

基于人-信息-物理系统 (HCPS) 的 新一代智能制造研究

王柏村^{1,2}, 臧冀原^{1,2}, 屈贤明¹, 董景辰¹, 周艳红³

(1. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 2. 清华大学, 北京 100084; 3. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 本文从制造业面临的问题和挑战、新一代人工智能技术带来的重大机遇、新一轮工业革命的核心技术等方面论述了新一代智能制造的发展背景。通过分析智能制造的发展演进过程, 指出传统制造向智能制造发展的过程是从原来的“人-物理”二元系统 (HPS) 向新的“人-信息-物理”三元系统 (HCPS) 发展的过程。HCPS 揭示了智能制造发展的基本原理, 是支撑新一代智能制造发展的理论基础。基于 HCPS 和智能制造的系统集成, 从给制造业带来的革命性变化、给人类社会带来的革命性变化等方面描述了新一代智能制造的愿景。

关键词: 新一代智能制造; 新一代人工智能; “人-信息-物理”系统 (HCPS); 系统集成; 愿景

中图分类号: N02; TP2; TP18 **文献标识码:** A

Research on New-Generation Intelligent Manufacturing based on Human-Cyber-Physical Systems

Wang Baicun^{1,2}, Zang Jiyuan^{1,2}, Qu Xianming¹, Dong Jingchen¹, Zhou Yanhong³

(1. The CAE Center for Strategic Studies, Beijing 100088, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper first discusses development of the new-generation intelligent manufacturing from the aspects of problems and challenges of the manufacturing industry, major opportunities brought by new-generation artificial intelligence, and core technologies of the new round of industrial revolution. By analyzing the evolution process of intelligent manufacturing, this paper points out that the process of development from traditional manufacturing to intelligent manufacturing is also a process of development from the original human-physical systems (HPS) to a human-cyber-physical systems (HCPS). HCPS reveals the basic principles of intelligent manufacturing development and is the theoretical basis for supporting the development of the new-generation intelligent manufacturing. Based on system integration of HCPS and intelligent manufacturing, the prospect of the new-generation intelligent manufacturing is described from the perspective of the revolutionary changes brought to the manufacturing sector and to human society.

Keywords: new-generation intelligent manufacturing; new generation of artificial intelligence; HCPS; system integration; prospect

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-07-06

通讯作者: 王柏村, 中国工程院/清华大学, 联培博士后, 助理研究员, 主要研究方向为智能制造; E-mail: wangbc@cae.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代人工智能引领下的智能制造研究”(2017-ZD-08-03); 中国博士后科学基金项目(2018M630191)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、新一代智能制造的发展背景

(一) 制造业亟需一场革命性变革

一方面，伴随着广大用户不断增长的个性化消费需求，以及资源能源环境约束进一步加大的挑战，全球范围内的制造业竞争愈演愈烈；同时制造业普遍有着提质增效降成本的强烈需求；制造业亟需一场革命性的产业升级 [1]。

另一方面，制造系统成为越来越复杂的大系统、制造全流程不确定性增加，为满足制造系统快速响应与重组、优化决策的能力，必须探索制造系统新的体系结构和运行机制；海量制造信息的获取、集成与融合、传播与处理、信息管理等均需进一步突破；知识的学习与传承能力已成为制约现代制造技术中产品开发和制造的瓶颈，迫切需要新的使能技术来解决制造过程中知识的产生、利用效率以及规模化使用的关键问题，从而使得整个制造系统能够以最优化的方式进一步释放能力与实现价值 [2]。

总的看来，现有制造体系和制造水平已经难以满足高端化、个性化、智能化产品和服务增值升级的需求；生产制造过程本身也需要更加智能的工具和计算方法来突破优化求解、知识传承等问题。这些问题和挑战均对制造业的技术创新、智能升级提出了紧迫要求。

(二) 新一代人工智能技术给制造业变革带来重大机遇

近年来，随着计算能力的极大提高，互联网引发了真正的大数据，在各种先进技术互融互通的基础上，新一代人工智能技术应运而生。新一代人工智能呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群体智能等新特征，大数据驱动知识学习、跨媒体协同处理、人机协同增强智能、群体集成智能正在成为发展重点，为人类提供认识复杂系

统的新思维、改造自然和社会的新技术 [3]。新一代人工智能解决复杂问题的方法从“强调因果关系”的模式向“强调关联关系”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，解决复杂问题的能力突飞猛进。最本质的是，人工智能具备了学习的能力，具备了生成知识和更好地运用知识的能力，实现了质的飞跃。当然，新一代人工智能技术还将继续从“弱人工智能”迈向“强人工智能”，应用范围将更加泛在、无所不在。总之，新一代人工智能已经成为新一轮科技革命的核心技术，正在形成推动经济社会发展的巨大引擎 [1]。

