



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
AI Energizes Process Manufacturing—Perspective

## 工业人工智能驱动的流程工业智能制造

杨涛<sup>a,\*</sup>, 易新蕾<sup>b</sup>, 卢绍文<sup>a</sup>, Karl H. Johansson<sup>b</sup>, 柴天佑<sup>a</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China

<sup>b</sup> School of Electrical Engineering and Computer Science, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 100 44, Sweden

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 18 January 2021

Revised 20 March 2021

Accepted 6 April 2021

Available online 29 July 2021

#### 关键词

工业人工智能

工业互联网

智能制造

流程工业

### 摘要

基于对流程工业特点和运行现状的分析,以及全球智能制造产业的发展,本文提出了一种流程工业智能制造新模式,即工业人工智能、工业互联网与流程工业的深度融合。本文分析了流程工业现有的由企业资源规划、制造执行系统和过程控制系统组成的三层结构的发展现状,并对流程工业所采用的决策、控制和运行管理进行了总结。在此基础上,阐述了流程工业智能制造的含义,提出了人机合作的智能优化决策系统和智能自主控制系统的愿景。最后,分析了实现流程工业愿景功能所需要攻克科学挑战和关键技术。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

制造业主要有两种类型:一种是离散工业,包括机械设备制造业;另一种是流程工业,以石油化工、冶金、建材、能源等重要原材料工业为代表。制造业是国民经济必不可少的基础产业,是支撑经济持续增长和世界经济的重要力量。离散制造是一个物理过程,产品可以单独计算,因此容易将制造过程数字化。离散制造更强调满足个性化的需求和柔性制造,但是,流程工业的生产经营方式具有较为明显的不容易数字化的特点。例如,原料的选取往往不同,而生产过程通常也会涉及不同的物理以及化学反应,涉及的机理较为复杂。对于流程工业来说,生产过程是连续的,不能停止的,过程中任何一个环节出错,都会直接影响整条生产线以及成品的质量。由于流程工业过程

中对原材料、生产设备、工艺参数等无法实时测量或检测。流程工业的上述特点表现为测量难、建模难、控制难和优化决策难。

经过几十年的发展,我国的制造行业已经有了跨越式进步,整体行业规模迅速提高,整体实力不断变强。目前,中国是世界上最齐全、规模最大的制造业国家,也是世界上唯一一个在联合国工业分类中包含所有工业类别的国家[1–2]。我国制造业面临的主要问题是能耗高、资源消耗高、产品附加值低、环境污染严重。因此,要实现制造过程的高效化与绿色化。高效化的涵义是在市场或原材料可能发生变化的情况下,实现整个生产过程的产品质量、产量、成本、消耗等综合生产指标的优化调控。高效化会带来产品的高绩效和高附加值,同时使企业的利润最大化。绿色化指的是对能源和资源的有效利用,通过尽

\* Corresponding author.

E-mail address: [yangtao@mail.neu.edu.cn](mailto:yangtao@mail.neu.edu.cn) (T. Yang).

可能降低能源和资源的消耗，实现污染物零排放以保护环境[3-7]。

智能制造已成为提升制造业整体竞争力的核心技术，人工智能（Artificial intelligence, AI）技术已成为制造业发展的重要趋势。例如，通用人工智能技术首次被证明适用于复杂工业场景中的诊断和预测问题[8-9]。人工智能技术加速了智能制造的发展[10-13]。智能制造的发展趋势如图1所示[14]。

以机械技术为基础的蒸汽机和反馈调速器的出现引发了第一次工业革命；电力和基于电气技术的控制系统的出现引发了第二次工业革命；可编程逻辑控制器（Programmable logic controller, PLC）和集散控制系统（Distributed control system, DCS）的出现引发了第三次工业革命。从这三次产业革命中可以看出，发展高效的新能源和信息技术是改变工业生产方式和提高工业竞争力的关键。当蒸汽和电力成为能源时，蒸汽机和发电设备就必须使用控制系统。反馈控制技术使机械调速器可以控制蒸汽动力机械缝纫机的速度，而反馈控制技术和逻辑控制技术使电气控制系统可以控制电动屠宰场输送带的稳定运行。通过计算机技术和控制技术的紧密结合而发明的PLC和DCS技术，极大提高了大规模生产线的自动化程度。

当前，随着人工智能、移动互联网、云计算、工业互联网等技术的快速发展，我们正处于第四次工业革命时期。发达国家实施工业化战略，加强制造业创新，以重塑制造业新的竞争优势。一些发展中国家也在加快规划和战略，积极参与全球产业劳动力再分工，以在新一轮产业竞争中寻求有利地位[7,15]。发达国家利用其在信息技术领

