

流程工业智能优化制造

柴天佑^{1,2}, 丁进良¹

(1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819;
2. 东北大学国家冶金自动化工程技术研究中心, 沈阳 110819)

摘要: 本文在分析流程工业的特点、运行现状和国际智能制造发展状况的基础上, 提出了我国流程工业智能制造的新模式——智能优化制造。在分析流程企业采用的由企业资源计划、制造执行系统、过程控制系统组成的三层架构和控制与管理信息化系统的发展状况基础上, 提出了未来流程企业应采用的智能优化制造的架构和系统愿景功能, 分析了实现愿景功能所需要攻克的关键共性技术和对自动化、计算机和通信、数据科学挑战的科学问题, 提出了突出流程工业战略地位、实施战略规划与顶层设计等发展流程工业智能优化制造的建议。

关键词: 流程工业; 智能优化制造; 发展愿景; 科学挑战

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A

Smart and Optimal Manufacturing for Process Industry

Chai Tianyou^{1,2}, Ding Jinliang¹

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. National Engineering Technology Research Center for Metallurgical Industry Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Based on the in-depth analysis of features of the process industry, the state of art of its operation control, and the global development of intelligent manufacturing, a new mode of intelligent manufacturing for the process industry, i.e., smart and optimal manufacturing, is proposed. After analysis of the development situation of the existing three-tier architecture (consisting of enterprise resource planning, manufacturing execution system, and process control system) and the control and management informatization system adopted by process enterprises, a smart and optimal manufacturing framework and prospects for future process enterprises are presented, followed by the analysis of key generic technologies that are critical for the successful deployment of intelligent manufacturing in the process industry. The fundamental challenges and open scientific problems to be addressed jointly by the communities of automation, computer and communication, and data science are also presented. Moreover, suggestions on the future development and deployment of smart and optimal manufacturing in the process industry are offered, include emphasizing the strategic position of the process industry, actualizing the strategic planning and top-level design.

Keywords: process industry; smart and optimal manufacturing; development vision; scientific challenges

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-08-13

通讯作者: 柴天佑, 东北大学, 教授, 中国工程院, 院士, 研究方向为工业过程综合自动化系统理论、技术及应用;

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+’行动计划的发展战略研究”(2016-ZD-03); 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)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

流程工业是制造业的重要组成部分，以资源和可回收资源为原料，通过包含物理化学反应的气液固多相共存的连续化复杂生产全流程，为下游离散型制造业提供原材料和能源的工业，包括石化、化工、钢铁、有色金属、建材和电力等高耗能行业，是国民经济和社会发展的支柱产业，是我国经济持续增长的重要支撑力量。近十年来，我国制造业持续快速发展，总体规模大幅提升，综合实力不断增强。流程工业的生产工艺、装备和自动化水平都得到了大幅度提升，目前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。我国流程工业产能高度集中，电力、水泥、钢铁、有色金属、造纸等行业的产能均居世界第一。我国矿产资源复杂，资源禀赋差，随着优质资源的枯竭，资源开发转向“低品位、难处理、多组分共生复杂矿为主”的矿产资源，资源综合利用率低、流程长、生产成本低。可以看出，资源紧缺、能源消耗大、环境污染严重成为制约我国流程工业发展的瓶颈。为解决资源、能源与环保的问题，我国流程工业正从局部、粗放生产的传统流程工业向全流程、精细化生产的现代流程工业发展，以达到大幅提高资源与能源的利用率，有效减少污染的目的，高效化和绿色化是我国流程工业发展的必然方向。

当前，发达国家纷纷实施“再工业化”战略，强化制造业创新，重塑制造业竞争新优势；一些发展中国家也在加快谋划和布局，积极参与全球产业再分工，谋求新一轮竞争的有利位置。从全球产业发展大趋势来看，发达国家正利用在信息技术领域的领先优势，加快制造工业智能化的进程。美国智能制造领导联盟提出实施 21 世纪“智能过程制造”的技术框架和路线 [1]，拟通过融合知识的生产过程优化实现工业的升级转型，即集成知识和大量模型，采用主动响应和预防策略进行优化决策和生产制造。德国针对离散制造业提出了以智能制造为主导的第四次工业革命发展战略 [2]，即“工业 4.0”计划，采用信息物理系统（CPS）将计算资源与生产制造过程的物理资源深度融合与协同，实现产品、设备、人和组织之间无缝集成及合作，“智慧工厂”和“智能生产”是“工业 4.0”的两大主题。“工业 4.0”通过价值链及信息物理网络实现企业间的横向

