

·“双清论坛”专题：人工智能基础理论及应用·

制造流程智能化对人工智能的挑战

柴天佑*

(东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室,沈阳 110819)

[摘要] 本文通过对两种主要制造业的特点和发展目标的分析,结合我国制造业的现状和重大需求,提出了智能制造的关键—制造流程智能化的涵义与愿景目标。在分析人工智能发展历程及其在历次工业革命中的作用的的基础上,提出了实现制造流程智能化所必须解决的科学技术难题以及对人工智能研究的挑战性科学问题。

[关键词] 制造流程;智能化;人工智能;科学问题

制造业是我国经济社会发展的支柱产业,实体经济的基石,对国内经济和社会发展做出了重要贡献。经过数十年的发展,我国制造业的生产工艺、装备及自动化水平都得到了大幅度提升,整体发展速度快,产业规模连续跨越,整体实力增长迅速,国际影响力显著提高。我国已成为世界上门类最齐全、规模最庞大的流程制造业大国。随着自动化和信息技术的发展,我国大型的制造企业大多采用企业资源计划(ERP)、制造执行系统(MES)、过程控制系统(PCS)或装备控制系统(DCS)三层结构,装备了计算机控制系统实现过程控制和装备控制,采用ERP和MES软件,实现企业信息化,来完成生产经营计划与管理、生产过程的运行操作与管理。由于工业系统的优化决策涉及多冲突目标、多冲突约束、多尺度的动态优化的世界性科学难题,当前企业的生产经营与生产制造过程运行操作的决策仍然依靠知识型工作者凭知识和经验来完成。当市场、生产条件发生变化时,决策者难以及时准确地做出决策,从而导致资源综合利用率低、产品质量低、生产成本低、能源消耗大、环境污染严重等问题。

面对第四次工业革命^[1]带来的全球产业竞争格局的新调整,为抢占未来产业竞争制高点,我国宣布实施“中国制造2025”。智能制造已成为公认的提升制造业整体竞争力的核心高技术。智能制造是我国实现制造强国的主攻方向。智能制造只有与制造业的特点与目标密切结合,将人工智能、大数据、云

计算和移动互联网、建模、控制与优化等现代信息技术与制造过程的物理资源紧密融合与协同,研发实现智能制造目标的各种新功能的智能技术系统,才可能使制造业实现跨越式发展。

本文通过对两种主要制造业的特点和发展目标的分析,结合我国制造业的现状和重大需求,提出了智能制造的关键—制造流程智能化的涵义与愿景目标。在分析人工智能发展历程及其在历次工业革命中的作用的的基础上,提出了实现制造流程智能化所必须解决的科学技术难题以及对人工智能研究的挑战性科学问题。

1 两种主要类型的工业生产的特点和发展目标

制造业包括以机械装备制造等为代表的离散工业和以石化、冶金、建材等重要原材料工业和电力等能源工业为代表的流程工业两种主要类型。

流程工业与离散制造业有明显不同,如图1所示。离散工业的主要制造过程可以概括为制造装备的总体设计,加工装备的零件,组装制造装备。其零件加工与组装是可拆分的物理过程,产品和加工过程可以数字化,因此,可以通过计算机集成制造技术实现数字化设计与生产。关键难点在于制造装备总体设计的优化。对于离散工业来说,智能制造的发展目标是实现个性定制的高效化。流程工业是由多个工业过程组成的不可拆分的物理化学过程,原

材料、成品材料和物质转化过程难以数字化,其难点在于工艺设计的优化与制造全流程的全局优化^[2]。流程工业智能制造的发展目标是高效化和绿色化。高效化的涵义是在市场和原料变化的情况下,实现产品质量、产量、成本和消耗等生产指标的优化控制,实现生产制造全过程安全可靠运行,从而生产出高性能、高附加值产品,使企业利润最大化。绿色化的涵义是实现能源与资源高效利用,使能源与资源的消耗尽可能少,污染物实现零排放、环境绿色化。