域的巨大优势，加快建立智能制造业。例如，2016年10月，美国国家科学技术委员会制定的《国家人工智能研发战略计划》指出，人工智能可以用于改善制造流程，提高整个产品制造过程的灵活性[16]。2018年5月，美国白宫举办了美国工业人工智能峰会，参会人员策划组织了特定行业的会议，分享了行业领袖通过使用人工智能技术增强美国劳动者劳动能力的新方法[17]。美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）也表示，人工智能有潜力改变美国工业的各个方面，并为先进制造业创造新希望[18]。2020年8月，美国国家科学基金会人工智能研究院发布了一个新的资助机会，重点关注八个主题，其中动态系统人工智能研究所是其中之一。动态系统人工智能研究所支持基础人工智能、机器学习理论、算法，以及实时传感、学习、决策和预测的相关工程和科学研究及教育，以引领安全、可靠、高效的人工智能发展[19]。美国2020财年和2021财年的研发预算强调，为了确保美国在科学技术发现和 innovation 处于全球领先，应优先考虑智能和数字化制造，尤其是针对机器学习和人工智能实现的系统[20-21]。在工业4.0之后，2017年9月，德国启动了“学习系统”的开发和应用，以确保未来工作和生产更加灵活和高效[22]。2018年11月，德国联邦政府宣布了人工智能战略，强调人工智能是促进工业过程智能监控、管理和控制的关键组成部分及必不可少的驱动因素，从而将工业4.0提升到下一个水平[23]。此外，英国公布《英国工业2050战略》，日本提出《i-Japan 战略2015》，韩国推出《制造业创新3.0战略》。面对第四次工业革命带来的全球产业竞争的新调整，中国工程院“新一代人工智能引领下的智能

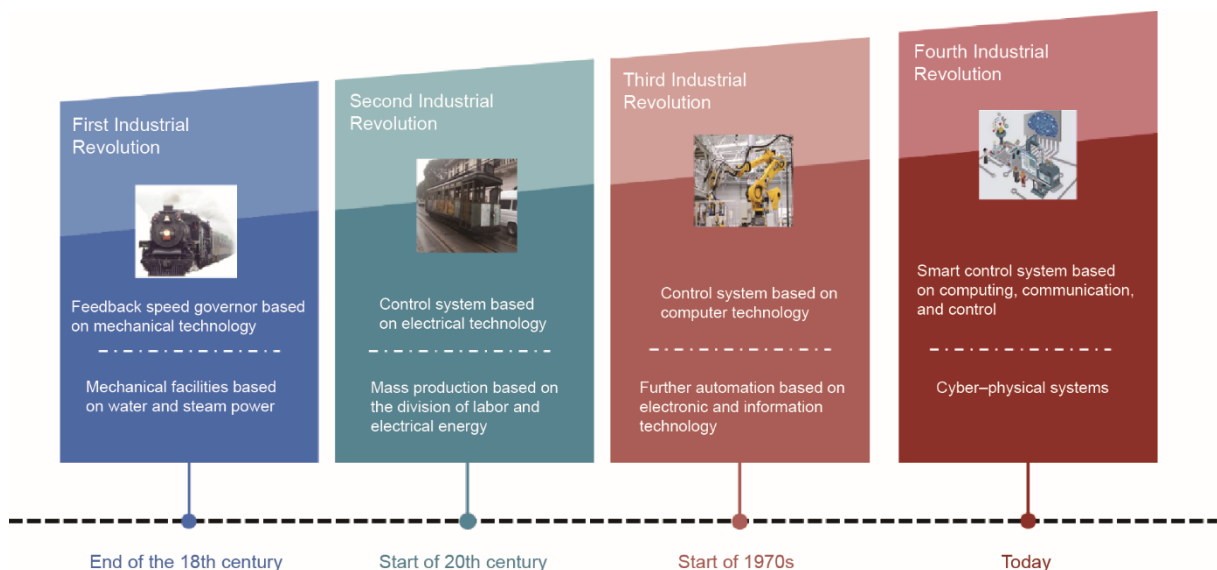


图1. 第一、二、三、四次工业革命路线图（源自文献[14]）。

制造研究”课题组发表题为《中国智能制造发展战略研究》的研究报告。该报告提出了标志我国智能制造进入第二阶段（2025—2035）的新一代智能制造是使中国的智能制造技术和应用水平走在世界前列[24-25]。

智能制造成为提升制造业整体竞争力的核心技术。智能制造是中国实现制造强国的主攻方向[7,26]。为了实现流程工业的跨越式发展（即从较低的技术水平跃升至较高的技术水平，同时跳过中级水平），需要将智能制造与流程工业的特点和目标相结合；充分利用大数据，将人工智能、移动互联网、云计算、建模、控制、优化等信息技术与流程工业物理资源深度融合；开发各种新功能来实现智能制造的目标[13,27-30]。为了使工业人工智能和工业互联网在流程工业智能制造中发挥不可替代的作用，加速我国制造业数字化、网络化、智能化的发展进程，本文以流程工业智能制造生产全流程为应用场景，阐述了智能制造对流程工业的意义，提出了新的研究方向和研究方法。