集成，支持新的商业策略和模式的发展；贯穿价值链的端对端集成，实现从产品开发到制造过程、产品生产和服务的全生命周期管理；根据个性化需求自动构建资源配置，实现纵向集成、灵活且可重新组合的网络化制造，实现个性定制生产的高效化。此外，英国宣布“英国工业 2050 战略”，日本和韩国先后提出“*I-Japan* 战略”和“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，充分利用大数据，将人工智能、移动互联网、移动计算、建模、控制与优化等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具有各种新功能的制造系统，才可能使制造业实现跨越式发展。

二、流程工业智能制造需要新模式

（一）我国流程工业现有运行模式存在的问题

近年来，我国大多数大中型流程工业企业都进行了信息化建设，生产过程控制采用了集散控制系统（DCS）、现场总线系统（FCS）、可编程控制器（PLC）系统，安装了先进控制软件，如紧急停车（ESD）系统、先进控制（APC）系统、实时优化（RTO）或运行控制系统，实现了生产线的回路闭环控制、过程监控和运行优化。生产经营计划与管理、生产过程的运行操作与管理采用了经营决策系统、企业资源计划（ERP）系统、制造执行系统（MES）、供应链系统和能源管理系统。由于我国流程工业原料变化频繁，工况波动剧烈；生产过程涉及物理化学反应，机理复杂；生产过程连续，不能停顿，任一工序出现问题必然会影响整个生产线和最终的产品质量；原料成分、设备状态、工艺参数和产品质量等无法实时或全面检测。此外，工业系统的优化决策涉及到多冲突目标、多冲突约束、多尺度的动态优化的世界性科学难题。因此，上述生产经营计划与管理、生产过程的运行操作与管理系统的决策分析仍然依靠知识型工作者凭知识和经验来完成。人的行为制约发展 [3]。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,从而导致我国流程工业企业从生产过程到经营管理存在下列问题:

(1) 以资金流为主的经营决策层:供应链采购与装置运行特性不适应、产业链分布与市场需求存在不匹配,缺乏适应市场和生产条件变化的快速准确决策。

(2) 以物质流为主的生产运行层:资源和废弃资源缺乏综合利用,运行管理与操作缺乏精细化,组成生产全流程的各生产过程缺乏协同优化,运行工况缺乏实时准确识别,产品质量缺乏实时监控与预测。

(3) 以能量流为主的能效安环层:缺乏生产全流程能源消耗的实时监控、预测与优化决策;缺乏在产品生产的全生命周期中废水、废气、废固的实时监控和溯源;缺乏与安全相关的关键岗位和危险品存放、运输等实时监控与预警。

(4) 以信息流为主的感知、认知与决策层:物料属性和加工过程的工艺参数无法快速获取;反映生产过程的动态特性、优化操作与决策知识难以挖掘,难以实现计划与调度一体化,难以实现决策与控制一体化,难以实现ERP、MES、过程控制系统(PCS)无缝集成优化,从而无法实现企业的全局优化。

(5) 系统支撑层:采用DCS、PLC、运行操作与生产管理计算机通过设备网、控制网和管理网组成的控制与管理系统的智能化。

总体上,当前我国流程工业两化融合关注的焦点集中在工业装置物质转化过程的自动化和生产过程运行管理与企业经营管理的信息化,缺乏对于在工艺设计、资源计划、生产过程运行管理中知识工作的自动化与智能化的研究。

(二) 流程工业的智能制造需要新的创新模式

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,关键是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。流程工业是以原材料为主产品,原料进入生产线的不同装备,通过物理化学反应乃至进一步的形变、相变过程,在信息流与能源流的作用下,经过物质流变化形成合格的产品。工艺和产品较固定,产品不能单件计量,产品加工过程不能分割,生产线的某一工序产品加工出现问题,会影响生产线的最终产品。流程工业的关键难点是工艺设计的优化与生产全流程的全局优化。流程工业生产工艺优化是指:①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;②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[4]。

