

数字孪生产业技术白皮书

White paper for industrial technology of digital twins

(2022 版)

主编单位：山西省数字产业协会

2022 年 3 月

编写组

太原理工大学

5G+XR 联合实验室

通信时空网联合创新中心

5G+云+AI 联合创新中心

山西省工业与信息技术学校

山西益通电网保护自动化有限责任公司

山西晋盛达智能后勤服务有限公司

山西晋电电力科技有限公司

山西省虚拟现实产业技术研究院有限公司

陈莹 程忱 杜子尧 樊兆月 高英豪 郭海峰 郭浩 郭武胜 贾燕冰
贾振华 靳峰 李健 李晓亮 李洋 李瑶 李英娜 刘成林 马军伟 马腾
马万里 马卫 庞宇 荣榕 尚方信 邵同旭 申润州 王栋 王峰 王星
王志 徐陵惠 薛磊 薛义飞 杨艳丽 张东霞 张栋 张峰 张建亮 张凯
张巍 赵涛 郑慧（按姓氏拼音排序）

前言

2021 年 11 月 21 日，国家主席习近平在出席二十国集团领导人第十五次峰会时强调，要主动应变、化危为机，以科技创新和数字化变革催生新的发展动能。要加强数据安全合作，加强数字基础设施建设，为各国科技企业创造公平竞争环境。

数字化转型是我国经济社会发展的必由之路。当前，世界正处于百年未有之大变局，数字化是大势所趋，已成为全球发展的热点。作为数字化领域热点之一，数字孪生逐渐成为从工业到产业、从军事到民生各个领域的智慧新代表。在工业界，无论是智能制造还是工业 4.0，这些智能化体系都需要网络化和数字化来支撑。在中国，工业互联网已经支撑起了网络化，而数字孪生即将成为数字化的基石。

数字孪生技术作为推动实现企业数字化转型、促进数字经济发展的重要抓手，已建立了普遍适应的理论技术体系，并在产品设计制造、工程建设和其他学科分析等领域有着较为深入的应用。数字孪生解决方案能够为企业带来巨大价值，达到互联智能技术出现前无法企及的水平。

本白皮书力求以较为浅显易懂的方式对数字孪生相关定义、特征进行阐述，并针对当前数字孪生的技术热点、应用领域、产业情况和标准化工作进展进行了分析，以期与业界分享，共同推动我国数字孪生的技术创新与产业发展。

在编写过程中，本白皮书参考了相关的行业资料。由于编写组能力有限，如有错漏，还望读者不吝指出。

数字孪生技术与应用白皮书（2022 版）编写组

目录

前言.....	II
图表索引.....	VIII
一、 数字孪生概述	1
1.1 概念及背景	1
1.2 数字孪生系统参考架构	3
1.3 数字孪生标准化体系	4
1.3.1 数字孪生基础共性标准	5
1.3.2 数字孪生关键技术标准	6
1.3.3 数字孪生工具及平台标准	13
1.3.4 数字孪生测评标准	14
1.3.5 数字孪生安全标准	15
1.3.6 数字孪生行业应用标准	16
1.4 数字孪生关键技术	17
1.4.1 建模与仿真	17
1.4.2 虚拟现实	18
1.4.3 物联网	19
1.4.4 云边协同计算	20
1.4.5 大数据	20
1.4.6 人工智能	21
1.4.7 区块链	22

1.4.8 第五代移动通信技术	23
1.5 数字孪生相近领域	24
1.5.1 计算机仿真	24
1.5.2 信息物理系统	25
1.5.3 增强现实和混合现实	26
1.5.4 元宇宙	27
二、 产业发展概述	30
2.1 应用发展方向	30
2.2 产业发展驱动	49
2.2.1 政策支持	49
2.2.2 硬件提升	51
2.2.3 数据积累	52
2.2.4 算法进化	54
2.2.5 标准化体系建设	56
三、 典型应用领域：数字孪生制造	59
3.1 数字孪生制造发展现状	59
3.2 数字孪生制造技术架构	59
3.3 数字孪生制造典型应用场景	61
3.4 数字孪生制造典型应用案例	63
四、 典型应用领域：数字孪生城市	67
4.1 数字孪生城市发展现状	67
4.2 数字孪生城市技术架构	68

4.3 数字孪生城市典型应用场景	71
4.4 数字孪生城市典型应用案例	74
五、 典型应用领域：数字孪生电力系统	79
5.1 数字孪生电力系统发展现状	79
5.2 数字孪生电力系统技术架构	80
5.3 数字孪生电力系统典型应用场景	81
5.4 数字孪生电力系统典型应用案例（一）	83
5.5 数字孪生电力系统典型应用案例（二）	86
5.6 数字孪生电力系统典型应用案例（三）	90
六、 其他领域典型应用案例	95
6.1 智慧水利数字孪生 IOC 系统	95
6.2 数字孪生可视化智慧监狱监控平台	101
6.3 化工园区数字孪生解决方案	103
6.4 数字孪生智慧工厂方案	105
6.5 电力企业变电站通信机房可视化解决方案	109
七、 产业现有挑战	113
7.1 行业数据	113
7.2 领域知识库	113
7.3 数字孪生安全	116
7.4 商业模式	117
7.5 人才培养	118
八、 产业未来发展趋势	121

8.1 技术发展趋势	121
8.2 标准化趋势	121
8.3 应用趋势	122
8.4 数字孪生的未来	122

图表索引

图 1-1 产品生命周期管理的概念设想.....	2
图 1-2 数字孪生系统通用参考架构.....	3
图 1-3 数字孪生标准体系结构.....	4
图 1-4 数字孪生基础共性标准及主要内容.....	5
图 1-5 数字孪生关键技术相关标准.....	6
图 1-6 物理实体相关标准及主要内容.....	7
图 1-7 虚拟实体相关标准及主要内容.....	8
图 1-8 孪生数据相关标准及主要内容.....	9
图 1-9 连接与集成相关标准及主要内容.....	11
图 1-10 服务相关标准及主要内容.....	12
图 1-11 数字孪生工具及平台相关标准及主要内容.....	13
图 1-12 数字孪生测评相关标准及主要内容.....	14
图 1-13 数字孪生安全相关标准及主要内容.....	15
图 3-1 数字孪生制造参考技术架构.....	60
图 3-2 VR 药厂生产线.....	64
图 3-3 数字化生产线.....	65
图 4-1 数字孪生城市参考技术架构.....	68
图 4-2 数字孪生智慧城市.....	75
图 4-3 城市安全监测.....	77
图 5-1 数字孪生电力系统参考技术架构.....	80

图 5-2 系统第一视角	84
图 5-3 模拟训练系统界面	85
图 5-4 XRTM 教育培训安全仓	85
图 5-5 配电系统管理	87
图 5-6 实时数据展示	88
图 5-7 高精度数字孪生热电厂	92
图 5-8 高精度人员定位	93
图 6-1 气象监测	96
图 6-2 电站运行监测	98
图 6-3 水量调度监测	99
图 6-4 水情遥测系统监测	100
图 6-5 资源整合	102
图 6-6 精细化网格管理	103
图 6-7 监控中心	104
图 6-8 生产管理监测	105
图 6-9 工艺流程模拟	106
图 6-10 实时数据显示	107
图 6-11 设备属性查询	107
图 6-12 监控报警数据查询	108
图 6-13 设备告警管理	108
图 6-14 设备信息可视化管理	109
图 6-15 资产可视化	111

图 6-16 空间可视化	111
图 6-17 机房管线可视化.....	112
图 6-18 运营管理流程化.....	112
附表 1 近年数字孪生相关政策	124
附表 2 数字孪生标准化相关活动	128

一、数字孪生概述

1.1 概念及背景

通俗来讲，数字孪生是指针对物理世界中的物体，通过数字化的手段构建一个在数字世界中一模一样的实体，借此来实现对物理实体的了解、分析和优化。从技术角度而言，数字孪生集成了建模与仿真、虚拟现实、物联网、云边协同以及人工智能等技术，通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态，通过指令来调控物理实体对象的行为，通过相关数字模型间的相互学习来进化自身，合理有效地调度资源或对相关设备进行维护。

数字孪生（Digital Twin，简称 DT）这一概念在制造领域的使用，最早可追溯到美国国家航空航天局的阿波罗项目。在该项目中，美国国家航空航天局需要制造两个完全一样的空间飞行器，留在地球上的飞行器被称为“孪生体”，用来反映（或做镜像）正在执行任务的空间飞行器的状态。在飞行准备期间，被称为“孪生体”的空间飞行器被广泛应用于训练；在任务执行期间，利用该“孪生体”在地球上的精确仿太空模型进行仿真试验，并尽可能精确地反映和预测正在执行任务的空间飞行器的状态，从而辅助太空轨道上的航天员在紧急情况下做出最正确的决策。从这个角度可以看出，“孪生体”实际上是通过仿真实时反映对象的真实运行情况的样机或模型。

2002 年 10 月在美国制造工程协会管理论坛上，当时的产品生命周期管理（Product Lifecycle Management，简称 PLM）咨询顾问 Michael

Grieves 博士提出了数字孪生最早的概念模型。但是，当时“数字孪生”一词还未被正式提出，Grieves 将这一设想称之为“PLM 的概念设想（Conceptual Ideal for PLM）”，如图 1-1 所示。

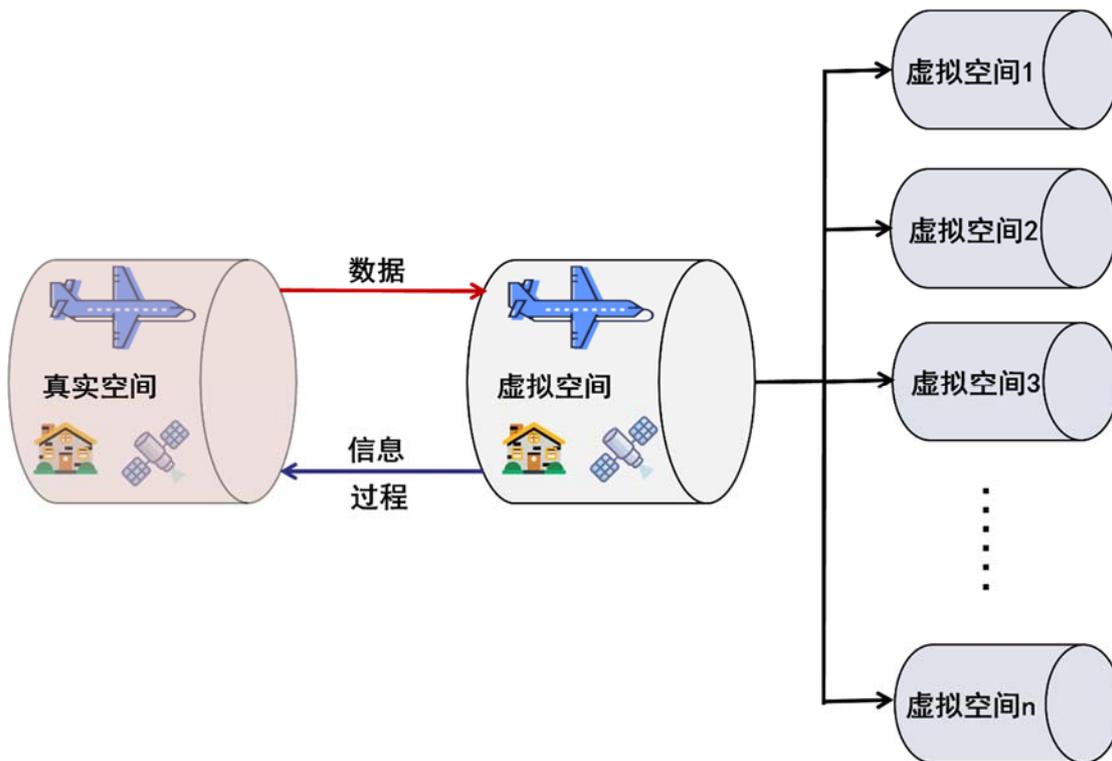


图 1-1 产品生命周期管理的概念设想

2009 年，美国空军实验室提出“机身数字孪生（Airframe Digital Twin）”概念，将数字孪生概念应用于航空航天制造领域。2010 年，美国国家航空航天局在《建模、仿真、信息技术和处理》和《材料、结构、机械系统和制造》两份技术路线图中直接使用了“数字孪生”这一名称，并将其定义为“集成了多物理量、多尺度、多概率的系统或飞行器仿真过程”。2011 年，Michael Grieves 博士在其所著的《智能制造之虚拟完美模型：驱动创新与精益产品》中正式定义了数字孪生概念，并一直沿用至今。

1.2 数字孪生系统参考架构

一个典型的数字孪生系统包括用户域、数字孪生、测量与控制实体、现实产业物理域和跨域功能实体共五个层次，如图 1-2 所示。

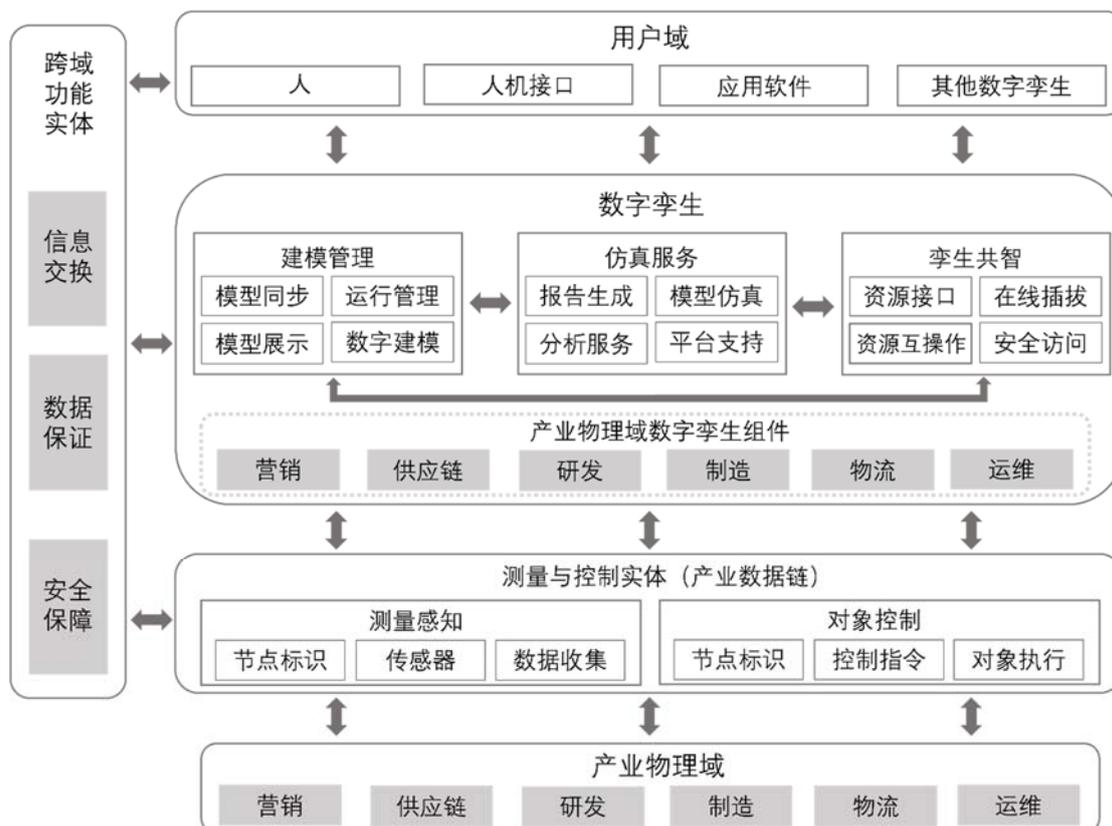


图 1-2 数字孪生系统通用参考架构

第一层是使用数字孪生的用户域，包括人、人机接口、应用软件以及其他相关的数字孪生。

第二层是与物理实体目标对象对应的数字孪生。它是反映物理对象某一视角特征的数字模型，并提供建模管理、仿真服务和孪生共智三类功能。建模管理涉及物理对象的数字建模与展示、与物理对象模型同步和运行管理。仿真服务包括模型仿真、分析服务、报告生成和平台支持。孪生共智涉及共智孪生体等资源的接口、交互操作、在线插拔和安全访问。建模管理、仿真服务和孪生共智之间传递物理对象的状态感知、诊断和预测所需的信息。

第三层是产业物理域数字孪生组件，主要是指包含营销、供应链、研发、制造、物流、运维等全产业链各环节的各种物理实体对象以及相关的业务活动。

第四层是处于测量控制域、联接数字孪生和物理实体的测量与控制实体，实现物理对象的状态感知和控制功能。

第五层是与数字孪生对应的物理实体目标对象所处的产业物理域。测量与控制实体和产业物理域之间有测量数据流和控制信息流的传递。

测量与控制实体、数字孪生以及用户域之间的数据流和信息流传递，需要信息交换、数据保证、安全保障等跨域功能实体的支持。信息交换通过适当的协议实现数字孪生之间交换信息。安全保障负责数字孪生系统安保相关的认证、授权、保密和完整性。数据保证与安全保障一起确保数字孪生系统数据的准确和完整。

1.3 数字孪生标准化体系

数字孪生标准体系由数字孪生各项子标准体系组成，数字孪生标准体系结构如图 1-3 所示。

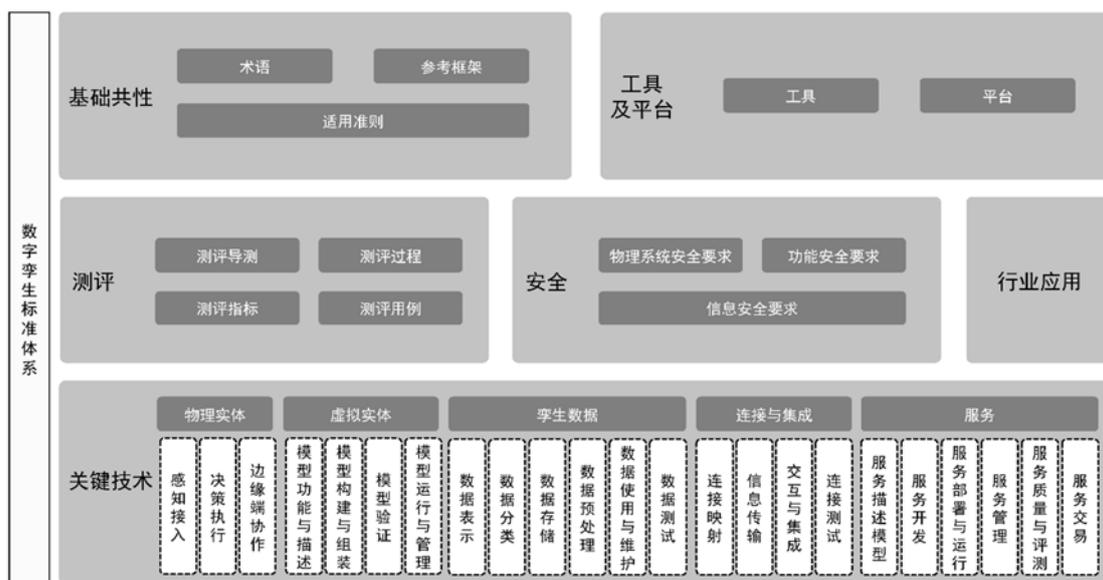


图 1-3 数字孪生标准体系结构

1.3.1 数字孪生基础共性标准

数字孪生基础共性标准主要规范数字孪生的基础性和通用性标准，相关标准及主要内容如图 1-4 所示。

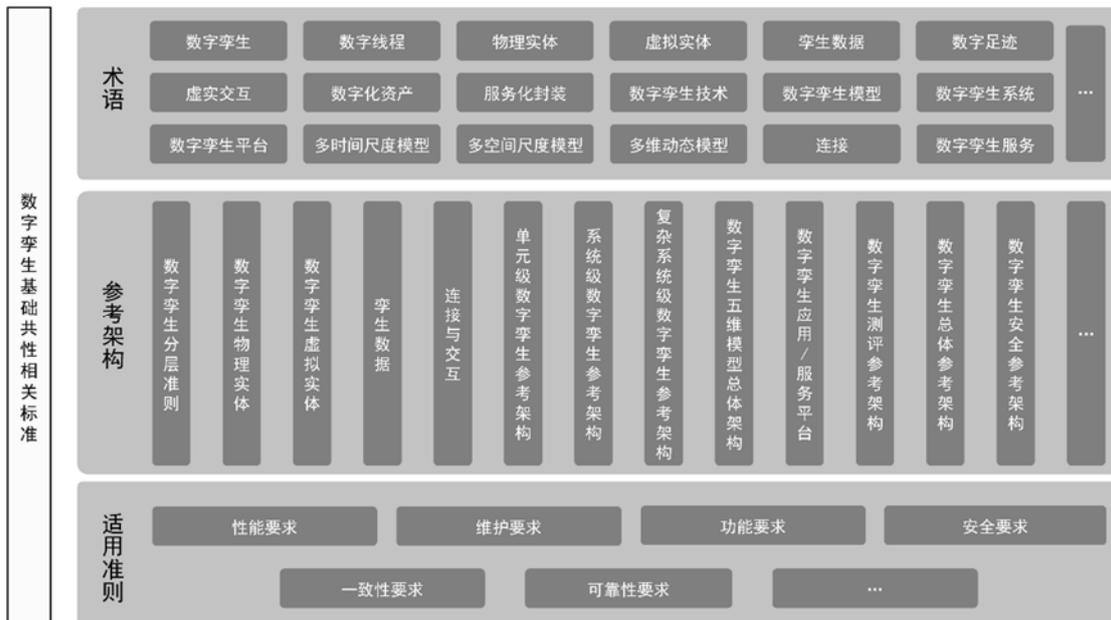


图 1-4 数字孪生基础共性标准及主要内容

(1) 术语标准

定义数字孪生有关概念及相应缩略语，可以帮助使用者理解数字孪生概念，并为其他各部分标准的制定提供支撑。数字孪生相关术语包括数字孪生主要概念定义、关键技术以及相近概念等，例如数字孪生、孪生数据、数字线程、数字孪生模型、数字孪生系统、数字孪生技术、数字孪生平台、多空间尺度模型、多时间尺度模型、多维动态模型、物理实体、虚拟实体、连接、数字孪生服务、服务化封装、数字足迹、数字化资产、虚实交互等。

(2) 参考架构标准

数字孪生按照物理实体的功能及结构可分为单元级数字孪生、系统级数字孪生和复杂系统级数字孪生 3 个层级。参考架构标准对上述

3 个层级的分层规则、数字孪生体系架构以及各部分参考架构进行规范，帮助使用者明确数字孪生分层方法、体系结构以及各部分之间的关系。参考架构标准包括数字孪生分层准则、数字孪生总体参考架构、单元级数字孪生参考架构、系统级数字孪生参考架构、复杂系统级数字孪生参考架构、数字孪生五维模型总体架构、数字孪生物理实体、数字孪生虚拟实体、孪生数据、连接与交互、数字孪生应用 / 服务平台、数字孪生安全参考架构和数字孪生测评参考架构等。

（3） 适用原则

规范数字孪生的适用性要求，帮助使用者决策实体是否适用数字孪生，包括功能要求、性能要求、安全要求、可靠性要求、维护要求、一致性要求（包括可测性要求）等。

1.3.2 数字孪生关键技术标准

数字孪生关键技术标准用于规范数字孪生实施过程中涉及的关键技术要求，如图 1-5 所示。

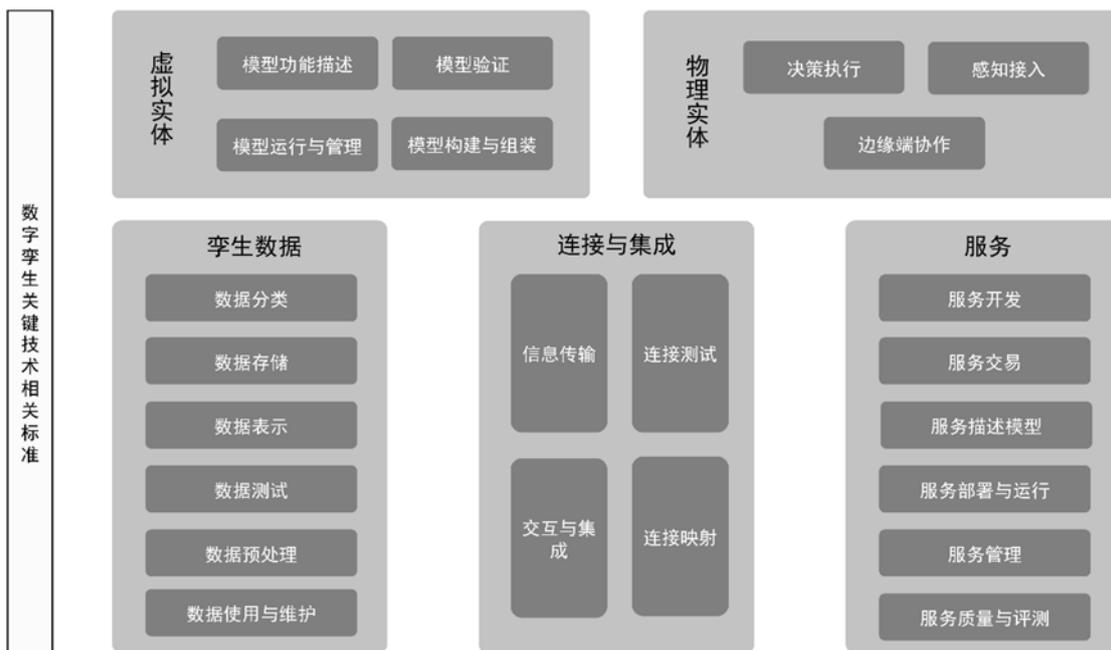


图 1-5 数字孪生关键技术相关标准

1. 物理实体标准

物理实体标准主要对物理实体的感知接入、决策执行、边缘端协作方面进行规范，相关标准及主要内容如图 1-6 所示，包括以下几个方面：

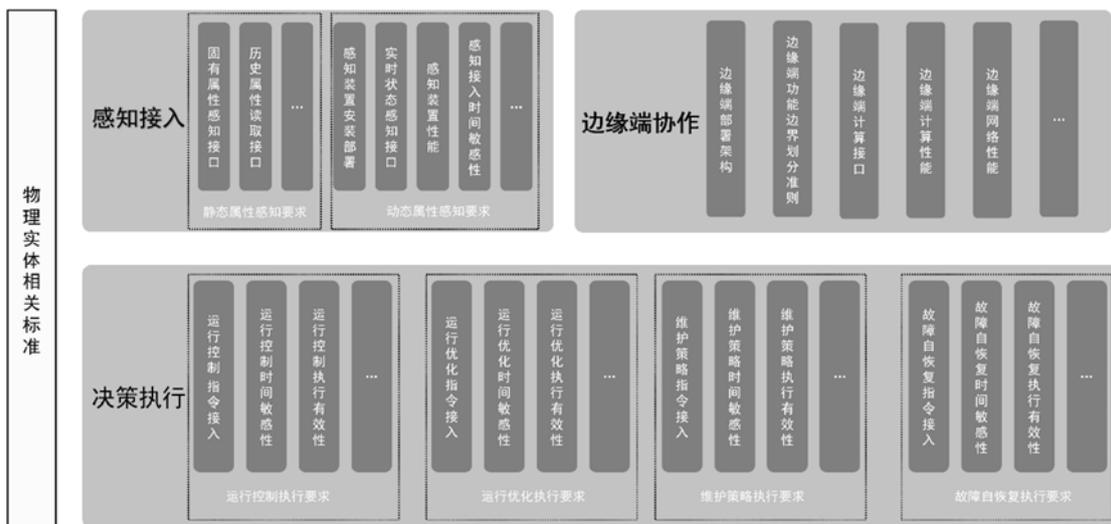


图 1-6 物理实体相关标准及主要内容

（1）感知接入标准

规范数字孪生系统中人、机、物、环境等物理实体的感知接入相关技术要求，保证物理实体信息获取与上传的规范性和兼容性，包括固有属性感知接口、历史属性读取接口等静态属性感知要求，以及实时状态感知接口、感知装置安装部署、感知装置性能、感知接入时间敏感性等动态属性感知要求。

