

数字孪生城市的驱动力、功能框架与建设路径

The Driving Force, Functional Framework and Construction Path of Digital Twin Cities

陈才 张育雄 张竞涛 孟楠 CHEN Cai, ZHANG Yuxiong, ZHANG Jingtao, MENG Nan

摘要 在城市资源、环境、物理空间发展约束日益增加的新常态背景下,以数字孪生等为代表的数字技术正加快推进城市数字化转型,对城市经济、社会、生态等进行体系重构、流程再造、能力重塑。数字孪生城市成为城市数字化转型的前沿方向和重要实践,背后是转型需求、技术演进、政策引导和产业促进4大驱动力。提出涵盖数字设施、底座平台、场景建设,以及组织机制、标准规范、运营支撑、安全保障体系的数字孪生城市发展框架。在深入分析数字孪生城市认知、技术、模式、安全等4方面挑战的基础上,从分类规划有序布局、坚持需求引领建设场景、强化底座平台赋能、注重数据安全保障与加快产业培育等方面,提出符合我国城市数字化转型发展要求的数字孪生城市规划策略与发展建议。

Abstract Under the background of the new normal with increasing constraints on the development of urban resources, environment, and physical space, digital technologies represented by digital twins are accelerating the digital transformation of cities, and carrying out system reconstruction, process reengineering, and capacity reshaping of urban economy, society, and ecology. The digital twin city has become the frontier direction and important practice of urban digital transformation, behind which there are four driving forces: transformation demand, digital technology, policy guidance and industry promotion. It also proposes a digital twin city development framework covering digital facilities, base platforms, scene construction, organizational mechanisms, standards and specifications, operational support, and security systems. On the basis of in-depth analysis of the challenges in four aspects of digital twin cities, this paper puts forward digital twin city planning strategies and development suggestions that meet the requirements of the country's urban digital transformation and development.

关键词 数字孪生城市;城市数字化转型;功能框架

Key words digital twin city; urban digital transformation; functional framework

文章编号 1673-8985 (2023) 05-0011-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. sup. 20230503

作者简介

陈才

中国信息通信研究院产业与规划所
教授级高级工程师,博士,chencai@caict.ac.cn

张育雄

中国信息通信研究院产业与规划所
高级工程师,硕士

张竞涛

中国信息通信研究院产业与规划所
工程师,硕士

孟楠

中国信息通信研究院产业与规划所
工程师,硕士

1 数字孪生城市的建设背景与内涵

当今世界,超过半数的人口居住在城镇地区,城市已成为现代经济社会发展和社会活动的主要载体。城市经济产出目前已占全球GDP的约80%以上,到2050年全球城镇人口的占比将上升至68%^[1]。联合国《2030年可持续发展议程》提出“建设包容、安全、韧性和可持续城市和社区”的目标^[2],城市可持续发展目标的实现,既依赖数字技术的创新与赋能,也需要政策支持与机制变革。

数字孪生城市(digital twin city)正是面

向未来可持续发展提出的城市规划建设新理念与新模式,是数字技术革新与城市运行机制创新的有效结合,是城市升级的可行路径。数字孪生城市通过物理城市与数字城市的精准映射、虚实融合、软件定义、智能干预,实现城市全要素的数字化、全状态的实时化,解决城市规划、设计、建设、管理、服务闭环过程中的复杂性和不确定性问题,驱动城市治理模式、服务模式、运营模式快速变革,促进城市生产协同高效、数字生活便捷包容、生态环境绿色低碳,助力城市可持续发展^[3]。

1.1 全球数字孪生的当前态势

目前,数字孪生城市已成为城市转型发展、构筑城市竞争新优势的战略选择和重要路径。中国、美国、欧盟、英国、法国、新加坡等多地区均发布相关政策,引导数字孪生城市探索建设。

数字孪生应用向经济社会各领域全面延伸。从国内应用实践看(见图1),在大基建政策和投资带动下,制造、能源、城市/园区、交通、水利领域孪生应用成为现阶段集中度和热度最高的板块,其中数字孪生技术在制造领域的应用占比高达10%,在能源方面的应用占比达9%^[4]。

