

钢铁工业数字化工厂建设与运营

——浅谈数字孪生技术的应用

袁磊^①

【摘要】钢铁行业正处于绿色低碳、高质量发展的关键时期，智能制造/数字工厂是关键抓手，本文讲述了数字化工厂设计、建造、交付、生产、运维的方法论，以及数字孪生技术在工程应用中发挥的重要作用，并分析了流程型制造企业多维度优化及全生命周期工业资产的价值化管理。

关键词：钢铁行业；数字工厂；数字孪生；建设与运营

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出数字中国战略。国务院印发的《“十四五”数字经济发展规划》明确提出，数字经济是继农业经济、工业经济之后的主要经济形态，发展数字经济是把握新一轮科技革命和产业变革新机遇的战略选择。钢铁行业作为工业的基础产业，经过改革开放 40 多年在充分市场竞争环境中的发展，具有较高的基础自动化、信息化水平。随着我国工业互联网创新发展战略深入实施，钢铁行业的头部企业继续走在工业智能化、数字化创新与发展的前列，担当起一代材料支撑一代文明的历史使命，以材料前沿创新推动引领先进制造业发展，充分发挥海量数据和丰富应用场景优势，促进数字技术与实体经济深度融合。按照《“十四五”数字经济发展规划》要求，钢铁行业需要推进数据质量提升工程，深入开展数据标准、数据治理和数据安全工作；推进行业数字化转型提升工程，培育智慧制造先行区，针对痛点、堵点制定数字化转型线路图，打通业务烟囱和数据竖井，实现“书同文，车同轨”；推动产业生态融

【作者简介】

袁磊 博士，宝钢工程技术集团公司党委委员、副总经理、CFO、CIO，中国宝武钢铁集团重点科研项目负责人，教授级高级工程师，正高级会计师，特级管理会计师。研究方向为钢铁工业数字化、价值化。

^① 在 2021 年第三届中央企业熠星创新创业大赛中，集团的“数字化设计交付、数字化钢厂建设及运营服务”项目，在 77 家央企 3340 个创新实践中脱颖而出，以总排名第 35 名的成绩在全央企两年一轮的大比武中荣获二等奖。

合，打造高效、透明、可控的智能制造和服务体系，赋能钢铁行业绿色低碳新发展和先进材料精品制造转型升级。

1 研究背景

钢铁行业正处于推进绿色低碳、高质量发展的关键时期，智能制造、数字工厂是实现两大目标的关键抓手，持续受到国家和行业的高度重视。钢铁行业面临着以数字化技术推动传统制造业转型升级的历史机遇与挑战，我们需要从钢厂全生命周期的视野来看智慧制造的实施路径和效果。钢铁工业基础设施及工厂建设是制造业建设的第一步骤，中国宝武钢铁集团技术创新体系的“三驾马车”是“研究开发、工程集成、持续改进”，这三环紧紧相扣。因此，制造业数字化转型中，从工厂设计建造、工程集成开始数字化转型是很重要的起点。面临的问题：一是这个过程中的数据如何流程化、平台化、标准化地全面完整采集；二是采集的数据如何形成知识存储和复用能力，为同类装备的系列化、参数化设计和价值化管理提供高效设计服务，进而为装备制造和工程建设服务；三是工程数据及装备投产后的数据，如何为工厂运营中装备状态点检诊断、备件管理的过程所使用，进而为生产过程中与装备相关的质量管理、节能降耗等环节使用。目前，我国流程型制造业，包括钢铁业，其资产全生命周期存在很多数据断点，或者叫数据黑洞，数据难以集成起来。数字化转型的最好方式是把全生命周期的数据按照标准集成起来，在数据中找到支持各种应用场景的规律、算法、模型来优化全生命周期的活动，使得效率更高、成本更低、风险更受控。这种把工厂全生命周期数据集成起来，通过大数据仿真及所产生算法模型支持动态过程优化、不断迭代升级的数字工厂建设和运营，是制造业数字化转型的重要方式。

从工程建设的普遍意义来看，当前工程建设行业产值占我国 GDP 相当大的比重，在我国经济转型发展中起着举足轻重的作用。然而这个行业仍然是非农产业中工作方式最传统、生产效率最低下的领域，在过去的几十年中，随着计算机技术的发展和普及，信息化推动制造业生产效率大大提高，而工程建设行业的生产效率却难以有实质性的提高，主要是因为工程行业和制造业业态的不同，制造企业生产的机器设备、流程、人员、场所相对固定，容易建设标准进行管控，而工程行业的每个合同项目都有特殊性，EPC（Engineering-Procurement-Construction）业务流程更具有开放性，需要在纷繁复杂的环境中利用数字化技术抓住各种来源的数据和价值管理内核，针对大规模的业务数据，建立柔性的快速响应机制，构建数据底座和数字资产。

