工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望

柴天佑*, 刘强, 丁进良, 卢绍文, 宋延杰, 张艺洁

东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819

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

收稿日期: 2021-08-26; 接受日期: 2021-10-22; 网络版发表日期: 2021-12-09

中国工程院战略咨询重大项目(编号: 2019-ZD-12, 2019-ZD-12-01-02, 2019-ZD-12-05-02)、2020年度辽宁省科技重大专项计划(编号: 2020JH1/10100008)、国家自然科学基金项目(批准号: 61991401, U20A20189, 61991400, 61991404, 61833004)、兴辽英才计划项目(编号: XLYC1907049, XLYC1808001)和教育部基本科研业务费项目(编号: N180802004)资助

摘要 本文首先综述了各国工业互联网的发展愿景和流程工业运行现状, 给出流程工业智能优化制造的内涵, 并分析了工业互联网驱动的流程工业智能优化制造的机遇与挑战; 结合工业互联网作为实现智能制造纵向集成、端到端集成和横向集成的基础设施, 探讨了工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式: (1) 工业互联网驱动的流程制造企业智能优化制造模式, 其包括: 制造流程全局优化; 驱动集中式企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)与制造执行系统(Manufacturing execution system, MES)向分散式数字孪生驱动的生产要素管理与决策一体化系统发展; 驱动过程控制系统(Process control system, PCS)/MES/ERP三层结构向智能自主控制系统和人机互动与协作的管理与决策智能化系统两层结构的决策与控制一体化系统发展; (2) 面向产品全生命周期的跨企业流程工业智能优化制造模式; 最后, 给出了实现上述流程工业智能优化制造模式的研究方向。

关键词 工业互联网, 全流程智能优化制造, 流程工业, 全生命周期

1 引言

1.1 各国工业互联网发展愿景

工业互联网作为新一代信息技术与制造业深度融合的产物, 是以数字化、网络化、智能化为主要特征的新工业革命的关键基础设施。工业互联网的概念是由美国通用电气公司在2012年11月首次提出^[1], 德国的工业4.0^[2]和中国制造2025也都将工业互联网作为实现智能制造的关键基础设施。美国、德国等发达国家

和我国为代表的发展中国家正在依托工业互联网大力推动制造业变革。

(1) 美国

美国发展工业互联网的大背景是服务于美国“再工业化”战略。2012年美国通用电气公司在白皮书《Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines》^[1]中阐述: “工业互联网汇集了两大革命的成果: 工业革命带来的无数的机器、设施、机群和系统网络方面的成果, 与互联网革命中涌现出的计

引用格式: 柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 14–25
Chai T Y, Liu Q, Ding J L, et al. Perspectives on industrial-internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 14–25, doi: 10.1360/SST-2021-0405

算、信息与通信系统方面近期取得的成果”。2014年通用公司联合美国电话电报公司、思科、IBM和英特尔建立的工业互联网联盟发起并由市场和企业来主导工业互联网发展,并由美国政府推动和倡导。2018年美国工业互联网联盟(Industrial Internet Consortium, IIC)发布的《The Industrial Internet of Things Volume G8: Vocabulary》中定义工业互联网为:“物、机器、计算机与人类的互联网,工业互联网帮助明智企业利用先进的数据分析法取得革命性的商业成果”^[3]。

美国工业互联网的目标,按照IIC发布的《The Industrial Internet of Things, Volume B01: Business Strategy and Innovation Framework》:“不仅仅是实现人、机、物、系统的连接,而是获取工业大数据,通过数据分析,产生有价值的信息,为企业业务管理和生产运行创造新的附加值”^[4]。IIC大力倡导实现物联网标准化,推动典型工业场景的新模式。为推进制造业新模式创新实践,IIC已发布智能化生产、预测性维护、规模定制、全球供应链集成、服务化工厂自动化平台、工厂运行可视化与智能、工业数字孪生等标准测试床27项^[5,6]。

美国通用电气公司等先进制造企业及谷歌公司等高科技公司,提倡从系统、软件和互联网等信息端着手重塑传统制造业。旨在打通连接各企业之间的生产网络来服务其他产业创造价值,应用案例包括:1) 航空发动机零件研发设计协同和共享。罗尔斯·罗伊斯公司构建了开放式的协同框架与平台,面向产品全生命周期支持公司全球设计、制造和维护等业务的高效协作;2) 航空发动机的远程运维服务。通用公司通过工业互联网监控、收集、整合和分析工业大数据,帮助客户提高各类产品及相关服务、能源等的使用效率。航空发动机“优化运行和健康保障系统”,帮助意大利航空年节约1.5%燃油,折合1500万美元;3) 能源公司 Bord Gáis Energy借助工业互联网平台对资产进行性能管理优化,年产生228万欧元的效益。

虽然工业互联网取得了成功的应用案例,但为企业业务管理和生产运行创造新的附加值需要与制造过程深度融合,因此,2021年1月,美国工业互联网联盟(IIC)与美国智能制造研究所(CESMII)宣布战略合作伙伴关系,2021年8月,随着美国通用电气公司等美国工业互联网创始成员离开,IIC全面转型工业物联网,其名称改为美国工业物联网联盟(Industrial IoT Consortium, IIC),缩写不变,试图以工业物联网为抓手,

