

面向 2035 的流程制造业智能化目标、特征和路径战略研究

袁晴棠¹, 殷瑞钰¹, 曹湘洪¹, 刘佩成²

(1. 中国工程院, 北京 100088; 2. 中国石油化工集团有限公司, 北京 100728)

摘要: 本文重点研究流程制造业制造流程的本构特征、耗散结构、耗散过程和建模机理等物理本体问题, 以石化工业和钢铁工业为主要研究对象, 将智能化与信息物理系统的概念进行对接, 研究如何实现全厂性动态运行、管理、服务等过程的自感知、自学习、自决策、自执行、自适应, 构建基于信息物理系统的智能化工厂。据此论证面向 2035 年的流程制造业智能化发展的目标、特征和路径, 并针对性提出机制建设、科技项目、财政支撑、技术研发、知识产权、国际交流等方面的对策建议。

关键词: 流程制造业; 智能化; 钢铁工业; 石化工业; 2035

中图分类号: TE6; TF32 **文献标识码:** A

Strategic Research on the Goals, Characteristics, and Paths of Intelligentization of Process Manufacturing Industry for 2035

Yuan Qingtang¹, Yin Ruiyu¹, Cao Xianghong¹, Liu Peicheng²

(1. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 2. China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China)

Abstract: This study focuses on the constitutive characteristics, dissipative structure, dissipative process, modeling mechanism, and other physical essence concerning the manufacturing processes of the process manufacturing industry. The petrochemical and steel industries are used as the major research objects in the study. It integrates intelligence with the concept of cyber-physical systems (CPS) to investigate the possible approaches for realizing self-sensing, self-learning, self-decision-making, self-execution, and self-adaptation of plant-wide dynamic processes including operation, management, and service. It also studies the approaches for building a CPS-based intelligent factory. Furthermore, the goals, characteristics, and paths are proposed for the intelligent development of the process manufacturing industry toward 2035; and countermeasures and suggestions are also proposed regarding mechanism construction, science and technology project, financial support, technology research and development, intellectual property, and international communication.

Keywords: process manufacturing industry; intelligence; steel industry; petrochemical industry; 2035

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-04-16

通讯作者: 袁晴棠, 中国工程院院士, 中国石油化工集团有限公司科技委顾问, 研究方向为石油化工技术管理; E-mail: pchliu@sinopec.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向 2035 的流程制造业智能化目标、特征和路径战略研究”(2017-ZCQ-4)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

作为我国实体经济的主体，制造业是现代化经济体系的重要组成部分，主要分为流程制造业和离散型制造业。流程制造业包括钢铁、石化、建材、化工、有色金属等工业门类，是由相关的但又异质异构的装备组成的生产过程集群。流程制造业的运行过程通常伴随着物理化学变化，且动态非线性耦合也是重要特征之一，因机理复杂而难以数字化、难以建立数学模型；此外，原料状态复杂、生产工况波动大，相关过程的工艺参数需要能够实时重新设定。经过数十年的发展，我国流程制造业的工艺技术水平大幅提升，整体实力快速增长，国际影响力显著提高，基本形成了世界上门类最齐全、规模最庞大的流程制造业体系。然而，与制造强国相比，我国流程制造业存在着资源与能源利用率偏低、产品结构不尽合理、产能过剩较为严重、高端制造能力发展滞后、安全环保水平有待提升等问题；未来发展还面临更为严峻的资源、市场、环保、竞争等重大挑战，迫切需要加快实施转型升级和提质增效。因此，我国流程制造业加快向绿色化和智能化方向发展成为必然 [1]。当前到 2035 年是我国智能制造发展的关键时期，流程制造业应当抓牢这一历史性机遇，集中优势力量实施重点突破，尽快实现智能制造以支撑经济高质量发展。

国内外智能制造方面的已有研究较多针对离散型制造业的智能化问题，如德国工业 4.0 等。然而，流程制造业的智能化不同于离散型制造业，流程型智能制造的理论与实践仍处于探索过程之中，尚缺乏公认的理论体系和应用案例。对此，本文重点研究流程制造业智能化的本构特征、耗散结构、耗散过程和建模机理等物理本体问题，提出面向 2035 年的流程制造业智能化发展的目标、特征和路径，以期为我国流程制造业的创新发展提供理论参考。

