

数字孪生应用白皮书

— 2020 版 —

主编单位：中国电子技术标准化研究院 树根互联技术有限公司

2020 年 11 月

编委会

主 编：赵 波

副主编：程多福 贺东东

编写组

中国电子技术标准化研究院

郭 楠 韦 莎 马原野 贾仕齐 李瑞琪 周 航 李 佳
张 晖 焦国涛 程雨航 胡 琳 王成然 夏娣娜 许 威
纪婷钰 廖胜蓝 何宏宏 张 欣 胡成林 左 鹏 崔文雅

树根互联技术有限公司

刘 洁 沈 鹏 周 咏 彭 雪 郑志喜 陈立峰 段文娟

特斯联科技集团有限公司

安 韧 孙 鹏 徐 超 关普璟 侯博月

中机生产力促进中心

肖承翔 李根梓 尚耀明

当家移动绿色互联网技术集团有限公司（51WORLD）

刘晓伦 张 帆 张焜棋

中汽研汽车工业工程（天津）有限公司

包伟伟 石华军 刘 莹 门 峰 苏青福

中船第九设计研究院工程有限公司

汪彦钧 熊冠楚 王 真

中国汽车技术研究中心有限公司

高 岳 刘静榕 闫相文 陈日强 董方岐

北京航空航天大学

陶 飞 张 萌 马 昕

东华大学

鲍劲松 黄德林 李 婕

上海优也信息科技有限公司

林诗万 柴 正 李志芳 刘祯祺 金 周

泰瑞数创科技（北京）有限公司

刘俊伟 唐莉萍 王金兰 黄 栋 黄慧敏

阿里巴巴（中国）有限公司

张 磊 伍 剑 胡 宁

中国汽车工程研究院股份有限公司

王红钢 李剑平 王 锐 朱红国

腾讯云计算（北京）有限责任公司

李永韬 王永霞 李 晋 刘莫闲

软通智慧科技有限公司

尹洪涛 柏 翔 雒冬梅

国家管网集团北方管道有限责任公司管道科技研究中心

李 博 薛向东 盖健楠

北京和利时智能技术有限公司

朱毅明

西门子（中国）有限公司

朱国良 张 琚

安世亚太科技股份有限公司

段海波

深圳华龙讯达信息技术股份有限公司

龙小昂 陈曦 张亚杰 赵东 聂道龙

中机研标准技术研究院（北京）有限公司

潘康华

中国电子技术标准化研究院

目录

前言.....	1
一、数字孪生概述.....	1
(一) 数字孪生发展背景.....	1
(二) 数字孪生的定义及典型特征.....	3
(三) 数字孪生与其他技术的区别.....	5
二、数字孪生相关概念及内涵.....	8
(一) 相关术语.....	8
(二) 相关概念.....	13
三、数字孪生应用发展综述.....	16
(一) 应用需求方向.....	16
(二) 数字孪生产业图谱.....	26
(三) 应用发展现状.....	37
(四) 数字孪生技术体系.....	73
(五) 推动条件.....	92
四、数字孪生标准化当前工作、现状及需求.....	99
(一) 标准化工作概述.....	99
(二) 智能制造领域数字孪生标准化现状及需求.....	105

(三) 智慧城市领域数字孪生标准化现状及需求.....	110
(四) 智慧交通领域数字孪生标准化现状及需求.....	112
(五) 智慧健康领域数字孪生标准化现状及需求.....	113
五、存在的挑战.....	115
(一) 数据相关的挑战.....	115
(二) 基础知识库相关的挑战.....	117
(三) 安全相关的挑战.....	119
(四) 商业模式相关的挑战.....	120
(五) 人才相关的挑战.....	122
(六) 多系统融合的挑战.....	123
(七) 互联互通互操作的挑战.....	124
六、典型应用案例.....	126
(一) 智能制造领域.....	126
(二) 智慧城市领域.....	208
(三) 智慧交通领域.....	241
(四) 智慧能源领域.....	266
(五) 智慧建筑领域.....	278
(六) 智慧健康领域.....	292
七、结论与展望.....	300
(一) 趋势的展望.....	300
(二) 支持与监管政策相关建议.....	301
(三) 技术开发与应用相关建议.....	303

前言

数字化转型是我国经济社会未来发展的必由之路。习近平总书记指出，世界经济数字化转型是大势所趋。当前，世界正处于百年未有之大变局，数字经济已成为全球经济发展的热点，美、英、欧盟等纷纷提出数字经济战略。数字孪生等新技术与国民经济各产业融合不断深化，有力推动着各产业数字化、网络化、智能化发展进程，成为我国经济社会发展变革的强大动力。未来，所有的企业都将成为数字化的公司，这不只是要求企业开发出具备数字化特征的产品，更指的是通过数字化手段改变整个产品的设计、开发、制造和服务过程，并通过数字化的手段连接企业的内部和外部环境。

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关键抓手，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较为深入的应用。在当前我国各产业领域强调技术自主和数字安全的发展阶段，数字孪生技术本身具有的高效决策、深度分析等特点，将有力推动数字产业化和产业数字化进程，加快实现数字经济的国家战略。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。白皮书涵盖了6个领域共计31个数字孪生应用案例。

本白皮书通过梳理数字孪生技术和产业应用发展情况，分析数字孪

生技术热点、行业动态和未来趋势，提出相关的标准化工作需求，希望可以作为数字孪生技术领域、产业发展和标准化之间的初始连接纽带，加快推动数字孪生发展应用。

一、数字孪生概述

(一) 数字孪生发展背景

“孪生”的概念起源于美国国家航空航天局的“阿波罗计划”，即构建两个相同的航天飞行器，其中一个发射到太空执行任务，另一个留在地球上用于反映太空中航天器在任务期间的工作状态，从而辅助工程师分析处理太空中出现的紧急事件。当然，这里的两个航天器都是真实存在的物理实体。

2003 年前后，关于数字孪生（Digital Twin）的设想首次出现于 Grieves 教授在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上。但是，当时“Digital Twin”一词还没有被正式提出，Grieves 将这一设想称为“Conceptual Ideal for PLM(Product Lifecycle Management)”，如图 1 所示。尽管如此，在该设想中数字孪生的基本思想已经有所体现，即在虚拟空间构建的数字模型与物理实体交互映射，忠实地描述物理实体全生命周期的运行轨迹。

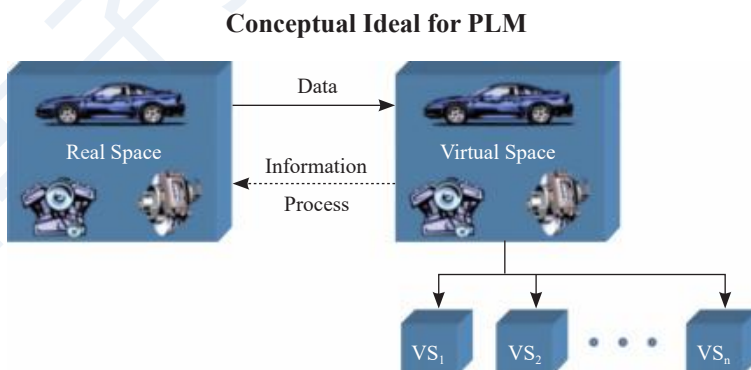


图 1 PLM 中的概念设想

直到2010年，“Digital Twin”一词在NASA的技术报告中被正式提出，并被定义为“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，美国空军探索了数字孪生在飞行器健康管理中的应用，并详细探讨了实施数字孪生的技术挑战。2012年，美国国家航空航天局与美国空军联合发表了关于数字孪生的论文，指出数字孪生是驱动未来飞行器发展的关键技术之一。在接下来的几年中，越来越多的研究将数字孪生应用于航空航天领域，包括机身设计与维修，飞行器能力评估，飞行器故障预测等。

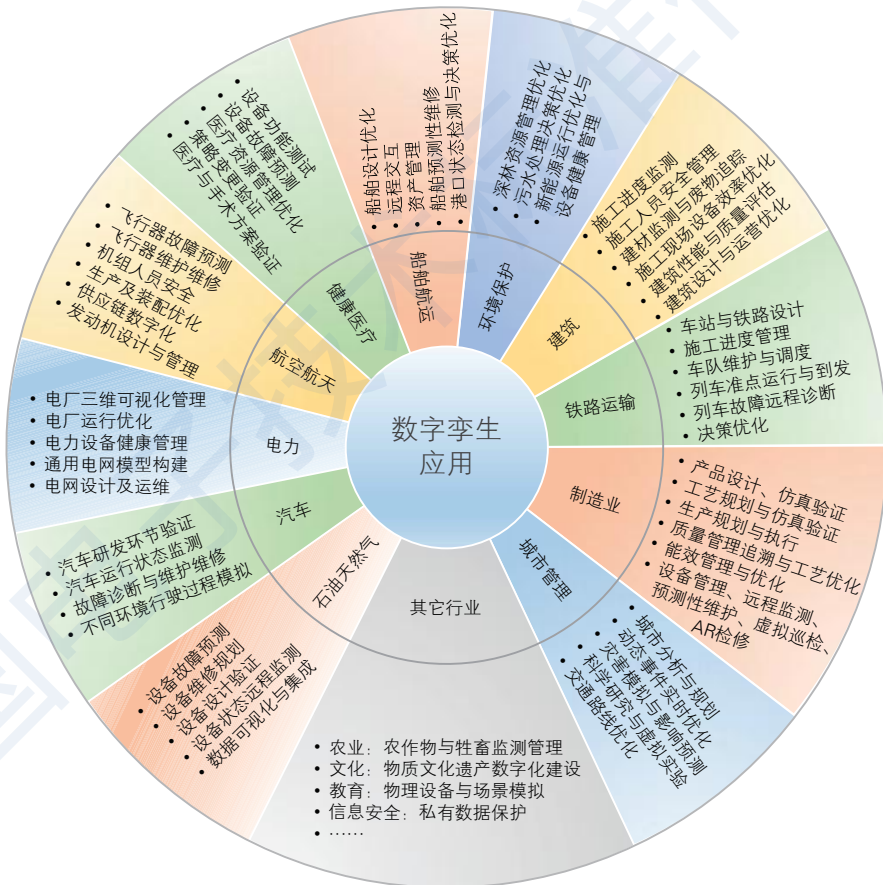


图2 数字孪生行业应用

近年来，数字孪生得到越来越广泛的传播。同时，得益于物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的发展，数字孪生的实施已逐渐成为可能。现阶段，除了航空航天领域，数字孪生还被应用于电力、船舶、城市管理、农业、建筑、制造、石油天然气、健康医疗、环境保护等行业，如图 2 所示。特别是在智能制造领域，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。许多著名企业（如空客、洛克希德马丁、西门子等）与组织（如 Gartner、德勤、中国科协智能制造协会）对数字孪生给予了高度重视，并且开始探索基于数字孪生的智能生产新模式。

（二）数字孪生的定义及典型特征

1. 数字孪生的定义汇总摘选

（1）标准化组织中的定义

数字孪生是具有数据连接的特定物理实体或过程的数字化表达，该数据连接可以保证物理状态和虚拟状态之间的同速率收敛，并提供物理实体或流程过程的整个生命周期的集成视图，有助于优化整体性能。

（2）学术界的定义

数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟实体，借助历史数据、实时数据以及算法模型等，模拟、验证、预测、控制物理实体全生命周期过程的技术手段^①。

从根本上讲，数字孪生可以定义为有助于优化业务绩效的物理对象或过程的历史和当前行为的不断发展的数字资料。数字孪生模型基于跨

^① 陶飞，刘蔚然等，数字孪生及其应用探索

一系列维度的大规模，累积，实时，真实世界的的数据测量^①。

(3) 企业的定义

数字孪生是资产和流程的软件表示，用于理解、预测和优化绩效以实现改善的业务成果。数字孪生由三部分组成：数据模型，一组分析或算法，以及知识^②。

数字孪生公司早已在行业中立足，它在整个价值链中革新了流程。作为产品，生产过程或性能的虚拟表示，它使各个过程阶段得以无缝链接。这可以持续提高效率，最大程度地降低故障率，缩短开发周期，并开辟新的商机：换句话说，它可以创造持久的竞争优势^③。

2. 数字孪生的典型特征

从数字孪生的定义可以看出，数字孪生具有以下几个典型特点：

(1) 互操作性

数字孪生中的物理对象和数字空间能够双向映射、动态交互和实时连接，因此数字孪生具备以多样的数字模型映射物理实体的能力，具有能够在不同数字模型之间转换、合并和建立“表达”的等同性。

(2) 可扩展性

数字孪生技术具备集成、添加和替换数字模型的能力，能够针对多尺度、多物理、多层级的模型内容进行扩展。

(3) 实时性

数字孪生技术要求数字化，即以一种计算机可识别和处理的方式管理数据以对随时间轴变化的物理实体进行表征。表征的对象包括外观、状

① Aaron Parrott and Lane Warshow, 工业 4.0 和数字孪生

② 通用电气, 什么是数字孪生?

③ 西门子, 工业中的数字化转型

态、属性、内在机理，形成物理实体实时状态的数字虚体映射。

(4) 保真性

数字孪生的保真性指描述数字虚体模型和物理实体的接近性。要求虚体和实体不仅要保持几何结构的高度仿真，在状态、相态和时态上也要仿真。值得一提的是在不同的数字孪生场景下，同一数字虚体的仿真程度可能不同。例如工况场景中可能只要求描述虚体的物理性质，并不需要关注化学结构细节。

(5) 闭环性

数字孪生中的数字虚体，用于描述物理实体的可视化模型和内在机理，以便于对物理实体的状态数据进行监视、分析推理、优化工艺参数和运行参数，实现决策功能，即赋予数字虚体和物理实体一个大脑。因此数字孪生具有闭环性。

(三) 数字孪生与其他技术的区别

1. 数字孪生与仿真(Simulation)的区别

仿真技术是应用仿真硬件和仿真软件通过仿真实验，借助某些数值计算和问题求解，反映系统行为或过程的模型技术，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方法，目的是依靠正确的模型和完整的信息、环境数据，反映物理世界的特性和参数。仿真技术仅仅能以离线的方式模拟物理世界，不具备分析优化功能，因此不具备数字孪生的实时性、闭环性等特征。

数字孪生需要依靠包括仿真、实测、数据分析在内的手段对物理实体状态进行感知、诊断和预测，进而优化物理实体，同时进化自身的数字模型。仿真技术作为创建和运行数字孪生的核心技术，是数字孪生实现数据交互与融合的基础。在此基础之上，数字孪生必需依托并集成其

他新技术，与传感器共同在线以保证其保真性、实时性与闭环性。

2. 数字孪生与信息物理系统(CPS)的区别

数字孪生与 CPS 都是利用数字化手段构建系统为现实服务。其中，CPS 属于系统实现，而数字孪生侧重于模型的构建等技术实现。CPS 是通过集成先进的感知、计算、通信和控制等信息技术和自动控制技术，构建了物理空间与虚拟空间中人、机、物、环境和信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统，实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代和动态优化^①。

相比于综合了计算、网络、物理环境的多维复杂系统 CPS，数字孪生的构建作为建设 CPS 系统的使能技术基础，是 CPS 具体的物化体现。数字孪生的应用既有产品、也有产线、工厂和车间，直接对应 CPS 所面对的产品、装备和系统等对象。数字孪生在创立之初就明确了以数据、模型为主要元素构建的基于模型的系统工程，更适合采用人工智能或大数据等新的计算能力进行数据处理任务。

3. 数字孪生与数字主线(Digital Thread)的区别

数字主线被认为是产品模型在各阶段演化利用的沟通渠道，是依托于产品全生命周期的业务系统，涵盖产品构思、设计、供应链、制造、售后服务等各个环节。在整个产品的生命周期中，通过提供访问、整合以及将不同 / 分散数据转换为可操作性信息的能力来通知决策制定者。数字主线也是一个允许可连接数据流的通信框架，并提供一个包含生命周期各阶段功能的集成视图。数字主线有能力为产品数字孪生提供访问、整合和转换能力，其目标是贯通产品生命周期和价值链，实现全面追溯、信息交互和价值链协同。由此可见，产品的数字孪生是对象、模型和数据，

① 中国电子技术标准化研究院，信息物理系统建设指南（2020）

而数字主线是方法、通道、链接和接口。

简单地说，在数字孪生的广义模型之中，存在着彼此具有关联的小模型。数字主线可以明确这些小模型之间的关联关系并提供支持。因此，从全生命周期这个广义的角度来说，数字主线是属于面向全生命周期的数字孪生的。

4. 数字孪生和资产管理壳(Asset administration Shell)的区别

出自工业 4.0 的资产管理壳，是德国自工业 4.0 组件开始，发展起来的一套描述语言和建模工具，从而使得设备、部件等企业的每一项资产之间可以完成互联互通与互操作。借助其建模语言、工具和通讯协议，企业在组成生产线的时候，可具备通用的接口，即实现“即插即用”性，大幅度降低工程组态的时间，更好地实现系统之间的互操作性。

自数字孪生和资产管理壳的问世以来，更多的观点是视二者为美国和德国的工业文化不同的体现。实际上，相较于资产管理壳这样一个起到管控和支撑作用的“管家”，数字孪生如同一个“执行者”，从设计、模型和数据入手，感知并优化物理实体，同时推动传感器、设计软件、物联网、新技术的更新迭代。但是，基于这两者在技术实现层次上比较相近，德国目前也正努力把资产管理壳转变为支撑数字孪生的基础技术。

二、数字孪生相关概念及内涵

(一) 相关术语

1. 数字孪生相关

(1) 数字孪生 (digital twin)

数字孪生是具有数据连接的特定物理实体或过程的数字化表达，该数据连接可以保证物理状态和虚拟状态之间的同速率收敛，并提供物理实体或流程过程的整个生命周期的集成视图，有助于优化整体性能。

(2) 数字孪生体 (digital twins)

“体”在中文中的涵义包括事物本身（物体、实体）或事物的格局或规矩（体制、体系）。加上“体”字后，数字孪生体就是一个名词。因此，数字孪生体中的“体”不仅指与物理实体或过程相对的数字化模型的实例，也指数字孪生背后的技术体系或学科，还指数字孪生在系统级和体系级场景下的应用。

(3) 实体对象 (entity)

存在、曾经存在或可能存在的一切具体或抽象的东西，包括这些事物之间的关联。示例：人员，对象，事件，想法，过程等^①。

(4) 物理实体 (physical entity)

物理环境现实物理世界中离散的、可识别和可观察的事物，示例：城市、工厂、农场、建筑物、电网中的电流、制造工艺等^②。

① ISO/IEC 2382-36: 2019, Information technology – Vocabulary

② ISO/IEC 23093-1, Information technology – Internet of media things

(5) 虚拟实体 (virtual entity)

与物理实体对应的表示信息或数据的事物。

(6) 物理域 (物理空间) (physical domain/space)

由物理实体组成的实体集合，包含人员、设备、材料等^①。

(7) 虚拟域 (虚拟 / 数字空间) (analog/digital space)

由虚拟实体组成的实体集合，包含模型、算法、数据等。

(8) 数字化表达 (analytic expression)

物理实体的信息集合，用以支持与它相关的某些决策。

(9) 数字化建模 (analytic model)

将信息数据分配给物理世界中待完成计算机识别的对象的过程。

2. 系统相关

(1) 物联网 (IoT)

互连的实体、人员、系统和信息资源的基础架构，以及对物理和虚拟世界中的信息进行处理和响应的服务^②。

(2) 基于模型的设计 (MBD)

通过算法建模进行软件设计的过程。

(3) 基于模型的企业 (MBE)

基于三维产品定义的完全集成和协作环境，实现在整个企业中详细共享；实现工程数据的快速、无缝且经济实惠的工程数据的消耗。采用建模与仿真技术对其设计、制造、产品支持的全部技术的和业务的流程进行彻底的改进、无缝的集成以及战略的管理；利用产品和过程模型来定义、执行、控制和管理企业的全部过程；并采用科学的模拟与分析工具，

① ISO / IEC 30141 Reference architecture

② ISO/IEC 20924: 2018, Information technology – Internet of things – Vocabulary

在产品生命周期的每一步做出最佳决策，从根本上减少产品创新、开发、制造和支持的时间和成本。

3. 系统数据相关

(1) 资产数据 (asset data)

事实、概念或指示的规范化表达，以支持人员或设备进行交流、解释或处理^①。

(2) 运营数据 (operation data)

在生产或运营中产生的数据。

(3) 背景数据 (background data)

运营或其他目的所需的数据，包括历史数据、相关数据等。

(4) 元数据 (metadata)

有关逻辑包，逻辑组织，内容和文件的描述性信息^②。

注 1：可以将元数据分配给逻辑包内的任何核心结构，包括清单。

注 2：允许对元数据对象进行任何绑定。元数据的每个对象可以是本地或远程的。

(5) 运营历史 (operation history)

有关实体的过去表现或学习经历的记录信息。

(6) 维修历史 (maintenance history)

将项目保留或恢复到能够满足相关规范要求并执行其所需功能条件的所有操作的记录信息^③。

① IEC 61804-1: Function blocks (FB) for process control – Part 1: Overview of system aspects v1.0

② ISO/IEC 2382-36: 2019, Information technology – Vocabulary

③ IEC 60079-17, Explosive atmospheres – Part 17: Electrical installations inspection and maintenance, v5.0

4. 模型相关

(1) 统计模型 (statistical model)

基于概率理论的模型，通过数学统计方法建立。

(2) 工程模型 (engineering model)

几何、材料、部件和行为、构建和操作数据。

(3) 元模型 (metamodel)

是关于模型的模型。这是特定领域的模型，定义概念并提供用于创建该领域中的模型的构建元素。

5. 性能相关

(1) 一致性 (consistency)

物理实体与其对应的虚拟实体相匹配。

(2) 一致性评价 (consistency evaluation)

用于评估物理实体与其对应的虚拟实体相匹配程度的过程。

(3) 可靠性 (reliability)

在给定的条件下，给定的时间间隔内，完成规定功能的能力。

(4) 验证 (verification)

通过检验（测试）证明规定的要求已经得到满足^①。

(5) 确认 (confirmation)

评估系统或组件以确保符合功能、性能和接口要求的过程。

(6) 鲁棒性 (robustness)

在存在无效输入或压力的环境条件下，系统或组件能够正常工作的程度^②。

① ISO/IEC 14776-121, Information technology – Small computer system interface, v1.0 (2010-10)

② ISO/IEC/IEEE 24765:2010, Systems and software engineering – Vocabulary

(7) 保真度 (fidelity)

虚拟实体准确地描述其对应物理实体细节的程度。

(8) 可追溯性 (traceability)

一种测量结果或标准值的性质，它可以通过一系列不间断的比较，与规定的参考文献相联系，所有这些比较都有规定的不确定度。

(9) 同步性 (synchronism)

用数字孪生表示的虚拟实体的状态与可观察到的物理实体状态的同步程度，或反之。

(10) 可重构性 (reconfigurability)

物理实体及其虚拟实体可分解和重新组合的能力。

6. 功能相关

(1) 分析 (analysis)

通过模型、数据、算法对物理实体进行描述、评估及预测的行为。

(2) 互操作性 (interoperability)

两个或多个数字孪生体在实现互联互通的基础上能够进行信息交换、信息同步、业务协同等的能力。

7. 应用相关

(1) 可视化 (visualization)

使用计算机图形和图像处理来呈现过程或对象的模型或特征，以支持人类的理解。

(2) 优化 (optimization)

设计和操作一个系统或过程，使其在某种意义上尽可能地实现更好。

(3) 预测(prediction)

用来获得一个量的预测值的计算过程^①。

注 1：“预测”一词也可用来表示一个量的预测值。

(4) 仿真(simulation)

基于实验或训练为目的，将原本的系统、事务或流程，建立一个模型以表征其关键特性或者行为 / 功能的方法。

(5) 监控(monitor)

一种向人员和控制程序提供自动性能监督和过程状态报警的方法^②。

(6) 增强现实(augmented reality)

真实环境的交互体验，其中驻留在真实环境中的对象通过计算机生成的感知信息进行增强。

(7) 虚拟现实(virtual reality)

一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统，它利用计算机生成一种模拟环境，使用户沉浸到该环境中。

(二) 相关概念

1. 数字孪生生态系统

数字孪生生态系统由基础支撑层、数据互动层、模型构建与仿真分析层、共性应用层和行业应用层组成。其中基础支撑层由具体的设备组成，包括工业设备、城市建筑设备、交通工具、医疗设备组成。数据互动层包括数据采集、数据传输和数据处理等内容。模型构建与仿真分析层包括

① IEC 62059-31-1, Electricity metering equipment – Dependability – Accelerated reliability testing – Elevated temperature and humidity

② IEC 62270, Guide for computer – based control for hydroelectric power plant automation (2013-09)

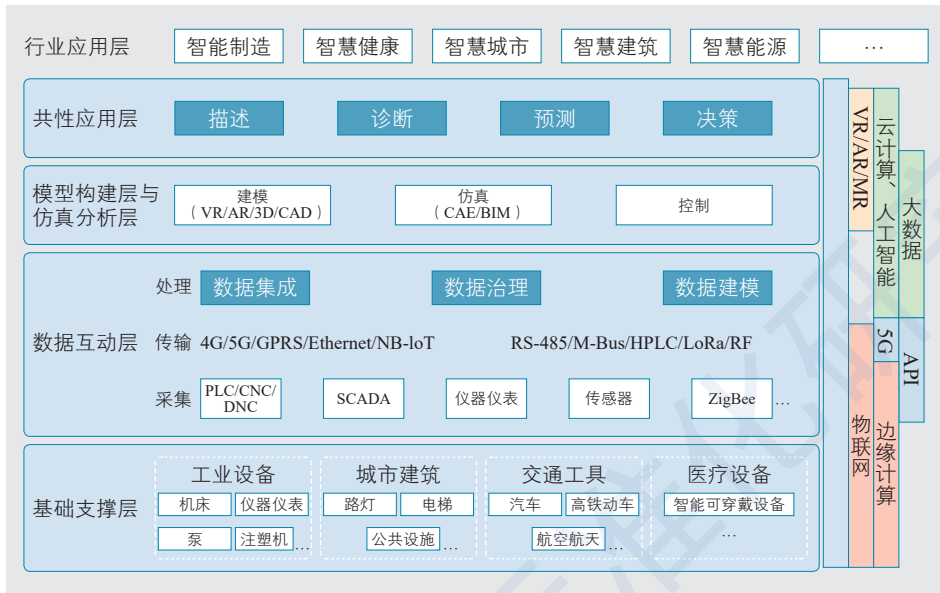


图3 数字孪生生态系统

数据建模、数据仿真和控制。共性应用层包括描述、诊断、预测、决策四个方面。行业应用层则包括智能制造、智慧城市在内的多方面应用。

2. 数字孪生生命周期过程

数字孪生中虚拟实体的生命周期包括起始、设计和开发、验证与确认、部署、操作与监控、重新评估和退役，物理实体的生命周期包括验证与确认、部署、操作与监控、重新评估和回收利用。值得指出的是，一是虚拟实体在全生命周期过程中与物理实体的相互作用是持续的，在虚拟实体与物理实体共存的阶段，两者应保持相互关联并相互作用。二是虚拟实体区别于物理实体的生命周期过程中，存在迭代的过程。虚拟实体在验证与确认、部署、操作与监控、重新评估等环节发生的变化，可以迭代反馈至设计和开发环节。

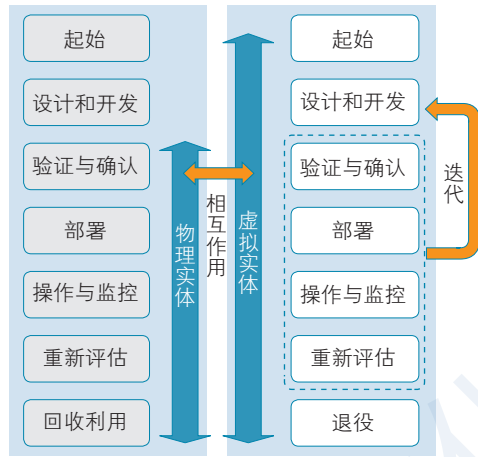


图 4 数字孪生生命周期过程

3. 数字孪生功能视角

从数字孪生功能视角，可以看到数字孪生应用需要在基础设施的支撑下实现。物理世界中产品、服务或过程数据也会同步至虚拟世界中，虚拟世界中的模型和数据会和过程应用进行交互。向过程应用输入激励和信息，可以得到包括优化、预测、仿真、监控、分析等功能的输出。

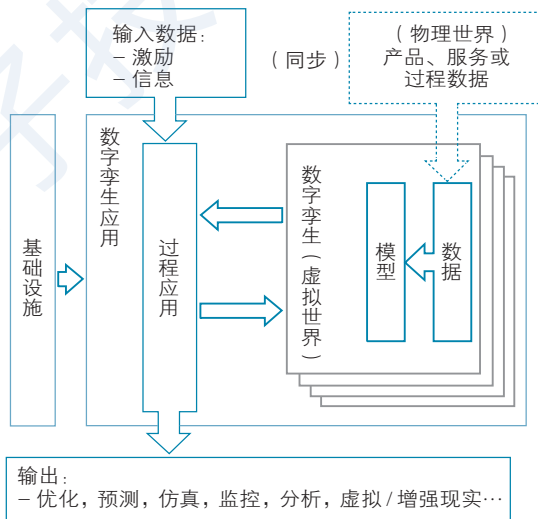


图 5 数字孪生功能视角

三、数字孪生应用发展综述

(一) 应用需求方向

1. 促进数字经济与实体经济融合,加快产业升级

习近平总书记强调指出,在创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念指引下,中国高度重视发展数字经济。当前,以新一代信息技术为代表的新兴技术突飞猛进,加速推动着经济社会各领域的发展变革。在推动形成以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局背景下,数字经济在推动经济发展、提高劳动生产率、培育新市场和产业新增长点、实现包容性增长和可持续增长等诸多方面,都发挥着重要作用。

党的十九大报告指出,我国经济已经由高速增长阶段转向高质量发展阶段。我们正处在转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期,这为数字经济与实体经济融合发展带来了重大机遇。而数字孪生作为一项关键技术和提高效能的重要工具,可以有效发挥其在模型设计、数据采集、分析预测、模拟仿真等方面的作用,助力推进数字产业化、产业数字化,促进数字经济与实体经济融合发展。

产业发展中的转型升级,不仅是技术问题,也不仅是管理问题;不只是商业交换问题,也不仅是商业模式问题,而是一种新的价值模式的问题,是要重新定义一个价值体系和产业结构。数字孪生系统和智能供应链不是从技术层面,更多的是从为企业创造价值,为企业转型,为企业找到新的价值模式层面,发挥现实作用。

2. 贯通工业生产信息孤岛,释放数据价值

当前工业生产已经发展到高度自动化与信息化阶段,在生产过程中

产生大量信息。但由于信息的多源异构、异地分散特征易形成信息孤岛，在工业生产中没有发挥出应有价值。而数字孪生为工业产生的物理对象创建了虚拟空间，并将物理设备的各种属性映射到虚拟空间中。工业人员通过在虚拟空间中模拟、分析、生产预测，能够仿真复杂的制造工艺，实现产品设计，制造和智能服务等闭环优化。数字孪生是未来数字化企业发展的关键技术，例如可应用于以下的常见工业领域：

工业产品设计

工业产品设计过程中，在没有数字化帮助下，设计产品要经历很多多次迭代，非常耗费资源并影响交付工期。在高度集成化的工业生产线设计中，需要基于精准的节拍对各设备、物料、质检、人工装配等环节进行优化协调，以提升整体效率。在传统规划过程只能依靠人工模拟或者在真实产线中进行验证。因此工业产品设计，以及工业产线设计过程中，可以在虚拟的三维数字孪生空间中进行部件修改调整，产品尺寸装配等，以及在虚拟产线中进行设计优化、问题诊断内容，从而大幅降低产品验证工作和装配可行性，大幅减少迭代过程中设备的制造工作量、工期及成本。

工业产品生产

在当前高度信息化和集成化的工业生产模式，生产线发生意外故障时，很容易致使全产线停机停产，例如高度精细化的汽车生产线，会造成每天数百万级的损失。对于一些特殊工艺生产线，比如高温高压下的化工生产线，甚至面临严重的安全风险和衍生灾害。因此工业生产过程中需要基于大量数据，在虚拟数字空间中进行例如设备诊断、化学类生产过程的模拟，以及对当前设备状态和生产工艺下结果的仿真预测等，从而防止现场故障、生产异常产生出严重后果。

3. 统筹协调系统内外部变化,实现资源能源优化配置

目前,在数字孪生制造系统已经成为了制造业的研究热点,实现不同产品生产过程的资源能源优化成为当前的迫切需求。数字孪生制造系统与传统制造系统相比,具有生产要素多样、动态生产路径配置、人/机/物自主通讯、自组织和数据支撑的决策等特点。

实现资源能源优化需要制造系统各部件具有自主智能并能通过群体协商寻求全系统稳定配置参数并保持各自部件利益最大化,动态决策系统还需要系统对外部环境变化及内部故障进行实时重分配与平衡。生产系统是根据内部条件和外部环境的变化,对其内部实行新的组合,从而使生产系统自身结构和功能不断创新的演进过程。在面对个性化定制生产中出现的生产要素多样、资源配置复杂问题,研究如何进行生产过程中资源能源的组织行为和组织形态动态变迁的有序化处理,实现生产资源能源的优化配置。

一个开放的系统,在平衡状态条件下可以由无序到有序的方向发展,有序的组织通过一个“自组织”实现从低级到高级的发展,这其中需要能量消耗。也就是说系统通过正反馈与外界交互物质和能量达到有序状态的不断增加,当超越某一临界值时,便达到了更高一级的阶段,这一阶段就是耗散结构。延伸到生产系统当中,如图所示,面对个性化生产,生产系统中的资源在不同订单的输入下是混沌状态或者是无序状态。通过耗散结构理论,输出的状态是不同订单具有不同的设备应用以及设备之间的有序排列。

在数字孪生制造系统资源能源优化中,系统的复杂性程度越大,制造过程的不确定性越大,制造系统的资源能源优化困难程度增大。数字孪生制造系统中资源能源利用耗散理论进行优化配置:首先将混乱无序的生产资源进行机器间关联,然后根据算法将关联设备按订单需求进行串联,

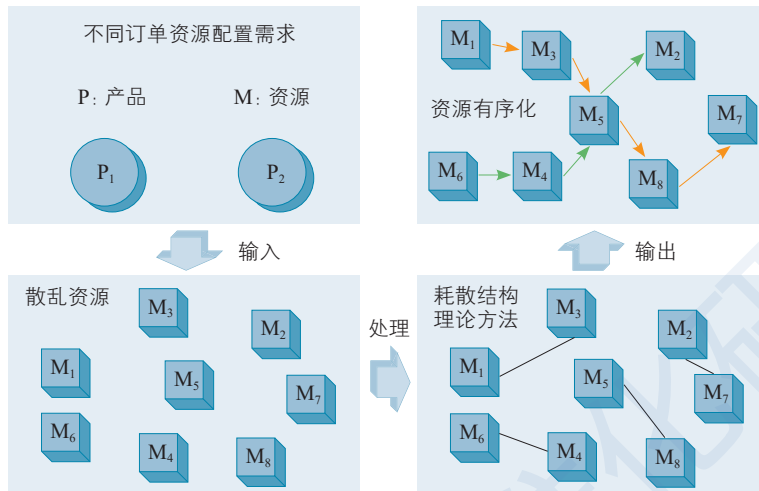


图6 资源能源优化配置

形成有序化排列，利用优化仿真进行生产预测，构建出资源分配与生产效益之间的定性映射关系数学模型。最终形成有序化资源能源配置。

数字孪生与传统的仿真技术都具有资源优化的能力。但是传统的仿真技术通常只是物理实体在数字空间单向和静态的映射，主要用于提升产品设计的效率，降低物理测试成本。相比于仿真技术，在物联网、人工智能、大数据分析等新兴技术的加持下，数字孪生对于资源优化有着更深远的帮助：

双向：数字孪生是对真实物理产品、设备或过程的动态和持续更新的表示。数字孪生能够理解、预测产品、设备或过程，乃至能对物理产品实施控制、改变产品的状态让很多原来由于物理条件限制、必须依赖于真实的物理实体而无法完成的操作变得触手可及，从而实现对于产品、设备或过程的相关要素资源的优化，并进一步激发数字化创新。

持续：数字孪生和物理产品之间的互动是不间断的，贯穿产品的全生命周期。在一定的程度上用来可以直接描述它对应实体对象的状态，确

保我们对实体对象状态的可见。更重要的是帮助我们更深入地辨认发生的事件(如质量、故障),理解其原因,并能对未来可能发生的事件提供预测,从而降低企业进行产品创新、模式创新中的成本、时间及风险,并且持续地推动产品优化,改善客户体验,极大地驱动了企业创新行为。

开放: 通过数字孪生收集到的海量数据,单靠企业自身的力量来分析和挖掘其中的价值是不够的,企业需要将数据对第三方开放,借助外部合作伙伴的力量充分挖掘数字孪生的价值。

互联: 数字孪生的意义不仅如此,还包括价值链上下游企业间的数据集成以及价值链端到端集成,本质是全价值链的协同。产品数字孪生作为全价值链的数据中心,其目标是实现全价值链的协同,因此不仅是要实现上下游企业间的数据集成和数据共享,也要实现上下游企业间的产品协同开发、协同制造和协同运维等。

4. 实现全要素数字化,推动新型智慧城市建设

中国的人口增长率尽管在新世纪呈现逐年下滑趋势,但受到人口基数和明显加快的城市化水平的影响,中国的人口在2019年已经升至14亿人口增长。人口的急剧增加与都市化发展带来的交通拥堵、治安恶化、大气污染、噪音污染等多种“城市病”正严重影响着我们的生活。城市过大,在短时间过多人口集中到城市,不可避免地产生大批失业、交通拥堵、犯罪增加、环境恶化、淡水和能源等资源供应紧张等现实问题。以及由上述问题引起的城市人群易患的身心疾病,这些问题和矛盾又在一定程度上制约了城市的发展,加剧了城市政府的负担,使城市政府陷入了两难困境。

智慧城市建设发展已近十年,至今却无一个城市自我标榜已建成了智慧城市。事实上,智慧城市面临技术和非技术两大瓶颈难以突破,可谓举步维艰。所谓技术瓶颈,是指基于云计算和互联网的聚合式的模式创新比较成功,而基于物联网、大数据、人工智能、区块链、量子通信等技术

的原始创新极度缺乏，未出现杀手级应用，各功能模块有机融合的 ONE ICT 架构未能实现，造成创新只停留在表面，城市运行和治理的水平有量的提升，但没有质的改变。所谓非技术瓶颈，表现在智慧城市建设所需的庞大资金问题一直没有找到解决之道，政府和市场边界不好划分，工程周期长投入大充满变数，企业盈利和资本回报前景模糊，观望踟蹰之下，推进效果可想而知。此外，彰显智慧所必须的资源共享与业务协同机制也一直没有建立起来，信息打通仍困难，协同共治难实现。两大瓶颈悬而未决导致智慧城市疲态尽显停滞不前，现有的建设发展模式亟待突破。

数字孪生城市通过对物理世界的人、物、事件等所有要素数字化，在网络空间再造一个与之对应的“虚拟世界”，形成物理维度上的实体世界和信息维度上的数字世界同生共存、虚实交融的格局。物理世界的动态，通过传感器精准、实时地反馈到数字世界。数字化、网络化实现由实入虚，网络化智能化实现由虚入实，通过虚实互动，持续迭代，实现物理世界的最佳有序运行。

数字孪生城市将推动新型智慧城市建设，在信息空间上构建的城市虚拟映像叠加在城市物理空间上，将极大地改变城市面貌，重塑城市基础设施，形成虚实结合、孪生互动的城市发展新形态；借助更泛在、普惠的感知，更快速的网络，更智能的计算，一种更加智慧化的新型城市将得以创建。

数字孪生城市不仅赋予了城市政府全局规划和实时治理能力，更带给所有市民能感受到的品质生活体验。

提升城市规划质量和水平：数字孪生城市执行快速的“假设”分析和虚拟规划，可迅速摸清城市“家底”，把握城市运行脉搏；在规划前期和建设早期了解城市特性、评估规划影响，避免在不切实际的规划设计上浪费时间，防止在验证阶段重新进行设计，以更少的成本、更快的速度，

推动创新技术支撑智慧城市顶层设计落地。

推动以人为核心的城市设计：实现智慧城市建设协同创新。数字孪生城市关注城乡居民出行轨迹、收入水准、家庭结构、日常消费等，对相关数据进行动态监测，并纳入模型，实现协同计算。同时，通过在信息空间上预测人口结构和迁徙轨迹、推演未来的设施布局、评估商业项目影响等。优化智慧城市建设并评估其成效，辅助政府在信息化、智慧化建设中的科学决策，避免走弯路或重复、低效建设。

节省市民出行时间总成本：第一时间感知路况、事故报警、拥堵分流。为市民消除设备安全隐患，通过全城治安事件实时监测为市民带来关怀与安全感。

营造更加文明的社会风气：对于践踏草坪、非机动车占用机动车道、非机动车逆行等行为，在线推送到城市监督部门曝光，有效地起到警示作用，提升全民文明风气。

当前智慧城市应用需求主要包括以下几个部分：

智慧城市规划

在新区总体规划与详细规划公布以及城市方案设计阶段，需要将未来城市规划面貌按照 1:1 复原真实城市空间，不同于以往传统的规划图纸与效果图，以最直观的方式呈现在城市管理者，城市设计者与大众面前。在细度上将数据颗粒度细化到建筑内部的一根水管、一根电线、一个机电配件，以及建筑外部的一草一木，在广度上覆盖了地上的地块、河流、道路、建筑，地下的管网、隧道和地铁线路，为城市建设实现可视化赋能，全面查看展望对城市未来蓝图，推演城市规划。协助城市管理者更直观与全面地对比城市设计方案，更好地做出城市规划决策。服务于城市规划、建设、运营全生命周期，为城市综合指挥中心各部门提供一张在线的蓝图，为后续城市建设提供支持。

数据面板需融合城市数据概况，人口密度，新城人口规划、建设用地规划、主城区规划等规划类相关数据，直观展示城市现状与未来规划指标。

智慧城市设计施工

在城市设计与施工阶段，需要通过三维数字仿真平台与工地基建仿真还原，在实现工程施工可视化智能管理的前提下，提高工程管理信息化水平。

数据面板需展示环境实时监测数据，项目工程信息，节点计划，现场管理人员名单与类型统计。做到项目管理、人员管理、安全管理一张图，保证施工人员安全实现人员高效管理调度，维护施工环境的绿色安全。

智慧城市管理运营

城市治理是推荐国家治理体系和治理能力现代化的总要内容，数字孪生仿真是实现“以数据智能支撑赋能行业，实现城市公共资源的优化配置和智能调度”的关键，是城市实现可调度、可运营、可评价的核心所在。

借助数字孪生技术，构建数字孪生城市运行场景，将极大改造城市面貌，重塑城市基础设施，实现对动态优化配置全市公共资源影响评估，并建设数字驾驶舱以数字化方式展现现在城市运营态势，实现城市管理决策协同化和智能化“态势有洞察”、“决策有支撑”、“处置有闭环”，确保城市安全、有序运行。

5. 优化城市设计布局, 打造科学公共服务体系

公共服务，是 21 世纪公共行政和政府改革核心理念，包括加强城乡公共设施建设，发展教育、科技、文化、体育、政务、交通、司法等公共事业，为社会公众参与社会经济、政治、文化活动等提供保障。

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

乡公共设施建设，发展科技、文化、政务、交通、司法等等多方面对城市进行高效管理，是现代城市建设的核心。

虚拟交互

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。虚拟交互、协同与融合将定义城市未来发展新模式。

智能服务

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科技、文化、体育、生态环境治理、交通管控，改善市民服务，赋予城市生活“智慧”。

6. 基于医疗大数据合理分配医疗资源,提升公共健康保障效率

智慧医疗保健是数字孪生智能化应用的重要组成部分。通过移动监测、移动诊室、无线远程会诊、智慧处方、医疗信息云存储等智能技术手段，可提升城市诊疗覆盖面与效率，促进城市医疗资源的合理化分配。进一步利用物联网技术构建“电子医疗”服务体系，实现医疗监护设备的小型化、无线化、发展智慧家庭健康保健、智能健康监护，可大幅降低城市公众医疗负担，缓解城市医疗资源紧缺的压力。具体应用需求如下：

基于患者的健康档案、就医史、用药史、智能可穿戴设备监测数据等信息可在云端为患者建立“医疗数字孪生”，并在生物芯片、增强分析、边缘计算、人工智能等技术的支撑下模拟人体运作，实现对医疗个体健康状况预测分析和精准医疗诊断。如基于医疗数字孪生应用，可远程和实时地监测心血管病人的健康状态；当智能可穿戴设备传感器节点测量到任何异常信息时，救援机构可立即开展急救。同样通过医疗数字孪生还可通过在患者体内植入生物学传感器来全天监控其血糖水平，以提供

有关食物和运动的建议等。

精准医疗

精准医疗是未来的诊疗模式。基于医疗数字孪生，医生可通过对患者健康大数据（基因、生活习惯、家族病史和病例）的搜集和分析，进而提出个性化、针对性的治疗方式和药物，实现精准诊断与治疗。这种模式不仅用于患者的疾病治疗，更侧重于对人们疾病的预防。最大的可能是医生根据患者的基因、生活习惯等因素制定独特的药物和方案。个性化药物使医疗效率得到优化，药物副作用降低，住院率下降，最终会体现在患者整体医疗成本的下降，也缓解了医疗资源的不足问题。

健康监测与管理

在个人的健康监测与管理方面，通过数字孪生可以更清楚地了解我们身体的变化，对疾病做出及时预警。未来通过各种新型医疗检测和扫描仪器以及可穿戴设备，我们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。但同时，时刻监测反馈所带来的心理暗示是否会影响人类健康又会成为课题。

远程医疗

通过 5G 等传输技术，远程医疗也将能够更为普及。目前全国首例基于 5G 的远程人体手术——帕金森病“脑起搏器”植入手术成功完成，这对实现优质医疗资源下沉、实现自动诊疗有着重要意义。

对于城市管理而言，掌握了城市居民群体的医疗数字孪生，有助于合理规划和分配医疗资源，以及辅助社保、扶贫等政策制定。

(二) 数字孪生产业图谱

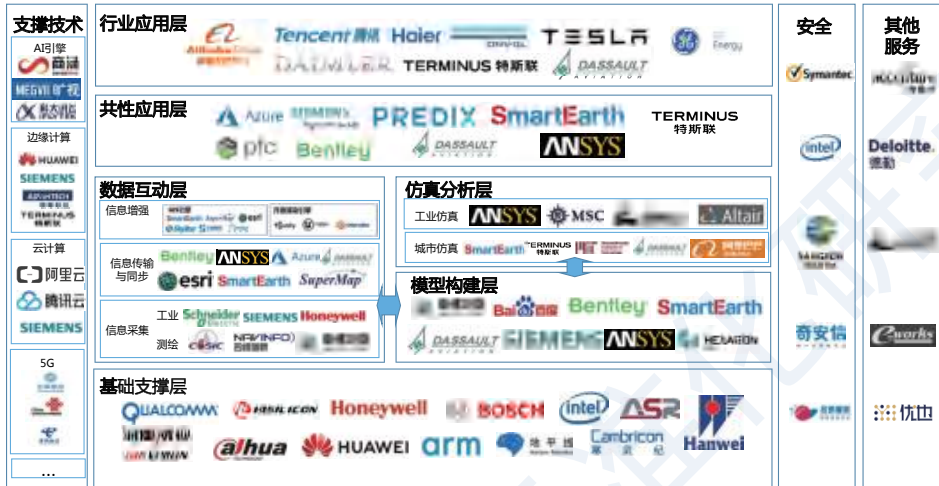


图 7 数字孪生产业图谱

数字孪生可划分为“基础支撑”、“数据互动”、“模型构建”、“仿真分析”、“共性应用”、“行业应用”6大核心模块，对应从设备、数据到行业应用的全生命周期。国内外主要厂商主要有建模业务、仿真业务、平台业务、行业服务业务四大类。

基础支撑层

基础支撑层是物联网的终端，主要是一些芯片、传感器等设备，用于数据的采集以及向网络端发送。

芯片是物联网终端的核心元器件之一，据市场调研公司 ABI Research 预计，在 2020 年通过物联网进行无线连网的设备总数将达到 300 亿台。不少芯片巨头将物联网芯片作为下一个博弈的领域，目前，主要的国外物联网芯片提供商包括高通、英特尔、ARM、AMD、三星、英伟达等。谷歌、华为与阿里等科技巨头也进入该领域，如谷歌深度学习芯片 TPU、华为海思和阿里主攻芯片的平头哥。

传感器是物联网终端市场的重要组成部分。目前主要由美国、日本、德国等少数几家公司主导，如博世、意法半导体、德州仪器、霍尼韦尔、飞思卡尔、英飞凌、飞利浦等。国内代表性的企业有汉威电子、华工科技等，但市场份额相对较小。

边缘计算让数据处理更靠近数据源头一侧，实现在边缘侧的数据采集、清理、加工、集合，从而大大缩短延迟时间，减少网络传输量，是物联网硬件的一个发展趋势。典型企业如英特尔、ARM、戴尔，国内的华为、研华科技等硬件企业都开始进军边缘计算市场。

监控设备能够采集图像信息，结合强大的边缘设备分析能力，在人脸识别、交通监控等方面有广泛的应用，是智能城市的重要环节。典型企业有海康威视、大华等。

表 1 典型基础支撑设备厂商

类型		厂商
芯片	通信芯片	广域：高通、ASR、海思、中星微、紫光展锐等 局域：新岸线、芯科科技等
	AI 芯片	英特尔、地平线、寒武纪、平头哥、英伟达、AMD、XILINX 等
	控制芯片	TEXAS、复旦微电子集团、英飞凌等
传感器		博世、霍尼韦尔、汉威科技、士兰微电子、欧姆龙、昆仑海岸、中星测控等
边缘计算		英特尔、戴尔、ARM、华为、HBC、爱立信、思科、研华科技、施耐德、特斯联等
监控		海康威视、大华等

数据互动层

数字孪生的构建和应用需要软件定义的工具和平台提供支持，如 Bentley 的 iTwin Service，ANSYS 的 TwinBuilder，微软的 Azure，达索的 3D Experience 等。但从功能性的角度出发，这些工具和平台大多侧重某

一或某些特定维度，当前还缺乏考虑数字孪生综合功能需求的一体化综合平台。经过多年发展，工业 / 工程 / 城市场景的不同工具的边界逐渐消失。国际上 Autodesk 与 ESRI 建立战略合作关系，企图把 BIM 和 GIS 数据融合起来；与此同时，Bentley Systems 跟西门子、Cesium 和 AGI 等公司力推开源数字孪生联盟，围绕 iModel.js，形成了数据驱动的开源体系。国内以传统 GIS 平台软件和基于开源渲染引擎二次开发的产品开始向数字孪生平台转型，其中以泰瑞的 SmartTwins 数字孪生底座平台为代表。国内市场的研发和销售市场规模达数十亿人民币，国内外有数十家企业相互竞争。技术层面，Esri 和超图的二维 GIS 软件技术成熟、研发实力较强；Skyline 和泰瑞在三维 GIS 研发上经验丰富，一直处于行业领先地位。从市场需求来看，传统 GIS 软件发展多年，需求已趋饱和。但是，随着倾斜摄影技术的广泛应用和智慧城市的迫切需求，功能涵盖了三维 GIS 软件的数字孪生平台需求量呈指数级增长。这个领域中，主要包括的国际巨头有 Esri 和 Skyline，国内的 GIS 优秀研发企业有 SuperMap（超图）、SmartEarth（泰瑞）。其他的国外主要竞争对手包括谷歌公司、美国数字地球公司、美国环境系统研究所公司、法国信息地球公司等。

仿真分析层

仿真业务是指为数字化模型中融入物理规律和机理。不仅建立物理对象的数字化模型，还要根据当前状态，通过物理学规律和机理来计算、分析和预测物理对象的未来状态。其中又分为工业仿真软件和复杂系统（交通和物流等）仿真软件。工业仿真软件，这里主要指计算机辅助工程 CAE（Computer Aided Engineering）软件，包括通常意义上的 CAD，CAE，CFD，EDA，TCAD 等。目前中国 CAE 软件市场完全被外资产品占据，如 ANSYS，海克斯康（2017 年收购 MSC），Altair，西门子，达索，Cadence，Comsol，Autodesk，ESI，Synosys，Midas，Livemore 等。国内

此方面以安世亚太为代表的国产模拟仿真软件，在多年使用和代理国外产品经验基础上开发出了国产化的替代方案，但目前还无法达到国外一线产品的水平。泰瑞在 2020 年推出工业仿真云产品，也以云服务模式进入这一市场。特斯联 AIoT 体系通过将虚拟现实技术、3D 建模技术、GIS 技术以及 VR 技术相结合，推出城市级仿真平台。

模型构建层

建模业务是指为用户提供数据获取和建立数字化模型的服务，建模技术是数字化的核心技术，譬如测绘扫描、几何建模、网格剖分、系统建模、流程建模、组织建模等技术。市场规模达数百亿人民币，主要由国有测绘企业主导市场，大约有 50 多家企业，其中，高德和百度的成功主要由于其庞大的用户群体和广泛的市场应用。总体来说，主营数据业务的企业除了在硬件集成和相机飞机研发上有技术投入，软件能力都比较弱，以采购国外软件为主。据调研，全国有 800 家甲级测绘资质企业，50 家航测甲级单位。现有的数据业务在大地测量等传统服务方面供大于求，但在倾斜航测等业务领域严重供不应求。测绘数据服务领域中，主要的软件包括泰瑞的 Photomesh、Bentley 的 ContextCapture 和街景工厂的 StreetFactory。

共性应用层

数字孪生的构建和应用需要软件定义的工具和平台提供支持，如 Bentley 的 iTwin Service，ANSYS 的 TwinBuilder，微软的 Azure，达索的 3D Experience 等。平台的优势在于，一是系统架构支持基于单一数据源实现产品全生命周期的管理，实现了数据驱动的产品管理流程。二是实现了不同行业、应用的打通，并支持其他模型通过 API 接入平台。但从功能性的角度出发，这些工具和平台大多侧重某一或某些特定维度，当前还缺乏考虑数字孪生综合功能需求的一体化综合平台。经过多年发展，工业 / 工程 / 城市场景的不同工具的边界将逐渐消失。

典型的数字孪生平台：

a) 达索——3D Experience

达索凭借航空业 CAD 设计软件的沉淀以及收购策略，建立了复杂的产品线。2012 年，达索提出 3DEXPERIENCE 战略，并于 2014 年推出 3DEXPERIENCE 平台，通过统一的平台架构，把旗下的产品逐步统一到一个平台上。实现了设计、仿真、分析工具（CATIA、DELMIA、SIMULIA、……）、协同环境（VPM）、产品数据管理（ENOVIA）、社区协作（3DSwym）、大数据技术（EXALEAD）等多种应用的打通。2019 年，达索与 ABB 建立全球合作伙伴关系，为数字化工业客户提供从产品全生命周期管理到资产健康的软件解决方案组合。

b) ANSYS——TwinBuilder

ANSYS 拥有一整套仿真解决方案，包括平台、物理知识和系统功能，集成多款建模仿真软件。ANSYS 的 TwinBuilder 是针对数字孪生的产品软件包，它将多域系统建模器的强大功能与广泛的 OD 应用程序专业库、3D 物理求解器和降阶模型 (ROM) 功能相结合。第三方工具集成功能帮助将各种来源的模型组合到完整的系统中进行协同仿真。通过嵌入式软件开发工具，用户可以重复使用现有组件并快速创建产品的系统模型。

ANSYS 仿真平台可以连接到各种工业互联网平台进行数据访问和协同，诸如 PTC 公司的 ThingWorx 平台和 GE 公司的 Predix 平台。ANSYS 与 PTC 合作做运行泵的仿真模型，能够比通常采用的试错方法更快地诊断和解决运行故障问题。

c) 微软——Azure

微软是数字孪生的一个新进玩家，在 2018 年发布了 Azure Digital Twins 平台，可用于全面的数字模型和空间感知解决方案，可应用于任何物理环境。Azure 数字孪生可提供物理环境及相关设备、传感器和人员的

全面虚拟呈现形式，并全面支持物联网和端点设备之间的双向通讯，提供开放式的建模语言以及实时的执行环境，并有 Azure 强大的服务生态（Azure AI、Azure 存储、Office365）等作为支持。

d) 上海优也 —— Thingswise iDOS

优也 Thingswise iDOS 平台把数字孪生技术作为核心无缝融入工业互联网平台，无论在国内还是在国际上都具有独到之处。建基于云原生、大数据、机器学习 / 人工智能和微服务等新一代的 IT 技术，优也 Thingswise iDOS 平台以数字孪生层作为核心功能层，下启物联层，上承应用层，构成具备多种图形开发工具，功能丰富和自成体系的工业互联网 PaaS 平台，既可部署在各大公有云环境，也可部署在私有云的虚机或物理裸机集群上，甚至也可部署在软硬一体化的机柜里，灵活实现可边可云，云边融合的架构。在数孪层，用户可以使用可视化设计台定义设备等对象的数字孪生体，梳理数据，融合算法模型，定义设备上下游的关系，对下联通设备数据，在数字空间动态地反映生产现场实际工况以及支持算法模型的计算，对上的支持数据驱动的工业智能应用。

行业应用层

行业解决方案是针对行业需求的数字孪生技术在智慧城市、交通、水利、工程、工业生产、能源、自动驾驶、公共应急等领域的各种应用服务，市场规模超千亿人民币，国内外供应商超过 1000 家。其中，西门子、GE、达索和 Bentley 因为具有基础平台软件研发和推广能力，技术实力强，对各领域有较透彻的理解，具有较强的竞争力，占有较大的市场份额。空客、DNV GL、Volvo 等高端装备制造制造商基于数字孪生技术提高了产品研发和资产管理能力。空客通过在关键工装、物料和零部件上安装 RFID，生成了 A350XWB 总装线的数字孪生，使工业流程更加透明化，并能够预测车间瓶颈、优化运行绩效。国内的情况，比亚迪、三一集团、

特斯联、中船重工等企业也在积极部署数字孪生系统。三一基于 IoT 的数字孪生技术结合售后服务系统,将服务过程的几个关键指标作为竞争指标,如工程师响应时间(从接到需求电话到可以派出工程师的时间)、常用备件满足度、一次性修复率、设备故障率等进行评价服务的好坏。通过对每一次的设备实时运行数据、故障参数以及工程师维修的知识积累,三一集团对数据进行建模,还原设备、服务等相关参与方的数字化模型,来不断的改进对应的服务响应与质量。特斯联 AIoT 产品体系,配合算法仓库、存算一体、云边协同等独家边缘网络能力,在云平台形成提供场景应用服务的城市组件。根据不同场景类型、规模、需求的差异, AI CITY 城市组件通过组合将庞杂的产业和城市场景降维成多个垂直模块,逐一升级为数字级的行业产品。从场景数据化到数据智能化,将人与基础设施、生产服务管理建立紧密联系,实现智慧社区、智慧园区、智慧消防等垂直行业的智慧管理和科技服务模式。

支撑技术层

(1) 云计算

云服务和通用 PaaS 平台将形成 IT 巨头主导的产业格局由于需要高昂的资金投入和复杂的技术集成能力,云服务平台和通用 PaaS 平台成为 IT 巨头“势力范围”,呈现出高度集聚的特点。

一方面,云服务平台市场马太效应初现端倪,领军云计算厂商成为当前市场最大赢家。亚马逊 AWS 云和微软 Azure 云成为国外 GEPredix、西门子 MindSphere、PTCThingWorx 等主流平台首选合作伙伴,国内阿里云、腾讯云、华为云也受到越来越多的企业青睐。另一方面,绝大多数通用 PaaS 平台都是 IT 巨头主导建设。例如亚马逊 AWS 在其云服务平台基础上积极引入容器、无服务器计算等技术来构建高性能 PaaS 服务; SAP 推出 CloudPlatform 平台帮助企业集成新兴技术,实现应用快速开发部署。

尽管出于满足自身应用需求和布局关键技术的考虑，个别工业巨头选择自建通用 PaaS 平台，例如 GE 和西门子都曾借助 CloudFoundry 开源框架构建通用 PaaS 平台，但对于大部分企业而言，独立建设通用 PaaS 平台既不经济也无必要。

未来，云服务平台和通用 PaaS 平台可能会被 IT 巨头整合成为通用底座平台，凭借技术和规模优势提供完整的“IaaS+通用 PaaS”技术服务能力。其他企业在通用底座平台上发挥各自优势打造专业服务平台，形成“1+N”的平台体系。如紫光云引擎提供紫光 UNIPower 平台，光电缆、光伏、日化等行业龙头企业则借助其底层技术支撑能力，结合自身业务经验优势打造各类行业专属平台。

(2) 人工智能

1. ICT、研究机构与行业协会提供算力算法支持，成为工业智能重要支撑

三类主体现阶段提供通用关键技术能力，以“被集成”的方式为工业智能提供基础支撑。主要包括三类，一是 ICT 企业，提供几乎涵盖知识图谱、深度学习的所有通用技术研究与工程化支持，如谷歌、阿里等在知识图谱算法研究领域开展研究；英伟达、AMD、英特尔、亚马逊、微软、赛灵思、莱迪思、美高森美等开展 GPU、FPGA 等深度学习芯片研发；微软、Facebook、英特尔、谷歌、亚马逊等开展了深度学习编译器研发；谷歌、亚马逊、微软、Facebook、苹果、SkyMind、腾讯、百度等开展深度学习框架研究；谷歌、微软等开展了可解释性、前沿理论算法研究。二是研究机构，主要提供算法方面的理论研究，如加州大学、华盛顿州立大学、马克斯-普朗克研究所、卡耐基梅隆大学、蒙彼利埃大学、清华大学、中科院、浙江大学等在知识图谱算法研究领域开展研究；蒙特利尔大学、加州大学伯克利分校等开展了深度学习框架研究；斯坦福大学、麻省理工、

以色列理工学院、清华大学、南京大学、中科院自动化所等开展了深度学习可解释性与相关前沿理论算法研究。三是行业协会，提供相关标准或通用技术支持，如 OMG 对象管理组织提供统一建模语言等企业集成标准的制定，为知识图谱的工业化落地奠定基础；Khronos Group 开展了深度学习编译器研发。

2. 应用主体面向实际业务领域发挥应用创新作用

各类主体以集成创新为主要模式，面向实际业务领域，整合各产业和技术要素实现工业智能创新应用，是工业智能产业的核心。目前应用主体主要包括四类：一是装备 / 自动化、软件企业及制造企业等传统企业，面向自身业务领域或需求痛点，通过引入人工智能实现产品性能提升，如西门子、新松、ABB、KUKA、Autodesk、富士康等。二是 ICT 企业，依靠人工智能技术积累与优势，将已有业务向工业领域拓展，如康耐视、海康威视、大恒图像、基恩士、微软、KONUX、IBM、阿里云等。三是初创企业，凭借技术优势为细分领域提供解决方案，如 Landing.ai、创新奇智、旷视、特斯联、ElementAI、天泽智云、Otosense、Predikto、FogHorn 等。四是研究机构，依托理论研究优势开展前沿技术的应用探索，如马萨诸塞大学、加州大学伯克利分校等在设备自执行领域开展了相应探索。

(3) 边缘计算：

接入场景和需求的不同驱动连接与边缘计算平台划分为商业物联和工业物联两大阵营，并形成了相对集聚的市场发展特点。专注 M2M 的通信技术企业重点布局商业物联平台，目前市场第一梯队已经基本形成。Ayla 物联平台通过蜂窝、Wi-Fi 和蓝牙等联网方式实现智能家居、消费电子等商业产品的接入和管理，目前全球客户中囊括了 15 个行业排名第一的企业；通信巨头华为和思科凭借 NB-IoT、LTE-M 等移动网络技术优势打造物联平台，被英国咨询机构 IHSMarkit 评为领域发展布局的冠亚

军。而具备自有设备整合或协议转换集成优势的装备及自动化企业是工业物联平台的主要玩家，如西门子 MindConnectNano 支持西门子 S7 系列产品通信协议及 OPC-UA，实现自家产品与 MindSphere 平台的无缝连接；自动化软件公司 Kepware 推出 KEPServerEX 连接平台，基于工业 PLC 的通信协议兼容转换，实现各类第三方工业设备的接入与管理。除此之外，还有众多企业以系统集成的方式为平台的部署实施提供定制化的工业连接解决方案。当前，不断积累工业协议数量以提供通用化连接服务成为工业物联平台发展重要方式，红狮控制的数据采集平台目前支持 300 多种工业协议，可以接入不同类型品牌的 PLC、驱动器、控制器等产品；KEPServerEX 平台集成了 150 余种设备驱动或插件；此外，研华科技在其新推出的 WISE 平台中也已将长期积累的 150 多种工业协议转化成为对外连接服务能力。树根互联云物联平台提供网关、SDK 植入和云云对接 3 种灵活连接模式，支持 400 多种工业协议和 300 多种设备私有协议，适配国际通用硬件接口。这些企业正积极将工业协议接入服务向更多平台企业提供，未来有望成为工业连接领域领导者，驱动工业物联平台市场走向集聚发展。特斯联下一代边缘计算系统采用 5G 高速无线网络作为数据承载网络的工业级网关，支持移动、联通、电信 5G 高速接入，融合了 AI 算力和工业协议处理的高性能融合计算，支持视频接入解析和各类工业接口协议处理，支持国密标准的数据加密，为远程设备和站点之间的联网提供安全高速的无线连接，支持 4 路 Socket 连接。

安全层

区别于传统的网络安全技术，物联网网络安全更加重视对设备、通信以及数据安全的保障。具体有以下几点：（1）设备和远程系统之间的通信加密和认证；（2）对设备的保护；（3）设备固件的安全升级；（4）对威胁行为的监测和防御；（5）数据存储的安全性。这要求物联网厂商

建立从产品开发、设计到监控全周期的安全防范机制，也要求 IoT 基础设施提供商做好基础设施的安全防护。物联网安全服务商有微软 Azure、赛门铁克、Intel 等。微软的产品 Azure Sphere 提供基于云的安全服务，支持对 Azure Sphere 认证的芯片进行维护、更新和控制。它在设备和互联网以及各种辅助云服务之间建立连接，确保安全启动、认证设备身份、完整性和信任根，同时确保设备运行经过审核的代码库。国内阿里云、腾讯云从平台的层级提供安全保障。此外，国内领先的网络安全企业包括奇安信科技集团股份有限公司、启明星辰信息技术集团股份有限公司、深信服科技股份有限公司等。

其他服务（研发、咨询与其他应用）

当前，数字孪生受到政府及相关机构、学术界及企业界的广泛关注。政府及相关机构、学术界围绕数字孪生展开研究，出台政策鼓励数字孪生技术的应用。企业界积极将数字孪生投入实际应用，基于该技术提供数据分析、管理和咨询等服务。

政府及相关机构：随着工信部“智能制造综合标准化与新模式应用”和“工业互联网创新发展工程”专项，科技部“网络化协同制造与智能工厂”等国家层面的专项实施，有力促进了数字孪生的发展。以中国电子技术标准化研究院、中国信息通信研究院、赛迪信息产业（集团）有限公司为代表的机构在数字孪生的概念、技术、标准、应用实践等方面开展了大量工作，为数字孪生在中国的推广与发展起到了重要作用。

