

钢铁工业智能制造体系架构白皮书

(2019 版)

(征求意见稿)

中国金属学会
中国金属学会智能制造标准化技术委员会
二零一九年十月

目录

前 言	4
1. 钢铁工业智能制造发展需求与问题	8
1.1 钢铁工业发展需求和智能制造特征	8
1.2 目前钢铁工业管控系统架构存在问题	10
1.3 钢铁工业智能制造体系架构研究方法	13
2 基于 HCPS 的钢铁工业智能制造体系架构	15
2.1 智能制造体系架构维度	15
2.2 钢铁工业智能制造体系架构设计主要原则	18
2.2.1 业务集成协同	18
2.2.2 信息物理融合	18
2.2.3 人机增强智能	19
2.2.4 自主分布智能	21
2.3 钢铁工业智能制造体系架构	21
3. 业务架构	23
3.1 业务需求	23
3.1.1 钢铁工业的特点分析	23
3.1.2 钢铁工业智能制造的典型功能	24
3.2 主要集成应用场景	27
3.2.1 全流程优化控制	29
3.2.2 全流程质量管控	33
3.2.3 一体化计划调度	35
3.2.4 能环生产协同调配与优化	36
3.2.5 设备资产生命周期管理	39
3.2.6 供应链协同优化	42
3.2.7 业务财务一体化管控	45
3.3 多要素管控的协同集成	46
4. HCPS 架构	50
4.1 HCPS 结构	50
4.2 物理系统	54
4.3 信息系统	56
4.4 数据中心	58
4.5 数字孪生	59
4.6 人机交互	62
5. IT 实现架构	63
5.1 IT 实现架构核心层级	63
5.2 IT 实现架构	65
5.2.1 工业互联网实现	65
5.2.2 数据中心	70
5.2.3 知识中心	73
5.2.4 软件开发和迭代优化	74
5.3 迁移路径	78

附件一 国内外智能制造体系架构研究概况.....	83
1.1 工业 4.0 参考架构模型 RAMI 4.0.....	83
1.2 中国智能制造系统架构（2018 年版）.....	86
1.3 日本工业价值链参考架构（IVRA）.....	88
1.4 NIST-RCS 智能控制体系结构.....	90
1.5 信息物理系统 CPS（Cyber-Physical Systems）.....	93
1.6 美国工业互联网联盟《工业互联网参考体系结构》.....	97
1.7 中国工业互联网平台体系架构.....	101
1.8 欧盟钢铁工业集成智能制造 I ² MSteel.....	103
附件二.典型案例.....	106
1. 宝钢股份智能制造案例.....	106
1.1 案例概况.....	106
1.2 主要做法.....	107
2 河钢唐钢智能制造系统.....	110
2.1 案例概述.....	110
2.2 主要做法.....	110
3 山钢集团日照公司智能制造系统.....	113
3.1 案例概述.....	113
3.2 主要做法.....	113
4 河冶科技生产智能管控系统.....	115
4.1 案例概述.....	115
4.2 主要做法.....	115
参考文献.....	119

前言

智能制造是基于新一代信息技术、人工智能与先进制造技术深度融合，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节，具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能新型生产方式，具有优质、高效、柔性、绿色等特征。智能制造所催生的智能化技术装备、协同化创新生态体系、敏捷、柔性化定制生产方式、集约化资源利用、精准化质量管理模式正在重塑新时期国际制造业竞争的新优势。

智能制造的本质是以人-信息物理系统（HCPS）为基础，实现贯穿企业设备层、控制层、管理层等不同层面的纵向集成，跨企业价值网络的横向集成，以及从产品全生命周期的端到端集成，是一项覆盖企业全价值链、需要有机整合ICT技术、工业自动化技术、人工智能技术、先进制造技术和现代企业管理等五大类使能技术的复杂系统工程。

目前，钢铁工业普遍采用的体系架构是ISA-95的ERP-MES-PCS三层架构，并细化为五级系统，这种体系架构已满足不了钢铁工业两化深度融合和智能制造发展需要。主要体现在以下几个方面：

（1）这种体系架构更多是从信息化视角对管控功能进行层次划分、界面和数据交换的界定，需要从智能制造横向集成、纵向集成和端到端集成视角重新梳理，基于信息物理系统建立新的体系架构。

（2）新型钢铁生产应该是可循环流程，具有生产钢铁产品、能源高效转化和消纳社会废弃物三大功能，目前这种体系架构主要强调的是物质流生产，因此，需要进行功能扩展，实现物质流、能量流、信息流三网协同，满足智能化、绿色化制造多目标需求。

（3）随着钢铁产业转型升级，新业务模式和商业模式不断涌现，用户个性化产品需求的高质量供给、制造向服务转变等带来新挑战，因此，需要提升钢铁制造的柔性和自适应能力，以便及时向用户提供高品质个性化服务和产品。目前这种体系结构更多强调大规模高效率生产，很难满足规模化定制、服务转型等需求。

（4）工业互联、大数据、云计算、人工智能等信息技术为智能制造提供了

有力支撑，在丰富原有功能内涵的同时，也对传统体系结构本身带来了冲击，边缘计算、数据中心、数字孪生、信息物理系统、移动互联和 APP 等技术，为智能制造的实现提供了各种可能性，呼唤新体系结构的出现。

《国家智能制造标准体系建设指南》虽为我国制造业企业构建智能制造系统体系架构指明了方向，但针对钢铁工业这种典型的流程制造业所具有的连续化、工艺体系复杂、生产过程不确定因素多、制造过程中间产品形态、性质及最终产品多样化的产业技术特点，需要结合《国家智能制造标准体系建设指南》，加强钢铁工业智能制造顶层设计：如何以人-信息物理系统(HCPS)为基础进行横向、纵向及端到端的三大集成；如何构建具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的智能制造技术体系；如何通过循序渐进的数字化、网络化及智能化的技术改造升级与进化，打通数据链以解决目前普遍存在的信息孤岛；如何实现新体系架构与目前我国钢铁企业普遍采用的 ERP-MES-PCS 信息化、自动化体系架构进行迁移与整合，都是需要研究探讨的问题。

因此，面对智能制造发展的新形势、新机遇和新挑战，在分析现有体系架构痛点、明悉智能制造需求基础上，结合钢铁工业制造特点，重新界定和梳理智能制造管控范围和执行流程，研究提出钢铁工业智能制造体系架构非常必要，对钢铁智能制造顶层设计和有序实施具有现实意义。

本报告以国家智能制造标准体系架构为基础，结合钢铁工业的业务与技术特点，在分析研究国内外有关研究和综合借鉴我国钢铁企业实践经验的基础上，探索构建了钢铁工业智能制造的体系架构，包括基于 HCPS 的体系架构、业务架构、HCPS 架构、IT 实现架构，以期对我国钢铁工业智能制造的健康发展有所帮助。

1. 基于 HCPS 的体系架构。体系架构分为生命周期、系统层级、智能特征三个维度。

(1) 生命周期。包括产品生命周期、产线生命周期两部分内容，目标是追求质量、成本、交付、环境多目标优化；

(2) 系统层级。自下而上包括产品、设备、控制、工序（炼铁、炼钢、轧钢）、产线（流程）、企业、互联（外部企业），目标是横向集成、纵向集成、端到端集成，为价值链的高效运转提供集成优化管控；

(3) 智能特征。自下而上包括资产、集成、通信、信息、知识、功能、业务，目标是信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行，为价值链的高

效运转和管控活动水平提升提供赋能手段。

2. 业务架构。从“生命周期”和“系统层级”的视角，讨论了钢铁智能制造的业务需求和主要集成应用场景。

(1) 业务需求。

根据钢铁生产、管理的特点，将信息技术和智能制造理念与钢铁生产与管理进行融合，提出钢铁智能制造工厂/产线的9项典型功能框架，包括：工厂数据中心和知识管理平台、钢铁产品智能化研发与设计平台、销产供（供应链）一体化智慧决策平台、智能化生产作业管理平台、全流程质量管控平台、制造全过程能源环境监视与综合管理平台、设备全生命周期的健康状态监控与管理平台、基于产品全生命周期大数据的对外服务平台、先进控制和状态感知模型平台。

(2) 主要集成应用场景。总结钢铁智能制造各种业务活动横向集成、纵向集成、端端集成需求，提出了7项集成应用场景，包括：全流程优化控制（含厂内物流）、全流程质量管控、一体化计划调度、能环生产协同调配、资产生命周期管理、供应链全局优化（含外部物流）和业财一体化管控。

(3) 多要素管控的协同集成和模式创新。

3. HCPS架构。从“智能特征”和“系统层级”的视角，讨论ICT技术如何融入这些功能和场景，提升其智能化水平。HCPS架构分为工序级HCPS、产线级HCPS和企业级HCPS三个层级。集成为物理系统、信息系统、数据中心、数字孪生和人机交互五部分。

(1) 物理系统。对应产线级HCPS的物理实体，是钢铁工业智能制造HCPS的根基。

(2) 信息系统。对应产线级HCPS的执行系统和企业级HCPS的经营系统，是钢铁工业智能制造HCPS的灵魂。

(3) 数据中心。是工序级HCPS、产线级HCPS和企业级HCPS数据中心的集成，实现人-信息虚体-物理实体信息交互纽带。

(4) 数字孪生。是工序级HCPS过程模型、产线级HCPS流程仿真和企业级HCPS市场模拟的集成，钢铁工业智能制造HCPS的核心。**(5) 人机交互。**是各类人员发挥主观能动性的主要形式，人员包括工序级HCPS操作人员、产线级HCPS生产指挥人员和企业级HCPS经营管理人员。

4. IT实现架构。描述智能制造体系架构中物理系统、信息系统、数据中心、

数字孪生和人机交互如何在工业互联网平台中实现和部署，完成智能制造管控活动的集成、协同和优化。报告给出钢铁智能制造边缘层、平台层、应用层三层技术架构。其中：

(1) **边缘层**。通过工业互联、设备接入、协议解析，实现数据汇集和实时分析，同时，边缘层也是实时监控、在线管控等功能实现的载体。

(2) **平台层**。包括数据中心、知识中心和软件开发。数据中心为工业用户提供海量工业数据的管理和分析服务；知识中心支撑人机结合的知识管理；软件开发在开放的开发环境中以工业微服务的形式快速构建定制化工业APP。同时，平台层也为应用层各应用功能提供数据、信息、知识的支撑。

(3) **应用层**。针对不同应用场景，构建经营、执行、控制等智能体组件，集成实现钢铁工业智能制造各项功能，实现价值的挖掘和提升。报告介绍了钢铁智能制造实现过程和开发平台，以及从原系统向新系统的迁移路径。

报告最后给出两个附件。附件一介绍了国内外在智能制造体系架构方面研究成果。包括智能制造体系架构、智能制造CPS架构、智能制造HCPS架构和智能制造IT实现架构等内容，报告中参考借鉴了这些研究成果，在此一并表示感谢。附件二为典型案例，介绍了公司级钢铁工业智能制造四个典型案例：宝钢股份智能制造案例、河钢唐钢智能制造系统、山钢集团日照公司智能制造系统和河冶科技公司生产智能管控系统。

本标准由中国金属学会提出。

本标准由中国金属学会智能制造标准化技术委员归口。

主要起草人：孙彦广、高怀、赵振锐、李鸿儒、范鸥、杜斌。

1. 钢铁工业智能制造发展需求与问题

1.1 钢铁工业发展需求和智能制造特征

近年来，各国纷纷推出一系列重振制造业的重大举措，如美国“先进制造业国家战略计划”“实施 21 世纪智能制造”，德国“工业 4.0”，以及我国的“中国制造 2025”，大力发展智能制造是重大对策之一。

智能制造是指将物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节融合，具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称，智能工厂为载体，以关键制造环节智能化为核心，以端到端数据流为基础、以网通互联为支撑。

智能制造可有效缩短产品研制周期、提高生产效率、提升产品质量、降低资源能源消耗，对推动钢铁工业等制造业转型升级具有重要意义。

钢铁制造业作为主要的原材料工业，根本任务就是以低的资源能源消耗，以低的环境生态负荷，以高的流程效率和劳动生产率向社会提供足够数量且质量优良的高性能钢铁产品，满足社会发展、国家安全、人民生活的需求。

钢铁工业市场环境、技术环境和社会环境发生了巨大的变化，其主要发展需求可归结为以下几点：

（1）敏捷化。体现在外部市场快速响应和内部资源柔性配置方面。在供给侧，钢铁产能严重过剩，产品同质化竞争日益加剧，在需求侧，宏观经济走势不确定性因素增多，用户日趋小批量、多品种、多规格的个性化需求，对钢铁企业经营提出了更高的快速响应和柔性应对要求。钢铁企业需要宏观研判经济态势、产业政策、环保政策、下游产业发展，对目标市场进行需求预测和快速响应，需要根据自身资源特色、能力禀赋优势，制定独特发展战略、产品组合优化和个性化服务方案，并据此灵活配置、协同组织内部资源，打通营销、研发、生产、供应、服务环节，构建协同优化的供应链和价值链。

（2）精益化。体现在质量稳定、即时交付和精细成本管控方面。随着社会经济转型升级，对钢铁产品品种规格的需求越来越多，对产品质量的要求越来越高。钢铁企业必须提高生产过程和产品质量的稳定性、一致性、可靠性，缩短新产品研发周期，即时提供高质量产品和个性化服务，而钢铁工业是典型的流程工

业，最终产品质量的优劣是由全流程的各个环节共同决定的，要想获得稳定、优良的产品质量，必须进行全流程“窄窗口”质量管控。为应对激烈市场竞争，钢铁企业需要通过一体化计划调度、能源生产协同调配、全流程界面优化和各工序自动控制，以及生产成本精细归集和透明分析，实现全流程紧凑连续、动态协同运行，降低原料、能源成本，提升劳动生产率，降低库存和资金占用，实现精细化降本增效，提升企业竞争力。

(3) 绿色化。体现在源头减少、高效转化和合规排放方面。随着社会的进步，政府和民众的环保意识以及对环境保护的要求大大提升，对具有高能耗、高污染特点的传统钢铁制造业提出了挑战。钢铁企业需要加强各生产工艺过程精准控制和全流程工序界面协同优化，从源头节能减排。同时通过能源预测动态调配，以及钢厂环境动态监控，实现余热余能高效转换，废弃物循环利用和合规排放，为构建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系提供技术支撑，推动钢铁工业高质量发展。

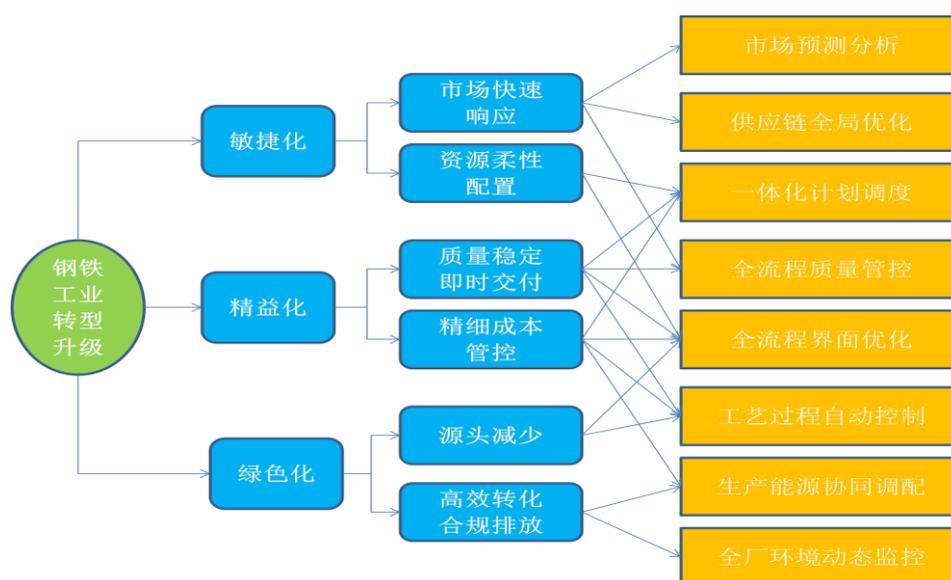


图1-1-1 钢铁工业发展对智能制造需求

为满足钢铁工业发展需求，钢铁工业智能制造需要具有以下特征：

(1) 流程数字化设计。以冶金流程工程学为指导，从流程工序功能集解析-优化、工序关系集协调-优化、流程系统工序集重构-优化多个层次，基于流程机理建立物理系统模型和数字化“虚拟工厂”模型,通过人机交互和仿真模拟,动态模拟钢铁生产全过程，支持新产品开发、新生产流程动态精准设计和现有产线优化

改造，实现生产流程物质流、能量流网络本身的结构优化。

(2) 生产智能化管控。工艺变量实时在线监控、工艺过程闭环控制、工序界面协同优化、全流程产品质量窄窗口控制、物质流能源流协同调配等关键技术取得突破，形成全流程动态有序-连续运行的高效低“耗散”运行生产模式，并大幅提高产品品质稳定性、适用性、可靠性。

(3) 经营精益化协同。建立产品全生命周期质量管控、产供销一体化、供应链全局优化、业务财务一体化系统，形成纵向-横向集成优化的钢铁智能工厂科学决策和运营支撑保障体系，企业品牌化、绿色化水平和综合效益显著提升。

(4) 系统开放性架构。通过工业互联和数据中心，打破业务、层级间信息孤岛；通过机理解析、经验分享和数据挖掘，建立融合物理系统建模、数学模型和规则建模的人机融合的管控决策机制；基于人信息物理系统（HCPS）构建开放、可扩展、迭代优化的智能制造体系架构。

1.2 目前钢铁工业管控系统架构存在问题

钢铁工业自动化信息化体系架构经历了从上世纪70年代计算机管理信息系统（MIS）、上世纪90年代计算机集成制造系统（CIMS，普渡大学模型），发展到现在钢铁企业普遍采用的ERP-MES-PCS三层架构（ISA-95）。

三层体系架构由美国AMR(Advanced Manufacturing Research)于1992年提出。其中位于底层的过程控制层（PCS），其作用是生产过程和设备的控制，位于顶层的计划层（ERP），其作用是管理企业中的各种资源，管理销售和服务制定生产计划等，位于中间层的制造执行层（MES），则是介于计划层和控制层之间，面向制造工厂管理的生产调度，设备管理，质量管理物料跟踪等系统。

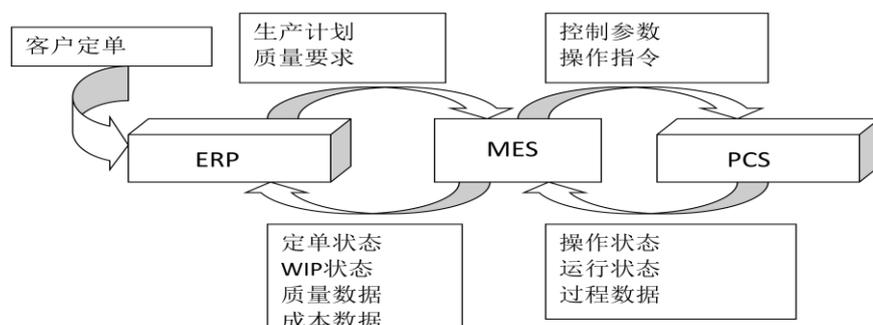


图1-2-1 三层体系架构

基于ERP-MES-PCS三层体系架构，钢铁企业目前建设了5级管控信息系统。



图1-2-2 钢铁企业目前5级管控信息系统

现有管控信息系统架构存在诸多问题和痛点，具体表现在：

- 传统的五级信息系统架构存在信息孤岛现象，全流程生产信息无法贯通，影响生产作业、产品质量、设备监控等管理一体化落实；
- ERP以财务为核心，与产线结合不够紧密，对产品制造过程的执行与跟踪未形成有效闭环；
- 质量管控缺乏全流程的系统支撑；
- 信息化与自动化之间存在断层；
- 难以适应小批量、多品种、定制化订单的生产组织；
- 过程控制系统优化模型功能缺失或不够完善，无法满足产线精准控制要求，在支撑产品升级上差距表现突出；
- 原材料、产成品感知系统不完善，如原料称重、检测、运输等系统没有完全实现信息自动化，物流系统跟踪信息链不完整，物流管控流程存在盲点，直接影响全流程物料跟踪与管控的完整性；
- 物联网、大数据、云计算和移动互联网等为代表的新一代信息化和人工智能技术应用较少；
- 生产过程大量数据缺乏深入分析挖掘，造成产品设计、质量控制、设备

维护等知识积累不足，不能对产品制造过程进行全流程闭环控制以持续改善。

- 现有信息管控系统设计时没有考虑产品研制过程的信息化联系，使得研发和制造一直有所脱节。
- 现有系统的软件架构和功能编制一般只适用于地理位置单一的制造单元，难以适应未来多地集中操控的大型制造群的情形。

目前，这种体系架构已满足不了钢铁工业智能制造发展需要。主要体现在以下几个方面：

（1）这种体系架构更多是从信息化视角对管控功能进行层次划分、界面和数据交换的界定，需要从智能制造横向集成、纵向集成和端端集成视角重新梳理，基于信息物理系统建立新的体系架构。

（2）新型钢铁生产应该是可循环流程，具有生产钢铁产品、能源高效转化和消纳社会废弃物三大功能，目前这种体系架构主要强调的是物质流生产，因此，需要进行功能扩展，实现物质流、能量流、信息流三网协同，满足智能化、绿色化制造多目标需求。

（3）随着钢铁产业转型升级，新业务模式和商业模式不断涌现，用户个性化产品需求的高质量供给、制造向服务转变等带来新挑战，因此，需要提升钢铁制造的柔性和自适应能力，以便及时向用户提供高品质个性化服务和产品。目前这种体系结构更多强调大规模高效率生产，很难满足规模化定制、服务转型等需求。

（4）工业互联、大数据、云计算等新一代信息技术和人工智能技术为智能制造提供了有力支撑，在丰富原有功能内涵的同时，也对传统体系结构本身带来了冲击，边缘计算、数据中心、数字孪生、信息物理系统、移动互联和 APP 等技术，为智能制造的实现提供了各种可能性，呼唤新体系结构的出现。

要实现智能制造，不仅需要研发数字化、网络化、智能化新技术，实现新管控应用功能，探讨新商业、业务模式，而且需要建立与之相适应的智能制造体系架构，在新系统中，通过信息流动，知识分享，支撑管控业务横向贯通、纵向协同。因此，面对智能制造发展的新形势、新机遇和新挑战，在系统开展两化深度融合现状调研、分析、评估基础上，梳理现有体系架构、明确智能制造需求和重点领域的基础上，结合钢铁工业转型升级需求和业务特点，分析钢铁企业主要业

务需求、功能模块，以及数据、知识等信息系统与业务功能深度融合方式，重新界定和梳理智能制造管控范围和执行流程，借鉴国内外提出的通用智能制造体系架构，研究构建钢铁工业智能制造体系架构是非常必要，对指导钢铁工业智能制造顶层设计和有序推进智能制造工作的开展具有重要的现实意义。

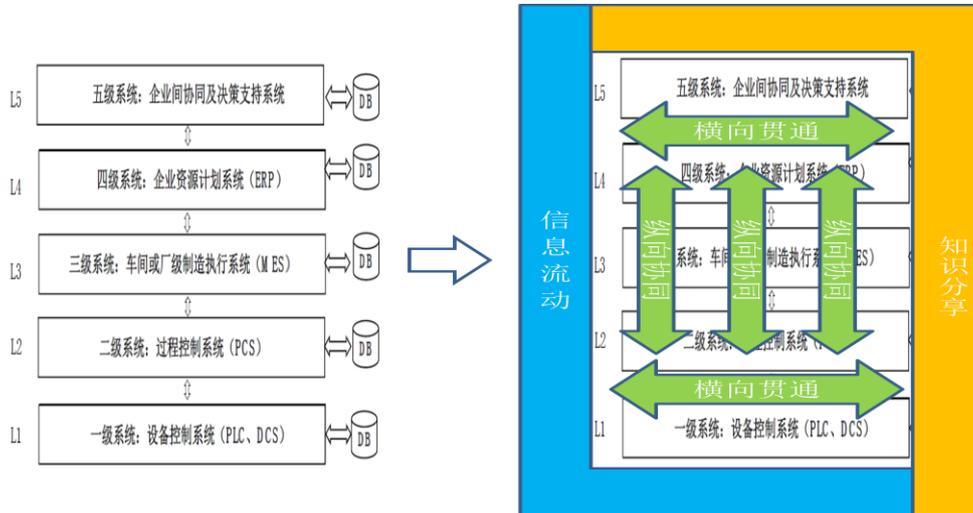


图1-2-3 向新体系架构的转变

1.3 钢铁工业智能制造体系架构研究方法

体系架构设计是通过业务架构来进行分解，形成统一且完整的具有内外信息系统结构的蓝图与规划，是从战略范畴落实到战术范畴的系统过程，它表达了企业的关键业务、信息、应用和技术战略以及它们对业务功能和流程的影响，是一套适用于工程系统及组织系统的顶层设计方法论。整体性、开放性和动态演进性是架构设计方法的固有特性。

钢铁工业智能制造实现贯穿企业设备层、控制层、管理层等不同层面的纵向集成，跨企业价值网络的横向集成，以及从产品全生命周期的端到端集成。智能制造体系架构是对企业纵向、横向和端到端集成的各相关要素及要素间关系的一种映射，是对智能制造活动的抽象化、逻辑化和模型化认识，既是为智能制造实践提供构建、开发、集成和运行的框架，也是为企业实施智能制造提供技术路线指导，有助于帮助企业从孤立系统建设与设备升级改造等、缺乏整体设计的发展转变到组织多维度链接与全方位协同的超级复杂系统的规划、设计与逐步实施。

本标准的钢铁智能制造体系架构采用 TOGAF (The Open Group Architecture Framework) 体系架构研究方法。TOGAF 是由 The Open Group 发起和设计的，它

有 300 多个会员企业，包括许多世界著名的企业，比如 IBM、凯捷、富士通、日立、惠普、NEC、美国国防部、美国国家航空航天局（NASA）等。从 1993 年产生以来，经过近 20 年的发展，TOGAF 已经成为一个行业的标准。TOGAF 由四个域构成：

（1）业务架构。定义组织希望取得的目标和能力需求。描述组织、人和流程的活动以取得上述目标。

（2）应用架构。描述这些过程如何通过软件应用自动执行以及它们如何相互集成互动。

（3）数据架构。描述这些应用如何使用数据为人和过程提供信息。

（4）技术架构。描述应用运行、数据存储处理的基础平台。迁移路径定义从目前架构到未来架构的迁移过程（项目），确保组织实现期望目标。

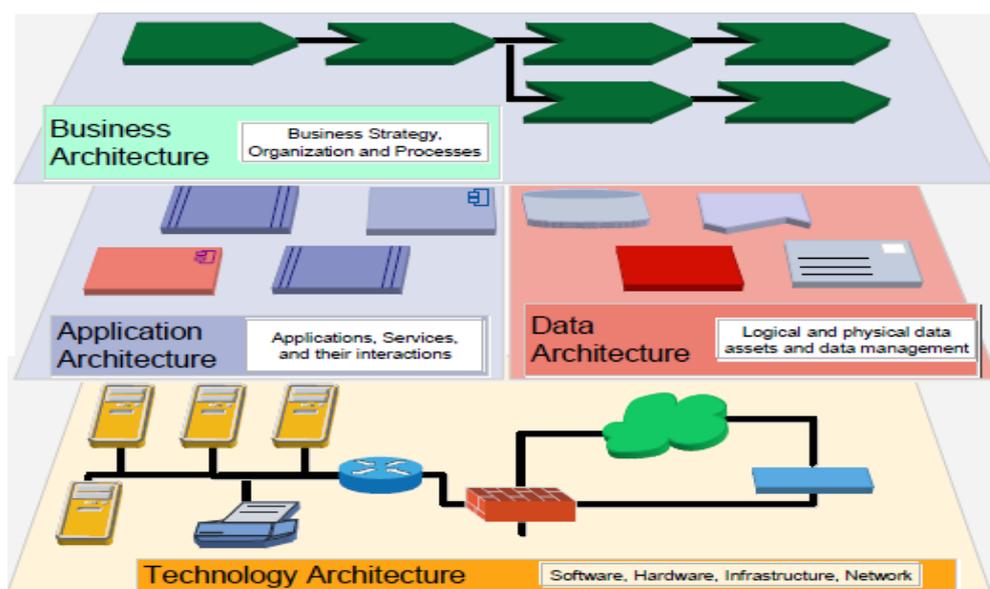


图 1-3-1 TOGAF 研究方法

借鉴 TOGAF 体系架构研究方法，进行钢铁工业智能制造体系架构设计：对应业务架构，确定智能制造体系架构维度和设计原则；对应应用架构，确定智能制造业务架构；对应数据架构，确定智能制造 HCPS 架构，对应技术架构，确定智能制造 IT 实现架构。

(1) 生命周期维度

三维模型第一个维度为生命周期。生命周期(价值链)包括产品生命周期、产线生命周期两部分内容。生命周期的各项活动可进行迭代优化,具有可持续性发展等特点。

产品生命周期是指从产品原型研发开始到产品售后服务各个阶段,包括开发、采购、生产、物流、销售、服务,构成企业价值链的主要环节。开发是指根据企业的所有约束条件以及所选择的技术来对客户需求进行构造、仿真、验证、优化等产品研发活动过程;采购是指是原燃料或半成品从供货商转移到企业手中的经营活动;生产是指通过劳动创造所需要的物质资料的过程;物流是指采购和销售活动中,原燃料从供应商到钢铁企业,产成品从钢铁企业到客户的实体流动过程;销售是指产品或商品等从企业转移到客户手中的经营活动;服务是指提供者与客户接触过程中所产生的一系列活动的过程及其结果。

产线生命周期包括设计、建设、运行、技改、维护,建立产线BIM系统和数字孪生,进行全流程动态、精准设计,实现设计文档、设备资料及管控系统的电子交付,为企业价值链的运转提供物质支撑基础。

智能制造在生命周期维度的目标是追求质量、成本、交付、环境多目标优化,实现企业价值创造。

(2) 系统层级

三维模型第二个维度为系统层级。系统层级是指与企业生产活动相关的组织结构的层级划分,系统层级自下而上包括产品、设备、控制、工序(炼铁、炼钢、轧钢)、产线(流程)、企业、互联(外部企业)。产品层体现不同产品品种对应不同设备、工序、产线特征,便于应用场景和运行规则的描述;设备层是指具有独立功能的机器、装置等,用于实现实际物理流程;控制层是指企业利用传感器、仪器仪表,感知和操控物理流程的层级;工序层是指产线(流程)功能单元,用于炼铁、炼钢、轧钢等车间(分厂)内处理信息、实现监测和控制物理流程的层级;产线(流程)层是实现面向工厂或车间的生产管理的层级;企业层是实现面向企业经营管理的层级;互联层是企业实现其内部和外部信息互联和共享过程的层级。通过智能化实现管控组织扁平化和管控功能纵向一体化。

智能制造在系统层级维度的目标是横向集成、纵向集成、端到端集成,即实现贯穿企业设备层、单元层、车间层、工厂层、协同层不同层面的纵向集成,

跨资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态不同级别的横向集成，以及覆盖设计、生产、物流、销售、服务的端到端集成，为价值链的高效运转提供集成优化管控。

(3) 智能特征

三维模型第三个维度为智能特征。智能特征是指基于新一代信息通信技术使制造活动具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等一个或多个功能的层级划分，智能特征自下而上包括资产、集成、通信、信息、知识、功能、业务，资产层是指机器、设备、零部件及人等生产环节的每个单元；集成层是指对各种传感器和控制实体；通信层是指的是专业的网络架构；信息层是指对数据的处理与分析过程；知识层是知识的获取、分享、持续完善的过程和管理；功能层是企业运营管理的集成化平台；业务层是指各类商业模式、业务流程、任务下发等，体现的是制造企业的各类业务活动。

智能特征维度在中国智能制造体系架构中，从反映信息与业务的融合程度和层次，分为资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态等五层智能化要求。其中：1) 资源要素是指企业对生产时所需要使用的资源或工具进行数字化过程的层级；2) 互联互通是指通过有线、无线等通信技术，实现装备之间、装备与控制系统之间，企业之间相互连接功能的层级；3) 融合共享是指在互联互通的基础上，利用云计算、大数据等新一代信息通信技术，在保障信息安全的前提下，实现信息协同共享的层级；4) 系统集成是指企业实现智能装备到智能生产单元、智能生产线、数字化车间、智能工厂，乃至智能制造系统集成过程的层级；5) 新兴业态是企业为形成新型产业形态进行企业间价值链整合的层级。本报告的体系架构与中国智能制造体系架构在智能特征方面的共同点都是在描述数据、信息、知识、应用等智能要素，细微差别在于本三维模型的层次划分强调按智能特征的功能，中国智能制造体系架构强调的是信息与业务的融合程度和层次。前者便于系统设计，后者便于系统智能化程度的评价。

智能制造在智能特征维度的目标是信息深度自感知、知识获取自学习、智慧优化自决策、精准控制自执行，为价值链的高效运转和管控活动水平提升提供赋能手段。

2.2 钢铁工业智能制造体系架构设计主要原则

钢铁工业智能制造体系架构设计主要考虑了业务集成协同、信息物理融合、人机增强智能、自主分布智能等设计原则。

2.2.1 业务集成协同

钢铁企业目前采用的ERP-MES-PCS信息化体系架构，很好地支撑了前一阶段钢铁企业的发展。要实现智能制造，不仅关注单一业务水平提升，更要加强两个或两个以上的业务部门或功能活动之间的管理协同、集成与优化，实现系统之间的信息共享和同步沟通、系统之间一体化运作，以及业务流程优化、整合和变革等，对互联互通和信息融合会不断提出新的挑战。

智能制造的价值体现在贯穿企业设备层、控制层、管理层等不同层面的纵向集成、跨企业价值链的横向集成（包括制造流程横向贯通），以及从产品全生命周期的端到端集成，实现整体协同、全局优化。

因此，需要提升制造执行系统与过程控制系统、企业资源计划系统之间的集成度，加强供应链上下游企业间以及钢铁全流程工序间的协同和共享能力，以达到降低原料采购成本、降低原料、在制品和成品总体库存水平、降低全流程生产运作成本、提高生产效率、缩短产品制造周期和提升精准服务能力的目的。

在业务架构设计中，强调了钢铁企业系统集成和管控协同，主要包括供应链协同、产供销一体化、一体化计划调度、全流程产品质量管控、生命周期设备管理、业财无缝衔接等。有机衔接用户需求、产品研发、工艺设计、生产制造、交付使用、服役周期等各环节，形成产品质量动态、PDCA闭环管控；贯通上游、下游企业间的产业链，实现信息协同、资源协同、业务协同；通过企业资源计划、制造执行系统与过程控制之间信息融合和功能集成，实现管控动态衔接和实时优化。

2.2.2 信息物理融合

从钢铁制造流程角度，要实现制造流程结构优化和运行优化，包括物质流网络、能量流网络、信息流网络“三网”融合及协同运行。物质流网络优化的方向

是动态有序、协同连续，包括炼铁、炼钢、轧钢等各工序优化，炼铁与炼钢、炼钢与连铸、连铸与轧钢之间界面优化，以及全流程物流网络优化等。能量流网络优化的方向是动态平衡、能质匹配，包括余热余能高效回收利用、多能源介质之间高效转化、能源管网适当缓冲能力、减少能流网络损耗。信息流网络优化的方向是全面感知、优化决策、精准执行，包括在线检测、工业互联、数据集成、数字模型、优化设定和精准控制，实现全流程质量管控、一体化计划调度、物质能量协同优化、多工序优化控制等。

从企业运营管理角度，要实现供应链结构优化、经营管理组织结构重构和管控流程集成，创新市场营销模式和生产管控模式。协同营销、研发、销售、生产、供应、服务等环节，通过互联互通打破部门信息孤岛，促成多源异构信息的集成、交换和共享的闭环自动流动，实现市场、用户、供应商、企业运营信息全面感知，市场态势、成本构成、盈利能力深度分析，发展战略、经营策略、产品组合和生产规模科学决策，快速响应市场变化，柔性配置企业资源，实现价值链全局优化，提升企业竞争力。

从智能制造体系架构角度，信息物理融合意味着构建物理系统和信息系统无缝衔接的信息物理系统CPS。通过计算进程与物理进程实时交互、虚实映射、反馈循环、深度融合，实现自感知、自学习、自决策、自执行、自适应。其中，工厂数据中心和数字孪生是物理系统和信息系统之间衔接的关键环节。工厂数据中心是物理系统和信息系统之间衔接的关键环节纽带，从客户需求到销售、订单、计划、研发、设计、工艺、制造、采购、供应、库存、发货和交付、售后服务等各个环节所产生的各类数据收集、汇集，并进行时间、空间精准匹配和自动流转。数字孪生是物理系统和信息系统之间的深度融合的关键枢纽，借助工业模型、虚拟现实、可视化仿真、优化、数据分析等技术实现钢铁制造过程场景重现与优化、工艺和质量设计、生产计划和作业计划仿真和优化、产品质量分析和预测、能耗分析和预测等，为钢铁企业提供优化与智能化的可持续解决方案。

2.2.3 人机增强智能

中国工程院“面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)”的报告提出由相关的人、信息系统以及物理系统有机组成的新一代智能制造 HCPS2.0 的范

式。认为传统制造向智能制造发展的过程中，制造系统经历了从原来的“人 - 物理”二元系统进入“人 - 信息 - 物理”三元系统，进入新一代“人 - 信息 - 物理”三元系统（HCPS2.0）的过程。新一代智能制造的 HCPS2.0 既是一种新的制造范式，也是一种新的技术体系，是有效解决制造业转型升级方案，如图 2-2-1 所示。

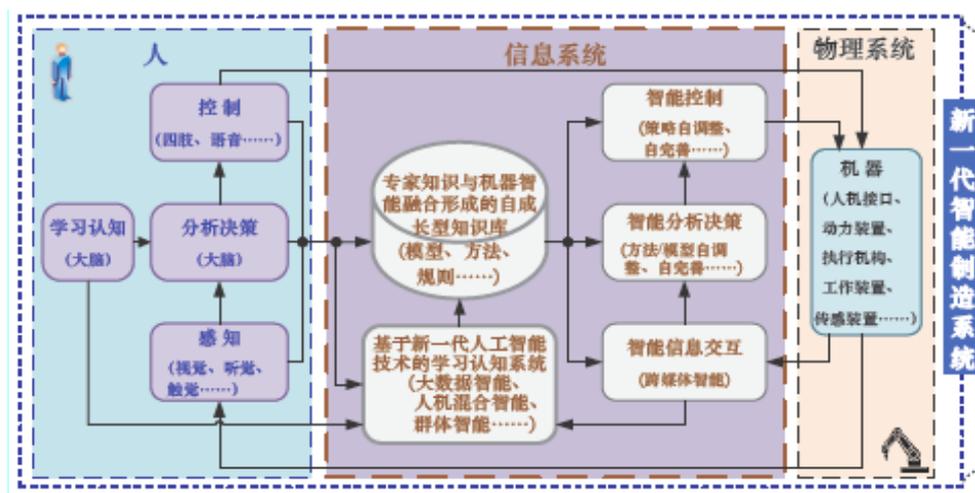


图 2-2-1 HCPS2.0

新一代智能制造的 HCPS2.0 及日本日本工业价值链参考架构（IVRA）强调人在智能制造中的作用，对我们深入理解智能制造的本质和研究钢铁工业智能制造体系架构具有重要的参考借鉴意义。

新一代智能制造系统最本质的特征是其信息系统扩充了学习认知功能，使系统不仅具有强大的感知、计算分析与控制能力，更具有学习提升、产生知识的能力。新一代智能制造系统的“知识库”是由系统研发人员和智能学习认知系统共同建立，它不仅包含系统研发人员所能获取的各种知识，同时还包含研发人员难以掌握或难以描述的知识规律，而且在系统使用过程中还可通过自学习而不断成长和完善。

从 HCPS 向 HCPS2.0 的演变，可极大提高制造系统处理复杂性、不确定性问题的能力，有效实现产品及其生产和服务过程的最优化。新一代智能制造进一步突出了人的中心地位，在 HCPS2.0 中，人类智慧的潜能将得以极大释放。一方面，新一代人工智能通过将人的作用或认知模型引入到系统中，人和机器之间能够相互理解，形成“人在回路”的混合增强智能，人机深度融合将使人的智慧与机器的智能相互启发性地增长；另一方面，知识型工作自动化将使人类从大量体力劳动和脑力劳动中解放出来，人类可以从事更有价值的创造性工作。

2.2.4 自主分布智能

工业互联、大数据、云计算、边缘计算、数字孪生、人工智能技术、移动互联网和 APP 等 ICT 技术，不仅丰富了智能制造功能内涵，而且为智能制造系统的软硬件实现提供了更多选项。体系架构设计充分利用 ICT 技术，构建自主、分布、开放、共享、可扩展、迭代优化的智能制造体系架构。

