	终端、服务器-客户机、浏览器/服务器模式、面向服务的架构和云计算等
	CAX/模拟仿真	计算机辅助设计、计算机辅助制造、计算机辅助工艺过程和数字孪生等
	控制	开环和闭环控制、比例积分微分控制、自适应和智能控制等
人工智能/机器学习	模糊逻辑、专家系统、神经网络、深度学习、强化学习等	
物理系统	能源	水力发电、煤炭、石油和天然气、电力、核能和清洁能源等
	材料	木材、金属、复合材料、半导体材料、纳米材料和智能材料等
	加工方式	机械加工、铸造、焊接、电处理、数控、机器人和增材制造等
系统集成	装备与设备	手工工具、机床、传感器和执行器、数控装备、机器人和智能工厂等
	系统层次	现场设备、车间、工厂、企业和全球业务网络
	产品生命周期	产品设计、加工过程设计、生产工程、制造、使用和服务、回收等
	商业生命周期	计划、采购、制造、交付和退货等
	生产生命周期	设计、建造、调试、运行和维护、退役和回收等
制造模式/范式	手工、精益、敏捷、可重构、数字化、可持续、智能化等制造模式/范式	

在 HCPS 中，人、信息系统、物理系统三者之间的交互融合，先后形成了三个子系统，即 HPS、HCS 和 CPS。

由人类和简易物理工具/装置共同组成的生产生活系统称作人-物理系统 HPS。HPS 发展的实质是人类不断在物理系统（动力系统、机械结构等）上创新、应用，使得机器（物理系统）进一步代替人类完成更多的体力劳动。HPS 发展的时间跨度包含了第一次和第二次工业革命，涉及生产力的发展、生产方式的进步、劳动组织形式的改变、社会结构的变革等多个方面。HPS 的发展逐步提高了生产生活系统的性能和效率，在一定程度上扩展了人类生产生活的物理边界。但在 HPS 中，需要人与机器发生物理接触，直接操作控制去完成各种工作任务，并要求人利用眼睛、耳朵、四肢及大脑去完成多方面的任务，人类需要不断优化机器的外形、尺寸、操纵力等工具性因素，以及振动、噪声、温度、湿度等环境因素，以更适合人的身心特点。另外，由于人类的一些先天特性（如操作失误、疲劳、遗忘、伤病等），使 HPS 在处理复杂工作任务、信息交流与传播、经验固化与传承等方面存在着不足和挑战。

在早期的 HPS 中，信息主要来源于书籍、书面交流、当面交谈等方式。随着现代信息技术的出现，人类与信息系统的交互形成了 HCS^[8]。从此，人类的信息获取、储存、加工和传播发生了革命性变化。人机交互（Human-computer interaction, HCI）可认为是 HCS 的早期形态，其中，计算机语言（程序设计语言）是人与信息系统（比如计算机）之间通信交互的基本语言。之后，高级程序语言的出现使得软件产业开始萌芽。软件是 HCS 发展的另一种重要体现和反映，是人类与信息系统对接的一种常见方式。HCS 的出现使得信息系统可以迁移/复制人类的经验知识和部分的脑力智慧，从而建立新的数字世界。此后，互联网、万维网、社交网络等的发展彻底改变了人类的生活和生产方式。根据美国自然科学基金委的描述^[9]，如今 HCS 的范畴已扩展到开源（Open Source）、增强现实（AR）、混合现实（MR）、社会计算（Social Computing）等领域。同时，随着人因工程学（人类工效学）的发展进步，HCS 成为人的因素、组织管理和文化因素等研究领域重要的理念和工具。

借助计算机、通信、控制、网络等技术^[10, 11]，对人造物理系统进行控制，形成的嵌入式系统、自动控制系统和智能体系统，可以认为是早期形态的 CPS^[12]，不过其交互范围和使用价值有限。近年来，伴随着信息通信技术的飞速发展，CPS 的范畴迅速扩展，多个国家和部门都尝试对 CPS 作出详细描述，学术界与工业界等也高度重视 CPS 的研究和应用推广，CPS 开始进入发展成熟期^[13, 14]。总体来看，CPS 的本质就是构建一套信息空间（或称为赛博空间）与物理空间之间的基于数据自动流动的闭环智能系统，通过网络化空间实时、安全、可靠地操控物理实体，以解决多维复杂系统中的复杂性和不确定性问题，从而提高资源配置效率，实现资源优化，具体包括状态感知、实时分析、自主决策、

精准控制等多个层次^[15]。CPS 是 HCPS 非常重要的组成部分，赋予人类与自然界（包括机器）一种新关系，成为当前 HCPS 领域的一个研究热点。

总之，HCPS 涉及机械科学、信息科学、计算机科学、能源科学、材料科学、生命科学、思维科学、社会科学等基础科学，是多学科交叉融合的产物，其应用覆盖多个领域，如制造业、交通、能源、环境、医疗、健康、农业等，本文主要聚焦 HCPS 在制造业的应用实践，即智能制造。

2 HCPS 视角下的智能制造

2.1 智能制造的发展演进

HCPS 的发展过程实质也是信息技术不断发展的过程，即从数字化（HCPS1.0）、网络化（HCPS1.5）走向智能化（HCPS2.0）^[7]。为了更好地服务于制造业的智能转型、优化升级，在深刻分析各种制造模式/范式的基础上，周济等^[7, 16-19]基于 HCPS 理论归纳提出了智能制造的三个基本范式：数字化制造（对应 HCPS1.0）、数字化网络化制造或“互联网+制造”（对应 HCPS1.5）、以及新一代智能制造（对应 HCPS2.0），如表 2 所示。当前，以新一代人工智能为主要特征的新一代信息技术正在开创智能制造创新发展的新阶段（新一代智能制造）。20 世纪 80 年代以来，我国企业逐步推进应用数字化制造，取得了巨大进步，各地大力推进“数控一代产品创新”和“数字化改造”，一大批数字化生产线、数字化车间、数字化工厂建立起来，众多企业完成了数字化制造升级。进入 20 世纪以来，我国工业界抓住互联网发展的机遇，大力推进“互联网+制造”，数字化网络化水平大大提高。一批数字化制造基础较好的企业成功转型，实现了数字化网络化制造；大量原来还未完成数字化制造的企业，采用并行推进数字化和网络化的技术路线，完成了数字化制造的“补课”，同时跨越到了互联网+制造的阶段，实现了企业优化升级。从研究层面来看，新一代智能制造的相关技术包括物联网、数字孪生、CPS、智能机器人、云计算、大数据分析、深度学习等，这些技术可以从感知、模拟仿真、控制、分析决策等层面提高制造系统的相关性能。但考虑到这些技术的规模化应用目前还不成熟，我国制造业当前的工作重点要放在大规模推广和应用“互联网+制造”上，同时，在这个过程中，要重视新一代智能制造技术的研究和融合应用。