充分认识到新一代人工智能技术的发展将深刻改变人类社会生活、改变世界，中国发布了“新一代人工智能发展规划”，以抓住机遇，抢占先机。世界主要经济体也都把新一代人工智能的发展摆在了最重要的位置 [1]。

(三) 新一代智能制造是新一轮工业革命的核心技术

“科学技术是生产力”是马克思主义的基本原理；科学技术是第一生产力；科技创新是经济社会发展的根本动力 [4]。历次工业革命都有其核心技术，第一次、第二次工业革命分别以蒸汽机和电力的发明和应用为根本动力，极大地提高了生产力，人类从此进入现代工业社会；第三次工业革命，以计算机、通信和控制等信息技术的创新与应用为标志，极大地推动了人类社会在经济、政治、文化各领域的变革（见图 1）。

新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合，形成了新一代智能制造技术，成为了新一轮工业革命的核心驱动力 [1,5]。新一代智能制造将给制造业带来革命性变化，真正形成第四次工业革命，也为我国实现制造业换道超车、跨越发展带来了历史性机遇。

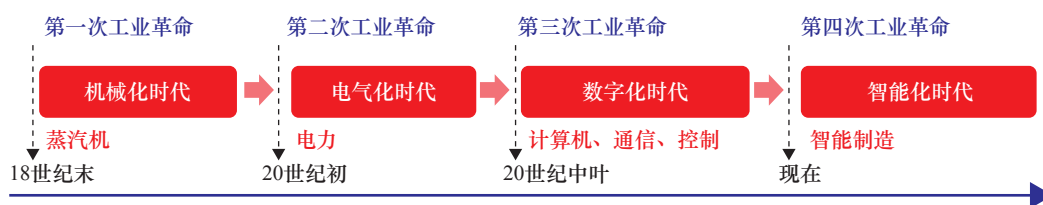


图 1 工业革命的四个阶段

二、智能制造：从人-物理系统（HPS）到人-信息-物理系统（HCPS）

智能制造是一个不断演进发展的大概念，可归纳为三个基本范式：数字化制造（第一代智能制造）、数字化网络化制造（第二代智能制造）、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造 [1]。智能制造涉及智能产品、智能制造过程以及智能服务等多个方面，下面将以生产制造过程为例对智能制造的技术原理和演进过程进行分析。

传统制造向智能制造发展的过程中，制造系统

经历了从原来的“人-物理”二元系统进入“人-信息-物理”三元系统，进而进入新一代“人-信息-物理”三元系统(HCPS2.0)的过程(见图2)。

(一) 传统制造系统与 HPS

早期制造系统（传统制造系统）只包含人和物理系统两大部分，是完全通过人对机器的操作控制去完成各种工作任务。尽管物理系统（机器）代替了人类大量的体力劳动，使人类的体力劳动得以极大减轻，但在传统制造系统中，仍然要求人完成感知、分析决策、操作控制以及学习等多种任务，因