流程工业智能制造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

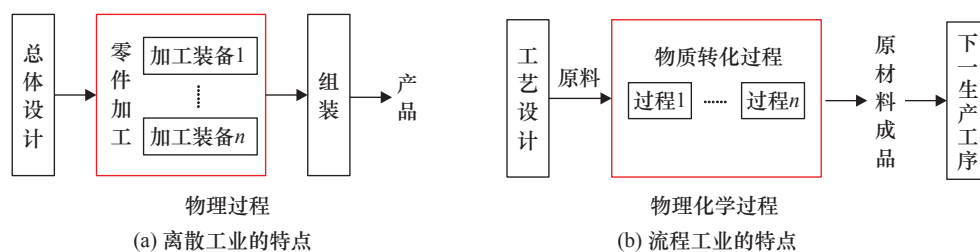


图1 离散工业和流程工业的结构

与资源的消耗尽可能少，污染物实现零排放、环境绿色化 [4]。

实现智能优化制造的高效化和绿色化的关键是生产工艺优化和生产全流程的整体优化。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，难以数字化。由于原料来源多样、成分复杂、生产条件多变，因此工况波动频繁，难以实现生产工艺的优化和生产全流程的优化控制 [5]。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，必须自主创新适合我国流程工业的实现高效化和绿色化的智能制造模式，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。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优化为特征的制造模式。

三、流程工业智能优化制造系统架构与愿景功能

(一) 流程工业智能优化制造系统架构

目前，流程工业采用如图 2 所示的由 ERP、MES 和 PCS 组成的三层架构。ERP 的主要功能是为实现企业目标对企业的人、财、物、能源等资源作出计划，对计划完成情况的信息进行监控；MES 的主要功能是将资源计划通过生产调度和工艺设计制定各生产部门的生产计划与工艺参数，并将其分解为生产线的调度计划和过程控制系统的运行指标，对生产计划、工艺参数、调度计划、运行指

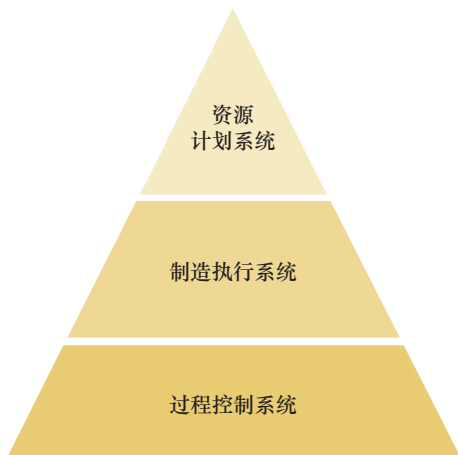


图 2 流程工业三层架构

标完成情况等信息进行监控。目前 ERP 和 MES 的主要功能是实现了信息集成和管理 [6]。企业目标、资源计划、调度计划、运行指标、生产指令与控制指令的决策分析与调整主要由知识工作者凭知识和经验完成，无法实现企业目标、生产计划与调度的一体化优化决策，无法实现 ERP 和 MES 的无缝集成优化。

PCS 的主要功能是实现工业过程各回路的闭环控制，组成工业过程的各工业装备的逻辑控制和对控制过程监控。过程控制系统的设定值、生产指令和运行工况识别仍然依靠知识工作者凭知识和经验来完成，无法实现组成生产全流程的各工业过程控制系统的协同优化，无法实现决策与控制的一体化，无法实现生产全流程的优化控制，无法实现 ERP、MES 和 PCS 的无缝集成优化 [7]。

参考文献 [8] 指出，人工智能不是单一技术，而是应用于特定任务的技术集合。参考文献 [9] 指出，虽然对人工智能的界定并不明确且随时间推移不断变化，但人工智能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 [10]。将人工智能技术与 ERP、MES 和 PCS，特别是与制造流程物理系统优化深度融合是流程工业智能制造的发展方向。

未来流程工业采用如图 3 所示的由人机合作的智能优化决策系统和工业过程智能自主控制系统组成的两层架构。人机合作的智能优化决策系统在 ERP 和 MES 的功能基础上增加如下三大功能：①对市场信息、生产条件和制造流程运行工况实时感知；②企业目标、生产计划与调度的一体化的人机合作优化决策；③对决策和执行过程实现远程、移动和可视化监控。工业过程智能自主控制系统在 PCS 的功能基础上，增加如下四大功能：①生产条件和运行工况变化的感知；②在控制系统设定值改变、频繁干扰和工况变化的情况下控制系统仍然具有好的动态性能；③过程工况远程、移动、可视化监控与自优化控制；④与组成生产全流程的其他工业过程控制系统相互协同，实现生产指标优化控制。