钢铁工业智能制造实现是一渐进过程，需要持续优化，因此，要求应用系统满足集成互操作性、功能可扩展性、系统可移植性要求；同时钢铁工业智能制造是一复杂巨系统，远非几个封闭的集中管控系统所能覆盖，需要将集中管控功能解构，将其拆分成多个有机联系、具有自主智能的智能体（Agent）功能组件，构成自主、分布的多智能体系统（MAS）。智能体是处于某个特定的环境下的信息系统实现方式，可以根据自身对环境的感知，按照已有的知识或者通过自主学习，并与其他智能体进行沟通协作，在其所处的环境自主地完成设定的目标。单个智能体求解问题的能力通常是十分有限的，将多个自治的智能体组合起来协作求解某些问题的能力很强大。多智能体系统就是指可以相互协作的多个智能体为完成某些全局目标使用相关技术组成的分布式智能系统。

钢铁工业智能制造需要强大的数据处理、信息交互、知识管理能力支撑。工业互联网平台为钢铁工业智能制造开放、共享、可扩展提供了解决方案。通过面向服务的架构 SOA(Service Oriented Architecture)和数据中心建设，用以实现不同系统之间的数据交互，避免传统系统架构中网状的数据交互模式，做到统一的数据传输管理和监控，也便于新建系统与已投用系统的快速链接。通过 SMW(semantic media wiki)和知识中心建设，实现知识获取、积累、管理和传承。

2.3 钢铁工业智能制造体系架构

结合钢铁工业智能制造体系架构维度和设计主要原则，本报告探讨了钢铁工业智能制造的业务架构、HCPS 架构和 IT 实现架构，提出了基于 HCPS 的钢铁工业智能制造体系架构。

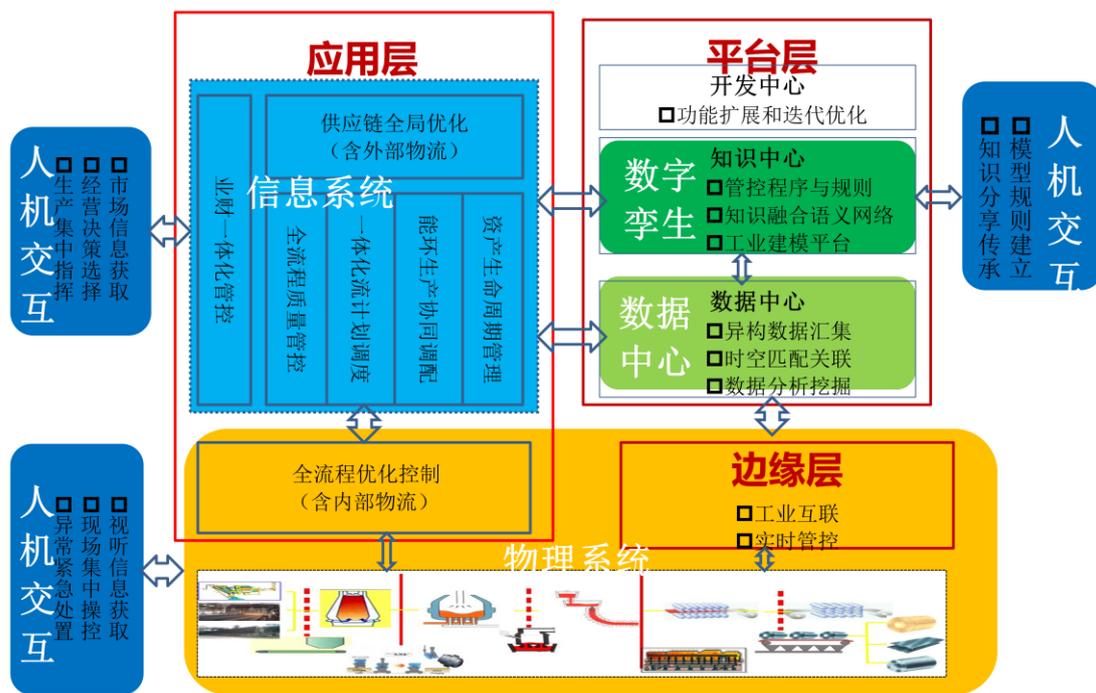


图 2-3-1 钢铁工业智能制造体系架构

本报告将在以下各章对钢铁工业智能制造体系架构予以展开阐述：

第三章业务架构。对应图中深红色框内应用层。从“生命周期”和“系统层级”的视角，讨论了钢铁智能制造的业务需求、主要集成应用场景，以及多要素管控的协同集成和模式创新。

第四章 HCPS 架构。对应图中白色标题标示内容。从“智能特征”和“系统层级”的视角，讨论 ICT 技术如何融入智能制造功能和场景，提升其智能化水平。HCPS 架构打破原有的层次结构，基于 HCPS 提出一种新的一体化集成管控体系，分为数据中心、物理系统、数字孪生、信息系统和人机交互五大部分。

第五章 IT 实现架构。对应图中深红色标题标示内容。描述智能制造体系架构中物理系统、信息系统、数据中心和数字孪生如何在工业互联网平台中实现和部署，通过边缘层、平台层、应用层三层技术架构完成钢铁工业智能制造管控活动的集成、协同和优化。其中，人机增强智能原则主要体现在图中平台层知识中心构建和应用层人机交互决策。

3. 业务架构

3.1 业务需求

3.1.1 钢铁工业的特点分析

钢铁生产和管理具有以下特点：

(1) 钢铁生产的特点

钢铁生产过程属于多阶段混合型连续生产过程，其中既包含连续式生产工序，也包含间歇式生产工序；这一过程中，物料量大，属性多、不确定性大，并且缺乏有效实时准确的自动检测手段；

钢铁生产工艺路线基本是固定的，从原材料到最终的钢铁产品的整个生产过程伴随有大量的附属产品产生，同时也有大量不同种类的原料和半成品进入生产过程；生产过程中被加工产品的化学特性、物理特性和机械特性都在不断变化；

钢铁生产主要集中在几个（条）大型工艺设备（或流水线上），单台设备规模和功率巨大，生产能耗巨大；

生产设备操作复杂，根据生产产品的需要进行部分部件的重新配置更换，同时需要根据生产情况和设备寿命按一定周期停产维修。

(2) 钢铁生产管理的特点

钢铁生产管理的基本目标是：保证质量、准时按量交货、降低成本、提高设备利用率、保证最高成材率；并在满足环境负荷下，实现可持续发展

钢铁企业的社会服务属性促使其不断的进行新产品研发，满足持续增长的社会需求，同时还需要结合用户实际应用实际延伸服务功能；

不同类别产品的生产设备、工艺路线不同、生产组织与计划方法具有很大差异。在面向用户大规模定制需求时，需要更智慧的优化决策；

钢铁生产要求工序之间要进行联合作业管理，保证生产物流衔接紧密、时间节奏相互协调匹配，必须进行全流程、一体化管控才能实现最优生产管理；

钢铁生产管理体系结构一般是多级的，各级计划之间遵循PDCA（Plan/计划, Do/执行, Check/检查, Action/调整）循环原则；

钢铁生产的连续性要求生产计划和作业调度具有实时性和在线计划与重计

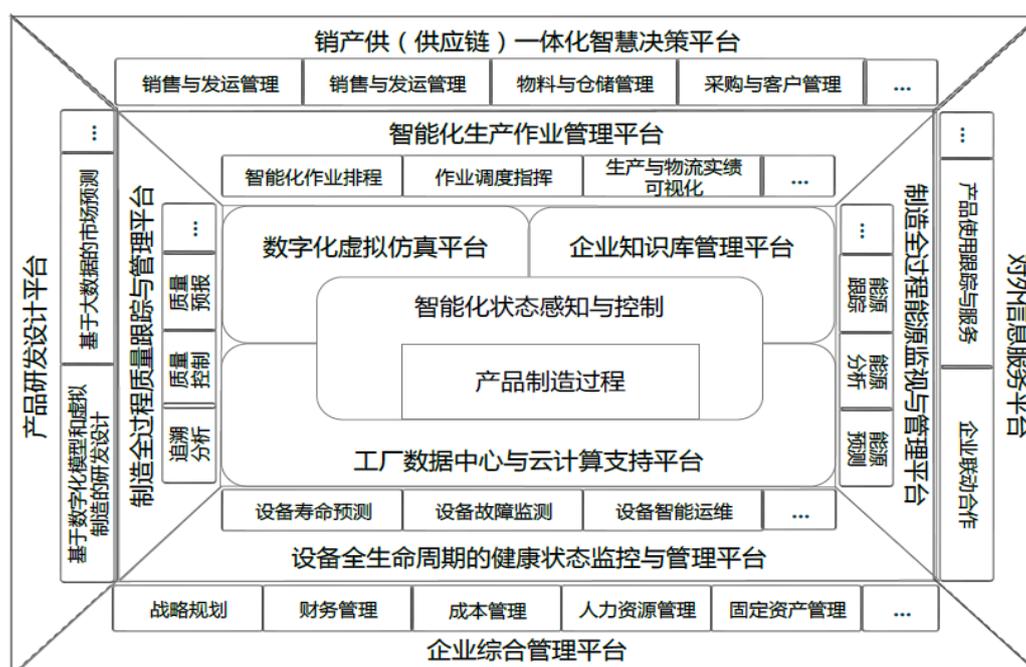
划的能力。钢铁生产的间歇性要求进行合理的库存管理，制定合理的生产批量；生产过程中伴有能源和资源的大量消耗与转换，需要对物质流、能量流、信息流进行同步综合管理。

钢铁制造业的特征决定了其智能制造技术推进的困难性，与目前已经接近迈入智能制造模式的电子、汽车等离散制造业不同，流程制造业的智能化推进在全世界范围内都处于规划的起步阶段，距离真正的智能化还有很长的路要走。

钢铁智能制造应充分考虑企业实际需求，着眼于生产过程、客户服务、业务经营和企业决策等核心环节，涵盖产品需求预测、钢种开发与工艺设计、生产制造过程和市场服务的优化控制、工业供应链优化和资金流转等各个环节，为企业带来实实在在的经济效益。

3.1.2 钢铁工业智能制造的典型功能

企业的核心功能是提供满足社会需求的优质产品和优质服务。企业的核心目标是围绕核心功能，进行全供应链优化，发挥企业在成本、交货期、质量、市场和服务等方面的优势，实现企业利益最大化和企业效益可持续增长。结合企业目标和功能，根据钢铁生产和管理的特点，将新兴信息技术和智能制造理念与钢铁生产与管理进行融合，提出钢铁工业智能制造的典型功能框架，如图3-1-1所示。



（1）销产供（供应链）一体化智慧决策平台

销售、生产、采购是钢铁企业生产和经营管理的主线。面向智能制造的销产供一体化智慧决策与优化，即对整个供应链中各环节的信息进行整合，制定出协调一致的集成销售、计划、采购、仓储、物流等全链条一体化管理决策方案，使整个供应链系统达到协同优化，提高生产效率、降低生产成本，库存成本，实现市场需求快速响应。

（2）智能化生产作业管控平台

生产作业优化管控是实现智能制造的关键环节，以一体化生产计划为依据，考虑设备状态、生产作业实绩等多种资源约束和工艺约束，以智能优化技术和人工智能技术为的手段，进行生产作业计划排程，并对生产和物流实绩进行监视，根据实际情况对生产作业计划进行实时修订和调整，实现生产过程的重调度，使整个生产过程高效、有序地运行。

（3）基于智能化方法的先进控制和状态感知模型平台

通过基于智能化方法的先进控制和状态感知模型，实现高度自动化为智能制造强基。智能感知技术包括机器视觉方面的智能感知技术、基于模型的智能感知技术、大数据深度感知技术，数字化仿真技术等，实现精确定位与精密检测。此外，智能化嵌入技术，自适应控制技术、模型优化设定技术及工业机器人、无人行车、无人台车、无人仓库等智能跟踪与精准执行技术，实现全流程的无缝连接，高效可靠自动化生产。

（4）满足多样性和个性化市场需求的钢铁产品智能化研发与设计平台

企业必须提供满足多样性和个性化市场需求的产品，才能获得市场竞争的优势。传统的产品研发设计过程需经历多次产品试制、修订和迭代，研发与设计周期长，消耗大量时间、人力和物资资源。面向智能制造的钢铁产品研发与设计过程以大数据为基础，以数字虚拟化为技术手段，通过数字化支持协同设计，改进传统的产品研发设计过程，不仅可利用各类大数据进行准确的产品需求预测，还可在产品设计过程中充分利用现有产品的相关技术数据，模拟产品的制造过程乃至产品全生命周期的各种活动对产品的影响，预测、评价产品性能和产品的可制造性等。有效降低由于前期设计缺陷给后期制造带来的回溯更改，实现产品开发周期和成本最小化、产品设计质量的最优化。

（5）全流程质量一贯制管控

制造全过程质量跟踪控制与管理贯穿产品制造全周期，指从产品设计、原材料采购、产品制造、物流运输等各环节的质量管理与控制。主要功能包括：质量标准管理、产品质量可视化监测、预报与分析、产品质量控制与追溯、质量评估和判定、返修及改判充当管理、产品质量缺陷管理、原材料监测与分析等。

（6）制造全过程能源环保监视与综合管理平台

绿色制造是智能制造的核心目标之一，是企业可持续发展的关键。制造全过程能源监视与综合管理就是针对整个制造过程中的每一环节进行能源监视和分析，从整体上进行能源消耗的控制和管理，有效减少制造过程对自然环境的污染，降低制造成本。智能制造的能源管理具有全局的把控能力，它能够从人员、介质、设备、部门、时间、类型等多维度进行智慧能源分析；可以进行科学合理的能源计划制定与管理，精准预测能源的消耗与产生并进行优化调度，实现全部能源站所的无人值守、集约化管控、智能平衡优化；通过能源诊断与余热余能回收技术，智能化能源管控与环境优化技术，污染物协同控制与一体化脱除技术，全面提升能源全流程的绿色创新工作。

（7）设备全生命周期的健康状态监控与管理平台

以服务产品生产为核心，通过智能化的预知维修方法和科学的管理体系实现设备全生命周期的健康状态监控与管理。从设备的设计、采购、投运、使用与维修、直至报废的整个生命周期的各阶段数据采集，全生命周期的设备大数据智能分析，进行设备性能评价、健康状态预知与剩余寿命估计，依据设备的状态趋势和可能的故障模式，预先制定预测性维修计划，确定机器应该维修的时间、方式和必需的技术和物资支持，进行设备备品备件优化管理，既可保证企业资源合理地利用，也可对提高制造效率和质量产生重要作用。

（8）基于产品全生命周期大数据的对外服务平台

通过建立基于产品全生命周期数据库，收集产品在使用过程中各种性能指标数据，实现产品性能和可靠性分析，对于企业持续提高产品质量，改善制造过程，提高服务水平具有重要作用。利用电子商务手段，实现制造企业之间的联动，比如进行订单共享与分配，在多品种小批量市场环境中，通过企业（产线）之间的合作共享，有效地解决多品种小批量和规模化低成本生产之间的矛盾。以客户增值服务为目标的产品数字化项目，通过数字化钢卷替代质检书，实现信息链扩展，提高客户产品利用能力，创造价值。

(9) 基于云计算的工厂数据中心和知识管理平台

基于制造过程产生的各种数据，建立工厂数据中心，在数据中心基础上利用大数据分析，虚拟仿真分析、人工智能等手段，分析和提取其中固化的有关产品设计、制造工艺、设备管理、质量管理、生产管理等规则和知识形成企业知识库，并提供知识管理和应用接口，使企业内部用户可以方便对知识和规则进行查询、使用、增补和修订，为持续提升企业技术和管理水平奠定基础。这一平台主要包括以下功能：工厂数据中心、云计算支持、虚拟仿真分析模型与方法库、企业知识库管理。

3.2 主要集成应用场景

钢铁企业主要管控活动如图 3-2-1 所示，具有流程多工序、管控多层次、要素强耦合、以人为主的特征。

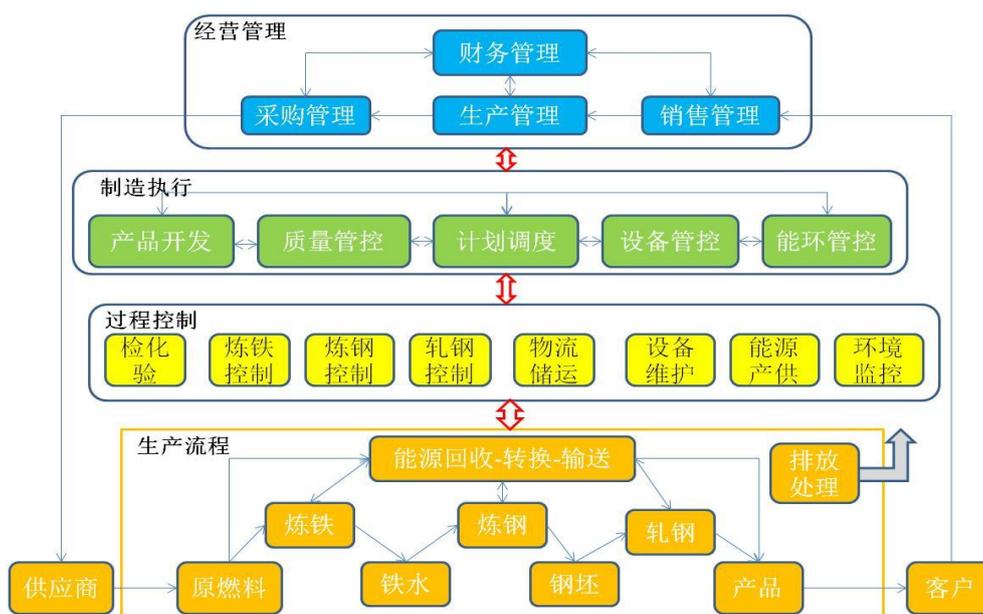


图 3-2-1 钢铁企业主要管控活动

钢铁企业面临市场竞争激烈、用户对产品质量要求高、社会环保压力大的环境变化，企业间竞争更多体现出整个企业体系竞争，企业效益最大化，取决于高价值产品组合（新产品、质量品牌）、产能最大化（生产率）以及成本最小化（原料、能源、维护、库存、物流、人工、资金、环保）等综合因素。需要考虑质量品牌化、管控精益化、环保绿色化等多元化目标综合优化，才能实现可持续发展。同时，企业间竞争优势除了体现在装备水平、生产技术水平外，更多

体现在人机协同的知识管理应用水平上。

企业智能制造旨在构建信息物理系统（CPS），实现各种业务活动横向集成、纵向集成、端端集成，围绕价值链，以客户满意、降本增效、节能减排为目标，以人机协同知识管理应用为手段，集成优化管控环节，加大内部协同、加快外部响应，增强企业竞争能力。

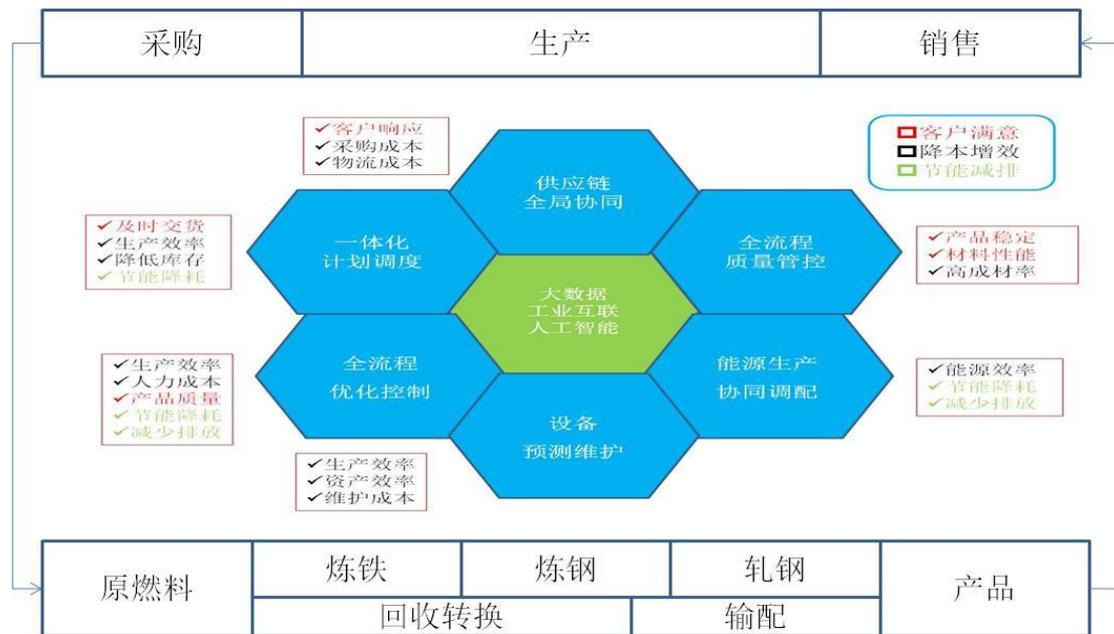


图 3-2-2 智能制造对价值链的提升作用

钢铁工业智能制造需要整合原有分立的管控活动，支撑信息流在各个功能模块间自由流动和互操作，图 3-2-3 为企业智能制造主要集成应用场景。通过各层次业务的横向协同、纵向贯通，实现多业务协同、多目标优化。互联互通和知识管理在第 4 章讨论，以下重点描述钢铁工业智能制造集成应用 2 横 5 纵应用场景：

- 全流程优化控制（含厂内物流）
- 全流程质量管控
- 一体化计划调度
- 能环生产协同调配与优化
- 设备资产生命周期管理
- 供应链协同优化（含外部物流）
- 业务财务一体化管控

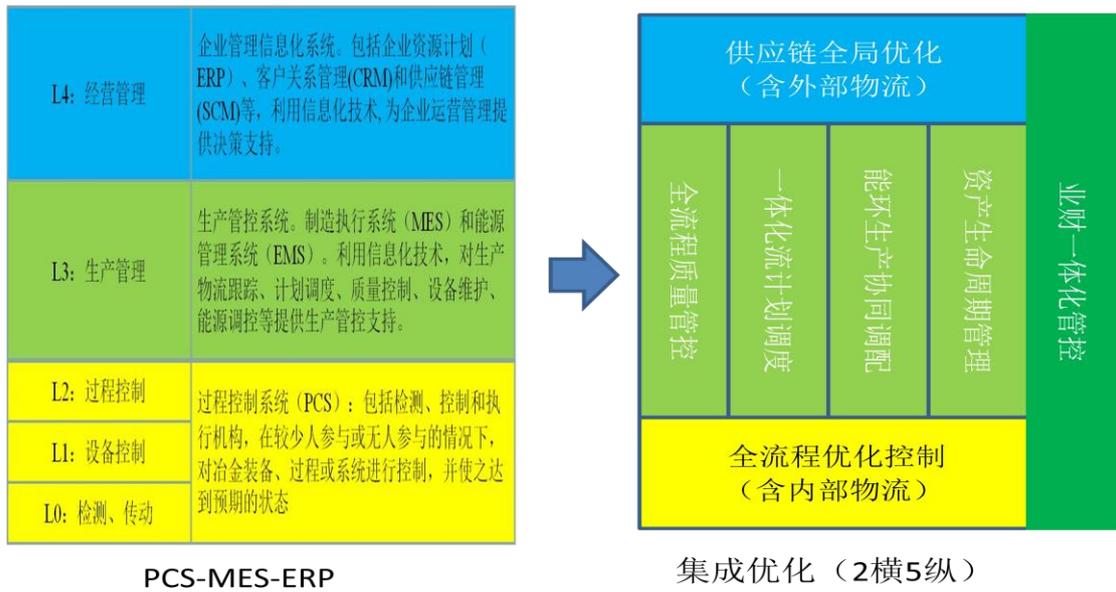


图 3-2-3 企业智能制造主要集成应用场景

3.2.1 全流程优化控制

钢铁企业生产流程包括原料、炼铁、炼钢、轧钢、产品等环节，构成从原料到产品的增值链，全流程优化控制是从全流程视角，基于冶金流程学的界面技术，在原 L0-L2 和部分 L3 功能基础上，将各工序生产管理和过程控制系统进行协同起来，进行集成优化控制，实现设备-工序-车间-流程四个层次的闭环优化控制，追求目标是全流程各环节连续紧凑、动态有序、“耗散”最小。

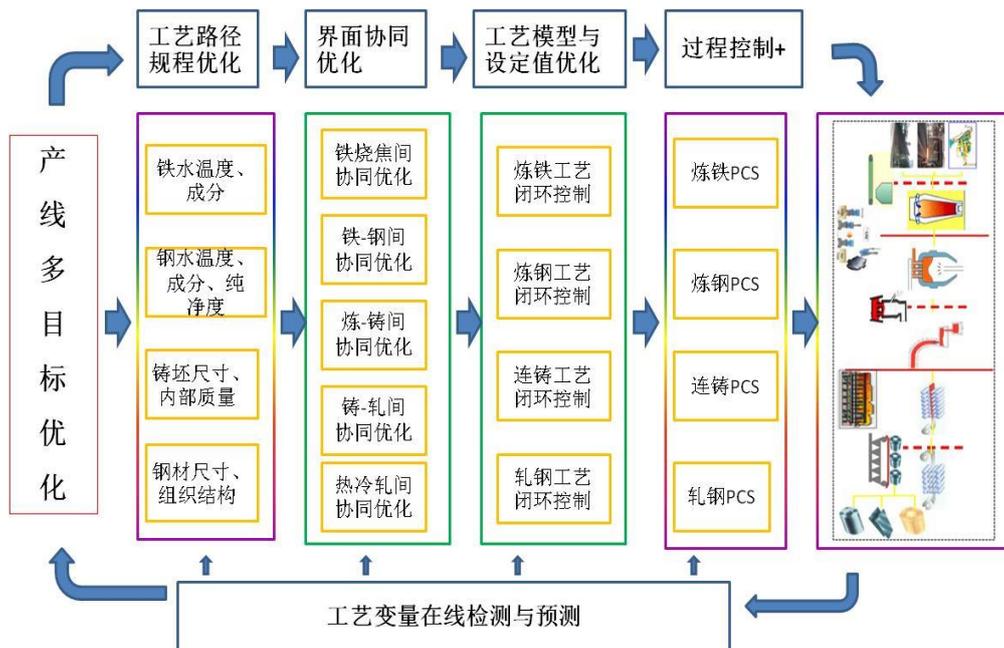


图 3-2-4 全流程优化控制多级闭环流程

全流程优化控制与一体化计划调度、全流程质量管控都强调全流程横向集成，只不过前者更关注生产流程“耗散”，后者更关注订单的完成（交货期、数量和质量）。全流程优化控制主要内容包括炼铁、炼钢、轧钢等各工序闭环优化控制（过程控制、工艺模型与设定值优化）；炼铁与炼钢、炼钢与连铸、连铸与轧钢之间界面优化；全流程物流网络优化等三个层次。

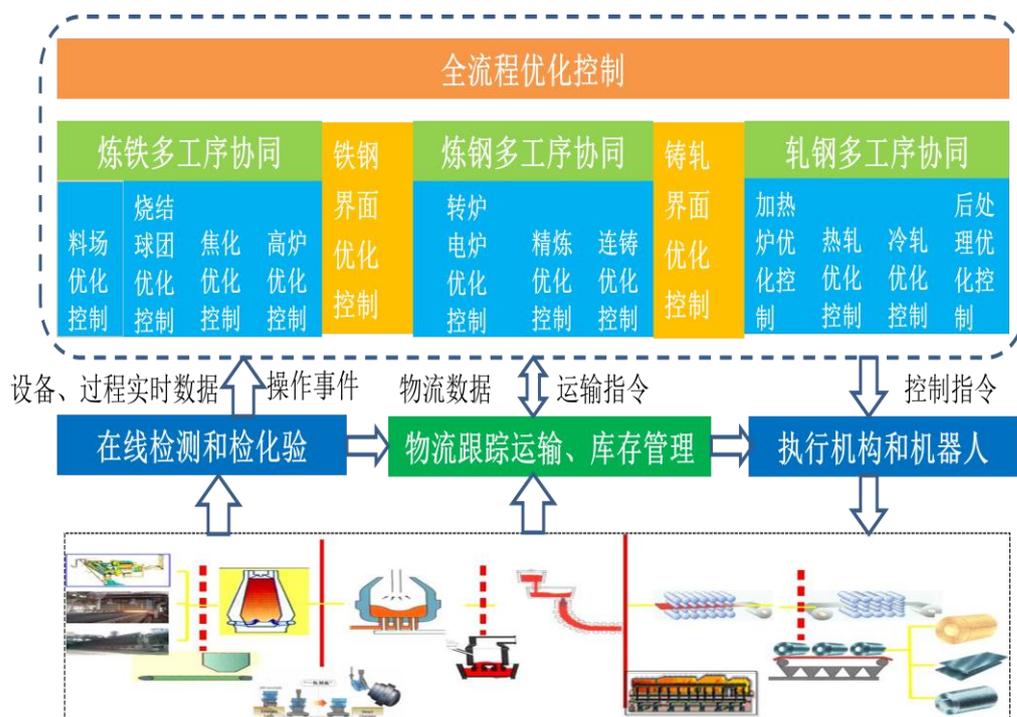


图 3-2-5 全流程优化控制主要内容

(1) 全流程界面技术优化

制造流程中“界面技术”的物理系统优化和信息数字系统的构建是推进钢厂智能化的一个重要切入口。全流程界面优化是全流程优化控制的新的挑战。

制造流程是由一系列相关的、异质-异构的工序/装置以及它们之间的“界面技术”构成的。“界面技术”承载着物质流/能量流/信息流的沟通、传递功能；工序/装置之间的功能衔接、匹配；工序/装置之间物质流、能量流的承接、缓冲功能等。“界面技术”鲜明地影响着制造流程的结构，尤其是动态运行结构和运行效率。

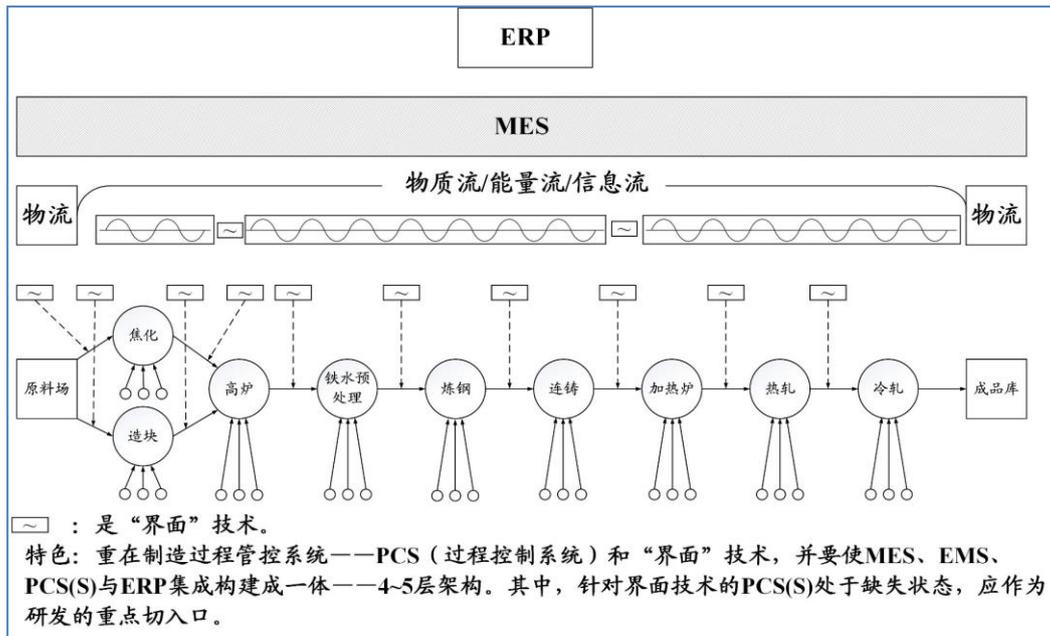


图 3-2-6 全流程优化的界面技术

界面优化主要包括匹配衔接技术；紧凑、简化、协同技术；铁水包、钢包个数优化和周转优化技术；动态匹配的层流运行技术。可按如下方法探索：

- **以图论为工具构建制造流程的静态网络。**制造流程的工程化是要通过工程设计落实到总平面图等一系列的图形上，因此要通过图论的知识，在“节点”和“线弧”方面进行研究。1)节点优化：包括节点功能、节点容量、节点数优化等的研究。2)连接线弧优化：重在节点间相互关系优化，距离、时间、路线等优化。对于构建静态网络及其优化而言，图论是构建静态网络的理论基础之一，也是动态精准设计方法的重要方法之一。
- **以排队论-Gantt 图等方法描述“界面”过程的运行动力学。**在静态网络初步优化的基础上，由于串联-并联关系的存在，上、下游工序之间动态运行路线的确定有赖于上、下游工序间输出流-输入流的方向、排队队长和顺序等，由此需用排队论和动态运行Gantt 图来分析研究，得到优化的动态运行程序——即功能序-空间序-时间序之间的信息参数（数字）协同优化，解决“界面”运行过程及其参数的协同优化。排队论-Gantt 图是动态运行程序编制的依据之一。同时，也影响着制造流程动态运行的网络和轨迹。

- **流程动态运行规则制定。**根据流程静态网络优化和动态运行程序优化的分析，要进一步按照“协同论”的原则制定工序/装置之间动态运行的规则。多工序/装置协同运行的相互依赖、相互制约、相互促进关系，特别是彼此间的伺服关系是动态运行过程优化必须建立的基本规则。
- **以软件仿真手段研究“界面”过程动力学及其比较优化。**在上述三步的基础上，构建起了制造流程的物理系统，进而要利用相关的仿真软件，进行全流程动态运行过程的仿真建模。要在图论、排队论-Gantt 图和动态运行规则的基础上进一步深化“界面技术”的过程内涵，挖掘出若干反映运行过程动力学机制“次界面”的方法、步骤，进而研究“界面”-“次界面”的动态过程路线优化和工序之间的长程协同优化，反过来也可评价流程动态运行和静态网络之间的优化关系。
- **工程化。**在运行规则和信息感知器件的支持下，解决物质流/能量流/信息流协同优化的自感知、自决策、自执行、自适应的数字信息系统，在此问题上要解决好物质流网络、能量流网络和信息流网络之间的“三网”联结、融合问题，构建起基于物理系统过程耗散优化的CPS系统，实现工程化的全流程智能化。

(2) 各工序闭环优化控制

各工序闭环优化控制是全流程优化控制实现的基础。需要在目前 L0-L2 基础上拓展提升。钢铁流程的特点决定了各工序闭环优化控制存在在线检测难、定量建模难和自动控制难等问题，需要通过智能制造加以解决。

- 通过综合采用新检测技术、智能化图像语音识别技术以及信息融合软测量技术，解决在线检测难的问题；
- 通过融合工艺机理模型化、生产操作经验规则化，数据驱动的数学模型，解决定量建模难问题，
- 通过分工况预测、多场景识别与自适应控制、工业机器人技术，解决自动控制难的问题。

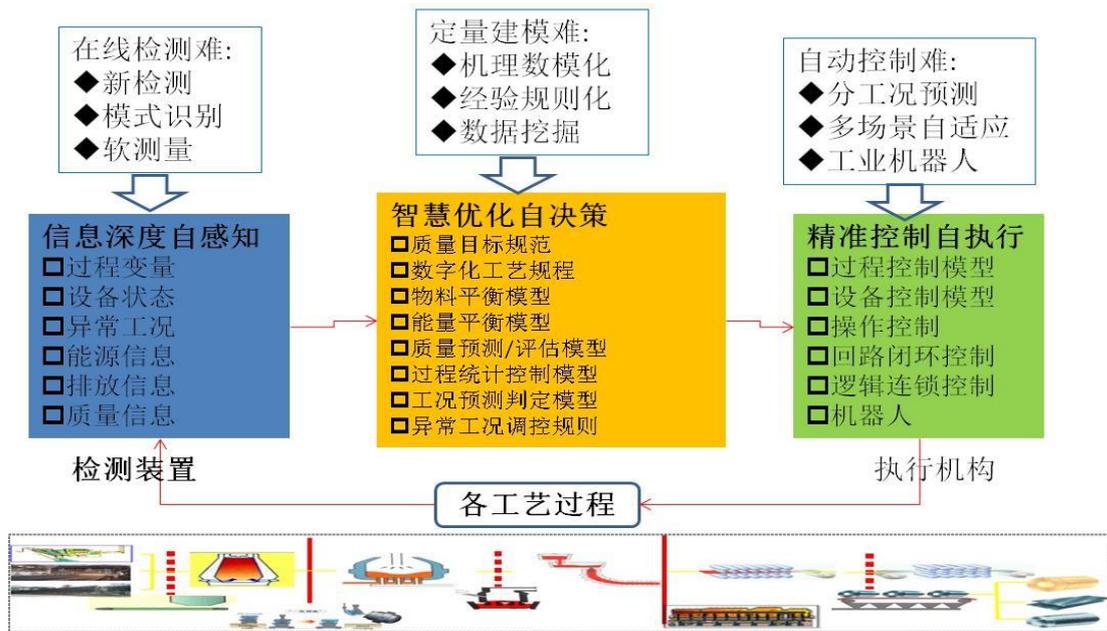


图 3-2-7 各工序闭环优化控制技术

3.2.2 全流程质量管控

全流程产品质量管控的目的是联通产品开发、工艺设计、生产制造、用户使用多个环节，打破信息孤岛，形成产品质量管控的多回路 PDCA 闭环。

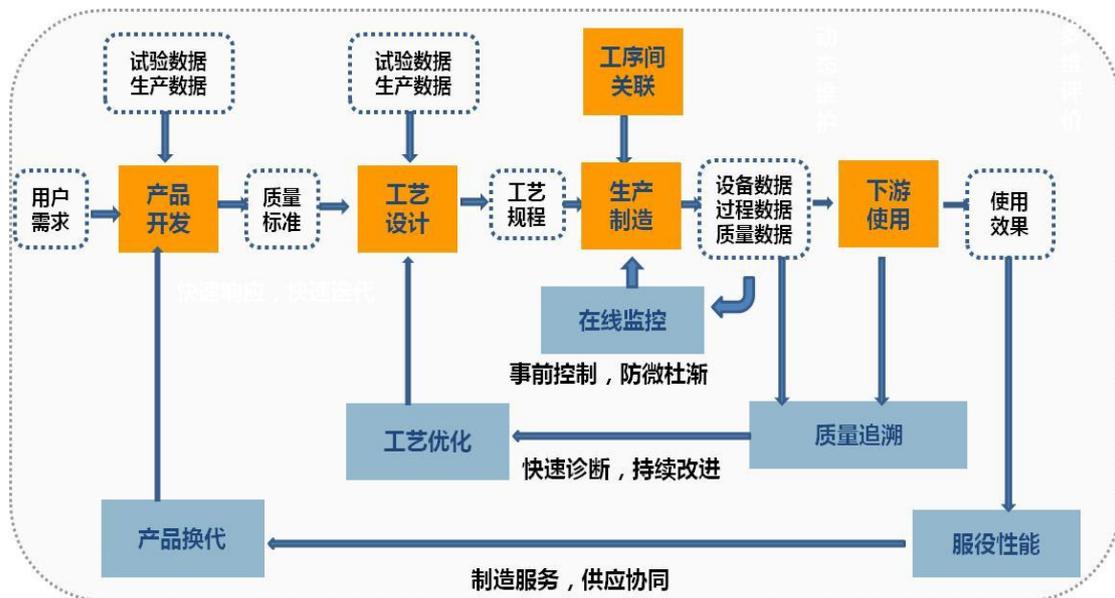


图 3-2-8 产品质量管控的多回路 PDCA 闭环

在实际生产过程中，集成目前 L2-L4 系统功能，实现订单评审、质量设计（静

态)、生产计划、过程控制、质量检验判定、动态质量设计(调整)、质量异议处理等各业务环节的联通和互操作,构建全流程质量动态管控集成化流程。

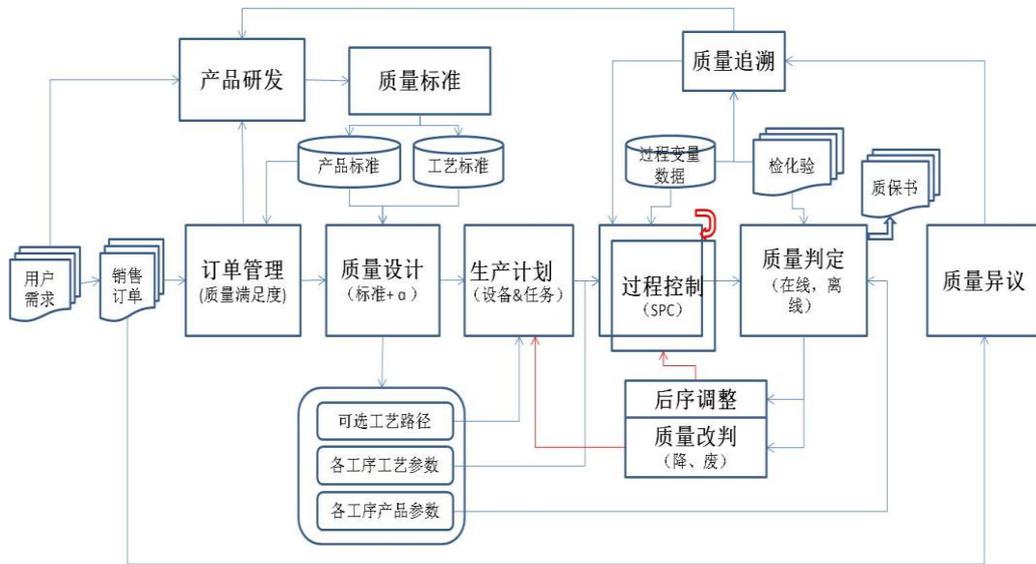


图 3-2-9 全流程质量管控互操作集成化流程

实现全流程质量管控,需要新技术的支撑。以扁平材为例,如图 3-2-10 所示,需要研究开发的技术内容包括:全制造周期集成质量信息平台,全流程产品质量在线监控,质量在线综合评判诊断,全流程产品质量的溯源分析和质量优化。同时,需要加强产品质量、工艺制造规程的标准化、数字化工作,研究开发重要质量要素的在线自动检测、质量偏差动态质量设计调整等技术。