（2）决策执行标准

规范物理实体的运行控制、运行优化、维护策略、故障自恢复的决策执行相关技术要求，包括控制指令格式、指令校验、指令注入权限等控制指令接入要求；响应时间、执行效率、时序同步等时间敏感性要求；执行精度、执行稳定性、执行反馈等执行有效性要

求。

（3）边缘端协作标准

规范数字孪生系统物理实体边缘端协作相关技术要求，包括边缘端部署架构、边缘端功能边界划分准则、边缘端计算接口、边缘端计算性能、边缘端网络性能等。

2. 虚拟实体标准

虚拟实体标准主要对模型功能、模型描述、模型构建、模型组装、模型验证、模型运行、模型管理进行规范，相关标准及主要内容如图 1-7 所示，包括以下几个方面：

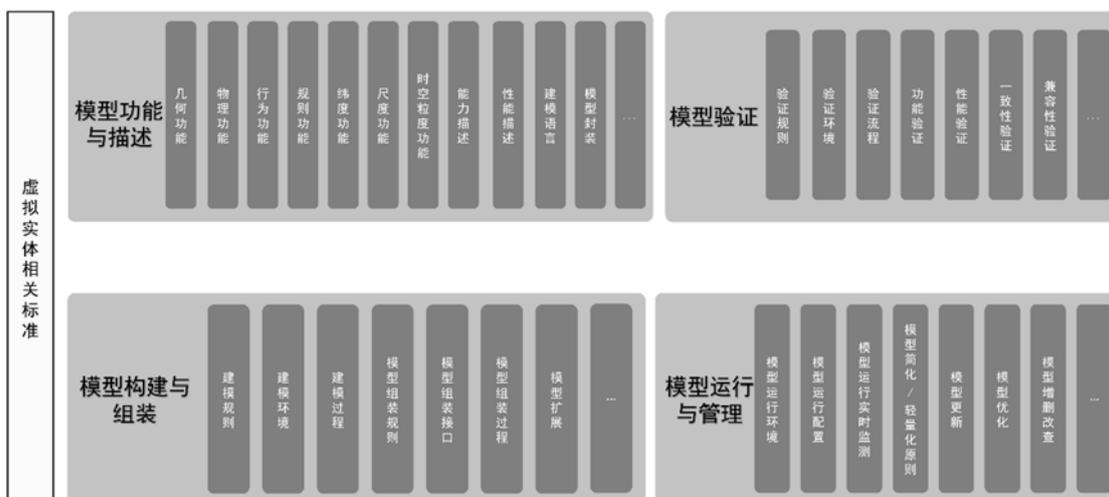


图 1-7 虚拟实体相关标准及主要内容

（1）模型功能与描述标准

规范几何、物理、行为、规则多维多时空尺度模型的功能与描述相关技术要求，包括几何功能、物理功能、行为功能、规则功能、维度功能、尺度功能、时空粒度功能、能力描述、性能描述、建模语言、模型封装、模型输入输出描述等。

（2）模型构建与组装标准

规范几何、物理、行为、规则多维多时空尺度模型的构建与组装

相关技术要求，包括考虑模型性能的建模规则、建模环境、建模过程、模型组装规则、模型组装接口、模型组装过程、模型扩展等。

（3） 模型验证标准

规范几何、物理、行为、规则单个模型与组装模型的分层级验证相关技术要求，包括单个模型与组装模型的验证规则、验证环境、验证流程、功能验证、性能（包括粒度、质量、准确性、可用性、易用性等）验证、一致性验证、兼容性验证等。

（4） 模型运行与管理标准

规范模型的运行与管理相关技术要求，包括模型运行环境、模型运行配置、模型运行实时监测、模型简化 / 轻量化原则、模型更新、模型优化、模型增删改查等。

3. 孪生数据标准

数据是驱动数字孪生系统运行的根本。孪生数据标准主要是对数字孪生系统涉及的孪生数据表示、分类、存储、预处理、使用与维护、测试进行规范，相关标准及主要内容如图 1-8 所示。

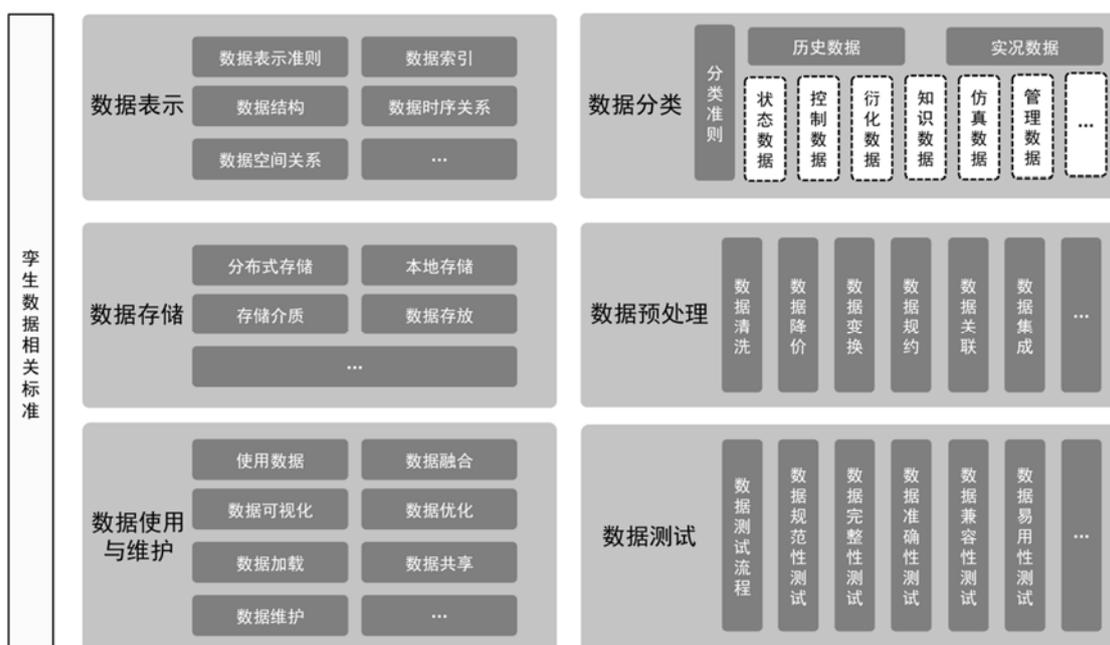


图 1-8 孪生数据相关标准及主要内容

（1） 数据表示标准

规范数字孪生数据表示涉及的相关技术要求，包括孪生数据表示准则、数据索引、数据结构、数据时序关系、数据空间关系等。

（2） 数据分类标准

规范数字孪生系统涉及到的孪生数据类别，包括分类准则、历史数据和实况数据，其中历史数据和实况数据包含物理实体、虚拟实体和服务产生的状态数据、控制数据、衍化数据、知识数据、仿真数据、管理数据等。

（3） 数据存储标准

规范孪生数据存储相关技术要求，包括分布式存储、本地存储、存储介质、数据存取等。

（4） 数据预处理标准

获取到物理实体、虚拟实体和服务的原始数据之后，需要对其进行预处理操作，相关技术要求包括数据清洗、数据降阶、数据变换、数据规约、数据关联、数据集成等。

（5） 数据使用与维护标准

规范孪生数据使用与维护过程中涉及的相关技术要求，包括使用环境、数据融合、数据可视化、数据优化、数据加载、数据共享、数据维护等。

（6） 数据测试标准

规范数据测试相关技术要求，主要包括数据测试流程、数据规范性测试、数据完整性测试、数据准确性测试、数据兼容性测试、数据

易用性测试等。

4. 连接与集成标准

连接与集成标准主要对数字孪生物理实体、虚拟实体、服务、数据库的数据连接与集成进行规范，相关标准及主要内容如图 1-9 所示。

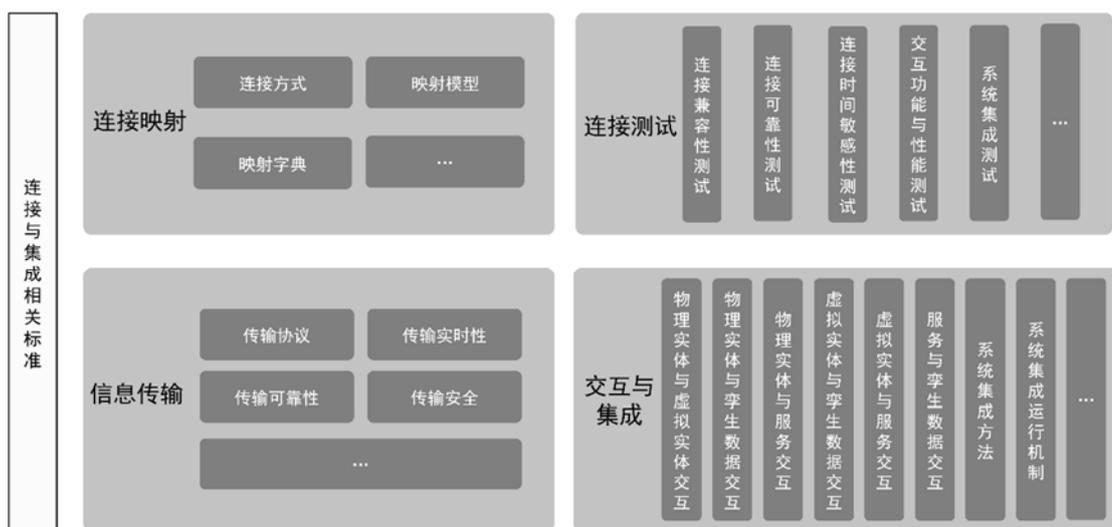


图 1-9 连接与集成相关标准及主要内容

(1) 连接映射标准

规范数字孪生中物理实体、虚拟实体、服务与数据库的连接映射相关技术要求，包含连接方式、映射模型、映射字典等。

(2) 信息传输标准

规范物理实体、虚拟实体、服务与数据库之间的数据传输相关技术要求，包括传输协议，传输实时性，传输可靠性，传输安全等。

(3) 交互与集成标准

规范物理实体、虚拟实体、服务与孪生数据之间的交互与集成相关技术要求，包括物理实体与虚拟实体交互、物理实体与孪生数据交互、物理实体与服务交互、虚拟实体与孪生数据交互、虚拟实体与服务交互、服务与孪生数据交互、系统集成方法、系统集成运行机制等。

（4） 连接测试标准

规范物理实体、虚拟实体、服务与数据库之间的连接测试相关技术要求，包括连接兼容性测试、连接可靠性测试、连接时间敏感性测试、交互功能与性能测试、系统集成测试等。

5. 服务标准

服务标准主要对服务描述模型、服务开发、服务部署、服务运行、服务管理、服务质量与评测、服务交易进行规范，相关标准及主要内容如图 1-10 所示。

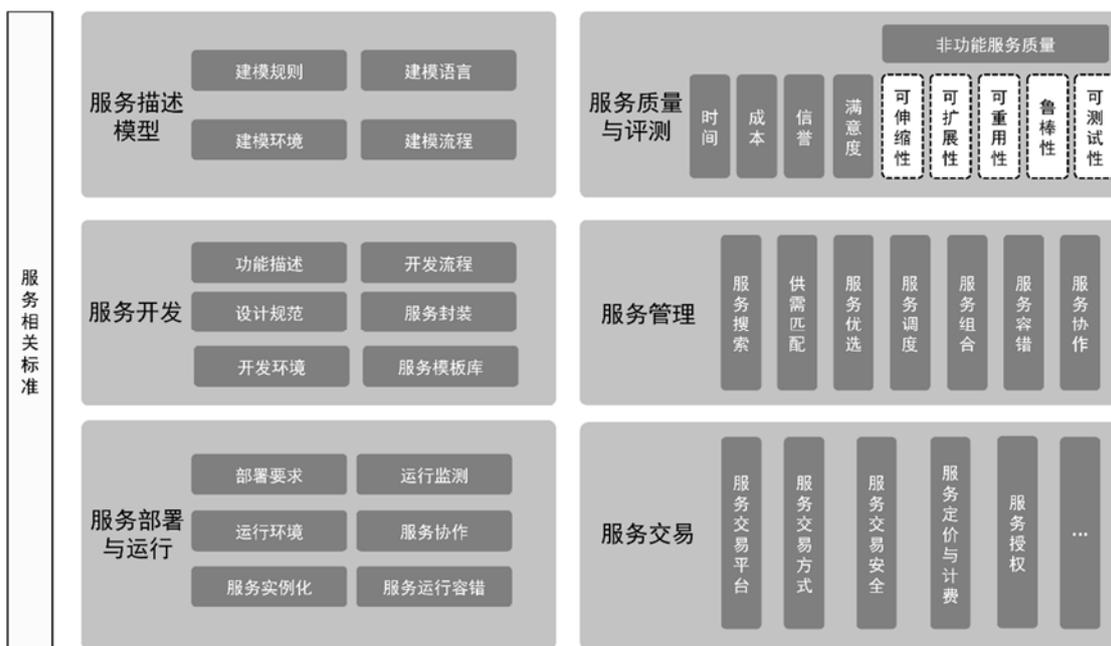


图 1-10 服务相关标准及主要内容

（1） 服务描述模型标准

规范数字孪生中的服务描述模型建模相关技术要求，包括建模规则、建模环境、建模语言、建模流程等。

（2） 服务开发标准

规范服务开发的相关技术要求，包括功能描述、设计规范、开发环境、开发流程、服务封装、服务模板库等。

（3） 服务部署与运行标准

规范数字孪生中服务部署及运行相关技术要求，包括部署要求、运行环境、服务实例化、运行监测、服务协作、服务运行容错等。

（4） 服务管理标准

规范服务全生命周期过程管理相关技术要求，包括服务搜索、供需匹配、服务优选、服务调度、服务组合、服务容错、服务协作等。

（5） 服务质量与评测标准

规范数字孪生的服务质量与评测相关技术要求，包括时间、成本、信誉、满意度、非功能服务质量（包括可伸缩性、可扩展性、可重用性、鲁棒性、可测试性）等。

（6） 服务交易标准

规范数字孪生的服务交易相关技术要求，包括服务交易平台、服务交易方式、服务交易安全、服务定价与计费、服务授权等。

1.3.3 数字孪生工具及平台标准

数字孪生工具及平台标准用于对数字孪生实现过程中涉及的软硬件工具及平台进行规范，相关标准及主要内容如图 1-11 所示。



图 1-11 数字孪生工具及平台相关标准及主要内容

(1) 工具标准

规范数字孪生中涉及的软硬件工具相关技术要求，包括工具功能、工具性能、工具运行环境、工具二次开发、工具集成、工具使用与维护等。

(2) 平台标准

规范数字孪生实现过程涉及的平台相关技术要求，包括平台功能、平台性能（包括平台基本性能、可靠性、扩展性、安全性）、平台运行环境、平台使用和维护、平台接口与集成、平台安全等。

1.3.4 数字孪生测评标准

数字孪生测评标准用于对数字孪生体系的测试要求与评价方法进行规范，相关标准及主要内容如图 1-12 所示。

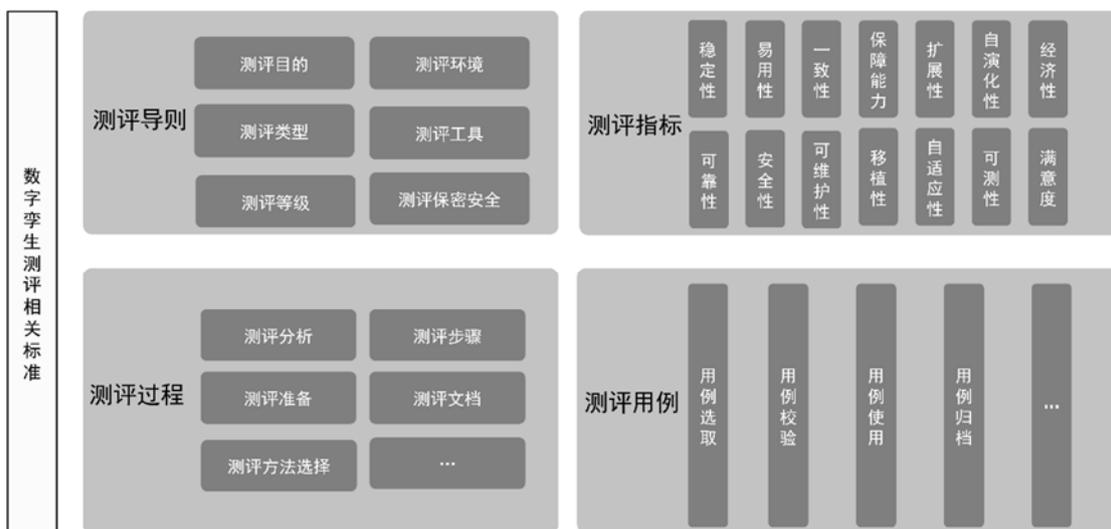


图 1-12 数字孪生测评相关标准及主要内容

(1) 测评导则

规范数字孪生体系的测试与评价过程的基本要求，包括测评目的、测评类型、测评等级、测评环境、测评工具、测评保密安全等。

（2） 测评过程标准

规范数字孪生体系的测试与评价过程相关技术要求，包含测评分析、测评准备、测评方法选择、测评步骤、测评文档等。

（3） 测评指标标准

规范数字孪生体系测试与评价过程涉及的各类指标要求，例如稳定性、可靠性、易用性、安全性、一致性、可维护性、保障能力、移植性、扩展性、自适应性、自演化性、可测性、经济性、满意度等。

（4） 测评用例标准

规范数字孪生体系的测试与评价用例相关技术要求，包括用例选取、用例校验、用例使用、用例归档等。

1.3.5 数字孪生安全标准

数字孪生安全标准用于规范数字孪生体系安全，相关标准及主要内容如图 1-13 所示。



图 1-13 数字孪生安全相关标准及主要内容

（1）物理系统安全要求

规范数字孪生体系中物理系统的安全要求，包括物理系统安全风险、电气系统安全、机械系统安全、本质安全、功能安全等。

（2）功能安全要求

规范数字孪生中的设计、制造、安装、运维等过程的安全功能相关技术要求，包括孪生系统安全风险、孪生系统安全功能设计、孪生系统安全完整性等级评估等。

（3）信息安全要求

规范数字孪生体系中涉及的各类信息安全相关技术要求，包括孪生系统信息安全风险分析、孪生数据安全、孪生系统网络安全等。

1.3.6 数字孪生行业应用标准

依据数字孪生基础共性标准、关键技术标准、工具及平台标准，测评标准和安全标准，结合各行业或领域自身需求与特点，制定数字孪生机床、数字孪生车间、数字孪生卫星、数字孪生发动机、数字孪生工程机械装备、数字孪生城市、数字孪生船舶、数字孪生医疗等具体行业的应用标准。在数字孪生使用前，应用对象、功能需求、适用性评价等行业应用标准能够帮助企业决策数字孪生的适用性；在数字孪生使用过程中，技术要求、工具标准、平台标准等结合行业 / 领域特性的应用标准能够指导数字孪生在各领域的应用落地；在数字孪生使用后，测试要求、评价方法、安全要求、管理要求等行业应用标准能够指导数字孪生的评估及优化方法，保证其使用安全性、稳定性、

可用性与易用性。

1.4 数字孪生关键技术

1.4.1 建模与仿真

建模，就是建立模型，就是为了理解事物而对事物做出的一种抽象，是对事物的一种无歧义的书面描述。建立系统模型的过程，又称模型化。建模是研究系统的重要手段和前提。凡是用模型描述系统的因果关系或相互关系的过程都属于建模。而数字孪生的目的或本质是通过数字化和模型化，用信息换能量，以更少的能量消除各种物理实体、特别是复杂系统的不确定性。所以建立物理实体的数字化模型或信息建模技术是创建数字孪生、实现数字孪生的源头和核心技术，也是“数化”阶段的核心。

仿真是指利用模型复现实际系统中发生的本质过程，并通过对系统模型的实验来研究已存在的或设计中的系统，又称模拟。这里所指的模型包括物理的和数学的，静态的和动态的，连续的和离散的各种模型。所指的系统也很广泛，包括电气、机械、化工、水力、热力等系统，也包括社会、经济、生态、管理等系统。只要模型正确，并拥有了完整的输入信息和环境数据，就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数。

从技术角度看，建模和仿真是一对伴生体：如果说建模是模型化人类对物理世界或问题的理解，那么仿真就是验证和确认这种理解的正确性和有效性。所以，数字化模型的仿真技术是创建和运行数字孪

生、保证数字孪生与对应物理实体实现有效闭环的核心技术。

1.4.2 虚拟现实

虚拟现实（Virtual Reality，简称 VR）技术可以将系统的制造、运行、维修状态呈现出超现实的形式，对复杂系统的各个子系统进行多领域、多尺度的状态监测和评估，将智能监测和分析结果附加到系统的各个子系统、部件中，在完美复现实体系统的同时将数字分析结果以虚拟映射的方式叠加到所创造的孪生系统中，从视觉、听觉、触觉等各个方面提供沉浸式的虚拟现实体验，实现实时且连续的人机互动。

VR 技术能够帮助使用者通过数字孪生系统迅速地了解和学习目标系统的原理、构造、特性、变化趋势、健康状态等各种信息，并能启发其改进目标系统的设计和制造，为优化和创新提供灵感。通过简单地点击和触摸，不同层级的系统结构和状态会呈现在使用者面前，对于监控和指导复杂装备的生产制造、安全运行及视情维修具有十分重要的意义，提供了比实物系统更加丰富的信息和选择。

目前很多互联网企业都在不断推出或升级数据呈现的空间或软件包，工业数据分析可以在借鉴或借用这些数据呈现技术的基础上，加强数据分析可视化的性能和效果。

在现有的工业数据分析中，往往忽视数据呈现的研究和应用，随着日趋复杂的数据分析任务以及高维、高实时数据建模和分析需求，需要强化对数据呈现技术的关注，这是支撑构建数字孪生系统的一个

重要环节。

1.4.3 物联网

物联网（Internet of Things，简称 IoT）是指通过信息传感设备，按照约定的协议，把任何物品与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。通俗地讲，物联网就是“物物相连的互联网”，它包含两层含义：第一，物联网是互联网的延伸和扩展，其核心和基础仍然是互联网；第二，物联网的用户端不仅包括人，还包括物品，物联网实现了人与物品及物品之间信息的交换和通信。

物联网作为新一代信息技术的高度集成和综合运用，具有渗透性强、带动作用大、综合效益好的特点，是继计算机、互联网、移动通信网之后信息产业发展的又一推动者。物联网的应用和发展，有利于促进生产生活和社会管理方式向智能化、精细化、网络化方向转变，极大提高社会管理和公共服务水平，催生大量新技术、新产品、新应用、新模式，推动传统产业升级和经济发展方式转变，并将成为未来经济发展的增长点。

物联网是数字孪生的载体，数字孪生是物联网的底层逻辑。数字孪生和物联网是相互成就的关系。一方面，物联网为数字孪生的数据流和信息流提供参考架构。同时，数字孪生是物联网发展应用的新阶段。数字孪生之所以变得越来越受欢迎，是因为它能够显著降低物联网生态系统复杂性并提高效率。

1.4.4 云边协同计算

云计算（Cloud Computing）是一种计算资源交付模型，集成了各种服务器、应用程序、数据和其它资源，并通过互联网以服务的形式提供这些资源。通常对资源进行了虚拟化。边缘计算（Edge Computing）是一种分布式处理和存储的体系结构，它更接近数据的源头。例如，带有视觉处理功能的摄像头、通过蓝牙向手机发送数据的可穿戴医疗设备等都利用到了边缘计算。与云计算相比，边缘计算更靠近终端，存在诸多优良特性，因此，边缘计算和云计算的混合使用通常被认为是构建企业级物联网解决方案的最佳实践，这种方案便是云边协同计算。

对于边缘计算来说，不同于把大量的资源整合的云计算平台，边缘云平台更是一个分布式的平台，因此云边协同的特征是边缘计算的主要特征之一，而云边协同包含了各种协议和功能，涉及到了云计算的方方面面，因此在边缘计算的发展过程中，云边协同的功能实现情况成了影响边缘计算的重要因素。

“共智”的目标是实现不同数字孪生智慧的交换和共享，其隐含的前提是单个数字孪生内部各构件的智慧首先是共享的。云边协同计算则为数字孪生内部和之间进行智慧共享提供了可能。

1.4.5 大数据

大数据（Big Data）是指以容量大、类型多、存取速度快、应用价值高为主要特征的数据集合。目前正快速发展为对数量巨大、来源

分散、格式多样的数据进行采集、存储和关联分析，从中发现新知识、创造新价值、提升新能力的新一代信息技术和服务业态。大数据必须采用分布式架构，对海量数据进行分布式数据挖掘，因此必须依托云计算的分布式处理、分布式数据库和云存储、虚拟化技术。大数据的主要特征为：数据量巨大，数据类型多，数据流动快，数据潜在价值大。

在数字孪生中，物联网的一项重要作用就是收集来自物理世界的的数据，这种数据往往具备大数据特征。数字孪生使用这些数据的一种模式就是通过机器学习技术，在物理机理不明确、输入数据不完备的情况下对数字孪生的未来状态和行为进行预测，尽管这种预测未必准确，特别在数字孪生的发育期，机器学习时间尚不充足。但相比一无所知，这种预测仍富有价值。而且随着数字孪生的进化，这种预测会越来越逼近真实世界，使得数字孪生拥有“先觉”能力。

1.4.6 人工智能

人工智能（Artificial Intelligence，简称 AI）是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能的应用可能会出现在工业互联网的各个环节，尤其是在数据应用的环节。利用机器学习和预测分析算法，工业大数据可以在预测、维护等用例场景中产生价值（如预测和预防制造机器、飞机、汽车、火车、风力涡轮机、输油管道等出现的机器故障或组件故障），包括生产过程早期的产品质量预测和产品质量优化（如钢铁