表 2 HCPS 与智能制造的基本范式

智能制造范式	阶段	基本标志/特征	核心技术	典型代表
数字化制造	HCPS1.0	计算机、通信和数字控制等信息化技术的发明和广泛应用	数控技术	数控一代产品
数字化网络化制造	HCPS1.5	互联网技术快速发展并得到广泛普及和应用	互联网云平台	远程运维
新一代智能制造	HCPS2.0	云计算、大数据、深度学习等信息技术普及应用	AI2.0	自主学习

2.2 新一代智能制造的技术特征

基于 HCPS 视角，新一代智能制造的三层参考架构如图 2(a)所示：包含单元级智能制造、系统级智能制造和系统之系统级智能制造三个层次。其中，单元级智能制造的技术体系如图 2(b)所示，主要

包括制造领域技术（如切削加工、铸造、焊接、增材制造等）、机器智能技术（如自主认知、自主决策等）和人机协同技术（如人机交互、协同认知、协同控制等）等三方面。在单元级智能制造的基础上，通过工业网络集成、智能生产调度、工业互联网、数字孪生、工业大数据及云平台等技术，可构建系统级或系统之系统级智能制造（如智能车间、智能产线、智能工厂等），从而实现制造资源大范围优化配置等目标^[7, 20-25]。

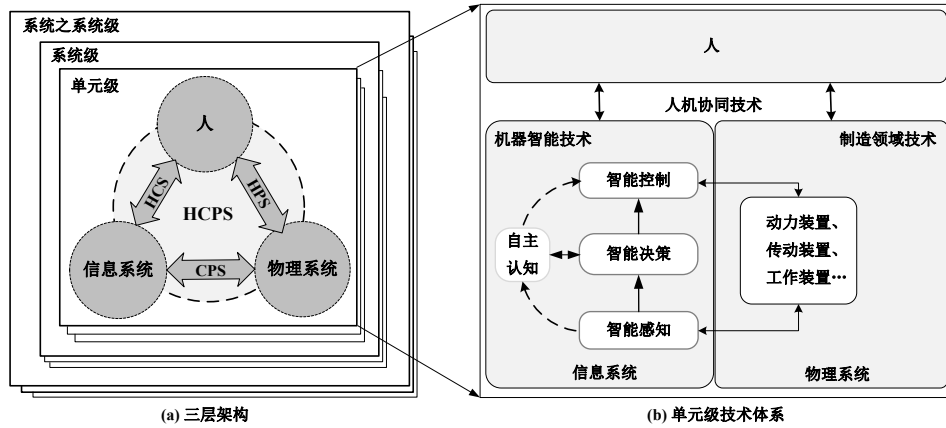


图 2 HCPS 视角下新一代智能制造的技术体系

综合分析智能制造的发展演进及其技术体系，可总结出：新一代智能制造本质上是“新一代人工智能+互联网+数字化制造”，其特征至少包括以下几个方面：

(1) AI2.0 的突破与运用。 AI2.0 将使得 HCPS 发生质的变化，形成新一代人-信息-物理系统，大数据智能、多媒体智能和人机混合增强智能等技术的发展，推动人与信息系统的关系发生根本性变化：即从“授之以鱼”发展到“授之以渔”^[26-29]。具体在新一代智能制造中，由于信息系统开始具有深度学习和自主认知的能力，人类可以将更多的脑力劳动或知识型工作交给信息系统完成，人类将有更多精力去思考和从事更具想象力和创造力的工作，这一变化将贯穿设计、生产、管理、服务、运维等各个制造环节及其系统集成。随着深度强化学习等研究的不断深入，人类将有望接近“解决智能，并用智能解决一切”的目标^[30]。

(2) 产业链集成与优化。 在传感器、工业网络、物联网、大数据分析等技术的共同作用下，新一代智能制造不仅涵盖产品设计、生产制造、物流、售后等多个环节，更涉及到能源、材料、信息、金融等多个产业链的集成与优化：企业内部研发、生产、销售、服务、管理等过程实现动态集成；基于工业互联网与智能云平台，企业与企业间实现共享和协作；制造业与上下游产业的互动与协作将形成服务型制造业和生产性服务业共同发展的新业态。

(3) 复杂系统建模与分析。有效建立制造系统不同层次的模型是实现复杂制造系统精准分析、优化决策与智能控制的基础。数理建模方法可以揭示物理世界的客观规律，但却难以精准分析解决制造系统中不确定性与复杂性问题，而大数据智能建模可以在一定程度上解决制造系统的不确定性和复杂性问题。理论上，新一代智能制造通过深度融合数理建模与大数据智能建模所形成的混合建模方法，将推动复杂系统分析方法从“强调因果关系”的模式向“强调关联关系”的创新模式转变，进而向“关联关系”和“因果关系”深度融合的先进模式发展，从根本上提高复杂制造系统建模和分析的能力。

(4) 制造与社会深度融合。新一代智能制造充分考虑人的因素和人类需求，以顾客、用户和员工为中心，将促进人与人之间、人与机器之间、机器与社会之间的沟通和知识的流通，推动形成“大众创业，万众创新”的良好生态。例如：终端用户可以直接参与到产品的设计、生产和服务活动中，增强用户体验和满意度。同时，新一代智能制造将制造业的发展与生态环境和社会福祉融合在一起，综合考虑经济、资源、环境、社会等因素并持续优化^[31, 32]。