据美国国家标准与技术研究院（NIST）统计，美国重要的工业设施在整个工厂生命周

期内，由于缺乏数据协同所带来项目成本的浪费为总项目成本的 5%~10%，其中超过 2/3 由业主承担，1/3 由工程相关单位承担。

基于 ICT 技术的工程建设数字化发展日新月异，工程建设数字化在项目质量、成本、进度、标准化等方面均效益显著。麻省理工学院（MIT）斯隆数字经济项目首席研究科学家乔治·韦斯特曼（George Westerman）在《引领数字化：让技术驱动商业转型》中判断，熟练应用新数字化技术的企业，利润比行业竞争对手要高出 26%，对数字化技术的更新与深度把控，将直接决定企业的竞争力。斯坦福大学集成设施工程中心基于 32 个应用 BIM（Building Information Modeling，建筑信息模型）技术的大型项目进行了分析。数据显示，模型化、数字化设计可以得到的回报如下：①消除 40%的未预料的工程变更；②降低成本估算时间的 80%；③造价成本误差控制在 3%以内；④通过碰撞检查减少 10%的合同造价；⑤缩短 7%的项目进度时间。工厂的数字化设计与交付不仅仅是建设方式的转变，更催生了工程建设、运营维护的全生命周期新技术和新管理模式，助推工厂装备从构建源头实现系列化、标准化、数字化，这是实现数字工厂正向建设与运营的必备前提条件。

当前在我国制造业数字化、网络化、智能化转型的工作中，探索数字化工厂建设及运营的技术与应用是一个重要任务，特别是数字孪生技术的工程应用。作为工业互联网的重要技术之一，数字孪生可以打通物理世界与数字空间，将实体数据与孪生模型集成融合，为优化物理空间提供决策支持和执行依据。全球行业分析师（Global Industry Analysts）报告，2020 年全球数字孪生市场规模为 46 亿美元，并将于 2026 年达到 287 亿美元。Garner 也连续 3 年将数字孪生列为未来十大战略趋势。从企业层面看，数字孪生技术在工业研发，智能工厂数字化设计、建造、交付、生产、运维及全生命周期工业资产全链条管理方面可以发挥重要作用。

谈到中国制造业的数字工厂建设，理论界和实务界都在积极探讨，但是众说纷纭，莫衷一是，数字工厂的标准建设也在热烈的讨论中。往往是实务界的不断探索与实践，为理论归纳与演绎提供支持。经过多年的实践探索，作者认为流程型制造业数字工厂的正向建设分为从初级到高级的四个阶段：第一阶段是数字化设计形成的数字工厂方案，第二阶段是 EPC 完成、数字化交付形成的静态数字工厂，第三阶段是实体工厂投产后在静态数字工厂虚拟空间中采集装备三维模型所对应的动态实绩数据而形成的的初级孪生工厂，第四阶段是由大量数据算法和模式驱动的高级孪生工厂。实践中也有逆向建设数字工厂的探索，即在实体工厂的基础上，运用扫描软件生成三维图像，在三维空间中集成实体工厂关键装备的运营数据，这种方法能够在一定程度上满足特定的管理需求，但是由于不能对现有设备进行体系化命名

并赋以设计参数、对接图纸等，所以不便进行从设计开始的资产全生命周期的优化和管理。

2 数字工厂的建设

正如青藏高原是中国的“水塔”，长江、黄河分别从青藏高原的唐古拉山脉、巴颜喀拉山脉发源。在数字化时代，企业数字河流的发源地在哪里呢？装备设计和工程建造的最初数据就是其最初的涓涓细流，而承载着交付标准和数据治理规则的交付平台就是数字化河流的最初河床，所以说数字钢厂的建设首先从数字化设计及交付开始，以终为始、以行为知。目前我国流程型制造业，如钢铁行业、石化行业、电力行业，其基于数字化设计和交付的数字化工厂的成功案例正处在一轮波澜壮阔的实践中，大部分处于第一、第二阶段，而进军第三阶段的数字工厂建设是凤毛麟角，第四阶段几乎是空白。作者所在的宝武钢铁集团在数字工厂建设中奋发创新，在第四阶段的探索中已经卓有成效。