(二) 智能优化制造系统愿景功能

1. 人机合作的智能优化决策系统愿景功能

目前, 流程企业采用 EPR 和 MES 两层结构通过如图 4 所示的信息化管理系统实现企业经营和生产过程的管理。该信息化管理系统由经营决策系统、资源计划系统、制造执行系统、供应链系统和能源管理系统组成。目前该系统是企业经营与生产管理的决策与分析的信息化平台。决策与分析功能还依赖于知识工作者凭知识和经验来完成。

提升上述信息化管理系统的智能化水平的目标是使上述系统成为如图 5 所示的人机合作的智能优化决策系统。该系统主要由智能优化决策、虚拟制造流程和运行工况认知与自优化控制三个子系统组成。人机合作智能优化决策系统的愿景功能包括: ①实时感知市场信息、生产条件和制造流程运行工况; ②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; ③远程与移动可视化监控决策过程动态性能; ④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。

2. 工业过程智能自主控制系统愿景功能

当前国际上先进的流程企业采用 DCS、PLC

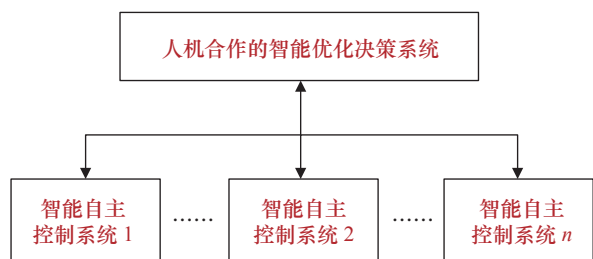


图 3 流程工业智能优化制造系统架构

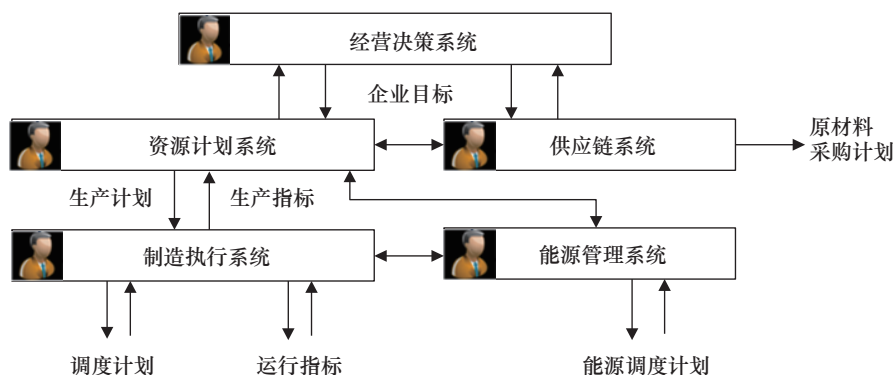


图 4 信息化管理系统

等先进的计算机控制系统实现了工业过程的自动控制。对于可以建立数学模型的石化等工业过程, 过程控制的设定值可以通过实时优化 (RTO) 和模型预测控制 (MPC), 但是对于具有综合复杂性的工业过程如冶金工业等, 控制系统的设定值仍然依靠知识工作者凭知识和经验来完成。当前, 运行异常工况诊断仍然依靠知识工作者完成 [11]。

提升 PCS 智能化水平的目标使过程控制系统成为智能自主控制系统。如图 6 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三个子系统组成。工业过程智能自主控制系统的愿景功能包括: ①智能感知生产条件的变化; ②以优化运行指标为目标, 自适应决策控制系统的设定值; ③高动态性能的智能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; ④实时远程与移动监控, 预测异常工况, 排除异常工况, 使系统安全优化运行; ⑤与组成生产全流程的其他工业过程智能自主控制系统相互协同, 实现生产全流程全局优化 [12]。