高校及科研院所：高校及科研院所是进行数字孪生理论研究的主力。统计结果显示，截止 2019 年 12 月 31 日，全球已有超过 1000 个高校、企业和科研院所开展了数字孪生研究且有相关研究成果在学术刊物公开发表，其中不乏包括德国亚琛工业大学、英国剑桥大学、美国斯坦福大学等世界一流高校。与美国、德国相比，数字孪生在中国的研究和受关注

相对较晚。从 2016 年开始，数字孪生文献发表数量进入快速增长期，直到 2019 年，数字孪生论文发表数量超过 600 篇，其中 2019 年占了近 10 年发文总数量的 50% 以上。

企业：企业积极关注并开展数字孪生实践。主要是一些提供数字孪生相关技术咨询的平台方和数字孪生技术的服务商。

技术服务商：以西门子为代表的厂商为了建立更加完整的数字孪生模型体系，近年来研发和整合了质量管理、生产计划排程、制造执行、仿真分析等各领域领先厂商和技术，支持企业进行涵盖其整个价值链的整合及数字化转型。以 Cognite 和 Sight Machine 为代表的数字治理和分析服务商通过数字孪生提高他们的数据分析能力。以埃森哲、德勤为代表的服务提供商从客户处获得行业知识的沉淀，以此作为基础开发数字孪生模型，从而加强他们在垂直市场的行业知识，以及分析和应用能力。

（三）应用发展现状

随着物联网的应用更加广泛，各个领域越来越多的企业开始计划数字孪生的部署。Gartner 的研究显示，截至 2019 年 1 月底实施物联网的企业中，已有 13% 的企业实施了数字孪生项目，62% 的企业正在实施或者有计划实施。工业互联网是数字孪生的延伸和应用，而数字孪生则拓展了工业互联网应用层面的可能性。

1. 产业生态

与美国、德国相比，数字孪生在中国的研究和受关注相对较晚。从 2016 年开始，数字孪生文献发表数量进入快速增长期，直到 2019 年，数字孪生论文发表数量超过 600 篇，其中 2019 年占了近 10 年发文总数量的 50% 以上。目前关注数字研究，并发表过相关报告的机构 / 作者主要来自学术界、企业界以及政府机构。

政府及相关机构：随着工信部“智能制造综合标准化与新模式应用”和“工业互联网创新发展工程”专项，科技部“网络化协同制造与智能工厂”等国家层面的专项实施，有力促进了数字孪生的发展。以中国电子技术标准化研究院、中国信息通信研究院、赛迪信息产业（集团）有限公司为代表的机构在数字孪生的概念、技术、标准、应用实践等方面开展了大量工作，为数字孪生在中国的推广与发展起到了重要作用。

高校及科研院所：高校及科研院所是进行数字孪生理论研究的主力。统计结果显示，截止 2019 年 12 月 31 日，全球已有超过 1000 个高校、企业和科研院所开展了数字孪生研究且有相关研究成果在学术刊物公开发表，其中不乏包括德国亚琛工业大学、英国剑桥大学、美国斯坦福大学等世界一流高校

企业：企业积极关注并开展数字孪生实践，将数字孪生技术付诸实现的研发方，提供数字孪生相关技术咨询的平台方和数字孪生技术的应用方。

表 2 数字孪生相关实践企业概况

企业类型	国内	国际
技术研发	航天云网、卡奥斯、树根互联、上海优也等	西门子、通用电气 GE、达索、ABB、Daimle、AG、PTC 等
技术咨询	e-works 数字化企业网、安世亚太、上海优也等	德勤、埃森哲
技术应用	比亚迪、三一集团、中船重工、特斯联等	空客、DNV GL、Volvo 等

数字孪生技术服务商方面，以西门子为代表的厂商为了建立更加完整的数字孪生模型体系，近年来研发和整合了质量管理、生产计划排程、制造执行、仿真分析等各领域领先厂商和技术，支持企业进行涵盖其整个价值链的整合及数字化转型。数字孪生技术服务商主要有以下类型：

数据治理和分析服务商：这种供应商通过数字孪生提高他们的分析能力，包括 AI 和高保真物理能力。比如一些大数据分析公司 Cognite 和 Sight Machine；

应用开发商：这些供应商开发数字孪生提高他们的应用能力，为客户 提供垂直细分市场的解决方案。通过 APM、物流或 PLM 等应用开发数字孪生模型和组合。比如 GE Digital、Oracle；

BPM：重点是 BPM(业务流程管理)，通过数字孪生加强这方面的能力。包括 BOXARR、XMPro；

IoT 平台：这种供应商通过数字孪生提高他们的 IoT 能力。比如提高资产监控和绩效统计的能力。比如 IDbox 和 ThingWorx；

服务提供商：以客户作为基础开发数字孪生模型，从而加强他们在垂直市场的行业知识，以及分析和应用能力。比如 Accenture 和德勤。

2. 智能制造领域数字孪生应用

(1) 数字孪生应用概述

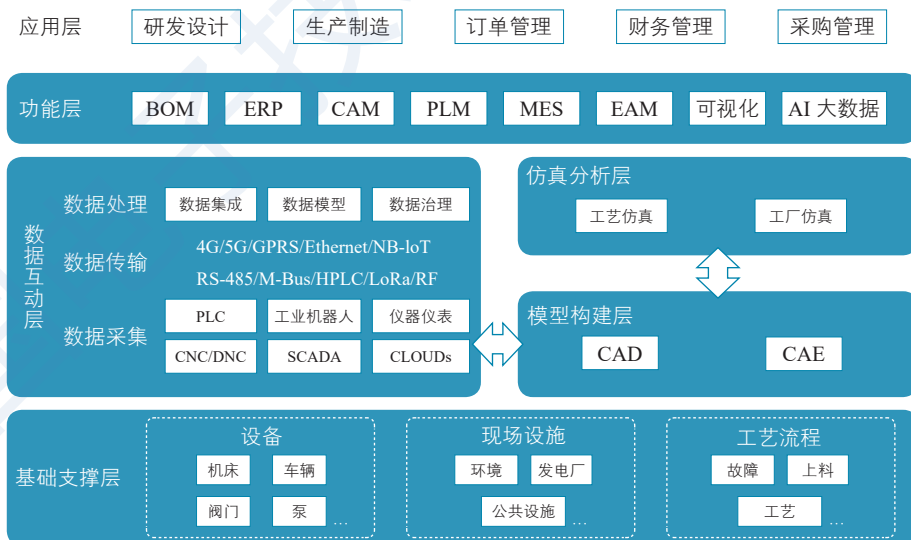


图 8 智能制造领域数字孪生体系框架

智能制造领域的数字孪生体系框架主要分为六个层级，包括基础支撑层、数据互动层、模型构建层、仿真分析层，功能层和应用层。

基础支撑层

建立数字孪生是以大量相关数据作为基础的，需要给物理过程、设备配置大量的传感器，以检测获取物理过程及其环境的关键数据。传感器检测的数据大致上可分为三类：（1）设备数据，具体可分为行为特征数据（如振动、加工精度等），设备生产数据（如开机时长，作业时长等）和设备能耗数据（如耗电量等）；（2）环境数据，如温度、大气压力、湿度等；（3）流程数据。即描述流程之间的逻辑关系的数据，如生产排程、调度等。

数据互动层

工业现场数据一般通过分布式控制系统（DCS）、可编程逻辑控制器系统（PLC）和智能检测仪表进行采集。近年来，随着深度学习、视觉识别技术的发展，各类图像、声音采集设备也被广泛应用于数据采集。

数字传输是实现数字孪生的一项重要技术。数字孪生模型是动态的，建模和控制基于实时上传的采样数据进行，对信息传输和处理时延有较高的要求。因此，数字孪生需要先进可靠的数据传输技术，具有更高的带宽、更低的时延、支持分布式信息汇总，并且具有更高的安全性，从而能够实现设备、生产流程和平台之间的无缝、实时的双向整合/互联。第五代移动通信网络（5G）技术因其低延时、大带宽、泛在网、低功耗的特点，为数字孪生技术的应用提供基础技术支撑，包括更好的交互体验、海量的设备通信以及高可靠低延时的实时数据交互。

交互与协同，即虚拟实体实时动态映射物理实体的状态，在虚拟空间通过仿真验证控制效果，根据产生的洞察反馈至物理资产和数字流程，形成数字孪生的落地闭环。数字孪生的交互包括物理-物理、虚拟-虚拟、

物理 - 虚拟、人机交互等交互方式。

a) 物理物理交互：使物理设备间相互通信、协调与写作，以完成单设备无法完成的任务。

b) 虚拟 - 虚拟交互：以连接多个虚拟模型，形成信息共享网络

c) 物理 - 虚拟交互：虚拟模型与物理对象同步变化，并使物理对象可以根据虚拟模型的直接命令动态调整。

d) 人机交互：即用户和数字孪生系统之间的交互。使用者通过数字孪生系统迅速掌握物理系统的特性和实时性能，识别异常情况，获得分析决策的数据支持，并能便捷地向数字孪生系统下达指令。比如，通过数字孪生模型对设备控制器进行操作，或在管控供应链和订单行为的系统中进行更新。人机交互技术和 3R 技术是相互融合的。

数据建模与仿真层

建立数字孪生的过程包括建模与仿真。建模即建立物理实体虚拟映射的 3D 模型，这种模型真实地在虚拟空间再现物理实体的外观、几何、运动结构、几何关联等属性，并结合实体对象的空间运动规律而建立。仿真模型则是基于构建好的 3D 模型，结合结构、热学、电磁、流体等物理规律和机理，计算、分析和预测物理对象的未来状态。例如飞机研发阶段，可以把飞机的真实飞行参数、表面气流分布等数据通过传感器反馈输入到模型中，通过流体力学等相关模型，对这些数字进行分析，预测潜在的故障和隐患。数字孪生由一个或多个单元级数字孪生按层次逐级复合而成，比如，产线尺度的数字孪生是由多个设备耦合而成。因此，需要对实体对象进行多尺度的数字孪生建模，以适应实际生产流程中模型跨单元耦合的需要。

复杂产品按照系统层次解耦

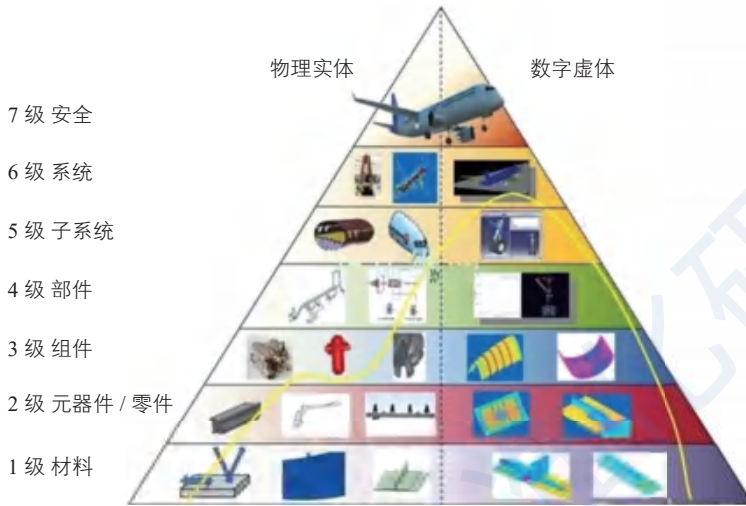


图9 复杂产品按照系统层次解耦

建立仿真模型的基础可以是知识、工业机理和数据，三种建模方式各有利弊。基于知识建模：要求建立专家知识库并且有一定行业沉淀。优势在于模型较简单，对极端情况建模效果。但模型精度、及时性、可迁移性较差，成本较高；基于机理建模：模型覆盖变量空间大、可脱离物理实体、具有可解释性，但要求大量的参数，计算复杂，无法对复杂流程工业中相互耦合的实体情况进行建模；基于数据建模：模型精度较高、可动态更新，但对数据数量、数据质量和精度要求更高，并且无法解释模型。

目前，数字孪生建模通常基于仿真技术，包括离散时间仿真、基于有限元的模拟等，通常基于通用编程语言、仿真语言或专用仿真软件编写相应的模型。数字孪生建模语言主要有 AutomationML、UML、SysML 及 XML 等。工业仿真软件，这里主要指计算机辅助工程 CAE (Computer Aided Engineering) 软件，包括通常意义上的 CAD, CAE, CFD, EDA, TCAD 等。目前中国 CAE 软件市场基本被外资产品垄断，如 ANSYS，海

克斯康（2017年收购MSC），Altair，西门子，达索，Cadence，Comsol，Autodesk，ESI，Synosys，Midas，Livemore等。中国具有自主知识产权的CAE软件仅有很少量的市场份额，国内此方面，主要是一些高校、科研院所和中小企业在进行CAE软件的研发工作，包括FEPG、JIFEX、HAJIF、紫瑞、LiToSim在内的国内自主知识产权软件系统已上市，但由于缺乏竞争力，一些软件已退出国内CAE市场。以安世亚太为代表的国产模拟仿真软件，在多年使用和代理国外产品经验基础上开发出了国产化的替代方案，但目前还无法达到国外一线产品的水平。泰瑞在2020年推出工业仿真云产品，也以云服务模式进入这一市场。

表3 工业仿真软件（CAE）主要供应商

公司 / 平台	提供服务介绍
达索	达索一开始专注于CAD,2014年正式确立了它的产品线战略，四大核心品牌包括CATIA、ENOVIA、DELMIA和SIMULIA。其中SIMULIA是达索在仿真领域的布局。通过收购ABAQUS、Dynamics AB、Engineous等仿真软件开发商，达索逐渐补齐多物理场仿真分析、仿真生命周期（SLM）、注塑仿真、多体仿真、流体场仿真、汽车建模仿真等领域的的能力。达索公司推出3DExperience平台，可服务于工业、交通、航空航天等12个行业。平台中包含了3D建模应用程序、内容与仿真应用程序、智能信息应用程序和社交协作式应用程序，以实现3D设计、工程、CAD、建模、仿真、数据管理和流程管理，帮助客户以数字方式重塑先进产品开发与制造的方法，助力数字孪生的发展。
ANSYS	ANSYS提供基于物理模型的分析技术来模拟材料应力和物理物质的流动（如流体、空气、温度，光学和电磁学）。ANSYS数字孪生建模工具支持使用各种语言和标准格式进行建模（例如，VHDL-AMS [IEEE 1076.1]，Modelica和SML）。它还支持功能模拟界面（FMI），允许用户导入来自多种建模工具的（例如，CarSim，Dymola，GT-SUITE和Simcenter Amesim）资产和设备（或子组件）模型，然后组合成一个完整的复合模型。ANSYS提供功能强大，操作简单方便，是国际最流行的有限元分析软件。

(续表)

公司 / 平台	提供服务介绍
海克斯康 (MSC)	MSC 主要提供面向汽车、航空行天和电子行业，服务于虚拟产品和制造工艺开发的仿真软件。2017 年被海克斯康收购。
西门子	西门子提供全面的软件解决方案——产品生命周期管理 (PLM 软件)，涉及产品开发和生产的各个环节——从产品设计到生产规划和工程直至实际生产和服务等。其中 NX 是主要的 CAD/CAM/CAE 软件套件之一，与 Teamcenter (设计协同、产品数据管理、研发流程管理)，Tecnomatix (工艺规划和仿真、工艺流程管理)，LMS (数据采集和分析) 形成 PLM 的产品生态。
Atair	旗下有 SolidThinking 平台、HyperWorks 平台，航空航天、汽车、电子等领域的 OptiStruct 面，向工艺制造工艺的优化软件 Click2，面向通用学科的优化 CAE 仿真平台 HyperStudy 等。在中国的主要市场在汽车和消费电子行业。。
优也	Thingswise iDOS 平台把数字孪生技术与工业互联网平台技术无缝融合，以数字孪生设计为中心，一体化地解决生产环境的接数 (物联)、管数 (数据梳理) 和用数 (算法模型和工业应用) 的问题。

功能实现层



图 10 数字孪生优化产品生命周期管理^①

① 埃森哲：数字孪生：打造生力产品，重塑客户体验

即利用数据建模得到的模型和数据分析结果实现预期的功能。这种功能是数字孪生系统最核心的功能价值的体现，能实时反映物理系统的详细情况，并实现辅助决策等功能，提升物理系统在寿命周期内的性能表现和用户体验。

已经有一些软件服务商通过提高数字孪生能力提高他们的应用能力，为客户提供垂直细分市场的解决方案。通过 APM、物流或 PLM 等应用开发数字孪生模型和组合。比如 GE Digital、Oracle 等。具体见下表：

表 4 突出数字孪生结合功能层应用的供应商

公司 / 平台	提供服务介绍
SAP	通过收购 Fedem 技术，SAP 拥有建立高保真物理模型的能力，也支持对压缩机、电钻等设备建立低保真的数字孪生模型。
西门子	西门子在物理、图形和模拟方面的能力，以及软件能力，包括 Teamcenter 和 MindSphere IoT 的能力，去开发数字孪生。有过开发产品、产品流程和用于预测设备状况的资产运营状况的数字孪生模型的经验。
ANSYS	ANSYS 提供基于工程模拟的数字孪生技术，以实现资产和设备优化和基于状态（和预测）的维护。ANASYS 的软件可以用于复杂数字孪生模型的开发。他可以与客户现有的资产管理应用融合，比如触发维修流程（因为 ANASYS 和 EAM 相关的应用没有竞争关系）。ANASYS 的技术方法让用户能通过分别建立子部件的模型，进而模拟整体的操作。ANSYS 还提供核心技术和产品组合来支持 SAP 的工程预测洞察（PEI）能力。ANASYS 提供 API，支持在其它应用或工业物联网平台上运行（包括 ThingWorx，GE Predix 和 SAP Leonardo）。
GE digital	作为 Predix 物联网平台的一部分，公司已投资建立工业资产的高保真数字孪生模型。到目前已建立了如齿轮和引擎数字孪生模型，并宣称有数十万生产中的数字孪生实例。
Amazon	AWS 的“设备影子”（device shadow）是整个 AWS 物联网服务的基础元素，作为 AWS 物联网应用层和设备层之间的联结。亚马逊已经建立了吸尘器、流水线设备的基础数字孪生模型。

(续表)

公司 / 平台	提供服务介绍
LogMeln	Xively 设备化身是一个基础数字孪生工具，允许公司为单个对象建立记录，以启用业务流程和数据管理。
PTC	“ThingModel” 是 ThingWorx 的中心和基础架构，它是平台数据的中央存储机构。客户已使用 ThingModel 为拖拉机和引擎等资产建模。
特斯联	特斯联 TACOS 作为支撑 AI CITY 的新建设施，以 AIoT 体系为基础，利用实时全量的城市数据，建立起整个城市多维度的数字孪生模型。

(2) 典型应用场景介绍

数字孪生在智能制造领域的主要应用场景有产品研发、设备维护与故障预测以及工艺规划。

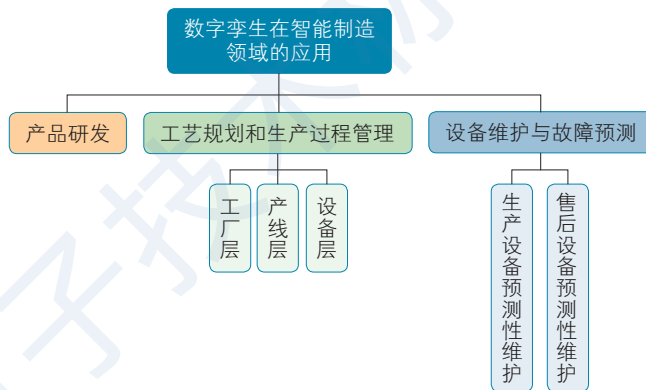


图 11 数字孪生在智能制造领域的应用

数字孪生应用于产品研发

传统的研发设计方式下，纸张、3D CAD 是主要的产品设计工具，它建立的虚拟模型是静态的，物理对象的变化无法实时反映在模型上，也无法与原料、销售、市场、供应链等产品生命周期数据打通。对新产品进行技术验证时，要将产品生产出来，进行重复多次的物理实验，才能得到

有限的数。传统的研发设计具有研发周期长，成本造价高昂的特点。

数字孪生突破物理条件的限制，帮助用户了解产品的实际性能，以更少的成本和更快的速度迭代产品和技术。数字孪生技术不仅支持三维建模，实现无纸化的零部件设计和装配设计，还能取代传统通过物理实验取得实验数据的研发方式，用计算、仿真、分析或的方式进行虚拟实验，从而指导、简化、减少甚至取消物理实验。用户利用结构、热学、电磁、流体和控制等仿真软件模拟产品的运行状况，对产品进行测试、验证和优化。以马斯克的弹射分离实验为例，火箭发射出去后扔掉的捆绑火箭，靠爆炸螺栓和主火箭连接，到一定高度后引爆螺栓爆炸释放卫星，但贵重的金属结构爆炸不能回收使用。马斯克想用机械结构的强力弹簧弹射分离，回收火箭。这项实验用了 NASA 大量的公开数据，在计算机上做建模仿真分析强力弹簧的弹射、弹射螺栓，没有做一次物理实验，最后弹射螺栓分离成功，火箭外壳的回收大幅度降低了发射的价格。类似的案例还有如风洞试验、飞机故障隐患排查、发动机性能评估等。数字孪生不仅缩短了产品的设计周期，提高了产品研发的可行性、成功率，减少危险，大大降低了试制和测试成本。

数字孪生应用于工艺规划和生产过程管理

随着产品制造过程越来越复杂，多品种，小批量生产的需求越来越强，企业对生产制造过程进行规划、排期的精准性和灵活性，以及对产品质量追溯的要求也越来越高。大部分企业信息系统之间数据未打通，依赖人工进行排期和协调。数字孪生技术可以应用于生产制造过程从设备层、产线层到车间层、工厂层等不同的层级，贯穿于生产制造的设计、工艺管理和优化、资源配置、参数调整、质量管理和追溯、能效管理、生产排程等各个环节，对生产过程进行仿真、评估和优化，系统地规划生产工艺、设备、资源，并能利用数字孪生的技术，实时监控生产工况，及时发现

和应对生产过程中的各种异常和不稳定性，日益智能化实现降本、增效、保质的目标和满足环保的要求。离散行业中，数字孪生在工艺规划方面的应用着重于生产制造环节与设计环节的协同；流程行业中，要求通过数字孪生技术对流程进行机理或者数据驱动的建模。图 X 反映了流程工业自动化的结构，在这个过程中，数字孪生通过将物理实体流程上的耦合转化为各个数字孪生参数间的耦合，实现整个流程的协同优化。

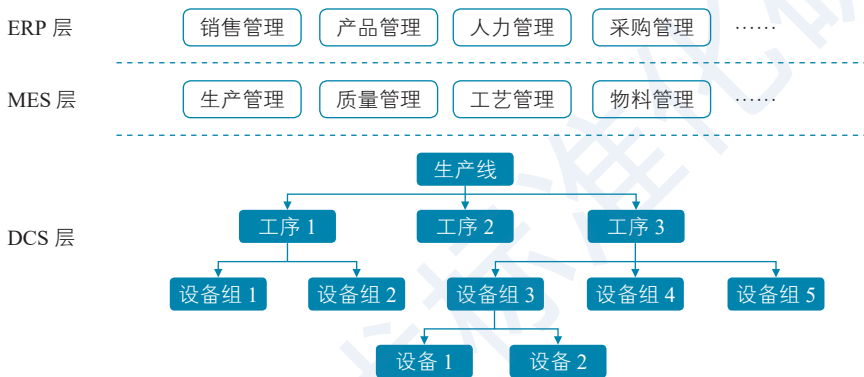


图 12 流程工业自动化的总体结构

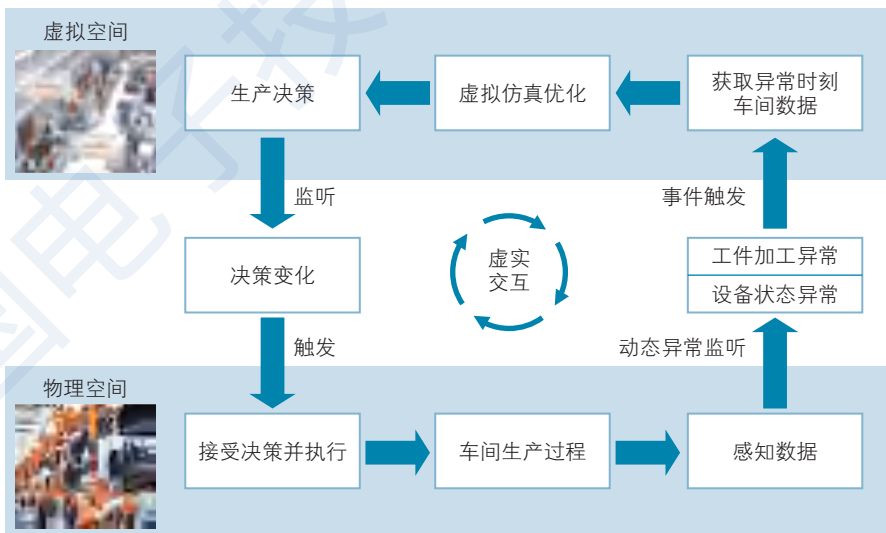


图 13 应用层级及生态

数字孪生应用于设备维护与故障预测

传统的设备运维模式下，当设备发生故障时，要经过“发现故障——致电售后服务人员——售后到场维修”一系列流程才能处理完毕。客户对设备知识的不了解、与设备制造商之间的沟通障碍往往导致故障无法及时解决。解决这一问题的方法在于将依赖客户呼入的“被动式服务”转变为主机厂主动根据设备健康状况提供服务的“主动式服务”。数字孪生提供物理实体的实时虚拟化映射，设备传感器将温度、振动、碰撞、载荷等数据实时输入数字孪生模型，并将设备使用环境数据输入模型，使数字孪生的环境模型与实际设备工作环境的变化保持一致，通过数字孪生在设备出现状况前提早进行预测，以便在预定停机时间内更换磨损部件，避免意外停机。通过数字孪生，可实现复杂设备的故障诊断，如风机齿轮箱故障诊断、发电涡轮机、发动机以及一些大型结构设备，如船舶的维护保养。

典型的企业如达索、GE 聚焦于数字孪生在故障预测和维护方面的应用。GE 是全球三大航空发动机生产商之一，为了提高其核心竞争力和加强市场主导地位，在其航空发动机全生命期过程引入了增材制造和数字孪生等先进技术。2016 年，GE 与 ANSYS 合作，携手扩展并整合 ANSYS 行业领先的工程仿真、嵌入式软件研发平台与 GE 的 Predix 平台。GE 的数字孪生将航空发动机实时传感器数据与性能模型结合，随运行环境变化和物理发动机性能的衰减，构建出自适应模型，精准监测航空发动机的部件和整机性能。并结合历史数据和性能模型，进行故障诊断和性能预测，实现数据驱动的性能寻优。

3. 智慧健康领域数字孪生应用

(1) 数字孪生应用概述

智慧健康是通过利用移动监测、移动诊室、无线远程会诊和医疗信息云存储等智能技术手段，以此提高诊疗效率，提升城市诊疗覆盖面与效

率，促进城市医疗资源的合理化分配。将数字孪生应用在智慧健康系统中，可以基于患者的健康档案、就医史、用药史、智能可穿戴设备检测数据等信息在云端为患者建立“医疗数字孪生体”，并在生物芯片、增强分析、边缘计算、人工智能等技术的支撑下模拟人体运作，实现对医疗个体健康状况的实时监控、预测分析和精准医疗诊断。如基于医疗数字孪生体应用，可远程和实时地监测心血管病人的健康状态；当智能穿戴设备传感器节点测量到任何异常信息时，救援机构可立即开展急救。同样医疗数字孪生体还可通过在患者体内植入生物医学传感器来全天监控其血糖水平，以提供有关食物和运动的建议等。

将数字孪生技术应用在智慧健康中，构建其应用框架如图 * 所示。该应用框架主要包含基础支撑层、数据互动层、模型构建层和功能层。

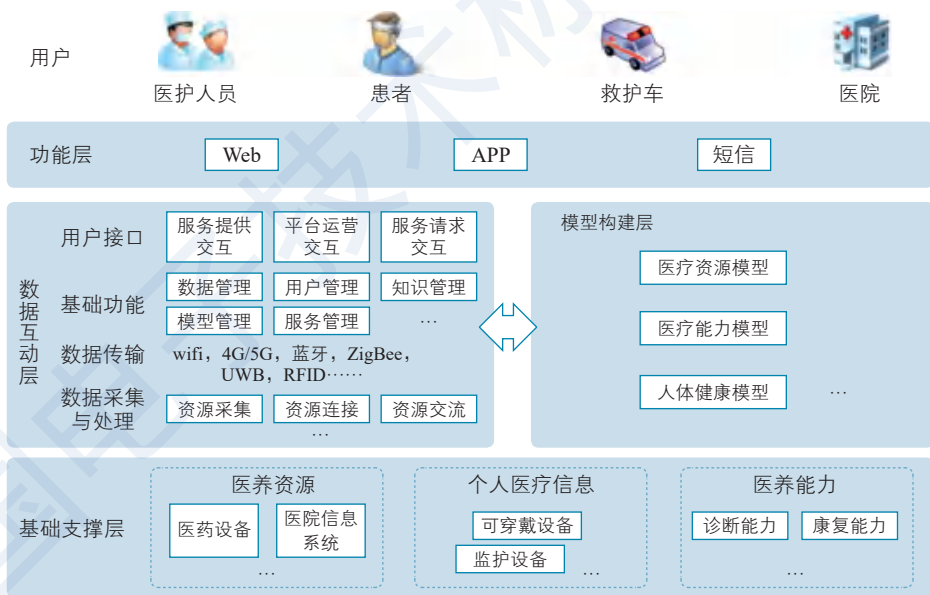


图 14 数字孪生智慧健康应用框架

基础支撑层

基础支撑层主要是与患者相关的软硬件资源和医院信息系统。如：医疗设备包括 CT 机、磁共振成像和理疗设备等，以及与硬件配套的专业软件（如健康信息系统）。医疗信息包括一些可穿戴设备（血压计、心率监测仪）以及一些其他智能系统采集到的信息。可穿戴设备在医学领域的相关产品包括血糖监测仪、心电监测仪、胎心监护仪、心电仪、血压计等。一些电子科技巨头生产用于健康监测的智能可穿戴设备，如谷歌、三星、华为小米等都已推出消费级可穿戴医疗设备，华为、索尼、LG、Garmin、Razer 等厂商也推出智能手环、智能眼镜等可穿戴产品。

数据互动层

数据将医疗资源的数据进行收集、分类、整合为平台提供支持。在数据采集方面，通过 RFID 标签、二维码、传感器等技术识别物体及其位置。医疗资源、信息等数据通过 4G/5G 网络上传到云平台。采集的数据主要包括诊断数据、监测数据和历史病例数据等。进入数据池的多源异构数据进行整合后，将数据进行虚拟化、服务化处理，从而实现数据的输入输出。

模型构建层

基于数据互动层处理的数据，建立物理对象的虚拟模型，比如患者和医疗资源的医疗资源模型，医疗能力模型和人体健康模型。这些孪生模型和物理实体进行实时数据交互，从而实现物理设备、虚拟模型、云健康系统的全要素、全服务、全流程的数据集成和聚合。同时模型构建层的基础功能包括服务管理、数据管理、知识管理和用户管理。其中，服务管理主要负责医疗资源配置、医护人员配置和在线挂号等服务。数据管理主要是负责数据存储、分析和传输。知识管理平台主要负责隐性知识的存储、表示、挖掘、搜索和分析等工作。用户管理平台提供了用户基本信息管理、用户信息管理和用户遗传信息管理功能管理等。

功能层

数字孪生智慧健康可通过手机、PC 终端、医疗系统和专用设备进行应用。如：微信推出“服务号”功能，患者可以通过医院的微信服务号进行诊疗卡办理、预约挂号、全流程缴费等，大大减轻了医院的接诊压力，提高了管理效率。基于微信平台，提供在线问诊功能，方便患者开药检查。医疗机构通过获取患者信息，向患者发送健康建议，并进行资源分配模拟。为患者提供实时监控、危机预警、医疗指导等服务。第三方软件使第三方医疗服务机构、政府获取计费信息，保证医疗服务费用支付安全、快速支付等相关功能。

安全系统与信息共享标准

安全系统负责确保医疗数字孪生系统中所有层的安全。包括系统和平台安全、网络安全、医疗数据安全、用户个人隐私和信息安全、应用安全和安全管理。防止来自第三方的恶意攻击、信息和数据的盗窃和篡改至关重要。安全系统确保整个智能医疗系统具备灾备、应急响应、监控和管理等安全功能。

除了上述功能，智慧健康平台还需要标准和系统规范模块，保证医疗信息实现跨应用、跨系统、跨平台的共享。这是为了保证医疗保健数据收集、数据共享和交换以及应用程序服务管理的标准化。

(2) 典型应用场景介绍

基于数字孪生的智慧健康典型应用场景如图所示。主要包括：健康实时监控、健康预测分析和健康医疗诊断三个方面。

数字孪生在健康实时监控方面主要应用于以下场景：

场景 1：急性疾病一般存在一定诱因，在突发前会有一些的征兆。传统手段没有进行征兆监控。数字孪生实现了实时健康状态监控：根据急性疾病突发前的征兆可进行预警，为患者留有紧急处理时间。

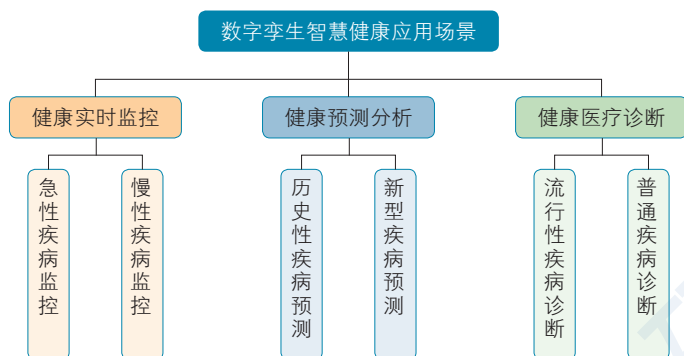


图 15 基于数字孪生的智慧健康典型应用场景

场景 2：慢性疾病发病相对缓慢，在病情达到一定程度后治疗极为困难。传统手段需要阶段性诊断，了解病情进展情况。数字孪生实现了实时健康状态监控：通过透明化持续观察病情进展情况，使病情得以及时治疗。

数字孪生在健康预测分析方面主要应用于以下场景：

场景 1：当患者存在历史性疾病时，医生通常需要掌握历史病例来进行诊断。传统手段是通过电子病例、纸质病例和患者口述辅助医生诊断。数字孪生实现了健康预测分析：通过患者历史数据预测疾病类型，辅助医生快速做出诊断。

场景 2：当患者患有新型疾病时，医生通常根据患病症状来进行诊断。传统手段是通过医生经验采用排除法诊断疾病类型。数字孪生实现了健康预测分析：通过相似症状和患者本身历史疾病信息，预测患者疾病类型。

数字孪生在健康医疗诊断方面主要应用于以下场景：

场景 1：针对流行性疾病的诊断需要根据患者的发病症状和流行疾病类型进行判断。传统诊断方法依靠医生经验进行逐步排查。数字孪生实现了健康医疗诊断：通过实时监控当前流行疾病和患者本身症状，辅助

医生快速诊断患者的患病类型并给出处理措施。

场景 2：针对普通疾病的诊断多采用逐步排除法。传统诊断方法需要依赖医生丰富经验和相关检查得出诊断结果。数字孪生实现了健康医疗诊断：通过结合监测的人体健康指标和历史病例，辅助医生快速诊断患者的患病类型并给出处理措施。

4. 智慧城市领域数字孪生应用

(1) 数字孪生应用概述

中国以“智慧城市”和“新基建”为代表的建设模式虽然起步较晚，但爆发速度前所未有的。目前全球近 1000 个提出智慧化发展的城市中，有近 500 个中国城市，占全球数量的 48%。这为中国下一阶段的城市和基础设施发展奠定了基础。

2019 年中国新型智慧城市规模超过 9000 亿元，未来几年将保持较快速度增长，预计到 2023 年市场规模将超过 1.3 万亿元。当前，安全综治、智慧园区、智慧交通是智慧城市建设投入的重点，三大细分场景规模占智慧城市建设总规模的 71%，而城市级平台、机器人等新技术和产品则在快速落地，被更多城市建设方采纳和应用。

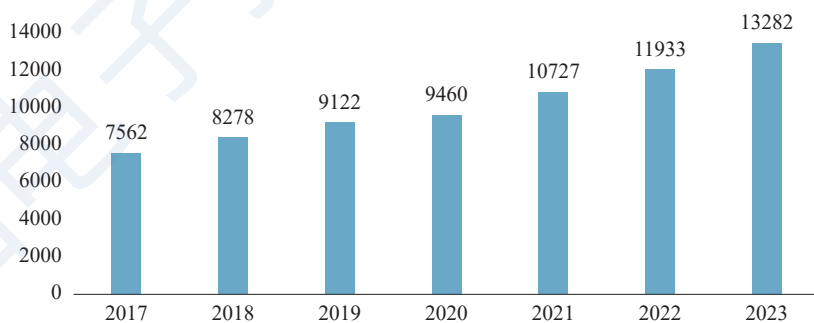


图 16 2018-2023 年中国新型智慧城市市场规模及预测（单位：亿元）^①

① 特斯联，智慧城市行业与市场调研报告

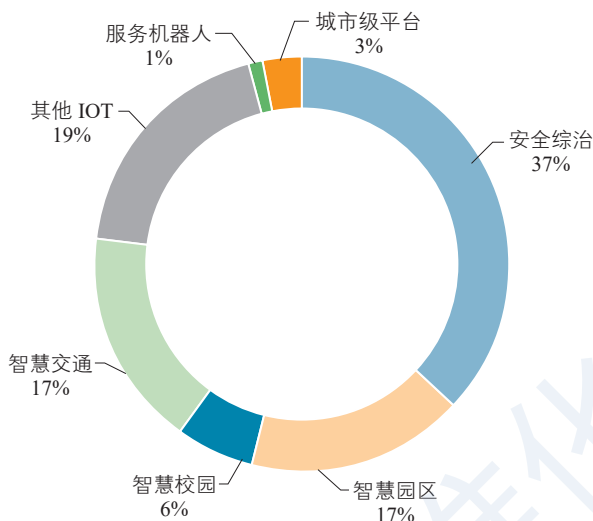


图 17 中国城市智慧化细分市场占比 [21]

数字孪生城市则是数字孪生技术在城市层面的广泛应用，通过构建城市物理世界及网络虚拟空间一一对应、相互映射、协同交互的复杂系统，在网络空间再造一个与之匹配、对应的孪生城市，实现城市全要素数字化和虚拟化、城市状态实时化和可视化、城市管理决策协同化和智能化，形成物理维度上的实体世界和信息维度上的虚拟世界同生共存、虚实交融的城市发展新格局。数字孪生城市既可以理解为实体城市在虚拟空间的映射状态，也可以视为支撑新型智慧城市建设的复杂综合技术体系，它支撑并推进城市规划、建设、管理，确保城市安全、有序运行。

数字孪生城市主要有新型基础设施、智能运行中枢、智慧应用体系三大横向的分层：

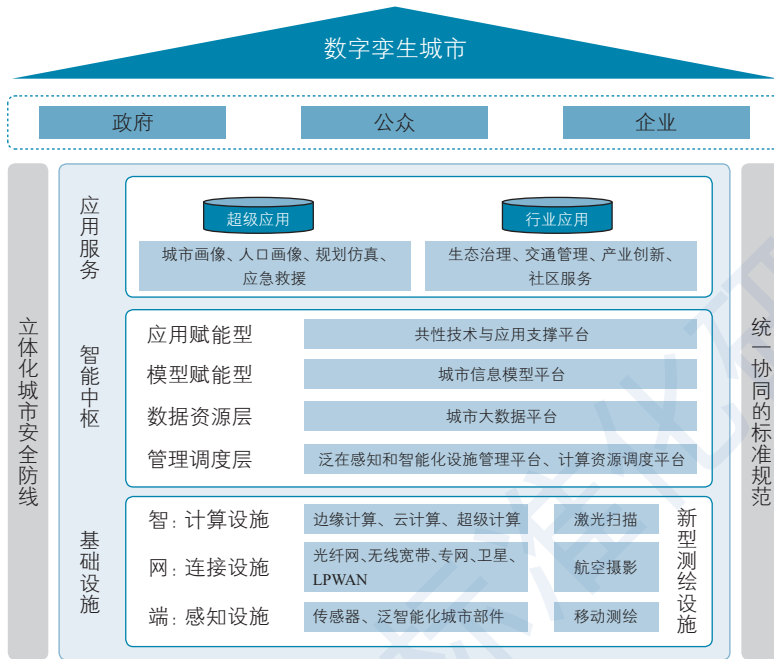


图 18 数字孪生城市

基础设施层

城市新型基础设施包括全域感知设施 (包括泛智能化的市政设施和城市部件)、网络连接设施和智能计算设施。与传统智慧城市不同的是,数字孪生城市的基础设施还包括激光扫描、航空摄影、移动测绘等新型测绘设施,旨在采集和更新城市地理信息和实景三维数据,确保两个世界的实时镜像和同步运行。

智能运行中枢

智能运行中枢是数字孪生城市的能力中台,由五个核心平台承载,一是泛在感知与智能设施管理平台,对城市感知体系和智能化设施进行统一接入、设备管理和反向操控;二是城市大数据平台,汇聚全域全量政务和社会数据,与城市信息模型平台整合,展现城市全貌和运行状态,成为数据驱动治理模式的强大基础。三是城市信息模型平台,与城市大数

据平台融合，成为城市的数字底座，是数字孪生城市精准映射虚实互动的核心。四是共性技术赋能与应用支撑平台，汇聚人工智能、大数据、区块链、AR/VR 等新技术基础服务能力，以及数字孪生城市特有的场景服务、数据服务、仿真服务等能力，为上层应用提供技术赋能与统一开发服务支撑。五是泛在网络与计算资源调度平台，主要是基于未来软件定义网络(SDN)、云边协同计算等技术，满足数字孪生城市高效调度使用云网资源。

应用服务层

应用服务层是面向政府、行业的业务支撑和智慧应用，基于数字孪生城市的应用服务包含城市大数据画像、人口大数据画像、城市规划仿真模拟、城市综合治理模拟仿真等智能应用，社区网格化治理、道路交通治理、生态环境治理、产业优化治理等行业专题应用。

(2) 典型应用场景介绍

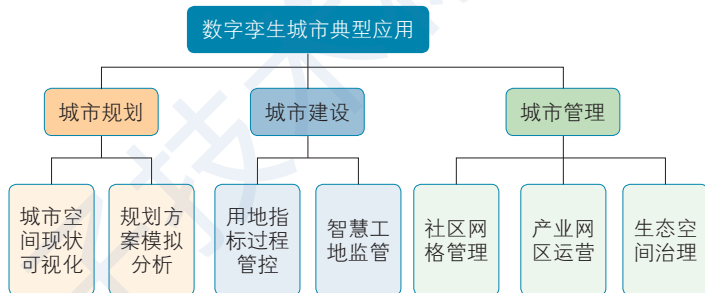


图 19 数字孪生城市典型应用

城市规划应用场景：

场景 1：城市空间现状可视化

城市的现状研究包含地上地下，室内室外，自然地形等，传统的测绘或者研究结果多数分散在各个部门。并且测绘的结果无法实时的展示或者更新。

数字孪生平台可以对各类现状数据进行分类和整合。比如地下结构数据，实现城市地质调查数据管理、展示、分析与共享的二三维一体化解决方案。满足地质调查成果数字化、成果立体模型化、成果表达多样化、成果服务广泛化的要求为目标，提供了一个面向城市多源异构地质数据的管理平台、面向专业人员研究的工作平台、面向政府部门及企事业单位的三维可视化决策辅助支持平台和面向社会公众的信息服务平台。

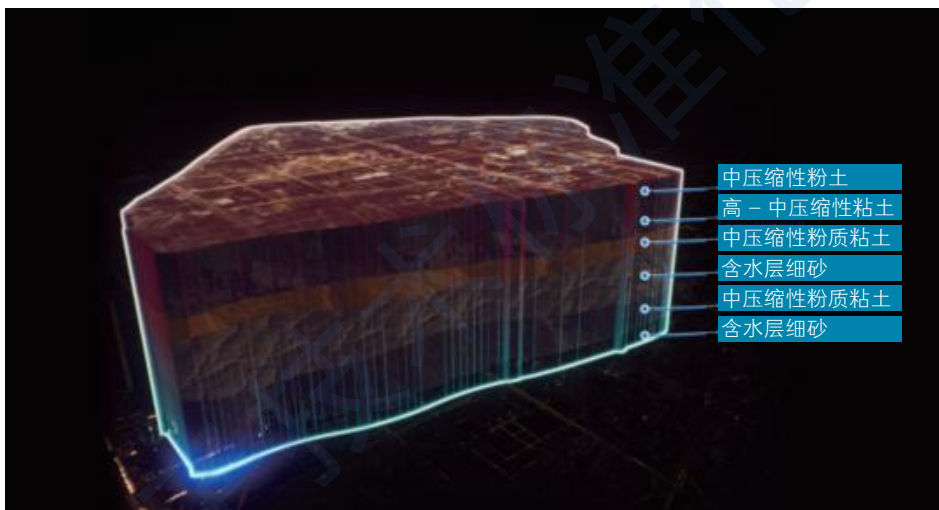


图 20 数字孪生实现地质调查

DEM 数据 - 等高线展示城市发展的基础现状。场景中展示城市的地质和高程信息。城市发展的现状不仅仅是数字孪生场景的基础也是真实城市规划建设管理业务的基础。城市现状的人口、用地、地质、风向等数据作为城市发展的数据基础。

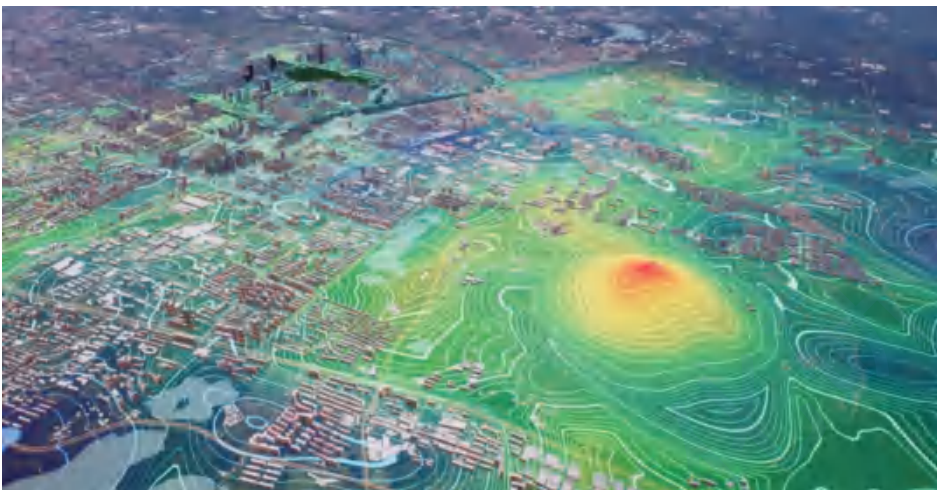


图 21 等高线展示

场景 2：城市规划设计方案对比模拟分析

总体规划与详细规划城市方案设计阶段，可将未来城市规划面貌按照 1:1 复原真实城市空间，不同于以往传统的规划图纸与效果图，以最直观的方式呈现在城市管理者，城市设计者与大众面前。数据面板融合了城市数据概况，人口密度，新城人口规划、建设用地规划、主城区规划等规划类相关数据，直观展示城市现状与未来规划指标。

城市建设应用场景：

场景 3：城市建设用地指标管控（控规盒子）

控规盒子功能模块，结合控规指标中对于每一个地块的用地性质、限高、退界线等信息。将控规指标三维化、可视化。

方案比选采用双屏显示对比同一地块的不同方案。真正实现直观、便捷的方案比对与方案查看。规划指标审核消防指标,建筑限高、建筑退界、用地红线等规划指标可视化。

城市地下综合管廊，可视化统一集成式管理，提高运维效率。

城市生长通过不同年份的规划数据导入，可拖动年份时间轴查看过

去及未来年份的区域规划用地，可实现跨时空总览城市发展历程与轨迹。

可视域分析，帮助了解城市空间内任一点的可见区域情况，其中绿色为可见区域，红色为不可见区域。为城市建筑设计方案与城市安防摄像头布摄选点提供参考依据。



图 22 城市建设用地指标管控（控规盒子）

场景 4：建设工地安全监管

在城市设计与施工阶段，在实现工程施工可视化智能管理的前提下，提高工程管理信息化水平。数据面板展示环境实时监测数据，项目工程信息，节点计划，现场管理人员名单与类型统计。做到项目管理、人员管理、安全管理一张图，保证施工人员安全实现人员高效管理调度，维护施工环境的绿色安全。包括智慧工地（通过三维数字仿真平台与工地基建仿真还原），城市管网（横切面视角和掀地管廊方式精细查看管廊尺寸类别等

详情), 渣车管理 (查询渣车车牌, 追踪渣车轨迹)。



图 23

城市管理应用场景

场景 5: 民生安全, 智慧社区网格管理

结合公安、交通、消防、医疗市政等多部门实时数据, 实现管辖区域内“人、车、地、事、建筑”的全面监控, 辅助公安部门综合掌控大范围城市治安态势。形成统一高效、互联互通、协同共享的智慧监管体系。民生服务一张图。重点人员监控, 独居老人关怀, 楼宇安全事件, 人员聚集预警, 城市综合治理。

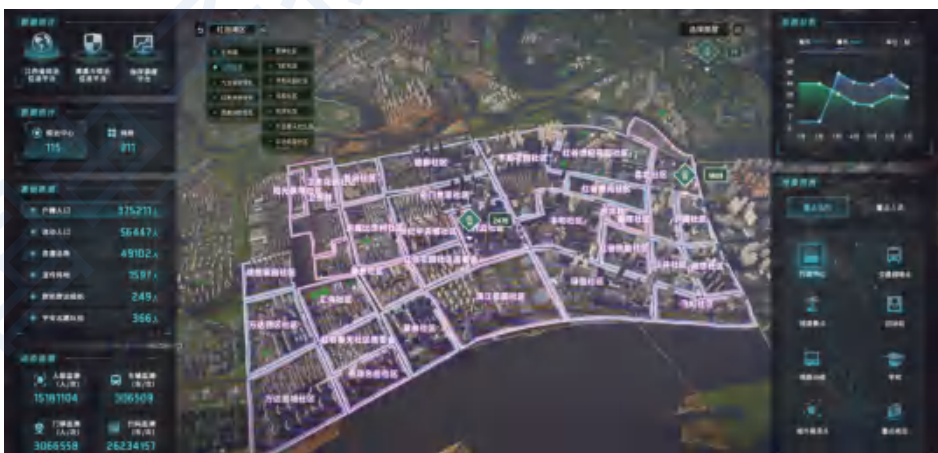


图 24 智慧社区网格管理

场景 6：产业运营，智慧园区综合运营

结合产业园区的发展政策与方向，全方位展示全域招商动态、入驻企业信息等。通过打通政府与企业的数据，更客观切实了解城市招商态势，快速准确地为管理者提供决策支持，为下一步招商计划做参考；同时了解不同区域下不同企业的现状和动态，帮助招商人员及时调整招商策略，节省大量时间成本和人力成本。



图 25 智慧园区综合运营

场景 7：生态环保，智慧生态空间治理

通过采集污染源数据、水环境质量数据、空气环境质量数据、噪声数据等环境信息，实时监控感知及时分析与处理，并做出相应的处理结果辅助决策建议，以更加高效智能的方式辅助各环保部门进行管理和运维，提升河长制效率，打造绿色城市。

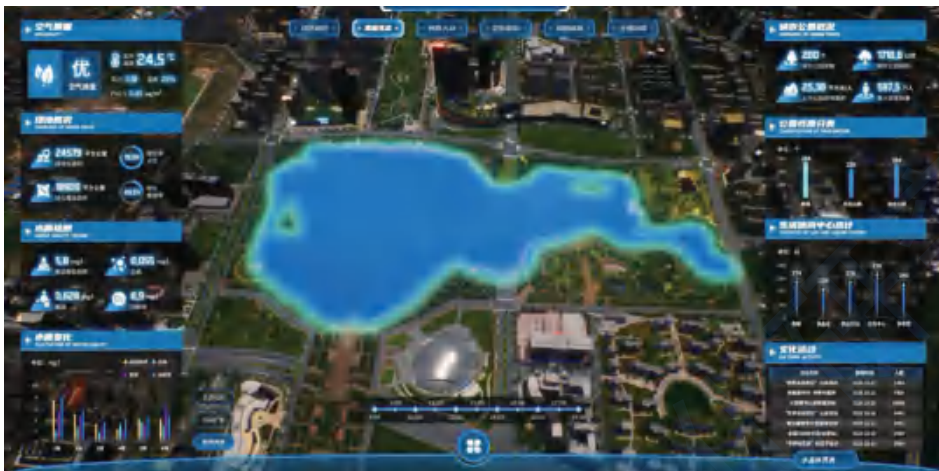


图 26

(3) 数字孪生城市的应用效果

提升城市规划质量和水平。当前的智慧城市规划和顶层设计，大部分都属于概念和功能设计，缺乏与实际人流、物流、资金流的交互，也缺乏对新技术引入带来的影响分析。数字孪生城市执行快速的“假设”分析和虚拟规划，可迅速摸清城市“家底”，精确到一花一木、一路一桥，把握城市运行脉搏；推动城市规划有的放矢、提前布局，在规划前期和建设早期了解城市特性、评估规划影响，避免在不切实际的规划设计上浪费时间，防止在验证阶段重新进行设计，以更少的成本、更快的速度，推动创新技术支撑智慧城市顶层设计落地。

推动以人为核心的城市设计，实现智慧城市建设协同创新。城市居民是新型智慧城市服务的核心，也是城市规划、建设需要考虑的关键因素。数字孪生城市将以人作为城市核心，关注城乡居民出行轨迹、收入水准、家庭结构、日常消费等，对相关数据进行动态监测，并纳入模型，实现协同计算。同时，数字孪生城市通过在“比特空间”上预测人口结构和迁徙轨迹、推演未来的设施布局、评估商业项目影响等，将对实体城市的

设计、建设和实施产生巨大的影响，甚至重塑城市。搭建可感知、可判断、快速反应的数字孪生城市，将支撑城市土地空间规划、重大项目建设，实现按需响应的惠民服务、触手可及的协同指引。

优化智慧城市建设并评估其成效。数字孪生城市体系以及可视化系统以定量与定性方式，建模分析城市交通路况、人流聚集分布、空气质量、水质指标等各维度城市数据，可让决策者和评估者快速、直观地了解智慧化对城市环境、城市运行等状态的提升效果，评判智慧项目的建设效益；实现城市数据挖掘分析，辅助政府在信息化、智慧化建设中的科学决策，避免走弯路或重复、低效建设。

模拟仿真：在数字世界推演城市运行态势

在数字城市仿真，在物理城市执行，使城市建设和发展少走弯路、不留遗憾，是数字孪生城市价值的真正体现。在数字孪生城市中，运用模拟仿真技术，可进行自然现象的仿真、物理力学规律的仿真、人群活动的仿真，自然灾害的仿真等，为城市规划、管理、45 应急救援等制定科学决策，促进城市资源公平和快速调配，支撑建立更加高效智能的城市现代化治理体系。

就目前的发展阶段来看，对整个城市进行模拟仿真的软件产品还未出现，仿真软件的应用范围还是局限于部分细分领域，如用于交通仿真的 SUMO、VISSIM、Carsim，水动力仿真的 MIKE21、HEC、SWIMM，景观环境仿真的 SITES 平台和物流固废仿真的 Anylogic。国内仿真软件与国外相比还有较大差距，国外厂商掌握 CAE 有限元算法和 CAD 核心几何内核算法，国内企业只能通过授权经营方式使用国外几何内核，基本不具有自主知识产权，多数厂商主要基于国外产品进行二次开发。

随着国内仿真软件的快速发展，在交通等部分领域已形成一定优势。51VR 公司自主研发推出 51Sim-One 无人驾驶仿真平台，通过自主研发

的静态高精度场景数据编辑和自动化转换工具，既可对已采集场景的多种数据进行融合，将实体非结构化场景快速生成高拟真的结构化虚拟仿真场景，又可根据自动驾驶测试任务的需要从无到有构建仿真训练流程与评价体系，极大提升自动驾驶训练效率。百度公司 2017 年对外发布了 Apollo（阿波罗）平台，其中的仿真平台可以提供贯穿自动驾驶研发迭代过程的完整解决方案，仿真服务拥有大量的实际路况及自动驾驶场景数据，基于大规模云端计算容量，打造日行百万公里的虚拟运行能力。中视典数字科技公司依托自主知识产权的虚拟现实平台软件，专门针对数字城市完全自主研发出产品：数字城市仿真平台（VRP-Digicity）、三维网络平台（VRPIE）、三维仿真系统开发包（VRP-SDK）等，能满足不同数字城市规划管理领域，不同层次客户对数字仿真的需求。

深度学习：推动城市自我学习智慧成长

数字孪生城市对人工智能领域深度学习、自我优化技术的应用，可使城市从以往部门之间各自为战、治标不治本、被动迟缓的基层治理模式，转变为全域协同治理、问题智能响应、需求提前预判的模式，构建起高效智慧的城市运行规则。在数字孪生城市中，对深度学习技术的应用主要集中在海量数据处理、系统运行优化等方面。

深度学习模型和技术源流多来自西方人工智能科学家，我国多数人工智能企业缺少原创算法，但近年来科研实力大幅增长，目前我国深度学习领域的差距主要在于缺乏体系化的产品、生态，未能进一步沉淀市场应用。

目前，数字孪生城市中较为成熟的深度学习产品目前有泰瑞数创 CIM Generator 空间语义平台和商汤科技 SenseEarth 平台。前者是一款融合了深度语义信息的 AI PAAS 平台，它包含了一个强大的人工智能内核，可将各类数据自动解译生成城市语义模型。同时支持多数据源，包括遥

感影像、航空影像、激光点云、建筑图纸等数据输入，并内置插件式 AI 组件，包括深度学习算法框架，内插多组网络模型，支持分布式架构。SenseEarth 智能遥感影像解译平台是一款面向公众公开的遥感影像浏览及解译在线工具，具有强大的数据解析和洞察能力，可提供在线体验基于卫星影像的道路提取、舰船检测、土地利用分类等人工智能解译功能，并可支撑用户浏览历史影像，以月度为单位对不同时段的影像进行变化检测，快速感知城市的变迁与发展。

5. 智慧建筑领域数字孪生应用

(1) 数字孪生应用概述

“数字孪生建筑”是将数字孪生使能技术应用于建筑科技的新技术，简单说就是利用物理建筑模型，使用各种传感器全方位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建筑的全生命周期过程。

数字孪生建筑具有四大特点：精准映射、虚实交互、软件定义、智能干预。

1、精准映射：数字孪生建筑通过各层面的传感器布设，实现对建筑的全面数字化建模，以及对建筑运行状态的充分感知、动态监测，形成虚拟建筑在信息维度上对实体建筑的精准信息表达和映射。

2、虚实交互：未来数字孪生建筑中，在建筑实体空间可观察各类痕迹，在建筑虚拟空间可搜索各类信息，建筑规划、建设以及民众的各类活动，不仅在实体空间，而且在虚拟空间得到极大扩充，虚实融合、虚实协同将定义建筑未来发展新模式。

3、软件定义：数字孪生建筑针对物理建筑建立相对应的虚拟模型，并以软件的方式模拟建筑人、事、物在真实环境下的行为，通过云端和边缘计算，软性指引和操控建筑的电热能源调度等。

4、智能干预：通过在“数字孪生建筑”上规划设计、模拟仿真等，将建筑可能产生的不良影响、矛盾冲突、潜在危险进行智能预警，并提供合理可行的对策建议，以未来视角智能干预建筑原有发展轨迹和运行，进而指引和优化实体建筑的规划、管理，改善服务。

数字孪生建筑的核心环节在于 BIM 的应用。建筑信息模型（BIM）是一种应用于工程设计、建造、管理的数据化工具和一种信息建模技术，可以实现建筑设计的三维可视化，BIM 技术叠加时间轴形成 4D 模型，进一步叠加成本信息可构筑 5D 模型，对建筑进行多维度考量，可贯穿建筑全生命周期中规划、概念设计、细节设计、分析、出图、预制、施工、运营维护、拆除或翻新等所有环节。

具体到 BIM 软件的核心领域，目前国内厂商占建筑结构设计软件市场优势，建筑信息化模型软件市场仍以国外厂商为主导：

（1）因建筑行业信息化发展迅速，作为建筑信息化的核心软件产品，建筑结构设计软件也吸引了越来越多企业进入。但是由于建筑结构设计软件专业技术门槛较高，目前国内外结构专业设计软件公司的集中度较高，主流软件包括北京盈建科软件股份有限公司 YJK 建筑结构软件系统、建研科技股份有限公司研发的 PKPM 系列软件、北京探索者软件技术股份有限公司的探索者结构系列软件，MIDAS Information Technology Co., Ltd. 的 Midas 系列软件、上海佳构软件科技有限公司 STRAT 软件、深圳市斯维尔科技股份有限公司 SUP 系列软件等几款国内外结构设计软件产品。因国外产品价格较高，对中国本土建筑规范理解不足，国外软件只在少量超高层复杂结构设计中有所应用，市场份额较小；而国内的软件，如 PKPM 系列软件等等，因研发应用较早，经过了多年发展在国内市场中具有较高的占有率。

（2）国内建筑信息化模型（BIM）软件市场上，以 Autodesk、

DassaultSystems、GRAPHISOFT、Tekla 为代表的国外软件厂商依然在设计 BIM 软件领域占据绝对优势，国内企业的 BIM 应用软件都采用国外的 Revit、Tekla 等平台产品。中国本土 BIM 软件厂商数量较多，开发的软件产品大多属于应用型软件，运行于基础平台软件环境中，这类应用型软件以项目业务为导向，注重将软件产品与本地化业务相结合，以提升项目推进效率，而本土软件厂商在提供应用软件产品的同时，也提供相关配套服务和业务解决方案。但近几年国内 BIM 软件厂商由建造、施工 BIM 软件向协同协作端软件发力，不断将触角伸向产业链上下游，通过本地化产品和配套的技术服务支撑，取得了相当好的成绩。因 BIM 软件研发需要大量的资金投入，目前国内实力的 BIM 研发企业主要有鲁班、广联达、鸿业、品茗等实力较大的软件厂商。

现在，知名的 BIM 软件供应商有 Autodesk、Trimble、Bentley、广联达、RIB Software 等：

表 5 全球主要 BIM 软件供应商

公司名称	简介
广联达	公司从 2009 年开始与斯坦福、马里兰大学合作 BIM 研究，2011 年 BIM 5D Beta 版发布，2014 年收购芬兰 Prog man 公司，正式发布产品 BIM5D，到 2018 年底，BIM5D 产品已覆盖全国 1000 多家施工企业，在 2000 多个工程项目中实现应用
Autodesk	主要有 Autodesk Revit、AutoCADCivil3D 等产品，Revit 系列软件构建于 Revit 平台之上，是完整的、针对特定专业的建筑设计和文档系统。AutoCADCivil3D 能够帮助专业人员保持协调一致，更轻松、更高效地探索设计方案，分析项目性能
Bentley Systems	产品：ProjectWise，针对基础设施项目的建造、工程、施工和运营进行设计和建造开发的项目协同工作和工程信息管理
Trimble	公司的 BIM to Field 解决方案，可帮助承包商全面掌握现场的项目进程，本方案集土方计量、结构放样、MEP 放样以及 QA/QC 评估管理、现场扫描、建立现状模型与 BIM 模型比对、优化净空、优化管线排布方案、施工模拟等功能于一身

(续表)

公司名称	简介
RIB Software	RIB 利用最先进的技术打造 iTWO4.0——全球第一个基于云的 5DBIM 企业级平台，助力行业实现数字化转型升级
鲁班软件	鲁班企业级 BIM 系统是以 BIM 技术为依托的工程基础数据平台，将 BIM 技术应用到了建筑行业的项目管理全过程当中

(2) 典型应用场景介绍

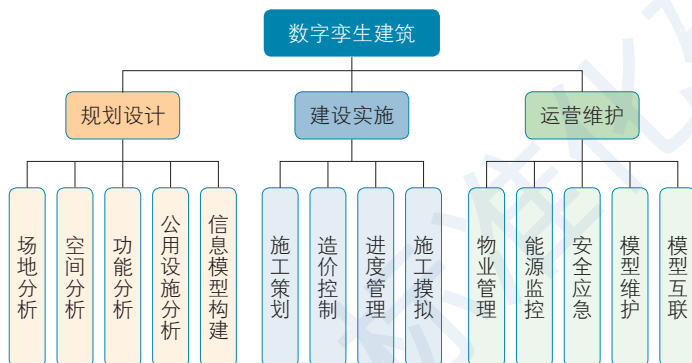


图 27 数字孪生建筑典型应用场景

(1) 数字孪生建筑在规划设计方面主要应用于以下场景

场地分析：传统的场地分析存在诸如定量分析不足、主观因素过重、无法处理大量数据信息等弊端；BIM 结合地理信息系统 (Geographi Information System, 简称 (GIS)，对场地及拟建的建筑物空间数据进行建模，通过 BIM 及 GIS 软件的强大功能，迅速得出令人信服的分析结果，帮助项目在规划阶段评估场地的使用条件和特点，从而做出新建项目最理想的场地规划、交通流线组织关系、建筑布局等关键决策。

功能分析：项目投资方可以使用 BIM 来评估设计方案的布局、视野、照明、安全、人体工程学、声学、纹理、色彩及规范的遵守情况。BIM 甚至可以做到建筑局部的细节推敲，迅速分析设计和施工中可能需要应对的问题。方案论证阶段还可以借助 BIM 提供方便的、低成本的不同解

决方案供项目投资方进行选择，通过数据对比和模拟分析，找出不同解决方案的优缺点，帮助项目投资方迅速评估建筑投资方案的成本和时间。对设计师来说，通过 BIM 来评估所设计的空间，可以获得较高的互动效应，以便从使用者和业主处获得积极的反馈。设计的实时修改往往基于最终用户的反馈，在 BIM 平台下，项目各方关注的焦点问题比较容易得到直观的展现并迅速达成共识，相应的需要决策的时间也会比以往减少。

空间分析：详图设计阶段发现不合格需要修改，造成设计的巨大浪费，BIM 能够帮助项目团队在功能规划阶段，通过对空间进行分析来理解复杂空间的标准和法规，从而节省时间，提供对团队更多增值活动的可能。特别是在客户讨论需求、选择以及分析最佳方案时，能借助 BIM 及相关分析数据，做出关键性的决定。BIM 在建筑策划阶段的应用成果还会帮助建筑师在建筑设计阶段随时查看初步设计是否符合业主要求，是否满足建筑策划阶段得到的设计依据。

公用设施分析：在厂区管网规划中，通常相关部门各行其道，造成道路经常被开挖，管线经常被挖断，造成很大经济损失。利用数字孪生技术通过对各类管线进行统一信息化处理，以市政规划数据库为设计基础进行相关管道的设计布线，就可避免错误发生，从而优化管网布置，提高设计及经济效率。