从海外应用实践看(见图2),在城市可持续发展理念引导下,公共服务/管理、社区发展,以及智能建筑孪生应用较热,在统计案例中占比达到40%以上^{[5]12}。

1.2 数字孪生城市的内涵特征

从全球来看,智慧城市数字孪生体、数字

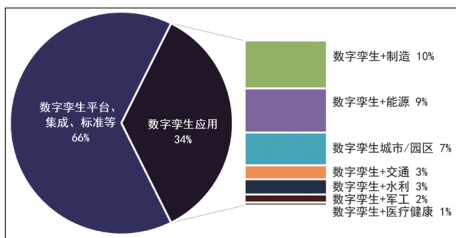


图1 中国2021—2022年数字孪生典型实践案例情况

Fig.1 The typical practice cases of digital twins in China from 2021 to 2022

资料来源:中国信息通信研究院、世界经济论坛(WEF)。

孪生城市领域的应用得到多国学者的广泛关注。2002年,Michael Grieves^[6]首次提出“镜像空间模型”(Mirrored Spaces Model)概念,为数字孪生的概念提出奠定了基础。2017年,佐治亚理工学院Neda Mohammadi等^[7]提出“智慧城市数字孪生体”的概念,智慧城市数字孪生体是一个智能的、支持物联网、数据丰富的城市平台,用于模拟真实城市中发生的变化,以提升城市的韧性、可持续性和宜居性。2019年, Qiuchen Lu等^[8]提出面向建筑和城市领域的数字孪生系统架构,涵盖数据采集层、传输层、数字建模层、数据与模型集成层和应用层,并在英国剑桥大学西剑桥校区开展数字孪生试点,为资产管理者、政策制定者和研究人员提供参考。Fabian Dembski等^[9]在德国Herrenberg构建了城市数字孪生模型,融

合了建筑环境3D模型、街道网络模型、风流模拟等数据,在城市规划、市民参与等领域实现了数字孪生应用。Petrova-Antonova D^[10]提出“六阶段”构建数字孪生城市的方法论,包含创建CIM模型、数据交互、数据聚合、分析、洞察、辅助决策6个阶段,助力城市实现数据驱动决策。

从国内来看,产学研围绕数字孪生单体、数字孪生技术等提出多重观点,为数字孪生城市研究提供了参考。2017年,中国信息通信研究院在雄安新区智能城市规划中首次提出“数字孪生城市”概念,迅速得到政府、产业界、科技界的高度关注与认可,成为智慧城市规划建设的新方向和新路径。2019—2020年,中国信息通信研究院提出数字孪生城市涵盖感知标识、地理信息、建模渲染、算

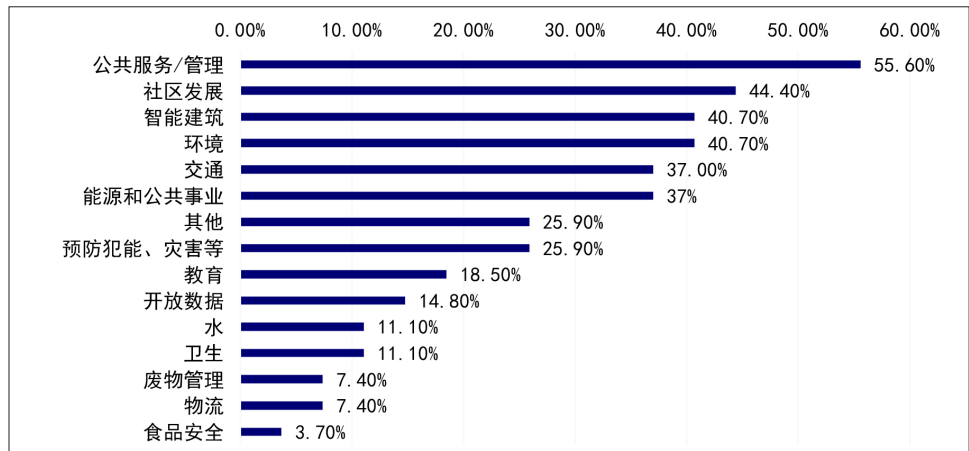


图2 全球数字孪生应用分布情况

Fig.2 Distribution of global digital twin applications

资料来源:中国信息通信研究院、世界经济论坛(WEF)。

表1 全球主要经济体数字孪生的相关政策

Tab.1 Digital twin related policies of the world's major economies

经济体	时间	政策名称	政策内容
英国	2023年6月	2035年交通数字孪生愿景和路线图	路线图概述了4个战略重点:战略和创新、有利环境、人员技能和文化、技术和数据。这些重点领域有助于为英国多式联运网络打造可信的互联数字孪生生态系统
欧盟	2023年3月	《数字欧洲计划之2023—2024年工作计划》	通过支持“数字孪生地球”倡议,为更多用户提供额外服务并确保与新的数字孪生技术的互操作性,建立绿色协议数据空间和数字产品护照,实现向循环经济的过渡
中国	2021年3月	《国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	探索建设数字孪生城市。完善城市信息模型平台和运行管理服务平台,构建城市数据资源体系,推进城市数据大脑建设
美国	2020年2月	《工业应用中的数字孪生:定义、行业价值、设计、标准及应用案例》	从工业互联网的视角阐述了数字孪生的定义、商业价值、体系架构以及实现数字孪生的必要基础,通过不同行业实际应用案例描述工业互联网与数字孪生的关系
英国	2020年4月	《英国国家数字孪生体原则》	构建国家级数字孪生体的价值、标准、原则及路线图,以便统一各独立行业开发数字孪生体的标准,实现孪生体间高效、安全的数据共享,释放数据资源整合价值
新加坡	2015年	《智慧国2025》	由国家研究基金会支持提出虚拟新加坡项目,与达索合作开发,利用3D城市模型解决城市能耗、废物处理、社区导航、交通规划、疾病传播等问题

