

# 数字孪生 技术应用白皮书

2021

## 前言

随着经济社会数字化转型的持续推进，数字孪生逐渐成为产业各界关注的热点技术。数字孪生起源航天军工领域，近年来持续向智能制造、智慧城市等垂直行业拓展，实现机理描述、异常诊断、风险预测、决策辅助等应用价值，已成为助力企业数字化转型、促进数字经济发展的的重要抓手。

本白皮书聚焦数字孪生关键技术和行业应用发展，梳理数字孪生整体发展情况，深入分析技术体系和典型垂直行业应用场景，旨在为产业界在规划实施数字孪生相关应用时提供参考借鉴，助力数字孪生技术演进和产业发展。

## 目录

前言 .....	2
1 数字孪生概述 .....	5
1.1 数字孪生内涵与发展历程 .....	5
1.2 数字孪生典型特征与概念辨析 .....	6
1.3 数字孪生发展现状 .....	7
2 数字孪生技术体系 .....	10
2.1 数字孪生技术架构概述 .....	10
2.2 基础技术：感知 .....	11
2.3 基础技术：网络 .....	13
2.4 关键技术：建模 .....	16
2.5 关键技术：仿真 .....	19
3 数字孪生赋能智慧城市 .....	22
3.1 总体情况 .....	22
3.2 核心价值 .....	24
3.2.1 促进多源数据互通融合 .....	24
3.2.2 建设城市全生命周期管理体系 .....	24
3.2.3 打造多方建设的创新模式 .....	24
3.3 关键技术 .....	25
3.3.1 多源数据融合技术 .....	25
3.3.2 多尺度建模技术 .....	26
3.3.3 三维可视化技术 .....	27
3.4 应用场景 .....	28
3.4.1 城市综合治理 .....	28
3.4.2 城市规划建设 .....	29
3.4.3 城市交通管理 .....	30
3.5 典型案例 .....	31
3.5.1 数字孪生助力城市大脑高效指挥 .....	31
3.5.2 数字孪生助力区域时空信息管理 .....	33
4 数字孪生赋能智能制造 .....	36
4.1 总体情况 .....	36
4.2 核心价值 .....	37
4.2.1 实现生产流程可视化提高生产管控 .....	38
4.2.2 建设企业数字业务化降本增效 .....	38
4.2.3 打造高度协同生产制造价值链释放价值 .....	38
4.2.4 构筑数字孪生运营模式赋能转型升级 .....	38
4.3 关键技术 .....	38
4.3.1 多源异构数据集成技术 .....	38
4.3.2 多模型构建及互操作技术 .....	39
4.3.3 多动态高实时交互技术 .....	39
4.4 应用场景 .....	39
4.4.1 设备实时监控和故障诊断 .....	39
4.4.2 设备工艺培训 .....	40

- 4.4.3 设备全生命周期管理 ..... 40
- 4.4.4 设备远程运维数 ..... 41
- 4.4.5 工厂实时状态监控 ..... 42
- 4.5 典型案例 ..... 43
  - 4.5.1 数字孪生助力医药生产制造异地协同管控..... 43
  - 4.5.2 数字孪生助力新能源装备制造智能化升级..... 45
  - 4.5.3 数字孪生助力汽车制造全流程数字化管理..... 46
- 5 数字孪生赋能智慧网络..... 49
  - 5.1 总体情况 ..... 49
  - 5.2 核心价值 ..... 50
    - 5.2.1 沉浸式的管理体验 ..... 50
    - 5.2.2 网络业务全生命周期管理 ..... 51
    - 5.2.3 网络风险和成本降低 ..... 51
    - 5.2.4 网络实时闭环控制 ..... 51
  - 5.3 关键技术 ..... 51
    - 5.3.1 网络数字孪生体建模技术 ..... 51
    - 5.3.2 数字线程技术 ..... 52
    - 5.3.3 网络数字孪生可视化技术 ..... 53
  - 5.4 应用场景 ..... 54
    - 5.4.1 无线网络重保 ..... 54
    - 5.4.2 智慧园区网络管理 ..... 55
  - 5.5 典型案例 ..... 57
    - 5.5.1 数字孪生助力场馆重点区域网络保障..... 57
    - 5.5.2 数字孪生助力运营商光网络高效管理..... 59
- 6 总结与展望..... 61
- 7 缩略语..... 63
- 8 编写单位及作者..... 64

# 1 数字孪生概述

## 1.1 数字孪生内涵与发展历程

数字孪生是一种数字化理念和技术手段，它以数据与模型的集成融合为基础与核心，通过在数字空间实时构建物理对象的精准数字化映射，基于数据整合与分析预测来模拟、验证、预测、控制物理实体全生命周期过程，最终形成智能决策的优化闭环。其中，面向的物理对象包括实物、行为、过程，构建孪生体涉及到的数据包括实时传感数据和运行历史数据，集成的模型涵盖物理模型、机理模型和流程模型等。

数字孪生的概念始于航天军工领域，经历了“技术探索、概念提出、应用萌芽、行业渗透”四个发展阶段。数字孪生技术最早在 1969 年被 NASA 应用于阿波罗计划中，用于构建航天飞行器的孪生体，反映航天器在轨工作状态，辅助紧急事件的处置。2003 年，数字孪生概念正式被密歇根大学的 Grieves 教授提出，并强调全生命周期交互映射的特征。经历了几年的概念演进发展后，自 2010 年开始，数字孪生技术在各行业呈现应用价值，美国军方基于数字孪生实现 F35 战机的数字伴飞，降低战机维护成本和使用风险；通用电器为客机航空发动机建立孪生模型，实现实时监控和预测性维护；欧洲工控巨头西门子、达索、ABB 在工业装备企业中推广数字孪生技术，进一步促进了技术向工业领域的推广。近年来，数字孪生技术在工业、城市管理领域持续渗透，并向交通、健康医疗等垂直行业拓展，实现机理描述、异常诊断、风险预测、决策辅助等应用价值，有望在未来成为经济社会产业数字化转型的通用技术。

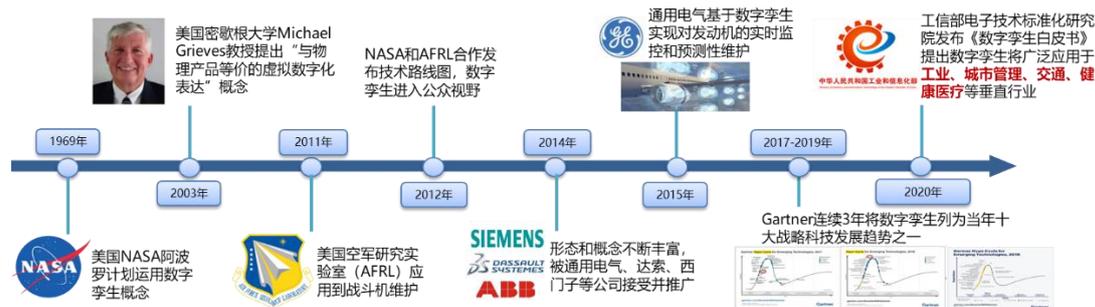


图 1-1 数字孪生发展历程沿革

## 1.2 数字孪生典型特征与概念辨析

数字孪生是一种“实践先行、概念后成”的新兴技术理念，与物联网、模型构建、仿真分析等成熟技术有非常强的关联性和延续性。数字孪生具有典型的跨技术领域、跨系统集成、跨行业融合的特点，涉及的技术范畴广，自概念提出以来，技术边界始终不够清晰。但是，与既有的数字化技术相比，数字孪生具有四个典型的技术特征：

(一) **虚实映射**。数字孪生技术要求在数字空间构建物理对象的数字化表示，现实世界中的物理对象和数字空间中的孪生体能够实现双向映射、数据连接和状态交互。

(二) **实时同步**。基于实时传感等多元数据的获取，孪生体可全面、精准、动态反映物理对象的状态变化，包括外观、性能、位置、异常等。

(三) **共生演进**。在理想状态下，数字孪生所实现的映射和同步状态应覆盖孪生对象从设计、生产、运营到报废的全生命周期，孪生体应随孪生对象生命周期进程而不断演进更新。

(四) **闭环优化**。建立孪生体的最终目的，是通过描述物理实体内在机理，分析规律、洞察趋势，基于分析与仿真对物理世界形成优化指令或策略，实现对物理实体决策优化功能的闭环。

数字孪生与一些技术概念有很强的关联性, 但又不完全相同: 一是**仿真技术**。仿真是一种基于确定性规律和完整机理模型来模拟物理世界的软件方法, 是数字孪生的核心技术之一, 但不是全部。仿真技术仅能以离线的方式模拟物理世界, 主要是用于研发、设计阶段, 通常不搭载分析优化功能, 不具备数字孪生的实时同步、闭环优化等特征。二是**资产管理壳 (AAS)**。AAS 的本质是基于德国工业 4.0 体系搭建的一套描述语言和建模工具, 旨在提升生产资料之间的互联互通和互操作性。AAS 是支撑数字孪生的基础技术之一, 数字孪生与 AAS 在一定程度上代表了美国和德国工业数字化转型的不同理念。三是**数字线程 (Digital Thread)**。数字线程发源并广泛应用于航空航天业, 是覆盖复杂产品全生命周期的数据流, 集成并驱动以统一模型为核心的产品设计、制造和运营。数字线程是实现数字孪生多类模型数据融合的重要技术。

### 1.3 数字孪生发展现状

从政策层面来看, 数字孪生成为各国推进经济社会数字化进程的重要抓手。国外主要发达经济体从国家层面制定相关政策、成立组织联盟、合作开展研究, 加速数字孪生发展, 美国将数字孪生作为工业互联网落地的核心载体, 侧重军工和大型装备领域应用; 德国在工业 4.0 架构下推广资产管理壳(AAS), 侧重制造业和城市管理数字化; 英国成立数字建造英国中心, 瞄准数字孪生城市, 打造国家级孪生体。在 2020 年, 美国工业互联网联盟 (IIC) 和德国工业 4.0 平台联合发布数字孪生白皮书, 将数字孪生纳入工业物联网技术体系。自 2019 年以来, 中国政府陆续出台相关文件, 推动数字孪生技术发展, 今年我国又将数字孪生写入《“十四五”规划》, 作为建设数字中国的重要发展方向。工业互联网联盟 (AII) 也增设数字孪生特设组, 开展数字孪生技术产业研究, 推进相关标准制定, 加速行

业应用推广。

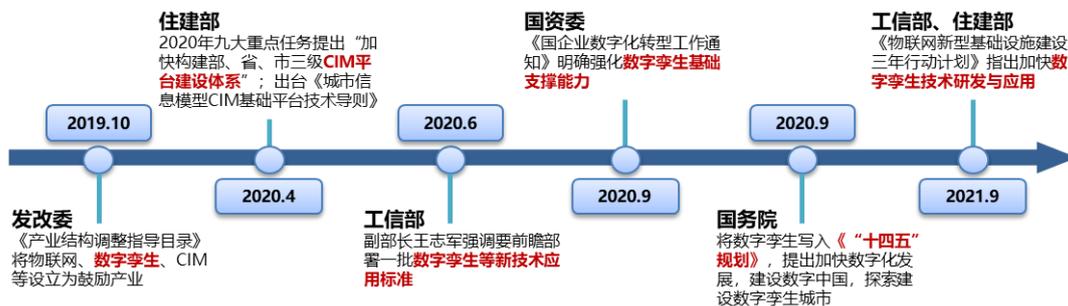


图 1-2 国内数字孪生相关政策沿革

从行业应用层面来看，数字孪生成为垂直行业数字化转型的重要使能技术。数字孪生加速与 DICT 领域最新技术融合，逐渐成为一种基础性、普适性、综合性的理论和技术体系，在经济社会各领域的渗透率不断提升，行业应用持续走深向实。工业领域中，在石化、冶金等流程制造业中，数字孪生聚焦工艺流程管控和重大设备管理等场景，赋能生产过程优化；在装备制造、汽车制造等离散制造业中，聚焦产品数字化设计和智能运维等场景，赋能产品全生命周期管理。智慧城市领域中，数字孪生赋能城市规划、建设、治理、优化等全生命周期环节，实现城市全要素数字化、全状态可视化、管理决策智能化。另外，数字孪生在自动驾驶、站场规划、车队管理、智慧地铁等交通领域中，在基于 BIM 的建筑智能设计与性能评估、智慧工地管理、智能运营维护、安全应急协同等建筑领域中，在农作物监测、智慧农机、智慧农场等农业领域中，在虚拟人、身体机能监测、智慧医院、手术模拟等健康医疗领域中有不同程度的应用。

从市场前景层面来看，数字孪生是热度最高的数字化技术之一，存在巨大的发展空间。Gartner 连续三年将数字孪生列入年度（2017-2019）十大战略性技术趋势，认为它在未来 5 年将产生颠覆性创新，同时预测到 2021 年，半数的大型工业企业将使用数字孪生，从而使这些企业的效率提高 10%；到 2024 年，超过

25%的全新数字孪生将作为新 IoT 原生业务应用的绑定功能被采用。根据 Markets and Markets 预测，数字孪生市场规模将由 2020 年的 31 亿美元增长到 2026 年的 482 亿美元，年复合增长率 58%。