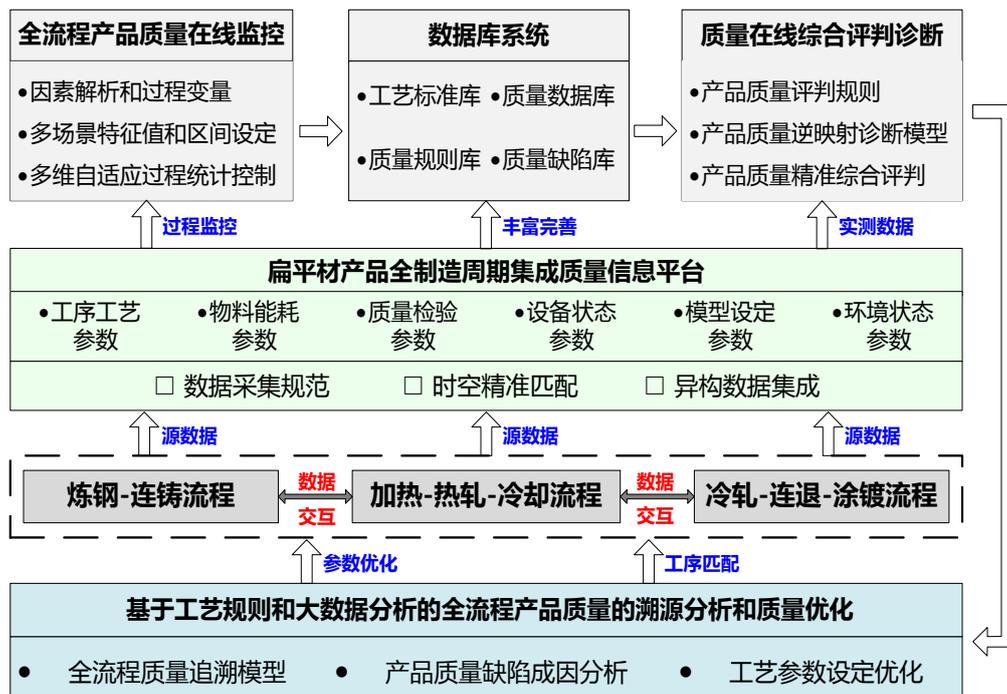


图 3-2-10 扁平材全流程产品质量管控技术

要实现一体化计划调度，需要研究开发以下新技术：生产路径与规程语义数字化网络化表达、基于多智能体(Agents)流程仿真、多层次迭代启发式计划优化、不确定因素（设备故障、质量下降）影响的预测、不确定因素的启发式调度策略等。图 3-2-13 为应用新技术实现一体化计划调度示例。

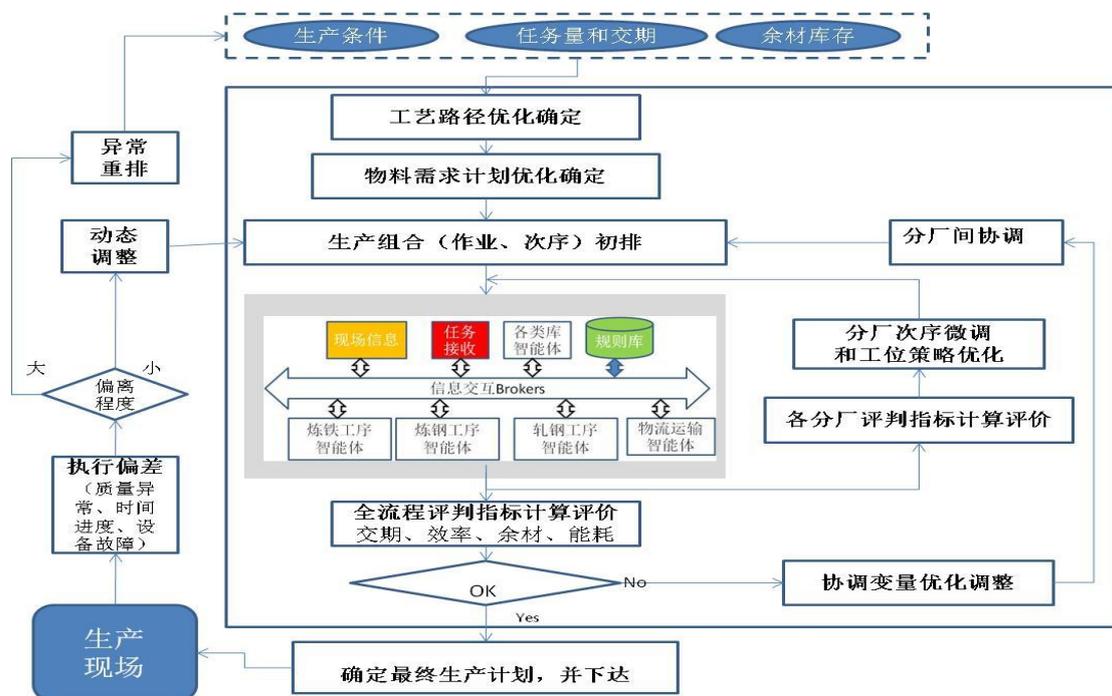


图 3-2-13 一体化计划调度新技术示例

3.2.4 能环生产协同调配与优化

在钢厂制造流程中，铁素物质流与碳素能量流的关系是相伴而行的，而碳素能量流与铁素物质流的关系则是时合时分的。流程动态运行过程中，物质流（铁素物质流）的转换运行过程和能量流（包括二次能量流、三次能量流）的输入-转换-输出过程、以及污染物产生-排放过程是密切相关的，特别是二次能量流的产生/输出与冶金工艺装置的运行特征直接有关，不同的物质流-能量流关联形式，可以出现不同的信息流和程序。因此，在钢厂制造流程中，不仅存在着铁素物质流网络及相关的运行程序，而且存在着与铁素物质流转换有关的能量流网络及其运行程序，以及对应的污染物排放监控、处理和控制在。因此，需要将物质流、能量流、排放流关联起来，将钢铁生产过程和能源环保系统联系起来，对当前钢厂能源中心、环保系统进行升级。

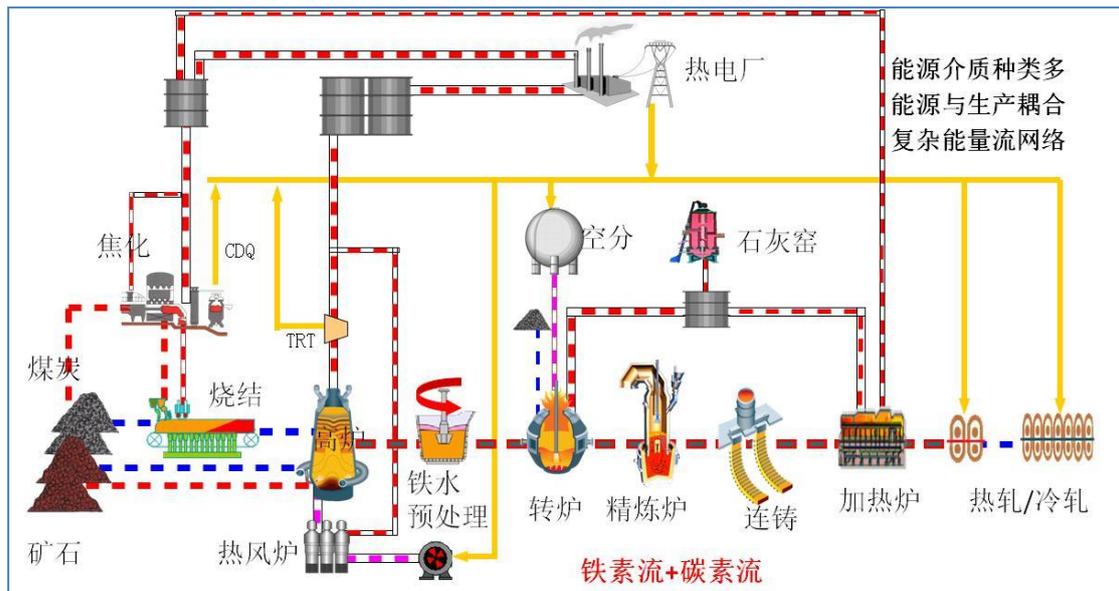


图 3-2-14 钢铁流程中能量流与物质流关系

物流、能量流、排放流协同是将钢铁企业生产优化的制造执行系统 MES、能源优化的能源管理系统 EMS 以及环保监控系统进行协同，实现能源环保的综合智能调控。物流、能量流协同关注与物流耦合紧密的能源流的产生-转换-缓冲-使用-回收等能量流网络各个环节，通过能源高效转化、适当缓冲能力、减少能流网络损耗等途径，实现能量流网络动态平衡、能质匹配。物流、能量流与排放流协同关注生产系统和能源系统产生的污染物的源头控制、处理、合规排放以及钢厂环境监控。

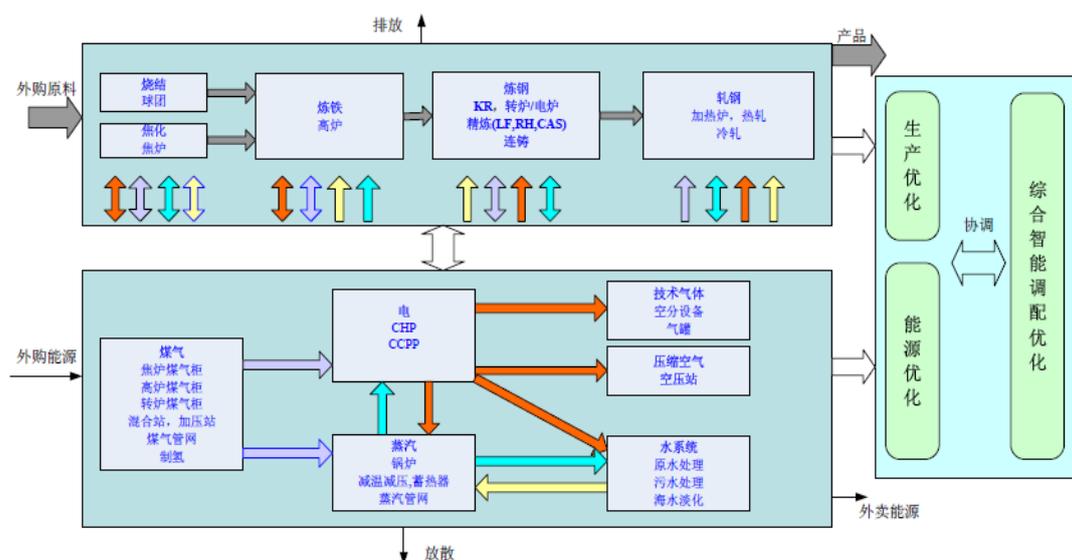


图 3-2-15 物流能量流协同优化

从能源管控角度，物质流、能量流协同包括 4 层次内容：反映产品生产特征的钢铁流程能效评估和能量流网络优化、满足环境变化和各種生产场景需求的能源计划优化、预测并适应流程生产变化的能源动态调度、充分利用产线余热余能的能源设备和过程的自动控制。图 3-2-16 为有机衔接 4 层次内容的物质流能量流协同的集成管控流程。

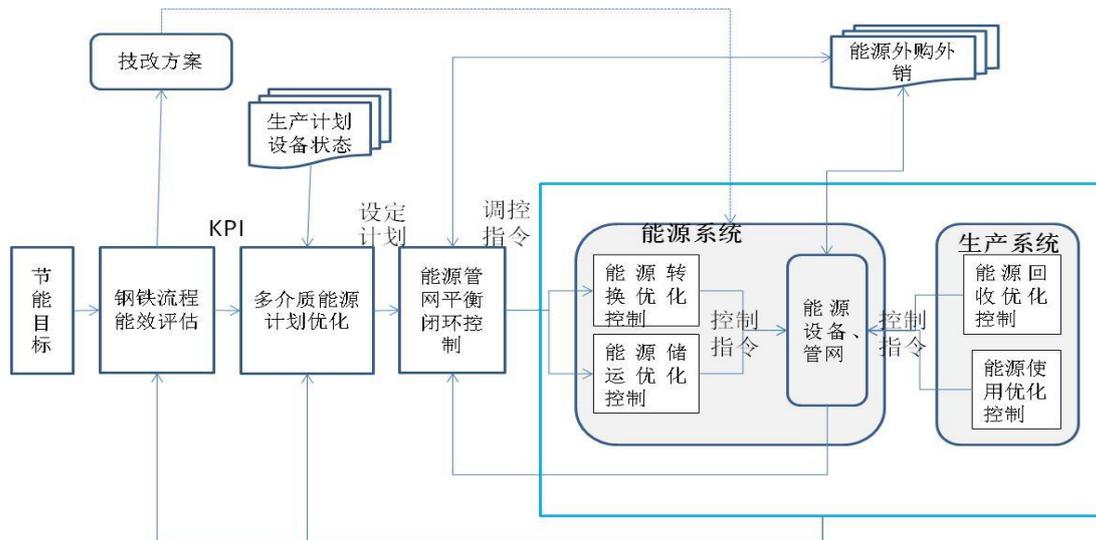


图 3-2-16 物质流能量流协同的流程

要实现物质流、能量流协同，需要研究开发以下新技术：全流程物质流-能量流耦合的能量流网络模型，基于能量流网络模型的动态仿真，多尺度多视角能效评估，多场景能源计划和多介质能源优化，生产预测与能源反馈结合的能源动态闭环控制。

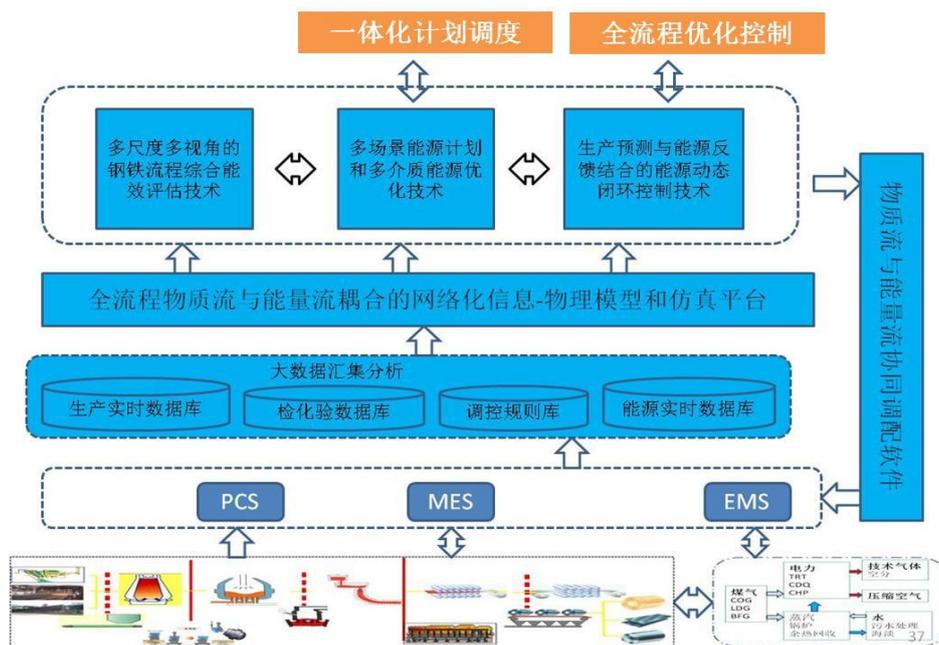


图 3-2-17 物质流能量流协同实现示例

要实现物质流能量流与排放流协同，在目前烟气、污水、噪声、粉尘等环保监测系统基础上，需要加强以下功能：

- (1) 配料优化和生产过程优化控制，减少污染物产生
- (2) 能源网络动态调控，减少煤气、蒸汽、技术气体放散
- (3) 污染源源头监测、污染源治理所需的自动化和优化，确保达标排放
- (4) 二氧化碳预测和交易技术支持

(5) 将分布在厂区各个在线监测点位的监测数据通过采集统一接到办公室环保监控电脑，实时在线监控所有在线监测数据，提高环保管理水平

3.2.5 设备资产生命周期管理

设备是企业制造产品的工具和手段。设备从采购、安装、调试、使用、维修、改造、更新、直到报废所经历的全部时间是它的生命周期。设备管理要覆盖设备的整个生命周期。设备生命周期管理是指企业根据自己的生产经营规划，以设备受控、安全、高效经济运行为目标，依托信息化、智能化技术，将设备全生命周期各个阶段纳入统一平台，通过一系列技术的、经济的、组织的措施，超前管理，预制状态，对所有设备的物质变化形态和价值变化形态进行综合管理，为企业智能制造奠定坚实的基础与保障。

一般地，设备管理分为前期管理和后期管理。设备前期管理是从设计、购置（制造）、安装调试到投运过程的管理，设备后期管理包括使用、检修、维护，技术改造等。主要管理活动如图 3-2-18 所示：

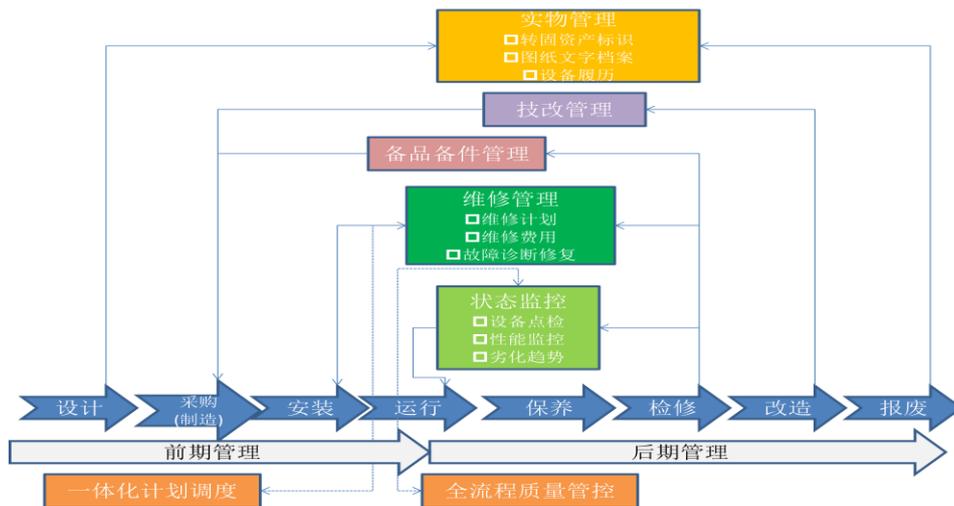


图 3-2-18 设备生命周期管理活动

(1) 设备实物管理。包括设备转固管理、设备标识、使用地点分配（所在厂或车间，所在生产线，所在机组，所在单机）、设备信息管理（包括固定资产标识、设备图纸档案、设备文字说明档案、设备 BOM、设备履历等）以及运行状态管理（‘运行’、‘待运行’、‘故障’、‘检修’、‘闲置’、‘移拨’）等，设备安装调试或更新改造后投入运行时，建立或更新‘设备’记录，并实时更新设备运行状态信息。其中，应建立设备的图纸和文字说明档案数据库，并以相应的标识作关键字与设备数据库链接。设备文字档案数据库借助于文字处理系统建立；设备图纸档案数据库借助于图形图像处理系统建立。设备和它的组件、零件之间用树结构连接，可以实现快速关联查阅。

(2) 设备履历管理。建立设备履历档案，记录设备的使用信息、维修信息、备件材料消耗信息，包括设备履历标识，设备标识，固定资产标识，设备故障次数累计，设备故障时间累计，设备维修次数累计，设计维修时间累计，设备维修费用累计，备件消耗费用累计，维修材料消耗费用累计。根据这些信息可链接描述该设备实物和财务信息的关系，找到该设备的名称、类别、投运时间、固定资产原值、资产现值、设备使用者以及调拨等方面相关信息，从而可全面分析该设备的总投入和总产出。

(3) 设备运行状态监控。对各主辅生产作业线上的设备运行状态进行跟踪和监测。监测的信息包括：设备异常信息、设备故障、设备事故、设备停机等方面的信息。运行状态监控的方式包括点检诊断和计算机监控系统诊断。(1) 点检诊断。要建立设备点检标准，包括设备标识、位置标识、检查部位、检查项目、检查周期、检查方法、检查工具、判定标准、处理方式、点检责任者等。根据点检标准编制设备点检计划。(2) 计算机监控系统诊断。针对重要关键设备设置在线诊断装置。

(4) 维修和维修费用管理。建立设备维修标准；必要时，对维修标准进行调整。根据维修标准生成设备维修计划，编制维修预算。生成并下达维修任务卡。维修任务卡中应记录事项包括：设备标识、位置标识、任务承担者、维修作业步骤、材料表、备件表、工具表、维修作业开始时间、维修作业结束时间、维修结果、验收人、实际使用材料和材料费用、实际使用备件和备件费、人工费等。

(5) 备品备件材料管理。包括备件材料的申请、存储、出入库及统计。

(6) 技改管理。设备管理系统与企业信息系统的生产、财务、采购、固定资产投资项目管理相互关联。设备维修计划的信息要被生产计划系统共享，生产调度和制造执行系统还要掌握设备状态信息。设备维修系统管理固定资产中的设备实物，实物状态变化产生的价值信息要送达财务管理系统，实物与资金要对帐。设备维修发生的费用要进入成本财务。备品备件及材料要与采购和供应系统的入库信息衔接。设备维修的外包项目要与项目管理系统相衔接。

设备生命周期管理需要集成各个阶段业务功能，包括从设备前期的立项、预算、设计、选型等，到设备中期的设备运行、设备转固、点巡检、在线检测、检修管理、备件管理等，设备后期的设备报废、备件报废等整合在一个统一平台上，形成完整的企业设备管理信息化平台，基于此平台，实现以下功能：

(1) 设备系统的信息资源进行统一化管理：设备资产、设备主数据管理、管理标准、备件材料主数据、供应商数据管理、设备点检及检修人员管理等实现公司统一管理。

(2) 设备全生命周期的精细化管理：系统实现固定资产编码与设备编码的有机结合。设备点检、检修、事故管理、措施检查落实等业务的线上运行，系统自动形成闭环的设备技术状态档案；通过集成设备全生命周期全过程管理数据，实现设备管理相关统计分析，形成设备管理知识库。

(3) 建立以点检定修为核心的周期性维修和以大数据为支撑的预测性维修体系，建立以指标动态控制为基础的指标预警，建立以离（在）线点检和故障分析为基础的设备运行预警体系。为不断优化设备定修模型、降低检修费用、提高设备综合效益提供系统支撑。

(4) 备品备件全生命周期管理：利用条码技术对备件信息进行编码，关联备件的申请、采购、入库、领用、上机、下机、维修、损坏、处置等业务与装机位置绑定，形成完整的设备关键备件使用、更换、修复、处置等历史数据，对合理储备、评估使用寿命、选择适宜的供应商等提供数据保障。

(5) 探索企业自身集中监控和外部专业团队远程运维相结合的新型设备运维模式。针对一些复杂、关键设备，探索类似 GE 发动机的设备租用运维外包的业务模式。

3.2.6 供应链协同优化

目前,销售、生产、采购业务分散在客户关系管理(CRM)、供应链管理(SCM)、企业资源管理(ERP)和制造执行系统(MES)中,与企业各业务部门职能相对应。在钢铁产能严重过剩,产品同质化竞争日益加剧的背景下,钢铁企业不仅需要提升企业智能制造水平,还需要增强上下游供应链协同能力,降低企业运营成本,增强企业竞争力。同时,客户日趋小批量、多品种、多规格的个性化需求,也对企业的产购销提出了更高的柔性和敏捷响应要求。因此,钢铁企业需要打通销售、生产、供应环节,构建协同优化的供应链。供应链协同优化包括中长期和短期两个层次。

在中长期层次,通过宏观经济态势、产业政策(包括环保政策、下游用户产业发展动向的研判,对目标市场进行中长期需求预测,确定战略客户,并对战略客户需求前期介入;根据企业发展战略、资源特色、能力禀赋优势,制定产品组合优化方案和中长期生产计划。同时,通过供应商供需平衡度分析,确定物料价格走势和采购时机,对供应商评估,并探讨物料替代可能性。通过中长期层次的供应链协同,及时反应环境、市场变化,提升企业科学决策能力。

在短期层次,将销售环节的合理接单、合同评审、产品配送、异议响应,生产环节的产线任务分配、短期生产计划、物料需求计划、深加工计划,以及采购环节的物料综合成本、物料采购决策、物料运输调度等业务和功能进行协同,可以满足用户个性化需求,快速响应用户异议,提供增值服务;同时,通过与生产计划的协同,可以精准、准时满足物料需求,通过原料、在制品、产品、余材的全流程物流管理和输送,降低库存和资金占用,提升企业资产、资金利用效率,降低综合成本,提升企业竞争力能力。

随着钢铁业集中度不断提升,为应对集团化、多基地集中管控的变化,在销产衔接环节的设计要便于“产品设计、质量设计、生产设计”等基本功能适应多基地的要求,并注意研制产线效率评估等原来没有的功能。

图3-2-20为河钢唐钢产销作业链全过程的一贯制计划优化管理方案。将计划排产模块从四级ERP和三级生产制造执行MES系统中分离出来,以3.5级公司级计划排程系统的建设为核心,建立起产销一体化管理平台,通过科学的智能优化算法,动态平衡企业资源,实现基于有限产能约束下的资源调配。通过对企业物料

需求、资源能力、时间约束的实时掌握，能够为销售订单预测确实可行的完工时间，对客户提供准确的交货期应答服务。通过全局透明的按单追踪与闭环计划反馈机制，实现从销售订单评审、销售订单接收、销产转换、公司及各分厂生产计划、作业计划、再到件次计划等产销作业链全过程的一贯制计划优化管理。

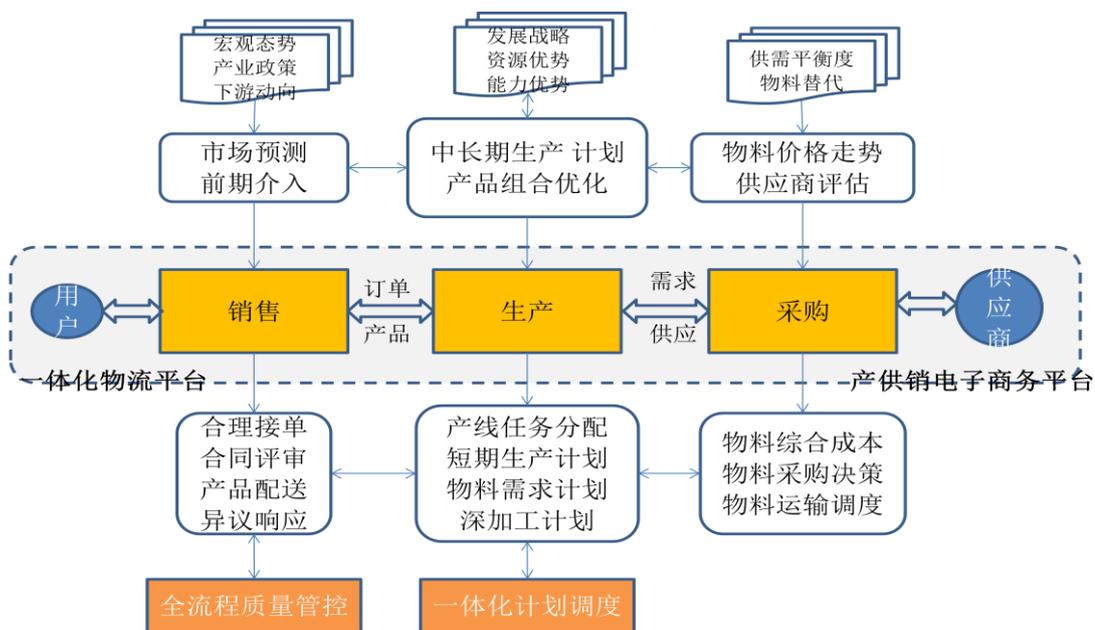


图 3-2-19 供应链协同优化（中长期和短期两个层次）

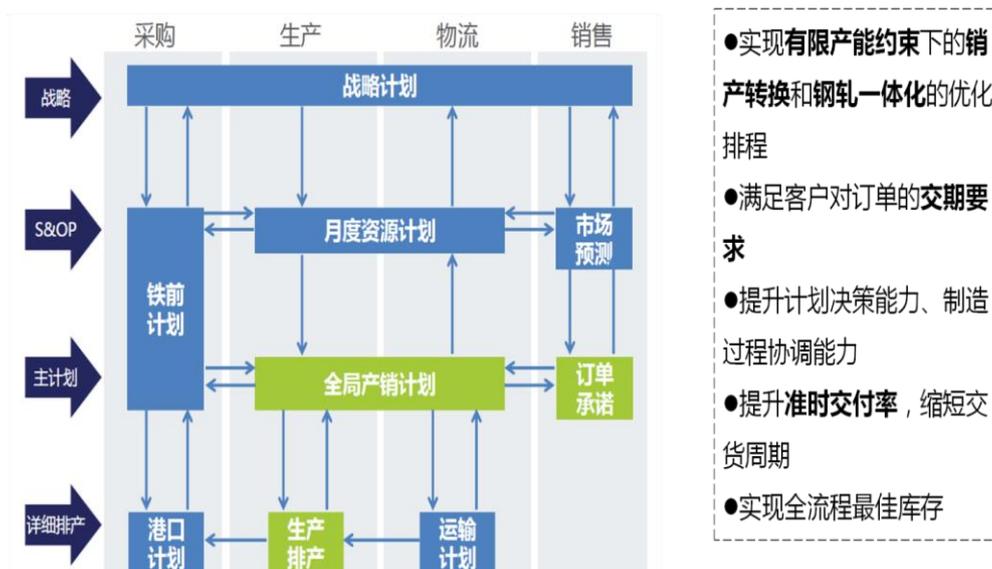


图 3-2-20 河钢唐钢产销作业链全过程一贯制计划优化管理方案

要实现供应链协同优化，需要建立连通用户、供应商的电子商务平台和一体化物流平台，实现相关数据、信息的即时沟通以及智能化决策技术支撑。例如：宝钢开展了原料采购与库存管理环节的智能化决策技术的研究，开发了合金采购智能决策系统，从合金需求精准预测、合金采购与库存优化、合金使用管理等多方面入手，以冶金机理计算、合金最优控制模型、库存优化理论、大数据分析、采购专家知识、网页抓取技术等为主要手段，不仅为合金采购人员提供决策支持，而且能够进行采购与库存综合优化，从而实现满足生产、降低合金成本的目的，取得了显著的经济效益。

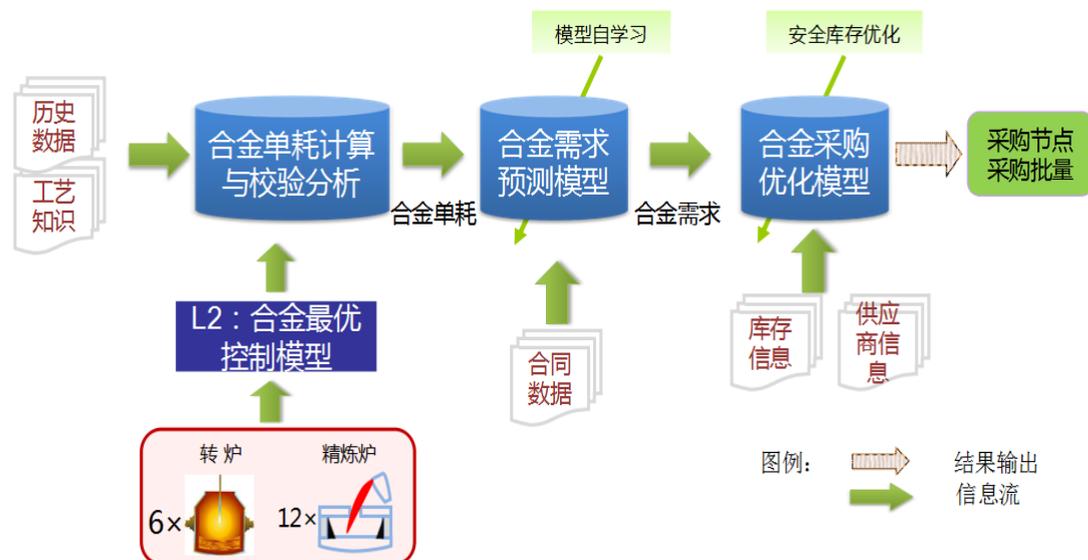


图 3-2-21 宝钢合金采购智能决策系统模型框架

供应链协同优化也催生了新的业务模式。有助于打破企业的边界，加强企业间的合作关系，建立了企业间一种双赢的业务联盟，以共同追求利润的最大化。

如宝钢针对汽车板等板材战略用户，以增强精准服务能力为目标，研发了汽车板预测式销售智能决策系统，实现用户需求与制造环节的精准对接与协同优化，提升钢铁企业与用户的“横向集成”智能化水平。具体来说，在接收试点客户生产计划、零件单耗、在库在途在制库存等信息基础上，利用模型技术滚动预测客户分周订货需求、给出安全经济的供应链整体上的库存方案，实现了汽车板试点用户分周订货需求的滚动计算，用户合同周期的统计分析，供应链库存方案和订货策略的智能优化，以及汽车板供应链的模拟仿真。通过上述科学的模型计算，为智慧供应链系统订货决策、标准化周期、断点管理、库存管理等提供了支撑和

保障，对降低库存、推动供应链协同有较大价值。

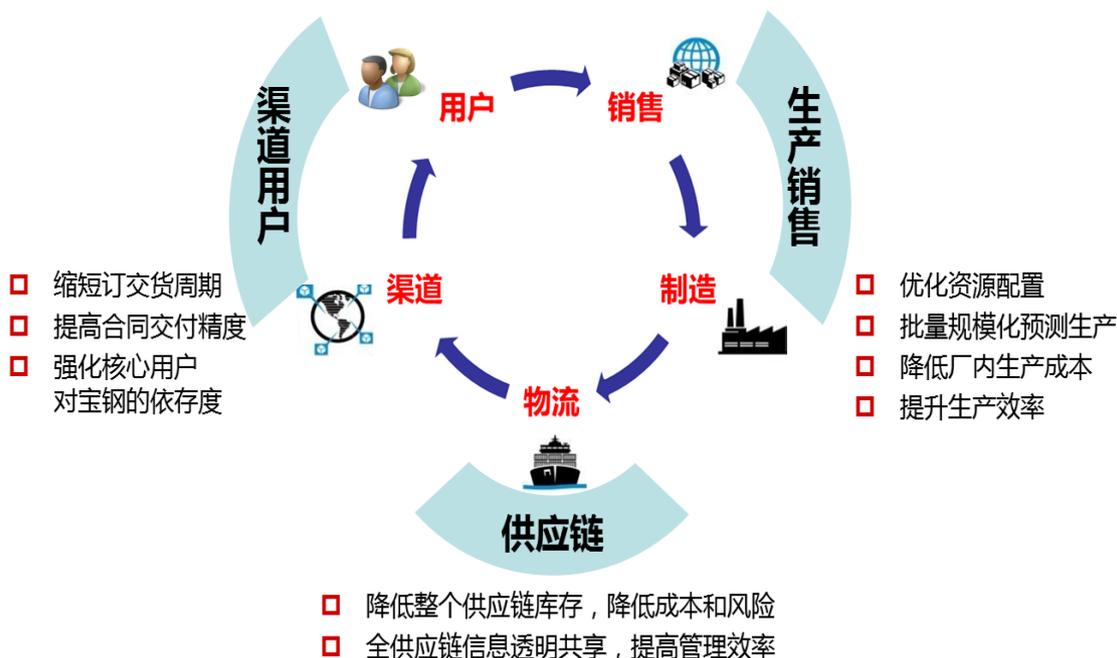


图 3-2-22 宝钢汽车板预测式销售智能决策技术

3.2.7 业务财务一体化管控

业财一体化管控主要是实现业务、财务数据在一体化系统平台上的集中与共享，打通产供销，实现业务财务一体化，业务交易实时准确地产生财务凭证，提升财务整体管理效率，推进各部门间的数据共享与业务衔接；借助集成、统一的系统实现业务信息与财务信息无缝衔接，业务信息自动生成财务信息。关键功能目标包括：

财务一级核算、集中管理，实现管理的扁平化。实现计划与预算控制职能，追踪预算执行情况，细化到各部门、各生产作业区。实现财务会计核算自动化。搭建财务共享服务、资金管理、银企直联等财务协同平台，将采购、销售对供应商、客户的结算，员工与企业 and 银行的结算等业务统一集中结算，并与合同管理系统实现对接。实现工序成本控制，对炼铁、炼钢、轧钢等各工序进行细化分解。构建财务分析体系，财务分析、统计分析和经济活动分析三个层面强化财务专业分析职能，为采购及产品销售运营优化提供支撑。

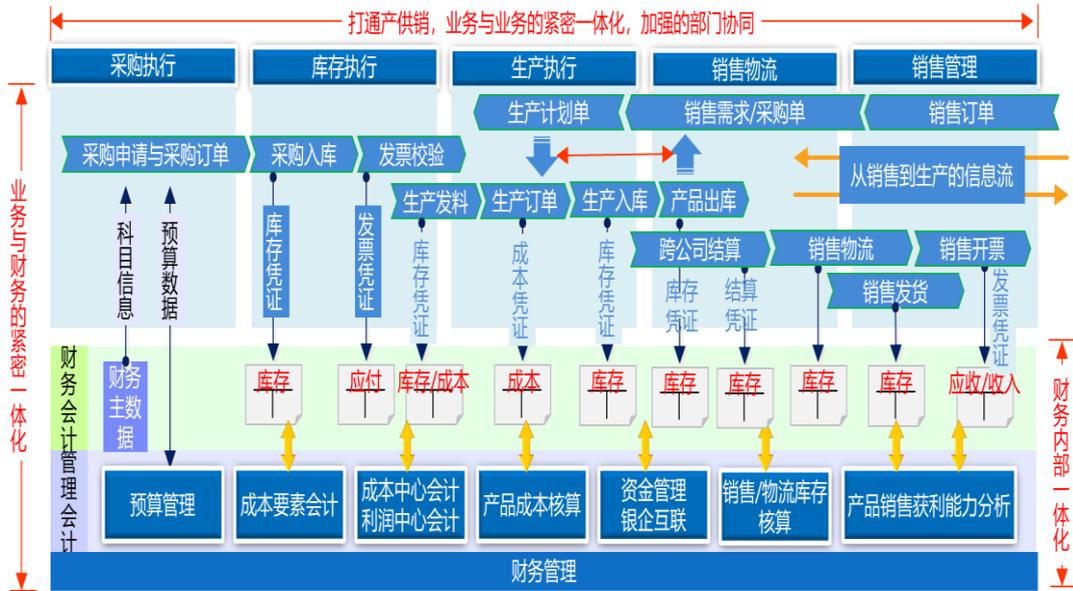


图 3-2-23 各管控活动之间信息交互

3.3 多要素管控的协同集成

以上主要管控活动强调的从产供销、计划调度、质量、能源、设备、生产过程控制等要素的闭环管控和集成优化，事实上，各要素之间存在着信息紧密关联和耦合关系。图 3-3-1 为各管控活动之间信息交互，图 3-3-2 为各管控功能之间的关联关系。