行业），连续生产过程中的关键情况预测、预防（如化学工业），产品寿命预测（如汽车发动机、风力涡轮机部件、电池等）以及能源需求预测、价格预测等。

数字孪生正在与人工智能技术深度结合，促进信息空间与物理空间的实时交互与融合，以在信息化平台内进行更加真实的数字化模拟，并实现更广泛的应用。将数字孪生系统与机器学习框架学习结合，数字孪生系统可以根据多重的反馈源数据进行自我学习，从而几乎实时地在数字世界里呈现物理实体的真实状况，并能够对即将发生的事件进行推测和预演。数字孪生系统的自我学习除了可以依赖于传感器的反馈信息，也可以通过历史数据，或者是集成网络的数据学习，在不断的自我学习与迭代中，模拟精度和速度将大幅提升。

1.4.7 区块链

区块链（Blockchain）技术是利用块链式数据结构来验证与存储数据、利用分布式节点共识算法来生成和更新数据、利用密码学的方式保证数据传输和访问的安全、利用由自动化脚本代码组成的智能合约来编程和操作数据的一种全新的分布式基础架构与计算方式。区块链的核心技术包括：（1）点对点分布式技术；（2）共识机制；（3）智能合约；（4）非对称加密技术。

区块链本质上是一种解决信任问题、降低信任成本的信息技术方案。区块链技术的应用，可以取缔传统的信任中介，颠覆传统上存在了几千年的中心化旧模式，在不需要中心化信任中介的情况下，解决

陌生人间的信任问题，大幅降低信任成本。

数字孪生是典型的数字资产。在众多数字孪生“共智”的过程中，必然存在数字资产的交易。区块链提供的去中心化的交易机制能很好地支持分布、实时和精细化的数字资产交易，可以成为数字孪生最佳的资产交易媒介。同时它也能引入信任度，持续保持透明度，很好地支持数字资产交易生态系统的参与主体，包括数字资产的采集、存储、交易、分发和服务各个流程的参与者。最后，去中心化数据交易网络也需要在可扩展性，交易成本和交易速度方面有突破，才能加速推动数字资产的商用化。

1.4.8 第五代移动通信技术

第五代移动通信技术（5th Generation Mobile Communication Technology，简称 5G）是具有高速率、低时延和大连接特点的新一代宽带移动通信技术，是实现人机物互联的网络基础设施。

5G 作为一种新型移动通信网络，不仅要解决人与人通信，为用户提供增强现实、虚拟现实、超高清视频等更加身临其境的极致业务体验，更要解决人与物、物与物通信问题，满足移动医疗、车联网、智能家居、工业控制、环境监测等物联网应用需求。最终，5G 将渗透到经济社会的各行业各领域，成为支撑经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键新型基础设施。

数字孪生是 5G 物联网时代的一个重要场景应用。5G 网络的场景应用包括：增强移动宽带、海量机器类通信、高可靠&低时延通信。

海量的应用场景和模式都是在这三者的基础上衍生出来的。增强移动宽带可以全面提升网络速度，增强网络体验；海量机器类通信可以链接更多的智能终端，实现万物互联；高可靠&低时延通信将应用于自动驾驶、移动医疗等精度要求高的行业。数字孪生便是上述应用场景的衍生之一。

数字孪生是 5G 赋能产业链上的重要一环。数字孪生作为 5G 衍生应用，加速了物联网的成型和物联网设备数字化，这与 5G 三大场景之一的万物互联需求强耦合。此外，数字孪生还是 5G 推动工业互联网发展过程中的助燃剂，5G 时代数字孪生不可或缺。

1.5 数字孪生相近领域

1.5.1 计算机仿真

计算机仿真技术是以相似原理、信息技术、系统技术及相应领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。计算机仿真技术具有经济、安全、可重复和不受气候、场地、时间限制的优势，被称为除理论推导和科学试验之外的人类认识自然、改造自然的第三种手段。

仿真是将包含了确定性规律和完整机理的模型转化成软件的方式来模拟物理世界的一种技术。只要模型正确，并拥有了完整的输入信息和环境数据，就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数。如果说建模是模型化人类对物理世界或问题的理解，那么仿真就是验证

和确认这种理解的正确性和有效性。所以，数字化模型的仿真技术是创建和运行数字孪生、保证数字孪生与对应物理实体实现有效闭环的核心技术。

数字孪生不仅仅是物理世界的镜像，也要接受它的实时信息，更要反过来实时驱动它，甚至进化为先知、先觉。

1.5.2 信息物理系统

信息物理系统（Cyber Physical Systems，简称 CPS）作为计算进程和物理进程的统一体，是集成计算、通信与控制于一体的下一代智能系统。信息物理系统通过人机交互接口实现和物理进程的交互，使用网络化空间以远程的、可靠的、实时的、安全的、协作的方式操控一个物理实体。

信息物理系统包含了将来无处不在的环境感知、嵌入式计算、网络通信和网络控制等系统工程，使物理系统具有计算、通信、精确控制、远程协作和自治功能。它注重计算资源与物理资源的紧密结合与协调，主要用于一些智能系统上如设备互联，物联传感，智能家居，机器人，智能导航等。

CPS 是在环境感知的基础上，深度融合计算、通信和控制能力的可控可信可扩展的网络化物理设备系统，它通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实时交互来增加或扩展新的功能，以安全、可靠、高效和实时的方式检测或者控制一个物理实体。

在构成上，CPS 和数字孪生都涉及物理世界和信息世界。通过信

息物理交互和控制，CPS 和数字孪生都实现了对物理世界的精确管理和操作。然而，对于信息世界，CPS 和数字孪生各有侧重点。数字孪生更侧重于虚拟模型，从而在数字孪生中实现一对一映射，而 CPS 强调 3C（计算、通信和控制）功能，从而导致一对多映射关系。在 CPS 和数字孪生的功能实现方面，传感器和执行器支持物理世界和信息世界之间的交互以实现数据和控制交换。相比之下，模型在数字孪生中起着重要的作用，有助于根据各种数据解释和预测物理世界的行为。从层次结构的角度看，二者均可分为单元级、系统级和 SoS 级。但是，由于它们具有不同的侧重点，CPS 和数字孪生在每个级别上具有不同的组成部分。

1.5.3 增强现实和混合现实

增强现实(Augmented Reality, 简称 AR)及混合现实(Mix Reality, 简称 MR) 等技术在近几年发展迅速，而且在以上各个场景中都有重要应用价值。

1. 增强现实

增强现实，也被称为扩增现实。通过电脑技术，将虚拟的信息应用到真实世界，真实的环境和虚拟的物体实时地叠加到了同一个画面或空间中。增强现实提供了在一般情况下，不同于人类可以感知的信息，不仅展现了真实世界的信息，而且将虚拟的信息同时显示出来，两种信息相互补充、叠加。

2. 混合现实

混合现实指的是合并现实和虚拟世界而产生的新的可视化环境。MR 是一组技术组合，不仅提供了新的观看方法，还提供了新的输入方法，而且所有方法可以相互结合，从而推动创新。MR 是虚拟现实技术的进一步发展，该技术通过在现实场景呈现虚拟场景信息，在现实世界、虚拟世界和用户之间搭起一个交互反馈的信息回路，以增强用户体验的真实感。

无论是虚拟现实、增强现实还是混合现实，在数字孪生的各个场景中都有巨大的应用潜力。人类通过屏幕与数字世界交互既不直观、不真实，而且交互深度受到巨大限制。这三种技术提供的深度沉浸的交互方式让人类与数字世界的交互方式与物理世界交互方式类似，使数字化的世界在感官和操作体验上更加接近物理世界，让“孪生”一词变得更为精妙。但在数字世界中，人类又具有超人般的特异功能，可以无限驾驭数字世界，例如穿墙而过、隔空取物、时空穿越、变换大小等，这将数字孪生的应用推向了极致。

1.5.4 元宇宙

元宇宙（Metaverse）一词可以追溯到尼尔·斯蒂芬森和他的反乌托邦赛博朋克小说《雪崩》。小说描绘了一个庞大的虚拟现实世界——“元界”，在这里，人们控制数字化身来相互竞争以提高自己的地位。这部小说于 1992 年发行，与威廉·吉布森的《神经漫游者》一起被认为是该类型的经典，后者描述了一种称为矩阵的虚拟现实数据空间。“元界”在英文原著中叫做“Metaverse”。它由 Meta 和 Verse

两个词根组成，Meta 表示“超越”、“元”，Verse 表示“宇宙 universe”。

元宇宙以虚拟现实技术为核心，扩展现实（Extended Reality，简称 XR）作为实现元宇宙的重要技术路径。XR 是 AR/VR/MR 等各种形式的虚拟现实技术的总称。它分为多个层次，包括通过有限传感器输入的虚拟世界到完全沉浸式的虚拟世界。

数字孪生，将使物联网连接对象扩展为实物及虚拟孪生，将实物对象空间与虚拟对象空间融合，成为虚实混合空间，物联网将发展成新一代数字孪生网，有可能成为第三代互联网应用，乃至成为元宇宙的核心基础。

“元宇宙”概念的兴起为数字孪生提供了更为集成的应用场景和开阔的实验空间，并通过多维赋能现存产业领域，推动产业链、价值链、创新链迭代升级，加快商业模式创新与潜在市场培育，从而加快催生出一系列新技术、新业态、新模式，进一步提高社会生产效率，促进传统产业迭代升级。

数字孪生不是元宇宙，它们是两个不同的概念，后者也不是前者的高级形态。数字孪生更多地关注于物理实体，而元宇宙聚焦的是人类和人类社会。不过人们可以充分利用元宇宙的映射技术完成对现实世界的映射孪生，使两者实现最大限度地交互。

元宇宙结合了互联网、游戏、社交网络和虚拟技术等，所有这些技术融合在一起，造就了一种全新的、身临其境的数字生活。想要构建一个与现实世界高度贴合甚至是超越现实世界的“元宇宙”，前提

需要大量的数据模拟和强大的算力来 1:1 创建一个虚拟世界，关键的核心则是数字孪生，而数字孪生也会成为构建元宇宙的核心技术之一，甚至可以说是元宇宙的基石。数字孪生技术的成熟度，决定了元宇宙在虚实映射与虚实交互所能支撑的完整性。

二、产业发展概述

2.1 应用发展方向

数字孪生是近年来兴起的非常前沿的新技术，或者说最近几年才走入民用领域的一项技术。对数字孪生的简单理解就是利用物理模型并使用传感器获取数据的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，以反映相对应的实体的全生命周期过程；数字孪生技术可以理解为通过传感器或者其他形式的监测技术，将物理实体空间借助于计算机技术手段镜像到虚拟世界的一项技术。可以说，在未来，物理世界中的各种事物都将可以使用数字孪生技术进行复制。

在工业领域，通过数字孪生技术的使用，将大幅推动产品在设计、生产、维护及维修等环节的变革。在对数字孪生技术研究探索的基础上，可以预见其即将在以下几大领域中落地，并将推动这些产业更快、更有效地发展，如五维模型在卫星/空间通信网络、船舶、车辆、发电厂、飞机、复杂机电装备、立体仓库、医疗、制造车间、智慧城市、智能家居、智能物流、建筑、远程监测、人体健康管理领域中产生巨大影响与改变。

1. 卫星/空间通信网络

近年来，随着卫星技术的快速发展，卫星通信技术及其应用取得了较大进步。空间信息网络作为卫星网络的进一步延伸，将卫星网络、各种空间航天器和地面宽带网络联系起来，形成智能化体系，具有巨大的研究意义和应用前景。空间信息网络由于节点及链路动态时变、

网络时空行为复杂、业务类型差异巨大的特点，导致在网络模型构建、网络节点管控、动态组网机理、时变网络传输等方面对网络建设提出了重大挑战。将数字孪生技术引入空间通信网络构建中，参照数字孪生五维模型，构建数字孪生卫星（单元级）、数字孪生卫星网络（系统级）及数字孪生空间信息网络（复杂系统级），搭建数字孪生空间信息网络管理平台，可实现卫星的全生命周期管控、时变卫星网络优化组网及空间信息网络构建与优化。

卫星作为高成本的复杂航天产品，其设计、总装等过程一直存在数字化程度低、智能水平低等问题，同时，卫星入轨后，其健康监控与维修维护也是一项难以解决的技术难题。数字孪生卫星，即可很好的完成卫星的全生命周期管控，解决上述难题。

卫星网络节点高速运行、链路动态变化，对卫星网络拓扑结构时变重构提出了极高的要求。构建数字孪生卫星时变网络，是借助高拟真的网络模型和相关协议及算法，结合卫星当前状态数据、历史数据及相关专家知识库，建立与实际卫星网络镜像映射的虚拟网络，并以此实现对网络行为的高精度仿真，实时辅助卫星网络拓扑的构建。

在卫星时变网络组网的基础上，整合相关资源，搭建数字孪生空间信息网络平台，能够实现对整个网络状态与信息的实时监控，并借助相关协议模型、算法及仿真工具，对网络场景与通信行为进行仿真，进而对空间信息网络实现路由预设置、资源预分配、设备预维护，实现空间信息网络的构建与优化。

2. 船舶

面对全球制造业产业转型升级趋势，设计能力落后、运维管控数字化水平低、配套产业发展滞后等问题仍制约着船舶行业的发展。将数字孪生技术与船舶工业相结合，参照数字孪生五维模型，开展基于数字孪生的船舶设计、制造、运维、使用等全生命周期一体化管控，是解决上述问题的有效手段。

针对上述问题将数字孪生技术引入船舶设计中，大量的船舶数字孪生数据能够支持知识数据库的建立，并辅助相关的建模工作；采用数字孪生建模技术及模型融合理论，能够为各学科模型的构建与融合提供解决思路；数字孪生的高拟真仿真环境，可以提高设计验证能力、加快设计速度、提高设计精度。

船舶建造的质量影响着产品的最终性能、质量、研制周期及成本。目前，船舶建造正在向数字化建造转型，但仍存在着原型设计与工艺设计脱节、零件管理复杂、二维工艺文件直观性差等问题。搭建基于数字孪生的船舶智能建造系统，将数字孪生船舶设计与工艺仿真结合，可以实现对现场的实时监控、数字化管理和工艺优化，同时以三维工艺文件的形式辅助工人操作，并将工人装配经验和知识转化为知识库，可用于后续的工艺指导和仿真训练。

船舶舱内信息相对封闭，舱外环境复杂多变，航行时难以监控。同时，对于大型舰船，其航行运转需要船内各个系统的配合，整体系统调度缺乏数字化统一管控。针对以上现状，结合数字孪生技术搭建船舶辅助航行平台，一方面可以采集实时数据，监控船舶的各种状况，实时反馈给船员，另一方面能够调度管控船舶各系统，并借助相关优

化策略，辅助船员控制航行。

安全运维对船舶具有极其重要的意义，准确有效的运维方法能够大大提高船舶故障预测、健康管理的效率成本。

目前，对船舶整体结构的故障预测与健康管理工作相对不足，既受限于实时数据的缺乏，同时在理论方法上也有着大量不足。基于数字孪生的船舶故障预测与健康管理工作，能够基于动态实时数据的采集与处理，实现快速捕捉故障现象、准确定位故障原因，同时评估设备状态，进行预测维修。

3. 车辆

车辆作为人类最主要的交通工具，具有一个涵盖材料科学、机械设计、控制科学等多学科的复杂系统。在多样化的工作条件下，车辆的壳体材料、内部构造、零部件及功能等在工作过程中均可能出现异常状况。不同的毁伤源（如碰撞、粉尘、外部攻击等）会对车辆造成不同程度的影响，因此需要对车辆进行抗毁伤性能评估。

现阶段对车辆抗毁伤性能评估一般采用物理模拟毁伤的方式，但是这种方式费用高且精度低、置信度差。参照数字孪生五维模型提出一种基于数字孪生技术的车辆抗毁伤评估方法，从材料、结构、零部件及功能等多维度对车辆的抗毁伤性能进行综合评价。

基于数字孪生的车辆抗毁伤性能评估是通过对实体车辆与虚拟车辆的实时信息交互与双向真实映射，实现物理车辆、虚拟车辆及服务的全生命周期、全要素、全业务数据的集成和融合，从而提供可靠的抗毁伤评估服务。数字孪生车辆由物理车辆、虚拟车辆、孪生数据、

动态实时连接及服务部分组成。物理车辆由车辆本身及其传感系统共同组成，传感系统从车辆实体中采集毁伤相关数据并传递到虚拟空间，支持虚拟车辆的高精度仿真。物理数据与虚拟数据进行融合，从而进行虚拟车辆抗毁伤性能的特征提取并辅助模型的构建。虚拟模型是包含几何模型、物理模型、行为模型及规则模型的多维度融合的高保真模型，能够真实刻画和映射物理车辆的状态。动态实时连接是在现代信息传输技术的驱动下，通过高效、快捷、准确的检测技术，实现实体车辆、虚拟车辆、服务等之间的实时信息交互。车辆抗毁伤性能评估是整合车辆的历史数据及实时数据进行分析、处理、评估，从车辆的材料、结构、零部件、功能等方面进行多维度的综合分析。

基于数字孪生，车辆能够实现对其材料性能、结构变化、零部件完整性及功能运行进行精确仿真，从而对车辆的抗毁伤状态进行精准预测与可靠评估，使车辆的毁伤情况和抗毁伤性能得到更加全面和深入地反映。

此外，相关数据的积累能够促进下一代车辆产品抗毁伤性能的改进和优化。

4. 火力发电厂

火力发电是目前我国最主要的发电方式。由于火力发电厂需要长时间运行，并且工作环境复杂、温度高、粉尘多，发电厂设备不可避免地会发生故障，因此实现发电厂设备健康平稳地运行，保证电力的稳定供给及电力系统的可靠与安全具有至关重要的意义。为实现上述目标，北京必可测科技股份有限公司开发了基于数字孪生的发电厂智

能管控系统，实现了汽轮发电机组轴系可视化智能实时监控、可视化大型转机在线精密诊断、地下管网可视化管理及可视化三维作业指导等应用服务。

汽轮发电机组轴系可视化智能实时监控系统基于采集的汽轮机轴系实时数据、历史数据及专家经验等，在虚拟空间构建了高仿真度的轴系三维可视化虚拟模型，从而能够观察汽轮机内部的运行状态。该系统能够对汽轮机状态进行实时评估，从而准确预警并防止汽轮机超速、汽轮机断轴、大轴承永久弯曲、烧瓦、油膜失稳等事故，帮助优化轴承设计、优化阀序及开度、优化运行参数，从而大大提高汽轮发电机组的运行可靠度。

可视化大型转机在线精密诊断系统基于构建的大型转机虚拟模型及孪生数据分析结果，可以实时远程地显示设备状态、元件状态、问题严重程度、故障描述、处理方法等信息，能够实现对设备的远程在线诊断。工厂运维人员能够访问在线系统报警所发出的电子邮件、页面和动态网页，并能够通过在线运行的虚拟模型查看转机状态的详细情况。

地下管网可视化管理系统运用激光扫描技术并结合平面设计图，建立完整、精确的地下管网三维模型。该模型可以真实地显示所有扫描部件、设备的实际位置、尺寸大小及走向，且可将管线的图形信息、属性信息及管道上的设备、接头等信息进行录入。基于该模型实现的地下管网可视化系统不仅能够三维地显示、编辑、修改、更新地下管网系统，还可对地下管网有关图形、属性信息进行查询、分析、统

计与检索等。

可视化三维作业指导系统基于设备的实时数据、历史数据、领域知识及三维激光扫描技术等来建立完整、精确的设备三维模型。该模型可以与培训课程联动，形成生动的培训教材，从而帮助新员工较快掌握设备结构；可以与检修作业指导书相关联，形成三维作业指导书，规范员工的作业；可以作为员工培训和考核的工具。

基于数字孪生的发电厂智能管控系统实现了对关键设备的透视化监测、故障精密远程诊断、可视化管理及员工作业精准模拟等，能够满足设备的状态监测、远程诊断、运维等各项需求，并实现了与用户之间直观的可视化交互。

5. 飞机

飞机总体设计是飞机研制的根基，现阶段的飞机优化设计仍存在变量耦合度高、数据缺乏、指标获取困难等问题。作为飞机重要的承力与操纵性部件，起落架承受着静态和动态的高负载，周而复始的工作更会对其结构产生破坏，如何实现对起落架的结构优化设计，对飞机的安全与可靠性有着重要意义。

北航团队与沈阳飞机工业集团合作，以飞机起落架为例，参照数字孪生五维模型，探索了基于数字孪生的飞机起落架载荷预测辅助优化设计方法。

在飞机的着陆与滑跑过程中，起落架和飞机机身都将承受很大的冲击载荷，其中垂直方向的冲击载荷被认为是影响飞机起落架结构疲劳损伤的重要因素，对起落架的设计也起到关键性辅助及指导作用。

垂直冲击载荷的影响因素众多并相互耦合，其主要影响因素与载荷是一种复杂的非线性关系，传统的基于内部机理分析为基础的建模方法很难建立起落架载荷的精确模型。将数字孪生技术应用于载荷预测，是在建立起落架数字孪生五维模型的基础上，获得与载荷密切相关的物理数据（如当量质量、垂直速度、攻角等）、虚拟数据（如缓冲压力、缓冲器行程、效率系数等）及融合数据，并利用现有的数据融合方法，即可准确地预测载荷，从而预测冲击载荷。随后即可利用其进行起落架结构优化计算，最终通过结构优化达到减轻重量、提高可靠性、提高设计效率、降低设计成本等目标。在已存在设计的结构优化阶段，可利用数字孪生对设计进行使用评估，并形成改进反馈。当与来自消费者的需求与意见结合后，若起落架迭代判断无需优化则无需重新设计，若需要进行起落架结构更新则进行优化设计。传统的优化设计过程主要分为建立目标函数、确定设计变量、明确设计约束等步骤，在此理论基础上，结合数字孪生的特点，利用虚拟模型对已有设计进行迭代改进与测试。若满足设计需求则最终形成新设计，若不满足则重复进行优化设计步骤直至得到满足设计需求且具有可行性的新设计。

采用数字孪生技术后，可综合大量的试验、实测、计算案例进行产品设计仿真，并将以往的真实测试环境参数融入起落架模型设计。对部分在传统起落架结构优化设计中需大量人力、物力实验才可测得的数据，可利用数字孪生模型进行准确而高效的计算，极大地简化了迭代设计步骤并提升了设计效率。经过计算和分析后，若结构优化设

计评估结果收敛，则可生成结构优化设计方案。

6. 复杂机电装备

复杂机电装备具有结构复杂、运行周期长、工作环境恶劣等特点。实现复杂机电装备的失效预测、故障诊断、维修维护，保证复杂机电装备的高效、可靠、安全运行，对整个电力系统极为重要。故障预测与健康管理的（Prognostics and Health Management，简称 PHM）技术可利用各类传感器及数据处理方法，对设备状态监测、故障预测、维修决策等进行综合考虑与集成，从而提升设备的使用寿命与可靠性。然而，现阶段的 PHM 技术存在模型不准确、数据不全面、虚实交互不充分等问题，这些问题究其根本是缺乏了信息物理的深度融合。将数字孪生五维模型引入 PHM 中，首先对物理实体建立数字孪生五维模型并校准，然后基于模型与交互数据进行仿真，对物理实体参数与虚拟仿真参数的一致性进行判断，再根据二者的一致/不一致性，可分别对渐发性和突发性故障进行预测与识别，最后根据故障原因及动态仿真验证结果进行维修策略的设计。该方法在风力发电机的健康管理上进行了应用探讨。

在物理风机的齿轮箱、电机、主轴、轴承等关键零部件上部署相关传感器可进行数据的实时采集与监测。基于采集的实时数据、风机的历史数据及领域知识等可对虚拟风机的几何—物理—行为—规则多维虚拟模型进行构建，实现对物理风机的虚拟映射。基于物理风机与虚拟风机的同步运行与交互，可通过物理与仿真状态交互与对比、物理与仿真数据融合分析，以及虚拟模型验证分别实现面向物理风机

的状态检测、故障预测及维修策略设计等功能。这些功能可封装成服务，并以应用软件的形式提供给用户。

基于数字孪生五维模型的 PHM 方法可利用连续的虚实交互、信息物理融合数据，以及虚拟模型仿真验证增强设备状态监测与故障预测过程中的信息物理融合，从而提升 PHM 方法的准确性与有效性。

7. 立体仓库

自动化立体仓库是一种利用高层立体货架来实现高效的货物自动存取的仓库，由存储货架、出入库设备、信息管控系统组成，集仓储技术、精准控制技术、计算机信息管理系统于一身，是现代物流系统的重要组成部分。但目前用传统方法设计的立体仓库仍然存在着出库调度效率低、仓库利用率低、吞吐量低等问题。

基于数字孪生五维模型可为立体仓库的再设计优化、远程运维及共享等问题提供有效解决方案。通过建立立体仓库中各个设备的数字孪生五维模型，依托设计演示平台实现近物理的半实物仿真设计。利用该平台，可以对仓库布局进行三维图像设计，同时基于货架设备、运输设备、机器人设备等进行半实物仿真验证，并完成几何建模、动作脚本编写、指令接口与信息接口定义，实现模块化封装和定制模型接口设计。

借助立体仓库及其设备的数字孪生五维模型，搭建面向用户的远程运维服务平台，可实现基于数字孪生的立体仓库远程运维。通过建立与立体仓库完全映射的虚拟模型，结合立体仓库的数据信息及各类算法，实现对立体仓库的实时模拟与优化仿真，对仓库进行实时状态

与信息监控的同时，将货存管理、货位管理、费用管理、预警管理、预测性维护、作业调度等功能以软件服务的形式提供给不同需求的使用者。

基于数字孪生的共享立体仓库是连接仓储资源供需的最优化资源配置的一种新方式。共享立体仓库首先将闲置的仓储设施、搬运设备、货物运输、终端配送、物流人力等资源进行统一整合与汇集，然后上传到共享仓库服务管理云平台进行统一调度与管理，平台将这些资源以分享的形式按需提供给需要使用的企业和个人，以期达到效用均衡。共享立体仓库不仅节省了企业和个人的资金投入，缓解了存储压力，还减少了投资风险。基于数字孪生的立体仓库设计，可以实现立体仓库的准确、快速设计，节约设计成本，便于仓库的个性化定制，具有针对性；在设计过程中平台可接收实时传输的数据信息，便于设计校对与更改，实现迭代优化设计；通过远程运维服务平台可以远程调度处理仓库信息，提高仓库运行效率；共享立体仓库可以实现资源的最大化有效利用，节省资源，降低成本。

8. 医疗

随着经济的发展和生活水平的提高，人们越来越意识到健康的重要性。然而，疾病预防缺、患者看病难、医生任务重、手术风险大等问题依然困扰着医疗服务的发展。

数字孪生技术的进步和应用使其成为了改变医疗行业现状的有效切入点。未来，每个人都将拥有自己的人类数字孪生。结合医疗设备数字孪生（如手术床、监护仪、治疗仪等）与医疗辅助设备数字孪