从企业主体层面来看，数字孪生被纳入众多科技企业战略大方向，成为数字领域技术和市场竞争主航道。数字孪生技术价值高、市场规模大，典型的 IT、OT 和制造业龙头企业已开始布局，微软与仿真巨头 Ansys 合作，在 Azure 物联网平台上扩展数字孪生功能模块；西门子基于工业互联网平台构建了完整的数字孪生解决方案体系，并将既有主流产品及系统纳入其中；Ansys 依托数字孪生技术对复杂产品对象全生命周期建模，结合仿真分析，打通从产品设计研发到生产的数据流；阿里聚合城市多维数据，构建“城市大脑”智能孪生平台，提供智慧园区一体化方案，已在杭州萧山区落地；华为发布沃土数字孪生平台，打造 5G+AI 赋能下的城市场景、业务数字化创新模式。

从标准化层面来看，数字孪生标准体系初步建立，关键领域标准制修订进入快车道。ISO、IEC、IEEE 和 ITU 等国际标准化组织推动数字孪生分技术委员会和工作组的成立，推进标准建设、启动测试床等概念验证项目。例如：2018 年起，ISO/TC 184/SC 4 的 WG15 工作组推动了《面向制造的数字孪生系统框架》系列标准（ISO 23247）的研制和验证工作。2020 年 11 月，ISO/IEC JTC 1 的 SC41 更名为物联网和数字孪生分技术委员会，并成立 WG6 数字孪生工作组，负责统筹推进数字孪生国际标准化工作。

## 2 数字孪生技术体系

### 2.1 数字孪生技术架构概述

数字孪生技术通过构建物理对象的数字化镜像，描述物理对象在现实世界中的变化，模拟物理对象在现实环境中行为和影响，以实现状态监测、故障诊断、趋势预测和综合优化。为了构建数字化镜像并实现上述目标，需要 IOT、建模、仿真等基础支撑技术通过平台化的架构进行融合，搭建从物理世界到孪生空间的信息交互闭环。整体来看，一个完成的数字孪生系统应包含以下四个实体层级：一是**数据采集与控制实体**，主要涵盖感知、控制、标识等技术，承担孪生体与物理对象间上行感知数据的采集和下行控制指令的执行。二是**核心实体**，依托通用支撑技术，实现模型构建与融合、数据集成、仿真分析、系统扩展等功能，是生成孪生体并拓展应用的主要载体。三是**用户实体**，主要以可视化技术和虚拟现实技术为主，承担人机交互的职能。四是**跨域实体**，承担各实体层级之间的数据互通和安全保障职能。

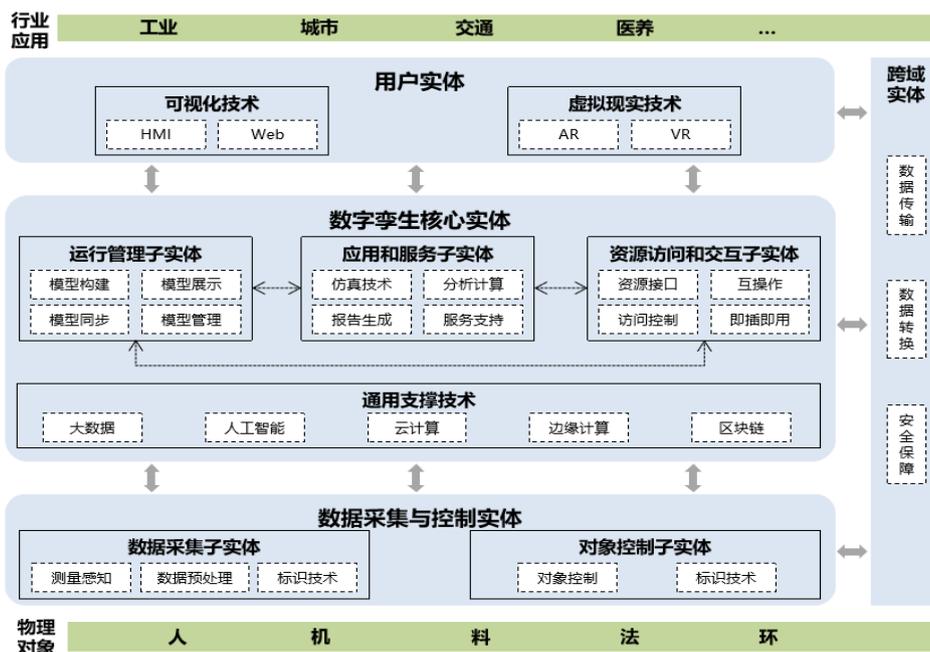


图 2-1 数字孪生技术架构

## 2.2 基础技术：感知

感知是数字孪生体系架构中的底层基础，在一个完备的数字孪生系统中，对运行环境和数字孪生组成部件自身状态数据的获取，是实现物理对象与其数字孪生系统间全要素、全业务、全流程精准映射与实时交互的重要一环。因此，数字孪生体系对感知技术提出更高要求，为了建立全域全时段的物联感知体系，并实现物理对象运行态势的多维度、多层次精准监测，感知技术不但需要更精确可靠的物理测量技术，还需考虑感知数据间的协同交互，明确物体在全域的空间位置及唯一标识，并确保设备可信可控。



图 2-2 典型数字孪生感知系统构建

### (1) 数字孪生全域标识

全域标识能够为物理对象赋予数字“身份信息”，支撑孪生映射。标识技术能够为各类城市部件、物体赋予独一无二的数字化身份编码，从而确保现实世界中的每一个物理实体都能与孪生空间中的数字虚体精准映射、一一对应，物理实体的任何状态变化都能同步反应在数字虚体中，对数字虚体的任何操控都能实时影响到对应的物理实体，也便于物理实体之间跨域、跨系统的互通和共享。同时，数字孪生全域标识是数字孪生中各物理对象及其数字孪生在信息模

型平台中的唯一身份标识，数字孪生全域标识可实现数字孪生资产数据库的物体快速索引、定位及关联信息加载。目前，主流的物体标识采用 Handle、Ecode、OID 等。

## （2）智能化技术

随着行业应用场景不断拓展，传统传感器已无法满足数字孪生对数据精度、一致性、多功能性的需求。而智能化传感器是将传感器获取信息的基本功能与专用微处理器的信息分析、自校准、功耗管理、数据处理等功能紧密结合在一起，具备传统传感器不具备的自动校零、漂移补偿、传感单元过载防护、数采模式转换、数据存储、数据分析等能力，其能力决定了智能化传感器具备较高的精度、分辨率，稳定性及可靠性，使其在数字孪生体系中不但可以作为数据采集的端口，更可以自发地上报自身信息状态，构建感知节点的数字孪生。

## （3）多传感器融合技术

由于单一传感器不可避免地存在不确定或偶然不确定性，缺乏全面性、鲁棒性，所以偶然的微小故障就会导致系统失效。多传感器集成与融合技术通过部署多个不同类型传感器对对象进行感知，在收集观测目标多个维度的数据后，对这些数据进行特征提取的变换，提取代表观测数据的特征矢量，利用聚类算法、自适应神经网络等模式识别算法将特征矢量变换成目标属性，并将各传感器关于目标的说明数据按同一目标进行分组、关联，最终利用融合算法将目标的各传感器数据进行合成，得到该目标的一致性解释与描述。多传感器数据融合不仅可以描述同一环境特征的多个冗余信息，而且可以描述不同的环境特征，极大的增强了感知的冗余性、互补性、实时性和低成本性。

## 2.3 基础技术：网络

网络是数字孪生体系架构的基础设施，在数字孪生系统中，网络可以对物理运行环境和数字孪生组成部件自身信息交互进行实时传输，是实现物理对象与其数字孪生系统间实时交互、相互影响的前提。网络既可以为数字孪生系统的状态数据提供增强能力的传输基础，满足业务对超低时延、高可靠、精同步、高并发等关键特性的演进需求，也可以助推物理网络自身实现高效率创新，有效降低网络传输设施的部署成本和运营效率。

伴随物联网技术的兴起，通信模式不断更新，网络承载的业务类型、网络所服务的对象、连接到网络的设备类型等呈现出多样化发展，要求网络具有较高灵活性；同时，伴随移动网络深入楼宇、医院、商超、工业园区等场景，物理运行环境对确定性数据传输、广泛的设备信息采集、高速率数据上传、极限数量设备连接等需求愈加强烈，这也相应要求物理运行环境必须打破以前“黑盒”和“盲哑”的状态，让现场设备、机器和系统能够更加透明和智能。因此，数字孪生体系架构需要更加丰富和强大的网络接入技术，以实现物理网络的极简化和智慧化运维。

### （1）基于行业现场网的组网技术

行业现场网是用于现场设备之间、现场设备与外部设备之间、以及设备与业务平台之间数据互通的通信与管理技术。行业近端网、组网需求碎片化，利用行业现场网可以为行业设备提供在近端通信域互操作的手段，实现行业现场异构网络的互联互通、柔性组网。

行业现场网关键技术包括面向资产盘点、出入库管理等场景的新型无源RFID技术，面向超低时延、超高可靠设备互通信的新型短距技术，面向数据高

可靠确定性通信的确定性传输技术，面向环境监控等场景的中低速技术，及面向设备及人员定位的室内定位技术等。5G+行业现场网是以网关为中心，南向通过无源 RFID、短距、确定性传输等现场网技术实现现场设备连接与通信，北向通过 5G 网络将行业现场生产及管理数据传输到平台，可服务于行业生产现场，满足各类业务差异化需求。行业现场网与 5G 协同，一方面能够满足不同行业现场通信需求，进一步提升网络的管理和运维能力；另一方面可结合边缘计算、算力感知等能力，提升网络的智能化能力。

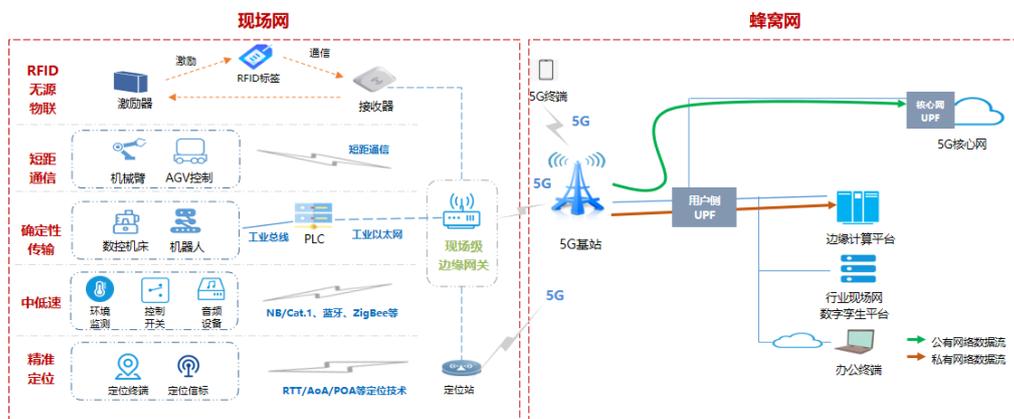


图 2-3 5G+行业现场网体系架构

## (2) 基于 SLA 服务的 QoS 保障技术

网络故障将带来丢包、乱序、时延、抖动，甚至网络服务中断等问题，这会直接影响用户的使用体验和满意度。如何结合不同等级的 SLA 服务对网络可靠性的需求，保证网络业务用户体验是数字孪生网络的重点研究内容之一。具体来说，基于 SLA 服务的 QoS 架构及能力分级管理方法，就是通过构建全流程、一体化的网络可靠性参数集、资源分配策略，包括端到端 QoS 映射规则、配置规则、监测及保障机制等，实现高效、可靠的 SLA 服务管理的增强，以承载各种能力等级要求的泛在感知应用，以及与之相关的用户体验一致性服务。

作为一种服务质量增强技术，该技术可以将包括用户服务质量请求在内的

SLA 请求参数高效传递给抽象后的网络管理虚拟化节点，并且逐步根据 QoS 服务的共性特征，形成 API 封装的平台级能力。

### (3) 基于多维度动态调度的资源编排技术

由于数字孪生网络可以感知无处不在的计算和服务，如何实现物理网络资源的统筹调度及编排，是数字孪生网络的重点研究内容之一。具体来说，数字孪生网络的各级管理实体应能够根据感知采样周期、网络拓扑结构和差异化数据质量需求等，以主动协商的方式对抽象后的网络资源、计算资源进行灵活度和协同编排，决定在什么时间、什么地点、使用合理的网络控制面和用户面资源来传输什么内容，为全要素、全业务数据的感知信息在网络会话中的关联、分发提供可信服务。

作为一种网络资源智能调度技术，该技术可快速将高优先业务流匹配至最优节点，实现对高质量感知数据的优先传输、运营，也可对整体网络资源进行最优部署、管理，有效降低物理网络的总能耗，实现绿色低碳、计算智能的低能耗网络组合。