二、流程型智能制造的特征

对于流程制造业而言，不同行业的制造流程既有共性特征，又有个性特征，因而内在的动态运行物理本质和智能化发展的基本特征较为明显。

(一) 共性特征

流程型制造流程是由原子 / 分子层级过程、工序 / 装置层级过程、流程 / 工厂层级过程互相嵌套组合，通过非线性相互作用 - 动态耦合、网络化、结构化等集成协同机制构建而成的，其本质是整体流动和转化，体现着整体论思维和还原论思维的结合、并以整体集成思维为导向 [2]。流程型制造流程由异质异构的相关工序构成，以不可拆分的制造流程整体协同运行的方式存在，适合于连续且批量化的生产，这是其共性特征。例如，流程制造企业的生产流程表现为连续或准连续方式，动态运行的要素有“流”“流程网络”“运行程序”[3,4]。

(二) 个性特征

不同行业的生产流程存在差异，工艺过程加工对象各不相同，因而具有各自的个性特征。例如，不同行业“流”的表现形式有差异，有的制造流程的“流”以“连续流”为主、“间歇流”为辅，而有的表现形式则相反；不同行业“流”的相组成、物理特征和工况也有所不同 [5]。对于流程制造业而言，在时 - 空边界内会发生物质 - 能量的流动 / 流变和物理化学变化，运行方式较为复杂，相关过程难以有确定解，难以数字化，由此引发的信息也有所不同。因此，信息流、信息流网络的特征是有区别的，应注重数字系统和物理系统的有机结合。

(三) 动态运行过程的物理本质

流程型制造流程的动态运行过程，其物理本质可以概括为：物质流在能量流的驱动和作用下，按照设定的“程序”，沿着特定的“流程网络”作动态 - 有序的运行，由此实现多目标优化 [6]。不同行业加工的物质流组分是不同的，能量流组成也随之不同，但都是不同形式的“流”在相应的“流程网络”中按“程序”运行。流程型制造流程的动态运行过程表现为开放性、非平衡性，属于在一个耗散结构内运动的耗散过程。为了优化流程运行的耗散过程，流程系统的运行状态应是动态 - 有序、协同 - 连续 / 准连续的。主导形成流程结构的“序”以及流程运行的“序”来源于制造流程内部结构及其相关信息，制造流程的自组织性来自于流程内相关工序 / 装置的功能序、空间序和时间序的合理配置与集成

组合。制造流程自组织力的强弱取决于制造流程系统内工序功能集的解析-优化、工序之间相互作用关系集的协同-优化、流程内工序集合的重构-优化 [2]。

（四）流程型智能制造的基本特征

流程型制造业智能制造的核心目标在于：在生产经营中显著提高应对市场的灵活性，在生产过程中显著改善效率、安全和清洁化，为了显著提高企业的经济效益来研发生产经营全过程的数字物理融合系统。相应特征包括：具有物质流网络、能量流网络、信息流网络“三网融合与协同”的信息物理系统；具备全面感知、智能决策、精准执行、深度服务等功能；实际涵盖自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等具体特征；涉及动态-精准设计、协同-优化运行、高效一体化管理、安全-低库存供应链、差异化服务等 [5]。

三、流程制造业智能化发展目标

作为我国制造业的重要组成部分，以钢铁工业、石化工业为代表的流程制造业，既是我国经济社会发展的支柱产业，又是实体经济的基石，相应产值约占全国规模以上工业总产值的 47%。我国流程制造业虽然总体规模和综合实力显著提升，但与世界先进水平相比，在竞争优势、技术能力、质量品牌、环境友好等方面还存在一定程度的差距，结构性供需失衡问题也较为突出。

当前，移动互联网、大数据、云计算、物联网、第五代移动通信（5G）、区块链等新一代信息技术不断取得突破，特别是新一代人工智能（AI）技术与先进制造技术深度融合所形成的新一代智能制造技术，已成为新一轮工业革命的核心驱动力。我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段，正处在转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期，迫切需要新一代 AI 等重大创新添薪续力 [7]。

“十九大”报告指出，要加快发展先进制造业，加快建设制造强国。推动流程制造业智能化发展是顺应制造强国战略的必然选择，也是适应新时代流程制造业发展数字化、网络化、智能化趋势，推进我国供给侧结构性改革、支撑经济高质量发展的重

