



白皮书

No. 202236

数字孪生城市白皮书

(2022 年)

中国信息通信研究院

中国互联网协会

中国通信标准化协会

2023年1月

版权声明

本白皮书版权属于中国信息通信研究院、中国互联网协会和中国通信标准化协会，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院、中国互联网协会和中国通信标准化协会”。违反上述声明者，编者将追究其相关法律责任。



前 言

习近平总书记指出，让城市更聪明一些、更智慧一些，是推动城市治理体系和治理能力现代化的必由之路。党的二十大报告明确将“国家治理体系和治理能力现代化深入推进”纳入未来五年主要目标任务，并提出“把我国制度优势更好转化为国家治理效能”“打造宜居、韧性、智慧城市”等要求。2022年1月发布的“十四五”数字经济发展规划提出“因地制宜构建数字孪生城市”。

数字孪生城市，逐步深入到城市全要素表达、业务预警预测、场景仿真推演、态势感知智能决策等多个环节，既能发挥多技术集成应用优势，又能凸显我国整体智治的制度优势，正成为各地智慧城市建设或城市数字化转型的重要探索方向。特别是今年以来，在政产学研用各方力量共同推进下，在数字孪生与 CIM 支撑下的城市规划建设管理，以及数字孪生水利水务领域进展较快，能源管理、智能交通、工业制造等领域也加快试点探索，数字孪生技术应用在文体旅游、应急安全、环境治理等城市多领域不断渗透，影响深远。

中国信息通信研究院已连续第5年发布数字孪生城市白皮书，今年白皮书分发展综述篇、实施建议篇和建设展望篇三大部分，**更新了数字孪生城市总体架构；首次系统性分析了“城市数字孪生体”和“数字孪生新引擎”建设思路；提出了数字孪生城市实施路径。**

一是发展综述篇，今年以来，数字孪生城市进程明显加快，逐步进入落地建设深水区，总体上呈现出，技术体系逐渐“清晰”，城市

转型内涵加快“演进”，政策措施“全面”，供给主体“丰富”、产业赛道“扩展”、生态耦合“紧密”、应用门槛“降低”、学术研究“活跃”、领域标准“深入”等发展态势。但数字孪生城市建设探索过程中，也初步浮现出“有表无里”“有静无动”以及供给侧同质化低质化、整体设计体系化不足等问题。

二是实施建议篇，白皮书首次深入分析数字孪生城市实施路径，重点围绕总体架构更新演进、总体设计统筹推进、典型场景筛选解剖、数字孪生体数据重构、能力引擎重组、可持续运营、成熟度评估等七方面内容展开。提出以“对象实体孪生+业务流程孪生”构建城市孪生体，以城市孪生体为基础，实现物联感知、全要素表达、可视化呈现、数据融合供给、空间分析计算、模拟仿真推演、虚实交互、自主学习自优化、众创扩展等九大能力目标，构建城市级数字孪生新引擎以及底座平台。

三是建设展望篇，在中国式现代化、国家治理能力与治理体系现代化总体要求下，各地将因地制宜、深入开展数字孪生城市的实施探索。**短期看**，数字孪生体“多源”数据融合重组，数字孪生“多能”新引擎构建，数字孪生“多跨”场景实现将是近期发展重点。**中长期看**，数字孪生体有望突破数字资产运营难题，孪生新引擎将全面激发城市数字化创新活力，城市建设的数字孪生应用成果有望在千行百业中推广借鉴。