### (4) 基于智能路由的数据流控技术

感知数据高效传输是满足物联网系统实现计算智能、认知智能的必要前提。如何在通信域全业务周期中为所有感知节点的实时数据流提供柔性组网、接纳控制的方法，是数字孪生网络的重点研究内容之一。具体来说，物理网络为了满足行业近端网络碎片化的组网需求，需要考虑引入智能路由的方式，在网络控制平面中定义多通信域之间的角色选择、信息交互机制及交互格式等，实现信息资源在网络中的自动化关联、寻址、调配等智能功能，高效指导实时数据流在全业务周期内的路由配置。

作为一种网络管道增强技术，该技术综合考虑全网路由状况和数据流计算状况，在用户不关心物理网络路由配置状态的前提下，保证每个业务流数据的传输路径的先后顺序和逻辑关系，可适用于异构网络自适应融合通信、多域数据流接纳控制等场景，在网络流量全息透视、网元全生命周期管理等场景也能发挥重要作用。

## 2.4 关键技术：建模

数字孪生的建模是将物理世界的对象数字化和模型化的过程。通过建模将物理对象表达为计算机和网络所能识别的数字模型，对物理世界或问题的理解进行简化和模型化。数字孪生建模需要完成从多领域多学科角度模型融合以实现物理对象各领域特征的全面刻画，建模后的虚拟对象会表征实体对象的状态、模拟实体对象在现实环境中的行为、分析物理对象的未来发展趋势。建立物理对象的数字化建模技术是实现数字孪生的源头和核心技术，也是“数字化”阶段的核心。而模型实现方法研究主要涉及建模语言和模型开发工具等，关注如何从技术上实现数字孪生模型。在模型实现方法上，相关技术方法和工具呈多元化发展趋势。当前，数字孪生建模语言主要有 Modelica、AutomationML、UML、SysML 及 XML 等。一些模型采用通用建模工具如 CAD 等开发，更多模型的开发是基于专用建模工具如 FlexSim 和 Qfsm 等。

按照实现来看，物理对象的建模可以包含是个步骤，如下图所示，模型抽象、模型表达、模型构建、模型运行。其中模型抽象实现对物理对象的特征抽象、模型表达对抽象后的信息进行描述，模型构建阶段会实现模型的校验、编排等，模型运行提供虚拟模型运行环境。

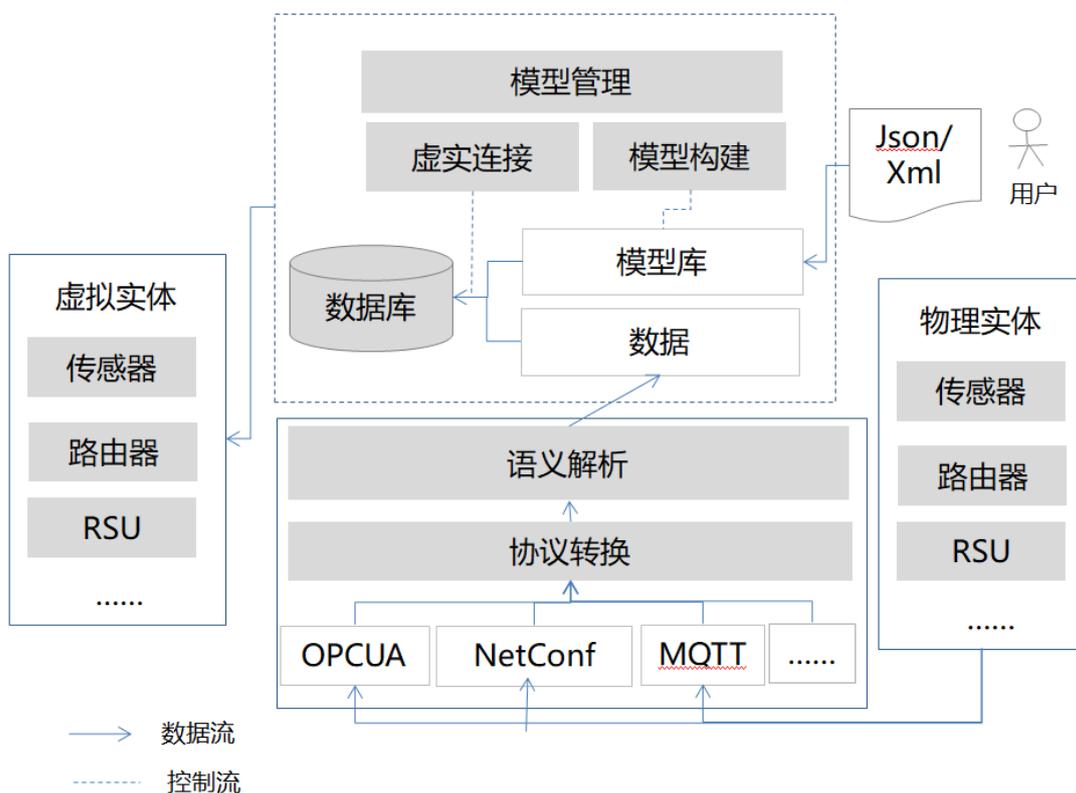


图 2-4 数字孪生模型构建流程

为了达到物理实体与数字实体之间的实时准确刻画，需要基础支撑技术做为依托，同时经历多阶段的演进才能很好的实现物理实体在数字世界中的塑造。在数字孪生建模的过程中涉及到的技术来看，涉及到不同领域的技术族，可以从模型建模的使用场景来分析。IT、OT、CT 三个领域有各自的特点。IT 领域目前的建模主要集中在两个场景，物联网设备建模和数字孪生城市等场景建模。其中物联网设备的建模主要由大的平台厂家推动，实现设备数据的平台呈现，在描述层面，大多采用 json、xml 等语言进行描述，自定义架构，并采用 MQTT，COAP 等应用传输协议进行虚实系统交互。OT 领域建模主要集中在复杂装备，对于 OT 领域的复杂装备和场景的建模，需要融合机械、电气、液压等不同领域知识。Modelica 是由瑞典非赢利组织 Modelica 协会开发，是一种开放的、面向对象的、基于方程的多领域统一物理系统建模语言，支持例如机械、电气、液压、控制、电磁等面向对象的组件模型构建。工业界的三大工业建模工具都支持 Modelica 建模语言。Modelica 开放、标准、与平台无关的特性，逐渐形成了丰富的模型库生态，利用模型库可很大提高建模效率和质量，模型库也成为商业建模工具最重要的竞争力。另外，如 OPC UA 等技术，在 OT 领域的信息模型构建方面也提供了如信息模型描述，信息模型模板等技术。CT 领域的模型构建能力主要集中在

网络基础设施和网络组网等能力的构建，主要集中在信息模型领域，以 SNMP/mib 方式为主，实现网络中网元状态信息，配置信息等的交互。对于 CT 领域数字孪生的需求，目前业界研究 telemetry 技术，用 netconf/YANG 来实现更高效的虚实交互能力。

从不同层面的建模来看，可以把模型构建分为几何模型构建、信息模型构建、机理模型构建等不同分类，完成不同模型构建后，进行模型融合，实现物理实体的统一刻画。如下图提供的模型融合架构。面对不同领域的多种异构模型，需要提供统一的协议转换和语义解析能力。



数字孪生模型的建立以实现业务功能为目标，对于不同的建模技术，最核心的竞争力都在工具和模型库。数字孪生模型库的组件原则可以提供以人员、设备

设施、物料材料、场地环境等信息为主要内容的对象组件模型库，也可以生产信息规则模型库、产品信息规则模型库、技术知识规则模型库为主要内容的规则模型库。也可提供与人机交互、业务展示相关的几何、拓扑等模型库。数字孪生模型库是与建模工具相辅相成的能力，作为数字孪生技术的底座和核心，模型构建的理论、方法和相关工具及模型库的发展，都是数字孪生核心的技术，这些都是数字孪生技术应用的有效支撑。

## 2.5 关键技术：仿真

数字孪生体系中的仿真作为一种在线数字仿真技术，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。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，验证和确认对物理世界或问题理解的正确性和有效性。从仿真的视角，数字孪生技术中的仿真属于一种在线数字仿真技术，可以将数字孪生理解为：针对物理实体建立相对应的虚拟模型，并模拟物理实体在真实环境下的行为。和传统的仿真技术相比，更强调物理系统和信息系统之间的虚实共融和实时交互，是贯穿全生命周期的高频次并不断循环迭代的仿真过程。因此仿真技术不再仅仅用于降低测试成本，通过打造数字孪生，仿真技术的应用将扩展到各个运营领域，甚至涵盖产品的健康管理、远程诊断、智能维护、共享服务等应用。基于数字孪生可对物理对象通过模型进行分析、预测、诊断、训练等（即仿真），并将仿真结果反馈给物理对象，从而帮助对物理对象进行优化和决策。因此仿真技术是创建和运行数字孪生体、保证数字孪生体与对应物理实体实现有效闭环的核心技术。

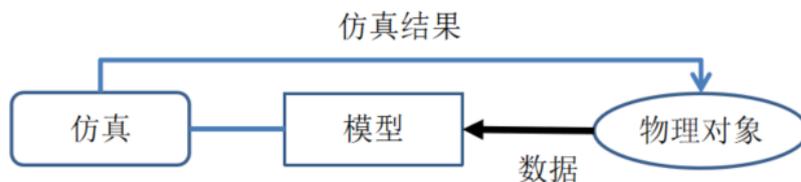


图 2-6 与数字孪生相关的各部分

随着与云计算、大数据、物联网、人工智能等新技术新理念的融合，仿真进入了一个新的发展阶段，向着数字化、网络化、服务化、智能化方向发展，体系逐渐完备。从对象、架构及粒度维度，数字孪生仿真技术发展出很多种类和分支。

按被仿真的对象可以分为：**工程系统仿真**，将实际工程的状态在模型中进行模拟，通过仿真技术确认工程系统的内在变量对被控对象的影响，如制造过程的仿真，仿真技术已被用于产品制造的整个生命周期；**自然系统仿真**，对自然场景进行真实模拟，部分自然场景具有不规则性、动态性和随机性，如气候变化仿真、自然灾害仿真，因此对自然场景的实时仿真具有重大的意义；**社会系统仿真**，是对复杂社会系统的描述与研究方法，有助于提高决策层对系统运行状态的快速掌握以及对各种状况的及时处理，如人工社会、经济行为的仿真；**生命系统仿真**，是以生命系统为研究对象，以生命的某种功能为划分系统的原则，以定量研究为特点的一种新兴学科，如数字人体，数字人体是指用信息化与数字化的方法研究和构建人体，即人体活动的信息全部数字化之后，由计算机网络来管理的技术系统，用以了解整个人体系统所涉及的信息过程，并特别注重人体系统之间信息的联系与相互作用的规律。**军事系统仿真**，在军事仿真方面，有战争模拟、作战演练、装备使用和维修培训等应用场景，能节约经费、提高效率、保护环境、减少伤亡。如通过仿真进行军事演习，可以极大地降低演习的消耗，并避免人员的伤亡。

按仿真粒度可以分为：**单元级仿真**，即面向单个部分或领域的仿真，如机械结构仿真、控制仿真、流体仿真、电磁仿真；**系统级仿真**，面向单一系统整体行为的仿真，如汽车、飞机等产品的全系统仿真；**体系级仿真**，面向由多个独立系统组成的体系系统的仿真，关注体系中各部分之间的关系和体系的涌现行为，如城市交通仿真、体系对抗仿真。

按仿真系统架可以分为：**集中式仿真**，即运行于单台计算机或单个平台上的仿真系统，适合中小型的仿真系统，便于设计和管理；**分布式仿真**，即运行于多台计算机或多个平台上的仿真系统，常用于大规模体系级仿真。

数字孪生技术是仿真技术在制造领域的应用并与物联网、虚拟现实等技术相结合的产物，在工业互联网浪潮的推动下，得到迅速传播。数字孪生的概念由于形象通俗的特点而引发行业内外外的广泛关注和浓厚兴趣，也使人们进一步认识了仿真技术的价值和重要性。仿真形成了较为完善的理论、方法和技术体系，这些将为数字孪生的研究和应用提供坚实的基础和有力的支撑。

## 3 数字孪生赋能智慧城市

### 3.1 总体情况

#### （一）需求背景

一是政策导向层面。国家将数字化作为推动经济社会发展重要的战略手段，《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》中明确探索建设数字孪生城市，推进城市数据大脑建设，加快数字化发展建设数字中国。同时住建部、发改委、自然资源部、工信部、网信办等均发布相关政策，鼓励数字孪生城市的发展。

二是企业支撑层面。数字孪生城市理念提出后受到政府和产业界的高度关注和认同，各地对数字孪生城市规划和建设的需求非常强烈，企业纷纷入局数字孪生城市建设，包括运营商、地理信息与测绘、BIM、建模仿真、集成商、互联网企业、大数据厂商、硬件厂商等，集结各领域优秀企业，共同建设数字孪生城市。