资料来源:中国信息通信研究院整理。

法仿真、虚实交互5大技术^[11],呈现9大核心能力^{[12]15},为各地数字孪生城市建设提供了重要参考。李德仁^[13]提出数字孪生城市是数字城市的目标,也是智慧城市建设的新高度,数字孪生赋予城市实现智慧化的重要设施和基础能力,将引领智慧城市进入新的发展阶段。工业4.0研究院^[14]提出“数字孪生水平”(Digital Twin level, DTL) 5等级划分,分别为几何模型、数据描述、数据融合、动态孪生和自主孪生,为数字孪生单体精细度划分提供了参考。陶飞等^[15]提出数字孪生五维度结构模型,张新长等^[16]提出数字孪生城市的4大支撑技术,为各地各行业推动数字孪生城市建设提供了参考。

笔者认为,数字孪生城市是通过数据标识、物联感知、网络连接、智能控制等技术,在数字空间再造一个与物理城市相互映射的数字城市,全息模拟、动态监控、实时诊断、精准预测现实城市的运行状态,推动城市全要素数字化、全状态实时化,准确反映物理实体城市状态的同时,可精准操控、智能优化现实城市,实现物理城市与数字城市平行运转、协同交互的城市发展新形态。数字孪生城市是智慧城市发展的新型支撑技术体系,是城市智能运行持续创新的前沿先进模式,具备精准映射、分析洞察、虚实融合、智能干预4大特点^[5]。

1.3 我国数字孪生城市发展背后的4大驱动力

1.3.1 转型需求驱动,城市转型升级亟待科技赋能

改革开放以来,我国经历了世界历史上规模最大、速度最快的城镇化进程,同时也积累了一些问题。在供给侧,我国的超大城市已有资源承载力、中小城市经济社会集聚力均面临挑战,部分城市老旧房屋和市政管线存在安全隐患。在需求侧,政企民各方对城市生产生活、城市治理精细化、城市服务便利化、城市应急响应敏捷化等提出更高需求。以数字孪生技术等为代表的新一代信息技术,缓解城市发展中人口膨胀、交通拥堵、资源紧张等“城市病”问题,满足政企民对城市发展

多元化的需求,为数字孪生城市发展奠定现实需求基础。

1.3.2 数字技术驱动,集成创新时空深度融合日渐成型

从技术赋能发展历程看,我国数字技术赋能城市转型大致经历4个阶段。一是表单数字化(2008—2012年),驱动力来自医疗、交通等行业条线信息化、数字化建设,企业引导带动。二是业务流程数字化(2012—2016年),驱动力来自以数字技术驱动业务流程融合和系统集成,“一网通办”“互联网+城市服务”兴起,加速数字技术全面应用。三是决策数字化(2016—2020年),以数据分析驱动为主,通过大数据等技术挖掘数据背后的复杂规则,推动决策从经验化向自动化、智能化转变。四是全面数字化(2020年之后),以数字孪生驱动为主,在单行业数字化水平较高、单项技术应用较深、静态数据汇聚较全的基础上,逐步向业务时空化、技术集成化、数据实时化发展。通过推进空间孪生、单体孪生、关系孪生、流程孪生等,带动城市物理空间、数字空间深度融合,进入以“数字孪生驱动”的城市数字化转型新阶段。

1.3.3 政策引导驱动,数字中国蓝图下的政策协同支持

我国国民经济和社会发展“十四五”规划纲要中明确提出“探索建设数字孪生城市”。住建部、自然资源部、水利部等多部委加强了对数字孪生产业、人才、技术、应用等政策支持力度。工信部联合五部门印发《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022—2026年)》,提出强化虚拟现实与数字孪生等技术相结合,在工业生产、文化旅游、智慧城市开展应用。水利部提出“数字孪生流域是智慧水利建设的核心和关键”,并发布《数字孪生流域共建共享管理办法》,明确具体建设内容。自然资源部印发7个新型基础测绘与实景三维中国建设技术文件。国家能源局、铁路局也提出要加快数字孪生等前沿技术的应用。国家多部委政策支持,为数字孪生城市建设提供了良好的政策环境。

1.3.4 产业促进驱动,产城融合提供创新孵化土壤

以数字孪生城市为抓手,驱动城市设施互联、数据互通、经济转型、产城融合,为各地数字孪生城市提供了有效的参考路径和广阔的发展空间。我国数字孪生城市的相关技术企业数量保持快速增长趋势,已成为带动产业发展、促进市场主体壮大的新兴力量。2015—2018年,我国数字孪生企业数量保持每年50—60家快速增长。2019—2021年,企业增长数量高达100余个。同时,深圳、上海、苏州等地积极布局数字孪生新赛道,以数字孪生城市促进产城融合发展:深圳市发布《数字孪生先锋城市建设行动计划(2023)》,加大对涉及数字孪生城市建设的顶层设计、标准研究、科研课题、工程项目、人才培养等保障;上海市临港数字孪生城获批数字化转型市级示范区,“数字孪生”技术已被应用到交通、管网监测等场景中;苏州工业园区成立数字孪生城市创新坊,共建数字孪生园区创新产业基地。