## 2. 流程工业生产全流程决策、控制、运行管理现状分析

流程工业生产全流程的决策、控制和运行管理现状如图2 [13]所示。流程企业普遍采用由企业资源规划（enterprise resource planning, ERP）、制造执行系统（manufacturing execution system, MES）和过程控制系统（process

control system, PCS）组成的三层结构。企业经理利用ERP系统得到生产过程各设备的参数，然后根据自身积累的经验和知识，对产品综合生产指标（产品质量、能耗和成本等）的目标值范围做出决定。生产部门经理利用MES得到生产信息，然后通过自己积累的专家经验来决定生产制造全流程的生产指标目标值范围。运行管理者和工艺工程师通过PCS获得运行条件，通过感官（即视觉、听觉和触觉）获得具体信息，再根据自己积累的经验和知识做出决定，以反映实际生产过程中产品质量、能耗和成本等运行指标的目标值范围，然后操作人员根据自己的经验和知识决定PCS的控制命令。PCS通过控制整个制造和生产过程，使受控过程的输出跟踪控制指令，以提高产品的运行指标并且保证整条生产线的生产指标在期望的目标值范围内[31-32]。

虽然大部分企业已经部署了三层架构系统或MES和PCS的两层架构系统，但这些系统主要是用来实现信息集成和管理功能[32]。企业目标（即利润、环境保护等）、资源规划与调度、运行指标、生产指令、控制指令等，仍由知识工作者根据其知识和经验决策。然而，知识工作者无法实现企业目标、生产计划与调度的一体化优化决策，也无法实现ERP与MES的无缝集成与优化。图3 [13]描绘了流程工业生产全流程的决策、控制和运行管理，可以将其视为人-信息-物理系统（human-cyber-physical system）[33]。操作员通过信息系统取得生产信息，并通过人的视觉、听觉和触觉获得多源异构的生产信息。再利用大脑的

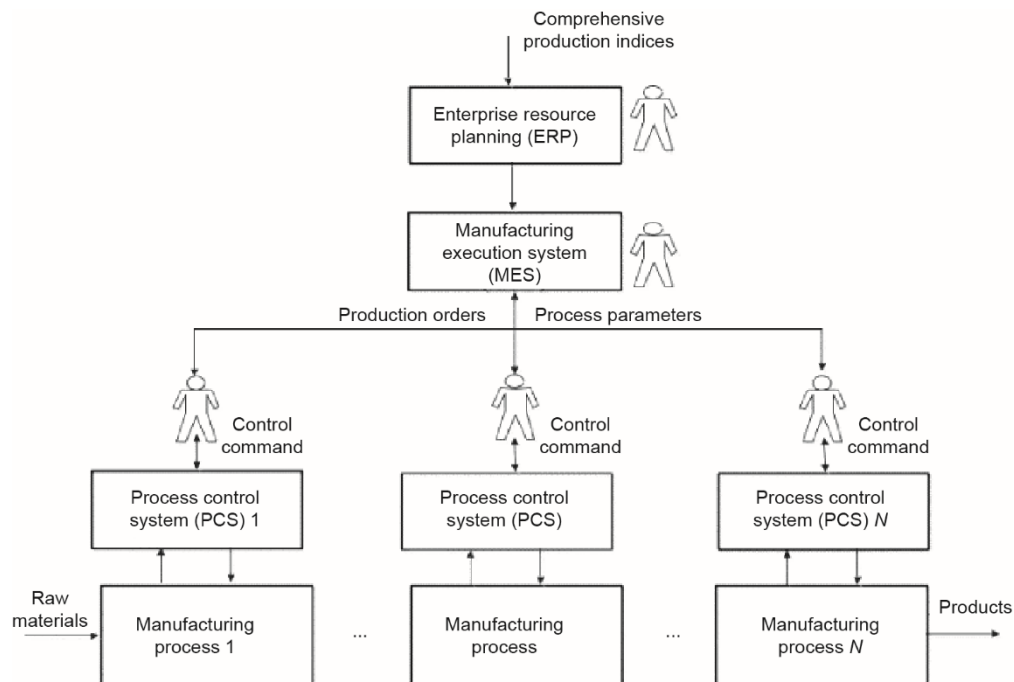


图2. 流程工业生产全流程的决策、控制和运行管理现状（源自文献[13]）。

学习、认知、分析、决策能力，结合自身的经验和知识，对综合生产指标、整个制造和生产过程的生产指标、操作指标和控制系统指令进行决策。

由于人无法及时准确地感知动态变化的运行条件，因此很难实现整个制造和生产过程的全局优化[34]。而且，人类行为已经成为制造流程发展的瓶颈[35]。总的来说，当前我国流程工业的重点是关注于工业设备物料转化过程的自动化和生产过程、运行管理和企业管理的信息化。而当前我国流程工业存在的主要问题是在工艺设计、资源规划、生产过程运行管理等方面，对知识工作的自动化和智能化缺乏研究。