要途径。

流程制造业智能化发展要以“理论突破、标准引领，总体规划、顶层设计，创新驱动、转型升级，试点示范、稳步推进”为原则，以深化供给侧结构性改革为主线，以智能化工厂为主攻方向，推动信息技术与先进制造技术深度融合发展，推进流程制造业的技术研发智能化、工程设计智能化、生产过程智能化、经营管理智能化、供应链与服务智能化；突破制约流程制造业“两化”深度融合的关键智能技术瓶颈和重大智能装备短板，构建新型现代化流程制造智能化工厂和运营模式，推动我国流程制造业实施质量变革、效率变革、动力变革，实现由大到强的发展方式重大转变。

2025 年，全国重点流程制造企业普及数字化、网络化制造并开展深度应用，部分领域试点示范流程制造智能化工厂应用，在取得显著成效的基础上进一步扩大应用范围，使我国进入世界流程制造业智能制造的先进行列。在钢铁工业方面，建立覆盖不同流程结构的钢铁企业示范智能化工厂，应用水平达到世界先进，示范企业实现流程数字化设计、生产智能化管控、企业精益化运营、系统开放性架构。在石化工业方面，推广应用数字化、网络化智能工厂，启动数字化、网络化、智能化智能工厂试点示范，进入世界智能制造先进行列。

2035 年，数字化、网络化、智能化智能工厂完成试点示范并开始推广应用，使得我国流程制造业实现转型升级，部分企业进入世界领先行列，为 2050 年我国建成世界一流的制造强国奠定坚实基础。在钢铁工业方面，面向钢铁企业推广应用智能化技术和新模式，全行业智能化水平获得根本性提升，整体达到世界先进水平，部分企业达到世界领先水平。在石化工业方面，推广普及数字化、网络化、智能化石化工厂，促进我国石化工业实现整体转型升级，智能制造整体达到世界先进水平，部分企业进入世界领先行列。

四、流程制造业智能化发展思路

智能化工厂是流程制造业实现智能化的重要载体。推进流程制造业实现智能化发展，研判并提出发展思路是重点内容，本文针对性提出了钢厂智能化和石化厂智能化的发展思路。

（一）钢厂智能化发展思路

围绕钢铁制造流程中的产品制造、能源转换、废弃物消纳处理与资源化三方面的功能价值提升问题，基于信息物理系统的物质流网络、能量流网络、信息流网络的关联和协同集成方法，将物联网、大数据、云计算、AI 等信息技术手段与钢铁制造流程的设计、运行、管理、服务等环节进行深度融合，构建全面感知、智能决策、精准执行、深度服务等功能，用于优化钢铁制造流程结构（尤其是动态运行结构）、保障全流程运行过程中的智能化控制和管理水平提升。

1. 钢厂信息物理系统架构

从物理机制来看，相关的系统架构如图 1 所示 [6]，特色在于制造过程管控系统，含过程控制系统（PCS）和“界面”技术；针对生产执行系统（MES）、能源管理系统（EMS）、PCS、企业资源规划系统（ERP），进行一体化的集成构建。其中，与“界面”技术密切相关的 PCS 技术基础较为薄弱，应作为系统架构研发的重点切入口之一。

2. 钢厂智能制造技术架构

钢厂智能制造技术架构如图 2 所示：数据中心、知识中心、数字孪生共同构成钢厂智能制造的支撑平台，工序优化、界面优化、流程优化成为钢厂智能制造的物理基础，全流程质量管控、一体化计划调度和能源 / 环保生产协同调配作为全流程动态有序运行的指挥中枢，供应链全局优化与服务链全生命周期管理为企业经营提供新的盈利模式。

钢厂智能化的应用重点在于围绕物质流网络、能量流网络和信息流网络的“三网协同”优化问题，开展数字化工程设计、全流程运行智能化控制、全流程质量管控、一体化计划调度、能源 / 环保与生产协同调配、供应链与服务链全局优化 6 个领域的集成优化。

（二）石化厂智能化发展思路

面向石化工业的各种制造模式，覆盖石化生产全产业链，将新一代信息技术与石化生产过程的资源、工艺、设备、环境、人的制造活动进行深度融合，推进工厂横向、纵向和端到端的高度集成，建立全面感知、预测预警、协同优化、智能决策四方面关键能力，以更加精细灵活的方式提高石化厂的运营管理水平，推动制造和商业模式创新 [8~10]。