2 数字孪生城市的功能框架

2.1 数字孪生城市的运行逻辑

数字孪生是指数字实体和物理实体之间的相互共生状态。数字孪生技术是一种整合了数据、模型和物理设施的综合集成技术。数字孪生城市是通过数字孪生技术收集一个城市实体的数字孪生体^{[17]127}。本文从信息流的视角,充分考虑现实城市与数字空间城市的虚实共生,按照信息流从实到虚、信息重组(分析洞察)、以虚控实的全过程,将数字孪生城市的运行逻辑分成4部分,即现实城市的数字设施域、数字空间城市的数据域、能力域和业务域(见图3)。

从现实世界的设施域看,有助于实现城市状态全要素的监测与优化调控。现实城市是有形的、动态变化的,数字孪生城市需要不断采集、监控、管理城市各类数据。数字设施作为重要的数据生成源头,是建设数字孪生城市的首要条件,涵盖城市中一切采集、承载、传输、计算数据的数字设施。依托数字设施,实现城

市静态可视化表达呈现,以及城市动态变化的实时感知,并高效安全地反馈到现实城市。

从数字空间的数据域看,依托全域多维数据融合数字孪生城市底座。由于城市数据是多维度的、异构的、混杂的,需要通过系统全面的数据治理才能得以应用。全域数据融合是建设数字孪生城市的基础。城市3D模型数据、物联传感数据、视频数据、业务系统数据等海量数据,需要围绕城市对象、城市业务流程等,融合重构数字孪生体、主题数据仓、数字孪生业务等,实现数据跨域共享,便于有效组织开发利用。

能力域方面,通过数字技术综合集成,形成数字孪生城市统一支撑能力。数字孪生技术是一项综合集成技术,涉及要素图形可视化、时空跟踪分析、虚实人机交互、要素关系分析、故障预测预警等诸多技术能力,关系到GIS、BIM、IOT、VR/AR、AI等多项技术交叉集成。技术是支撑业务应用场景的基础保障,如何“松散解耦”各类技术要素,并搭建开放式支撑平台,支持各个利益相关者之间的高效协作,成为建设数字孪生城市的重要一环。

业务域方面,依托规则与机制实现城市规划决策仿真推演。在数字空间中仿真推演并预测城市交通、能源、应急、城管、水利、管网等运行状态,是建设数字孪生城市的最终目的。但城市各领域运行都有其业务规则、管理制度和运行机理模型。以消防救援为例,数字孪生城市系统既要分析火势变化机理模型,又要理解消防业务流程和制度办法,还要分析灾害影响人群等,最终制定可行的消防救援方案,反馈指导现实城市决策、调度与运行,每一业务场景都是一个复杂的推演决策系统工程。

2.2 数字孪生城市的总体规划框架

数字孪生城市还处于发展的初期总体框架在持续完善中。Tianhu Deng等^{[17][30]}提出,数字孪生城市由基础设施建设、城市大脑平台和创新应用场景组成,城市大脑平台是城市运营的智能中心,包括基于BIM+GIS的地理信息平台、城市数据资产平台、智能应用管理平台、基础设施信息感知与反馈平台。Ehab

Shahat等^[18]确定了5大主题,即数据管理、可视化、动态感知、计划与预测以及集成与协作。

本文基于智慧城市技术演进、需求迭代与机制变革,充分考虑数字孪生城市的运行逻辑,提出数字孪生城市的“三横四纵”的七要素总体规划架构,其中数字基础设施、数字孪生中枢、数字孪生应用是“主体规划框架”,组织机制、安全防线、标准规范、运营体系是“支撑保障支柱”(见图4)。

2.2.1 主体规划框架

数字基础设施,助力现实城市精准映射至数字空间。涵盖采集设施、连接设施、计算设施等3大类数字基础设施,承载着城市全要素数据的采集生产、传输与分析计算。采集设施可获取城市风貌、建筑、道路、山川等静态数据,以及城市车辆、行人、时空位置、压力、温湿度等动态变化数据,主要包括传感设施、视频监控设施、测绘设施等。连接设施可将视频、音