移动互联网、边缘计算、云计算和第五代移动通信技术(5G)的发展催生了工业人工智能和工业互联网的出现。工业人工智能的本质是将人工智能技术与特定的工业场景相结合，实现设计模式创新、智能生产决策、资源优化配置等创新应用。工业人工智能赋予工业系统自感知、自学习、自执行、自决策、自适应的能力，使其能够适应复杂多变的工业环境并完成多样化的工业目标和任务，最终提高生产效率、产品质量和设备性能[36]。工业互联网为企业提供了获取工业大数据的机会，带动工业人工智能技术的发展以及科研模式和方法的变革[37]。比如CPS(cyber physical system)和会聚研究等新方法的出现[38]，促进了工业过程制造的数字化、网络化和智能化。第四次工业革命将实现制造业知识工作的自动化和智能化[4,13,19,33]。

### 3. 智能制造对流程工业的意义和前景

流程工业智能制造是一种以实现对整个制造、生产过程的管理和决策，以及智能优化和智能自主控制为特征的制造模式。智能制造的目标是使企业的制造流程“绿色化”和

低碳化，并提高生产效率。如图4[13]所示，将操作者的知识工作变得自动化，将控制系统和制造过程转变为智能自主控制系统，使企业管理者和生产管理者的知识工作智能化。ERP和MES转变为人机合作的智能管理决策系统，将企业原有的ERP、MES、PCS三层结构转变为人机合作的智能管理决策系统和智能自主控制系统两层结构，如图5[13]所示。如图6[13]所示，将整个制造和生产过程的决策、控制与运行管理转化为CPS，并将生产制造操作员以及知识工作者的知识工作变得自动化和智能化。CPS中的知识工作者是计划者、管理者和决策者[34]。

人机合作的智能管理决策系统主要由智能优化决策、虚拟制造过程、工况识别与自优化控制三个子系统组成[14,34]。该智能管理决策系统的预期功能如下：

- (1) 感知市场信息、生产情况和制造过程的实时运行状况；
- (2) 以企业高效化与绿色化为目标，实现企业综合生产指标、计划调度指标、制造生产全流程生产指标、运行指标、生产指标、控制指令的综合优化决策；
- (3) 实现对决策过程动态性能的远程移动可视化监控；
- (4) 通过自学习和自优化决策，实现人与智能优化决策系统之间的协同，使决策者能在动态变化的环境中准确优化决策。

智能自主控制系统主要由三个子系统组成：智能运行优化、高性能智能控制、运行状态识别和自优化控制。该智能自主控制系统的预期功能如下：

- (1) 智能感知生产条件的动态变化；
- (2) 以优化运行指标为目标，对控制系统的设定值进行自适应决策；
- (3) 智能跟踪控制系统设定值的变化具有高动态性能，将实际运行指标控制在目标值范围内；