信息模型构建：以往的二维平面设计对建筑空间尤其是复杂的建筑空间表达效率较低，BIM 是以三维数字技术为基础，集成了建筑工程项目各种相关信息的工程数据模型，BIM 是对工程项目设施实体与功能特性的数字化表达。一个完善的信息模型，能够连接建筑项目生命期不同阶段的数据、过程和资源，是对工程对象的完整描述，可被建设项目各参与方普遍使用，支持建设项目生命期中动态的工程信息创建、管理和共享。建筑信息模型同时又是一种应用于设计、建造、管理的数字化方法，

这种方法支持建筑工程的集成管理环境，可以使建筑工程在其整个进程中显著提高效率和大量减少风险。

(2) 数字孪生建筑在建设实施环节主要应用于以下场景

施工策划：施工组织是对施工活动实行科学管理的重要手段，它决定了各阶段的施工准备工作内容，传统施工组织设计很难协调施工过程中各施工单位、各施工工种、各项资源之间的相互关系。BIM 施工组织可视化在编制施工方案、施工组织设计的同时，将 BIM 技术融入到整个环节中去，以直观可视化的方式进行方案编制辅助、方案模拟验证、方案优化、方案敲定等。从方案模型创建到方案优化再到方案敲定输出，全部基于 BIM 技术可视化呈现，更加有益于保证施工组织设计可行性。

造价控制：施工单位精细化管理很难实现的根本原因在于，海量的工程数据无法快速准确获取，以便更好的支持资源计划，致使经验主义盛行。而数字孪生建筑可以让建筑模型快速准确的获得工程基础数据，为施工单位制定精准的资源计划提供有效支持，大大减少了资源、物流和仓储环节的浪费，为实现限额领料、消耗控制提供技术支撑。

进度管理：建筑施工是一个高度动态的过程，随着建筑工程规模不断扩大，复杂程度不断提高，使得施工项目管理变得极为复杂。通过将 BIM 与施工进度计划相链接，将空间信息与时间信息整合在一个可视的 4D (3D+Time) 模型中，可以直观、精确地反映整个建筑的施工过程。可以在项目建造过程中合理制定施工计划、4D 精确掌握施工进度，优化使用施工资源以及科学地进行场地布置，对整个工程的施工进度、资源和质量进行统一管理和控制，以缩短工期、降低成本、提高质量。

施工模拟：通过 BIM 可以对项目的重点或难点部分进行可建性模拟，对于一些重要的施工环节或采用新施工工艺的关键部位进行模拟和分析，如可进行深基坑支护分析，各专业综合管线干涉分析等，也可以

利用 BIM 技术结合施工组织计划进行预演以提高复杂建筑体系的可造性。借助 BIM 对施工组织的模拟，项目管理方能够非常直观地了解整个施工安装环节的时间节点和安装工序，并清晰把握在安装过程中的难点和要点，施工方也可以进一步对原有安装方案进行优化和改善，以提高施工效率和施工方案的安全性。

（3）数字孪生在运营维护主要应用于以下场景

物业管理：物业管理部门需要得到的不只是常规的设计竣工图纸，还需要能正确反映真实的设备状态、材料安装使用情况等与运营维护相关的文档和资料。而数字孪生的建立正好满足了这一需求，管理人员可以实时系统监控整个体系，结合运营维护管理系统可以充分发挥空间定位和数据记录的优势，合理制定维护计划，分配专人专项维护工作，以降低建筑物在使用过程中出现突发状况的概率。对设备还可以跟踪其维护工作的历史记录，以便对设备的适用状态提前作出判断。

能源监控：传统建筑设计对能源管理的关注程度不高，仅局限于对于数据的测量，在数字孪生的帮助下，可以对建筑物能耗分析、内外部气流模拟、照明分析、人流分析等涉及建筑物性能的的参数进行评估，最终确定、修改系统参数甚至系统改造计划，以提高整个建筑的性能。

安全应急：传统建筑在事故发生的情况下，仅有疏散指示等固定标志。BIM 模型可以提供救援人员紧急状况点的完整信息，与通过与楼宇自动化系统及时获取建筑物及设备状态信息相结合，BIM 模型能清晰地呈现出建筑物内部紧急状况的位置，甚至找到到达紧急状况点最合适的路线，提高应急行动的成效。

模型维护：通常在项目竣工以后，业主得到的是一套设计蓝图和相关设备的技术文件，无法将各项目团队的所有建筑工程信息进行汇总。借助于数字孪生技术，可以根据项目建设进度建立和维护 BIM 模型，实际

上是消除了项目中的信息孤岛，并且将得到的信息结合三维模型进行整理和储存，以备项目全过程中项目各相关利益方随时共享；目前，可以将整个工程项目的 BIM 模型在规划、维护和管理进行统一规划，以确保 BIM 模型信息的准确、时效和安全。

模型互联：传统的建筑设计是二维平面设计，无法对建筑全生命周期各个阶段的数据资源进行整合。智慧城市在建设过程中最重要的一环就是信息化建设，数字孪生技术可以自始至终贯穿建设的全过程，支撑建设过程的各个阶段，实现全程信息化、智能化协同模式；BIM 技术与物联网技术的结合，可以将数据信息与物理线路、虚拟与实际的接口连接起来，实现有效的现场实际操作和个人行为管理方法。总之，BIM 是未来工程建设管理方法的技术基础，物联网是关键支撑点。两者的融合将实现城市智慧式管理和运行，进而为城市中的人创造更美好的生活，促进城市的和谐、可持续发展。

（四）数字孪生技术体系

1. 数字孪生技术架构概述

数字孪生以数字化方式拷贝一个物理对象，模拟对象在现实环境中的行为，对产品、制造过程乃至整个工厂进行虚拟仿真，目的是了解资产的状态，响应变化，改善业务运营和增加价值。在万物互联时代此种软件设计模式的重要性尤为突出，为了达到物理实体与数字实体之间的互动，需要经历诸多的过程也需要很多基础的支撑技术做为依托，更需要经历很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。首先我们需要构建物理实体在数字世界中对应的实体模型，就需要利用知识理、数字化等技术构建一个数字模型，而且我们对构建的数字模型需要结合行业特性做出评分，是否可以在商业中投入使用；有了模型还需要

利用物联网技术将真实世界中的物理实体元信息采集、传输、同步、增强之后得到我们业务中可以使用的通用数据；通过这些数据可以仿真分析得到数字世界中的虚拟模型，在此基础之上我们可以利用 AR/VR/MR/GIS 等技术在数字世界完整复现出来，人们才能更友好的与物理实体交互；在这个基础之上我们可以结合人工智能、大数据、云计算等技术做数字孪生体的描述、诊断、预警 / 预测及智能决策等共性应用赋能给各垂直行业。



图 28 数字孪生整体分层架构

2. 数字孪生关键技术及成熟度

(1) 模型构建层

建模“数字化”是对物理世界数字化的过程。这个过程需要将物理对象表达为计算机和网络所能识别的数字模型。建模的目的是将我们对物理世界或问题的理解进行简化和模型化。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“数字化”阶段的核心。

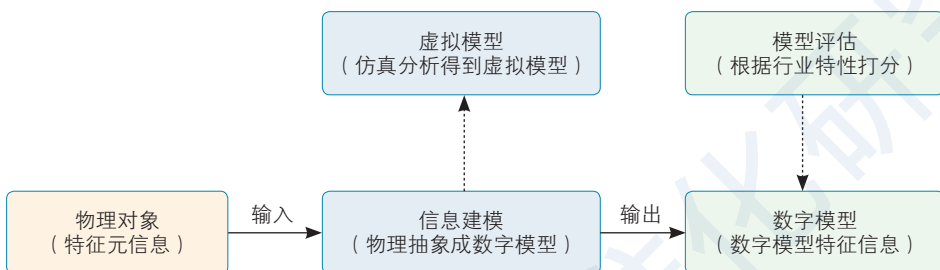


图 29 模型构建流程示意图

概念模型和模型实现方法

数字孪生模型构建的内容主要涉及概念模型和模型实现方法。其中，概念模型从宏观角度描述数字孪生系统的架构，具有一定的普适性；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 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。目前业界已提出多种概念模型，包括：

1) 基于仿真数据库的微内核数字孪生平台架构，通过仿真数据库对实时传感器数据的主动管理，为仿真模型的修正和更逼真的现实映射提供支持；

2) 自动模型生成和在线仿真的数字孪生建模方法，首先选择静态仿真模型作为初始模型，接着基于数据匹配方法由静态模型自动生成动态

仿真模型，并结合多种模型提升仿真准确度，最终通过实时数据反馈实现在线仿真；

3) 包含物理实体、数据层、信息处理与优化层三层的数字孪生建模流程概念框架，以指导工业生产数字孪生模型的构建；

4) 基于模型融合的数字孪生建模方法，通过多种数理仿真模型的组合构建复杂的虚拟实体，并提出基于锚点的虚拟实体校准方法；

5) 全参数数字孪生的实现框架，将数字孪生分成物理层、信息处理层、虚拟层三层，基于数据采集、传输、处理、匹配等流程实现上层数字孪生应用；

6) 由物理实体、虚拟实体、连接、孪生数据、服务组成的数字孪生五维模型，强调了由物理数据、虚拟数据、服务数据和知识等组成的孪生数据对物理设备、虚拟设备和服务等的驱动作用，并探讨了数字孪生五维模型在多个领域的应用思路与方案；

7) 按照数据采集到应用分为数据保障层、建模计算层、数字孪生功能层和沉浸式体验层的四层模型，依次实现数据采集、传输和处理、仿真建模、功能设计、结果呈现等功能。

信息模型的建立

数字孪生信息模型的建立以实现业务功能为目标，按照信息模型建立方法及模型属性信息要求进行。数字孪生信息模型库包括以人员、设备设施、物料材料、场地环境等信息为主要内容的对象模型库和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。数字孪生信息模型框架如下图所示。

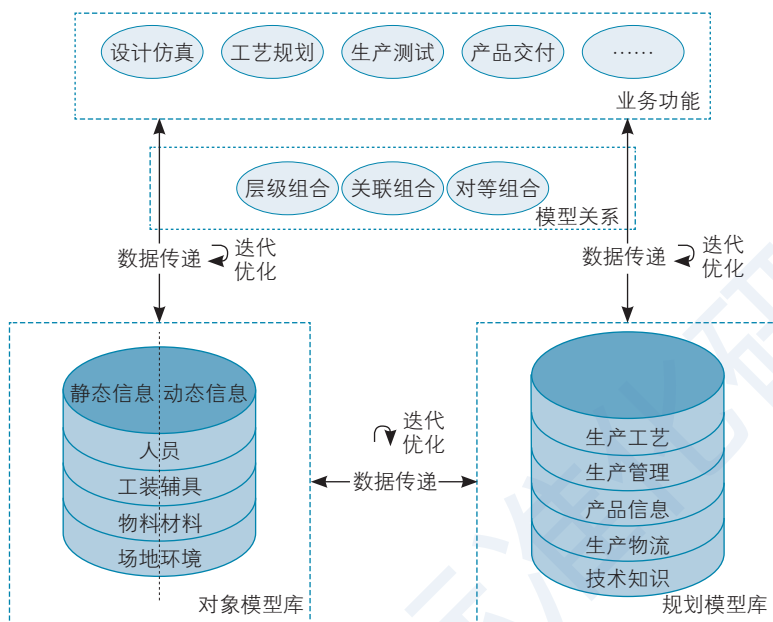


图 30 信息模型框架

a) 模型业务功能

模型业务功能按照产品生命周期的四个主要功能展开：

- 设计仿真基于产品原型库、设计机理库等设计基础信息，建立产品的虚拟模型。在设计仿真阶段，还应将产品的虚拟模型在包括设备生产能力、设备生产环境的虚拟工厂运行环境中进行模拟生产，测试产品设计的合理性、可靠性，提升产品研发效率。
- 工艺流程规划基于工艺知识库、设备布局信息、仓储情况等工艺流程规划基础信息，完成产品工艺流程规划。在工艺流程规划阶段，还应将包括工艺信息的产品虚拟模型在虚拟工厂的生产规划中进行流程模拟，测试产品工艺规划和流程规划的合理性、可靠性，提升工艺流程规划效率。
- 生产测试基于设备布局信息、设备运行信息等基础信息及包括工艺信息和生产信息的产品虚拟模型，对产品的生产环节进行模拟

测试，测试产品设计、工艺规划及生产流程的合理性和可靠性，提升产品设计成功率和测试效率。

- 产品交付分为实体产品交付和产品虚拟模型交付两部分。其中产品虚拟模型应包括产品的外观信息、功能信息、工艺信息等内容，可适当提前于实体产品提供给用户，以满足用户提前进行模拟测试的需求。

b) 对象模型库

对象模型库包含人员模型、设备设施模型、物料材料模型、场地环境模型及其相对应的模型关系。模型元素的属性信息划分为静态信息和动态信息两部分，其中静态信息包括身份信息、属性信息、计划信息和静态关系信息，动态信息包括状态信息、位置信息、过程信息及动态关系信息。

c) 规则模型库

规则模型库包含生产工艺规则模型库、生产管理规则模型库、产品信息规则模型库、生产物流规则模型库与技术知识规则模型库等：

- 生产工艺规则模型库包含工艺基础信息、工艺清单、工艺路线、工艺要求、工艺参数、生产节拍、标准作业等规则模型信息及其相关逻辑规则。
- 生产管理规则模型库包含生产计划信息、排产规则信息、生产班组信息、生产线产能信息、生产进度信息、生产排程约束信息、生产设备效率信息之间的逻辑规则。
- 产品信息规则模型库包含产品主数据、物料清单、产品生产规则、资源清单之间的信息共享与信息交换。
- 生产物流规则模型库包含物料需求、物流路径、输送方式、配送节拍、在制品转运方式、完成入库、出库等与生产物流相关的规则。
- 技术知识规则模型库包含工艺原理、操作经验、仿真模型、软件

算法等。

d) 信息模型组件

不同的信息模型组件可根据需要进行组合，以形成系统、产线等集成组合。按照应用层所提供业务功能的不同要求，信息模型组件间的组合可采用层级组合、关联组合、对等组合等方式：

- 层级组合用以描述不同系统层级的信息模型按照层级关系依次组合的信息模型关系。在层级组合关系的描述下，可将具有从属关系的不同信息模型结合，作为整体进行功能实现。
- 关联组合用以描述不同信息模型之间存在的相互关联关系。在关联组合关系的描述下，可将非从属关系但相互耦合的信息模型建立关系，作为整体进行功能实现。
- 对等组合用以描述不同信息模型之间存在的非耦合关系。在对等关系的描述下，可将独立的非耦合信息模型之间建立关系，作为整体进行功能实现。

(2) 数据互动层

物联网“数字化”中的另一层意思是物理世界本身的状态变为可以被计算机和网络所能感知、识别和分析，这些状态包括位置、属性、性能、健康状态等，物联网技术为原子化向比特化转变提供了完整的解决方案。同时物联网为物理对象和数字对象之间的“互动”提供了通道。“互动”是数字孪生的一个重要特征，主要是指物理对象和数字对象之间的动态互动，当然也隐含了物理对象之间的互动以及数字对象之间的互动。前两者通过物联网实现，而后者则是通过数字线程实现。能够实现多视图模型数据融合的机制或引擎是数字线程技术的核心。

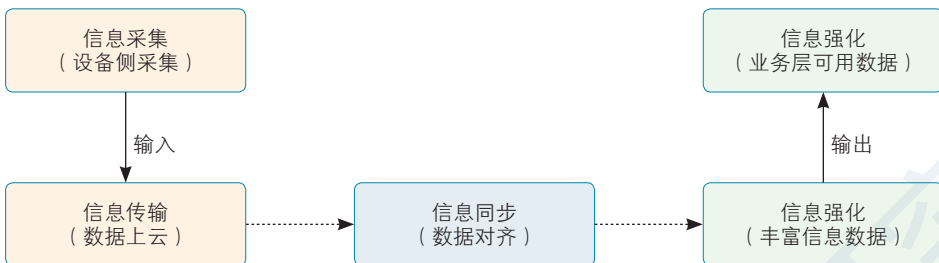


图 31 数据互动流程示意图

信息同步

当前，企业力求着手建立相关产业的互联网平台，将各类时空资源数字化，并以数字空间为载体，链接人与物，打造时空一体的数字孪生技术基础的信息平台，以实现数据的同步和融通联动。以基于 CIM 的 Citybase 为例，其具有以下特点：

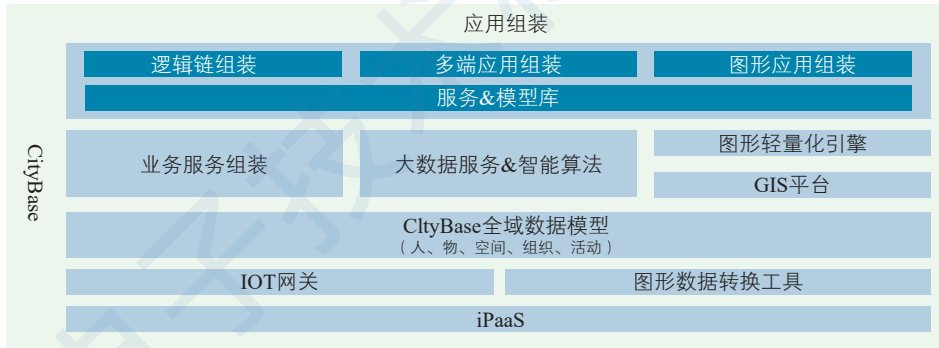


图 32 Citybase 主要技术

数据价值挖掘：监测设备的运行数据，且在此基础上可对设备的全生命周期进行管理，分析挖掘数据价值，辅助运营决策。

数据融通与跨系统联动：从物联网底层进行数据的统一连接和管理，支持数据的灵活调配，可以更简单充分地进行数据融通与跨系统联动，真正做到打破“烟囱式管理”。

空间索引与事件驱动：将设备、数据及事件与空间联系起来。能以空间为线索完成完整的业务闭环，能对各种异常情况进行准确三维空间确定与快速响应。

CityBase 构造了空间数字底板，构建一图多景，技术上支持以下功能：

a) 数据分级可视化及应用，支撑建造、交通、水务、应急等各种城市业务场景；

b) 以空间为核心，融合人、物和行为活动，构建一套可扩展的数据模型；

c) 支持大体量模型轻量化，软件生产工业化，模型库、服务库与应用快速组装；

d) 实现对实时监控视频与三维模型配准融合，生成大范围三维全景动态监控画面，形成一张“无限量”分辨率的大视频，“一张图”看全局，无需切换任何分镜头画面，实现对重点区域整体现场的全景、实时、多角度监控，虚拟线上融合共生；

e) 支持 BIM+ 倾斜摄影 + 影响 + 点云 + MAX 模型，单体模型等的大场景、海量、大体量数据的高逼真渲染。

信息强化

当前，企业通过对多源异构孪生数据的整合和综合运用，建立“人机料法环”各类数据的全面采集和深度分析数字体系，全面建立以数据为驱动的管理模式，有助于探索基于数字孪生的数据驱动型变革新路径。数字孪生的信息强化主要包括以下几个方面进行详细的数据管理：

a) 数据清洗：数据清洗对数据进行重新审查和校验的过程，目的在于删除重复信息、纠正存在的错误，并提供数据一致性。对数据进行重新审查和校验的过程，目的在于删除重复信息、纠正存在的错误，并提供

数据一致性。发现并纠正数据文件中可识别的错误的最后一道程序，包括检查数据一致性，处理无效值和缺失值，去除无用的数据。

b) 数据分类：数据分类主要对清洗过的数据进行分类，使数据的类别清晰、明确。数据分类主要包括以下原则：现实性原则、稳定性原则、持续性原则、均衡性原则、揭示性原则、规范性原则、系统性原则、明确性原则、扩展性原则。结合数据建模服务，通过采用人、机、料、法、环的原则进行数据分类。

c) 数据编码：数据编码主要将不同的信息记录采用不同的编码，一个码点可以代表一条信息记录。由于计算机要处理的数据信息十分庞杂，有些数据库所代表的含义又使人难以记忆。为了便于使用，容易记忆，常常要对加工处理的对象进行编码，用一个编码符合代表一条信息或一串数据。对数据进行编码在计算机的管理中非常重要，可以方便地进行信息分类、校核、合计、检索等操作。系统可以利用编码来识别每一个记录，区别处理方法，进行分类和校核，从而克服项目参差不齐的缺点，节省存储空间，提高处理速度，同时也有利于数据建模服务对于数据的快速匹配。

d) 数据标签：通过数据清洗、数据分类来将毛坯数据转化为标签数据。数据标签管理对海量标签数据的管理，包括去重、合并、转义等数据标签的操作。

通常来说，数字孪生价值的实现，在于数据与数据的连接。数据和数据之间的关系才是重中之重，而不是单纯的数据本身。因此对于每个数据点建立数据标签，有利于数据属性的管理，对数据之间关系的建立及维护发挥重要作用。通过交换和共享数据标签，来充实已掌握的数据标签，并实现数据标签与数据建模的相互匹配。

e) 数据压缩：为了减少网络数据对带宽的占用量，在实际传输时，

将会对数据进行压缩和解压。具体的压缩库，可以是 ZLIB、LZMA 或 LZO 等等。具体选用哪种压缩库，以及具体的压缩级别，各生产厂用户都可以在工业互联网平台进行自定义设置。

(3) 仿真分析层

仿真预测是指对物理世界的动态预测。这需要数字对象不仅表达物理世界的几何形状，更需要数字模型中融入物理规律和机理，这是仿真世界的特长。仿真技术不仅建立物理对象的数字化模型，还要根据当前状态，通过物理学规律和机理来计算、分析和预测物理对象的未来状态。物理对象的当前状态则通过物联网和数字线程获得。这种仿真不是对一个阶段或一种现象的仿真，应是全周期和全领域的动态仿真，譬如产品仿真、虚拟试验、制造仿真、生产仿真、工厂仿真、物流仿真、运维仿真、组织仿真、流程仿真、城市仿真、交通仿真、人群仿真、战场仿真等。

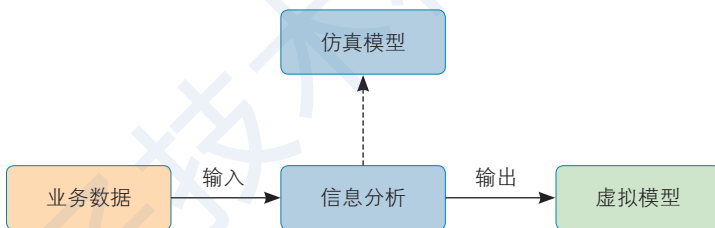


图 33 仿真分析流程示意图

如何在大体量的数据中，通过高效的挖掘方法实现价值提炼，是数字孪生重点解决问题之一。数字孪生信息分析技术，通过 AI 智能计算模型、算法，结合先进的可视化技术，实现智能化的信息分析和辅助决策，实现对物理实体运行指标的监测与可视化，对模型算法的自动化运行，以及对物理实体未来发展的在线预演，从而优化物理实体运行。其工作流程图如下：

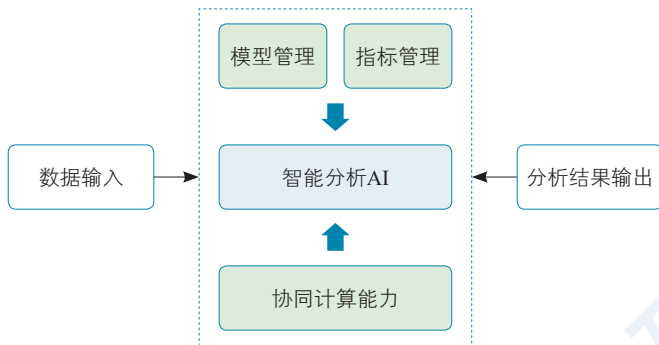


图 34 信息分析工作流程图

模型管理

模型是数字孪生信息分析的核心，具有专业性。例如，国土空间规划的各类规则模型、评价模型、评估模型，可为国土空间规划编制、审查、实施、监测、评估和预警等提供支撑。模型管理应包括模型可视化流程设计、插件框架式模型设计和管理扩展模型以及发布模型服务能力，通过算法注册、数据源管理及配套可视化工具实现模型构建。

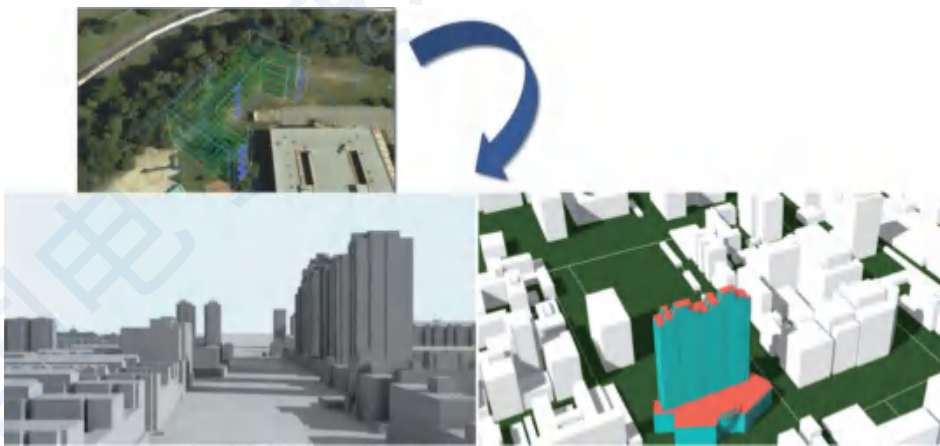


图 35 国土规划指标审查

指标管理

指标是判断物理实体运行状态好坏的标准。通过指标管理、指标计算配置、指标值管理及数据字典管理功能实现对实施评估指标项、指标体系及指标元数据、指标维度、指标值、指标状态及指标计算方式等的信息化管理，便于指标库的快速操作、更新维护以及指标的动态调整。

协同计算能力

高性能的协同计算是数字孪生信息分析的效率保障。在数字孪生模式下，物理实体实现高度数字化，同时产生海量数据资源，高性能的协同计算将提供算力支撑，主要包括强大的数据处理中心和边缘计算中心，为数字孪生的高效运行提供运行决策。以自动驾驶车联网应用为例，通过车辆获得的车辆周边感知数据和车路协同基础设施获得的路况数据，在边缘计算中心进行环境理解、导航规划、高精地图更新等数据处理及决策，然后在交通部门的云计算中心实现指挥交通控制决策。

(4) 共性应用层

数字孪生的映射关系是双向的，一方面，基于丰富的历史和实时数据和先进的算法模型，可以高效地在数字世界对物理对象的状态和行为进行反映；另一方面，通过在数字世界中的模拟试验和分析预测，可为实体对象的指令下达、流程体系的进一步优化提供决策依据，大幅提升分析决策效率。数字孪生可以为实际业务决策提供依据，可视化决策系统最具有实际应用意义的，是可以帮助用户建立现实世界的数字孪生。基于既有海量数据信息，通过数据可视化建立一系列业务决策模型，能够实现当前状态的评估、对过去发生问题的诊断，以及对未来趋势的预测，为业务决策提供全面、精准的决策依据。从而形成“感知—预测—行动”

的智能决策支持系统。首先，智能决策支持系统利用传感器数据或来自其他系统的数据，确定目标系统的当前状态。其次，系统采用模型来预测在各种策略下可能产生的结果。最后，决策支持系统使用一个分析平台寻找可实现预期目标的最佳策略。

数字孪生技术真正改变了智能决策支持系统的部署方式。数字孪生是对基础设施的数字化表示，借此了解基础设施如何工作。当我们将决策支持系统与数字孪生相结合时，产出的是独特的、一个能够不断学习和不断适应的决策支持系统。我们将这种新的模式转变称为“智能决策”。通过以下的多种智能决策技术，我们在数字孪生中结合过去某实际的运营历史来经营，当新事件发生时，系统会学习更多，从而运行地更准确：

三维空间分析技术

基于三维模型的空间布局和关系，在场景的地形或模型数据表面，相对于某个观察点，基于一定的水平视角、垂直视角及指定范围半径，分析该区域内所有通视点的集合。分析结果用不同颜色表示在观察点处可见或不可见。

动态单体仿真技术

群体仿真数据、调参权限、高精空间分析，帮助推算群里动线的结果更加准确，令专业的算法分析结果更加直观，降低决策者对算法解决和应用的门槛。以人流疏散为例，原始数据的计算是算法系统进行计算。人流拥堵热力图和单位面积断面人流量统计。摄像头监测盲区、巡更监测区、拥堵人群影响安防监测等状态评估及智能决策。

空间流体分析

通过栅格化体数据（水体或气体），形成数千万级别的三维网格，同步导入监测数据后，赋予所有数据时间与空间信息，便于了解到填充

物（例如污染物等）扩散、暗点、露点的分布状态，为业务部门巡查提供定位依据及智能决策分析。

事件处置流程仿真技术

通过接入传感器数据，因此异常事件发生时能够快速定位，并自动计算周围关联人员的位置关系，联动通知系统进行处理。以十字路口车辆刮蹭为例，摄像头报警后，系统自动定位，并能调用周围最近其他摄像头进行多角度的核实。同时，调用周围的温度传感器判断有无火点。必要时，选出周围巡逻人员联络前往，并通过通知系统圈定接受信号的范围，让公众离开。这打通了多套系统，提高决策效率。

(5) 支撑技术

包括大数据、云计算、AI 以及区块链的技术应用。例如，数字孪生中的孪生数据集成了物理感知数据、模型生成数据、虚实融合数据等高速产生的多来源、多种类、多结构的全要素 / 全业务 / 全流程的海量数据。大数据能够从数字孪生高速产生的海量数据中提取更多有价值的信息，以解释和预测现实事件的结果和过程；数字孪生的规模弹性很大，单元级数字孪生可能在本地服务器即可满足计算与运行需求，而系统级和复杂系统级数字孪生则需要更大的计算与存储能力。云计算按需使用与分布式共享的模式可使数字孪生使用庞大的云计算资源与数据中心，从而动态地满足数字孪生的不同计算、存储与运行需求；数字孪生凭借其准确、可靠、高保真的虚拟模型，多源、海量、可信的孪生数据，以及实时动态的虚实交互为用户提供了仿真模拟、诊断预测、可视监控、优化控制等应用服务。AI 通过智能匹配最佳算法，可在无需数据专家的参与下，自动执行数据准备、分析、融合对孪生数据进行深度知识挖掘，从而生成各类型服务；数字孪生有了 AI 的加持，可大幅提升数据的价值以及各项服务的响应能力和服务准确性。区块链可对数字孪生的安全性提供可靠保证，可确保

孪生数据不可篡改、全程留痕、可跟踪、可追溯等。独立性、不可变和安全性的区块链技术，可防止数字孪生被篡改而出现错误和偏差，以保持数字孪生的安全，从而鼓励更好的创新。此外，通过区块链建立起的信任机制可以确保服务交易的安全，从而让用户安心使用数字孪生提供的各种服务。

(6) 安全

以数字孪生技术为基础的工业智能制造和数字孪生城市的虚拟空间与物理空间之间的连接以及过程中各组成部分之间的连接都建立在网络信息流传递的基础之上，随着数字孪生技术与相关应用的加速融合，由封闭系统向开放系统的转变势在必行，系统性的网络安全风险将集中呈现。

一方面，工业智能制造的基础设备和控制系统面临未知网络风险，原有的基础设备多为长期运行在封闭系统环境下的简单设备，相关的硬件芯片、软件控制系统等都可能存在一定的未知安全漏洞，同时由于缺乏应对互联网环境的固有安全措施，极易遭受网络攻击，进而引发系统紊乱、管理失控乃至系统致瘫等网络安全问题。

另一方面，工业智能制造系统面临数据安全风险。随着当前网络攻击方式的不断变化，工业智能制造系统产生和存储了生产管理数据、生产操作数据以及工厂外部数据等海量数据，这些数据可能是通过大数据平台存储，也可能分布在用户、生产终端、设计服务器等多种设备上，任何一个设备的安全问题都可能引发数据泄密风险。同时，随着智能制造与大数据、云计算的融合，以及第三方协作服务的深度介入、大量异构平台的多层次协作等因素，网络安全风险点急剧增加，带来更多的入侵方式和攻击路径，进一步增加数据安全风险。这样就有四个大的方面的技术应用需求，包括隐私保护、权限管理、网路访问安全、区块链

技术。

需要针对数字世界中的数据进行隐私保护和权限管理，比如针对数字孪生的连接，以防篡改的方式保护连接到数字空间的每个物理实体，限制物理空间中每个设备、传感器和人员的角色的种类和范围，如果遭到入侵，需要将影响将降到最低。

在网络访问安全方面，需要考虑实体 IP 地址筛选和端口限制的可能使用，限制 I/O 和设备带宽，以提高性能，通过阻止拒绝服务攻击，速率限制可增强安全性，使设备固件、操作系统和软件保持最新，定期审核并查看设备、软件、网络和网关安全最佳做法，保证在其不断改进和发展的同时，使用受信任的经过认证的安全系统、软件和设备。

采用区块链技术作为一个保护机制，可以最大程度保证数据的安全性。数据使用区块链技术后最大的好处是防止被篡改，另一方面数字孪生的资产被区块链上链后，就变成了真正的资产，可以更安全的用于交易、共享和开发。

企业为满足自身生产信息安全需求，需要开展隐私保护策略、数据安全及功能安全的系统搭建，以满足企业的生产信息安全要求。

隐私保护策略

为了加强对重要敏感信息的保护，同时也为了尽量不提高信息安全建设的成本，有必要将信息系统进行相应的分割，使庞大的涉密信息系统变为由若干个安全等级要求明确的小系统组成。同时，为方便管理和易于监控，尽可能减少划分的区域，否则会大大增加监控和管理策略的复杂性，不利于系统安全动态维护管理。越复杂的等级划分，策略控制越复杂，从而留下的不安全隐患越多。

在具体划分公司涉密网安全域时，按以下原则进行划分与定级：

a) 涉密网安全域之间的边界划分明确，安全域与安全域之间的所有数据通信都应安全可控。

b) 根据组织结构将不同的部门划分为单独的安全域，尽可能将安全需求相同的用户应划分在同一安全域中。

c) 将涉密网的安全管理设备划分为独立的安全域。

d) 将涉密网服务器区域划分为一个独立的安全域。

e) 明确涉密网的终端计算机与终端计算机之间的边界，禁止终端计算机之间直接访问。

f) 明确涉密网终端计算机与服务器之间的边界，禁止非授权终端越权访问服务器资源。

g) 根据应用系统的密级和应用范围进行划分。划分为机密、秘密、内部三个安全域。

h) 涉密网不同等级的安全域间通信，禁止高密级信息由高等级安全域流向低等级安全域。

数据可信交换

可信数据交换技术借助区块链这一去中心化信任体系，利用链上数据不可篡改性、可追溯性和安全性等特性，同时结合智能合约技术和密码学技术，提供数据交换的隐私保护、归属权确认、权限管理和数据定责等功能。在整个数据交换过程中，通过同态加密方式使数据无需解密仍可进行分析和运算操作，不暴露原数据，保障共享方的数据所有权。智能合约去中心化处理数据，掌握数据执行权，控制加密数据的访问和执行权限，加密数据用后置空销毁，使用方只有密文结果的使用权，互相监督，互相制约，实现数据权的分离解耦。

同态加密技术是在数据可信交换时，实现隐私数据不出库、不泄密的情况下，满足数据查询方查询结果的需求。可将隐私数据加密成密文，

通过智能合约处理密文数据并得到正确的密文结果，供使用方解密使用，用来确保隐私数据的归属权和隐私权。

非对称加密技术主要应用于区块链网络中的账户生成和交易签名等方面，不同于对称加密技术中使用同一密钥易泄密的缺陷，非对称加密只需公开公钥，私钥个人保存不公开，二者作用可简述为公钥加密、私钥解密、私钥签名、公钥验证。数字签名就是基于非对称加密技术的这一特性，通过数字签名，在区块链等去中心网络中，可以校验交易合法性，验证数据来源和校验数据完整性，防止数据伪造和篡改。

功能安全性问题

从系统安全运行的角度出发，可以系统的功能就是根据生产要求采集系统内部各设备状态，给出控制设备的指令。

为了确保系统的技术安全，为了提高系统的整体安全性，可以参照电子设备的安全作法。与现有系统不同之处在于，新系统在逻辑处理单元之外，增加了故障检测单元。系统在向列车和道岔输出控制指令之前，需要根据输入的行车计划对输出的结果进行检查。如果故障检测单元检测到任何不符合故障—安全原则的输出，则应切断输出，使得系统处于安全状态。

（五）推动条件

1. 基础设施政策落实

2018 年至今，党中央和国务院多次召开会议明确表示加强新型基础设施建设，重视程度不断强化，相关政策路线图日趋清晰。自中央首次提出“新型基础设施建设”以来，各级政府对此给予了高度重视。2020 开年，中央政府大力号召部署新型基础设施建设，各省为了更好地响应中央政策，

都在加紧落实部署，部分地区还专门出台了分领域相关行动方案和计划。而新型人工智能城市的建设作为“新基建”中5G、人工智能、工业物联网、大数据中心等新型数字基础设施建设的重要载体，在接下来的推动和政策扶持等方面也将得到更多的政策关注。

2. 计算设备 / 硬件发展

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学联系到一起，采用量子特性使用一个两能级的量子体系来表示一位等等。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。

3. 可用数据规模提升

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，旨在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。该等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，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。

4. 模型和算法演进

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 Catia V4、Catia V5、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 3D Max 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 3D Max 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 Porex、Solidworks，多媒体建模软件如 3DS Max 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 3DS Max 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。

表 6 模型中各部件

名称	缩略图	OMC(MB)	RMC(MB)	ONM	RNM
物料盘存放架		39.2	1.39	473222	4154
PCBA 组件		18.6	0.792	255960	2189
双车与工装盘		7.98	0.66	83179	1093
组装工位机械手		313	1.23	4682378	2217

(续表)

名称	缩略图	OMC(MB)	RMC(MB)	ONM	RNM
机器人吸取夹爪		121	1.58	5380689	5180
ER130 机器人		116	9.12	1491422	44753
ABB 机械臂		7.98	0.66	83179	1093
.....					

5. 专业人才培养

统计结果显示, 2010—2019 年间已有 50 余个国家开展了关于数字孪生技术的研究并发表了相关成果。通过对发表论文数量的统计, 过去三年有关数字孪生文献的发表数量呈指数式快速增长, 体现出学术界对数字孪生技术的高度关注。研究成果主要来源于美国、德国、英国等具有较高科技水平的发达国家以及中国、俄罗斯、印度等发展迅速的国家的一千余名学者或专家。

在行业和企业方面, 已经有十多个行业关注并开展了关于数字孪生技术的应用实践, 包括: 电力、医疗健康、城市管理、铁路运输、环保、汽车、船舶、建筑等; 已经有西门子、PTC、戴姆勒等世界一流企业和美国 NASA、法国国家科学研究中心、俄罗斯科学院等世界顶尖科研机构的专家和学者探索了数字孪生在制造领域的应用。

与发达国家相比, 中国虽然对数字孪生的关注和研究相对较晚, 但在

2019年已形成迎头追赶的趋势。随着工信部的“智能制造综合标准化和新模式应用”、“工业互联网创新发展工程”、以及科技部“网络化协同制造与智能工厂”等专项的实施，企业和科研院所建立了人才实训基地和行业的核心智库，培养并持续为行业输出了关于数字孪生技术的复合型人才。

数字孪生的应用需多领域学科人才的参与，如建模仿真领域人才、数据挖掘领域人才、感知接入领域人才等。在社会培训机构中，相关专业人才的培养也受到了越来越多的重视。代表性的如新华三大学，它正式宣布，将进一步深化校企合作，实践产教融合，提出“新职素，新技能”的“双新”概念，并通过“数字工匠”、“协同育人”两大校企合作项目来实践数字化人才培养、以“H3C新技术认证体系”来检验数字化人才培养，无缝对接院校人才培养与企业人才需求，从质与量的维度更好地满足数字经济进入全新发展阶段后对数字化人才的需求。

四、数字孪生标准化当前工作、现状及需求

(一) 标准化工作概述

表 7 数字孪生国际标准化进展

年份	相关标准化组织	标准化工作概述
2015	美国工业互联网联盟	启动工业数字线程测试床项目
2017	ISO/TC184 SC4、韩国电子通信研究院	ISO 23247《面向制造的数字孪生系统框架》标准立项
2018	美国工业互联网联盟	成立“数字孪生互操作性”任务组
2019	ISO/TC184	成立数字孪生数据架构特别工作组 AHG2
2019	IEEE	IEEE 2806《智能工厂物理实体的数字化表征系统架构》标准立项
2019	ISO/IEC JTC1	发布《数字孪生技术趋势报告》，成立数字孪生咨询组 AG11
2019	ISO/IEC JWG21	成立 TF8“数字孪生资产管理壳”任务组
2019	ISO/TC184 SC4	ISO TR24464《自动化系统和集成工业数据数字孪生的可视化组件》立项
2020	美国工业互联网联盟	发布《数字孪生在工业行业的应用白皮书》，以及与德国工业 4.0 联合发表《数字孪生与资产管理壳的概念与在工业互联网和工业 4.0 中的应用白皮书》
2020	美国数字孪生联盟	联盟成立并着手创建跨行业的数字孪生参考架构和定义
2020	德国工业数字孪生协会	协会成立并着重开发数字孪生开源解决方案
2020	国际电信联盟 ITU-T SG17	智慧城市领域《智慧城市数字孪生系统安全机制》标准立项

(续表)

年份	相关标准化组织	标准化工作概述
2020	国际电信联盟 ITU-T SG17	智慧城市领域《智慧社区安全机制》标准立项
2020	IEEE	IEEE 2806.1《工厂环境中物理对象数字表示的连接性要求》标准立项
2020	ISO/IEC JTC1	AWI 5618《数字孪生 概念与术语》和 AWI 5719《数字孪生 应用案例》两项国际标准立项

自 2015 年开始，数字孪生已吸引了 ISO、IEC 和 IEEE 等国际标准化组织的关注，各组织正着手推动分技术委员会和工作组，力求从各自的领域和层面出发，探索标准化工作的同时推动测试床等相关概念验证项目，助力标准的实施推广。

当前，制造和智慧城市领域是数字孪生标准工作的切入点，其他领域相对缺乏标准化的研究工作；数字孪生整体的标准化工作也处于初级阶段，标准研究内容有待丰富。

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或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及相关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。

1. ISO/IEC JTC1 标准化工作

2018 年 5 月，经 ISO/IEC JTC1 第 32 届全会通过，我国专家承担了

ISO/IEC JTC1 新兴技术创新特别工作组 (JETI) 《数字孪生技术趋势报告》联合编辑。2019 年 5 月, ISO/IEC JTC1 第 34 届全会通过该技术趋势报告, 并采纳中国、韩国、美国等成员代表建议, 成立数字孪生咨询组 AG11。会议确认由中国电子技术标准化研究院韦莎博士作为该咨询组召集人。

2019 年 11 月起, ISO/IEC JTC1 AG11 数字孪生咨询组开始工作, 各国代表围绕数字孪生关键技术、参考模型、典型案例模板等进行了交流, 评估了相关标准化活动并提出进一步需求。

目前, AG11 数字孪生咨询组已完成工作报告。AG11 在报告中制定了如下的数字孪生的标准体系框架, 为数字孪生标准研究与制定人员提供参考, 同时为数字孪生落地应用提供指导:

基础标准: 术语和概念、参考架构和框架等;

数字孪生技术实现: 功能、数字孪生生命周期、数字线程和互操作性;

不用数字孪生系统之间的集成与协作: 资源、数据、信息模型和接口等;

测试与评估: 性能评估、成熟度和合格测试等;

用例和应用: 不同行业的数字孪生应用, 例如, 智能制造、智慧城市、智能建筑、智慧农业、智慧医疗等。

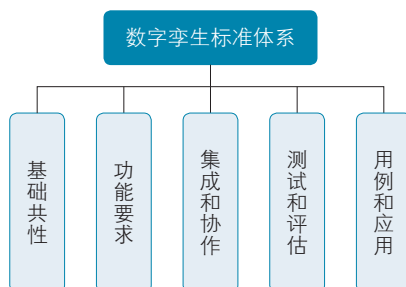


图 37 数字孪生标准体系一级目录

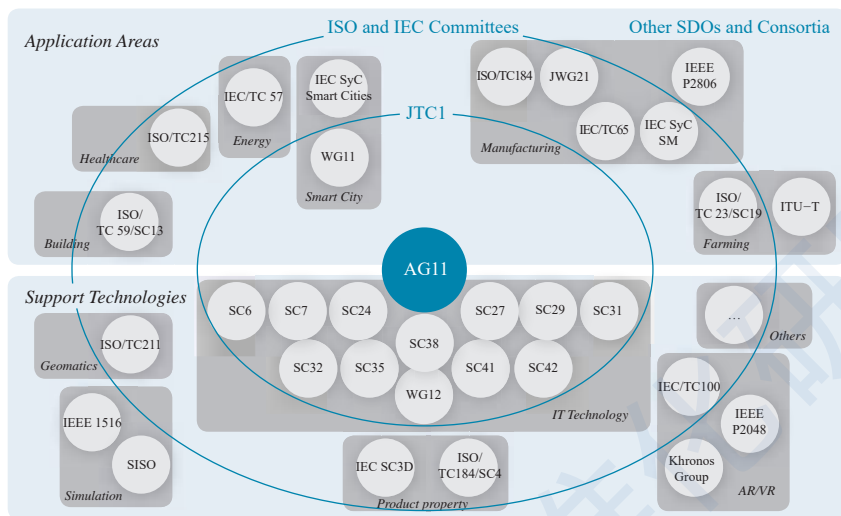


图 38 数字孪生国际标准化全景图

当前，AG11 数字孪生咨询组已完成职责范围内的所有工作，并于 2020 年 10 月推动 ISO/IEC AWI 5618《数字孪生 概念与术语》和 AWI 5719《数字孪生 应用案例》两项国际标准项目正式获批立项。

2. ISO 标准化工作

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。该标准的四个部分范围如下：

概述和一般原则：包括制造业中开发数字孪生的一般原则和要求。

参考架构：具有功能视图的参考体系架构。

制造元素的数字表示：可观察制造元素的基本信息属性列表。

信息交换：参考体系结构中实体之间信息交换的技术需求。

该标准发布的数字孪生制造框架，从用户域、运维管控域、服务提供域、资源交互域、感知控制域和目标对象域六方面描述了数字孪生制造框架，涵盖了数字孪生创建人员、设备、材料、制造过程、设施、环境、产品和

支持文件等制造要素。另外，本系列标准附加的技术报告包含了符合框架的数字孪生用例，标准第四部分的附件中也包含了用例的初步纲要。

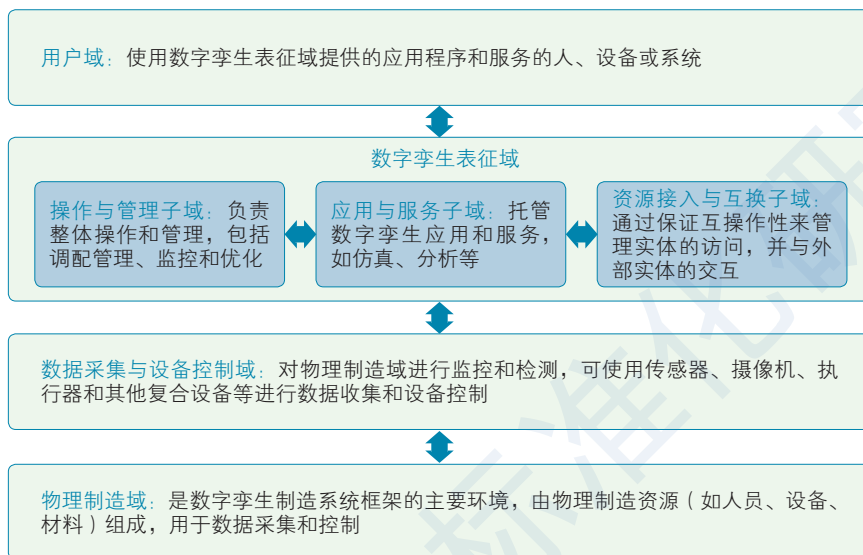


图 39 数字孪生制造框架

3. IEC 标准化工作

IEC TC 65/SC 65 推动了 IEC 62264《企业控制系统集成》标准的制定。在该标准中，资源被定义为“提供执行企业活动和 / 或业务流程所需的部分或全部功能的企业的实体”，包括了人员、设备、物理财产和材料。IEC 62264-2 则定义了如何表达资源的特征和功能的方法，并对资源能力、资源能力属性、资源类别定义、资源类别属性、资源定义和资源属性进行了建模。IEC 62264-2 的范围仅限于 IEC 62264-1 定义的层次模型中的第 3 级制造系统中制造资源的对象和属性，没有定义表示对象关系的属性，也没有考虑资源和活动的虚拟表示。

对数字孪生而言，IEC 62264-2 指定了制造控制功能和其他企业功能之间交换的对象和属性，并定义了包含在通用接口中的一组元素，以及

用于扩展这些元素以实现的机制。

事实上,一些早期ISO和IEC标准,如IEC 61987系列、IEC 61360系列、ISO 13584-42和ISO 22745提供了描述给定设备特性的方法。由IEC TC 65研制的IEC 62832《数字工厂框架》则在这些的基础之上扩展了这个方法,为包括设备在内的生产系统整个生命周期的数字表示定义了一个参考模型,包括生产要素和要素之间的关系,以及这些要素的信息交换。

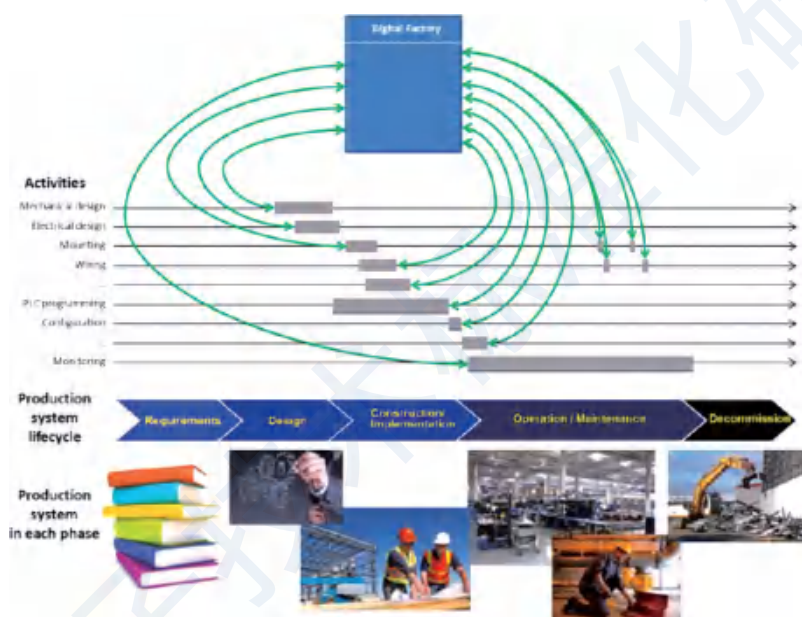


图 40 数字工厂和实例活动的概述

4. 德国工业 4.0 标准化工作

德国力求推动其工业 4.0 的国际化,使其在未来的国际制造版图中占据主动。为此,德国工业 4.0 平台(Industrie 4.0 Platform)寻求与中国和美国等国家展开合作。“资产管理壳 AAS”作为一个深入的理论突破,获得了世界范围的广泛关注。当前,IEC/TC 65/WG 24“工业应用程序的资产管理壳”工作组推动成立,将着手于资产管理壳在工业和智能制造

中的应用范围，并定义如何通过资产管理壳（结构、属性和服务）在信息世界中表示现实世界的资产。

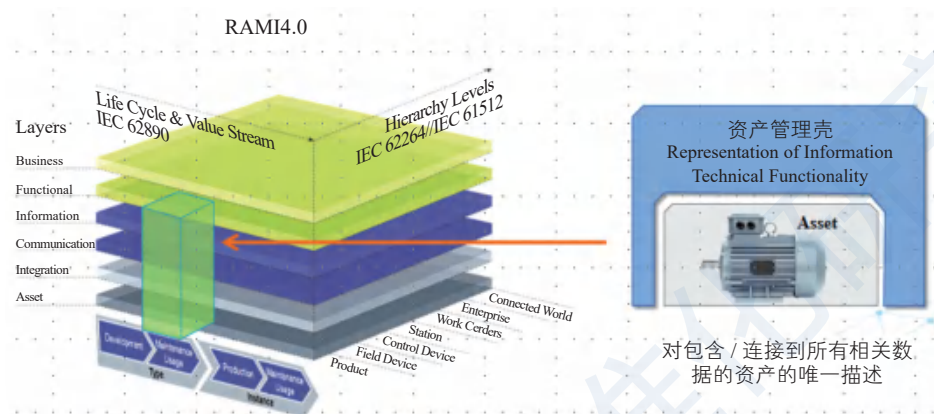


图 41 工业 4.0 参考模型架构中的资产管理壳

2018 年，德国重构了与美国工业互联网联盟的合作任务组，探讨数字孪生和资产管理壳在技术和应用场景方面的异同，以探讨资产管理壳和数字孪生相互支持的适用性和可行性。

在中德智能制造 / 工业 4.0 标准化工作组的研究中，数字孪生与资产管理壳同样成为研究主题，双方在推进数字孪生和资产管理壳的标准化工作保持一致，未来中德双方将发布《中德智能制造 / 工业 4.0 数字孪生 / 资产管理壳联合报告》，深入讨论二者的一致性。

（二）智能制造领域数字孪生标准化现状及需求

1. 智能装配标准化现状及需求

目前智能化装配方法已经得到的深入的研究，众多高校和企业采用产学研的方法进行探索应用。如北京航空航天大学陶飞团队把数字孪生概念应用到车间层面，从物理融合、模型融合、数据融合和服务融合 4 个维度，系统地探讨了实现数字孪生车间信息物理融合的基础理论与关键技术。

该团队是国内研究数字孪生最活跃的团队，研究主要集中在制造系统上的数字孪生框架与模型。

北京理工大学刘检华团队在虚拟装配领域取得较多成果，近来研究了产品数字孪生在产品设计阶段、制造阶段和服务阶段的实施途径。以航空航天装配领域为对象，提出了涵盖物理装配车间、虚拟装配车间、车间孪生数据及装配车间服务系统的数字孪生装配车间架构，研究了物理装配车间数据的实时感知与采集、虚拟装配车间建模与仿真运行技术、装配车间生产管控等关键技术。该团队研究主要集中在面向复杂产品装配制造系统的数字孪生车间。

东南大学刘晓军团队提出了数字孪生驱动的复杂产品装配工艺方法。以卫星产品装配为对象，研究了基于三维模型的装配工艺设计方法、三维装配工艺演示模型、轻量化显示技术。该团队研究主要集中在卫星产品装配过程的数字孪生技术研究，并利用增强现实技术来辅助装配。

东华大学鲍劲松团队在国内较早研究虚拟装配技术，并提出了半实物虚拟装配模型，其实就是目前所说的数字孪生模型，该团队研究集中在研究虚实融合的装配工艺、装配信息模型、模型演变规律和可视化方法，并应用在航天和船舶领域。

数字孪生装配相关标准缺失，产品质量规范化和一致性难以保证，需要统一数字孪生装配基础标准、建设指南和管理规范。主要包括：

- a) 统一数字孪生装配的基本术语、分类与编码等。
- b) 基于装配车间不同类型的装配设备、智能化设备需求，提出对车间设备和传感器接口等技术要求。

针对不同的装配对象需求，需要建立分级、分类的数字孪生装配评价指标体系。主要包括：

- a) 开展标准前研究，了解数字孪生装配评价研究的现状和技术难点，

初步提出数字孪生装配评价的关键点。

b) 根据需求侧的不同服务需求，建立数字孪生装配评价模式的建立和相应的评价指标，涉及零件级需求的评价模式和评价指标、产品级的评价模式和评价指标。

c) 开展标准实施的实证研究，选择相应的数字孪生装配，对标准的可操作性和针对性进行评价，验证标准的可行性，为标准的完善提供证据。

2. 虚拟工厂标准化现状及需求

虚拟工厂针对新工厂规划建设、工厂运行实时仿真、轻量化企业分散产能等需求，基于数字孪生技术，实现模拟对象在现实环境中的行为，对产品、制造过程乃至整个工厂进行准确、完整、实时虚拟仿真的目标。

虚拟工厂相关国家标准《智能制造 虚拟工厂参考架构》《智能制造 虚拟工厂信息模型》均处于报批阶段。针对实体工厂的建设和应用规划情况，需以虚拟工厂应用场景为出发点，定义虚拟工厂的应用范围，虚拟工厂中应用场景的映射展现方式，并对相关的生产资源和要素的定义进行规范，对虚拟工厂的模型构建进行技术约定，为虚拟工厂的实际应用奠定基础。该部分标准需求包含：

虚拟工厂应用范围定义标准

虚拟工厂应用范围主要包括新工厂规划建设应用、工厂运行全局与局部实时虚拟仿真、轻量化企业分散产能的虚拟组合等内容。

生产资源要素虚拟化标准

虚拟工厂的实质是实现实体工厂的流转映射，在实体工厂运行过程中，生产资源要素同样需要在虚拟工厂中体现，并在系统中进行动态的反映，因此需要对生产资源要素进行虚拟化、数字化的工作，需编制相关要素的定义标准，包括生产资源、虚拟产品的三维文件要求、不同类型生产

资源的功能要素。

虚拟工厂场景定义标准

结合实体工厂的实际业务环节，考虑虚拟工厂发挥的作业，制定相应的场景定义标准和表现形式，如生产线规划测试、物流仿真及物流瓶颈分析，工艺流程仿真，产能分析，虚拟生产，实体工厂的实时虚拟等。

工厂仿真驱动要素定义标准

对应不同的虚拟功能作用，在计算机系统中定义所需要的驱动要素，编制相关驱动要素的定义标准。

驱动要素信息采集范围与流程标准

结合实体工厂，针对不同业务场景的驱动要素，梳理分析信息的采集范围，编制相关的采集流程标准。

虚实工厂信息传递技术要求

结合虚拟工厂与实体工厂的信息传递要求和应用要求，编制相关的技术要求标准，包括对虚拟工厂与实体工厂之间的信息传递载体的技术要求、虚拟工厂对实体工厂的虚拟延迟要求、虚拟工厂与分散产能的信息传递安全标准等。

虚拟工厂系统平台要求

从数据存储、信息展现方式、智能分析、物理运行仿真等方面对虚拟工厂系统平台提出建设标准和要求。

虚拟到实体工厂的驱动控制标准

虚拟工厂的应用不仅仅是要实现现实工厂的反映，还需要能基于虚拟工厂的运行情况提出相应的改善意见，并能驱动对实体工厂的驱动控制，因此需要编制驱动控制方面的标准。

虚拟工厂的评价标准

虚拟工厂的应用也是个逐步提升和改进的过程，应用的场景也随着

应用的深入在不断变化，因此需要对虚拟工厂的应用进行评价，以便形成阶段性的应用模式和固化成果。

3. 汽车行业标准化现状及需求

整体而言，数字孪生技术在汽车行业企业中的应用还处于初步探索阶段，除研发设计相关软件实现一定标准化应用外，大部分应用研究解决方案尚不成熟，很多企业都在尝试提供相关解决方案，不同方案差异性较大，技术应用标准和评价标准尚未建立。以汽车风洞为例，随着近年来国内汽车风洞数量的逐步增加，汽车风洞测试标准已经进入大众视野并被提上了会议日程。目前，风洞测试相关标准工作正在稳步推进，但面对这一繁杂的测试系统，该领域的相关标准远不完善。目前，各大汽车公司、高校与科研院所均为行业标准化工作建言献策，标准框架已经出具出行，但可以预见的是，该行业的标准距离完备使用还仍需时日。

当前，国内外众多研究机构正在积极开展数字孪生相关标准研究和制定。在汽车行业内，当前亟需的数字孪生相关标准包括：汽车生产制造的数字孪生平台各系统集成标准及接口协议标准、汽车数字孪生工厂及车间建设的技术要求相关标准、汽车行业数字孪生技术应用成熟度评价要求等相关标准等。

4. 大型起重机械行业标准化现状及需求

大型起重机械有其自身一系列围绕设计、使用、监管等方面的国际、国家、行业与企业标准，但对其数字化、智能化的应用研究乃至形成规范、标准，仍然存在欠缺。具体到应用数字孪生理论研究与应用实践中，至少存在以下问题：①缺乏相关术语、架构、适用准则等标准，从而造成起重机械数字孪生研究和落地应用过程中存在交流困难、集成困难、协作困难等问题；②缺乏数字孪生相关模型、数据、连接与集成、服务等标准，

在数字孪生关键技术实施过程中，导致模型间、数据间、模型与数据间、系统间集成难、一致性差、兼容性低、互操作难等问题，造成新的孤岛；③缺乏相关实施要求、工具和平台等标准，在起重机械行业 / 领域实施数字孪生过程中，造成用户或企业不知如何使用数字孪生。

数字孪生有望推动智能制造实现快速发展，标准化的系统架构将促进起重机械数字化技术的市场采用度，并为设计方、制造商、集成商、解决方案提供商与用户等各种利益方带来好处。

5. 物流标准化现状及需求

物流行业在数字孪生领域还没有建立统一的标准，各个企业之间点的技术差异性大，数据标准化也不足，亟需建立相关的标准。

目前，随着中国产业结构日益走向规模化和专业化的格局，伴随信息技术的大量应用、电子商务的兴起以及对成本控制要求的提升，物流行业也开始进入整合阶段，从无序走向有序，各种新的业态也开始涌现，例如供应链管理、整车零担运输等等，也涌现出很多具有很强竞争力和成长能力的公司。随着物流行业的进一步整合和中心化建设，亟需建立相关的数字孪生标准，实现信息和数据的互联互通，形成一个多层次多中心的智慧物流体系，建立一个多智能体协同的柔性智慧物流体系。

（三）智慧城市领域数字孪生标准化现状及需求

建立科学合理的智慧城市标准体系，是开展智慧城市标准化顶层设计和总体布局、判断和明确智慧城市标准化方向和重点的需要。2015年，国家标准委等部委联合提出智慧城市标准体系框架，包括总体、支撑技术与平台、基础设施、建设与宜居、管理与服务、产业与经济、安全与保障七大类。2016年，国家发改委、国家标准委等提出智慧城市评价指标体系，包括惠民服务、精准治理、生态宜居、智能设施、信息资源、网络安全、

改革创新、市民体验 8 个一级指标，下设 37 个二级指标评价要素。2017 年进行了调整后的智慧城市评价指标体系。

在智慧城市标准体系框架的指引下，我国开展了系列国家标准研制，已发布和立项了系列基础性国家标准约 57 项，其中已发布 36 项。多层次、全方位、密集发布的标准为新型智慧城市高质量发展提供了标准化技术支撑。

国内其他主要标准化组织均与国际组织建立了技术对口关系，并在各自的领域内开展了智慧城市相关标准的研究工作。

全国信息技术标准化技术委员会（SAC/TC28）设立智慧城市应用工作组，启动了智慧城市术语、技术参考模型、评价模型和指标体系、数据和服务融合平台、数据模型、设计方法等标准研究，目前已发布智慧城市相关国家标准 15 项，正在批准国家标准 2 项，正在起草国家标准 1 项。

全国智能建筑及居住区数字化技术委员（SAC/TC426）主要在建筑自动化、数字城市、物联网家居等方面开展标准研究工作，其归口管理涉及智慧城市、智能建筑、智慧居住区、智能家居、数字城管、智能卡等领域的国家标准 30 余项，现有成员单位 210 余家。

全国通信标准化技术委员会（SAC/TC485）主要开展通信网络、系统和设备的性能要求、通信基本协议和相关测试方法等方面的标准研究工作，由国家标准化管理委员会主管，工业和信息化部作为业务指导单位，中国通信标准化协会（CCSA）作为秘书处承担单位。

此外，国内其他标准化组织，如全国信息安全标准化技术委员会（SAC/TC260）在智慧城市信息安全技术方面起草国家标准 5 项，如《信息安全技术 智慧城市安全体系框架》、《信息安全技术 智慧城市网络安全评价方法》、《信息安全技术 智慧城市公共支撑与服务平台安全要求》等；自然资源部测绘地理信息中心在智慧城市时空基础设施方面发布国家

标准 2 项。

目前，虽然全国两百多个城市都提出了各自的智慧城市建设方案，但各地对智慧城市建设的理解和认知水平参差不齐，在信息化基础设施建设投入、信息化开发能力等方面还存在很大差异，智慧城市的“智慧”程度还存在很大差距，没有统一的规划指导和标准支撑，往往会造成重复投资和资源浪费；同时，有可能造成各个城市盲目建设、城市间应用形成更多孤岛和难以连通的问题，导致“智慧城市”不智慧的局面。同时，调研表明，用户在智慧城市建设中最为关注的仍然是信息化建设多年来的难题——信息资源共享、整合、有效利用和跨部门业务协同。

智慧城市建设涉及面广、技术复杂、业务类型多，需信息、通信、应用多领域协作，需要不断完善标准体系。智慧城市部分领域标准缺失，标准体系不完善，影响智慧城市标准化建设。如智能家居标准缺失，技术标准不统一、产品兼容性和开放性差，无法互联互通；新能源汽车、无人驾驶等由于缺乏加氢站建设运营管理、无人驾驶汽车测试等规范而受影响。

数字孪生城市基于数字孪生技术建立的城市信息模型（CIM），作为智慧城市的重要基础，其核心围绕全域数据端到端管理运营：数据采集、接入、治理、融合、轻量化、可视化、应用。这一核心正是面向信息资源共享、整合、有效利用和跨部门业务协同的根源性解决手段。因此，数字孪生城市的标准化制定会是满足智慧城市标准化需求的重要途径。

（四）智慧交通领域数字孪生标准化现状及需求

在空间维度，针对各层级模型及数字孪生之间以及与上层级模型及数字孪生的可组合性、综合孪生、混合孪生等，需要对功能性能、接口、集成、互操作性等建立标准规范。

在时间维度，针对数字孪生的动态更新、基于数字线程实现全生命周期的数字孪生等，需要对全生命周期的模型传递、数据集成等建立相关指导性标准规范。

在价值维度，需要基于优化目标、增值服务等核心需求，聚焦关键对象的数字孪生，这一过程方法需要相关指导性标准规范。

（五）智慧健康领域数字孪生标准化现状及需求

健康建筑标准体系逐步完善。美国、法国等国家在健康建筑设计和营造方面制定了相关标准和指南，关注于室内空气污染物、建筑材料、净化系统、用水品质、噪声、光照、视觉、温度、湿度、室内外空间、老人及残疾人设施、食品、虫害、健身激励、精神等方面，旨在提升建筑的健康性能。健康建筑、健康养老、个人健康状态远程监测等方面的标准相继出台，但数字健康建筑和数字健康家庭通用标准体系尚未建立。《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2019、《健康社区评价标准》T/CECS 650-2020、《健康建筑评价标准》T/ASC02-2016 等标准，从涵盖人所需的生理、心理、社会 3 方面健康要素出发，提出了建筑的空气、水、舒适、健身、人文、服务等指标要求；《传感器网络 个人健康状态远程监测》GBT37733.1-2019、《家用声系统设备互连配接要求》GB/T 9031-1988 等国家标准对个人健康状态远程监测、设备互连提出了基本要求。但是针对数字健康建筑和家庭服务技术方案在标准层面尚缺乏适用的标准依据，亟需制定数字健康建筑和家庭服务分级、分类的建设、管理、评价等标准，为提供高质量数字健康家庭服务奠定基础。