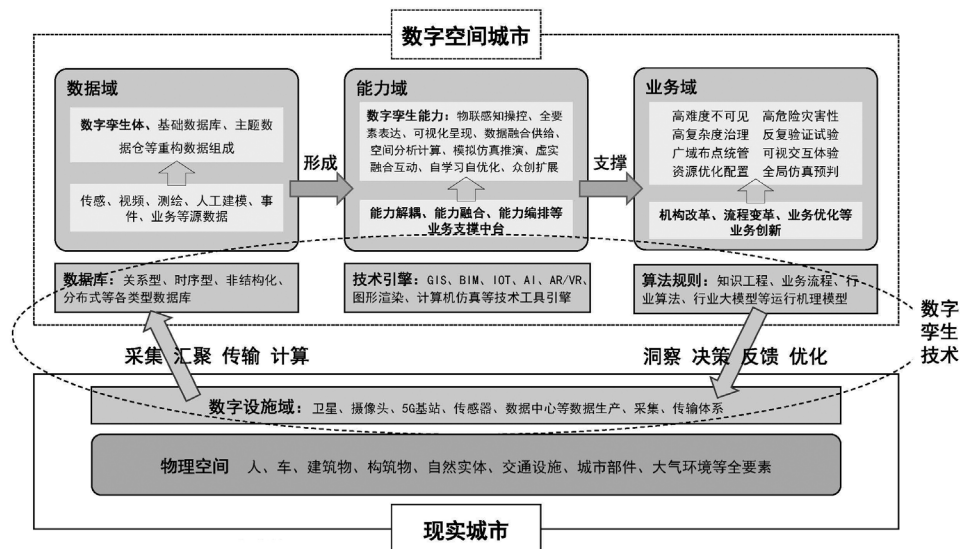


图3 数字孪生城市运行逻辑
Fig.3 Digital twin city operation logic

资料来源:笔者自绘。

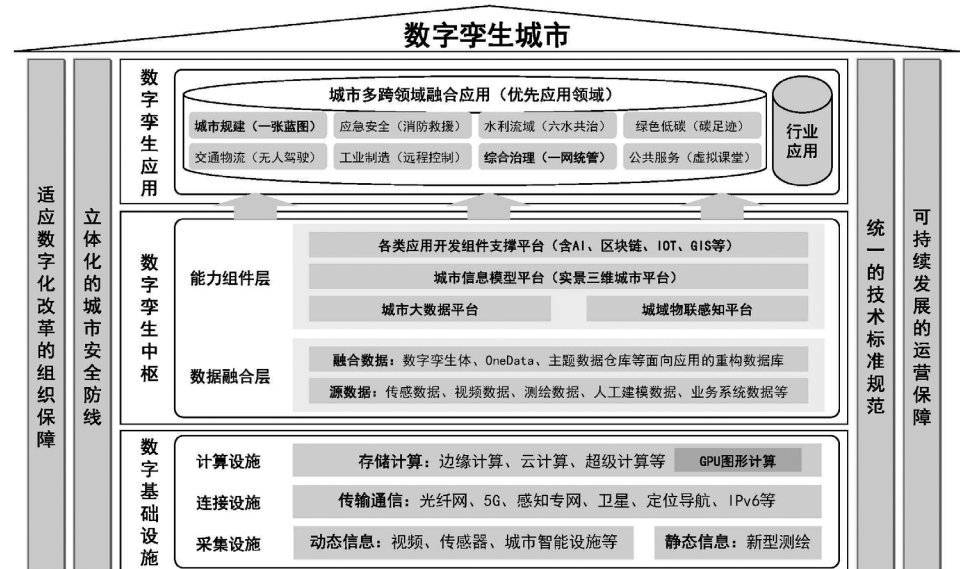


图4 数字孪生城市总体规划框架
Fig.4 Digital twin city planning framework

资料来源:笔者自绘。

频、感知、指令等数据传输到数字孪生中枢平台,主要包括光纤网络、移动网络、感知专网、卫星导航设施等。计算设施可满足数字城市的数据分析、可视呈现、仿真推演、系统运行等需求,包括面向城市的边缘计算设施、云设施及部分超算设施,其中要大力发展以GPU为代表的智能算力,为数字孪生城市实时呈现与仿真提供基础支持。

数字孪生中枢平台,形成核心能力全面赋能数字城市发展。数字孪生中枢作为转化城市数据要素价值、赋能业务场景构建的综合载体。一方面,通过数据融合,构建可视化的数据底座,将源数据转化为支撑业务场景仿真推演需要的“数字孪生体数据”,融合城市对象的对象标识、几何模型、时空位置、运行状态、行业属性等全维度数据。另一方面,依托城市已有的IOT平台、大数据平台、AI平台等分析计算平台,通过能力重构和系统集成,对上层业务提供可视化、时空分析、虚实交互、仿真推演、自学习等核心能力。

数字孪生应用场景,是实现城市规划建设管理运行各领域仿真推演的舞台。数字孪生城市建设目的之一是低成本、高效安全地仿真推演现实城市交通、能源、城管、应急等运行状态,优化现实城市运行效率,提升服务质量。数字孪生应用将更突出基于“数据融合”的多跨领域融合应用,实现城市治理能力现代化,如综合治理、应急安全、交通物流、城市规建、水利流域、绿色低碳、工业制造、公共服务等典型场景,需要多业务协同、多部门协调的应用场景。

2.2.2 支撑保障支柱

一是确保组织机制创新,适配数字孪生技术实现双轮驱动发展。数字孪生城市是典型的系统工程,需要协调技术、业务、数据等多类要素资源,以及与之相关的多方主体,组织机制创新,要开展部门大部制业务机构改革,建立总体设计部、实施孪生攻关专班、推进首席信息官和首席数据官等机制,以适应数字孪生扁平化、高协同性的建设需求。

二是高标准构建城市安全防线,保障数

据要素合规流通、系统安全互联。数字孪生城市建设需要跨行业数据深度融合、跨部门业务系统互联互通,数字空间的城市运行安全隐患与风险挑战日益增大。没有数字孪生城市安全,即难保城市安全,要充分利用区块链、隐私计算、数据非线性变化等脱敏、安全流通等技术加持,也要形成与之匹配的数字安全管理机制。