1. 石化智能制造体系架构

石化智能制造的基础设施是石化工业互联网平台，相应要素包括数据、模型和应用。这些要素在不同层次上构成了闭环反馈，体现了石化企业内部信息的纵向集成、全产业链的横向集成、工程数字化端到端集成。石化智能制造体系架构主要分为统一的数据平台、模型平台、数字空间、应用开发平台等 4 个层面（见图 3）。其中，数据平台包括数据的采集、处理和保存功能，模型平台包括机理、数字、规则的建立，数字空间主要是指以工厂为对象的数字孪生，应用开发平台包括应用的开发、部署和运行。

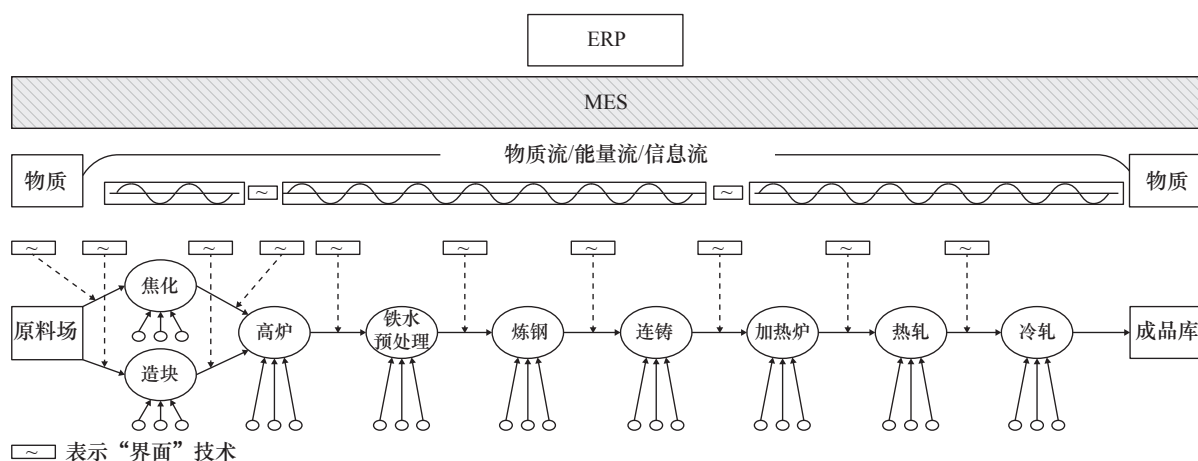


图 1 钢厂信息物理系统架构示意图

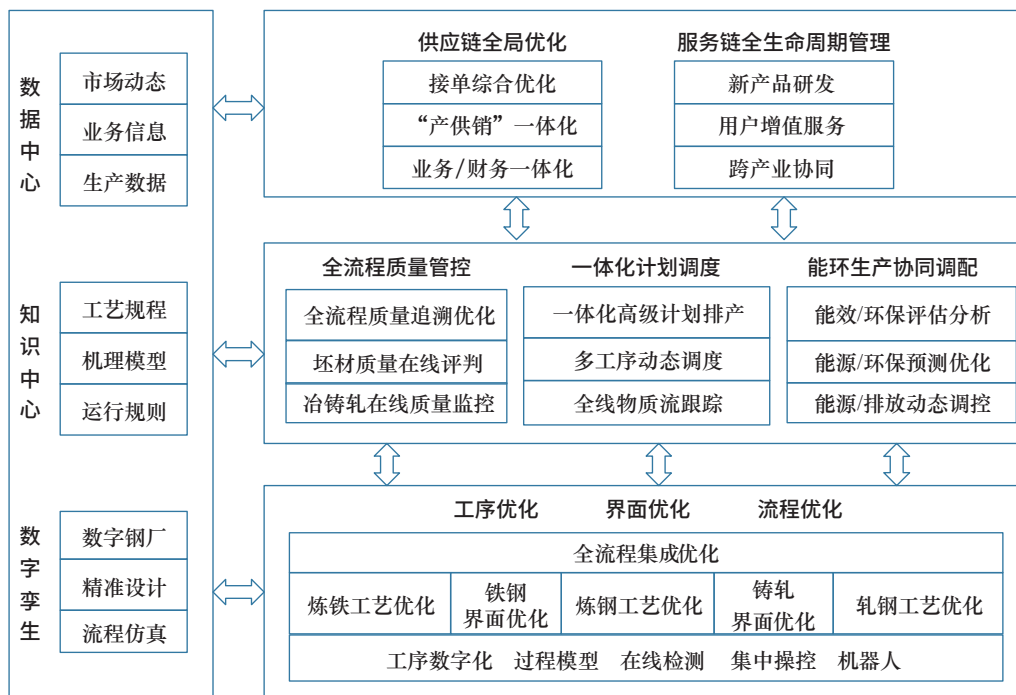


图 2 钢厂智能制造技术架构示意图

2. 石化厂智能化技术架构

结合石化工业特点和新一代信息技术优势，石化厂智能化技术架构主要包括工厂计算、人机协同智能、大数据与知识自动化、创新的制造与管理模式 4 个方面（见图 4）[11,12]。