三是城市建设需求。新冠疫情防控、洪涝灾害充分暴露出我国城市治理还存在诸多短板和弱项，包括城市风险预警预测滞后、突发事件应急响应迟钝、资源统筹协调能力不足等，将全周期管理意识落实到城市治理的具体实践中还有很多现实困难，需要解决目前还存在的技术应用割裂、数据碎片化分布、治理协同难以达成等问题。如何通过数字孪生技术，构建韧性城市，是当前亟需解决的问题。

#### （二）功能架构

基于云计算、大数据、人工智能、物联网新一代信息技术构建的开放创新和运营平台，其深度整合汇集政府数据、设备感知数据、历史统计数据、GIS 数据、行为事件、宏观经济等人、事、物数据等海量、多源、异构数据，开展数据融合计算，完成数据融合、智能感知、业务联动处置闭环，实现城市运行感知、公共

资源配置、宏观决策指挥、事件预测预警等功能，完成对城市可视、可监、可控的闭环控制。并基于统一的标准和规范，积累完整的城市大数据资产，支撑城市管理、生态环保、安全保障、应急管理、公共服务、产业发展等各领域的数字化转型升级，辅助城市管理者实现从规划-建设-管理-运维的城市全生命周期体检评估，有利于提升城市精细化治理水平，提升政府管理能力。

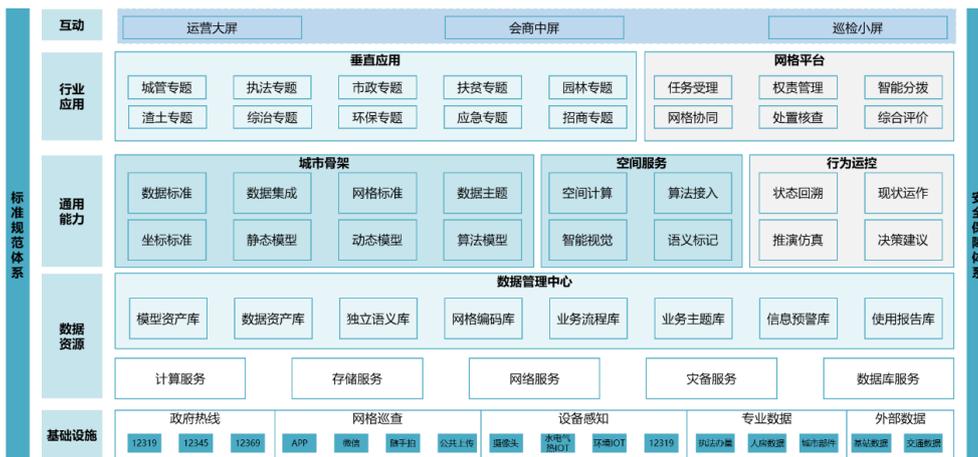


图 3-1 数字孪生城市整体架构

1) **基础设施**：汇聚城市多维时空数据，包含政府热线、网格巡查、设备感知、专业数据及外部数据。

2) **数据资源**：对原始数据如矢量数据、栅格数据、BIM 模型数据、点云数据、人工建模数据等静态数据，IoT 感知数据、业务运行数据、仿真算法数据等动态数据。进行聚合、质量管理、数据清洗，形成不同结构化的主题数据库，提供基础计算能力。

3) **通用能力**：又称平台支撑层，包含城市骨架、空间服务与行为运控，城市骨架，供包括应用代码、SDK、操作系统以及 API 在内的 IT 组件，借助微服务组建及平台开发工具，构建 UBD 数字孪生底座、可视化平台、场景编辑平台、业务仿真平台及业务开发平台，同时，用户可使用工具集自定义数字孪生体。融合算法模型，向下接通数据，向上支撑业务应用。

**4) 行业应用：**为数字孪生平台应用提供赋能，一方面为数字孪生行业应用业务系统提供功能扩展接口，行业应用，如智慧城市、智慧园区、智慧水务、智慧交通、智能汽车、智能制造、智能港口等行业。另一方面实现运行、管理、预警应急等协同工作机制，并提供创新性的业务应用。

**5) 互动：**通过运营大屏、会商中屏、巡检小屏完成对数字孪生平台的可视化呈现。

## 3.2 核心价值

### 3.2.1 促进多源数据互通融合

汇聚城市多源异构数据，包含由地理矢量数据、模型数据、BIM 数据等为主的基础数据，以及城市各业务涉及的专题数据，形成可复用的、庞大的数据资产库，解决数据碎片化、数据不完整、格式不一致、数据孤岛等问题，通过精准的“数据反哺”，为数据驱动城市运行提供基础。

### 3.2.2 建设城市全生命周期管理体系

通过构建城市规划、建设、管理、运营全生命周期管理体系，实现一张蓝图绘到底、干到底、管到底：一张蓝图绘到底，支撑多规合一的规建业务，实现多要素的静态场景和图层的管理；一张蓝图干到底，支持动态引入制定模型，实现城市-系统同步更新，多精度场景贴近现实；一张蓝图管到底，支撑城市综合治理业务，实现数据驱动静态场景、动态场景，映射现实世界。在这一蓝图的基础上，围绕人民群众最关心的问题，开展大城市治理，像“绣花”般精细，像钉钉子般务实力，形成有效的超大城市的治理体系靠的是精细化管理水平。

### 3.2.3 打造多方建设的创新模式

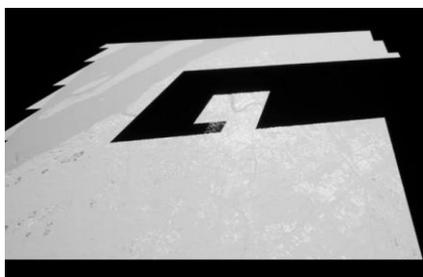
城市本身是一个知识集成、技术集成、数据集成、算法集成、工具集成、应

用集成的复杂巨系统，因此必须有强有力的产业生态紧密协作，对零散的应用平台进行集成和升级，通过政府、企业、社会合作构建产业生态，打造集约化平台，用科技产业发展带动技术进步，推动整个社会参与城市治理服务、数字经济发展，实现公共资源高效调配，城市事件精准处置。

### 3.3 关键技术

#### 3.3.1 多源数据融合技术

以 GIS 数据、IoT 数据、BIM 数据、公共专题数据、行业专题数据、互联网数据等海量异构多维时空数据为数据源，利用机器学习、深度学习算法，对时空大数据进行自动识别、数据挖掘及三维重建，能够为数据赋予空间特性及用途，构建涵盖地上地下、室内室外、二三维一体化的全息、高清的数字空间。同时，构建时空数据库，为数据设计统一定义、存储、索引及服务机制，形成 TB 级数据集、分布式集群管理，实现数据统一接入、交换和高效共享，构建全要素数据体系。为城市提供完整统一的三维数字底板。数字孪生系统包含全要素场景衍生数据（DEM、DOM、矢量、倾斜摄影、BIM、激光点云、人工模型等）、行业数据（城市、交通、航空、码头、医疗、工地、能源、生态、水务等）、物联感知数据（智能手机、可穿戴设备、传感器等）等多种数据。





组图 3-2 全要素场景数据处理

### 3.3.2 多尺度建模技术

以应用场景为导向，基于不同精度标准还原较大规模城市及区域场景，能够实现大规模环境下的多尺度建模。融合倾斜摄影、激光点云数据、GIS 基础数据、IoT 数据及其他业务数据，匹配不同尺度与不同颗粒度数据，生成多尺度数据融合标准，以此标准为依据，自定义不同层级呈现的数据主题，完成人、事、地、物全要素的多尺度建模，实现物理空间与数字空间的分层次映射。同时基于深度学习技术，对点云进行语义分割，进行多种场景下的事件检测、事件相关元素以及事件间的关系抽取，再进一步做单体的语义建模，形成三维语义模型，将模型赋予灵魂。



(a) 初精度模型



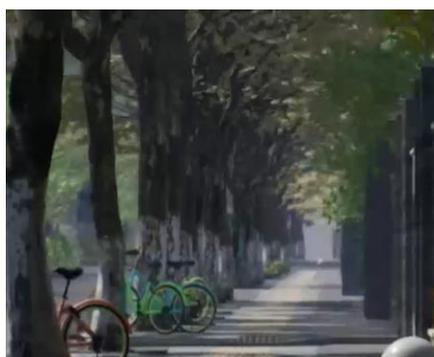
(b) 中精度模型



(c) 高精度模型



(d) 高拟真模型

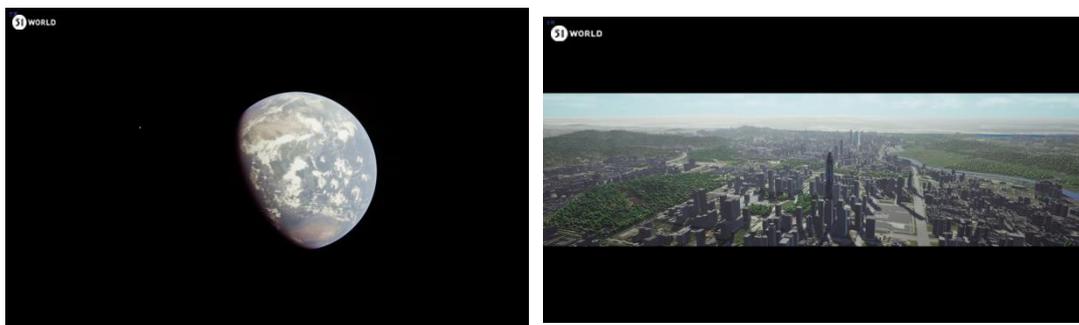


(e) 全拟真模型

组图 3-3 多尺度建模

### 3.3.3 三维可视化技术

三维场景高效可视化技术是基于游戏引擎、3D GIS 技术、混合现实技术，多层次实时渲染复杂三维场景，从宏观的城市场景到精细局部的微观细节，支持三维场景全域可远观、可漫游，观察距离从 32 千米到 1 米，实现对空间地理数据的可视化表达，对物理场景进行 1:1 还原，实现地上地下一体化、室内室外一体化、静态动态一体化。地上地下一体化基于地形挖开和侧面剖切的方式，对地下空间进行展示浏览的可视化功能。支持将地下地质模型、水体模型等上升到地表独立进行可视化查看，使地上地下三维场景既可以一体化展示，也可以独立化展示。室内室外一体化基于游戏引擎的流式关卡加载技术，快速高效地实现由室外至室内的一体化浏览。静态动态一体化在大范围静态三维场景下，支持人流、车流等各类智能交通体的动态模型可视化。



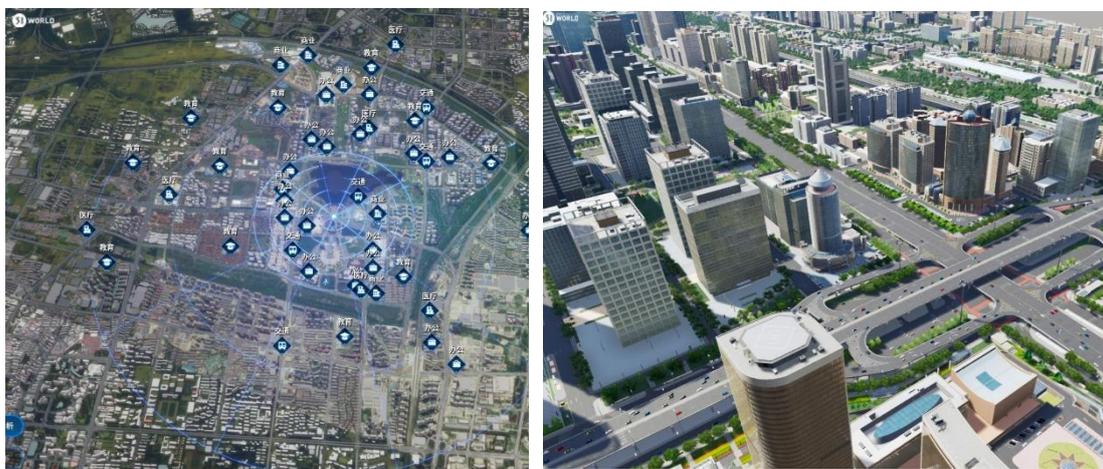
组图 3-4 大场景到精细场景



组图 3-5 地上地下



组图 3-6 室内室外



组图 3-7 静态动态

### 3.4 应用场景

#### 3.4.1 城市综合治理

数字孪生城市通过对各类城市基础设施、电力系统、生态环境等元素的模拟，建立起物理世界和数字世界的映射和交互平台，打破传统智慧城市建设领域中条块化的建设和管理模式，为城市综合治理提供城市运行全貌的实时监测和展示中

心。在此基础上形成跨区域、跨层级、跨部门的城市协同管理新思路，充分利用政务网络、数据交换平台和现代信息技术手段，发挥信息系统的监测甄别能力、业务操作引导能力、信息透明能力、协同支持能力和决策支持能力，实现城市问题的快速发现、精准定位和智能决策，提高城市公共资源的管理和配置效率，为决策者提供城市全局态势的感知工具和指挥调度的平台。