目 录

一、发展综述篇：数字孪生城市发展逐步进入深水区.....	1
（一）技术体系：数字孪生城市的技术构成逐渐清晰.....	1
（二）内涵认识：城市数字化转型进入孪生驱动阶段.....	5
（三）政策环境：政策部署与地方落地实践明显提速.....	7
（四）供给主体：企业数量增加，发展战略调整聚焦.....	9
（五）产业布局：服务能力深化，服务对象内容扩展.....	11
（六）合作生态：引擎融合加速，互补产品集成开拓.....	12
（七）技术能力：应用门槛降低，模型供给能力提升.....	13
（八）学术科研：学术研究活跃，仿真决策颇受关注.....	16
（九）标准专利：行业领域发力，专利申请快速增长.....	18
（十）数字孪生城市前期探索已遇建设瓶颈.....	20
二、实施建议篇：基于孪生体理念推进孪生城市建设.....	22
（一）更新城市总体架构，建设城市数字孪生底座.....	22
（二）应用总体设计方法论，推进底座平台体系设计.....	26
（三）坚持高价值场景驱动，筛选并解剖具体场景.....	28
（四）重构数字孪生体属性，开展数据融合治理.....	30
（五）集成融合成熟引擎，形成全能力服务型平台.....	35
（六）构建多方协同机制，助力可持续建设运营.....	37
（七）建立成熟度评估模型，推动以评促建迭代发展.....	40
三、建设展望篇：数字孪生城市建设助力中国式现代化.....	43
（一）“多源”孪生体数据深度融合，数据组织应用将发生较大调整.....	43
（二）“多能”数字孪生引擎或出现，推动技术产业及城市建设模式变化.....	44
（三）“多跨”应用场景将加速推进，有力支撑中国式现代化发展模式... ..	46

图 目 录

图 1 数字孪生技术集成发展历程.....	2
图 2 数字孪生城市涉及核心技术构成.....	4
图 3 我国城市数字化转型发展阶段.....	6
图 4 全国数字孪生企业增长趋势.....	10
图 5 GIS/BIM 与视频引擎融合示例	13
图 6 数字孪生低代码平台功能框架.....	14
图 7 基于 NeRF 的城市级自动化建模	15
图 8 全球/全国数字孪生相关论文发布情况	17
图 9 各国数字孪生相关领域发表论文数量.....	17
图 10 全球数字孪生专利数量占比情况.....	19
图 11 我国数字孪生专利新增数量变化情况.....	20
图 12 数字孪生城市总体架构.....	23
图 13 城市数字孪生底座平台与城市大脑、现有系统的关系.....	26
图 14 总体设计在数字孪生城市建设中的定位.....	27
图 15 数字孪生城市总体设计任务框架.....	28
图 16 数字孪生场景价值判别方法.....	29
图 17 数字孪生体数据融合思路.....	31
图 18 数字孪生底座平台应用架构.....	35
图 19 数字孪生底座平台运营架构.....	40
图 20 数字孪生城市成熟度模型构成.....	41
图 21 数字孪生城市成熟度模型“三阶段”应用.....	42

一、发展综述篇：数字孪生城市发展逐步进入深水区

“数字孪生城市”自提出以来已有五个年头，在政产学研用合力推进下，2022 年呈现出技术体系逐渐“清晰”、城市转型进入“孪生驱动”新阶段、政策全面“有力”支持、市场项目持续“增长”、企业供给能力持续“深化”、产业服务全面“扩展”、技术产品加快“融合”、应用门槛逐步“降低”、学术研究较为“活跃”、行业领域标准“发力”等发展态势。同时，数字孪生城市前期探索也浮现出一些瓶颈问题，数字孪生城市发展进入深水区。

（一）技术体系：数字孪生城市的技术构成逐渐清晰

数字孪生技术发展历程是新一代信息技术不断集成融合的过程。回顾数字孪生技术发展历程，大致可以分四个阶段，数字孪生萌芽期，以模型仿真驱动为特征；数字孪生概念期，以模型与感知控制驱动为特征；数字孪生推广期，以模型、感知、空间位置等多技术融合驱动为特征；数字孪生壮大期，以模型、位置、感知、交互、AI 等技术全面融合驱动为特征。可以看出，每个阶段均呈现出，更多技术的一次集成与融合，并形成一种综合性更强的技术。



来源：中国信息通信研究院

图 1 数字孪生技术集成发展历程

➤ **数字孪生萌芽期：以模型仿真驱动为特征。**20 世纪 80 年代以来，CAD、CAE、CAM 等计算机建模、模拟仿真技术迅猛发展，并在制造业领域开始广泛应用，从产品设计发展到工程设计和工艺设计等，通过建模软件来设计产品外观、仿真软件来模拟产品性能，成为该时期发展的主要目的及形态。