石化厂智能化的应用重点在于围绕物质流、能量流、信息流的“三流”合一问题，开展研发设计、供应链管理、生产运行、经营决策、产业链协同、营销与服务 6 个领域的集成优化。

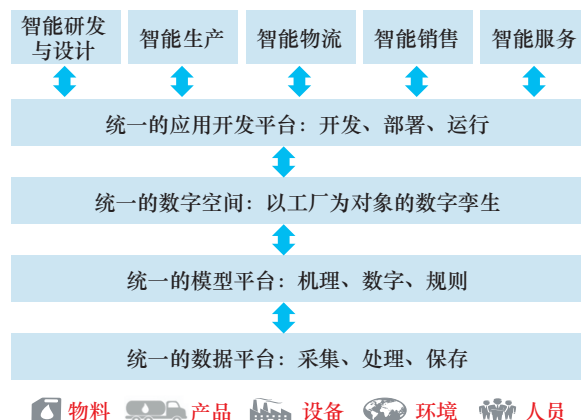


图 3 石化智能制造体系架构示意图

五、流程制造业智能化重点任务

（一）建设智能化工厂

在智能化工厂设计方面，开展面向工厂全生命周期的工程设计，打造贯穿价值链的智能化设计平台；提升设计效率和质量，实现数字化交付，形成全流程模拟优化、数字孪生仿真、工厂高性能运行的良好“基因”。

在智能化生产运行方面，通过企业内部信息的纵向集成来提升工厂感知、在线优化控制和分析决策的能力。

在智能化生产管理方面，通过智能化设备、质量、能源、数据、人力资源等方面的管理优化来提

升智能化生产管理水平。

在智能化供应链方面，通过开展全产业供应链的横向集成，实现企业内部供应链优化协同转向全产业供应链协同；推行上下游企业以及跨产业的协同运营，形成可视、可控、可追溯的集成化供应链运营体系，支撑降本增效、供需匹配和产业升级。