图 3-8 城市综合治理应用场景

### 3.4.2 城市规划建设

城市信息模型通过对城市物理空间中的地形、建筑、基础设施等对象进行数字化表达，并以三维空间模型为载体关联城市中各类社会经济和物联感知设备的监测数据，以此为基础为城市规划和建设提供有机综合平台，实现城市规划建设工作的“数据化、信息化、流程化”。统一的城市信息模型将原本分散的不同层级的总体规划，城乡规划等业务系统进行整合，为国土空间规划的融合统一提供信息化支撑，实现信息化层面上的“多规合一”，强化国土空间规划对各专项规划的指导约束作用，解决各级各类空间规划在支撑城镇化快速发展过程中出现的部分内容重叠冲突，审批流程复杂、周期过长，地方规划朝令夕改等问题。通过在城市信息模型上模拟仿真和虚拟规划，提前验证规划方案的可靠性和合理性，在早

期阶段对城市规划方案进行比选和验证,以更低的成本对城市规划进行定性和定量的分析和评估,实现对城市开发建设的规划、设计、施工、运维和管理的综合管控,保证城市规划方案实现土地综合效益的最大化。



图 3-9 城市规划建设应用场景

### 3.4.3 城市交通管理

基于数字孪生城市的数字空间,结合大数据采集的交通信息和高精度地图,对城市交通进行模型建设和仿真模拟,对城市路网提出分析评价和优化,从而解决城市道路的通行问题。可在数字孪生空间中依据交通行为特征和规则,判断推演交通流的变化情况,对交通管理形成科学预判。宏观上,数字孪生可实现交通态势协同感知、红绿灯动态配时、交通流量统计、路口拥堵报警等功能,通过将城市中的物理基础设施、信息基础设施、社会基础设施和商业基础设施连接起来,对数据进行收集、清洗、存储和标准化,基于融合数据建模实现城市交通的智能预测和决策,赋能智慧交通、智慧城市。微观上,数字孪生可实现交通突发事件的检测和报警,为驾驶车辆提供道路基础设施静态信息及运营动态信息,保障和提升驾驶汽车安全性。

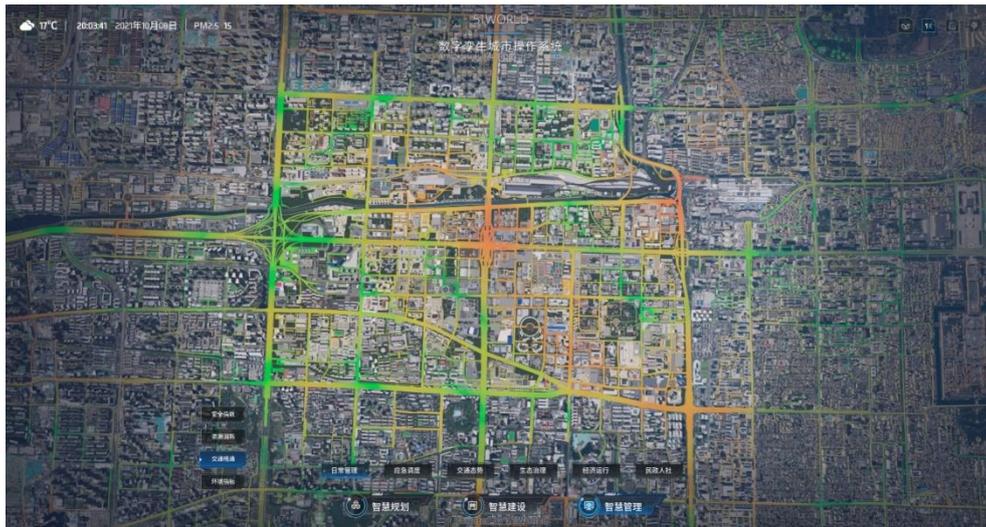


图 3-10 城市交通管理应用场景

## 3.5 典型案例

### 3.5.1 数字孪生助力城市大脑高效指挥

**应用背景：**海淀区依托中关村创新发展机遇，贯彻“两新两高”战略部署，广泛激发社会活力，积极实践智能化治理新模式，高质量建设全国科技创新中心核心区。海淀区 IOCC 项目建设，51WORLD 全精度、全要素、全粒度还原城市市场景，打通业务系统，接入业务数据，实时感知城市运行态势，辅助海淀区城市管理，解决传统城市底图重复建设、可视化效果差、响应速度慢等问题。

**方案简介：**构建“1+1+2+N”城市大脑架构，即一张感知网、一个智能云平台、两个中心（大数据中心、AI 计算中心）、N 个创新应用场景，具体建设内容为：“一张感知网”：由全区 14500 余路在网摄像机，以及 10000 多路传感器做支撑；“时空一张图”：汇聚全区 249 个专题地图数据，包括基础地理、行政区划、二三维地图、约 17 万个建筑，以及由 127 个图层、约 130 万个数据要素组成的城市部件数据等；“两个中心”：大数据中心汇聚政务数据、物联网数据、互联网数据、社会资源数据。

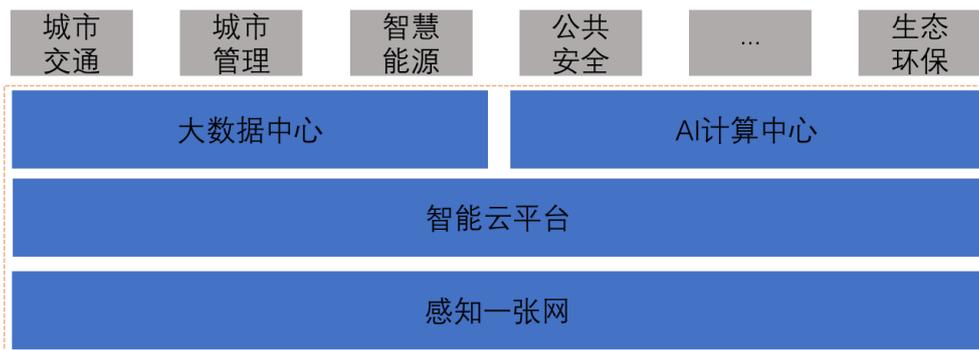


图 3-11 区域城市大脑整体框架

**典型应用：**一是**城市一张图**，基于自研的 AES 数字孪生平台，对海淀全区进行中精度还原，对中关村西区 3 平方公里进行高精度还原，包括全区的基础地理信息、行政区划、二三维地图、17 万个建筑、城市部件等，能以近乎真实的效果还原海淀区现实城市的地形、道路、建筑、植被、车辆、人流、环境等场景。二是**城市管理**，对城市智能部件进行总览，包含智能部件部署的位置、数量、种类，以及基础设施的覆盖率、运行状态等；对城市中高频事件类型的感知，对当前城市中高频事件进行重点管理。三是**城市治理**，在渣土车综合治理领域，整合工地信息、卫星图斑、周边视频、消纳地点等监测数据，交通、环保、城管等多部门政府数据，构建一车一档信息，充分利用“城市大脑”的地理定位和 AI 识别能力，实现了对渣土车源头管控、车辆轨迹研判、违法特征研判、执法取证、自动处理环节在内的精准识别与高效处理。



图 3-12 区域城市大脑界面

**应用成效：**依托数字孪生城市技术与平台底座，对零散数据和应用进行集成和升级，通过政府、企业、社会合作构建产业生态，打造集约化平台，用科技产业发展带动技术进步，推动整个社会参与城市治理服务、数字经济发展，实现公共资源高效调配，城市事件精准处置。

### 3.5.2 数字孪生助力区域时空信息管理

**应用背景：**为把握新一轮的信息技术变革和数字化发展趋势，深化实施数字经济战略，北京 CBD 要求立足于数字产业化、产业数字化、数字化治理、数据价值化，充分利用城市的海量数据，建设城市数字孪生全要素数据资源体系，为数字经济高质量发展、企业数字化转型、数字化生态打造、城市治理精细化赋能。

**方案简介：**一是**数字孪生精细化**。超高精度还原中心区重点楼宇，高精度还原 7 平方公里 CBD 中心区，中精度还原 84 平方公里 CBD 功能区，完成地面建筑、道路、绿化、水域、地下管网等要素的 1:1 还原。利用三维场景结合动效，POI 打点，区域高亮，路径特效，富文本内容呈现等方式对三维场景内北京 CBD 区域的数据资源进行物理实体的属性展示和分析呈现。引入各类先进技术和算法，在数字孪生城市底板的基础上实现如“一桥：国贸桥数字孪生视频融合应用”、“一路：高精还原示范路段仿真”、“一楼：智慧楼宇智能化管理示范”、“一管网：地下数字孪生示范管廊可视化管理”等的细化模型呈现。通过土地利用、城市生长、资产配置，动态展现城市生长脉搏。



图 3-13 数字孪生精细化城市还原

二是区域**经济透视化**。通过展现产业结构和宏观经济指标，把控产业发展趋势。基建领域，全面展现作为经济载体的写字楼和园区等服务设施的分布和等级信息，包括商业、酒店、剧院、便利店、咖啡店、书店、艺术空间等商业规划设施的展示。企业视角通过个性化专题展示显示世界 500 强、上市公司、独角兽企业、总部企业、跨国公司地区总部企业、外资企业、功能性企业，精准定位各行业领头羊。



图 3-14 区域经济透视化

三是**风险预警可控化**。详细展现优秀企业分布。对风险楼宇与企业进行预警，通过信用数据分析展示高风险企业、经营异常企业、行政处罚企业、黑名单企业、

红名单企业、重点监测企业等数据，为未来深度的全球分析、京津冀地区分析、北京市内分析乃至楼宇自身的分析等多维度多视角分析提供参考。



图 3-15 风险预警可视化

**建设意义：**整合海量、多源、异构结构化数据和非结构化数据，推进数据融合，建设智慧城市体系，构建部门协同机制，建立企业信用监管机制，优化企业信用体系，形成北京 CBD 版的“新基建”，成为了中国 CBD 联盟首个搭建数字孪生系统，打造全国数字化基建和数字经济发展样板。

## 4 数字孪生赋能智能制造

### 4.1 总体情况

#### (一) 需求背景

制造业作为全球经济发展重要支撑，世界各国纷纷制定国家级发展战略，我国先后出台了“中国制造 2025”、“互联网+”、“工业互联网”等制造业国家发展实施战略，把推动制造业高质量发展作为构建现代化经济体系的重要一环，推动制造业与新型 ICT 技术融合，实现制造业数字化、智能化转型。在智能制造浪潮下，数字孪生成为了最为关键和基础性技术之一。数字孪生作为连接物理世界和信息世界虚实交互的闭环优化技术，已成为推动制造业数字化转型，促进数字经济发展的关键抓手，以数据和模型为驱动，打通业务和管理层面的数据流，实时、连接、映射、分析、反馈物理世界行为，使工业全要素、全产业链、全价值链达到最大限度闭环优化，助力企业提升资源优化配置，有助于加快制造工艺数字化、生产系统模型化、服务能力生态化。

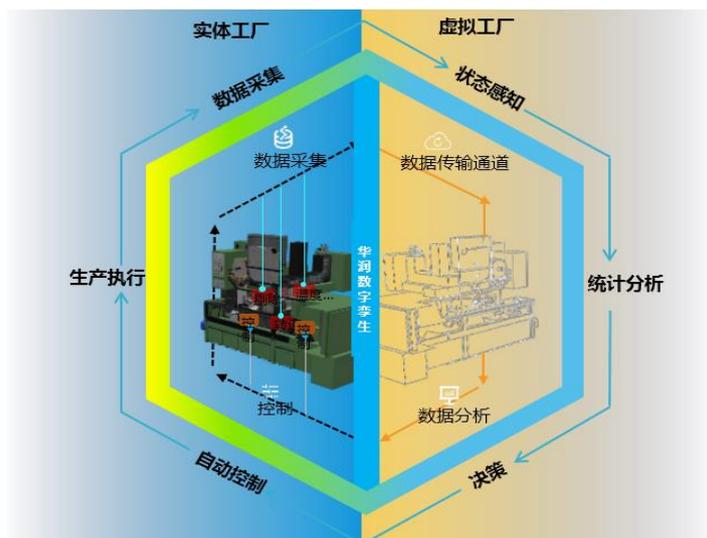


图 4-1 制造业数字孪生概念视图

## （二）发展现状

**制造业数字孪生应用发展前景广阔。**随着物联网、大数据、云计算、人工智能等新型 ICT 基数席卷全球，数字孪生得到越来越广泛应用，被应用于航空航天、电力、船舶、离散制造、能源等行业领域，应用场景如研发设计、生产制造、营销服务、运营管理、规划决策等环节。在智能制造领域，数字孪生被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段，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。基于模型、数据、服务方面的优势，数字孪生正成为制造业数字化转型的核心驱动力。

**制造业数字孪生基础和关键技术待提升。**数字孪生作为综合性集成融合技术，涉及跨学科知识综合应用，其核心是模型和数据。特别是在制造业领域，各行业间原料、工艺、机理、流程等差异较大，模型通用性较差，面临多源异构数据采集协调集成难、多领域多学科角度模型建设融合难和应用软件跨平台集成难等问题。基于高效数据采集和传输、多领域多尺度融合建模、数据驱动与物理模型融合、动态实时交互连接交互、数字孪生人机交互技术呈现等数字孪生基础支撑核心技术，有助于探索基于数字孪生的数据和模型驱动型工艺系统变革新路径，促进集成共享，实现数字孪跨企业、跨领域、跨产业的广泛互联互通，实现生产资源和服务资源更大范围、更高效率、更加精准的优化。