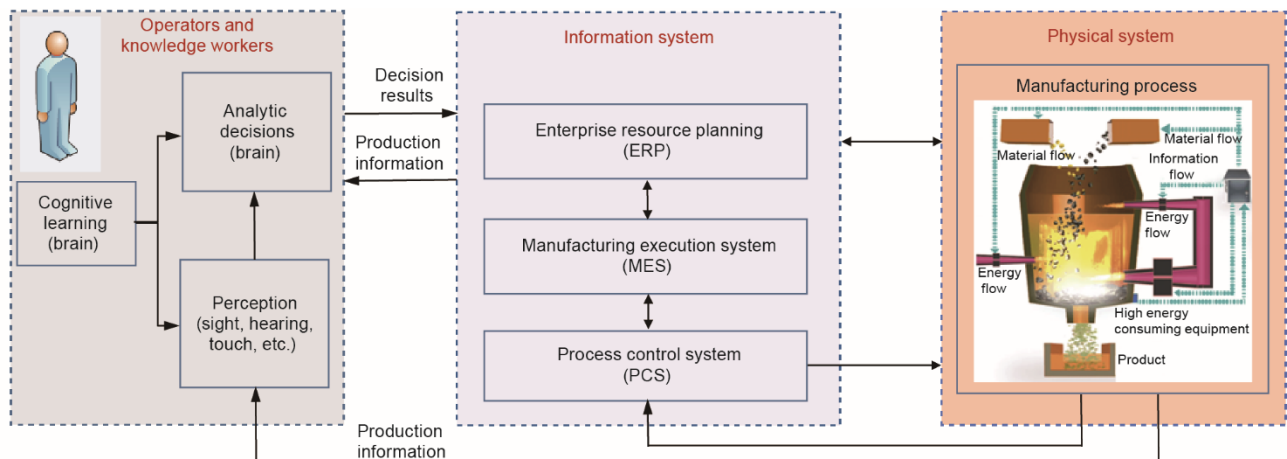


图3. 人-信息-物理系统 (源自文献[13])。

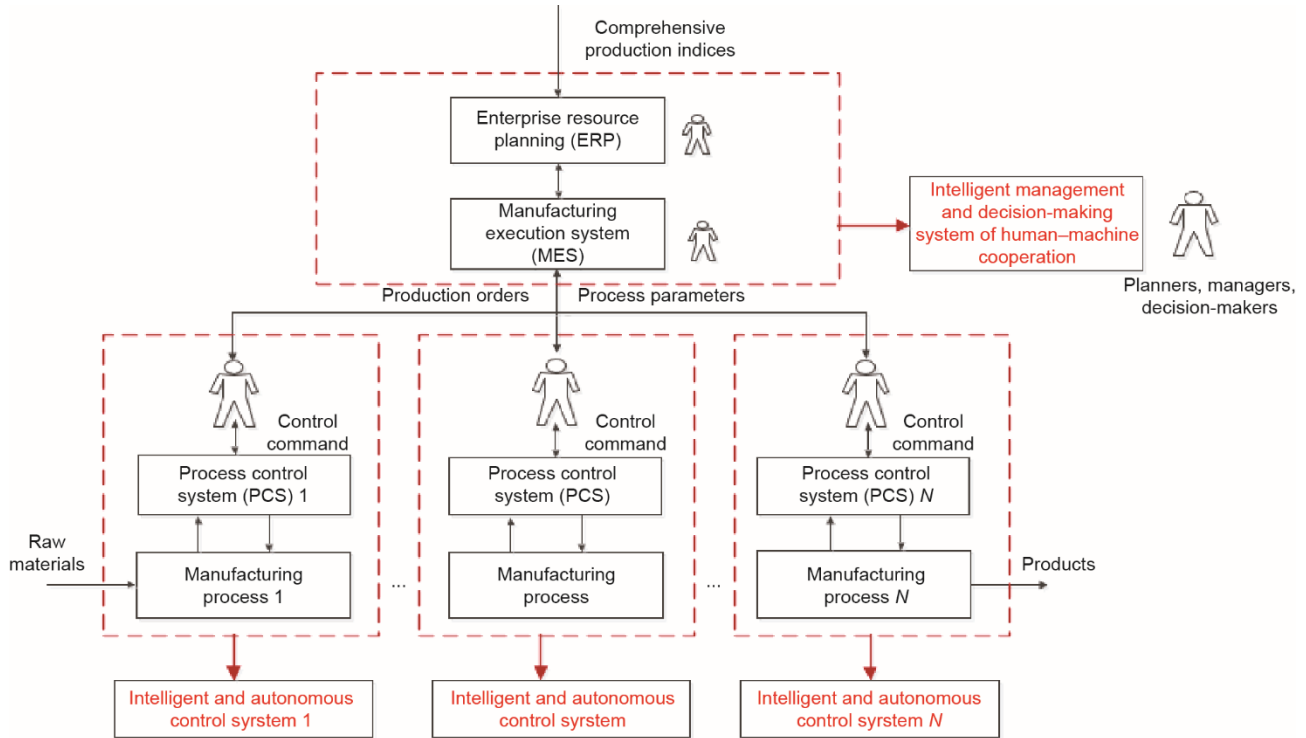


图4. 智能制造和生产过程（源自文献[13]）。

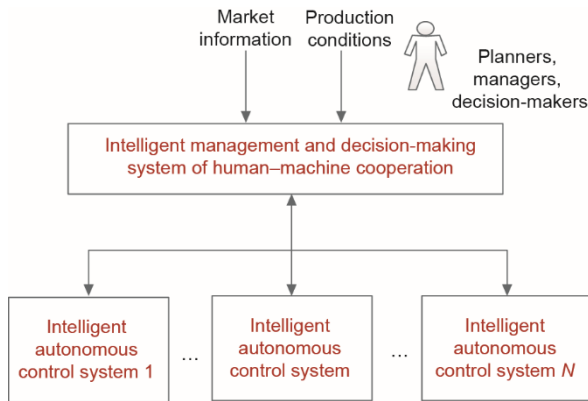


图5. 制造过程由三层结构转变为智能的两层结构（源自文献[13]）。

(4) 实现实时远程监控和移动监控, 预测和排除异常运行工况, 使系统安全、优化运行;

(5) 配合构成整个生产过程的其他工业过程的智能自主控制系统, 实现整个生产过程的全局优化。

#### 4. 科学挑战与关键技术

流程工业生产全流程的智能化对自动化科学技术中基于数学模型或因果数据的建模、控制和优化提出了挑战。工业人工智能和工业互联网为流程工业提供了实现整个生产过程智能化的新方法和新技术。

虽然工业人工智能的定义尚不明确且随着时间的推移

而发生变化, 但工业人工智能研究及其应用的核心目标是实现当前工业生产活动中知识工作的自动化和智能化, 从而显著提高经济和社会效益。这些活动包括生产和过程设计、运行管理和决策过程, 制造过程和运营管理控制——目前依赖于人类感知、认知、分析决策能力、经验和知识的活动。