在智能化服务体系方面，通过智能化产品销售服务、产品增值服务、“产供销”一体化协同、产业链服务等体系的建立来降低成本并提升客户满意度。

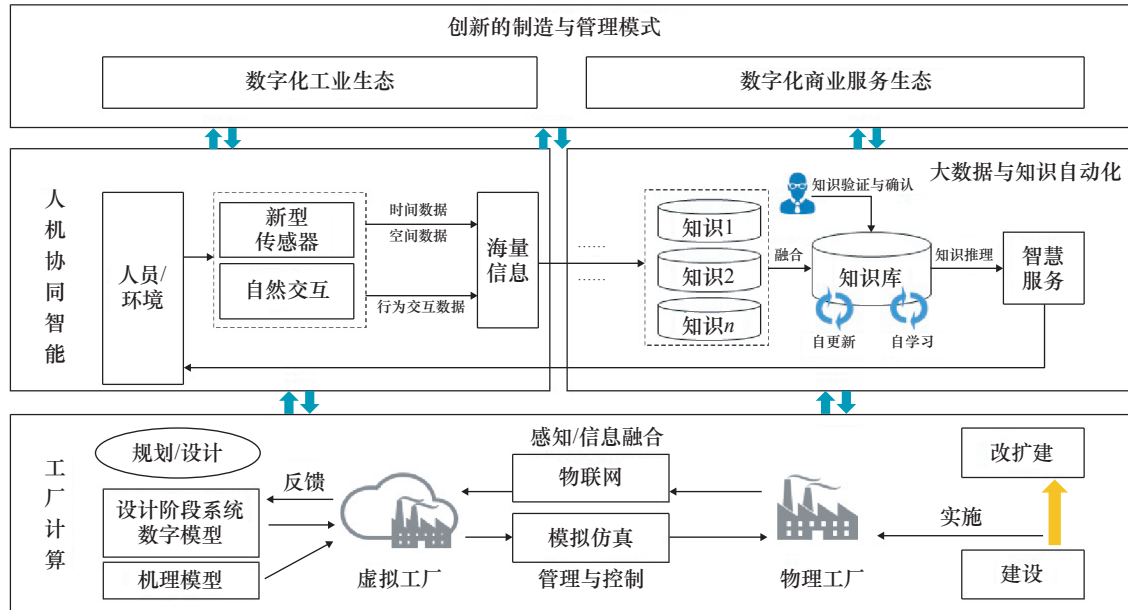


图4 石化厂智能化技术框架示意图

(二) 突破关键技术与装备

在智能钢厂方面，需要突破的关键技术与装备主要有：物质流网络、能量流网络和信息流网络的协同优化技术，多层次、多尺度智能化建模技术与求解方法，全流程一体化调度技术与质量管控技术，高温、高危、高污染复杂条件下的信息感知和数字化技术与装备，钢铁制造过程工业互联网技术与装备，智能化执行技术与装备，无人化的专业运输装置等。

在石化智能化工厂方面，需要突破的关键技术与装备主要有：面向石化工业现场需求的工业物联网技术与装备，石化工业大数据建模及智能分析技术，石化企业知识工程的理论与技术，石化工艺虚拟建模与自动控制关键技术，仪表自控智能化关键技术，大型机组健康管控关键技术，静设备与管道的智能化关键技术，流程模拟和实时在线优化技术等。

(三) 攻克工程科学问题

在智能钢厂方面，需要解决的工程科学问题有：以实现产品制造、能源转换和社会废弃物消纳为多目标优化的钢铁制造流程的物理本质和本构特征，满足“流”“流程网络”“程序”三大要素的钢铁制造流程信息物理融合系统，工厂构成与

管控架构等。

在石化智能化工厂方面，需要解决的工程科学问题有：生产和经营全过程的信息自动感知与智能分析，“人机物”协同的全流程控制与优化，全生命周期环境足迹智能监控与风险控制，生产安全风险的智能预测预警，人在回路的混合增强智能等 [13]。

(四) 建立国家标准体系

钢铁智能化工厂标准体系结构由“A基础标准”“B关键技术标准和行业应用标准”两部分组成（见图5）。“A基础标准”包括通用、安全、可靠性、检测、评价等五大类，位于智能化工厂标准体系结构的最底层，也是“B关键技术标准和行业应用标准”的支撑。“B关键技术标准和行业应用”是钢铁智能制造参考模型智能特征维度在生命周期维度和系统层级维度所组成的制造平面的投影。

石油化工行业智能制造标准体系结构由“A基础共性标准”“B关键技术标准”“C细分行业应用标准”三部分组成（见图6），着重反映标准体系各部分的组成关系。“A基础共性标准”包括通用、安全、可靠性、检测、评价等五大类，位于石化智能化工厂标准体系结构图的最底层，也是“B关键技术标准”“C行业应用标准”的支撑。