2 制造流程智能化的涵义与愿景

2.1 智能优化制造的涵义

以德国工业 4.0 为代表的智能制造的愿景目标是使生产资源形成一个循环网络,具有自主性、可调节性、可配置等特点;使加工过程的产品具有独特的可识别性,可与加工装备相互识别,使加工装备可以加工个性定制的产品部件;使生产线根据整个价值链,自组织集成化生产设施,根据当前生产条件,灵活制定生产工艺,实现个性定制的高效化。实现上述功能的核心技术是采用分布式信息物理融合系统(CPS)^[3-5]和嵌入式互联网技术相互融合与协同。

在上述智能制造过程中,人(知识型工作者)的作用至关重要。人是具有创造性的规划者、管理者 and 决策者^[6],其作用主要体现在 3 个方面:(1) 由人提出产品构思与设计;(2) 由人确定生产规则和参数;(3) 信息物理融合系统(CPS)根据指令仿真并对比各种生产选项,给出符合要求的“最佳”生产方式建议,由人选择最佳生产方式,实现生产。

由上节分析的两种类型工业过程的特征可知,流程工业是由多个重大装备组成的生产过程,其运行过程的动态机理复杂,难以建模和数字化。由于原料来源多样、成分复杂、生产条件多变、工况波动频繁,难以实现生产全流程的优化控制^[7]。因此,我国流程工业不能采用以“工业 4.0”为代表的离散工业智能制造模式,要想实现流程工业高效化和绿色化,必须自主创新适合我国流程工业的智能制造模式。流程工业智能制造模式是智能优化制造,即流程工业智能优化制造^[8]。智能优化制造的涵义是以企业全局及生产经营全过程的高效化与绿色化为目标,以生产工艺智能优化和生产全流程整体智能化为特征的制造模式。实现智能优化制造的高效化和绿色化的关键点是生产工艺优化和生产全流程的整体优化。流程工业生产工艺优化是指优化已有的生产工艺和生产流程,为实现生产全流程的高效化与绿色化打下基础;产生生产高性能、高附加值产品的先进生产工艺。生产全流程整体优化是指在全球化市场需求和原料变化时,以高效化与绿色化为目标,使得原材料的采购、经营决策、计划调度、工艺参数选择、生产全流程控制实现无缝集成优化,使企业全局优化运行,实现企业综合生产指标的优化控制。

2.2 制造流程智能化的涵义及愿景

图 2 是我国具有世界先进水平的特种变压器制造流程。虽然该制造流程采用先进的数控机床来加工特种变压器零件,但是,各种类型的变压器的生产计划、质量设计、生产调度、机床加工程序主要依靠知识工作者凭知识和经验来完成。

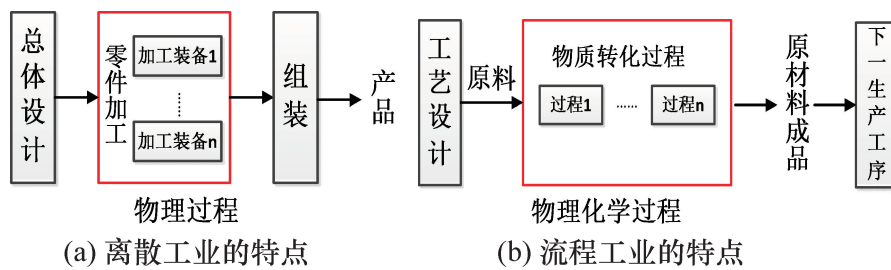


图 1 离散工业和流程工业的区别

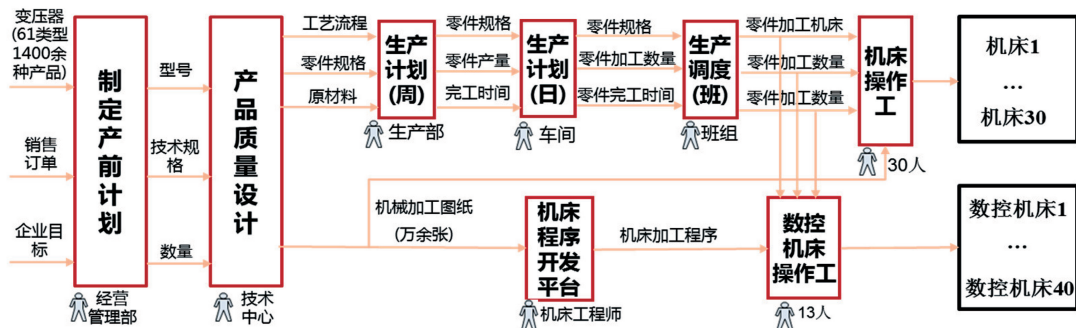


图 2 变压器个性化定制制造流程

图 3 是我国具有世界先进水平的石化与冶金制造流程。虽然生产过程装备了先进的计算机控制系统和计算机管理系统,生产过程实现了自动化,但是,综合生产指标、运行指标、工艺参数、调度指令主要依靠知识工作者凭知识和经验来完成。