3. 工艺智能优化系统愿景功能

实现生产全流程的优化控制必须解决生产工艺参数的优化问题。如图 7 所示, 目前工艺参数是由工艺研究人员凭知识和经验并经过实际生产过程的反复试验来确定。提升工艺参数研究的智能化水平的目标是研制工艺智能优化系统。该系统的愿景功能包括: ①使生产过程虚拟化; ②实现生产过程物质流、能源流和信息流相互作用的可视化; ③给出符合要求的最佳生产工艺参数建议, 由工艺研究人员确定最佳工艺参数。

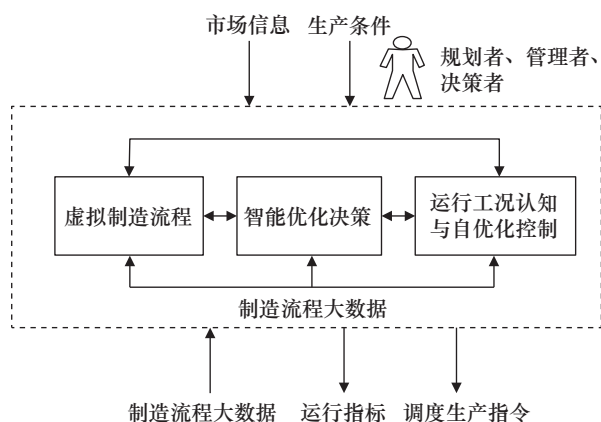


图5 人机合作智能优化决策系统

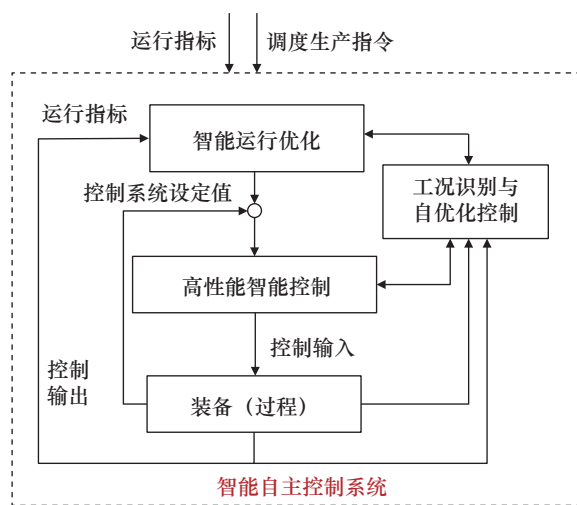


图6 工业过程智能自主控制系统

四、关键共性技术与挑战的科学问题

企业经营和生产管理与决策过程是人、机和物三元空间融合的复杂系统，是人参与的信息物理系统。复杂工业过程控制、全流程运行监控与运行管

理、企业运作管理和生产管理的决策分析以及最佳工艺参数的决策仍然依靠知识工作者根据其经验和知识来完成。知识型工作在企业经营与生产过程的管理与决策中起核心作用。麦肯锡全球研究所研究报告指出：知识型工作的自动化是驱动未来全球经济的12种颠覆性技术之一 [13]。复杂工业过程控制、全流程运行监控与运行管理产生大数据，企业运作管理与决策和生产管理与决策产生大数据，工艺研究实验也产生大数据。工业大数据的特征是数据容量大、采样率高、采样时间段长（历史正常、历史故障、实时）；数据类型多，如过程变量（控制量、被控量）、声音和图像、管理及运行的生产指标数据。工业大数据的出现使企业经营过程和生产全流程的建模、运行控制与优化决策研究从过去的假设驱动型转为数据驱动型。基于数据的建模、控制与优化决策已成为自动化科学与技术中新的研究热点 [14]。大数据应用技术与人工智能驱动的知识型工作自动化为生产工艺智能优化和生产全流程整体智能优化控制研究开辟了一条新的途径。

将工业大数据、人工智能驱动的知识型工作自动化、计算机和通信技术与流程工业的物理资源紧密融合与协同，攻克下面四项关键共性技术，才有可能实现流程工业的生产工艺智能优化和生产全流程整体智能优化。