“新一代智能制造”还处于起步阶段，其定义、内涵及特征将不断的扩展。“新一代智能制造”并不指某一单一的制造模式/范式，在其发展进程中会相伴出现大量的制造新模式、新业态，诸如共享制造、可持续制造、智慧制造等^[33-35]。

3 相关研究进展

新一代智能制造是新一代人工智能与先进制造技术深度融合的产物，同时还可延伸到其他领域（能源、交通、医疗、社会等）。本节从新一代人工智能、新一代智能制造、智能制造与其他系统集成融合等角度综述 HCPS 视角下新一代智能制造的研究进展。

3.1 新一代人工智能研究进展

智能科学主要涵盖两个领域：自然智能和人工智能。人工智能是智能科学的一个分支，其历史可以追溯到 20 世纪 40 年代初^[36]。新世纪以来，特别是近 10 年来，移动互联、大数据、云计算、物联网等新一代信息技术极其迅速的普及应用，使得人类社会—信息空间—物理空间三元系统加速融合形成更加先进的 HCPS，真正引发一场革命。HCPS 三元系统的技术融合和集成创新，使大数据真正走向大知识，推动人类认知和控制能力的变化。这些历史性的技术进步和巨变，使得新一代人工智能（AI2.0）应用而生，并呈现出深度学习、人机协同等新特征^[26]。目前，新一代人工智能主要体现在五个方面：大数据智能、群体智能、跨媒体智能、混合增强智能以及自主无人系统。其中，大数据智能、跨媒体智能、自主智能系统及类脑智能等^[28, 37]，主要是通过信息系统（Cyber system）的技术创新来不断提高机器智能的水平。大数据智能是指数据驱动和知识引导相结合的智能；跨媒体智能指从分类型处理多媒体数据（如视觉、听觉、文字等），迈向跨媒体认知、学习和推理的新水平智能；自主

智能系统将研究的理念从机器人转向自主协同控制与优化决策智能系统^[38]。此类系统中，人类是系统的设计者，虽不直接参与系统的实时运行与控制，但仍然保留对系统运维、创新和优化的权限。混合增强智能和群体智能^[27, 29]，是通过人与信息系统的协同创新，充分发挥人类智能与机器智能的各自优势，达到“1+1>2”的效果。混合增强智能主要研究人在控制回路的智能、脑机协同及人机群组协同等内容；群体智能主要包括群体智能结构理论、群体智能激励机制、群体智能学习等理论和方法^[38]。此类系统中，人类不仅是系统的设计者和管理者，还实时参与运行、控制与优化。

AI2.0 正在快速促进人工智能在各行业的融合创新和规模化应用。例如，随着人工智能从以符号智能为代表的传统 AI 发展到以大数据智能为代表的 AI2.0，智能制造也正在发生重大变化，传统以专家系统为代表的智能制造逐渐发展到面向数字化、网络化、智能化、服务化的新一代智能制造，从某种意义上来说，人工智能的发展将决定智能制造的走向^[39, 40]。

3.2 新一代智能制造研究进展

3.2.1 国内研究进展

近年来，国内学术界基于 HCPS 对新一代智能制造的定义内涵和系统组成进行了探索性研究。中国工程院“新一代人工智能引领下的智能制造研究”课题组^[15, 16, 41, 42]认为新一代智能制造是一个基于 HCPS 的大系统，主要由智能产品与装备^[43]、智能生产^[44-46]、智能新业态（如智能服务）^[47]、工业互联网和智能制造云^[48]等子系统集合而成，各个子系统都以自身先进技术为本，以 HCPS 作为理论基础，深度融合 AI2.0 等技术。从 HCPS 视角看，国内相关研究进展主要包括人机物协同制造、社会制造、共融机器人、人机技能传递等方面。

(1) 人机物协同制造/智慧制造。在分析制造业信息化需求的基础上，姚锡凡等^[49]融合云制造、制造物联、和企业 2.0 等理念，将务联网、物联网、知识网和人际网集为一体，提出了人机物协同的制造模式——智慧制造。作者认为人是制造系统智慧的主要来源，只有结合人的经验、知识和智慧才能实现真正的智慧制造。

(2) 社会制造/社群化制造。王飞跃^[50]认为通过社会计算，社会制造可以使得传统的企业转变为能够主动感知并且响应用户定制需求的智能企业。在社会制造的环境中，消费者与企业通过网络可以随时随地参加到生产流程中，从而有效地实现需求和供应之间的相互转化。江平宇等^[51]认为社群化制造模式的驱动力包括几个方面：小微化、服务化的制造业环境；共享经济与社群经济环境；新兴制造、信息、管理技术应用。社群化制造模式能够解决制造业中大规模个性化的用户需求以及多参与主体之间的复杂共享、协同与交互等问题，进而促进形成人人参与生产的制造业局面。

(3) 共融机器人。丁汉^[52]认为未来机器人有三个特征：机器人与环境的共融、机器人与人间的协同、机器人与机器人之间的共融，进而自主适应复杂任务和动态环境，更加理解人类的需求和反应。

共融机器人核心特征包括：柔顺灵巧，能服从使用的指挥，也能适应复杂环境；动态感知，具有多模式传感能力，能清晰认知广义的行为环境；自主协同，既有个体行为智能性，又有群体智能协作功能。

(4) 人机技能传递。人-机器人技能传递是指人将操作技能传授给机械臂，从而使得机器人具备类人化作业能力，达到高效示教编程的目的。相对于传统机器人编程，人机技能传递具有高效率、低成本、不依赖机器人本体平台等显著优点，是人-信息-机器人融合系统（Human-cyber-robot-systems, HCPS）中重要环节之一。曾超等^[53]认为人-信息-机器人融合系统是 HCPS 在机器人领域中的具体应用实践，可以将人的优势（包括智慧性与灵巧性等）与机器人优势（包括高速率与高精度等）高效结合。