工业人工智能主要是利用工业大数据, 开发用于工况识别、预测以及决策的人工智能算法和人工智能系统; 并设计用于智能决策和智能化管控系统的软件, 以补充和提高知识工作者在生产和设计过程中的能力。此外, 人工智能算法、运算能力和人机交互也是不容忽视的问题[39]。

工业互联网的出现, 大数据、CPS、互联网等信息技术的发展, 以及对先进制造和智能制造的重大需求。2012年10月, 美国通用电气在题为“*Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines*”白皮书中提出了工业互联网的概念。2011年1月, 德国工业科学研究联盟提出工业4.0战略。2011年11月, 工业4.0战略被列入《2020年高新科技战略》。近期, 美国和德国都制定了结合人工智能技术发展工业互联网的战略。2019年10月18日, 国家主席习近平向在辽宁省沈阳市举行的工业互联网全球峰会开幕式致贺信, 习近平在信中表示: 当前, 全球新一轮科技革命和产业革命加速发展, 工业互联网技术不断突破, 为各国经济创新发展注入了新动能, 也为促进全

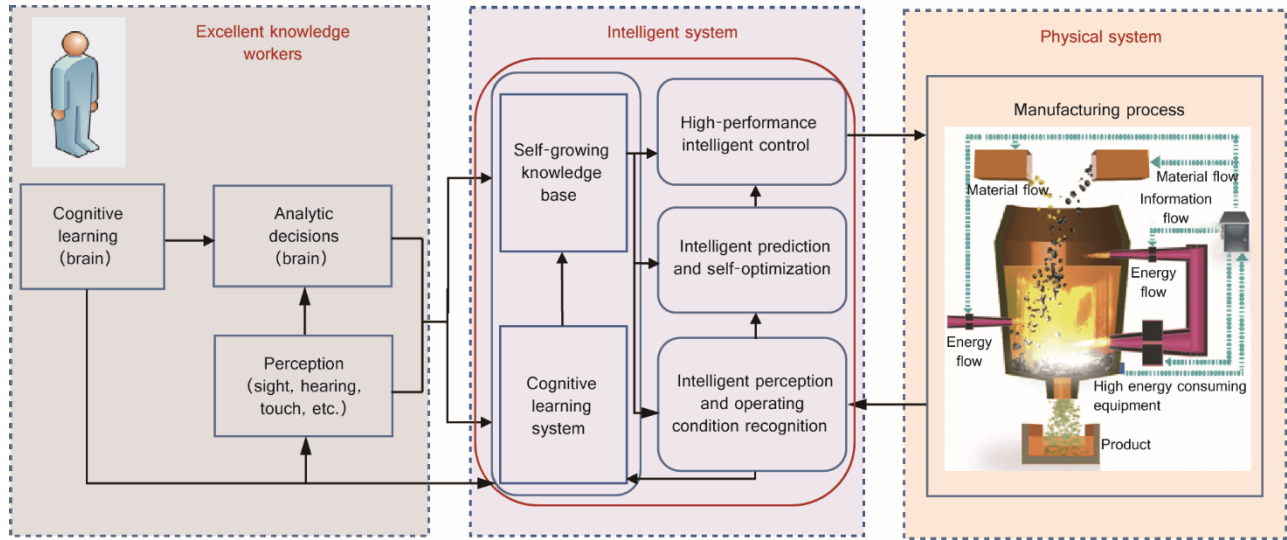


图6. 制造和生产过程的信息物理系统（源自文献[13]）。

球产业融合发展提供了新机遇。中国高度重视工业互联网创新发展，愿同国际社会一道，持续提升工业互联网创新能力，推动工业化与信息化在更广范围、更深程度、更高水平上实现融合发展[40]。这一声明指明了中国工业互联网高质量发展的方向。要使工业互联网成为推动我国制造业高质量发展的强大动力，开展工业互联网高质量发展的模式和路径研究至关重要。

结合我国流程工业发展现状，数字化、网络化、智能化需求以及工业人工智能和工业互联网的发展目标，我们提出需要解决以下科学问题：

- (1) 基于动态系统建模与深度学习相结合的复杂工况识别与反馈控制；
- (2) 基于机理分析与工业大数据分析相结合的动态特性、运行、决策知识挖掘；
- (3) 基于预测、反馈和强化学习相结合的人机协同优化决策；
- (4) 多冲突目标、多约束、多时间尺度的智能优化决策与控制一体化技术。

为了解决这些科学问题，有必要采用CPS和会聚研究的思想[37]。会聚研究是一种以问题驱动为特征的新的研究范式和思维方式。会聚研究解决的问题是具有挑战性的科学研究问题或涉及社会需求的重大挑战，需要跨学科的合作研究。为了解决这些复杂的问题，需要各学科进行交叉学习，以达到各学科共同创新的新框架。将科学的方法以及技术相融合是解决该难题的最佳策略。团队科学正在成为一种更典型的研究模式[41-42]。为此，我们提出以下亟待解决的关键技术：