(1) 攻克具有综合复杂性的工业过程智能优化控制技术，实现以综合生产指标优化控制为目标的生产全流程智能协同优化控制，研制工业过程智能自主控制系统。

(2) 攻克人参与的CPS的物理机制建模、动态性能分析、关键工艺参数与生产指标的预测和多目标动态优化决策技术，研制智能优化决策系统。

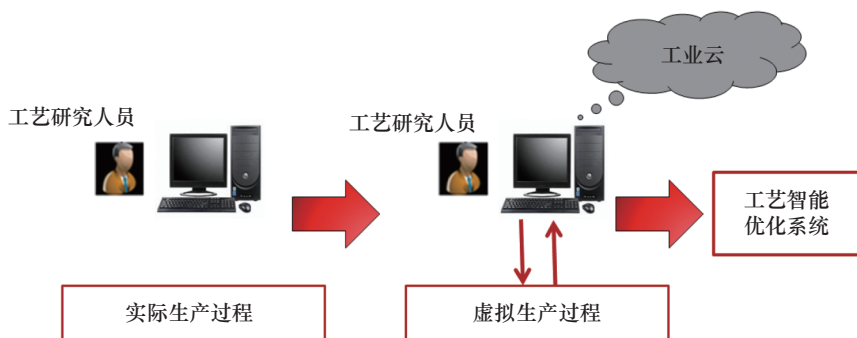


图7 工艺研究智能化

(3) 攻克以信息实时感知手段为核心的生产全流程运行工况感知与认知技术, 研制运行工况识别与自优化控制系统。

(4) 攻克大数据与物理系统知识共同驱动的生产过程信息流、物质流、能源流交互作用的动态智能建模、仿真与可视化技术, 研制用于流程工业控制、决策和工艺研究实验的虚拟制造系统。

攻克上述关键共性技术必须解决涉及到的对自动化科学与技术、计算机和通信科学与技术、数据科学挑战的科学问题。

对自动化科学与技术挑战的科学问题包括: ①大数据分析技术与机理相结合的复杂工业过程运行动态性能的智能建模与可视化; ②工业过程智能优化控制系统理论与技术; ③大数据与知识(物理系统知识、管理系统知识等)相结合的生产经营与管理与工业过程运行操作与管理中的多目标动态智能优化决策技术。

对计算机和通信科学与技术挑战的科学问题包括: ①基于移动互联网的工业装备嵌入式计算机控制系统; ②支撑大数据与知识自动化的新一代网络化智能化管控系统; ③复杂工业环境智能感知与认知技术; ④实现生产工艺智能优化和生产全流程整体智能优化控制的软件平台。

对数据科学挑战的科学问题包括: ①从价值密度低的大数据中挖掘相关关系数据; ②处理数据、文本、图像等非结构化信息; ③利用相关关系建立复杂动态系统的模型。

五、发展流程工业智能优化制造的建议

为了尽快实现流程工业智能优化制造, 使我国由流程工业制造大国变为制造强国, 对国家资助机制和相关政策提出如下建议。

(一) 突出流程工业的战略地位, 提升流程工业企业创新能力

在政策制定、国家发展战略制定中确立流程工业在我国经济发展中的基础性、战略性地位和作用。我国流程工业发展虽然迅速, 但目前还是主要利用低廉的劳动力和产能规模以降低生产成本。从长远发展来看, 必须依靠内涵发展来提高创新能力、促进经济增长。加大研发投入力度, 建立健全研发和

服务体系。加快实施重点流程工业行业智能制造专项行动, 切实构建企业主导的产业技术研发体系, 着力促进政产学研组成的创新主体的协同创新, 提高企业原始创新能力。

(二) 组织由学术、研发与企业三方共同开展流程工业智能优化制造的战略规划与顶层设计

建议由国家相关部门组织产学研各方面的专家组成战略研究组, 共同研讨我国流程工业的特征、现状和问题。研讨流程工业两化深度融合实现智能制造的内涵与挑战; 研究发展思路、发展目标及重点任务、重点工程科技问题、重大关键技术和技术路线图。为我国流程工业两化深度融合的应用实施和推广提出配套政策和措施建议。

(三) 将基础与前沿研究、国家重点研发计划、工业和信息化部两化深度融合推进计划和重大项目进行一体化整体部署

发挥中国特色社会主义制度的优越性, 协调各类国家研究计划, 围绕流程工业两化深度融合实现智能制造的关键工程科技问题和重大关键技术, 对从基础与前沿研究、技术研发、产品研制到推广应用各类项目的投入与资助进行一体化部署。