生（如人体外骨骼、轮椅、心脏支架等），数字孪生将成为个人健康管理、健康医疗服务的新平台和新实验手段。基于数字孪生五维模型，数字孪生医疗系统主要由以下部分组成。

通过各种新型医疗检测和扫描仪器及可穿戴设备，可对生物人体进行动静态多源数据采集。基于采集的多时空尺度、多维数据，通过建模可完美地复制出虚拟人体。其中，由几何模型体现人体的外形和内部器官的外观和尺寸；物理模型体现的是神经、血管、肌肉、骨骼等的物理特征；生理模型体现的是脉搏、心率等生理数据和特征；而生化模型是最复杂的，要以组织、细胞和分子的多空间尺度，甚至毫秒、微秒数量级的多时间尺度展现人体生化指标。

医疗数字孪生数据有来自生物人体的数据，包括 CT、核磁、心电图、彩超等医疗检测和扫描仪器检测的数据，血常规、尿检、生物酶等生化数据；有虚拟仿真数据，包括健康预测数据、手术仿真数据、虚拟药物试验数据等。此外，还有历史/统计数据 and 医疗记录等。这些数据融合产生诊断结果和治疗方案。

基于虚实结合的人体数字孪生，医疗数字孪生提供的服务包括健康状态实时监控、专家远程会诊、虚拟手术验证与训练、医生培训、手术辅助、药物研发等。

实时数据连接保证了物理虚拟的一致性，为诊断和治疗提供了综合数据基础，提高了诊断准确性、手术成功率。基于人体数字孪生，医护人员可通过各类感知方式获取人体动静态多源数据，以此来预判人体患病的风险及概率。依据反馈的信息，人们可以及时了解自己的

身体情况，从而调整饮食及作息。一旦出现病症，各地专家无需见到患者，即可基于数字孪生模型进行可视化会诊，确定病因并制定治疗方案。当需要手术时，数字孪生协助术前拟订手术步骤计划；医学实习生可使用头戴显示器在虚拟人体上预实施手术方案验证，如同置身于手术场景，可以从多角度及多模块尝试手术过程验证可行性，并改进到满意为止。

借助人体数字孪生还可以训练和培训医护人员，以提高医术技巧和成功率。在手术实施过程中，数字孪生可增加手术视角并警示危险，预测潜藏的出血隐患，有助于临场的准备与应变。

此外，在人体数字孪生上进行药物研发，结合分子细胞层次的虚拟模拟进行药物实验和临床实验，可以大幅度降低药物研发周期。医疗数字孪生还有一个愿景，即从孩子出生就可以采集数据，形成人体数字孪生，伴随孩子同步成长，作为孩子终生的健康档案和医疗实验体。

9. 制造车间

车间是制造业的基础单元，实现车间的数字化和智能化是实现智能制造的迫切需要。随着信息技术的深入应用，车间在数据实时采集、信息系统构建、数据集成、虚拟建模及仿真等方面获得了快速发展，在此基础上，实现车间信息与物理空间的互联互通与进一步融合将是车间的发展趋势，也是实现车间智能化生产与管控的必经之路。

将数字孪生技术引入车间，目的是实现车间信息与物理空间的实时交互与深度融合。数字孪生车间包括物理车间、虚拟车间、车间服

务系统、车间孪生数据及两两之间的连接。在融合的孪生数据的驱动下，数字孪生车间的各部分能够实现迭代运行与双向优化，从而使车间管理、计划与控制达到最优。

车间的设备健康管理方法主要包括基于物理设备与虚拟模型实时交互与比对的设备状态评估、信息物理融合数据驱动故障诊断与预测，以及基于虚拟模型动态仿真的维修策略设计与验证等步骤。基于数字孪生技术，能够实现对车间设备性能退化的及时捕捉、故障原因的准确定位，以及维修策略的合理验证。

在能耗分析方面，信息物理数据间的相互校准与融合可以提高能耗数据的准确性与完整性，从而支持全面的多维、多尺度分析；在能耗优化方面，基于虚拟模型实时仿真可通过对设备参数、工艺流程及人员行为等进行迭代优化来降低车间能耗；在能耗评估方面，可以使用基于孪生数据挖掘产生的动态更新的规则与约束对实际能耗进行多层次、多阶段的动态评估。数字孪生能提高车间动态调度的可靠性与有效性。基于信息物理融合数据能准确预测设备的可用性，从而降低设备故障对生产调度的影响；基于信息物理实时交互，能对生产过程中出现的扰动因素（如设备突发故障、紧急插单、加工时间延长等）进行实时捕捉，从而及时触发再调度；基于虚拟模型仿真可以在调度计划执行前验证调度策略，保证调度的合理性。

对生产过程进行实时全面的状态感知，满足虚拟模型实时自主决策对数据的需求，通过对控制目标的评估与预测产生相应的控制策略，并对其进行仿真验证。当实际生产过程与仿真过程出现不一致时，基

于融合数据对其原因进行分析挖掘，并通过调控物理设备或校正虚拟模型实现二者的同步与双向优化。

10. 智慧城市

城市是一个开放庞大的复杂系统，具有人口密度大、基础设施密集、子系统耦合等特点。如何实现对城市各类数据信息的实时监控，围绕城市的顶层设计、规划、建设、运营、安全、民生等多方面对城市进行高效管理，是现代城市建设的核心。

借助数字孪生技术，参照数字孪生五维模型，构建数字孪生城市，将极大改变城市面貌，重塑城市基础设施，实现城市管理决策协同化和智能化，确保城市安全、有序运行。通过在城市天空、地面、地下、河道等各层面的传感器布设，可对城市运行的状态充分感知、动态监测。

通过数字化建模建立与物理城市相对应的虚拟模型，虚拟城市可模拟城市中的人、事、物、交通、环境等全方位事物在真实环境下的行为。根据城市基础设施、交通、环境活动的各类痕迹，虚拟城市的模拟仿真及各类智能城市服务记录等汇聚成城市大数据，驱动数字孪生城市发展和优化。

城市规划、建设及民众的各类活动，不但存在于物理空间中，而且在虚拟空间中得到了极大地扩充。虚实交互、协同与融合将定义城市未来发展新模式。通过数字孪生对城市进行规划设计，指引和优化物理城市的市政规划、生态环境治理、交通管控，改善市民服务，赋予城市生活“智慧”。

我国政府将数字孪生城市作为实现智慧城市的必要途径和有效手段，雄安新区在规划纲要中明确指出要坚持数字城市与现实城市的同步规划、同步建设，致力于将雄安打造为全球领先的数字城市。中国信息通信研究院成功举办了三次数字孪生城市研讨会，研讨数字孪生城市的内涵特征、建设思路、总体框架、支撑技术体系等。阿里云研究中心发布《城市大脑探索“数字孪生城市”白皮书》，提出通过建立数字孪生城市，以云计算与大数据平台为基础，借助物联网、人工智能等技术手段，实现城市运行的生命体征感知、公共资源配置、宏观决策指挥、事件预测预警等，赋予城市“大脑”。

此外，从国外比较具有代表性的探索来看，Cityzenith 为城市管理搭建了“5D 智能城市平台”，基于这个平台，城市基础设施开发过程可以实现数字化及城市的数字化全生命周期管理。IBM Watson 展示了如何在城市建筑中使用数字孪生来控制暖通空调系统并监测室内气候条件，通过创建数字孪生建筑来辅助管理能源并进行故障预测，并为技术人员提供维护、控制等服务支持。

数字孪生技术是实现智慧城市的有效技术手段，借助数字孪生技术，可以提升城市规划质量和水平，推动城市设计和建设，辅助城市管理和运行，让城市生活与环境变得更好。

11. 智能家居

智能家居在 5G 时代是一个必然的技术产物，也可以理解为智慧城市的一个终端“细胞”，这个“细胞”是一个独立完整的个体组织。目前制约智能家居的最大问题是“智能不智”，这其中的关键因素就

是构建的系统过于复杂，控制操作系统不能直观交互，智能设备的应用环境与设备运用无法有效监测，导致智能家居系统不智能。

随着家居用品智能化越来越普及，需要一个中央管理系统对安全系统、电视网络、Wi-Fi、冰箱、太阳能、热水器、厨房设备、暖气/空调、车库、门禁、水电煤等系统进行统一管理、控制、监测。以目前的技术来看，正是由于使用与管理的复杂性，制约了智能家居产业的普及。

随着数字孪生技术的介入，用户所使用的物理实体居住空间及其所应用的设备借助于数字孪生技术同步到虚拟空间中，并同步实时监测设备的运行，以及通过虚拟模型的呈现进行简单、可视化的交互操作。与此同时，用户可以对环境及设备运行进行实时监测与管理，可以更有效地进行设备的维护，保障使用时的可靠性与舒适性。

12. 智能物流

未来的智能产品都将分为两类：一类是物理实体，一类是物理实体的数字孪生。智能可以体现在产品的实体中，也可以放到数字孪生中。物理实体与数字孪生之间，借助于 5G 等可靠性强的传输技术有效保障了虚实之间的实时呈现。在数字孪生中，除了产品档案，更多的是使用、监测、控制及维护的方法，当然还可以嫁接更多的功能。而数字孪生技术对于物流产业而言，将为智能物流带来重大的颠覆性创新。比如，在全程无人化智能物流框架体系中，智能货架、搬运机器人、智能拣选模块、无人装车系统、无人卸车系统、无人卡车、无人机、配送机器人等物流智能物件的物理实体与数字孪生进行关联，

就能够建设智能物流系统控制平台，操作数字孪生就能实时控制全程无人化智能物流系统，还能实时了解它们的工作状态，以及相关环节、部件的运作情况，方便今后的维修、追溯与使用。

数字孪生不仅包括实体物流网络物品的数字化，更包含物流系统本身和作业流程及设备的数字化，甚至是物流货物本身的虚拟化。数字孪生就像是数字化的双胞胎，实行的是虚拟与现实实时、同步，也就是将物理实体空间发生的事借助于数字孪生技术同步到虚拟空间中构建同样的场景，由此为各方提供更便捷、更直观的管控服务。数字孪生除了能够实时、智能地控制物流设备，意义更深远的是，数字孪生模型能持续积累智能物流设备与产品设计和制造相关的知识，不断实现管理与调用，实现持续性改进设计与创新。

13. 建筑

对于建筑行业，尤其是复杂建筑领域，数字孪生技术将成为其最核心的全过程应用技术。但数字孪生在建筑领域的应用与其他领域的应用有部分区别，数字孪生在建筑行业所采用的是反向技术，也就是说建筑设计师先设计好虚拟的建筑体，然后借助数字孪生技术，即通过数字化扫描实时监测物理实体空间的施工，并将数据实时镜像到数字孪生空间进行验证。

简单的理解就是先有虚拟空间，再借助扫描技术实时监测物理实体空间的施工技术、工艺、进度等，通过数字孪生镜像校验物理实体空间的施工是否符合设施要求，是否产生了偏差，是否能够有效、实时管控建筑实施的全过程，而不是施工后的事后验收，借助于数字孪

生技术能够从根本意义上有效防范施工偏差，保障工程全过程的有效性。可以说，建筑行业将会是数字孪生技术的一个重要应用领域。

14. 远程监测

通过数字孪生技术，人们可以精确地了解这些实体设备的运行方式，通过数字孪生模型与实体设备的无缝匹配，实时获取设备监控系统的运行数据，从而实现故障预判和及时维修。

监控对于数字孪生技术而言，只是一个相对初级的应用阶段，而数字孪生技术真正的价值在于虚实混合的控制，即借助于数字孪生技术在虚拟空间中直接对物理实体空间进行控制与管理。正如第 5 章中提到的智能家居管理一样，在工业与设备管理领域，甚至是未来的飞机驾驶都可以借助数字孪生技术控制实体飞机的驾驶与飞行。通过数字模型，人们可以实现设备的远程操控。未来，远程辅助、远程操作、远程紧急命令都将因数字孪生技术的存在而成为管理的常用词汇。

15. 人体健康管理

从孩子出生的那一刻开始，在虚拟空间中有一个镜像的“孩子”存在。人们借助于各种新型医疗检测和扫描仪器及可穿戴设备，不仅可以完美地复制出一个数字化身体，并可以追踪这个数字化身体每一部分的运动与变化，从而更好地进行健康监测和管理。

不仅如此，人类每天摄入的食物、接触的环境、工作的变化、情绪的波动都会被记录在数字孪生中，而医生与医学研究人员则可以通过这些数据对人类的身体展开研究，包括环境与食物、药物对人类身体健康状况的影响等。当然还包括更为深入的脑机接口技术所衍生出

的人类大脑的数字孪生。医生可以借助于脑机接口，通过数字孪生技术实时呈现、控制、干预人们的大脑活动，包括一些由大脑神经引发的疾病，都可以借助于数字孪生技术得到更有效的诊治。

当然，人们还可以借助于数字孪生技术让人与人之间实现远程的物理实体与虚拟空间的真实有效互动对话。在数字孪生时代，“不论我在哪里，我都将时刻陪伴在你身边”将成为一种可能与现实。

数字孪生技术将随着该技术的不断成熟与普及，拓展更多的应用领域，未来人们将会面对三个世界：一个是真实的物理世界，一个是数字孪生的世界，一个是虚实交互的世界。尽管从当前来看，数字孪生技术对于大多数人而言还是一项相对陌生的技术，但正如人类当前所面对的科技时代一样，随着技术的不断更新迭代，数字孪生将完全改变人类发现、认知和改造世界的方式。

2.2 产业发展驱动

2.2.1 政策支持

2020 年，“新基建”首次写入中央政府工作报告，在对于该项热点的讨论中，“数字孪生”被不少代表和委员提及。2020 年 4 月，国家发改委印发《关于推进“上云用数赋智”行动，培育新经济发展实施方案》中，方案提出要围绕解决企业数字化转型所面临的数字基础设施、通用软件和应用场景等难题，支持数字孪生等数字化转型共性技术、关键技术研发应用，引导各方参与提出数字孪生的解决方案。数字孪生技术受关注程度和云计算、AI、5G 等一

样，上升到国家高度。2020 年 9 月 11 日，工业和信息化部副部长辛国斌强调，要前瞻部署一批 5G、人工智能、数字孪生等新技术应用标准。

2022 年 1 月 6 日，水利部响应《国家十四五规划纲要和远景目标》中提出的“构建智慧水利体系，以流域为单元提升水情测报和智能调度能力”的政策，从而印发了《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》，其中要求，到 2025 年，通过建设数字孪生流域、“2+N”水利智能业务应用体系、水利网络安全体系、智慧水利保障体系，推进水利工程智能化改造，建成七大江河数字孪生流域，在重点防洪地区实现“四预”（即预报、预警、预演、预案），在跨流域重大引调水工程、跨省重点河湖基本实现水资源管理与调配“四预”，N 项业务应用水平明显提升，建成智慧水利体系 1.0 版。

2022 年 1 月 12 日，国务院印发《“十四五”数字经济发展规划》（以下简称《规划》），明确了“十四五”时期推动数字经济健康发展的指导思想、基本原则、发展目标、重点任务和保障措施。《规划》明确坚持“创新引领、融合发展，应用牵引、数据赋能，公平竞争、安全有序，系统推进、协同高效”的原则。到 2025 年，数字经济核心产业增加值占国内生产总值比重达到 10%，数据要素市场体系初步建立，产业数字化转型迈上新台阶，数字产业化水平显著提升，数字化公共服务更加普惠均等，数字经济治理体系更加完善。展望 2035 年，力争形成统一公平、竞争有序、成熟完备的数字经济现代市场体系，数字经济发展水平位居世界前列。

2021 年 3 月 5 日在北京召开的第十三届全国人民代表大会第四次会议，表决通过了《关于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》的决议，《纲要》单列出第五篇“加快数字化发展建设数字中国”，并提到推进城市数据大脑建设，探索建设数字孪生城市，足可见对数字化发展和建设数字中国的重视程度。

纲要中指出以数字化助推城乡发展和治理模式创新，全面提高运行效率和宜居度，分级分类推进新型智慧城市建设，将物联网感知设施、通信系统等纳入公共基础设施统一规划建设，推进市政公用设施、建筑等物联网应用和智能化改造，完善城市信息模型平台和运行管理服务平台，构建城市数据资源体系，推进城市数据大脑建设，探索建设数字孪生城市。（其他更多数字孪生相关政策发布请参照附表 1）。

2.2.2 硬件提升

数字孪生是一种新兴的技术，它对计算设备/硬件提出了较高要求，这是因为：（1）数字孪生涉及的模型与数据规模庞大，包括建模对象全生命周期中不断更新的全要素、全业务、全流程的数据与模型，这需要计算设备/硬件具有庞大的存储空间；（2）数字孪生对模型仿真与数据分析处理效率有实时要求，即基于实时的模型仿真与数据分析结果向物理空间反馈控制策略，这需要计算设备/硬件具有强大的计算能力；（3）为了支持进一步的虚实融合，数字孪生对终端设备（如支持 3D 显示的终端设备）提出更互动、更沉浸、更清晰的要求，这对硬件设备的数据传输能力、显示技术等提出了更高的要求。

当前，CPU 和大规模集成电路的发展正在接近理论极限，人们正在努力研究超越物理极限的新方法，新型计算机可能会打破计算机现有的体系结构。目前正在研制的新型计算机有：生物计算机——运用生物工程技术，用蛋白分子做芯片；光计算机——用光作为信息载体，通过对光的处理来完成对信息的处理；量子计算机——将计算机科学和物理科学联系到一起，采用量子比特，可以同时处在多个状态等等。这些技术的发展是数字孪生高效、高速、高质量运行的推动条件。

2.2.3 数据积累

数字孪生的构建需大量数据的支持。一方面，在数字空间构建多维、多尺度的虚拟模型需大量数据，如建模对象的属性数据、状态数据、行为数据、环境数据等；另一方面，已完成构建的虚拟模型仍需基于物理空间连续不断的实时数据实现更新。当前，随着物联网、传感技术的发展，可用数据的规模在不断提升，这是实现数字孪生应用的推动条件。

据调研，转型升级过程中，供给侧竞争的加剧、营运成本的提升以及盈利能力的下降，迫使企业追求生产的自动化、数字化、标准化。目前，大部分企业完成了自动化能力升级及初步的数字化能力建设。

在企业生产管理数据方面，大部分企业的数字化能力建设聚焦于独立的信息系统搭建，旨为实现特定的功能目标，如资源的调配、物料的管控、生产排程的下发等。目前生产车间普遍部署 MES（制造执行系统）、APS（生产计划排程系统）、SCADA（数据采集与监视控

制系统)等各种信息系统,可以实现对车间整体自动化线的有效管控。有效实现从采集、监控、到分析、反馈再引至辅助决策和前端设计,中间涉及到系统兼容、数据接口/格式、数据全面性、优化标的一致性等多种问题。生产计划排程系统关注每个设备的工作能力、订单数量、生产节拍等要素。信息数据处理模式完整囊括车间信息数据的获取,分析、监控等功能,真正实现有效的管控运维。全局性部署车间制造流程数据采集,可以较为系统地反映并记录车间制造全流程的物理状态,利用直观的数据展现方式完成自动化产线实时有效管控、运维;并基于多维模型性征、数据分析、仿真模型,实现前馈控制及仿真优化。

智能化产线在实际生产流程中部署了数以千计的传感器,共同收集各个不同层面的数据,包括生产机械的行为特征、半成品(厚度、颜色质地、硬度、转矩、速度等)以及工厂内部的环境状况等。这些数据不断传输至数字孪生处理中心,并由该程序完成数据聚合。数以千计的传感器持续开展重要检测,并向数字化平台传输数据。数字化平台进而开展准实时分析,通过比较透明的形式优化运营流程。生产流程中配置的传感器可发出信号,数字孪生可通过信号获取实际流程相关的运营和环境数据。传感器提供的实际运营和环境数据将在聚合后与企业数据合并。其中企业数据包括物料清单、企业系统和设计规范等。其他类型的数据还包括工程图纸、外部数据源连接以及客户投诉记录等。

2.2.4 算法进化

国内外一大批专注于工业生产线底层数据采集的技术公司在前一轮工厂自动化、数字化建设中成长起来，以西门子、Honeywell、菲尼克斯电气公司为首的自动化企业纷纷推出自己的数据采集网络系统、智能网关等数据采集相关产品。另一方面，轻量化模型构造工具软件产品的普及，以 Unity 软件为代表的可视化引擎工具使用成本降低，极大的支撑了数字孪生核心技术的发展。国内，数字孪生行业的火爆催生了一大批原本致力于工厂数字化、物联网、虚拟仿真技术的中小企业投入到数字孪生核心技术的开发中。

实际上，自从有了诸如 CAD 等数字化的“创作（authoring）”手段，就已经有了数字孪生的源头，有了 CAE 仿真手段，就让数字虚体和物理实体走得更近，有了系统仿真，可以让数字虚体更像物理实体，直至有了比较系统的数字样机技术。发展到现在，人们发现在数字世界里做了这么多年的数字设计、仿真结果，越来越虚实对应，越来越虚实融合，越来越广泛应用，数字虚体越来越赋能物理实体系统。

由于当前三维模型已成为表达产品信息的主要方式，而不同企业往往根据自身需求选用不同的三维设计平台，甚至统一企业内部也由于协同设计的参与者不同，往往也习惯于使用符合自己习惯的不同三维设计软件。由于 CAD 设计软件所生成的产品三维模型文件各不相同，这就造成了浏览查看时必须使用特定的 CAD 软件，上述这些原因直接导致了企业内部和企业间的数据交流和共享困难。

除了需要特定的 CAD 软件进行读取之外，发生在企业间和企业内部的三维模型数据的传输也会给企业的信息交流带来障碍。以往的数据交换主要采用直接三维模型数据交换、中性几何文件格式数据交换和中性显示模型数据交换。这几种传统的三维模型数据传输方式都存在各自无可避免的缺点，要么要求必须具有相同的三维建模平台，要么要求使用通用的三维浏览软件，要么所传输的三维模型文件一般打开需要花费极长的时间，要么没有几何信息，不能精确地测量零件的几何位置关系。这样一来，无疑对于企业的信息交流是十分不利的。

此外大多数情况下企业的网络带宽不足以支撑庞大的三维模型数据传输，所以要在网络上快速发布产品设计结果，实现产品数据的快速浏览和精确的几何信息查阅，就需要对产品数据模型简化，使数据交换文件更小，同时还需要保留详细的几何模型信息。

目前 3D 轻量化技术发展比较成熟，它能够在保留完整三维模型基本信息，保证模型精确度的前提下，将原始的三维模型原始文件进行最高上百倍的压缩，实现百兆级以上数据的流畅浏览与操作，并使三维模型的可视化与三维软件无关联。现有的技术中几乎所有流行的三维文件格式，如 CatiaV4、CatiaV5、Pro/E、UG、SolidWorks、Parasolid、Inventor、IGES、STEP、VDA/FS、SKP 等的轻量化，轻量化后的 3D 模型文件，仍将保留完整的数据结构并实现准确的测量。

数字孪生中的超轻量几何模型处理技术作用在于数字孪生系统内几何模型的构建，对于结构简单的规则模型，直接对 STP 格式的 CAD 模型进行轻量化处理；对于结构复杂、存在较多曲型曲面的不

规则模型，需要在 3DMax 软件中完成模型重建且一并完成贴图渲染处理。将制造资源和在制品的 CAD 模型导入 PIXYZ 软件进行模型轻量化处理并导出 FBX 格式的文件，将文件导入 3DMax 对模型进行局部光顺化处理和贴图处理，并导出 FBX 格式的文件；对于部分轻量化时间成本较高的模型，利用三维 CAD 软件如 Pldex、Solidworks，多媒体建模软件如 3DSMax 等软件对数字化车间的厂房、设备、工装、车间 6S 元素等进行三维建模。三维模型主要由三角面片、材质、动画等部分组成，Unity 软件支持多种外部导入的模型格式，但并不是对模型格式的所有参数都支持。经过测试，.FBX 格式的所有属性都得到了 Unity 软件的支持，并且可以通过 3DSMax 软件生成导出，因此三维场景文件都选择.FBX 格式。为了实现大场景模型的实时渲染，保证渲染的帧率，需要对面片较多的模型进行细节层次（LOD）的制作。另外在三维场景中，由于有些模型的需要进行运动动作的可视化，因此在制作模型的过程中要定义各个部件之间的附属关系，建立模型的节点关系。

2.2.5 标准化体系建设

近年来，作为第四次工业革命的通用目的技术，数字孪生受到学术界和工业界的极大关注。这样的关注，标准化组织同样也有参与。而且，与一般的新兴技术（如大数据、云计算、5G 等）不同，甚至与人工智能和物联网这另外两个第四次工业革命的通用目的技术也不同；上述这些技术在 ISO、IEC 或 ITU 都有专门的（联合）工作组负

责相关技术的标准化工作，而数字孪生却吸引了多个国际组织的多个联合技术委员会、技术委员会和分委会的关注，从各自领域、各个层面出发，成立了多个数字孪生相关的工作组（对比德国工业 4.0 中的资产管理壳，在各国际标准化组织中目前只有 IEC/TC65/WG24 这—一个工作组以 AAS 命名）。这从一个侧面证明了各方对数字孪生在第四次工业革命中地位和作用的共识，同时也反映了数字孪生标准化工作的必要性、紧迫性和复杂性。

2021 年 1 月 14 日，由中国电子技术标准化研究院物联网研究中心组织了数字孪生国际标准国内专家组第一次电话会议。共有来自 50 余家单位近 70 名专家在线参与，涉及领域涵盖能源，制造，电力，通信，互联网等。其他参会单位如华能，中石油，清华大学，电子科大，中科院，联通研究院，移动研究院，联想，之江实验室，腾讯等企事业单位，研究机构 and 高校。

中国电子技术标准化研究院作为数字孪生国际标准工作组 ISO/IEC/JTC1/SC41/WG6 的召集人单位，在会上介绍了 WG6 的成立历程和背景，目前已立项的两份标准（ISO/IEC30173《数字孪生概念和术语》；ISO/IEC30172《数字孪生应用案例》）筹备情况，以及预研项目（《数字孪生参考模型》）的进展情况。

随着全国信息技术标准化技术委员会、国家智能制造标准化总体组等国内标准化组织和机构对数字孪生标准化的关注与推动，由中国电子技术标准化研究院牵头起草的《智能制造虚拟工厂参考架构》《智能制造虚拟工厂信息模型》两项国家标准已报批，《信息技术数字孪

生第 1 部分：通用要求》已提交立项。未来，国内数字孪生领域基础共性关键技术标准将不断涌现，依托正在研制的数字孪生概念框架等标准，通过聚焦核心标准化需求逐步建立基本的数字孪生标准体系并孵化典型行业中的数字孪生应用标准，形成国际标准、国家标准、行业标准和团体标准良性互动的局面（其他更多数字孪生标准化相关活动请参照附表 2）。