三是重视建立源头技术标准规范,促进多方快速协同、业务走深拓广。数字孪生城市建设涉及大量的数据互认互信、异构数据融合、系统接口、技术集成、业务流程打通等协同工作,技术标准规范的重要性逐渐显现。通过建立涵盖数据、网络、系统、平台等方面的体系化技术标准规范,推动场景应用迈向融合互通、价值释放的深层次应用。

四是建立可持续运营体系,推动由点及面、迭代式建设发展。数字孪生城市建设是一项长期性的、艰巨的建设工作。数字设施需要不断完善、增强,中枢平台需要常见迭代演进和升级,应用场景需要由浅入深、由点及面的建设。建立完善的运营体系,要建立合理完善的运营模式、可持续投资收益机制、专业技术运营队伍等,形成可持续发展局面。

3 数字孪生城市面临的挑战

3.1 对数字孪生新生事物的认知不足

对数字孪生系统过度乐观与盆景式展现观念并存。一方面,对数字孪生系统过度乐观,忽视了数字孪生城市在现实应用中的实际难题,一蹴而就反而带来负面影响。另一方面,认为数字孪生城市是盆景式展现的观点,需要有更全面的理解。数字孪生城市并非完美,但伴随技术演进与机制创新,数字孪生城市潜力逐步释放,可高效为城市管理者提供更全面、准确的信息以优化决策。

注重数字孪生场景价值挖掘而忽视“社会”孪生。部分城市过于注重对城市实景的精细化三维建模重现,同等重要的实时仿真、云端建模、虚实互动、智能操控等未能得到相应

重视,也缺乏对应用需求与目标的深入分析,导致孪生技术城市业务发展脱节。

此外,对数字孪生城市普遍存在重“物理”属性、轻“社会与环境”属性的现象^[19]。构造的数字孪生城市模型通常基于建筑物、街道和自然环境功能的测量数据,而缺乏对城市中的人类交互、活动及社会习俗等社会属性进行建模分析。

3.2 集大成的技术体系亟待新能力培育与国产化

数据缺乏有效标准化指引,异构融合依然困难。在数字孪生数据采集源头,过去往往忽视对物理传感设备数据采集的尺度、更新频率、存储格式等进行源头规范^[20]。此外,在数字孪生城市中,异构数据融合问题一方面涉及数据的空间和时间融合,另一方面,数据往往以“多图层与兴趣点”叠加式融合为主,缺乏对天然对象化、事件化的城市业务的综合式融合,造成孪生数据应用难^{[12][42]}。

技术路线锁定带来能力与生态绑定,难以解耦服务。由于不同技术供应商之间缺乏统一的标准和互操作性,数字孪生城市系统中的技术生态往往存在着高度的封闭性和紧密绑定。这使得客户在尝试切换到其他供应商的系统时面临着巨大的技术和成本挑战,从而限制了市场竞争,加大了客户的投资风险。例如部分技术供应商利用独有数据格式与技术平台,构建私有生态,限制了其他技术供应商与其进行集成或替换,导致互操作性问题。

数字孪生渲染与建模等核心环节的国产化能力不足。当前以计算机图形学为基础的图形渲染中,很多核心技术和关键算法依然摆脱不了依赖局面,例如以CAX为代表的基础建模与设计软件、以UE/Unity为代表的渲染引擎等。此外,从产业链角度看,目前我国数字孪生城市领域的上下游产业链还有待完善。从图形算力支持、数据采集、模型建立和决策优化,都亟需配套的技术和服务支持与协同合作。

3.3 协同治理机制与商业模式存在短板

分而治之的模式亟待形成多部门协同统一治理。当前城市物理空间的“分部而治、分业监管”，在城市数字孪生空间亟需“统一治理、协同监管”。例如，实景三维工作与城市信息模型、建筑信息模型等工作之间，还有部分交叉甚至不一致。再如，地方城市中“人车物”等要素的体系化表达，在不同部门管理下，已然各自形成不同的数据编码、数据表达范式等，若缺乏有效协同的管理机制，将造成数字孪生、CIM、时空信息平台等数字基础设施的重复投资与浪费。

政企协同不足导致缺乏商业化长效运营机制。数字孪生城市的商业模式尚不清晰、融资渠道单一、价值挖掘深度不足等成为非技术因素排名前3的关注因素^[20]。目前孪生城市商业模式依赖政府投入，相对单一：数字孪生城市的数据采集、模型构建等投入，与业务价值增值产出难成正比。政府财政投入较多，小规模领域试点应用与大规模数字孪生技术应用突破之间，其成本和收益、研究和应用间的差距短期内尚未能弥合。

3.4 集中攻击风险与数据安全风险加大

数据集聚后带来系统性攻击风险增大。数字孪生要承载城市级多源异构数据的高效存储、加工和呈现，数字孪生与物理世界的“孪生性”“开放性”使得网络攻击的目标范围变大、损害也更具关联性。随着数字孪生城市虚实互动的演进与不断深化，网络安全、数据安全、平台安全保障体系变得愈发重要。从基础设施到服务安全，数字孪生城市数据的多层次安全保障体系亟待完善。