不过，尽管国内学者在 HCPS 视角下对智能制造开展了初步研究，但总体来看，相关概念和研究还处于起步阶段，相关应用也处于尝试探索阶段。

3.2.2 国外研究动态

最近几年，国际上对 HCPS 语义下的智能制造展开了探索性研究，涵盖人-信息系统（HCS）、人在回路的信息-物理系统（Human-in-the-loop cyber-physical system, HitL-CPS）、以人为中心（human-centered）的智能制造系统、人机协作（Human-robot collaboration）、人机共生（human-automation symbiosis）、第四代操作工（Operator 4.0）、未来工作和未来工人（Future work and future worker）等多个领域，介绍如下：

(1) 人-信息系统。Matthew 和 Laine^[54]指出人是汽车制造业中的重要元素，但是目前大量熟练工人在工业 4.0/ CPS 的实践中仅仅被指定为“数据接收器”。基于“人-信息系统”重视在汽车装配中完成大部分手工工作的工人，可使人类更安全、有效地完成工作，并支持手工操作任务的增强控制和质量监控。基于此，作者提出了 HCS 和 CPS 的一个统一框架，用于指导智能制造系统的实施。

(2) 人在回路的信息-物理系统。Schirner 等^[55]和 David 等^[56]认为多数 CPS 系统中仍然将人定义为不可预测的元素，并只将人放在控制回路的外部，但为了使这些系统更好地满足人类需求，未来 CPS 将需要与人类建立更紧密的联系，通过“人在回路”控制，将人的意图、心理状态、情绪、动作等考虑进来。Sulayman 等^[57]研究了“人在回路”的 HCPS 与传统 CPS 的不同，并建立了人员服务能力描述模型，Sirajum 等^[58]指出了“人在回路”语义下 CPS 面临的挑战：需要全面掌握“人在回路”控制的各种类型、导出人类行为模型的能力、如何将人类行为模型纳入以往的反馈控制方法中。David 等^[56, 59]还讨论了 HitL-CPS 中人的不同作用和角色以及“人在回路”控制需要具备的条件，并分析了 HitL-CPS 具体的应用案例，指出了其广阔前景。

(3) 以人为中心的智能制造系统^[60-62]。Damien 等^[62]展示了“以技术为中心”设计方法的局限性，指出目前智能制造系统对于人的有效融合缺乏关注，并忽略了人类解决某些复杂问题的能力，认为在

智能制造系统的早期设计阶段需要定义好相关人员的角色；基于不同级别有关人员的能力和局限，提出了人与机器之间任务分配以及人机合作的原则，并可以根据系统情况选择适当的自动化级别。Marie-Pierre 等^[61]提出了一种以人为本的方法来设计智能制造系统能。在此基础上，设计了一个人工自组织系统（ASO）进行实验，以及一个辅助系统来支持 ASO 和人类操作员之间的合作，实验用于评估该系统在改善 HCPS 性能方面的效用，以及在人机工程学（Ergonomic）方面的可接受性，初步结果显示该方法是有效的。

（4）第四代操作工及人机互动/人机协作。David 等^[63, 64]在 HCPS 语义下提出了第四代操作工的概念并展望了其前景，认为其有助于实现社会化可持续制造和人机共生。同时，作者讨论了人机共生的基本概念和使能技术（包括增强现实/虚拟现实、智能个人助手、协作机器人、社交网络、大数据分析等）。Wang 等^[65]从共存、合作、互动和协作四个层面梳理了人机关系，并描述了各自的定义和特征。在此基础上，重点介绍了共生人机协作装配的主要技术、未来发展方向及挑战。

（5）未来工作和未来工人。美国国家自然科学基金委（NSF）在 2016 年启动了十个大概念（Big Ideas）长期项目，“未来人-技术前沿的工作”（Future of Work at the Human-Technology Frontier, FW-HTF）项目是其中之一^[66]。FW-HTF 项目的目标是为了应对新工业革命可能带来的风险，包括过度自动化造成失业、对教育资源的压力、安全和隐私威胁、算法上的偏见、对技术的过度依赖、以及对人类技能的侵蚀等，其愿景是了解并促进人-技术伙伴关系、推广新技术以增强人类绩效、了解新技术的风险和收益、通过新技术促进终身学习和泛在学习等。FW-HTF 项目的一个特色是对未来人类工作、未来技术以及未来的工人进行整合研究。

3.3 智能制造与其他系统的集成融合

HCPS 语义下，智能制造是一个大系统，其内涵不断演化，可延伸到其他行业，包括智慧能源、智能汽车、智能交通、智慧医疗、智慧城市等，进而共同形成智能生态大系统——智能社会。

（1）智慧能源

美国能源部牵头成立了清洁能源智能制造创新中心，其架构部署中能源互联网和智能制造系统已融为一体，并已经在电网和制氢等领域开展研究和应用^[67]，站在能源互联网视角，智能制造既是其服务的对象，又是其前进的基础。施陈博等^[68]基于 CPS 的概念阐述了能源互联网的技术体系与技术特征，围绕能源生产、传输、存储和分享探讨了互联网与能源系统的融合，对基于 CPS 的能源互联网应用前景进行了研究；程乐峰等^[69]认为在能源市场开放的大环境下，人与社会行为实质上深深地嵌入到了能源电力生产、输送、分配和消费的各个环节，能源调控方式与人类行为紧密耦合，因此，需要考

考虑市场与人的行为，从复杂系统理论出发构建 HCPS（或称为信息-物理-社会系统），进而实现多智能群体知识自动化。

（2）智能交通

通过智能化技术在汽车研发设计、生产制造、物流、管理、服务等环节的深度应用，可以整体提升汽车产业链的水平。智能网联汽车是智能制造体系及产业价值链的核心环节，可有效地加强车辆、道路和使用者三者之间的联系，形成一种综合运输系统，即“人-车-路-云”，是智能交通系统的重要环节^[70]。Xiong^[71]认为人的社会因素与 CPS 同等重要，在此基础上提出了信息物理社会系统（CPSS）的概念和架构，并应用到智能交通系统中。Miriam^[72]基于 HitL-CPS 的理念分析了将人置于 CPS 回路的技术挑战，并设计了一个概念架构来完成合适的“人的集成设计”方案，该架构在智能汽车中得到了验证。