三、典型应用领域：数字孪生制造

3.1 数字孪生制造发展现状

智能制造中对于物联网技术的应用已经不言而喻，如今物联网技术融入了数字孪生之后，便能够更具体的为产品的全生命周期提供服务。例如一些复杂工业产品的制造过程中，需要有全局规划。而设计人员与制造人员分属不同环节，出发点也不同，容易导致设计信息的流失，制造人员很难准确理解设计人员的意图，增加出错的几率。利用数字孪生，对所需制造的产品、制造的方式、资源以及地点等各个方面进行系统规划，实现设计人员和制造人员的协同。

因此，数字孪生投资应由价值链驱动，以便于产品与资产相关方能够以更加结构化的整体方式在其供应链中管理工业机械、设施、产品或资产。

从趋势及应用效果上来看，数字孪生无疑会影响到众多物联网应用行业。另一方面，数字孪生演化并累积了越来越多的历史数据，面对拥有编程工具的厂商，数字孪生所有者将面临着逐步受制于这些厂商的风险。需要提醒 IT 架构师与数字孪生所有者为数据格式与数据存储的长期演化做好规划，以免在应用技术的同时陷入被动风险。

3.2 数字孪生制造技术架构

第一章给出了数字孪生系统的通用参考架构。参考这一通用架构，本章给出适用于数字孪生制造系统的参考架构（图 3-1）。

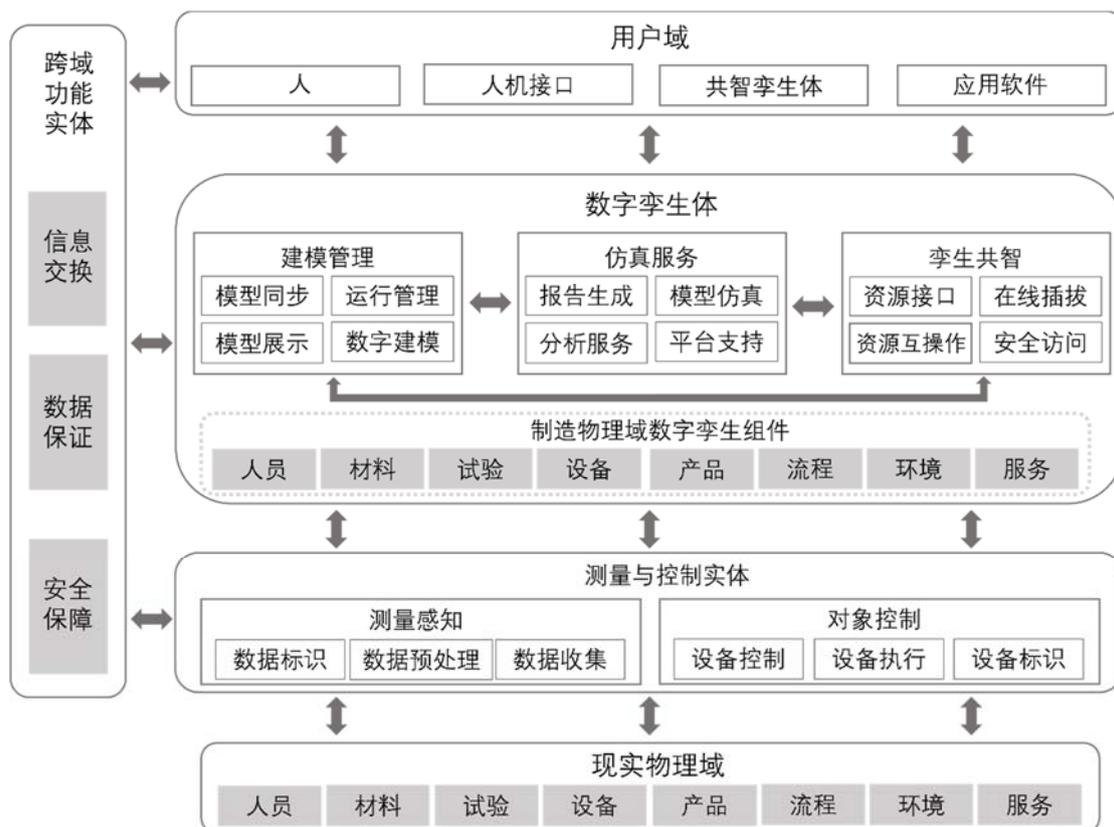


图 3-1 数字孪生制造参考技术架构

用户域和跨域功能实体的内容与前文的通用架构相同，这里不再赘述。

数字孪生：除了前文通用架构里阐述的三个部分外，这一层还包含制造物理域数字孪生组件（图中虚线框中）。针对现实物理域的每一个对象，都有一个对应的数字孪生存在。

测量与控制实体：这一层承担着物理实体和数字孪生之间的互动功能。这层包含测量感知和对象控制两种功能，其中测量感知是数字孪生从物理实体采集设备的设计、运行等各种参数，进行数据预处理和数据标识。对象控制则负责把数字孪生发出的控制策略传递给物理实体。

现实物理域：无论是离散型制造业还是流程型制造业，都包含研发设计阶段、生产运营阶段、维护服务阶段的各种物理实体，如人员、

设备、试验、产品、材料、流程、环境、服务等。

3.3 数字孪生制造典型应用场景

1. 产品的运行监控和智能运维

对于能够实现智能互联的复杂产品，尤其是高端智能装备。在装备运行过程中，将实时采集的传感器数据传递到其数字孪生模型进行仿真分析，对装备的健康状态和故障征兆进行诊断，并进行故障预测。如果产品运行的工况发生改变，对于拟采取的调整措施，可以先对其数字孪生模型在仿真云平台上进行虚拟验证，如果没有问题，再对实际产品的运行参数进行调整。

在复杂装备的运维方面，可以通过 AR 技术，基于产品的数字孪生模型生成产品操作、装配或拆卸的三维动画。在实物环境下，透过各种穿戴设备或移动终端进行示教。

2. 工厂运行状态的实时模拟和远程监控

对于正在运行的工厂，通过其数字孪生模型可以实现工厂运行的可视化。包括生产设备目前的状态，在加工什么订单，设备和产线的 OEE、产量、质量与能耗等，还可以定位每一台物流装备的位置和状态。对于出现故障的设备，可以显示出具体的故障类型。华龙讯达应用数字孪生技术，在烟草行业进行了工厂运行状态的实时模拟和远程监控实践，中烟集团在北京就可以实现对分布在各地的工厂进行远程监控。海尔、美的在工厂的数字孪生应用方面也开展了卓有成效的实践。

3. 生产线虚拟调试

虚拟调试技术在数字化环境中建立生产线的三维布局，包括工业机器人、自动化设备、PLC 和传感器等设备。在现场调试之前，可以直接在虚拟环境下，对生产线的数字孪生模型进行机械运动、工艺仿真和电气调试，让设备在未安装之前已经完成调试。

应用虚拟调试技术，在虚拟调试阶段，将控制设备连接到虚拟站/线；完成虚拟调试后，控制设备可以快速切换到实际生产线；可随时切换到虚拟环境，分析、修正和验证正在运行的生产线上的问题，避免长时间且昂贵的生产停顿。

虚拟调试技术对企业的价值体现在：早期验证优化研发+工艺+制造的可行性，减少物理样机投入成本；减少去用户现场做机器人调试时间和出错率，节约出差成本；虚实融合后为整个工厂的数字孪生打好基础，工厂建成之后可以与 SCADA 系统融合，打造基于三维模型的可视化监控系统，实现工厂的数字孪生。

4. 机电软一体化复杂产品研发

对于高度复杂的机电软一体化产品，可以在研发阶段构建产品的数字孪生模型，并通过工程仿真技术的应用加速产品的研发，帮助企业以更少的成本和更快的速度将创新技术推向市场。运用数字孪生技术，能够综合利用结构、热学、电磁、流体和控制等仿真软件进行单物理场仿真和多场耦合仿真，对产品进行设计优化、确认和验证，还可以构建精确的综合仿真模型来分析实际产品的性能，实现持续创新。通过结合创成设计技术、增材制造技术、半实物仿真技术，可以显著

缩短产品上市周期。

5. 数字营销

对于尚未上市的新产品，通过发布其概念阶段的数字孪生模型，让消费者选择更喜欢的设计方案，然后再进行详细设计和制造，这样有助于企业提升销售业绩。同时，通过构建基于数字孪生模型的在线配置器，可以帮助企业实现产品的在线选配，实现大批量定制。

3.4 数字孪生制造典型应用案例

1. 开发公司介绍

深圳华龙讯达信息技术股份有限公司，成立于 2003 年 1 月 9 日，是工信部试点示范的工业互联网赋能平台公司，在基于工业互联网平台的设备级、工厂级和产业级数字孪生领域具有技术优势。该公司曾参与制定国家两化融合、物联网和 CPS 标准，入选广东省、云南省工业互联网产业生态供给资源池，是新能源装备、石化、航空、风电、核电、汽车、交通、医药、烟草等行业的工业互联网平台领跑者。提供全球主流工业设备设施数据采集和边缘计算设备“机器宝”、木星数字孪生平台、木星数据建模平台、木星工业物联网平台、木星工业互联网平台、木星智能控制等系列产品，助力传统行业数字化转型升级。

2. 案例概述

在智能制造的大环境下，医药制造现阶段各业务系统数据分散在不同信息化系统中，数据相对独立，系统之间数据缺乏关联和有效整合利用，不能实时了解生产现场中在制品、人员、设备、物料等制造

资源和加工任务状态的动态变化。且传统的数据化软件，在兼容性、智能化上仍有不足，无法满足对数字化转型的后续需求，急需强大的智能化平台来构建自己的转型之路。

3. 应用场景

（1）全要素、全流程、全业务数据集成化管控模式

依托统一的数据标准，采集华润三九人员、设备、物料、方法、环境（简称人、机、料、法、环）等要素的数据，并对数据进行归集与标签化，在信息空间中建立数字工厂的镜像，建立统一数字孪生平台来打通数据流、信息流，实现深圳观澜、安徽金蝉和四川雅安三地三个颗粒车间工业生产数据全要素、全流程、全业务的集成式管控。



图 3-2VR 药厂生产线

（2）可复用、可调用信息模型

数据建模将车间的物理设备（包括混合机、制粒机、袋装内包装机、瓶装内包装机、瓶装外包、袋装外包、物料输送设备等）、生产工艺（称量混合、制粒、瓶装包装、袋装包装工序）、经验、知识及方法，进

行模型化、标准化、软件化、复用化，形成可重复使用的设备基础模型、设备零部件基础模型（约 8000 个）、工艺模型集（约 60 个）、部件模型集（约 300 个）、数据驱动模型集等（约 430 个），同时数据建模服务对外提供标准接口，以供其他 APP 进行调用，使企业具备虚实联动的能力、模型驱动生产的能力，为数字孪生打下基础。

（3） 信息空间与物理空间的“精确映射”与“精准执行”

通过颗粒车间采集和加工数据，利用科学的算法分析，形成信息模型，驱动生产执行与精准决策，创建虚拟空间与实体工厂的虚拟映射，实时映射生产过程、设备运行情况、质量跟踪状态，实现数字孪生体与实时生产过程管控、设备运行状态管控、过程质量管控和物料管控同步，并通过建模、仿真及分析再将结果反馈回物理空间，实现实体资源配置优化、生产过程管控优化，提高企业整线设备的使用能力，提升生产管控水平。



图 3-3 数字化生产线

（4） 部署可调用的数字孪生 APP

基于数字孪生实现设备智能化控制与 MES、SCADA 等生产应用系统的上下贯通、左右协同，开发部署可调用的数字孪生 APP，打通

“人、机、料、法、环、测”信息流，推动企业各环节信息的互联互通和数据共享，数字孪生 APP 的应用领域从单个设备、单个工艺、单个企业向全要素、全流程、全业务各类资源优化配置，为提高制造业产品质量、生产效率、服务水平、降低成本和能耗提供管理依据和有效工具，从而助力实体经济不断提升核心竞争力、持续高质量发展。

4. 案例总结

数字孪生平台进一步加强了 MES、LIMS、SCADA、设备等软硬件的集成，建立设备与系统的双向数据传递和控制，通过实体车间与虚拟车间的双向真实映射与实时交互实现实体车间、虚拟车间的数据的集成和融合。

在数据模型的驱动下，实现车间生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等在实体车间、虚拟车间的镜像运行，从而在满足特定目标和约束的前提下达到车间生产和管控最优的一种生产运行模式。

通过项目对生产车间的所有设备产量、消耗等数据进行综合排名，给管理人员提供有效的数据来分析设备，从而提高综合管理水平。通过多系统信息流实现工厂信息全集成，时刻感知工厂运行状况，进行智能化的决策和调整，提升效率和质量，降低成本。

四、典型应用领域：数字孪生城市

4.1 数字孪生城市发展现状

当前，城市数字孪生已经发展成为支撑智慧城市的重要技术手段。城市数字孪生通过在数字空间对城市物理空间和社会空间进行全要素表达、全过程呈现、全周期可溯，实现城市全面感知、虚实交互、智能决策、精准控制，推动城市智能化、智慧化发展。2021 年 3 月，《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》（简称“十四五”规划纲要）发布，明确指出“完善城市信息模型平台和运行管理服务平台，构建城市数据资源体系，推进城市数据大脑建设”“探索建设数字孪生城市”，为城市数字孪生营造了良好的发展环境。

标准是促进技术和应用创新发展的重要抓手。2021 年 12 月，国家标准化管理委员会、网信办、科技部、工信部等十部门联合印发《“十四五”推动高质量发展的国家标准体系建设规划》。该规划明确指出“围绕智慧城市分级分类建设、基础设施智能化改造、城市数字资源利用、城市数据大脑、人工智能创新应用、城市数字孪生等方面完善标准体系建设”，明确将城市数字孪生纳入智慧城市标准体系的重要组成部分。但是，城市数字孪生领域国际国内标准化工作仍处于起步阶段，亟待整体规划、加速推进。

4.2 数字孪生城市技术架构

基于数字孪生系统的通用参考架构，依据城市特色，本白皮书进一步从技术实现角度构建了城市数字孪生技术参考架构（图 4-1）：

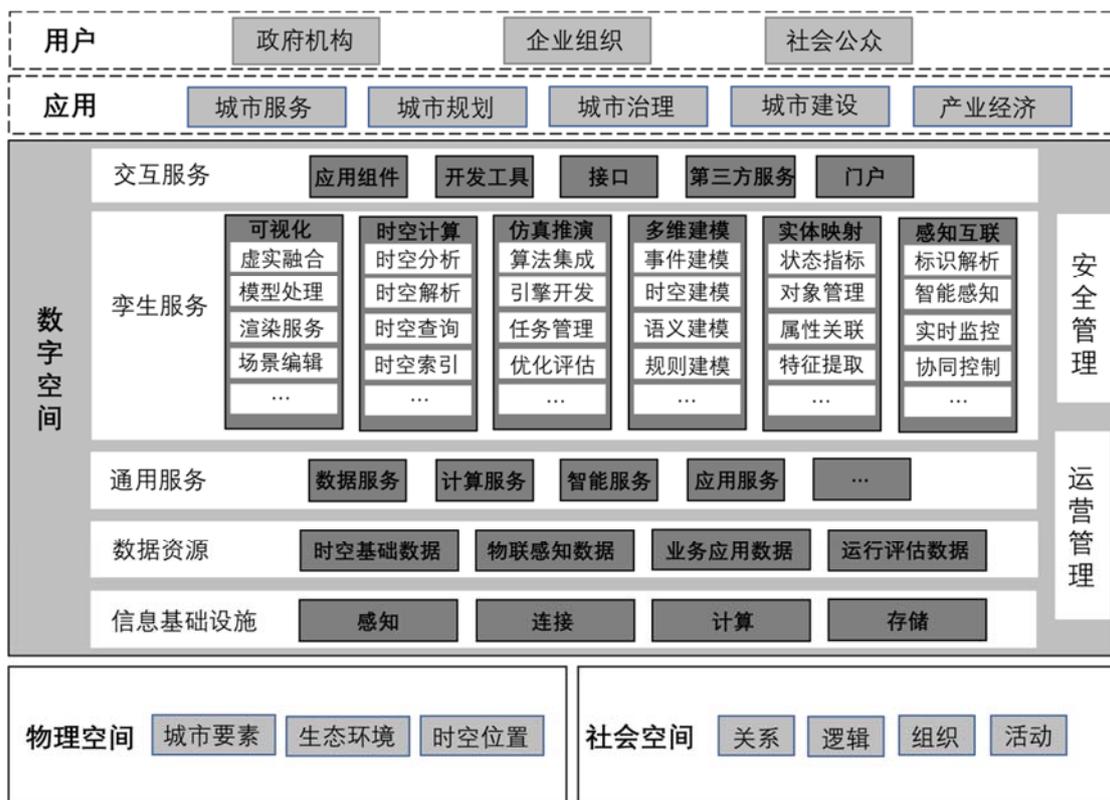


图 4-1 数字孪生城市参考技术架构

为实现城市数字孪生，首先需对物理空间以及社会空间中的物理实体对象、事件对象以及关系对象进行数字空间的虚拟表达以及映射。在此基础上，依托信息基础设施实现数据的汇聚、传输以及处理，形成数据资源，在通用服务能力的支撑下进一步融合数字孪生技术，形成能够对外提供的数字孪生服务，并通过交互服务实现与上层应用场景的融合。同时，需提供立体化安全管理以及全生命周期的运营管理，保障数字空间各类资产以及服务的安全高效运行。

（1）信息基础设施

信息基础设施是指提供感知、连接、存储以及计算能力的数字化基础设施，其中感知基础设施包含嵌入式传感基础设施、物联网基础设施以及测绘基础设施等。连接基础设施包含 5G 网络、车联网、窄带泛在感知网、全光网络等先进连接通信设备、设施以及系统。存储基础设施主要指多级数据存储中心以及云数据中心，涵盖多种存储方式，包括分布式文件存储、分布式结构化数据存储、分布式列式数据存储、分布式图数据存储。计算基础设施包含高性能计算、分布式计算、云计算以及边缘计算等先进计算基础设施，支持城市建立虚拟一体化计算资源池。

（2） 数据资源

数据资源是城市各类数据的总和，是构建城市数字孪生系统的基础。从数据来源可分为时空基础数据、物联感知数据、网络传输数据、业务应用数据以及运行评估数据。其中时空基础数据包括矢量数据、影像数据、高程模型数据、地理实体数据、地名地址数据、三维模型数据等。物联感知数据包含通过物联感知设备采集上报的各类感知数据以及状态数据，如温度、湿度、压强、亮度、设备运行状态等。业务应用数据包含来自业务信息系统、行业领域信息系统、第三方社会机构信息系统等多源业务应用数据。运行评估数据主要包括城市规划、城市管理、经济发展、环境保护、气象、能源、交通等领域运行成效以及评估数据。

（3） 通用服务

通用服务为城市数字孪生提供基础共性能力支撑。其中数据服务

是对数据资源利用提供的通用支撑服务，包括但不限于数据模型、资产管理以及数据治理。应用服务提供保障城市数字孪生应用及服务的基础能力，包括但不限于引擎服务、组件管理以及用户管理。计算服务包括但不限于任务调度、资源管理、性能监测。智能服务包括但不限于模式识别、统计分析、知识图谱等。

（4）孪生服务

孪生服务是指城市数字孪生所需的特性服务，包括但不限于感知互联、实体映射、多维建模、时空计算、仿真推演及可视化。感知互联是指城市全要素实时感知及互联控制，有标识解析、智能感知、实时监测、协同控制等。实体映射是指建立物理实体与虚拟实体之间的多层次、多维度的映射关系，有状态指标、对象管理、属性关联、特征提取等。多维建模是进行全要素多维度数字化表达，有事件建模、时空建模、语义建模、规则建模等。时空计算指基于时间以及空间坐标的多维计算，有时空分析、时空解析、时空查询、时空索引等。仿真预测是指模拟仿真，智能预测、动态决策等，有算法集成、引擎开发、任务管理、优化评估等。可视化是完成物理城市到数字城市的表达，有虚实融合、模型处理、渲染服务、场景编辑等。

（5）交互服务

交互服务是指提供多种类型的能力开放界面，通过统一规范的交互界面实现跨系统数据互通以及服务调用，通过提供平台化、轻量化数据、API、消息、应用等集成能力，第三方应用可以对功能组件进行灵活组合，实现业务逻辑和技术逻辑的分离。开放形式包含但不限

于门户、第三方服务、接口、开发工具、应用组件等。

（6）安全管理

安全管理是指根据城市安全管理制度，开展数据安全、信息系统和网络安全、安全预警和应急处理等管理工作。

（7）运营管理

运营管理是指基于数字模型和标识体系、感知体系以及各类智能设施，实现城市基础设施、地下空间、能源系统、生态环境、道路交通等运行状况的实时监测和统一呈现，通过数字模型和软硬件系统，实现快速响应、决策仿真、应急处理以及设备和系统的运行、维护和运营。实现城市要素、生态环境等运行状况的实时监测和统一呈现。

4.3 数字孪生城市典型应用场景

当前，城市数字孪生典型应用场景主要包括城市规划、城市建设、城市治理、智慧园区、智慧交通、智慧能源等。分别描述如下：

1. 城市规划

在城市规划领域，构建总规、控规、专规、城市设计、地下空间设计等全要素、全空间的城市规划模型，依据规划建设容量，以定量与定性方式，基于专题分析、模拟仿真、动态评估、深度学习等方法，对城市虚拟规划和场景仿真模拟，实时动态性监管城市开发和城市生长更新的整体规划实施情况。提出市域城乡统筹发展战略，保证规划建设、绿地、公路、桥梁、公共设施等每一寸土地时实现综合效益的最优化，推动城市规划有的放矢提前布局。

2. 城市建设

在城市建设领域，围绕城市建设中“人员、安全、进度、协同、环境”几个重要因素，构建数字孪生信息化应用系统，对建设过程中涉及的人、机、料、法、环等生产要素进行数字化，实现对项目施工信息、工程进度、重大事件实时更新，并通过系统同步配置用户的组织结构、智能权限，结合各类子系统应用实现信息有效触达、问题及时跟进、工地有序管理，为建设方、施工方、监理方、设计方及相关人员提供应用服务，有效解决城市以及新区建设过程中的复杂性和不确定性等行业痛点，打造安全可靠、绿色环保的城市建设。

3. 城市治理

在城市治理领域，城市治理是推进国家治理体系和治理能力现代化的重要内容，通过城市数字孪生汇聚 GIS 数据、影像数据、高程数据、OSGB、BIM、专题数据等多维时空数据，对接城市管理、生态治理、交通治理、市场监管、应急管理、公共安全等不同领域系统，以城市事件综合管理、重大事件和特殊场景需求为驱动，将“自学习、自优化、自演进”功能融入城市治理过程之中，制定全域一体的闭环流程和处置预案，对症下药精准施策，更好地把影响城市生命体健康的风险隐患察觉于酝酿之中、发现在萌芽之时、化解于成灾之前，实现引导城市规划建设，达到精准化治理效果。

4. 智慧园区

园区作为城市的核心单元，智慧园区建设已成为当今城市规划和社会发展的关注焦点，也是产业园区和社区发展的必然趋势。基于城

市数字孪生感知化、互联化、平台化、一体化的手段，实时接入园区 IoT 设备、资产、能源、设施及环境等数据，建立基于园区实时运行状况的数字孪生场景，融合园区数字孪生、运用管理、业务管理为一体，实现对园区总体情况、设备运维、物业管理、安全管控、运营服务等全要素、全流程可查、可管、可控、可追溯，打造“安全、智慧、绿色”的园区，提升园区的社会和经济价值，开创智慧园区的立体多维管理新模式，从而实现园区经济可持续发展的目标。

5. 智慧交通

在智慧交通领域，通过融合多源异构数据，搭建包含基础设施、动态车流、时空、地理等信息的交通数字孪生底座，并融入物联网、云计算、大数据、移动互联等前沿 IT 技术，汇集各类交通信息，提供实时交通数据下的交通信息服务。并利用 AI 图像识别、仿真算法等数据处理技术，实现智慧交通系统性、实时性、信息交流的交互性以及服务的广泛性，有效解决了交通感知难、出行难、治理难、维护难的行业痛点，进一步提升交通“规、建、管、运、服”能力，助力建成便捷顺畅、经济高效、绿色集约、智能先进、安全可靠的现代化高质量国家综合立体交通网，实现“交通强国”目标。

6. 智慧能源

在智慧能源领域，统筹大数据、人工智能、物联网等新一代信息技术，构建与物理城市能源相匹配的数字城市能源系统，挖掘真实的数据需求，建立科学的决策程序，用数据分析结果指导实践，实现城市能源系统全要素数字化和虚拟化，全状态实时化和可视化、运行管

理协同化和智能化，实现物理城市和数字城市虚实交互。通过“智慧化”使能源转化效率、能源传输效率、能源基础设施利用效率、能源与经济社会的结合效率显著提升，最终实现能源系统更加高效、清洁、低碳。

4.4 数字孪生城市典型应用案例

1. 开发公司介绍

北京睿呈时代信息科技有限公司成立于 2008 年 2 月，具有软件著作权四十余项，并获得国家测绘资质认定。公司自主研发的全息化企业应急地理信息管理平台通过专家审定，被正式立项为科技型企业技术创新基金项目，并给予创新基金支持。公司作为三维 GIS 领域的领导者，率先推出了拥有完全自主知识产权的全息 GIS 平台——“睿-GIS”。该平台实现了空间 GIS 技术、虚拟现实技术和模拟仿真技术的有机融合，为 GIS 技术发展及应用模式带来了无限可能，在关注现场管理的行业具有广阔的应用前景。

2. 案例概述

天津市滨海新区打造的滨海数字孪生城市基于多源数据的时空模型体系，对滨海新区陆域及海域进行数字孪生场景还原构建，通过接入 440 类 GIS 数据图层，构建城市智能运行的时空数据底座，模拟现实城市发展规律。通过大数据分析支撑城市规划建设、违法用地精准监测、土地全生命周期管理、城市应急、交通及水务的管理等应用场景。

滨海数字孪生城市一方面准确反映物理实体城市状态，另一方面精准操控、智能优化现实城市，极大改变城市面貌，重塑城市基础设施，形成物理维度上的实体城市和信息维度上的数字城市共生互动、虚实交融的格局。

3. 应用场景

（1）城市仿真及数据共享支撑城市智慧化建设

数字孪生系统，一方面将多源时空数据与专题数据进行对接、解析，可按不同时序观察滨海新区的变化趋势，将多源数据进行全要素数字化表达。通过多源 GIS 数据的融合构建，进行全方位模拟仿真推演，在界面上搭建出滨城风貌特色的场景，为智慧城市的建设提供数字化基础城市底板，引导重点地区的空间品质提升，展示美丽滨城的城市形象。同时，平台展示了城市结构与形态，为下一阶段总体城市设计工作奠定基础；另一方面，滨海数字孪生可为各委办局提供多类空间数据的支撑，用于构建各领域的智慧应用场景，监测 GIS 数据对各委办局的支撑情况、数据调用情况、信息化应用情况等，实现数据共享价值。