数字健康家庭服务相关标准缺失，产品质量规范化和一致性难以保证，需要统一数字健康家庭服务基础标准、建设指南和管理规范。主要包括：

- a) 统一数字健康家庭服务的基本术语、分类与编码等。

b) 数字健康家庭服务、家庭医生管理及医院在院病人管理连续服务等管理规范。

c) 基于家庭设置不同类型的穿戴式设备、智能化设备需求，提出对住宅建设的布线系统、建筑接口等技术要求。

针对不同的服务对象和特殊的服务需求，需要建立分级、分类的数字健康家庭服务评价指标体系。主要包括：

a) 开展标准前研究，了解数字健康家庭服务评价研究的现状和技术难点，初步提出数字健康家庭服务评价的关键点。

b) 根据需求侧的不同服务需求，建立数字健康家庭服务评价模式的建立和相应的评价指标，涉及普遍需求的评价模式和评价指标、重点人群的评价模式和评价指标。

c) 开展标准实施的实证研究，选择相应的数字健康家庭，对标准的可操作性和针对性进行评价，验证标准的可行性，为标准的完善提供证据。

五、存在的挑战

（一）数据相关的挑战

数字孪生的核心是模型和数据，建立完善的数字模型是第一步，而加入更多的数据才是关键，要想充分发挥数字孪生技术的潜能，数据存储、数据的准确性、数据一致性和数据传输的稳定性也需取得更大的进步，同时，将数字孪生应用于工业互联网平台时，还面临数据分享的挑战。

在数字孪生工具和平台建设方面，当前的工具和平台大多侧重某些特定的方面，缺乏系统性考量，从兼容性的角度来看，不同平台的数据语义、语法不统一，跨平台的模型难以交互；从开放性的角度来看，相关平台大多形成了针对自身产品的封闭软件生态，系统的开放性不足；从模型层面来看，不同的数字孪生应用场景，由不同的机理和决策模型构成，在多维模型的配合与集成上缺乏对集成工具和平台的关注。

1. 多维度、多尺度数据采集的一致性较难实现

数据采集的尺度或计量单位的一致性，涉及物理数据、几何数据、时间数据等。如构建实物的三维模型的坐标与计量单位不一致，会导致不同模型之间无法融合，需要增加数据接口与编写数据翻译器；如工厂内的生产计划数据采集过程中，不同时间单位的生产计划数据会导致数字孪生模型出现数据读取错误。

数据采集参数及格式的一致性。针对同一对象，多维虚拟模型采集的数据格式不一致、参数类型和数量不对等，同样会出现不同模型在数据融合时出现问题，不能进行交互。

数据采集周期问题。如生产设备的数据产生一般以毫秒记，用采集

的数据来驱动数字孪生模型时，往往需要放大时间尺度，否则模型的仿真运行压力过大会导致崩溃。

2. 数据传输的稳定性不足

无论数据采集还是下达指令，数据的实时传输过程都存在丢失数据的问题。特别是在工业生产车间，对数据传输的稳定性、可靠性具有极高的要求。传统无线通讯网络数据传输的稳定性和可靠性水平，难以满足数字孪生实时交互的建设需求。

3. 数据的准确性不能保障

数字孪生系统的输入数据包含不同来源渠道，如不同信息系统、不同社会主体、不同统计路径等，受数据录入方式、数据来源渠道、数据统计方式以及信息系统数据维护错误等因素影响，数据的准确性难以保障。

4. 海量数据的存储与处理能力欠缺

部分数字孪生应用场景不强调数据的及时处理，但需要进行海量数据的存储与加工，如复杂产品的故障诊断和预防性维修，需要对不同数据源的海量数据存储及大数据分析，对数据的存储能力和计算能力提出了较大挑战。

5. 通讯接口协议及相关数据标准不统一

在构建数字孪生模型的过程中，以及不同维度模型的集成过程中，需要在不同系统和设备之间进行不同类型数据传输和交互，因此要建立通讯接口协议，并形成数据标准，统一数据语义及代码，相关技术及工作是建立完善的多维数字孪生平台的基础。现有不同系统和设备通讯接口协议和数据标准不统一，是构建数字孪生的较大挑战。

6. 数据的分享与开放机制不完善

将数字孪生应用于工业互联网平台或数字孪生模型的建立基于第三

方云服务平台时，将面临数据分享和开放的挑战。目前数字相关的分享机制和服务体系建设还不够完善，不同主体之间的数据分享存在较大的安全隐患和利益冲突，难以满足数字孪生对于数据开发共享的相关需求。

7. 多源异构数据难融合

数字孪生需要将物理空间所有数据和信息进行数字化表达，形成统一的数据载体，并实现数据挖掘分析和决策。这些数据涉及空间模型、互联网信息、物联网实时感知、专业知识、音频、视频、文本等等，如何将这多源异构多模数据集成、融合和统一管理，是数字孪生首要解决的问题之一。

（二）基础知识库相关的挑战

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。在全局层面，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。

(三) 安全相关的挑战

数字孪生以仿真技术为基础，在智能制造、智慧城市建设和等方面都将发挥重大推动作用。随着全球各大企业数字化转型的深入发展，数字孪生已经成为制造企业迈向工业 4.0 的解决方案。数字孪生技术实现了虚拟空间与物理空间的深度交互与融合，其连接关系都是建立在网络数据传输的基础之上。数字孪生的应用使得企业原有的封闭系统逐渐转变为开放系统，在其与互联网加速融合的过程中势必面临系列网络安全挑战。当前，数字孪生在安全相关的挑战主要分为两个方面：

数据传输与存储安全

实现数字孪生技术的应用涉及到数据传输与存储。在数据传输过程中会存在数据丢失和网络攻击等问题，具体体现在：①各原料供应商与制造商之间的模型交付过程。②制造商与用户之间的模型交付过程。③数字孪生系统本身虚实交互过程。在数据存储中，由于数字孪生系统在实际应用过

程中会产生和存储海量的生产管理数据、生产操作数据和工厂外部数据等，这些数据可以是云端、生产终端和服务器等存储方式，任何一个存储形式的安全问题都可能引发数据泄密风险。

制造系统控制安全

在数字孪生制造系统中，往往需要实现资源自组织和工艺自决策。但是，由于虚拟控制系统本身可能会存在各种未知安全漏洞，易受外部攻击，导致系统紊乱，致使向物理制造空间下达错误的指令。因此，涉及的安全问题有两个：①下达错误的数字信息指令对生产安全存在一定的隐患。②虚拟控制系统受网络工具存在保密数据泄漏问题。

（四）商业模式相关的挑战

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，实现制造工业全要素、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资状态，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。

(五) 人才相关的挑战

1. 核心软件技术由国外人才主导

数字孪生技术发展潜力巨大，吸引了全球许多企业参与进来，美国 and 德国等发达国家成为数字孪生应用的领跑者。凭借在工业软件、仿真系统方面的技术领先优势，以及在传统工控网络、通信等方面的标准话语权，掌握了大量数字孪生的主导力量。例如，XMPRO 积极参与美国工业互联网联盟的建设，独自提出了数字孪生参考架构；围绕孪生工具的能力，Bently 开发了完整的工具体系，可以为基础设施提供从建模、仿真到 AEC 系统化的数字孪生化服务，成为基础设施领域的领先企业；西门子美国公司从 PLM 转型数字孪生驱动的工业软件解决方案，到 2019 年基本形成了自成体系的数字孪生认知。

当前各个行业的大量软硬件系统由国外企业提供，核新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)、SO/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。

（六）多系统融合的挑战

数字孪生作为一种实现物理实体向信息空间数字化模型映射的关键技术，通过充分利用布置在物理系统各部分的传感器，对物理实体进行数据分析与建模，形成多学科、多物理量、多时间尺度、多概率的仿真过程，将物理实体在不同真实场景中的全生命周期过程反映出来。数字孪生的多系统特性即反映在物理空间，也反映在虚拟空间，在数据、模型和交互各环节均有表达。

数字孪生融合物理世界与数字世界，是一个多维系统的融合。首先面临的是物理世界的多系统挑战。据不完全统计，制造业现在的设备数字化率约为 47%，局域联网率只有 40%，可接入公网的只有 20% 左右，底层 OT 跟 IT 的融合仍然是极其核心的基础性问题。企业管理及其架构也是制约因素。企业内部业务全面集成管控水平不高，跨企业协同难度较大，上云以后无法进行资源综合优化配置，进一步制约了数字孪生技术的深入应用。

数据是连接物理空间和虚拟空间的桥梁，是实现数字孪生的关键基础。数据采集主要通过传感器及分布式传感网络对物理设备数据进行感知获取，是实现数字孪生的一项重要技术。数字孪生数据采集的基本要求包括数据来源的可靠性、数据传输的实时性、多源数据的同步性、数据采集的容错性等。目前的传感器网络普遍缺乏实时性、同步性和容错性，还难以满足数字孪生系统的要求。

在数据传输环节，目前通用的网络传输协议（如 TCP/IP）基于尽力传输的思想，难以保障数字孪生对数据传输的实时性要求，数据拥塞可能

导致数据丢失，进而影响数字孪生在虚拟空间的可信度和可靠性，使得数字孪生的整个系统处于不稳定状态。同时，数据具有多模态、高重复性和海量等特征，怎样开展高效、精确的大数据分析，避免实时数据对历史数据的覆盖，实现知识的高效管理、智能分析和可靠决策，也是一个需要进一步解决的问题。

在**模型构建**环节，数字孪生也面临重大挑战。物理空间的复杂系统往往很难建立精确的数理模型。目前的建模方法大多基于统计学算法将数据转化为物理模型的替代，模型的可解释性不足，难以深度刻画或表征物理实体的机理。如何将高精度传感数据与物理实体的运行机理有效深度结合，获得更好的状态评估和系统表征效果，是亟待解决的问题。

交互与协同是数字孪生的关键环节，虚拟实体通过传感器数据监测物理实体的状态，实现实时动态映射，再在虚拟空间通过仿真验证控制效果，并通过控制过程实现对物理实体的操作。虚拟/增强/混合现实是以沉浸式体验为特征的人机交互技术，如何将它们结合到数字孪生架构中，为虚拟实体、物理实体和人的深度信息交互与协同提供支持还存在挑战。

（七）互联互通互操作的挑战

1. 数据歧义

多源异构感知数据、业务运营类数据形成数据烟囱，相互不通，导致无法支撑同一业务场景或作业流程中闭环的数据流，例如应急处置场景下，感知终端预警数据、应急人员定位数据、应急资源分布数据、处置流程跟踪数据相互无法打通，较难闭环化支撑事前预测、事中综合指挥、事后复盘分析。

2. 数据关联性不明确

因数据使用方没有清晰的数据使用需求，会导致主数据不一致问题，

例如房管系统的楼栋房间编号和业务出租的房间号不一致，用地规划地块编号与施工阶段、交付社区阶段编号不一致情况，导致较难拉通进行土地、房产经营数据分析。

业务属性关联性不明确，例如智慧城市整合地物数据和要素分类，基于规划逻辑或生产经营逻辑的分类标准不一致，导致同一单体属性数据无法拉通。

3. 数据可用性低, 质量较差

每时每刻都在产生大量的数据，但很多业务机构对数据在预处理阶段不太重视，导致数据处理不规范。需要花大量时间进行清洗和去噪，才能有效的使用数据。数据可用性低质量差，数据不准确。

六、典型应用案例

本白皮书中共收集案例 31 个，涉及智能制造、智慧城市、智慧交通、智慧能源、智慧建筑、智慧健康等 6 个领域。

（一）智能制造领域

案例一：基于数字孪生的机械产品可靠性测试应用案例

（1）案例背景及基本情况

本项目以《国家智能制造标准体系建设指南（2018 版）》《装备制造业标准化和质量提升规划》为指导，以解决可靠性测试与验证过程中的关键问题为出发点，开展基于数字孪生的机械产品可靠性测试模型及测试方法、可靠性评价、结果分析与可靠性增长等的系统研究，制定相关技术标准，填补我国基于数字孪生的机械产品可靠性测试标准空白，健全现有可靠性标准体系。通过试验验证和企业应用验证，建立应用规范，实现典型企业示范应用，充分发挥标准的基础规范、技术支撑和示范引领作用，促进基于数字孪生的机械产品可靠性测试技术的广泛、有效应用，推动企业数字化可靠性测试与验证体系的建设，补齐可靠性测试阶段的数字化应用短板，实现产品设计、测试、制造全流程的数字化、智能化，促进企业提质增效，显著提升企业的竞争力。

本项目在系统梳理和总结国内外技术应用和标准研究现状的基础上，针对国内基于数字孪生的机械产品可靠性测试应用存在的主要问题，对标国际标准，开展技术标准研究与制定，广泛征求行业企业意见和建议，按照“需求分析——标准研制——试验验证——应用验证”的研究思路，开展可靠性测试流程、可靠性测试模型、可靠性测试仿真、可靠性评价、

结果分析与可靠性增长等关键技术标准研制，搭建基于数字孪生的机械产品可靠性测试方法标准试验验证与服务平台，并选择航空航天、先进轨道交通、节能与新能源汽车等领域内的典型企业对标准的全部技术内容进行应用验证。

基于数字孪生的可靠性测试在机械产品全生命周期的各个环节都具有重要作用，涉及多个利益相关方，如下图所示。对于产品设计者来说，可依托数字孪生开展产品可靠性仿真和分析，进而开展设计改进和可靠性增长等工作；对于制造商和验证方来说，可依托数字孪生并结合产品实物开展可靠性评价等工作；对于使用者来说，可依托数字孪生开展产品的可用性预测等工作；对于维护方来说，可依托数字孪生开展产品的保障性分析和预测性维护等工作；在产品退役时，可依托数字孪生开展产品各系统剩余寿命分析和再制造评估等工作。

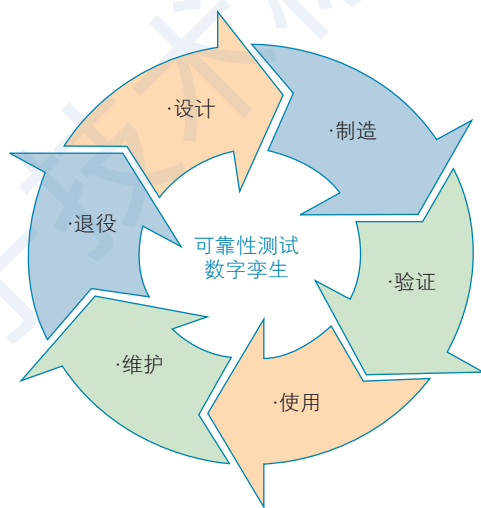


图 42 机械产品可靠性测试数字孪生商业模式示意图

(2) 系统框架

面向基于数字孪生的机械产品可靠性测试与数据集成要求，构建软硬件齐备、适用多种应用场景试验验证环境。系统框架主要包括：

数字仿真计算硬件系统：

以服务器为核心，数据库系统和操作系统为基础，高性能工作站和笔记本为途径的并行计算系统，为数字孪生仿真计算软件系统的运行提供硬件支持，保证各数字孪生的可靠性测试顺利进行。

数字仿真计算软件系统：

数字孪生仿真计算系统的核心，具有结构静动力学分析、可靠性分析、数据管理等功能，是数字孪生建模、性能仿真、可靠性评估、数据管理的主要依托。

试验数据库：

对积累的仿真及试验数据进行存储和统一管理。对于缺少可靠性试验数据的产品，需补充进行物理试验，完善试验数据库，为数字孪生模型的修正、产品可靠性的评价及增长提供数据支撑。

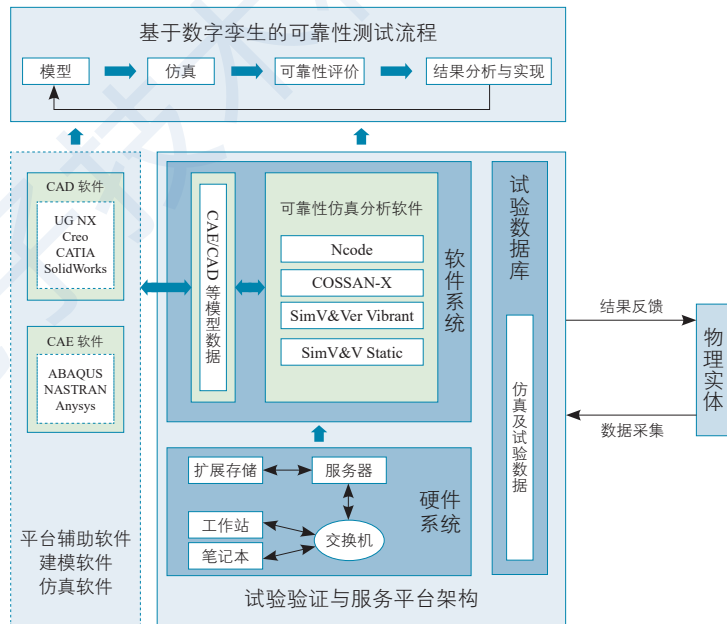


图 43 基于数字孪生的机械产品可靠性测试框架示意图

试验验证与服务平台软硬件资源：

CAD 软件：利用 CAD 软件实现产品数字孪生三维建模和设计信息三维标注，在三维模型上完整、准确地表达产品设计信息，满足 CAE 分析、可靠性评估等各阶段对设计数字孪生数据的需求。

CAE 软件：用于分析机械产品的各项性能，包括结构静力学性能、结构动力学性能、热力学性能、电磁学性能、疲劳性能等，为可靠性分析提供依据。

可靠性分析软件：基于 CAE 仿真数据进行可靠性评估，给出当前条件下的产品可靠性结果，对结果进行分析等。

CAD/CAE 模型等数据库：对数字孪生模型建立、流程管理、可靠性评价及结果分析与可靠性增长过程中产生的环境数据、模型数据、分析结果数据进行管理，实现各类数据的存档。

数字孪生仿真计算硬件：工作站、笔记本、服务器、交换机、网络部署等，为构建基于数字孪生的机械产品可靠性测试标准验证平台提供硬件基本环境。

物理实体（验证试验设备）：

环境模拟设备、寿命模拟加载设备等。对于缺少可靠性试验数据的产品，需利用上述设备进行补充试验，为仿真结果正确性检验提供数据支撑。

(3) 案例特点

建立基于数字孪生的可靠性仿真

该模块具有创建参数规范完整、环境条件准确、边界条件合理的数字孪生仿真分析模型的功能，可为可靠性仿真提供有效输入。通过数字孪生完整、准确地表达可靠性分析所需的信息，保证仿真模型满足仿真分析、可靠性评价等各阶段的需求。

基于数字孪生的可靠性仿真分析

该模块具有影响因子筛选、分析方法选取、分析样本量确定、输出

定义等功能，可实现产品静态、动态仿真结果与可靠性分析结果间的信息双向传递，以及仿真数字孪生模型和可靠性模型的关联变更。验证敏感因子信息、仿真分析方法、仿真样本量信息等内容是否能实现可靠性测试中仿真模型与仿真过程的关联管理和变更。

基于数字孪生的可靠性评价

该模块可对数据进行梳理与筛选，在仿真数据的基础上结合试验数据，对仿真结果进行检验。针对仿真结果构造相应的统计量，提取数据中的有效信息，为进一步减少试验样本量、提高可靠性评价准确度提供依据。验证仿真结果的数据类型是否与检验过程相匹配、仿真结果是否包含可靠性评价的有效信息以及仿真有效信息是否匹配物理试验的测试结果等内容。

基于数字孪生的结果分析与可靠性增长

该模块可通过可靠性灵敏度分析精准定位产品薄弱环节，开展基于数字孪生的产品改进工作，实现产品可靠性增长。对可靠性评价结果进行合理利用，充分挖掘产品设计空间潜力，减少产品中的设计冗余。为可靠性结果分析与可靠性增长过程提供系统完备的可靠性提升方法，从而在合理控制研制周期与成本的前提下，使产品满足可靠性要求。

数字孪生相关数据库管理

对已有历史数据及在基于数字孪生的机械产品可靠性测试过程中产生的大量数据进行系统管理与存档，形成仿真与试验数据的资源库，在对资源数据进行总结的基础上建立可靠性测试知识库。利用大数据分析的方法，深入挖掘并充分利用数据库中的有效信息，为数字孪生模型的修正、产品可靠性的评价及增长提供数据支撑。

(4) 实施步骤

针对可完全物理模拟场景开展基于数字孪生的可靠性测试标准试验验证在可完全物理模拟场景下，产品的工作环境完全能够通过物理手段

进行模拟，在进行产品数字孪生仿真模型修正与可靠性评价过程中均可直接利用物理试验数据。针对可完全物理模拟场景开展基于数字孪生的可靠性测试标准试验验证流程如图所示。

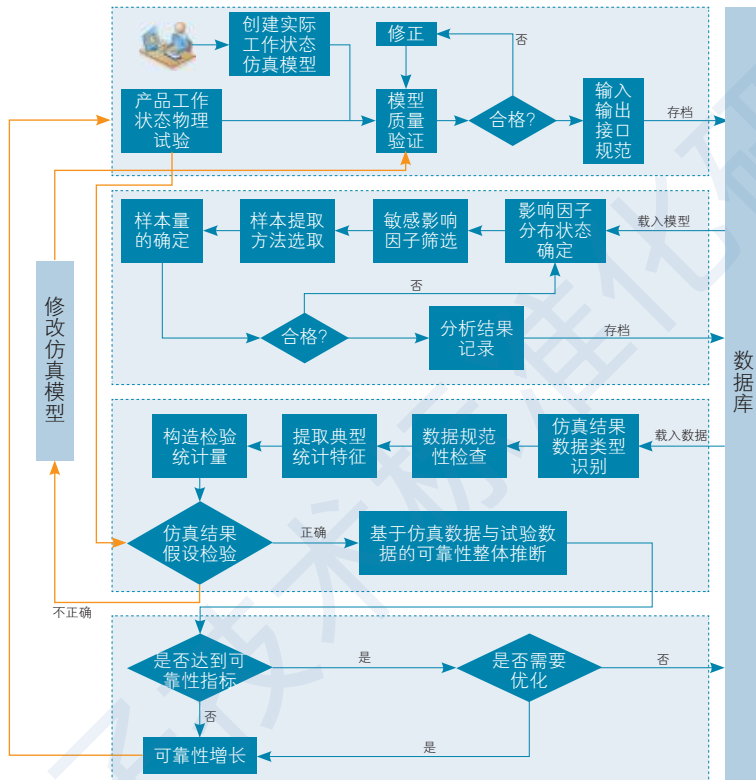


图 44 可完全物理模拟场景的流程示意图

设计人员生成用于仿真的数字孪生模型，进行可靠性测试的建模方法验证。数字孪生模型建立完成后，利用产品实际工作状态下的物理试验交叉验证，对仿真分析的数字孪生模型进行修正，生成更为准确的模型。建模完成后，定义输出格式，建立模型数据输出通道。

针对不可完全物理模拟场景下的机械产品标准试验验证

相比于可完全物理模拟场景，不可完全物理模拟场景在基于数字孪生的可靠性测试过程中所进行的物理试验条件难以与产品实际工作状态

完全一致。因此其数字孪生模型建立及可靠性评价过程与工况可完全物理模拟场景有一定差异，需进行进一步验证，如图 3 所示。

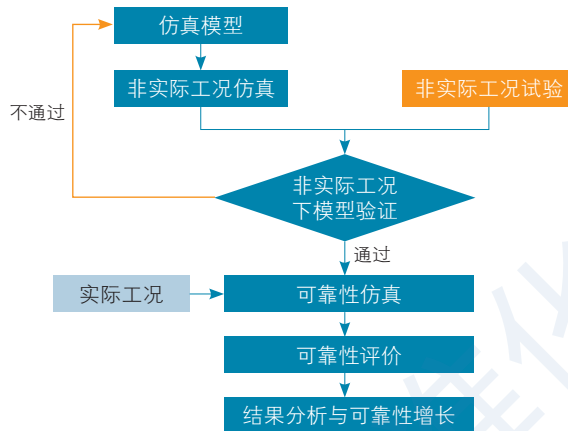


图 45 不可完全物理模拟场景的流程示意图

相比于可完全物理模拟，不可完全物理模拟场景下，产品实际工作环境特殊，难以通过物理手段进行模拟。但工程实际要求对数字孪生的模型进行验证，因此需进行非实际工作环境下，开展针对数字孪生模型的物理验证。针对不可完全物理模拟场景下的数字孪生模型建立，需按照物理试验条件建立额外的模型，经过模型质量检验保证仿真模型准确性后，建立实际工作状态下的模型，并依照规范输出定义，进入基于数字孪生的仿真分析流程。在按照要求完成影响因子分布状态确定、敏感因子筛选、样本提取方法选取及样本量确定后，完成仿真分析，并将仿真分析结果存档，进入可靠性评价流程。

(5) 涉及的关键技术

完全物理模拟场景下，基于数字孪生与试验数据融合的产品可靠性整体评价

将数字孪生手段引入可靠性测试后，在可完全物理模拟应用场景下，仿真测试的虚拟环境与试验测试的物理环境可保持一致。但是由于两种

测试手段得到的测试结果在统计上来源于不同的母体，不能够作为一个整体对产品进行可靠性评价，造成有效信息不能被充分利用，可靠性评价结果精度不高。因此，如何在可完全物理模拟场景下综合利用数字孪生与试验数据对产品可靠性进行整体评价是本项目面临的技术难点。

在不可完全物理模拟场景下，数字孪生模型准确性检验

数字孪生模型的准确性直接影响到可靠性评价结果的正确性，作为可靠性测试过程的基础环节，确保所建立模型可准确反映产品的性能响应，对可靠性测试的顺利进行起着至关重要的作用。在可完全物理模拟场景下，可通过进行产品实际工况下的物理试验对实际工况下的数字孪生模型进行模型准确性的检验与修正；但在不可完全物理模拟场景下，由于无法完全构建产品实际工作环境，实际工况下的物理试验难以开展，阻碍了实际工况数字孪生模型准确性的检验与修正。因此，如何在不可完全物理模拟场景下保证数字孪生模型的准确性是技术难点之一。

基于数字孪生的产品可靠性增长

在产品未满足可靠性要求的情况下，需要对产品进行设计改进甚至重新设计，直至符合可靠性要求，实现可靠性增长。传统基于物理手段的可靠性增长方法需要不断进行产品迭代，开展大量物理试验，时间长，成本高。因此，行业逐渐重视基于数字孪生的可靠性增长方法，寻求可靠性增长效率的提高。但是在利用数字孪生模型替代大部分物理试验开展可靠性增长工作的过程中，在仿真数据的利用方法上不同于传统方法，阻碍了利用数字孪生仿真分析手段实现可靠性增长的过程。因此，如何利用数字孪生实现产品可靠性增长是技术难点之一。

(6) 案例成效和意义

提出了基于数字孪生与试验数据的产品可靠性整体评价方法

该方法能够充分挖掘数字孪生仿真数据中的有效部分，通过对仿真

数据的筛选和整理，得到仿真结果的统计信息，并基于统计信息构造特殊的统计量，结合试验数据完成假设检验，实现数字孪生仿真数据正确性的判断。在仿真正确的基础上，利用仿真结果的统计信息对不同状态下的试验数据进行改造，使之能够作为一个整体进行可靠性分析。从而实现数字孪生仿真信息和试验信息的综合利用，进而给出具有更高精度的可靠性评价结果。

实现不可完全物理模拟场景下数字孪生仿真模型的检验与修正

在不可完全物理模拟场景下，产品的实际工况难以采用物理手段完全实现，造成数字孪生仿真模型的准确性检验工作难以开展，但可通过放宽实际工况中难以实现的极端条件，实现部分工况下的物理试验（即非实际工况物理试验）。本项目提出在非实际工况下结合物理试验手段对数字孪生仿真模型进行修正的方法，在确保模型准确性的前提下，为数字孪生仿真模型添加实际工况边界条件，实现实际工况下的产品可靠性分析。

提出基于数字孪生的产品可靠性增长方法

传统的可靠性增长多依靠物理试验手段进行，在产品的增长过程中需要不断进行产品设计迭代，开展大量物理试验。本项目提出的基于数字孪生的产品可靠性增长方法，通过对产品可靠性进行灵敏度分析，深入挖掘传统方法难以得到的薄弱点，全面定位产品薄弱环节。同时，该方法通过数字孪生实现产品的迭代设计，有效减少物理试验次数，有利于产品研制成本与周期的控制。

根据目前的示范应用情况，基于数字孪生的机械产品可靠性测试能够有效降低综合成本、缩短验证时间。具体的量化指标还在收集和整理之中。

案例二:数字孪生驱动的智慧火电应用案例

(1) 案例背景及基本情况

现有的火电厂监控信息系统（Supervisory Information System）存在以下几个方面问题：（1）采集数据量小，不能满足经营管理、发电生产、设备运维等业务部门对火电机组考核、管理、分析需要；（2）功能相对分散（包含经营管理子系统、燃料管理子系统、绩效管理子系统等），且部分系统功能不完善，需要建立能够提供支持生产优化和辅助决策的智能信息管理系统；（3）缺少汽轮机、空压机、鼓风机、锅炉等重要设备的机理模型，无法实现设备性能的实时评价。采用数字孪生技术，建立火电机组设备模型、机理模型和管理模型，实现数字模型与机组设备的双向同步和实时互动，支持安全环保、总体绩效、机组优化、燃料管理等功能，满足智慧电厂对于高水平生产管控的要求。

(2) 系统框架

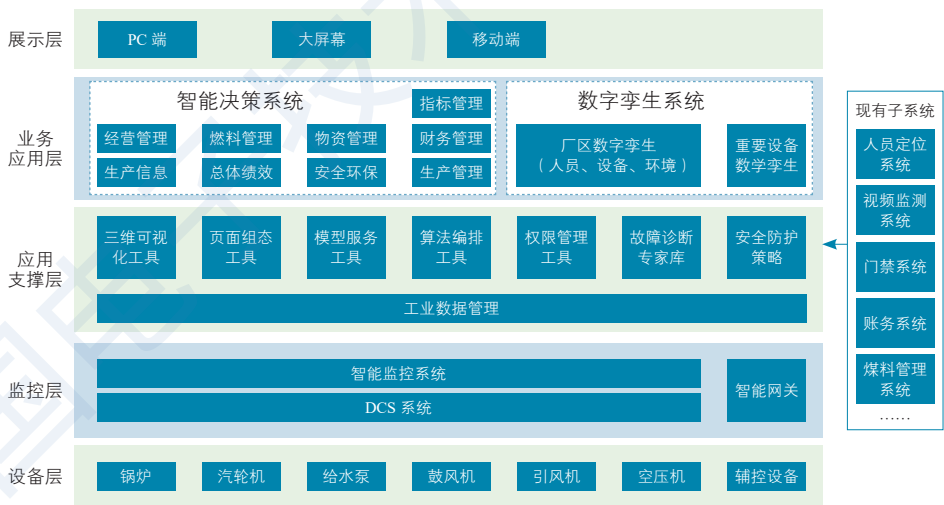


图 46 智慧火电系统框架图

智慧火电厂整体分为 5 层，从下至上分别为设备层、监控层、应用支撑层、业务应用层、展示层。

设备层：电厂设备较多，类型较复杂，以锅炉、汽轮机、发电机为主，其它包含省煤器、凝汽器、空压机、引风机、除灰除渣设备等。

监控层：主要包括分布式控制系统（DCS）和监控信息系统（SIS），实现生产数据采集和实时控制，融合先进控制技术与数据分析技术，以及统一实时数据和历史数据接口引擎，实现发电过程的智能控制与优化运行。

应用支撑层：包括数据管理和应用工具，为业务定制开发提供支撑，具体包含工业数据存储、过滤、管理等，以及可视化工具、页面组态工具、模型服务工具、算法编排工具、权限管理工具、故障诊断专家知识库、安全防护策略。其中，可视化工具可以编制简易的厂房、设备二维和三维动态图元，也可从外部导入高清晰或者复杂的三维设备模型。

业务应用层：主要包含智能决策系统、数字孪生模型，其中智能决策系统融合了火电厂现有的多个系统，总体绩效模块单独开发设计；数字孪生模型包含工艺机理模型、设备模型和管理模型。

展示层：提供 web 访问方式，可以在 PC 端、移动端显示查看，也可以大屏幕的形式展示。

(3) 案例特点

物理设备与数字模型的融合：开发了火电机组的工艺机理模型、设备模型和生产管理模型，基于数字仿真提供优化控制、设备运维、能效分析、燃烧管理等功能；同时融合了 11 个既有的信息化系统，建立辅助决策分析模型，为企业经营管理提供支持。

三维可视化：支持图片、模型库导入导出、支持光照与透明等渲染效果，支持设备三维模型与动态的生产数据的融合展示。

(4) 实施步骤

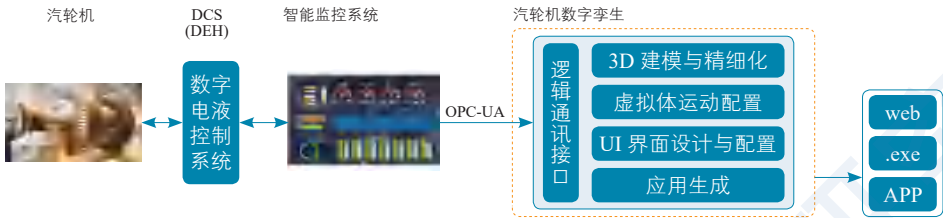


图 47 汽轮机数字孪生实施步骤

以火电厂汽轮机数字孪生系统为例，具体实施步骤如下：

构建汽轮机数字模型：基于工艺机理和运行数据建立迭代升级的汽轮机数字模型，从 DEH 系统中实时获取汽轮机运行状态，实现数据模型与物理实体的信息同步，并基于运行历史数据修正模型。

构建汽轮机三维模型：包含各部件的造型、装配体效果、设计作业指导的流程、以及交互界面的设计。

(5) 涉及的关键技术

因果机理模型与大数据技术的融合：传统的简化机理模型精细化程度不高，也无法反映设备随着时间发生的变化，基于设备工艺机理建立初始的数字孪生模型，基于历史数据周期性地通过机器学习方式迭代升级模型，使数字模型尽可能地保持与物理设备的一致性。

模型轻量化与显示技术：由于火电设备结构复杂，通过 CAD 软件对汽轮机三维建模，文件较大，如果以原文件显示，关联汽轮机实时运行参数后页面会卡顿，对三维精细化模型进行轻量化处理，并保持原有的装配关系，使得复杂设备的数字孪生效果体验更佳。

(6) 案例成效和意义

完善火电厂监控信息系统：解决监控功能单一的问题，满足了管理层、发电部、设备部对机组运营的考核、管理、分析需求。

建设智能决策支持系统：满足了工艺管理、生产运作、工艺追溯、设备管理、安全及故障管理、生产应急指挥等不同业务系统的数据交互与同步、海量数据智能分析与决策、领域数据规范管理的要求和应用。

探索设备作业指导新方式：选取了复杂设备汽轮机作为数字孪生试点，可以实时显示汽轮机运转参数，增强了展示效果；另外，作为员工熟悉汽轮机原理和结构的新方式，可以展开分解汽轮机显示安装过程等，对于员工维修维保汽轮机大有裨益。

建立可视安全监控新模式：建立电厂 1:1 的三维数字地图，融合视频监控系統、门禁系統等园区监测信息，巡检人员佩戴定位系統，可实时远程展示厂区信息和巡检人员在虚拟地图中的位置信息，如图 11 所示，当发生危险报警或异常情况时，及时提醒危险区域人员。

案例三：数字孪生驱动的汽车发动机装配方法

(1) 案例背景及基本情况

近年来，随着机器学习、大数据、云计算和 IoT 等技术的快速发展，使汽车发动机装配技术由数字化模型仿真为主的虚拟装配逐渐向虚实深度融合的智能化装配方向发展。如何实现装配虚实空间的深度融合，是推动智能化落地的关键。数字孪生通过集成新一代信息技术实现了虚拟空间与物理空间的信息交互与融合，即由实到虚的实时映射和由虚到实的实时智能化控制。为此，将数字孪生应用在汽车发动机的装配中是未来的重点研究方向。

在装配设计阶段，通过建立的零组件数字孪生模型，在装配约束条件下进行装配工艺仿真，然后对发动机总成数模进行干涉检查，包括发动机本体零部件之间的静态干涉检查及运动部件的运动间隙检查；发动机总成与发动机舱中其他零件之间的干涉检查。对于不满足干涉检查及间隙要求的零件，需要对装配过程进行分析验证，包括对装配顺序、安装

工具及装配空间的可操作性进行分析，评估对制造系统的影响。对于不满足要求的零件进行装配工艺的调整，如果调整工艺后仍不满足，则需要分析零件设计是否合理，并根据情况改进零件设计，同时修改零件数模，直到满足可装配性的要求。在装配分析的过程中，同时进行设计和验证装配工艺，得出满足装配质量要求的装配工艺。将装配工艺下达至装配车间，在实际装配过程中建立装配设备数字孪生模型和装配操作数字孪生模型，控制和监测实际装配活动。同时建立装配质量评估数字孪生模型，对装配过程进行阶段和综合的装配质量评估。对于装配质量评估不合格的部分工艺进行多目标优化。

(2) 系统框架

将汽车发动机的装配分为装配设计、装配过程和质量评估三个阶段，并分别建立相对应的数字孪生。如图所示的多数字孪生组成及结构关系，根据不同装配阶段所包含对象和功能的不同，在装配设计数字孪生中包含了零组件数字孪生和装配工艺孪生体；在装配过程数字孪生中包含了装配操作数字孪生和设备数字孪生；在质量评估数字孪生中包含了阶段评估数字孪生和综合评估数字孪生。

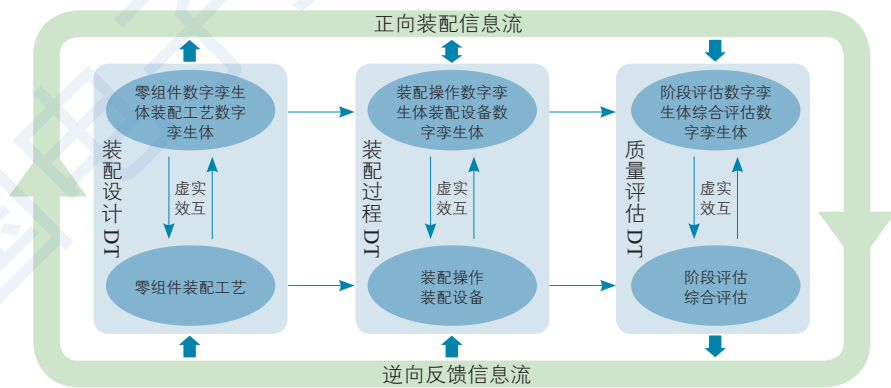


图 48 多数字孪生组成及结构关系

装配设计阶段的主要对象为待装配零组件和装配工艺文件，其功能进行装配仿真，形成优化装配工艺。该阶段利用虚实对象间数据的交互性可以提高设计的准确性，并验证产品在真实环境中的可装配性。装配设计数字孪生包含两个数字孪生：零组件数字孪生和装配工艺数字孪生。装配过程阶段的主要对象为装配设备、已装/待装零组件和装配操作方式，其功能是利用工艺信息进行实际的装配活动。通过虚实空间的数据交互实现装配过程的实时监测和装配工艺的动态优化。在装配过程数字孪生中构建的数字孪生包括装配设备数字孪生和装配操作数字孪生。其中装配工艺是起源于装配设计阶段，形成于装配过程阶段。质量评估阶段的主要对象为阶段装配体和总装配体，其功能是集成装配过程多学科、多物理量的装配质量评估过程。通过质量评估可以为装配工艺提供优化的目标函数，实现工艺的自适应调整。质量评估数字孪生包含两个数字孪生：阶段评估数字孪生和综合评估数字孪生。

在汽车发动机的数字孪生装配体系中，不同装配阶段数字孪生之间进行正向装配信息流动和逆向反馈信息流动，不同装配阶段数字孪生内部进行虚实空间的数据交互。为了实现包含装配全要素而建立的多数字孪生具有不同的应用功能，多数字孪生共同组成一个完整的双向装配链，使得不同装配阶段上下游可以无缝连接。多数字孪生之间利用信息的交互性进行相互影响，使其稳健性得以提高。在装配过程中，以装配工艺数字孪生为核心，将装配工艺信息形成装配工艺知识图谱。通过建立几何层面的工艺优化目标和性能层面的优化目标，在局部和全局工艺优化的角度进行多数字孪生协同装配，实现虚实装配空间的深度融合和模型的高度集成。将多数字孪生协同装配方法应用在汽车发动机的装配中，可以提高产品的装配质量一致性和一次性装配成功率。

(3) 案例特点

在高精密产品的不同装配阶段建立了装配设计数字孪生、装配过程数字孪生和质量评估数字孪生，并根据其内部不同的物理对象及功能建立了多个数字孪生。

在多数字孪生协同装配中，以装配工艺数字孪生为核心，根据不同工序的工艺优化目标，利用知识图谱和机器学习算法进行了装配工艺的动态优化。

在传统的发动机缸体单元装配方法中，装配设计阶段虚拟仿真得出的装配工艺是通过理想几何模型及理论数据产生的，无法正确指导实际装配过程，使得装配设计与装配过程出现脱节。在实际装配过程中需要人工推算多道工序的预留公差，这给装配操作带来了极大的难度，且装配耗时较长，装配成功率较低。利用多数字孪生协同装配方法实现了不同装配阶段数字孪生的高效协同。在完成每一装配工序后，均可利用机器学习算法进行下一道或多道工序的装配质量预测和工艺优化，实现了装配过程的智能决策。将传统装配方法与本方法进行对比，取 20 台发动机装配的实验结果，每一阶段的平均装配时间均有所减少，装配质量一致性均有所提高。同时这种智能化装配方法还降低了装配过程的操作难度。

(4) 实施步骤

多数字孪生协同装配系统的搭建

在汽车发动机缸体单元的多数字孪生协同装配系统中，搭建了虚实装配实验环境。如图 8 所示，在物理装配实验环境搭建中，利用装配实验平台，在原装配设备基础上添加了双目视觉相机、流量测量设备、电信号检测设备、力矩测量仪和高精度激光扫描仪等检测设备，用于获取装配过程中发动机缸体单元的装配状态数据。虚拟装配实验环境搭建中，以 Visual Studio2019 为系统开发平台，以 Unity3D 为图形显示，搭建虚拟装配系统。虚实装配空间通过双向互操作接口进行连接，为不同阶段数

字孪生提供融合数据。

装配工艺知识的生成

在开始实际装配前，即装配设计阶段需要形成装配工艺知识。如图 4 所示，首先利用历史装配工艺数据形成装配工艺知识图谱，根据产品装配需求和零组件的实际尺寸提取装配工艺信息。其中零组件在虚拟空间中的表示是集成了三维几何模型、点云模型和属性信息。几何模型来源于上游的产品设计部门，通过 CAD 软件（UG、CATIA 等）生成 .stl 格式模型文件，然后导入数字孪生装配系统的模型库中。点云模型是通过连接物理空间模块的三维激光扫描仪获取点云数据，经过点云的过滤、拟合等预处理形成点云模型。属性信息依靠 XML 文件进行存储，主要包括几何特征信息、材料属性信息、物理属性信息等。在完成整个装配仿真过程后，根据装配过程的不同阶段（与阶段质量评估相对应）对总装配序列进行分解，形成不同装配过程阶段的子知识图谱。子知识图谱表示的是不同装配过程阶段的工序链。

装配过程中的工艺优化

发动机缸体单元的实际装配过程要分为装配曲轴、装配主轴承盖、装配止推轴承等数十个阶段。在装配过程中首先对装配状态数据和装配质量数据进行采集。采集的数据包括每一道工序的装配尺寸数据以及装配质量检测数据，通过 OPC-UA 标准通讯协议上传至虚拟空间装配系统的数据存储模块，并根据不同工序和数据类别进行分类。其中装配质量检测实现了全自动化控制，设备部件的移动均采用气动控制，通过动作控制柜控制设备的各个动作。

(5) 涉及的关键技术

虚实映射的零组件逆向建模及装配全要素数字孪生模型构建技术

针对汽车发动机在装配精度上要求较高，研究基于逆向建模的零组

件精确实体数模构建技术；以关键装配特征为配准点，研究集成模型与实体模型共融技术，研究覆盖全部装配要素的数字孪生模型构建技术。

基于孪生数据的可装配性预测与工艺优化

针对汽车发动机装配过程中，采用修配法或调整法无法根据装配现场采集的实际装配尺寸实时设计合理可靠的装调方案，基于装配作业实测数据与数字孪生模型仿真数据融合的孪生数据，研究待装零组件可装配性预测技术，研究装配工艺的动态调整及优化技术。

案例四：基于数字孪生的工业网络与设备虚拟调试应用

(1) 案例背景及基本情况

新生产系统的设计和和实施通常是耗时且高成本的过程，完成设计、采购、安装后，在移交生产运行之前还需要一个阶段，即调试阶段。如果在开发过程中的任何地方出现了错误而没有被发现，那么每个开发阶段的错误成本将大大增加，未检测到的错误可能会在调试期间造成设备重大的损坏。而且，随着工艺要求和控制复杂度的增加，使得本来就很棘手的设备调试变得更加棘手，脱离了现场运行环境，机械、电气部件和自动化软件就得不到充分的调试，设备设计的正确性和有效性等得不到有效的保障。在调试阶段，工程师会发现错误，修改设计，编写和优化程序，以及对操作人员进行新设备、新操作流程培训。这个阶段是难以计划，会延迟生产，也会造成成本超支，并可能导致延迟发货，影响客户满意度。

由于数字孪生是物理资产的准确表征，可以用于对新网络或设备设计的虚拟调试。在虚拟调试时，如果发现问题需要进行设计优化，则可以在计算机上对虚拟的系统模型进行更改，虚拟调试允许重新更改网络规划、重新编程机器人或更改变频驱动器、PLC 编程等操作。一旦重新编程，系统会再次进行测试，如果通过，则可以进行下一阶段的物理部署。通过虚拟调试实现对设备的设计进行仿真验证，缩短从设计到物理实现

的时间；使用虚拟调试来提前测试设备运动部件以发现机械干涉，以及提前验证自动化 PLC 编程和 HMI 软件，这样可以使现场的调试速度更快，风险更低。

(2) 系统框架

网络规划和仿真验证系统

在设计阶段，通过 SINETPLAN 实现对工业网络 PROFINET 的规划设计和仿真，识别潜在的问题并避免发生，系统功能如图 3 所示。新建、组态 PROFINET 网络，或导入现有项目，进行网络负载仿真，流量整形保证网络运行安全可靠，优化网络资源和透明化网络利用率；也可以对已安装 PROFINET 网络进行在线扫描和验证。

设备的数字孪生

在设备开发中应用虚拟调试，首先要创建一个设备的数字孪生即虚拟设备，虚拟设备构成主要有三部分，即物理和运动系统模型、电气和行为模型、自动化模型，如图 所示。



图 49 虚拟设备构成

其中，物理和运动系统模型主要是机械组件，比如设备主体、执行机构、输送带、工装夹具等；电气和行为模型主要是一些活动组件例如驱动器、阀门和外设行为；自动化模型是 PLC 程序和 HMI 软件。

虚拟调试系统

虚拟调试系统分软件在环（SiL: Software in Loop）和硬件在环（HiL: Hardware in Loop），根据不同的仿真环境可以选择软件在环或硬件在环。软件在环是把整体设备完全虚拟化，即由虚拟控制器 CPU、虚拟 HMI、

虚拟信号及模型算法、虚拟机械模型组成；硬件在环是把设备主要的硬件放在仿真环境中，使用真实 HMI、真实控制器 CPU、现场 IO 设备与虚拟机械模型组成虚拟设备模型，如图 所示。

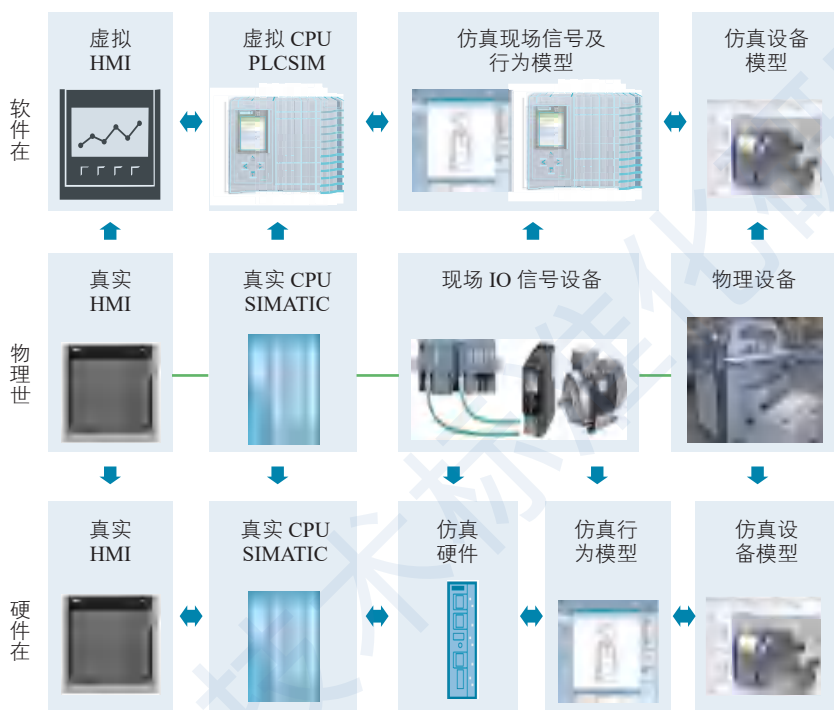


图 50 虚拟调试平台构成

通过搭建虚拟调试平台，对包含多物理场以及通常存在于机电一体化产品中的自动化相关行为进行 3D 建模和仿真，使机械、电气和自动化设计能够同时工作，并行协同设计一个项目：

- 对工业网络 PROFINET 进行高效规划、布局、仿真和验证。
- 机械工程师可以根据三维形状和运动学创建数字模型。
- 电气工程师可以选择并定位传感器和驱动器等行为模型。
- 自动化编程人员可以设计设备的控制逻辑和 HMI 程序，然后与机械模型、电气模型连接，实现基于事件或命令的控制和运动模型。

(3) 案例特点

虚拟调试不同于在物理世界中调试新网络或设备，而是通过在虚拟世界中创建数字孪生，然后模拟新网络或设备的功能测试和模型验证，这样可以实现：

- a) 规划 – 仿真 – 测试
- b) 虚拟环境中的程序代码测试和调试
- c) 设备运行仿真，可以发现设计问题以及对解决方案的快速评估
- d) 机器人单元操作的仿真
- e) 仿真新设备的产能，识别空间限制和对现有操作的影响，以便在安装前解决这些问题
- f) 对设备操作人员的培训

(4) 实施步骤

对 PFOFINET 工业网络的规划、仿真与测试，通过三步即可达到目的，如图 所示，包括创建 / 加载项目、调整、分析并输出报告。

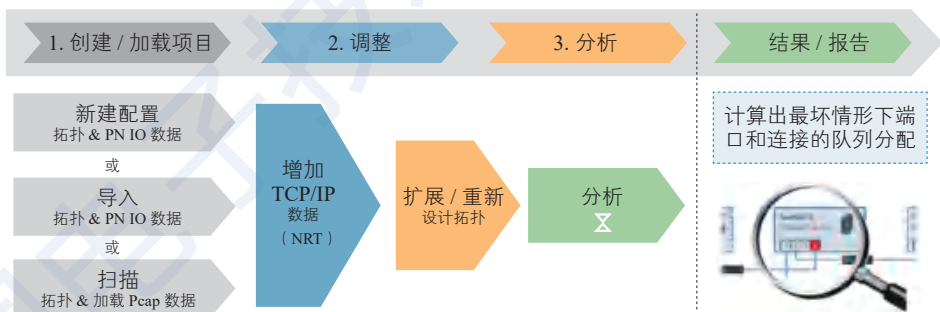


图 51 SINETPLAN 对 PROFINET 的虚拟调试

对设备的虚拟调试，需要以下几个主要步骤：

建立虚拟设备模型

首先要了解设备的真实控制机理，分析每个运动的真实物理场景中相对应的控制信号，在 NX MCD 建立虚拟设备模型，创建及匹配相应的

信号，并使用信号来控制运动模型的动作，仿真实际机械部件的运动情况，为后续使用 PLC 的虚拟调试做基础。

建立虚拟控制系统

在 TIA Portal 中编写 PLC 控制程序和 HMI 画面，编程和 HMI 工作完成后，启动 PLCSIM Advanced 建立虚拟 PLC，与真实 PLC 具有相同的功能，将 PLC 控制程序下载到虚拟 PLC 中；并启动 HMI 人机界面仿真器建立虚拟 HMI 人机界面。

建立虚拟模型与虚拟控制系统的映射关系

将 PLC 中的输入、输出变量与 NX MCD 中输入、输出信号建立联系，从而达到 PLC 中的输出信号作为 NX MCD 的输入信号，反之 PLC 中输入信号作为 NX MCD 的输出信号。

通过虚拟调试试验验证设计的可用性

启动虚拟 PLC，在线监控 PLC 控制程序的运行情况；在 NX MCD 中运行虚拟设备模型，查看程序控制的运动情况。通过虚拟设备模型的运动和控制逻辑仿真，优化改进自动化模型、电气和行为模型，以及物料和运动模型，而不会造成硬件资源的浪费。

(5) 涉及的关键技术

软件在环仿真技术

软件在环 (SiL: Software in Loop) 仿真是采用虚拟控制器模型和虚拟对象模型连接起形成闭环，以运行仿真对象来模拟其运行行为和状态，可以完成一些实际中难于实现的场景测试。

硬件在环 (HiL: Hardware in Loop) 仿真是将实时处理器和虚拟对象结合起来运行仿真模型来模拟仿真对象的运行行为和状态，通过 I/O、OPC UA 及网络等接口与被测对象相连接。也称为半实物仿真，是将需要仿真的部分系统硬件直接放到仿真回路中的仿真系统，仿真时，实际系统的

一部分设备与计算机通过各种信息通道相连，计算机和实际硬件共同完成仿真工作，并将仿真结果在电脑中进行分析，从而判断硬件的运行情况。硬件在环仿真不仅弥补了纯数字仿真中的许多缺陷，提高了整个模型的置信度，而且可以大大减轻编程的工作量。这种仿真的另一个优势在于它实现了仿真模型和实际系统间的实时数据交互，使仿真结果的验证过程非常直观，大大缩短了产品开发周期。

(6) 案例成效和意义

工业网络和设备的设计过程很难预测到生产和使用过程会不会出现问题，而虚拟调试带来许多好处之一就是验证工业网络和设备设计的可行性。虚拟调试允许设计者在物理设备生产之前进行任何修改和优化，因为用户在测试过程中可以修复错误，及时对自动化系统或机械设计进行改进优化，可以节省时间。虚拟调试将每个设计细节都验证好之后，就可以把这台设备做出来，然后只要在物理设备上再做 15% 或者 20% 这样少量的软件优化，设备就可以正常运行。

通过数字孪生技术的应用，帮助企业在实际投入物理对象（如设备、生产线）之前即能在虚拟环境中进行设计、规划、优化、仿真、测试、维护与预测等，在实际的生产运营过程中同步优化整个生产流程，以明珞装备为例，通过虚拟调试系统在规划、设计和调试阶段与客户交换数据和协调，将项目周期缩短了 20%–30%，减少 50% 以上的工程现场调试时间，最终实现高效的柔性生产，提高企业核心竞争力。

通过对 PROFINET 的规划与仿真，实现调试前的透明化，节约成本，变被动为主动。

案例五：数字汽车风洞技术研究

(1) 案例背景及基本情况

空气动力学性能是汽车的重要特性，优良的空气动力学性能对于提

升汽车的安全性、操控性、舒适性以及能耗经济性都有着重要的意义。作为目前研究汽车空气动力学的两种主要手段，汽车风洞试验与数值仿真有着它们各自的优势——风洞试验具有更高的直观性和实用性，但成本相对数值仿真较高；数值仿真拥有更好的可重复性和灵活的数据处理方式，但其准确性和可靠性低于风洞试验。因此将两者的优势结合、将风洞实验室进行数字化，是一项兼具市场前景与挑战性的研究。

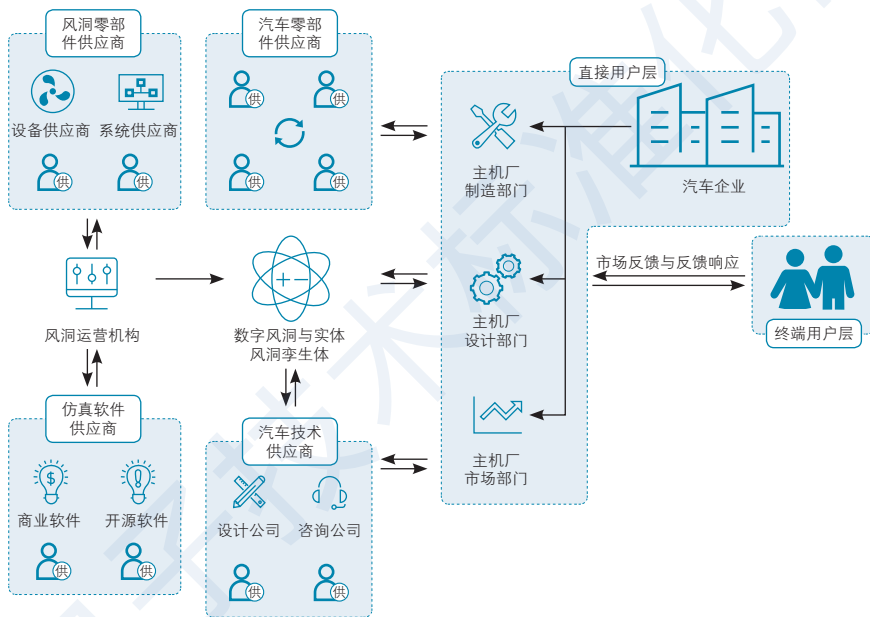


图 52 数字风洞数字孪生应用商业模式图

目前，世界范围内各大汽车公司（如奔驰、宝马、奥迪、福特及丰田等），软件供应商及服务团队（如 DASSAULT 公司），以及一流的风洞试验室（斯图加特 FKFS 风洞、NAVISTAR 风洞等）均有 / 已开展风洞数字化项目，并将其作为科研与技术服务的重点方向。而在国内，汽车风洞属于稀缺资源，对于风洞数字化的研究还处于起步阶段。

中国汽车技术研究中心汽车气动声学风洞拥有国际领先水平的车辆空气动力学测试条件，其流场品质、声学指标、测力性能以及完备的车辆造型开发配套设施为业内提供了高度成熟的研发解决方案。

利用数字孪生方式开展数字风洞建设，将风洞测试技术与 CFD 技术进行结合，使得在软件中重现风洞试验的流场细节成为了可能，该项目在为工程师提供更全面的流场信息的同时，也将为挖掘更深层次的车辆空气动力学机理、拓展风洞测试实验能力以及未来的风洞技术升级打下坚实的基础。

(2) 系统框架

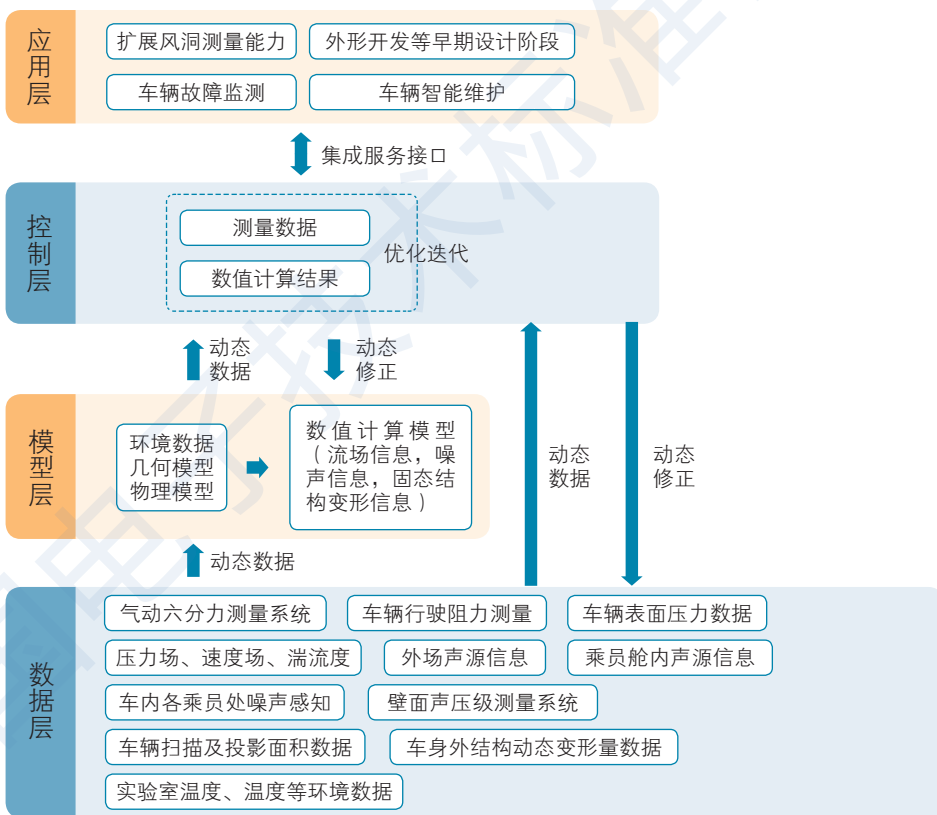


图 53 风洞 - 数字风洞数字孪生应用框架模型

数据层

数据层是物理世界与虚拟世界交互和协同的关键，也是数字孪生的关键。本层将通过先进的测量技术，将实验中所有的测量数据及环境条件转换为数字信息，并且能按照自诊断的要求对其进行相应处理和高效传输，同时也能接受控制的决策指令，从而实现少人干预的闭环控制要求。

模型层

在数据中得到的信息均可以与数值计算结果进行比较与优化迭代，其中气动力与流场信息相关数据对应流场计算结果，噪声数据可以与风噪匹配 nvh 仿真结果，车身结构动态变形对应流固耦合仿真结果。模型层要实现仿真模型的搭建和计算，要将几何数据、环境数据进行建模，重点是物理模型的选择与多个仿真软件之间的交互。

控制层

控制层的重点是实现仿真结果与测量结果的优化迭代，在迭代结果获得之后要反馈给数据层与模型层，提升测量设备与仿真模型准确性。

应用层

通过本课题打造数字孪生，仿真技术的应用将扩展到车辆各设计阶段以及风洞的升级改造阶段。对于本实验室，信息将用于提升仿真精度与测试精度、扩展风洞测量功能，由本系统提供的信息将涵盖汽车产品的外形开发、故障检测、智能维护等应用。例如，通过日益智能化的工业设备所提供的丰富传感器数据与仿真技术强大的预测性功能双剑合璧，帮助车企分析特定的工况并预测故障，从而在生产和运维方面节约成本。大部分产品研发成本都锁定在概念设计阶段，本系统的应用可以在早期快速迭代获得最优气动性能，避免在不实际的设计上浪费时间，并且防止在验证阶段对设计返工。

(3) 案例特点

本案例的主要特点为对上汽中心风洞实验室进行的详尽的建模与数字还原，通过数字孪生技术，在实体风洞与数字风洞间建立起数据映射关系，不断完善数字风洞的物理模型，拓展实体风洞的测量能力限制。该项目的创新点有：

风洞实验室的数字化模型搭建

相比于传统 CFD 仿真，数字风洞将为整车仿真提供更高拟合度，更高精度以及更具有可对比性的仿真数据。利用两款基于不同原理的 CFD 软件对中心风洞进行数字化，同时进行不同风洞间、风洞与数字风洞间的横向对比。

风洞标定模型的设计、测试与应用

基于一款自主设计制造的风洞标定的 CDA 可调模型，该模型可以为不同风洞间、风洞与数字风洞间的横向对比提供多种 CDA 配置下的数据，也可用于设备稳定性与数据可重复性检测。

数字化成果的集成与封装

利用 CFD 软件的开发接口，将数字风洞集成化、功能化、插件化，将研究结果转化为具有自主技术的软件插件，形成未来服务企业与客户开发的重要技术工具，为未来在国产软件、开源软件内的应用积累技术，应对可能发生的商软技术壁垒。

(4) 实施步骤

该项目的实施步骤主要分为四部分：项目启动后，首先将基于两款商用软件（STAR CCM+ 和 PowerFLOW）对上汽中心的气动声学风洞进行物理建模，并对空风洞中的关键流场特性进行对标，例如对边界层厚度、射流角度以及压力梯度等进行调整，获得更为真实的流动模拟方法。

第二阶段为可变 CDA 模型的制造与数字风洞的矫正环节，通过具有

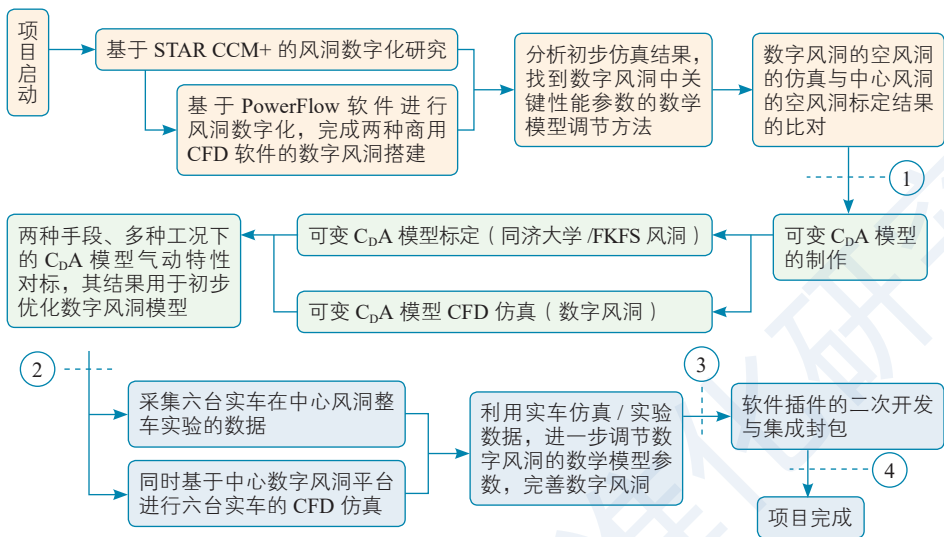


图 54 数字汽车风洞技术研究实施步骤

特定 CDA 数值的模型的测试，对非空流场的仿真模型进行进一步的校准和修正。

第三阶段为多车型的数字风洞完善环节，在这一阶段中，六类（微型轿车、轿车、MPV、SUV、轻型客车以及轻型卡车）基础类型的典型车辆将作为用于最终验证和完善数字风洞的数据样本。至此，数字风洞物理模型搭建完毕。

第四阶段为二次开发阶段，结合软件的二次开发接口，形成可以嵌入 CFD 软件的功能性插件，对目前的仿真流程进行依据用户需求的优化和补充。

(5) 涉及的关键技术

基于两种不同软件的数字风洞搭建

基于 STAR CCM+(SIEMENS) 软件的稳态和瞬态计算模型对中心气动声学风洞进行几何重现和物理仿真，利用该数字风洞预测车辆在实际风洞

中的受力情况，利用风洞实测获得的数据和数字风洞的预测结果进行对比并利用实测结果对于仿真结果进行评价和修正。其中，需要格外关注的变量主要为边界条件的设置与湍流模型选择。由于汽车风洞外流场具有强烈的湍流与瞬态特性，因此不同的湍流模型对于力学结果的影响非常显著。