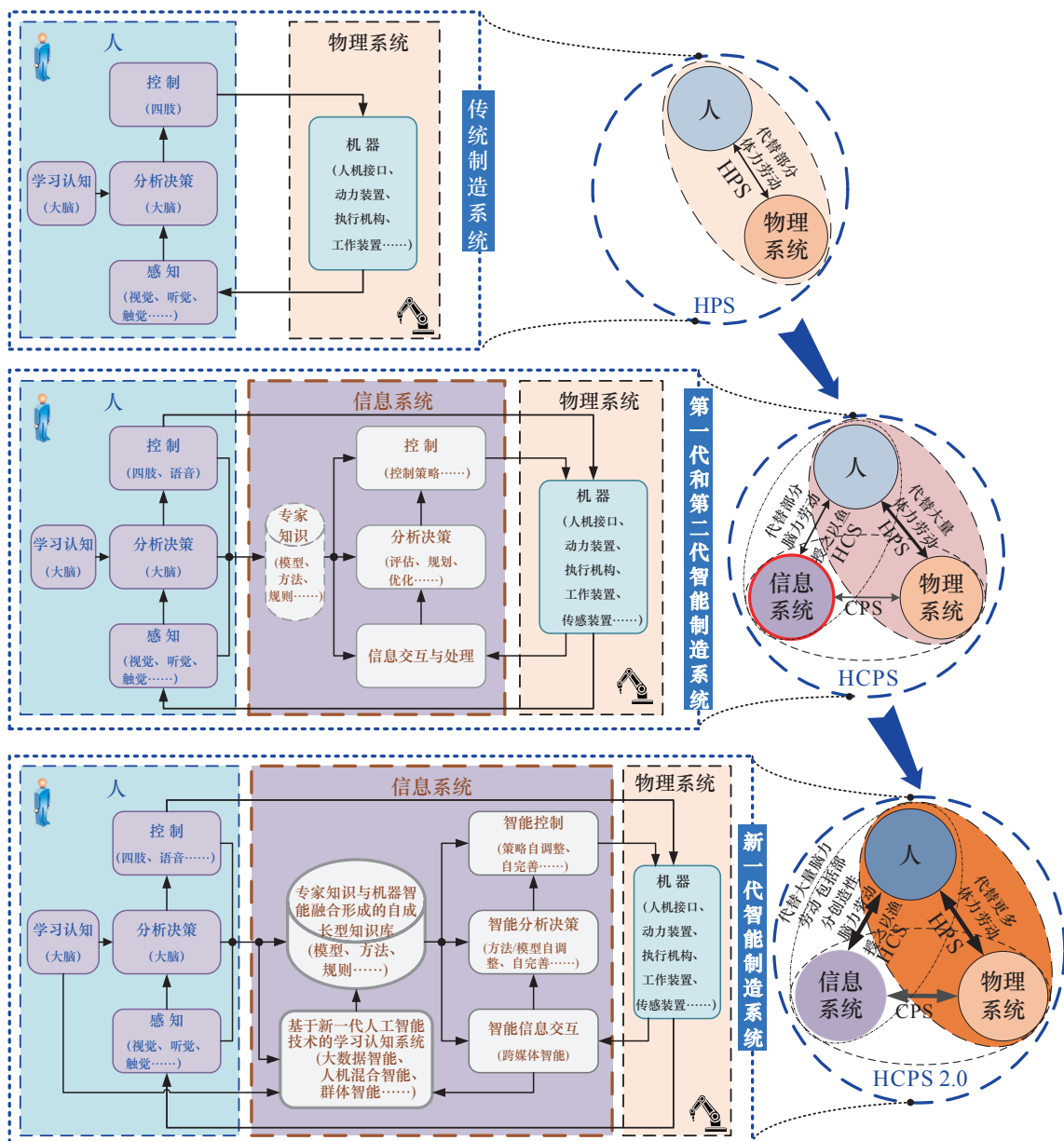


图2 智能制造：从HPS到HCPS的演变

此,传统制造系统实质上是“人-物理系统”。

在最初 HPS 中,系统对人的要求高,劳动强度很大,系统工作效率还不够高。第一次工业革命和第二次工业革命分别通过蒸汽机和电力等的发明和广泛应用革命性地提高了物理系统(动力机械等)的性能,从而极大提高了 HPS 的生产能力。

(二) 第一代、第二代智能制造系统与 HCPS

与传统制造系统相比,第一代和第二代智能制造系统主要有两方面变化(见图 2)。第一,最本质的变化是,在人和物理系统之间增加了一个信息系统(cyber system),该信息系统可替代人去自动完成部分感知、分析决策和控制等各种任务;第二,物理系统进行了升级,如增加了各种传感检测装置,动力装置变成数字化动力装置。

通过集成人、信息系统和物理系统的各自优势,第一代和第二代智能制造系统的能力尤其是计算分析、精确控制以及感知能力都得以很大提高,其结果是:一方面,系统的自动化程度、工作效率、质量与稳定性以及解决复杂问题的能力等各方面均得以显著提升;另一方面,不仅操作人员的体力劳动强度显著降低,同时,还将人的相关制造经验和知识转移到信息系统和物理系统(主要是信息系统),有效提高了人的知识传承和利用效率。

制造系统从传统的“人-物理系统”在向上述“人-信息-物理系统”的演变进程中,信息系统的引入使得制造系统同时增加了“人-信息系统”(HCS)和“信息-物理系统”(CPS)。HCS 使得人的部分感知、分析决策与控制功能向信息系统复制迁移;同时,CPS 系统逐渐实现物理系统和信息系统在感知、分析、决策、控制及管理等方面的深度融合;信息系统、物理系统共同代替人类完成更多的体力和脑力劳动,进而形成基于 HCPS 的新型制造系统。

(三) 新一代智能制造系统与 HCPS2.0

智能制造的根本目标是要实现产品及其生产和服务过程的最优化,获得高效、优质、柔性、敏捷、低耗、宜人等效果。为此,智能制造需要解决方方面面、各种各样的问题(产品设计、工艺设计、过程控制、生产管理、健康保障等),这些问题本质上都可以看成是各种各样的最优决策问题,这类

