

·“双清论坛”专题：人工智能基础理论及应用·

人工智能助力制造业优化升级

钱 锋^{1*} 桂卫华²

(1. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

[摘要] 制造业是我国实体经济的基础,而人工智能是经济发展的新引擎。本文基于以人工智能基础理论及应用为主题的“双清论坛”讨论内容,阐述了我国流程工业智能制造的发展现状、存在问题、发展目标以及解决途径,从智能感知、智能建模、智能控制、智能优化决策和智能安环五个方面介绍了人工智能技术助力流程制造业优化升级,打造新一代智能制造体系的核心内容,并给出了流程工业智能制造的发展愿景。

[关键词] 人工智能; 流程工业; 智能制造; 优化升级

1 流程制造业的现状及面临的挑战

流程制造业主要包括石化、钢铁、化工、有色和建材等基础原材料行业,是经济社会发展的支柱产业,也是我国实体经济的基石。经过数十年的发展,我国流程制造业的生产工艺、装备及自动化水平都得到了大幅度提升,目前已成为世界上门类最齐全、规模最庞大的制造大国,且部分工业装置的装备水平与发达国家的装备相当、甚至更先进,但总体效能与国际先进有一定的差距,资源、能源和环境约束下的创新水平不高。从现有制造模式看,我国流程制造业存在的问题如下^[1-4]:

(1) 在以信息流为主的信息感知与集成层面:物料属性和加工过程部分特殊参量无法快速获取,大数据、物联网和云计算等技术在物流轨迹监控,以及生产、管理和营销优化中的应用不够,各类实时信息的快速获取和信息系统集成有待提升。

(2) 在以资金流为主的经营决策层面:供应链管理 with 装置运行特性关联度不高,产业链分布与市场需求存在不匹配,知识型工作自动化水平低,缺乏快速和主动响应市场变化的敏捷决策机制。

(3) 在以物质流为主的生产运行层面:物质转化机理与装置运行信息融合度不高,缺乏能够根据实际生产过程的动态实时运行数据进行全流程协调控制与优化的核心技术,面向高端制造的工艺流程

和操作模式分析的认知能力不足,虚拟制造技术水平亟待提高。

(4) 在以能量流为主的能效安环层面:能源综合利用技术有待发展,废水、废气、废固的全生命周期足迹缺乏跟踪和溯源,高危化学品缺乏信息化集成的流通轨迹监控与风险防范。

当今时代,信息技术与工业化呈现加速融合趋势,世界发达国家纷纷提出相应的智能制造发展规划和战略布局,例如美国智能制造领导联盟提出了实施 21 世纪“智能过程制造”的技术框架和路线,拟通过融合知识的生产过程优化实现工业的升级转型;德国提出了以智能制造为主导的第四次工业革命发展战略,即“工业 4.0”,将信息和通信技术 (Information and Communications Technology, ICT) 与生产制造技术深度融合,实现产品、设备、人和组织之间的无缝集成及合作;日本则提出了“工业价值链”计划,利用日本制造在物联网和机器人领域的优势,打造智能工厂互联互通的基本模式。为实现“新工业革命”时代下制造业模式创新与企业变革,抢抓人工智能“2.0 时代”发展的重大战略机遇,我国提出了“中国制造 2025”和“新一代人工智能发展规划”,以促进制造业创新发展为主题,以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向,强化工业基础能力,提高系统集成水平,完善多层次人才体系,实现制造业由大变强

的历史跨越^[5, 6]。党的十九大报告指出：“必须坚持质量第一、效益优先，以供给侧结构性改革为主线，推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革，提高全要素生产率，着力加快建设实体经济、科技创新、现代金融、人力资源协同发展的产业体系；加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合，促进我国产业迈向全球价值链中高端”。2018年政府工作报告也明确指出：“深入开展“互联网+”行动，实行包容审慎监管，推动大数据、云计算、物联网广泛应用，新兴产业蓬勃发展，传统产业深刻重塑；实施“中国制造2025”，推进工业强基、智能制造、绿色制造等重大工程，先进制造业加快发展”。

流程制造业生产过程智能化的本质是智能感知、优化控制和决策。知识型工作者具有感知、认知和决策的能力，因此使系统具有一定面向生产过程的感知、认知和决策能力是实现生产过程智能化的根本挑战^[7, 8]。因此，流程制造业生产智能化亟需改变对人工方式的依赖，实现生产过程智能化，其实质是以人工智能技术驱动实现生产过程优化，关键是如何围绕多目标、多环节的生产全流程决策要素，建立一种集智能感知、知识发现和分析、智能关联、判断和自主决策于一体的人工智能驱动的生产优化决策系统。将新一代人工智能方法和技术与具体工业生产过程相结合，推进智能制造、绿色制造和高端制造，实现智能感知、智能建模、智能控制、智能优化与智能安环等技术在流程制造业中的应用，解决工业制造过程中面临的供应链、计划、调度、工艺运行指标以及控制系统设定值等优化决策问题，是促使我国由“全球制造大国”向“全球智造强国”转变的必由之路，对流程制造业提质增效、转型发展和优化升级具有重大意义。