随着企业数字化转型需求的提升，数字孪生技术将持续在制造业领域发挥作用，在制造各个业领域形成更深层次应用场景，通过跨设备、跨系统、跨厂区、跨地区的全面互联互通，实现全要素、全产业链、全价值链的全面连接，为制造领域带来巨大转型变革。

## 4.2 核心价值

#### 4.2.1 实现生产流程可视化提高生产管控

围绕制造业数字化转型，数字孪生技术应用帮助生产制造企业优化产品生产制造流程，通过满足制造业企业的生产需求，制定全方位数字孪生服务，形成生产流程可视化、生产工艺可预测优化、远程监控与故障诊断在生产管控中高度集成，提升企业生产质量，提高对生产制造的管控水平。

#### 4.2.2 建设企业数字业务化降本增效

利用数字孪生技术，通过深化改革、技术改造和现代管理，实现企业数字业务化以数据流带动技术流、资金流、人才流、物资流，实现降本增效。在设备方面数字孪生帮助企业提升设备管理运行效率、降低产品生产设备故障率、降低设备维护成本等以降低企业运营成本。

#### 4.2.3 打造高度协同生产制造价值链释放价值

数字孪生技术促进上下游企业间数据集成和端到端汇聚，打造高度协同的上下游企业间生产制造链条，优化资源配置，提高企业效率，协同研发制造，推动企业释放更大的增值。

#### 4.2.4 构筑数字孪生运营模式赋能转型升级

数字孪生深入设计、生产、物流、服务等活动环节，贯穿贯穿产品的全生命周期，渗透到设备、车间、企业、产业链各个层级应用，创造以产业升级、业务创新、全数字化个性化定制为导向的新的运营模式，摆脱旧商业模式束缚，触发新型生产模式和商业模式的演进，助力企业升级改造，为传统制造转型升级赋能。

### 4.3 关键技术

#### 4.3.1 多源异构数据集成技术

在工业实际应用中，工业软件、高端物联设备不具备国产自主可控性，接入

的高端设备的读写不开放,各套信息化系统差异大,因此形成设备的信息孤岛,数据流通不畅。依托统一的数据标准,采集人员、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融合了企业的人、机、料、法、环等全域数据。

### 4.3.2 多模型构建及互操作技术

数字孪生模型具有多要素、多维度、多领域、多尺度模型特点,以生动、形象的方式展示数字孪生对象“几何—物理—行为—规则”模型结构属性,实现数字孪生对象模型构建刻画。在工业领域中数字孪生物理对象和数字空间进行模型构建后,模型间要进行交互转换,实现模型间双向映射、动态交互和实时连接。

### 4.3.3 多动态高实时交互技术

以数据和模型为驱动,利用工业机理算法,驱动生产执行与精准决策,以3D数字化呈现的方式将生产过程中的人、机、料、法、环、测的各项数据融入虚拟空间,将物理实体和信息虚体连接为一个有机的整体,使信息与数据得以在各部分间交换传递,实现数字孪生全闭环优化。同时以友好的人机操作方式将控制指令反馈给物理对象,给予用户最直观的交互。

## 4.4 应用场景

数字孪生孪生工业领域主要有设备级、工厂级和产业级数字孪生服务,面向设备的数字孪生应用聚焦设备实时监控,面向工厂的数字孪生聚焦于全过程生产管控,面向产业数字孪生聚焦于产品全生命周期追溯。相关应用场景如下:

### 4.4.1 设备实时监控和故障诊断

在工业设备生产过程中,实现状态感知和实时状态监控,监控设备数据涵盖但并不限于:设备生产运行信息、设备监控信息、设备维护信息以及管理信息。

可以根据监控信息，对设备生产工艺过程进行可视化，且能针对故障报警进行器件定位，并提供故障及维修案例库。



图 4-2 备实时监控和故障诊断

#### 4.4.2 设备工艺培训

提供可视化的工业设备 3D 智能培训和维修知识库，以 3D 动画的形式，对员工进行生产设备原理、生产工艺等培训，缩短人才培养时间。



图 4-3 备实时监控和故障诊断

#### 4.4.3 设备全生命周期管理

基于工业设备运行管理、维护作业管理和设备零配件全生命周期管理，通过对设备的集中监视，汇总生产过程中的设备实时状况，形成设备运行和管理情况统计、设备运行情况统计、设备运维知识库，为合理安排设备运行维护，充分发挥设备的利用率，满足设备操作、车间管理和厂级管理的多层需求提供依据。



图 4-4 设备生命周期数字孪生

#### 4.4.4 设备远程运维数

运用数字孪生技术，探索基于工业设备现场复杂环境下的预测性维护与远程运维管理，通过收集智能设备产生的原始信息，经过后台的数据积累，以及专家库、知识库的迭加复用，进行数据挖掘和智能分析，主动给企业提供精准、高效的设备管理和远程运维服务，缩短维护响应时间，提升运维管理效率。

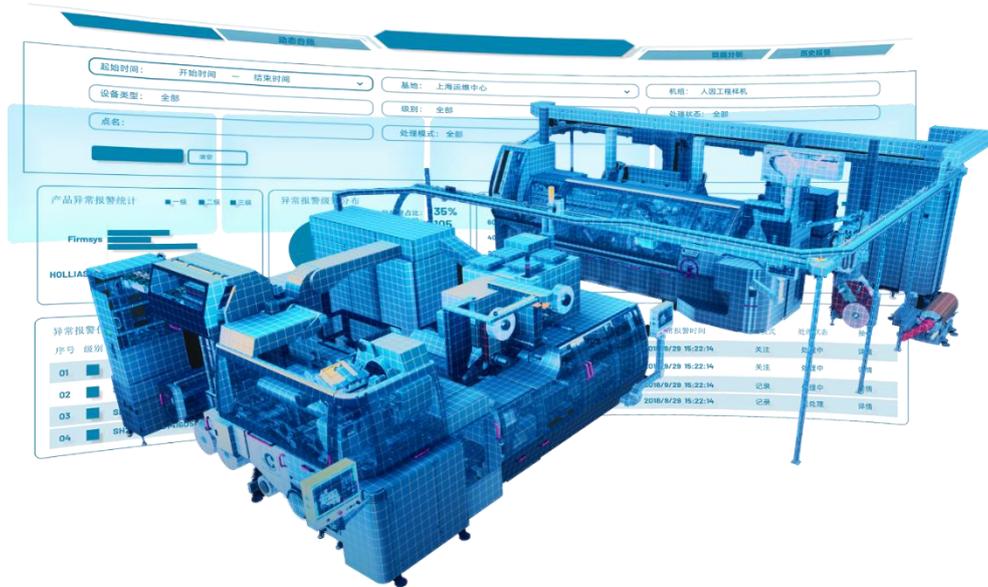


图 4-5 设备远程运维数字孪生

#### 4.4.5 工厂实时状态监控

通过对设备制造生产设备实时数据采集、汇聚，建立实体车间/工厂、虚拟车间/工厂的全要素、全流程、全业务数据的集成和融合，通过车间实体与虚体的双向真实映射与实时交互，在数据模型的驱动下，实现设备监控、生产要素、生产活动计划、生产过程等虚体的同步运行，满足设备状态监控、生产和管控最优的生产运行模式提供辅助数字孪生服务。主要包括生产前虚拟数字孪生服务、生产中实时数字孪生服务、生产后回溯数字孪生服务，以确保做到事前准备到位、事中管控到位、事后优化到位。

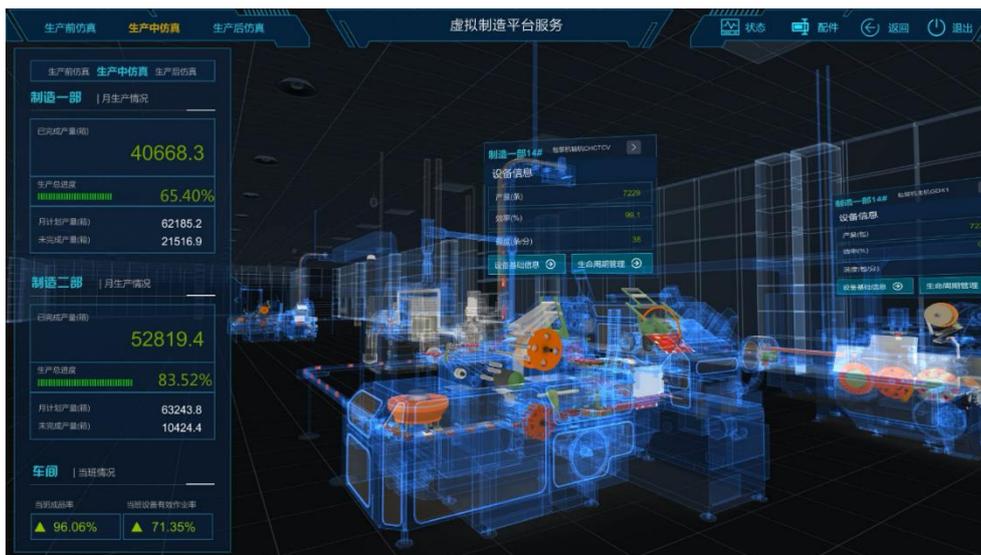


图 4-6 工厂实时状态数字孪生监控

## 4.5 典型案例

### 4.5.1 数字孪生助力医药生产制造异地协同管控

**应用背景:**为加强医药集团总部为具体业务管控力度和提高生产的整体灵活性,需将原来的分布式工厂生产模式,建立异地协同统一平台集成管控,基于工业互联网的数字孪生成为工厂实现智能生产、经营活动的有效集成、优化运行、优化控制与优化管理的桥梁和纽带,通过多系统信息流、异地工厂协同实现从单个设备、单个工艺、单个企业向全要素、全流程、全业务信息全集成,实时感知各个生产基地/工厂运行状况,提升效率和质量,降低成本。

**方案简介:**本方案结果医药制造企业生产业务情况,构建数字孪生数字化工厂及运维平台,依托统一的数据标准,采集医药制造企业人员、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,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。本通过建立统一数字孪生平台,五大应用服务涵盖车间数字孪生平台、设备生命周期管理、运维监视中心、

远程智能运维虚拟培训等，来打通数据流、信息流，实现深圳、安徽和四川三地车间工业生产数据全要素、全流程、全业务的集成式管控，提高生产过程管控优化和各业务资源优化配置。

**应用成效：**本项目推动企业各环节信息的互联互通和数据共享，通过多系统信息流实现异地工厂信息全集成，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。因此通过运用数字孪生技术，医药制造企业实现了对生产运营状况的感知、优化和产能调配，生产效率提高 20%；通过资源优化，运营成本降低 20%。



图 4-7 数字孪生车间视图



图 4-8 数字孪生工厂运维

#### 4.5.2 数字孪生助力新能源装备制造智能化升级

**应用背景：**随着新能源汽车的爆发，锂电池需求量不断攀升，但生产工艺复杂且工序繁多同时对成本和性能要求也在不断提升。而锂电生产线的自动化、智能化程度将直接决定锂电企业在未来的竞争力。近年来国内一些企业在锂电装备自动化、信息化和智能化研发上不断开拓创新。因此企业数字化转型大势所趋这背景下，新能源装备行业面临着如何加强数字化转型，加强生产过程的集成式管理，提升装备生产制造智能水平问题。

**方案简介：**通过单机设备进行数字孪生智能化改造，通过对生产现场“人机料法环”各类数据的全面采集和深度分析，多维度全方位管控锂电池从原辅料、参数、过程、工艺、质量、批次、在线、离线、人员、状态等信息，应用数字孪生技术实现锂电池生产线电池生产全过程实时动态跟踪与回溯的双向真实映射。本项目通实现了人-产品-设备-数据之间互联互通和全方位集成与贯通，支撑企业全面建立以数据为驱动的数字孪生运营与管理模式，提速新能源锂电装备的智能化升级。

**应用成效：**目前经过项目实施已实现了新能源锂电池生产装备的智能化升级，缩短生产周期 35%，降低或消除数据输入时间 36%，降低或消除交接班记录 67%，缩短生产提前期 22%，有效提高产品质量。



图 4-9 设备数字孪生建模



图 4-10 数字孪生工厂管理平台

#### 4.5.3 数字孪生助力汽车制造全流程数字化管理

**应用背景：**在汽车制造四大工艺中，焊接和总装的生产现场非常复杂，工艺

设计与生产执行缺乏合适的同步仿真与检测手段；产品的质量信息采集手段，由于自动化程度不高，往往滞后，无法有效指导质量改进。通过数字孪生在焊接与总装引入数字孪生，以数字化、可视化方式在虚拟空间呈现物理对象，破除瓶颈工位及时掌握生产信息，助力汽车智能制造，推动产业转型升级。