结合 STAR CCM+ 软件平台下的数字风洞边界条件设置，基于 POWERFLOW (DASSAULT) 软件对中心气动声学风洞进行建模仿真。除了对比该软件的力学仿真结果外也要重点关注该数字风洞对于实际声学测量的预测的准确性。

可调 CDA 标定模型的设计制造

设计制造一辆具有可变 CDA (即气动阻力系数 * 投影面积) 值的风洞模型车，使其满足 CDA 在 1.2m^2 至 2.0m^2 内连续可调在 2.2m^2 ， 2.4m^2 ， 2.6m^2 处间断可调。利用其 CDA 可调的特性纵向地检测风洞试验室测量的稳定性与可重复性，横向地比较不同风洞试验室的力学测量机构，提升各试验室间的测量数据的可对比度与参考性，这对于目前国内整车风洞技术的研究与进步有着重要的意义。

风洞测试与数字风洞的标定

利用至少六台实车与可调 CDA 模型的风洞试验结果对两种数软件平台下的数字风洞进行调整，逐步修正其物理模型与仿真边界，最终完成该数字风洞的标定和结果修正。

数字风洞的调试与封装

出于对于操作便利性和高集成度的追求，在完成 STAR CMM+ 平台下的数字风洞建模后，要对其基础功能进行封包整合，并以插件的形式嵌入 STAR CCM+ 以提高空气动力学正向开发的便利性。该插件应具备虚拟风洞流场形式的选择、不同湍流模型的选择、湍流模型参数的风洞对标推荐值、计算规模与硬件匹配程度、误差预测与修正方法等多种功

能以确保工程师可以获得具有与风洞试验极高对比度的原始数据与其所采用模型对应的修正方法。

(6) 案例成效和意义

中汽中心风洞数字化是一项兼具学术和市场的前瞻性的重要科研项目。虽然目前国内部分风洞运营方已经提出了“虚拟风洞”或“数字风洞”的概念，但具备实体风洞对标能力并得到学术界普遍认可的数字风洞还尚未出现，该研究的先进性与紧迫性不言而喻。其关键成效在于：

提升数值仿真对标风洞试验的模拟精度

相比于传统 CFD 仿真过程，数字风洞的搭建需要基于特定的风洞设施与空气动力学试验设备，对于一些重要的流动特性（例如边界层厚度，湍流度空间分布，气流散度角空间分布等）进行模拟修正，并在此基础上与试验室测量结果进行对比调试。由于引入了特定风洞的流动参数，因此数字风洞模型也是因风洞而异的，其最大的特征在于考虑了风洞设施自身对于流动的影响，相比于传统 CFD 仿真，其结果与风洞试验结果相比将更具参考性。参考目前市场（EXA）价格，完成 30 轮计算并结合实验设计、实验实施与数据分析，风洞数字化项目的收入约为 150 万元/项目。如果以租赁形式向主机厂提供数字风洞插件（参考 EXA 收费方式，按照算例证书收取费用），按照 6 家企业自研并采用数字风洞证书估算，数字风洞证书收入约为 120 万元/年。

气动声学风洞试验能力扩展（虚拟）

由于设备技术及建造成本上的约束，所有的现实风洞都是“妥协”的，有局限的，无法满足汽车空气动力学研究日益增长的试验需求。通过数字化，可以最大限度的克服风洞的这些局限性，提供超越风洞实际试验能力但准确性和可靠性非常高的准现实虚拟仿真结果。如提供更高的风速，更真实的雷诺数，更大尺寸的试验对象，不同的环境条件模拟，等等。总

体上，以目前 60 万级外包开发项目为例，单个项目可获得 15%–20% 的效益增长（约 12 万元），应用投入市场后，由数字风洞带来的 CFD 仿真效益增长可达 300 万元以上。

提升工程服务竞争力，仿真 / 试验相互促进

中汽中心风洞于 2020 年中进行标定，届时风洞各项参数指标将可以作为数字风洞搭建的对比基础，结合两种特定的仿真软件对其物理模型的参数进行调节。该研究成果可以缩短整个开发流程，同时，通过与风洞试验结果对比得到的高可信度的数值仿真结果也将更具有参考价值。目前预估，数字孪生技术将带来年均 300–400 小时的增量，转化约 1000 万 / 年的收入。经过后期多轮与试验数据的对比调试后，利用 CFD 软件的二次开发接口将研究成果封装转化为插件程序，有选择的提供给风洞试验的大客户。在提升中汽中心空气动力学研发实力的同时，进一步提高工程服务竞争力，形成仿真及试验业务的相互促进的良好局面。

案例六：造船用大型起重机械数字孪生应用

(1) 案例背景及基本情况

造船用起重机是造船工艺流程中的关键基础设备，船舶建造中许多零部件、分段直至总段的搭载通过起重机高吊运输设备来实现，在仓储、预处理、加工、焊装、总装、涂装等过程中充当关键角色。提高起重机的利用效率、增加潜能、降低故障对实现精益造船至关重要，通过以起重机为代表的重要造船装备的转型、升级，可解决船舶工业生产效率低、质量差等问题。

但是，一方面随着信息技术和互联网技术的飞速发展，以及自动化新技术的应用，起重机械正在向信息化、自动化和智能化方向发展，传统起重机升级成为智能制造装备的发展空间巨大。另一方面，由于近些年来全球海洋航运严冬来临，船舶业市场环境严峻，残酷的竞争态势迫

使船舶企业加速结构调整，转型升级。利用智能制造装备是应对挑战的最佳助推器，以智能造船起重机为代表，面向工业现场的具有智能导向精确定位技术和智能远程控制技术以及智能集群控制技术的起重搬运设备将加快推进数字化、网络化、智能化造船整体水平。

中船九院采用多种新技术、新手段，研制开发新一代智能造船起重机，通过数字化设计，提高材料利用率，优化设备机型，通过数字化生产、运维、监控，为船厂生产调度提供合理化建议，助力船舶企业提高作业效率、减轻劳动强度、改善操作环境、增强安全性能，同时推动数字化造船的智能化进程。

(2) 系统框架



图 55 造船用起重机数字孪生系统架构

资产层：是造船起重机械的物理实体。从其构成上看，可解耦为材料、元器件 / 零件、组件、部件、子系统（如行走机构、起升机构）、系统（如机械系统、电气系统、液压系统）、全机直至多机协作群等几个产品层级。

理论上每一个层级都可以有一对一映射的数字孪生虚体，但从工程应用角度，未见到有如此高保真、细颗粒度的机理模型，实际上也无从必要，为满足业务功能需要，基本上向下分解到组件一级，已可充分满足要求。

集成层：此层包括传感器、执行器等元器件与设备，该部分属于物理实体域。又有一部分跨入数字虚体域，包含这些设备采集到的工作数据，可以上传给起重机械数字孪生，也包含数字孪生通过模拟运行分析后产生的决策数据，可以下达控制指令给物理实体。

信息层：此层将通过网关、通信协议等手段进行必要的筛选与清洗后的数据，针对面向物理实体和逻辑对象的机理模型、数据驱动模型等建立规则，匹配赋值。

功能层：此层是起重机械数字孪生的核心，提供基础保障服务。它由三个子域组成，其中生产和管理系统是将物理设备生产运行常用数据固化，负责执行数字孪生生产运行过程的同步动作及比对监控，并可脱离物理实体，单纯驱动数字孪生模拟运行，从而预判故障，实行路径优化。文件缓存服务器用于暂存性数据文件的存取，如设计或生产计划排产变更数据、零部件替换带来的技术规格调整数据、新开发 APP 应用程序实用前的调试数据，或者从物理实体采集到的突变数据等，在此可作适配性分析并生成报表，供决策者判断后再进行下一步处理。数据库服务器则是将实体设备各种生产运行历史数据、虚拟样机制造调试数据、工艺专家知识库数据、相关方应用服务数据等进行集中管理，可根据需要随时调用。

业务层：提供整体业务逻辑运算服务，例如流程运行，权限管理逻辑。它接受企业客户端请求，经业务逻辑验证后，处理成数字孪生功能层能够接收的请求命令并提交，在功能层处理完后将结果返回客户端。

协同层：提供 Web 访问服务请求，例如登陆请求、查询请求、保存请求等，可满足企业用户将改造、维护等部分业务外包时分配访问权限，

通过为每个协同登录用户分配专享空间，将个别外协用户操作对系统的冲击降到最小。

应用层：提供企业用户业务层及协同层可访问的管理平台，用户基于浏览器使用相应功能模块。

(3) 案例特点

(1) 解决数字化基础的问题

a) 数据采集。主要由 OPC 服务器来完成，如该控制系统采用 ProfiBus 现场总线网络，则 OPC 服务器采用 SIMATIC NET 协议，只需在 OPC 服务器中做好该电控系统的硬件组态，就可以接受和发送来自主 PLC 的数据了。当现场设备发生变化时，由于服务器提供的接口一致，只需对 OPC 进行重新组态，监控软件无需更改。

b) 数据传输。采用无线工业 WIFI 的传输方式为最佳方案。采用无线工业 WIFI 的主要优点是能极大地增加系统容量、提高通信质量和数据传输的速率，并且可以通过有线网络的转接，实现 Internet 的接入。

c) 数据存储。为了便于维护人员查看设备运行状态及故障信息，采用了可视化动态显示，利用通用的组态软件对画面进行组态，并将数据存于后台数据库中。

d) 起重机防撞和安全监控模型。设备、单元层全部关键数据采集监控，结合数字仿真模型，实现起重机本机和区域防撞。

e) 可视化管控中心。起重机安监信息平台由原来的单台起重机运行数据的本地监控，演变实现了整个厂区多台起重机设备的集群式监控管理，是对起重机信息化技术的指数级增长，数字化、网络化进步和集成式智能化创新的体现。建立可视化管控中心，实现船厂智能化设备联网，为船舶业智能工厂的建立打下了很好的基础。

f) 起重机远程运维维护平台。可以实现设备的本地、远程监控和在

线维保平台功能的方案。具有对标准中要求采集的信息进行处理及控制的功能；具有对起重机运行状态及故障信息进行实时记录和历史追溯的功能；具有故障自诊断功能；系统在发生故障时，除发出报警外还应具备止停功能。

g) 起重机能源管理平台。MES 能源管理基于现场能源网络，通过 OPC 接口采集能源网络 PLC 实时计量数据；为企业及时、准确的基础数据，提升耗能设备的优化运行，实现了企业的自动化与信息化融合。

解决实际工程应用中经常遇到的问题

a) 起重机双主梁分层设计与制造。采用数字仿真 3D 建模方式，对四主梁双小车和双主梁结构进行设计，将设计结果进行参数对比，对比结构显示，双主梁结构形式在成本节约方面效果显著，而且一方面结构相对简单，使得双主梁结构在设计、制造、安装、维护等方面的成本控制相对于四主梁结构小车结构具有很大优势；另一方面，大车轮压较小，在承轨梁设计成本控制上起到很大作用。

b) 重型构架空中连续翻身工艺。采用数字信号采集技术，设备层 PLC 根据控制模型，由使负载在空中连续翻身过程动作更加准确、平稳，在上小车两钩 M 和下小车主钩 N 上均加装了起升高度编码器，能够把各钩的高度信号即时传回 PLC 系统；同时，在上、下小车行走机构车轮上加装了测量轮装置，能够把它们所处的位置即时传回 PLC 系统。这样可帮助 PLC 系统随时作出判断，并发出正确指令。

c) 大型起重机纠偏问题。通过对起重机啃轨问题现状的分析，提出了实时在线纠偏的方案。实时在线纠偏就是起重机在运行过程中可能出现啃轨时，通过微控制器采集车架的偏斜量信号并实现对车轮运行状态的自行动态调整以保证车轮运行中心线与轨道中心线基本重合。使用数字仿真模型进行工况模拟。具体措施为：采用数字驱动技术，把大车运

行电机改成变频驱动方式。两套变频器设置成外接电压控制模式。使用数字滤波技术，设计软、硬件两套滤波系统，为微控制器准确采集到旋转编码器输出起重机的偏斜信号准备了基础。根据电动机、减速器、车轮的固有传递参数推导出适用于本控制系统的动态响应方程，并由方程中计算出的响应时间确定系统的控制参数，从而保证控制系统达到较好效果。

d) 重载起重机上下小车三钩高精度同步问题。利用数字控制驱动技术：实现高精度同步。智能化驱动功能体现于控制单元中的闭环控制功能。不仅可用于矢量和伺服控制，而且还可进行 U/f 控制。变频器还可对所有传动轴进行转速和转矩控制。吊钩同步运行时，起制动（包括紧急停车）时同步精度不超过 $\pm 100\text{mm}$ ，稳速运行时在吊钩整个行程范围内同步精度不超过 $\pm 50\text{mm}$ 。上、下小车同步运行时，起制动（包括紧急停车）时同步精度不超过 $\pm 200\text{mm}$ ，稳速运行时在整个行程范围内同步精度不超过 $\pm 100\text{mm}$ 。起重机运行起制动（包括紧急停车）时同步精度不超过 $\pm 200\text{mm}$ ，稳速运行时起重机运行同步偏差不得超过 $\pm 100\text{mm}$ 。

e) 吊运设备的轮廓和位置检测。智能起重机具备工况实时感知技术，由计算机辅助识别系统(Computer Assistance Recognition, CAR)系统完成。利用多种输入技术（光电编码器 / 磁感应 /RFID/ 条码，GPS/ 北斗 / 室内 Wi-Fi 定位，激光 / 微波 / 超声波雷达），实现多源数据采集监控。

f) MES 工艺规划接入。具有工厂车间级 MES 系统有开放接口，系统可方便接入工厂信息网络并且提供开放的数据接口。平台可提供双向信息流。输入起重运输设备信息，其采集起重运输设备集群运营数据，建立海量数据库，通过数据分析和数据挖掘，将海量数据转化成有效信息，为终端起重运输设备集群提供安全运行和维护服务。

(4) 实施步骤

三维建模

通过调研和分析对现有三维数字化软件进行筛选，确定三维数字化实施方案，建立协同设计平台，建立符合起重机专业数字化要求的信息编码体系，并收集或自编建立通用标准件三维模型库，完成起重机全信息模型。在目前三维出图无国家标准的情况下，研究三维数字化模型转换成生产制造图纸的可行性以及总结起重机三维数字化设计方法。

分析优化

(1) 通过起重机三维数字化模型实现虚拟现实技术，实现人机交互、内部浏览、管线干涉和碰撞检验等功能。通过起重机三维数字化模型的数据信息实现结构有限元分析、机构运动模态分析及起重机内部环境分析和外部因素影响分析等方面的应用，如大拉杆风振研究等。

制造协同

通过起重机三维数字化模型进行模拟施工过程的应用研究，初步实现三维模型信息与施工管理的有限融合。如起重机模型可用于制造过程中，主梁抬吊及刚性腿、柔性腿安装方案的分析评估等。

数字化运行

(2) 在起重机运行过程中，结合起重机的运行数据，实时在线调用备用数据库实现该起重机运行状态的可视化显示，能够实时掌握运行中起重机的状态。如起重机抬吊分段翻身过程，行走同步纠偏等，都可在数字孪生虚体中同样体现，也可通过数据驱动进行工况模拟，借助虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，为物理实体增加或扩展新的能力，能更好的保障起重机的安全运行。

智能监控

通过起重机数字孪生系统，可对作业区及设备进行 24 小时在线实时

健康状态监控、负载率信息分析等，方便企业更宏观的对生产资源进行调度，及健康状态评估、预测，制定保养维护方案。

预测性维护

(3) 建立设备载荷谱数据模型，评估关键部件维保要求，并实现基于故障信息库的预测性诊断分析，最终达到集群汇总数据平台。

(5) 涉及的关键技术

起重机三维建模及运行状态实时可视化技术

(4) 采用三维有限元建模技术构建起重机动力学模型，分析计算各种工况，找出起重机设计结构的薄弱环节。通过对薄弱环节针对性的应力、形变以及疲劳等的监测，结合起重机当前的起重量、位置信息、升降速度和风速等参数，采用数字计算类设计技术，实现起重机运行状态、应力状态和形变状态的实时三维显示，直观地远程再现设备薄弱环节的受力状态。

基于小波神经网络的部件疲劳分析技术

起重机在运行过程中会出现非平稳随机振动，该类振动对受力部件的使用寿命影响较大。通过在起重机该类环节处加装振动检测设备进行随机振动信号的数据采集，基于小波神经网络的数据处理与分析方法，对随机振动信号进行消噪滤波和求取频带能量，并根据各个频带能量的变化提取特征数据，然后采用神经网络进行零件疲劳状态的识别和分析，可以提前发现“带病上岗”的部件。

(5) 基于智能混合算法的故障诊断及检测方法

根据起重机的历史数据构建变速箱故障的数学模型，通过模拟试验和振动测试，对理论模型和计算方法进行修正和验证，实现起重机变速箱不开箱安全检测。结合模拟试验、神经网络及支持向量机技术的不开箱故障诊断及检测方法，能快速、准确确定故障类型。

（6）起重机部件的多参数预警维保技术

起重机有时处于超负荷的运转状态，部分超出设计年限和安全使用期限，但由于缺乏科学有效的部件维保机制，造成设备故障频发。通过数字孪生技术，分析已有的维修记录数据，可建立起重机多参数的状态监测维修更换模型。根据对设备关键部位在线或离线监测，依据可靠的预测模型对潜在故障源进行危险性分析，根据评测结论更换或维修零部件，将在较大程度上避免设备故障的发生。

（7）实时数据采集、传输和接收的设计技术

（8）数据采集与传输模块通过各类传感元件实时检测起重机运行过程中起重力矩、起重量、起升高度、风速、运行行程、制动器状态等参数，发送模块根据指令可定时或实时地将起重机的状态参数打包发送到远程监测中心的数据服务器。数据库服务器端的接收程序完成起重机状态参数等数据的接收、分类和数据库保存。Web 服务器部署安全作业与维保监管系统，通过数据绑定方式调用数据库服务器中的数据，完成各状态参数的实时显示、状态预警与维保操作的交互。

（9）基于 SaaS 模式 重机安全作业与维保监管系统

（10）采用软件运营服务模式 SaaS（software as a service）构建起重机安全监测与维保 Web 系统，由系统统一部署，设备快速联入系统，可满足十万台起重机同时在线监控的需求。系统具有设备管理、地图显示、实时监测、数据统计、维保管理、故障分析和备件管理等功能。同时，对每一台起重设备进行监测与维保的按需定制，做到不同起重机类型、不同状态参数在系统上的实时监测和预警，并及时提示起重机部件维保和更换等信息。

(6) 案例成效和意义

造船用大型起重机械数字孪生技术应用研究以提高船舶业起重机的安全、高效作业与管理为目的，结合物联网技术和先进控制理论，建立了一套基于模型的起重机设计、仿真、安全运行与远程监管及在线维保系统，目前已经实现了整机状态监控、关键部件在线检测，故障诊断等，在起重机行业起到具有良好的示范作用。通过研究，使造船起重机具备了以下智能化技术特征：

自感知：利用多种输入技术（光电编码器 / 磁感应 / RFID / 条码，GPS / 北斗 / 室内 Wi-Fi 定位，激光 / 微波 / 超声波雷达），实现本机防撞和多机协同作业。可以实现本机防撞和多机协同作业的方案。具有防止大型分段撞击起重机腿部功能，其具体功能包括：在门式起重机小车防撞系统中，激光会在设定的安全范围内形成安全“门帘”，一旦有任何物体进入“门帘”系统及时报警提醒司机，并结合小车的运行速度、及小车运行距离等信息，可以预测出工件边缘的运行位置从而报警，确保小车运行安全。

自适应：数字控制驱动技术。利用数字变频器 1/1000 的运行调速范围，实现两台（或多台）起重机的联合作业，同步作业。智能化驱动功能体现于控制单元中的闭环控制功能。不仅可用于矢量和伺服控制，而且还可进行 U/f 控制。变频器还可对所有传动轴进行转速和转矩控制，并执行其它智能驱动功能。控制单元用于多机传动系统的智能控制。它配有控制驱动的相关 I/O 以及与上位控制系统通讯的接口。

自执行：拥有智能工艺规划接入技术，具有工厂车间级 MES 系统有开放接口，系统可方便接入工厂信息网络并且提供开放的数据接口。

全面监测：除了满足国家标准对起重机监控参数和状态的要求外，对起重机减速器轴承振动、大车啃轨状态、卷筒轴疲劳状态、起升制动器

磨损状态、供电坦克拖链受力状态等进行监控，监控参数和状态更加完善，达到国外同类产品性能指标，进一步加强对起重机安全监控和事故预防。

远程维护技术：利用数字工具（本机联网 / 多机网络 / 物联网，手持无线终端，云计算平台，大数据分析），实现单机、多机的本地、远程监控和大型门式起重机维保数据库、在线维保平台功能。平台将运维部门的大部分信息类工作转移到云端。深度挖掘客户需求，有效开拓市场。

案例的示范效应将推动起重机械数字孪生系统国家标准的修订，促进起重机设计和监测方法的改进和提高，抢占高端起重机的市场份额。

案例七:管道智能工厂数字化集成系统

(1) 案例背景及基本情况

船舶管系制造加工是船舶建造的重要组成部分，同时也是确保船舶安全航行的关键，具备总量庞杂、工艺复杂等特点，上世纪 90 年代，国内各大船企花费巨大代价尝试开展管法兰半自动装配以及先焊后弯自动生产流水线升级工作。但受到造船设计、生产管理和工业基础水平等因素限制，导致管子自动化生产线目前正常生产的仍然寥寥无几。根据上海地区船舶配套管子加工设施固定资产投资建设经验，形成如此规模的船舶管子加工能力，固定资产投资将达到近 20 亿元人民币，且受管子加工技术进步、固定资产折旧及报废、退市进郊等产业政策影响，船舶管子加工设施大致呈现出每隔 10~15 年大规模建设一次的波浪式渐进过程。随着国内船厂智能制造转型升级的重要背景下，对于船厂车间及生产线技术研发手段也提出了更高要求。上述内容都为管道智能生产线一体化技术研究内容提供了强有力的市场需求。

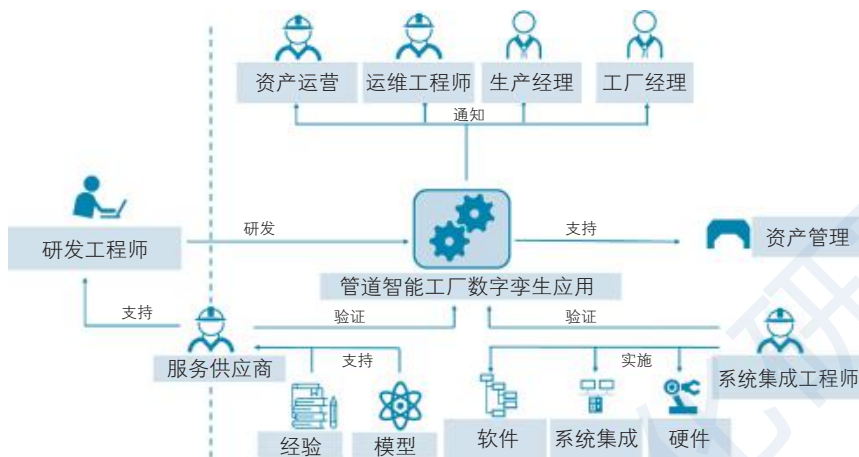


图 56 管道智能工厂数字孪生应用

本项目是张江国家自主创新示范区专项发展资金项目，中船九院作为主研单位，和上海江南船舶管业有限公司（以下简称江南管业）、浙江金马逊机械有限公司（以下简称浙江金马逊）、唐山开元自动焊接装备有限公司（以下简称唐山开元）联合实施。其中中船九院负责先焊后弯生产工艺、数据采集与监控、制造执行系统、可视化设备资产、系统集成等工作；江南管业参与先焊后弯工艺研发与管控平台落地；浙江金马逊负责数字化弯管机研发；唐山开元负责数字化切割与焊接装备研发。

(2) 系统框架

系统架构划分为四个层级，分为企业层、车间层、控制层和设备层，见下图所示。

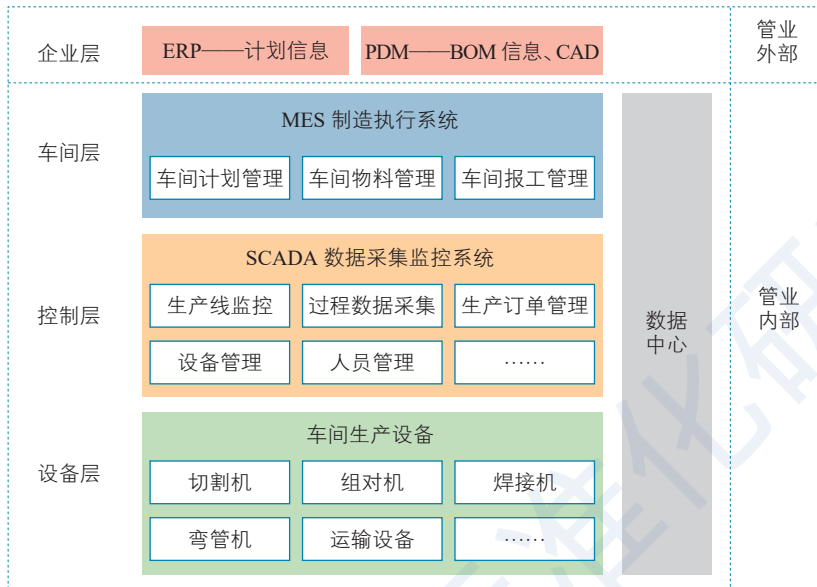


图 57 系统架构

企业层：ERP 系统为江南管业的母公司江南造船集团的 ERP 系统，为江南管业提供管系生产计划数据；PDM 系统为江南研究院等船舶设计院所的设计数据管理系统，为就江南管业提供管系 BOM 信息和 cad 图纸文件。

车间层：车间层为本项目建设开发的江南管业制造执行系统，拥有车间计划管理、车间物料管理和车间报工管理三个功能模块。

控制层：控制层为本项目建设开发的江南管业 SCADA 数据采集监控系统，拥有生产线监控、过程数据采集、人员管理等功能模块。

设备层：设备层为江南管业车间配置的各类生产、加工设备，均为外购设备。

本项目的工作重点是建设江南管业内部承上启下的车间级 MES 系统和控制层 SCADA 系统，并通过数字孪生技术，集成工艺流、数据流、信息流，从车间设计、生产制造和性能分析等方面进行了仿真验证。

(3) 案例特点

船舶行业的信息智能制造技术应用与创新能力，首先表现为信息的集成应用水平，近年来，我国船舶工业积极推进信息化建设，但信息的流动仍局限于单个业务功能，信息集成性差，“信息孤岛”现象较为严重，同时由于受到国内造船设计水平、生产管理水平和工业基础水平等因素限制，管子自动化生产线目前正常生产的仍然寥寥无几。本课题突破船舶管道加工传统的“经验+单机”离散型制造模式向“数字化模拟+柔性生产”先进制造模式转型关键技术，实现管道智能工厂中管径先焊后弯智能生产线工艺方案及船舶管系的设计、制造、管理信息一体化，打造管道智能工厂集成系统平台。本项目建设主要具备如下特点：

先焊后弯无余量数字化智能化生产线技术

该项技术具备国内领先水平，通过导管绕弯回弹非线性补偿模型构建、导管绕弯回弹智能补偿模型构建技术研发，形成导管绕弯补偿回弹预测技术，并运用到管道先焊后弯数字化生产线中。

面向工艺流、数据流、信息流的数据一体化系统集成

以工艺流为主线，将管道加工前置数据、生产过程中由数字设备产生的数据、以及生产管理三种数据，进行信息流与数据流分析，为系统集成开发奠定了重要基础。

“虚实结合”的生产线设计与制造创新模式应用

所谓虚是指通过数字化技术来仿真真实项目建设，所谓实是指仿真所需的支撑工艺、系统、数据都来源于真实的项目需求和相关数据，通过这种方法，模拟和验证项目方案的可行性、合理性。

(4) 实施步骤

船舶管道加工过程涉及严密的工程设计、复杂的装配生产线、大量的控制设备与工艺参数，产量和品质极大地依赖管道加工生产的流程管控

和优化决策。为了突破管道加工传统“经验+单机”离散型制造模式向“数字化设计+柔性生产”先进制造模式转型的关键技术。在生产线设计阶段，采用三维数字化设计手段，从前期管道生产线工艺方案设计（物量数据分析、三维建模、工艺仿真、流程优化），到后期车间改造升级工程设计（多专业 BIM 协同、厂房通风环境、绿建采光模拟、焊接作业 CO₂ 浓度分布），围绕“车间、生产线数字设计一体化”、“三维数字化设计工具一体化”，在设计理念和设计手段上，利用数字孪生技术，突出数字化设计及绿色设计核心思想。并结合船厂生产管理软件平台和生产线智能装备，作为三维设计和仿真优化的数据支撑，达到用真实生产管理数据驱动仿真设计模型，在生产线正式投产前，搭建智能管道生产线虚拟数字样机。具体实施路径如下：

管道智能制造工艺技术研究

以上海地区典型管子加工车间现状为基础，以成组技术原理为指导思想对管件按照生产加工工艺进行分族，通过将现有成熟的先进管子加工装备与信息化技术进行集成，设计一条能够满足多种管型的中径（114mm~219mm）管子上线进行自动化生产，并能够实现管子先焊后弯工艺的智能化生产线。

管道智能切割与焊接装备技术研究

开发了机械式定长切割机、等离子/火焰定长切割机、弯头切割机、相贯线切割机、组对机、管法兰焊接机、管法兰焊接生产线、管弯头焊接机、立体料架 9 个切割焊接设备，这些设备根据船厂业务需求，形成了管子智能切割焊接生产流程。

管道先焊后弯智能装备技术研究

完成工控机+PLC 形式研发弯管机数控系统研发。该形式不但可以达到高速高精度的性能，还具有很高的可靠性以及易扩展性、易维护性等

特点。

制造执行系统研究

针对管件生产加工企业的厂级的项目管理，研发数据管理，计划管理，流程管理，质量管理，报表管理，看板管理，工时管理，用户管理等系统功能模块，形成统一的操作管理平台。

数据采集与监视控制系统研究

开发一套数据采集与监视控制系统，包括生产线 SCADA 监控、过程数据采集及接口、生产订单管理、物料信息采集与管理、人员管理、电子看板、视频采集和生产报表等功能模块

三维可视化管道生产线设备信息管理系统

完成三维可视化设备信息系统开发、管道生产线物流仿真系统开发、管道工厂沉浸式虚拟体验系统开发等工作。

数据集成管理技术研究

完成了数据集成管理技术的研究工作。包括数据构架、集成工作的内容、PDM 与 MES 的数据接口、MES 与数据采集与监控系统的数据格式标准化、数据集成五个方面的技术研究。

(5) 涉及的关键技术

本课题采用虚实结合研究方法开展项目工作，以江南管业中管径生产线为背景，研发包括工艺、设备、数据、管理的智能生产线落地实施方案，并在此基础上，以真实数据为驱动，利用数字化手段仿真模拟出管子加工智能生产流水线，其中包含的关键技术包括：

法兰先焊后弯工艺技术研究

法兰先焊后弯技术的核心在于无余量弯制，实现管子的无余量弯制是提高管子加工效率极其关键的手段，是实现管子先焊后弯工艺的先决条件。法兰先焊后弯既可减少材料的浪费，又可简化加工工序、缩短管子

加工周期，经济效益显著。在此基础上，确定设计原则、纲领、上线分类、生产流程、信息系统数据、设备选型与配置，形成工艺流程和工艺方案。

船厂生产管控系统技术研究

船厂生产管控系统分为业务应用层，支撑层，数据层三个层次。业务应用层包括项目管理，数据管理，计划管理，流程管理，质量管理，报表管理，看板管理，工时管理，用户管理几大模块，主要对接用户配套，工艺，计划，生产，质检等几个部门对数据访问，编辑的直接需求。支撑层作为业务层和数据层中间的桥梁，主要包括数据检索组件，数据库组件，报表组件，日志组件，流程引擎等几部分。

数据采集与监视控制技术

实时监控生产线上各 PLC 设备的状态，显示现场出现的各种设备的故障及报警，系统将对 PLC、现场终端及各自动化设备的工作状态等信息进行采集，并在监控画面上以颜色来显示设备的状态，数采需求表对每个工序需要采集的“工位信息、设备状态、工艺参数、生产统计、生产追溯、报警数据”的信息整理除“采集变量、接口、数据类型、采集方式、设备变量名称、变量地址”等的信息。

基于真实数据驱动的数字化仿真技术

利用数字孪生技术，在计算机虚拟环境中，基于产品生命周期（产品设计、工艺流程、产品制造、服务）的相关数据为基础，驱动智能管道数字化集成系统进行仿真制造，将虚拟仿真技术应用于数字化设计、数字化制造、数字化管理等领域，使其形成一个虚实映射的智能数字化集成系统，为今后正式工程建设先奠定一个可操作、可落地的设计、制造、管理为一体虚拟数字系统。

数据集成管理技术

江南管业数据集成项目的体系架构划分为四个层级，分为企业层、

车间层、控制层和设备层，本项目的工作重点是建设江南管业内部承上启下的车间级 MES 系统和控制层 SCADA 系统。具体来说，本项目进行了以下集成工作：

- a) 企业级 PDM 系统与车间级 MES 系统的数据接口
- b) 本项目对江南管业新建的 MES 系统的数据格式进行了通用格式定义。
- c) 本项目对江南管业新建的 SCADA 系统的数据格式进行了通用格式定义。
- d) 对 MES 系统、SCADA 系统之间的数据进行纵向集成。
- e) 对 MES 系统与设备层之间的数据进行纵向集成。

(6) 案例成效和意义

通过本课题的建设，构建了一条中管径管道智能（数字化）制造工艺生产线设计方案，并与智能（数字化）装备结合，形成一条中管径管道智能（数字化）制造工艺生产线，该设计方案经过数字孪生技术验证，采用虚实结合方法，以真实数据为驱动，利用数字化手段仿真模拟出管子加工智能生产流水线，满足船厂管道数字化生产要求，实现智能制造工艺和智能装备数字化制造的一体化集成。

本次项目以点带面，具备示范效应，项目成果及方法对船舶行业具备普适性，可以辐射整个行业，通过下游制造方生产制造数据与上游设计方产品设计数据的标准化，实现产业链上下游的互通和集聚。该课题的研发，大大提升九院智能制造相关领域的设计水平、质量。课题研究成果为我公司后续设计项目提供了技术支持，同时也为实现数字化车间规划与建设打下坚实基础，课题成果达到国内先进技术水平。目前项目成果已应用于多个船厂工程项目中，特别是在船厂智能制造设计、改造、信息化建设项目中取得了较好效果，如江南管业生产管控系统开发、沪

东长兴 1# 线集控室项目、外高桥邮轮建造设施总体规划、招商局船厂智能制造设计等项目。通过这些项目的应用，为企业创造了一定经济效益，同时通过节省投资、缩短工期、提升质量和安全，创造了经济和社会效益，销售额达 600 多万，带动企业新增投资 341.2 万，完成专利数量 6 项，软件著作权 1 项。

案例八:广汽三菱某工厂物流配送优化的数字孪生应用

(1) 案例背景及基本情况

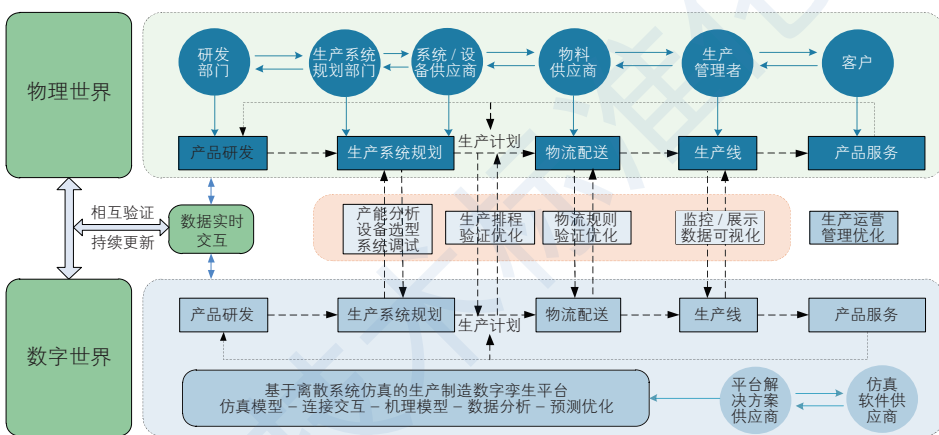


图 58 基于离散系统仿真的数字孪生平台应用商业模式图

汽车工厂作为典型的复杂生产系统，其对产品的生产效率、交付周期、交付质量以及对原料的供应要求都很高，同时固定投资和生产成本大，对工厂规划和生产运营管理提出了很高的要求，而近年来智能制造等先进生产方式的提出，使得更高的设备开动率、更低的生产节拍、更加通畅的物流系统已成为汽车工厂的核心需求，而解决这些问题，对生产系统进行实时快速的仿真验证成为了目前高效而准确的手段。中汽研汽车工业工程（天津）有限公司为此积极开发基于离散系统仿真的生产制造数字孪生平台，并与生产企业合作搭建应用场景。

对于汽车工厂来说，无论是原材料、半成品还是成品，低库存甚至零库存一直是工厂追求的目标，某一生产环节的库存容量的设计及优化问题是至关重要的。本案例基于某汽车工厂总装车间车门线 SPS 分拣区新物流规划方案及实际生产和物流数据，应用基于离散系统仿真的数字孪生技术，根据工艺流程、物流逻辑和实际调度规则，建立车门线及 SPS 分拣区的虚拟孪生线，进行 SPS 分拣区零件入库及出库过程的仿真实验，以预测 SPS 分拣区零件缓存容量水平，进一步可验证产能提升后分拣区零件货架规划的合理性，并提出优化建议。

(2) 系统框架

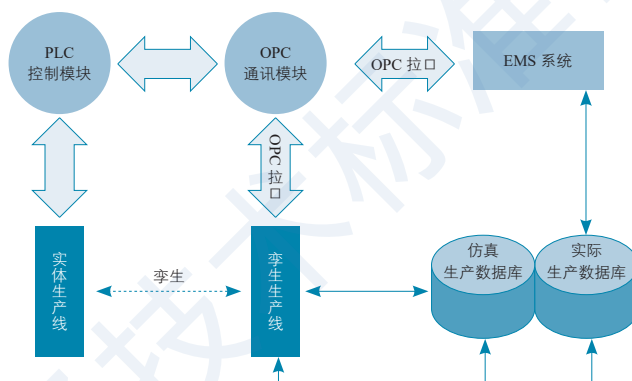


图 59 基于离散系统仿真的数字孪生系统框架

OPC server

连接实体生产线和虚拟生产线以及生产管理系统之间的桥梁，同时根据读取文件需求，重新配置文件，测试 OPC 接口性能。

OPC 接口

需要开发 OPC 接口协议，以建立相关连接。

仿真生产数据库

建立与实际生产数据库一致的仿真生产数据库，并仿真运行，产生实时的仿真生产数据。

可以用指令控制的虚拟生产线

建立基于离散系统仿真的虚拟生产线，并建立通过接口可以接收调度指令的控制模型和物流模型，用于与实际生产线的同步验证、虚拟调试。

可以自动运行的虚拟生产线

建立可以自动运行的控制模型和物流模型，用于生产计划仿真，生成仿真生产运行数据，可提供给可视化管理系统。

可视化系统

为了使数字孪生系统运行过程的可视化更加美观，且可实现 VR 漫游等功能的扩展，可单独建立可视化系统，可与基于离散系统仿真的虚拟生产线同步运行，即可通过指令控制其运行进行展示，也可通过实时生产过程来驱动其自动运行。对于本案例来说，专业的可视化系统不是数字孪生应用的重点。

(3) 案例特点

建立了基于离散系统仿真的数字孪生平台

面向生产制造过程，建立数字孪生系统时，将离散系统仿真技术作为关键技术，并构建基于离散系统仿真的虚拟生产线，作为数字孪生平台的子系统之一，核心目的是对生产运营阶段的不同业务场景进行基于数据驱动的实时的仿真和预测优化。针对生产排程及产能预测、物流优化等业务场景，建立基于离散系统仿真技术的数字孪生平台最为适合，具有较强的数据分析及预测优化的功能，其可视化功能较弱，但可以构建另外可并行运行的可视化管理系统，连接到同一数据库。

能有效进行物流分析与优化并校验输入数据

应用结果表明，应用离散仿真技术能有效的对物流方案、库存水平、设备参数等设计指标进行验证与优化，确定指标水平，降低生产成本。系统运行过程和结果的分析，还能帮助发现输入数据存在的问题，进一步

帮助发现生产运营管理中存在的问题，发现数据和管理中的错误和问题，已成为数字孪生应用的隐形功能。

需建立不同系统间的通讯方法及相关标准

应用过程中需要对离散仿真系统与生产设备 PLC 之间通讯建立进行研究，并给出建立通讯的路径与方法，同时还要建立不同系统之间接口协议及相关标准，相关技术是建立数字孪生平台或数字化虚拟工厂的基础技术手段。

(4) 实施步骤

设备三维模型建立

典型的设备建模路径：solidwork → 3Dmax → automod，完成设备的建模、轻量化和分解工作。

设备单元仿真模型建立

在 automod 中组装设备三维模型、设置动作，按照生产设备的单元输入参数，以单体设备为单元在仿真系统中建立虚拟仿真模型。

构建机理模型

根据不同业务场景需求，构建机理模型，实现基于生产过程实时数据驱动的仿真过程。展示案例为根据新物流方案和信息系统的实时数据，利用数字孪生系统进行 SPS 分拣区零件入库及出库过程的仿真，对物流方案进行预测和优化。

系统互连

通过 OPC UA 解决不同系统间的接口集成和信息协同的互操作问题。

试验分析与辅助决策

通过仿真及机理模型，对系统输入数据进行多参数多水平的仿真试验分析，根据试验分析的结果进行辅助决策。本案例不仅对库存水平进行了验证及优化，还对 AGV 的运行过程及设备参数进行了优化。

(5) 涉及的关键技术

三维建模： 主要指设备等资源的三维模型，模型能够在数字孪生系统中流畅的运行还依赖一些模型的轻量化和分解技术，其中分解技术是指一个模型不同运动副之间在数字孪生系统中也需要进行相对运动的情况下，有时会需要对三维模型先进行分解，再导入数字孪生系统去定义运动参数。本案例的数字孪生系统是基于离散系统仿真平台构建的，因此模型的轻量化和分解是必不可少的。

离散系统仿真： 本案例中数字孪生应用的核心在于数据驱动的实时仿真过程，且建模和仿真是相辅相成的，如果说建模是对物理世界的理解，那么仿真就是验证这种理解的正确性和有效性。面向汽车制造过程，离散系统仿真技术是数字孪生应用中的核心技术，可以解决生产过程中的生产排程优化、产能预测和物流配送优化等问题。

信息通信： 数字孪生的主要思想在于借助 IT 技术将实体与虚体抽象为统一的信息资源，并通过虚实联动，实现不同业务场景的应用，本案例选择 OPC UA 框架作为基础支撑技术，从而满足未来智能制造中各系统和服务间的互连互通。

集成标准的完善： 经过集成调试后，编写并制定系统连通和数据通信的集成标准，以确保各系统间可以建立起自由无缝的协同关系。

VR、AR 技术： 虚拟现实（VR）和增强现实（AR）等技术在近几年发展迅速，而且在多个业务场景中都有应用价值，如方案展示、设备维护和员工培训等。此外，专业的可视化系统还需要模型的渲染技术。

(6) 案例成效和意义

研究并应用基于离散系统仿真的数字孪生技术，验证并优化车门线 SPS 分拣区各零件的缓存容量，并指导分拣区的零件货架规划。应用结果证明，应用数字孪生技术能验证和优化库存容量水平、设备参数及参数

等设计技术指标，还能校验信息系统中数据的准备性和完整性，不仅能发现物流规划方案中存在的问题，还可以进一步挖掘管理中存在的问题。案例也证明了将基于离散系统仿真的数字孪生技术应用于数字化汽车工厂设计及运营管理的可行性。

案例九：钢铁智慧能效管理系统数字孪生应用

(1) 案例背景及基本情况

钢铁、有色、化工等基础工业中，原料与能源动力成本占比达 80% 以上，能源效率的管理提升是企业降本增效的有效发力点。目前基础工业能源管理普遍存在以下问题：生产工艺流程复杂、产能储能用能过程非连续稳定过程；可能存在某些设备既是生产加工设备又是能源供应设备的复杂关系；现有的生产管理、能源管理系统和实际生产运行的匹配度差，多数企业未能建立智能化的能源平衡调度系统与动态快速的异常识别 - 诊断分析 - 决策推送的支持系统，导致企业能源系统管理粗放、普遍出现供需平衡矛盾与利用效率偏低的情况。以钢铁企业的煤气系统为例，往往存在：煤气需求侧消化和调节能力不足，同时运行调配过程中产供协同、调节滞后、供需平衡状况信息不对称，导致系统管网呈现宽幅波动，同时由于缺乏产用过程平衡优化、缓冲响应、使用管理优化，引发间歇性供应不足与集中性放散交错并存、能源使用波动大浪费多的问题，造成显著的能源损失。

本系统基于具有先进数字孪生体架构的优也 Thingswise iDOS 工业数据操作系统开发，以能源信息互联互通与数据采集分析为基础，通过在数字空间搭建能源生产（转化）、调度存储、使用消耗（放散）设备的对应数字孪生体并构建能源基础模型，实现能源系统、集群、单体设备的运行状态、重点参数、能源调节需求的在线监测、诊断与优化。同时，本项目的实施也为未来企业基于数字孪生的生产管理、质量管理、运维管理等系统的拓展奠定了基础。

(2) 系统框架

系统的总体框架如下图：

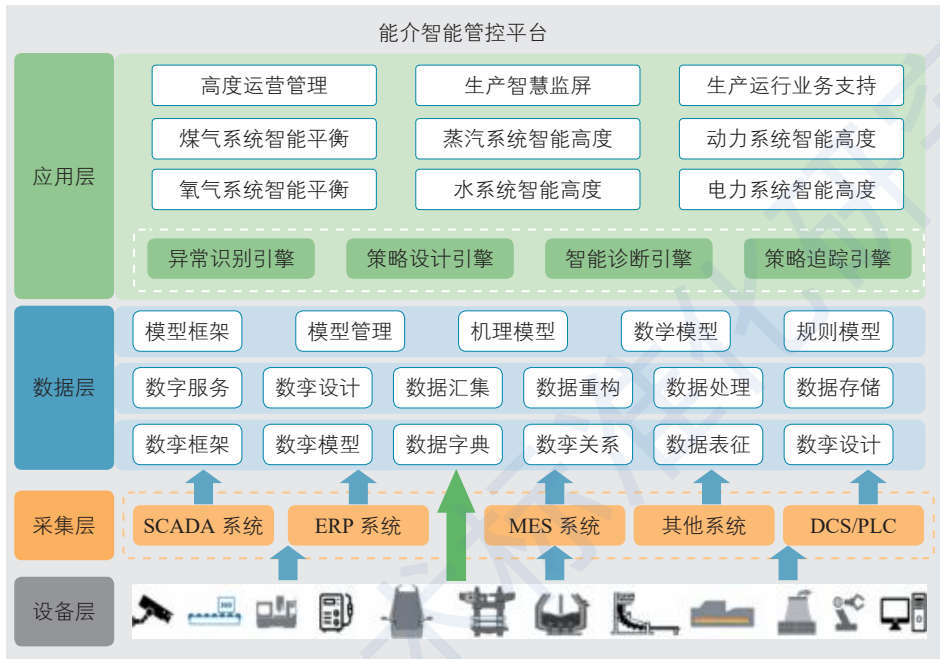


图 60 能源介质智能管理平台系统架构图

通过智能网关将企业在物理层的设备数据、传感器数据、DCS/SCADA系统数据采集到数据平台层，进行数据建模、分析和应用APP开发，最终实现上层不同能源系统的智慧监测、智能调度以及运行生产层面的运行支持指导。

利用数字孪生体技术，可以高效结构化的管理每个能源相关设备全生命周期数据；通过对能源介质流的有效分类定义，可以使得各类能源数据能够快速上浮下钻；通过对应用、数字孪生、模型的解耦搭建，使得各类基础算法与数据处理高度一致，在提高开发效率的同时避免基础算法的不一致性带来的系统优化改进困难。最终通过跨工序、跨流程、跨业务的大数据和模型深度融合，最大程度的挖掘能源效率的潜在提升机会，

实现系统性全局化的优化提升。

(3) 案例特点

跨维度系统性的数字孪生体

本案例针对不同能源系统维度的大量生产、储存、使用的设备进行大范围、系统性的数字孪生体建模，同时对与能源产用息息相关的运行生产维度的生产状态、重点参数进行了对应建模，从而将传统的能源保供为主的监测性、单点管理转化为能源与生产组织相协调的智能调度、系统性管理。

基于生产规则变化的动态异常识别、诊断、优化

为了满足实际生产中设备调整与运行条件、生产需求的变化，本案例设计中采取了可动态调整的生产规则引擎，使得能源产、用异常可以随生产的变化得到动态的调整判别，以更好的指导生产调整。

(4) 实施步骤

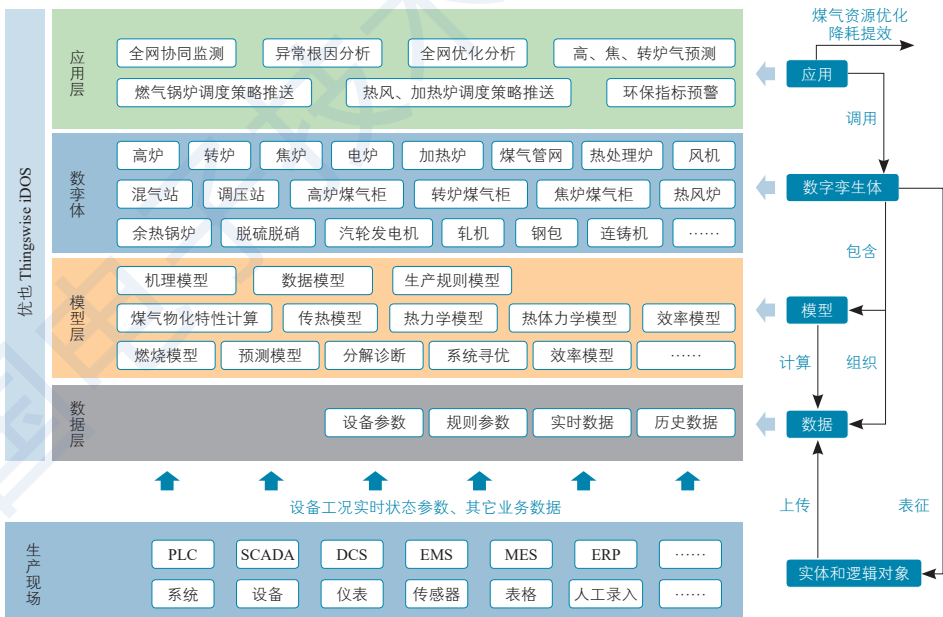


图 61 能源介质智能管理平台功能架构图

以钢铁行业能源管理重点的煤气系统数字孪生实践为例，核心实施步骤如下：

- a) 提炼煤气系统管理优化功能（应用）需求，如全网优化分析、煤气预测、策略推送；
- b) 确定煤气产、储、调、用以及生产关联的设备，搭建相应数字孪生框架，如高炉、转炉、热风炉、加热炉、轧机、钢包；
- c) 根据不同功能需求与对应数字孪生体，进行基础算法模型开发，如煤气物化特性计算模型、燃烧模型、预测模型；同时梳理相关数据，如各类煤气成分、压力、产量、耗量数据；
- d) 开发面向用户的应用交互页面，通过数据层对于现场数据的接入与实施模型计算输出与前端处理，实现煤气系统的监测、预警、分析、运行与调度的支持优化。

(5) 涉及的关键技术

- a) 以数字孪生为框架、以设备为核心的数据汇聚、梳理、管理、使用方式，使数据系统中庞杂的数据得到高效组织、使用，结合可云可边的部署形式，以同一架构系统、一体化的方式，实现满足边缘、数据中心到云端的不同层次需求的数字孪生。
- b) 分层解耦的设计方式，将各功能层合理抽象分层，使得 OT/DT/IT 各专业人员可以各司其职、各施其能、分工合作、高效协同，同时使算法、功能得到有效复用，提升开发效率，并便于应用的统一管理；
- c) 平台化设计理念，使得各个应用实现联通，产生并发价值，同时可实现分布式计算，既能按需水平扩展，支持海量数据的计算，也能避免单点宕机，保障系统的高度稳定可靠。

(6) 案例成效和意义

经济效益：某年产 500 万吨钢厂实施煤气智能平衡系统项目，实现年

化节能效益 4200 万元，其中：压力稳定率从 78.6% 中位值上升到 95.4% 中位值，生产稳定带来年化 2500 万元收益；煤气放散率从 1.38% 降低至 0.48%，减少放散带来年化 1700 万元的能源节降。

推广意义：

本案例的智慧能效管理系统是典型的将新兴的数字孪生和工业互联网平台技术与深厚工业知识的有机结合成果，该方式有效适用于其他相似的工业场景。仅考虑钢铁行业，我国钢铁行业每年消耗 6 至 7 亿吨标准煤，约占全国煤炭消耗总量的两成，是我国节能降耗的重点行业。根据 2019 年底的统计数据，中国共有 37 家年产钢超 500 万吨钢企，共 8 家钢企年产超过 2000 万吨，通过类似系统的使用，每年的能源节降金额可达 100 亿元以上；同时能源的节降也将会带来远超经济价值的环境保护效益，随着国家环保政策的不断收紧，这一点对于工业企业的可持续发展经营也至关重要。

案例十：医药制造行业数字孪生集成可视化管控

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。

在这种背景下，华龙讯达作为国内最早开展数字孪生技术研究与实际应用的公司，在基于工业互联网平台的数字孪生技术应用进行了探索和实践，现以医药制造行业特性，通过建立医药制造数字孪生生产线，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的高度集成的可视化管控模式。以数据化、可视化的手段实现医药生产

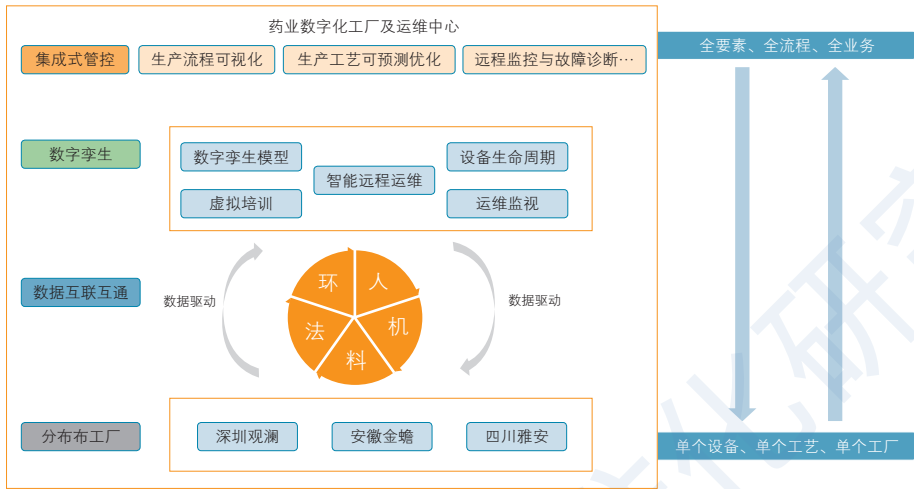


图 62 医药制造数字孪生平台商业模式图

的及时管控、有效解决工业自动化与信息化融合问题。本项目形成以数据为核心驱动要素的产业体系，推进以工业互联网为代表的新技术融合创新，实现可视化智能生产、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，推动医药制造向数字化、网络化、智能化转变，将产业效率提升与新业态、新模式探索相结合。

(1) 系统框架

在智能制造的大环境下，华润三九国药事业部通过前期项目，进行了车间“数字化”改造，现结合三九现有业务情况，建立统一平台、统一技术架构、五大应用服务，形成可开放共享、安全稳定的虚实映射实时交互数字孪生平台。

方案应采用成熟、先进、兼容性强的技术构建数字孪生数字化工厂网络平台，平台汇集数据采集、数据建模、虚拟仿真、标准接口等组件，构建数字工厂通用的规范、规则、方法，并形成平台的资源集聚能力、组件管理能力、知识共享能力和软件分发能力，实现数字孪生应用服务，形

成可开放共享、安全稳定的平台。

通过数字孪生平台实现实体车间和虚体车间的“状态感知－实时采集－精准执行”闭环，现实体车间、虚拟车间的全要素、全流程、全业务数据的集成和融合。



图 63 医药制造数字孪生平台建设思路

基于工业互联网平台构建的数字化工厂数字孪生平台系统架构分为四层，分别是基础数据层、基础服务层（IaaS）、平台服务层（PaaS）、应用服务层（SaaS）。

基础数据层：包括有国药MES系统、国药SCADA系统、金蟾DCS系统、雅安SCADA系统和国药视频监控系统。

基础服务层（IaaS）：虚拟化计算资源池，包括计算资源、存储资源、网络资源等，应用虚拟化技术，实现按需调配。

平台服务层（PaaS）：为应用提供了支撑环境，有搜索引擎框架、中间件、虚拟现实开发引擎、关系数据库服务、缓存服务、文件服务、企业服务总线（ESB）等。

应用服务层（SaaS）：为华润数字化工厂应用提供了赋能平台，包

括了虚拟培训模块、运维监视模块、数字孪生模块、设备生命周期模块、智能远程运维模块等。

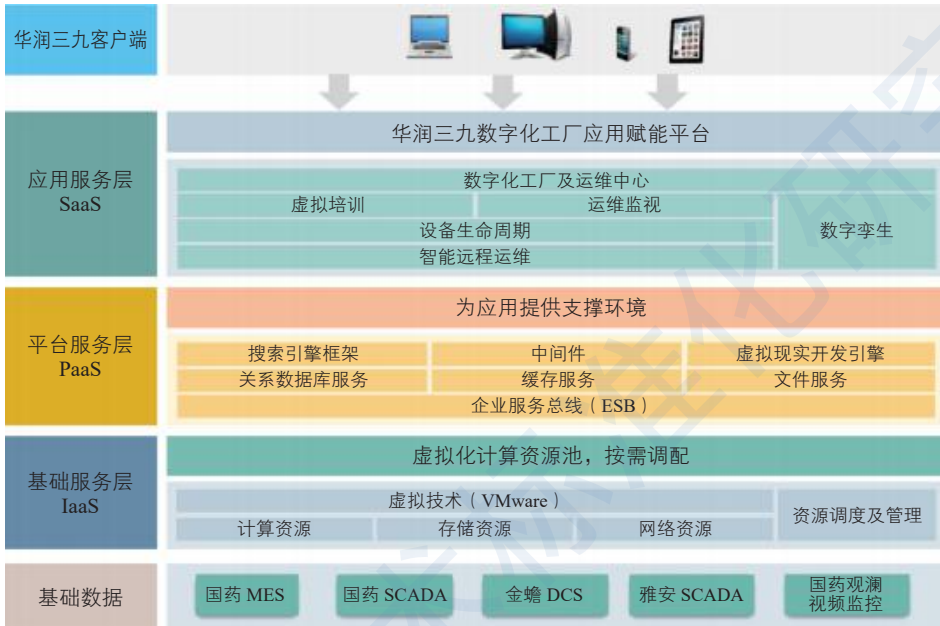


图 64 医药制造数字孪生平台总体架构

(2) 案例特点

构建全要素、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、安徽金蟾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。

建立可复用、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。

实现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。

开发部署可调用的数字孪生APP,优化智能制造服务,形成新的模式和新的业态

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。

(3) 实施步骤

根据数字化工厂数字孪生项目需求,确定项目实施内容和实施步骤,华润三九数字孪生数字化工厂及运维中心框架分为: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、虚拟培训五个部分。

建立车间数字孪生平台：通过建模平台构建数字孪生数字化工厂应用基本模型和数据内容，建立数字孪生平台数字模型；通过数字孪生平台构建工厂层应用的数据集成及基本功能，对接 MES 系统和 SCADA 系统相关数据（数据及接口由华润三九提供），完成数字孪生平台的工厂级和设备级的虚拟仿真，搭建制药生产线物理实体和信息虚体虚实映射，对生产线各个设备的状态进行实时管控。

构建设备生命周期管理系统：基于车间数字孪生平台，通过数据孪生的映射，建立全厂级生产设备的使用寿命台账，具备提前预警，智能通知等。依据真实数据或经验数据设置关键部件预防性维护周期或使用寿命值，当实际维护时间或使用寿命值接近设定值 90% 时，进行预警提示，并能通过任务的方式通知到相关人员，进行维护。

构建运维监视中心：包括视频监控和生产看板。视频监控：在系统中可调生产设备相对应的现场监控摄像头的画面，可以实时的看到生产现场设备的生产情况和人员的动向。生产看板：在系统中可以到其他生产工厂系统的统计数据，主要有设备数据、生产数据、物耗数据、质量数据，雅安主要有日统计、月统计、年统计的生产数据。

构建远程智能运维：通过移动企业微信 APP，可推送报警信息给维修人员，维修人员接到维修任务时在 APP 中查看相关的设备及维修图纸，以便可以快速的处理设备故障，同时管理人员可以看到维修记录及维修的进度。

建立虚拟培训模式：利用仿真技术，对车间设备进行建模，建立车间设备操作、维修、维护保养等虚拟培训场景，虚拟场景内培训步骤与现实培训一致，实现虚拟培训。

(4) 涉及的关键技术

针对设备、车间、工厂和生产建模，提供高性能的模型分析求解和模型构造能力：将设备、车间、工厂和生产过程、生产工艺、流程逻辑等要素，进行数据建模，定义生产过程需遵守的规范，形成工艺模型集、部件模型集、数据驱动模型集等服务，提供数据建模工具，采用模板库、拖拽式建模，明显加快单元级、系统级和 SoS 级的建模速度，显著节省实施的时间、人力和资金成本。

以虚拟数字孪生引擎为核心打造覆盖全要素、全业务、全流程的数字孪生开发平台，实现数字孪生技术的全面升级：通过高效率的物体渲染运算、组件化开发、场景实时加载、海量资源管理，LOD 技术，打造虚拟数字孪生引擎核心，结合积累沉淀的科学决策算法、工业机理模型，围绕产品设计与数字孪生、生产过程建模与控制、设备故障诊断与远程运维等生产制造全流程进行功能优化提升。研制“数据驱动的数字孪生算法”，在单元级上可达到毫秒级的关联与驱动，在系统级和 SoS 级上可达到秒级的数据关联与驱动。支持云端虚拟数字孪生，可将大量的运算工作分布至云端运行，支持电脑、Pad 和手机实时展现和操作数字孪生，适用于主流操作系统和硬件。

以智能诊断模型、可视化工具实现工业大数据分析应用：建立基于工业大数据的智能诊断模型，实现对生产全过程的实时动态跟踪与回溯，全面分析人、机、料、法、环、测等生产过程关键影响因素，挖掘生产过程数据隐藏的“改善源”及解决方案，实现工艺过程管控分析从结果导向逐步转向全过程管控，提高工艺质量实时动态监控及决策管控有效性。以可视化大数据平台，实现工业大数据图形化、可视化、交互化的高性能数据服务，实现快速配置化集成。

(5) 案例成效和意义

数字化工厂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对设备进行分析，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。

案例十一：利用数字孪生和创成设计实现单色器狭缝组件的正向设计

(1) 案例背景及基本情况

基于创成设计方法创建的机构动态数字孪生模型，并借助智能搜索最优解的 Galapagos 算法自动查找最优矫正值，对于每一台机构的参数组合，搜索最优值的时间不到 1 分钟。矫正后的机构误差与未校正机构的误差数据实时可视化，方便设计人员看到概念验证的结果。这样的效率和直观性远远优于传统设计方法。

概念得到验证之后，需要把概念方法应用于实际机构的矫正。对于传统设计方法来说，这步工作是一个机电开发过程（需要开发 PCB 板、编写嵌入式程序等），要开发一套精度测量及校正工装，实现全自动地缝宽测量、标定及校正。这些工作需要机、电、软件工程师相互配合协作完成。不同专业的人员交流有时很困难，导致项目进程很慢，有时甚至无法实施。而采用创成设计方法建立的数字孪生模型，无需任何硬件开发，只需要通

过创成设计平台的测量和控制接口就可以进行虚实数据互操作，从传感器和数字化测量仪表读取数据，在数字孪生模型中处理数据并进行矫正计算，把矫正参数传回给实体机构的控制程序，从而实现机构的高精度输出。创成设计方法能够让有想法的工程师方便地用数字孪生模型实现所有的想法，大大提升研发效率。同时，还方便了安装调试工人利用数字孪生模型快速矫正机构。

(2) 系统框架

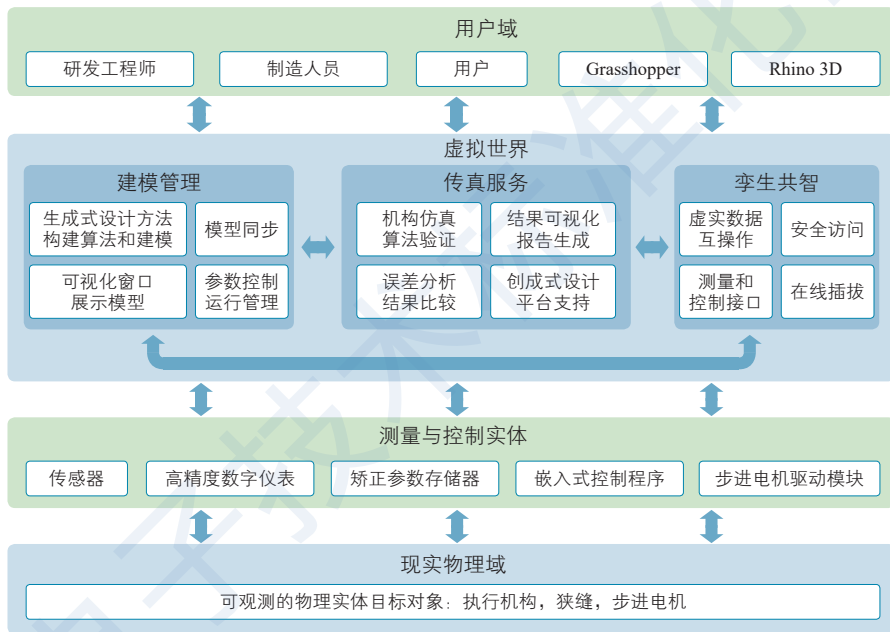


图 65 狭缝组件数字孪生系统架构

现实物理域：狭缝系统组件包括执行机构、狭缝、步进电机，步进电机驱动机构运动，实现狭缝宽度的可变。

测量与控制实体：包括机构上的定位传感器、测量机构位移的高精度数字比较仪、用于传输测量和控制数据的 Arduino 板、用于存储参数的 EEPROM、控制程序、以及步进电机驱动模块。

虚拟世界：在创成设计平台上构建的基于几何和运动关系的动态机构模型，物理实体机构误差模拟的数字模型，优化算法库，矫正参数计算模型，机构运动仿真和误差计算分析模型，结果数据的可视化图表，外部数据输入/输出接口插件等。数字孪生模型的运行时参数化可控的，通过测量和控制接口可实现虚实数据的互操作，多有接口都支持在线插拔。