离散工业的制造流程和流程工业的制造流程的涵义是由知识工作者将企业目标通过计划调度信息系统转化为生产指令和工艺参数,进而转化为加工装备(过程)的控制系统指令,从而控制加工生产线的加工装备(过程),将加工产品的质量、效率、消耗等生产指标控制在目标值范围内^[9]。其结构如图 4 所示。

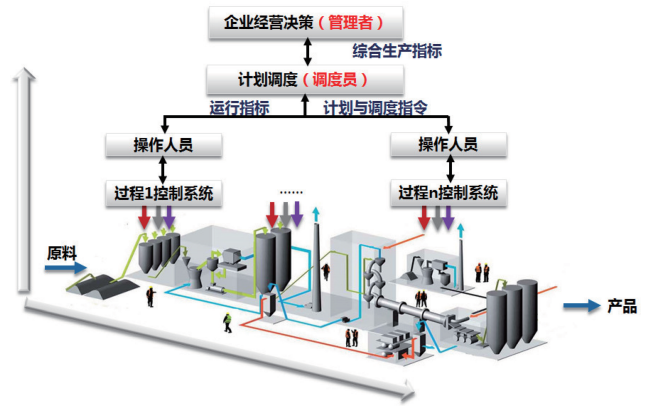


图 3 先进的石化、冶金制造流程

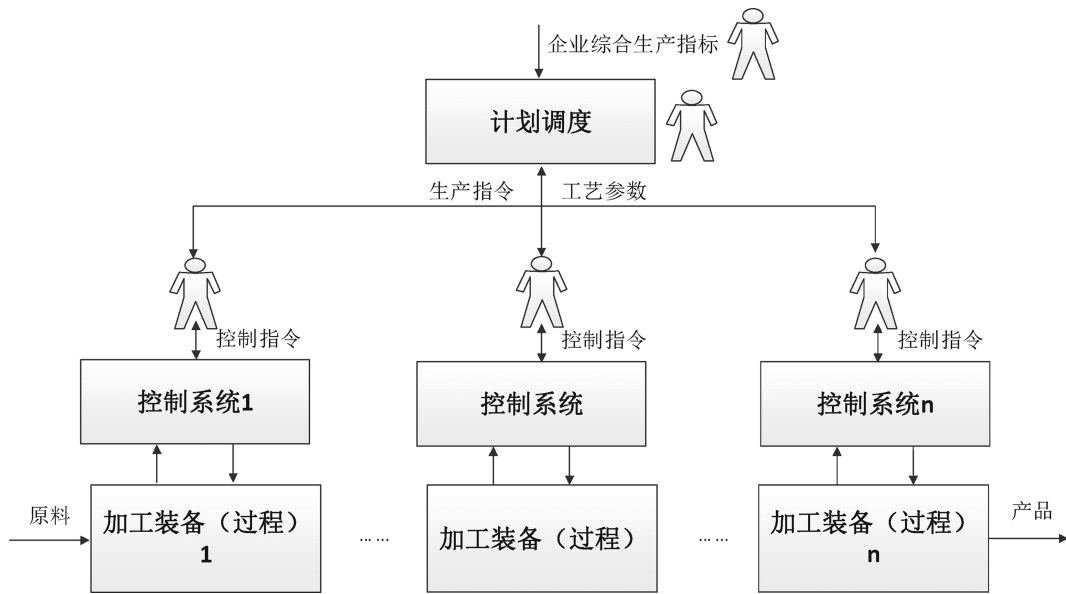


图 4 制造流程涵义示意图

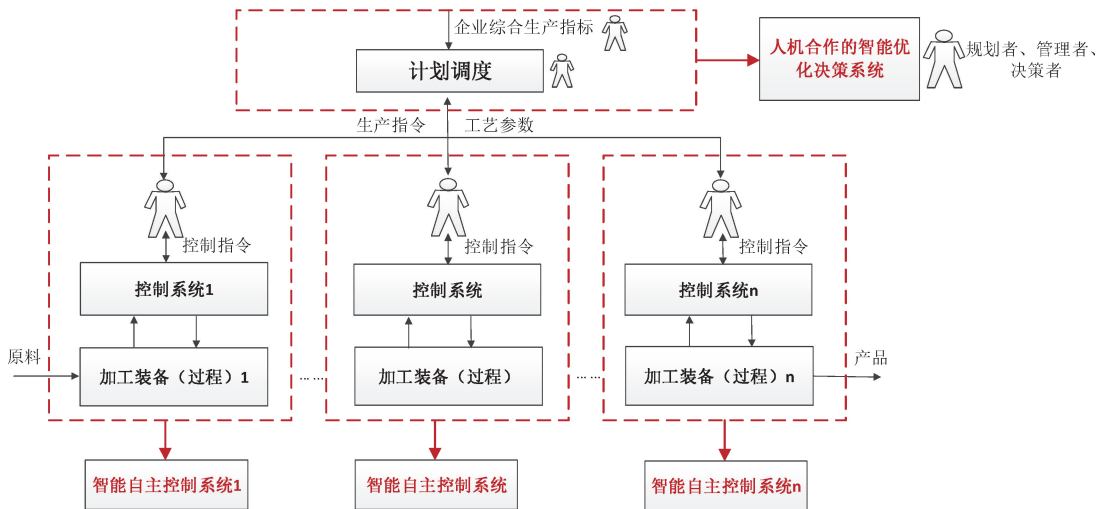


图 5 制造流程智能化涵义示意图

智能制造的目标是实现智能生产,智能生产的关键是实现制造流程智能化。制造流程智能化的涵义是以企业高效化与绿色化为目标,以实现制造流程的智能优化决策与加工装备(过程)智能自主控制为特征的制造模式,其结构如图 5 所示。当前国际上先进的制造企业采用 ERP 和 MES 作为生产计划与调度决策的信息平台,由知识工作者依靠知识和经验决策企业综合生产指标、制造流程的生产指标、运行指标(工艺参数)和生产指令。制造流程智能化的目标是使上述系统成为人机合作智能化决策系统。