重塑传统制造业。

(2) 德国

德国拥有强大的机器和设备制造业,据统计,2019年的制造业占国民生产总值的30.1%。德国结合自身离散制造业的领先优势,提出以CPS为特征的工业4.0^[7]。2013年汉诺威工业博览会上,德国机械制造业联合会、德国信息技术、通信与新媒体协会、德国电气与电子工业协会提出建立工业4.0平台,2015年4月从协会平台到政府平台,上升为国家战略。工业4.0将计算资源与制造过程物理资源深度融合,实现产品、设备、人和组织间无缝集成及合作,“智慧工厂”和“智能生产”是工业4.0的两大主题^[2,8-10]。2013年4月,德国工业4.0工作组在《把握德国制造业的未来——实施“工业4.0”攻略的建议》中指出,工业4.0的愿景是使制造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;使产品具有可识别性,可与生产设备互相识别和互操作;使生产线根据整个价值链动态、实时优化和自我组织;员工和生产系统可以根据当前生产条件和客户需求,灵活制定生产工艺、调节和配置制造资源,实现个性定制的高效化^[2]。工业4.0实现纵向集成、端到端集成和横向集成^[2]。其中,纵向集成实现执行器和传感器、控制、制造和执行及企业计划等不同层面的信息系统集成;端到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;横向集成实现将各种使用不同制造阶段和商业计划的信息系统集成^[2]。目前,德国已建立了工业4.0在线地图,包含360多个工业4.0案例,涵盖76个测试中心,用于探索、测试和开发新模式应用^[10]。

德国的西门子公司和宝马公司等先进制造企业,借助工业互联网开展服务化制造模式和规模定制模式的实践。比如,高端磨床制造商Gehring公司利用西门子MindSphere平台采集研磨机床上刀具等部件的关键指标并进行分析和评估,实现刀具的剩余寿命和主动更换备件的服务模式。宝马莱比锡汽车工厂按照客户订单来制定生产计划,零部件供应商按需供货,供应商与生产之间建立准时生产模式。

(3) 中国

我国工业互联网提出的背景始于2015年印发的《中国制造2025》。2015年《政府工作报告》中提出实施“中国制造2025”,部署全面推进实施制造强国战略。2015年,国务院发布《关于积极推进“互联网+”行

动的指导意见》,提出“提升制造业数字化、网络化、智能化水平,加强产业链协作,发展基于互联网的协同制造新模式”。2017年,十九大报告中提出加快发展先进制造业,推动互联网、大数据、人工智能(Artificial intelligence, AI)和实体经济深度融合。工业互联网产业联盟定义工业互联网为:“新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态”。

2021年1月13日,工信部工业互联网专项工作组印发的《工业互联网创新发展行动计划(2021~2023年)》中指出^[11]:工业互联网以网络为基础、平台为中枢、数据为要素、安全为保障,通过对人、机、物全面连接,变革传统制造模式、生产组织方式和产业形态,构建起全要素、全产业链、全价值链全面连接的新型工业生产制造和服务体系;在持续深度融合应用方面,推进工业互联网新模式推广工程,培育推广智能化制造、网络化协同、个性化定制、服务化延伸、数字化管理等新模式。我国相关制造企业和高技术企业积极开展工业互联网相关实践,目前建成了海尔COSMOPlat、东方国信Cloudiip、华为FusionPlant、用友精智等工信部发布的十大跨行业、跨领域工业互联网平台^[12]。

1.2 流程工业运行现状和智能优化制造内涵

1.2.1 流程工业运行现状

流程工业制造是以各类自然资源为原料,通过包含物理化学反应的气、液、固多相共存的连续化生产过程,为下游制造业提供原材料和能源的基础工业。流程工业制造的特点是制造过程涉及复杂的物理化学反应、连续生产不能中断、产品不以件计。流程工业制

造过程的物质化学反应过程建模难且产品难以数字化;全流程多单元协同生产对制造流程全局优化带来挑战;企业多冲突目标,物质流、能量流、信息流联系错综复杂,需求、设计、供应链复杂关联造成难以实现企业全局优化。

上述特点使得制造过程和运行管理过程中的检测、操作、决策等多个环节仍是人参与的信息物理系统,如图1所示。目前,流程工业普遍采用企业资源计划(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)三层结构^[13]。ERP为实现企业目标对企业的人、财、物、能源等资源做出计划并对完成情况进行监控;MES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控制系统运行指标,并对完成情况进行监控。目前,ERP/MES系统仅作为企业经营与生产管理的决策与分析的信息化平台。人利用ERP和MES获得的生产信息、市场信息及需求信息进行经营决策,再将决策结果通过信息系统执行^[14]。

PCS实现工业过程各回路的闭环控制,以及对各装备的逻辑控制和过程监控。流程工业生产过程目前普遍采用PID实现回路控制,采用实时优化、模型预测和智能运行反馈控制技术进行运行优化控制,实现回路设定值自动决策^[15],但运行指标目标值范围决策和故障诊断仍依靠人工,如图2所示。

针对实际工业过程大都运行于工作点附近,回路控制主要采用基于跟踪误差的PID控制技术;考虑到未知与频繁出现随机干扰可使积分器失效,造成回路控制难以获得良好控制性能,近年来各类数据驱动的

图1 (网络版彩图)流程制造企业信息系统三层结构

Figure 1 (Color online) Three-layer structure of information system for process industries.

图 2 (网络版彩图)人机合作运行控制结构图

Figure 2 (Color online) Human-machine cooperation operation control.