2.1 设立工厂对象位号标识

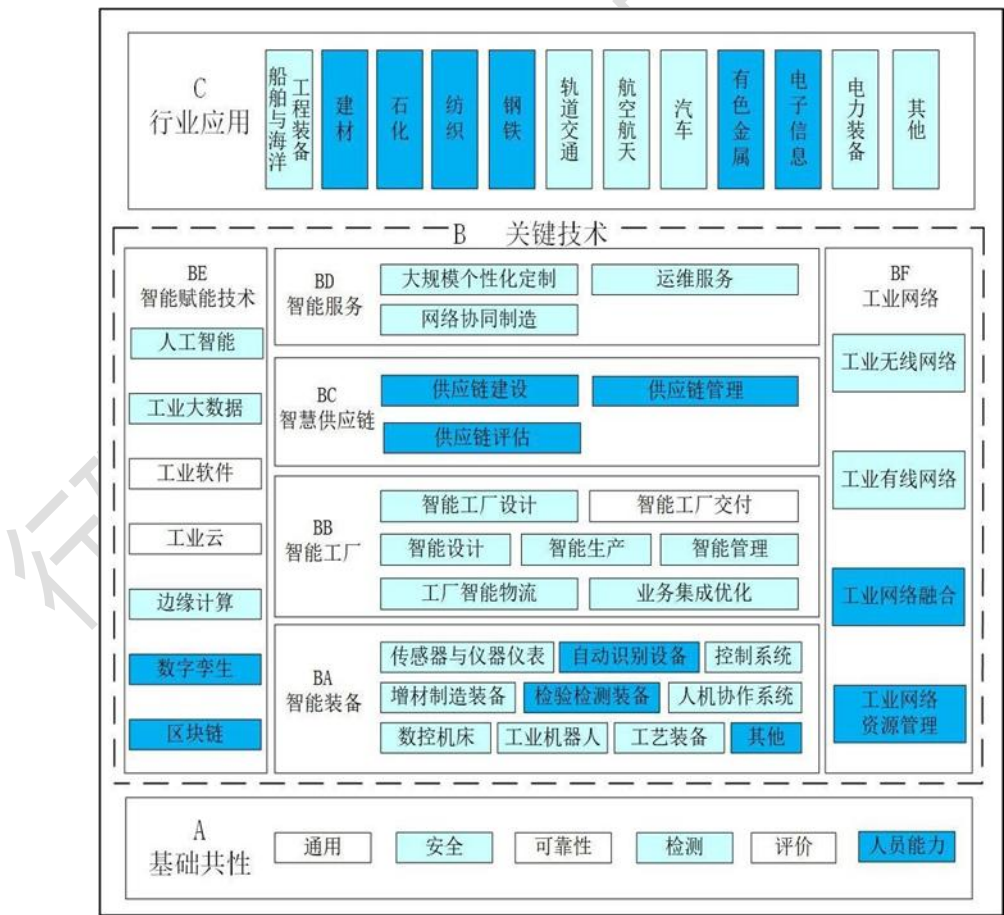
在缺乏最初顶层设计的情况下，长流程制造企业的多个信息系统根据自身业务管理特点，不断丰富完善本系统的代码设置，很好地完成了本职工作，但是各个系统之间代码相关性不大，造成数据不能贯通共享。这些在线运营的系统树大根深，蕴含着本专业深厚的知识体系。我们面临的难题是，如何在尊重各个体系的同时能够跨越数据竖井呢？围绕冶金产线装备的系列化、标准化、数字化，从工程设计源头出发，研究产线装备全生命周期各个阶段的数据形态和管理方法，分析项目管理、设备管理、资产备件管理各类系统的数据编码共性和差异性，以工业互联网方式重新定义工厂对象，探索通过描述制造业工艺逻辑功能对象来建立位号标识体系，以该位号体系建立对现有各个相互孤立信息系统的柔性连接关系。建设位号数据管理系统，标准化命名位号数据，在项目执行、竣工转固、生产运营等阶段将工程设计、项目管理、设备管理、采购供应链等运作体系串联起来，打通工程设计、采购、施工、调试、生产、运维、退役各个阶段的数据壁垒，实现产线装备全生命周期的“一码贯通”。这是企业重要的数据治理工作，技术难度和管理难度都很大。这个难题是横亘在制造业数据河流上的一道难以逾越的屏障，如果不能贯通，数据河流就是一段段的堰塞湖。