如图 6 所示,该系统主要由智能优化决策、虚拟制造流程和生产状况识别与自优化决策 3 个子系统组成。人机合作智能优化决策系统的愿景功能:实时感知市场信息、生产条件和制造流程生产状况,以企业高效化和绿色化为目标,实现企业目标、计划调度、运行指标、生产指令与控制指令一体化优化决策,远程与移动可视化监控决策过程动态性能,通过自学习与自优化决策,实现人与智能优化决策系统协同,使决策者在动态变化环境下精准优化决策。

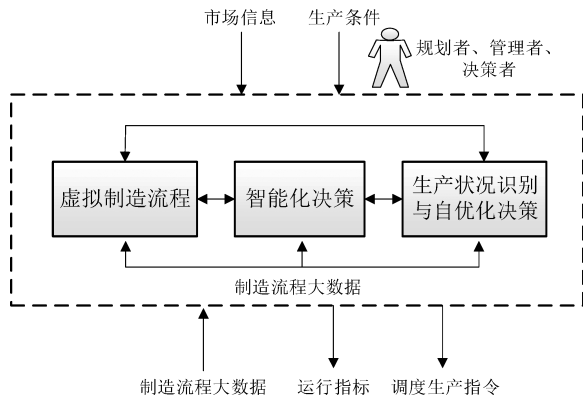


图 6 人机合作智能优化决策系统愿景

当前国际上先进的制造企业采用 DCS、PLC 等先进的计算机控制系统实现了装备和生产过程的自动控制。但是控制系统的指令、运行工况监控和异常工况诊断仍然依靠知识工作者。制造流程智能化的目标是使装备(过程)的控制系统成为智能自主控制系统。如图 7 所示,该系统主要由智能运行优化、高性能智能控制、工况识别与自优化控制 3 个子系统组成。装备(过程)智能自主控制系统的愿景功能:智能感知生产条件的变化,以优化运行指标为目标,自适应决策控制系统的设定值,高动态性能的智能控制系统跟踪控制系统设定值的改变,将实际运行指标控制在目标值范围内。实时远程与移动监控与预测异常工况,自优化控制,排除异常工况,使系