（3）智慧医疗

智慧医疗源于 IBM 公司“智慧地球”的概念，指以电子健康档案为基础，综合运用物联网、互联网、云计算、大数据等技术，构建医疗信息共享的交互平台，实现患者、医务人员、医疗机构和医疗设备等互动，智能匹配医疗圈的需求^[73]，其本质是数字化网络化智能化的 HCPS，其中智能制造技术对于医疗设备设计、设备生产、远程运维、智能远程手术等方面起着重要作用。

（4）智能社会

顾新建等^[32]全面分析研究了智能制造与智慧城市的关系，剖析了智慧城市对智能制造的需求，研究了智能制造对于智慧城市的重要作用和基本功能。日本的超智能社会（社会 5.0）^[74]的一个重点是利用智能机器人和智能生产进行高效的社会服务，人们将与提升生活品质的机器人和 AI 共生。景轩和姚锡凡^[75]提出了社会信息物理生产系统的概念，研究了 CPS 的社会化特点，通过 CPS 将人类社会和智能体社会相融合，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（智能社会），将更有助于构建更加和谐和完善的社会体系。

上述国内外研究进展表明：在 AI 2.0 等共性使能技术的引领下，HCPS 科学与技术和新一代智能制造正在推动新一轮工业革命，重塑制造业的技术体系、生产模式及价值链，引发发展理念、制造模式、人机关系等发生重大而深刻的变革，促进制造业与其他智能产业协同创新、融合发展，最终实现人类社会生产力的整体跃升。

4 智能制造发展建议

作为一种基本准则和概念，HCPS 科学与技术给智能制造的研究发展和推广应用带来了难得的历史性机遇。在我国，不少企业和学者对于智能制造的理解还停留在自动化、机器换人的层面，与智能

制造有关的研究集中在 CPS、云制造、数字孪生、大数据、物联网等方面^[39, 76]，针对智能制造系统中人的因素的深入研究还较为缺乏；但与此同时，国际上对 HCPS 理论框架下智能制造的研究和应用高度重视，这给我国相关领域的研究与发展提出了挑战。鉴于 HCPS 的理论价值和应用价值，本节从人、信息系统、物理系统、系统集成等层次提出智能制造发展的若干建议，以期为进一步践行 HCPS 理念、发展智能制造技术提供参考。

(1) 人员层面 (Human)。智能制造发展的关键是人才队伍建设。在全球范围内，同时掌握人工智能技术和工业应用方面丰富知识的专家极度缺乏，而 HCPS 与智能制造的快速发展对这类人才的需求却呈现爆发式的增长。顶尖人工智能专业人士、工业工程师、高素质的技术工人将成为新一代智能制造生态系统的主力军。此外，在相当长一段时间内，机器很难完全取代人，智能制造的研究与应用不能将人完全排除在系统之外，面向智能制造，亟需“以人为中心”构建完整的 HCPS 科学与技术体系，并提前分析智能制造时代工人所需具备的素质和技能。建议加快就各类智能制造高技术研发型人才和技术工人教育培训等方面提出具体措施，例如，实施智能制造高素质人才队伍建设、培养新时代智能制造技术工人等行动计划。

(2) 信息技术层面 (Cyber system)。新一代信息技术的快速发展是推动智能制造发展的动力引擎。未来企业乃至行业的竞争将逐渐从物理系统向信息系统转移，信息系统的核心技术和价值布局将决定企业、行业乃至国家是否具有真正的、可持续的竞争力，包括效益、质量、服务水平等。同时，计算系统的体系结构、系统软件、应用软件等面临着高效能、高可靠、低能耗、敏捷设计等多个挑战；电子设计自动化等工业核心软件、嵌入式工业软件以及工业互联网系统软件等也面临多方面挑战。建议针对新一代信息系统技术的基础研究与应用提出相对应的政策和促进措施。例如，实施工业互联网、服务型制造、大力振兴工业软件、新一代人工智能在制造业的推广应用等行动计划。

(3) 制造基础层面 (Physical system)。切削、铸造、焊接、3D 打印等制造基础技术与传感器、轴承、齿轮、仪器仪表等关键部件是智能制造发展的根基。例如，工业机器人的核心零部件包括减速器、伺服电机和控制器，这些部件占机器人成本的 70%左右，但国产工业机器人的这些核心零部件基本都依赖于进口。建议针对制造基础与关键零部件等方面提出具体发展措施，促进智能关键零部件、元器件、智能材料等领域的创新能力。例如，实施智能制造强基及产业化、高端装备制造、“智能一代”产品创新等行动计划。

(4) 系统集成层面 (System Integration)。“系统决定成败，集成者得天下。”智能制造系统集成技术和系统集成产业培育非常关键，包括与智慧能源、智能交通、智慧城市等系统的集成。同时，人与智能机器之间的集成融合和分工协作也非常重要。此外，完整的产业链、创新链、人才链、资金链等是保证智能制造系统健康发展的重要因素。建议针对智能制造系统集成产业制定政策，积极

培育集成商，吸收借鉴世界范围内的先进理念、技术和系统集成经验，推动智能制造产业链、创新链、人才链、资金链等的有机衔接和“多链融合”，同时加强人与智能机器集成融合方面的科学研究。例如，实施强化智能制造标准化、智能云平台、推动人机协同系统发展、推动智能制造产业链与创新链融合发展、构建智能制造生态体系等行动计划。