2 流程制造业的发展目标

智能制造是以企业高效化、绿色化与安全化为目标，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。近年来，我国流程制造行业在工艺装备、运行技术与管理决策方面都取得了长足的进步，但在全流程和全生命周期的数据感知、多系统协同优化控制、供应链敏捷管理、安全环保监控与溯源诊断等方面还存在很多的不足。新时代背景下，流程工业智能优化制造的发展目标是：在已有的物理制造系统基础上，充分融合大数据和人的知识，通过云计算、(移动)网络通讯

和人机交互的知识型工作自动化以及虚拟制造等现代信息技术和人工智能，从生产、管理以及营销全流程优化出发，推进以高端化、智能化、绿色化和安全化为目标的流程工业智能优化制造，不仅要实现制造过程的装备智能化，而且制造流程、操作方式、供应链管理、安环保障也实现自适应智能优化。

因此，人工智能是实现流程制造业绿色、高效、安全和智能化的加速器，流程工业生产过程迫切需要通过人工智能方法满足流程制造业的优化升级需求。

3 人工智能技术助力流程制造业生产智能化

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，新一代人工智能技术与先进控制技术深度融合，将重构制造流程的各个环节，形成从技术模式到价值链的新一代智能制造体系，助力流程制造业优化升级。

3.1 智能感知和信息融合

流程制造生产过程优化调控和经营管理优化决策需要大量的实时信息，目前面临的难点就是如何实现制造业流程信息的智能检测、传感与融合认知。在工业数据感知方面，流程工业原料来源多样、成分多变、品质不一，生产过程依赖于能量质量传递、物理化学反应、多相多场耦合、高温高压运行等复杂环节，由于现有检测技术及恶劣工况、环境等的限制，关键运行信息和重要过程参数难以精准感知，造成过程信息不完备甚至检测机理失效。在工业数据融合方面，物理量的检测信号、监测图像、指令文本等海量数据具有多源异构、多时空尺度、数据缺失和不完整性等特点，并且随着数据种类和规模迅速增加，人无法及时计算、学习和处理海量信息，无法从大数据中自动高效获取知识和有价值的规律。

因此，可以在以下方面进行探索和研究：

(1) 针对数据感知问题，采用新一代智能感知技术和设备，例如光学检测新方法、智能传感器、机器视觉(Machine vision)、分布式传感技术、移动技术和物联网(Internet of Things, IoT)等，对原材料与产品属性、生产工况、工艺参数等进行智能感知，实现从原料供应、生产运行到产品销售全流程与全生命周期资源属性和特殊参量的快速获取与信息感知；

(2) 针对信息融合问题，基于新一代人工智能之大数据智能和跨媒体智能技术，采用贝叶斯学习

(Bayesian learning)、主成分分析(Principal component analysis)、因子分析(Factor analysis)等方法对原始数据进行清洗、填充和降维,进而采用贝叶斯估计(Bayesian estimation)、模糊逻辑推理和聚类分析(Cluster analysis)等方法提取工况特征信息,将多源异构数据进行融合,实现复杂制造流程高精度、高可靠、强实时的高性能智能感知与综合认知。

3.2 融合过程机理和工业大数据的智能建模与分析

流程制造业物料变化频繁、装置耦合复杂、多层次运行,物质转化和能量传递机理复杂,传统的机理建模往往难以精确描述复杂过程物质流和能量流耦合、传递与反应等关系;数据驱动的建模由于缺乏过程单元内部结构和机理信息,严重依赖于数据样本的数量和质量,难以对过程机理进行深层次的分析 and 解释。但是,机理分析有利于抓住过程的本质特征和主要矛盾,获得有效的模型结构;数据驱动的方法则可以自动获取潜藏在数据中的信息和知识。综合二者的优点,采用人工智能方法挖掘海量工业数据内在的知识信息,提取过程转换机理特征,建立融合过程机理分析和工业大数据的混合模型,降低模型的计算复杂度,提升模型的鲁棒性,可以为后续工业生产过程的优化和智能决策奠定基础。

因此,可以在以下方面进行探索和研究:

(1) 在海量工业数据智能感知的基础上,采用无监督机器学习(Unsupervised machine learning)中的人工神经网络(Artificial neural network)和分层聚类(Hierarchical Clustering)等方法实现对多源异构的生产数据进行有效的融合、特征提取及知识挖掘;