统安全优化运行。与其他智能自主控制系统相互协同,实现制造流程全局优化。

制造流程智能化将会使企业由原来的 ERP/MES/PCS(DCS)^[10] 三层结构变为由人机合作智能优化决策系统和装备(过程)智能自主控制系统组成的两层结构。解决了无法实现 ERP、MES、DCS (PCS)无缝集成优化的难题,实现了企业决策与控制一体化,从而实现制造流程全局优化。如图 8 所示。

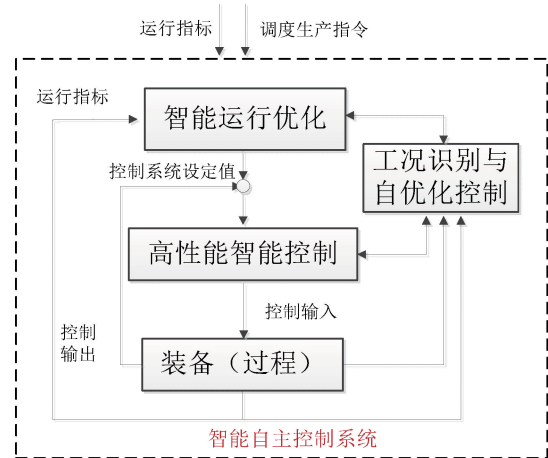


图 7 装备(过程)智能自主控制系统愿景

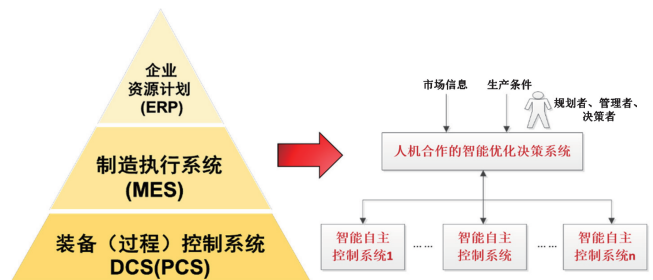


图 8 企业由三层结构转变为智能化两层结构

3 对人工智能挑战的科学问题

实现制造流程智能化需要将人工智能技术与制造流程的控制系统、管理系统和制造流程的物理资源深度融合与协同。为此,需要明确人工智能技术的涵义及发展历程。

3.1 人工智能的涵义

迄今为止,人工智能还没有一个统一的明确的界定。下面介绍对人工智能技术的 3 个主要定义。文[11]指出,人工智能(AI)的研究,简单来说,就是要通过智能的机器,延伸和增强人类在改造自然、治理社会的各项任务中的能力和效率,最终实现一个人与机器和谐共生共存的社会。文献[12]指出,AI不是单一技术,而是应用于特定任务的技术集合。文献[13]指出,虽然对 AI 的界定并不明确且随时间

推移不断变化,但 AI 的研究和应用多年来始终秉持一个核心目标,即使人的智能行为实现自动化或复制。

虽然人工智能技术没有一个统一的定义,但是,人工智能技术的涵义是通过机器智能延伸和增强人类的感知、认知、决策、执行的功能,增强人类认识世界与改造世界的能力,完成人类无法完成的特定任务或比人类更有效地完成特定任务。

3.2 人工智能的发展趋势

历经 60 多年的发展,人工智能正在迎来新一轮创新发展机遇,已成为科技发展的新热点。欧美等发达国家纷纷从国家战略层面加紧布局,2016 年 10 月,美国白宫发布了《美国国家人工智能研究与发展策略规划》,谋划美国未来的人工智能发展。2017 年 7 月,中国国务院印发《新一代人工智能发展规划》,人工智能正式成为我国国家战略。