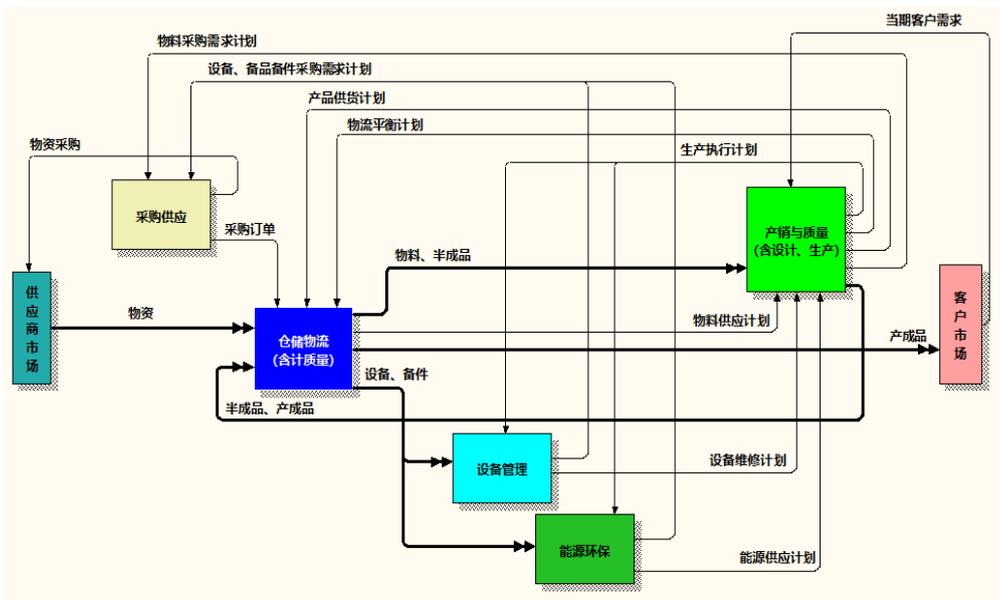


图 3-3-1 各管控活动之间信息交互

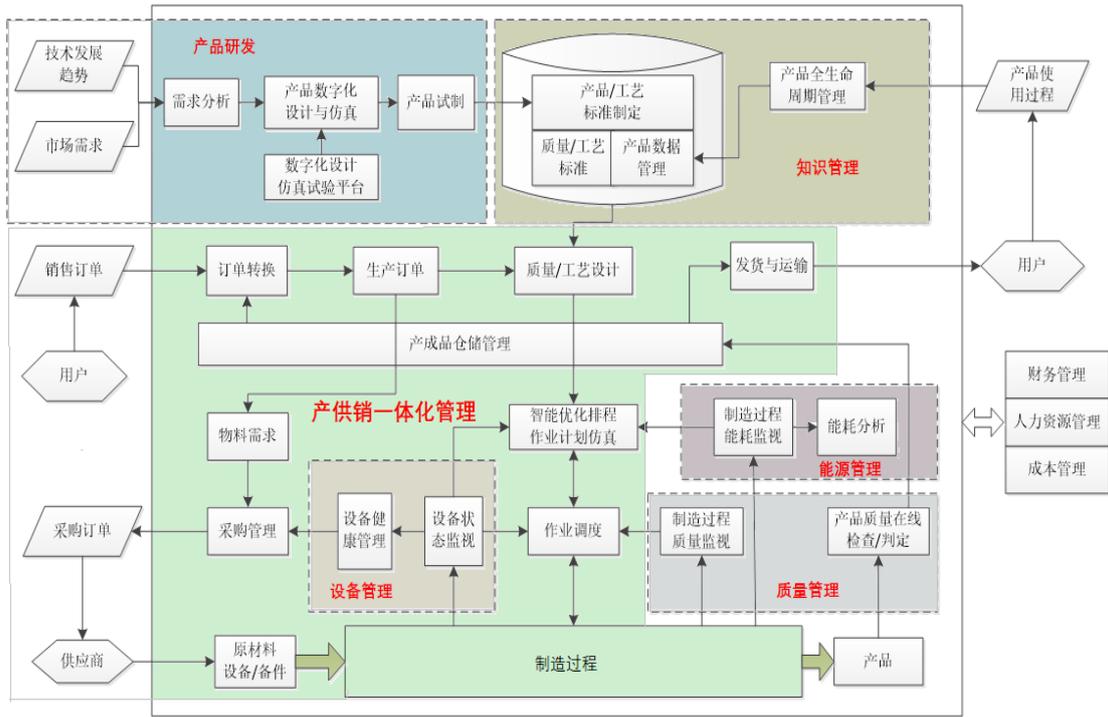


图 3-3-2 各管控功能之间的关联关系

因此，在此基础上，还需要进一步厘清各要素之间的关联、主从、制约关系，确定各要素管控活动和功能之间的信息沟通和协作机制，实现多要素管控的协同集成，追求综合效益最大化。图 3-3-3 为各要素管控活动之间的关联关系图。单箭头表示主从或制约关系，双箭头表示交互协调关系。

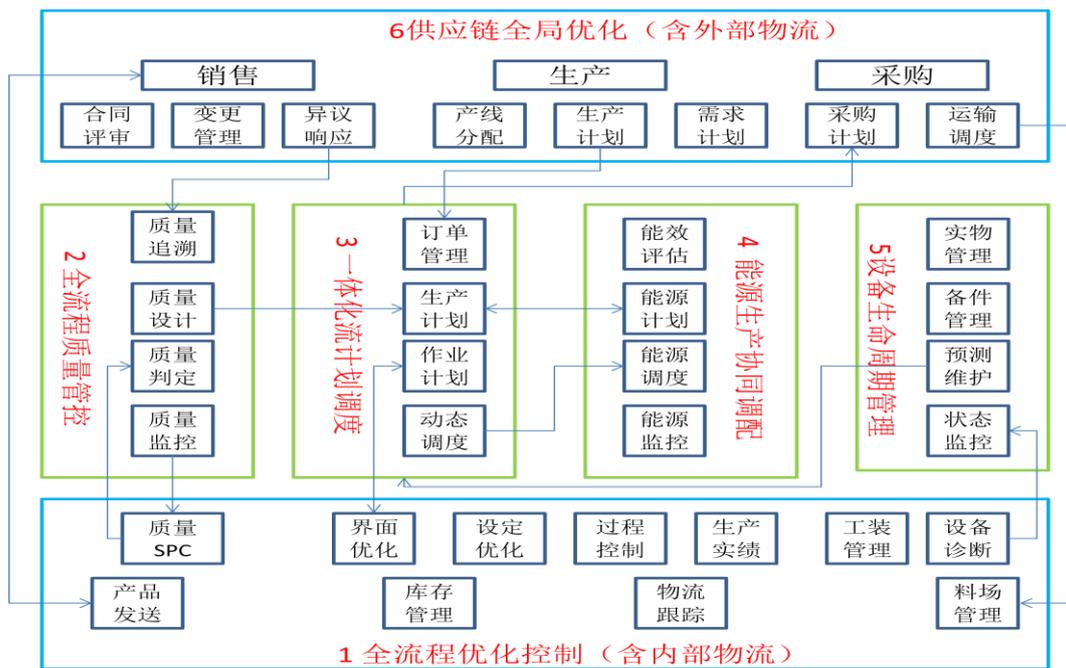


图 3-3-3 各要素管控之间关联关系图

需要指出的是，图中给出的管控活动，强调的是管控活动的闭环、完整、集成和协同，并不代表企业实际实施的层级，或对应几级信息化软件系统。事实上，图中一些管控活动存在着功能重叠，需要根据企业管理水平、业务能力和管控流程等实际情况进行合并或简化，部署在某一要素管控功能中，或进行进一步扁平化归集，如 6 中生产计划（企业）与 3 中生产计划（流程），3 中作业计划（全流程一体化）与 1 中的界面优化，5 中状态监控和 1 中的设备诊断（重要设备），2 中的质量监控（工序）和 1 中的质量 SPC 等。

此外，上述讨论未涉及企业关注的成本、资金、利润等要素，这些要素可以通过上述 6 部分管控活动体现、反映出来，如物料成本、能源成本、质量成本、设备成本、人工成本、库存和资金占用等，并通过这 6 部分管控活动集成协同优化实现企业综合效益最大化。

随着各要素管控活动的智能化水平的提升，多要素管控的协同集成，也体现在各要素管控活动相互促进和共同提升，从而涌现新的智能制造制造模式。图 3-3-4 给出了几种可能性。

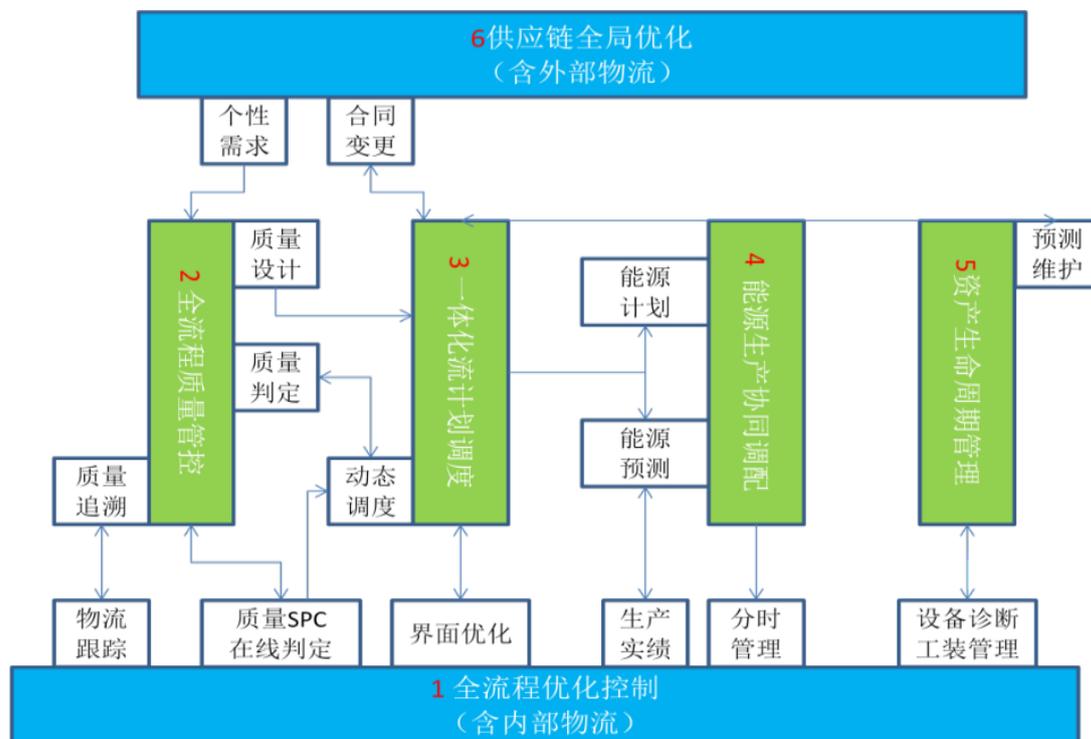


图 3-3-4 各要素管控活动相互促进和共同提升（新模式）

例如，在 6-3-2 之间，通过质量设计和动态调度水平提升，可以更好地满足用户个性需求，即时响应合同变更。在 1-2 之间，通过物流跟踪的精细化可以提升质量追溯的水平，质量管控工艺规程的数字化可以为工序过程质量 SPC 提供科学依据，后者又会进一步提升在制品质量在线判定的水平。在 3-4-1 之间，生产计划、流程实绩信息可以提升能源预测水平，为能源计划和能源调度优化提供条件，实现能源精细化分时管理。在 1-5-3 之间，通过过程控制和设备诊断信息汇集，可以提升预测维护水平，后者通过设备高效可靠运行，反过来支撑生产组织和流程优化控制。

4. HCPS 架构

关于智能制造体系架构，国内外进行了富有成果的研究和探讨，殷瑞钰院士对智能化钢厂进行了系统论述，提出了物质流、能量流、信息流三网协同优化的系统架构；柴天佑院士提出了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两层架构组成的新型流程企业智能优化制造架构；A. M. Meystel 和 J. S. Albus 等提出了由感知处理-对象模型-价值判值-行为生成基本单元构成的 NIST-RCS 递阶智能控制体系结构；中国信息物理系统发展论坛发布了《信息物理系统白皮书（2017）》；欧盟钢铁工业集成智能制造提出了 I²MSteel 的集成优化架构；河钢集团和东北大学结合河钢典型产线智能制造顶层设计，提出了工厂、物理系统、信息系统、工厂数据中心和虚拟系统四大部分组成的系统架构；中国工程院“面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)”的报告提出由相关的人、信息系统以及物理系统有机组成的新一代智能制造 HCPS2.0 的范式。本章借鉴上述研究成果，探讨钢铁工业智能制造 HCPS 架构。

4.1 HCPS 结构

HCPS 基本单元是人-数字孪生-物理实体之间实时交互系统。通过人机交互、数据中心、数字孪生的支撑，形成状态感知-实时分析-科学决策-精准控制的闭环循环和迭代优化，以安全、可靠、高效和实时的方式驱动管控对象，实现既定目标。

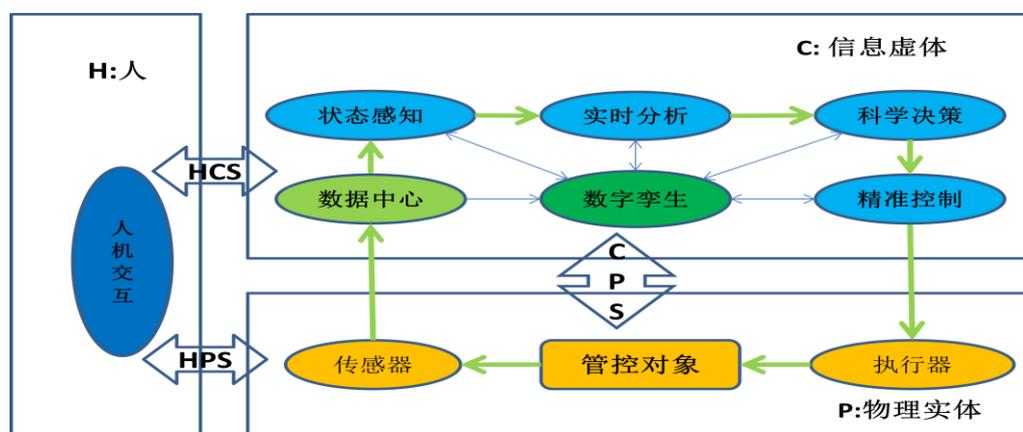


图 4-1-1 HCPS 基本单元

基于 HCPS 基本单元，考虑物理实体和人的不同层次，以及对应信息虚体不同功能，钢铁工业 HCPS 架构可分为工序级、产线级和企业级，形成多级嵌套结构，如图 4-1-2~图 4-1-4 所示。

工序级 HCPS 的物理实体为炼铁、炼钢和轧钢等冶金工序，人为操作人员，数字孪生为工程模型，数据中心汇集过程数据，信息虚体为控制系统，完成过程预报、工况判断、优化设定和自动控制功能。

以现有的 PCS、PLC 和基础自动化系统为基础，主要功能是执行系统级下达的执行指令，对工艺装备进行精准控制，同时负责数据采集与数据推送，装备间数据交互与通信等功能。应具有状态感知能力、控制执行能力、数据计算能力、自主决策能力及数据通信能力。目前，钢铁企业已广泛应用不同类型的 PCS 和 PLC 系统，实现了底层的自动化控制，但是缺乏自主感知、自主优化和自主控制能力。各工序中经过工业验证后的数字孪生模型可以嵌入到 HCPS 中，提升自主学习、自适应、自决策、自控制能力。

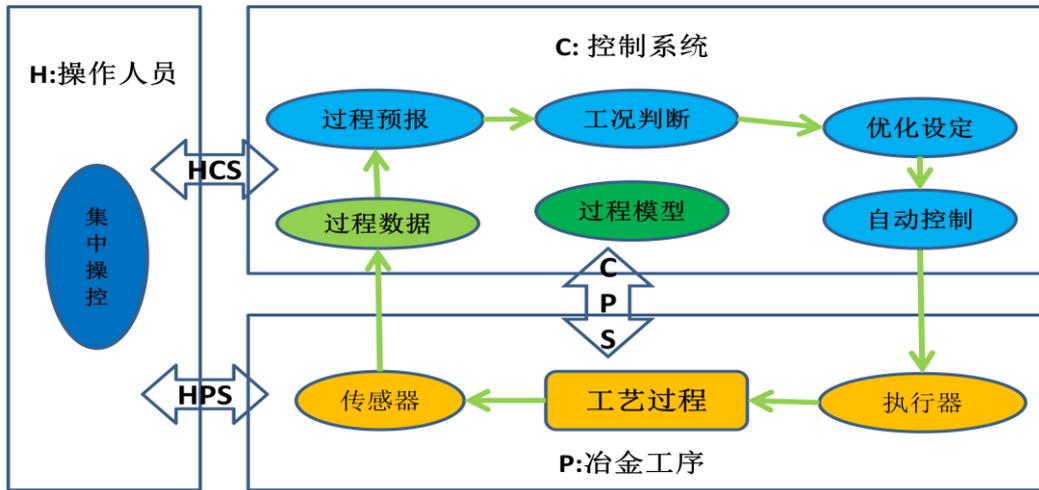


图 4-1-2 工序级 HCPS

产线级 HCPS 的物理实体为炼铁、炼钢和轧钢组合的长流程，炼钢和轧钢组合的短流程，人为生产指挥人员，数字孪生为流程仿真，数据中心汇集全产线数据，信息虚体为执行系统，完成生产监控、生产判断、计划优化和动态调度能。

在现有 MES 和 PCS 基础上，通过内部的宽带高速互联网、现场总线、无线网络，实现不同工序间生产计划、工艺数据、质量数据、检测数据、物料数据、装备数据、能源需求数据的互联互通，实现点到点的数据集成。建立全流程数字化制造系统，通过钢铁智能制造过程的数字孪生模型，实现信息空间与物理空间的

整体协同与优化。数字化制造系统通过数据挖掘技术与人工智能方法，建立各工序精准的数字孪生模型，实现生产计划、产品质量、生产成本、产线绩效的在线协同优化。

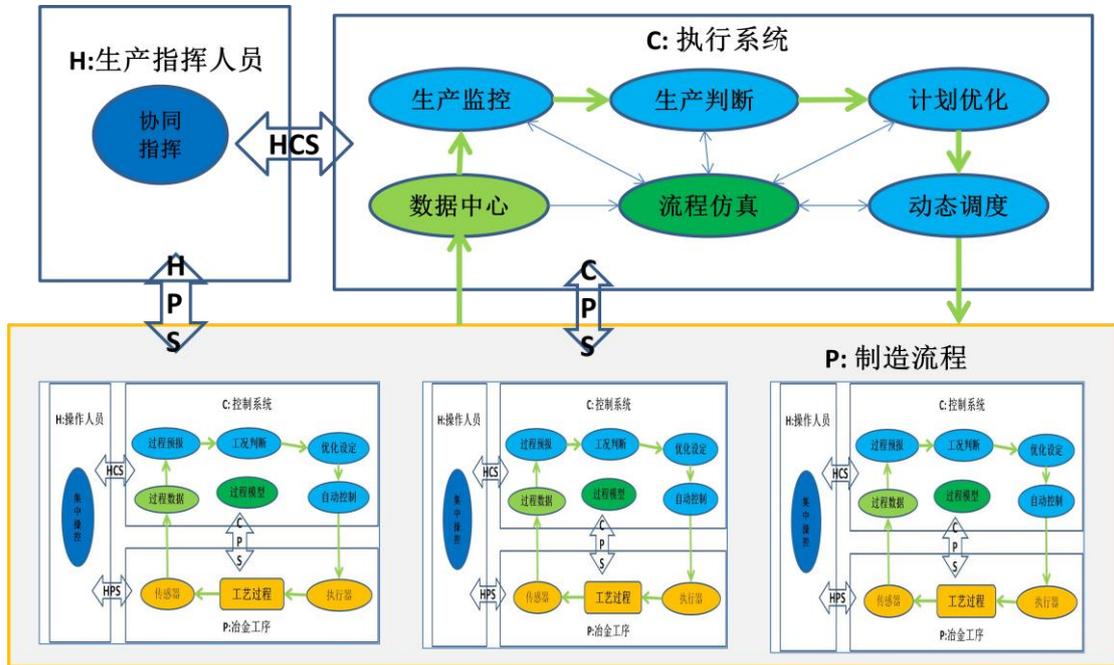


图 4-1-3 产线级 HCPS

企业级 HCPS 的物理实体为供应商、多生产基地（产线）和用户构成的供应链（或价值链），人为经营管理人员，数字孪生为市场模拟，数据中心汇集全供应链数据，信息虚体为经营管理系统，完成市场信息收集、市场态势研判、供应链协同优化和企业资源配置功能。

围绕产品全生命周期的核心信息和数据，通过数据集成与融合平台，运用大数据分析技术，为企业在运管过程的精益决策提供信息集成和决策支持。通过数据挖掘与决策支持平台，实现制造过程中战略发展规划、市场需求分析、经营决策分析、企业资源规划、产品研发计划、产品质量管理、客户关系管理、供应链管理等环节的协同优化，实现产品与服务过程的全要素、全价值链、全流程、全生命周期的整体协同与优化。

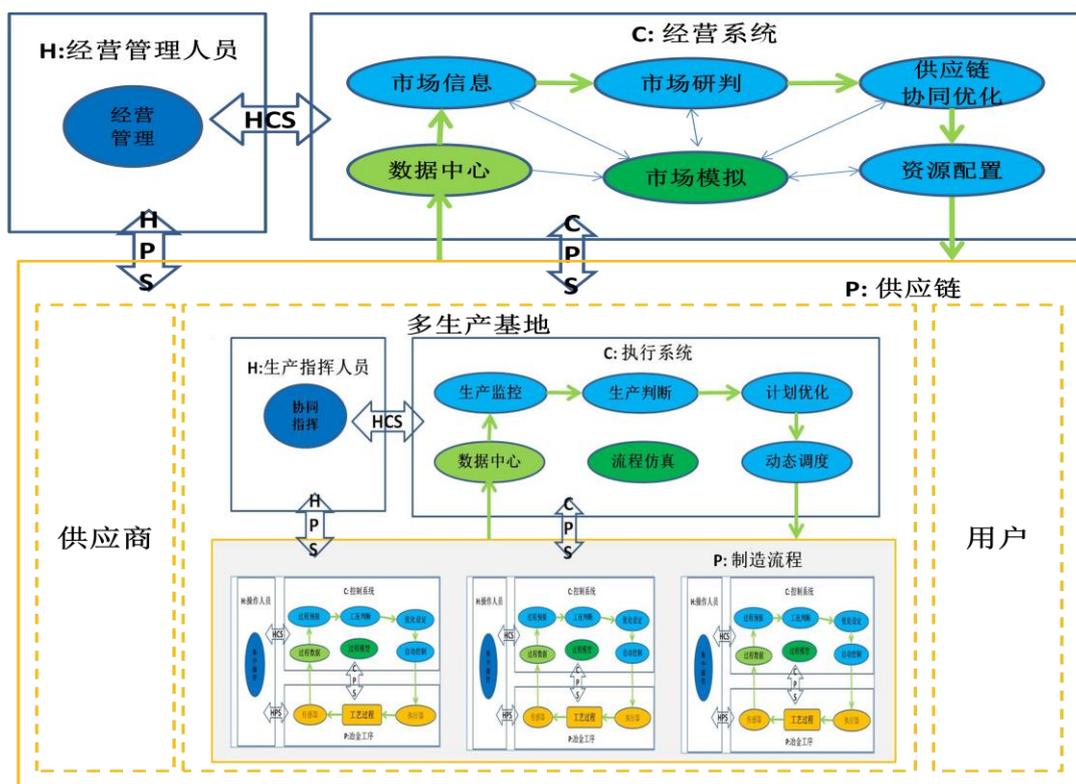


图 4-1-4 企业级 HCPS

将上述各级 HCPS 进行综合集成，可得到图 4-1-5 所示钢铁工业智能制造 HCPS 架构，由物理系统、信息系统、数据中心、数字孪生和人机交互五部分构成。

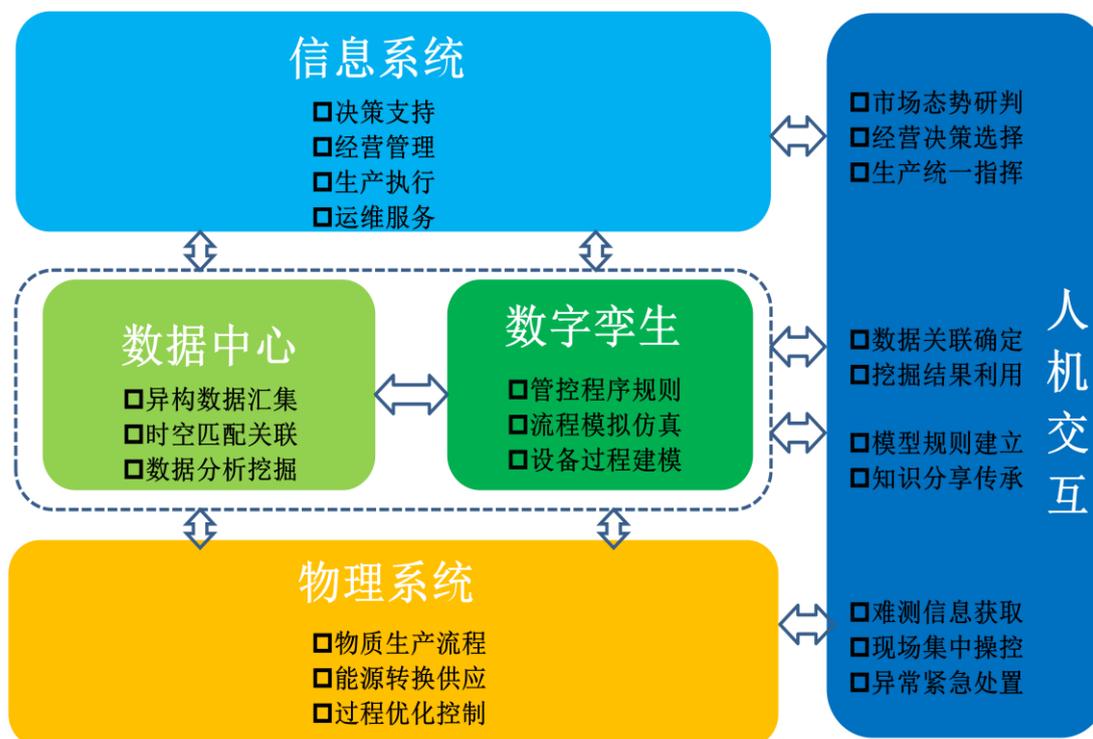


图4-1-5 钢铁工业智能制造HCPS架构

其中：**物理系统**对应产线级HCPS的物理实体，是钢铁工业智能制造HCPS的根基。**信息系统**对应产线级HCPS的执行系统和企业级HCPS的经营系统，是钢铁工业智能制造HCPS的灵魂。**数据中心**是工序级HCPS、产线级HCPS和企业级HCPS数据中心的集成，实现人-信息虚体-物理实体信息交互纽带。**数字孪生**是工序级HCPS过程模型、产线级HCPS流程仿真和企业级HCPS市场模拟的集成，钢铁工业智能制造HCPS的核心。**人机交互**是各类人员发挥主观能动性的主要形式，人员包括工序级HCPS操作人员、产线级HCPS生产指挥人员和企业级HCPS经营管理人员。

信息系统。对应产线级HCPS的执行系统和企业级HCPS的经营系统，是钢铁工业智能制造HCPS的灵魂。从钢铁企业的生产管理、运营管理，通过横向贯通、纵向协同，统筹管理企业运营。

数据中心。数据中心是工序级 HCPS、产线级 HCPS 和企业级 HCPS 数据中心的集成，实现人-信息虚体-物理实体信息交互纽带。完成从客户需求到销售、订单、计划、研发、设计、工艺、制造、采购、供应、库存、发货和交付、售后服务、运维等整个产品全生命周期各个环节所产生的各类数据收集、汇集、处理及分析应用。

数字孪生。数字孪生是工序级 HCPS、产线级 HCPS 和企业级 HCPS 过程模型、流程仿真和市场模拟的集成，钢铁工业智能制造 HCPS 的核心。它借助工业模型、虚拟现实、可视化仿真、优化、数据分析等信息技术和人工智能技术实现钢铁产品制造过程及物流过程场景重现与优化、工艺和质量设计、生产计划和作业计划仿真和优化、产品质量分析和预测、能耗分析和预测，模拟产品全生命周期的各种活动，为钢铁企业经营管理与生产管控提供决策支持。

人机交互。人机交互是钢铁工业智能制造 HCPS 的活动主体。对应信息系统，起到市场信息获取、经营决策选择、生产集中指挥作用；对应数字孪生，起到模型规则建立、知识分享传承作用；对应物理系统，起到难测信息获取、现场集中操控和异常紧急处置作用。

4.2 物理系统

物理系统是钢铁企业各种设备及控制系统等实体要素的集合，这些实体要素按照功能不同构成炼铁、炼钢、轧钢等各工序，各工序按照生产流程构成不同

的产线。

钢铁工业的生产过程是物质、能量以及相应信息在合理的时空尺度上的流动/演变过程，其动态运行过程的物理本质是物质流（对钢铁企业而言主要是铁素流）在能量流（对钢铁企业而言主要是碳素流和电流）的驱动和作用下，在一定的装置内，按照设定的“程序”（各种生产作业指令等），沿着特定的“流程网络”（钢铁生产流程）作动态-有序的运行，并实现生产过程的多目标优化。

钢铁制造流程是由融合着复杂的物理输入/输出的物质流网络、能量流网络和信息流网络所组成的HCPS，钢铁工业智能制造需要构建“三网协同”的HCPS，其物理机制如图4-2-1所示。其中，“界面技术”是一种复杂嵌入式系统，因为钢厂物理系统是由异质、异构的组成单元（子系统）构建而成的。要实现智能化必须解决异质异构的子系统之间的相互辨识、相互感知、相互作用、相互协同的关系，从而以优化的“嵌入”件的方式融入数字物理系统之中，促进上位系统（全流程）的优化、协同。

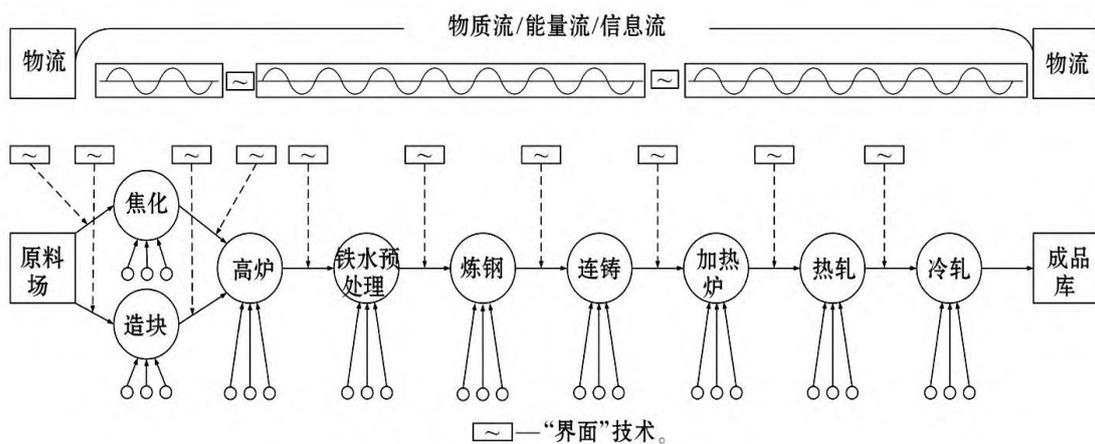


图4-2-1 钢铁流程的物理机制

从钢铁制造流程动态运行的物理本质中可以看出，流程运行过程有三个要素，即“流”、“流程网络”和“运行程序”：

- (1) “流”包括了物质流、能量流和信息流，含有输入、输出的涵义；对铁素物质流而言，贯通全流程的基本参数是物质流量、温度和时间。
- (2) “流程网络”包括了物质流网络、能量流网络和信息流网络；三者应该协同、融合。对于流程制造业而言，其中物质流网络是根源。
- (3) “运行程序”包括了物质流运行程序、能量流运行程序和信息流运行程序。物质流、能量流体现了钢铁制造流程物理系统的动态输入输出本质

和关联行为，通过信息流实现物质流、能量流的动态关联。

网络构建是智能化设计的重点之一，也是智能化运行的基础。智能流程的静态网络构建需要考虑：

- (1) 节点数量优化与节点功能选择优化，即单元工序功能集的解析-优化，设备合理大型化、高效化。
- (2) 工序/装置连接“界面”技术的选择与优化，即工序之间关系集的协同-优化，连接简捷化。
- (3) 节点-节点之间动态耦合技术，即工序间的动态衔接调控和路径优化。
- (4) 全流程协同-连续技术，即流程工序集的重构优化（制造流程结构演化，企业结构升级）。

运行程序为智能流程的动态-有序、协同-连续；层流-节律运行提供了指导性规则，需要考虑以下内容：

- (1) 各类自复制过程的模块（高炉、转炉、轧机等生产过程控制与调度）；
- (2) 各类链接和自修复模块（天车、管道、煤气柜、储气罐、铁水罐、钢水包、仓库等传输、缓冲模块和维修计划等）；
- (3) 各类协同优化的“界面”技术模块；
- (4) 自生长模块（全厂性、全流程智能化调度、管控系统）；
- (5) 全流程动态协同运行指令产生、失稳态自感知与自修复、连续自生长模块的集成；
- (6) 流程系统指令与子系统运行互相协同、验证；
- (7) 进厂/出厂物流模型及其价值链分析等。

4.3 信息系统

在钢铁工业智能制造系统中，信息系统涵盖现有的ERP、MES的功能模块，打破层级界限，从全产业供应链系统、一体化生产管控、工厂设备资产全生命周期等多维度构建组织管理功能出发进行设计，基于统一的大数据平台，统筹管理企业运营。虽然从数据流来看，系统已经完全扁平化，没有传统的层级数据库存在，但是从实际的业务来看，还是有清晰的业务管理流程。

信息系统在典型MES、ERP功能基础上，面向全流程和各加工工序，增加了基

于工业大数据驱动的智慧优化决策、产品质量监测与预报模型、故障诊断与智能维护以及全流程能源管理与预测、市场预测分析等功能。信息系统按功能类型分为几大类：战略规划（Strategic Planning, SP）、运营管理（Operation Management, OM）、运营服务（Operation Service, OS）、生产管理（Production Planning, PP）、生产服务（Production Service, PS）等。如图4-3-1所示。其中：



图4-3-1 信息系统模块群

战略规划SP。侧重集团战略功能，主要包括经营规划、经营分析、市场开发规划、产品研发规划等，从集团总体经营、市场开发、战略决策需求出发，利用大数据等新技术开发具有辅助决策功能的模块；

运营管理OM。体现生产厂/产线从订单开始到计划排程的运营管理主流程，包含了订单设计、质量管理、制造资源优化、高级排程等主流程模块，还不可或缺地涵盖财务、销售、采购、外部物流等紧密支持主流程的功能模块；

运营服务OS。体现保障公司运营管理服务的功能模块群，主要包括传统ERP和MES内容中的公司日常管理内容；

生产管理PP。体现对各工序生产过程、产品质量的管理功能模块群，主要包括传统MES内容中的工序MES、质量以及厂内物流仓储等管理内容，增加质量预报、判定、控制等新的功能模块，主要保障公司最核心的生产高效运行；

生产服务PS。体现对主生产流程的服务支持功能，主要包括设备在线诊断、

健康管理、智能预测式维护、能源以及分析检验等管理内容，增加带有智能功能的设备智能维护、设备健康管理、全生命周期类新的设备与产品管理等新功能模块，主要保障公司企业设备能源等良好工作状态，支撑稳定高质的生产。

有关信息系统的功能及其集成应用，在上一章业务需求和主要集成应用场景中已有讨论，此处不再赘述。

4.4 数据中心

数据中心是从客户需求到销售、订单、计划、研发、设计、工艺、制造、采购、供应、库存、发货和交付、售后服务、运维等整个产品全生命周期各个环节所产生的各类数据及相关技术和应用的总称。

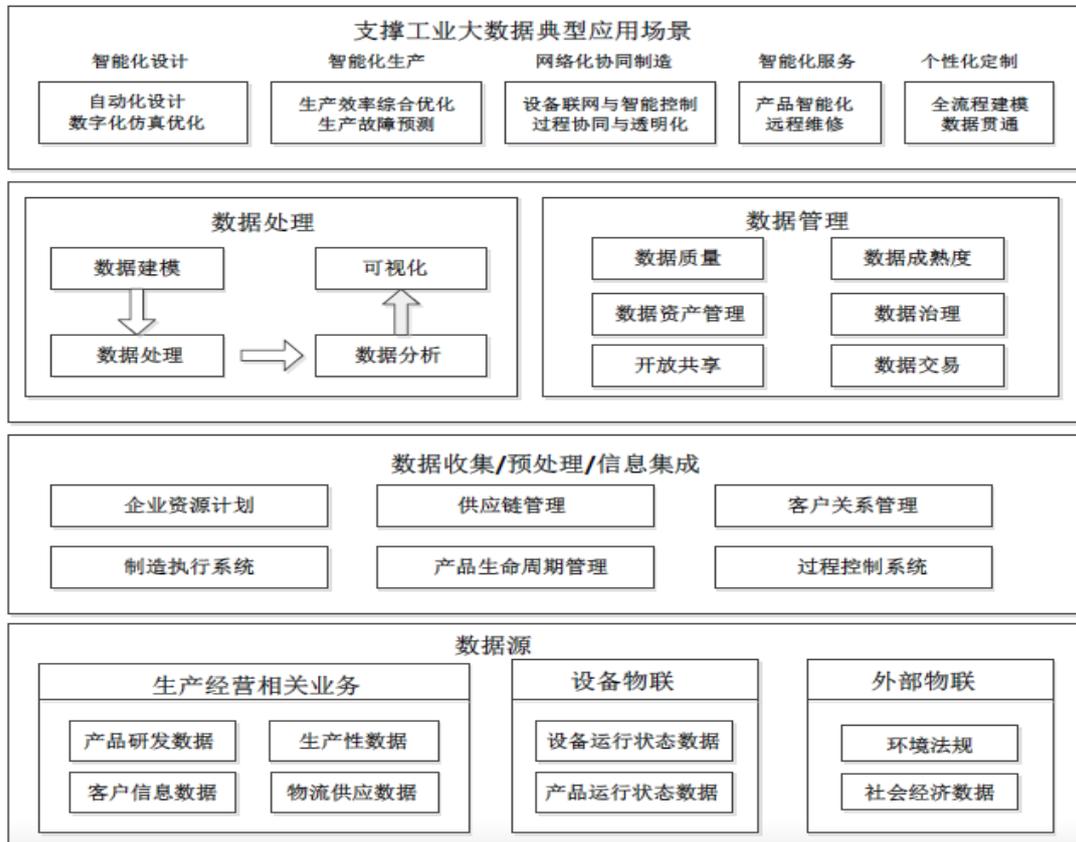


图4-4-1 数据中心应用的主要环节

随着云计算和大数据时代的到来，数据中心正面临着数据日益猛增的严峻压力，下一代工厂数据中心，可以通过虚拟化技术将物理资源抽象整合，动态进行资源分配和调度，实现数据中心的自动化部署，共享的软硬件资源和信息可以按

需提供给计算机和其他设备的云计算服务功能。

数据中心应用的目标是构建覆盖工业全流程、全环节和产品全生命周期的数据链，图3-5-1展现了工厂数据在实际应用当中涉及到的主要环节，包括数据源、数据收集与集成、数据处理与数据管理、典型应用场景等四个层次。

数据源：第一类来自企业生产经营相关的业务数据，主要是企业信息系统累计的大量产品生产研发数据、客户信息数据、生产数据、物流供应数据及环境数据；第二类设备物联数据，指工业生产设备物联网运行模式下，传感器实时产生收集的涵盖设备运行参数、工况状态参数、运行环境参数等评估生产设备运行状态、产品运行状态的数据；第三类外部数据，指与工业生产活动相关的互联网上产业链相关企业外部互联网来源数据。

数据收集与集成层：主要实现工业各环节数据的收集与集成，打通现有信息系统的数据连接，包括企业资源计划（ERP）、制造执行系统（MES）、供应链管理（SCM）、产品生命周期管理（PLM）、客户关系管理（CRM）、过程控制系统等。

数据处理和数据管理层：是工业大数据的核心环节，其关键目标是实现工业大数据面向生产过程智能化、产品智能化、新业态新模式智能化、管理智能化以及服务智能化等领域的数据处理和数据管理。通过数据建模、数据处理、数据分析，实现数据结果和3D工业场景的可视化，对数据质量、能力成熟度、数据资产管理、数据开放共享和交易等进行数据管理。

应用场景层：主要是基于数据处理和数据管理结果，生成可视化描述、控制、决策等不同应用，从而实现智能化设计、智能化生产、网络化协同制造、智能化服务和个性化定制等典型的智能制造模式，并将结果以规范化数据形式存储下来，最终构成从生产物联设备层级到控制系统层级、车间生产管理层级、企业经营层级、产业链上企业协同运营管理的持续优化闭环。

4.5 数字孪生

数字孪生系统借助工业模型、虚拟现实、可视化仿真、优化、数据分析等信息技术和人工智能技术实现钢铁产品制造过程及物流过程场景重现与优化、产品研发设计、工艺和质量设计、生产计划和作业计划仿真和优化、产品质量分析和

预测、能耗分析和预测，模拟产品全生命周期的各种活动。

数字孪生是与信息系统和物理系统中相关子系统相平行的模拟仿真系统，面向钢铁企业制造与管理过程的全生命周期进行仿真和优化，在海量数据的基础上，综合运用可视化仿真技术，智能优化技术、人工智能技术和数据分析技术，通过离线和在线学习方式，训练和优化各类感知、控制、排程、计划、预测、分析和模型，面向钢铁企业制造与管理过程的全生命周期进行仿真和优化，通过对钢铁制造过程进行“再现过去”、“检验现在”、“预测未来”等数字化、图形化分析，实现制造过程的可持续优化，为钢铁企业提供优化与智能化的可持续解决方案。