**方案简介：**打通汽车制造焊接和总装车间中物料、产品、设备、产线等每一个环节的信息瓶颈，将汽车车间中的数据在信息空间进行全要素重建，从生产管理、品质管理、计划管理、物料管理等维度对工厂-车间-线体-设备进行信息模型驱动，构建物理实体信息虚体生产线融合映射交互制造，实现远程现场巡检。同时对焊接和总装生产线所有工位的工序的生产产品质量进行实时监控，针对不同的加工工序与工艺，不同类型加工质量，数据检测等等，建立不同的模型数据库，通过在虚拟车间仿真计算，以对产品加工质量进行分析和预测。

**应用成效：**通过数字孪生进行生产线可视化工艺仿真，能够对关键设备的健康状况进行管理，对车间能耗进行多维分析与优化，对车间动态生产进行调度，对车间生产过程进行实时监控，解决了车间生产管控和资源调配不及时的难题，提高了生产效率，降低了运行成本。



图 4-11 数字孪生汽车制造工厂建模



图 4-12 数字孪生骑车制造工厂看板

## 5 数字孪生赋能智慧网络

### 5.1 总体情况

#### （一）需求背景

数字孪生经历了一段时间的平稳发展，直到 5G 技术的出现，数字孪生技术的发展才正式进入快车道，本质原因是数字孪生的实现依赖通信技术的高效支撑。数字孪生与网络发展相辅相成，当前的网络数字孪生发展还处于探索阶段，基于数字孪生实现网络管理智能化，同时辅助管理者挖掘网络潜在能力。GSMA（全球移动通信系统协会）专家提出，5G 物联网时代的数字孪生将大幅提升各行业数字化进程，随着 5G 时代到来，网络数字孪生应运而生。数字孪生技术可以为以下示例性列举的一些场景提供支持：

1) 5G 网络目前的可用性有限，研究人员和开发者要想实际访问 5G 网络非常困难，而且成本极高。许多行业都想探索 5G 的商业潜力，因此也需要一个灵活、低成本、高效率的研究场地。

2) 网络安全性方面的风险也正在日益提高，这意味着如果我们想要以前瞻方式研究风险，就需要具备一个有代表性的沙盘。

3) 通信服务商也需要一系列的环境，对复杂的 5G 网络所应具备的行为和性能进行连续的验证和优化。5G 网络数字孪生是一种仿真出来的物理网络端对端软件复本，两者以平行方式运行，从而可以实现连续的评估、预测和建议，以高效的、前瞻方式为实际运行的网络及其相关服务提供建模、验证和保障。

#### （二）功能架构

1) 物理网络层：物理网络层是指实体网络，包括网络设备设施、网络服务的地理环境信息、完整的组网信息等。

2) 数据层：数据是数字孪生运行的血液，用于物理网络层的信息上报和孪生层生成的策略指令下发等，同时数据层肩负着数据采集、数据清洗、数据汇聚、数据处理、及数据存储等能力。

3) 孪生层：孪生层包含网元单体模型的构建及网络服务场景的构建，运用数字线程技术驱动场景运行赋能网络全生命周期管理。

4) 应用层：基于孪生网络能力，超前验证网络生命周期各阶段遇到的问题，实现网络演进预测。



图 5-1 数字孪生网络整体架构

## 5.2 核心价值

### 5.2.1 沉浸式的管理体验

基于数字孪生实时交互并可视呈现的能力，为管理者提供了一种沉浸式的交互体验，动态的运行状态监测可及时发现网络异常并预测网络演进方向等信息。

全息化呈现网络虚实交互映射，帮助用户更清晰地感知网络状、更高效地挖掘网

络有价值信息、以更友好的沉浸交互界面探索网络创新应用。

### 5.2.2 网络业务全生命周期管理

传统的网络业务生命周期管理没有很好的融合，不利于网络故障回溯、故障预测、网络优化设计等，网络数字孪生可以基于设备孪生体模型预测设备运行状态，当网络出现故障，回溯到网络与网元的“过去”，实现了网络和设备的生命周期关联分析，通过数字孪生网络将网络和设备的生命周期紧密结合，实现网络和设备的全流程精细化管理。

### 5.2.3 网络风险和成本降低

基于数字孪生网络对网络优化方案高效仿真，充分验证后部署至实体网络，降低现网部署的试错风险和成本，提高方案部署的效率。借助网络数字孪生，可实现低成本、高效率的网络创新技术研究，降低新技术在现网中验证时产生的风险，减小部署到现网中发生错误的可能性。

### 5.2.4 网络实时闭环控制

基于数字孪生网络具备的仿真、分析和预测功能，生成相应的网络配置，实现网络实时闭环验证控制。

## 5.3 关键技术

### 5.3.1 网络数字孪生体建模技术

网络数字孪生体建模技术实现了物理空间中的网络实体向虚拟空间孪生体的映射，并通过在虚拟空间进行分析和决策，形成交互指令对物理空间进行干预和调控，使整个物理系统保持良好的运行状态。网络数字孪生体模型构建技术主要包括：孪生网络本体模型构建、统一表征融合网络孪生体数据库的构建以及网元模型和拓扑模型的构建。

**一是孪生网络本体模型构建。**孪生网络本体模型是实现大规模网络数据一致性表征的基础。首先定义本体的组成要素，例如，类、属性、关系、规则和实例。继而通过本体模型对大规模网络数据进行一致性表征。

**二是统一表征融合网络孪生体数据库的构建。**基于孪生网络本体模型构建多源异构数据一致性融合表征操作，形成具有统一格式的数据，完成从多源异构数据到统一表征数据的映射。

**三是网元模型和拓扑模型的构建。**根据不同网元模型的功能或拓扑模型的结构，可基于统一表征的数据库，按需组合构建网络基础模型，从而实现孪生网络和物理网络的虚实映射。

### 5.3.2 数字线程技术

数字线程是一种可扩展、可配置分析框架，将物理对象的全生命周期的各数字孪生体之间的数据资产进行传递和追溯，从而实现优秀策略的沉淀。数字线程技术是数字孪生网络场景的驱动器。它按照业务规则，在场景中对数字孪生体之间建立连接，并调度数字孪生体的交互，在场景中实现动态的业务逻辑，并管理每个数字孪生体的整个生命周期，需要具备以下主要能力：

**一是场景驱动。**根据业务规则或预设的自然规则（重力、材质碰撞、地形淹没等），在场景中驱动数字孪生体交互，实现孪生域中各业务实践。数字线程技术在数字孪生网络中可驱动多个数字孪生体实例在多样化场景中进行网络性能验证。

**二是场景隔离。**可对不同的场景生成不同的驱动线程实例，每个线程实例驱动一个场景运行，多场景同步运行时，场景中的孪生体实例互相不影响。同时还对场景、孪生体等实现鉴权服务，控制访问安全性。

三是**数字孪生体生命周期追溯**。可对场景中的每个孪生体运行动作记录日志，后续可进行追溯与回放。

### 5.3.3 网络数字孪生可视化技术

根据通信业务需求，运用数字孪生技术构建网络数字孪生体模型，基于业务需求，构建不同级别的可视化能力，同时能够通过通信网络网元数字孪生体的拓扑规则形成网络网元的拓扑结构，并满足通信网络数字孪生体与现实物理通信网络设备之间的动态交互、关联性交互和沉浸式模拟。

网络数字孪生可视化需要支持不同精度的网元单体模型、场景模型构建能力，基于业务选择合适级别的可视化能力，以此构建对应环境的拟真能力。覆盖小微场景到规模化的城市级场景网络全生命周期管理可视化，通过该技术能高度拟真还原现实网络，利用数字线程驱动场景可视化运行，通过数字线程修改其网络可视化内容，达到动态可视的能力。构建一个宏观到微观、室内到室外、个性化场景到规模化场景、网络组网到设备单体的数字孪生网络的平行世界。

利用网络可视化技术，一方面可以辅助用户认识网络的内部结构，另一方面有助于挖掘隐藏在网络内部的有价值信息。数字孪生网络的可视化面临孪生网络规模大、虚实映射实时性要求高的挑战。网络孪生体可视化呈现分为以下 3 类：

**一是网络拓扑可视化**。作为数字孪生网络可视化的基础，网络拓扑可视化将网络节点和链路以点和线构成图形进行呈现，清晰直观地反映网络运行状况，辅助人们对网络进行评估和分析。可视化布局算法是拓扑可视化的核心。

**二是功能模型可视化**。将相关的可视化技术运用到数字孪生网络的流量建模、故障诊断、质量保障、安全建模等功能模型中，基于网络孪生体完成功能验证的

同时实现可视化呈现。可进一步直观体现统一数据模型作为数字孪生网络能力源所发挥的作用。

**三是可视化动态交互。**数字孪生网络的网络拓扑和数据模型需要尽可能提供动态交互功能，让用户更好地参与对网络数据和模型的理解和分析，帮助用户探索数据、提高视觉认知。常用的网络可视化动态交互方法有直接交互、焦点和上下文交互、关联性交互和沉浸式模拟等。

## 5.4 应用场景

### 5.4.1 无线网络重保

无线通信基于其构建成本廉价、建设工程周期短、适应性和扩展性好、设备易维护、等特性，为用户在日常生活中使用带来了广泛的便利性。当前包括但不限于智慧景区、智慧园区、智慧社区、智慧楼宇、智慧场馆等基本都是运用无线通信技术用于场景下的日常运作。

特定的无线网络应用场景往往对性能、覆盖范围等有所不同，现场组网方式也显有差异，既要满足用户对网络能力的要求，又要降低场景相关负责人的管理难度。需要一种具备极致透视能力的网络管理办法，实现对特定场景下无线网络的精细化管理。基于数字孪生技术的无线网络的实时重保应用，首先应对重保区域定义地理化围栏，依据网络孪生体（包括 AAU、CU、DU 等）实例，自动化构建复现重保区域的无线网络情况，运用数字线程技术驱动孪生体实例运行，可模拟网络的运行状态及验证网络的性能，也可同步监测物理网络的运行情况。运用可视化技术将网络节点和链路以点和线的形式构成图形进行呈现，观地反映网络运行状况，基于孪生体与网元实体交互特性，依据场景的演化趋势，网元实体也可以接受孪生体的指令做相应配置调整，同时基于网元实体的运行状态，孪生

体也可提前预测网络的运行趋势，辅助人们对网络进行评估和分析。让用户更好地参与对网络数据和模型的理解和分析，帮助用户探索数据、提高视觉认知。提升网络全息化呈现水平，如各种网元、拓扑信息、网络业务负荷、网络质量、详细告警等的实时状态、演化方向等信息等。



图 5-2 重保场景业务监测

## 5.4.2 智慧园区网络管理

智慧园区作为智慧城市发展的助推器，近些年各市政部门也在大力推动其合理化的建设进程，园区的总体建设目标主要围绕“安全”、“环保”、“安防”、“能源”、“应急”、“办公”等需求最终实现统一的智慧化管理。而通信技术作为“园区智慧化”实现的基础，有效合理的赋能园区内所有末端设备，才能真正实现园区的智慧化管理。传统的智慧园区布网方案复杂，设备入网方式混乱，管理不便。本案例提供了一种基于数字孪生技术的智慧园区网络管理方案。

非工业场景的智慧园区网络组网管理主要考虑门禁、智慧停车、智慧安防、智慧水电、商务办公场所等。基于数字孪生的园区网络设计，首先应对园区做统

一的概框调研，落实园区各业务场景需求，对园区各板块进行模块化分类和统一集成管理，按需配置。智慧园区在网络规划前应知晓园区概框（面积、管理方式、租户类型）、园区特点（人员是否密集、企业是否有恶略网络使用需求等）、痛点问题（如是否有效率要求，无线代替有线减少布线麻烦等问题）、业务指标（关键的 SLA:如带宽、时延、可靠性、人员密度等）、终端要求（用户前端设备、传感器、监控设备）等，内容不限上述所述，应尽可能涵盖所有影响园区网络布局的因素。根据场景要求进行网络合理化配置。

基于数字孪生融合 5G 及行业现场接入技术的智慧园区网络模块化管理方案，运用 5G 融合行业现场网接入技术（RFID\蓝牙\wi-fi\UWB 等）有关技术，将园区内各类网络需求按模块化分类统一集成管理。通过现场级边缘网关统一接入数字孪生平台，运用数字孪生技术复现园区全貌，构建孪生的智慧园区网络，运用大数据、AI 等技术全面分析园区网络需求，生成网络服务方案，并在孪生的智慧园区中进行网络的编排构建，模拟验证业务符合性，同时在智慧园区网络运行过程，实时运行数据映射至孪生网络，基于各业务场景需求，在现有的资源中，孪生网络可以基于各业务 SLA 要求，实时调配网络资源，按需保障各业务的优先级，有效保障各业务的 SLA 要求等。数字孪生技术与 5G 及行业现场接入技术融合，以 UPF 下沉为特点的 5G 专网将在现场网中大量应用，部署在用户侧的 UPF 将数据分流至边缘计算平台进行处理，使得智慧园区中的用户侧数据不出场，最大限度的保证了数据安全。同时基于模块化的管理，在园区网络发生拓扑结构变化时，基于数字孪生技术也可以优先验证新的业务会给原有业务带来哪些影响，并基于影响因素输出网络调整或参数配置调整方案。最终实现对不同的工作场景所需的网络模块精细化管理，完成低成本试错，提高园区网络交付效率。