控制方法, 如无模型控制^[16]、学习控制^[17]、模糊控制^[18]、多模型切换智能解耦控制^[19]等得到了学术界的广泛关注.

对于可以建立数学模型的石化工业的生产过程, 运行优化控制采用实时优化^[20,21]进行回路设定值优化. 但上述方法仅适用于稳态过程, 未考虑工况变化和干扰引入的动态造成静态优化的滞后. 针对该问题, 学者提出基于模型预测控制的运行优化控制策略^[22].

对于难以建立数学模型的钢铁和有色金属等生产过程, 国外高技术公司采用预处理手段使原材料成分稳定、生产工况平稳, 研发将运行指标转化为回路设定值的经验模型. 然而, 我国矿产品位低、成分波动大, 造成我国流程工业原料性质变化频繁、工况波动剧烈、机理不清, 难以建立过程的精确数学模型, 特别是能耗物耗、质量等运行指标不能在线测量, 无法采用原料成分稳定基础上的控制策略. 针对这类工业过程, 文献^[23,24]提出了由控制回路预设模型、运行指标预测模型、前馈与反馈补偿器、故障工况诊断与自愈控制器组成的设定值智能闭环优化控制策略, 并成功应用于竖炉等实际工业过程^[25]. 然而, 流程工业生产全流程优化控制^[26]、流程工业管理与决策涉及到的多冲突目标非凸动态优化^[27], 仍是尚未解决的科学难题.

当市场需求和生产条件发生变化时, 目前的信息化系统难以有效感知这些变化, 使得决策者难以及时准确地决策, 人的行为制约发展^[28]. 另一方面, ERP/MES各类信息系统相对独立、集成性不强, 仅能局部优化、难以实现信息集成基础上的生产全流程全局优

化^[29], 且上下游多个生产单元以及研发、能源、生产、供销多系统间难以协同^[30]. 我国流程工业不能直接采用工业4.0为代表的离散工业智能制造模式, 需研究适合流程工业的智能优化制造模式.

1.2.2 流程工业智能优化制造的内涵

流程工业智能优化制造的内涵是以流程工业的高端化、智能化、绿色化为目标, 以制造企业生产全流程全局智能优化和跨企业产品全生命周期的全过程集成优化为特征的制造模式. 生产全流程全局智能优化的涵义是在全球市场需求和原料变化时, 以高端化、智能化、绿色化为目标, 使原材料的采购、经营决策、计划调度、工艺参数选择、生产全流程运行管理与控制实现无缝集成优化, 使企业全局优化运行^[31]. 跨企业产品全生命周期的全过程集成优化的涵义是将市场需求、产品与工艺设计、原材料供应、资源计划、生产过程管理与控制、产品销售与服务所涉及的企业集成, 通过流程产品全生命周期的全过程数字化、网络化、智能化, 实现流程工业高端化、智能化、绿色化. 高端化的涵义是使工艺流程紧凑和柔性, 生产出高性能、高附加值产品. 智能化的涵义是流程产品与工艺设计智能化、生产智能化、产品服务智能化. 绿色化的涵义是全生产链供应链安全环保, 资源能源循环利用, 能耗物耗低, 污染物近零排放.

1.3 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造的机遇与挑战

1.3.1 机遇

工业互联网和人工智能技术的最新进展为实现流程工业智能优化制造创造了机遇.

工业互联网是实现智能制造纵向集成、端到端集成和横向集成的基础设施: 纵向集成可实现企业的生产方式由金字塔式变革为智能化扁平式; 端到端集成可实现产品与工艺的研发、产品联合设计、生产制造、产品销售与服务各项业务流程高效化, 缩短生产周期, 减少运营成本, 提高客户满意度^[9].

利用工业互联网获取的工业大数据, 分析与获取有价值的信息需要采用AI技术^[32,33]. AI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^[7]。将人的智能行为实现自动化或复制一直是人工智能研究的核心目标^[34]。麦肯锡全球研究所研究报告也指出: 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^[35]。AI技术发展为企业经营与生产过程的管理与决策这类知识性工作的自动化、提升生产运行和管理与决策的智能化水平创造了机遇^[36]。流程工业过程控制、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。工业互联网汇聚上述工业大数据, 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模型驱动型转变为数据驱动型。基于数据的建模、控制与优化已成为自动化科学与技术中新的研究热点^[37,38], 自动化、人工智能与工业互联网和流程工业深度融合与协同为实现流程工业智能优化制造开辟了新的途径。

1.3.2 面临的挑战

(1) 流程制造企业智能优化制造面临的挑战

目前, 工业互联网虽然实现了流程制造企业设备状态的远程监控和运维、资源调配等功能, 但仍缺乏如何利用工业互联网实现制造过程多单元协同、控制与决策全局智能优化制造的深入研究和实践^[14,30]。正如发表在*Nature*的文献^[32]中所指出的, 多尺度、多源信息获取、预测模型和资源计划决策与控制过程集成是智能制造的挑战难题, 具体而言: 1) 生产过程运行工况识别、工艺参数和运行指标依赖人的经验和知识判断与决策; 2) 生产全流程各过程协同控制与运行管理依赖人的经验和知识判断与决策, 难以实现运行控制与管理集成优化^[30,39]; 3) ERP、MES决策依赖人的经验和知识; 4) ERP、MES和控制系统无法实现纵向无缝集成, 流程制造企业难以实现全局优化^[39]。