HCPS 的关键技术之一在于如何在虚拟世界中优化和重组实体的状态以及实体之间的关系。虚拟与实体彼此共享信息和协同活动，虚拟世界中代表实体状态和相互关系的模型和运算结果精确对称地指导和辅助实体的行动，使实体的活动相互协同和优化，进而实现价值更加高效、准确、和优化的增值。现实世界与数字孪生对应映射关系如图 4-5-1 所示。

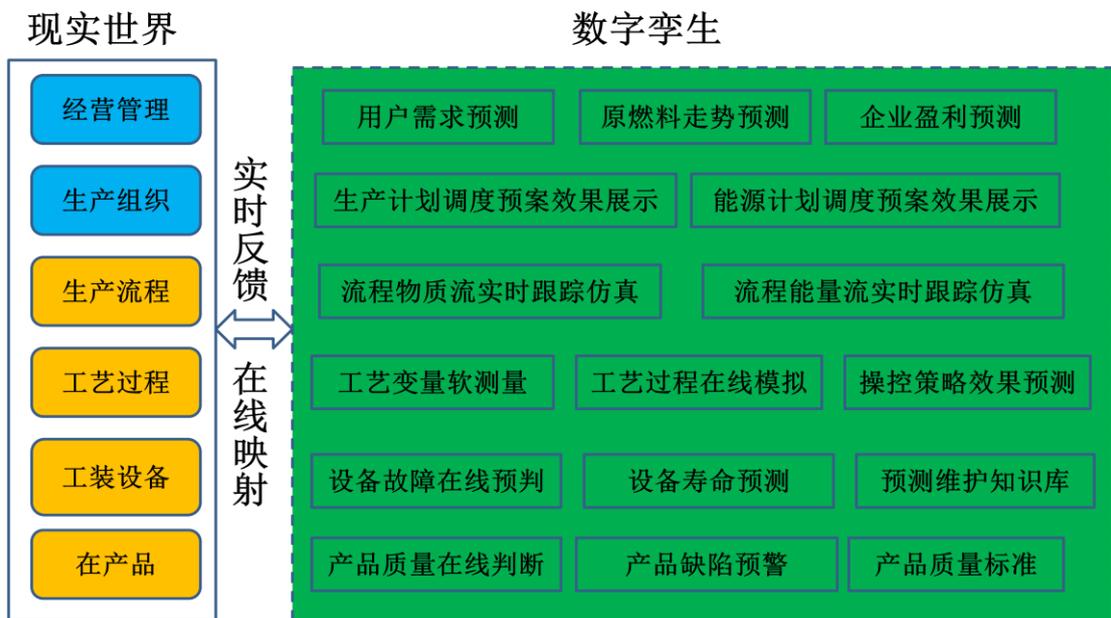


图4-5-1 现实世界与数字孪生对应映射关系

数字孪生具有以下功能：

(1) 钢铁产品质量和工艺数字化设计

根据各类产品设计标准，进行钢铁产品质量和工艺的数字化设计，形成钢铁产品数据管理系统，支持钢铁产品虚拟制造过程。基本功能包括：钢铁产品质

量指标体系和工序质量指标数字化设计； 钢铁产品生产工艺数字化设计。

（2）关键工序虚拟制造仿真

根据钢铁产品的质量和工艺设计，结合设备实际状况进行关键工序虚拟制造仿真，形成数字化虚拟产品；利用工厂数据中心提供的生产与质量数据，进行产品质量预测可视化分析，为预判生产过程和产品质量问题提供参考。基本功能包括： 单工序虚拟制造可视化仿真与评估； 多工序虚拟制造可视化仿真与评估； 单工序产品质量判定、预测与可视化分析； 多工序产品质量判定、预测与可视化分析。

（3）企业生产物流过程仿真分析

考虑实际生产中的各种动态变化情况，如：作业时间不确定、设备故障、生产节奏不准时等，进行作业计划的仿真分析，为完善生产作业计划、进行重调度提供依据；对原料、半成品、产成品的仓储过程和运输配运进行可视优化和仿真分析，给出物流作业计划建议方案。基本功能如下： 单工序作业计划可视化仿真分析； 多工序作业计划可视化联合仿真分析； 生产与物流节奏仿真分析； 仓储物流可视化仿真与优化； 运输物流可视化仿真与优化。

（4）企业能源流仿真分析

利用工厂数据中心提供的各类生产与能耗数据，进行关键工序与整个生产过程的能耗预测与核算，为能源优化提供参考。基本功能如下： 单工序能耗可视化仿真分析； 多工序能耗可视化仿真分析； 全流程能耗仿真分析。

（5）关键设备健康与运维仿真分析

利用工厂数据中心提供的各类设备运行数据，进行关键设备生命周期预测和设备故障诊断与预警，为优化设备运维提供依据。基本功能如下： 关键设备生命周期预测； 关键设备故障诊断与预警； 设备维修计划分析。

（6）企业供应链仿真分析

模拟企业外部市场环境，为优化企业经营决策提供依据。功能如下： 基于制造能力约束的产品交货期协商仿真优化； 原材料订购策略与库存策略仿真分析； 销售策略与产品定价策略仿真分析； 资金流/现金流仿真分析。

（7）模型与算法开发环境

利用工厂数据中心提供的各类数据，根据企业运营需要，开发多种模型和算法，进行在线和离线训练、仿真与优化，为企业提供可持续的智能最优化解决方案。

案。基本功能如下：仿真工具库建设；模型算法库建设；模型开发与训练优化。

4.6 人机交互

钢铁工业智能制造旨在使人类从大量体力劳动和脑力劳动中解放出来，从事更有价值的创造性工作，而不是彻底实现无人化。事实上，由于钢铁生产过程复杂性、不确定性，通过人机深度融合实现智能增强，人机交互将发挥重要作用。

在工序级HCPS, 人机交互起到视听信息获取、现场集中操控和异常紧急处置作用，同时借助人的机理知识、实践经验和规则总结，与计算机数据统计模型相结合，可以建立因果性、相关性结合的过程模型或专家系统。

在产线级HCPS, 可以发挥人对难定量、不完整生产信息感知能力，通过人机交互形成综合分析预测，发挥人异常紧急处置、优化目标直觉选择能力，通过人机交互形成异常调控规则和生产集中协同指挥。同时借助人的机理知识、实践经验和规则总结，与计算机局部统计模型相结合，可以建立网络化流程模拟仿真，支撑计划优化和动态调度

在企业级HCPS, 可以发挥人对不确定市场信息获取能力，预测市场发展趋势，发挥人对经营目标的决断能力和风险意识进行经营决策。同时，借助管理人员经验，结合数据分析展示，提升市场变化态势判断能力。

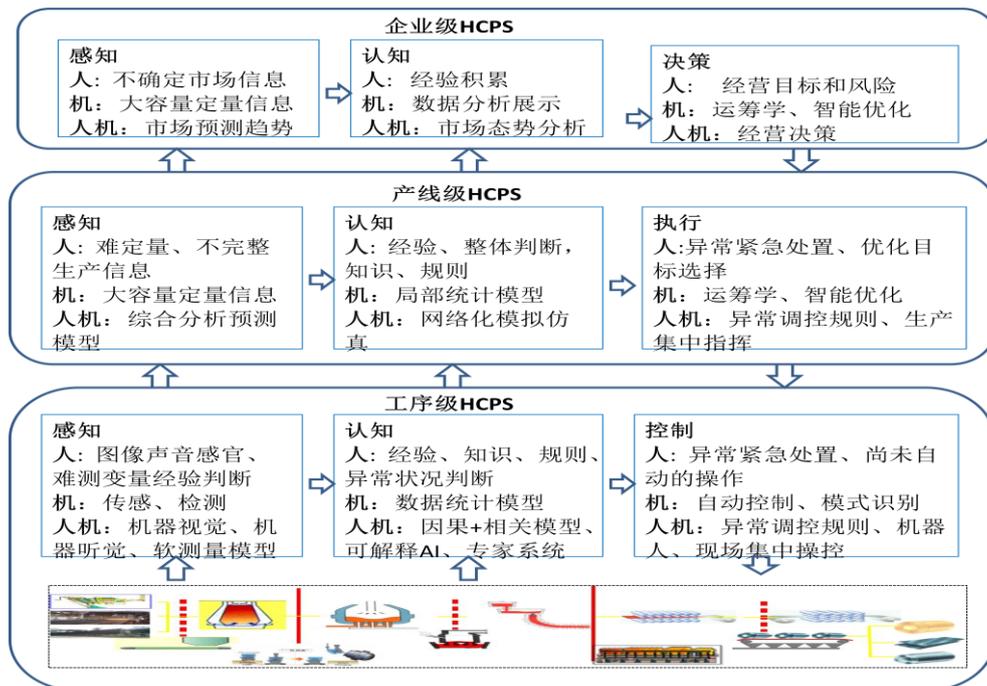


图4-6-1 人机交互在HCPS中的作用

5. IT 实现架构

IT 实现架构描述智能制造业务架构以及 HCPS 架构中物理系统、信息系统、数据中心、数字孪生和人机交互如何在工业互联网平台中实现和部署，完成智能制造业务架构管控活动的集成、协同和优化。

IT 实现架构有着各种可能，而且会随着技术发展不断变化，本报告参考美国工业互联网参考体系结构、工业互联网产业联盟（AII）的工业互联网体系架构（1.0 版）、中国工业互联网平台体系架构，以及欧盟钢铁工业智能制造技术架构，在此基础上给出钢铁工业智能制造 IT 实现架构，并介绍了从原系统向新系统的迁移路径。

5.1 IT 实现架构核心层级

借鉴上述工业互联网平台和欧盟钢铁集成智能制造架构，钢铁工业智能制造 IT 实现架构分为边缘层、平台层、应用层三大核心层级。

（1）边缘层。通过工业互联、设备接入、协议解析，实现时序数据、关系数据、非结构对象（事件、图像、声音、文本）等数据汇集，运用边缘计算技术，实现错误数据剔除、数据缓存等预处理以及边缘实时分析，降低网络传输负载和云端计算压力。同时，边缘层也是实时监控、在线管控等功能实现的载体。

（2）平台层。包括数据中心、知识中心和软件开发。通过数据中心，为工业用户提供海量工业数据的管理和分析服务；通过知识中心，积累沉淀常规和 AI 算法组件以及钢铁行业的机理知识、经验规则等组件，通过工业建模平台，构建数据模型与工业知识融合的语义网络，形成价值判断和行为生成（决策、控制）模块，支撑人机结合的知识管理；通过软件开发，在开放的开发环境中以工业微服务的形式提供给开发者，用于快速构建定制化工业 APP。同时，平台层也为应用层各应用功能提供数据、信息、知识的支撑。

（3）应用层。针对不同应用场景，构建经营、执行、控制等智能体组件，集成实现钢铁工业智能制造各项功能，为用户提供设计、生产、管理、服务等一系列创新性应用服务，实现价值的挖掘和提升。

边缘层、平台层和应用层之间有着紧密的关联：

边缘层是应用层实时监控、在线管控等功能实现的载体。同时，边缘层可以起到以下作用：强化协议转换能力，实现不同工业网络协议的转换；强化边缘计算能力，利用边缘网关剔除冗余数据，在边缘侧运行分析算法，实现实时反馈控制；强化边缘与云端协同能力，将云端模型导入边缘设备进行实时分析，并根据反馈数据进一步优化云端模型，实现双向迭代。

平台层的数据中心、知识中心为应用层、边缘层各应用功能提供数据、信息、知识的支撑。

应用层实现智能制造各项集成优化功能。同时为边缘层和平台层数据中心提供各种数据和信息来源，应用层的实践为平台层知识中心提供源源不断的素材。

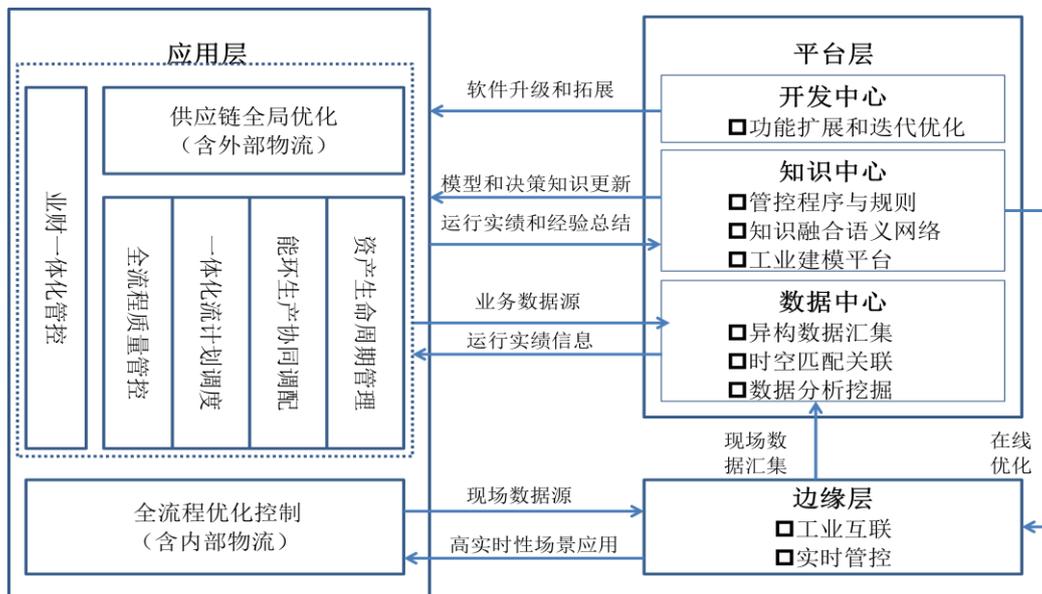


图 5-1-1 钢铁工业智能制造 IT 实现架构的层级关联

基于工业互联网平台三层IT实现架构，可以构建钢铁工业智能制造系统架构。其中，物理系统及全流程优化控制对应三层IT实现架构的边缘层；信息系统对应三层IT实现架构的应用层的除全流程优化控制以外的管控功能，以及平台层的开发中心；工厂数据中心对应三层IT实现架构的平台层的数据中心；数字孪生对应三层IT实现架构的平台层的知识中心。图5-1-2为钢铁工业智能制造业务架构、CPS架构与三层IT实现架构之间对应和关联关系。

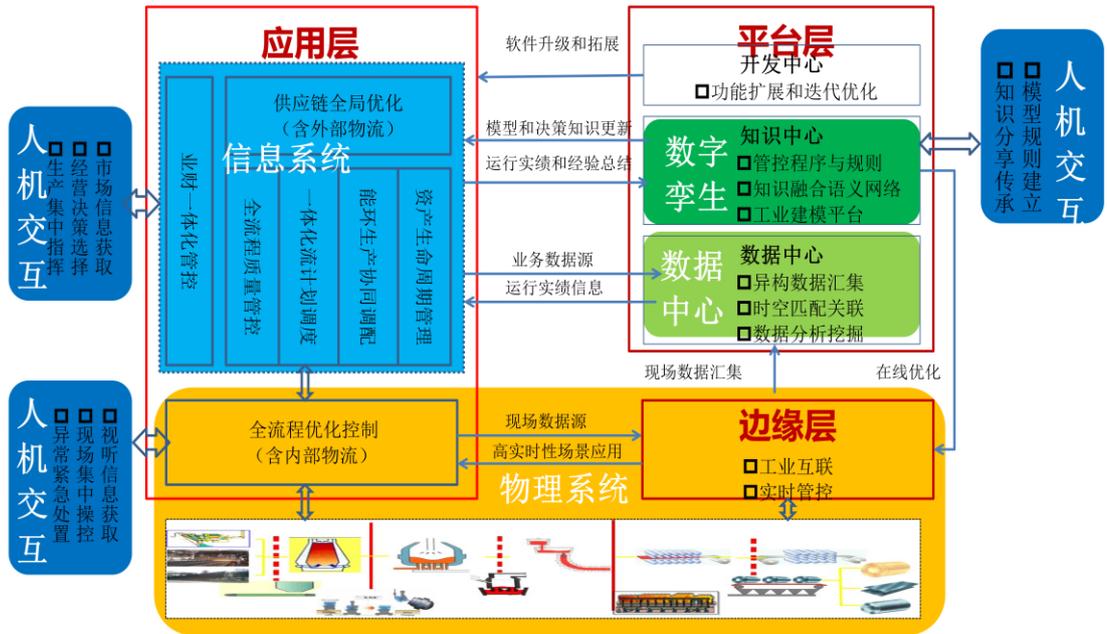


图5-1-2 钢铁工业智能制造业务架构、HCPS架构与三层IT实现架构关联

5.2 IT 实现架构

5.2.1 工业互联网实现

现阶段钢铁企业的数字化、网络化已具备一定基础，典型架构如图 5-2-1 所示。

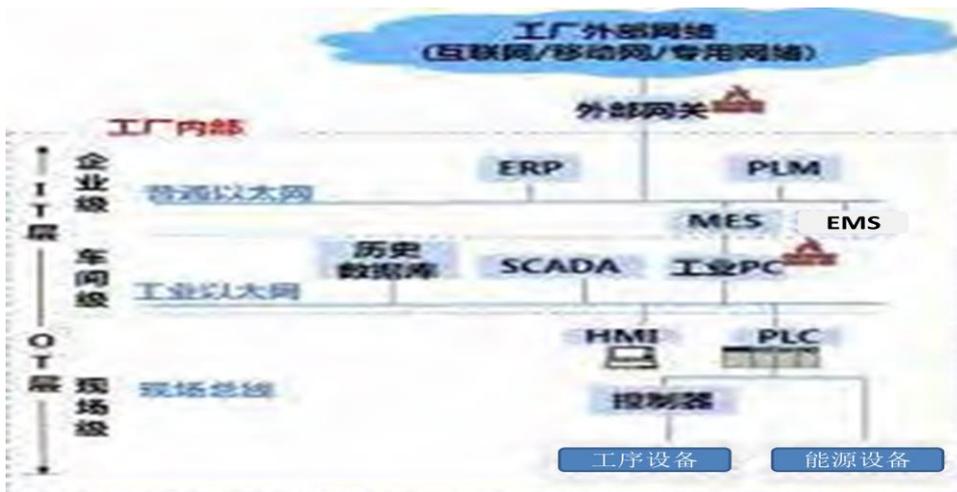


图 5-2-1 钢铁企业工业互联网现状

但与智能制造要求相比，在网络、数据、知识等方面还有很大改造和提升空间。在网络互联方面，工业网络层级复杂，现场总线、工业以太网、普通以太网

等多种联网技术并存且以有线为主，工厂与外部互联有限。在数据集成方面，不同层级之间的数据相对隔离，底层设备采集有限，系统间数据集成困难，云、大数据等技术还未有效开展。

在工业互联网背景下，钢铁智能化系统在网络互联、数据智能等方面将进行快速的迭代演进，云和大数据技术逐步引入，扁平化的软硬件部署架构成为重要发展趋势，并将呈现以下关键特征：

- 体系架构方面，实现层级打通、内外融合，传统多层架构逐渐演变为应用层、平台层和边缘层三层，整体架构呈现扁平化发展趋势。
- 网络互联方面，各种智能设备充分实现网络化，无线成为有线的重要补充，新型网关推动异构互联和协议转换，工厂、外部信息系统和用户充分互联。
- 数据智能方面，工业云平台成为关键核心，实现工厂内外数据的充分汇聚，支撑数据的时空匹配、存储、挖掘和分析，有效支撑钢铁工业智能化和各种创新应用。

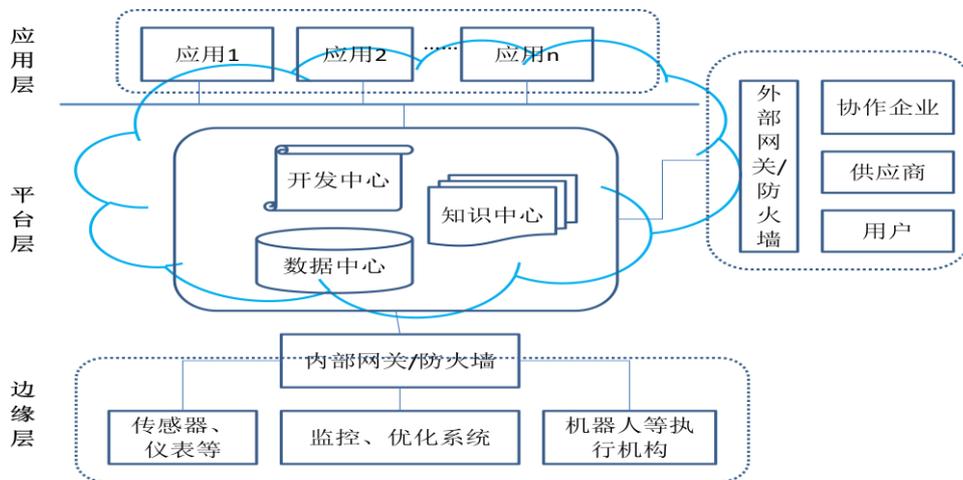


图 5-2-2 工业互联网目标实现架构

5.2.1.1 网络互联的实施

网络互联的实施主要解决工业互联网各种设备、系统之间互联互通的问题，涉及现场各产线设备和系统之间的互联，以及企业信息系统、用户、供应商与云平台之间不同互联场景，针对现有工业系统既包含现有设备与系统的网络化改造，还包含新型网络连接的建设。网络互联的实施涉及的主要环节如图 5-2-3 所示。

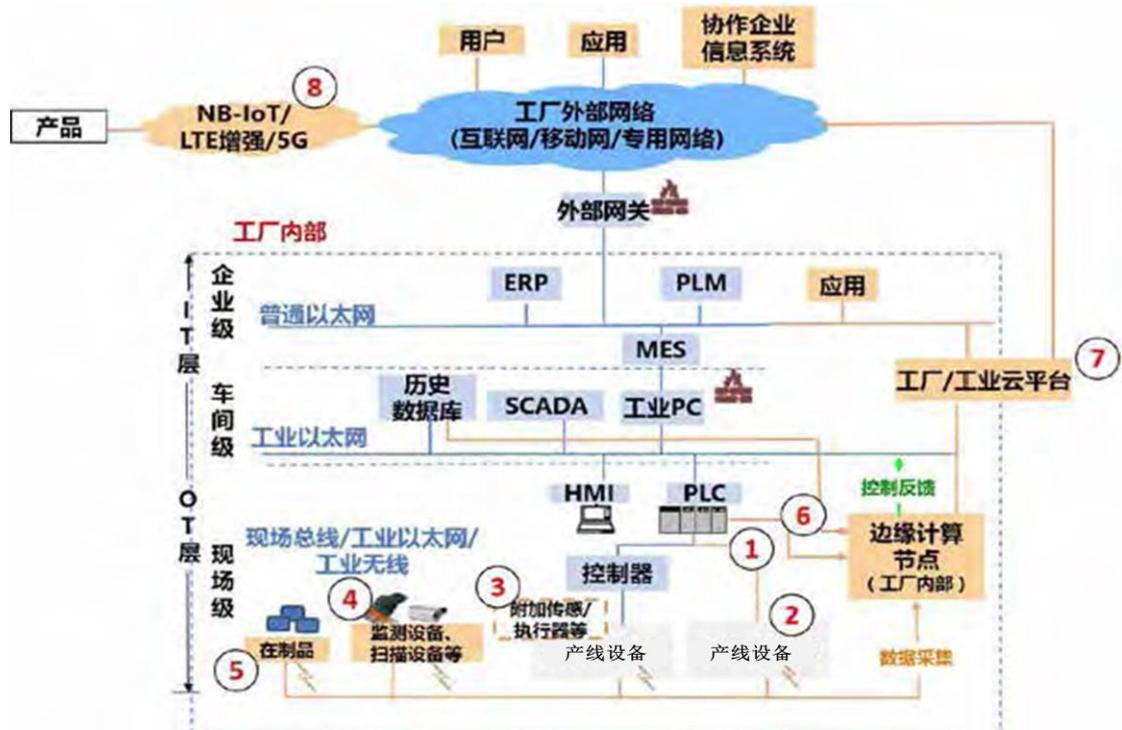


图 5-2-3 网络互联的实施

在现场级和车间级，主要实现底层设备横向互联以及与上层系统纵向互通的连接，宜包括以下内容：

- (1) 对控制器、产线设备的通信方式进行改造，如以工业以太网代替现场总线
- (2) 现有产线设备增加网络接口
- (3) 现有产线设备附加传感器、执行器等增加与外部的信息交互
- (4) 为采集生产现场信息或执行反馈控制，部署新的检测设备、执行器等
- (5) 对物流或物流设备通过内嵌通信模块或附加标签方式，增加与工业系统的信息交互功能
- (6) 部署边缘计算节点，汇聚生产现场数据及工业控制系统实时数据，并进行数据边缘化处理

在工厂企业级或工厂外部：

(7) 注重引入云平台和大数据技术，并通过云平台实现与设备、控制系统、信息系统、工业互联网应用之间的信息交互，

(8) 注重与协作企业信息系统、用户之间的信息交互，为企业不同地域、不同功能的各类系统的横向互联，以及与上层应用、跨企业/跨行业各类主体之间的互联，为价值链协作提供支持。

5.2.1.2 应用支撑的实施

应用支撑的实施主要是解决工业互联网各种数据、服务的集成分析和利用，并为互联网应用提供支撑，其中关键是推动工厂/工业云平台建设，提供数据存储分析处理、应用支撑、开放接口等。工厂/工业云平台的实施可以考虑包含三种方式，如图 5-2-4、5-2-5、5-2-6 所示。

方式一是工厂云平台的实施，即在工厂内部部署云平台，汇聚工厂内部的各种数据，包括来自产线上传各类数据以及来自工厂信息系统和管理系统的数据，根据需要还可以对外互联汇聚来自产品、用户、供应商、协作企业的信息，最终目标是实现对设备、产线、工厂等物理对象以及工艺、流程等的无损数字化映射与描述，在此基础上实现对这些软硬件的服务化组合与调用，同时为工业信息系统提供运行平台环境。



图 5-2-4 方式一：工厂云平台的实施

方式二是工业云平台的实施，工业云平台部署在互联网等公共网络上，可以汇聚来自设计、物流、市场、产品、用户等工业互联网价值链上的数据，目标是实现围绕产品全生命周期、全价值链的全局数据分析和优化，同时工业云平台可以与工厂信息系统交互，使工业云平台可以调用工厂内部数据，工厂内部信息系统也可以调用外部数据。

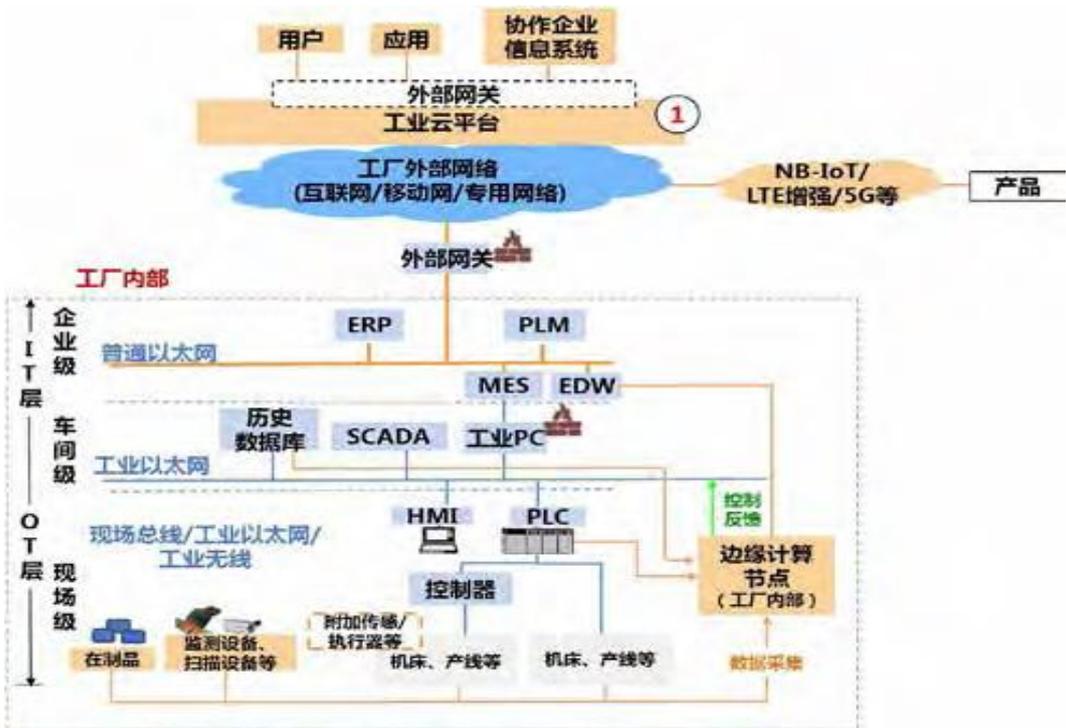


图 5-2-5 方式二：工业云平台的实施

方式三是混合云的实施，即工厂云平台与工业云平台协同部署。企业内部耦合紧密的信息或系统运行在工厂云平台上，而将适宜对外提供的数据、服务或对外交互的系统运行在工业云平台上。

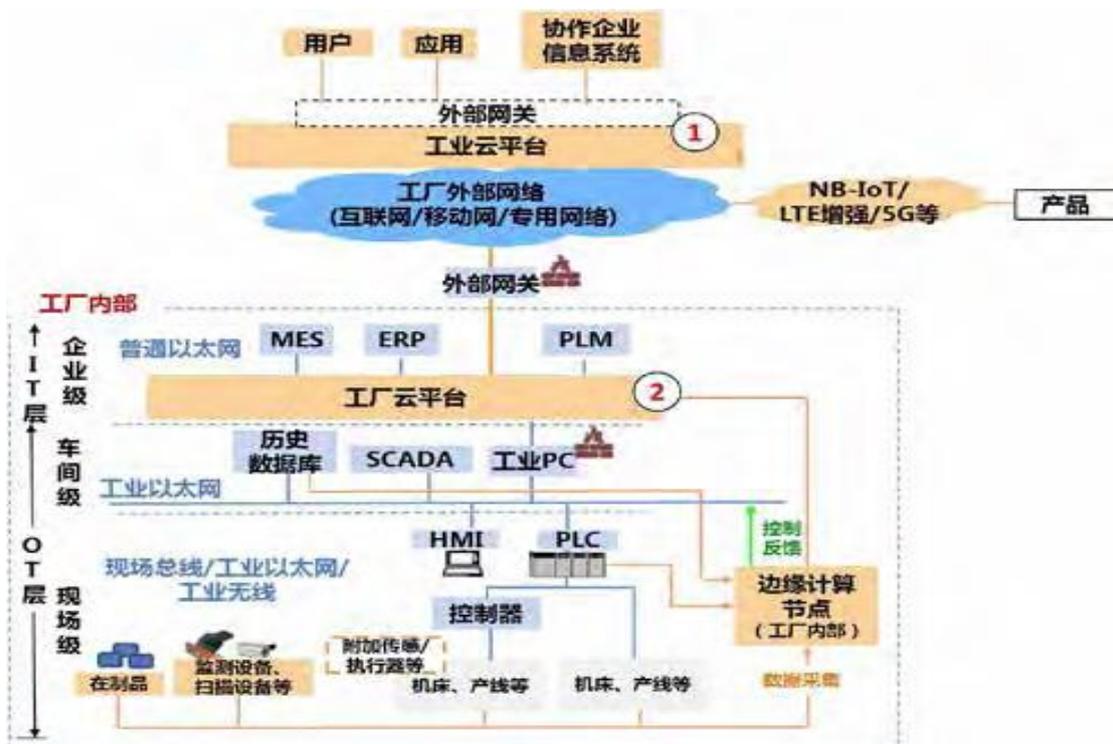


图 5-2-6 方式三：混合云的实施

同时工厂/工业云平台与边缘计算节点之间应相互交互，边缘计算节点根据实时性、安全性等要求，对数据进行本地化处理，同时对过滤后的数据传送到工厂/工业云平台，形成“基于云计算的全局优化”+“基于边缘计算的局部优化”的趋势。

5.2.2 数据中心

工业互联网数据的实施涉及数据全面的采集与流动、工业数据云平台建设，以及多层次数据处理和分析能力构建，在此基础上支撑各种智能应用，同时应注意构建数据反馈闭环，以实现信息系统之间以及信息系统与物理系统之间的相互作用。工业互联网的实施涉及的主要环节如图 5-2-7 所示。

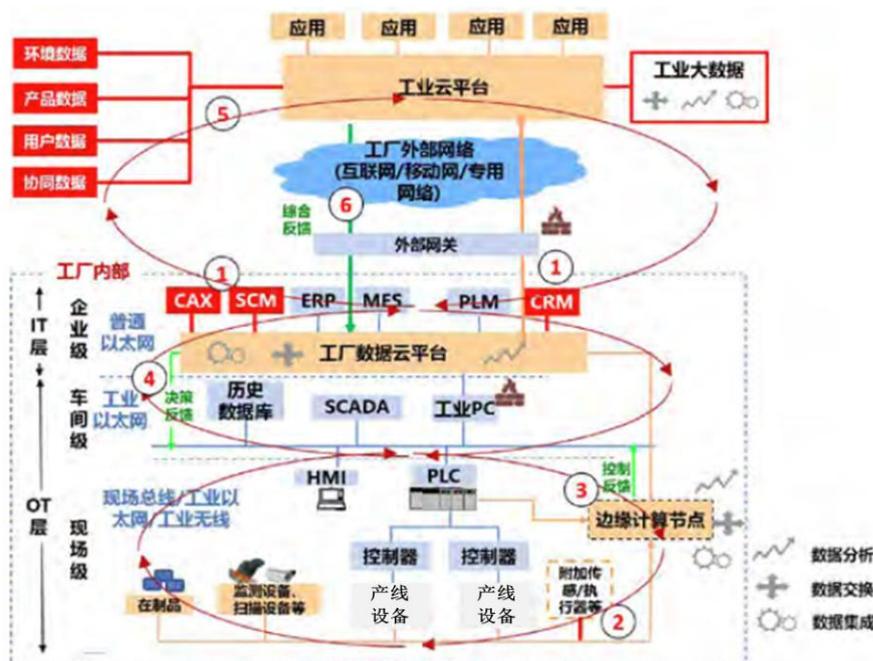


图 5-2-7 工业互联网的实施涉及的主要环节

主要环节应包括：

- (1) 推动工厂管理软件之间的数据流动和信息交互
- (2) 推动全面数据感知采集，包括设备、工序、流程和生产环境信息
- (3) 部署边缘计算节点，实现边缘数据分析处理功能，同时构建边缘数据控制闭环，满足边缘实时控制、数据安全等要求
- (4) 利用云和大数据技术，推动工厂内部数据集成分析，同时构建决策反馈闭环，实现对工业生产的控制以及各种智能决策应用

(5) 通过工业云平台，汇集产品数据、用户数据、环境数据、协作企业数据等，并利用大数据技术、实现海量、复杂数据的综合存储、分析和处理

(6) 构建综合反馈闭环，在工业云平台大数据集成与分析基础上，建立从工业云到企业信息系统的综合性分析反馈闭环，提升工厂内外联动。

目前，围绕工厂数据中心建设，国内外企业开展了研究、探索。以下为几种典型解决方案。

图5-2-8为河钢唐钢工厂数据库解决方案。涵盖了生产过程的实时信息、底层数据的关系匹配与逻辑计算、实时数据按照上层信息系统需求而进行过滤与处理等。在工厂数据库中，不止包括实时数据库，还包括关系型数据库、位置型数据库，在存储内容上涵盖了离散型、连续型，线性、非线性等不同类型的数据库资源。工厂数据库将这些数据按照一定规则整合、串接，形成完整的数据链条，支撑所有三级以上系统进行信息提取与收集。

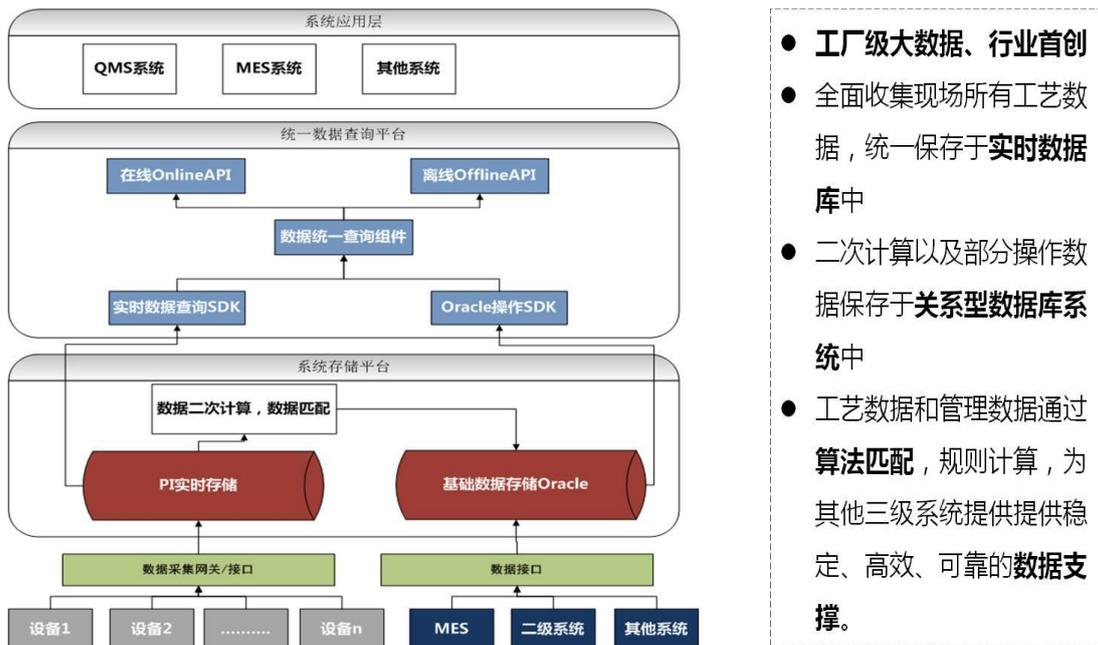


图5-2-8 河钢唐钢工厂数据库

图5-2-9为宝信工业互联网平台方案，主要分成三级架构，第一级是面向工业现场的边缘计算。第二级是部署在云端的大数据平台。第三级是面向企业各种业务的应用系统。宝信工业互联网平台可根据钢铁制造数据特征和业务要求，实现数据存储、传输和获取的标准化。宝钢集团已经基于宝信工业互联网平台，通过现场设备数据的采集和协议转换，实现了企业OT层与IT层的打通，使数据得以在整个制造系统和IT系统之间高效流通。