建议工业和信息化部与国家自然科学基金委员会成立联合基金, 共同支持流程工业智能制造示范工程中的基础与前沿科学问题研究。

建议设立流程工业智能优化制造的重大专项、重点研发计划。

建议国家自然科学基金委员会先行启动与流程工业智能优化制造相关的重大研究计划、重大项目与重点项目群。

(四) 分层次、分目标实施两化深度融合, 推进流程工业智能优化制造

建议实施两化深度融合引领企业示范工程。按行业选择有示范作用的重点企业, 以企业为主体联合相关国家重点实验室、国家工程技术中心, 形成固定的研发与工程实施队伍, 进行机制创新, 建立对研发队伍持续支持的机制, 联合创新将示范企业打造成世界领先的企业。

建议开展面向行业的两化深度融合示范工程。

利用大数据、云计算、工业互联网、移动计算等新的信息技术，搭建面向不同行业的两化融合技术创新服务平台和企业生产管理信息服务平台，如云ERP、云MES等。

建议开展面向流程企业以实现智能优化运行为目标的信息化系统智能化水平提升示范工程。特别是开展针对关键生产工序的重大生产装备，尤其是高耗能设备，以实现智能优化运行为目标，完善过程控制系统，使其可靠完整采集信息，实现回路闭环控制，具有故障诊断与自愈控制、控制指令优化设定等功能。

（五）完善可持续发展的职业教育与专业人才培养模式，培养一批流程工业智能优化制造领域的专业技术与研发人才队伍

完善人才引进、培养、使用、评价、激励和保障政策，优化人才引进和培养环境，重点培养和造就面向工业创新需求的实战型工程技术人才和具有扎实素养的应用型研发人才，提升在职人员劳动素质，培养一批流程工业智能优化制造领域的专业技术与研发人才队伍。

参考文献

[1] Smart Manufacturing Leadship Coalition. Implementing 21st century smart manufacturing [R]. Washington DC: Smart Manufacturing Leadship Coalition, 2011.

[2] 德国联邦教育与研究部. 把握德国制造业的未来, 实施“工业4.0”攻略的建议 [R]. 波恩: 德国联邦教育与研究部, 2013. Federal Ministry of Education and Research – BMBF. Grasp the future of German manufacturing industry and to implement the strategy of “industrial 4.0” [R]. Bonn: Federal Ministry of Education and Research – BMBF, 2013.

[3] Gil Y, Greaves M, Hendler J, et al. Amplify scientific discovery with artificial intelligence [J]. Science, 2014, 346: 171–172.

[4] 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 [R]. 北京: 中国工程院, 国家自然科学基金委员会, 2016. Chinese Academy of Engineering, National Natural Science Founda-

tion. Research on development strategy of big data and knowledge automation for manufacturing process [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, National Natural Science Foundation, 2016.

[5] 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 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 641–649. Chai T Y. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 641–649.

[6] 柴天佑, 金以慧, 任德祥, 等. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 1–6. Chai T Y, Jin Y H, Ren D X, et al. Contemporary integrated manufacturing system based on three-layer structure in process industry [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 1–6.

[7] 柴天佑. 工业过程控制系统研究现状与发展方向 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1003–1015. Chai T Y. Research status and development direction of the industry process control system [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(8): 1003–1015.

[8] Executive Office of the President. Artificial intelligence, automation and the economy [R]. Washington DC: Executive Office of the President, 2016.

[9] Executive Office of the President, National Science and Technology Council, Committee on Technology. Preparing for the future of artificial intelligence [R]. Washington DC: Executive Office of the President, National Science and Technology Council, Committee on Technology, 2016.

[10] 柴天佑. 制造流程智能化对人工智能的挑战 [J]. 中国科学基金, 2018 (3): 251–256. Chai T Y. Challenges for artificial intelligence of manufacturing process intelligentize [J]. Science Foundation of China, 2018 (3): 251–256.

[11] Chai T Y, Qin S J, Wang H. Optimal operational control for complex industrial processes [J]. Annual Reviews in Control, 2014, 38(1): 81–92.

[12] Chai T Y, Ding J L, Yu G, et al. Integrated optimization for the automation systems of mineral processing [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(4): 965–982.

[13] McKinsey Global Institute. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy [R]. Chicago: McKinsey Global Institute, 2013.

[14] Lamnabhi-Lagarigue F, Annaswamy A, Engell S, et al. Systems & control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges [J]. Annual Reviews in Control, 2017, 43: 1–64.