(2) 面向产品全生命周期的跨企业流程工业智能优化制造面临的挑战

由于流程型制造业的产品是为下游制造企业提供的原材料和能源, 产品全生命周期所涉及到的工业场景与离散制造不同, 所需工业互联网平台不同。目前, 缺乏面向流程行业特定技术领域的专业性工业互联网平台。产品全生命周期的数字化、网络化、智能化程度不高, 所涉及到的制造活动的智能化程度低, 制造活动涉及到的知识工作依赖人的经验和知识完成, 难以实现产品全生命周期制造系统优化。具体而言: 1)

目前工业互联网将行业 and 产业集群的原料供应商、制造企业、物流和市场需求之间的信息互联、共享和可视化, 但是上下游企业产品设计、生产制造和制造服务协同效率低下、智能化水平不高^[40]; 2) 需求、设计与供应链协同方面, 目前主要是基于工业互联网平台获取市场需求, 缺乏市场需求预测能力且动态响应市场变化的能力较弱; 设计与生产协同方面, 设计与生产互操作性不强; 生产、销售与服务协同方面, 目前主要是基于工业互联网回溯产品, 生产及时响应服务需求能力不强, 制造企业对产品质量管控的客户服务尚未延伸到产品全生命周期; 3) 尚未实现在产品全生命周期内支持全球设计、采购、生产和服务等业务的高效并行协作^[41]。

2 工业互联网驱动的流程制造企业智能优化制造模式

2.1 制造流程全局优化

流程工业生产过程通过工业互联网获取工业大数据, 实现智能感知与工况识别、高性能智能自主控制、全流程多工序协同优化控制、远程移动可视化监控和增强操作人员能力的AI系统, 实现制造流程全局优化新模式。

(1) 驱动人工化验和人工观测与识别向大数据驱动的智能感知与工况识别系统发展

智能感知与工况识别系统利用工业互联网将人工化验相关的控制系统输入输出数据、反映运行工况的音视频等多源异构工业大数据汇聚, 采用工业人工智能技术, 实现人工化验的工艺参数实时预测和运行工况智能感知、预测和异常工况溯源。

(2) 驱动控制系统向高性能智能自主控制系统发展

高性能智能自主控制系统通过大数据驱动的智能感知与工况识别系统, 智能感知生产条件变化, 自适应决策控制回路设定值, 使回路输出跟踪设定值, 实现运行指标的优化控制^[16]; 对运行工况进行实时可视化监控, 及时预测异常工况; 当异常工况出现时, 通过自愈控制和自优化控制排除异常工况, 实现安全优化运行。

(3) 驱动生产单元的自动化系统向全流程多工序协同优化控制系统发展

全流程多工序协同优化控制系统通过智能感知与

预测多工序的运行指标(表征产品质量、产量、消耗、成本、排放的工艺参数)实际值, 自适应优化决策各生产单元的运行指标目标值, 使生产单元的自动化系统跟踪运行指标目标值, 自主学习与自优化, 实现全流程多工序协同优化控制。

(4) 驱动本地监控系统向远程移动可视化监控系统发展

传统的生产过程监控系统采用PLC/DCS控制系统, 操作人员只能在控制室对生产过程的控制信息进行监控。远程移动可视化监控系统通过工业互联网采集工业大数据, 实现生产过程要素的数字孪生、可视化监控、预测与回溯, 实现控制系统性能的可视化监控。操作者和专业人员无需亲临环境恶劣的工业现场, 随时随地通过其他终端如智能手机远程监控和操作工业过程控制系统, 实现无人值守和移动决策。同时, 方便地利用本地和云端的高性能软硬件资源对生产过程进行优化、控制与决策, 保障其运行安全和优化。

(5) 驱动人工操作向增强操作人员能力的AI系统发展

针对流程制造中仍存在大量需要人工操作和人工决策的环节(比如装配操作和工艺参数决策、质量检测 and 故障处理), 为提高操作效率和保证操作质量, 增强操作人员能力的AI系统通过工业互联网对操作行为和决策行为进行智能视频监控和回溯, 人机交互, 增强操作人员的能力, 如: 装配员工操作和质检员产品质

量检测等人机交互的工作指导, 操作人员的安全操作行为和上岗资质监控^[42]。

2.2 数字孪生驱动的生产要素管理与决策和控制一体化

工业互联网驱动集中式ERP与MES向分散式大数据驱动的生产要素(设备、产品质量、能耗与物耗、碳排放)数据采集、数字孪生^[43]、可视化监控、预测与回溯和决策一体化系统发展。

(1) 工业互联网驱动的设备管控智能化

工业互联网驱动实现设备使用者对设备工况远程移动监控、可视化分析和运维决策一体化和设备生产厂商对售后设备远程运维服务, 如图3所示, 包括如下部分。

设备运行状况智能感知与识别。通过工业互联网实时采集设备温度、声音、振动、油液等状态数据, 设备履历的文本记录, 以及人员操控行为记录与视频等多源异构信息, 设备使用者智能感知与识别设备运行状况, 实现数据驱动的全流程设备远程集中实时监控和设备健康状态识别^[44,45], 掌控设备的运转率、完好率, 减少设备连锁损坏、空转与非计划停机。设备生产厂家对售后设备运行状况智能感知与识别, 进行远程运维服务。

设备运行工况数字孪生、可视化分析与识别、预测与回溯。汇聚运行工况相关的设备历史运行和操作数据, 建立设备运行工况数字孪生模型以及运行工况

图3 (网络版彩图)设备远程移动可视化监控、预测和智能运维决策

Figure 3 (Color online) Remote visual monitoring, forecasting and intelligent operational decisions for equipments.