用户域：研发工程师是设计师，安装调试工人、仪器产品、终端用户都是数字孪生的使用者，可视化编程平台（Grasshopper）和3D模型展示界面（Rhino）提供了工作环境和界面。

系统工作描述：Rhino/Grasshopper 平台提供了可视化编程建模和展示的环境。研发工程师可以在平台上编写自己的算法程序，也可以调用很多现成算法来实现想要的功能设计（如，本案例中，通过在矫正参数优化程序中引用遗传算法，实现了全局快速搜索最优解）。制造人员和用户直接应用研发工程师开发的算法完成自己的工作。本案例提供两种 DCDCD 和 PD 之间的交互方法：1）Firefly 提供了一套软件工具，它连接 Rhino/Grasshopper 和像 Arduino 这样的微控制器。它允许数字域和物理域之间的近实时数据流动。这一特性意味着从各种类型的传感器或其他输入设备获取的真实世界数据，可以用于显式定义 Grasshopper 模型中的参数关系。Firefly 也允许用户将信息从 Grasshopper 发送回微控制器以激发特定的驱动。2）从 Grasshopper 传输给电机驱动模块的矫正参数，可以存储在 EEPROM 中，供控制程序使用。

(3) 案例特点

本案例的创新点和实施后的提升主要包括两个方面：

不依赖于加工精度和闭环伺服控制系统，而是运用系统思维，通过构建数字孪生系统找到普通精度（关键机构尺寸参数 $\pm 0.1\text{mm}$ ）的实际机构参数组合的等效参数组合，利用等效参数组合计算的电机控制参数，

实现了只需采用开环控制系统得到系统的高精度输出（本案例的输出为目标狭缝宽度 $\pm 0.002\text{mm}$ ）。

不是基于传统系统工程和 CAD 建模的正向设计，而是在创成设计平台上，用基于规则的编程方式构建数字模型和数字 workflow，这些数字模型是参数控制的动态模型，数字 workflow 可以自动地完成生成几何模型、优化计算等工作。这一模式创新通过数字化和模型化，以更少的能量，以信息换能量或信息换物质的方式来减少和消除不确定性，进而提高开发效率。

(4) 实施步骤

基于数字孪生架构，本文的单色器狭缝组件的正向设计过程如下：

建立机构原理动态模型。基于几何关系规则，在 Grasshopper 可视化编程平台上创建数字机构，该数字机构实时地显示在 Rhino 窗口（图 8）。

研究真实机构精度。真实机构误差来源于加工误差和装配误差，低成本加工可实现的普通加工精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 。创成设计工具中，可以通过公差范围内的随机数模拟加工和装配误差，建立真实机构的抽象模型，从而分析系统误差范围。

矫正方法的概念验证。思考过程同传统正向设计方法，现在用创成设计和数字孪生来找到最优的实际机构尺寸等效值。为了找到最优校正值，本研究借助了 GH 平台上自带的遗传算法（Gagapagos），在一个设定的域内全域搜索使系统误差最小的值。经矫正的机构的系统误差是否满足要求，可以直观地看到，并且可方便地进行矫正前和矫正后的对比。

构建数字模型和算法。建立数字模型与物理实体模型的联系，通过获取测量值，实现在数字孪生中完成对每一台实际机构的矫正计算，是机构的系统精度达到目标要求。

将数字孪生的校正参数写入物理实体模型，从而实现真实机构的控制和系统高精度输出。

(5) 涉及的关键技术

在本案例中，构建数字孪生系统过程中应用的关键技术是创成设计的方法、工具和过程。

“创成设计”是由“Generative Design”翻译过来的一种对设计系统和方法的表达，早期通常翻译为“生成式设计”或“衍生式设计”，有些文献和书籍上称这种方法为“算法辅助设计 (Algorithms-Aided Design)”或“计算性设计 (Computational Design)”，建筑领域习惯称之为“参数化设计”。这种方法起源于建筑领域，最近十年中在建筑设计和视觉艺术领域得到广泛应用，可是在制造业产品设计领域却几乎见不到应用。其实主要原因并不仅仅是受制造工艺的限制，而是受技术人员的思维约束，认为创成设计只适合做造型设计。近几年各大 CAD 厂商做的创成设计也多是拓扑优化这样的零件级别的设计。

(6) 案例成效和意义

本案例通过设计方法和模式的创新，开发周期可从原来的六个月缩短到一个月（包括样机制作周期）。通过数字矫正模型替代物理矫正工装，不但免去了电路板开发工作量，节约了成本，还免去了许多沟通时间。创成设计和数字孪生无疑是给机械产品工程师赋能的技术，使得工程师很多的设计想法可以快速得到实践和验证。

与传统设计方法相比，本案例实现了狭缝机构在全生命期的低成本的系统级高精度，实现狭缝宽度连续可变，且宽度误差为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的狭缝系统部件总成本不到 500 元。基于数字孪生技术，不但实现了设计 - 加工 - 调试的一体化，而且在光谱仪的使用维护阶段，实现了“软运维”，大大降低了维护时间和成本。

本案例给出了利用创成设计和数字孪生技术重构的正向设计过程，验证了数字孪生系统通用参考架构中数字孪生、测量与控制实体、现实

物理域以及用户域之间的信息传递和互动机制，展示了数字孪生技术和创成设计方法的潜力。这种全新的正向设计模式在我国众多重大技术装备和产品关键零部件的超高精度加工能力有所欠缺的国情下，具有现实的推广意义。

案例十二：钢铁行业质量大数据系统数字孪生应用

(1) 案例背景及基本情况

钢铁行业冶炼和锻造生产普遍存在以下问题：生产工艺流程复杂、产线和炉台设备供应关系复杂，MES 和执行脱节，质量管理多为事后管理等。本项目主要的建设内容包括特冶厂和锻造厂的质量数据监控、质量实绩查询以及质量分析等三大方面内容，实现工艺设计、工艺执行以及工艺改善的闭环的全面质量数字化管理。整个项目的技术路径采用具有先进数字孪生体架构的优也 Thingswise iDOS 工业数据操作系统，为将来的水平拓展，系统的推广创造了可能性。

钢铁行业质量大数据分析系统是一个新型的基于全面质量管理 PDCA 循环的动态质量过程管理系统，通过构建全流程跨时空跨系统集成的大数据和工业互联网平台，实现产品质量问题与物质流、工艺过程、设备状态的严格对应，为准确定位导致质量问题的原因奠定基础。在此基础上，利用生产历史数据和工艺卡数据库形成的大数据资源，进行对比分析，有效地确认分析结果的正确性。从而将碎片化信息挖掘、提炼、整理为系统化、结构化、规范化的质量信息和知识。在这个基础上，可以进一步建立可靠的算法模型、积累有效的知识，用于预测和评估未来可能发生的质量问题，以便及时采取有效的对策，减少质量损失、并更好地满足用户需求，真正实现从基于结果的碎片化滞后质量管理到基于过程的全流程实时质量管理的飞跃。

(2) 系统框架

系统的总体框架如下图：

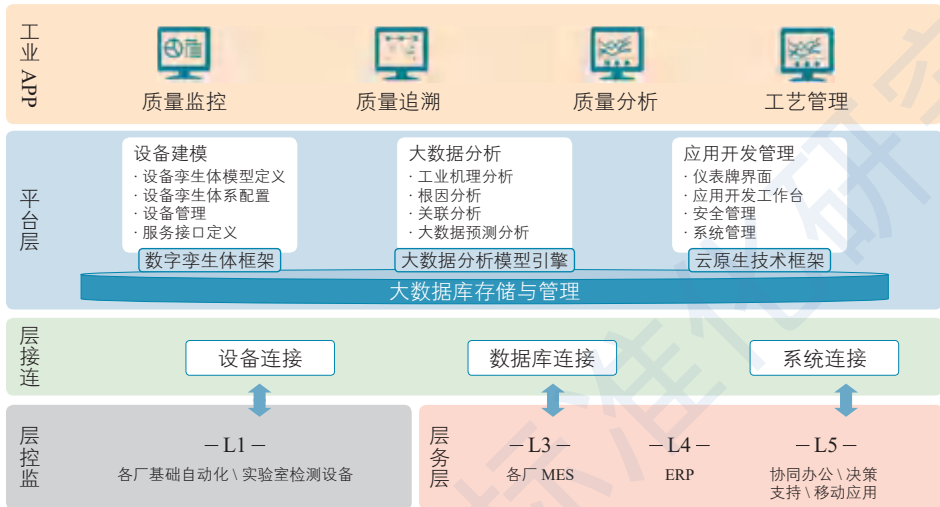


图 66 钢铁行业质量大数据系统架构图

通过智能网关（在连接层）将钢铁企业中 L1，L2，L3，L4 和 L5 层的信息化系统或设备中将相关的质量数据采集到质量大数据平台层，进行建模、分析和应用开发，在上层的工业 APP 包括本质量大数据分析系统的四个功能模块：质量监控、质量追溯、质量分析和工艺管理。

利用数字孪生体技术，结构化梳理和管理锻造过程全生命周期数据；数字孪生技术管理物质流对象，可以保证每一个数据都有明确数据来源、用途、工业意义、隶属关系等；将跨工序、跨流程、跨业务的大数据和算法模型深度融合，挖掘数据潜在价值，实现大范围的、全局的优化（传统优化一般在单点或局部）。



图 67 钢铁行业质量大数据系统产品数字孪生体在过艺过程数据跟踪和集成示意图

(3) 案例特点

动态的数字孪生

本案例核心是对于物料的在时间和空间上的追踪，通过建立动态的数字孪生体，对钢锭的质量全生命周期进行追踪，从而为质量数据的实时监控、查询，以及预警分析和产品质量追溯打下基础。

将全面质量管理理念数字化

通过前面所说的基于钢坯的动态数字孪生的建立，得以将生产过程中的数据实现跨越时空的串联，真正实现生产过程数字化，对数据的进行追踪、预警和分析，实现从基于结果的碎片化滞后质量管理到基于过程的全流程实时质量管理的飞跃

(4) 实施步骤

a) 建立统一的数据采集和存储平台

将关键质量数据进行采集并将这些数据归集到统一的实时数据库和历史数据库中，在运行基于优也 Thingswise iDOS 工业数据操作系统的质量大数据分析系统（工业 APP）过程中，智能网关将根据计算需求从实时数据库和历史数据库中采集相关数据。

b) 采集质量指标基线

以实现产品质量的提升和效益的提升为目标，定义对系统成功的结果指标和过程指标并进行运行前以及过程中的测量，做好定期监测有效

性的比较。

c) 建立工艺卡管理数据库

工艺标准和工艺规程是质量管理的核心要求，建立工艺卡的管理数据库，能够进行动态的录入，删除，更改，发布，下达等管理，保证工艺设计和工艺执行的一致性标准。

d) 按照数字孪生体的方法进行数字表征，确保系统的可复用性

- 采用先进的工业互联网数字孪生体技术通过对物质流信息流生产流设备状态流进行数字化表征，行成以物质流为核心的质量数字孪生体，作为质量大数据分析系统的**结构化数据基础**。
- 根据业务需求设计和建立质量监测，分析，诊断，预判，优化等机理模型和大数据模型。
- 确保模型接口的通用性和可复用性，为将来二次开发打好基础。

e) 人机界面的设计和重构

根据岗位的工作职责以及日常分析的需求进行设计，对产品质量有关的关键过程进行实时监控并对产品质量进行自动判定和预警上下游工序，减少操作工人误操作的概率，对于发现的质量问题，做到及时诊断和预警以便授权人员进行处理；整个质量管理功能的设计根据过程监视和测量的结果以及 PDCA 的过程方法不断提升过程的有效性和效率，通过系统保证管理的闭环。

f) 用户参与到产品设计中来

采用敏捷的开发方式保证用户参与到产品的设计中，在迭代中不断完善系统的功能。

(5) 涉及的关键技术

a) 设备实时状态 3D 展示技术

通过对设备状态的 3D 展示技术，使得用户操作界面变得直观、易操

作。该界面通过前端的 3D 技术与平台的数字孪生体技术相融合，支持状态的实时自动更新，方便用户进行设备监控管理。同时用户可以在界面上对该 3D 设备进行操作，将实物与信息进行精确关联，使得人机交互更加友好易用。（参见下图）

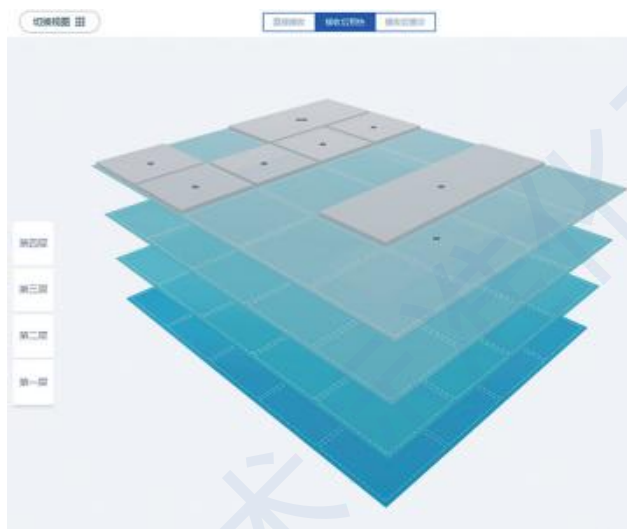


图 68 钢铁行业质量大数据系统产品数字孪生体在虚拟工位的展示和操作示意图

b) 动态生成数字孪生体实例的技术

系统对设备及产品建立了对应的数字孪生体，在生产中，产品不断被制造出来，意味着数字孪生体的实例必须能够动态创建。优也 Thingswise iDOS 首创动态创建数字孪生体实例的技术，映射了客观世界中物理实体的创建、发展、沉淀的过程，扩展了数字孪生体的全生命周期管理的应用。

c) 温度曲线工艺阶段自动识别技术

系统通过数字孪生体流式计算中的算法模型设计，自动识别温度曲线的升温、保温、降温等工艺阶段，为实时数据与工艺设置数据的自动比对提供了算法基础。

(6) 案例成效和意义

经济效益：质量大数据分析系统在预期可以帮企业提高成材率 1%–3%，对一家年产 500 万吨钢的企业来说，按市价 4000 元 / 吨核算，每年可提高 2–6 亿元经济效益。

推广意义：

由于质量大数据分析系统是将工业互联网平台的云计算与微服务、大数据、机器学习与人工智能、模型和应用研发工具引入生产现场，并以数字孪生体框架为基础，系统性地数字空间映射生产现场的产品、设备和过程的状态和行为，简化工业知识的模型化和软件化过程，以及智能应用的开发，排除了现有的架构瓶颈和应用开发瓶颈，形成了具有特钢行业特点的专业知识模型以及智能化的应用，实现快速的复用并创造价值，在特钢行业，以及其它类似的制造业行具有广泛推广的潜力。

案例十三：基于 APRO 通用控制平台的智能复合工艺产线数字孪生解决方案

(1) 案例背景及基本情况

随着增材制造产业的快速发展，传统（减材和等材）制造的工艺流程、生产线、工厂模式、产业链组合都将面临深度调整，人类物质生产的制造技术体系将迎来增材、减材和等材工艺融合的新时代。在这一趋势下，一方面，越来越多的行业使用增材和减材混合工艺来制造小批量定制化、造型复杂、设计多样的零部件；另一方面，个性化的工艺选择和材料选择对复合工艺生产线的适应性配置、实时监控，以及制造过程本身的数字化、自动化和智能化提出了更高的要求。传统制造工艺的各种现有控制系统已无法满足工艺融合条件下，复合工艺生产线的实体设备和虚拟模型间沟通桥梁的需求。

安世亚太针对工艺融合和复合工艺对高性能工控系统的需求，自主设计研发了新一代“双信号域”通用控制平台，实现了复杂制造装备中高性能实时控制回路，与高时空分辨率数字孪生的和谐共存；在 APRO 通用控制平台的支撑下，人工智能可实时交叉检验数字孪生模型与仿真预演模型的运行状态，进而根据两者数值偏差预测设备加工性能，实现数字化制造产品质量的主动管理；基于 APRO 通用控制平台，针对所需制造零件模型特性及应用场景，采用多种增材、减材工艺，通过模块式工位及工业机器人传输装置，构建了全自动化复合工艺产线，并集成开发了智能复合工艺产线数字孪生解决方案。

(2) 系统框架

智能复合工艺产线数字孪生解决方案的系统架构如图所示，自底向上包括：

现实物理域：智能复合工艺产线的物理实体包括：增材减材工艺设备、模块式工位、工业机器人、后处理设备和环境。

测量与控制实体：包括 APRO 控制平台的各种传感器和运动控制器、扫描控制器、微喷控制器等控制执行元件。

数字孪生：包括加工零件的三维几何模型、公差模型和工艺路径规划，增材和减材加工设备和机构的动力学模型、数值仿真模型、人工智能决策，以及资源访问接口。

用户域：包括设备操作人员、设备控制界面和可视化模块。

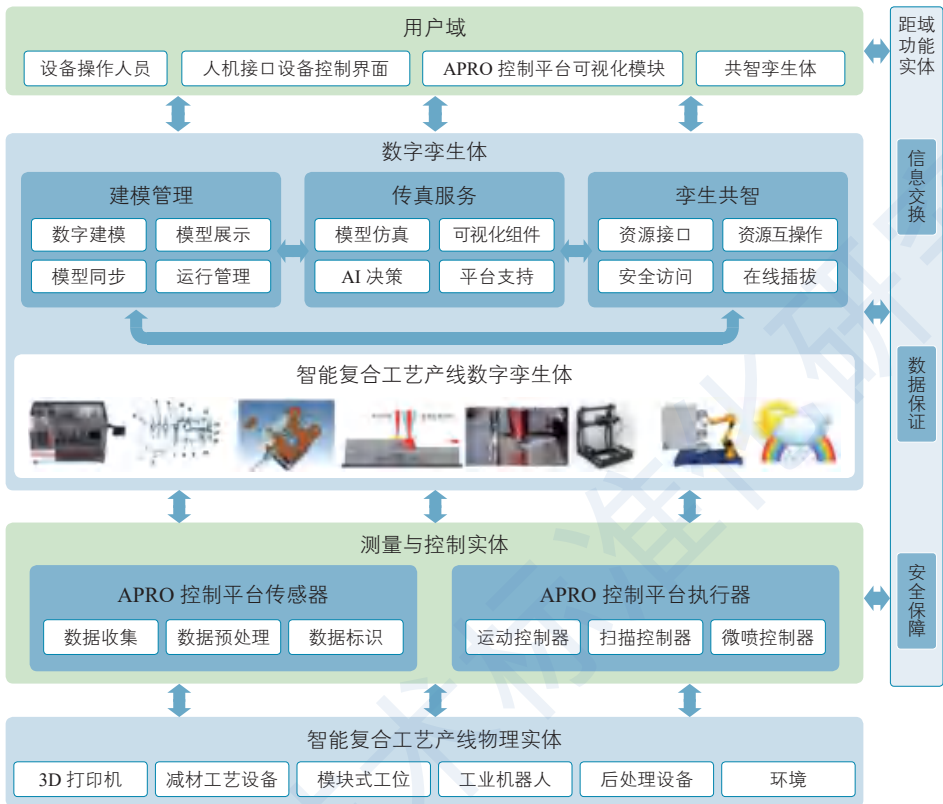


图 69 智能复合工艺产线的数字孪生系统架构

(3) 案例特点

a) 从加工对象设计和工艺的数字化模型导入，到高性能制造产线控制，再到 AI 品控，整个过程以自主知识产权的关键软件平台和硬件设备实现各阶段的无缝衔接，全方位展示了安世亚太基于数字孪生的新一代全链路数字制造解决方案，是安世亚太基于增材思维的先进设计与智能制造整体解决方案的核心部分。

b) 通过对多种增材工艺成型原理的深刻分析和抽象，形成了四大实体建造体系，进而分析综合每种建造体系的执行和控制需求，提出并研发了基于专用执行模块、通用输入输出模块、传感模块和网络互联架构

的 APRO 通用控制平台。秉持开源理念，基于通用操作系统规范，提供各网络模块的应用开发函数和高级脚本语言开发环境。用户可开发自定义 APP 以重新组织 3D 打印机硬件资源（既可作为输出实体制品的生产工具，也可作为研发材料或工艺的可编程试验工具）。这一技术货架（对内）和技术平台（对外）的实现，为构建良性可持续的商业模式和行业生态打下了坚实的基础。

c) 基于 APRO 通用控制平台，采用复数个单工艺模块搭建复合工艺产线，按需进行工位设定及流程定制，建立复合工艺产线的数字孪生，记录采集各工位实时运行数据，实现整个生产过程的可视化监控，并集成有效工艺工位进行混构打印，既综合了增材减材工艺各自的优势，又简化了各阶段处理过程，满足了产品制造过程中对多工艺、多材料的个性化需求，降低制造成本和人力成本。

(4) 实施步骤

DHP 一站式智能复合工艺产线工作流程如下：

a) 以熔融沉积、光固化 3D 打印技术作为零件制造技术进行成型工作，在成型过程中可通过装夹机械手臂在零件中装配 RFID 芯片，装配完成后继续 3D 打印成型工作；

b) 3D 打印成型工作完成后，零件通过传输托盘（图 9）传输到 CNC 加工区进行精加工（图 10），精加工完成后，再传输到后处理区进行表面处理；

c) 通过非接触式 RFID 读写区，加工过程中的零件生产数据会被写入产品芯片中，为最终零件的生产统计、生产调度、作业时间控制、品质追踪、产品归档等提供数据依据；

d) RFID 读写结束后，零件将传输到基板分离区卸载打印底板，卸载的打印底板可立即投入下一次生产加工；

e) APRO 通用控制平台会实时采集整个加工制造过程中的工艺参数、设备状态等信息，实现实时操作和可视化监控。

(5) 涉及的关键技术

APRO 通用控制平台是本案例解决方案的关键技术。在设计之初它就瞄准了提供强大稳定的信息存储、运算及输出能力，适应灵活多变的增材工艺，兼顾多种形式的高速运动控制任务，具备种类齐备的传感系统等核心需求，进化出敏捷 Agile、精密 Precise、鲁棒 Robust、优化 Optimized 四大基因。

APRO 通用控制平台采用硬件和算法双重分布式架构，即专用和通用 IO 与控制算法均在模块前端实施，网络互联架构专注于构建机器运行逻辑、人机控制界面。其快速重构、模块复用和轻量化主机特性使得材料体系与四大实体建造体系充分交叉，快速推进了一批增材装备研发项目，形成了横跨多种材料种类、形态、尺度以及建造体系的增材装备。

(6) 案例成效和意义

本案例的成效和意义包括两个层面：复合工艺产线和整体解决方案。

对于复合工艺产线，本案例通过并发打印，成倍提高了加工效率；通过机械臂多工位自持生产，实现加工件在不同工位间精确转换和全自动化连续生产，提高生产效率的同时，大大降低了人力成本，进而大幅降低新产品研发和小批量生产的装备及工艺技术门槛，从而广泛赋能新制造业，并推动泛在制造、分布式制造等新实体经济模式的快速发展。

对于整体解决方案，本案例的成功研发，深化了安世亚太对增材制造技术要素的理解，即材料（实体）→ 成形方法（虚拟知识）→ 控制与机构（实体）虚实互动的路径；基于 IPD 技术货架和技术平台的思想，推动技术组件高效积累和复用、基础研究和技术研发高效协同和互动，建

立了 APRO 通用控制平台这一技术货架和技术平台，对内助力数字化研
制体系建设，对外助力良性可持续行业开源生态构建。

案例十四:智能热电管理系统数字孪生应用案例

(1) 案例背景及基本情况

化工、有色、造纸和纺织等行业以电力和蒸汽作为主要能源介质，
企业通常建有自备热电厂为生产供应电力和蒸汽。由于热电调度的运行
效率与经济性受跨系统的因素，如燃料供给、电网供电价格和计价方式、
下游汽电需求、锅炉、汽机设备状况、环保消耗等的综合影响，传统的
信息系统很难全面地考虑诸多因素，通常仅依靠运行人员的经验去判断
和操作，以满足下游生产电力和蒸汽需求、分配不同机炉的负荷与抽汽
比例；另外，蒸汽生产、使用过程中还存在燃料多变且质量难以监督、
对设备效率采用事后统计的管理方式，而且面临运行波动较大、负荷调
度往往被动且滞后等问题。造成运行管理人员无法有效监管原料品质、
保障综合能源供应的经济性与机组运行的高效性，使得能源采购成本居
高不下。

智慧热电管理系统全面整合散落在企业各系统的数据，通过建立以
蒸汽和电力的需求预测模型为核心的用汽、用电设备的数字孪生体，并建
立以能源转化效率与综合效率优化模型为核心的锅炉和发电机组的数字
孪生体，及时跟踪和响应能源需求变化和价格变化，自动生成锅炉、发
电机组的生产负荷以及外购电量的最优决策，并快速发现用能异常，智
能辅助全厂的生产调度优化。在不投资改造的基础上，实现跨空间、跨
系统的调度优化与生产稳定运行，降低了综合能源成本。

(2) 系统框架

系统的总体框架如下图：

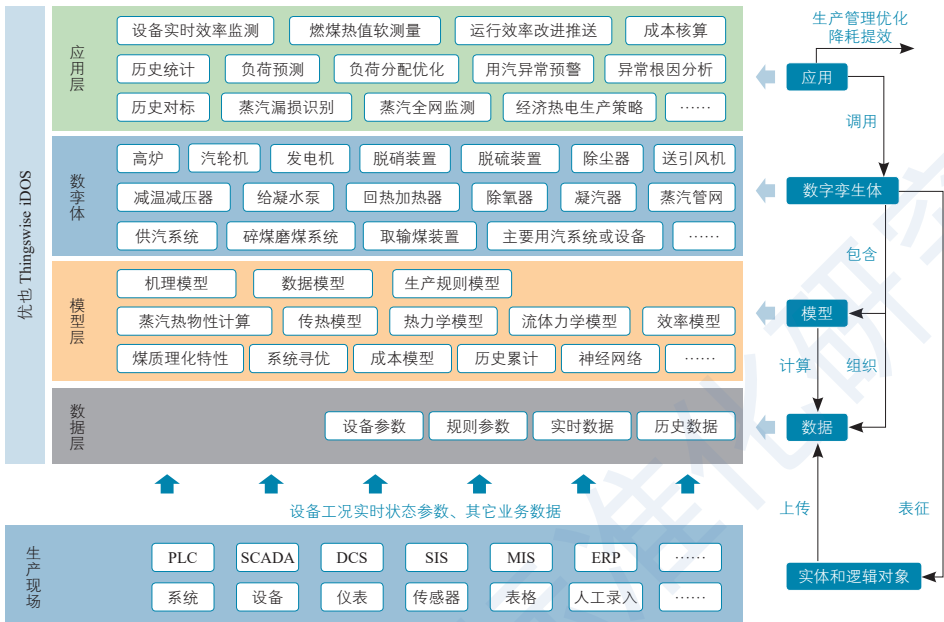


图 70 智能热电管理系统功能架构图

系统主体整体框架分为四层：数据平台层主要是将热电生产现场已有的仪表数据、DCS、SIS 系统数据进行采集汇总与预处理；模型层主要用于实现智能热电管理功能基础的机理模型、数据模型、生产规则模型的搭建；数字孪生体层主要通过梳理组织数据、管理整合基础模型实现输入数据的实时计算，从而表征物理实体的状态；应用层主要通过前端页面的开发，组织不同数字孪生模型的输出结果，以易于理解的图形、文字形式反馈给不同用户，达到最终的智能热电管理中的各个功能。

(3) 案例特点

基于工业互联网平台和数字孪生体技术，实现了对锅炉及辅机系统、汽轮发电及辅助系统、蒸汽管网及主要使用系统的跨空间、跨系统实体的数字化镜像。

基于历史数据与当前生产用汽情况，利用所建立于相应数字孪生体

的算法模型，提前 10 分钟预测蒸汽需求量，推送最优方案、避免放散或供应不足，实现了合理经济的前馈调整。

通过历史大数据的合理对标方式，有效激发员工自主改善潜力，以简单算法生发强大价值。

(4) 实施步骤

数据采集

依据现场数据接口实际情况和通信协议类型，利用智能网关从实时数据库和历史数据库中采集相关数据。

平台部署

依据客户要求，确定或云或边的平台部署方案，并进行相应的部署调试。

数字孪生构建与模型开发

进行系统所包含设备的数字孪生搭建与底层基础模型的开发。

应用的开发及部署使用

根据功能以及面向的用户设计对应的应用前端界面，最终将数字孪生模型与应用部署至客户环境中，供客户操作人员在生产现场在使用。

(5) 涉及的关键技术

基于大范围、跨系统、多设备的数字孪生的实时监测、计算、分析，通过有效解耦算法与数字孪生，实现算法模型的高度复用，如汽机负荷分配、锅炉负荷分配均采用相同的综合效率优化模型，各用汽需求预测均采用产量、汽压、用汽量阶段历史变化关联模型；

有效的数据降维优化算法，将蒸汽、电力、环保等不同维度数据通过一定的模型合理的转化为成本数据，实现了关键参数和经济指标的有效关联，将数据与优化算法降维，基于全系统的综合优化算法开发设计更为简单便利。

(6) 案例成效和意义

经济效益

某纺织企业自备热电厂智能热电管理系统，安装有三台 80t/h 蒸汽锅炉和三台 13MW 汽轮发电机组。通过应用智能热电管理系统，能自动精准预测下游纺织厂汽、电需求，智能生成每台锅炉和每台发电机组的最佳运行负荷策略，同时根据峰谷平购电价格较为经济的确定谷平时段的最佳发电状态，实现外购燃料和电力成本综合节降年化 500 万元以上。

推广意义

智慧热电管理系统是一个能源生产管理和调度优化的工业应用系统，可广泛应用于化工、有色、造纸和纺织等行业的自备热电厂，应用本产品可以在稳定电力与蒸汽供应的前提下，减少 1-3% 的外购燃料和电网电力等能源成本；同时通过应用大数据技术推进自备热电厂的精益管理，实现管理可视化和操作标准化，进一步提升自备热电整体运行、管理效率。

(二) 智慧城市领域

案例一：重庆 AI CITY 系统建设

(1) 案例背景及基本情况

当前，城市不同部门对智慧城市发展规划认识不一致。城市规划建设部门从信息技术应用于城市规划建设角度出发，信息化主管部门从工业化、信息化相互融合角度出发，地方政府从国民经济角度出发，各界尚未形成统一的智慧城市架构体系。同时缺乏相关的重点专业技术，智慧城市建设的关键技术如物联网、云计算、三网融合、无线宽带等技术有待突破缺乏必要的专业的技术人才，信息共享和信息兼容存在较大盲目性。尚未形成统一的智慧城市架构体系，导致各自为政、信息孤岛现象，硬件和系统重复开发，数字孪生生态难以完善。

数字孪生的应用亟需一种新的落地形式才能使其发挥出最大的作用，而 AI CITY 的系统建设恰好满足了数字孪生的落地。AI CITY 拥有多维感知，多维数据，多维智能，传统的二维展示已经无法满足 AI CITY 的展示要求和交互要求，数字孪生集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的特点，可以很好满足 AI CITY 对现实世界的虚拟映射。数字孪生在 AI CITY 建设中体现出了价值和体现出了天然的应用场景。

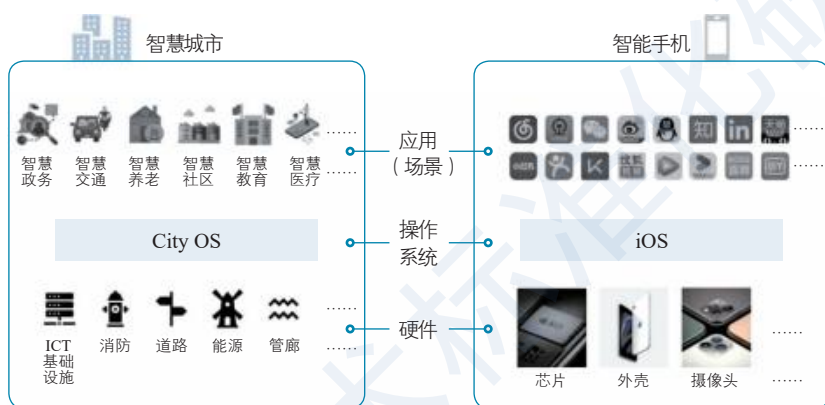


图 71 智慧城市操作系统

在实施层面，AI CITY 提供统一的平台底座，上层各种不同的垂直场景应用就像是手机的 APP，通过 AI CITY 提供底层能力、标准化中间件支撑，迅速构建各领域应用。有效避免了底层硬件的重复建设、信息和数据规格符合 AI CITY 规范，打破了信息孤岛，使得数据得到有效打通。以操作系统为突破口，革新顶层设计。信息孤岛问题、重复建设冗余投入问题、缺乏联动和标准问题以及不可持续更新问题，本质上都源于智慧城市顶层设计。这些问题看似难解，却都是来自于系统独立、割裂这一源头。因此从问题源头出发，就必然会想到去革新城市的底层系统架构。

(2) 系统框架



图 72 AI CITY 系统建设框架

在技术架构最底层，是城市实体以及各种智能硬件：包括特斯联机器人系列、边缘系列、终端系列，以及网关、存储等等智能硬件，目的是实现场景的数据化。中间层为 TACOS 特斯联的智能城市操作系统，包括多层中台：连接硬件层的 IOT 层负责把线下数据连接到网络，IoT 的连接可以兼容各种硬件，支持各种不同的协议，它是能实现设备的抽象，包括接入和管理；实现资源调度和计算的 Kernel 层；核心的算力、数据处理和资源调度层，实现最优化资源配置；实现赋能应用的 API 和组件层可实现统一身份认证、位置服务、数据服务等等不同的 API，以及基于各种 API 打包出来的城市组件。中间层形成赋能上层应用的接口，最上层的应用生态基于底层硬件和平台，呈现无人驾驶、无人配送、新零售、分布式能源管理、智能家居等等这些新的场景和应用，实现新场景落地。

(3) 案例特点

特斯联 AI CITY 对标智能汽车和智能手机，通过空间 / 硬件 - 平台 -

生态的整合,实现数据驱动,性能和效果最优;并且能够实现OTA远程升级、弹性化空间等特性。

城市实体和硬件层面

友好未来感的基础设施+重构硬件架构——新的基础设施、新的技术、新的时代,会诞生新的物种,需求升级。对硬件的要求要远高于传统城市。

a) 城市空间——弹性可延展、机器人友好、为数字化专门打造,每一个角落都能够产生和应用数据。比如非接触式场景,这次疫情带来了非常大的机会,无人化、机器人化都成了刚需,所以在设计硬件里面的时候一定要更多的为这些无人化提供基础设施,包括充电桩、维护、数据的交互等等。

b) 终端和硬件设备——强调硬件对城市场景的适配性和效果。如机器人实现150台编组协同,服务世博会;如针对社区、楼宇中的门禁系统,可以将所有技术都嵌入人脸识别PAD。在公安部三所的测试中,识别率最高。

平台操作系统层面

特斯联的目标是在城市里面实现千人千面,整个城市以数据为驱动,将智能硬件产生的数据整合放在一起,再反过来驱动整个城市的运营。

a) 统一调度智慧响应的操作系统,如同智能汽车通过CCM的中控系统操作所有部件,提供一个中央的控制系统,来连接所有的场景,可以达到跟智能汽车一样的智能城市的操作平台。

b) 数据驱动,每一个场景都会产生数据,这些数据都产生不同的反馈,AI CITY让每个人在空间中都会有on demand的体验和感受。

c) OTA远程升级,根据不同的数据、不同的场景进行不断迭代,实现不断的进化。如特斯拉不需要改动硬件,只需要通过打补丁的方式就可以进行远程升级。

生态层面

打通产业链上下游及不同行业合作伙伴共生。

a) 丰富的城市组件，通过硬件产生的数据，协同到平台层里面，然后通过 API 和城市组件实现输出，简化生态应用开发工作。

b) 开放的生态平台，真正的智能城市和未来的智能产业，应该是一个平台化的数字生态模式。相当于苹果开发者平台，连接了超过 200 多万的应用和 2300 万的开发者；把各行各业的产业都搬到了互联网里面，搬到了智能手机的生态平台当中去。

c) 特斯联 AI CITY 会有一个强大的生态，把合作伙伴都吸引进来共同建设。

(4) 实施步骤

a) 在产业生态圈方面，拟通过三种方式：龙头引领、平台支撑、产业生态合作实现产业集聚，构建和落地产业生态圈。具体将以特斯联及合作伙伴 2-3 个重点项目为核心，通过占比 5%-10% 的龙头项目进行引领；集中孵化占比 15% - 20% 的 3-4 个重点项目，构建智能物联网研发创新公共服务平台作为支撑；向外拓展产业生态合作，完成余下约 70% 的生态圈建设。打造智能物联网产业集群发展，空间合理布局的城市级智能物联网科技生态城。

b) 在产业导入方面，依托构建的产业体系，充分结合光控新经济产业理念及本项目产业生态圈的理念，实现产业导入。秉持光控新经济产业理念，发挥优势基础，基于项目本体及未来发展进行定位；结合国家及区域的产业发展导向，做大基础产业，嫁接新兴产业，导入前沿领域；以产业生态圈的理念搭建产业构架，并落实产业生态的构建。同时坚持产业生态圈理念，深挖上下游产业链，促建生态圈闭环；以技术研发为核心输出，支撑产业发展；坚持以龙头企业、中坚企业、创新企业

为核心构建主导产业；完善产业核心要素，补充服务产业、金融证券、人力等配套产业。以强市场竞争力和可持续发展能力，形成多维网络生态体系。

c) 在创新创业生态方面，创新与资本双驱动，构建创新创业生态圈。建立“众创空间－孵化器－加速器－产业园”空间链条，构建产学研新动力。通过引入/自建，建设国家级众创空间；建设国家级科技孵化器及专业型孵化器；建设省级科技型企业加速器；在众创空间、孵化器、加速器的基础上，建设一流产业园。采用“基金+基地”模式，构建涵盖政府、高校科研院所、金融机构、服务机构在内的创新创业生态圈。联合政府引导的创投基金和百亿级产业基金，行成政企联盟、产业聚集和资本聚集的创新创业生态圈。

d) 在产业规模化方面，通过 AIoT 战略产业联盟、伙伴式招商平台实现产业集聚发展。战略产业联盟是由光控特斯联、及人工智能、物联网企业、智能制造企业、应用企业，及行业服务提供商等共同建立产业联盟。仅 2018 年，特斯联与各类头部客户进行战略签约 23 起。伙伴式招商平台以各城市项目为载体，可为全国各项目公司、联动展示、招商平台，提供硬件设施和软性服务。平台组成以“行业展会、论坛、刊物+商会/协会+各企业服务机构的招商合作平台，促进项目招商合作进度的快速提升。

(5) 涉及的关键技术



图 73 AI CITY 核心技术构成要素

AI CITY 的核心技术围绕 BASIC 打造。其技术要素构成了 AI CITY 的核心关键技术，特斯联在上述技术要素中，根据技术发展趋势，结合公司战略、业务方向，前瞻性布局了多点开花的核心技术体系。

a) Bigdata 大数据

包括可信计算、大数据平台调度系统、时空数据融合引擎、分布式数据库、高可用的数据采集系统、EB 级数据仓库、智能数据权限管理系统，解决数据合规性、资源分配等数据获取、并发、存储、采集等问题。

b) AI 人工智能

包括多智能体、行人重识别 (Re-ID)、图像生成、图卷积神经网络、联邦学习、人脸识别、知识图谱等技术。

联邦学习

c) Security 安全

包括统一身份认证、物联网安全、数据安全、移动安全、网站安全、数据容灾、物联网安全 - 终端安全、物联网安全 - 通信安全、物联网安全 - 平台安全、物联网安全 - 态势感知等安全技术。

d) IoT 物联网

包括设备接入服务、多协议接入、异步消息服务、区块链等技术。

e) Cloud 云计算

包括负载均衡技术、混合云管理、集群联邦、场景高保真压测、城市仿真等技术。

f) 边缘计算

包括存算管一体、云边协同等边缘智能技术。边缘硬件具有三大核心功能：IO + Storage + Computing。Storage 即分级存储，(软件定义存储，Block 块存储层，流式存储，对象存储，结构化存储，边缘数据安全)；Computing 即弹性算力，(可插拔，业务定制，VPU+GPU，算法仓)；IO

即混合异构接入，（有线无线，高带宽低带宽，软件定义网络，终端设备全面管理）。

（6）案例成效和意义

重庆特斯联 AI CITY 项目，占地预计 1400 亩左右，总建设规模约 140 万方，建设周期 5-6 年，预计总投资额约 300 亿元，其中科技产业投资 100 亿元，基础设施和智能产业投资 200 亿元。预计到 2025 年全部开发完成，全面达产后预计实现产业年产值约 100 亿元以上，实现产业带动年产值约 1000-2000 亿元，带动就业人口约 8 万人，其中 20% 以上均为高端科研人才。通过“产业聚集，以产促城，智慧提升”协同发展，实现“中国乃至全球顶尖的科技创新示范区和智慧城市标杆”的愿景。

项目将打造融合大数据、人工智能、物联网、智能制造等各项先进技术的重庆智慧城市系统、打造中国乃至全球顶尖的科技创新示范区和智慧城市标杆，形成“以产促城、产城融合、智慧生态”的典范。通过补位区域发展中基础设施、公共配套的智能升级，完善城市功能，促进区域快速发展成熟。项目将成为重庆市经济增长的新亮点、城市形象提升的新名片，提升重庆城市形象。项目将为市民提供良好的城市生活、产业空间、居住空间，促进就业并提高市民收入。

案例二：智慧滨海城市数字大脑

（1）案例背景及基本情况

2018 年，滨海新区以智慧政务、智慧经济、智慧城管和智慧民生四大版块 N 个智慧应用为重点，分三年推进智慧滨海建设，实现“大数据一张图”支撑决策，“大运营一条链”服务产业，“大平台一张网”惠及民生，全面打造智慧滨海品牌，带动和提升滨海新区经济社会各领域的信息化、智能化水平。

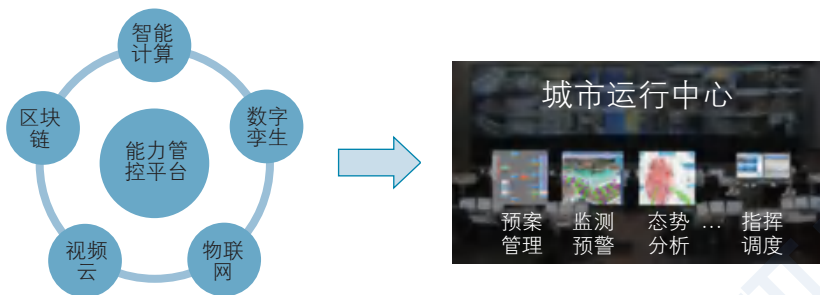


图 74 智慧滨海城市管控平台与运行中心

智慧滨海城市大脑，以数字孪生理念为指导，通过构建数字孪生平台作为重要基础平台和组成部分，一方面实现滨海全域全量数据资源的管理和可视化展示，另一方面，充分利用高性能的协同计算能力、模型仿真引擎，实现滨海城市治理、民生服务、产业发展等各系统协同运转，从而形成智慧滨海城市数字大脑自我优化的智能运行模式。

(2) 系统框架

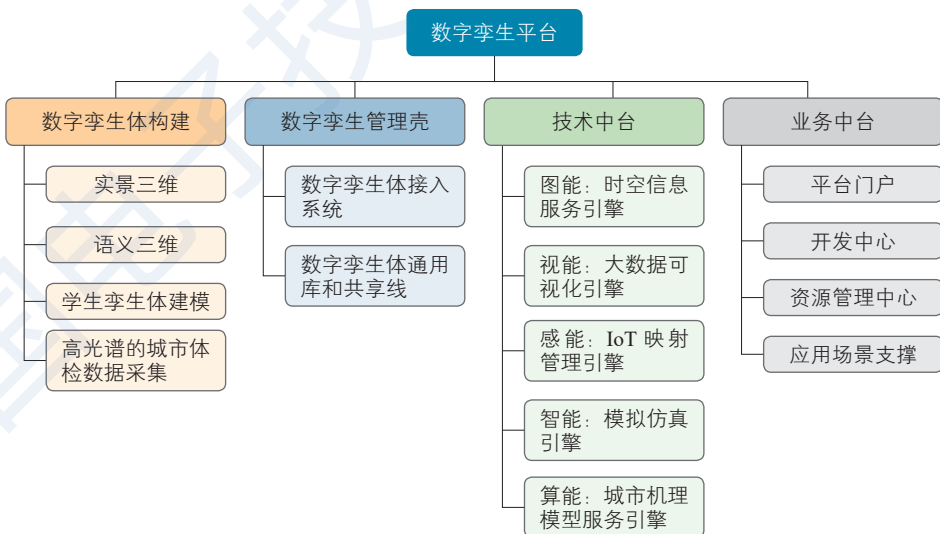


图 75 滨海数字孪生平台架构图

a) 数字孪生体构建，提供实景三维、数字孪生体、高光谱数据处理能力和服务。

b) 数据孪生管理壳，包括数字孪生体接入系统、数字孪生体通用库和共享总线，提供数字孪生体数据接入、展示、存储、管理、发布等功能。

c) 技术中台提供数字孪生基础服务能力，包括图能、视能、感能、智能、算能，实现将数字孪生体按照孪生底座的服务能力进行融合、分析、感知、仿真，面向不同行业提供专题服务能力。

d) 业务中台提供专题应用能力，面向行业应用，提供行业系统快速搭建能力。

(3) 案例特点

a) 以数字孪生体系作为基础底座，实现城市物理世界、网络虚拟空间的相互映射、协同交互，进而构建形成基于数据驱动、软件定义、平台支撑、虚实交互的数字孪生城市体系，实现城市从规划、建设到管理的全过程、全要素数字化和虚拟化、城市全状态实时化和可视化、城市管理决策协同化和智能化；

b) 以城市信息模型（CIM）作为建设核心，数字孪生模式下的所有信息悉数加载在城市信息模型上，依靠人工智能技术进行结构化处理、量化索引一座城市，依靠深度学习技术实现自动检测、分割、跟踪矢量、挂接属性入库，形成全景视图和各领域视图，全局、直观、量化可分析、可推演、预见未来，从而给城市管理带来质的飞跃。

c) 以数字孪生 PaaS 平台作为开发平台，数字孪生平台基于海量“数据”和高性能“算力”，全面构建融合大数据、人工智能、区块链等先进技术引领的深度学习机器智能平台，应用机器学习和深度学习等机器智能算法，更好的实现有效采样、模式识别、行动指南和规划决策，将人类智能和机器智能相结合，把专业经验和数据科学有机融合，利用机

机器学习驱动的交互可视分析方法迭代演进，不断优化，提升智能算法执行的效率和性能，保证数据决策的有效性和高效性，以适应不断变化的城市各种服务场景。

(4) 实施步骤

a) 数据采集和数字孪生体建设：构建全空间的城市基础物联网感知网络，利用传感器、摄像头等感知设施实现对城市地上、地下、空天的一体化监测。利用通信技术，将传感器采集到的数据，实时地传输到城市孪生信息服务平台中，并对收集到的数据进行预处理，实现城市状态信息的持续更新，为后续的城市管理及科学决策提供坚实的数据基础。

b) 数据共享交换：全域数据共享交换系统支持来源于分布式应用系统间、云环境下应用系统之间的多源异构海量城市大数据的交换共享，实现了资源共享、一站式查询、管理与调用，可满足各种大型应用、各种复杂的网络环境下的业务需求，尤其适用于跨部门、跨地域、跨层级的数据交换共享。

c) 数字孪生基础服务能力建设：提供数字孪生底座平台的基础服务能力，包括时空信息服务、城市机理模型服务与城市知识图谱服务、大数据可视化、智能模拟仿真、IoT 映射管理，辅助各部门业务运转，通过精准映射、模拟仿真、虚实交互、智能干预等推动城市治理和各行业领域应用创新发展。

(5) 涉及的关键技术

a) 实景三维重建技术：实景三维重建技术是依托倾斜摄影测量遥感数据成果，结合摄影测量学、计算机图形学算法，通过自动化处理流程手段，获得三维点云、三维模型、真正射影像（TDOM）、数字表面模型（DSM）等测绘成果的模式构建技术。其建模速度快，位置精度和几何精度高，纹理真实性强，具有非常实、细致、具体、有冲击力的视觉感受。激光点

云三维构建技术体现了数字孪生时代下三维模型自动化构建优势。传统 3D 模型建立采用 CAD 技术、航空摄影测量技术，利用 2 维信息建立 3D 立方体，其纹理依靠专门的 3D 软件如 3DMAX 等进行人工粘贴，其工作量较大，生产成本也高，而激光点云三维构建技术具备高效率、高精度、高真实感、低成本优势，通过点云构网 TIN 技术，将现有点云进行贴近于显示地物的三维曲面重建，实现多幅建筑物立面的倾斜影像及屋顶垂直遥感影像与三维几何模型的快速、高精度纹理映射。

b) 城市室内外一体化语义模型构建技术：利用倾斜摄影、点云、室内结构图纸等数据，自动化构建室内外一体的、语义化的、架构的城市三维模型，实现城市模型具有完整的、机器可识别分析的语义信息，实现“数字世界语义化”，推进数字孪生城市发展。

c) 多源数据融合技术：在数字孪生时代，以地理信息服务精细化、精确化、真实化、智能化为目标，利用机器学习或深度学习算法以及 SLAM（实时定位与制图）算法对测绘地理大数据进行自动识别、数据挖掘和三维重建，快速提取地物特征、发现隐藏在大数据中的知识和还原地物模型，结合充实各地理实体的社会经济属性，形成涵盖地上地下、室内室外、二维三维一体化的全息、高清、高精的结构化实体和城市数字空间，从较为单一的 GIS 数据升级为融合多源、异构、多时态空间数据，以满足应用和分析的需求，从多源异构数据无缝融合、时空数据库建立和空间数据快速更新等方面入手，为社会各界提供知识服务。在数字孪生时代，测绘地理信息行业从传统的地图产品制作转型为面向城市治理、社会经济、专业建设和大众民生应用的服务行业。

d) 三维语义化技术：语义化即对数据进行智能化加工处理，使其所包含的信息可以被计算机理解。在数字孪生城市中，只有将三维数据进行语义化处理之后，才能更快速、准确地提取到所需要的信息，保证

数据的无歧义理解和良好结构化表达，实现可量化索引。利用语义化技术，可以形成一个量化并可索引的城市描述信息，同时利用 CIM 的可扩展性，可以接入人口、房屋、公司法人、安防设施、公安警务数据、住户水电燃气信息、交通信息、公共医疗等诸多城市公共系统的信息资源，实现跨系统应用集成、跨部门信息共享，避免重复建设和信息化孤岛。

e) 时空知识图谱技术：知识图谱本质上是结构化的语义知识库，为智能系统提供从“关系”角度分析问题的能力。以符号形式描述物理世界中的概念及其相互关系，其基本组成单位是“实体—关系—实体”三元组，以及实体及其相关“属性—值”对。不同实体之间通过关系相互联结，构成网状的知识结构。知识图谱能够依托数字孪生城市的海量信息为海量实体建立各种各样的关系，为城市运行管理奠定基础。

f) 深度学习：利用深度学习技术，自动对实景三维检测、分割、跟踪矢量、挂接属性入库，将物理世界中多源异构和多模态的空间大数据组织形成复杂庞大的数据语义网络，解决跨领域的数据在几何位置、属性语义、逻辑等方面的相似性、不一致性问题；并结合“天—空—地”一体化多源三维数据融合和可视化技术，实现静态三维可视化向智能动态可视化转变；CIM 还可建立从描述性可视分析到解释性可视分析和探索性可视分析的多层次可视分析体系，快速有效地从多模态实景三维大数据中发掘价值，支撑数字孪生各应用领域的决策分析。

(6) 案例成效和意义

滨海新区基于数字孪生底座打造的 1+4+N 新型智慧城市建设体系，完成了一个智慧滨海城市大脑、4 个应用板块、N 项智慧应用的智慧滨海建设，实现以运营管理中心为核心枢纽，以城市信息模型为数据载体，打通信息孤岛和业务壁垒，实现从规划、建设到管理的全过程、全要素数字化和虚拟化、城市全状态实时化和可视化、城市管理决策协同化和智能化。

智慧滨海建设于 2018 年底启动，2019 年 6 月份投入运行。截至目前，运营管理中心整合接入了 28 个已建系统，新开发了 10 个应用系统并投入使用。例如危化品全域监管系统，利用城市信息模型实现全区 916 家相关企业的信息展示、储罐实时监测和预警、仓储实时同步和分析、运输实时监控和应急快速响应等功能，为危化品安全提供保障。

案例三：雄安新区智慧城市建设

(1) 案例背景及基本情况

本项目紧密围绕指南方向，根据雄安智能城市规划，面向雄安新区智能城市建设和发展过程中面临的“数字城市与现实城市同步规划建设中协同一致性问题”，“面向智能城市的新型异构网络融合、协作及自主可控问题”，“面向碎片化、高耦合数据的城市发展预测与推演问题”，“智慧城市综合应用示范和产业生态薄弱的问题”等重要问题设立了五项研究内容：数字孪生框架体系及关键技术；面向智能城市的新型融合网络体系；基于全域时空信息的智能城市混合现实及推演技术；数字孪生体系构建及应用示范；国家新区城市发展指标与创新生态体系。



图 76 雄安新区智慧城市建设

本项目的研究目标是建立符合雄安新区实际需求的数字孪生框架体系，制定面向国家新区的智能城市建设标准规范和城市发展指标体系。突

破全域时空多源异构数据汇聚共享技术、关键领域资源预测等核心技术，突破空天地一体化融合网络体系，建立城市多维时空推演平台、数字孪生体系，在智能安防、智慧工地、智能交通、绿色生态、智慧能源、城市管理等领域，开展示范应用的建设，形成可持续发展的智慧城市技术创新生态，促进技术、产业与应用集成的创新，支撑把雄安建设成为具有全球领先地位的数字孪生城市。

(2) 系统框架

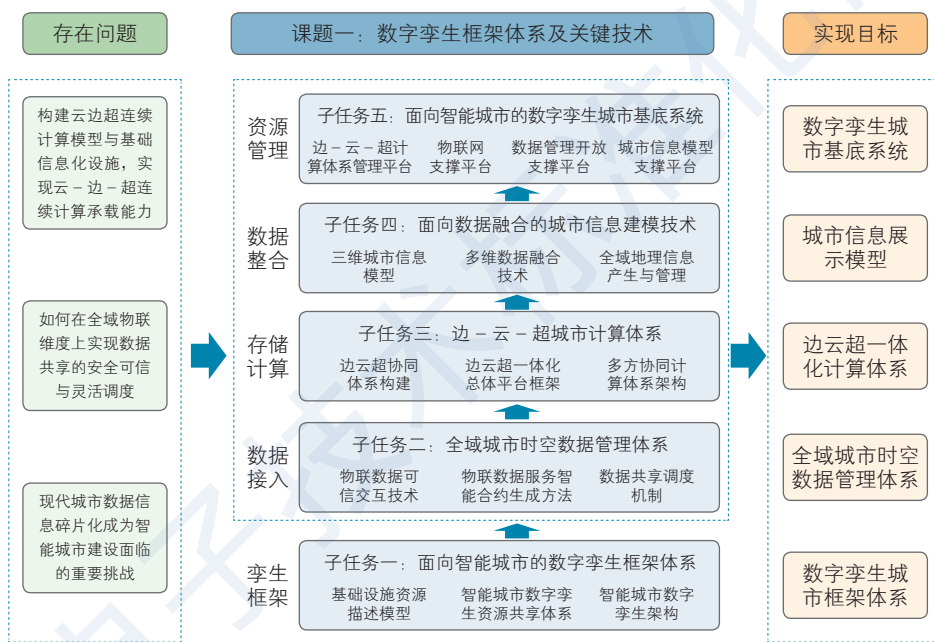


图 77 雄安新区面向智能城市的数字孪生框架体系

分析雄安新区海量资源汇聚、融合、共享与智能运营管理的需求，构建面向智能城市的数字孪生框架体系，融合物联网、边-云-超计算体系、城市信息模型，形成覆盖智能城市全域的全栈式资源协同基础；突破云边超连续计算、城市数据信息碎片化融合建模、全域城市时空数据管理和业务高效协同等关键技术，研制数字孪生城市基底系统。

面向智能城市的数字孪生框架体系

面向国家新区的基础设施建设与综合规划等典型应用迫切需求，分析雄安新区数字孪生相关设备、网络、平台的建设现状，揭示数字孪生系统在终端感知设备、城市时空数据可信共享、数字孪生业务模型和数字孪生应用的建设和布局过程中面临的需求与挑战。

研究智能城市数字孪生资源管理体系。研究边-云-超融合计算环境下城市时空数据的可信传递模型，研究去中心化的多方协同的城市时空数据智能管理模型和可信共享框架。

融合智能城市数字孪生体系资源管理体系和全域城市时空数据可信采集、分析、管理和开放共享体系，研究全域城市资源智能协同的数字孪生框架体系。

全域城市时空数据管理体系

研究数据资源描述模型和轻量化数据表征模型，形成语义空间坐标相互独立、各维坐标轴相互正交的数据描述范式，利用数据时空特性、网络拓扑关系对全域时空数据进行抽象与组织，建立统一、简洁的数据描述元模型，提高数据的兼容性与共享效率。

研究城市时空数据可信交互技术，设计城市时空数据资源的开放式命名规则，构建城市时空数据资源标识的注册、标识、解析校验机制。

研究全域数据接入网关和城市时空数据共享调度机制，满足多样化城市时空数据共享需求，设计可扩展的数据共享合约模板，通过城市时空数据共享适配组件化和可动态配置智能合约，实现城市时空数据共享策略的灵活调整。

边-云-超城市计算体系

建立边云超协同体系作为城市信息模型的云能力中台，对接城市网络、产业园区、民生物联等基础设施，为智慧城市体系提供安全、实时、高效、

智能、灵活的云计算环境。

研究基于边缘计算、云计算和超算平台的资源协同、数据协同、智能协同、应用管理协同、业务管理协同、服务协同与安全协同的整体三层协同设计,形成边云超一体化的基础设施能力、平台能力、管理与安全能力、应用与服务能力的总体平台框架。

研究不同类型的业务,对边缘计算、云计算、超算平台部署需求,构建复杂应用场景下,超算平台与云、边缘计算平台的一对一、一对多等多方协同计算体系架构,研究典型业务的协同流程。

基于数据融合的城市信息建模技术

研究城市运行态势的全域多维数据融合技术,研究包含系统、应用、新型网络和设备的城市信息模型架构,基于三维 GIS、BIM 数据、IOT 网络,集成城市规划建设管理过程和成果数据,形成可感、可观的三维城市场景的建模技术体系。

研究城市运行态势的全域多维数据融合技术,研究基于全新的地理特征数据库、全域地理特征几何模型抽取多类型、大规模地理特征数据技术,研究全域数字城市地理信息生产与管理方法,形成支撑数字孪生的城市海量特征数据建模技术体系。基于建模技术体系研究,构建支撑数字孪生体系的城市信息建模服务能力。

面向智能城市的数字孪生城市基底系统

研制边-云-超计算体系管理平台。研究提供多种运维场景的配置数据服务,为应用从创建到部署,再到后续的维护管理提供了完善的自助化和自动化服务。

研制面向数字孪生系统的物联网支撑平台,以全域物联感知接入为基础,以资产统筹建设运维服务为核心,以开放共享应用赋能理念支撑数字孪生体系建设。

研制城市数据管理开放支撑平台，结合业务场景特征，基于人工智能和区块链技术构建数据汇聚、融合、协同与共享方法，提升数字城市海量时空数据的治理与共享开放能力。

研制城市信息模型支撑平台，实现城市全要素数据与业务建模、模型管理及开放共享服务，为智能城市数字孪生全域业务提供数据与业务建模能力。

集成上述支撑平台，构建面向雄安新区的数字孪生城市基底系统，研究业务、数据与场景驱动的数据汇聚模型，研究分散、异构应用需求整合与应用服务需求为驱动的资源整合技术。

(3) 案例特点

国际先进的数字孪生体系，基于数字孪生 3P 理论，围绕社区网格化精细化的治理为总体建设目标。

依托国家标准数字孪生标示标准，融合社区多业务，多主题数据，形成了统一管理，目前打通了公安、企业、人口、法人，形成了统一的数据资源共享。

在社区设立仿真决策中心，联合高校攻关了城市仿真算法模型，国内领先做到了把仿真模型应用到了城市治理应用。

(4) 案例成效和意义

本项目形成 1 套具有中国特色、全球领先的数字孪生体系，包含 1 套数字孪生城市基底系统，新型融合网络业务能力开放及管理、城市全域时空推演等 5 个平台，多级异构的边-云-超计算体系和城市全域数据接入体系；1 套面向智能城市的网络资源预测及智能调度模型；1 套城市发展指标体系；10 套智能城市技术领域相关团体标准；在雄安新区开展 6 类重点应用示范，打造具有全球意义的智慧城市技术、产业与应用集成的创新示范区。为中国新型智慧城市发展提供创新理论、技术支撑和通

用技术范式。

案例四:南京市江北新区 CBD 智慧城市指挥中心

(1) 案例背景及基本情况

随着我国经济不断发展,人民生活水平不断提高,社会对航空出行、航运的需求日益高涨。国内航空业的发展,也从成为航空大国转向航空强国。民航局在 2020 年 1 月份发布了《中国民航四型机场建设行动纲要(2020-2035 年)》(下称纲要),其中提到了“平安、绿色、智慧、人文”的纲要核心。

在新的发展起点上,南京江北新区将高举习近平新时代中国特色社会主义思想伟大旗帜,全面贯彻中央和省、市决策部署,牢牢锁定“三区一平台”战略定位,积极抢抓“一带一路”、长江经济带、长三角一体化三大国家战略机遇叠加,充分发挥“双区联动”新优势,加快推进创新名城先导区和“两城一中心”建设,加速社会主义现代化建设,加强生态文明建设,扩大对外开放合作,高质量推进南京新主城建设,努力建成全省全市发展新的重要增长极,为建设“强富美高”新江苏做出新的更大贡献。

(2) 系统框架

城市的生长周期分为现状、规划、建设、运营、再建设五个阶段。这五个阶段相辅相成、互相融入。城市的服务对象分为政府、企业、公众。因此,建设一套数字孪生城市系统,需要囊括 5 个阶段,面向 3 类场景。首先,要梳理物理城市的家底,如城建区、城建面积、建设年龄等,这需要通过遥感、斜拍、街景等技术收集资料。

在规划层面,为落实规划纲要,项目方需要公示总体规划、专项规划、详细规划,用以传递规划成果,收集公众反馈;在建设阶段,要引入工程施工的数据,主要来自安全施工、绿色施工两个方面,包含施工设备、

渣土倾倒、绿布覆盖、人员大概、建设进度等；在运营阶段，则结合网格化管理，为城市建设管理、城市综合管理、城市招商服务、公共政府等内容提供支撑。

基于新区数字孪生城市建设要求，综合使用最新的数字孪生三维技术、实时渲染显示技术实现多页面互动，不仅可以政务大数据可视化应用进行直观的展示，使与本项目相关的领导层、业务人员、群众、企业能够直观的“看得见、看得清、看得懂”。体现出本项目的建设成果，以及规划建设改革层面取得的突破性进展。

针对新区在物理城市与数字城市同步规划、建设、管理、运营等不同阶段所产生的差异化需求，围绕新区成长的“全生命周期”，服务不同使用群体的需求，为新区在城市定量化决策、精细化管理和全时化反馈上的全流程创新奠定条件。

(3) 案例特点

智慧城建

规划展示功能：打开三维智慧城市系统，我们可以在大屏幕上俯瞰中央商务区 25.4 平方公里的大场景。当系统界面下沉到具体片区，系统就可以展示片区内功能区规划、市政基础建设和重点建设项目等，还可查询展示控规地块土规情况、征转情况、权属情况。比如土地规划以不同色彩表示用地类型；市政基础建设部分，对四纵四横主干道路、贯穿商务区的地铁沿线进行还原展示等。

形象管理功能：系统运用 BIM 模型展示在建项目的形象进度管理过程，可将项目工程进度通过建模与实景对比的方式表述出来。系统可根据项目方的工作计划书将 BIM 模型进行分解，通过项目实际进度填报，系统还原出 BIM 模型的施工进度。比如红色透明部分代表未开工部分，已完工部分采用模型实体显示，整体进度一目了然。系统还会提供计划进度

与填报进度的对比分析。

5G+ 无人机巡航功能 :“5G + 无人机的巡航功能”结合 5G 网络、人工智能、云计算、4K 级视频等技术，可以实现制定线路巡航和应急突发事件响应。作为中央商务区的“空中之眼”，5G 无人机可以实现监控地面的道路交通状况，拍摄突发事件的照片和视频，可以随时对建设中工地进行监控，对裸土覆盖情况、违章搭建情况进行判别，精准执法。目前，中央商务区正在加紧建设 5G 网络覆盖，叠加人工智能技术后，无人机将成为江北核心区的“智慧之眼”。

智慧城管

城市管理 :此分项下系统可以实现市容市貌、渣土车管理及停车秩序管理。以渣土车为例，中央商务区的痛点是对无牌、套牌渣土车偷倒垃圾的行为进行管理。系统的设计是基于白名单管理、关键路口的抓拍保存黑车及其驾驶员的信息，结合技防、电子狗防，能发现非商务区的渣土车并广播语音催促其驶离商务区。保存下来的黑车及其驾驶员信息可作为报案处理依据。通过大数据分析可还原黑车习惯的行进路线，通过城管人员设卡，现场抓捕。

安全管理 :安全管理分项下包括消防安全、用电安全、临边防护、塔吊设备、施工升降机、工地现场视频等。这些项目一旦发生告警，系统会在三维场景上相应告警发生地弹出告警按钮，有相同类型告警时会滚动显示。系统坐席人员可及时通知相关部门处理告警，将安全问题扼杀在摇篮之中。

环保管理 :环保管理分项下包括扬尘管控、水质监测、车辆冲洗管理等。坐席人员可以在系统内看到工地现场视频，扬尘数据也可以实时调看。扬尘指数一旦超标，系统发出告警，坐席人员会第一时间通知项目管理人员注意关注，实现告警事件处理的闭环。

企业服务

CBD 智慧城市系统将为广大市民、技术创新与科技型企业成长提供信息服务保障，努力成为自贸区建设的重要节点，整合利用共享、协作创新和提升技术服务能力。

系统为商务区企业服务专门开发了一个平台，可以展示商务区招商以及企业服务相关政策。企业服务模块应用 AI 人工智能技术，咨询人员可点击相应按钮查看相关资料，如扶持政策按钮。

咨询人员也可以输入相应问题或录入相关语音，智能 AI 会自动识别并反馈相应解答。若咨询人员对智能 AI 反馈的结果不满意，还可点击人工客服按钮，采用视频聊天的方式向专业客服人员咨询相关问题，视频聊天的同时还可实现在线传输文件、屏幕共享、在线互动等功能。咨询人员可直接获得相关文件、需填写的表格，减少企业来回跑的次数。相关政策可通过屏幕共享的方式详细的讲解，相对于面对面交流，比通过电话沟通更加有效。