## 5.5 典型案例

### 5.5.1 数字孪生助力场馆重点区域网络保障

**应用背景：**赛事要求确保期间关键场所有线、无线网络的通信畅通、安全，保证网络高质量运行，保障与会及相关人员网络畅通以及高速的 5G 网络体验，保障场馆物联网设备通畅与高速的 5G 网络体验。需解决重点保障场馆多、人流密度大，比赛周期长、网络性能要求高、5G 信号覆盖稳定性、应急保障要求反应快、电信设备设施多等难点。

**方案流程：**一是**规划**。通过提前获取赛事的场馆位置信息，实现在地图上添加地理围栏。对每个场馆周边一二级道路信息进行提取，组成重点保障的道路网。围绕重点保障对象，可对网络提前建设规划。二是**分析**。获取重点保障基站、机房、等重要电信设施。对网络覆盖情况，容量情况，是否可达，做出提前预判分析。对重要传输网络进行主备分析。三是**预测**。结合网络数字孪生产品，通过在数字城市模拟推衍，在物理城市执行，可对自然灾害、断站、退服等突发事件对重点场景网络影响程度进行预演分析。四是**决策**。根据在数字孪生城市的模拟推衍，通过物孪生指令控制与事件脚本编排生成可视化的应急方案。为决策提供有效的优化依据。当突发事件发生时，自适应套取应急方案。五是**监控**。对比赛场馆、重点人群的网络性能指标进行监控。通过 MR 落在栅格中的电频值实时监控信号强弱情况，可及时预防突发事件。对天气、水文的监控可及时预测收影响的机房、基站以及传输网。六是**指挥**。通过大屏指挥系统，在数字孪生城市中选择应急方案，并在物理城市中执行，结合视频直播、位置定位等方法实时查看执行过程。统一指挥各个职能部门有条不紊的面对各种突发事件。

**方案应用：**一是**重点人群监控**。获取卫健委上报病患数据，再结合大数据中

心提供位置信息与 GIS 空间计算及道路拟合算法进行纠偏，展现用户的轨迹信息。最后通过缓冲分析获取同行者人员，进行人员监控。



图 5-3 重点人群轨迹监控

二是电信设备设施规划监测。根据场馆地址坐标信息，在地图圈定地址围栏，根据人群与高速流量使用情况调整 5G 网络工作参数。

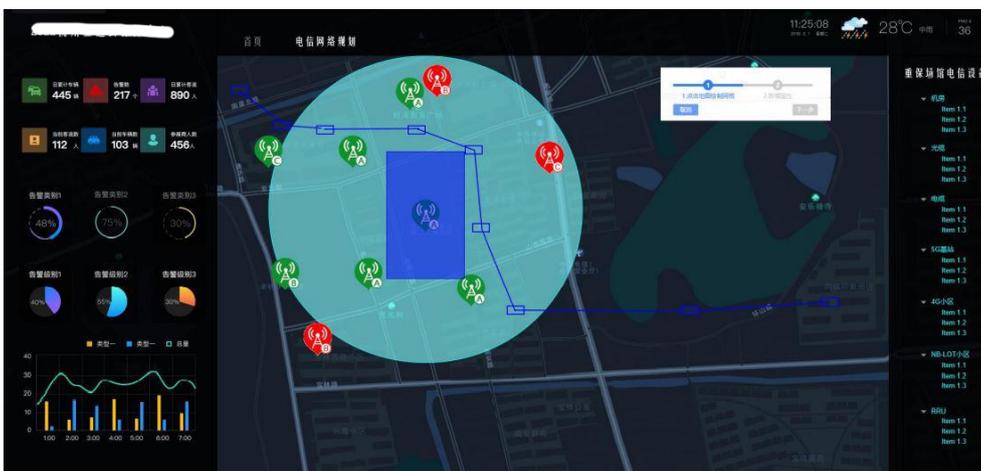


图 5-4 电信设备设施规划监测

三是赛事直播信号保障。需保障场馆 8K 赛事直播信号无中断无卡顿，需要及时调整光网络的负载情况。场馆末端设备(终端设备)的光网络必须有主备光缆，当故障出现时能及时切换，保障通信网络的流畅。

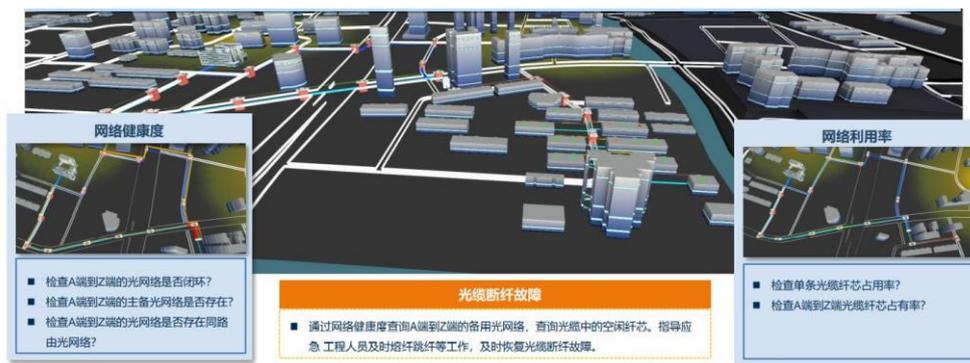


图 5-5 赛事直播信号保障

### 5.5.2 数字孪生助力运营商光网络高效管理

**应用背景：**随着千行百业数字化转型进程的推进，对运营商网络能力和管理水平提出了极高的要求。运营商要求实现光网络拓扑可视管理，支撑光网络运行维护和投资规划。

**主要目标：**一是物理网络孪生化。聚资管机房、光接入设施等资源数据，实现网络资源数据的孪生体定义与设计，以该市区选定区域范围，实现对网络资源覆盖可视还原。二是业务知识数据化。汇聚资管业务运行数据，实现对光网络业务运行状态的还原。以光网络告警场景为例，实现对告警规则的配置定义，实现业务场景动态配置。三是孪生网络应用场景模拟。聚焦网络精准投资规划主题，建立小区户数测算、端口扩容预测和稽核模型，完成对网络投资规划场景的还原。



图 5-6 光网络业务数字孪生流程

方案应用：一是光网络故障分析。可视化呈现该位置区域内光网络现状，监测光网络资源利用率、告警现状、告警数据、告警级别。基于告警详情，快速判断告警引发因素，基于地理信息快速到达故障所在位置。

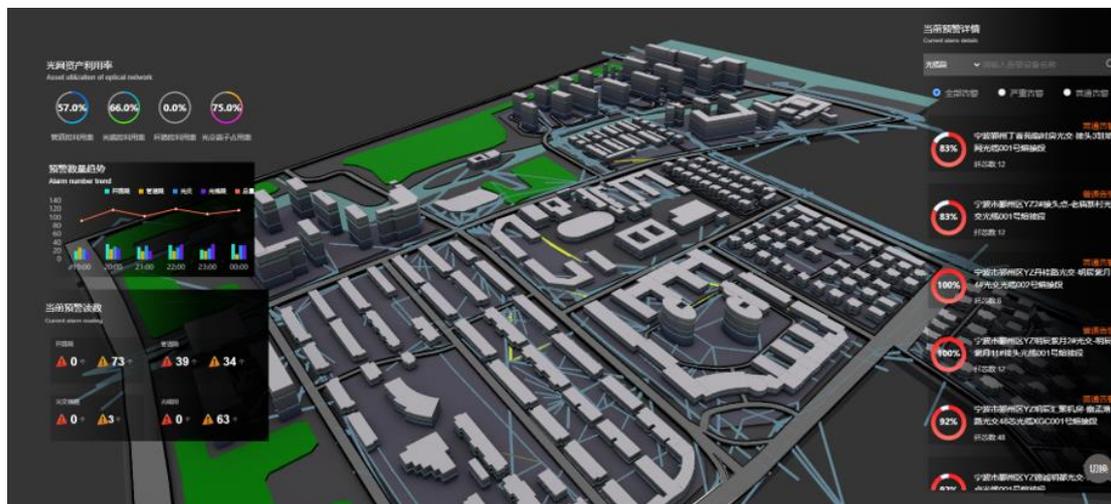


图 5-7 光网络告警分析场景

二是网络利用率分析。可视化动态呈现业务现状，监测业务变化，分析业务趋势，分析资源的整体利用率。预测业务演进趋势。



图 5-8 网络利用率分析

## 6 总结与展望

作为发展数字经济的重要使能技术，数字孪生近年来备受业界关注，技术体系不断发展，核心技术快速演进，产业生态持续完备，行业应用走深向实，成为促进工业、城市、交通、网络等垂直行业实现数智化转型的重要抓手。但同时我们也注意到，数字孪生作为一项新兴技术理念，尚处于发展初期，仍存在许多短板问题亟待破解。一是**实施成本高企**。数字孪生技术的实现涉及到企业研发、生产、供应链、管理等系统的改造，投资大、沉没成本高。受限于此，目前数字孪生往往仅能成为大企业“锦上添花”的高端技术应用，而难以成为广大中小企业“雪中送炭”的普适技术应用。二是**产业基础薄弱**。数字孪生产业链长、分工细致、碎片化程度高，跨领域之间的技术融合性较差、资源整合难，存在 IT 企业不懂行业机理、OT 企业难以报团的突出痛点，亟需产业整合者的出现。三是**商业模式不成熟**。不同垂直行业对数字孪生的需求差异大，垂直行业内需求“长尾效应”显著，解决方案的可复制性不强，导致数字孪生应用多以项目交付型为主，平台化、模块化程度较低，不利于高效推广。四是**技术短板凸显**。在机理建模、仿真分析、数据集成等方面的技术短板制约了数字孪生技术整体的应用深度，同时部分核心技术被国外龙头企业垄断，“安可”有潜在风险。

整体上来看，为进一步促进数字孪生技术融合发展，形成产业合力，推广技术应用，打造赋能千行百业的通用技术底座，业界需要从顶层设计、技术攻关、生态构建和标准化四个层面重点突破。一是**顶层设计层面**，在相关部委指导下联合产业多方智库力量尽快研究明确数字孪生中长期发展规划，为技术产业发展指明方向和路径。同时建立完备的数字孪生评价体系，从建模精度、数据互通性、同步演进性、智能化程度、系统间数据的共享程度等多种维度构建评价指标，牵

引数字孪生向高阶演进。二是**技术攻关层面**，聚焦数字孪生基础理论及关键核心技术，鼓励产学研联合研发，在信息建模、机理建模、模型同步、模型融合、智能决策、智能感知和信息安全等方面突破一批技术瓶颈，形成基础扎实、稳定成熟的技术体系。三是**生态构建层面**，数字孪生产业链长，技术体系复杂，垂直行业壁垒高筑，需要产业各方协同创新、优势互补、形成合力，特别是在基础设施共建、跨领域技术融合、数据共享互认、能力开放互用等方面形成长效协同机制，依托产业联盟、创新中心等方式加深产业链的交流合作与需求对接，构建优势互补、协同共赢的产业生态。四是**标准化层面**，在技术发展初期，尽快完善术语、通用架构等基础共性标准，形成统一的话语体系和规范性指导框架。在此基础上，进一步对信息模型、数据集成、平台等数字孪生核心要素和垂直行业应用模式进行规范统一，力求快速形成覆盖数字孪生基础共性、关键技术和行业应用的标准体系。

## 7 缩略语

英文简称	英文全称	中文全称
DT	Digital Twin	数字孪生
DTN	Digital Twin Network	数字孪生网络
5G	5th Generation Mobile Communication Technology	第五代移动通信标准
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国国家航空航天局
AAS	Asset Administrator Shell	资产管理壳
AII	Alliance of industrial internet	工业互联网产业联盟
IIC	Industrial IoT Consortium	美国工业物联网联盟
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气与电子工程师协会
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
OID	ObjectIdentifier	对象标识符
CAD	Computer Aided Design	计算机辅助设计
ICT	Information and Communications Technology	信息与通信技术
AI	Artificial Intelligence	人工智能
IOT	Internet of things	物联网
SDK	Software Development Kit	软件开发工具包
API	Application Programming Interface	应用程序接口
RFID	Radio Frequency IDentification	射频识别技术
QOS	Quality of Service	服务质量
SLA	Service-Level Agreement	服务等级协议
UWB	Ultra Wide Band	超宽带
SNMP	Simple Network Management Protocol	简单网络管理协议

## 8 编写单位及作者

### 中国移动通信有限公司研究院：

范晓晖、王迪、孙琳、罗达、龙容、李小涛、李宜铮、马帅、肖善鹏

### 中移物联网有限公司：

吴伟胜、杨磊、林锋

### 深圳华龙讯达信息技术股份有限公司：

龙小昂、陈曦、张亚杰、曾超劲

### 亚信科技控股有限公司：

王达、郭建超、邓玥

### 北京五一视界数字孪生科技股份有限公司(51WORLD)：

张焜棋、姚新新、付挪舟、王洁、王欣媛