人工智能的发展从宏观上来说,可以分为两种大的趋势。一种是大数据驱动的人工智能,另一种是基于机理的数学模型驱动的人工智能。大数据驱动的人工智能一个视角是从 50 年代的逻辑表达、启发式搜索到 80 年代法国的专家系统、神经网络,再到 2012 年的深度学习和之后的博弈游戏;另一视角是从 1957 年神经网络到 1982 年 BP 神经网络,再到 2006 年的深度学习神经网络。近年来,人工智能在计算机视觉、自然语言处理、生物特征识别等细分领域进展显著^[14]。尤其是以深度学习^[15]为代表的人工智能方法的兴起,极大地提高了当前机器学习算法的性能,很多新的应用和产品已经惊艳亮相。

基于机理的数学模型驱动的人工智能在历次工业革命中发挥着至关重要的作用。如图 9 所示,第一次工业革命中,反馈控制实现了蒸汽机调速。第二次工业革命,PID 与逻辑控制实现了传送带自动

化。第三次工业革命中,先进控制、运行优化、ERP 与 MES 使自动化程度更高。可以预见,人工智能驱动的自动化将会在智能制造中实现知识工作自动化与智能化方面发挥不可取代的作用。

3.3 对人工智能研究的挑战性科学问题

当前复杂制造流程中的工况识别、运行控制、资源计划与调度的决策主要依靠知识型工作者凭经验和知识来完成。复杂制造流程的工况识别和运行控制的现状是运行人员通过观测数据、图像和听觉信息结合经验知识判断复杂重大装备的运行工况,进行运行控制。其挑战的科技难题是机理不清的复杂系统建模与控制。复杂制造全流程资源计划与调度的决策主要是依靠知识工作者来完成,其现状是主要由知识型工作者依据数据、文本、图像等信息和经验进行制造流程的计划与调度决策,实现制造流程全局优化。其挑战的科学技术难题是多冲突目标、多冲突约束、多尺度动态优化决策。

虽然知识型工作者在制造流程的决策中发挥重要作用,但难以实现制造流程智能化的目标,主要原因在于:(1) 在工况感知方面,工业大数据为多干扰不确定多元信息,生产条件与工况动态变化造成知识型工作者难以感知动态变化的运行工况;(2) 在认知与知识处理方面,制造流程的动态特性未知、运行工况认知涉及多元异构信息使得知识型工作者难以及时处理海量信息;(3) 在决策与执行方面,严重依赖个别高素质知识型工作者。由于制造流程的决策是多冲突目标、多冲突约束、多尺度的动态优化的世界性难题,人的行为制约发展^[16]。人的决策和操作存在主观性和不一致性,容易失误导致人工操作、决策不能实现动态全局优化。