(2) 采用深度卷积神经网络(Deep convolutional neural network)和软测量(Soft sensor)等技术,实现机理模型与数据模型深度融合的动态智能建模,将生产过程中复杂的化学反应过程机理模型与智能感知到的非结构和结构工业数据进行有机融合,建立有效的动态智能模型;

(3) 采用模糊聚类(Fuzzy clustering)、慢特征分析(Slow feature analysis)和回归神经网络(Recurrent neural network)等方法,对原材料和装置运行状态进行智能分类和识别,建立能满足智能生产需要的多操作模式模型。

3.3 全流程智能协同优化控制

流程制造业生产过程包含多个生产工序,而每

个生产工序又由一个或多个关联耦合复杂的工业装置所组成。为了实现生产全流程的产品质量、产量、消耗、成本等综合生产指标的优化,必须协同各个生产工序,即工业过程智能体,来共同完成。由于受到各种生产指标范围、原料、设备等动态因素的影响,各个工序的运行指标决策要不断地根据这些动态因素进行调整。现有的全流程协同主要通过生产调度部门和工艺技术部门来实现,即运行指标决策过程主要依赖于知识工作者的经验。由于人工调整不当或不及时常常不能保证生产全流程的综合生产指标在其目标范围内,难以实现全流程的优化运行,从而造成产品质量差、能耗高、资源消耗大等问题。采用人工智能学习与智能控制技术,建立全流程智能协同优化控制系统,使过程生产不依靠人的干预实现制造生产的自主运行。

因此,可以在以下方面进行探索和研究:

(1) 采用聚类算法(Clustering algorithm)、迁移学习(Transfer learning)和受限玻尔兹曼机(Restricted Boltzmann machine)等方法,对生产原材料进行智能分类以及装置运行模式进行智能判别,实现多操作装置单元间耦合关联规则的知识挖掘;

(2) 采用关联规则学习(Association rule learning)和深度学习(Deep learning)等方法,将多个生产装置单元进行有机联合,建立融合机理、数据和知识的全流程动态智能模型;

(3) 采用主成分回归(principal component regression)和分类决策树(Classification decision tree)等方法,将全流程生产过程以及优化目标进行多层次地划分和降维,实现多尺度多目标的全流程智能协同优化控制,达到局部优化与全局优化的平衡。

3.4 知识自动化驱动的智能优化决策

市场营销、决策计划、经营管理、生产调度系统是顶层功能,它们一方面必须依赖于来自底层的信息,保证所做出的各项决策、指令都符合实际情况,另一方面,需要从海量的过程实时数据库和各部门的数据库中按照一定的规则抽取足够数量的数据,同时把这些数据加以整理分析,给企业决策者提供高质量的信息。目前,流程制造过程优化决策层主要采用金字塔式的人工管理和控制方式,主要依靠企业知识工作者的自身经验和知识,并没有统筹、自动地利用企业内外部生产经营相关数据、信息和知识,从而依据市场变化、生产行为的实时计算和预测

进行有针对性、优良的生产经营决策。采用新一代人工智能技术,将生产数据、市场规律、先进管理理念等信息转化为知识,建立知识自动化驱动的智能优化决策系统,通过结合工业制造流程、知识工作者自动化以及智能技术,使得企业能够智能感知物质流、能源流和信息流的状况、自主学习和主动响应,自适应优化决策企业生产目标、优化配置资源和合理配置与循环利用能源,实现工业过程智能优化制造,从而提高企业经营决策水平、经济效益和市场竞争能力。

因此,可以在以下方面进行探索和研究:

(1) 采用先验算法(Apriori algorithm)、基于图形的方 法(Graph-based method)和概念聚类(Conceptual clustering)等方法,实现融合生产机理、操作和管理经验的领域知识挖掘;

(2) 采用深度递归神经网络(Deep recurrent neural network)、专家系统(Expert system)和逻辑学习机(Logic learning machine)等方法,融合人的知识、历史运行数据、市场信息等,建立物质、能量流向与价值增益的关联表征,并与装置运行特性进行有机融合,建立价值决策智能模型;

(3) 采用多粒度知识(Multi-granularity knowledge)、决策树(Decision tree)和进化计算(Evolutionary algorithm)等智能优化算法等方法,实现工业生产计划调度的智能优化决策。

3.5 安环指标溯源与自优化

流程制造业生产规模大,生产条件苛刻,过程中直接或间接使用了大量有毒、易燃易爆的危险化学品,安全和环保贯穿了整个流程制造生产过程。目前,流程制造生产过程异常运行工况的监控很大程度上还依靠领域专家完成。优点是可以综合运用人对外界事物的综合监控,确保系统安全运行。缺点是监控与调控效果参差不齐,滞后大,结果不可靠,只能监测而无法预测,不优化。传感技术、大数据、云计算以及人工智能技术为安环指标的溯源与自优化创造了条件,通过新型智能传感技术和设备获取更加全面的系统运行数据资源,充分利用多种信息和计算资源,使用以深度学习为代表的新一代人工智能技术对异常进行分析,保障工业系统安全、可靠、绿色运行。