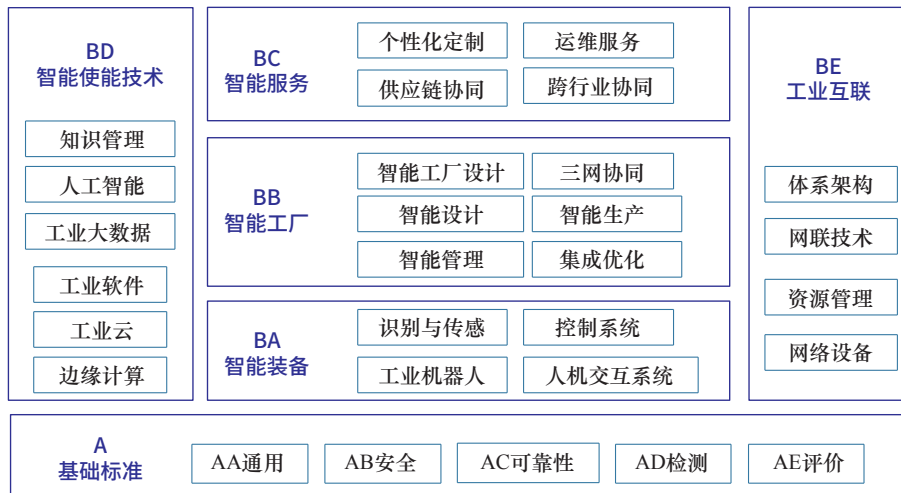


图 5 钢铁智能化工厂标准体系结构示意图



图 6 石油化工行业智能制造标准体系结构示意图

六、流程制造业智能化发展路径

（一）钢厂智能化发展路径

采用数字化、网络化、智能化并行实施的技术路线，推行“研究开发—试点示范—推广普及”模式，明确智能化钢厂的推进步骤和切入点。推进步骤具体包括：

（1）通过工程设计动态优化和（或）钢厂现有制造流程中的“界面”技术优化等措施，推动物质流网络、能量流网络的协同优化，为智能化钢厂建

设打下良好的物理基础，使物理系统架构便于信息流的导入和贯通。

（2）通过制造流程中关键信息要素（序参量）的实时感知来构建工业互联网平台，完善不同层次（PCS、MES、EMS，甚至 ERP）、不同过程（如原料场系统、炼铁系统、炼钢系统、轧钢系统、钢材库系统）的信息流网络结构和模型，打通物理系统与生产管控系统之间的信息流。

（3）优化物质流网络、能量流网络、信息流网络，推动“三网”融合，建立智能化生产管控中心、

能源 / 环保中心、设备运维中心等协同优化的生产管控系统。

(4) 构建“产供销”一体化、业务 / 财务一体化的智能化经营管理平台, 提供供应链、价值链与工厂智能化管控中心的协同运行能力。

(5) 协同产品全生命周期内的产品研发、销售服务和增值服务, 拓展智能服务链, 实现与智能化管控中心、能源 / 环保中心的联网同步。

(6) 开展智能化动态精准设计与模拟, 建立基于过程机理模型和流程运行规则的虚拟仿真工厂, 以“数字孪生”形式实现对实体物理工厂的控制、预判和持续优化。

(二) 石化厂智能化发展路径

2025 年, 基于物联网技术实现对石化厂的材料、产品、设备、环境、人员等全要素信息的实时感知, 形成数字化、网络化的石化生产环境; 建成石化过程制造工业互联网平台, 通过数据、模型和应用来开展包括资产、过程、业务在内的多个层次的闭环优化; 建成基于信息物理系统的高度自动化石化工厂, 通过“数字孪生”实现对物理工厂的控制、预测和协同优化; 在设计、生产、物流、服务等核心业务环节实施数字化转型, 通过数据自动流动来大幅提升企业对市场的响应速度和风险应对能力, 提高能源利用效率, 加强企业竞争力。

2035 年, 实现新一代 AI 在石化企业的广泛应用, 形成上游供应链与下游产品销售服务链的高效协同与资源优化能力; 通过石化工业制造系统的自感知、自学习、自决策、自执行和自适应能力来实现智能制造和绿色制造。