识别的信息物理系统^[46], 实现数字孪生驱动的设备运行工况可视化分析与识别和预测与回溯(正常优工况、正常非优工况和异常工况)^[47].

设备在线与远程智能运维管理与决策. 以设备安全和优化运行为目标, 在设备运行状况智能感知与识别和设备运行工况数字孪生、可视化分析与识别、预测与回溯的基础上, 生产企业实现人机合作的智能巡检, 设备停机、消耗性备件更换决策等, 具体是: 1) 利用移动终端、地理信息和设备履历信息, 自动推送待检设备; 2) 建立移动终端自录入的巡检业务系统, 运用移动终端来减少设备诊断流程及现场设备运行管理; 3) 建立智能化喷注润滑系统; 4) 基于增强现实技术的智能点检与保养. 设备生产厂商通过跨企业工业互联网实现远程智能运维管理与决策, 根据设备运行工况或负荷等量化部件劣化程度, 预测剩余寿命, 实现视情维护; 利用设备剩余寿命信息, 设备运维管理部门与采购部门联动来实现以保障生产和库存最小为目标的离线检修计划决策和备件管理智能决策.

(2) 工业互联网驱动的产品质量管控智能化

工业互联网驱动产品质量数据采集、数字孪生、可视化监控与分析、预测与回溯和决策一体化如图4所示, 包括如下部分.

产品质量相关信息的感知、采集和处理. 通过工业互联网汇聚包括质量检测数据、设备控制参数、物料信息、订单生产进度、岗位操作视频监控和供应链物流数据等多源异构数据, 并获取供货商标签来对供货商原料进行管控.

产品质量数字孪生、可视化分析、预测与回溯. 汇聚产品质量相关的可见光图像、光谱图像、质量检测数据、设备控制参数等数据进行产品质量数字孪生, 实现产品质量缺陷可视化分析和在线检测. 对影响

产品质量指标的因素进行分析, 通过质量智能预测, 提前掌握工序质量指标和变化趋势. 对生产全流程质量数据、原料供应商质量信息和售后产品质量管理信息等及时查询和关联分析, 跟踪产品在其生命周期中流转的全过程, 当发现产品质量异常或物料质量异常时, 采用数据驱动的贡献图和重构等方法进行快速正向、反向回溯来实现采、销、生产中的缺陷定位及原因分析, 包括: 产品生产线信息回溯、产品工序质检人员回溯.

产品质量异常处理智能决策. 产品质量发生异常变化或预测出异常趋势时, 进行调整控制参数、维护生产设备等决策, 推送决策信息, 使相关生产人员及时处理, 保证产品质量满足要求.

(3) 工业互联网驱动的能耗物耗管控智能化

工业互联网驱动能耗物耗实时动态监控、预测和异常回溯, 并与生产协同优化决策, 包括如下部分.

能耗物耗智能感知与动态监控. 利用工业大数据和企业生产全流程运行态势智能感知设备的启停状态及能耗, 对能耗物耗相关数据自动进行分类与标记索引, 智能化分析各个生产环节中能耗物耗的实时状态. 通过对设备运行数据、能耗物耗数据的全面采集和分析, 建立典型设备的状态分析和效能分析的性能模型.

能耗物耗智能分析、预测与异常回溯. 针对生产过程反映单位产品能源利用效率的指标——产品单吨能耗, 将机理分析与机器学习相结合, 建立单吨能耗数字孪生模型, 实现单吨能耗可视化监控与分析 and 终点预报. 当实际单吨能耗指标不能满足要求时, 基于数字孪生驱动的预测与回溯和智能优化决策算法进行能耗超限原因分析、生产瓶颈定位与异常溯源和智能优化决策.

能耗管控与生产管控的协同优化决策^[48]. 目前生产管理与控制和能耗管理与控制采用不同的系统分别

图4 (网络版彩图)产品质量智能化管理与决策的一体化

Figure 4 (Color online) Integration of intelligent management and decision making for product quality.

进行. 例如, 耗能超限, 能耗管控系统采用停机等手段保证用电量符合要求, 造成不必要的停机和损耗. 利用工业互联网, 实现能耗管控与生产管控的协同优化, 在满足企业总能耗和产品交货期要求的前提下优化不同耗能设备的能源分配和计划排产, 例如: 1) 在对能耗物耗精准分析的基础上, 以满足产品交货期、生产能耗、产品质量与产量等优化为目标, 制定生产计划; 2) 监控与预测当前单元设备能耗, 与本企业其他产线或其他单元的生产联动实现生产节奏的节能优化.

(4) 工业互联网驱动的碳排放管控智能化

目前, 企业碳排放统计的方式为年度碳排放报告填报, 工业互联网驱动碳排放实时监控、分析、预测、回溯与协同优化决策.

碳排放智能感知与动态监控. 利用工业互联网动态感知生产全流程运行态势, 采集碳排放相关数据(CO_2 排放量、 SO_2 排放量、 CO 排放量等), 对其进行自动分类与标记索引, 实现大数据驱动的各个生产环节中碳排放的可视化监控.

生产全流程碳排放智能分析、预测与异常回溯. 在大数据驱动的各生产环节中碳排放可视化监控的基础上, 计算与分析生产过程单位产品的碳排放量, 预测碳排放量变化趋势, 回溯碳排放量超限原因.