问题的解决取决于建立有效的决策模型和准则。但由于制造系统和制造过程的复杂性,建立有效的决策模型和准则往往极为困难,它不仅可能要用到方方面面的人类已经掌握的知识规律,而且还可能涉及众多目前尚未掌握或难以描述的知识规律。在第一代和第二代智能制造的信息系统中,模型和准则是在系统研发过程中由研发人员通过综合利用相关理论知识、专家经验、实验数据等来建立并通过编程等方式固化到信息系统中,由此建立的模型和准则一方面受限于研发人员的知识、能力和研发条件;另一方面在系统使用过程中也往往是固定不变的,难以适应系统内部和外部状态的动态变化。因此,第一代和第二代智能制造系统仍不能有效实现产品、生产和服务过程最优化这一根本目标,需要发展新一代智能制造系统。

与第一代和第二代智能制造系统相比,新一代智能制造系统最本质的特征是其信息系统扩充了学习认知功能,使系统不仅具有强大的感知、计算分析与控制能力,更具有学习提升、产生知识的能力(见图 2)。新一代智能制造系统的“知识库”是由系统研发人员和智能学习认知系统共同建立,它不仅包含系统研发人员所能获取的各种知识,同时还包含研发人员难以掌握或难以描述的知识规律,而且在系统使用过程中还可通过自学习而不断成长和完善。

新一代智能制造系统的核心关键技术是新一代人工智能技术,是通过大数据智能、人机混合增强智能、群体智能等使系统具有学习发现有关知识规律并有效实现人机协同的能力。这种新一代智能制造系统可有效建立与实际产品和生产过程高度一致的模型,不仅可对产品及其生产过程进行优化,还可对产品的服务和维护进行优化,即可对整个产品生命周期进行优化。目前,作为新一代人工智能技术的典型代表,基于大数据和深度学习的大数据智能技术,已显示出巨大潜力。

从第一代和第二代智能制造系统向新一代智能制造系统的演变实质上也就是从 HCPS 向 HCPS2.0 的演变,本质的变化是 HCPS2.0 的信息系统被赋予了认知和学习能力,即从“授之以鱼”变成了“授之以渔”,可极大提高制造系统处理复杂性、不确定性问题的能力,有效实现产品及其生产和服务过程的最优化。

新一代智能制造进一步突出了人的中心地位，在 HCPS2.0 中，人类智慧的潜能将得以极大释放。一方面，新一代人工智能通过将人的作用或认知模型引入到系统中，人和机器之间能够相互理解，形成“人在回路”的混合增强智能，人机深度融合将使人的智慧与机器的智能相互启发性地增长；另一方面，知识型工作自动化将使人类从大量体力劳动和脑力劳动中解放出来，人类可以从事更有价值的创造性工作。

三、新一代智能制造的系统集成

新一代智能制造是一个基于 HCPS 的大系统，主要由智能产品、智能生产、智能服务、工业互联网和智能制造云集合而成。其中，智能产品是主体，智能生产是主线，以智能服务为中心的产业模式变革是主题，并构成三大功能系统；智能制造云、工业互联网是支撑智能制造的重要基石，并构成两大支撑系统 [1]。

新一代智能制造系统集成的主要特征：一是“大集成”，新一代智能制造系统由两大支撑系统组成的连接、通信、计算控制与安全体系，使得三大功能系统实现高度集成化，各环节的企业可以在系统集成平台上实现信息共享、系统集成与资源优化配置；二是“大闭环”，在新一代人工智能技术的引领下，制造的三大功能系统的每一个智能活动环节都具有“感知-分析决策-执行”的闭环特征；三是“大智能”，人-机器-企业之间能够在互联互通的基础上，灵活运用集中智能、分布智能与群体智能，实现快速响应和优化决策 [6]。

新一代智能制造的三大功能系统和两大支撑系统，是发展新一代智能制造的五大重点任务，各自都要以自身先进技术为本，以 HCPS 作为理论基础，深度融合新一代人工智能技术，并形成各自系统在未来 20 年的发展目标和技术路线。

四、新一代智能制造的愿景

新一代智能制造的广泛应用将把新一轮工业革命推向高潮，使得整个制造业以至整个人类社会的面貌均朝着以人为本、智能、和谐、绿色、安全的方向发生革命性变化。

（一）给制造业带来的革命性变化

第一，制造知识的产生、获取、应用和传承的方式与效率将发生根本性变化，制造业创新与服务能力极大提高。通过融合新一代信息技术尤其是人工智能技术，新一代智能制造的制造系统与工具将具备越来越强大的能力特别是机器学习能力，致使制造知识的产生、获取、应用和传承方式与效率均发生根本性变化，同时人类智慧与创新潜能也将得以极大释放，由此将使制造业创新与服务能力极大提高。