2.2 建立数字化设计交付标准、数字孪生标准

针对钢铁生产流程连续、工艺体系复杂、产品中间态多样化等特点，亟待制定钢铁行业智能制造标准。为更好推动钢铁工业数字工厂建设，我们正在积极牵头或参编冶金工业信息标准研究院和全国钢标准化技术委员会组织的钢铁行业智慧制造标准的研制工作。主要内容是建设以工厂对象位号标识码为核心的数字化设计交付标准、数字孪生标准等，以及钢铁行

业智能工厂评价导则、钢铁行业智能工厂评价方法等。钢铁行业数字工厂和数字孪生的建设发展具有重要意义。①解决智能化建设关键技术难题，促进关键技术持续优化发展。②促进提升我国钢铁制造核心竞争力。数字孪生系统可对制造过程进行虚拟仿真，在智慧的传承和累加中实现低成本试错、智能化决策和高效率创新，升级现有制造模式，打造柔性化、数字化和智能化的制造体系。③具备贯穿全生命周期的动态集成能力，通过设计数字孪生、生产数字孪生、运营数字孪生、服务数字孪生等过程优化，实现全生命周期资产管理。④形成示范效应，带动冶金行业智慧制造水平提高，进一步夯实全球领先地位。智能制造数字孪生行业标准的重点研制需求主要包括：数字孪生架构、技术要求与规范、全流程一体化协同管控技术要求、数据交互与接口规范、成熟度模型与评估方法、数字孪生装备通用要求、钢铁行业应用工艺参数在线检测与预测规范等。

在工业和信息化部与国家标准化委员会共同发布的《国家智能制造标准体系建设指南（2021版）》中，钢铁企业智能工厂在国家标准体系中的位置如图1所示。在图1中可以看到智能工厂/数字工厂及数字孪生的内容和相互关系。



在2018版上修改 在2018版上新增

图 1 钢铁企业智能工厂在国家标准体系中的位置

2.3 实现数字化设计与交付

工业设计和工程技术服务是个复杂的系统工程，其核心是对生产设施的支持。紧随其后的主机厂和施工方各管一方，EPC 工期时间跨度大，过程修改和调整多，经过多方交接最终交给业主运营方的资料文档是以卡车计量的，中间涉及大量的数据断点。理想的状态是建立一个基于工厂对象位号标识码的数字化集成交付平台，为工程建设参建方提供资料提交的统一门户。

(1) 数字化交付系统以工厂对象为核心，内置数字化交付的数据标准，接受设计、采购、施工承包商、设备供应商等数字化设计信息并集成关联，形成全周期渐进式、伴随式交付。

(2) 将 EPC 全过程各阶段产生的数据、资料、二维/三维模型等，经标准化整编后，以数字化的形式交付各类成果，实现建设期信息资产的整编和完整性交付，输出满足工厂运营维护、生产管理需求的数据和模型，为数字化工厂和智慧制造提供静态基础设施数据支持。

(3) 业主方与总包方、分包方一同构建数字化工具能力，实现多方资料高效传递及同步协同，随时随地获得项目最新信息，在线审阅 EPC 全过程的成果与进展，接收最早的设计意图和 3D 模型，把控进度、质量情况，做好费用管控。

(4) 研发数据模型解析技术，将众多类型 CAD/CAE 设计软件进行统一标准化输出，实现数字化交付和多终端轻量化、可视化应用。这里要特别说的是，我们当前要攻关的是如何解决数字化设计交付软件“卡脖子”问题，为国产自主工业软件的发展添能聚力。

2.4 建设数字孪生工厂

在传统工程行业交付实物工厂的基础上，工程公司将向业主单位进一步交付数字工厂。如前所述，数字工厂建设分为四个阶段三方面内容。

四个阶段包括：数字化工业设计和工程建设中的静态数据模型建设，生产运营中的动态数据采集及模型的建设，实现静态数据与动态数据的全生命周期握手，实现数字工厂与物理工厂的相互支持与优化。