七、流程制造业智能化的战略举措和对策建议

(一) 战略举措

(1) 从流程制造业的本构特征和内在物理特征等基础研究入手, 以智能化工厂为核心, 加强理论研究, 制定有关智能化标准和规范, 为流程制造业智能化打牢基础。

(2) 做好顶层设计, 采取“总体规划 - 试点示范 - 分步实施 - 全面推进”方式予以实施, 明

确各阶段的发展思路、发展目标、重点任务、重点工程科技问题、重大关键技术和技术路线图, 体现工作推进的系统性和有序性。

(3) 提升流程制造业智能化工厂设计方案, 将规划设计与工程设计深度融合, 解决可能面临的系列工程问题, 扎实开展流程制造业智能化工厂优化设计。

(4) 在技术与装备方面推行“产学研用”一体化协同创新, 着力解决流程制造业智能化工厂建设过程中的技术难题。

(5) 结合流程制造业企业的发展规模、技术水平、信息化水平等实际情况, 分类开展智能化工厂建设。

(6) 完善职业教育与专业人才培养模式, 注重可持续发展, 培养造就一批流程制造业智能化工厂方向的专业技术与人才队伍。

(二) 对策建议

(1) 建立流程制造业智能化推进机制, 推进智能制造战略实施, 推动流程制造业转型升级。

(2) 针对制约我国流程制造业智能化的理论及标准体系和关键技术瓶颈, 梳理和调整设立流程制造业智能化国家科技重大专项、重点研发计划和科技创新类项目, 将其列入“十四五”国家科技攻关项目计划, 力求稳定增加研发资源投入, 优化投入结构, 大幅提高基础研究投入占比。

(3) 保持政府财政资金投入, 用好技术改造专项资金来推进智能制造, 采取税收优惠政策, 加大对发展流程制造业智能化的金融支持。

(4) 从国家层面加大对相关领域技术创新的支持力度, 设立流程制造业智能制造重点科技开发项目, 重点实施基础建模、智能传感、智能化装备和工业软件等方面的技术研发, 突破流程制造业智能化的关键技术瓶颈, 逐步实现自主安全可控。

(5) 建立数字资产知识产权保护机制, 引入数字资产许可制度, 构筑保持透明的数字资产使用环境; 利用信息技术对数字资产进行加密、标记、追溯和监控, 保持对违规行为法律约束。

(6) 深化流程制造业智能化国际交流合作, 鼓励跨国公司、国外机构在中国设立智能制造研发机构、人才培训中心并建设流程制造业智能化示范工

厂。鼓励国内企业参与国际并购、参股国外先进的研发制造企业，积极推进与国际智能制造产业联盟和学术机构的交流合作，实现智能制造领域的更高水平开放。

参考文献

- [1] 袁晴棠, 戴宝华. 我国石化工业转型升级创新发展战略研究 [J]. 当代石油石化, 2016, 25(5): 1-5.
Yuan Q T, Dai B H. Research on transformation and innovation-driven development strategy for China's petrochemical industry [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2016, 25(5): 1-5.
- [2] 殷瑞钰. “流”、流程网络与耗散结构——关于流程制造型制造流程物理系统的认识 [J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(2): 136-142.
Yin R Y. “Flow”, flow network and dissipative structure—Understanding of the physical system of manufacturing process of process manufacturing type [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2018, 48(2): 136-142.
- [3] 殷瑞钰. 冶金流程工程学(第2版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
Yin R Y. Metallurgical process engineering (2nd edition) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [4] 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
Yin R Y. Theory and method of metallurgical process integration [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [5] 殷瑞钰. 关于智能化钢厂的讨论——从物理系统一侧出发讨论钢厂智能化 [J]. 钢铁, 2017, 52(6): 1-12.
Yin R Y. A discussion on “smart” steel plant—View from physical system side [J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 1-12.
- [6] Yin R Y. Theory and methods of metallurgical process integration [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.
- [7] 李彦宏. 推动我国新一代人工智能健康发展 [N]. 人民日报, 2019-07-22 (17).
Li Y H. Promote the healthy development of China's new generation of artificial intelligence [N]. People's Daily, 2019-07-22 (17).
- [8] Li D F, Jiang B H, Suo H S, et al. Overview of smart factory studies in petrochemical industry [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2015, 37: 71-76.
- [9] Li D F. Study and application of the computing architecture of petrochemical cyber-physical system (PCPS) [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2018, 44: 2023-2028.
- [10] 索寒生, 蒋白桦. 石化智能工厂探索与实践 [J]. 信息技术与标准化, 2018 (11): 20-26.
Suo H S, Jiang B H. Exploration and practice of petrochemical smart factory [J]. Information Technology & Standardization, 2018 (11): 20-26.
- [11] Wang J M. Theoretical research and application of petrochemical cyber-physical systems [J]. Frontiers of Engineering Management, 2017, 4(3): 242-255.
- [12] Li D F, Suo H S, Liu W. System structure and network computing architecture of petrochemical cyber-physical system: Overview and perspective [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2019, 97: 2176-2198.
- [13] 曹湘洪, 袁晴棠, 刘佩成. 中国石化工程科技2035发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 57-63.
Cao X H, Yuan Q T, Liu P C. Development strategy for China's petrochemical engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 57-63.