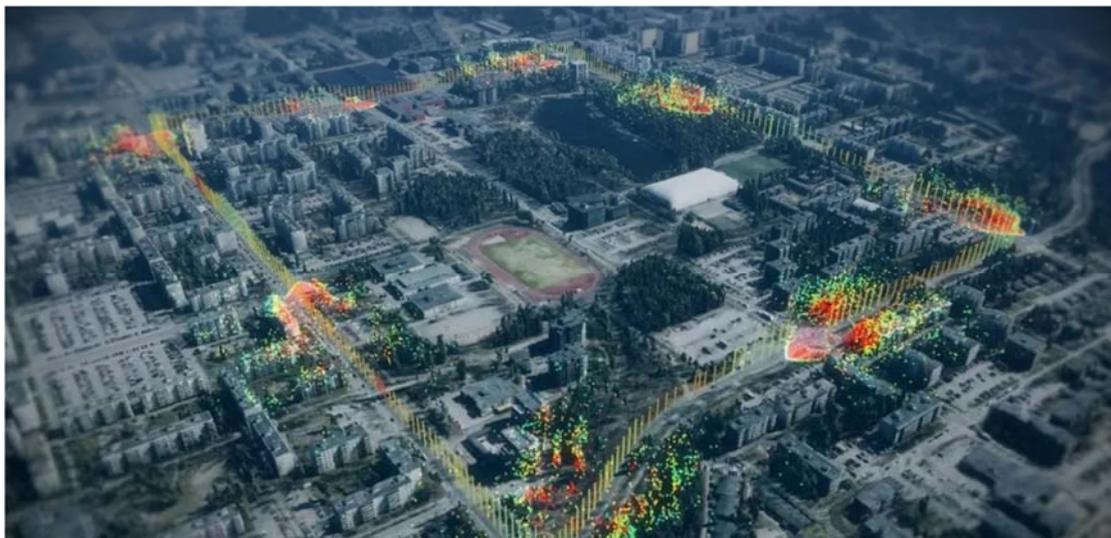


图 4-2 数字孪生智慧城市

（2） 数字孪生辅助辖区国土空间规划

数字孪生系统可实现对辖区内土地资源进行整体规划。以基础评价与风险评估为先导，以规划目标与战略为引领，依托优化的基础支撑体系，推进区域协同发展，塑造集聚发展的国土空间格局，构建河湖林田的生态农业空间，构建产城融合发展的城镇空间，塑造陆海统筹的魅力海岸带及海洋空间，保护历史与风貌塑造，修复生态与国土综合整治、优化主城区布局，实现规划传导与实施保障。

（3） 城市更新反应城市更迭升级成果

城市更新模块呈现滨海的新旧更替工作进展，了解城市更新项目分布，展示城市更新总体指标。通过重点城市更新项目的监测，结合国土三调数据及土地地籍信息，展示项目的更新进度，通过不同时期数据的积累，进行不同项目进度成果对比，掌握城市产业升级、土地节约集约利用、环境改善、设施优化、空间品质提升等情况，监测城市建成区拆除重建、综合整治或两者兼顾的规划建设活动，激发社会参与积极性，实现公平与效益兼顾，提高决策质量和效率。

（4） 城市夜经济反应区域经济发展

以滨海新区历年的夜景灯光影像为基础，通过数字孪生仿真系统对手机信令数据、区域经济统计数据、夜间灯光影像数据等多源异构数据进行信息整合。利用夜间灯光影像进行滨海新区宏观夜经济的发展探索，结合历年数据掌握滨海夜经济的横纵向发展趋势，通过蜂窝热力的形式反映该区域的 GDP 与夜间人口活动情况，微观场景以重点区域为例，进行夜间灯光变化展示，体现美丽高效的滨海夜间经济

发展。

（5） 土地全生命周期监管

数字孪生平台从土地规划计划、土地征收转用、土地储备、土地供应进行详细的土地处置节点跟踪，对超时未兑现的地块进行及时预警；土地的全生命周期管理可实现土地的用途管制、功能设置、业态布局、土地使用权明确等机制，促进项目建设、功能实现、运营管理、节能环保等经济、社会、环境各要素更合理化，实现土地利用管理系统化、精细化、动态化。

（6） 违法事件发现和执法监管

利用遥感数据辅助分析违法用地现象，助力实现耕地和基本农田严格保护、土地利用结构和布局优化调整、城乡建设用地统筹集约利用，通过土地生态环境有效改善实现土地利用总体目标。结合违法用地的管理流程，进行事件的高效处置，摸清处置力量，实时跟踪巡查人员的轨迹，规范处置流程，对超时处置进行及时预警。

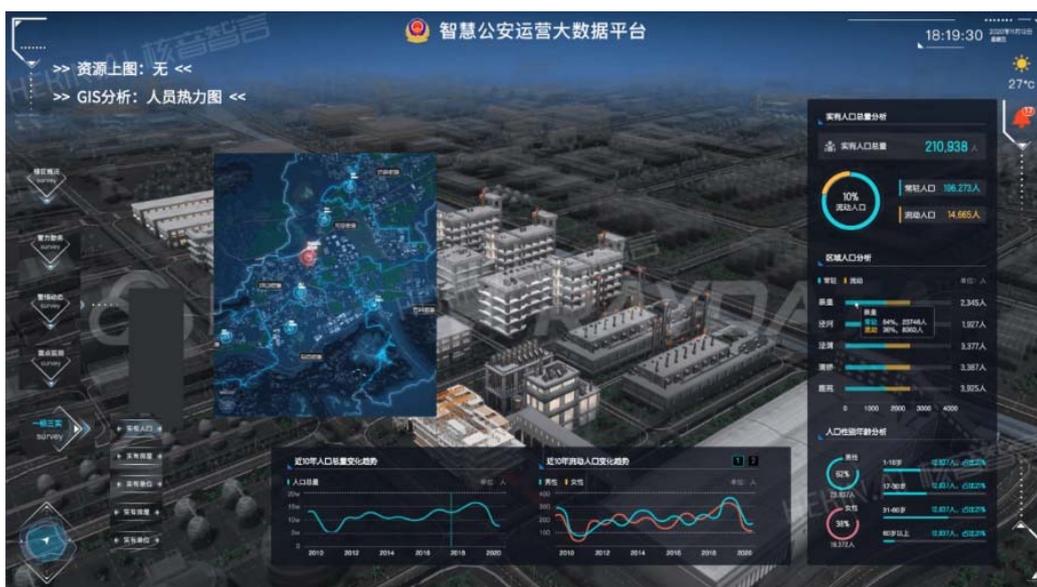


图 4-3 城市安全监测

（7） 滨海数字孪生助力土地资源监测管理

通过土地整治监测、土地利用监测、土地节约集约以及土地收益测算等系统模块，可促进城市的项目建设、功能实现、运营管理、节能环保，使城市经济、社会、环境各要素更合理化，实现土地利用管理智能化。

4. 案例总结

滨海数字孪生城市是支撑滨海新区新型智慧城市建设的复杂综合技术体系，是新区智能运行持续创新的前沿先进模式，一方面汇聚全区空间数据 440 项，数据服务发布 423 项，已为 4 个委办局提供了 253 次数据共享和接口服务能力，供各部门进行智慧城市建设；另一方面利用已有数据进行应用建设，呈现滨海新区全球贸易地位、城市建设进展新面貌及城市资源要素管理新体系等。面向各级领导、领域专家、民众等不同用户，针对智慧城市建设、重大决策、招商引资、民众参观等需求，既提供了规划愿景和现有成就的展示窗口，也提供专业决策分析工具，为城市的“规、建、管、服”提供应用支撑。

五、典型应用领域：数字孪生电力系统

5.1 数字孪生电力系统发展现状

工业 4.0 研究院的分析显示，电网行业具有价值较高、技术要求不复杂等特点，非常适合作为数字孪生应用的先导性场景。部分电力企业虽然引入了数字孪生技术，但主要应用在发电厂和配电厂的数字孪生化，简单讲即为可视化，其他场景的应用存在各种各样的问题，并未形成全局和全生命周期的应用。

从我国主要的电力公司推进数字化转型和数字孪生的情况上来看，大部分公司都没有形成公司级别的战略和规划，更谈不上形成全局和全生命周期的数字孪生，这不利于数字孪生技术在电网领域的应用和普及。

具体来讲，目前电网行业主要有三方面的挑战：

一是缺乏理论支撑。对于什么是数字孪生电网缺乏系统和统一的认知，甚至有时候还是互相矛盾的说法，其知识大都来自于国防领域或航空航天，并不适合电网这样的模块化特征较为明显的领域。

二是缺乏系统的规划。多家电网公司的调研显示，各家公司大都采用供应商提供的资料做规划，因此往往陷入供应商埋下的坑中，难以响应企业经营中创新的需要。

三是现有技术风险巨大。从各电网公司采用的数字孪生解决方案来看，大部分采用了游戏引擎（例如 Unity、UE 等）和消费互联网技术（例如数据中台等），这在解决管理信息化方面能起到一定作用，

但不太容易满足电网公司精细化或精准化管理等高级需求。

5.2 数字孪生电力系统技术架构

数字孪生电力生态系统总体架构包含基础层、数据层、应用层。

其中数据层包括感知层、传输层和平台层（图 5-1）。



图 5-1 数字孪生电力系统参考技术架构

基础层：以物联网电厂、输电、变电站、配电、楼宇空间等底层基础设施为依托，实现真实空间与虚拟空间之间的双向数据互通、指令控制、虚实联动。

感知层：以高精度、高灵敏的 PLC、SCADA、表计、ZIGBEE 等传感器系统为实现数字孪生电力系统的基础和万物互联感知的入口，通过采用这些系统实现了从虚拟电网对物理电网的全息复制和动态调整。

传输层：异构通信技术，数字孪生系统面临多系统、大连接、海量数据的双向传输需求，要利用宽带（4G/5G/GPRS/NB-IoT）、窄带（RS-485/M-Bus/HPLC/Lora/RF/Ethernet）等新型异构网络技术实现

高速率、高容量、低时延接入，确保物理电网海量传感器接入要求和虚拟电网精准控制指令的传达要求。

平台层：数字孪生模型构建与自我优化依赖全域全量的电网数据，通过数据中台的数据的存储、检索和大数据分析能力实现超大规模全量多源数据的安全存储、高效读取、为数字孪生平台优化决策提供精细的数据要素。

应用层：基于数字孪生技术对电力系统主要设备、厂站与环境精细三维全景仿真，实现与采集数据实时交互，实现在智慧输电、智慧园区、智慧电厂等各个应用场景中动态融合展示设备与关键传感数据。应用从超级可视化到实时诊断、智能预测、应急预案等多场景中。

5.3 数字孪生电力系统典型应用场景

1. 电网状态环境可视化监控应用

基于数字孪生技术对电网主要设备、厂站与环境精细三维全景仿真，实现与采集数据实时交互，能够在仿真场景中动态融合展示设备与关键传感数据。通过在厂站内部署的视频网络和传感器网络，实时反馈环境变化、并进行实时分析。

2. 电网设备远程智能巡视应用

使用物联网智能感知技术对众多关键测点进行监测，既能够增加巡检效率，又能够节约人力成本。

3. 远程故障诊断及辅助决策应用

目前电网各环节监控数据尚未统一集中上送至国网总部，各省公

司亦无法全面汇集所辖设备信息，从而无法及时开展设备预警预控和快速分析。因此要实现远程故障诊断，通过全面的数据调用和专家团队集中决策，大幅提高故障诊断和后续处理的及时性和准确性。

4. 电网智能预警及状态检修应用

在以往的实际生产中，大部分管理人员根据已有的经验对设备异常和故障做出判断，然而这种主观的认知并不能十分准确的反应设备状态变化。通过对设备运行数据的实时监测，来智能评估设备运行状态，提前预警并提出预防措施，防止出现危及系统及设备的严重故障，也有助于科学合理的制定检修计划。

5. 电网设备仿真培训应用

通过三维动画演示开展电力系统的检修指导及培训，不断提高检修人员的技术水平。

6. 安全作业管控应用

通过和三维空间位置信息的结合，进而实现对人员、设备、车辆的安全作业管控。依托业务中台安全域的两票管理、安全风险、安全评价等中心的服务，进行工作票的全过程安全管控和作业风险提前识别；同时结合现场传感设备，进行现场作业过程的状态感知和状态快速分析，实现作业计划管控、作业风险评估等功能。

7. 电网生产业务管控应用

采用桌面终端、移动终端等方式，为业务管理、日常管控、辅助决策提供统一的融合平台。

5.4 数字孪生电力系统典型应用案例（一）

1. 开发公司介绍

山西虚拟现实产业技术研究院成立于 2019 年 11 月，不断促进数字科技创新与经济社会发展的深度融合，致力于推动数字孪生、虚拟现实等数字科技新基础设施建设。公司坚持社会经济发展需求为科技创新导向，突出服务科技创新和引导产业发展，聚合高校优势学科平台和科研带头人、企业创新中心和科研院所研发力量、国际一流创新成果，目标实现数字孪生与虚拟现实产业引领和推动机构、国内一流新型研发机构、区域产业结构转型升级示范机构、有力担当就业税收等社会责任机构。

2. 案例概述

电力系统是由发、输、变、配、用各环节组成的一个整体，电力的生产、输送、分配和消费是在同一时间进行的，因此电力系统对安全稳定运行的要求非常高。由于电力系统规模大、设备种类多、专业分工细，对发电、供电、电建从业员工的要求特别严格，持续的电力安全生产、作业技能职业教育培训意义重大；而传统的电力职业教育培训方式不可能利用实际运行设备进行，因此学员缺乏真实体验感。如何克服场地、设备、时空等各种限制，寻求一种安全并且有效的培训方法，是电力职业教育培训多年来不断探索的方向。

学员培训本质上是关于安全生产知识和作业技能学习的教学过程。如何运用信息化手段，把物联网、云计算、人工智能、VR 虚拟现实等先进的技术应用于教学训练，发挥教育技术对教育效果的提升

作用，虚实结合进行演练，并不断研究电力的生产、输送、分配和消费中可能出现的、复杂多变的情况，使学员综合素质在多层次得到锤炼，促进学员由知识向能力的转化，意义重大，也是当前电力职业教育信息化建设的重要课题。



图 5-2 系统第一视角

3. 应用场景

（1）资源互联互通

统一大平台基础上，电力企业省级机构总体部署规划平台资源，各分支机构资源既可分别管理又可共享互通。

（2）统一教育培训云服务平台

实现统一升级、统一维护，统一培训/考核标准，通过高效率、低成本运营，保障大规模常态化应用；并为电力企业与下属分支机构培训管理者，提供便捷化的教育培训管理和科学决策。



图 5-3 模拟训练系统界面

（3）全新教育培训方式

通过 VR 技术及互联网 IT 技术在教育及训练中的应用，从而全面提高一线工人的专业知识和施工作业技能，促进职工素质的全面提升。

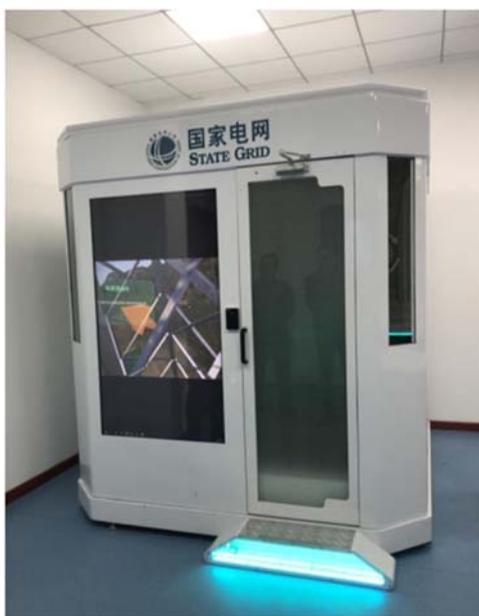


图 5-4XRTM 教育培训安全仓

4. 案例总结

平台按照省、市两级部署，由专有的运营服务平台和运维服务平

台提供统一支撑，面向第三方教育厂商和各分支机构开放，旨在打造覆盖全省、多地分布、互联互通互动的教育培训云服务体系。

围绕“XRTM 教育培训云平台”、“XRTM 教育培训安全仓”“大数据中心”、“资源中心”，以学员和培训管理部门为服务对象，最终形成智慧学习生态体系，促进电力企业员工整体教育质量的提升。

5.5 数字孪生电力系统典型应用案例（二）

1. 开发公司简介

该案例同样由山西虚拟现实产业技术研究院主导开发。

2. 案例概述

数字孪生智慧电力园区平台，实现生产调度电力园区的重点功能区域重点设备的电流电压、水浸、温湿度、烟雾等的数据采集和集中处理。通过对系统中各类指标阈值设定和关联大数据分析处理，实现安全预警、事件报警、事件精准定位和事件应急方案提示。在配电系统，通过采集进出线的电压、电流、中性线电流、频率、有功功率、无功功率、功率因数等指标，对过流过压进行报警，实现供配电系统的安全预警。通过对采集的数据进行数据分析，包括三相不平衡分析，谐波分析和负荷率计算等，实现供配电平稳运行。通过对重点机房、功能区域以及公共区域的实时水浸监测，管路水压、水流实时监测，及时发现漏水、管裂、管爆事件，实现快速定位事件发生位置，及时防范灾难性事件发生。通过对关键功能区域的温湿度指标的实时监测，

及时推定可能事件的发生，如空调失效、门窗破损，雨水灌入等事件，以保护设备环境。

通过对关键功能区域烟雾、空气质量的监测，提前预警，保护作业人员的人身安全，并根据大数据关联性分析，提醒值班人员可能的事件类型，与其他传感器的警示相互印证；并在其他传感器存在可能失效的情况下提供事故预警的高一级防线。

3. 应用场景

（1） 配电系统管理

实时展示变配电系统结构、三维电气拓扑图；以图形方式展示模拟量、开关量实时数据，动态展示设备通信状态，支持远程配置阈值，可实时上报故障、越限、通信事件，支持声音和语音报警，可以各种动画效果展示；实时监测变配电回路三相温度、高温报警、过流告警、过功率告警等信号，并进行变压器和单个回路的负荷率以及损耗率的统计分析；谐波精准监测。精确测量到从基波到第 31 次的奇偶次电压电流谐波含量，实时反映非线性负荷对变压器的损耗影响，及时发现异常用能和能源损耗，提醒用户及时干预。

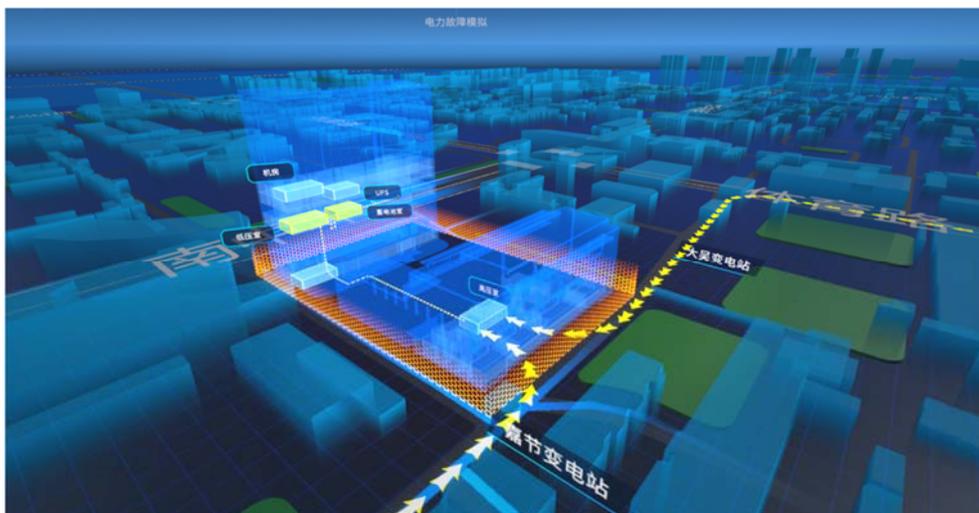


图 5-5 配电系统管理

（2） 实时数据展示

关联了展示要求，在查看某项数据和报警时，能够方便查看该项数据相关联设备数据或运行状况。监控系统采用了 3D 图：在空间结构上，能够展现监控对象所在的楼宇、楼层及房间；在逻辑结构上，能够按照不同子系统来分别呈现。当发生故障时，报警事件可以直观地在 3D 界面上显示相应的效果。具备按照房间或类型为划分的区域告警，可准确显示告警地点、告警内容及告警等级。能够直观显示各类被监控基础设施的实时数据和状态信息。

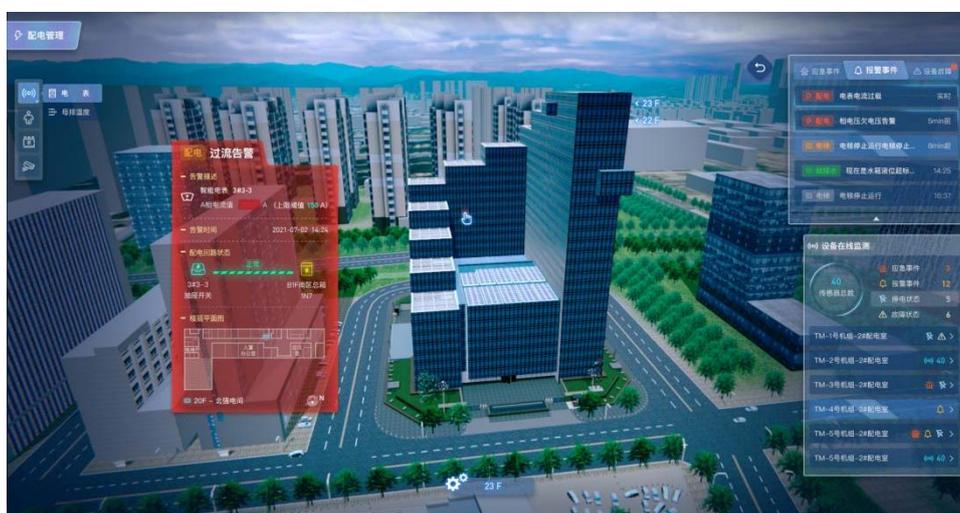


图 5-6 实时数据展示

（3） 异常报警

实现系统内所有事件统一告警，并具备多种告警方式。系统具备完整的告警事件查询功能，查询方式应该灵活多样，允许用户根据不同的组合条件对告警事件进行查询，查询结果包含每一条告警事件的告警时间、地点、告警设备、告警内容、确认人等信息。

系统可对所有报警事件进行判断，分析各报警事件的因果关系，通过预先设定的逻辑关系，屏蔽部分报警事件，减少突发性事件带来的误报警和容量冲击，实现准确定位事件根源，从而提高了管理人员

的工作效率，设置过滤组可对过滤时间、过滤条件，以及过滤报警的描述进行设置。

（4） 实时运行监控

实时展示变配电系统结构、电气主接线图；以图形方式展示模拟量、开关量实时数据，动态展示设备通信状态，支持遥控、遥调和置数，可实时上报故障、越限、通信事件，支持声音和语音报警，可以各种动画效果展示。

实时监测变压器三相温度、高温报警、故障等信号，并进行负荷率以及损耗率的统计分析。

实时监测动环系统参数，如温湿度、烟雾、水浸探测等。

（5） 趋势曲线查询及分析

支持对系统计量监测对象的关键用能参数（如：电-有功功率；温度、湿度等）进行历史趋势数据的查询和分析，帮助运行人员分析故障原因。系统默认提供多种方式的电力数据统计对比展示模块，以便管理人员直接调用。

（6） 设备管理

通过对设备工作状态参数以及工况参数的实时采集和监视可及时判断设备的运行工况是否正常。对设备的历史维护记录和维护计划进行在线管理，设备及其主要零配件的检修、更换历史记录形成信息化管理，并可提供设备计划检修到期提醒以及逾期检修告警等功能，确保设备的安全、稳定、经济运行。支持录入、查询和修改指定设备对象的维护、检修记录。包括项目名称、设备名称、检修时间、检修

人、问题现象描述以及检修结果等详细内容。

（7） 工单管理

实现巡视计划、派工、巡视处理单一体化智能化线上处理。监视巡视中如发现设备问题或者故障，线上及时生成故障检修任务电子工单，由检修人员手机接单后进行及时的抢修和处理。工单完成后，处理结果线上报告，实现无纸化办公。

（8） 能效分析

定期提供月度和年度节能诊断及运行管理分析报告给用户管理人员。该服务为主动型服务，侧重从整体层面对当前耗能设备、主要耗能区域以及用能运行管理的过程进行数据分析，寻找设备用能的规律和特点，用能管理可提升优化的空间，为下一周期的节能管理提供参考建议。

4. 案例总结

以电力公司生产调度电力园区为试点，打造了数字化、信息化、自动化、智能化的数字孪生智慧楼宇管控平台，应用于生产调度电力园区的电力、水务、安保、消防、运管等多个业务模块，引领能源数字化转型，促进数字化转型进程，同时以该公司数字化转型为山西省省重点试点，建设全省域能源互联网示范区，实现能源优势向经济优势的合理转换。

5.6 数字孪生电力系统典型应用案例（三）

1. 开发公司介绍

北京华电天仁电力控制技术有限公司成立于 2003 年 4 月，是最早从事发电厂信息系统业务的高新技术企业之一。

公司致力于发电行业控制与信息领域，以电力生产更安全、高效、智能化为使命，深度融合信息网络科技，拥有强大的技术研发、工程实施和运行维护能力，形成了新能源、信息化两大核心业务。

绿色共享、智慧互联，公司顺应电力体制改革，率先打造电力行业信息化服务团队，利用互联网信息+控制与信息核心技术建设智慧电厂，为客户提供定制化解决方案，推动电力行业转型升级。

2. 案例概述

随着廊坊热电厂精细化管理要求的不断提高，现有信息化系统已不能满足管理需要。主要体现为：业务覆盖不全，系统未横向打通，数据利用率低，数据缺乏挖掘分析；生产、经营、燃料等管理标准还未能融入各业务系统，“两票三制”等关键管理制度管控标准化、流程化、智能化水平存在较大差距，执行效率还不高，安全生产和业务管控还存在风险点；部门间、专业间、岗位间协同化运作无支撑平台，还有较大潜力可控。

综上，为响应集团公司战略发展要求，基于廊坊热电厂的实际需求和作为集团公司窗口电厂对外展示的需要，结合集团公司安全生产环保工作新要求，利用云计算、大数据、物联网、移动应用、人工智能等前沿信息技术，在充分利用集团信息化规划建设成果的基础上，按照“云边结合”的理念，开展廊坊热电厂数字化转型建设，支撑企业生产管控、业务运营的安全、高效、集约、规范和智能运作，提升

企业的科学分析、决策和预判能力，提高设备可靠性，促进机组安全、经济运行。

3. 应用场景

（1）高精度数字孪生热电厂

项目根据热电厂现场和现有数据情况，采用多种建模手段，融合多种数据成果，构建与现实物理世界等比例且具有高精度的数字孪生电厂。



图 5-7 高精度数字孪生热电厂

（2）设备全生命周期管理

在智能电厂的各个层级实现针对全厂设备的全生命周期管理，实现全程可视化和全生命周期管理透明化。运行管理人员可以在三维虚拟平台中用直观高效的一体化方式综合浏览热电厂各类信息，包括热电厂本体、接线逻辑以及运行、检修状态等，同时可利用这些信息对热电厂设备的实时状态和历史状态进行对比分析，预测设备运行趋势。