公民数据隐私面临挑战。结合元宇宙、AIGC等数字技术，数字孪生城市正演化成为一个高并发、大规模、充分开放的复杂巨系统，深度融入人们的生活、生产中。通过数字孪生城市使用或者生成的数据可深入了解人们的行为、偏好和其他敏感信息，如果受到非正常使用或恶意泄露，将对个人、企业、机构组织等产生负面影响。

4 推进数字孪生城市建设的路径建议

4.1 坚持开放创新，形成面向数字孪生体的分级分类数字孪生城市系统

引入复杂网络、系统论等理论，构建基于数字孪生体的巨系统。要理性认识数字孪生系统，更加客观和全面地看待数字孪生系统的发展潜力与局限性。城市作为一个开放复杂的社会物理系统，是持续生长、开放发展的有机体，不应局限在物理空间。可以引入复杂网络理论的多层网络结构概念，从不同的尺度进行关系建模，让市民作为人体传感器记录交互习惯、当地环境，为孪生城市更好地分析决策奠定基础^[21]。此外，要引入系统论思想，将同一实体的不同维度模型数据汇聚、融合在同一数字孪生体上，按照分级分类原则，将城市全要素实体充分表达，进而实现城市孪生体的软件定义和资产化管理。

面向不同层级城市形成分类规划、分级引导的孪生城市规划体系。省会型的数字孪生城市建设应发挥区域示范引领和辐射带动作用，坚持高端高位发展，注重智慧创新孪生枢纽建设和品牌打造。地级市数字孪生城市建设应树立产城融合、以城带产等理念，提高城市产业发展、规划建设和城市服务的智慧化水平。县域城市数字孪生城市建设注重因地制宜，特色优先，尽量复用中心城市数字基础设施，积极推进公共服务延伸。新城新区数字孪生城市建设要积极创新孪生城市运行机制，以机制改革为引领，提升新区数字科技应用水平和管理服务效能。

4.2 坚持需求导向，引领城市因地制宜释放数字孪生应用价值

坚持需求引领，并坚持应用导向、以人为本，优先开放推进一批数字孪生成效显著的综合场景。一是高难度不可见场景，如地下管网、地下水保护等地下空间场景。二是高危险灾害性场景，如火灾、爆炸、暴雨、城市内涝等应急演练场景，提高城市安全韧性。三是高复杂度治理场景，如复杂交通路口疏导、社区综合治理等复杂场景。四是反复验证试验场景，如城

市规划布局优化、碳排放政策优化、智能供热流程优化等。

构建场景成熟度模型，迭代推进场景建设。分级形成外观孪生、实景呈现的初级应用；机理孪生、点状应用的二级应用；孪生互动、综合集成的三级应用；智能优化、动态推演的四级应用；虚实共生、创新引领的五级应用。并基于场景成熟度模型，开展数字孪生城市场景遴选，建立场景机会识别、场景创新研发、场景应用示范等环节的全流程数字孪生城市应用场景工作体系，加强场景示范推广和动态评估评价。

积极探索构建数字孪生商业化可持续运营机制。支持建立面向数字孪生城市的投资基金，成立数字孪生平台和孪生体资产运营公司，开展数据资产运营、孪生技术服务，提供可互操作、安全调用的渲染仿真等云服务，以满足数字孪生的SAAS服务需求。根据数字孪生城市模型的不同精度，将孪生服务有序开放给产业界，促进数字孪生模型二次开发应用。

4.3 强化主流兼容，提升能力解耦的孪生底座平台全局赋能作用

构建能力解耦、场景赋能的数字孪生底座平台。数字孪生城市底座平台应采用能力解耦和模块化设计的方法，将不同的功能和服务拆分为独立的模块，针对物联感知、全要素表达、可视化呈现、数据融合供给、空间分析计算、仿真推演、虚实交互、自学习自优化等数字孪生城市核心能力，通过API等接口进行连接，形成一个灵活、可扩展的系统，推动不同功能模块的独立升级和迭代演进，为上层应用提供基础“功能组件”和兼容主流的开发接口。同时需要基于统一的数据结构和语义模型，进行各类能力引擎的调用与融合，形成协同赋能的支撑能力。

横向融合形成多部门协同的底座共用模式。统筹推进数字孪生城市组织体系和管理机制，避免条线分割的单兵作战，逐步形成由城市大数据管理部门统一扎口，统一征集各委办局数字孪生城市底座服务的共性需求，避免出现

城市信息模型CIM平台、时空信息GIS平台等重复建设、需求过度满足等问题。大数据管理部门统一管理底座平台建设、共性赋能、数据治理与标准框架,由业务局分头推进领域数据采集、提供底座业务需求、共用底座核心能力,形成底座共用、需求共提、成效共享的模式。