➤ **数字孪生概念期：以模型与感知控制驱动为特征。**2002 年迈克尔·格里夫教授首次提出“镜像空间模型”¹，成为数字孪生概念的起源，并将该理念应用于产品全生命周期管理之中。与此同时，21 世纪初“物联网”技术快速推广应用，通过感知通信获取产品实时运行数据成为可能。2010 年 NASA 将数字孪生应用于航天航空领域，随后

¹ 数字孪生城市框架与全球实践（2021 年）

通用电气、达索、西门子等制造业龙头企业广泛开展数字孪生应用，推动了物联感知技术与建模仿真技术的集成融合。

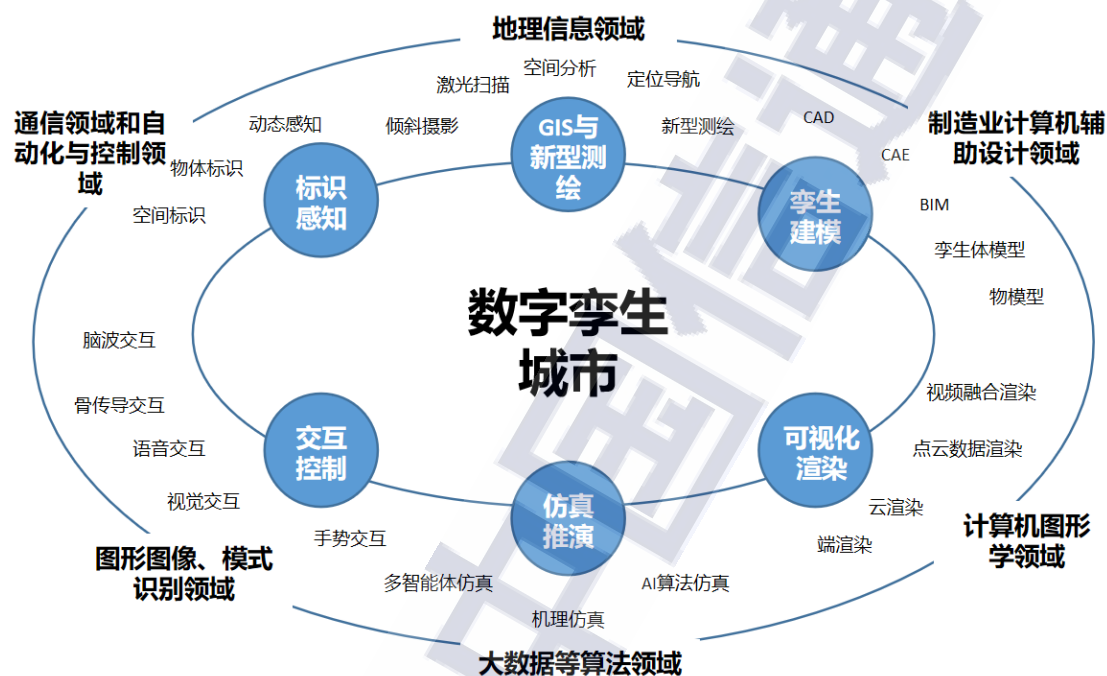
➤ **数字孪生推广期：以模型、感知、空间位置等多技术融合驱动为特征。**随着物联网、BIM 技术的成熟普及，二维 GIS 技术走向三维化实体化语义化，数字孪生技术应用逐渐从封闭空间小微场景，向开放空间大中型场景转变，从数字孪生零件、产品、车间，走向数字孪生楼宇、园区、城市等大尺度范围。2015 年新加坡提出“虚拟新加坡”建设计划²，2017 年雄安新区提出“数字孪生城市”建设理念并落地实施，数字孪生技术开始着力解决城市规划、能耗管理、废物处理、交通规划等社会运行发展问题。

➤ **数字孪生壮大期：以模型、感知、位置、交互、AI 等技术全面融合为特征。**随着大数据、AI、区块链等技术进入大规模应用，行业知识图谱、行业算法与空间分析计算开始融合，VR/AR 等交互技术兴起，UE、Unity 等高逼真可视化渲染引擎广泛应用，GIS、IOT、BIM、AI、VR/AR 等企业纷纷开展合作，并参与到城市大脑、数字孪生城市、数字孪生流域建设中来，构建全时空、全要素、全能力的数字孪生空间成为可能。近两年元宇宙概念兴起、AR/VR 发展提速，加速推动数字空间与现实空间深度融合，数字空间赋能现实空间运行，数字孪生进入大集成大融合新阶段。