5 结语

在分析 HCPS 内涵与系统组成及新一代智能制造主要特征的基础上，本文从新一代人工智能、新一代智能制造、相关智能系统等方面分析了智能制造的研究进展。HCPS 揭示了制造系统数字化网络化智能化发展（即智能制造范式演进）的基本原理，同时指明了智能制造迈向新一代智能制造的发展趋势。在此基础上，从人、信息系统、物理系统、系统集成等层面提出了促进智能制造发展的若干建议。人类社会、信息系统、物理系统三者良性互动、协同创新、融合发展所形成的 HCPS 科学与技术体系有望成为理解智能制造演进过程、构建智能制造技术体系、推动新一代智能制造创新发展的基础与支撑，在产品的设计、工艺设计、生产制造、组织管理、运维服务及系统集成等方面有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] BRYNJOLFSSON E, MCAFEE A. The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies[M]. New York, USA: WW Norton & Company, 2014.
- [2] EVANS P, ANNUNZIATA M. Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines[EB/OL]. [2019-12-15]. https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf.
- [3] H. KAGERMANN H, HELBIG J, HELLINGER A, et al. 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[EB/OL]. [2019-12-15]. <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>.
- [4] TAKI H. Towards Technological Innovation of Society 5.0[J]. Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2017,137:275-275.
- [5] ZHOU Ji. Intelligent Manufacturing——The main direction of Made in China 2025[J]. China Mechanical Engineering, 2015,26(17):2273-2284(in Chinese). [周济. 智能制造——“中国制造 2025” 的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015,26(17):2273-2284.]
- [6] State Council of the People's Republic of China. Notice of the State Council on Issuing the Development Plan on the New Generation of Artificial Intelligence[EB/OL]. [2019-12-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm(in Chinese).[国务院.国务院关于印发

- 新一代人工智能发展规划的通知. [EB/OL]. [2019-12-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.]
- [7] ZHOU Ji, ZHOU Yanhong, WANG Baicun, et al. Human–Cyber–Physical Systems (HCPSs) in the Context of New-Generation Intelligent Manufacturing[J]. Engineering, 2019,5(4):624-636.
- [8] HU Hu, ZHAO Min, NING Zhenbo, et al. Three-body intelligence revolution[M]. Beijing:China Machine Press,2016(in Chinese).[胡虎, 赵敏, 宁振波,等. 三体智能革命[M]. 北京, 机械工业出版社, 2016.]
- [9] NSF. Cyber-Human Systems (CHS)[EB/OL]. [2019-12-15]. https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504958.
- [10] TSIEN H S. Engineering cybernetics[M]. New York, USA: McGraw-Hill Book Co., Inc.,1954.
- [11] WIENER N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine[M]. Cambridge, MA, USA: MIT press,1961.
- [12] FITZGERALD J, LARSEN P G, VERHOEF M. From embedded to cyber-physical systems: Challenges and future directions[M]//Collaborative design for embedded systems. Berlin, Germany: Springer, 2014
- [13] SCHATA B, TORNGREN M, PASSERONE R, et al. CyPhERS-Cyber-Physical European Roadmap & Strategy -- Research Agenda and Recommendations for Action.[2019-12-15].<http://www.cyphers.eu/>.
- [14] LEE J, BAGHERI B., Kao H A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015,3:18-23.
- [15] CESI.Cyber-Physical Systems white paper (2017) [EB/OL]. [2019-12-15]. <http://www.cesi.ac.cn/201703/2251.html>(in Chinese).[中国标准化研究院. 信息物理系统白皮书（2017）[EB/OL]. [2019-12-15]. <http://www.cesi.ac.cn/201703/2251.html>.]
- [16] ZHOU Ji, LI Peigen, ZHOU Yanhong, et al. Toward New-Generation Intelligent Manufacturing[J]. Engineering, 2018,4(1):11-20.
- [17] KUSIAK A. Intelligent Manufacturing Systems[M].Old Tappan,New Jersey,USA:Prentice Hall Press,1990.
- [18] YANG Shuzi, DING Hong. Development and research of intelligent manufacturing technology and system[J]. China Mechanical Engineering, 1992,3(2):15-18(in Chinese). [杨叔子, 丁洪. 智能制造技术与智能制造系统的发展与研究[J]. 中国机械工程, 1992,3(2):15-18.]
- [19] FAN Yushun. The connotation and key technologies of network manufacturing[J].Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003,9(3):576-582(in Chinese). [范玉顺. 网络化制造的内涵与关键技术问题[J]. 计算机集成制造系统,2003,9(3):576-582.]
- [20] XU Liang, WANG Liangyong, LIU Changxin. Industrial applications,technologies,challenges and trends for industrial cloud[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018,24(8):1887-1901(in Chinese).[徐泉, 王良勇, 刘长鑫. 工业云应用与技术综述[J]. 计算机集成制造系统, 2018,24(8):1887-1901.]

- [21] TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(1):1-18(in Chinese).[陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(1):1-18.]
- [22] WANG Wanliang, ZHANG Zhaojuan, GAO Nan, et al. Progress of big data analytics methods based on artificial intelligence technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(3):529-547(in Chinese). [王万良, 张兆娟, 高楠, 等. 基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(3):529-547.]
- [23] WANG Xuliang, CHAI Xudong, ZHANG Cheng, et al. Collaborative production planning algorithm for cross-enterprises in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(2): 412-420(in Chinese).[王旭亮, 柴旭东, 张程, 等. 云制造环境下跨企业协同生产调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(2): 412-420.]
- [24] ZHANG Longfei, ZHANG Lin, LIU Yongkui. Survey on scheduling problem in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017,23(6):1147-1166(in Chinese). [周龙飞, 张霖, 刘永奎. 云制造调度问题研究综述[J]. 计算机集成制造系统, 2017,23(6):1147-1166.]
- [25] TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop:a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017,23(1):1-9(in Chinese).[陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017,23(1):1-9.]
- [26] PAN Yunhe. Heading toward artificial intelligence 2.0[J]. Engineering,2016,2(4):409-413.
- [27] LI Wei, WU Wen-jun, WANG Huai-min, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017,18(1):15-43.
- [28] ZHUANG Yue-ting, WU Fei, CHEN Chun, et al. Challenges and opportunities: from big data to knowledge in AI 2.0[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2017,18(1):3-14.
- [29] ZHENG Nan-ning, LIU Zi-yi, REN Peng-ju, et al. Hybrid-augmented intelligence: collaboration and cognition[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2017,18(1):153-179.
- [30] LIU Quan, ZHAI Jian-wei, ZHANG Zong-zhang, et al. A Survey on Deep Reinforcement Learning[J]. Chinese Journal of Computers,2018,41(1):1-27(in Chinese).[刘全, 翟建伟, 章宗长, 等. 深度强化学习综述[J]. 计算机学报, 2018,41(1):1-27.]
- [31] ZHOU Jia-jun, YAO Xi-fan, LIU Min, et al. State-of-Art review on new emerging intelligent manufacturing paradigms[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017,23(3):624-639(in Chinese).[周佳军, 姚锡凡, 刘敏, 等. 几种新兴智能制造模式研究评述[J]. 计算机集成制造系统, 2017,23(3):624-639.]
- [32] GU Xin-jian, DAI Feng, CHEN Ji-xi, et al. Relationship between smarter manufacturing and smarter city[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013,19(5):1127-1133(in Chinese).[顾新建, 代风, 陈芟熙, 等. 智慧制造与智慧城市的关系研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013,19(5):1127-1133.]