4.4 坚持安全发展,推进国产化加快培育数字孪生城市新产业

强化网络安全及数据安全。分级分类构建孪生城市数据体系,确保分布式安全保障与个人隐私保护。面对全域全时下构建的数字孪生城市,逐步建立起针对不精度、密级数据的分级分类数据资源体系和监管机制。同时,要充分采取数据去标识化、脱敏等技术手段,并建立有效的用户隐私协议,以最大程度地减少个人身份的识别与泄露风险。

加快数字孪生技术国产化进程与产业培育。在数字孪生渲染、城市仿真推演等领域,要进一步加大基础技术、底层技术研发投入,以龙头企业为创新主体,组建产学研用相结合的技术创新联合体,通过集中优势资源,强强联合,向底层算力设施、渲染引擎、实时仿真等领域创新突破,支持国产厂商研发商用数字孪生产品。同时,以大型城市数字孪生城市建设为试点载体平台,培育建立基于信息技术创新的完整数字孪生产业链支持体系,加快推进开源开放模式,加速创新生态的发展壮大。

5 结语

本文提出涵盖数字设施、底座平台、场景建设,以及组织机制、标准规范、运营支撑、安全保障体系的数字孪生城市发展框架。在深入分析数字孪生城市认知、技术、模式、安全等4方面挑战的基础上,从分类规划有序布局、坚持需求引领建设场景、强化底座平台赋能、注重数据安全保障与加快产业培育等方面,提出符合我国城市数字化转型发展要求的数字孪生城市规划策略与发展建议,以期为我国数字孪生城市相关研究提供思考和启发。

参考文献 References

- [1] 世界银行. 城市发展2022[EB/OL]. (2001-01-01) [2023-08-01]. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment>. World Bank. Urban development 2022[EB/OL]. (2001-01-01) [2023-08-01]. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment>.
- [2] 联合国. 2030年可持续发展议程[R]. 2015. United Nations. 2030 Agenda for sustainable development[R]. 2015.
- [3] 张竞涛,陈才,崔颖,等. 数字孪生城市框架与发展建议[J]. 信息通信技术与政策, 2022 (12): 2-11. ZHANG Jingtao, CHEN Cai, CUI Ying, et al. Digital twin city framework and development proposals[J]. Information and Communication Technology and Policy, 2022(12): 2-11.
- [4] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市产业图谱研究报告[R]. 2023. China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin city industry map research report[R]. 2023.
- [5] 世界经济论坛,中国信息通信研究院. 数字孪生城市:框架与全球实践洞察报告[R]. 2022. World Economic Forum, China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin city framework and development suggestions[R]. 2022.
- [6] GRIEVES M. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking[M]. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [7] MOHAMMADI N, TAYLOR J E. Smart city digital twins[C]//2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Piscataway: IEEE, 2017.
- [8] LU Q, PARLIKAD A K, WOODALL P, et al. Developing a dynamic digital twin at building and city levels: a case study of the West Cambridge campus[J]. Journal of Management in Engineering, 2020, 36(3): 05020004.
- [9] DEMBSKI F, WÖSSNER U, LETZGUS M, et al. Urban digital twins for smart cities and citizens: the case study of Herrenberg, Germany[J]. Sustainability, 2020(12): 2307.
- [10] PETROVA-ANTONOVA D, ILIEVA S. Digital twin modeling of smart cities[C]//International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies. Cham: Springer, 2020: 384-390.
- [11] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2019) [R]. 2019. China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin city research report (2019)[R]. 2019.
- [12] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市白皮书(2020) [R]. 2020. China Academy of Information and Communications Technology. White paper on digital twin cities (2020)[R]. 2020.
- [13] 李德仁. 数字孪生城市 智慧城市建设的新高度[J]. 中国勘察设计, 2020, 337 (10): 13-14. LI Deren. New height of digital twin city smart city construction[J]. China Survey and Design, 2020, 337(10): 13-14.
- [14] 工业4.0研究院. 数字孪生体报告[R]. 2021. Industry 4.0 Research Institute. Digital twin report[R]. 2021.
- [15] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24 (1): 4-21. TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 4-21.
- [16] 张新长,李少英,周启鸣,等. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[J]. 测绘科学, 2021, 46 (3): 147-152, 168. ZHANG Xinchang, LI Shaoying, ZHOU Qiming, et al. Logic and innovative thinking of constructing digital twin cities[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(3): 147-152, 168.
- [17] DENG T, ZHANG K, SHEN Z J. A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 6(2): 125-134.
- [18] EHAB S, CHANG T H, YEOM C. City digital twin potentials: a review and research agenda[J]. Sustainability (Switzerland), 2021, 13(6): 3386.
- [19] NEAL Z, ROZENBLAT C. Handbook of cities and networks[M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2021.
- [20] LEI B, JANSSEN P, STOTER J, et al. Challenges of urban digital twins: a systematic review and a Delphi expert survey[J]. Automation in Construction, 2023, 147: 104716.
- [21] JAYATHISSA P, QUINTANA M, ABDELRAHMAN M, et al. Humans-as-a-sensor for buildings—intensive longitudinal indoor comfort models[J]. Buildings, 2020, 10(10): 174.