数字孪生城市技术集成性高，核心板块日渐清晰。随着近年来数

² 数字孪生城市研究报告（2018 年）

数字孪生技术在城市各领域广泛应用，建模仿真、物联感知、地理信息、大数据与人工智能、虚拟现实等各领域头部企业纷纷开展技术合作和集成创新，加速进入数字孪生城市建设新赛道，数字孪生城市的技术体系总体构成逐渐清晰，其核心技术至少包含六大板块。



来源：中国信息通信研究院

图 2 数字孪生城市涉及核心技术构成

➤ **标识感知技术**，来源于通信领域和自动化与控制领域，是连接物理世界的入口和反馈物理世界的出口，具备标识解析和感知两大功能。

➤ **GIS 与新型测绘技术**，来源于地理信息领域，通过定位与空间导航、空间分析等技术，为数字孪生提供基础地理信息、遥感影像等城市底板数据。

➤ **孪生建模技术**，来源于制造业计算机辅助设计领域，通过几何建模和物理建模实现对物理实体形状、已知（或经验）的物理规律以及未知的物理规律的模拟。

➤ **可视化渲染技术**，来源于计算机图形学和图像处理技术理论，通过 WebGL 或游戏引擎工具将 3D 模型生成图像、视觉效果的过程，能够真实展现物理世界全貌。

➤ **仿真推演技术**，来源于大数据分析、AI 分析、视频分析等算法领域，通过机理仿真、大数据或 AI 驱动仿真对物理世界及其运行发展全过程进行仿真模型构建、模拟分析和实时智能推演。

➤ **交互控制技术**，来源于类脑视觉、AR/VR、三维视觉、模式识别等图形图像领域，将人的因素通过手势、视觉、语音、脑波等融入数字孪生系统，使用者可以通过友好的人机操作方式将控制指令反馈给物理世界，实现数字孪生全闭环优化。

（二）内涵认识：城市数字化转型进入孪生驱动阶段

数字孪生城市有力支撑城市数字化转型。全球主要经济体如英国、新加坡等提出“数字孪生国家”“数字孪生城市”等推进计划，国民经济和社会发展“十四五”规划纲要明确提出“探索建设数字孪生城市”，标志着城市数字化转型向“数字孪生城市”方向探索迈进。从发展历程看，城市数字化转型正在经历从单个行业、单个环节、单项技术、静态为主的点状数字化转型，到技术、数据、模型共同驱动的跨行业、全环节、融合技术、时空连续的全面数字化转型转变的阶段，

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、数字空间的深度融合，促进了业务、数据、技术的全面融合，逐步显现出“数字孪生驱动”城市数字化转型的新特征。



来源：中国信息通信研究院

图 3 我国城市数字化转型发展阶段

我国城市数字化转型大致经历四个阶段：

- **表单数字化（2008—2012 年）**，以行业应用驱动为主，各部门各自推进本行业网络化、数字化，如住建部牵头“智慧城管”。
- **业务流程数字化（2012—2016 年）**，以数字技术驱动为主，通过移动互联网、物联网、云计算等数字技术与业务流程融合加速数字技术全面应用，如发改委牵头推进“互联网+”行动。
- **决策数字化（2016—2020 年）**，以数据分析驱动为主，通过大数据、人工智能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，如全国各地建设“城市大脑”。
- **全面数字化（2020 年之后）**，以数字孪生驱动为主，在“十三

五”时期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。

（三）政策环境：政策部署与地方落地实践明显提速

数字孪生城市相关支持政策相继出台。继 2021 年国家“十四五”规划纲要明确提出“探索建设数字孪生城市”以来，发改委、工信部、住建部、人社部、水利部、国家能源局等相关部委对数字孪生产业、人才、技术、应用等政策支持力度更大。国务院印发《“十四五”数字经济发展规划》，提出“因地制宜构建数字孪生城市”。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、融合媒体、教育培训、体育健康、商贸创意、演艺娱乐、安全应急、残障辅助、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”，发布《数字孪生流域共建共享管理办法（试行）》，明确了数字孪生流域的具体建设内容。自然资源部先后印发 7 个新型基础测绘与实景三维中国建设技术文件。人社部提出“数字孪生应用技术员”等 18 个新职业，表明数字孪生技术成为各行业数字化升级广泛所需，具备很强的需求和前景。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。