- (1) 复杂工业环境下运行工况的多尺度多源信息的智

能感知与识别；

- (2) 复杂工业环境下基于5G的多尺度多源信息快速可靠的传输技术；
- (3) 系统辨识与深度学习相结合的复杂工业系统智能建模、数字孪生与可视化技术；
- (4) 关键工艺参数和生产指标的预测与追溯；
- (5) 复杂工业系统的智能自主控制技术；
- (6) 人机合作的智能优化决策方法；
- (7) 智能优化决策与控制一体化技术；
- (8) “端-边-云”协同实现工业人工智能算法的技术。

## 5. 总结

为了实现流程工业的高端化、绿色化、智能化，需要将工业人工智能、工业互联网与流程工业领域知识深度融合，开发人工智能算法和人工智能自主系统，以补充和提升知识型工作者的能力。本文总结了现有流程工业整个生产过程的决策、控制和运行管理的不足，阐述了流程工业智能制造的含义，并提出了流程工业智能优化制造的愿景。结合我国流程工业的发展现状和数字化、网络化、智能化的需要，提出了流程工业智能制造面临的科学问题和关键技术。

## 致谢

本研究得到国家自然科学基金(61991400、61991403、61991404)、中国工程咨询研究院项目(2019-ZD-12)、辽宁省2020年科技重大专项(2020JH1/10100008)的支持。作者感谢徐磊的有益讨论。