三大方面内容为：一是基于装备三维模型，形成工艺参数设计可视化、产品模型可视化，

实现设备“黑箱”状态远程可视化、异常处理过程可视化等功能；实现三维空间的远程巡检运维。二是推进产线装备状态的全面精细化管理，基于工厂及装备三维模型、工艺机理模型、设备监测预警诊断模型等，提高设备状态预测、备件采购和库存优化能力，发挥数字化工艺设计和设备设计优势，在运营阶段采集现场数据，开发集成算法模型，逐步推进工业知识和经验的数据化、可视化、模型化，实现知识沉淀与传承。三是建设数字工厂智慧管理空间，实现对与装备相关的生产工艺、质量、能耗、环境、安全、成本等关键业务的感知，开发多应用场景的智慧分析与控制模型，以价值创造为导向，深度连接数据，挖掘数据资产价值，实现算法驱动、模型驱动能力的提升，不断提高工厂的产出效率和管理效率，构建更为柔性、灵活的大制造体系。推进跨时间、跨空间融合，构建人机一体的智慧体场景，以移动技术改变工作方式。

运用数字化设计交付、数字化钢厂建设及运营服务的关键技术，我们的数字钢厂示范产线已经在建设工期提前、现场点检替代率、减少备件库存、故障停机时间减少、产品质量提升等方面取得显著成效。

数字孪生是一系列技术的集成融合和创新应用。实时运行的数字工厂集成工程建设数据和工厂运营数据，建立数字模型并不断迭代，应用数字孪生技术研究生产全过程实时动态跟踪与回溯的双向真实映射，基于数字主线完成物理实体在数字空间的模型映射，并基于PLC（可编程逻辑控制器）及传感监测和数据传递，通过表达引擎、搜索引擎、计算引擎、推荐引擎，实现对物理实体的表达、诊断、预测、仿真、优化和控制，从而帮助钢厂优化生产和运维，建设工业大脑，成为学习型、智能化钢厂。