表 1 数字孪生城市相关国家政策摘录

印发部门	发布日期	政策文件	政策内容
国务院	2022 年 1 月 12 日	《“十四五”数字经济发展规划》	提升城市综合管理服务能力，完善城市信息模型平台和运行管理服务平台， 因地制宜构建数字孪生城市
工业和信息化部	2021 年 11 月 30 日	《“十四五”大数据产业发展规划》	融合应用市场加速繁荣，场景挖掘将从边缘浅层向核心深层拓展。基于 数字孪生体 的制造执行、跨系统跨产业链的综合性分析等深层次应用将加速涌现
中央网络安全和信息化委员会	2021 年 12 月	《“十四五”国家信息化规划》	稳步推进城市数据资源体系和数据大脑建设，打造互联、开放、赋能的智慧中枢，完善城市信息模型平台和运行管理服务平台， 探索建设数字孪生城市
国家标准化管理委员会等 10 部门	2021 年 12 月 6 日	《“十四五”推动高质量发展的国家标准体系建设规划》	要围绕智慧城市建设内容，加强 城市数字孪生 、城市数据大脑、城市数字资源体系等方面的标准体系建设，规范引导智慧城市发展
国家铁路局	2021 年 12 月 14 日	《“十四五”铁路科技创新规划》	要推进 数字孪生 等前沿技术与铁路领域深度融合，加强智能铁路技术研发应用，开展铁路设备智能建造 数字孪生平台 研发应用
工信部、科技部、自然资源部三部门联合印发	2021 年 12 月 29 日	《“十四五”原材料工业发展规划》	提高生产智能水平。构建面向主要生产场景、工艺流程、关键核心设备的 数字孪生模型
发展改革委、水利部	2022 年 1 月 18 日	《“十四五”水安全保障规划》	要推进数字流域、 数字孪生流域 建设，实现防洪调度、水资源管理与调配、水生态过程调节等功能，推动构建水安全模拟分析模型，要在重点防洪区域开展 数字孪生流域试点建设
水利部	2022 年 3 月	《数字孪生流域共建共享管理办法（试行）》	明确了 数字孪生流域 的具体建设内容，细化了技术要求
人力资源和社会保障部	2022 年 6 月 14 日	向社会公示“数字孪生应用技术员”等 18 个新职业信息	表明 数字孪生技术 成为各行业数字化升级广泛所需，具备很强的需求和前景
国家能源局	2022 年 10 月 9 日	《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》	加快完善能源产业链数字化相关技术标准体系，推进能源 各领域数字孪生 、能源大数据、智能化等技术标准制修订

印发部门	发布日期	政策文件	政策内容
科技部、住房和城乡建设部	2022 年 12 月 23 日	“十四五”城镇化与城市发展科技创新专项规划	研究基于三维空间单元的城市信息模型（CIM）理论和平台构建关键技术与应用；研究城镇智能体理论、数据与运行安全等技术标准体系；研究建筑、大型交通枢纽与市政公用设施智慧运维关键技术装备， 研究城市数据大脑及数字孪生城市建设理论与技术 ，构建全场景智能监测预警和智慧综合运维服务平台