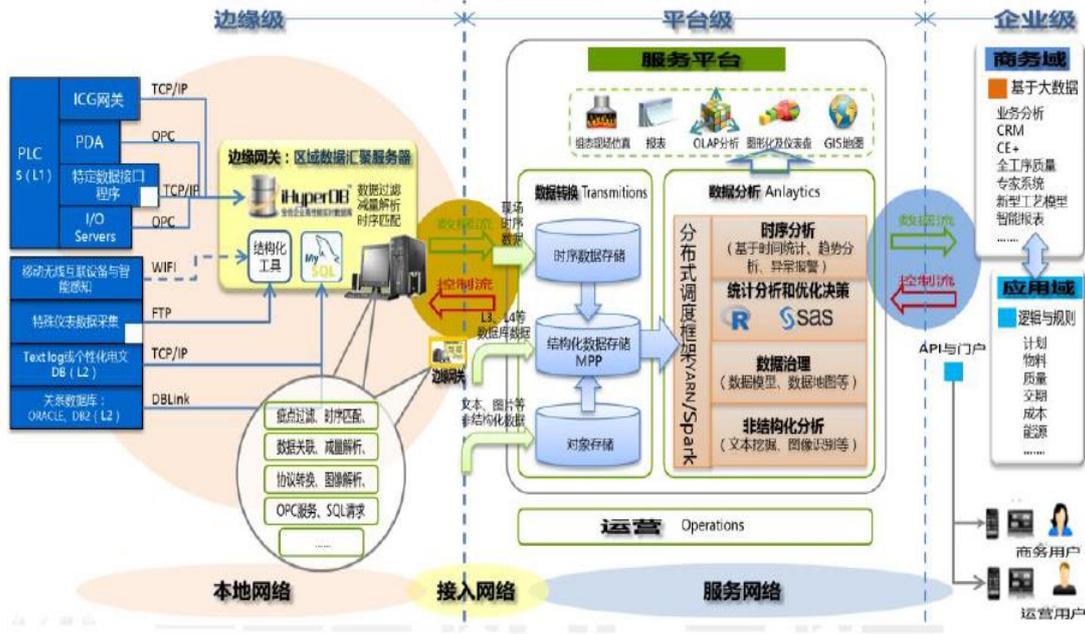


图5-2-9 宝信工业互联网平台方案

图5-2-10为冶金自动化院数据中心解决方案。

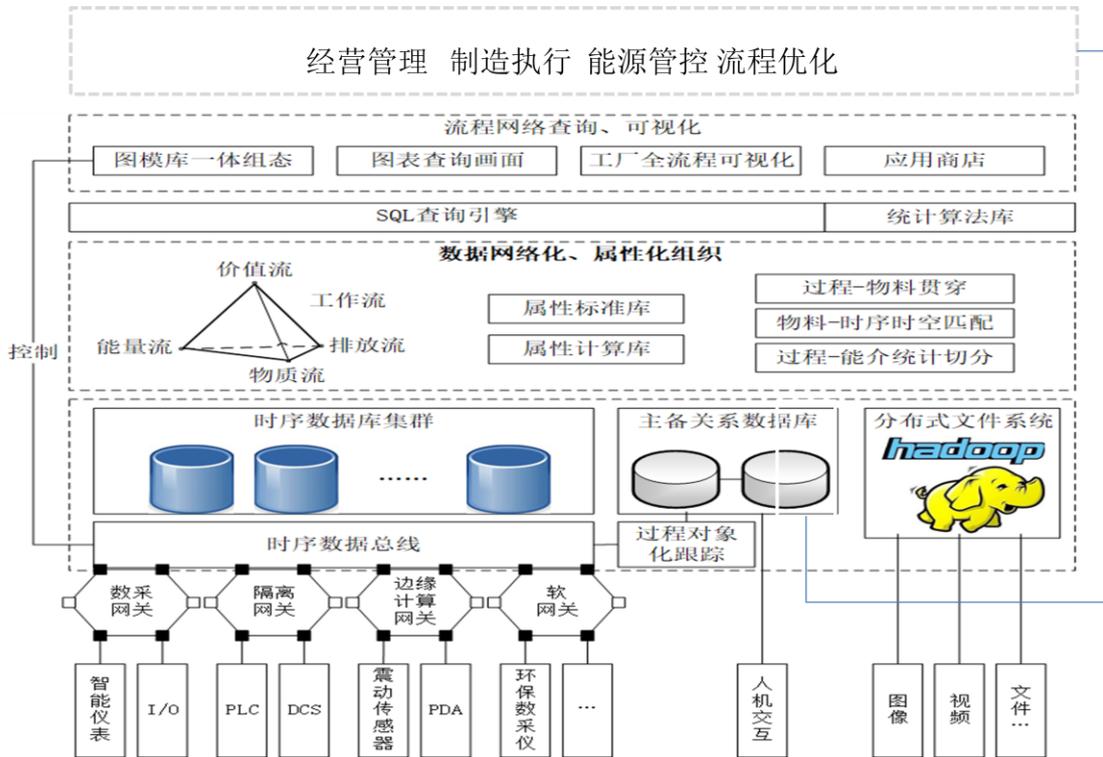


图 5-2-10 冶金自动化院数据中心解决方案

该方案包含由网关构成的数据接入层、集时序业务与非结构数据管理功能为一体的数据库层、网络化属性化的数据语义层、SQL化数据查询引擎、可视化层

等，对物质流、能量流数据进行网络化表征，全面支撑信息化、智能化主要应用功能，实现企业信息化的扁平化、通用化、低时延、高可用、易维护、易扩展。基于此数据平台汇聚、整合生产、能源、设备等数据，实现了沙钢能源精细化管控，取得了显著经济效益。

5.2.3 知识中心

智能制造的知识来源于基于工业机理的模型和规则，以及数据驱动的关联性分析和规律挖掘。上述两种路径的融合可加快工业知识获取、积累，通过各种形式化表达加以沉淀，将汇聚起大量的工业知识，实现知识传承、迭代与复用。

钢铁工业智能制造系统平台层的知识中心为机理建模+数据挖掘学习、知识更新提供了支撑开发平台。知识中心应主要包括以下内容：

- 常规和 AI 算法组件库，支持分析、聚类、特征、预测、优化、控制、决策等常规和 AI 算法。
- 工业知识组件库，钢铁行业的机理知识、机理模型、经验规则、价值判断、边界条件、经验规则等。
- 工业建模平台，支持类型甄别、算法选择、模型建立、测试验证、迭代学习等工业模型开发过程。
- 数据模型与工业知识融合的语义网络。
- 价值判断和行为生成，支持仿真、优化、控制、决策、学习等模块开发。



图 5-2-11 平台层知识中心

如基于工业互联网平台的工业微服务组件/微服务框架、基于 CPS 的多智能体组件构建等，并支持系统快速迭代优化。

(1) 基于工业互联网平台的软件创新、部署和集成方式

在传统 IT 开发模式中，企业按照业务流程开发独立的软件系统，功能和数据分散在不同的软件中，难以协同与集成。在工业互联网开发模式中，平台解构传统工业需求，将其拆分为更具体和细化的功能组件，构建微服务池。开发者根据特定用户需求，调用和组合微服务组件，并固化为 APP。APP 之间基于平台实现快速交互集成，形成按需定制，全面集成的新型开发方式。

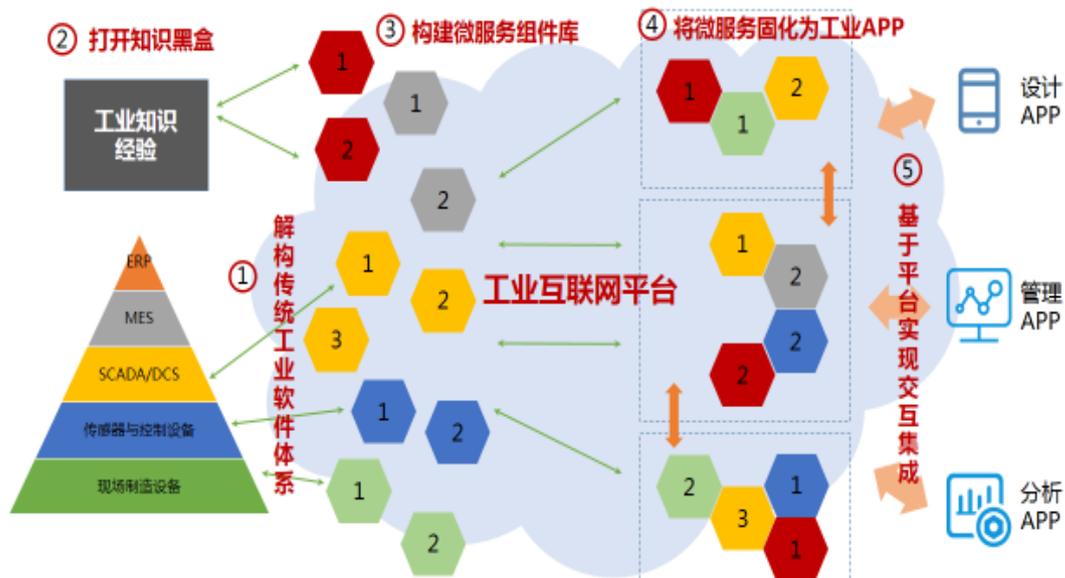


图 5-2-13 工业互联网开发模式

工业互联网平台通过应用新型软件开发架构提升工业应用开发效率，降低开发门槛。如 GE Predix 等平台集成微服务架构，支持多种开发工具和编程语言，通过将工业知识进行模块化封装和复用，加快应用部署速度；ThingWorx 等平台支持图形拖拽开发方式，将应用开发时间从几个月缩短到几周。

(2) 基于 HCPS 的多智能体组件构建

基于 HCPS，对于应用系统按照感知、认知、决策、执行等功能进行解构，然后用智能体进行构建。一个智能体可提供或请求一个特定的服务。自主智能体之间可以独立地相互联系，也可以与其它智能体彼此相互合作。在多智能体系统中 (MAS) 引入经纪人 (broker) 机制。经纪人起着协同、居间调节的作用，管理智能体和它们的技术 (服务)。每个智能体都在经纪人那里登记，宣布它可以

提供的服务。对应地，当一个智能体需要特定的服务时，它也联系这个经纪人，请经纪人给出能提供这一特定服务的智能体。

当智能体形成一组（group）以解决某一问题时，这组智能体叫做智能体结合体，如果智能体结合体是解决这一问题的唯一可能的用例时，结合体就变成了子整体（holon），功能智能体的集合组成了功能子整体（functional holon）。此外，为了解决多智能体中交互或谈判活动，如生产计划的订单组合和产线分配，在多智能体框架（MAS framework）中引入市场（market place）的概念。

图 5-2-14 为 I²MSteel 提供的智能体实现方式，智能化系统各功能模块由多智能体组件构建。在 I²MSteel 基本架构中，运行的解决方案具有通用的特质，即开发的智能体中的定义的算法可以独立于真实工厂布局配置，而工厂布局配置信息存储在本体(ontology)中，通过 SMW(semantic media wiki)管理。与过程数据库的连接通过 SOA，实现统一的工厂 IT 信息存取。

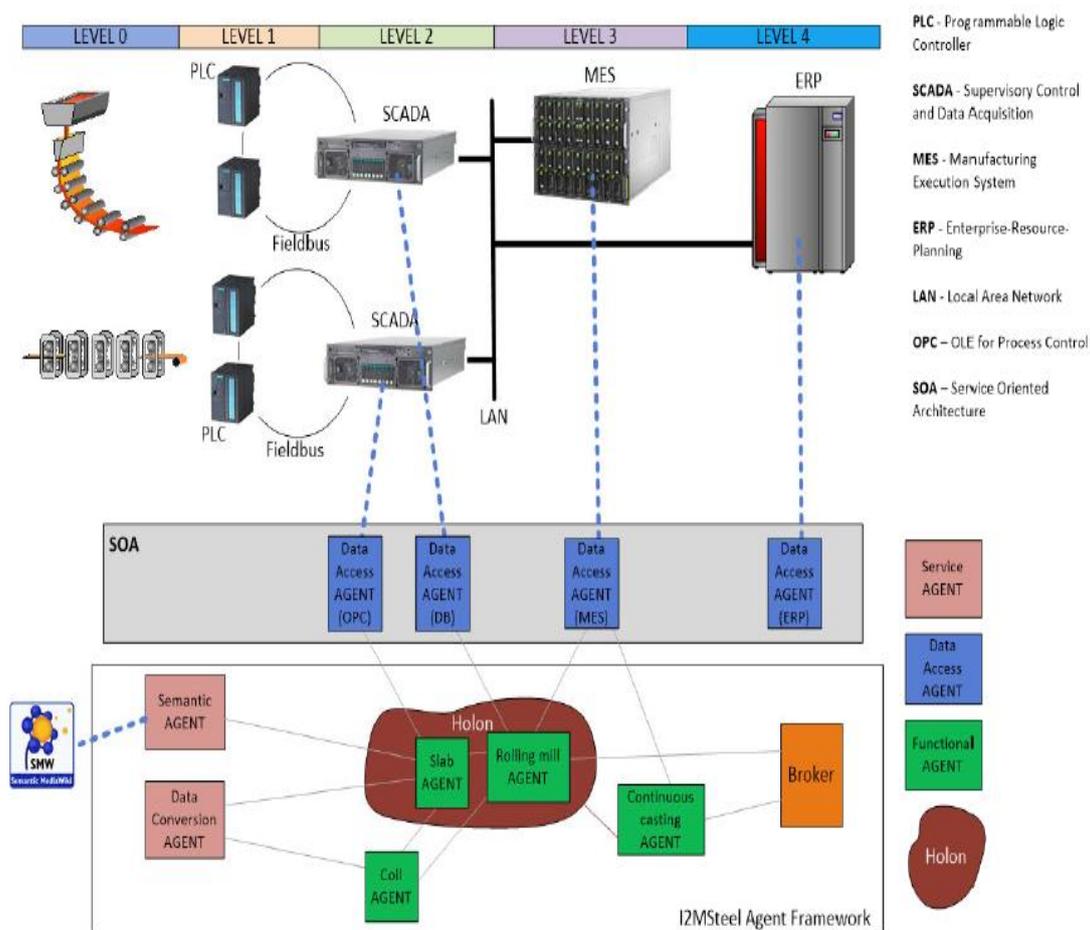


图 5-2-14 I²MSteel 基本架构

(3) 系统快速迭代优化

钢铁工业智能制造系统实现包括开发过程和运行过程，不同于一般的自动化、信息化系统，需要通过开发过程和运行过程不断交互，实现快速迭代学习，持续改进优化，建设学习型钢铁企业。钢铁智能系统实现大致可分为4个阶段，数据汇集、机理+数据挖掘学习、知识更新，以及软件开发和部署运行。

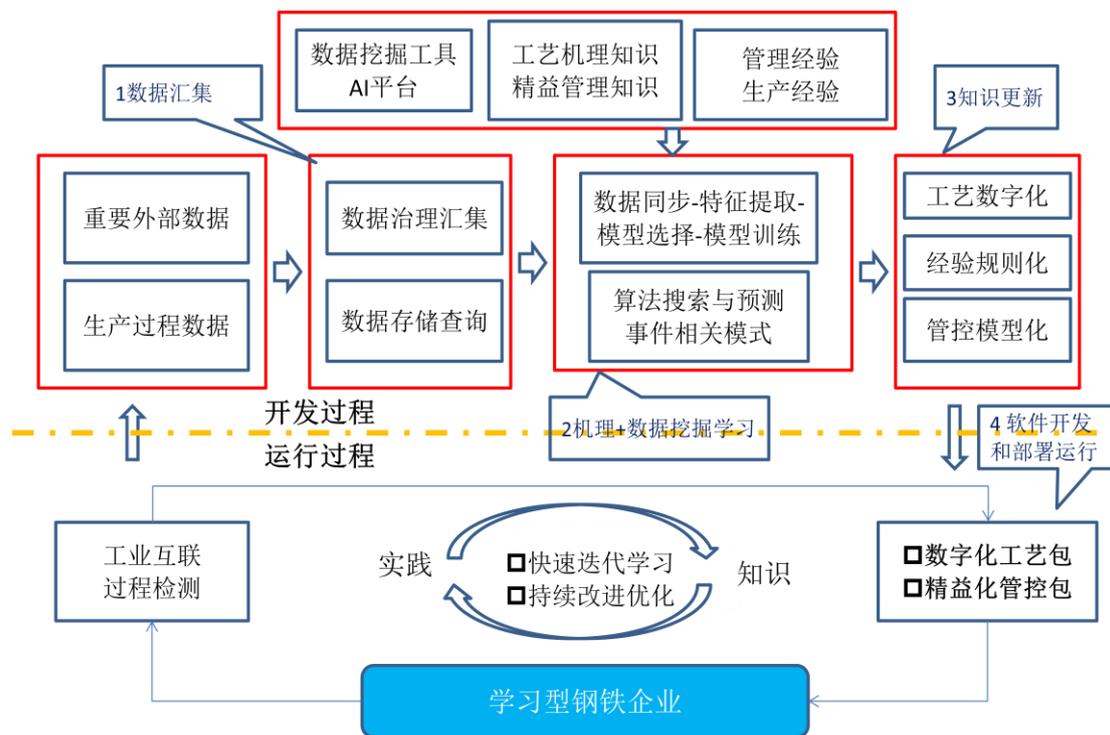


图 5-2-18 钢铁智能系统迭代优化实现过程

5.3 迁移路径

目前智能制造的浪潮来势很快，各企业管理者提出了很高的要求和期望，各钢铁企业在策划和实施智能制造项目时既需要充分考虑业务驱动，更需要与内外部熟悉控制、计算机系统、行业特征的专业建模的公司和高校结合，以取得事半功倍的效果，避免失误和一哄而上。

首先，将现有企业信息化系统的五级架构按照业务功能映射为工序级HCPS、产线HCPS和企业级HCPS。其中，工序级HCPS对应自动化L0、L1和L2级，产线HCPS对应信息化L3级以及部分L4级，企业级HCPS对应信息化L5级以及部分L4级。

然后，在此基础上进行集成、协同、优化，进行钢铁工业智能制造系统设计

和开发。如图5-3-1所示，物理系统对应产线级HCPS的物理实体，信息系统对应产线级HCPS的执行系统和企业级HCPS的经营系统。数据中心是工序级HCPS、产线级HCPS和企业级HCPS数据中心的集成。数字孪生是工序级HCPS过程模型、产线级HCPS流程仿真和企业级HCPS市场模拟的集成。人机交互是各类人员发挥主观能动性的主要形式，人员包括工序级HCPS操作人员、产线级HCPS生产指挥人员和企业级HCPS经营管理人员。

最终，现有企业信息系统五级架构中的自动化L0、L1、L2级和部分L3级映射为物理系统。管理的功能与未来钢铁工业智能制造系统的信息系统对应，现有企业信息系统五级架构中的L3、L4、L5级通过横向集成、纵向集成映射为信息系统。类似地，现有分散在五级架构的各种数据库通过整合、汇聚、关联映射为数据中心；现有分散在五级架构的各种模型、规则、规程、规范通过补充、完善，形成物理数字孪生、控制数字孪生、管理数字孪生，最后通过数字化、规范化、体系化映射为数字孪生。操作人员、生产指挥人员和经营管理人员的人机交互映射为人机交互。

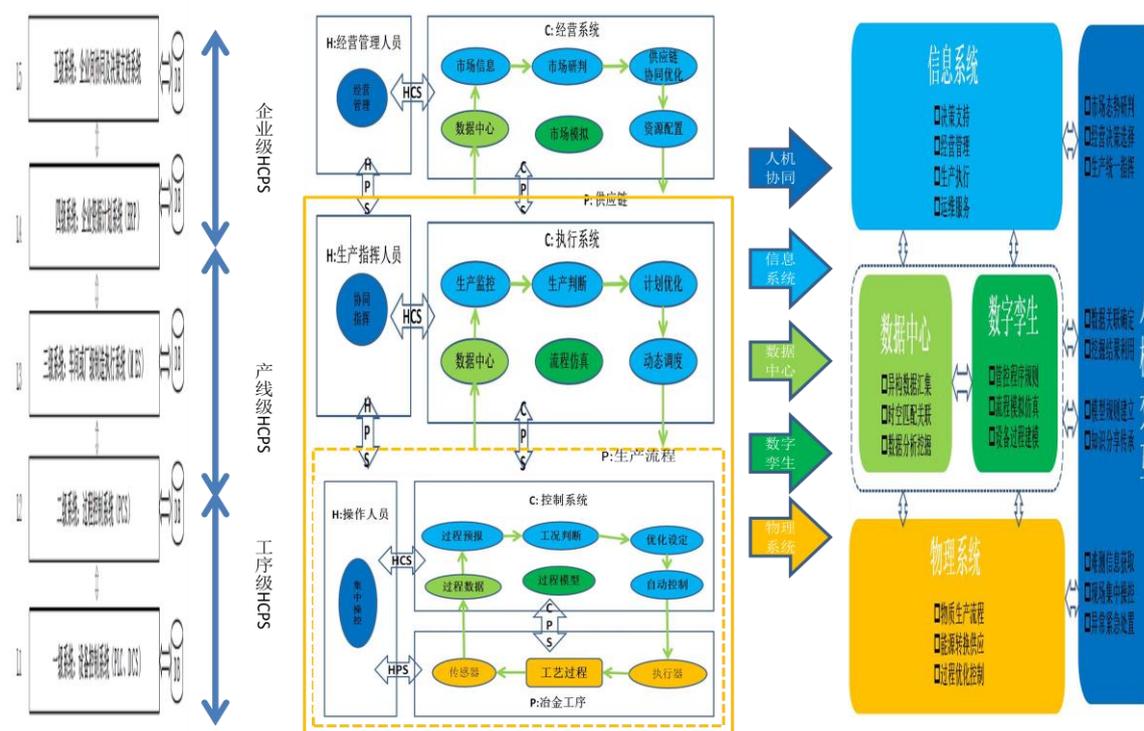


图5-3-1 现有5级企业管控系统向智能制造系统的迁移路径

在5.2节介绍了钢铁工业智能系统的技术架构实现，其中工业互联网实现、

数据中心、知识中心、软件开发等内容同样适用于钢铁企业现有系统向智能系统的迁移。此处，主要强调迁移实现过程中物理系统完善补充、信息系统集成优化、数据中心关联重构和数字孪生（知识中心）建设等问题。

（1）物理系统完善补充

现有钢铁企业向未来钢铁工业智能制造系统迁移，对现有物理系统应完善补充的主要内容：

- 关键工艺变量的在线连续检测、监控和预测，提高流程全面感知能力；
- 各工序工艺模型补充、完善和持续优化，实现工序过程的闭环优化控制；
- 机器视觉、工业机器人、集中监控等技术应用，提升精准执行和劳动生产率；
- 不同工序界面优化技术，包括铁钢界面、炼钢内部界面、铸轧界面协同，支撑全流程动态有序、紧凑运行；
- 建议上述功能部署在边缘计算节点，在实现这些功能的同时，为现场数据采集、汇集创造条件。

（2）信息系统集成优化

现有钢铁企业向未来钢铁工业智能制造系统迁移，对现有信息系统应完善补充的主要内容：

- 加强信息系统横向集成优化，例如供应链全局优化、全流程物流跟踪、全流程质量追溯、多工序一体化计划调度、物质流能源流协同等；
- 加强信息系统纵向集成优化，形成各要素管控闭环，例如质量设计-过程SPC-工序产出在线判定-质量动态设计闭环，产销转换-生产计划-作业计划-动态调度-过程控制闭环，能源计划-动态平衡-实时优化闭环；
- 建议上述功能采用新型软件开发模式，对原有系统进行多智能体封装，为智能化功能扩展和新架构过渡创造条件。

（3）数据中心重构

现有钢铁企业向未来钢铁工业智能制造系统迁移，对数据中心重构应考虑以下内容：

- 加强5.2.1.1节“网络互联的实施”8个环节网络互联工作。解决工业互联网各种设备、系统之间互联互通的问题，为数据汇集创造条件。
- 按照物质流、能量流对汇集数据进行时空匹配，为信息系统集成优化提供

支撑。

钢铁工业大数据应用要平衡好“路”（大数据系统）、“车”（具体应用）和“驾驶员”（工程师）的协调发展，并且在认识上和客观上把数据看成工具或者说新的“兵器”之一。大数据的应用务必重视与机理原理、与领域专家经验的结合，利用一切可以利用的知识和信息，真正提高企业在效率成本方面的竞争力。就数据工程师人才来看，考虑到绝大部分大数据应用与业务相关度较高，钢铁企业应该以培养自己的人才为主。

建议大数据应用优先在信息层面开展，选择必要性强、成功率较高领域开展，如：上下游供应链协同优化、全流程质量质量分析与监管、行业工序级或专用设备诊断、缺陷图像数据处理与分类、基于大数据的能源整体调度优化、基于制造大数据的智能采购、基于市场与制造大数据的预测式制造系统、基于大数据的销售决策支持、成本大数据的应用、工序间数据建模与决策、钢铁电商大数据分析等。在控制层面，从行业或者企业集团的角度看，工业数据应用应该结合多专业和专业公司的力量，先研制出有效的专有系统，再铺开应用较为合理。

（4）数字孪生（知识中心）建设

现有钢铁企业向未来钢铁工业智能制造系统迁移，数字孪生（知识中心）建设应注意：

—重视质量标准、工艺制度、操作规程、管控规则的数字化工作，为知识中心建设提供素材；

—有机融合工业机理和数据挖掘，加强设备、工序、流程模型化、形式化表征，逐步形成对应的设备数字孪生、控制数字孪生、管理数字孪生，不断充实数字孪生（知识中心）内涵；

—建立知识体系化管理和迭代优化机制，支撑企业知识的获取、积累、传承、完善与复用。

（5）人机交互建设

考虑到人和机器在决策活动中的不同特征及其特点，结合不同决策任务的性质，从解决决策问题的技术角度，人机交互具有3种模式：人主机辅、人机共商、机主人辅。

人主机辅。通常用来解决经营管理战略决策。这类决策问题最大特点就是影响因素具有不确定性和不可量化。因此，制定这类决策方案，需要以专家为

主，专家在计算机系统的辅助下，提出决策问题，明确决策目标和问题的范围，参考决策分析过程模型，拟订该决策问题的求解技术路线，分解决策问题，在系统的支持下提出决策问题的解决方案。在这类决策智能系统中，计算机辅助系统是面向用户设计的，在决策过程中为用户提供所需要的功能服务，而不是面向问题求解。

人机共商。主要用于解决生产执行过程中的指挥决策。这类决策涉及的因素较多，存在一定的不确定性，主要是由未来环境因素的不确定性引起的。人们对这类问题有了较深入的研究，形成了相应的理论和方法，有一套科学的决策程序。但是，在一些重要的步骤上，需要人的参与，需要机器的协助。这类决策问题中，人和机器之间既需要分工，又需要合作。这需要在开始阶段进行人机决策任务分配，将适合于机器做的任务交给机器，将适合于人完成的任务交给人去做，两者在决策中取长补短。

机主人辅。主要适用于工序过程操控决策。工序过程操控特点是涉及外界因素少，确定性因素多，解决问题的流程比较固定，结构化的成分多。操控人员只是在问题比较复杂情况下，参与问题的求解，以减少问题的复杂度，或者在系统决策过程中出现问题时，帮助系统做出适当的选择。

附件一 国内外智能制造体系架构研究概况

国内外在智能制造体系架构方面开展了深入系统的研究工作，取得了富有成效的研究成果。

在智能制造体系架构维度方面，德国提出了工业4.0参考架构模型RAMI 4.0、国家工信部和国标委提出了智能制造系统架构IMSAs、日本工业价值链促进会提出了工业价值链参考架构IVRA，中国工程院提出了数字化、网络化、智能化递进的新一代智能制造系统架构HCPS2.0。

在智能制造CPS架构方面，殷瑞钰院士提出了物质流、能量流、信息流三网协同优化的系统架构；柴天佑院士提出了优化决策和自主控制二层流程企业智能优化制造架构；A. M. Meystel和J. S. Albus等提出了NIST-RCS递阶智能控制体系结构；中国信息物理系统发展论坛发布了《信息物理系统白皮书（2017）》，河钢集团和东北大学提出了工厂数据中心、物理系统、虚拟系统和信息系统四大部分组成的系统架构。

在智能制造IT实现架构方面，美国工业互联网联盟IIC提出了工业互联网参考体系结构；中国工业互联网产业联盟AII提出了工业互联网体系架构（1.0版）、工业互联网平台体系架构；欧盟I2M提出了钢铁集成智能制造技术架构。

以下为部分政府和机构研究报告简介。

1.1 工业 4.0 参考架构模型 RAMI 4.0

德国工业4.0 在德国工程院、弗劳恩霍夫协会等德国学术界和产业界的建议和推动下形成,由德国联邦教研部与联邦经济和能源部联手支持,在2013 年4 月的汉诺威工业博览会上正式推出并逐步上升为国家战略。其目的是为了提高德国工业的竞争力，在新一轮工业革命中占领先机。2015年3月，德国正式提出了工业4.0的参考架构模型（RAMI4.0: Reference Architecture Model Industrie 4.0）。从产品生命周期/价值链、层级和架构等级三个维度，分别对工业4.0进行多角度描述的一个框架模型。

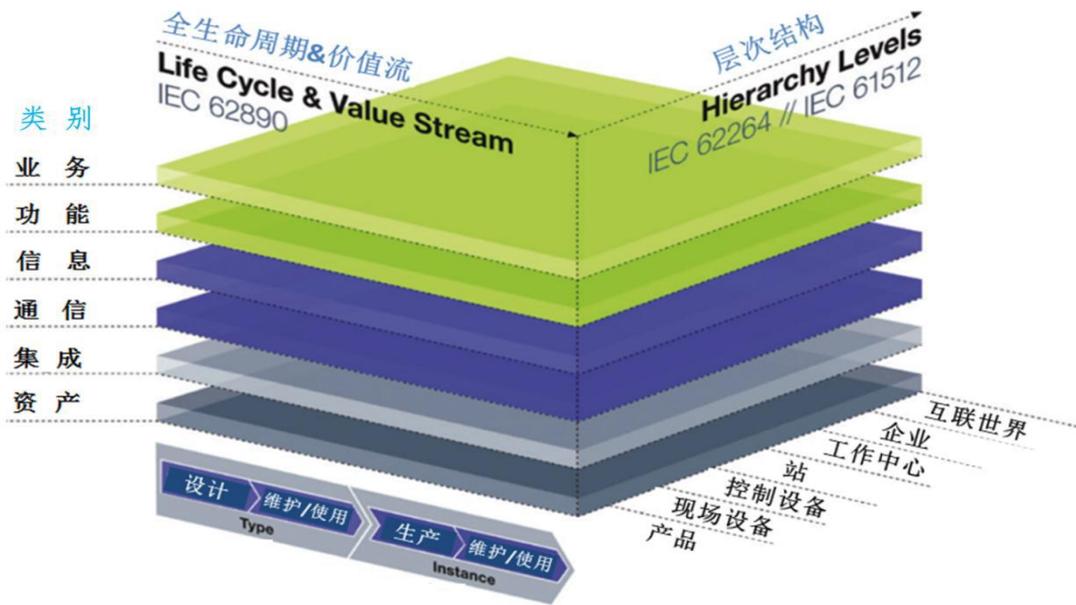


图 1-1-1 德国 RAMI4.0 的三个维度

第一个维度(Layers)是信息物理系统的核心功能，以各层级的功能来进行体现。具体来看，资产层是指机器、设备、零部件及人等生产环节的每个单元；集成层是指对一些传感器和控制实体等；通信层是指的是专业的网络架构等；信息层是指对数据的处理与分析过程；功能层是企业运营管理的集成化平台；商业业务层是指各类商业模式、业务流程、任务下发等，体现的是制造企业的各类业务活动。



图 1-1-2 RAMI 功能维度

RAMI4.0 的第二个维度是递阶层次(Hierarchy Levels), 是在 IEC 62264 企业系统层级架构的标准基础之上(该标准是基于 ISA-95 模型, 界定了企业控制系统、管理系统等各层级的集成化标准), 补充了产品(product)的内容, 并由个体工厂拓展至“互联世界(connected world)”, 从而体现工业 4.0 针对产品服务和企业协同的要求。

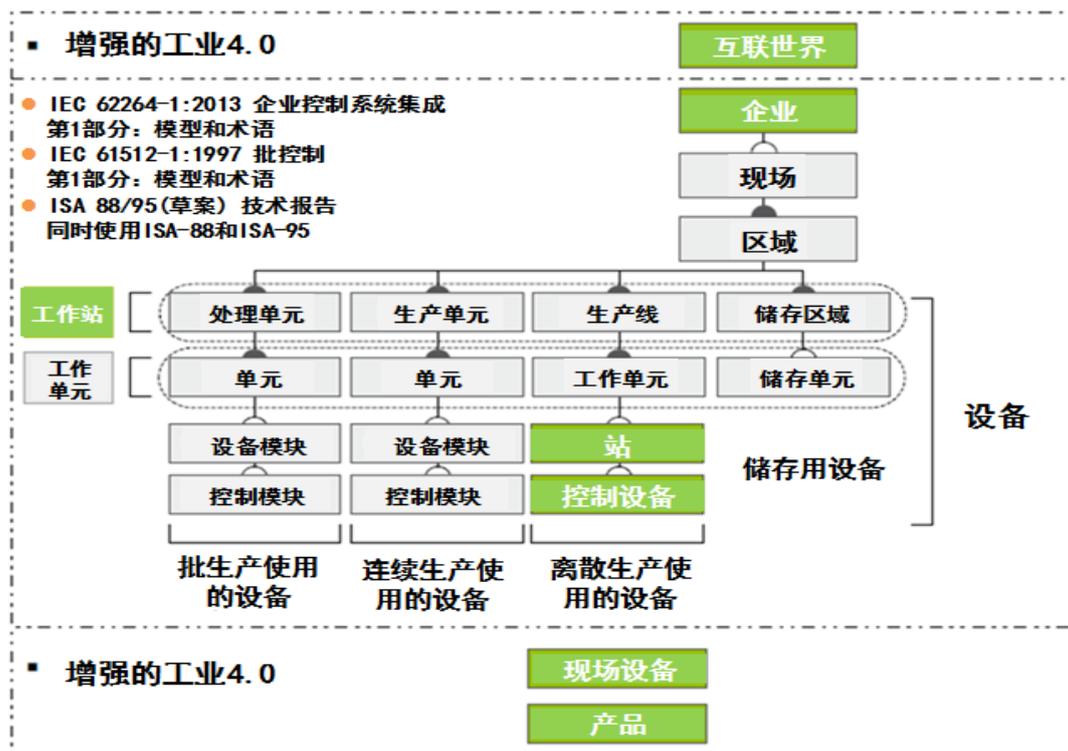


图 1-1-3 RAMI4.0 的递阶层次维度(Hierarchy Levels)

第三个维度是生命周期和价值链(Life Cycle & Value Stream)。基于 IEC 62890 生命周期管理标准, 描述了以零部件、机器和工厂为典型代表的工业要素从虚拟原型 (type) 到实物(instance)的全过程。具体体现为三个方面: 一是, 将其划分为模拟原型和实物制造两个阶段。二是突出零部件、机器和工厂等各类工业生产部分都要有虚拟和现实两个过程, 体现了全要素“数字孪生”特征。三是在价值链构建过程中, 工业生产要素之间依托数字系统紧密联系, 实现工业生产环节的链接。

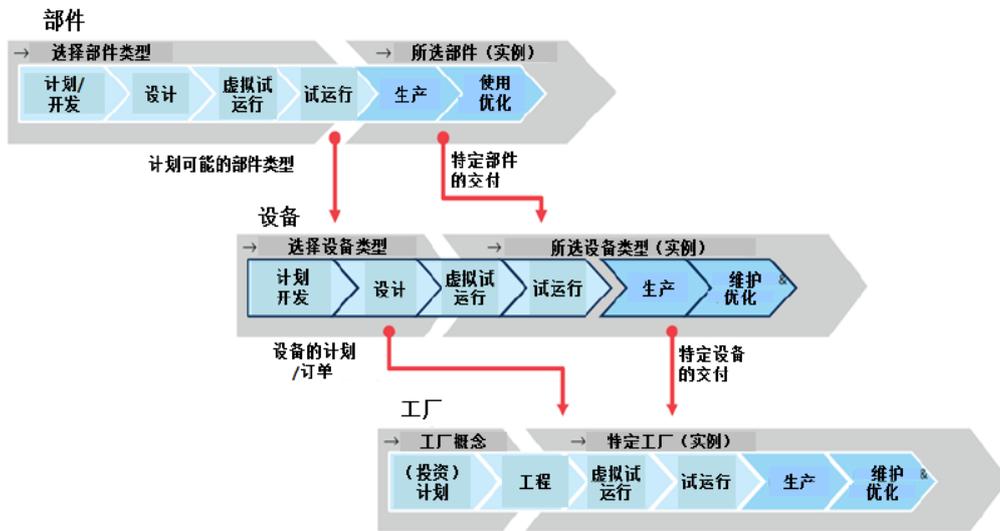


图 1-1-4 不同对象的全生命周期及相互关系

目前公布的 RAMI4.0 已经覆盖有关工业网络通信、信息数据、价值链、企业分层等领域。对现有标准的采用将有助于提升参考架构的通用性，从而能够更广泛地指导不同行业企业开展工业 4.0 实践。

1.2 中国智能制造系统架构（2018 年版）

智能制造是落实我国制造强国战略的重要举措，也是中国制造 2025 的主攻方向。加快推进智能制造，是加速我国工业化和信息化深度融合、推动制造业供给侧结构性改革的重要举措，对重塑我国制造业竞争新优势具有重要意义。根据《中国制造 2025》的战略部署，工业和信息化部、国家标准化管理委员会在 2015 年共同组织制定了《国家智能制造标准体系建设指南（2015 年版）》、《国家智能制造标准体系建设指南（2018 年版）》。

建设指南中给出了智能制造系统架构，从生命周期、系统层级和智能特征三个维度对智能制造所涉及的活动、装备、特征等内容进行描述。

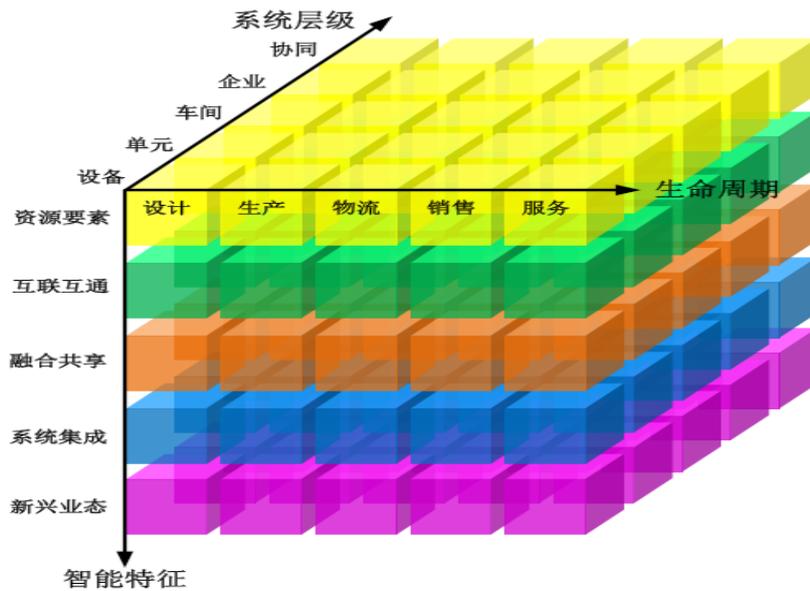


图1-2-1 中国智能制造系统架构

第一个维度为生命周期。生命周期是指从产品原型研发开始到产品回收再制造的各个阶段，包括设计、生产、物流、销售、服务等一系列相互联系的价值创造活动。生命周期的各项活动可进行迭代优化，具有可持续性发展等特点，不同行业的生命周期构成不尽相同。（1）设计是指根据企业的所有约束条件以及所选择的技术来对需求进行构造、仿真、验证、优化等研发活动过程；（2）生产是指通过劳动创造所需要的物质资料的过程；（3）物流是指物品从供应地向接收地的实体流动过程；（4）销售是指产品或商品等从企业转移到客户手中的经营活动；（5）服务是指提供者与客户接触过程中所产生的一系列活动的过程及其结果，包括回收等。

第二个维度系统层级。系统层级是指与企业生产活动相关的组织结构的层级划分，包括设备层、单元层、车间层、企业层和协同层。（1）设备层是指企业利用传感器、仪器仪表、机器、装置等，实现实际物理流程并感知和操控物理流程的层级；（2）单元层是指用于工厂内处理信息、实现监测和控制物理流程的层级；（3）车间层是实现面向工厂或车间的生产管理的层级；（4）企业层是实现面向企业经营管理的层级；（5）协同层是企业实现其内部和外部信息互联和共享过程的层级。

第三个维度智能特征。智能特征是指基于新一代信息通信技术使制造活动具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等一个或多个功能的层级划分，包

括资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态等五层智能化要求。(1) 资源要素是指企业对生产时所需要使用的资源或工具进行数字化过程的层级；(2) 互联互通是指通过有线、无线等通信技术，实现装备之间、装备与控制系统之间，企业之间相互连接功能的层级；(3) 融合共享是指在互联互通的基础上，利用云计算、大数据等新一代信息通信技术，在保障信息安全的前提下，实现信息协同共享的层级；(4) 系统集成是指企业实现智能装备到智能生产单元、智能生产线、数字化车间、智能工厂，乃至智能制造系统集成过程的层级；(5) 新兴业态是企业为形成新型产业形态进行企业间价值链整合的层级。

智能制造的关键是实现贯穿企业设备层、单元层、车间层、工厂层、协同层不同层面的纵向集成，跨资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态不同级别的横向集成，以及覆盖设计、生产、物流、销售、服务的端到端集成。

1.3 日本工业价值链参考架构（IVRA）

日本工业价值链促进会（Industrial Value Chain Initiative, IVI）2016年12月，IVI基于日本制造业的现有基础，推出了智能工厂的基本架构“工业价值链参考架构（Industrial Value Chain Reference Architecture, IVRA）”。

IVRA提出了一种可互联的智能制造单元（Smart Manufacturing Unit, SMU）作为描述制造活动的基本组件，并从资产、活动、管理的角度对其进行了详细的定义。

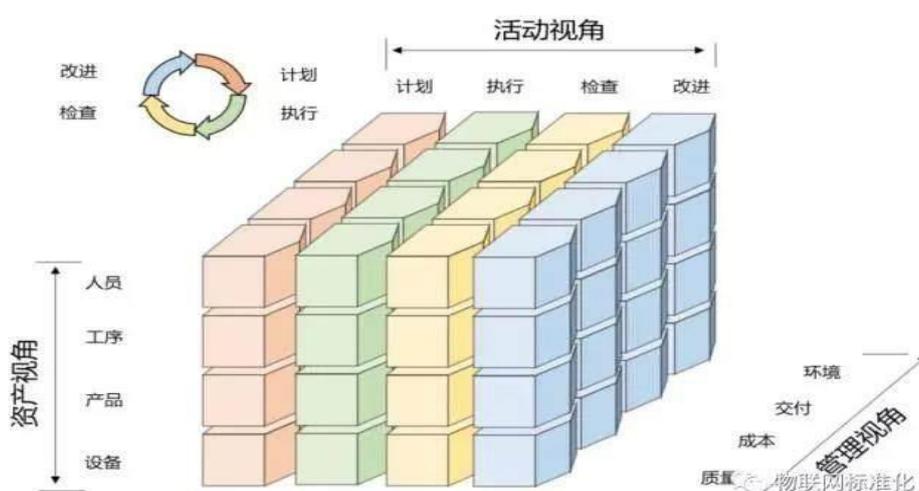


图 1-3-1 智能制造单元的三个视角

从工程知识流、供应需求流和层次结构三个方面构建了通用功能模块（General Function Blocks, GFB），借助通用功能模块展现制造价值链。通过多个 SMU 的组合，不仅可以全方位地展现制造业产业链和工程链情况，也可以根据需要体现企业的单项优势。