智慧制造中数字孪生技术的架构图如图 2 所示。

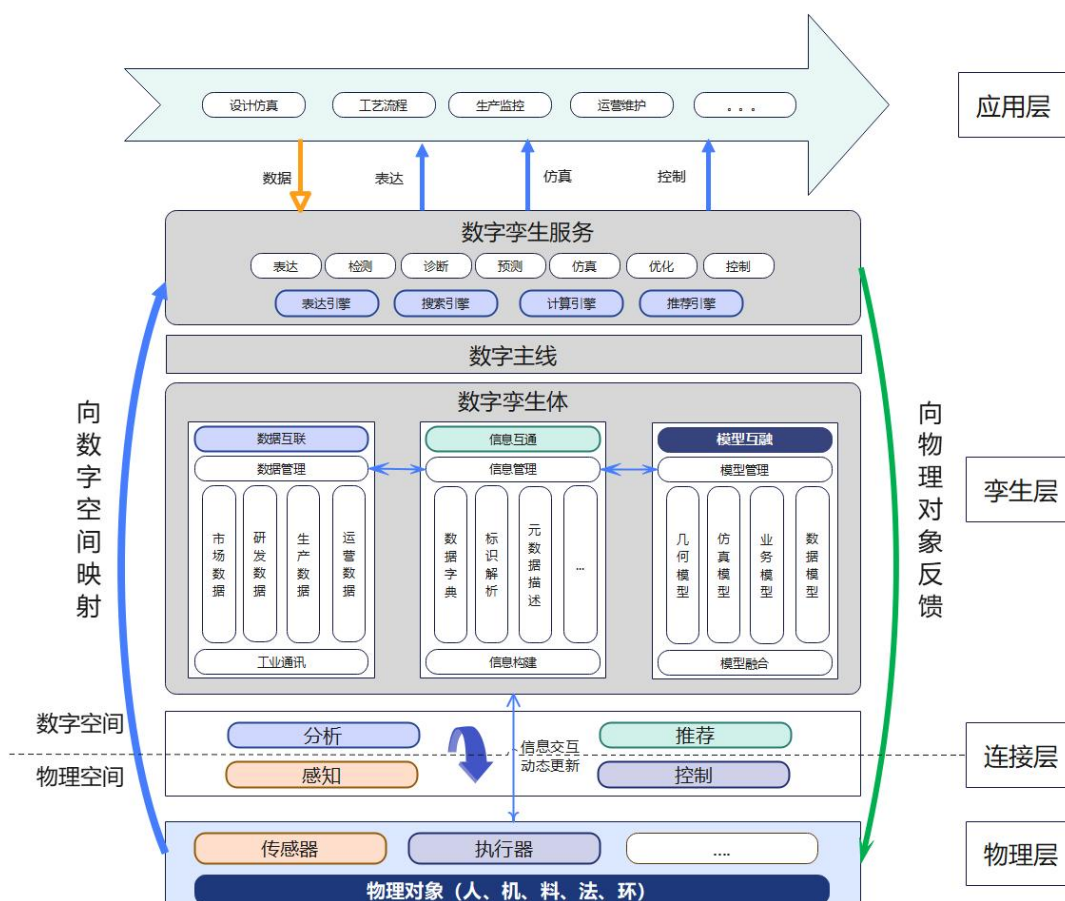


图2 数字孪生技术的架构图

2.5 建设工程造价库

一般来说，质量是生命，成本是寿命。制造企业的成本管理一直是个重要的话题，其中工程基建成本管理相比生产成本管理难度更大。工程建设行业产业链条长，从勘察设计、施工建设、监理、工程咨询，到工程管理、工程造价等多个细分领域，体量大，参与主体众多，业务过程复杂，从业人员多，工作方式传统，所以工程成本的精细化、标准化管理是非常有挑战性的，财务管理及固定资产入账等工作管理粒度较粗，会计科目较为简单。从工程设计和建设源头开始的数字化设计交付、数字化工厂建设和运营的发展日新月异，全周期数字化解决方案不仅仅转变了建设方式，更催生了与工程建设、运营维护相关的新的成本管理及全生命周期价值管理模式，助推冶金装备系列化、标准化、数字化、绿色化。关于工程建设的建筑安装部分，2020年住房和城乡建设部办公厅发布了《工程造价改革工作方案》，取消最高投标限价按定额计价的规定，逐步停止发布预算定额；鼓励企事业单位通过信息平台发布各自的人工、材料、机械台班市场价格信息，供市场主体选择。为此，大型工程及制造型企

业集团有责任积极推动行业工程造价的市场化改革，加强工程造价数据积累，加快建立国有资金投资的工程造价数据库，按地区、工程类型、建筑结构等分类发布人工、材料、项目等造价指标指数，利用大数据、人工智能等信息化技术为概预算编制提供依据。大型央企有责任积极响应国家号召，带头探索建立行业工程领域价值管理的造价库。

宝武钢铁集团在数字化时代创建价值管理体系，从设计源头开始，建设工程造价库，为集团建设工程投资控制及价值管理提供有力数据支持。集团通过对工程项目投资概算、招标采购、竣工结算数据的智能采集，实现工程造价数据的智能化对比分析，为投资决策和工程过程管理提供工程造价专业化服务。

以往传统工程行业交付实物工厂和几卡车图纸，数字化时代我们要做的是在这个基础上进一步交付数字工厂和工程造价价值模型，进而形成数字资产、金融资产。价值交付方面，一方面是工程造价，要体现工程设计和建设的高质量、低成本，另一方面要为交付生产使用后的精益运营提供数字化的工作环境，贯穿工程建设和生产运营活动的各个环节，全流程实现最小管理基准值的价值化管理创新。

生产过程精益运营水平决定了产品的变动成本，工厂装备的设计和建造水平决定了产品的固定成本。我们不仅通过数字化加快工程项目建设进度、提高质量、降低固定成本，还要实现工厂建设与生产运营双向联动，从资本投入产出的全生命周期系统性角度优化全成本，精准控制工程建设成本，联动优化工厂运营过程，降低变动成本。打通产品链、资产链、价值链，实现数字工厂从投入到产出的全生命周期效能提升，系统性推进碳排放的下降。

通过工业大脑、数字孪生功能的建设应用，从源头建立统一的工程数字化技术和标准体系，发挥设计、制造、运维、备件优化的数字化协同联动效应，将数字工厂工艺、模型融入设备设计和工程中，不断迭代升级。业数字孪生是多类数字化技术的集成融合，其中仿真建模与数据科学的融合应用是关键。云平台是数据集成、模型融合的关键载体，是数字孪生发展的重要基础设施，数字工厂要实现软件上云、流程上云、数据上云、标准上云、模型上云、价值上云。赋能智慧制造，提升钢铁行业数字化能力和水平。

3 数字工厂建设面临的挑战与思考

3.1 管理变革

数字世界展开了一幅“人+技术+数据”的精美画卷，对于大企业来说，管理甚至定义了技术的边界，而管理往往是短板，标准化、流程化、价值化管理能力不足，造成质量、成本、效率方面有很多需要改进的地方。因此，以管理变革与创新来推进制造业数字工厂建设