- [33] WEI Qi. Research on the Driving Force of China's Shared Manufacturing Development[J]. Management Observer, 2019,3(7):9-13(in Chinese).[魏麒. 我国共享制造模式发展的驱动力研究[J]. 管理观察,2019,3(7):9-13.]
- [34] STOCK T, SELIGER G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0[J]. Procedia Cirp, 2016,40:536-541.
- [35] YAO Xifan, JIN Hong, ZHANG Jie. Towards a wisdom manufacturing vision[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2014,28:1291-1312.
- [36] WANG Lihui. From Intelligence Science to Intelligent Manufacturing[J]. Engineering,2019,5(4):615-618.
- [37] PENG Yu-xin, ZHU Wen-wu, ZHAO Yao, et al. Cross-media analysis and reasoning: advances and directions[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017,18(1):44-57.
- [38] ZHU Jun, HUANG Tiejun, CHEN Wenguang, et al. The future of artificial intelligence in China[J]. Communications of the ACM, 2018,61(11):44-45.
- [39] YAO Xifan, LIU Min, ZHANG Jianming, et al. The past, present and future of intelligent manufacturing from perspective of artificial intelligence[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(1):19-34(in Chinese).[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[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(1):19-34.]
- [40] LI Bo-hu, HOU Bao-cun, YU Wen-tao, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017,18(1):86-96.
- [41] WANG Baicun, ZANG Jiyuan, QU Xianming, et al. Research on New-Generation Intelligent Manufacturing based on Human-Cyber-Physical Systems[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):29-34(in Chinese).[王柏村, 臧冀原, 屈贤明, 等. 基于人-信息-物理系统 (HCPS) 的新一代智能制造研究[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):29-34.]
- [42] LI Bohu, CHAI Xudong, ZHANG Lin, et al. Accelerate the Development of Intelligent Manufacturing Technologies, Industries, and Application under the Guidance of a New-Generation of Artificial Intelligence Technology[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):73-78(in Chinese).[李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 新一代人工智能技术引领下加快发展智能制造技术, 产业与应用[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):73-78.]
- [43] TAN Jianrong, LIU Zhenyu, XU Jinghua. Intelligent Products and Equipment Led by New-Generation Artificial Intelligence[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):35-43(in Chinese). [谭建荣, 刘振宇, 徐敬华. 新一代人工智能引领下的智能产品与装备[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):35-43]
- [44] LU Bingheng, SHAO Xinyu, ZHANG Jun. Development Strategy for Intelligent Factory in Discrete Manufacturing[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):44-50(in Chinese). [卢秉恒, 邵新宇, 张俊, 等. 离散型制造智能工厂发展战略[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):44-50.]

- [45] CHAI Tianyou, DING Jinliang. Smart and Optimal Manufacturing for Process Industry[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):51-58(in Chinese). [柴天佑, 丁进良. 流程工业智能优化制造[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):51-58.]
- [46] YUAN Xiaofeng, GUI Weihua, CHEN Xiaofang, et al. Transforming and Upgrading Nonferrous Metal Industry with Artificial Intelligence[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):59-65(in Chinese). [袁小锋, 桂卫华, 陈晓方, 等. 人工智能助力有色金属工业转型升级[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):59-65]
- [47] TAO Fei, QI Qinglin. Service-oriented Smart Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(16):11-23(in Chinese). [陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报, 2018,54(16):11-23.]
- [48] YU Xiaohui, ZHANG Hengsheng, PENG Yan, et al. Networking Architecture and Development Trend of Industrial Internet[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(4):79-84(in Chinese). [余晓晖, 张恒升, 彭炎, 等. 工业互联网网络连接架构和发展趋势[J]. 中国工程科学, 2018,20(4):79-84.]
- [49] YAO Xifan, LIAN Zhaotong, YANG Ling, et al. Wisdom manufacturing: new humans-computers-things collaborative manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014,20(6):1490-1498(in Chinese). [姚锡凡, 练肇通, 杨岭, 等. 智慧制造——面向未来互联网的人机物协同制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2014,20(6):1490-1498.]
- [50] WANG Feiyue. From social computing to social manufacturing: the coming industrial revolution and new frontier in cyber-physical-social space[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012(6):658-669(in Chinese). [王飞跃. 从社会计算到社会制造: 一场即将来临的产业革命[J]. 中国科学院院刊, 2012(6):658-669.]
- [51] JIANG Pingyu, DING Kai, LENG Jiewu. Social manufacturing: drivers, research status, and trends[J]. Industrial Engineering Journal, 2016,19(1):1-9(in Chinese). [江平宇, 丁凯, 冷杰武. 社群化制造: 驱动力, 研究现状与趋势[J]. 工业工程, 2016,19(1):1-9.]
- [52] DING Han. Basic theory and key technology of Coexisting-Cooperative-Cognitive Robot[J]. Robot Industry, 2016,6:12-17 (in Chinese). [丁汉. 共融机器人的基础理论和关键技术[J]. 机器人产业, 2016,6:12-17.]
- [53] ZENG Chao, YANG Chen-guang, LI Qiang, et al. Research Progress on Human-robot Skill Transfer. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2019,45(10):1813-1828 (in Chinese). [曾超, 杨辰光, 李强, 等. 人-机器人技能传递研究进展[J]. 自动化学报, 2019,45(10):1813-1828.]
- [54] KRUGH M, MEARS L. A complementary cyber-human systems framework for Industry 4.0 cyber-physical systems[J]. Manufacturing Letters, 2018,15:89-92.
- [55] SCHIRNER G, ERDOGMUS D, CHOWDHURY K, et al. The Future of Human-in-the-Loop Cyber-Physical Systems[J]. Computer, 2013,1:36-45.
- [56] NUNES D S, ZHANG P, SILVA J S. A Survey on Human-in-the-Loop Applications Towards an Internet of All[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015,17(2):944-965.