（3）现实热电厂搜索引擎

以数字孪生热电厂为基础，索引并归档物理热电厂中的对象，并以知识图谱为基础构建对象之间的逻辑关系，从而提供便捷完善的搜索方式，包括关键字搜索、编码搜索、空间关系搜索、时序关系搜索和逻辑关系搜索等，实现快速定位和精准获取所需内容。

（4）高精度人员定位

结合对人员管理的实际工作要求，在高精度数字孪生热电厂基础上，实现全厂工作人员的精准定位，采用 UWB 精准定位技术、图像识别、人脸识别、大数据分析等新技术，打造工业复杂环境下分米级定位的三维安全管控系统。高精度人员定位模块通过 PC 端和移动端 APP 相结合方式，实现对整个厂区人员活动轨迹的监控，并以此功能深入拓展，实现智能点巡检、智能两票管理系统等，一方面能降低由人为原因造成的安全事故，另一方面也可大大提高生产管理安全，实现有效管控，实现智慧电厂全方位安全生产管理。

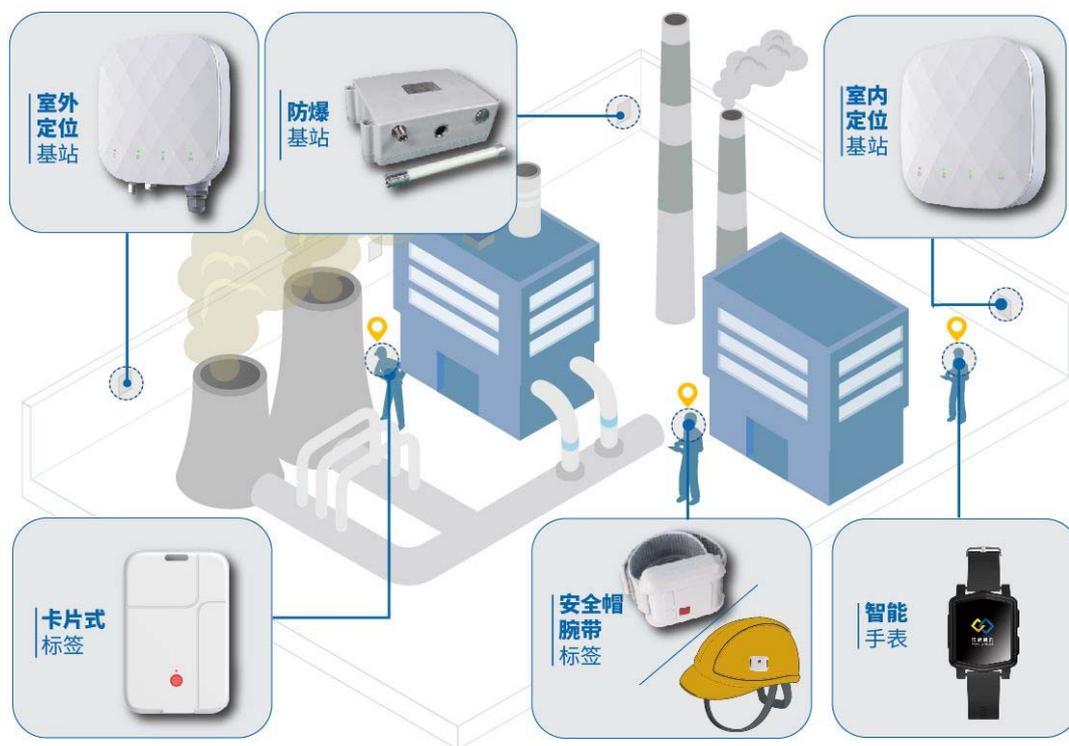


图 5-8 高精度人员定位

（5）实时视频监控

在数字孪生热电厂环境下，接入并融合监控视频，可实时调用并查看视频。同时，可针对摄像头位置进行分析，保障重点区域实现监控全覆盖，从而加强对重点监控区域的监察管理。

4. 案例总结

廊坊热电厂通过将数字孪生和新一代信息技术融入工厂全过程管理，构建数字化、信息化、智能化的管理平台，全面提升了发电生产、管理、运营的信息化、数字化、智能化水平。通过全面的信息感知、互联，以及智能分析模型，智能判断热电厂设备运行工况，实现一、二类故障全覆盖，早期预警预判达到 85%以上，提高了设备的可靠性，实现了促进机组经济运行，促进安全生产，减员增效，为管理提升、高品质绿色发电、高效清洁近零排放电站建设提供技术支撑。

六、其他领域典型应用案例

6.1 智慧水利数字孪生 IOC 系统

北京数字冰雹信息技术有限公司智慧水利数字孪生 IOC 系统，面向水利监督管理部门，支持整合水利各部门现有信息系统的数据库资源，深度融合 5G、大数据、云计算、AI、融合通信等前沿技术应用，将信息、技术、设备与水利管理需求有机结合，覆盖水利综合态势监测、水资源监测、流域气象水文监测、水库调度监测、梯级电站运行监测、防汛安全监测等多个业务领域，全面赋能用户业务应用，实现“智能感知、智能处置、智能考评、智能改进”，有效提升跨部门决策和资源协调效率。

1. 水利综合态势监测

支持基于地理信息系统，对江河湖泊流域、水库、电站、重要设备等管理要素的分布、范围、类型、状态等信息进行综合监测；支持融合水利管理各部门现有数据资源，对水文气象信息监测、调度业务管理、节水发电、防洪等各业务领域的关键指标进行多维可视分析；支持通过三维建模，多种角度直观展示大坝主体、船闸、电站机组、闸门泄水建筑物等重点管理对象的运行态势，实现水利管理综合运营态势一屏掌握。

2. 流域气象水文监测

（1）流域气象监测

支持融合气象管理部门业务系统、气象观测站、天气雷达等系统

数据资源，对坝区、站点、流域的天气、降水、蒸发、渗流、径流、蒸腾等参数指标进行综合监测分析，支持灾害气象预警告警，辅助管理者全面掌控水文气象态势，实现气象准确预测、及时响应。



图 6-1 气象监测

（2）水文信息监测

支持基于地理信息系统，通过丰富的可视化手段，对各流域、河流、湖泊、水库、地下水等要素的位置、范围、状态、径流组成等要素信息进行直观展示，对河道水位、河道流量、流速、水库水位、出入库流量等数据指标变化态势进行实时监测分析，对异常态势进行实时预警告警，为防汛抗旱减灾、水资源管理、水生态保护、突发水事件应急处置、水工程建设运行等业务决策提供有力支撑。

（3）流域水情监测

支持基于地理信息系统，直观展示各监测点的分布、覆盖面积、类型和监测信息，并可结合专业分析预测模型，对流量、流速、降雨（雪）、蒸发、泥沙、冰凌、墒情、水质等水情参数进行多维度分析，

对异常水情进行可视化预警告警，辅助用户及时掌握水情动态，提升对水害事故应急相应效率。

3. 防洪防汛安全监测

基于地理信息系统，可直观监测各流域、水库、超警站点等要素的分布、状态等信息；支持集成防汛抗旱、水利工程、城市内涝监测、水位监测等各系统数据，对天气、降水量以及江河湖泊、水库的水位、水库蓄水量、总库容、入库流量、出库流量等要素进行实时监测和可视化分析，并可对各异常情况进行可视化预警告警，为防汛抗旱、洪灾风险评估等工作提供支持。

4. 梯级电站运营监测

（1）梯级电站拓扑监测

支持从地理空间分布维度和逻辑层级结构维度，对大范围梯级电站送电线路的分布、节点位置、送电方向、拓扑关系等信息进行综合展示；并可集成电网自动化管理、运行监测、信息采集等调度数据，结合专业模型算法，对电力外送线路、主变及发电机等要素的容量、电压、负载、线路约束、装机能力以及电力配送情况等指标进行多维度可视化分析，辅助管理者综合掌握梯级电站外送与运行态势，提高电能调配的能力和效率。

（2）电站运行监测

支持通过三维建模，对坝体、电站、闸门等要素的外观、复杂机械结构等信息进行三维仿真显示；并可集成视频监控、设备运行监测、环境监测以及其他传感器实时上传的监测数据，动态展示闸门状态启

闭开度状态、下泄流量、闸门开启次数、闸门排序等枢纽信息，对机组运行时间、出力特征值、水位、负荷等数据进行可视化分析，支持设备运行异常实时告警、设备详细信息查询，辅助管理者直观掌握电站运行状态。



图 6-2 电站运行监测

5. 水库调度监测

(1) 生态调度监测

支持基于地理信息系统，对采样点、产卵场、保护区、实验区、缓冲区等管理要素的位置、分布、范围、类型等信息进行实时监测；支持结合专业模型算法，对产卵量、水文调度流量、水温、水位、分层取水数据等指标进行可视化分析，为水生态保护与修复、河湖生态流量水量管理以及河湖水系连通工作等提供有力支持。

(2) 水量调度监测

支持集成各水库监测管理系统数据，基于地理信息系统，对水库的位置、范围、状态等信息进行直观展示，对入库径流量、水库蓄水

量、防洪库容、可用水量等数据指标进行多维度分析研判，对水库调蓄能力不足、水位超限等异常态势进行可视化预警告警，提升水库运行监管力度，为防洪、兴利等工作提供决策支持。



图 6-3 水量调度监测

（3）泥沙调度监测

支持集成前端监测系统数据，对流域泥沙量进行可视化监测，通过可视化手段动态展示泥沙淤积情况，支持设立泥沙量超标预警机制，对泥沙沉积过量进行告警，辅助用户高效感知泥沙沉积状况，提升泄洪抗洪效能。

（4）航运调度监测

支持基于地理信息系统，对河道、锚地、船只电站等要素的位置、分布、状态等信息进行可视化监测，并可通过丰富的可视化手段，对年/日通航船次、过闸船次等航运数据进行多维度分析研判，辅助用户进行汛期防洪对航运影响分析，提高航运调度的能力。

6. 系统信息安全态势监测

（1）水情遥测系统监测

基于地理信息系统，支持对水文站、水库站、雨量站等各站点以

及维修中心等要素的位置分布、类型、状态等信息进行直观展示，支持点选查看具体站点详细信息（如建设时间、面积、站点数量、设备详情等）；支持提供丰富的可视化手段，对卫星、移动基站、电台、网络等各类测站的组网态势、通信传输方向、传输速率等指标进行可视化分析，辅助用户全面直观掌握水情遥测系统运行态势。



图 6-4 水情遥测系统监测

（2） 自动化系统监测

支持从地理空间分布维度和逻辑层级结构维度，对自动化系统及设备的构成、区域分布、应用功能等信息进行直观展示；并可集成自动化系统及设备运行数据，动态展示系统数据流、数据量和系统运行工况、相关单位间数据调取情况等，并可对数据实时流转情况、畅通率及可用度、数据存储余量等数据进行可视化分析，辅助用户全面直观掌握梯调中心调度自动化运行态势。

（3） 通信态势监测

支持通过拓扑图、链路图等方式展示通信光传输网络拓扑，对通

信数据传输的设备、节点、态势进行动态复现，支持结合专业行业模型分析算法，提供丰富的可视化手段，对通信电源容量、通道/业务可用率、通道容量、光纤长度、业务数量等数据指标进行可视化分析，对通信安全设立预警机制，对影响通信安全事件进行可视化告警，辅助管理者提高通信安全监管力度。

6.2 数字孪生可视化智慧监狱监控平台

数字孪生可视化智慧监狱监控平台（以下简称可视化平台），适用于监狱指挥监控中心大屏环境，具备优秀的大数据显示性能以及多级协同管理机制，支持大屏、多屏、超大分辨率等显示情景。整合监狱现有信息系统的数据资源，覆盖监所管理多个业务领域，凭借先进的人机交互方式，实现数据融合、数据显示、数据分析、数据监测指挥等多种功能，可广泛应用于监所日常管控、应急处置、安全风险研判、展示汇报等场景。

1. 深度融合监狱各项业务

着眼于监狱工作实际，在遵循“集成化、标准化、智慧化、可视化、体验化”的原则基础上，以数字孪生和物联网技术为基础，叠加云技术、大数据处理技术、现代网络和信息技术、智能化技术、AI等多种先进技术与监狱各项业务深度融合，将其统一整合到一个平台，统一进行数据的实时采集、分析、存储、应用、共享，实现监狱多种异构平台的统一指挥、调度，形成标准规范科学统一、数据信息全面准确、业务应用灵活普及、研判预警智慧高效的监狱管理应用体系。

2. 保护已有信息化投资

充分利用监狱各区域和各场景现有的各类设备（传感器）和各类子系统资源的基础上，将各项硬件/系统资源统一整合到一个平台，使用数字孪生三维技术动态、实时展示监狱罪犯活动动向、警力分布、物力资源、技防资源、警戒安防等信息资源，使之一目了然、一键调度，提升处置效率的同时，提升监狱资源利用效率。



图 6-5 资源整合

3. 全景呈现三维监区

基于监狱真实的楼宇空间数据，搭建三维监所精确模型，从监室内部空间到整体的楼宇结构，每一处细节都逼真还原，监狱空间所见即所得。

提供便捷友好的人机交互方式，支持多角度视点调整、下钻查看，并可根据视野范围显示多精度模型细节，实现将所有监测对象尽收眼底，杜绝监测死角，辅助监狱管理人员查看监区运行态势，有效提升安防管理工作效力。

4. 精细化网格管理

采用网格化管理可视化主题方案，依据各部门职能，在三维场景中
对监所进行了网格区域划分，监狱管理人员可对每个网格区域内警
力、警情、监管人员等要素的运行态势进行宏观和微观的监测。从而，
有效的提升了监狱精细化管理的工作效率和监管力度。



图 6-6 精细化网格管理

5. 监狱风险分析研判

运用预防大于治理的管理理念，并在结合监狱风险研判算法模型
的基础上，围绕“人、地、事、物、情”五个维度对监狱风险要素进
行可视化分析，通过不同颜色对潜在风险信息进行直观的标注，对高
风险信息进行实时预警告警。辅助监狱管理人员感知监狱各项风险隐
患，以便提前做好安防工作，有效降低突发事件发生的概率。

6.3 化工园区数字孪生解决方案

随着园区自动化、信息化建设的不断推进，各种自动化系统、信
息化系统的部署与应用，使得园区整体的运营管理变得越来越重要，

而且工作量越来越大，协同工作性要求越来越高，对安全性、可用性和运维管理等要求也越来越高。但另一方面，随着园区智能化建设不断演变，会由于缺乏统一规划等制约条件，而面临越来越大的挑战。

1. 可视化数字孪生工厂

对整个园区、建筑物、生产车间、生产设备、监控设备等进行三维建模，实现物理园区到三维虚拟园区的数字化、监控可视化的转变。



图 6-7 监控中心

2. 全面融合现有系统

通过对园区内现有各种架构专业信息管理系统融合，在包括：生产管控、环境监控、物流管理、人员作业等在内的全方位、全流程的管控，从而形成统一的设备运行状态及参数实时全面采集，统一系统平台数据汇总、存储、分析，并通过仿真软件中模型状态的实时更新，使模拟数据同真实设备、人员和环境状态保持一致，最终实现在园区整体宏观态势的把控与预测。

3. 告警可视化管理与定位

平台集成的监控子系统，可以设定监控属性预警阈值以及预警等级，同时开放接收第三方系统推送的预警接口，实现不同等级的预警

展示，并用不同颜色进行提醒。点击预警对象时，可以显示详细的预警信息；点击定位时，可以实现视角定位。



图 6-8 生产管理监测

6.4 数字孪生智慧工厂方案

现代化工厂的自动化、信息化程度都相对较高，各种系统的部署，软硬件的联合应用，都使得工厂管理的重要性更为突出，同时也增加了管理的工作量。究其根本原因，还是因为庞大体系下的工厂信息不透明导致的。工厂集中监控可视化管理平台的缺失，导致管理人员无法实时、全面、准确的得知各生产及相关环节的实际状况，更无法及时的进行排查及做好及时处理，这也造成了工厂管理的窘境。

基于这一背景，旨在通过三维可视化技术、快速建模技术，集成工厂实时监控设备传感器技术（MES 系统）、摄像头、传感器实时数据以及运营管理数据等，最终满足三维数字孪生工厂的管理需求。通过三维数字孪生工厂的建设，管理人员能够实时掌握生产现场的生产进度，计划、目标达成情况，以及生产的人员、设备、物料、质量的

相关信息等，使整个生产现场完全透明。

1. 工艺流程模拟

工艺流程表现，虚拟孪生工厂车间真实还原现实物理生产车间，并模拟生产过程。通过对各个生产工艺的工艺流程、设备生产关键动作进行模拟，以动画的形式进行展示，能够快速展示各个生产工序的流程，同时针对不同的工序进行深度开发，将生产数据与三维模型设备进行融合，可实现三维模型设备与现实物理生产设备的联动和控制，展示现场设备实时运行数据。

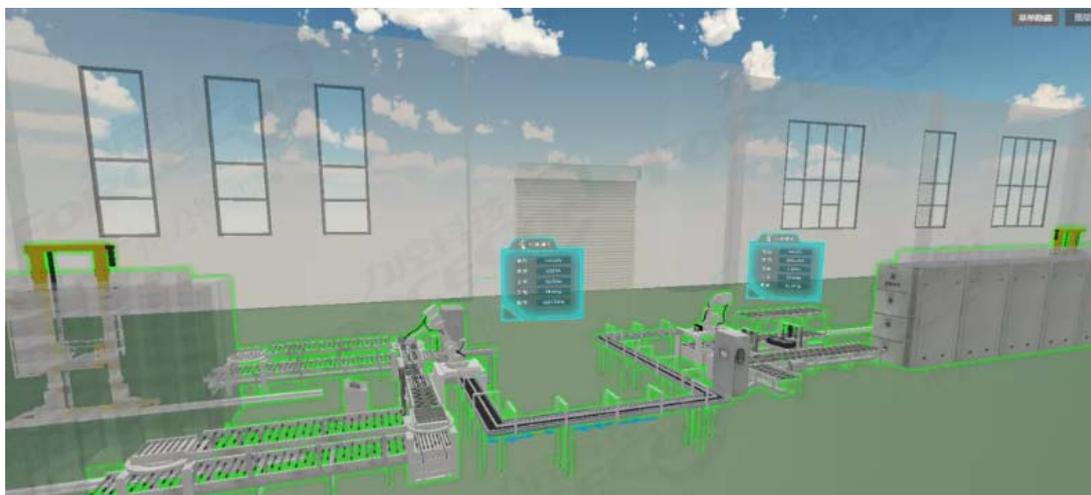


图 6-9 工艺流程模拟

2. 实时数据显示

将 SCADA、MES 等系统的传感器数据与三维场景相关联，在三维传感器模型上进行实时数据展示，实现动态数据的三维可视化展示，为系统的业务管理功能提供支撑。将传感器实时回传的检测数据从数据库中读取，实时绘制在三维场景的设备工位和传感器上方，实时监控设备运行状态等，遇到超出预设值时进行警告提醒。用户通过此功能可以调阅整个数字孪生工厂的生产情况，设备安装变更情况等，在三维场景中真实反映和表现。



图 6-10 实时数据显示

3. 设备属性查询

在系统场景中通过点击各种对象查询其属性，包括建筑信息查询、附属设施查询、设备信息查询。能够对数字孪生工厂系统的重要设备的运行状态以及相关历史属性进行查询，了解数字孪生工厂的运行状态。

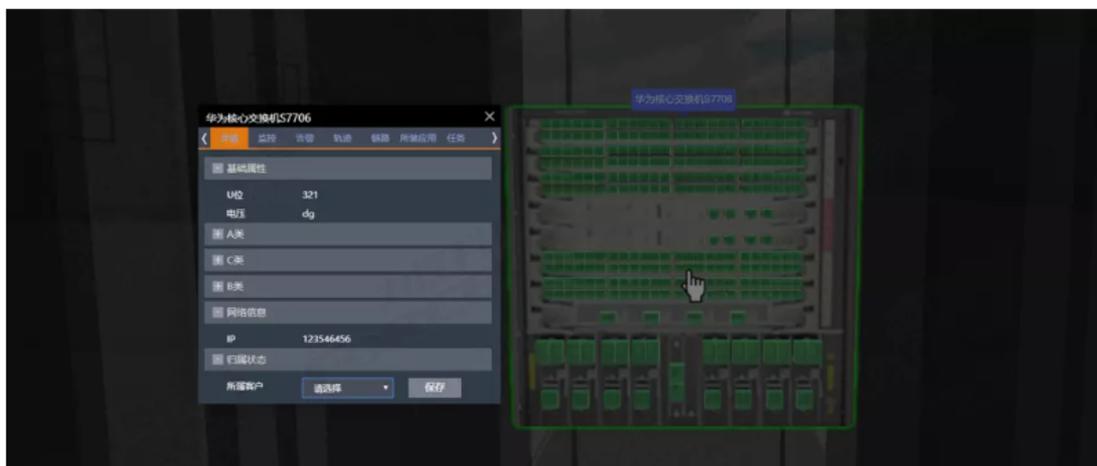


图 6-11 设备属性查询

4. 监控报警数据查询

通过关联数据库，系统可以实时调阅、查询所关注区域的监控和报警数据，系统支持按照时间、区域、设备类型、及高级条件匹配组合等多种查询方式，全面贴合各阶层用户的查询需求，利于保存、更

新、维护，避免了数据信息孤岛及更新维护不及时的现象，真正提升了企业信息化办公的水平，方便企业快速分析海量数据及判定走向趋势，提高了办公效率。



图 6-12 监控报警数据查询

5. 设备告警管理

系统能及时对设备发生故障报警，采集报警信息，列出报警设备信息，点击报警信息能自动定位到设备处，快速查看设备的报警情况，并且在报警设备处显示醒目报警标签。

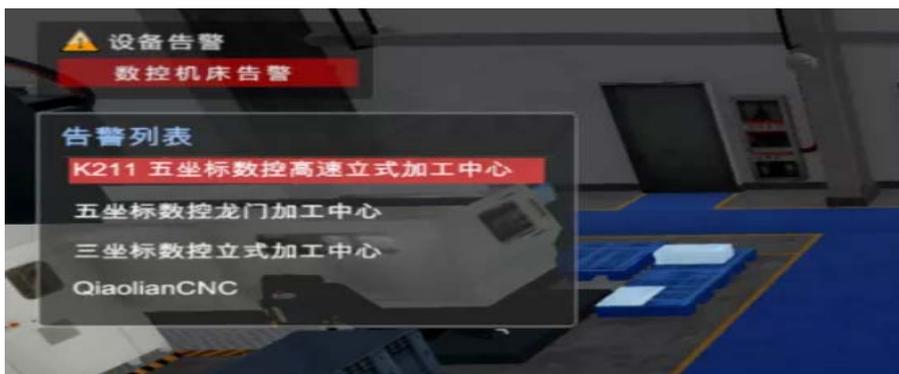


图 6-13 设备告警管理

6. 设备信息可视化管理

系统提供三维数字孪生工厂的运维管理模式，实现所有独立设备与架式设备的三维建模，可以快速搜索、定位目标设备，便捷的查询

设备信息、设备安装应用信息、设备归属信息、设备运维信息以及相关运行手册，运维人员无需频繁进出便可清晰掌握生产产区的资产状况。



图 6-14 设备信息可视化管理

7. 设备实时联动可视化管理

数据采集设备实时采集对应设备运行参数，将采集到的设备运行参数推送至平台，将物理对象与虚拟对象进行映射，实现仿真软件中模型状态实时更新数据同真实设备运动一致，真正监控到智能工厂的真实运行情况。

6.5 电力企业变电站通信机房可视化解决方案

随着电力企业变电站自建通信机房的规模和数量逐年快速增长，在对机房资源管控、运维等工作的过程也出现了如下问题：

机房规模小或分散。电力企业变电站自建通信机房，一般都有在远离市区、分散不集中和规模偏小的特点。这给一线运维人员的日常运维工作带来极大困难。

管理工具分散。应用和系统管理、网络管理、机房管理等工具系统，分散孤立，缺乏整合，无法提供统一管理视图，难以协调配合。

技术领域关联分析不足。没有建立跨技术领域的关联关系，缺乏自业务应用至 IT 基础设施的统一管理视图，当系统出现故障时，影响范围和故障根源定位困难。

可视化管理缺失。当前系统建设仍停留在数据管理和传统的表格维护层面，内容理解困难，缺乏有效的可视化分析手段。

管理数据维护繁重。部分运维数据维护仍依赖传统的离线电子表格，管理分散，缺乏统一的管理手段，带来的工作量繁重。

因此，如果没有统一的监控系统进行管理，而主要是依靠值班人员的定时巡检来进行系统监控，由于值班人员知识面和安全管理的问题，值班人员不可能实时详细地检查每个通信机房，所以存在较大的安全生产隐患。

1. 资产可视化

资产管理模块，通过集中化平台管理通信机房的所有设施，能够对资产进行多图层展现，逐层定位到具体机房、区域、模块、机柜与 IT 设施，直观呈现信息的对象和位置属性，并实现对 IT 设备的图形化查询。

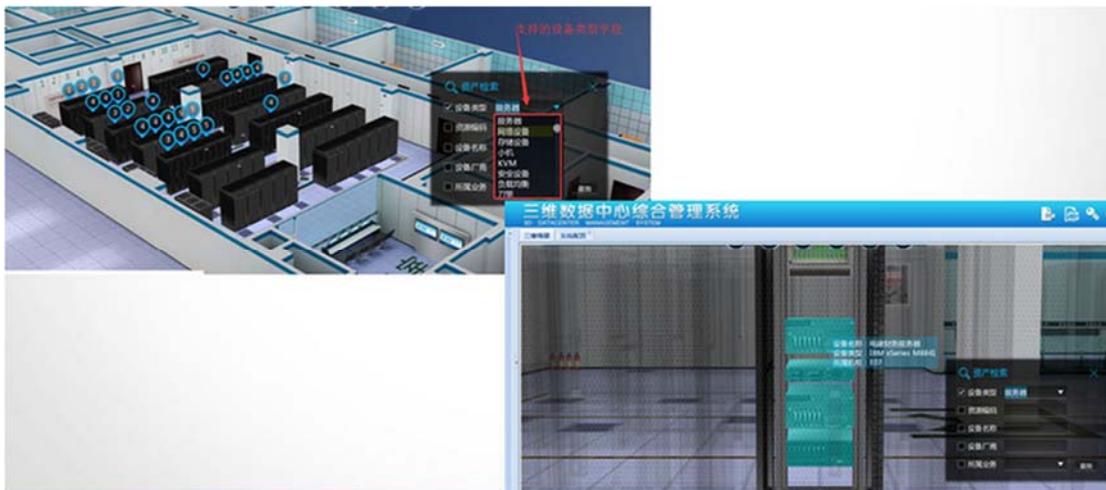


图 6-15 资产可视化

2. 空间可视化

通信机房可以根据需求进行扩容，保证设备设施的位置安放空间储存。孪生场景中将微模块机房内的机位容量、机柜剩余空间、功耗、机柜承重都进行直观展示，同时可快速查看通信机房机柜的空间使用容量，以实现最佳的容量规划。