智慧城市指挥系统后续还会结合中央商务区管办建设的企业加油站，在指挥中心大屏展示企业加油站覆盖区域，打造企业服务网格的概念。同时，企业服务站前段无法解答的问题，能通过上面的企业服务在线答疑功能能给企业答疑解惑，帮助企业一次性解决问题，实现只跑一次的目标。

(4) 实施步骤

江北新区的智慧城市与数字孪生城市的建设是“顶层规划、稳步推进、垂直应用、综合管理”的：

城市建设与数字城市规划

城市规划与建设由发改委、自然资源部门、住建部门指出方向，专业的设计院设计，信息化规划由专业的咨询公司或科研单位提供方案，由经信委或大数据局等部门完成信息化建设。

资料采集

智慧城市的需要有它的细胞和神经元，例如 GIS、BIM、3DMAX、CAD、斜拍、IOT、IAAS、光纤、5G、AI 等数据。最核心一点要对这些数据统一度量衡，即何时、何地、如何、怎样干预。

场景与权限映射

(1) 城市运营数据海量且庞杂，数据又分为绝密、机密、秘密、公开不同级别。权限管理是必不可少的。权限可以按照数据权限、操作权限、网格空间权限进行区分。公众能看到政务公开信息的。企业能看到三产占比或办公地址招商的信息。政府则可以看到公共安全、城市管理的信息。针对某一职能部门，它只能看到授权范围内的业务数据。针对街道办或社区办，只能接触该街道的数据而不能查看全域。

(5) 涉及的关键技术

天空大气层物理仿真

通过行星大气的参与介质模拟了近似的光散射。以适当且准确的方式散射光来定义天空和大气外观。天空大气系通过米氏散射和瑞利散射来模拟吸收。这些散射效果通过模拟入射光与大气中的粒子和分子的相互作用，使天空在一天中的过渡期间可以适当地更改颜色。

PBR 物理材质

PBR 是基于物理渲染 (Physical Based Rendering) 的缩写。通过引入 BRDF 函数理论模型，来尽量逼近模拟自然界的物理现象如反射，吸收，折射，离散等，以及在各种表面的特性进行模拟。在计算机中准确的还原物理材质特性以及视觉效果。根据物理特性将分解成为漫反射贴图，高光贴图，粗糙度贴图，法线贴图，金属度贴图等贴图来控制物理表面视觉效果。PBR 物理材质几乎可以根据物理现象模拟任何硬表面和柔体，不透明，半透明，以及次表面物体的光线离散，吸收等物理现象。

天气模拟

通过大场景的实时光线追踪、24小时动态环境光照自定义，昼夜分明，光照效果自然合理，RayMarching 体积云、真实天气系统的物理仿真渲染将阴、晴、云、雨、雪等常见 32 种真实天气进行模拟。天气和时间都可以同步接入实时动态数据，通过结合天空大气层物理仿真，场景中数百万的动态粒子可以吸收和反射光线，可以控制各种粒子效果参数，包括有大小、颜色、密度、下降散开和反弹。后期可用于城市级别的仿真预测。

(6) 案例成效和意义

CBD 智慧城市的建设标志着中央商务区各项工作对高科技的重视，在未来的工作中，要将技术手段、工作方法、成果体现和信息集成技术相结合。CBD 智慧城市指挥中心的建成，是中央商务区对信息技术、计算机系统、决策和服务系统、视觉图像处理技术有机结合的重要探索。

CBD 智慧城市系统未来的发展还存在三个重要命题：一是如何让系统在现有功能的基础上发挥更大的作用，在广度和深度上更好的贴合中央商务区的区域建设和发展；二是如何让技术和管理、技术和组织、技术和各项事项的处理流程更有机更科学的结合，实现技术和团队一体化，思路 and 战略一体化，措施和效果一体化；三是如何让更多的社会大众、参建单位、企业更好的理解和接受智慧城市系统，主动地参与进来。

新型智慧城市已成为新时代创新城市发展和治理模式的重要举措，未来指挥中心将继续数据资源的开发与利用，深化智慧城市规范化与标准化建设，以及展开与科研院所全方位技术合作，推进中央商务区城市功能与城市品质不断提升。

案例五：深圳市智慧海绵管理系统

(1) 案例背景及基本情况

2018 年 6 月《深圳市智慧海绵管理系统》立项，旨在依照国家海绵

城市建设相关要求,综合应用云计算、互联网+和地理信息系统等科学手段,建设深圳市海绵城市规划设计、工程建设、运营管理的智慧化管理平台,实现智慧化、系统化、科学化、精细化管理,全面提高深圳市海绵城市建设和管理水平,为 2020 年乃至 2030 年深圳市海绵城市建设过程及后期运营考核业务管理提供基础数据和科学管理模式。

本项目是实现海绵城市建设管理信息化、智能化的重要举措,基于数字孪生城市技术,实现海绵城市项目合理规划,为海绵城市建设过程及后期运营考核业务管理提供有效支撑。

应用系统设计:包括全市总览、项目统筹管理、项目督查管理、项目模型评估、部门日常业务管理、绩效考核管理、公众参与互动、海绵学院及个人工作台等。

支撑平台设计:包括应用管理数据建设、数据调用和接入、GIS 应用服务、物联网设备适配管理系统、数据库系统平台。

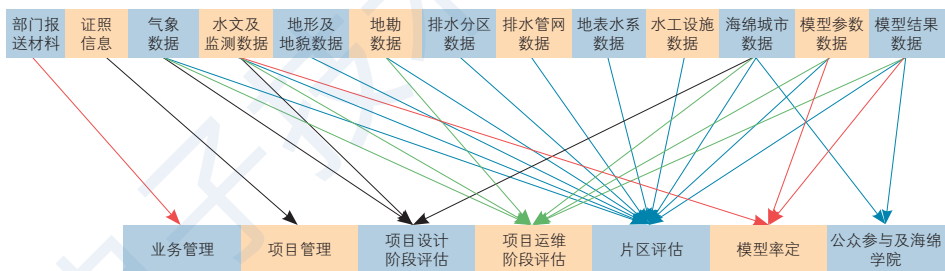


图 78 智慧海绵管理系统

海绵城市建设和管理涉及到的数据类型、部门庞大繁杂。涵盖气象、水文及监测、地形及地貌、地勘、排水分区、排水官网、地表水系、水工设施、海绵城市数据、模型参数、模拟结果共 11 类数据。分别应用于业务管理、项目管理、项目设计阶段评估等七大模块中。

建设数字孪生城市,可以将数据跨越部门以及行业边界,将全域全

量数据资源作为基础资产，从全景视角洞察城市的运行态势和运行规律。通过城市特征的抽取，管理者能够及时发现痛点问题，掌握发展方向，便于有的放矢、精准施策。

(2) 系统框架

基于各局办建设的海绵相关检测设备，如水文水利对温度、湿度、风速、风向、水质、雨量、水位、流量、流速等的监测，以及视频图像等监控，构建环境感知层（IaaS）。通过政务云基础设施层提供统一计算、存储、网络、安全等资源。

在数据层（DaaS），综合各项项目数据，如：用地规划许可、方案设计、方案形式审查、施工图设计、海绵检测数据、本底数据、设备数据、施工图审查、建设工程规划许可、施工许可、竣工验收、水务检测数据、业务管理数据等，共享各局办数据建设智慧海绵数据层。

在平台支持层（PaaS），构建 GIS 平台、 workflow 平台、物联网设备适配管理系统、统一权限管理系统。

在此基础上，构建业务应用层（SaaS），涉及全市总览、项目统筹管理、项目督查管理、模型评估、日常业务管理、绩效考核管理、奖励申报、工作参与互动、海绵学院。

面向用户的终端，包括大屏、PC、笔记本电脑、平板电脑、手机等多场景适配。

(3) 案例特点

目前，在智慧海绵城市的建设过程中，有四大难点问题：

局内部数据共享渠道不成熟

为了实现智慧海绵管理系统的模型评估功能需要获取大量数据，但由于局内部数据共享渠道仍不成熟，如水文、市政排水管网、河道水系等数据仍无法获取。

局外部单位数据有待信息化

为了实现海绵城市方案设计事中事后审查的信息化，需要获取全市项目涉及全部门、全流程的审批信息数据，但部分核心数据仍没有规整到统一的信息化平台（如规自局方案设计文件仍由各区管理、住建局的施工图纸信息化工作仍未完成）。

缺乏统一数据标准

为了实现海量数据的精细化管理，需要统一的数据标准。其中部分外部数据仍未有全市统一的标准，现项目团队已建成的数据库在未来可能由于新标准出台而需要返工。

信息安全和数据共享需求有冲突

为了实现准备模型评估需要高精度的数据（如地形图、管网等涉密数据），其中信息安全的要求与在线共享数据的需求间的冲突难以解决。

本案例中的智慧海绵数字孪生城市建设，满足了如下需求：

系统体系架构：按照 SOA 体系结构开展系统设计开发。

应用开发技术：采用 MVC 的 J2EE 架构实现服务体系结构。支持水务局数据中心已有的 Oracle11g 数据平台。

数据资源建设：满足智慧水务“一中心”的数据中心信息资源管理要求，进行标准系统数据库设计和建设、通过数据中心进行系统数据的交换共享、基于数据中心“一张图”地图服务开展相应的数据展示应用。

应用支撑组件：利用现有智慧水务“一平台”的应用支撑平台现有支撑软件工具。

安全要求：系统、网络架构满足二级等保的要求。

(4) 实施步骤

阶段一：从需求调研分析入手，设计并审核确认系统功能，搭建核心功能以及参与互动功能，在进行联调过程中，进行项目初步验收。

阶段二：进行可演示版本系统各功能迭代修改，进而搭建平台全部功能，在参与互动功能完成后进行测试，最后进行项目验收。

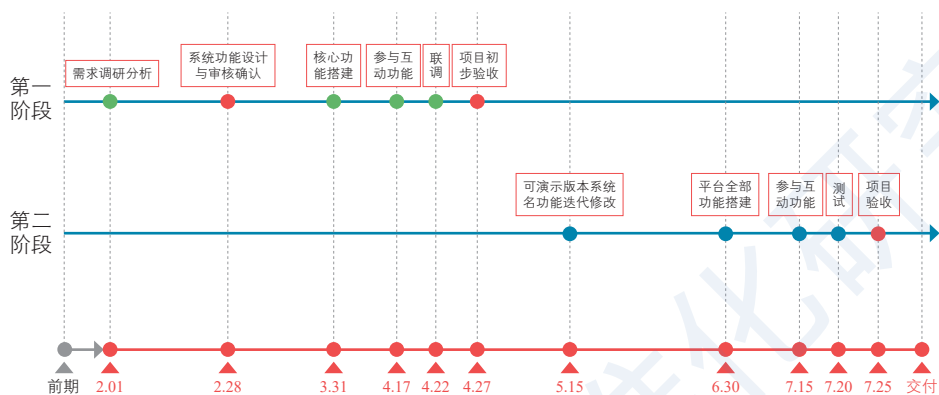


图 79 智慧海绵管理系统实施步骤

(5) 涉及的关键技术



图 80 腾讯云 CityBase 关键技术

腾讯云 CityBase 基于 CIM 的产业互联网平台，将城市土地、建筑、水体、路桥、管线、管网、管廊等地上地下基础设施和空间资源全面数字化，并以数字空间为载体，链接人与物，打造时空一体的数字孪生城市，服务城市的规、建、管、服全生命周期，助力建设能感知、有温度、会思考的新型智慧城市。

(6) 案例成效和意义

2016 年至今，深圳海绵城市的建设已取得阶段性成果，并通过腾讯云 CityBase 的助力走入全域智慧化、系统化新征程。在全域智慧化、系统化过程中，深圳市委市政府坚持海绵城市建设的“七全”模式，该模式受到住建部的高度认可并向全国推广中。CityBase 在其中的助力成效和意义：

全覆盖规划指引，加强顶层设计，融合构建规划体系

针对海绵城市建设任务多样、建设条件差异大的情况，腾讯云 CityBase 助力深圳市水务局迈入全域系统化新征程，以加强顶层设计，推动规划体系的融合建构。

全视角技术支撑，建设全过程精准指导

为帮助深圳市水务局对各行业在开展海绵城市建设的全过程中提供有力指导，腾讯云 CityBase 建设并提供方案审查应用，实现了方案审查的智能化。方案审查应用的具体功能包括：按照规范自动化抽选项目进入审查流程；可自动获取项目方案设计、施工图纸等材料；建立向各部门反馈审查意见的信息化途径；实现事中事后审查全流程的信息化管理等。

全方位项目管控，全过程管理

为助力深圳市在建设海绵城市过程中的全过程管理，腾讯云 CityBase 建设并提供项目管理应用。其中，项目库管理应用实现了建设项目的智能化管理，项目库管理应用的具体功能包括：项目自动拉取、批量导入实现入库智能化；项目合规审批状态自动同步更新；高效信息化、流程化的项目管理；项目信息的多维度自动化统计等。其次，项目巡查应用可智能推送巡查任务信息，项目巡查应用的具体功能包括：现场巡查人员可通过移动端随手拍随手填；通过 GPS 记录巡查位置保证巡查真实性；建立问题整改及反馈处理的信息化通道；提供在线巡查项目表单、图片、视频展示等信息；实现巡查成果智能筛选、自动统计等功能。

全社会广泛参与，共谋、共建、共享

随着深圳市海绵建设项目的不断增加，原有的线下技术培训和交流已逐渐难以满足需求。为推动全社会参与到深圳市海绵城市的建设之中，腾讯云 CityBase 建设并提供海绵学院应用，充分利用互联网技术，将培训等内容迁移到线上，实现了海绵知识传播的交互性、开放性、共享性和自主性。此外，腾讯云 CityBase 打造了公众参与互动应用，民众通过手机 APP、小程序可随时随地了解身边的海绵设施，参与海绵 DIY 秀，对海绵设施状况进行上报，对海绵建设满意度进行反馈等。

全市域以点带面，“点—线—面结合”

腾讯云 CityBase 助力全市域智慧化、系统化升级，从而推动全市范围“点—线—面结合”的实施态势的形成与巩固。“点”上，本着应做尽做的原则，除豁免清单外的项目全部施行海绵城市建设项目入库管理；“线”上，以河道综合整治、道路建设为依托，提升周边区域整体品质；“面”上，在全市梳理出来的 43 个汇水片区基础上进行系统化推进，力促从项目达标到片区达标。

全维度布局建设，全维度谋划布局

为推动全维度布局建设，腾讯云 CityBase 为深圳市水务局建设并提供了全市总览应用，实现了一张图展示深圳市地图全貌，可将行政区域、流域、用地规划、河流、项目、气象站、海绵检测设备、易涝点、水文站、二级排水分区等分别或同时于一张图进行呈现，便于管理者进行决策。

案例六：数智花果园

(1) 案例背景及基本情况

花果园是亚洲最大的棚户区改造项目，占地面积 10 平方公里，总建筑面积 1840 余万平米，区域内高层建筑密布，总人口峰值近百万，聚集了近 30000 余家工商注册公司，社会治理压力远超传统社区。2019 年南

明区委、区政府创新性地提出了打造一个科学化、精细化、智能化的数智花果园的建设总体目标，政府委托软通智慧科技有限公司打造智慧社区。

本项目围绕总体目标，以数字孪生框架体系为总体指导建设思路，从社区真实诉求出发，利用数字孪生关键技术建设了一体化高质量的社区运营、社区管理和社区服务。



图 81 数智花果园项目

(2) 系统框架

物理区域：花果园十平方公里社区地形环境、建筑及部件设施、车辆、人员、设备等。

数据采集和设备控制域：物联网数据、城市地理信息、实景三维数据进行统一接入、设备管理和反向操控。

数字领域：融合政府业务数据、感知数据、互联网数据、企业数据、空间地理数据、建筑数据、业务数据、传感器数据、互联网数据等多元数据，打造城市数据中台，统一数据标准和口径，解决数据孤岛问题

用户域：以花果园社区城市大脑为核心，深度挖掘社区大数据价值，面向社区管理部门、企业和居民，提供公安、环境、物业、消防、城管、

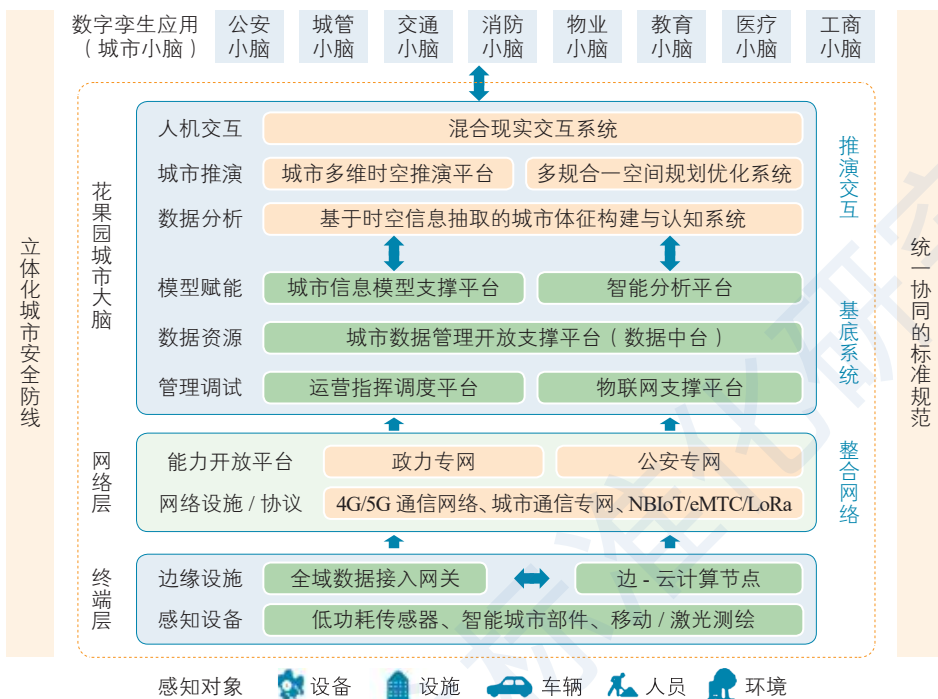


图 82 数智花果园系统框架

工商、医疗八大类高效、精细化社区治理和服务。

物理区域和数据采集设备控制域的关联关系：对各类感知设备、地理数据、社区运行数据进行采集、解析、清洗、预处理，并通过调用开放 API 接口，为设备管理、上层应用开发提供高质量数据支撑服务，包括数据协议管理、数据分析、数据统计、数据调用等。

数据采集设备控制域和数字领域的关联关系：数据中台汇聚融合全域全量政务、社会、城市信息模型数据，提供各层次数据服务，包括：基础数据、空间分析数据、业务数据、专题数据服务。

数字领域和用户域的关系：利用城市信息模型和叠加在模型上的多元数据集合，打造精准、动态、可视化的花果园数字孪生城市大脑；汇聚人工智能、大数据、AR/VR 等新技术基础服务能力，以及数字孪生城

市特有的场景服务、数据服务、仿真服务等，为上层应用提供技术赋能与统一开发服务支撑。

(3) 案例特点

本项目围绕社区网格化精细化的治理为总体建设目标，软通引入了基于时空大数据数字孪生 3P 理论（现状 present，预测 predict，干预 preact），通过数字孪生基底能力打造数据、要素现状（场景全要素融合），通过城市仿真模型库、自主学习模型（智能研判）、城市态势感知构建面向特定场景城市预测推演，形成辅助决策支撑应用示范建设。

依托国家标准数字孪生标示标准，融合社区多业务，多主题数据，形成了统一管理，目前打通了公安、企业、人口、法人，形成了统一的数据资源共享。

在社区设立仿真决策中心，联合高校攻关了城市仿真算法模型，国内领先做到了把仿真模型应用到了城市治理应用。

(4) 实施步骤

需求分析：分析社区现有的数据和感知设备，深入挖掘实现智能社区的具体需求。

架构设计：根据需求分析，依据数字孪生架构，设计出数智花果园数字孪生的架构，包括终端层，网络层，城市大脑，和城市小脑等。

功能设计：构建了人口、法人、经济、时空几大主题库，形成了以网格化为单元花果园智能数据资产，实现了社区消防、人口、交通预防预演形成科学报告辅助社区找人、打传、电梯等主要事件上报、受理、核查，调度整个流程提供辅助科学决策。

实施：编码和实现。

运营维护：依托数字孪生操作系统和仿真中心、仿真推演。针对场景痛点，建设垂直创新应用。

(5) 涉及的关键技术

物联网：用来采集传感器，摄像头等感知设备的数据。

地理信息：描绘花果园十平方公里社区的城市地理信息。

三维建模：对城市建筑及部件设施、车辆、人员、设备等进行三维建模。

三维可视化渲染：渲染三维地图，城市建筑及设施，车辆，人员，设备等。

多元数据融合：物联网数据，城市地理信息，实景三维数据，企业和居民，物业，消防，城管，工商，医疗等多元数据进行融合。

人工智能：通过对摄像头人脸进行智能分析，实现社区流动人口疑似排查，打击传销。

模拟仿真：仿真模拟，消防，人口流动等。

(6) 案例成效和意义

花果园社区居民足不出户，可以通过 APP 预约各种服务，生活中可实时享受隐形的保护，同时财产安全、健康状况等一切信息都能得到保障，出现任何问题均会在第一时间得到帮助。花果园社区将打造全方位的服务，使老百姓时刻都享受着政府关怀，真正实现数化万物，智在融合，惠及民生的理念。

(三) 智慧交通领域

案例一：地铁设备数字孪生模型的应用

(1) 案例背景及基本情况

机场站是深圳地铁 11 号线的一座车站，位于机场航站楼及交通中心，北侧为深圳宝安国际机场，在 T3 航站楼地下。航站楼南侧为机场交通中心。车站是供旅客乘降，换乘和候车的场所，应保证旅客方便、安全、迅速地

进出车站，并有良好的通风、照明、卫生、防火设备等，给旅客提供舒适、清洁的环境。尤其是机场站，车站应容纳主要的技术设备和运营管理系统，从而保证城市轨道交通的安全运行。

目前地铁车站采用监视控制与数据采集系统来实现地铁车站监控运维管理，但存在以下三方面缺陷。

信息可视化方面：传统监控运维系统中，不同设施、不同地点的信息和状态通常使用二维图纸进行信息展示，难以与实际物理模型相对应。因此，在这种系统中，数据呈现和故障反馈都不够直观，难以直观反映出建筑或设施的实际运行状态。缺少直观准确表达系统信息与让管理者理解的展示能力，效果必然大打折扣。

信息共享化方面：传统监控运维系统中，不同领域、不同来源的信息往往是异构的，如传感器数据、视频监控数据、设备运行状态等，通常是分别显示和存储，信息之间缺乏与实际模型的紧密联系，这样的信息管理模式会对维护工作造成诸多不便。

数据分析方面：对于大多数建筑和设施，监控运维数据的积累具有很大价值。而在传统的监控运维系统中，由于对信息的整合程度不够，数据间的内在联系难以被深入挖掘，从而降低了运维效率。

为了克服上述现有技术存在的缺陷，本项目在原有系统基础上引入数字孪生技术。数字孪生技术将物理资产和数字资产进行同步，利用数字手段将数字孪生资产中的所有数据元素连接到各个阶段以及各个流程中，并通过不同的输出方式进行运用。而运营维护和管理是地铁项目的重要环节，各个阶段也要针对各自的需求来合理运用数字技术，并能够将数据进行流通，来满足最终的运维需求。数字资产中，作为所有数字信息的载体，最根本的条件就是要有一个能够和物理资产相对应的数字模型。

(2) 系统框架

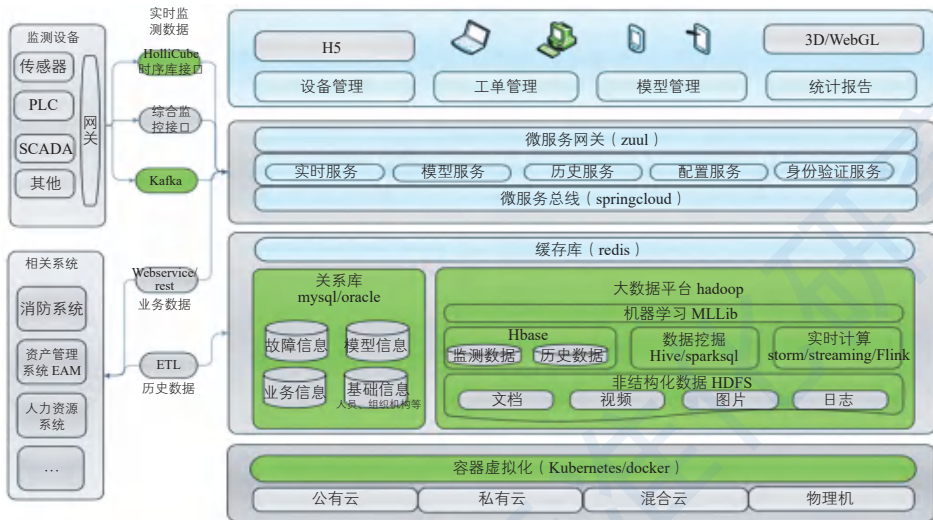


图 83 智慧地铁运营管理平台

基于智慧地铁运营管理平台,采用层次化建模方式建立地铁车站信号、机电、供电等多个系统的数字资产模型。为了降低工程实施阶段应用建模的难度,和利时提供了专业基础设备类库、类编辑器和模型实例编辑器,支持车站和设备专业双维度层次化数字孪生模型的创建。

(3) 案例特点

本项目中,采用了建筑信息与设备信息结合的数字模型,建筑信息模型中同时包含设备信息,并借助无线传感以及通讯技术实现物理设备与数字模型的实时交互,形成三维和二维可视化人机界面,从而提供全面的地铁运行状况,并可结合机器学习、大数据等新一代信息技术实时分析运行数据,实现地铁车站的高效安全运营。

随着 BIM (Building Information Modeling, 建筑信息建模) 技术在建筑的设计、施工阶段的应用愈加普及,借助 BIM 模型能够覆盖系统运维的全生命周期。因此在建筑竣工以后通过继承设计、施工阶段所生成的

BIM 竣工模型，可将各种零碎、分散、割裂的信息数据，以及运维阶段所需的各种机电设备参数进行一体化整合。同时，能够进一步引入日常设备运维管理功能，完成空间与设备运维管理。

项目不仅完成了数字模型生成，更是将其与运维阶段业务流程结合，设计了借助数字模型的业务流程管理体系，例如：智慧巡检、智慧维修、智慧施工等功能。优先实现以资产运维、智慧车站和智慧节能为主的智慧地铁功能，智慧地铁应用开发生态基本成型。运维人员利用手持终端进行现场作业，实现对检修作业现场的全过程管理，从人员、时间、位置、设备、工器具、物资等多维度实现检修作业管理的标准化、精细化、智能化管理。

(4) 实施步骤

以智慧地铁车站运营系统具体实施步骤如下：

构建地铁设备基础模型库：基于设备机理抽取共性属性和行为建立地铁信号、机电、供电设备的基础模型库。

建立地铁车站资产模型：基于地铁设备基础模型库，以层次化的模式创建设备模型实例，配置变量地址、通讯链路和物理 IO 通道，实现数字模型实例与特定的物理设备的双向连接。

创建设备模型实例与 BIM 模型的链接：实现智慧车站运营管理系统与地铁线路数字资产管理系统的关联。

(5) 涉及的关键技术

车站级轻量化 BIM 模型

BIM 是一种设计和交付项目的方法，可以使项目所涉及的不同方面之间更好地协作。虽然 BIM 涉及使用高级 3D 建模软件来创建结构的虚拟模型，BIM 是有关设施信息的共享资源。BIM 不只是设施的三维计算机渲染模型，它包含建筑数据，而对于维护和工程部门包含有关设施组件的全面信息，包括产品制造商和型号信息。BIM 旨在成为一个不断增长的

数据集，它将在构建环境的整个生命周期中带来收益。当 BIM 创建资产的虚拟模型以帮助其设计、构造和操作时，它包含了数字孪生所需要的许多信息，从而使其成为数字孪生的理想基础。通过合并实时数据（即来自传感器的数据），可以基于当前运行状况（例如电流，温度和其他环境因素）进行实时分析。这不仅可以帮助预测维护问题，还可以将实际条件的比较与分析值或设计值进行比较。有了准确的数据，就可以评估和满足运维的要求。本项目中使用了设计、施工过程中使用的 BIM 模型作为基础，进行轻量化后完成了信息实时更新等功能。

为了使数字孪生技术与实际业务对接更紧密，本项目也使用了大数据处理相关技术。数据挖掘是在大型数据集中发现模式的过程，其中涉及机器学习，统计数据和数据库系统交叉处的方法。数据挖掘是计算机科学和统计学的一个交叉学科领域，其总体目标是使用智能方法从数据集中提取信息并将信息转换为可理解的结构以供进一步使用。本项目中主要用于设备故障预测、识别等功能的实现，通过大数据分析平台与故障预测分析系统，将动态设备模型计算生成的实时预估值和设备测点的实测值进行比较，并根据比较结果发布设备早期故障状态预警。反馈的结果将在数字孪生模型上直观展现，模型以及软件平台其他功能辅助运维人员模块完成巡检与维修任务。

(6) 案例成效和意义

本项目基于统一的元数据、设备模型和 BIM 模型建立地铁车站设备资产数字孪生模型。基于数字孪生模型实现车站机电和供电设备综合状态分析、设备故障统计分析、设备更换统计分析、缺陷分析、维修计划分析、测量数据趋势分析等业务应用，满足智慧车站管理需求。同时，通过设备模型与 BIM 模型的连接实现了车站设备设施和检修工作过程和状态可视化。

案例二:数字孪生驱动的列车运行优化

(1) 案例背景及基本情况

列车运行系统是涵盖机械、电气、软件一体化、多系统紧密耦合的复杂系统，其核心系统具有多层次多回路闭环控制结构，涉及复杂能量和信息变换与传递。根据相关领域的要求、特点及发展趋势，期待基于数字孪生实现列车运行保障及优化，主要包括：提供基于多属性数据映射的精细化高拟实的多维度多环境建模，推动多领域协同优化以及建模仿真与真实环境的融合交互，实现复杂装备在复杂运行系统和运行环境下的性能分析和行为预测；结合实时监测数据构建“车-地-网”虚拟运行系统，更精准的预测列车在复杂多样化环境下的运行趋势，优化控制策略；从传统的故障修、计划修转向基于数字孪生的状态修、预测修，实现设备实时监控、事故主动预防、故障快速诊断及维护策略优化，满足30年长寿期的高安全高可靠运行；等等。

(2) 系统框架

基于数字孪生技术构建的列车运行系统框架如图 X-1 所示，图中左上部分为包含供电、线路、信号、车辆控制系统及列车在内的“车-地-网”虚拟运行系统，左下部分为所对应的物理运行系统，右侧为基于数字孪生的运行服务。由于“车-地-网”运行系统复杂、随机，涉及专业众多，建立全面的数字孪生模型尤为复杂。各系统需要包含几何模型、物理模型、行为模型及规则模型等多种模型，以便能够从不同时间尺度、空间尺度以及历史履历信息中获得虚拟实体的详细描述，为其运行控制提供足够多的仿真数据支撑。当考虑“车-地-网”运行环境对某一系统的影响时，其它系统建立行为级模型，呈现出各系统之间的相互耦合关系，为被分析的系统的虚拟实体提供高逼真度的虚拟运行环境。其孪生数据平台综合设计、制造和运维所产生的孪生数据，实时采集虚拟运行系统

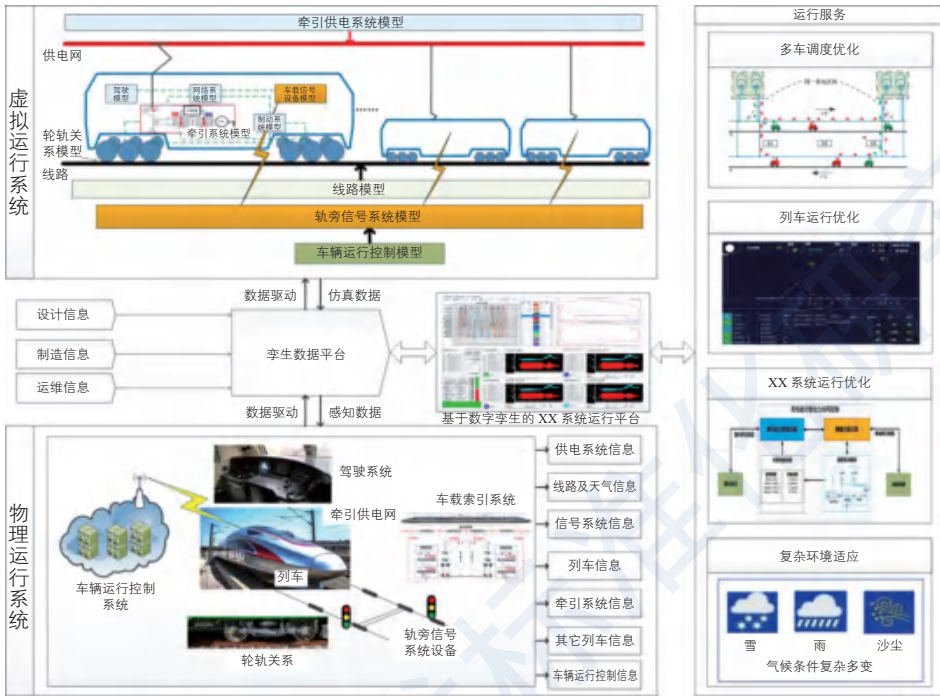


图 84 数字孪生驱动的车辆运行系统框架

产生的仿真数据和物理运行系统产生的物理数据，对数据融合处理，形成基于数字孪生的运行控制平台。

(3) 案例特点

该平台可实时处理“车-地-网”运行系统物理实体反馈的运行需求、运行状态等信息，并结合历史履历信息，与“车-地-网”运行系统虚拟实体仿真运行数据比对，分层分级决策形成最优运行策略。基于“车-地-网”运行系统虚拟实体与“车-地-网”运行系统物理实体的数据交互融合，可实现更大系统层面的优化运行，支撑多车调度优化、列车单车运行优化，以及各子系统运行优化和环境适应服务。

(4) 实施步骤

列车牵引系统运行环境复杂多变，其运行优化问题实质是在线寻求

列车运行变量在供电、线路、运营条件时变情况下的实时优化控制值。当以列车牵引能耗最小为优化目标时，针对给定的运行里程与运行时间，考虑运行速度、加速度及冲击率的约束和列车载荷、供电及粘着条件变化对牵引力发挥的限制，并结合牵引传动效率及实际坡度、弯道、隧道等线路条件，寻求一组与列车位置和时间有关的牵引力输出序列使得整个运行过程牵引能耗最小。通过对系统进行离散描述，将其转化为混合整数线性规划模型简化求解、基于混合整数线性规划模型求解的节能运行优化问题。

列车优化运行时，基于数字孪生的运行控制平台实时采集“车-地-网”运行系统物理实体反馈的运营要求、供电、线路、环境条件以及列车和各系统状态，并结合孪生数据平台存储的各系统历史信息，在“车-地-网”运行系统虚拟实体中求解得到一组节能运行控制序列送回“车-地-网”运行系统物理实体控制列车节能运行。

(5) 涉及的关键技术

目前主要涉及：MBE、建模，仿真，系统工程，工业互联网，5G，云计算，智能传感/检测，工业物联网，边缘计算，工业人工智能，机器学习，虚拟现实，大数据，数据标识解析，数据加密，知识工程，等。

未来预期还将涉及：区块链，增强现实/混合现实等。

案例三：数字孪生技术在自动驾驶测试中的应用

(1) 案例背景及基本情况

自动驾驶汽车可采集海量的道路感知数据，并以此为基础对算法进行有效训练。为了尽量多的采集数据，汽车制造商往往通过几十台，甚至数百台路测车辆来解决实际场景数据收集问题。尽管自动驾驶虚拟测试里程的长短可以作为一项简单易懂的测评指标，但是脱离了具体交通场景，里程本身不足以成为一项有效的衡量指标。典型场景与危险场景往往不会随着测试里程增多而持续增加，很快会显示出长尾效应，路试后期很难短

时间收集到更有价值的场景了。另一个事实是各国的交通环境显然有着巨大的差异，即使各地区的道路环境与交通习惯也存在较大差异性和多样性。车辆只有在真实的运行环境中才能积累足够丰富而多样的场景挑战，才能使训练与测试具备真正的价值，使得算法可以更好地适应本地独有的交通环境和驾驶规则。如何从广泛的公开道路车辆运行中不断提取出复杂多样的交通场景复现至测试流程中，成为测试评价系统面临的实际问题。行业需要形成一种具有高度开放与灵活的测试验证环境，支持各类自动驾驶算法验证测试，为自动驾驶相关研究机构、企业提供开放测试服务。

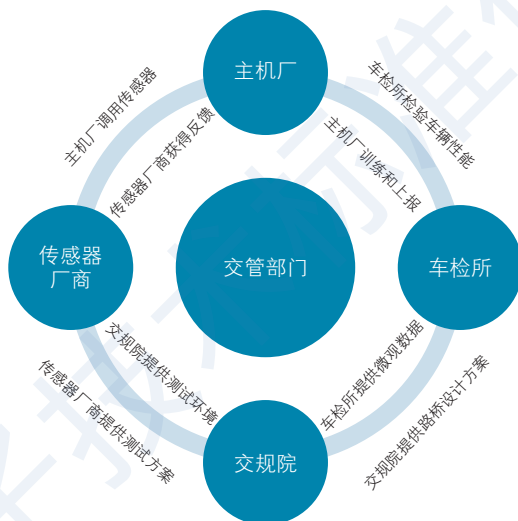


图 85 自动驾驶测试模式图

该项目里，交管部门、主机厂、车检所、交规院多头终端用户，传感器厂商为能力提供者之一。交管部门制定城市交通管理目标，由交规院实现整体方案的设计和道路侧的测试，车检所承担车辆侧测试。车检所会检验主机厂车辆的无人驾驶和 V2X 之间的互动水平，给以反馈。主机厂车辆在车检所和交规院提供的场景上训练，确保前置条件和口径统一。主机厂调用传感器模拟数据并反馈，厂商优化产品。

(2) 系统框架

针对自动驾驶测试的行业应用特点，数字孪生系统总体框架图如下。

数字孪生系统分为物理实体域、感知与控制域、数字孪生域与用户域四层。第一，物理实体域具体包含以下几个方面：自动驾驶测试车辆主体，车载传感器与控制器，决策控制算法等；参与测试场景组成的遥控测试目标车辆、道路使用者模型与障碍物、交通信号灯等；封闭测试场道路结构、道路标志标识、道路周边绿植与建筑环境、测试场地的天气条件等。第二，感知与控制域主要包含车辆测试用各类传感器与车载数据记录仪等，车载仿真计算机，基于 C-V2X 的无线通讯设备，路侧边缘感知与计算单元（RSU），交通信号控制器，遥控测试目标单元控制系统（驾驶机器人或牵引底盘系统）等。第三，数字孪生域主要包含具备仿真物理模型，能连接实体测试数据的虚拟仿真数字孪生，测试评价管控系统，车侧与路侧物联网设备的数据交换接口，测试场景库与数据库等。第四，用户域指测试专家，仿真计算集群与驾驶模拟器等设备。

以上各域之间存在相互关联关系。感知与控制域通过各类型传感器对物理实体域进行数据采集与行为监控，物理实体域通过感知与控制域中控制系统对物理实体执行控制；感知与控制域使数字孪生域体可以精确地复制来自真实实验环境与状态下的虚拟映射，数字孪生通过虚拟信号注入方式给感知与控制域提供实验数据并指令传输等；用户域可以通过仿真计算集群为数字孪生域提供复杂的虚拟场景信息，数字孪生域为用户域提供真实测试评价的管控平台。

自动驾驶汽车数字孪生测试系统要求对整车测试数据的场景虚拟重构，并在虚拟场景中通过物理仿真工具对测试对象与流程进行全过程复现，对测试结果进行分析与评估；同时，在实车测试场景中对测试实体进行全过程信号虚拟注入，以整车在环方式将车辆实时状态数据实时反馈到

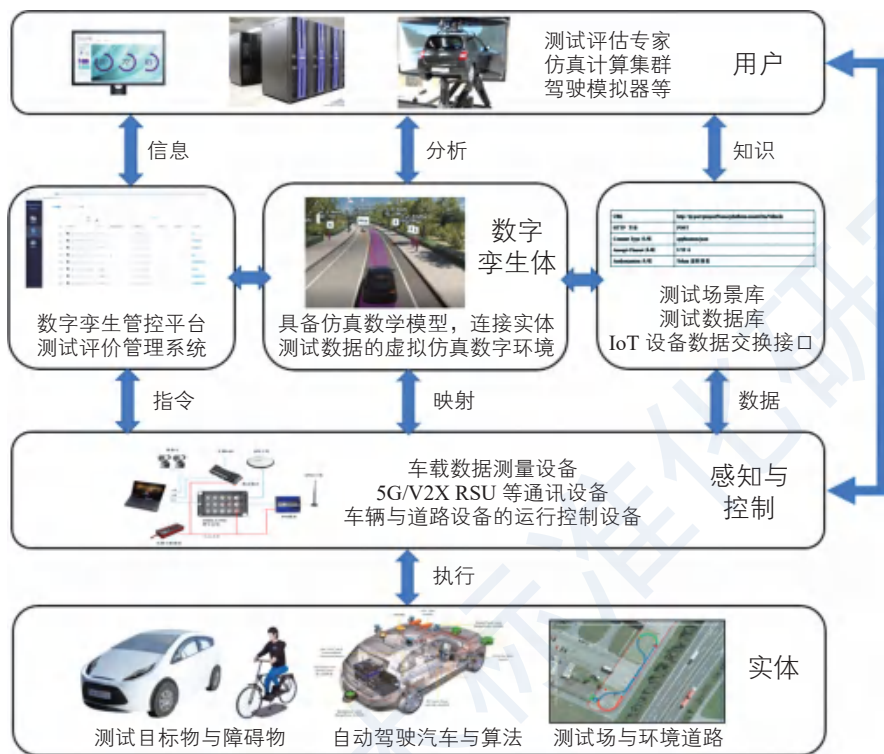


图 86 数字孪生系统总体框架图

虚拟场景控制器中，从而实现自动驾驶车辆在真实道路上对不同的虚拟场景的测试验证。

自动驾驶汽车数字孪生测试技术按通信方式的不同可以分为两种不同的类型：移动式数字孪生测试技术以及集中式数字孪生测试技术。移动式数字孪生测试技术，仿真模拟系统是搭载在被测的自动驾驶车辆上，随着测试场景的执行，仿真模拟系统随着车辆在空间中移动。移动式数字孪生测试技术在实际测试过程中，仿真系统与被测对象之间通过有线网络互联，彼此交互大量信息。集中式数字孪生测试技术，仿真模拟系统集中部署在边缘计算服务集群内，通过 C-V2X 无线通信方式与被测对象进行信息交互，交互信息的容量受限于所采用的无线通信模式。

基于整车的数字孪生测试系统充分结合了 XiL 在环仿真测试与实车测试的优势，通过仿真软件生成虚拟测试场景，将虚拟传感器探测到的场景信息注入给算法控制器中，进而控制实际车辆的运动状态。以移动式数字孪生测试为例，将 ADAS/AD 算法控制器至于真实车辆中，同时通过实时仿真机及仿真软件模拟道路、交通场景和传感器信号，并将真实车辆置于其中，从而构成完整测试环境的方法。可实现 ADAS/AD 算法功能验证、各场景仿真测试、与整车相关统的集成测试。

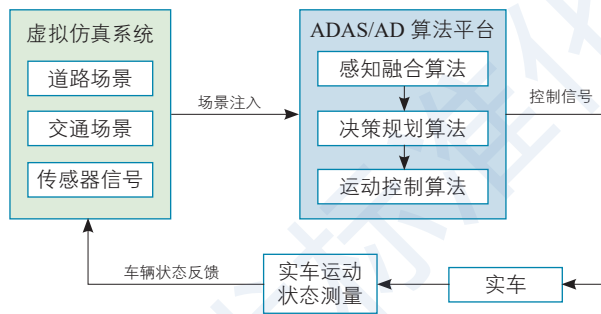


图 87 数字孪生测试原理图

(3) 案例特点

测试场景广，速度快且成本低

数字孪生技术赋予了自动驾驶测试评价方法更丰富而全面的测试场景来源，更大程度的覆盖了自动驾驶功能安全等多重测试场景范围。通过智慧交通与车路协同的逐步部署，来源于车辆使用全生命周期内的场景可以被提取与应用于测试，例如车辆（ICV）运行数据库，车联网（V2X）运行数据库，智慧交通（ITS）数据库。这些基于历史运行数据产生的场景，还被二次加工提炼，为边缘工况案例库、人机交互评价案例库等典型测试场景提供大数据基础。

数字孪生技术提升了试验场的整体测试效率，减少了不同测试场景切换的准备周期。通过 5G 通讯技术建立的更加快速的数据连接通道，被

测试车辆与复杂测试环境之间的数据形成闭环反馈链条并可以完成即时交换。例如 V2X 虚拟信号注入的方式可以让被测试车辆在一次测试中连续进行多项整车在环测试，而不必每次单一工况测试完毕后，再回到起始位置重新准备新的测试项目。同时车辆运行与测试结果通过网络可同步上传至测试管理评价系统，执行自动化批量化的数据分析与性能评价。

数字孪生技术降低了试验场的整体测试成本，节省了部分价格昂贵且操作复杂的目标车控制系统与测试背景车的购置数量。虚拟信号注入整车的测试方式，对创建复杂交通环境的工况有很大成本优势。通过数字孪生仿真计算，在虚拟环境中创建更多的混合交通流、复杂气候条件等，解决了测试场无法组织大规模复杂交通流的工况测试问题，同时减少了危险事件发生的概率。另一方面，数字孪生测试可以方便地重复同样的测试条件，保证多次试验一致性的成本显著降低。

实现虚实映射，分层测试评价

数字孪生面对被测试车辆、测试场地环境与测试场景进行了全面的数字化映射，测试全过程的动态实时数据在实体与仿真模型之间形成双向流动与信息的闭环反馈。被测试整车系统中各类传感器向数字孪生系统不断实时更新数据，孪生系统通过多层数学仿真模型计算输出虚拟环境与其他车辆的交互变化，被测试整车根据仿真模型信号注入给车载计算平台并执行下一步的行动，最终完成测试与评估工作。

数字孪生的信号数据在车辆系统的多个层级中同步交换，混合了真实数据与仿真计算数据。感知，决策与规划，控制模块既可以独立进行数字孪生测试，也可以在系统级和整车级做集成式测试。整车在环测试中可以采集获取真实的车辆输出了动力学响应数据，包含真实的感知硬件，车辆总线与车载计算平台，最终提供决策规划控制的实时结果。硬件在环测试中可以复用这些真实的数据，修正动力学仿真简化模型，加入总线控

制器对信号时序的影响因素，可在实验室内对算法或硬件进行测试评价；在硬件在环测试中可以得到真实数据结果，并与场外验证进行交叉验证。软件在环测试中进一步利用真实数据及修正的仿真简化模型，建立精度可控的降阶模型，可对各个独立的算法进行回归测试。不同分层的数字孪生测试下，多物理仿真模型的融合帮助数字孪生系统搭建得更复杂更准确。

(4) 实施步骤

基于虚拟仿真与真实环境相结合的数字孪生自动驾驶测试系统，集成仿真测试工具、C-V2X 通信设备、真实测试车辆等功能单元，实现在有限资源条件下开展虚拟复杂场景的自动驾驶实车测试验证。该系统实施分为如下步骤：建立数字孪生子系统、建立测试评价管理子系统、建立测试场景数据库子系统、建立 V2X 通讯子系统，建立场地测试感知与控制子系统。

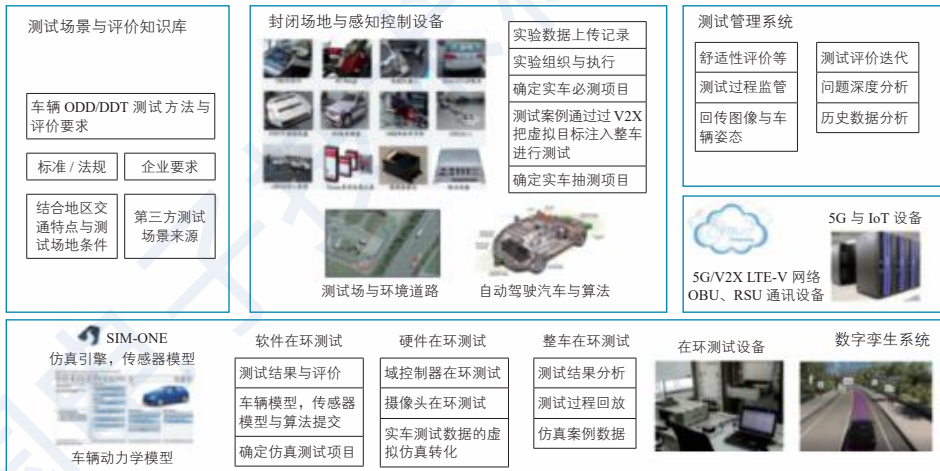


图 88 数字孪生自动驾驶测试系统的主要组成部分

数字孪生子系统

a) 搭建虚拟仿真平台

数字孪生系统的核心之一是建立实体的数字化映射。这首先需要选

择适合的工程虚拟仿真软件作为基础平台。它包含车辆动力学、传感器等物理模型、道路与场景环境的三维建模，交通流与智能交通体的数学模型，集成软件算法接入，多系统的耦合，并对模型进行计算与结果分析。典型的自动驾驶仿真平台系统组成如下图。



图 89 自动驾驶虚拟仿真平台

通过仿真平台，1:1 还原测试场的虚拟数字道路，并配置与被测试车辆一致的力学参数，各类型的传感器配置与部件参数，接入感知规划决策算法等，1:1 还原自动驾驶车辆模型。由于真实测试系统内包含有大量复杂子系统，在数字孪生 1:1 建模过程中需要选取适合的物理模型并进行合理简化。道路与车辆模型的精度与数据格式方面，需要与真实测试要求相匹配。这样可以保证车侧与路侧传感器收集的数据可以准确映射进入仿真模型系统中，形成数字孪生系统。根据数字孪生测试技术不同的通信方式，数字孪生系统可以选用车载工控机固定在被测试车辆上，也可以选用边缘计算服务集群部署在外场通过 C-V2X 通信。统一的高精度地图、定位与系统授时是数字孪生系统的运行基础。

b) 数字孪生测试场景库建设

对于实际测试场，通过测绘重建的方式，根据点云或地图影像等真实数据还原兼具地理精度和真实感的数字孪生环境。在该环境中可以自由地配置全局交通流、独立的交通智能体、对手车辆、行人等元素来构建动态场景，结合光照、天气等环境的模拟来呈现丰富多变虚拟环境。

数字孪生测试场景库是由满足某种测试需求的一系列自动驾驶测试场景构成的数据库。单个测试场景包括静态场景与动态场景。静态场景通常包括道路设施，交通附属设施，周边环境等；动态场景通常包括交通管理控制，机动车，行人与非机动车等。根据测试需求，选择的测试场景应能在统计学上覆盖现实交通中部分典型现象，从而在某种程度上替代对应的道路测试场景。场景库中的场景应分类明确，支持快速检索与调用。构建场景库需选取对自动驾驶具有挑战性且在现实中有一定概率出现的场景。由于场景的统计学意义难以精确估算，往往很难有力说明场景库与实际路测里程的确切关系。

数字孪生测试评价管理子系统

搭建数字孪生测试评价管理平台系统，集成了数字孪生虚拟场景、高精度地图、实验管理系统、数据记录与展示系统，实际测试监控系统等。整个系统搭建分为三个层次：用户交互，数据管理层和数据存储层。用户能够通过平台对测试任务进行流程化的管理，覆盖测试的创建、运行、完成、生成测试报告整个生命周期。用户能够在展厅与监控中心等环境下实时监测实验过程，车辆实时数据等信息。系统同步存储数字孪生的仿真与真实测试数据，包含主车行驶轨迹、主车所有感知数据与决策规划控制数据、虚拟仿真对手车行驶轨迹、仿真触发事件、测试场监控视频数据、结构化测试数据等。

评价是测试流程中的最后阶段。设计该评价模块，要求导入外部实

际测试数据，同时可以导入虚拟仿真测试数据。通过对比数字孪生系统测试与真实物理测试的结果差异，实现自动驾驶车辆算法与功能的自动化评测。系统还需要对以上自动化测试数据与评价指标进行积累与二次聚合，最终形成动态更新的自动驾驶测试评价数据库。

(5) 案例成效和意义

积累关键技术研发的无形资产

测试评价是自动驾驶汽车基础支撑技术之一。其中自动驾驶系统计算机仿真是自动驾驶车辆测试和试验的基础关键技术，也是未来行业定义自动驾驶车辆相关开发流程与技术准入标准的基础工具。仿真测试与真实物理测试构成相互结合的有机整体，两者缺一不可。数字孪生给自动驾驶测试评价提供了新方法。

数字孪生贯穿产品的研发与使用生命全周期，从产品概念选型到产品运行数据收集与系统升级。数字孪生测试评价所产生的产品数据库，测试数据库，测试场景库，评价指标库，评价报告库等，均积累并迭代成为技术开发人员的知识体系。数字孪生不但帮助实现产品的安全性与稳定性，而且帮助累积企业的设计流程、工程经验与数字模型等宝贵的无形资产。

保证车辆的安全上路

数字孪生测试评价技术可以帮助认证机构完善对汽车智能化软件产品的认证流程与监督方法，尤其是从测试技术上，弥补目前偏重实车路试的不足。通过完善虚拟仿真的海量自动化测试流程，结合有限标准实车测试。不但可以增加测试工况范围和复杂程度，更可以对其零部件、子系统与整车集成进行不同层级的全链条测试。通过数字孪生虚拟测试环境下及早发现实车测试不易甄别的软件故障，作为实车测试的前提条件，从而提高自动驾驶封闭测试区和示范区测试的安全性，节省测试的时间与成本。

数字孪生通过大数据与云计算平台，记录车辆运行真实数据和软件

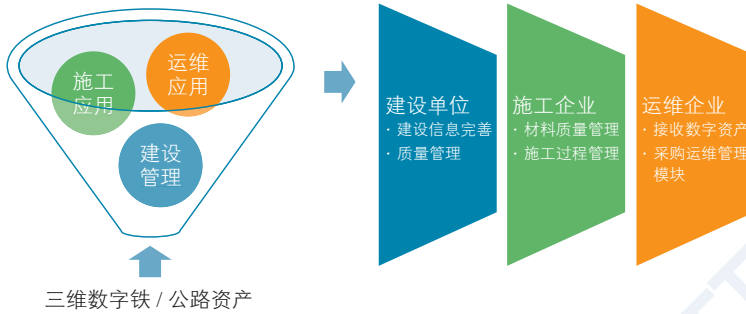
算法的决策过程，自动驾驶车辆运行全生命周期中的实时数据。当车辆获得认证许可后，数字孪生平台用来存储车辆实时行驶数据，收集并分析车辆遇到的危险工况并作为检测车辆感知决策执行系统的依据。一方面用于检验产品的故障原因，另一方面提供产品的优化数据，从而保证汽车产品质量的安全可靠与持续升级，最终形成更为科学有效的功能测试方法和产品性能评价指标。

案例四：三维铁路数字产品

(1) 案例背景及基本情况

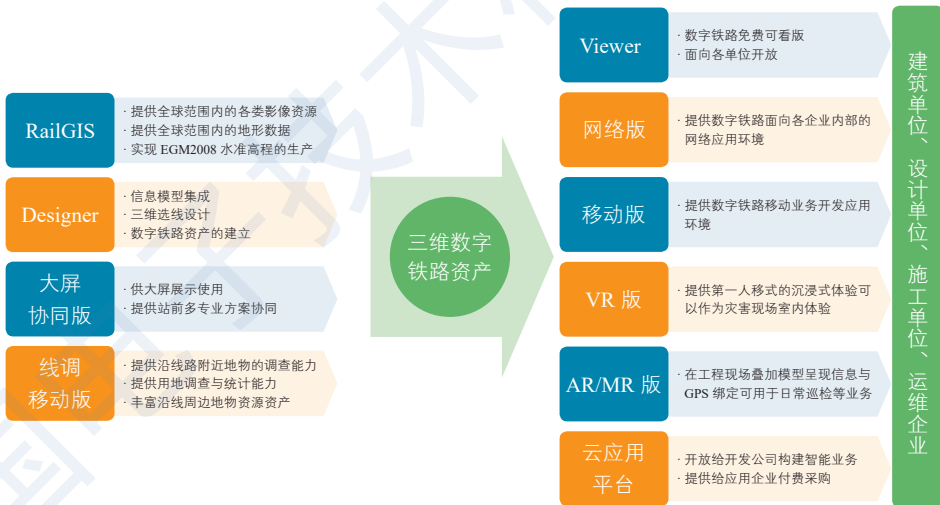
数字孪生模型是物理资产、流程或系统以及可供我们了解并对其性能进行建模的工程信息的数字化表示。数字孪生模型技术可以确保根据学习的经验提升设计，并将这些经验应用于未来的产品和系统中。数字孪生模型会跨越资产全生命周期，将它应用于铁路基础设施时，其意义和影响力将非常明显。

在新铁路的规划、设计和施工期间或进行重大升级时，工程数字孪生模型可以根据运营要求优化设计，并通过模拟来降低工期延误或施工不合规的风险。工程数字孪生模型还可以改善供应链内的物流和沟通，从而维持项目进度和预算。在运营期间，性能数字孪生模型将成为最有价值的工具。业主运营商可以将来自物联网（IoT）互联设备（如可以进行持续勘测以实时跟踪现实环境中的资产变化的无人机）的数据添加到数字化表示中，从而更深入地了解运营状况，这种深入了解有助于业主运营商确定维护或升级的优先级并对其进行相应改进。因此，如果成功实施数字孪生模型技术，铁路或交通运输系统可以实现其最大价值。通过使用数字孪生模型来规划、设计和建设网络，以及在运营期间利用数字孪生模型，铁路或交通运输业主运营商将能够提升性能和可靠性。



中铁四院基于数字孪生技术开发的三维数字铁路具备在全球三维地理空间下开展实时三维选线设计与生成全线普适性三维数字铁路资产的能力，提供了世界领先的资产构建手段。同时，支持基于桌面端、网页端、手机端、VR/AR 端实时查看三维地理环境的全线数字铁路资产。

(2) 系统框架



体系完整的三维数字铁路产品与丰富的三维地理环境的结合，以普适性的空间数据库进行组织，使得数字铁路工程具备广泛的应用活力，从

而为智能铁路的实施提供了数字载体。从设计源头利用三维线路设计系统开展地理设计构建的三维数字铁路产品，可接入各种监控监测系统，实现大场景下整条铁路生命体的全生命周期可视化管理与业务应用，更可以跨平台地将数字产品发布到网络端、移动端、AR/VR 端，形成更广泛的数字化、智能化业务集成应用格局，可以面向铁路全行业设计、建造、运维、管理的全生命周期提供业务智能定制服务。

(3) 案例特点

基于数字孪生技术，构建普适性的铁路数字资产

铁路是桥梁、隧道、站场、路基等构件的有序拓扑，三维数字铁路产品基于数字孪生技术，实现 BIM、CAD、GIS 无缝融合，整合各类地理信息资源，通过对线性工程深入地自动化建模手段开发，将铁路工程上的万事万物都统一到数字地球空间上，构建铁路数字孪生，具有一致性、完整性、全生命周期和普适性等特点。

三维数字铁路是一种独立地、开放的数据资产

三维数字铁路是独立于任何表达及管理平台的、格式完全公开且满足国际 OGC（国际开放地理信息联盟）标准的 GIS 数据产品，可以定制配置到任何 GIS 评估上进行表达，与商业表达平台无关。数字铁路产品按照空间数据库的组织结构进行组织，不仅仅可以用于信息管理系统中的查询、分析决策等拓展开发，更能有效利用空间数据库的 GIS 兼容表达优势，实现空间定位、空间分析及各种二三维符号化配置表达。

(4) 实施步骤

构建实景三维自然地理环境：通过遥感影像、高程模型构建大范围实景三维自然地理环境，为铁路数字资产提供底图基础。

铁路三维选线设计系统：依据要求和标准进行三维铁路选线设计，并实现参数化自动建模，以及各类指标数据自动生成。

铁路数字孪生资产全生命管理系统：实现资产管理、信息查询、综合分析和辅助决策等功能。

多终端应用展示：桌面端、网页端、移动端、VR/AR/MR 等。

(5) 涉及的关键技术

针对复杂工程设施的三维参数化建模方法：通过语义建模实现工程设计信息在设施信息模型中的表达、存储、修改和应用，扩展了三维数据模型，同步记录工程设施的三维几何模型和相应的参数，并能联动更新，以实现模型的最优化。

多方协同设计方法：针对方案级多专业协同设计提供分布式设计手段与实时的联动表达机制，实现“像发射卫星一样”的多机交互设计能力。

三维实景自然地理环境构建技术：利用世界先进的小波运算技术以及独有的优化处理技术，将 DOM 数据和 DEM 数据优化并融合，对不同分辨率数据源无缝衔接，构成独立的带有真实坐标的三维地形场景。

XR 技术：通过计算机技术和可穿戴设备产生的一个真实与虚拟组合、可人机交互的环境，实现虚拟世界与现实世界之间无缝转换的“沉浸感”体验。

(6) 案例成效和意义

提供“宏 - 微”观一体的三维实体选线设计能力，充分发挥 GIS 的空间分析优势提供了包括自动拉坡设计、自动桥隧插旗与命名、面相关 BIM 的构件自动改三维建模与精细化工程数量统计功能，可应用于铁路、地铁、公路、电力、管线及河道的线路三维直观可视设计，构建的三维数字线路模型资产成果可用于网络发布、移动应用、AR/VR 端应用及全生命周期业务开发，已在湖苏沪、福厦高铁、汉十客专等 20 余个铁路项目中得以应用，经专家组奠定达到国际领先水平，先后取得中国铁建、国家铁路局、中勘协优秀工程软件一等奖。

不用于以往作业人员埋头苦画的场景，用户只需通过鼠标在数字孪生场景中一点，即可以开始线路初步走向设计：首先得到一条没有坡度的线路，然后系统会自动拉坡设计，形成一组默认变坡点，直接生成线路轨面模型。自动拉坡后还会同时自动生成拉坡方案的各项数据评估报告。通过“由粗入精”的选线模式，方便地实现从宏观到微观的逐步细化选线。同时还利用 VR/AR 设备，进行交互设计、巡查现场叠加线路模型等直观验证、审查及分析。目前已广泛应用在工程设计中，根据统计结果分析，平均每月纵断面采集量 40000km 以上，地图采集量在 2000km² 以上，节省了大量人力、物力，综合效果较好。方便、快捷的三维可视化漫游与分析，在多个项目的论证决策过程中起到了具体直观的展示与分析作用。

案例五：智慧交通仿真推演平台

(1) 案例背景及基本情况

随着私家车数量的与日俱增，直接造成了城市道路的大量拥堵，交通拥堵的地方发生事故的频率也相对较高，严重影响了人民的生命财产安全。显然，城市交通严重拥堵的问题是与智慧城市的理念相悖的，可以说，如果城市交通严重拥堵的问题不改善，那么智慧城市的理念也很难得到实现。而造成这些现象的原因除了汽车数量过多以外，部分建路不合理，高峰期缺乏对车辆的宏观调控也造成了交通拥堵的主要原因。

如何找到城市交通拥堵问题的解决方案，在现实世界中修改道路或者做实地测试非常困难。而在数字孪生技术塑造的场景中可以做成百上千种测试。让每一辆车、每一条路，甚至很多车道线设计、转向设计在模拟器内测试，跑出最优解，然后再回到现实世界里去实施。



图 92 智慧交通仿真推演平台

智慧交通仿真推演平台是基于数字孪生基底，把 CIM 支撑平台提供的交通领域的信息数据，在推演平台试验，修改信号灯、路测设备等其他关联信息参数，推演交通运行情况，决策方案反馈到现实，指导交通运行；借助 vissim 平台构筑交通仿真场景，提供实时轨迹；实时响应通讯仿真的反馈；借助 NS2 平台无线节点跟踪 OBU 车辆运动，执行策略员发布的通讯仿真任务。并可利用仿真结果进行动态交通流控制方案对比，利用仿真结果和执行方案进行道路信号控制、智能诱导、线路规划，卡口控制分流，后期道路流量预测等进行拥堵管控服务和管理。

(2) 系统框架

终端设备层：负责底层数据的手机，包括车载 GPS 终端，ETC 收费终端，测速雷达，监控摄像头，环境监测设备，停车场监测终端等，为系统提供数据源。

网络层：5G 基站，wifi 信号，蓝牙等，为系统各部分传输数据。

数据层：包括地理信息数据，道路数据，信号灯数据，车辆数据，人流数据，监控数据，环境数据，ETC 收费数据等。

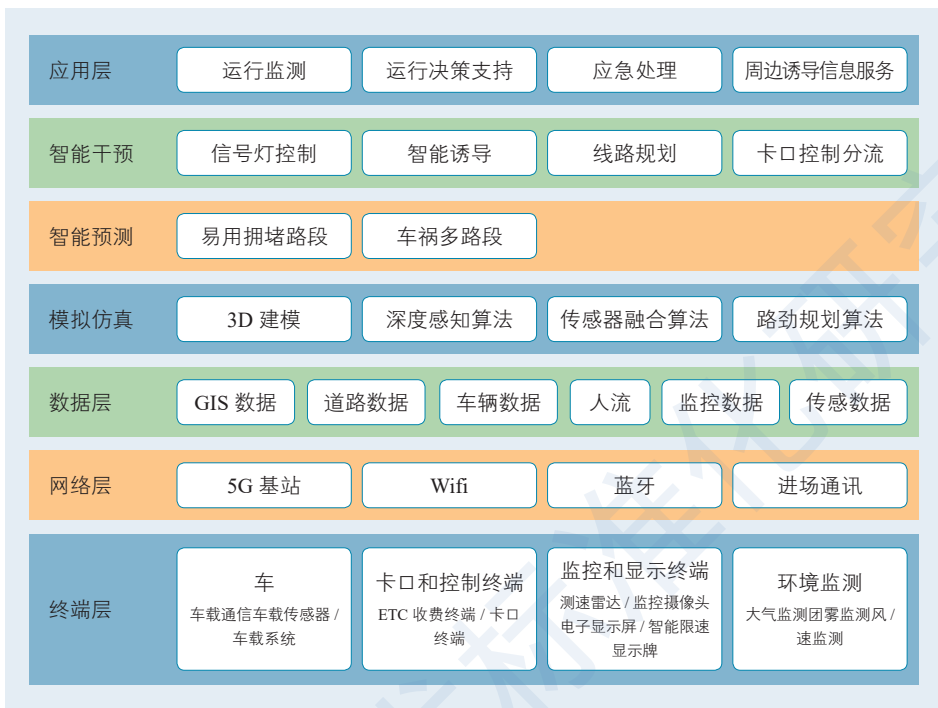


图 93 智慧交通仿真推演平台框架

模拟仿真：对道路，车辆，人流，信号灯，传感器等数据进行 3D 建模，利用深入感知算法，传感器融合算法，路劲规划算法进行仿真模拟。

智能预测：通过仿真预测出易于拥堵的路段和形成条件。

智能干预：根据仿真结果对路段进行智能干预，包括，信号灯控制，行车诱导屏，停车诱导屏，道路重新规划，卡口控制等干预方式。

应用层：主要包括道路运行监测，道路运行决策，应急处理，多运输方式协同，周边诱导信息服务等。

(3) 案例特点

本案例的主要创新点是创新构建城市级交通仿真推演及预测体系。在城市规划建设过程中需要具有预见性和前瞻性，在城市运行管理过程

中需要具有全局性和战略性。该城市仿真推演与预测体系基于本项目所提出的“同步规划、同步建设”的城市数字孪生技术框架，充分利用智慧城市新型融合网络体系，通过使用深度学习、强化学习和增量学习协同技术，分析城市级动态演化与知识发现，预测城市发展，实现城市级运行资源要素优化配置。与传统城市仿真推演与预测技术相比，本项目所提出的创新技术方法不仅适合大型国家级新区规划建设中的推演与预测，而且对于具有战略地位的大型城市区域运行管理也具有很强的支撑作用。