经济效益指标和碳排放指标协同优化决策. 以实现经济指标和碳排放指标目标值优化为目标, 优化生产链与供应链, 实现能源分配和物资调配与生产计划与调度的智能协同优化决策.

2.3 决策与控制集成优化

工业互联网驱动ERP/MES/PCS三层结构向智能自主控制和人机互动与协作的管理与决策智能化系统

图 5 (网络版彩图)制造流程信息系统两层结构

Figure 5 (Color online) Two-layer structure of information system for process industries.

两层结构的决策与控制一体化系统发展, 如图5所示^[29], 实现人机互动与协作的管理与决策智能化系统和智能自主控制系统一体化集成, 包括三个层面的决策与控制一体化集成.

(1) 设备运行管理与控制一体化集成: 智能自主控制系统实现生产条件和设备运行状态智能感知和工况识别, 以实现设备安全优化运行为目标, 自适应决策控制系统指令, 在频繁干扰和工况变化的情况下, 控制系统仍然能够很好地跟踪控制指令, 保证设备安全可靠优化运行.

(2) 生产全流程运行管理与控制一体化集成: 人机互动与协作的管理与决策智能化系统获取生产全流程多单元运行状态信息, 以生产指标优化为目标, 优化决策各工业过程智能自主控制系统的运行指标, 生产全流程中各工业过程的智能自主控制系统随决策指令协同运行, 实现生产全流程运行管理与控制一体化集成.

(3) 企业资源计划、生产计划与调度和运行管理与控制一体化集成: 人机互动与协作的管理与决策智能化系统利用工业互联网对市场信息、生产条件实时感知, 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, 以企业全局优化为目标, 自适应优化决策企业综合生产指标、全流程生产指标和运行指标; 智能自主控制系统根据优化决策的运行指标协同运行, 实现企业资源计划、生产计划与调度和运行管理与控制一体化集成.

3 面向产品全生命周期的跨企业流程工业智能优化制造模式

流程工业制造的产品是用于下游制造业的原材料

和能源。流程工业产品全生命周期智能优化制造就是将市场需求、产品与工艺设计、原材料供应、资源计划、生产过程管理与控制、产品销售与服务所涉及的企业集成,实现价值链内上下游企业集成与共享采购、设计、生产、销售等信息。以产品全生命周期全过程中的产品质量优化、原材料成本和运输成本最小等为目标将订单信息、工艺设计任务、制造任务等在不同地域、不同规模的企业之间动态配置与协同优化。具体包括:面向规模定制的需求识别与预测、供应链和生产计划协同优化,面向新产品工艺设计的协同优化,基于产品使用过程质量分析的生产工艺智能优化。

3.1 面向规模定制的需求识别与预测、供应链和生产计划协同优化

需求识别和预测。针对典型流程工业(比如钢铁工业)通常将下游制造业分散的用户需求合并后组织大规模的批量生产,通过对市场信息和用户历史数据的分析实现用户需求识别和预测,并将分散的用户需求根据产品属性合并,确定组织生产所需采购的原料。

面向库存最小和用户需求动态响应的供货企业、制造企业和用户企业供应链集成优化。将供货企业、制造企业和用户企业供应链集成优化。(1) 原料供货企业实时感知与预测流程工业制造企业的生产需求,按需安排生产、送货,实现供货企业与制造企业之间协同的准时生产模式,供货企业精准满足生产需求,推动少库存和零库存,降低制造企业的库存成本;(2) 流程制造企业以满足用户需求、采购成本与生产成本和库存最优化等为目标确定物流计划和原料采购计划,以及确定执行生产任务的生产线。另一方面,制造企业向用户企业开放订单进展情况和生产全过程运行状态,实现全过程的质量管理;(3) 用户企业通过电商平台实时发布需求信息,制造企业按需生产,并快速响应用户动态变化的需求,准时交付订单。

需求识别和预测与企业资源计划和生产计划协同优化。用户需求与资源计划、合同排产、计划排程一体化协同。(1) 在资源计划方面,根据用户需求对多制造基地、工序、机组产能进行综合平衡,消解物流冲突和产销矛盾,指导接单和交期应答,实现各制造企业整体产销协同优化;(2) 在合同排产方面,通过用户需求与加工途径优化、成本约束、能耗约束、设备状态约束和批量效益平衡,给出优化的合同排产策略;

(3) 在计划排程方面,根据用户动态变化的需求,通过数字孪生模型支持作业变化条件下的实时优化和动态响应,根据库存和生产进度及时调整生产计划与调度方案。

3.2 面向新产品工艺设计的协同与共享优化

基于专业化工业互联网平台的流程工业新产品的工艺设计,采用并行工作的方式进行全球化异地联合设计。与历史相似或同类产品工艺设计共享产品工艺设计经验库,根据历史工艺设计数据和新产品需求,建立新产品工艺设计方案,包括:工艺配方、生产方式、工艺路径和工艺参数,并且将工艺设计与供货企业原料供应、制造企业生产计划的协同优化;建立面向工艺设计的数字孪生模型,通过数字孪生驱动的虚拟实验替代工业现场实验,评估新产品工艺设计的成本、周期和产品质量,以人机互动方式迭代更新优化工艺设计方案。