- [57] SOWE S K, ZETTSU K, SIMMON E, et al. Cyber-Physical Human Systems: Putting People in the Loop[J]. IT Professional. 2016,18(1):10-13.
- [58] MUNIR S, STANKOVIC J A, LIANG M, et al. Cyber Physical System Challenges for Human-in-the-Loop Control[C]//8th International Workshop on Feedback Computing. San Jose,CA,USA: The advanced computing systems associations, 2013.
- [59] NUNES D, SILVA J S, BOAVIDA F. A Practical Introduction to Human-in-the-loop Cyber-physical Systems[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [60] PERUZZINI M, PELLICCIARI M. A framework to design a human-centred adaptive manufacturing system for aging workers[J]. Advanced Engineering Informatics, 2017,33:330-349.
- [61] PACAUX-LEMOINE M P, TRENTESAUX D, REY G Z, et al. Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017,111:581-595.
- [62] TRENTESUAX D, MILLOT P. A Human-Centred Design to Break the Myth of the “Magic Human” in Intelligent Manufacturing Systems[M]//Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing. Berlin, Germany: Springer, 2016.
- [63] ROMERO D, STAHERE J, WUEST T, et al. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies[C]//Proceeding of International conference on computers & industrial engineering(CIE46), 2016:1-11.
- [64] ROMERO D, BERNUS P, NORAN O, et al. The operator 4.0: human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems//Proceeding of IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, 2016:677-686.
- [65] WANG L, GAO R, VANCZA J, et al. Symbiotic human-robot collaborative assembly[J]. CIRP annals, 2019,68(2):701-726.
- [66] NSF. Future of Work at the Human-Technology Frontier: Core Research(FW-HTF)[EB/OL]. [2019-12-15]. <https://www.nsf.gov/pubs/2020/nsf20515/nsf20515.htm>.
- [67] EDGAR T F, PISTIKOPOULOS E N. Smart manufacturing and energy systems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018,114:130-144.
- [68] SHI Chenbo, MIAO Quan, CHEN Qixin. Key technology and application of the energy internet based on cyber physical systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2016,56(9):930-936+941(in Chinese). [施陈博, 苗权, 陈启鑫. 基于 CPS 的能量互联网关键技术与应用[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2016,56(9):930-936+941.]
- [69] CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Cyber-physical-social Systems Based Smart Energy Robotic Dispatcher and Its Knowledge Automation: Framework, Techniques and Challenges [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(1):25-40(in Chinese). [程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息-物理-社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(1):25-40.]

- [70] BIAN Mingyuan, LI Keqiang. Strategic Analysis on Establishing an Automobile Power in China Based on Intelligent & Connected Vehicles[J]. Strategic Study of CAE, 2018,20(1):52-58(in Chinese). [边明远, 李克强. 以智能网联汽车为载体的汽车强国战略顶层设计[J]. 中国工程科学, 2018,20(1):52-58]
- [71] XIONG Gang, ZHU Fenghua, LIU Xiwei, et al. Cyber-physical-social System in Intelligent Transportation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2015,2(3):320-333.
- [72] GIL M, ALBERT M, FONS J, et al. Designing human-in-the-loop autonomous Cyber-Physical Systems[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2019,130:21-39.
- [73] XIANG Gaoyue, ZENG Zhi, SHEN Yongjian. Present Situation and Development Trend of China's Intelligent Medical Construction[J]. Chinese General Practice, 2016,19(24):2998-3000(in Chinese). [项高悦, 曾智, 沈永健. 我国智慧医疗建设的现状及发展趋势探究[J]. 中国全科医学, 2016,19(24):2998-3000.]
- [74] SHIROISHI Y, UCHIYAMA K, SUZUKI N. Society 5.0: For human security and well-being[J]. Computer, 2018,51(7):91-95.
- [75] JING Xuan, YAO Xi-Fan. Towards Social Cyber-physical Production Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019,45(4):637-656(in Chinese).[景轩, 姚锡凡. 走向社会信息物理生产系统[J]. 自动化学报, 2019,45(9):637-656.]
- [76] LIU Qiang. Study on Architecture of Intelligent Manufacturing Theory[J]. China Mechanical Engineering, 2020,31(1):24-36(in Chinese).[刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020,31(1):24-36.]

作者简介:

王柏村 (1990-), 男, 安徽太湖人, 中国工程院战略咨询中心助理研究员/博士后, 博士, 研究方向: 智能制造、人-信息-物理系统、能源系统优化等, E-mail: wangbc@cae.cn;

易兵 (1987-), 男, 湖南怀化人, 中南大学副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 数字样机、虚拟现实和结构拓扑优化等, E-mail: bingyi@csu.edu.cn;

刘振宇 (1974-), 男, 江西赣州人, 浙江大学教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 数字化设计与制造、建模仿真与数字样机技术, E-mail: liuzy@zju.edu.cn;

周源 (1977-), 男, 上海人, 清华大学长聘副教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 创新管理、公共政策等, E-mail: zhou_yuan@mail.tsinghua.edu.cn (通信作者);

周艳红 (1966-), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 生物信息技术, E-mail: yhzhou@hust.edu.cn。