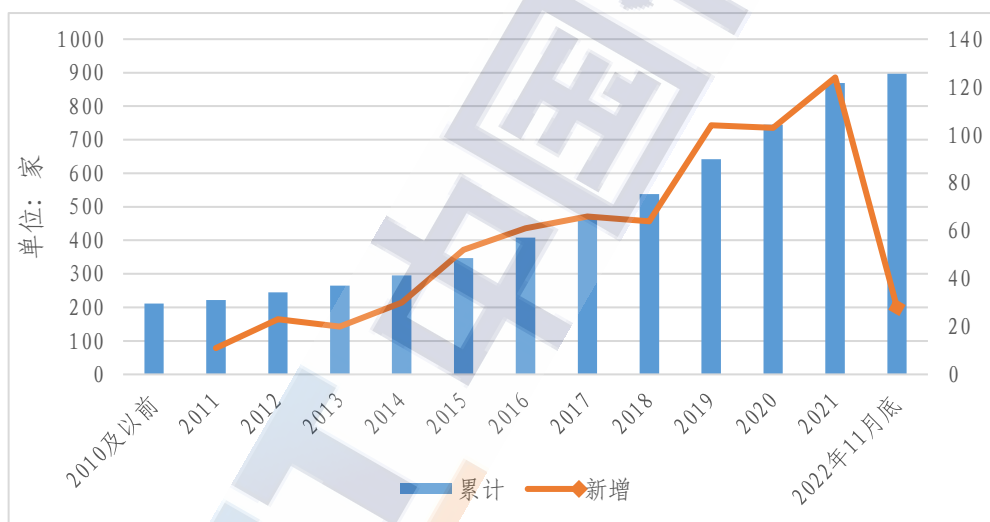
来源：中国信息通信研究院整理

地方政府积极出台数字孪生城市政策，加速数字孪生城市场景建设与产业布局。在国家政策指引下，各地因地制宜探索建设数字孪生城市。贵阳、南京、福州等城市，均出台了以数字孪生城市为导向推进新型智慧城市建设的文件。上海临港新区发布数字孪生城建设行动方案，面向开发者提供约 1 平方公里待开发区域时空底板，明确数字孪生港区、城市孪生体、数字人才港等 9 个重点场景。苏州工业园区率先推进数字孪生创新坊，联合业界生态企业集中联合攻坚，积极探索构建面向城市级的数字孪生体以及数字孪生底座平台，打造面向行业第三方服务的数字孪生公共服务平台，积极创建数字孪生园区创新产业基地。雄安新区依托 CIM 平台建设成果，积极打造数字孪生城市。浙江宁波市开展数字孪生第二批试点工作，征集了三江流域数字孪生监测等 41 个数字孪生应用场景，推进数字孪生应用建设。

（四）供给主体：企业数量增加，发展战略调整聚焦

我国数字孪生城市相关技术企业数量保持快速增长趋势，市场主

体持续壮大。据网站不完全统计³，在 2014 年以前，我国数字孪生城市相关企业新增数量保持在每年 30 个左右。2015 年至 2018 年，保持 50 至 60 个的幅度快速增长。2019 年至 2021 年，企业增长数量高达 100 余个，涨幅达到顶峰。表明我国市场主体持续壮大，后入场玩家较多，市场机会多，市场潜力大。目前的产业主体主要以地理信息、新型测绘、游戏引擎、数字建模与可视化为主，随着城市数字孪生新引擎新底座的出现，未来将有大量的人工智能、大数据、仿真推演、算力服务的企业进入。



来源：天眼查，中国信息通信研究院整理

图 4 全国数字孪生企业增长趋势

数字孪生城市成为互联网企业竞技的新擂台。腾讯积极进行业务架构与组织机构调整，成立数字孪生产品部，打造一个数字孪生云服务，在城市、建筑、交通、工业、能源等领域形成数字孪生底座和产

³ 天眼查“数字孪生”关键词检索数据

品。阿里巴巴正式发布了超融合数字孪生平台产品，将感知、仿真、控制、可视等四域数据进行融合与计算，服务于高速公路、城市交通、码头和机场等场景。科大讯飞在“城市超脑”中增加数字孪生引擎，为城市提供统一、标准、可视化的数字集成底座。京东科技在智能城市操作系统中，完善时空数据引擎、模块化时空 AI 算法、基于联邦学习的数字网关等，构建数字孪生城市数据基底。