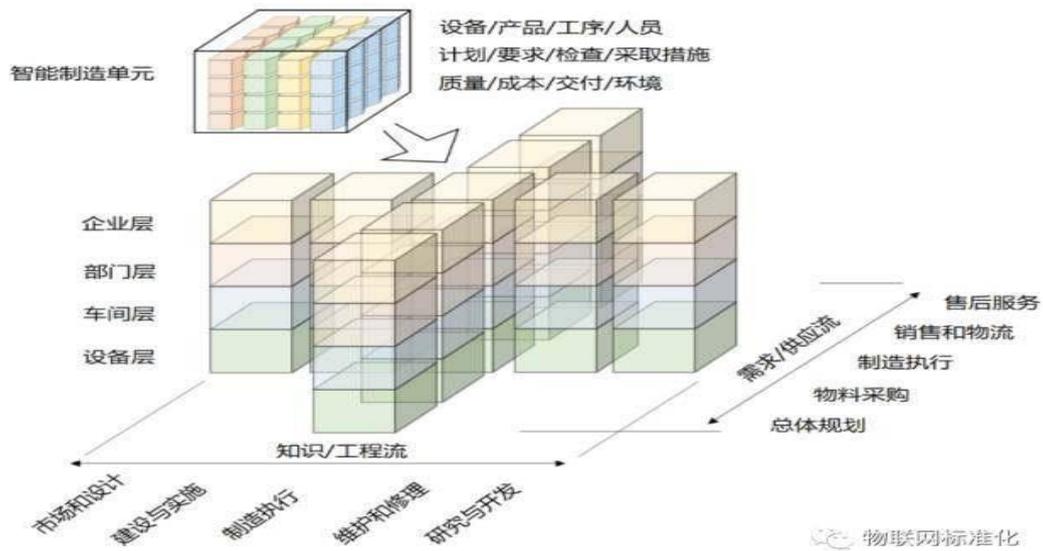


图 1-3-2 智能制造通用功能模块（GFB）

SMU 之间的可靠的价值转移媒介，采用便携装载单元（Portable Loading Unit, PLU），在保证安全和可追溯的条件下，实现了不同 SMU 之间资产的转移，模拟了制造活动中物料、数据等有价资产的转化过程，从而真实地反映了企业内和企业间的价值转换情况，充分体现了价值链的思想。

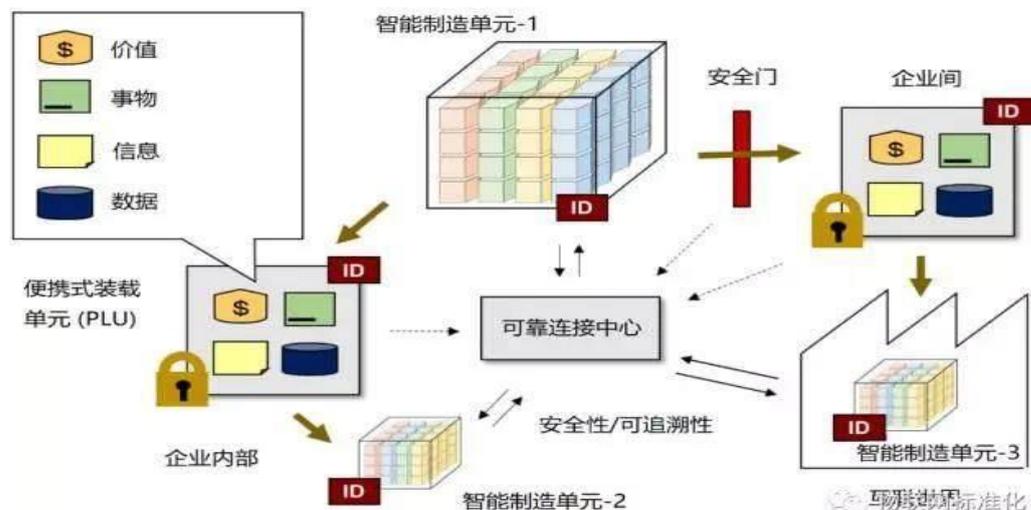


图 1-3-3 便携装载单元（Portable Loading Unit, PLU）

工业价值链参考架构嵌入了“日本制造业”特有的价值导向，借鉴了精益制造、KAIZEN（持续改善）的经营思想等：

(1) SMU 的建模方法，融入管理思想，突出价值属性，不是单纯地将智能制造技术对应至模型中，而是更多地融入了先进的管理思想（例如 PDCA 等），突出了 SMU 的资产价值属性，体现了伴随制造过程的价值变化。同时，兼顾制造的过程与结果，明确了人员在制造体系中的重要作用，坚持人员是制造过程中的关键因素，所构建的信息物理平台中，不仅能够实现物理设备和信息数据的实时有效关联，而且将人视为信息和物理世界映射过程中的重要元素，充分考虑了人在制造活动中的地位和作用，使“人员”有机参与到“制造活动”中，从而更贴切地描述具体工业场景。

(2) 在 GFB 的建模过程中，突出专家知识库的重要意义，将工程/知识流作为一个单独维度论述，其中包括了市场营销和设计、建设与实施、制造执行、维护和修理、研究与开发过程中积累的专业知识和经验，突出了专家知识库对制造过程的重要影响。

1.4 NIST-RCS 智能控制体系结构

美国 A. M. Meystel 和 J. S. Albus 等人提出了实时控制系统(RCS)，进而形成了美国国家标准和技术研究院的智能控制系统设计参考结构 NIST-RCS 版本，在此基础上，搭建了制造业的智能系统结构 ISAM (Intelligent System Architecture for Manufacturing)。

(1) 工业智能控制系统设计参考结构

任何智能系统都由两部分组成：内部的或计算的，以及外部的或应用实现的界面。内部的部分可以分解为四个智能的内部部件（子系统）：感知处理 SP(Sensory Processing)、环境模型 WM(World Model)、行为生成 BG(Behavior Generation)和判值 VJ(Value Judgement)。外部的部分到智能系统内部部分的输入和从智能系统内部来的输出，都由被认为是外部部分的传感器 S(Sensors)和执行器 A(Actuators)实现。组成智能系统的各部分功能关系和信息流如图所示。系统内的节点和计算模块之间由通信系统相互连接。

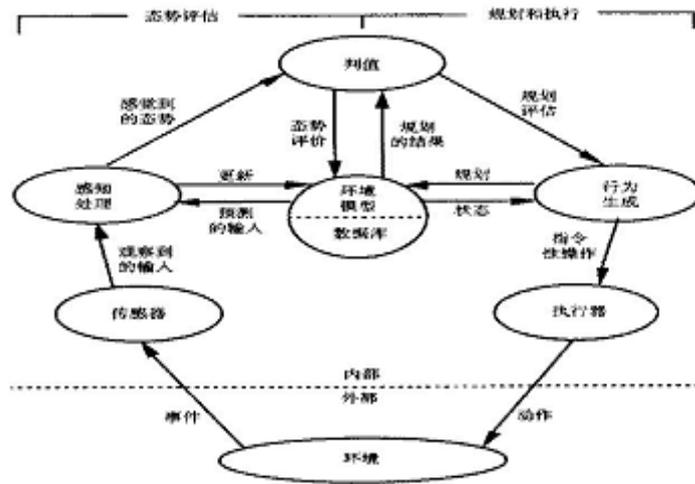


图 1-4-1 NIST-RCS 内部结构

- **感知处理。**感知发生在一个感知处理系统的元件中，该元件将传感器的观测内部环境模型所产生的期望进行比较。感知处理算法在时间和空间上整合观测和期望之间的异同，以便检测事件并识别环境中的特征、对象和关系。来自种类繁多的传感器且在持续的时间周期中的感知输入数据，融合成一个对环境状态相容的统一的感知。感知处理相当于生物感知子系统。
- **环境模型。**环境模型是智能系统对环境状态的最好估计。环境模型包括一个关于环境的知识库和一个存储与检索信息的数据库管理系统。环境模型具有仿真能力，产生期望和预测。环境模型对有关环境状态的目前、过去和将来的信息请求提供答复。为了做出智能规划和行为选择，环境模型给行为生成系统单元提供信息服务。它给感知处理系统单元提供信息，以实现相关性分析、模型匹配以及基于模型的状态、对象和事件的辨识。它给判值系统单元提供信息，以计算诸如费用、利益、风险、不确定、重要性和吸引性的值。环境模型由感知处理系统单元维持更新。
- **判值。**判值系统决定优与劣、奖与惩、重要和琐碎、确定和不可能。判值系统评估观测到的环境状态和所假定的规划预测结果；计算观测到的情况和所规划的活动费用、风险和利益；计算正确性概率和分配的可信度以及状态变量的不确定性参数。它还对象、事件、空间区域和其他生物等分配吸引度或排斥度。判值系统为决策或选择一个动作代替另一个动作提供基础。
- **行为生成。**由行为生成系统产生的行为结果是选择目标和规划，并执行任务。

任务被回归分解为子任务，子任务被排序以实现目标。目标选择和规划产生是由行为生成、环境建模和判值元件之间的一个交互回路实现的。行为生成系统设想规划。环境模型预测这些规划的结果，判值元件评价这些结果，然后行为生成系统选取具有最高评价的规划来执行。行为生成系统还监督规划的执行，当情况需要时，修改现有规划。

基本作用回路 ELF(Elementary Loop of Functions)如图 1-4-2 所示。这个回路阐明了一个明显的事实，**W**(环境中感兴趣的子集)中的所有事件应该是可“感知”(SP)的。感知的结果应该进行编码(转换成符号)、组织(假定执行某些基本的辨识)，并提交给环境模型 **WM**。**WM** 被用做能立即被感知的环境的知识集合，同时 **WM** 支持行为生成(BG)子系统，**BG** 对所有必要的活动做出决策(这个子系统有时候称为“决策”或“规划控制”)。**BG** 将这种决策提交给执行系统(A)。

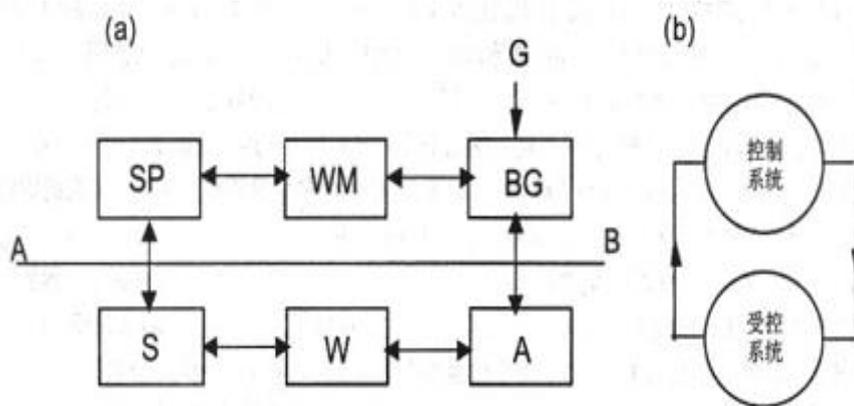


图 1-4-2 基本作用回路 ELF

ELF 图给出了现实与物理器件(直线 **AB** 下方, 受控系统)以及在计算机系统的软硬件中认知活动(直线 **AB** 上方, 控制系统)的一个近似镜像。在 **WM** 模块和环境集{**W**}之间的箭头表示现实环境 **W** 和环境模型 **WM** 中的表示之间的一个虚拟对应。环境模型 **WM** 中的知识是环境实际状态的最好估计。

在 **RCS** 递阶结构中, 较低层次的控制系统的可以看做是受控系统的一部分。如图 1-4-3 中矩形所示, 分界线 **AB** 只对 **ELF** 的第一层起作用, 第二层有自己的分界线 **A_vB_v**。

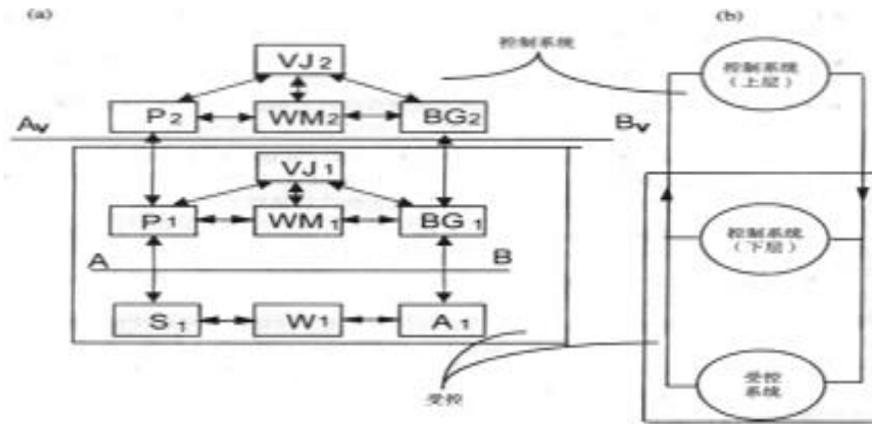


图 1-4-3 紧凑形式的两层 NIST-RCS 模块

(2) 制造业的智能系统结构 ISAM

制造业的智能系统结构（**ISAM: Intelligent System Architecture for Manufacturing**）概念框架试图将智能控制概念应用到制造领域，以至于能实现全范围的灵活制造概念。**ISAM** 是智能制造系统的一个参考模型结构。**ISAM** 由递阶布局的智能处理节点的集合组成，这些节点组成嵌套的控制回路串。在各节点，分解任务、产生规划、维护环境模型、处理来自传感器的反馈信号，并闭合控制回路。较高层的节点处理协作和生产管理，而较低层的节点处理机器协调和过程控制。**ISAM** 把拟定的规划和反应式控制功能进行集成和分布，它遍及整个递阶结构，并在所有层次上具有全部的空间和时间标度。

在各递阶结构层，环境模型、传感器的感知及判值模块给行为生成模块提供决策和控制所需的信息。在各递阶结构层次，行为生成模块把任务分解为下属行为生成模块的子任务。同一层的知识库之间共享环境模型知识，并在较高层次和较低层次在知识数据结构之间建立关系指针。

1.5 信息物理系统 CPS（Cyber-Physical Systems）

中国信息物理系统发展论坛 2017 年 3 月发布了《信息物理系统白皮书》。

《信息物理系统白皮书（2017）》给出对 CPS 的定义：信息物理系统通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术，构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统，实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。可以看出，信息物理系统是工业和信息技术范畴内跨学科、跨领域、跨平台的综合技

术体系所构成的系统，覆盖广泛、集成度高、渗透性强、创新活跃，是两化融合支撑技术体系的集大成。信息物理系统能够将感知、计算、通信、控制等信息技术与设计、工艺、生产、装备等工业技术融合，能够将物理实体、生产环境和制造过程精准映射到虚拟空间并进行实时反馈，能够作用于生产制造全过程、全产业链、产品全生命周期，能够从单元级、系统级到系统之系统（SoS）级不断深化，实现制造业生产范式的重构。

《信息物理系统白皮书（2017）》认为CPS本质就是构建一套赛博（Cyber）空间与物理（Physical）空间之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系，解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题，提高资源配置效率，实现资源优化。

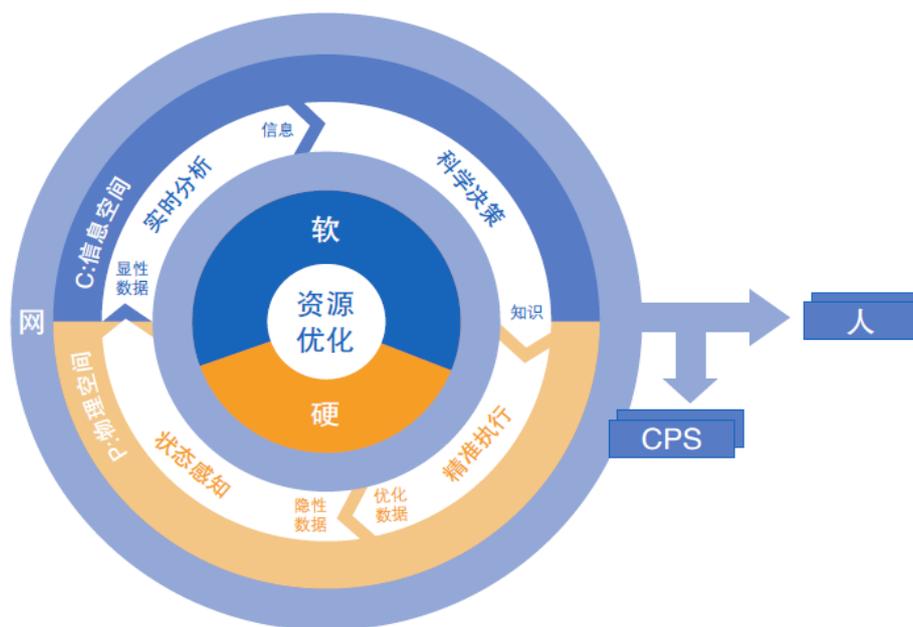


图1-5-1 CPS闭环赋能体系

实现数据的自动流动具体来说需要经过四个环节，分别是：状态感知、实时分析、科学决策、精准执行。大量蕴含在物理空间中的隐性数据经过状态感知被转化为显性数据，进而能够在信息空间进行计算分析，将显性数据转化为有价值的信息。不同系统的信息经过集中处理形成对外部变化的科学决策，将信息进一步转化为知识。最后以更为优化的数据作用到物理空间，构成一次数据的闭环流动。具体来说：

状态感知。是对外界状态的数据获取。生产制造过程中蕴含着大量的隐性数据，这些数据暗含在实际过程中方方面面，如物理实体的尺寸、运行机理，外部环境的温度、液体流速、压差等。状态感知通过传感器、物联网等一些数据采集技术，将这些蕴含在物理实体背后的数据不断的传递到信息空间，使得数据不断“可见”，变为显性数据。状态感知是对数据的初级采集加工，是一次数据自动流动闭环的起点，也是数据自动流动的源动力。

实时分析。是对显性数据的进一步理解。是将感知的数据转化成认知的信息的过程，是对原始数据赋予意义的过程，也是发现物理实体状态在时空域和逻辑域的内在因果性或关联性关系的过程。大量的显性数据并不一定能够直观的体现出物理实体的内在联系。这就需要经过实时分析环节，利用数据挖掘、机器学习、聚类分析等数据处理分析技术对数据进一步分析估计使得数据不断“透明”，将显性化的数据进一步转化为直观可理解的信息。此外，在这一过程中，人的介入也能够为分析提供有效的输入。

科学决策。是对信息的综合处理。决策是根据积累的经验、对现实的评估和对未来的预测，为了达到明确的目的，在一定的条件约束下，所做的最优决定。在这一环节CPS能够权衡判断当前时刻获取的所有来自不同系统或不同环境下的信息，形成最优决策来对物理空间实体进行控制。分析决策并最终形成最优策略是CPS的核心关键环节。这个环节不一定在系统最初投入运行时就能产生效果，往往在系统运行一段时间之后逐渐形成一定范围内的知识。对信息的进一步分析与判断，使得信息真正的转变成知识，并且不断地迭代优化形成系统运行、产品状态、企业发展所需的知识库。

精准执行。是对决策的精准物理实现。在信息空间分析并形成的决策最终将会作用到物理空间，而物理空间的实体设备只能以数据的形式接受信息空间的决策。因此，执行的本质是将信息空间产生的决策转换成物理实体可以执行的命令，进行物理层面的实现。输出更为优化的数据，使得物理空间设备运行的更加可靠，资源调度更加合理，实现企业高效运营，各环节智能协同效果逐步优化。

螺旋上升。数据在自动流动的过程中逐步由隐性数据转化为显性数据，显性数据分析处理成为信息，信息最终通过综合决策判断转化为有效的知识并固化在CPS中，同时产生的决策通过控制系统转化为优化的数据作用到物理空间，使得

物理空间的物理实体朝向资源配置更为优化的方向发展。从这一层面来看，数据自动流动应是以资源优化为最终目标“螺旋式”上升的过程。

CPS可分为单元级、系统级、系统之系统级三个层次。

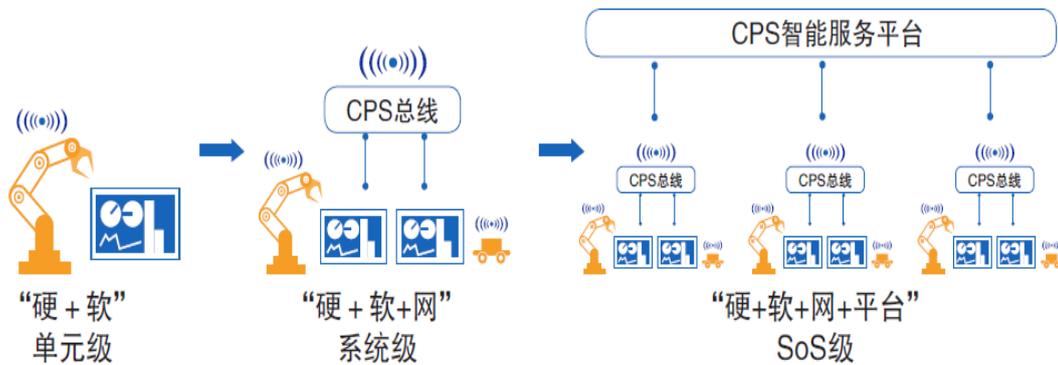


图1-5-2 CPS的三个层次

单元级是具有不可分割性的信息物理系统最小单元。可以是一个部件或一个产品，通过“一硬”（如具备传感、控制功能的机械臂和传动轴承等）和“一软”（如嵌入式软件）就可构成“感知-分析-决策-执行”的数据闭环，具备了可感知、可计算、可交互、可延展、自决策的功能，典型如智能轴承、智能机器人、智能数控机床等。每个最小单元都是一个可被识别、定位、访问、联网的信息载体，通过在信息空间中对物理实体的身份信息、几何形状、功能信息、运行状态等进行描述和建模，在虚拟空间也可以映射形成一个最小的数字化单元，并伴随着物理实体单元的加工、组装、集成不断叠加、扩展、升级，这一过程也是最小单元在虚拟和实体两个空间不断向系统级和系统之系统级同步演进的过程。

系统级是“一硬、一软、一网”的有机组合。信息物理系统的多个最小单元（单元级）通过工业网络（如工业现场总线、工业以太网等，简称“一网”），实现更大范围、更宽领域的数据自动流动，就可构成智能生产线、智能车间、智能工厂，实现了多个单元级CPS的互联、互通和互操作，进一步提高制造资源优化配置的广度、深度和精度。系统级CPS基于多个单元级最小单元的状态感知、信息交互、实时分析，实现了局部制造资源的自组织、自配置、自决策、自优化。由传感器、控制终端、组态软件、工业网络等构成的分布式控制系统（DCS）和数据采集与监控系统（SCADA）是系统级CPS，由数控机床、机器人、AGV小车、

传送带等构成的智能生产线是系统级CPS，通过制造执行系统（MES）对人、机、物、料、环等生产要素进行生产调度、设备管理、物料配送、计划排产和质量监控而构成的智能车间也是系统级CPS。

系统之系统级（即SoS级）是多个系统级CPS的有机组合，涵盖了“一硬、一软、一网、一平台”四大要素。SoS级CPS通过大数据平台，实现了跨系统、跨平台的互联、互通和互操作，促成了多源异构数据的集成、交换和共享的闭环自动流动，在全局范围内实现信息全面感知、深度分析、科学决策和精准执行。

1.6 美国工业互联网联盟《工业互联网参考体系结构》

美国工业互联网联盟于2015年6月发布了《工业互联网参考体系结构》，从商业视角、使用视角、功能视角和技术实现视角四个视角展开。

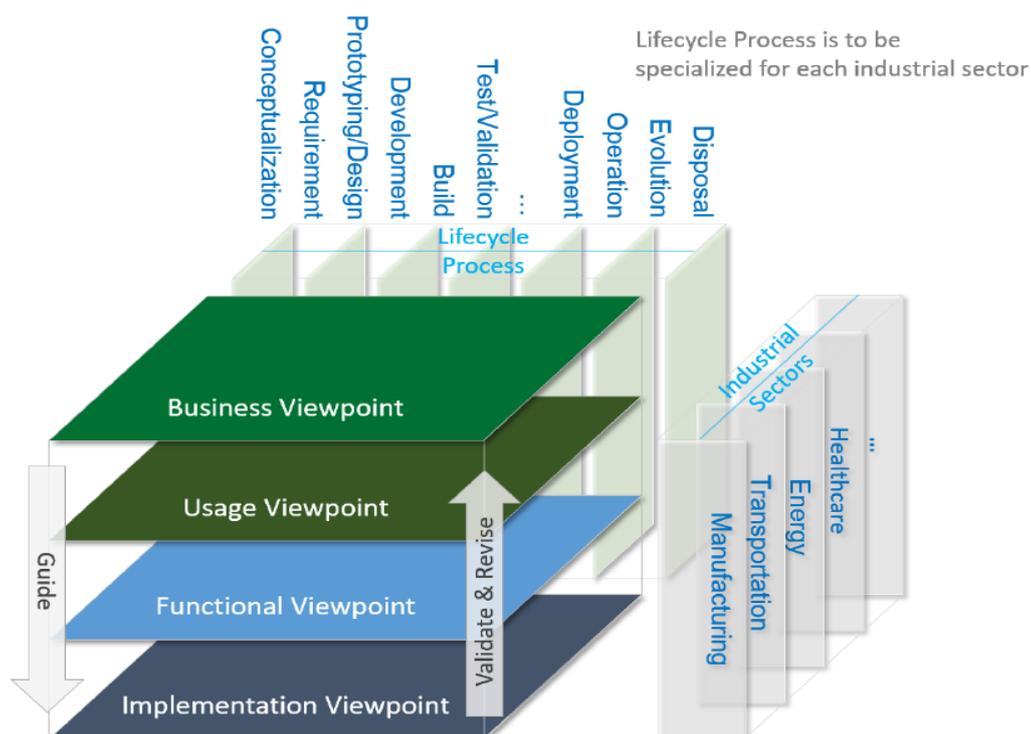


图1-6-1 工业互联网参考体系结构四个视角

商业视角从愿景和价值出发导出关键目标和基本能力。

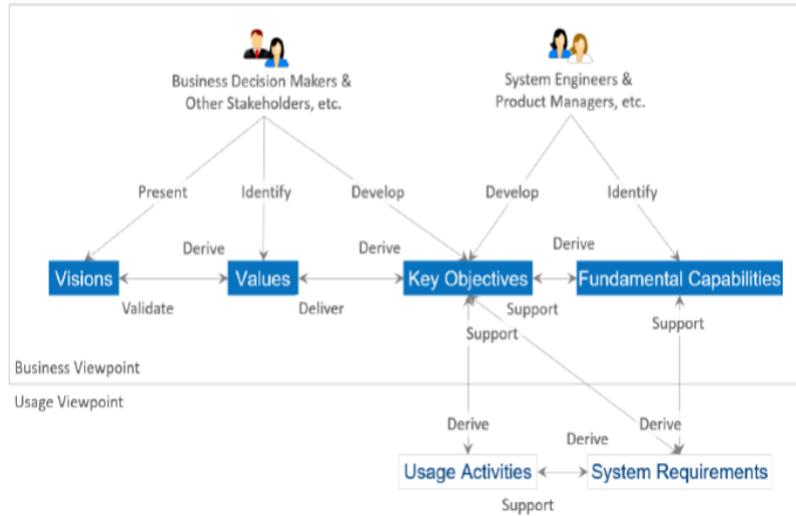


图1-6-2 愿景和价值驱动模型

使用视角关注信息系统如何在商业视角识别的基本能力，描述协调系统各部件工作的活动。

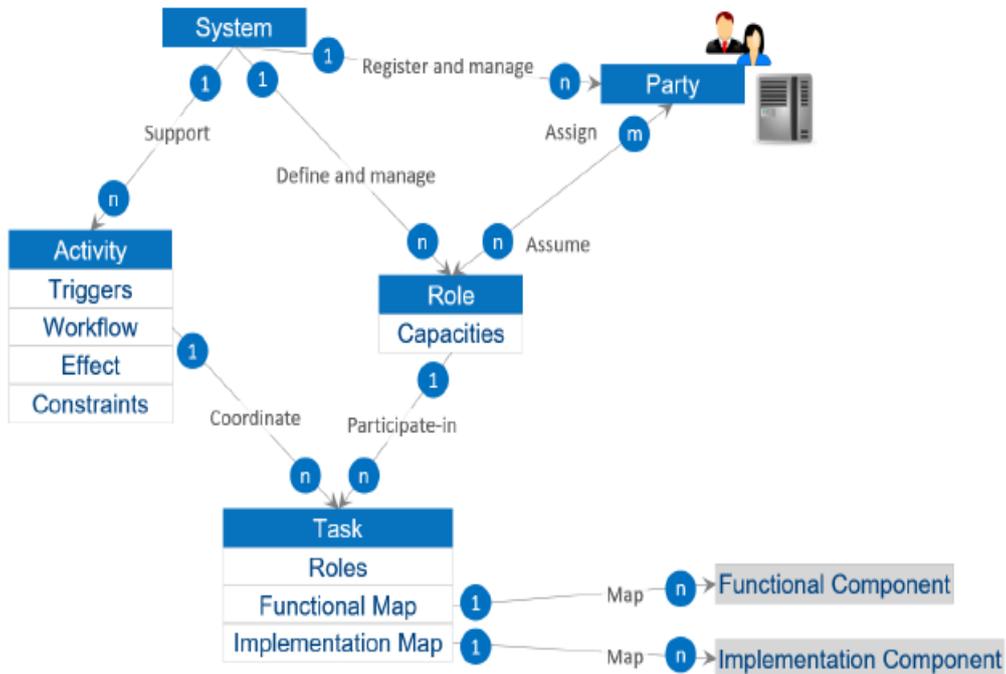
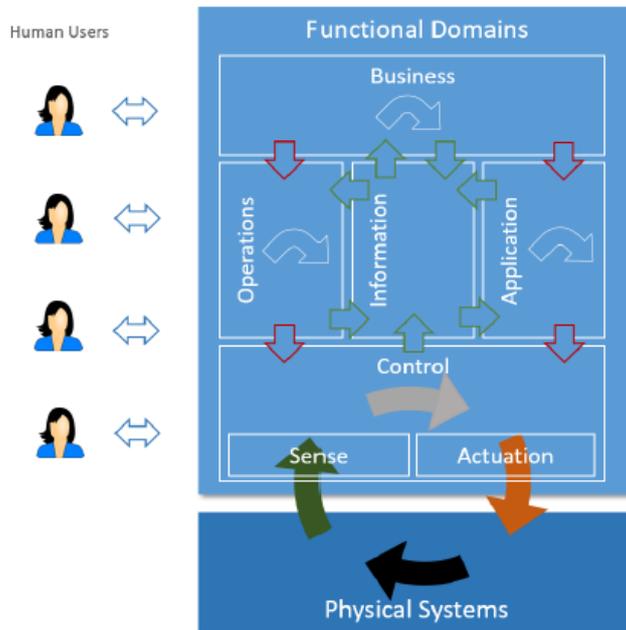


图1-6-3 使用视角

功能视角表示系统功能元件间的相互关系、结构、接口、交互以及与外部的相互作用，该视角确定了五个功能域组成：商业、运营、信息、控制、应用。



Green Arrows: Data/Information Flows; Grey/White Arrows: Decision Flows; Red Arrows: Command/Request Flows

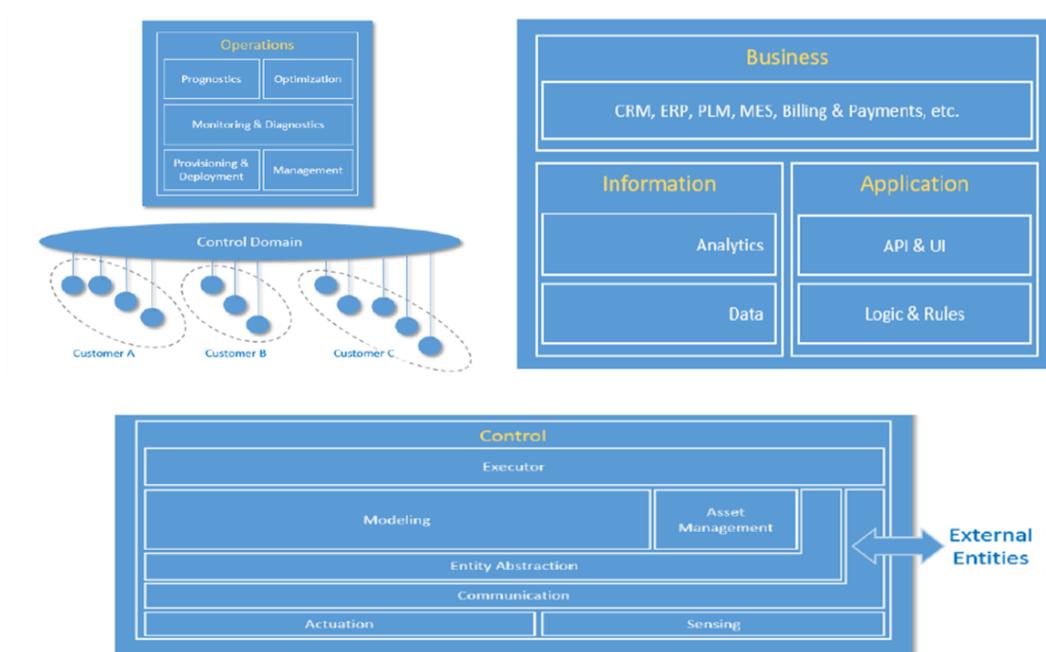


图1-6-4 功能视角及各功能主要活动

在功能域需要考虑交叉功能以及安全等系统特性。包括系统安全、信息安全、弹性（容错、自修复、自组织等）、互操作性、连接性、分布数据管理、工业分析、智能适应性控制、动态组合等。

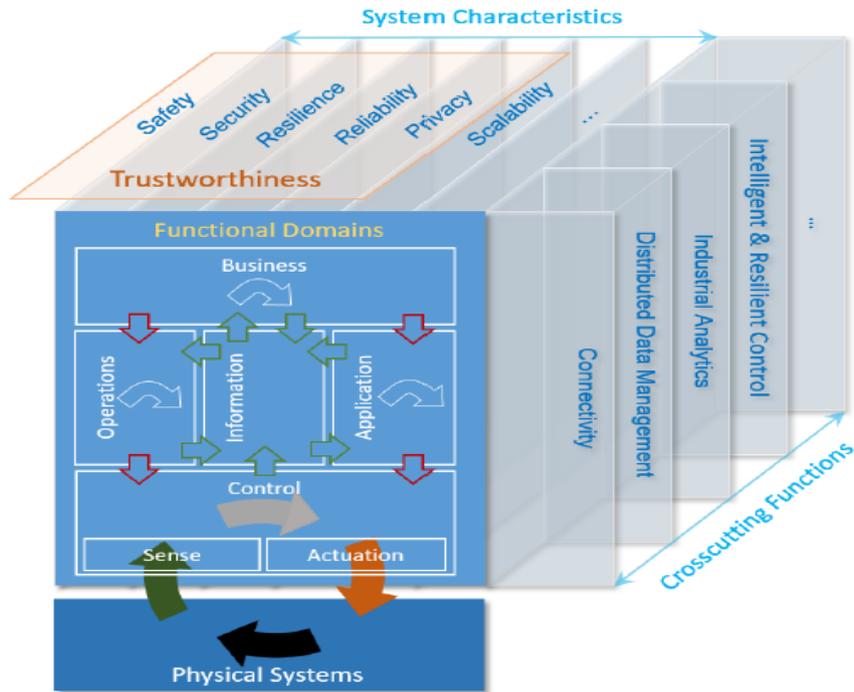


图1-6-5 功能域、交叉功能以及系统特性

实现视角关注系统的技术表示以及实现上述活动和功能的系统构成。图1-7-6给出了一种三层（边缘层、平台层、企业层）工业互联网架构方案。

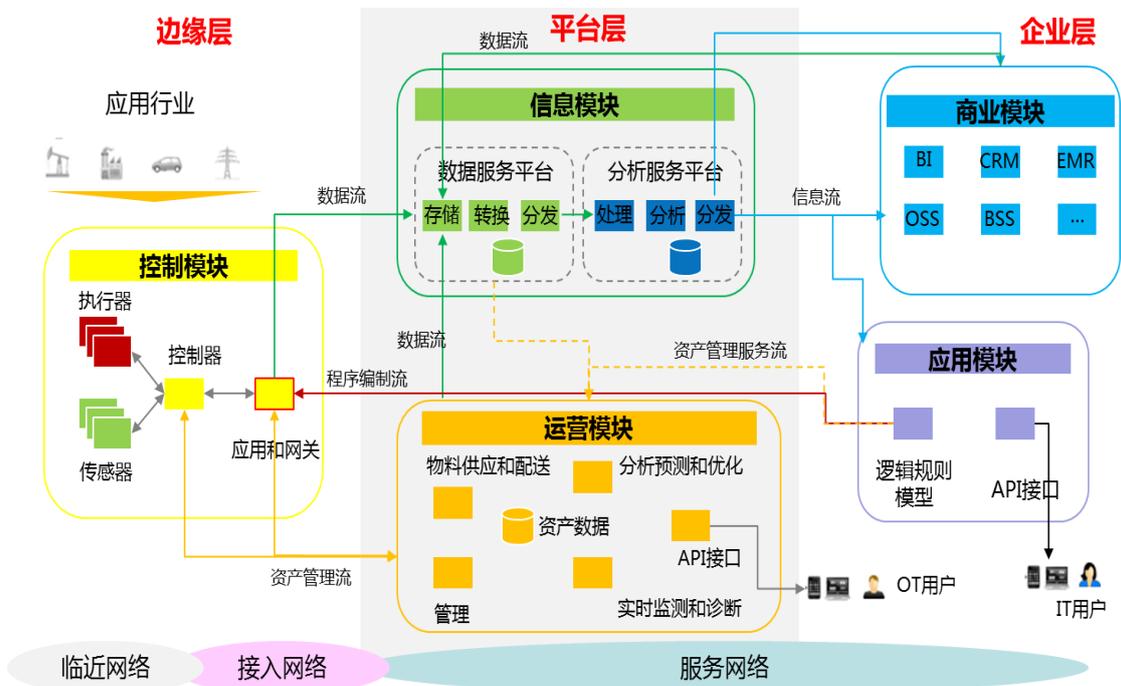


图1-6-6 三层工业互联网架构方案

1.7 中国工业互联网平台体系架构

中国工业互联网产业联盟 2017 年 11 月发布了《工业互联网平台白皮书》，给出了工业互联网平台体系架构。

整个工业互联网平台分为边缘层、IaaS层、平台层（也叫工业PaaS层）、应用层（也叫工业SaaS层）三大核心层级以及贯穿上述各层级的安全防护。

- (1) 边缘层是基础。在平台的边缘层，对海量设备进行连接和管理，并利用协议转换实现海量工业数据的互联互通和互操作；同时，通过运用边缘计算技术，实现错误数据剔除、数据缓存等预处理以及边缘实时分析，降低网络传输负载和云端计算压力。
- (2) 平台层是核心。在通用PaaS架构上进行二次开发，实现工业PaaS层的构建，为工业用户提供海量工业数据的管理和分析服务，并能够积累沉淀不同行业、不同领域内技术、知识、经验等资源，实现封装、固化和复用，在开放的开发环境中以工业微服务的形式提供给开发者，用于快速构建定制化工业APP，打造完整、开放的工业操作系统。
- (3) 应用层是关键。通过自主研发或者是引入第三方开发者的方式，平台以云化软件或工业APP形式为用户提供设计、生产、管理、服务等一系列创新性应用服务，实现价值的挖掘和提升。



图1-7-1 工业互联网平台体系架构

工业互联网平台呈现4个技术发展趋势：

(1) **平台架构，PaaS以其开放灵活特性成为主流选择。**一是基于通用开源PaaS架构二次开发构建平台，例如GE Predix、西门子MindSphere等均基于Cloud Foundry进行平台建设。二是以API为代表的新型集成技术为系统集成和平台能力开放提供有效支撑，例如Ayla、Intel IoT等平台基于API协议对设备、应用和系统进行全面集成，GE Predix基于API协议对外提供资产管理、数据验证、数据分析服务。三是利用容器技术支撑平台和应用灵活部署，例如PTC ThingWorx平台能够基于容器方式支持在不同IaaS上的部署，GE Predix平台中训练形成的智能模型能够基于容器直接部署在Predix Machine上。

(2) **应用创新，工业机理与数据科学走向融合。**当前，工业数据分析呈现两类路径：一是从工业机理出发，进行建模分析，二是从数据角度出发，通过关联性分析，找到规律。上述两种路径的融合能够取得更加明显的效果，是未来工业数据分析的趋势，通过各种分析模型在平台上的沉淀，平台将汇聚起大量的工业知识，实现知识传承、迭代与复用。