新一代智能制造给制造业带来的这一变化是最根本性的，对于发展中国家尤为重要，因为这将有助于解决工业化时间短、工业知识积累少所带来的一系列问题，如高精尖基础工艺、基础材料、基础零部件和装备、技术质量基础等方面的问题，同时也将有效解决广大企业所面临的高技能人才缺乏、创新能力不强等方面的问题。

第二，产品高度智能化、宜人化。产品创新是根本，新一代智能制造将给制造业产品创新带来无限空间和可能，高度智能化与宜人化将成为未来产品的最重要特征。例如，产品可以方便地充分理解人的意图，以至达到“所思即所得”的境界；如果需要，产品也可对自身状态和外部环境进行监测，在整个生命周期内随时确认自身的损耗程度，并动态响应环境变化，还可不断对自身性能进行学习提升，确保在使用过程中发挥最佳作用。

第三，产品制造过程高质、柔性、高效、低耗。在新一代智能制造环境下，各种高度智能化的系统和工具手段将全面支持制造企业的所有功能，质量、成本、效率等竞争要素显著提升。

在产品的设计方面，未来的新一代智能化设计系统将拥有强大且可不断自主学习完善的知识库支持，可对产品性能、可靠性、寿命、成本等进行准确建模与仿真分析，这不仅可极大提高产品设计的效率与质量以快速响应市场需求，同时将有效减轻产品设计人员的负担，而且使用户也可方便参与设计过程甚至自主设计所偏好的产品，大大提高产品创新的效率。

在产品生产方面，一方面，信息互联互通将从企业内部延伸至全供应链和全产业链；另一方面，新一代人工智能技术将攻克复杂系统（制造装备、车间、企业、全供应链）的精确建模、实时优化决

策等关键技术, 解决制造系统全生命周期的高可靠性、高精确性、高适应性等难题, 形成以知识驱动并能自我学习完善的智能工厂与智慧企业, 实现产品制造的高质、柔性、高效与绿色。

第四, 制造业的产业模式和产业形态将发生革命性的变化。一是服务型制造业快速发展; 二是规模定制化生产将得到广泛应用, 特别是在消费品制造领域将得以普及; 三是生产性服务业的大发展, 并与制造业共同形成新型大制造。

(二) 给人类社会带来的革命性变化

第一, 人类的工作生活环境和方式将发生根本性变化。一方面, 人与机器的分工将产生革命性变化, 人类可更多地从事创造性的和宜人环境下工作, 而将危险、枯燥、繁重、低附加值的工作和其他不愿意从事的工作交给机器去做; 另一方面, 制造业生产的各种高度智能化宜人化产品将遍及人类生活与经济社会发展的方方面面, 人类的工作生活环境和方式将朝着以人为本的方向迈进。

第二, 资源环境等问题极大缓解。新一代智能制造将有效减少资源与能源的消耗和浪费, 同时对于我国实现产业结构调整优化、化解产能过剩等问题起到重要作用, 持续引领我国经济健康稳定发展。

五、结语

制造业从传统制造向智能制造发展的过程是

从原来的“人-物理”二元系统进入新的“人-信息-物理”三元系统的过程。HCPS 揭示了智能制造发展的基本原理, 是支撑新一代智能制造发展的理论基础, 指明了智能制造的发展趋势。未来 20 年, 要分阶段推进智能制造各个功能系统和支撑系统的技术进步和产业化进程; 特别要抓紧探索、研究与试点示范, 争取 3~5 年内在若干方向上实现重点突破, 形成若干具有标志性意义的新一代智能制造示范性成就, 真正引领和推动新一轮工业革命。

参考文献

- [1] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11-20.
- [2] 李杰, 邱伯华, 刘宗长, 等. CPS: 新一代工业智能 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
Li J, Qiu B H, Liu Z C, et al. CPS: The new generation of industrial intelligence [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017.
- [3] Pan Y H. Heading toward artificial intelligence 2.0 [J]. *Engineering*, 2016, 2(4): 409-413.
- [4] 习近平. 习近平谈治国理政(第一卷) [M]. 北京: 外文出版社, 2014.
Xi J P. Xi Jinping: The governance of China (I) [M]. Beijing: Foreign Languages Press, 2014.
- [5] Li B H, Hou B C, Yu W T, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: A review [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(1):86-96.
- [6] 国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 智能制造 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
National Manufacturing Strategy Advisory Committee, The CAE Center for Strategic Studies. Intelligent manufacturing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.