因此,可以在以下方面进行探索和研究:

(1) 针对流程工业安全运行的特点,建立合适的知识库本体模型,从各个领域的数据源中提取出实体,属性以及实体间的相互关系,形成具体化的知

识表达;

(2) 基于贝叶斯方法、Granger 因果关系分析以及灰色关联分析(Grey relational analysis)等方法,对多源知识进行融合,学习历史经验和趋势,提升知识可信度;

(3) 融合专家知识、基于逻辑和图方法,构建融合多领域异构信息的安全知识图谱,提高信息集成度,降低信息再利用难度;

(4) 采用知识图谱(Knowledge Graph)、迁移学习并融合人机交互等方法,自动分析造成异常工况的根本原因、预测异常可能导致的后果,消除风险演化的不确定性,实现系统故障智能诊断和自愈控制,使系统自主恢复安全优化运行。

综上所述,人工智能技术能够助力流程工业智能制造,实现从传统生产方式向绿色化、高效化和智能化生产方式的转变。借助人工智能技术,建立具有智能感知、智能控制、智能协同、智能优化决策和智能安环的智能制造系统,实现流程制造业生产过程的智能化。

4 流程工业智能制造发展愿景

新一代智能制造主要特征在于学习能力,能够通过深度学习、强化学习、迁移学习等使知识的产生、获取、应用和传承效率发生革命性变化,显著提高感知认知、自主控制和创新决策能力。流程工业以高端化、绿色化为主题的智能优化制造,就是要在工程技术层面实现四化,即:数字化:结合过程机理,采用大数据技术建立企业的数字化工厂,实现虚拟制造;智能化:充分挖掘机理知识和专家知识,采用知识型工作自动化技术实现企业的智能生产和智慧决策;网络化:依托物联网和(移动)互联网技术,发展基于信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)的智能装备,实现分布式网络化制造;自动化:采用现代控制技术,实现自动感知信息,主动响应需求变化,进行自主控制。同时,流程工业智能优化制造在企业运行层面也要实现四化,即:敏捷化:对市场变化做出快速反应,实现资源动态配置和企业的柔性生产;高效化:实现企业生产、管理和营销的全流程优化运行,实时动态优化生产模式;绿色化:对工业生产的环境足迹和危化品能实现全生命周期的监控,实现能源的综合利用和污染物的近零排放;安全化:保证生产流程的本质安全和企业信息安全,并通过故障诊断和自愈控制技术实现生产制造过程的

安全运行。上述目标的实现离不开新一代人工智能技术的发展,它能够为流程制造业生产转型升级提供强有力的支撑,为把我国建设成为具有技术引领能力的制造业强国开辟了广阔的前景。

参 考 文 献

- [1] 钱锋,杜文莉,钟伟民,等.石油和化工行业智能优化制造若干问题及挑战.自动化学报,2017,43(6),893—901.
- [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—160.
- [3] 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—1005.
- [4] 柴天佑.智能制造与智能优化制造.2016国家智能制造论坛摘要集,2016.
- [5] 中华人民共和国国务院.《中国制造2025》.2015.5
- [6] 中华人民共和国国务院.《新一代人工智能发展规划》.2017.7
- [7] 桂卫华,陈晓方,阳春华,等.知识自动化及工业应用.中国科学:信息科学,2016,46(8):1016—1034.
- [8] 桂卫华,王成红,谢永芳,等.流程工业实现跨越式发展的必由之路.中国科学基金,2015,29(5):337—342.

Boosting optimization and upgrade for manufacturing industry by artificial intelligence

Qian Feng^{1*} Gui Weihua²

(1. East China University of Science and Technology, School of Information Science and Engineering, Shanghai 200237;

2. Central South University, School of Information Science and Engineering, Changsha 410083)

Abstract Manufacturing industry is the foundation of China's real economy, and artificial intelligence is the new engine of economic development. Based on the 194th Shuangqing Forum entitled "Fundamental Theories and Applications of Artificial Intelligence", we expound the state-of-the-art, existing problems, development goals and the technological ways achieving the goals. We also present the core content of boosting optimization and upgrade for manufacturing industry by artificial intelligence and new generation of smart manufacturing systems from intelligent sensing, intelligent modeling, intelligent control and decision-making, and intelligent safety and environmental protection. We finally give the development vision for smart manufacturing in the process industry.

Key words artificial intelligence; process industry; smart manufacturing; optimization and upgrade