是非常重要的。数字化创新力的培育需要经历艰难的过程，需要人、观念、组织、流程等方面的转变。数字工厂的建设在本质上讲，需要人们转变思想观念，优化团队组织结构和知识结构，创新工作流程。领导者要有坚定的决心和行动，组织企业的人财物资源，投入资产链、产品链、价值链的数字化转型与重构中。这项工作有时没有引领者，不知道付出努力后是否能够成功，也就是直接效益产出不明确，这时就需要有数字化领导力体现出来的责任与担当。数字工厂的建设，需要推动基层组织变革、工作流程变革，打通界面贯通数据以提升管理效率，提高管理智能化水平，推进跨空间、跨时间融合，统一管理思想，统一业务逻辑，以同一平台、同一标准、同一文化，推动数字化创新从业务驱动向数据驱动转变。

3.2 要解决什么问题，如何挖掘需求

作者的一位长者曾说：对于任何信息化项目开发，业主决策层的主管领导对项目的需求分析和模块设计的把控能力，是一种稀缺资源。所以，业主的专业能力成为开发商对软件项目风险评估的首要事项。对于以数字技术与实体经济深度融合为主线的工业化和信息化融合，需求的挖掘与管理是最重要的入口，也就是说，我们要清楚到底要解决什么问题，哪些问题是主要问题，哪些问题是有可能在现有条件下能解决的问题。一线的业务经验和管理痛点很重要，往往需要由设计、研究、生产单位的管理者、技术首席、生产及设备管理一线人员组成联合团队进行共同攻关。时至今日，被称为“鞍钢宪法”的“两参一改三结合”的管理制度（干部参加劳动，工人参加管理；改革不合理的规章制度；工程技术人员、管理者和工人在生产实践和技术革新中相结合）对推动企业走新型的信息化与工业化融合的道路仍然有着深远的现实意义。

3.3 数据管理

工业制造业产生的数据很多，数据是公司的战略资产，但是数据资产化程度不高，那么如何管理好数据呢？第一，从业务、技术、管理等方面定义数据标准，目前“钢铁工业数据分类与编码”标准正在业界讨论编制；第二，增强数据治理的工具和实施能力，驱动企业构建跨越孤立数据的简单、可信、一致的数据管理系统；第三，构建全生命周期、实时感知业务、承载仿真与模型算法的数字孪生世界；第四，在数据网络安全前提下实现数据大范围共享，提升业务作业效率和质量。

3.4 要探索更科学的方法

现有的系统工程方法中，信息以非数字化的文件传递，工程图纸资料交付的是纸质文档

和 PDF 文件，其严重缺陷是不能传递文件内容之间的相互关系，缺乏系统性和重用性，这样造成企业最宝贵的大量原始数据躺在工程档案馆中，最终交付的产品和服务与最初的需求相去甚远。近阶段攻坚面临的难点是如何将图纸资料激活、结构化，以进行数据应用。而在需求牵引和技术发展的推动下，以模型为代表的信息技术在钢铁行业数字化工厂建设中将发挥重要的作用，基于模型的系统工程 MBSE（model-based systems engineering）从需求阶段开始即通过模型的不断演化驱动工艺设计、装备设计的不断优化，包括需求分析，功能分析，系统设计、确认及验证行为均由结构化数据或模型表达，并驱动联合仿真，以及产品设计、实现、测试、验证和确认环节。

3.5 要不断探索新技术、积累专业知识

当前国内数字化工厂建设大部分应用仍处于数据融合和实时诊断阶段，而宝武钢铁集团数字化工厂建设取得了突破性进展，建成了承载多方数据的三维数字空间，以及全生命周期数字工厂云平台，为主作业线示范工厂分析预测能力的提升提供了肥沃的数据土壤。在智慧制造实践中，集团不断探索新技术，不断丰富建模功能，提升建模精度，从横向丰富场景和纵向优化性能两方面不断提升水平，凭借深厚的行业细分领域经验，形成多场景数字孪生解决方案。但是在实际操作中，我们面临着许多短板和“卡脖子”问题，例如数字化设计及仿真软件基本依赖进口，而承载本行业知识的软件非常难得，且往往是由黑匣子保护。数字化设计及仿真软件的各种输出模型的解析与整合需要技术攻关；数字化设计、交付、数字化工厂孪生标准尚未形成体系，数字化设计融入现场实际作业流程不足，装备仿真、数字孪生、数据互联互通接口等方面的总体技术水平与国外先进制造业相比存在差异；与装备密切相关的生产工艺、质量、能耗等模型积累不够。