## Compliance with ethics guidelines

Tao Yang, Xinlei Yi, Shaowen Lu, Karl H. Johansson, and Tianyou Chai declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Liu K. [70 years of self-dependence, hard struggle: China has become the largest manufacturing country with all industrial categories]. *Guangming Daily*. 2019 Sep 21. Sect. 10:(col. 1). Chinese.
- [2] Qian F, Zhong W, Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry. *Engineering* 2017; 3 (2): 154–60.
- [3] Ge W, Guo Li, Li J. Toward greener and smarter process industries. *Engineering* 2017;3(2):152–3.
- [4] Gui W, Chen X, Sun Y, Xie Y, Zeng Z. Knowledge-driven process industry smart manufacturing. *Sci Sin Inf* 2020;50(9):1345–60.
- [5] Mao S, Wang B, Tang Y, Qian F. Opportunities and challenges of artificial intelligence for green manufacturing in the process industry. *Engineering* 2019; 5(6):995–1002.
- [6] Chinese Academy of Engineering, National Natural Science Foundation of China. [Research on development strategy of big data and knowledge automation for manufacturing process]. Report. Beijing: Chinese Academy of Engineering, National Natural Science Foundation of China; 2016. Chinese.
- [7] Chai TY, Ding JL. Smart and optimal manufacturing for process industry. *Strateg Stud Chin Acad Eng* 2018;20(4):51–8.
- [8] Eager J, Whittle M, Smit J, Cacciaguerra G, Lale E. Opportunities of artificial intelligence [Internet]. Luxembourg: European Parliament; 2020 Jun [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2020/07/Opportunities-of-Artificial-Intelligence.pdf>.
- [9] Yuan Y, Ma G, Cheng C, Zhou B, Zhao H, Zhang HT, et al. A general end-to-end diagnosis framework for manufacturing systems. *Natl Sci Rev* 2020;7(2): 418–29.
- [10] Ding H, Gao RX, Isaksson AJ, Landers RG, Parisini T, Yuan Y. State of AI-based monitoring in smart manufacturing and introduction to focused section. *IEEE ASME Trans Mechatron* 2020;25(5):2143–54.
- [11] Panetto H, Weichhart G, Pinto R. Special section on Industry 4.0: challenges for the future in manufacturing. *Annu Rev Contr* 2019;47:198–9.
- [12] Yang T. Guest editorial of the special session on industrial artificial intelligence. *Acta Automatica Sin* 2020;46(10):2003–4.
- [13] Chai TY. Development direction of industrial artificial intelligence. *Acta Automatica Sin* 2020;46(10):2005–12. Chinese.
- [14] Chai TY. Industrial process control systems: research status and development direction. *Sci Sin Inf* 2016;46(8):1003–15. Chinese.
- [15] Lee J, Li X, Xu Y, Yang S, Sun KY. Recent advances and prospects in industrial AI and applications. *Acta Automatica Sin* 2020;46(10):2031–44.
- [16] Baru C, Daimler E, Ferguson R, Forbe N, Harder E, Ferguson R, et al. The national artificial intelligence research and development strategic plan [Internet]. Washington, DC: National Science and Technology Council, Networking and Information Technology Research and Development Subcommittee; 2016 Oct [cited 2021 Jan 11]. Available from: [https://www.nitrd.gov/pubs/national\\_ai\\_rd\\_strategic\\_plan.pdf](https://www.nitrd.gov/pubs/national_ai_rd_strategic_plan.pdf).
- [17] Summary of the White House summit on artificial intelligence for American industry [Internet]. Washington, DC: the White House Office of Science and Technology Policy; 2018 May 10 [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2018/05/Summary-Report-of-White-House-AI-Summit.pdf>.
- [18] Statement on artificial intelligence for American industry [Internet]. Washington, DC: National Science Foundation; 2018 May 10 [cited 2021 Jan 11]. Available from: [https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=245418](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=245418).
- [19] Important notice—change in individual eligibility restrictions [Internet]. Washington, DC: National Artificial Intelligence (AI) Research Institutes; 2020 Sep 21; [cited 2021 Jan 11]. Available from: [https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=301176&org=NSF](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=301176&org=NSF).
- [20] yearFiscal 2020 administration research and development budget priorities: memorandum for the heads of executive departments and agencies [Internet]. Washington, DC: Executive Office of the President; 2018 Jul 31; [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/07/M-18-22.pdf>.
- [21] yearFiscal 2021 administration research and development budget priorities: memorandum for the heads of executive departments and agencies [Internet]. Washington, DC: Executive Office of the President; 2019 Aug 31; [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/08/FY-21-RD-Budget-Priorities.pdf>.
- [22] Gu G. [Germany: artificial intelligence keeps the pace with Industrial 4.0]. *Science and Technology Daily*. 2018 Apr 10; Sect. 2. Chinese.
- [23] The Federal Government's artificial intelligence strategy [Internet]. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy; [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/EN/Standardartikel/artificial-intelligence-strategy.html>.
- [24] The Research Group for Research on Intelligent Manufacturing Development Strategy. Research on intelligent manufacturing development strategy in China. *Strateg Stud Chin Acad Eng* 2018;20(4):1–8.
- [25] Zhou Ji, Li P, Zhou Y, Wang B, Zang J, Meng L. Toward new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2018;4(1):11–20.
- [26] Chai TY, Ding JL, Gui WH, Qian F. Research on the development strategy of big data and manufacturing process knowledge automation. Beijing: Science Press; 2019. Chinese.
- [27] Ding JL, Yang CE, Chen YD, Chai TY. Current status and prospects of intelligent optimization decision-making systems for complex industrial processes. *Acta Automatica Sin* 2018;44(11):1931–43. Chinese.
- [28] Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data. *Nature* 2017; 544 (7648):23–5.
- [29] Cyber – physical systems, program announcements and information [Internet]. Washington, DC: National Science Foundation; 2009 Feb 27 [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://www.nsf.gov/pubs/2008/nsf08611/nsf08611.pdf>.
- [30] Chinese Association of Automation. [Automation discipline development roadmap]. Beijing: China Science and Technology Press; 2020. Chinese.
- [31] Chai TY. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories. *Acta Automatica Sin* 2009; 35 (6): 641–9.
- [32] Chai TY, Jin YH, Ren DX, Shao HH, Qian JX, Li P, et al. Contemporary integrated manufacturing system based on three-layer structure in process industry. *Control Eng China* 2002;9(3):1–6. Chinese.
- [33] Zhou Ji, Zhou Y, Wang B, Zang J. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2019; 5 (4):624–36.
- [34] Chai TY. Artificial intelligence research challenges in intelligent manufacturing processes. *Bull Natl Nat Sci Found China* 2018;32(3):251–6.
- [35] Gil Y, Greaves M, Hendler J, Hirsh H. Amplify scientific discovery with artificial intelligence. *Science* 2014;346(6206):171–2.
- [36] [Industrial intelligence white paper] [Internet]. Beijing: Industrial Internet Industry Alliance; 2020 Apr 26 [cited 2021 Jan 11]. Available from: [https://www.miit.gov.cn/ztzl/rdzt/gylhw/cgzs/art/2020/art\\_e1842c433fce43e39a45ce96be50213a.html](https://www.miit.gov.cn/ztzl/rdzt/gylhw/cgzs/art/2020/art_e1842c433fce43e39a45ce96be50213a.html). Chinese.
- [37] Yuan Ye, Tang X, Zhou W, Pan W, Li X, Zhang HT, et al. Data driven discovery of cyber physical systems. *Nat Commun* 2019;10(1):4894.
- [38] Convergence research at NSF [Internet]. Washington, DC: National Science Foundation; 2020 [cited 2021 Jan 11]. Available from: <https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/index.jsp>.
- [39] Dai Q. [Some thoughts on artificial intelligence computing capabilities, algorithms, and testing]. *Chin Assoc Artif Intell News* 2020;10(11):1–4.
- [40] Xi sends congratulatory letter to Industrial Internet Global Summit [Internet]. Beijing: Xin Hua Net; 2019 Oct 18 [cited 2021 Jan 11]. Available from: <http://en.people.cn/n3/2019/1018/e90000-9624243.html>.
- [41] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Graduate STEM education for the 21st century. Washington, DC: The National Academies Press; 2018.
- [42] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The endless frontier: the next 75 years in science. Washington, DC: The National Academies Press; 2020.