3.3 基于产品使用过程质量分析的生产工艺智能优化

流程工业产品服务智能化的核心是满足用户对产品质量的要求,利用工业互联网平台与现实和潜在用户展开一对一、一对多的双向信息交流与共享,实时获取用户企业对产品的需求和产品使用过程的质量信息,感知原料信息与生产过程信息,分析和回溯质量异常原因,通过人机互动智能决策,优化生产工艺流程,使产品质量满足客户需求。

4 结论与展望

工业互联网作为实现智能制造纵向集成、端到端集成和横向集成的基础设施,推动了学术界和工业界进行相关研究。特别是工业界先期开展了一些工业互联网驱动的制造新模式的创新实践。本文结合工业互联网和智能制造纵向集成、端到端集成和横向集成,展望了工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式。

为支撑实现工业互联网驱动的流程工业智能优化制造的新模式,需要将工业自动化与信息化技术、人工智能、数据科学等与工业互联网深度融合,开展下列研究:

(1) 建立由智能自主优化控制系统、生产过程运行管理与控制一体化系统和人机互动与协作的管理与决策智能化系统组成的企业工业互联网管理与控制系统;

(2) 建立由产品全生命周期涉及到的企业工业互

联网管理与控制系统和面向特定行业的专业性工业互联网平台组成的跨企业工业互联网系统;

(3) 研发工业系统的数字孪生、智能感知与识别、自优化控制、可视化监控、预测与回溯和人机互动与协作的智能优化决策等工业人工智能算法。

参考文献

- 1 Evans P C, Annunziata M. Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines. GE, 2012
- 2 Forschungsunion. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013
- 3 Industrial Internet Consortium. The Industrial Internet of Things Volume G8: Vocabulary. 2018
- 4 Morrish J, Figueredo K, Haldeman S, et al. The Industrial Internet of Things, Volume B01: Business Strategy and Innovation Framework. Industrial Internet Consortium, 2016
- 5 Industrial Internet Consortium. Usage of standards in the smart factory web testbed. 2020
- 6 Industrial Internet Consortium. Outcomes, insights and best practices from IIC testbeds: Smart factory web testbed. 2019
- 7 Riedl M, Zipper H, Meier M, et al. Cyber-physical systems alter automation architectures. *Annu Rev Control*, 2014, 38: 123–133
- 8 Plattform Industrie 4.0. Plattform Industrie 4.0—What is Industrie 4.0? <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>
- 9 Colombo AW, Karnouskos S, Kaynak O, et al. Industrial cyber physical systems: A back bone of the fourth industrial revolution. *IEEE Indust Electron Mag*, 2017, 11: 6–16
- 10 Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Plattform Industrie 4.0. 2019
- 11 Ministry of Industry and Information Technology Industrial Internet Task Force. Industrial Internet Innovation and Development Action Plan (2021–2023). 2021 [工信部工业互联网专项工作组. 工业互联网创新发展行动计划(2021~2023年). 2021]
- 12 Alliance of Industrial Internet. Industrialization Networking Platform White Paper (2019) (in Chinese). 2019 [工业互联网产业联盟. 工业化联网平台白皮书(2019). 2019]
- 13 Chai T Y, Jin Y H, Ren D X, et al. Contemporary integrated manufacturing system based on three-layer structure in process industry (in Chinese). *Control Eng*, 2002, 9: 1–6 [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. 控制工程, 2002, 9: 1–6]
- 14 Chai T Y, Gui W H, Qian F, et al. Big Data and Manufacturing Process Knowledge Automation Development Strategy Study (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [柴天佑, 桂卫华, 钱锋, 等. 大数据与制造流程知识自动化发展战略研究. 北京: 科学出版社, 2018]
- 15 Chai T Y. Industrial process control systems: Research status and development direction (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2016, 46: 1003–1015 [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: 1003–1015]
- 16 Han Z G, Wang G Q. Cascade scheme of model free control law and its application (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2006, 32: 345–352 [韩志刚, 汪国强. 无模型控制律串级形式及其应用. 自动化学报, 2006, 32: 345–352]
- 17 Sugie T, Ono T. An iterative learning control law for dynamical systems. *Automatica*, 1991, 27: 729–732
- 18 Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 1993, 1: 146–155
- 19 Fu Y, Chai T. Nonlinear multivariable adaptive control using multiple models and neural networks. *Automatica*, 2007, 43: 1101–1110
- 20 Basak K, Abhilash K S, Ganguly S, et al. On-line optimization of a crude distillation unit with constraints on product properties. *Ind Eng Chem Res*, 2002, 41: 1557–1568
- 21 Marchetti A, Chachuat B, Bonvin D. Real-time operations optimization of continuous processes. In: Proceedings of the 5th International Conference on Chemical Process Control. Lake Tahoe: American Institute of Chemical Engineering, 1997. 156–164
- 22 Engell S. Feedback control for optimal process operation. *J Process Control*, 2007, 17: 203–219
- 23 Chai T, Qin S J, Wang H. Optimal operational control for complex industrial processes. *Annu Rev Control*, 2014, 38: 81–92
- 24 Chai T Y, Ding J L, Wang H, et al. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2008, 34: 505–515 [柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. 自动化学报, 2008, 34: 505–515]