(4) 实施步骤

需求分析：分析城市现有的路况，车辆，环境监测，卡口，信号灯，测速雷达，智能限速显示牌，深入挖掘实现智能交通的具体需求。

架构设计：根据需求分析，依据数字孪生架构，设计出智慧交通仿真推演平台的架构，包括终端层，网络层，仿真层，智能预测层，智能干预层，应用层等。

功能设计：通过收集和存储终端设备数据，通过算法进行模拟仿真，实现运行监测，运行决策支持，应急处理，周边诱导信息服务几大应用。

实施：编码和实现。

运营维护：依托仿真推演平台。针对场景痛点，建设垂直创新应用。

(5) 涉及的关键技术

涉及的关键技术有物联网、地理信息、城市三维建模、三维可视化渲染、人工智能、模拟仿真等，具体应用如下：

物联网：用来采集 ETC 收费终端，卡口终端，测速雷达，环境监测传感器，摄像头等设备的数据。

地理信息：描绘城市地理信息。

三维建模：对城市建筑及部件设施、车辆、人员、设备等进行三维建模。

三维可视化渲染：渲染三维地图，城市建筑及设施，车辆，人员，设备等。

仿真模拟：仿真模拟，消防，人口流动通过深度感知算法，传感器融合算法，路劲规划算法进行仿真模拟。

(6) 案例成效和意义

在数字孪生技术塑造的场景中可以做仿真测试，跑出最优解，然后再回到现实世界里去实施。提高了城市交通规划、建设与管理水平，提高了城市道路交通预测能力，实时发布动态交通信息，使车辆驾驶员和出行者了解当前道路交通情况，避开拥堵路段，缓解道路交通拥挤状况；定期发布交通报告（月报、年报），为政府、行业、企业和公众提供所需的综合交通信息、引导出行者合理的交通行为、优化交通运输结构提供技术支持，实现了交通运输流程再造创新。

(四) 智慧能源领域

案例一：管道数字孪生构建与应用

(1) 案例背景及基本情况

自 2003 年冀宁联络线首次提出数字化管道建设目标以来，油气管道行业依托于数据技术、网络技术、SCADA 系统、GIS、遥感等信息科学手段，逐步形成了数字化设计体系、全生命周期数据库，油气供应保障体系、风险防控体系等，传统业务能力有了明显提升。与此同时，随着中国数字化转型浪潮不断加深，长输油气管道传统业态模式同样面临着数字化转型升级的机遇期。

2018 年以中俄东线天然气管道工程建设为标志，中国石油提出建设具备“全方位感知、综合性预判、一体化管控、自适应优化”能力的智慧管网并开题立项，力求实现管道运行管理由精细化模式进一步朝智能化、

精准化方向升级。其中，数字孪生无论从技术理念、技术内涵还是预期目标都与智慧管网建设理念高度契合，因此以管道数字孪生构建应用作为实现智慧管网建设运行的重要着力点，也同时成为管道各建设运行企业关注焦点。

(2) 系统框架

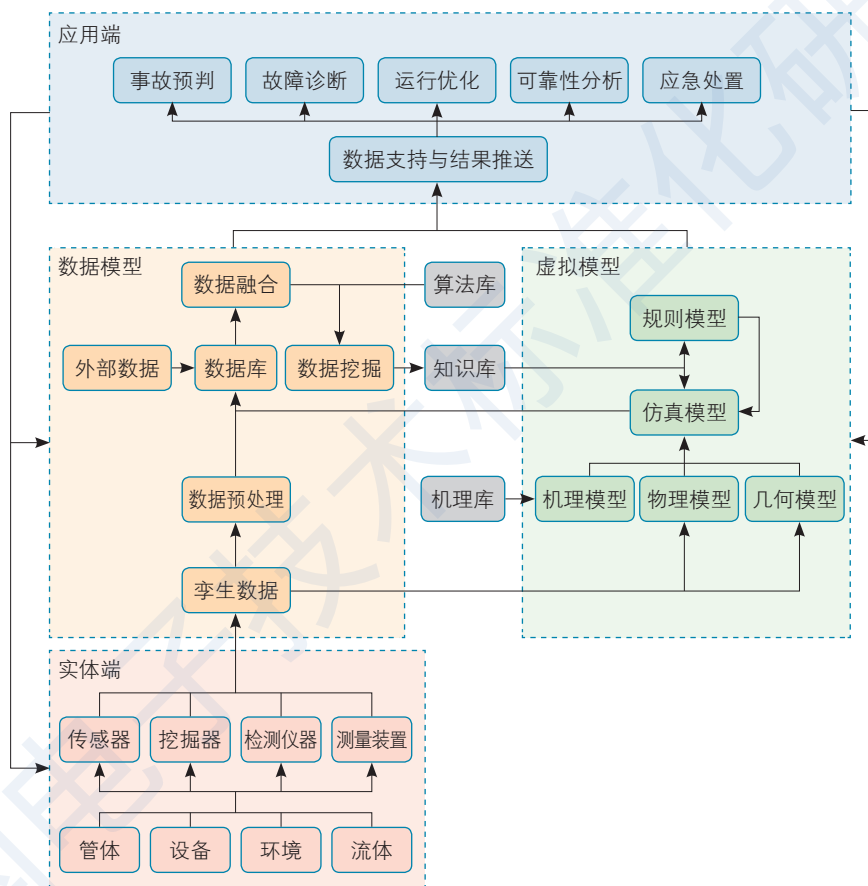


图 94 管道数字孪生系统架构

系统架构以“两端两核”理念构建设计，一方面承接了管道数字孪生构建的核心内涵，并以远期构建管道泛在数字化生态圈愿景为引导，另一方面依托于系统架构实现了管道建设运行全生命周期下各业务场景重

塑设计，同时作为管道数字孪生构建方案的实施与部属指导性框架。系统架构中：

应用端包含了各类分析决策系统，生产管理人员各类实际应用中以数字孪生计算、分析后的数据与结果作为分析与决策依据，形成信息和决策闭环。

实体端包含实际管道系统中的各类物理实体以及配套检测装置等内容。实体端通过采集实际管道系统的信息、运行参数、操作指令等，并准确传递给数据模型和机理模型。

数据模型包含了实体端传递的实际管道系统的数据、外部系统共享的数据以及虚拟模型计算后的数据，并且具备数据的处理、存储、融合、分析等功能。

虚拟模型主要以仿真模型和规则模型为主，仿真模型涵盖反映实际管道系统客观规律的机理模型、反映实际管道系统材料、属性、特征等信息的物理模型、反映实际管道系统形状、尺寸、位置、装配关系的几何模型；规则模型通过既有经验或数据分析得到的结果，用以支持仿真模型的构建和计算。

基于两端两核设计理念，系统架构中管道数字孪生以数据、模型、知识的融合为驱动内核，各业务场景或业务系统以管道数字孪生为运转媒介，实现数据与模型同源共生基础上，实现各业务场景链式构建，实现各业务场景间协同运转。

系统架构中，依据管道物理世界的边界划分为线路、流体、设备、环境四个部分，并从中获取各业务场景下所需的全要素数据并构建精准化模型，结合孪生体对数据、模型、知识、结果的融合交互实现分析决策，并将各类分析决策结果反馈至各业务场景以及实体，最终实现信息流闭环。

(3) 案例特点

a) 业务维度:

设计施工: 赋予设计施工期的数据和模型以生命力, 促进面向管道运维的方案优化。促进资源配置优化, 实现建设效益最大化, 为后续运营管理奠定坚实的基础。

油气调运: “全国一张网”下, 持续优化产运销系统, 统筹优化管网的运行方案和自控方式, 不断提升调控系统的自学习、自适应、自决策能力。提高管输收益, 提升方案响应速度, 降低能耗成本, 为管网互联互通创新赋能。

线路管理: 充分融合天地空多维度的感知信息, 预测管道的缺陷发展, 评估管道剩余强度和剩余寿命, 合理制定维修计划。实现安全风险的智能辨识和预警, 提高本体安全的管控能力。

设备诊断: 通过拟真的设备数字化模型与强大的工业大数据平台相结合, 获取设备细致入微的洞察力信息, 实现设备的智能化诊断, 预防性维护和全生命周期管理。

事故应急: 涵盖“事前、事发、事中、事后”全过程分析, 快速及时的对事故进行响应, 预估事故后果, 评定事故等级。实现运行工况调整、人员和物资调配、维抢修作业等一体化的解决方案, 最终形成统一指挥和协同工作的应急机制。

b) 技术维度:

标准化数据与统一化模型: 管道运行管理中场景涉及领域广、业务交叉度大, “两端两核”以标准化数据与统一规范化模型为基础, 以构建数据与模型资源池为底层支撑, 实现管道生产运行各维度的数据与模型统一存储、调用、修正; 实现数据、模型可溯源; 分析结果可验证。规避了非标准化数据以及非统一化的模型在传统业务体系下生产分析决策

数据利用率低效以及模型低可靠度等问题。

模型融合为技术核心：以数据模型与虚拟模型深度融合为技术驱动核心，弥补了数据分析与仿真分析技术在管道生产问题分析决策中的技术局限性，具体的：①不断利用生产运行数据对仿真模型进行反向估计，提高仿真精度；②借助大数据、机器学习等数据分析技术探寻数据规律填补机理空白，形成规则模型辅助建模；③通过虚拟模型验证数据分析结果可靠性；④通过虚拟模型计算模拟扩充数据维度与数据量。

(4) 实施步骤

从管道数字孪生构建与设计，到试点应用到最终全面推广实现最终目标需要的时间跨度非常长，以实体数化、互联互通、集成融合、智慧共享四个成熟阶段作为的管道数字孪生建设成熟度，逐步引导实现管道数字孪生的建设实施，其中：

实体数化：将实际管道系统表达为计算机和网络所能识别和分析的数字模型，阶段特征是管道物联网系统的全面构建以及建模技术的成熟应用。

互联互通：实现孪生体同实际管道系统间信息的双向互联互通。阶段特征数据和模型的标准化、统一化以及工业互联网平台的构建和成熟应用。

集成融合：实现孪生体对实际管道系统状态和行为的精准预测，为业务提供分析决策。阶段特征是机理模型和大数据模型的充分发展以及模型融合技术的成熟应用。

智慧共享：各业务间以孪生体为媒介，共享数据、模型和知识，形成全业务链协同运转的管道生态系统。阶段特征是知识网络、数字主线等技术的成熟应用。

需要强调的是，在实际管道数字孪生构建过程中，各成熟阶段需要

依托各类基础工程、信息化建设、科研项目的推进、部署与研究，而具体实施过程也并非独立存在，需要结合现有管道的物理基础、技术基础、以及生产需要或同步开展、或交替实施。

(5) 涉及的关键技术



图 95 管道数字孪生构建技术

管道数字孪生构建依托物联网技术、仿真技术、大数据分析技术、模型融合技术、工业互联网技术等关键技术支撑，同时在管道数字孪生构建与应用过程中各技术间并非单一线性叠加关系，而是依靠多领域、多学科技术间集成、融合形成的一体化技术解决方案为管道生产运行决策提供服务支持。

物联网技术：核心在于提供管道数字孪生与实体场景间联通与交互，通过各类传感器、监测手段、定位系统等装置与技术获取管体、流体、环境、设备属性、行为、状态，依托光线、5G 等传输技术反馈至数据模型与机理模型完成建模分析工作，并将分析决策的结果反馈至实体实现操作、维修、更换等形成信息流闭环。

仿真技术：除针对高精度的模拟仿真需要具备较高计算能力的计算

引擎外，针对分析结果时效性要求高的应用场景下，数字孪生应具备模型降阶技术提供快速计算的轻量级仿真模型。针对仿真模型参数缺失、样本量少等制约，通过分析实测及历史的运行数据，应用反向建模与参数估计技术扩充数据维度与数据量，提升仿真计算的精度。规范化仿真模型校核、验证与确认流程，以便确定该模型准确反映实际系统的特性，提高仿真结果置信度。最后，数据、模型及计算结果三维可视化，使管理人员能够更方便、直观地掌握实际管网系统的相关信息。

大数据分析技术：数据进行预处理，包括数据清洗、数据压缩、数据平滑、数据转换等数据处理技术。面对实体端传输的或外部数据库接入的海量多源异构数据的存储，高效的数据库技术与统一的数据标准不可或缺。在机理不明确、模型不完善的情况下，综合利用深度学习、支持向量机、统计方法、相关性分析、聚类分析、时间序列分析等技术形成先进的数据分析手段，对实际管网系统的未来状态和行为进行预测。同时由于数据源既包括实际管网系统中的数据也包括虚拟模型中的数据，需要对各类数据、特征、决策等进一步融合，其依赖于数据融合技术。

工业互联网技术：通用的工业互联网平台架构为参考与管道系统相结合，实现从管道实体到分析到业务的各类元素的全面互联。参考通用工业互联网平台架构，部署边缘层（通过全要素数据的感知，自控逻辑的接入、异构数据的协议转换和边缘处理、载体平台与已有系统的互联互通，形成管道数字孪生的数据基础）、IaaS层（提供本地部署以及云部署的基础设施）、PaaS层（基于通用PaaS资源部署和管理把计算分析以及运行中积累的经验、知识等资源固化为可移植、可复用的组件，构建APP开发环境，借助微服务组件和APP开发工具，帮助各业务快速构建轻型、定制化的工业APP）、SaaS层（一方面为管道传统业务系统提供功能扩展接口，另一方面实现生产运行、资产管理、预警应急等业务的协同工作机

制，并提供创新性的业务应用）。

(6) 案例成效和意义

宏观层面上，基于管道数字孪生构建实现管网系统全生命周期、全业务链数据和模型的标准化、集成化；通过大数据、仿真、云计算等技术的非线性叠加，发挥技术在管道生产分析、评价、决策过程中的增值效应；以信息化带动工业化，以工业化促进信息化，实现信息化与工业化在管网系统中高层次的深度结合；充分发挥人的专家经验与机器的推理预测，对管网运行管理中各类生产问题形成综合性的决策判断；最终，实现管道全业务链下信息、技术和知识的融合共享，形成新型协同运转的业态模式。

案例二：廊坊电厂

(1) 案例背景及基本情况

随着廊坊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，还有较大潜力可挖。

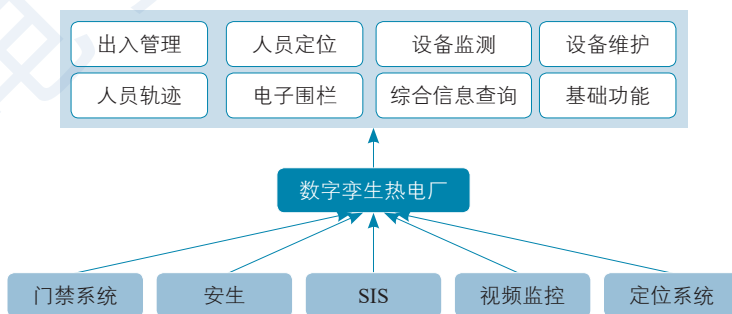


图 96 廊坊数字孪生热电厂

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。

(2) 系统框架

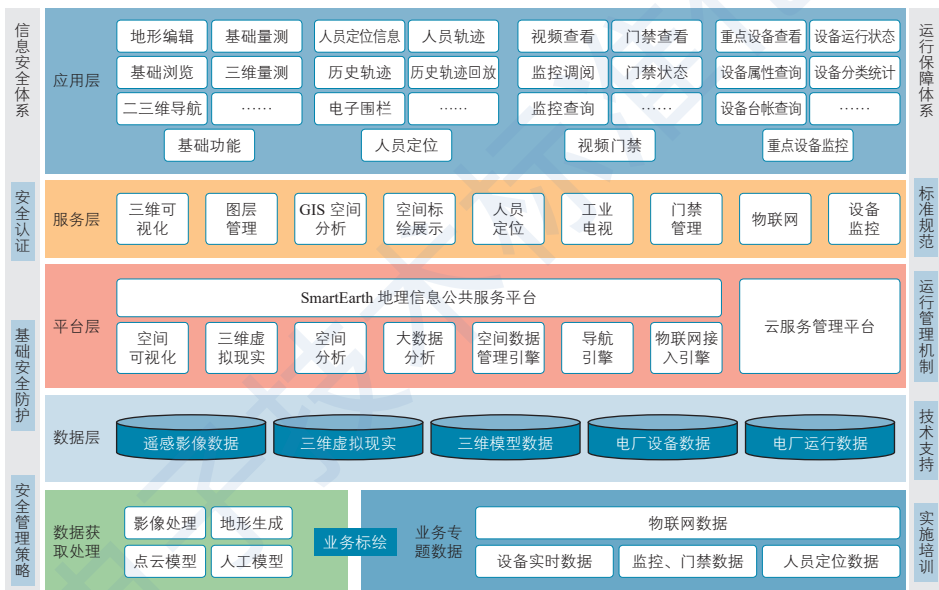


图 97 廊坊电厂数字化转型框架

整个系统架构从逻辑上分为数据采集处理层、数据层、平台支撑层、服务层和应用层来组织。系统软件设计采用分层架构技术，以通用性、稳定性定层次，同一层次以功能划分包，以上层服务为导向，逐级设计，逐步细化平台组件的颗粒度。

数据获取处理包括新建及对接两类，其中影像数据、地形数据、点

云模型、人工模型、业务标绘为新建数据，工业电视画面点位、门禁点位置属性、人员定位信息、设备实时测点数据、检修等业务专题数据、物联网数据为对接数据。

通过上述数据搭建三维可视化数据层，对系统模块提供遥感影像 GIS 数据支撑，三维地形场景支撑，三维模型数据支撑，电厂设备数据空间展示支撑，电厂运行数据空间可视化。

三维可视化应用系统，主要通过搭建三维基础应用平台，通过对接人员定位系统，实现工作现场作业人员监督管理的应用场景。同时对接 SIS 重点设备测点数据、视频、门禁系统，面向安生业务系统提供部分支撑。

(3) 案例特点

数字化

借助覆盖全厂的网路平台实现生产数据的实时采集，快速掌握生产运行情况，实现生产环境与信息系统的无缝对接，提升了管理人员对生产现场的感知和监控能力。

模型化

基于工厂模型构建煤化工的各类工艺、业务模型与规则，并与各种生产管理活动相匹配。

可视化

根据提供的设计图纸搭建了三维可视化工厂，并与生产工艺、设备信息、作业票、应急演练等功能进行集成，为生产操作和管理人员提供直接的业务场景展示。

自动化

建设了覆盖全厂的 DCS、SIS 等系统，实现对整个工艺过程的监测与控制。

决策科学化

利用大数据技术，对各应用系统的数据进行集中存储和分析，协助公司领导层及时发现问题、分析问题原因、进行风险预警，实现决策的科学化。

集成化

建设了企业信息集成平台，以MES为核心，向上支撑企业经营管理，向下与生产过程的实时数据高度集成，将各自独立的信息系统连接成为一个完整可靠和有效的整体。

(4) 实施步骤

a) 数据采集和数字孪生体建设：建设的数字孪生体将完整还原廊坊热电厂各职能区域，直观、如实的反映各专业设备设施空间分布关系及必要状态，满足人员定位管理、视频监控等安全生产应用需求，涵盖建筑结构、地形场景、交通模型、植被要素模型、其他要素模型和专业设施模型等。

b) 物联感知能力建设：通过与物联网数据库连接，实现人员定位信息、部门信息等三维场景中的可视化展示和定位查询。实现在三维场景中对摄像头的位置、监控范围进行可视化直观展示分析，同时调取视频内容，加强与安全业务关联性，通过视频获取监控信息，加强对重点监控区域的监察管理。实现智能化、一体化门禁监控管理。

c) 设施设备全生命周期管理能力建设：构建设备全生命周期数据库，接入设施设备基础属性信息、生产参数监控实时数据、维修维护历史数据等数据信息。当主要设备生产参数监控数据发生异常时，系统在模型中定位到异常设备位置，同时发出报警。当环境参数超过设定的安全值范围，系统在模型中定位到报警位置。留有相关视频接口，可在报警时调出相应视频。

(5) 涉及的关键技术

a) 多层次融合建模技术，构建高精度数字孪生热电厂

三维建模是描绘和理解物理世界的一种手段，是数字孪生的前提。它能够利用大量数据，检查资料的连续性，辨认资料真伪，发现和提出有用异常，为分析、理解及重复数据提供了有用工具，对多学科的交流协作起到桥梁作用。三维可视化既是一种解释工具，也是一种成果表达工具。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。

b) 基于数字孪生热电厂实现设备全生命周期管理

针对传统电厂运营管理和设备资产管理相对独立、跨部门数据集成度和利用度低等问题，研究基于数字孪生热电厂的智慧电厂设备全生命周期管理技术，利用三维模型语义化、属性语义扩展，完成设备几何信息、业务信息的信息融合，实现设备安装、运行巡检过程中的三维仿真和实时互动功能。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。

c) 基于数字孪生编码技术，构建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。

d) 实现高精度人员定位，满足安全管控要求

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。

e) 实时视频监控，加强厂内安全监管

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。

(6) 案例成效和意义

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。

(五) 智慧建筑领域

案例一：安徽创新智慧楼宇运营管理平台

(1) 案例背景及基本情况

安徽创新馆是我国第一座以创新为主题的科技展馆，场馆总占地面积 150 亩，建筑面积 8.2 万平方米。全馆由三栋独立的场馆组成，一号馆以科技成果展示为核心，二号馆以科技创新成果服务为主题，三号馆以科技成果转化交易为主题。

基于该建筑的特殊性与科技创新元素，结合 VR、大数据、云计算、物联网等当代前沿技术，通过融合各类场景数据如 GIS、BIM、倾斜摄影、设计文件、3D 模型等数据，建立逼真的虚拟场景，1:1 孪生对应的数字世界，实现人、地、事、物在数字世界里的镜像孪生。用户通过智慧楼宇运营管理平台（以下简称 BOS）瞬间掌握营运环境，极大缩短反应时间。安徽创新馆 BOS 系统作为全省首个落地智慧园区数字孪生管控平台，将为场馆提供全面、精准、高效的安全及运营管理。

BOS 及智慧楼宇管理系统，通过可视化的数字孪生场景与 IOT 数据结合，建立逼真的虚拟建筑场景，建筑内外场景能够实时漫游，并且对周边环境进行虚拟 1:1 还原，与真实的场景保持一致，虚拟建筑能够进行大小缩放、分层查看、分间查看、能够进行平面 360 度旋转、立面 180 度旋转，能够自由操作，便于运维管理人员操控，加快响应速度，缩短处理时间。

BOS 是对传统智能楼宇的创新升级，是未来对楼宇、场馆、机场、高铁站等功能性繁多的公共区域进行预防性管理、节能管理、空间管理的标准产品，通过该系统我们可以连接楼宇的各个控制系统，连接用户，降低成本，提高效率。

(2) 系统框架

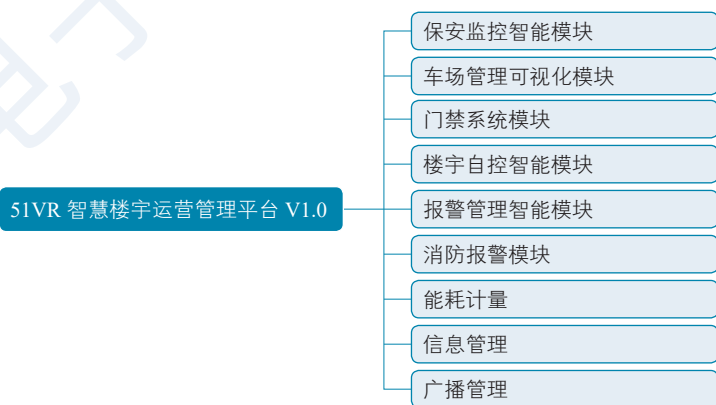


图 98 智慧楼宇平台系统框架

楼宇自控智能模块

综合信息集成系统与楼宇自动化系统的主机或控制器相连，通过楼宇自动化系统提供接口汇集各种设备的运行和检测参数，并对各类数据进行积累与总计。如冷冻机、热交换、新风机组、空调机组、各种泵的运行时间、启停次数等参数进行积累与总计，以便更好地进行物业管理。

消防报警系统

消防报警系统通过 RS232 网络向集成管理系统传递信息，内容包括系统主机运行状态、故障报警；火灾报警探测器的工作状态、探测器地址、位置信息、相关联动设备的状态。

保安监控智能模块

通过可视化场景快捷操作，并接受其它子系统的报警联动等，控制视频画面的切换、缩放、摄像头聚焦、转动、切换预置位等功能。通过可视化场景可选择待操作的监控点设备，对电视监控系统进行快捷操作。集成系统可以接受其它子系统的报警实现联动。

报警管理功能模块

实时显示并记录系统状态和报警信息，可以通过安防系统进行有关区域的设防和撤防。当发生非法入侵时集成系统工作站应立即显示警报发生点信息，弹出报警区域地图界面，指示报警位置，启动警号。

门禁系统模块

实时监测出入口状态并记录电锁或门磁的开关状态、出入口的开关控制、异常的进出记录。当有人非法开启安装门禁的房门时，打开邻近区域的照明并报警。

车场管理可视化模块

集成系统通过网络与停车场管理系统计算机相连。集成系统采集车辆进出及存放时间的记录。

广播管理

集成平台与广播系统联结后，实现大楼内包括各层功能区播放背景音乐、业务语音广播、消防紧急广播、分区切换功能的状态监控。

信息管理

集成平台从信息导引与发布系统获取实时的设备运行状态数据，同时监视信息导引与发布系统的运行、远程开启 / 关闭等。

能耗计量

将整个楼宇的各种能耗事实反映出来，在集成管理系统中，可以方便监控和了解整个楼宇的状况；同时，也可以在监视工作站上实时显示楼宇内的环境参数相应的信息。将能耗与环境参数情况归纳、分析，以文本、图形、表格等方式供网络间共享。能源管理模块对能耗各子系统能量的报表统计，以年、月、日、饼、柱图不同方式表示及对比。

(3) 案例特点

综合监控：基于高精度还原的 3D+ 场景集成视屏监控数据，通过摄像设备实现对创新馆全面覆盖的实时监视与控制。通过建筑物模型图、楼层平面图和景区电子地图可选择待操作的监控点设备，对电视监控系统进行快捷操作。集成系统可以接受其它子系统的报警实现联动。控制视频画面的切换、缩放、摄像头聚焦、转动、切换预置位等功能。

门禁管理：实时监测出入口状态并记录电锁或门磁的开关状态、出入口的开关控制、异常的进出记录。当有人非法开启安装门禁的房门时，提示报警。

楼宇自控：综合信息集成系统与楼宇自动化系统的主机或控制器相连，通过楼宇自动化系统提供接口汇集各种设备的运行和检测参数。如冷冻机、热交换、新风机组、空调机组、各种泵的开 / 关状态、运行正常 / 非正常状态等数据，并实施控制各设备。

消防报警：基于高精度还原的 3D+ 场景及各类型火灾感知设备终端数据集成，消防自动化报警系统与集成平台数据流（限于消防法规，只监测不控制，为单向），消防报警系统通过 RS232 网络向集成管理系统传递信息，内容包括系统主机运行状态、故障报警；火灾报警探测器的工作状态、探测器地址、位置信息、相关联动设备的状态。

车场管理：完成对车场空置、车辆进出及存放时间的记录采集。并可联动现场监控设备，甄别车辆 / 非车辆停放情况，实现对地下停车场的全面监控

报警管理：当系统设备如安防报警器、冷冻机、新风机组、空调机组、各种泵及管道出现故障或意外情况时，综合信息集成系统将进行采集，并提示。报警管理功能自动运行而无需操作人员介入。当设备发生故障时，能在显示器上弹出警示红色闪烁对标记，显示出相应设备的图形界面，所有的报警应显示报警点的详细资料，包括位置、类别等。

能耗计量：将整个楼宇的各种能耗事实反映出来，在集成管理系统中，可以方便监控和了解整个楼宇的状况；同时，也可以在监视工作站上实时显示楼宇内的环境参数相应的信息。能源管理模块对能耗各子系统能量的报表统计，以年、月、日、饼、柱图不同方式表示及对比。

广播通讯：完成各层功能区播放背景音乐、业务语音广播、消防紧急广播、分区切换功能的状态监控。

信息引导：集成平台从信息导引与发布系统获取实时的设备运行状态数据，同时监视信息导引与发布系统的运行、远程开启 / 关闭等。

(4) 涉及的关键技术

数百万量级数字资产库：

三维模型自动构建工具链，模型自动导入及优化工具 51EngineTools，常见模型格式（max/maya/su）自动转化为渲染引擎端能够识别的标准

FBX 格式，并自动监测材质和贴图丢失错误等常见问题。

城市骨骼数据库（51UrbanData）：

在 GIS 数据基础上，通过对卫星图及街景全景图进行目标分割，完成对建筑和道路的信息提取，以扩展传统 GIS 数据信息量的问题。

数字孪生操作系统能力：

解决虚拟世界在集成和控制上与真实世界无限接近的问题，基于标准 ETL（抽取、转换、加载）流程，目前已实现地理信息、建筑信息、视频流、传感器、关系型数据库等各类源的业务类别和技术格式。

实时可视运行及控制能力：

通过可视化图形组件，将复杂数据进行实时二维及三维可视化，用以清晰快速地获取各类信息，包括信息分类、信息对比等。

表 8 技术结构层

序号	结构层	描述
1	数据面板结构层	提供数据面板单独适配相应，针对页面在蓝图中可快速针对页面进行编辑。
2	场景结构层	独立的模型渲染和加载，能够更具 GIS 数据生成相应模块图层，同时兼顾良好的实时渲染效果；
3	3D socket 结构层	既地图 3D 图层，在 3d 图层中根据结构化模式是适配于不同业态，关联不同业务场景联动，在场景中显示不同业务效果，并且独立管理；
4	事件告警管理结构层	根据事件告警做不同场景选择展示，能够总体管理告警，完成告警汇总与区分。

表 9 产品应用模式

序号	形态描述	
1	CS 架构形式	以单一安装包为使用形态的本地客户端版本
		Launcher 在线管理客户端版本
2	BS 架构形态	独立云渲染展示版本
		SuperAPI 开放展示版本

(5) 案例成效和意义

提供智能硬件设备集成数据平台，能够接入 IOT 设备数据（设备运行参数、设备运行状态等），并形成统一数据输出平台，支持 api 接口调用及参数配置。支持数据存储及分布式存储应用。构建数据输出中间层，优化数据结构与数据分析环节，可支持对于历史数据的数据库基本功能。逐步完成 IOT 设备数据湖的构建。

监控平台以摄像头数据中转处理及数据分析处理为功能构建。支持多格式码流数据接入，支持码流接入分类，参数配置解析能力，可支持视频数据存储功能，存储时间、制式、清晰度可配置。满足视频数据统一转码形成统一制式数据输出。

根据楼宇平台对楼宇事件进行数据监控,对于异常信息进行报警显示,并提供报警信息定位,呈现事情情况与发声位置,做到中央指挥。

监控视频是保障楼宇日常安防的重要功能，提供完备的视频监控平台，提供不同类型摄像头的接入功能，保障不同功能等级监控需求的满足。提供监控信息的软硬件管理方式，对硬件及信号做出合理预判。

能效管理系统是一个综合性系统,目前可以提供基础性能效管理呈现。根据集成数据底层完成管理模块功能搭建。实时展示能源消耗情况，能源消耗曲线，增加费用统计模块，实时计算费用指标。对各类能效使用及消耗做到细分颗粒度管理。掌握楼宇的能效问题。

楼宇停车场综合管理，整合楼宇停车场资源，集合停车场数据统计系统实时了解停车场状态，对楼宇车辆接纳能力有清晰统计。并对各车辆有详细停留记录，做到楼宇信息可视化。

案例二:综合办公服务区 BIM 应用

(1) 案例背景及基本情况

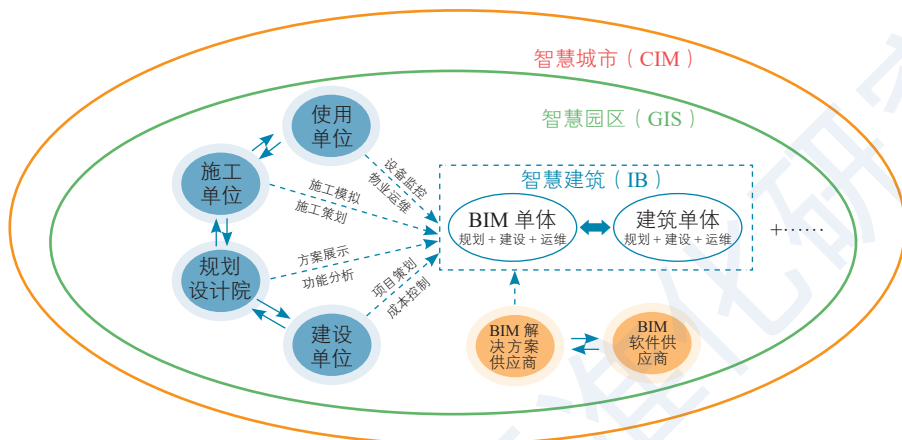


图 99 基于 BIM 的数字孪生建筑应用商业模式图

为了引领行业技术发展、更好地服务国内外汽车企业，满足各类用户的需求，中汽汽车技术研究中心有限公司近几年在国内主要地区（北京、上海、广州、宁波、武汉、昆明等地）分别投资建设了若干基地，并在德国、日本增设了办事机构。天津总部核心业务部门也随着业务的不断增长（特别是新能源汽车、智能驾驶等新技术、零部件等新材料）、生产试验规模的不断扩大以及人员的大幅增加，现有相关设施已不能满足需要，特别是新能源、智能网联、大数据、咨询服务等新兴业务在技术服务、员工办公、职工就餐等方面矛盾凸显，已经成为中汽中心开拓新兴业务、实现新利润增长点的重要障碍之一。

本项目充分依托现有院区建设的公用基础设施，在中汽中心主院区扩建征地范围内，按照原政府部门批准的规划，建设“中汽中心汽车研发大厦、职工餐厅及会议报告厅为一体的综合办公服务区，既保证了主要业务部门（检测认证事业部和工程院、设计院等）传统业务人员扩充的要求，

也为新能源、新技术（智能网联、大数据、智库等）以及楼宇经济业务的发展提供了良好的办公保障，同时解决中心原有职工食堂小，无法满足人员不断扩充的要求的困境，也有效改善了员工的就餐环境，成为中汽中心未来发展的重要保障性项目。中汽研汽车工业工程（天津）有限公司负责该项目的工程设计工作，设计过程中应用 BIM 相关技术，建立数字孪生建筑模型。

(2) 系统架构

BIM 工作

本项目 BIM 建模分为两个阶段，主要内容如下：

表 10

序号	阶段	建模精度	阶段用途	建模工具
1	概念、方案设计	LOD100	场地分析、规划分析、	Rhino
2	初步设计	LOD200	可视化交流、立面评审、布局评审、空间评审、	Revit

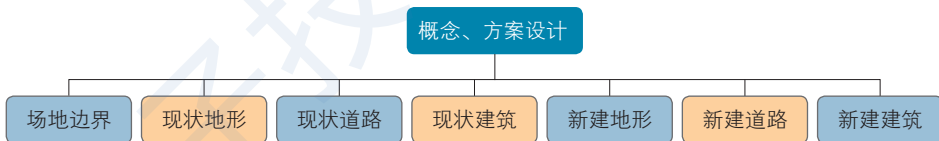


图 100 概念方案设计

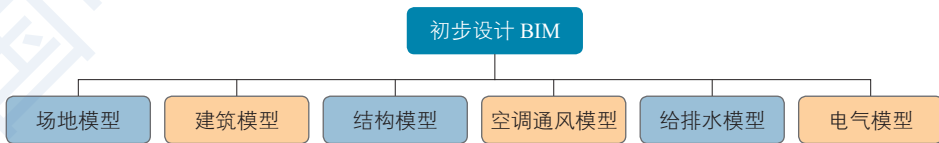


图 101 BIM 初步设计

(3) 案例特点

BIM 应用目的

通过有效的可视化交流，可以更加直观的了解建筑的立面分割、立面效果与园区整体风格是否协调，是否与概念方案一致并符合预期。理解水平及垂直功能布局是否有机协调。各个功能区域的空间规划是否合理，空间比例是否达到一个舒适的尺寸。

BIM 应用内容

场地分析、规划分析。可视化交流、立面评审、布局评审、空间评审。

BIM 应用效果

该项目为在厂区预留地区域新建，并且新建建筑物在主要干道沿街，所以关系到与开发区整体风格及原有厂区风格的协调统一。主要的应用成效如下：

- a) 优化了厂区建筑布局，新建区域与厂区原有人流物流更加协调。
- b) 优化了建筑物造型，与厂区原有建筑造型风格统一。
- c) 优化了建筑物立面效果，主干道沿街立面风格协调。
- d) 优化了食堂取餐区的空间设计，扩大了取餐区域面积。
- e) 优化了设备房间空间尺寸，根据设备及主要管线空间布局，提高了部分设备房间净高。

(4) 涉及的关键技术

BIM 建模技术

BIM 的含义，BIM 即 Building Information Modeling，也就是建筑信息模型。BIM 是以三维数字技术为基础，集成了建筑工程项目各种相关信息的工程数据模型，BIM 是对工程项目设施实体与功能特性的数字化表达。一个完善的信息模型，能够连接建筑项目生命期不同阶段的数据、过程和资源，是对工程对象的完整描述，可被建设项目各参与方普遍使用，

支持建设项目生命期中动态的工程信息创建、管理和共享。建筑信息模型同时又是一种应用于设计、建造、管理的数字化方法，这种方法支持建筑工程的集成管理环境，可以使建筑工程在其整个进程中显著提高效率和大量减少风险。

案例三:基于 BIM 的数字孪生建筑综合应用

(1) 案例背景及基本情况

本案例是利用 BIM 技术平台搭建建筑物数字模型为工程设计及建设进行服务。案例所实施的工程是由中国汽车技术研究中心投资建设的汽车整车零部件和新能源汽车产品检验检测中心。中汽研汽车工业工程（天津）有限公司作为该项目 EPC 总承包方，负责设计、施工及试验设备采购、安装、调试等全过程实施工作。

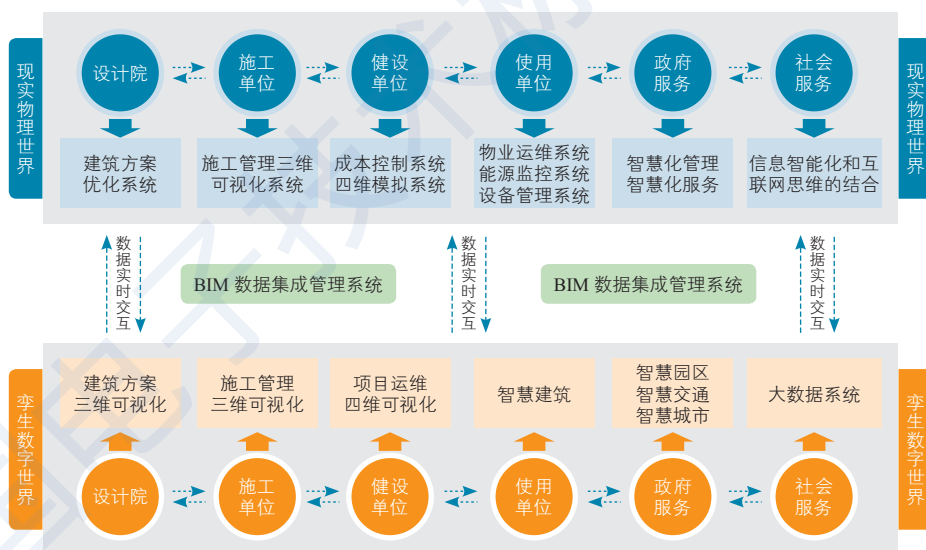


图 102 基于 BIM 的数字孪生建筑综合应用商业模式图

本案例实施于项目的一期工程。项目一期工程主要包括：整车耐久及发动机试验室、整车排放试验室及停车楼 A，门卫、动力站房等，总建

筑面积 52534m²。

(2) 系统框架

由于本项目为 EPC 项目，在项目成立初期便设立了 BIM 团队，项目经理牵头第一责任人，项目总工程师指导实施。下设经验丰富的 BIM 负责人及各专业 BIM 工程师进行建模与现场实施，保证落地应用。

项目初期，编写项目 BIM 实施策划，确定 BIM 应用点，明确各项技术流程及实施过程管理程序，制定管理及技术相关制度，确定实施成果及其现场应用形式。

(3) 案例特点

a) 弧形坡道施工难点

取本工程已施工首层北侧坡道试验段，检测已完成模板安装工程 220 个点，合格点数 176 个，不合格点数 44 个，模板安装合格率仅为 80%，其中弧形模板合格率仅为 60%，占模板安装不合格率的 91%，亟需提高。

b) 弧形坡道辅助 BIM 软件选用

因弧形坡道轮廓形状，建模使用基础软件难以实现，因此利用 Rhino 软件对弧形曲面进行参数化建模，确定模板的尺寸、拼接方式以及立杆与龙骨的高程，并给每个模板与立杆特定的编号，记录其尺寸、高程、位置坐标信息，统计成表。

c) 弧形坡道数据获取

根据 Rhino 展开模型，按照模型尺寸制作了特有的弧形木模板，保证了造型效果。通过 REVIT 模型，获得模板和立杆的详细信息表，现场工人只需根据表上的数据加工材料，然后按照清单中特定编号的模板或立杆的位置安装、拼接，施工过程变得非常有效率，也大大减少了模板拼接不齐或立杆高度错误等问题出现的可能。

d) 三维扫描技术应用

首先第一步先对施工场地和加工完成后的造型木模板进行三维扫描，生成的点云数据，并将点云数据导入到电脑里，进行预拼装。预拼装完成后与之前在 Revit 和 Rhino 创建的全三维仿真模型进行比对，核对现场造型木模板的安装误差，从而及时采取相应的纠正措施，使各造型模板在安装时 X、Y、Z 单个方向上的误差在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，安装完成后，对造型模板的位置进行复测，经检验合格，造型美观，成型精度高，节约成本，顺利完成了弧形坡道的安装。

e) 高支模施工难点

本次项目施工的难点之一就是高支模施工。整车耐久及发动机试验室及整车排放试验室首层顶板均为 8.45m，部分区域甚至达到 9.75m 的高度，依照《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》须设专项方案并由专家进行论证。

在方案编制后利用 BIM 建模使图纸方案三维可视化，方便了图纸审查，也使方案实施前对施工队交底变得更加容易；利用 BIM 技术信息化统计，也方便了钢管与扣件的统计工作，减少了现场施工出现错误的可能。

f) 本项目以 BIM5D 平台为核心，集成土建、机电、钢构等各专业模型，并以集成模型为载体，关联施工过程中的进度、合同、成本、质量、安全、图纸、物料等信息，利用 BIM 模型的形象直观、可计算分析的特性，为项目的进度、成本管控、物料管理等提供数据支撑，协助管理人员有效决策和精细管理，从而达到减少施工变更，缩短工期、控制成本、提升质量的目的。

(4) 实施步骤

a) 利用 Revit 的 Architecture、Structure、MEP，以及 Tekla 软件，依据设计成果进行数字建模，钢结构部分单独使用 Tekla 软件建模；

- b) 将各模型互相导入和转换，建立建筑物的三维可视化模型；
- c) 将完成模型导入 Navisworks 中进行漫游及碰撞检测，模拟施工进度；
- d) 将完成模型导入 3dmax 中进行吊装模拟；
- e) 基于 BIM 技术建立完整的项目专属族库；
- f) 在 BIM 软件创建的三维模型基础上，以虚拟现实化的方式，使用 VR 眼镜、遥感控制器、定位仪等设备完成本项目的 VR 场景创作；
- g) 利用 BIM 模型及 720yun 展示应用在移动端上实现模型展示。

(5) 案例成效和意义

本案例节约费用共计约 54 万，节约工期约 95 天：通过各专业间的碰撞检查，提前解决 112 处硬碰撞，节约成本达 12 万，节约现场解决碰撞时间约 15 天。在机电深化设计和钢结构深化设计方面，通过与设计人员沟通，深化设计 26 处，节约成本约 27 万。预埋件、钢结构、高支模、弧形坡道等技术施工采用三维交底，提高效率，节约工期约 31 天，节约材料约 15 万元，同时无需现场加工，减少降尘，做到绿色施工。在进度管理方面，通过 BIM5D 平台对施工进度、质量、成本等进行把控，提升项目管理水平，减少了可能产生的返工、误工、窝工等现象，节约工期约 49 天。

本项目通过对 BIM 技术的创新应用，辅助解决了施工过程中众多工程技术难题，提升了工程质量管理水平。在项目观摩期间向各界领导、社会同仁充分展示了 BIM 技术应用的特色，得到了相关监督部门、设计单位、建设单位和监理单位的广泛认可，并给予了充分肯定和高度评价，提高了企业的知名度及竞争力，并且为本工程申报“国优奖”提供了强有力的技术信息支撑，社会效益显著。

（六）智慧健康领域

案例一：基于数字孪生的家庭健康检测

（1）案例背景及基本情况

健康服务不仅包括医疗服务，还包括健康管理与促进、健康保险以及相关服务。发达国家健康服务业规模可达其国内生产总值的10%~17%，而我国健康服务产业目前仍以医疗卫生服务为主，前端产业（疾病预防和健康维持类）和后端产业（健康促进和提升类）规模小、内容少、发展滞后，且总量较小。当前产业大多聚焦于老年健康服务，对慢性病和亚健康人群的健康服务较为缺乏；而健康服务需求正由线下模式转到以线上为主、线下为辅的新模式，由单次体检转变为长期、连续的监测和干预。新冠疫情期间，宅在家中的生活模式更使人们意识到家庭场景中健康服务的缺失，比如缺乏连续测量监测以及上传个人健康体征数据的工具，缺乏有效的通道使居民高效获得签约家庭医生的健康指导和治疗方案，缺乏便捷的方式让居民获取高端增值的个性化健康管理服务（如膳食营养、健身服务等）。

新一代信息技术为家庭健康服务创造了条件。数字孪生是在整个生命周期中，在虚体空间中所构建的数字模型，形成了与物理实体空间中的现实事物所对应的在形、态、行为和质地上都相像的虚实精确映射。数字孪生系统起源于智能制造领域，随着人工智能与传感器技术的发展，在更复杂的更多样的社区管理领域，同样可以发挥巨大作用。本案例介绍的是以数字孪生技术在社区的应用，通过视觉传感器、人工智能芯片、深度学习算法及数字孪生建模技术实现家庭成员（尤其是老年人）日常行为活动姿态、健康风险情况的监测与预警，起到全面关爱家庭成员健康，降低服务成本，提高家庭健康服务质量，降低家庭成员健康风险隐患，实现家庭健康的智能化精细化管理的作用。

(2) 系统框架

系统结构分为四层体系，包含驱动层、平台层、算法层与应用层，如图 1 所示。

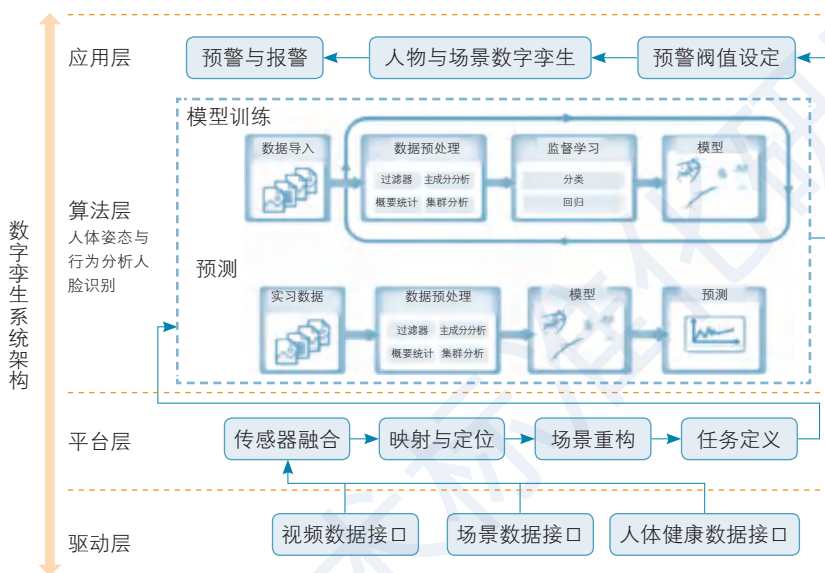


图 103 基于数字孪生的家庭健康检测系统层级

驱动层包含了分布在家庭成员活动关键场所的视觉传感器、人工智能芯片，社区健康小屋的智能健康监测设备，如血压计、血糖仪、血氧仪，及居家使用智能健康设备、可穿戴设备等。这些设备嵌入了大量传感器、计算、控制部件的智能体，分布在家庭成员生活的环境中，既能够全部采集家庭成员安全健康相关的数据，又能够通过终端计算的方式，避免泄露用户的隐私，从而保护信息与数据的安全。

平台层主要通过驱动层上传的数据，实现各种传感器数据的融合和场景重构。通过用户的唯一身份识别信息，关联全部数据，根据用户的活动区域，利用软件建模的方式，构建人物状态和现实场景的数字孪生，并根据用户自身的特性进行任务定义，现实个性化的健康管理及风险报警。

算法层主要根据人脸识别与人体姿态与行为识别的需求，利用深度学习算法，实现云端训练与终端执行，为家庭成员的风险状态判定提供数据依据。

应用层主要是面向用户提供软件服务。包括面向社区管理者的家庭成员活动状态的虚拟重现，风险状态的实时报警，与家庭成员、养老护理员、社区志愿者的沟通交流等。家庭成员及家属可以查看本人相关的健康数据与报告，社区管理者也可以了解家庭成员的身体状况和行为活动状况，实现家庭成员安全与健康的精细化管理。

(3) 案例特点

创新点 1：面向家庭健康监测的数字孪生建模

针对多场景、多类别、多源数据的家庭健康监测，提出以家庭为中心的**数字孪生建模**。机理方法研究，提出在孪（**Twinning**）和已孪（**Twinned**）虚实融合方法，以家庭健康要素的数字孪生模型为基础，基于知识图谱描述数字孪生间的数据融合和互操作。

创新点 2：基于数字孪生的家庭成员姿态异常监测

通过数字孪生技术研究，并结合视觉传感器、人工智能芯片和深度学习算法等技术，研发了基于数字孪生技术的老年人跌倒、姿态异常等实时监测报警系统。该系统通过采集老年人姿态和行为数据，经人工智能芯片计算分析后，在云端数字映射虚拟呈现。一旦偏离安全阈值，即可启动报警，以避免或减轻老人跌倒所造成的损伤。

(4) 实施步骤

本系统实施步骤包含四个核心要素：关联数据、数字模型、实时监测与智能分析。基于物理实体，构建数字孪生，实现基于数据的家庭成员安全与健康监测，体现科技服务于人的核心。

关联数据构建

关联数据包含三部分：场景数据、人物数据与个体生理健康数据。

场景数据包含老年人活动的主要场所，根据现场实际测量数据后通过 3D 建模，精准还原现场的情况。场景包括家庭成员居所，社区服务综合体，以及养老机构等老人集中活动的场所。

人物数据包括人体姿态数据与人体活动轨迹数据。人体姿态检测利用终端执行的深度学习算法，根据视频数据，利用人体部位数据库，至下而上得到关键点位置再获得骨架，进而识别人体姿态算法不因为画面中出现的人物数量多，而增加算法的耗时。一个关节点信息包括 (x, y, score) 三个信息，x 和 y 即为图像中的坐标信息，score 表示预测评分，归一化处理后取值范围 (0, 1)，越接近 1 值表示预测值越准确，其关节点的还原度就越高，同时姿态的还原度也就越高。将 18 个关键节点用特定的顺序连接后，形成一幅人体骨骼图。

个体生理健康数据，来源于家庭成员在社区的健康档案，包括基本生理数据，如身高、体重、体脂，日常的健康监测数据，包括体温、血压、血糖、血氧等数据，还有老年人患有的相关疾病及患病史，如三高疾病、脑卒中、认知症障碍等等。

数字模型构建

数字模型包括场景数字模型和人物数字模型。

场景数字模型根据场景采集的实际尺寸数据，根据 3D 建模软件，构建一套数字环境模型，通过结合现有的数字组件，包含可复用的围墙、道路、家具、门、窗、路灯等数字组件，形成一个完整的可视化的沉浸式环境。

人物数字模型分为两部分，一部分是人物关节模型，一部分是人物身份模型。人物关节模型根据深度学习算法识别出的人体 18 个关键点，利用 3D 建模软件，根据 18 个关键点，来塑造虚拟人物关节模型，18 个

关键点可根据人体活动范围任意活动，实现真实人体的关键节点与虚拟人物节点的精准映射。人物身份模型，以人物的衣着进行判断，通过衣着特征来标识人物的身份，根据人物的行走速度、姿态、步幅、步频等，识别人物身份，重点识别老年人身份。

实时监测

该数字孪生系统是充分利用物理模型、传感器、历史数据、人工智能算法，集成多物理量、多尺度、多概率、实时的仿真过程，从而实现虚拟空间中各层线路、各传感器的有机整合，使得现实空间中的家庭成员行为状态信息都能够有效地反馈在虚拟数字空间中，完成完整的实时映射过程。

该数字孪生系统采用分布式的拓扑结构，传感器分布在家庭成员活动的关键场所，利用 4G/5G 或 WiFi 无线网络实时传输采集的数据，数据经过智能算法处理后，在云端实时展示家庭成员的活动状态，出现风险实时报警与风险预警。

智能分析

根据深度学习算法获得的人体的 18 个关键节点坐标，通过一种模板匹配法的支持向量机方法，实现对家庭成员姿态以及健康状况的监控与管理。支持向量机算法的关键是分类器的训练，分类器的训练过程包括图像预处理、归一化处理、特征提取与模式分类四部分。

(5) 涉及的关键技术

针对家庭健康监测过程涉及多物理、多源数据的问题，系统地研究数字孪生家庭健康拓扑体系和信息集成框架，建立以家庭为中心的数字孪生技术，突破该类型的数字孪生健康检测虚实融合理论方法及关键使能技术，如图所示。

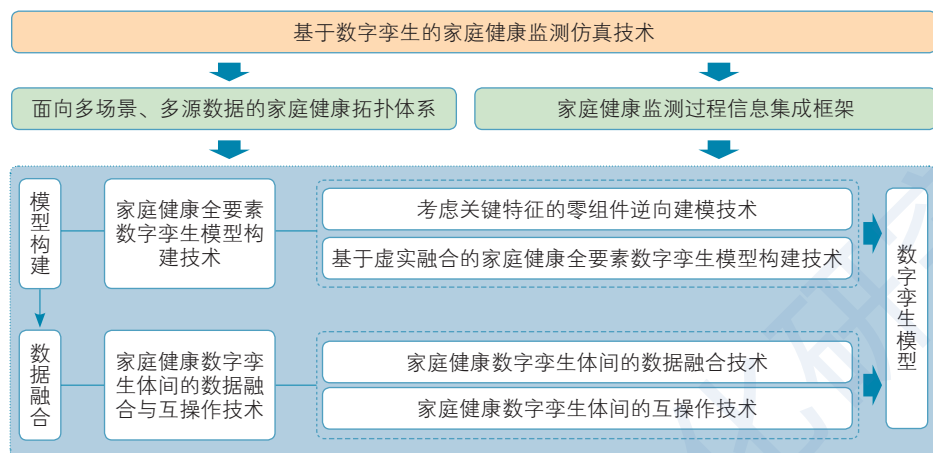


图 104 以家庭为中心的数字孪生技术

数字孪生家庭健康拓扑体系和信息集成

为了满足家庭健康监测需求，将基于 SysML 方法，研究结合家庭要素的多场景（涉及客厅、卧室、阳台等多个家庭场景）、多类别（独居老人、三口之家、四世同堂等）、多源数据（场景数据、人物数据、个体生理健康数据）的拓扑体系构建方法，实现多学科间的统一协同、数据一致。

基于机器学习方法研究家庭健康信息的结构化、模式化、知识化；基于 OSLC 方法研究家庭健康动态过程的信息的集成框架，将家庭健康要素都通过 URI 进行标识，用户通过请求能够获取通过标准形式表达的有用信息，并且允许事物间的链接，使得用户能够发现更多的信息。

家庭健康全要素数字孪生模型构建

针对物品遮挡和拍摄角度导致的家庭实体特征不足的问题，在非接触式视觉传感器与可穿戴设备配合的基础上，研究虚实映射的零组件逆向建模技术。分析集成模型与实体模型之间的映射关系，研究基于虚实

融合的家庭健康全要素数字孪生模型构建技术。家庭健康要素数字孪生模型主要包括五个部分，家庭场景、家庭人员、可穿戴设备、家庭活动及健康监测数字孪生模型，其余四个模型主要为健康监测过程提供服务，保证监测的高准确性和及时预警。从实际家庭的健康监测过程中获取数据，对数据进行处理，构建家庭健康要素数字孪生模型，包含模型层和操作层，通过虚拟空间的相关应用为家庭健康监测提供指导。

家庭健康数字孪生间的数据融合

针对家庭健康多源异构数据融合问题，利用 CNN 图像语义处理模型和基于 RNN 噪声异常信号提取模型处理非结构化数据，通过数据对齐、数据重组、数据排序技术处理非顺序性数据。研究多学科多专业家庭健康监测过程的数据融合方法、数据统一接口、过滤规则以及访问策略。针对家庭健康数字孪生间的互操作问题，将获得的零散结构化与顺序性数据通过知识融合与知识加工，构建出家庭健康监测关系图谱。通过基于知识图谱的交互和互操作接口实现与其他数字孪生的信息交互。

(6) 案例成效和意义

通过 5 个不同场景的人体站立位置的测量，通过相似三角形法，利用图像坐标计算的现实坐标点与实际场景中的物理坐标对比，5 个场景的误差平均为 4.8%。在人体骨架图的验证过程中，选择人体最基本的三种姿态（立、坐、卧），同时在桌椅遮挡 0%、30%、50% 的三种条件下，通过 5 个不同场景，10 个不同测试人验证测试。判断准确率由 18 个关键节点的坐标偏差平均求得（被遮挡的关键节点不纳入计算），具体验证数据如表所示。

表 11 人体骨架图的验证结果

姿态	遮挡率 (%)	测量次数 (n)	准确率 (%)
立	0	100	99.85
	30	100	99.76
	50	100	98.37
坐	0	100	99.32
	30	100	98.31
	50	100	97.35
卧	0	100	99.33
	30	100	98.23
	50	100	96.37

本案例介绍的数字孪生技术，正是利用非接触式的视觉传感器，在终端处理影像数据，不上传和存储任何视频和图片数据，确保用户隐私数据的安全，同时实现了家庭成员在社区生活状态的虚拟仿真呈现，数据由终端传感器多维动态采集，把脱敏数据虚拟呈现，包括定位、人体姿态与人体行为数据，完成记录、追踪、风险管理，实现对家庭成员健康状态的精细化管理，出现风险后实时报警与风险预警，解决了非接触式家庭成员安全与健康产品的隐私、数字孪生家庭健康拓扑体系和信息集成、家庭健康全要素数字孪生模型构建和家庭健康数字孪生间的数据融合等关键问题，有助于视觉健康产品的全面推广应用。

七、结论与展望

(一) 趋势的展望

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。

2. 标准化的趋势

随着 ISO、IEC、ISO/IEC JTC1、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/IEC JTC1 AWI 5618）、《数字孪生 应用案例》（ISO/IEC JTC1 AWI 5719）、《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及相关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。

3. 应用的趋势

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。

（二）支持与监管政策相关建议

1. 加强数字孪生标准化顶层设计与统筹推进机制

标准化工作是数字孪生技术与产业发展的基础和前提。现有的数字孪生标准化工作还处于起步阶段，涉及领域众多，工作协调难度大，因此首先需要加强标准化顶层设计，以“基础统领、应用牵引”为原则，基于国内外数字孪生技术和应用现状、数字孪生标准化现状，梳理数字孪生产业生态体系脉络，把握技术演进趋势和产业未来重点发展方向，扎实构建满足产业发展需求、先进适用的数字孪生标准体系。建议充分整合领域优质产学研资源，探索建立以企业为主体、产学研相结合的技术创新和标准制定体系，科学谋划、适度超前布局数字孪生标准化工作，营造开放合作的标准化工作氛围。

2. 加强数字孪生重点领域标准研制和应用示范

近年来，数字孪生技术进展迅速，可规模化、可商业化产品和应用层出不穷，在很多领域或行业取得了显著落地效果，同时也在过程中涌现出一大批理论与工程问题，迫切需要围绕数字孪生标准化需求，开展术语、参考框架、算法模型、技术平台等重点急需标准的研制，切实发挥数字孪生标准对产业和技术发展的支撑保障作用。鼓励相关行业协会、重点企业参与数字孪生标准宣传、意见征集和试验验证与应用，形成工作合力，建议优先在国家数字经济创新发展试验区^①建立数字孪生标准示范基地，提升标准孵化和研制质量，增加标准与技术环境的适应能力，提升重点领域数字孪生标准实施应用成效，探索建立标准研制与科技研发、行业应用高度融合的长效机制并逐渐在全国推广。

3. 加快数字孪生标准符合性测试工具和平台建设

数字孪生标准的实际应用效果需要制定科学的评判依据，建立健全数字孪生标准试验与符合性测试评估体系，明确测试范围和评估标准，形成数字孪生标准符合性测试规范与工具，并搭建数字孪生标准的符合性测试平台，提高测试执行的准确率和效率。加强专业化、专职化的标准符合性测试机构建设，鼓励适应数字孪生技术和产业发展且具有领域影响力和公信力的第三方检测认证服务机构发展，重点支持1-2家检测机构成为国家级标准符合性检测单位，提供数字孪生标准化符合性评测服务和技术指导，提升标准符合性检测服务供给能力和专业化水平。

4. 加快数字孪生公共服务平台建设

数字孪生的构建离不开数据的积累和优秀的运算性能，然而数据和算力所需大量资金投入也给很多企业设置了一道不低的门槛，对公共服务

^① 《国家数字经济创新发展试验区实施方案》

平台的建设需求也一日显著。加快数字孪生公共服务平台建设，围绕数字孪生技术验证、标准测试数据集开发、构建工具研制、数据开放与共享等需求，加快通用领域及典型行业数字孪生公共服务平台建设，探索数字孪生用户、产品供应商、工具开发方、第三方服务机构间的协同交流机制，鼓励各方基于现有基础不断加强相关服务能力，加深横、纵向产业链的交流合作与需求对接，加快集聚全球数字孪生领域的高端创新与服务要素，实现全方位的产业升级。

5. 成立数字孪生产业数据模型共享与交易平台

为更好地推动数字孪生相关机构间的接通互通，解决和破解发展难题，推动全产业链数据模型的高效流通及整体跃升，建议以政府引导、企业为主、开放合作、公平竞争为原则，汇聚数字孪生领域优势产业资源，建立数字孪生产业数据模型共享与交易平台。积极探索联合开发、收益共享、风险共担的契约关系，聚焦产业技术创新发展需求，支撑和引领数字孪生领域技术进步和产业发展，提升数字孪生产业核心竞争力。依托平台，基于区块链、人工智能等技术，构建共享与交易机制，搭建安全可信的交易、调用和监督体系及技术链，加强企业间的互通与数据模型要素流转，并借助数字孪生成熟度评估、数据模型质量评估标准及测试渠道，推进优质数字孪生、数据模型集群的推广与应用，建立引领行业发展的合作研发平台和科技成果转化基地，打造具有自主知识产权、知名品牌和国际影响力的产品与技术，推动数字孪生技术与实体经济融合发展。

（三）技术开发与应用相关建议

1. 加强数字孪生核心关键技术支持与突破

突破数字孪生基础理论及关键核心技术瓶颈，以算法为核心，以数据和硬件为基础，以大规模知识库、模型库、算法库的构建与应用为导向，

实施重大关键技术攻关工程，制定数字孪生共性技术开发路线图，重点提升信息建模、信息同步、信息强化、信息分析、智能决策、信息访问界面、信息安全等多种数字孪生关键技术，形成开放兼容、稳定成熟的技术体系。同时，通过梳理和细化标准化需求，以技术突破带动核心技术标准突破。

2. 加强数字孪生优秀解决方案 / 产品展示与推广

数字孪生当前已在部分企业取得了良好的应用成效，而且形成了一定的实践积累和平台化产品。然而，传统企业受限于内部本领域专业人才对数字孪生构建、链接、应用理论及难点了解有限，而且受限业内成套解决方案匮乏，无法准确反馈和把握企业对数字孪生构建的需求及意义，有必要通过梳理数字孪生在典型行业的优秀案例并形成案例集，建设开放性实验室，推出优质培训课程等方式加强数字孪生优秀平台或产品的展示与推广，打破数字孪生开发企业、研究院所、高校与各领域企业间的沟通屏障。

3. 加强数字孪生产业开放与交流平台建设

目前，优质行业企业与数字孪生头部企业协同创新不足。开放的数字孪生开放与交流平台是推动数字孪生技术在各行业融合应用的重要基础设施，能够避免企业在建设数字孪生过程中从零开始或重复建设，也可降低数字孪生项目实施方的设计开发成本。此外，通过数字孪生在各企业项目的落地实施还可不断反哺领域数字孪生的完善，提升实体覆盖率及典型领域模式的完备性，进而实现平台质量与影响力的提升。此外，我国各行业随已存在一批对行业特征理解深入、自主研发能力强、且拥有丰富数据筛选经验的企业，在数字孪生相关产品和解决方案开发及实施中均具有较大潜力。但受限于企业无法与优秀数字孪生厂商进行深度对接，大量需求和技术无法落地，限制了企业在数字孪生领域探索的积极性，

并拉高了企业的整体投入成本。

4. 加强数字孪生与其他技术的融合

人工智能、大数据、云计算、AR/VR/MR 等技术在构建数字孪生和应用数字孪生时均具有重要意义。然而，数字孪生自动化构建和智能化应用仍处于发展初期，整体发展速度依然有限。有待加速推动拟在数字孪生方向上投入资源的企业、高校和研究院探索和研究更符合数字孪生相关业务的基础理论、集成融合技术及方法学，以支撑数字孪生相关技术更广泛的落地与应用。

5. 加强数字孪生相关人才培养

数字孪生和其他领域相关技术不同，在数字孪生构建的各环节都需要大量业务模型（数据模型或机理模型）、领域知识的摄入及业务专家的参与。初级技能数字人才培养跟不上需求发展；具备数字技术与行业经验的跨界人才供不应求；顶尖数字人才极其稀缺。有待持续加强同时具备数字孪生与其他领域知识储备的交叉复合型人才，为数字孪生应用与企业需求及业务场景的高度匹配提供保障。