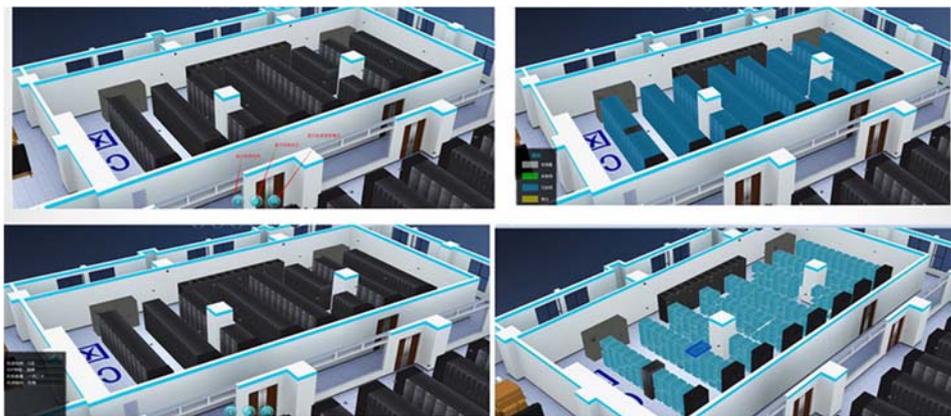


图 6-16 空间可视化

3. 机房管线可视化

以 3D 可视化手段梳理通信机房日益密集的电气管道与网络线路，让通信机房运维人员从平面图纸及跳线表格中解脱出来，更加直观地掌握通信机房的管线分布及走线情况，从而快速排查及修复管线类故障，提高管线管理水平和故障解决效率。

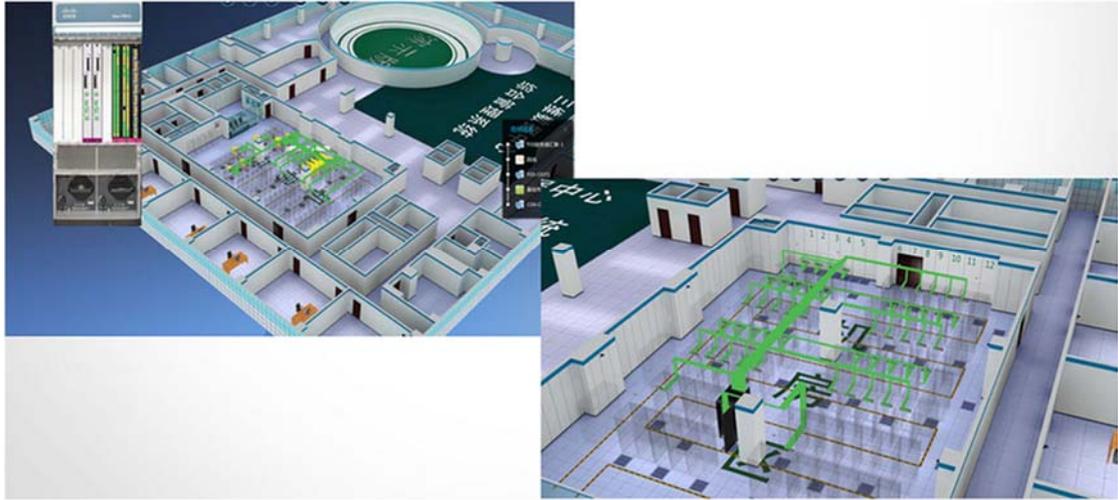


图 6-17 机房管线可视化

4. 运维管理流程化

以平台生成运维工单，派发 to 相应运维人员的手机专用运维 APP 中，实现通信机房运维工作的“事前-事中-事后”全流程闭环管理。



图 6-18 运营管理流程化

七、产业现有挑战

7.1 行业数据

数字孪生是一个建立在虚实空间交互与理解基础上的复杂互操作系统，期望通过虚拟模型高精度复刻目标，提升目标系统性能。其中高精度复刻及互操作特征对数字孪生系统中数据准确性提出了更高要求。

（1）多源异构数据融合

数字孪生系统是一种面向多对象、多元素的复杂系统。如何将多个对象中多个维度感知的多种异构物理数据进行统一表示、一致转化以及可靠表达是需要数字孪生虚实交互研究中的重要问题。

（2）数据语义一致性保证

孪生数据物理层感知采集到的原始信号不能为模型层虚拟模型直接使用，语义需经物理数据信息化处理；虚拟模型产生的信息数据或知识不能为物理设备或相关人员直接理解，需进行信息/知识数据的物理/指令化才可得以被理解和执行。此外不同模型间的数据也存在语义理解不通的问题。只有在正确理解和使用的基础上虚拟模型或指令才能被精准接收并执行，因此如何解决复杂体系架构中的多层次多模型间的语义理解是数据发送后的重要问题和挑战。

7.2 领域知识库

从数据中挖掘知识，以知识驱动生产管控的自动化、智能化，是

数字孪生技术应用研究的核心思想，如数据挖掘技术可应用于故障诊断、流程改善和资源配置优化等。将挖掘得到的模型、经验等知识封装并集成管理也是数字孪生技术的关键内容。

知识资源可由实体资源直接提取获得，包括静态工艺机理知识、设备数字化模型等，另一部分需间接通过数据处理、信息挖掘分析后方可获得，包括产品质量评估模型、故障诊断模型、复杂工艺过程辨识模型等。

在实际应用中，数字孪生技术所需的基础知识库发展仍面临众多问题，其挑战主要来自以下三个方面。

1. 系统层级方面体现在数字化、标准化、平台化的缺失。

（1） 各层级的自身基础知识库匮乏

设备、单元层：在从分析预测阶段向自主控制的智能化分析探索，对基础知识库提出海量数据的需求，作为人工智能引擎的“燃料”。

车间层：向分析预测阶段演进，对基础知识库提出算法驱动的需求。

企业层：停留在基础的数据融合阶段，对基础知识库提出融合共享的需求。

（2） 层级之间的基础知识库互联互通障碍

由于目前知识库的数据结构和模型没有统一的标准，多模型互操作难。数据语义、语法不统一问题造成知识资源的冗余或缺漏。

（3） 基础知识库的整体架构有待探索

标准化的知识图谱体系尚需探索。企业知识内化的数字化不足，使基础数据采集困难导致后期的数据提炼、分析到产生知识的结果欠

佳。企业内部知识的平台建设滞后。在全球层面，需要与仿真建模精度相适应的基础知识库平台。

2. 生命周期方面（设计，制造，销售，物流，服务等）体现在结构化、传承性、规划性的缺失。

（1）各环节的自身基础知识库匮乏

大量传统非数字化的基础知识需要转化为数字形态。如人工经验，纸质文档等。历史数据、流程日志往往缺失，难以有针对性的加以回溯。非结构化的数据需要转化为结构化数据。如音、视频，互联网文档等，需要结构化处理。

（2）各环节的基础知识库互联互通障碍

由于目前知识库的数据结构和模型没有统一的标准，而生命周期各阶段往往由不同单位在实施，数据传承性差。

（3）未来缺少前瞻性规划

最高级别的知识管理是在生产过程中根据具体情境自动提供必要的信息。因为要实现这一目标必须保证非常好的数据质量和分析能力。这样做的主要优点是可以缩短培训时间，知识体系集成生产过程或生命周期环节中。

3. 价值链方面体现在应用价值不足、兼容性差、盈利模式不明。

（1）实际问题和知识库的应用价值关联不足

其与生产管理功能有机融合的技术匮乏，或者应用领域单一，难以规模化复制推广。

（2）各类知识库库之间孤立

知识管理从商业视角、知识协同视角和技术流程视角等多角度出发，不能进行统一的表达、组织、传播和利用。

（3） 基础知识库的商业价值不确定

知识库为人类公共资源和个别团体知识产权之间的存在利益冲突，公众期望基础知识库的宽泛，而企业倾向于知识产权的封闭，建立基础知识库的投资者盈利前景不明确。

7.3 数字孪生安全

高精度传感器数据的采集和快速传输是整个数字孪生系统的基础，各个类型的传感器性能，包括温度、压力、振动等都要达到最优状态，以复现实体目标系统的运行状态。传感器的分布和传感器网络的构建以快速、安全、准确为原则，通过分布式传感器采集系统的各类物理量信息表征系统的状态。同时，搭建快速可靠的信息传输网络，将系统状态信息安全、实时地传输至上位机供其应用，具有十分重要的意义。

数字孪生系统是物理实体系统的实时动态超现实映射，数据的实时采集传输和更新对数字孪生具有至关重要的作用。大量分布的各类型高精度传感器在整个孪生系统的前线工作，起着最基础的感官作用。目前，数字孪生系统数据采集的难点在于传感器的种类、精度、可靠性、工作环境等各个方面都受到当前技术发展水平的限制，导致采集数据的方式也受到局限。数据传输的关键在于实时性和安全性，网络传输设备和网络结构受限于当前的技术水平无法满足更高级别的传

输速率，网络安全性保障在实际应用中同样应予以重视。

7.4 商业模式

针对促进新一代信息技术与制造业深度融合，数字孪生以实现制造物理世界与信息世界交互与共融的需要应运而生，实现制造业全要素、全产业链、全价值链互联互通。数字孪生在工业现实场景中已经具有了实现和推广应用的巨大潜力，但经产业要素重构融合而形成的商业模式形态并不完善，其面临挑战如下：

（1）数字孪生多技术融合：数字孪生是一项综合性技术，数字孪生与数据采集处理、数字孪生与数字模型、数字孪生与 PLM 产品全生命周期、数字孪生与大数据分析、数字孪生与 CPS 信息物理系统、数字孪生与工业互联网等多技术融合，当前需要数字孪生基础理论及相关的技术融合突破，开展设备泛在接入、工业通信协议适配、异构系统集成、虚实融合等核心关键构件研发，突破多协议数据转换、海量异构数据汇聚、感知数据驱动、数字孪生精准映射等关键技术研究促进数字孪生应用。在多技术融合下，其商业模式不能得到充分保障，因此在当今制造业数字化转型正处于突破性时刻。

（2）数字孪生多领域应用：数字孪生的应用领域从早期的航天军工到目前的装备制造、城市建设、园区、交通、物流等等逐步延深到更广阔的领域，从汽车制造、飞机装备等特定行业进行更大范围更复杂的综合场景应用。

（3）数字孪生多场景应用：在制造业中数字孪生技术贯穿了产

品生命周期中的不同阶段，数字孪生以产品为主线，并在生命周期的不同阶段引入不同的要素，形成了不同阶段的表现形态。设计阶段数字孪生提高设计的准确性，并验证产品在真实环境中的性能；制造阶段的数字孪生：在产品的制造阶段，利用数字孪生可以加快产品导入的时间，提高产品设计的质量、降低产品的生产成本和提高产品的交付速度。服务阶段的数字孪生结合大量的传感器采集产品运行阶段环境和工况状态，改善对产品的使用体验，如远程监控和预测性维修。

（4）数字孪生产业链待形成：面向多智能制造行业、多部署环境，数字孪生综合性集成性技术，面向“人机料法环”融合，实现跨区域、跨行业、跨企业、跨部门高效协同、资源优化配置，其数字孪生产业链各方主体尚属于碎片阶段，产业链待形成。

未来以数字孪生建设过程中形成的模型、规则、方法、工具和标准为依托，联合制造业、上下游相关专业合作伙伴共建多级平台与系统化应用，在制造业全产业链各专业领域形成应用场景，实现设备、用户、设备商数字化打通，创造成熟的产业化、生态化商业应用模式，提供“平台+产品+服务”的服务型制造新模式，实现不同行业的产消融合、协同制造、服务延伸和智能决策，不断催生新业态、新模式、新产业。

7.5 人才培养

1. 核心软件技术由国外人才主导

目前，以虚拟现实、数字孪生和 AI 为代表的使能技术，已被用

于制造、交通、医疗、工业等行业助力数字化转型。但在人才供应上，尤其虚拟现实、数字孪生等技术领域的人才资源远远不足。

面对如此巨大的国内市场，LinkedIn 发布的《全球虚拟现实人才报告》显示，现阶段中国虚拟现实人才数量仅占全球 2%，但对虚拟现实实现的人才需求却达 18%。

当前各个行业的大量软硬件系统由国外企业提供，核心软件技术由国外人才主导，使得国内企业使用时存在通信协议及标准不统一、不开放、数据采集难、系统集成差等诸多问题，为数字孪生技术推广与应用造成较大难题。

2. 需要标准化研究专业人才

数字孪生在落地应用过程中缺乏标准的指导与参考。虽然一些诸如国际标准化组织自动化系统与集成技术委员会（ISO/TC184）、IEEE 数字孪生标准工作组（IEEE/P2806）、ISO/IEC 信息技术标准化联合技术委员会数字孪生咨询组等组织正在开展数字孪生标准体系的研究，但尚未有统一的数字孪生具体应用标准发布，这也就导致了集成系统时存在一定的困难。

当前需要培养数字孪生标准化研究相关专业人才，着重针对共性基础标准、行业应用标准等进行研究。梳理基础共性标准、关键技术标准缺失情况，补充人员能力标准；在行业应用标准中，分析各行业未来标准研制的重点方向，指导细分行业开展智能制造标准体系建设。

2020 年 3 月，人力资源社会保障部与国家市场监管总局、国家统计局近日联合向社会发布了 16 个新职业，其中虚拟现实工程技术

人员在列，不久之后，教育部也公布了《普通高等学校本科专业目录（2020 年版）》，将虚拟现实技术本科专业纳入其中。与此同时，数字孪生技术也开始逐渐成为部分高校的重点课程。这表明我国已经充分意识到了数字孪生相关人才培养的重要性，正在不断加大人才培养的力度。

八、产业未来发展趋势

8.1 技术发展趋势

数字孪生主要技术包括信息建模、信息同步、信息强化、信息分析、智能决策、信息访问界面、信息安全等七个方面，尽管目前已取得了很多成就，但仍在快速演进当中。模拟、新数据源、互操作性、可视化、仪器、平台等多个方面的共同推动实现了数字孪生技术及相关系统的快速发展，随着新一代信息技术、先进制造技术、新材料技术等系列新兴技术的共同发展，上述要素还将持续得到优化，数字孪生技术发展将一边探索和尝试、一边优化和完善。

8.2 标准化趋势

随着 ISO、IEC、ISO/IECJTC1、IEEE、全国信息技术标准化技术委员会、国家智能制造标准化总体组等国内外标准化组织或机构对数字孪生标准化的关注与推动，《数字孪生概念与术语》（ISO/IECJTC1AWI5618）、《数字孪生应用案例》（ISO/IECJTC1AWI5719）、《智能制造虚拟工厂参考架构》（20182046-T-339）、《智能制造虚拟工厂信息模型》（20182047-T-339）等多项数字孪生相关国际、国家标准获得立项或提出讨论。未来，数字孪生领域基础共性关键技术标准将不断涌现，依托正在研制的数字孪生概念框架等标准，通过聚焦核心标准化需求逐步建立基本的数字孪生标准体系并孵化典型行业中的数字孪生应用标准，形成国际标准、国

家标准、行业标准和团体标准良性互动的局面。

8.3 应用趋势

长期以来，使用虚拟的模型来优化流程、产品或服务的想法并不新鲜。但随着具有更复杂的仿真和建模能力、更好的互操作性和 IoT 传感器以及电力系统可视化的数字化仿真平台和工具的广泛使用，使企业逐渐意识到创建更精细、更具动态感的数字化仿真模型成为可能。目前，越来越多的企业，特别是从产品销售向“产品+服务”转变的企业，正在广泛应用数字孪生技术。数字孪生的大规模应用场景还比较有限，涉及的行业也有待继续拓展。仍然面临企业内、行业内数据采集能力层次不齐，底层关键数据无法得到有效感知等问题。此外，对于已采集的数据闲置度高，缺乏数据关联和挖掘相关的深度集成应用，难以发挥数据潜藏价值。从长远来看，要释放数字孪生技术的全部潜力，有赖于从底层向上层数据的有效贯通，并需要整合整个生态系统中的所有系统与数据。

8.4 数字孪生的未来

随着数字孪生技术的发展趋势在未来几年加快，越来越多的企业开始使用数字孪生技术优化流程，实时做出数据库决策，并开始寻找修订新产品、服务和商业模式的机会。在制造业、公用事业、能源等资本密集型产业中，成为数字孪生技术应用的先驱。如果早期的实践者在各个行业领域表现出先发优势的话，其他企业也紧随其后。

从长远来看，要实现数字孪生技术的所有潜力，可能需要整合整个生态圈的系统和数据。建立完整的客户生命周期或供应链数字模拟，提供有洞察力的宏观运营观点，包括一线供应商及其自身供应商，但仍需要将外部实体集成到内部数字生态系统中。今天，大多数公司仍然不满意点对点连接以外的外部整合。克服这种犹豫也许是一个长期的挑战，但最终所有的付出都是值得的。将来，企业希望利用块链打破信息孤岛，验证信息并输入数字孪生。这将释放以前无法访问的大量数据，使模拟更加详细、动态化和潜在价值。

附表 1 近年数字孪生相关政策

序号	发布时间	发布机构	机构类型	文件名称	摘要内容
1	2020-12-31	国务院办公厅	中央	《关于促进养老托育服务健康发展的意见》	实施方案提出，促进养老托育用品制造向智能制造、柔性生产等数字化方式转型。鼓励支持企业研发生产可穿戴、便携式监测、居家养老监护等智能养老设备。
2	2021-08-21	国务院	中央	印发《国务院关于支持北京城市副中心高质量发展的意见》	推进智慧城市建设。加强城市信息模型平台和运行管理服务平台建设，打造数字孪生城市，建设智慧高效的城市数据大脑，探索形成国际领先的智慧城市标准体系。实施智慧医疗、智慧交通等一批智慧惠民工程，提升城市服务品质。
3	2021-11-02	国家发展改革委	中央	《关于推动生活性服务业补短板上水平提高人民生活品质的若干意见》	《意见》提出，推动服务数字化赋能，引导各类市场主体积极拓展在线技能培训、数字健康、数字文化场馆、虚拟景区、虚拟养老院、在线健身、智慧社区等新型服务应用。
4	2021-11-09	国家电影局	行业	《“十四五”中国电影发展规划》	《规划》提出，充分应用传统摄制、虚拟摄制、云端制作、智能制作以及计算机动画等多元化电影摄制技术手段，推动建立电影创作、内容和数据共享技术体系。

5	2019-03-20	浙江省人民政府	地方	《浙江省未来社区建设试点工作方 案》（浙政发 〔2019〕8号）	《试点方案》提出构建现实和数字孪生社区，明确了未来社区建设试点目标定位、任务要求、措施保障，为下一步全面开展未来社区建设试点指明了方向。
6	2020-06-18	上海市人民政府 办公厅	地方	《推动工业互联网 创新升级实施“工 赋上海”三年行动 计划（2020-2022 年）》	集中突破工业软件、数字孪生、边缘计算、工业智能、工业知识图谱等关键核心技术，组织“揭榜挂帅”。围绕生产流程优化、质量分析、预测性维护、智能排产等应用场景，推进工业仿真、数字孪生、工业大数据应用软件开发与产业化。
7	2020-10-13	成都市人民政府	地方	《成都市智慧城市 建设行动方案 （2020—2022）》	融合政府、企业和社会数据，叠加实时感知数据，全要素模拟城市运行状态，打造数字孪生城市。
8	2020-11-05	广东省政府办公 厅	地方	《广东省推进新型 基础设施建设三年 实施方案（2020- 2022年）》	探索构建“数字孪生城市”实时模型，形成集应用服务中枢、决策分析助手，治理指挥平台、规划专家系统于一体的全要素“数字孪生城市”一网通管系统。

9	2021-05-27	山西省人民政府	地方	《山西省“十四五”未来产业发展规划》	明确指出数字孪生和虚拟现实产业作为山西“十四五”未来重点发展的行业之一，并为此指明了重点发展方向、目标和发展路径。
10	2021-11-02	河北省工业和信息化厅	地方	《推动新一代信息技术与制造业深度融合加快工业互联网创新发展导向目录（2021 年）》	重点支持面向协同研发、生产过程集中管控、产品质量管控、能耗综合管理、产品（设备）健康管理、产供销财一体化管理、集团生产经营管控、产业链上下游协同、数字孪生及模拟仿真等方面的企业级工业互联网平台建设及应用。
11	2021-11-16	湖南省人民政府办公厅	地方	《推动流通创新发展促进消费提质扩容行动方案（2021—2023 年）》	实施“数字兴商”工程，引导大型商业综合体、购物中心、连锁便利店、大型批发市场等商贸实体，运用 5G、虚拟现实、人工智能、大数据、物联网等信息技术，丰富线下消费体验、拓展线上业务。
12	2021-11-16	江苏省工业和信息化厅	地方	《江苏省贯彻〈推进工业文化发展实施方案（2021-	支持利用数字技术、网络技术、虚拟现实技术等现代科技手段，推动工业文化创新发展，催生一批新技术、新工艺、新业态，进一步丰富中国制造的文化内涵。

				2025 年)) 行动计划》	
13	2021-11-17	西安市人民政府 办公厅	地方	《西安市“十四五”文化和旅游发展规划》	突出科技赋能，依托人工智能、移动互联网、虚拟现实等新技术，开发沉浸式文化和旅游体验项目，加强数字文化和旅游创意产品供给。
14	2021-11-17	呼和浩特市人民政府 办公室	地方	《呼和浩特市加快工业经济转型升级推动工业高质量发展十条政策措施》	支持新一代信息技术与制造业融合发展。对于区块链、物联网、边缘计算、工业大数据、人工智能、虚拟现实、数字孪生等技术与实体经济创新融合的项目，按照实际完成投资额的 20% 给予奖补，单个项目奖补资金不超过 200 万元。
15	2021-11-19	重庆市人民政府 办公厅	地方	《重庆市商务发展“十四五”规划（2021—2025 年）》	运用虚拟现实、增强现实、交互娱乐等技术，创新发展游戏体验、旅游体验、文化体验、艺术体验等沉浸式体验消费业态。

附表 2 数字孪生标准化相关活动

时间	相关组织	工作职责或相关活动及成果
2015.9	美国工业互联网联盟	启动由 InfoSys 和 GE 主导的工业数字线程测试床项目
2016.10	ISO/TC184/SC4	波音和 STEPTools 等公司展示面向数控加工的数字线程和数字孪生案例
2017.11	韩国电子通信研究院	提出《面向制造的数字孪生系统框架》标准立项申请
2018.1	ISO/TC184/SC4	《面向制造的数字孪生系统框架》标准批复立项
2018.5	ISO/TC184/SC4	《面向制造的数字孪生系统框架》获得编号 IS023247，进入工作草案阶段
2018	美国工业互联网联盟	成立“数字孪生互操作性”任务组，探讨数字孪生互操作性的需求及解决方案，重构与德国工业 4.0 的合作任务组，探讨数字孪生与管理壳在技术和应用场景方面的异同，以及管理壳在支持数字孪生的适用性和可行性
2018.11	ISO/TC184/SC4	收集面向制造的数字孪生实施案例，确定 IS023247 验证项目
2019 年初	ISO/TC184	成立数字孪生数据架构特别工作组（AHG2），负责定义数字孪生术语体系和制定数字孪生数据架构标准
2019.3	IEEESA	IEEEP2806《智能工厂物理实体的数字化表征系统架构》标准获批立项
2019.3	电子四院和韩国电信研究院 (ETRI)	联合完成了数字孪生技术趋势报告，并向 ISO 建议启动数字孪生标准化工作
2019.5	NIST	开发基于 HLA 的通用 CPS 联邦环境和 IEEE1451 智能传感器数字孪生联邦，支持从数个到数百个智能传感器的协同仿真和故障影响分析及决策

2019. 5	ISO/IECJTC1	发布《数字孪生技术趋势报告》。成立数字孪生咨询组（AG11），负责梳理数字孪生的术语、定义以及标准化需求；研究数字孪生相关技术、参考模型；评估开展数字孪生领域标准化的可行性并向 JTC1 提出相关建议等
2019. 7	ISO/TC184/SC4	ISO23247 进入委员会草案阶段
2019. 7	ISO/IEC/JWG21	智能制造参考模型工作组第八次会议，正式确定“智能制造统参考模型”这一新国际标准提案名称。成立“TF8 数字孪生资产管理壳”任务组，梳理数字孪生与智能制造参考模型之间的潜在关系；后续 TF8 可能会成为新的 ISO 和 IEC 联合工作组
2019. 8	IEEE/C/SAB/DR_WG	IEEE 数字孪生标准工作组成立，IEEEP2806；《智能工厂物理实体的数字化表征系统架构》标准启动会
2019. 9	ISO/TC184/SC4	ISO23247 进入国际标准草案阶段。ISO/TR24464《数字孪生的可视化组件》进入委员会草案阶段
2019. 10	IEEE/C/SAB/DR_WG	IEEEP2806《智能工厂物理实体的数字化表征系统架构》标准第二次会议
2019. 3-10	GOLEM&ASIDEES	联合国工业发展组织（UNIDO）的合作伙伴奥地利 GOLEM 集成微电子解决方案有限公司和奥地利经济、环境与社会可持续创新发展协会（ASIDEES）为咨询顾问和审计师开发了 ISO37120（可持续城市和社区：城市服务和生活品质指标）贯标培训和认证服务解决方案，基于 ISO37120 实施数字孪生城市
2019. 11	ISO/IECJTC1AG11	数字孪生咨询组第一次面对面会议，交流数字孪生关键技术、典型案例模板等，讨论数字孪生咨询组中期研究报告
2019. 11	ISO/IEC/JWG21	智能制造参考模型工作组第九次会议，讨论《智能制造统一参考模型》主要内容和工作计划
2019. 11	北航、电子四院、仪综所等国内 12 家单位	联合发表《数字孪生标准体系探究》，提出数字孪生标准体系框架和结构

2019. 12	ISO/TC184/SC4	ISO/TR24464 进入国际标准草案阶段
2019. 12	安世亚太 数字孪生实验室	发布《数字孪生技术白皮书》，给出数字孪生的定义，提出数字孪生的概念模型、数字孪生系统参考架构、数字孪生的应用框架和成熟度模型
2020. 4	ISO/IEC/JWG21	智能制造参考模型工作组第十次会议，将讨论《智能制造参考模型》第一稿国际标准草案
2020. 11	JTC1/SC41	JTC1/SC41 正式成立，WG6 开展数字孪生的标准化工作
2021. 1	中国电子技术标准化研究院	组织第一次数字孪生国际标准国内专家组第一次电话会议，共有来自 50 余家单位近 70 名专家在线参与
2021. 4	中国电子技术标准化研究院	中国首个城市数字孪生标准化联合实验室正式揭牌
2022. 1	全国信标委智慧城市标准工作组	《城市数字孪生标准化白皮书（2022 版）》正式发布