- 25 Chai T, Ding J, Wu F. Hybrid intelligent control for optimal operation of shaft furnace roasting process. *Control Eng Practice*, 2011, 19: 264–275
- 26 Chai T Y. Challenges of manufacturing process intelligence to artificial intelligence (in Chinese). *Bull Nat Nat Sci Found China*, 2018, 3: 251–256 [柴天佑. 制造流程智能化对人工智能的挑战. 中国科学基金, 2018, 3: 251–256]
- 27 Khong S Z, Nešić D, Tan Y, et al. Unified frameworks for sampled-data extremum seeking control: Global optimisation and multi-unit systems. *Automatica*, 2013, 49: 2720–2733
- 28 Gil Y, Greaves M, Hendler J, et al. Amplify scientific discovery with artificial intelligence. *Science*, 2014, 346: 171–172
- 29 Chai T Y, Ding J L. Intelligent optimized manufacturing for process industries (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2018, 20: 51–58 [柴天佑, 丁进良. 流程工业智能优化制造. 中国工程科学, 2018, 20: 51–58]
- 30 Qian F, Du W L, Zhong W M, et al. Problems and challenges of smart optimization manufacturing in petrochemical industries (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2017, 43: 893–901 [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: 893–901]
- 31 Chai T Y. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms control and optimization theories (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2009, 35: 641–649 [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: 641–649]
- 32 Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data. *Nature*, 2017, 544: 23–25
- 33 Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 2006, 313: 504–507
- 34 Executive Office of the President, National Science and Technology Council, Committee on Technology. Preparing for the future of artificial intelligence. 2016
- 35 McKinsey Global Institute. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. 2013
- 36 Gui W H, Wang C H, Xie Y F, et al. The necessary way to realize great-leap-forward development of process industries (in Chinese). *Bull Nat Nat Sci Found China*, 2015, 5: 337–342 [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, 5: 337–342]
- 37 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. *Annu Rev Control*, 2017, 43: 1–64
- 38 Qin S J. Process data analytics in the era of big data. *AIChE J*, 2014, 60: 3092–3100
- 39 Strategic Consulting Project of Chinese Academy of Engineering. Development Strategy Study of Intelligent and Optimized Manufacturing in Raw Material Industry in the New Era (in Chinese). 2020 [中国工程院战略咨询项目. 新时代原材料工业智能优化制造的发展战略研究. 2020]
- 40 IBM Institute for Business Value. Smart operations, the advantage: A global top management survey of chief operating officer insights (in Chinese). 2020, <https://www.ibm.com/downloads/cas/JPA0VDVD> [IBM商业价值研究院. 智能运营, 优势尽显: 全球最高管理层调研之首席运营官洞察. 2020, <https://www.ibm.com/downloads/cas/JPA0VDVD>]
- 41 IBM. Sandvik Transforms Mining Asset Management with IoT and Analytics. 2020. https://www.ibm.com/case-studies/sandvik-ibm-iot?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=sandvik
- 42 National Science and Technology Council. The National Artificial Intelligence Research and Development Strategic Plan: 2019 Update. 2019
- 43 Industrial Internet Consortium. Digital Transformation in Industry White Paper. 2020
- 44 Gao D W, Wang Q, Zhang F, et al. Application of AI techniques in monitoring and operation of power systems. *Front Energy*, 2019, 13: 71–85
- 45 Zhao C H, Yu W K, Gao F R. Data analytics and condition monitoring methods for nonstationary batch processes—Current status and future (in Chinese). *Acta Autom Sinica*, 2020, 46: 2072–2091 [赵春晖, 余万科, 高福荣. 非平稳间歇过程数据解析与状态监控——回顾与展望. 自动化学报, 2020, 46: 2072–2091]
- 46 Yuan Y, Tang X, Zhou W, et al. Data driven discovery of cyber physical systems. *Nat Commun*, 2019, 10: 4894
- 47 Yuan Y, Ma G J, Cheng C, et al. A general end-to-end diagnosis framework for manufacturing systems. *Nat Sci Rev*, 2020, 7: 418–429
- 48 Deng W L. Prospect of energy management and control system in iron and steel industry under intelligent manufacturing (in Chinese). *Iron Steel*, 2020, 55: 1–9 [邓万里. 智能制造视野下钢铁企业能源管控系统展望. 钢铁, 2020, 55: 1–9]

Perspectives on industrial-internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries

CHAI TianYou, LIU Qiang, DING JinLiang, LU ShaoWen, SONG YanJie & ZHANG YiJie

State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China

In this paper, the potential of the industrial internet in representative countries and the current status of intelligent optimized manufacturing for process industries are first reviewed, where the opportunities and challenges introduced by the industrial internet are analyzed. Second, by vertically considering the integration from end to end and horizontally introducing the important infrastructure of intelligent manufacturing using industrial internet, the perspectives of industrial-internet-driven intelligent mode for process industries are discussed. The intelligent optimized manufacturing mode for process industries in industrial-internet-driven manufacturing enterprises consists of the following. i) The manufacturing process is transformed into intelligent optimized manufacturing of the whole process. ii) The centralized enterprise resource planning (ERP) and manufacturing execution system (MES) are transformed into an integrated digital-twin-driven decentralized management and decision-making system for production factors. iii) The traditional process-control system–MES–ERP three-layer structure is transformed into an integrated two-layer structure decision-making and control system that is composed of an autonomous-control and intelligent decision-making system with human–machine cooperation. The optimized life-cycle cross-enterprise intelligent optimized manufacturing mode for process industries can achieve global collaborative optimization of the entire production chain of demand, design, purchasing, production, sales, and service. Finally, the research fields that need to be developed in the future are presented.

industrial internet, intelligent optimized manufacturing of whole processes, process industries, life cycle

doi: [10.1360/SST-2021-0405](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0405)