3.6 工业软件是短板

改革开放以来，钢铁领域工业软件有长足进步，特别是 ERP（企业资源计划）、SCM（供应链管理系统）、CRM（客户关系管理）很成熟，有良好应用；在制造过程中，生产管理系统/设备管理系统/质量管理等工业软件也很成熟。但是，我们在工业软件上还存在许多短板，如生产过程中流程模拟、排程优化方面的工业软件还不稳定，甚至是缺乏；而在工厂设计、体系建模与仿真、数字化工厂建设方面的工业软件虽然拥有雄厚的应用基础，但仍然尚处于探索发展阶段，需要我们不断将大量复杂的工业知识与数学、计算机技术相结合，通过建模与优化不断发掘、固化、传承工业知识，为智慧制造赋能，在智慧制造领域，恰恰蕴含着巨大的潜力和价值。

工业软件，一直是智能制造和工业互联网必不可少的武器，工业运行的逻辑是基于大量的工业化知识的，工业软件就是工业化知识的集大成者，大量复杂、精细的工业知识，越来越紧密地被编码化。国际上许多拥有先进制造业的国家，在数字化、网络化、智能化发展过程中，不断围绕制造发展工业软件，将工业优势转化为工业软件。纵观美国工业软件的发展道路，可以给我们些许启示。2008 年金融危机之后，美国开始反思过度依赖虚拟经济的产业政策，同时将制造业作为振兴美国经济的抓手。2009 年美国竞争力委员会发布的白皮书《美国制造业：依靠建模和模拟保持全球领导地位》，将建模、模拟和分析的高性能计算，视为维系美国制造业竞争力战略的王牌。2010 年美国发布的白皮书《高性能计算与美国制造业圆桌会议报告》指出，建模与仿真可以显著缩短设计周期。2011 年美国高端制造合作伙伴计划（AMP）重点发展三大领域：一是开发面向复杂系统的设计工具，二是开发模块化制造设备，三是提供开发式参与平台（围绕数字模拟技术的工具和应用软件平台）。2014 年美国商务部推出《振兴美国先进制造业》战略计划，确立优先发展的三大技术领域的战略，包括先进传感器、控制和制造平台技术（ASCPM），可视化、信息化和数字化制造技术（VIDM），以及先进材料制造技术（AMM）。新的使用数据和信息的方法能实现网络资产（cyber asset）和物理资产（physical asset）之间的无缝交互。可视化、信息化和数字化制造技术涵盖了从数字化设计、采购和交付，直至产品定制化生产的整个过程。先进材料制造技术主要发展数字孪生技术等。2018 年美国国家科学技术委员会发布《先进制造业美国领导力战略》报告，认为先进制造业是美国经济实力的引擎和国家安全的支柱，制造业应与研发、产品设计、软件开发和集成系统，以及为向市场提供有价值的产品或服务而开展的生命周期服务活动等价值链紧密结合。在国家战略层面，美国把科学计算和建模仿真作为服务于国家利益的关键技术，多年来一直持续推进。

依靠“政、产、学、研”的密切合作，中国国家制造力量在不断发展壮大。大学拥有强大的基础教育和研究能力、深厚数学基础，大学具有强有力条件与企业共同研发工业软件，成为工业软件最重要的摇篮。数字经济时代，紧密围绕钢铁行业关键环节，开展新一代信息技术与制造装备融合的集成创新和工程应用，政产学研用联合攻关，强化企业创新主体地位，促进各类创新要素向企业集聚，钢铁工业数字化工厂建设与运营任重道远。

参考文献

- [1] 国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知[EB/OL]. (2021-12-12) [2022-04-22]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817.htm.
- [2] 卢阳光, 马逢伯, 漆书桂. 数字孪生视角的数字工厂建设[J]. 信息技术与标准化, 2019 (6): 35-39.
- [3] 孙丽丽. 石化工程整体化管理模式的构建与实践[J]. 当代石油石化, 2018, 26 (12): 1-8.
- [4] 工业互联网产业联盟 (AII). 工业数字孪生白皮书 (2021) [R]. 北京, 工业互联网产业联盟, 2021.
- [5] 林雪萍. 工业软件简史[M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 2021.