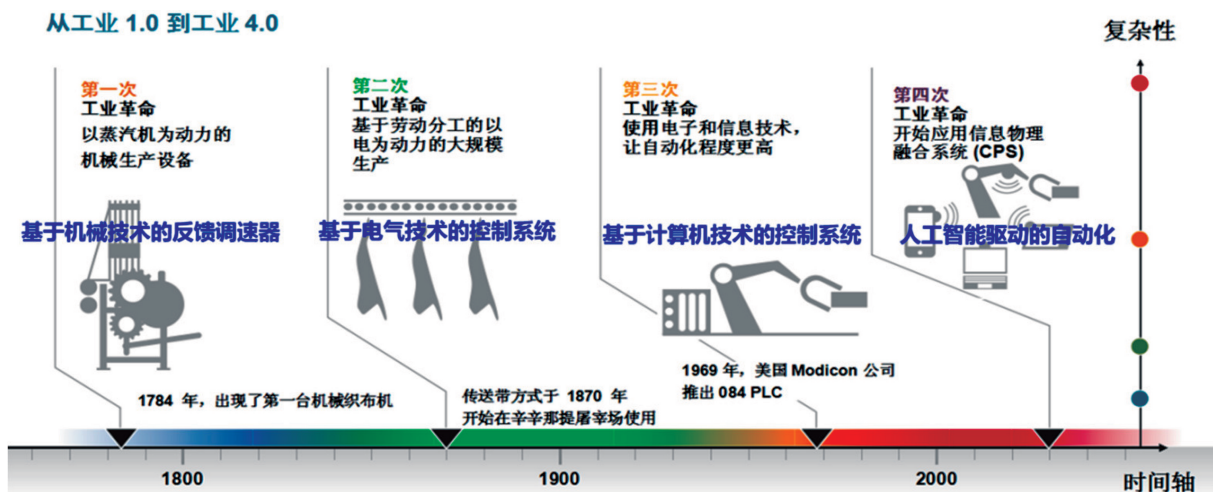


图 9 基于机理的数学模型驱动的人工智能在工业革命中的作用

大数据驱动的人工智能技术主要解决“大数据小任务”问题。然而,制造流程智能化必须要解决“小数据大任务”的难题。“小数据大任务”是对人工智能研究的挑战^[11]。因此,需要将两类人工智能技术相结合,解决下列制造流程智能化中的挑战科学问题:(1)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)机理分析与工业大数据分析相结合的动态特性、操作与决策知识挖掘;(3)预测与反馈和强化学习相结合的人机合作优化决策;(4)多冲突目标、多冲突约束、多尺度的智能优化决策与控制一体化。

致谢 本文工作得到国家自然科学基金(项目批准号:61550002)支持。

参 考 文 献

- [1] Maynard AD. Navigating the fourth industrial revolution. *Nature nanotechnology*, 2015, 10(12): 1005—1006.
- [2] 柴天佑. 工业过程控制系统研究现状与发展方向. *中国科学:信息科学*, 2016, 46(8): 1003.
- [3] Colombo AW, Karnouskos S, Kaynak O, et al. Industrial cyberphysical systems: A backbone of the fourth industrial revolution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, 11(1): 6—16.
- [4] Lee J, Bagheri B, Jin C. Introduction to cyber manufacturing. *Manufacturing Letters*, 2016, 8: 11—15.
- [5] Riedl M, Zipper H, Meier M, et al. Cyber-physical Systems alter Automation Architectures. *Annual Reviews in Control*, 2014, 38(1): 123—133.
- [6] 鲁思沃. 制造业的未来,通往工业 4.0 之路. 中国工程院交流会议, 2013. 10. 23.
- [7] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. *自动化学报*, 2009, 35(6): 641—649.
- [8] 中国工程院、国家自然科学基金委员会. 大数据与制造流程知识自动化发展战略研究. 2016.
- [9] Chai T, Ding J, Yu G, et al. Integrated optimization for the automation systems of mineral processing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(4): 965—982.
- [10] 柴天佑,郑秉霖. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统. *控制工程*, 2002, 9(3): 1—6.
- [11] 朱松纯. 浅谈人工智能:现状、任务、构架与统一. 加州大学洛杉矶分校 UCLA.
- [12] Executive Office of the President U. S. 人工智能、自动化及经济报告(Artificial Intelligence, Automation and the Economy). 2016.
- [13] Executive Office of the President, National Science and Technology Council, Committee on Technology, U. S. 为人工智能的未来做好准备(Preparing for the Future of Artificial Intelligence). 2016.
- [14] Müller VC, Bostrom N. Future Progress in Artificial Intelligence: A Survey of Expert Opinion. In: Müller V. (eds) *Fundamental Issues of Artificial Intelligence*. Synthese Library (Studies in Epistemology, Logic, Methodology, and Philosophy of Science), vol 376. Springer, Cham.
- [15] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, 521(7553): 436—444.
- [16] Gil Y, Greaves M, Hendler J, et al. Amplify scientific discovery with artificial intelligence. *Science*, 2014, 346(6206): 171—172.

Artificial intelligence research challenges in intelligent manufacturing processes

Chai Tianyou

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries,
National Engineering Research Center of Metallurgical Automation, Shenyang 110819)

Abstract Combined with the current state and future demands of China's manufacturing, this paper analyzes the knowledge of features and goals of two kinds of manufacturing, and proposes the meaning and vision function of intelligent manufacturing processes which is the key in smart manufacturing. Moreover, based on the analysis on the progress of development of Artificial Intelligence (AI) as well as its strong effects in prior successful industrial revolutions, the paper proposes the difficult problems of science and technology and the AI research challenges that must be solved in order to achieve intelligent manufacturing processes.

Key words manufacturing processes; intelligent; Artificial Intelligence; scientific problem