(3) **功能下沉，边缘与云端协同成为平台重要发展方向。**一是强化协议转换能力，例如GE Predix Machine利用OPC UA技术实现不同工业网络协议的转换。二是强化边缘计算能力，例如SAP Leonardo利用边缘网关剔除冗余数据，Azure IoT在边缘侧运行分析算法，实现实时反馈控制。三是强化边缘与云端协同能力，例如ThingWorx平台将云端模型导入边缘设备进行实时分析，并根据反馈数据进一步优化云端模型，实现双向迭代。

(4) **开发框架，微服务等新型架构大幅降低开发难度与创新成本。**工业互联网平台通过应用新型软件开发架构提升工业应用开发效率，降低开发门槛。一方面GE Predix等平台集成微服务架构，支持多种开发工具和编程语言，通过将工业知识进行模块化封装和复用，加快应用部署速度。另一方面ThingWorx等平台支持图形拖拽开发方式，将应用开发时间从几个月缩短到几周。

工业互联网平台重构了工业软件创新、部署和集成方式。在传统IT开发模式中，企业按照业务流程开发独立的软件系统，功能和数据分散在不同的软件中，难以协同与集成。在工业互联网开发模式中，平台解构传统工业需求，将其拆分为更具体和细化的功能组件，构建微服务池。开发者根据特定用户需求，调用和组合微服务组件，并固化为APP。APP之间基于平台实现快速交互集成，形成按

需定制，全面集成的新型开发方式。

1.8 欧盟钢铁工业集成智能制造 I²MSteel

欧盟提出了钢铁工业集成智能制造概念，欧盟 2006 年发布了钢铁技术平台计划 ESTEP（European Steel Technology Platform Vision 2030），提出钢铁工业智能制造技术重大研究项目（Intelligent manufacturing）。优先研发领域包括高度自动化的生产链技术、全面过程控制技术和模拟仿真优化技术。通过新检测技术或改进物理模型，在线测量和控制机械性能；集成过程监控、控制和技术管理，实现钢铁生产多目标优化，包括生产率、资源效率和产品质量。

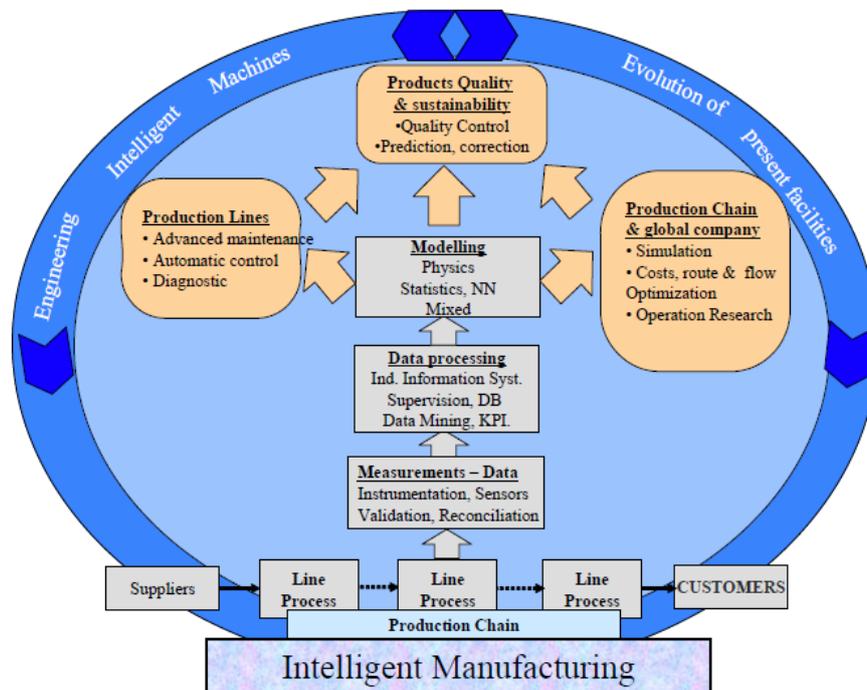


图 1-8-1 欧盟钢铁工业集成智能制造

欧盟 2012 年成立钢铁集成智能制造小组（Integrated Intelligent Manufacturing, I²M），并于 2012、2014、2016 年召开三次讨论会，其愿景是以整体视角整合传感器、数据处理、模型和工艺知识，提升人与制造过程之间的交互能力，钢铁集成智能制造特征如图所示。

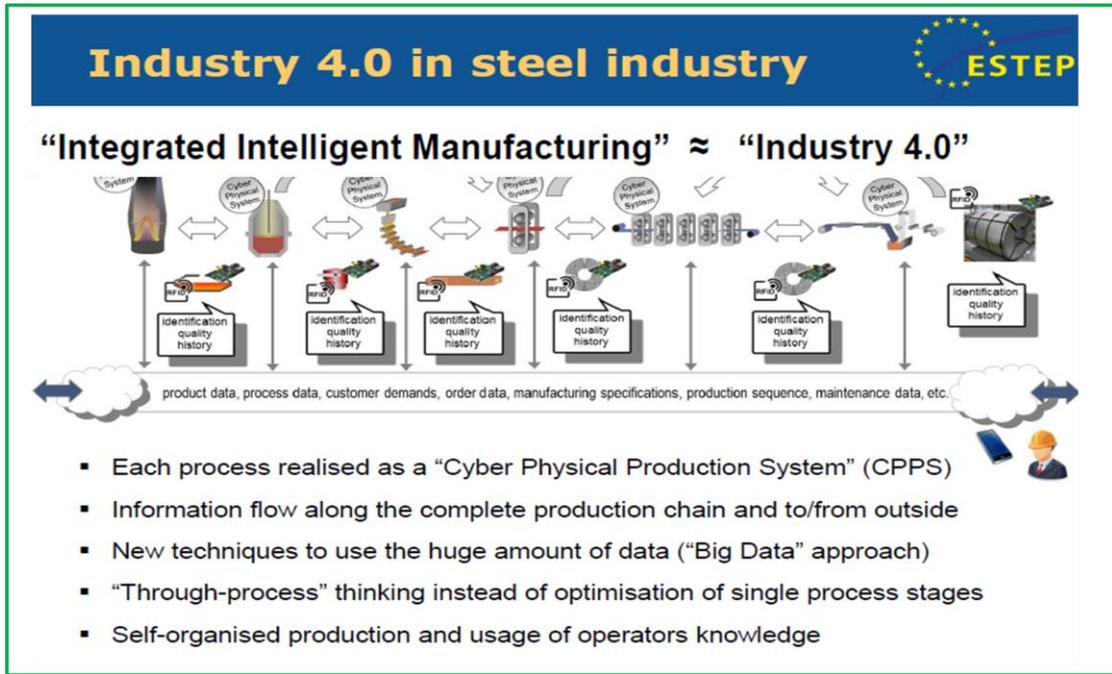


图 1-8-2 钢铁集成智能制造特征

2012-2015 年，欧盟启动了 I²MSteel（Integrated Intelligent Manufacturing for Steel Industries）项目，开发新的满足**集成互操作性、功能可扩展性、系统可移植性的集成智能制造的自动化和信息化架构**，研究建立集成智能制造（I²M）的全厂、全公司自动化、信息化体系，实现全供应链的无缝/灵活的协作和信息交换。

新的架构基于三大支柱技术，高级任务智能体（产品跟踪、过程控制、过程计划、全过程质量控制、信息存储、物流等）、SOA(面向服务架构)、制造链的语义描述。

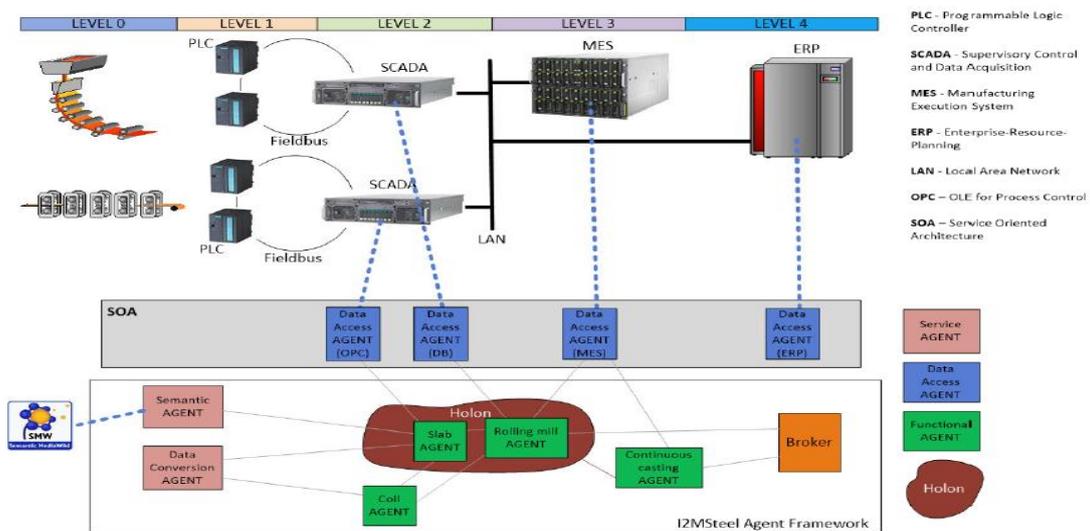


图 1-8-3 I²MSteel 基本架构（general）

在 I²MSteel 基本架构中，运行的解决方案具有通用的特质，即开发的智能体中的定义的算法可以独立于真实工厂布局配置，而工厂布局配置信息存储在本体 (ontology) 中，通过 SMW (semantic media wiki) 管理。与过程数据库的连接通过 SOA (service oriented architecture)，实现统一的工厂 IT 信息存取。

自主智能体之间可以独立地相互联系，也可以与其它智能体彼此相互合作。一个智能体可提供或请求一个特定的服务。在多智能体系统 (MAS) 中，引入所谓的经纪人 (broker) 机制。每个智能体都在经纪人那里登记，宣布它可以提供的服务。对应地，当一个智能体需要特定的服务时，它也联系这个经纪人，请经纪人给出能提供这一特定服务的智能体。总而言之，经纪人起着协同、居间调节的作用，管理智能体和它们的技术 (服务)。

当智能体形成一组 (group) 以解决某一问题时，这组智能体叫做智能体结合体，如果智能体结合体是解决这一问题的唯一可能的用例时，结合体就变成了子整体 (holon)，功能智能体的集合组成了功能子整体 (functional holon)。此外，为了解决多智能体中交互或谈判活动，在多智能体框架 (MAS framework) 中引入了市场 (market place) 的概念。

附件二.典型案例

附件二介绍了公司级钢铁工业智能制造三个典型案例：宝钢股份智能制造案例、河钢唐钢智能制造系统、山钢集团日照公司智能制造系统和河冶科技公司生产智能管控系统。四个案例各有特点，宝钢股份侧重智能制造总体思考，河钢唐钢智能制造系统侧重在原系统上如何进行改造升级，山钢集团日照公司智能制造系统侧重新产线建设如何进行顶层设计和集成优化，河冶科技公司生产智能管控系统侧重特钢企业如何进行智能化管控。

1. 宝钢股份智能制造案例

1.1 案例概况

宝钢股份作为宝武集团钢铁业的核心企业，在智能制造浪潮中应当成为新技术的领头羊。宝钢股份目前具有宝山、青山、湛江、梅山等制造基地，宝山基地是国际上产品种类和制造规模最大的钢铁制造单元之一。图 1-1 展示了宝钢股份分层次推进智能制造的概况。

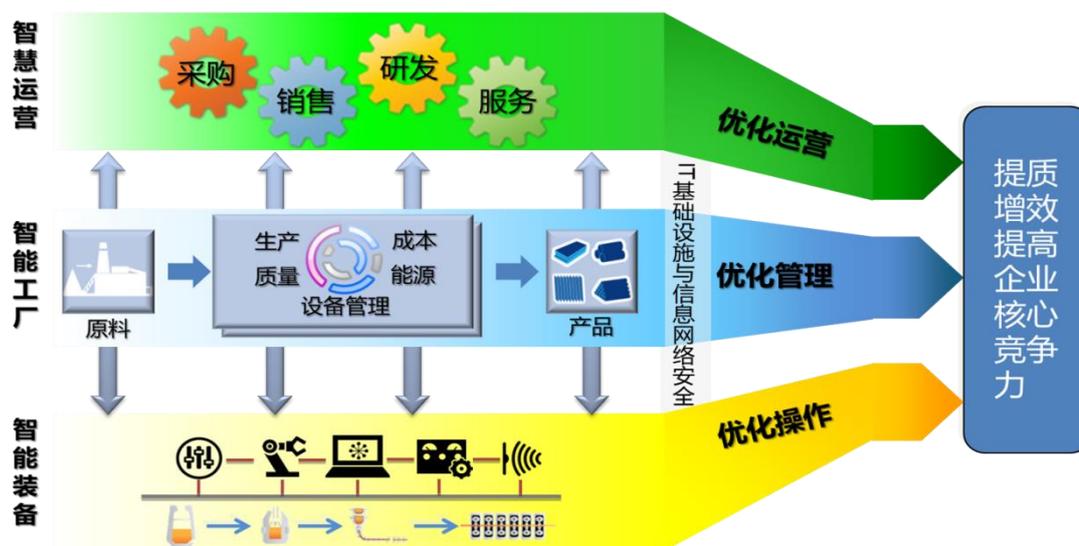


图 1-1 宝钢股份智能制造分层次示意图

公司力图通过不断完善检测、控制与决策等计算机系统，开展运营的辅助智能决策模型与系统、制造的智能优化计划、产品的质量大数据监管技术的研制，

通过逐步实施的机器人和更高度的自动化技术、操作少人化技术等实施，通过知识自动化技术的研发和逐步应用，实现企业效益不断增加、产品质量稳定、成本不断下降的本质目的，最终增强企业竞争力。

图 1-2 和图 1-3 依次展示宝武集团未来的信息化架构和宝钢股份的自动化信息化的未来架构。

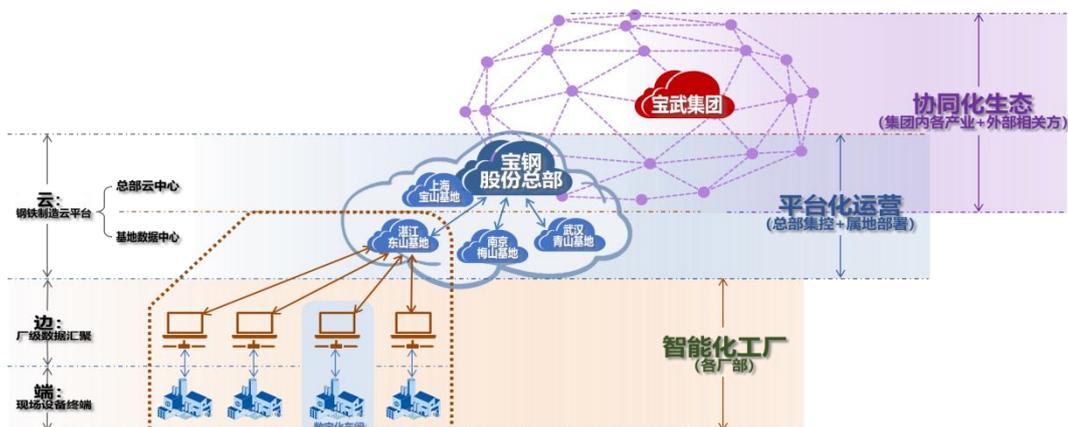


图 1-2 宝武集团信息化架构示意图

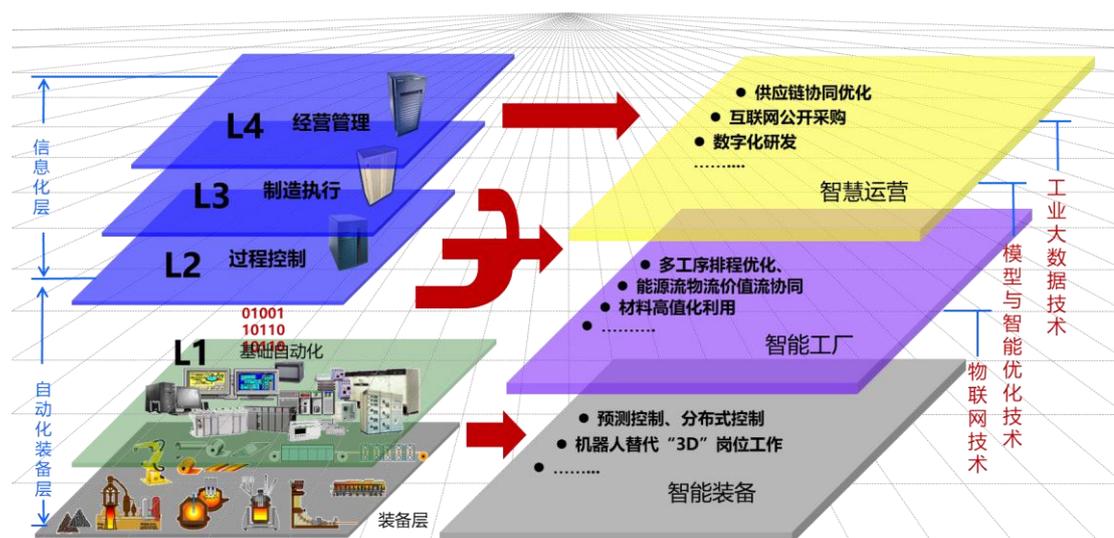


图 1-3 宝钢股份多层架构与部分内容关系示意图

1.2 主要做法

宝钢股份智能制造将紧紧围绕企业降本增效的根本目的开展。具体实施过程既注重顶层和体系的设计，又重视应用基础技术的自主研发积累，还重视人才培养和现场工程师的转型增能，做到了“路、车、司机”的平衡发展。宝钢股份智能化工作有以下特征：

- (1) 注重实施新技术对价值和减员增效的引导与评估；
- (2) 系统和新技术研制要有利于未来一个中心加多个制造基地的模式形成；
- (3) 注重通过试点来带动面上的实施，以避免走弯路；
- (4) 复杂智能优化、工业大数据应用等新技术坚持自主研发，以研发先行的模式推进智能化；
- (5) 宝钢股份各基地自动化、信息化基础不一，落地的项目和技术也会不同，不搞“一刀切”；
- (6) 宝山基地自动化信息化基础好，该基地智能制造工作坚持以信息化领域人工智能和大数据应用为优先切入，数十年来在智能排程、生产平衡、库存优化、质量管理智能技术、供应链协同、工艺参数数字化等多方面取得了较好成果，经济效益和劳动效率方面价值明显。
- (7) 自主设计对现场工程师的智能化、编程技术、数据建模等技术的培训。自主研发钢铁业适用的多用户远程数据分析与建模工具系统，为宝钢股份大众创新奠定扎实基础。

图 1-4 是目前各方面主要工作的示意图。



图 1-4 宝钢股份智能制造取得进展或已经开始研发的工作示意图

图 1-5 为宝钢智能制造技术自主研发的技术架构示意图，宝钢在该领域体现了研发先行的布局和一定优势，为智能制造特别是智能决策技术的应用方向选择奠定了较为扎实的基础，有效避免盲目。毋庸置疑，宝钢智能制造还有很多艰巨任务，包括工业大数据系统顶层设计、多基地合同协调优化、预测式制造、复杂物流智能平衡、多基地物流与供应链设计等十分复杂的问题。

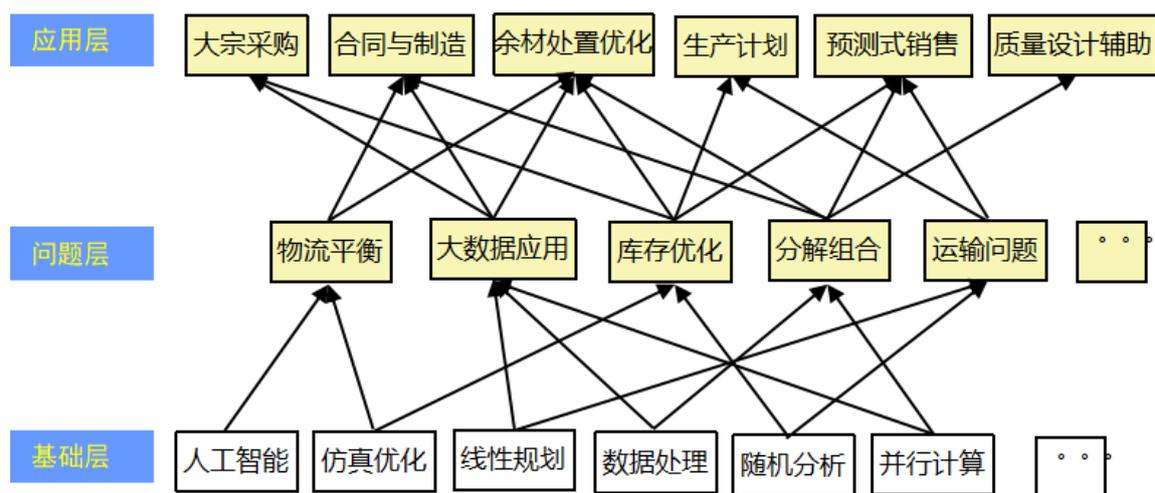


图 1-2 基础技术层、同类模型层与业务应用层关系示意图

经过近三年的努力，目前宝山基地已完成的工作成果较多，限于篇幅仅举 2 例如下：

(1) 以 1580 热轧国家示范项目为导向，开展了智能车间的全方位智能制造技术研发。该项目按照“作业无人化、全面在线检测、新一代控制模型、设备状态监控与诊断、产线能效优化、质量一贯管控、一体化协同计划、可视化虚拟工厂”等智能化标准，策划实施了行车无人化改造、智能检测与诊断、感知-控制-决策一体化工艺模型、智能设备、智能节能、热轧尺寸、温度、断面类质量自动判定、磨辊间自动化改造、热轧生产动态排程、可视化仿真平台、数字化工厂等项目。通过智能车间试点示范建设，1580 热轧产线实现了质量工序能耗、内部质量损失分别下降 5.5%、10%，劳动效率提升 11%；同时，突破了一批钢铁智能制造核心共性技术和车间级智能制造实践方法，形成热轧智能车间标准（框架模型），为钢铁车间级智能制造升级提供了可推广、可复制经验。

(2) 在制造管理领域，以提升柔性制造能力为切入点，就新一代碳钢板材

全产线（含炼钢、连铸、热轧、冷轧等）智能排程、库存智能自动处置、质量余材优化系统、原料码头传送自动决策、后加工多级库存协同与生产智能排程等开展了一系列研发和应用工作，取得了巨大的生产效率提升和生产过程的优化，大幅度提高了产线的柔性制造能力以及，大大减少了部分岗位的工作符合，若干技术初步做到了无人智能决策，实现了知识自动化技术在钢铁业的应用。以连铸智能排程为例，中间包利用率明显提升、调宽次数减少、劳动效率提升 10 倍以上。

2 河钢唐钢智能制造系统

2.1 案例概述

近年来，河钢集团将发展战略逐步导向产品升级及结构调整，通过产业升级扩大中高端供给，提高产品的有效供给。2013 年，河钢唐钢启动高强度汽车板产线建设，产品定位为中高端产品市场。新的产品市场定位决定了新的服务定位，高端家电板及汽车板客户，对供货商的订单响应能力、精准交付能力以及产品质量、订单个性化需求更为严苛。同时，竞争激烈的市场环境也对企业自身成本管理发起了挑战。河钢唐钢以高强汽车板产线建设为发力点，从企业各个方面的管理入手，加快接单生产及质量一贯生产组织模式转变。特别是在信息自动化体系的支撑方面，重新设计实施配套信息自动化系统架构，大力提升信息化协同以及自动化控制水平，推动企业向智能化转型升级。2016 年，河钢唐钢该项目获得国家工信部授予的“智能制造试点示范”。

2.2 主要做法

为更好地满足客户需求，将产品设计、计划排程、质量管理三项重点从原来的三级 MES 或者四级 ERP 中拆分出来，设立三点五级，向上接入 ERP，向下衔接 MES，强化面向客户订单的质量独立设计、有限资源约束的生产作业全局计划管理以及全流程可追溯的质量闭环管理。河钢唐钢破旧立新，重新定义钢铁企业五级架构体系。如图 2-1 所示。

建设工厂数据库，实现全局数据支撑，定义为二点五级，介于信息化系统与

自动化系统之间，功能上满足信息化系统对于底层数据的采集需求。



图 2-1 河钢唐钢信息系统架构示意图

(1) 公司级订单设计 ODS

通过 ODS 系统建设，建立起企业产品规范数据库、冶金规范数据库、工艺路径数据库，统一质量管理标准。针对客户销售订单进行质量设计展开，输出自铁水预处理、转炉、精炼、连铸、热轧、冷轧、退火、镀锌等产品制造流程中各个工序的产品参数、计划参数、工艺控制参数，实现集中一贯的质量设计。

(2) 公司级计划排程 APS

通过 APS 系统建设，从全局、钢轧一体化、冷轧一体化等三个层次进行计划作业管理，综合考虑生产过程中的各种限制条件，实现基于有限产能约束下的资源调配。通过对企业物料需求、资源能力、时间约束的实时掌握，能够为销售订单预测确实可行的完工时间，从而对客户提供的准确的交货期应答服务。通过全局透明的接单追踪与闭环计划反馈机制，实现从销售订单评审、销售订单接收、销产转换、公司及各分厂生产计划、作业计划、再到件次计划等产销作业链全过程的一贯制计划优化管理。

(3) 质量管理体系

通过 QMS 系统建设，搭建了覆盖产品制造周期各道工序的质量管控体系，重

点关注质量监控、质量评价和判定、质量问题追溯、质量趋势分析等内容，实现了全流程可追溯的质量管理，将过程质量、生产工艺控制情况纳入产品最终判定，使质量管理从对产品的成品判定转变为对生产过程合规性的判定，保障产品质量稳定性。

通过 TPQC 系统建设，实现与自动化系统无缝对接，及时采集产品全生产流程中与质量相关的各类数据，实现在线质量跟踪与关键参数评估，对质量缺陷进行在线监控，及时判断问题根源，并提出修复措施。

（4）炼钢动态调度 MSCC

建设炼钢动态调度系统（MSCC），通过特定工艺参数、牌号以及工艺路径的数据设定，管理从铁水需求、转炉、精炼到浇铸和钢包管理的一系列生产过程，在满足工艺和物流管理需求的基础上，达到生产序列和生产截止期的最佳匹配，削减缓冲时间，提升钢区冶炼作业效率。炼钢动态调度系统与一二级系统的完善有效支撑了自动化炼钢的实现。

（5）全自动无人天车

在唐钢高强汽车板公司原料库、中间库、成品库传统天车设备基础上进行智能化改造，为天车系统增加了智能调度层、控制层以及辅助系统控制的传感器、执行器等，具体功能包括库区天车作业指示自动排程、多车作业实时调度、天车作业无人驾驶、库区钢卷实时动态跟踪、HMI 操作控制。将库区所有天车进行统一的智能化管理与调度，实现无人驾驶、钢卷库位的自动分配、按指令进行自动钢卷吊装，并选择最优运输路径。同时，与 MES、APS 系统的集成，协调工序生产计划与物料需求计划，满足了接单生产以及计划排程对于实际库存管理的需求，保证了物流、排产及生产顺行。

（6）设备在线诊断系统

通过设备在线诊断系统建设，对设备运行状态进行故障诊断、分析、检测与管理，能够提高设备运转率，随时掌握设备运行状态，发现早期隐患，延长设备使用期限，减少事故停机造成的损失，提高设备可用率，提高设备检查效率及精准度。

3 山钢集团日照公司智能制造系统

3.1 案例概述

山钢集团日照公司钢铁精品基地项目是我国钢铁产业结构调整试点工作重要组成部分，是山东钢铁集团优化布局、提升档次、转变发展方式核心工程。日照钢铁精品基地产品定位为高端汽车用钢、家电用钢、建筑用钢、热镀锌产品等。

山钢集团日照公司开展了“管理流程创造暨信息化顶层设计咨询服务”(BPC)项目。按照智能、高效、绿色、高端的理念建设，体现了超前性，具备了主动性。顶层设计中提出了“智能制造梦工厂”总体目标，具体目标有：订单交货准确度达成 96%，把产品库存时间缩短为 5 日之内，达到人均年产钢 1650 吨的生产率，一天内解决客户质量方面的投诉，支持到日单位的经营管理等。山钢集团日照公司钢铁精品基地在智能制造的道路上进行了有益的尝试。

3.2 主要做法

山钢集团日照公司信息系统架构是借鉴 Posco ICT 管理流程创造暨信息化顶层设计成果，采用钢铁行业经典的五层架构体系进行构建。分为企业战略层、生产经营层、制造执行层、过程管理层和控制感知层。如图 3-1 所示。



图 3-1 山钢集团日照公司信息系统框架图

(1) 企业战略层

企业战略层为公司战略服务，其中包含了 BI 系统、全面预算系统、公司待办，移动互联以及公司内外门户网站系统等。其主要职能执行和分解公司战略目标；执行公司制定的年度预算指标；通过大数据仓库，数据分析等手段，为公司决策提供参考和数据支撑；统一待办服务为公司管控和决策提供系统支持；内外部网站为公司提供企业文化的展示平台和对外交流的窗口。

(2) 生产经营层

生产经营层为公司物流、信息流和资金流三流合一的集中体现。为公司生产经营活动提供系统平台。日照公司将 marketing 系统独立出来，解决了长期困扰钢铁企业“厚三薄四”还是“厚四薄三”的问题。将具有行业特色的接单排产功能独立为 marketing 系统，做到了真正的以销定产。将 ERP 系统进行瘦身，分为供应链管理、设备管理、财务管理，HR 以及主数据（MDM）管理，将 ERP 系统做的通用、简洁与高效。物流、研发、SHE 及知识管理等专业管理系统，相对独立又互为支撑，共同搭建生产经营管理平台。共赢服务平台（WSP）系统为内部系统向外部系统延伸的窗口，做到内外部信息共享和上下游产业的协同。

(3) 制造执行层

制造执行层以 MES 系统为代表，为公司生产活动的核心信息系统。从 L4 级系统接收生产订单并执行生产计划，下达作业指令到 L2 级系统。日照公司建设了完善的全流程 MES 系统，涵盖公司生产的所有工序。铁钢包智能调度系统(LMS)作为连接铁前 MES 及钢后 MES 系统的纽带，实现了高炉至炼钢物流和信息流的无缝衔接。检化验、计量、能源系统（EMS）作为 MES 系统的有效补充，实现了对生产要素的全方位管理。设备管理系统（PMS）作为 ERP 系统中 EAM 模块的支撑系统，可做到公司重要设备的全生命周期管理。

(4) 过程管理层

过程管理层主要由专家系统和控制模型组成。集过程控制理论和行业经验为一体，为钢铁制造技术的核心所在。日照公司配备了全流程的模型和专家控制系统，并与 MES 系统紧密结合，为钢铁工业智能制造的主要载体。

(5) 控制感知层

控制感知层由传统 PLC 及 DCS 组成的 L1 级系统和由传感器及执行机构组成的 L0 级系统组成，构成了整个钢铁信息化系统的基本神经元。控制感知层为整

个系统框架的基石，此层的健壮与否将直接影响到整个系统的执行效率和数据准确性。

此外，山钢集团日照公司在 L2-L3 级之间及 L3 以上系统之间构建了以 U-CUBE 和 ESB 为主的数据交换平台，用以实现不同信息系统之间的数据交互，做到统一管理和监控，避免了传统系统架构中网状的数据交互模式，做到统一的数据传输管理和监控，也便于新建系统与已投用系统的快速链接。

4 河冶科技生产智能管控系统

4.1 案例概述

河冶科技产品按钢种分为高速钢、粉末冶金高速钢、合金工具钢、不锈钢、其他特殊要求合金材料等五大类；按品种分为锻材、锻坯、热轧圆钢、方钢、扁钢、盘条、冷拉材、剥皮材、磨光材、钢板、热轧钢带、冷轧钢带等十二个系列近千个规格，并可根据顾客需要提供锻制、挤压、焊接类近终成型刀具毛坯。河冶科技产品广泛用于工具、模具、汽车、航空、造船、军工、冶金、汽轮机等行业，销往国内二十六个省、自治区、直辖市，并远销欧美、东南亚等十余个国家和地区。

针对特钢企业多品种、小批量、规模小、投资少的特点，河冶科技建立了统一的数据中心和简洁扁平化的生产智能管控系统，为特钢企业开展智能制造提供了可借鉴的模式。

4.2 主要做法

河冶科技采用了“数据中心-业务系统”两层信息化模式，即将数据从业务系统中解放出来，由专门的数据平台软件负责采集、处理、存储，对外提供访问接口，为生产管理、能源管理、设备管理、ERP 提供数据支撑，大幅缩短业务系统的开发周期、降低投资，并为后期建设提供开放可拓展的数据支撑，



图 4-1 数据中心与业务系统关系示意图

其中，采集层主要提供数据源，采集层的 PLC、计量仪表、检化验、物流跟踪数据均进入数据中心，由数据中心完成处理、存档，并为应用层提供访问接口；应用层中的应用满足业务部门个性化的应用需求，如计划排产、质量分析、成本管理等；报表平台直接建立在数据中心之上，取代现有的报表文件共享平台，覆盖河冶绩效指标体系；指挥控制中心是动态信息汇聚点，是业务管理部门与分厂之间的纽带，多部门在此完成生产指挥、能源调配和事故应急处理；同时，河冶科技作为社会化大生产中的一个环节，需要成为互联网中的一个信息节点，通过互联网+与客户、外委单位、员工实现协同互动，融入到云制造之中。

针对河冶科技公司产品多品种小批量、生产工序多规模小的高品质特殊钢的特点，建设了简洁、扁平化的生产智能管控系统。包括3中心一级管理、4分厂二级控制和数据中心。覆盖生产管理、质量管理、能环管理、设备管理、KPI管理、生产过程控制、数据中心等内容。数据中心自上而下覆盖生产管控所有范围，实现各层级数据汇总和信息交换。

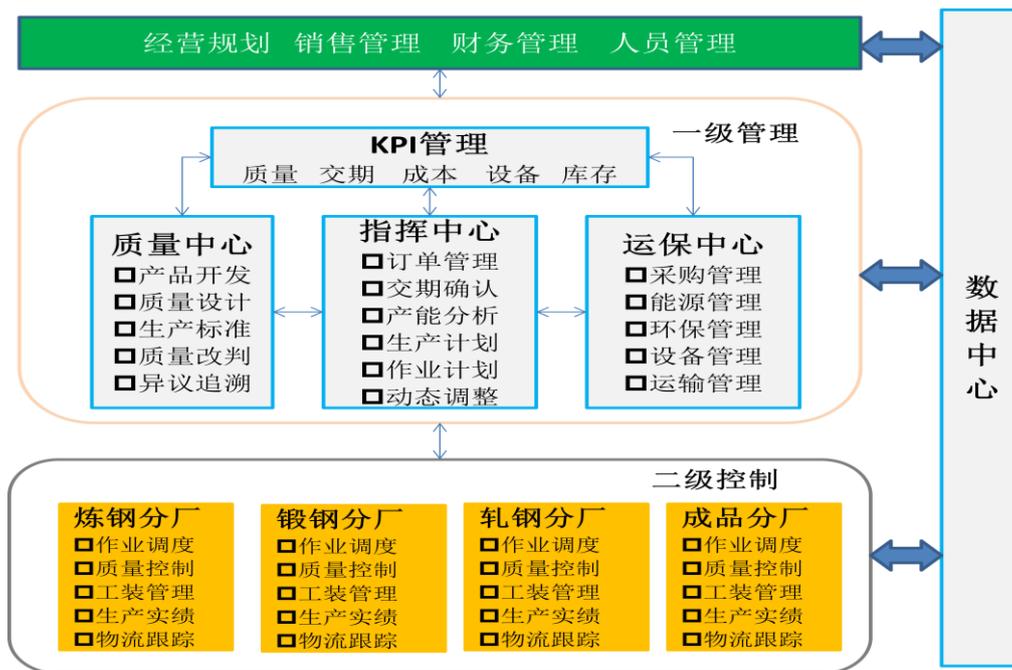


图4-2 简洁扁平化的生产智能管控系统

(1) 数据中心平台

数据中心平台由服务器、AriPlat3.0 数据平台软件、关系数据库软件构成。其中，冶金自动化院 AriPlat3.0 是建立在关系数据库软件基础上的、集实时数据库、内存缓存数据库、管理数据库职能于一身的平台软件，采用分布式架构设计，具有数据采集、数据压缩、海量数据高效存储等功能，能够为业务系统提供丰富的数据资源。数据平台软件由采集数据采集、数据处理、数据归档、数据访问、配置管理、运行管理、数据库等部分组成。

(2) 一体化计划调度

高速工具钢生产组织具有以下难点：产品品种、规格、钢种多，批量小，规模化组织生产难；产品工艺路径多，存在电渣、锻造以及隐形（浇铸、退火、成品某些环节）瓶颈；生产组合时，不仅要考虑本工序，还要考虑后续工位是否能接续上，需要前后迭代；各工位生产节奏不同，时间节奏不平衡造成物流紊流，一个流紧密衔接难；需要考虑工艺装备服役期、工装设备周转不开等因素；现场、市场不确定性影响因素多，场景分析组合多，计划与执行匹配难；保交货期、降低库存（余材）、提高生产效率、降能耗等目标间有矛盾，需要综合考量、平衡和优化。

一体化计划调度充分吸收计划调度人员的丰富经验,总结成显性规则(策略);采用先进的计划调度算法,通过基于智能体仿真、局部运筹优化(搜索)、可理解/可进化的计划调整策略,充分发挥人(全局、经验直觉)、计算机(模型化、涌现化)优势。充分反映工艺、质量、设备的约束条件,综合考虑订单交期、生产效率、瓶颈环节、物料能源成本等多目标优化要素,提高计划调度的适应性、准确性水平,实现交货期、效率、成材率综合优化。一级计划调度与二级过程控制(纵向)一体化,通过信息交互,实时反映生产实绩与计划偏离情况,实时分析偏离原因,实时确定调整方案,实现生产过程动态管控。

(3) 全线物流跟踪

河冶科技的产线分为炼钢、锻钢、轧钢、成品四个分厂,工艺装备上百台,且不同品种产品的生产工艺路线不同,从原料到成品的物流路径繁多;由于场地和投资限制,物料进出工艺设备以及工艺设备间物料运输手动干预多,高温物料、在制品标识困难,因此全线物流在线跟踪难度很大。

综合自动采集、逻辑判断、条码跟踪、二级终端录入等手段,通过生产实绩自动归集,实现从原料到成品的物流跟踪。自动生成台账报表,及时反映订单完成和在制品库存变化。为成本核算提供原辅料、能源、人工、工装设备、质量等信息。同时汇集物流、过程变量数据、检化验结果,支持质量追溯。

(4) 精细化 KPI 管理

从物料、能耗、质量、效率等因素识别过程要求,基于河冶公司、分厂、工序分级过程 KPI,通过数据中心在线收集相关信息,计算不同时间频度的实际指标,考虑各种影响因素,进行分析评估,设定合理目标值,通过考核激励,不断改进提高,实现精细化管理。

参考文献

- [1] 殷瑞钰, 关于智能化钢厂的讨论——从物理一侧出发讨论钢厂智能化, 钢铁, 2017. 7
- [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, 中国科学: 技术科学, 2018. 2
- [3] 赵振锐, 河钢唐钢智能制造体系架构报告
- [4] 河钢集团、东北大学, 河钢典型产线智能制造顶层设计
- [5] 杜斌, 宝钢供应链优化报告
- [6] 德国工业4.0参考架构模型RAMI 4.0 (An architectural Model for Industrie 4.0)
- [7] 中国国家智能制造标准体系建设指南和智能制造系统架构IMSA (2018年版)
- [8] 日本工业价值链计划IVI工业价值链参考架构IVRA
- [9] TOGAF (The Open Group Architecture Framework) 体系架构研究方法
- [10] 美国工业互联网联盟IIC, The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture
- [11] 中国信息物理系统发展论坛 信息物理系统白皮书 2017年3月
- [12] 中国工业互联网产业联盟2017年11月发布了《工业互联网平台白皮书》
- [13] 欧盟钢铁工业集成智能制造 I²MSteel 报告
- [14] A. M. Meystel, J. S. Albus 等著, 冯祖仁 李人厚等译 智能系统—结构、设计与控制 (Intelligent Systems: Architecture, Design and Control), 北京: 电子工业出版社, 2005
- [15] 王柏村, 臧冀原, 屈贤明, 董景辰, 周艳红, 基于人-信息-物理系统(HCPS)的新一代智能制造研究, 中国工程科学 2018年 第20卷 第4期
- [16] 柴天佑, 丁进良, 流程工业智能优化制造, 中国工程科学, 2018, 第20卷 第4期
- [17] 中国工程院, 中国智能制造发展战略研究报告, 2018. 2
- [18] 工业互联网产业联盟(AII), 工业互联网体系架构(1.0版), 2016. 8
- [19] 周济, 周艳红, 王柏村, 臧冀原, 面向新一代智能制造的人-信息-物理系统

(HCPS), 中国工程院院刊, 2019, 8, 21

[20] SAP AG, The Open Group ArchitectureFramework (TOGAF™) Version 9,
2009