（五）产业布局：服务能力深化，服务对象内容扩展

数字孪生基础平台服务商升级延展基础能力。随着行业需求的爆发增长，现有基础平台服务商加快产品能力更新迭代演进，呈现三大方向，一是提供更高效、安全的底层数据治理和接口能力，阿里云⁴、泰瑞数创、奥格科技等企业通过语义实体建模技术，基于数字孪生体数据库进行数据融合和管理。二是提供更丰富、系统的低代码、组件化平台能力，优锘科技、51WORLD、飞渡科技等企业开放 PaaS 平台，对外提供更多的“预制件”数字资产，便于应用组件式构建，以及数字资产运营变现。三是提供面向更多行业应用场景的业务支撑能力与统一格式，英伟达推出多 GPU 支持的开放式云原生平台 Omniverse，并通过 USD 统一数据格式进一步增强其建模与服务的通用性，2022 年以来平台组件所连接的跨行业应用增长了 10 倍。微软提出了数字孪生定义语言（DTDL），预定义数字孪生描述模型，加速数字孪生解决方案开发。

⁴ Ganos V5.0 重磅升级，走向孪生全空间数据库

数字孪生技术企业加大对 ToB、ToC 服务供给。数字孪生城市相关企业依托自身优势，推出虚拟现实、增强现实、元宇宙等体验类产品，着力拓展面向企业和个人的数字孪生体验服务。**优锆科技**打造物联产业元宇宙平台“物联森友会”，面向企业提供从设备选型、方案设计、方案展示、智能运营管理的全生命周期制作工具。**百度**、**51WORLD** 等企业搭建沉浸式元宇宙展厅、会议、展览等服务，提升用户虚拟与现实融合体验。

（六）合作生态：引擎融合加速，互补产品集成开拓

数字孪生城市相关技术引擎正加速开展深度融合。随着数字孪生城市应用场景需求丰富、尺度延伸，各类型技术引擎融合赋能成为数字孪生技术应用迭代升级的新方向。**泰瑞数创**、**超图集团**等企业开展 GIS 引擎与 UE、Unity 等游戏引擎深度融合，将 GIS 引擎数据管理调度、空间分析等能力与游戏引擎场景表现能力紧密结合。**CIM** 快速发展带动 GIS 引擎与 BIM 引擎进一步融合，将 BIM 单体化、精细化管理能力与基础地理信息相结合，实现从宏观到微观的全生命周期信息化管理。物联网厂商积极开展 IOT 引擎与 WebGL 图形可视化渲染引擎融合，将物模型与空间、建筑模型挂接，实时加载物联网数据，实现数字孪生城市动态化管理。此外，**智汇云舟**等视频服务企业推出视频孪生融合引擎，加快与 GIS、BIM 等引擎融合，实现多机位、多视角的二维视频向三维场景的逆向还原，以及多业务在统一数字孪生场景时空中的态势感知、时空回溯。



来源：中国互联网协会企业提供

图 5 GIS/BIM 与视频引擎融合示例

企业加快跨领域集成合作优化数字孪生城市创新方案。互联网大厂与地理信息行业领军企业合作，将云服务架构及互联网技术引入空间地理信息服务，通过耦合数据治理能力与空间计算分析能力，创新数字孪生城市解决方案。可视化渲染厂商与交通行业研究机构、设计院以及运营商等主体深度合作，为无人驾驶、车路协同等场景提供数字孪生基础技术支撑，创新打造高价值应用场景，形成优势互补的可持续发展态势。ICT 优势厂商与可视化厂商、模型软件开发商深度合作，将数字孪生技术能力集成到城市信息化项目中，推出基于数字孪生的城市大脑、城市中枢解决方案，赋能新型智慧城市建设迈向新阶段。

（七）技术能力：应用门槛降低，模型供给能力提升

低代码化推动数字孪生技术服务能力开放。模型预制件、云渲染等技术的逐步发展，降低了数字孪生应用建设中代码的开发量，提升了系统复用性和稳定性，减轻了客户端压力，实现数字孪生资源的灵

活封装和行业应用快速上线。伴随数字孪生城市的快速推进，GIS、BIM、可视化渲染、物联网、模拟仿真等领域厂商纷纷布局低代码平台，支持应用场景自由搭建、灵活扩展及多样化部署，提高数字孪生城市建设效率。数字孪生低代码领域标准体系、测评框架逐步完善，进一步规范了低代码平台功能完备性、易用性、开放性、性能优越性，持续提升低代码平台对数字孪生城市的支撑作用。

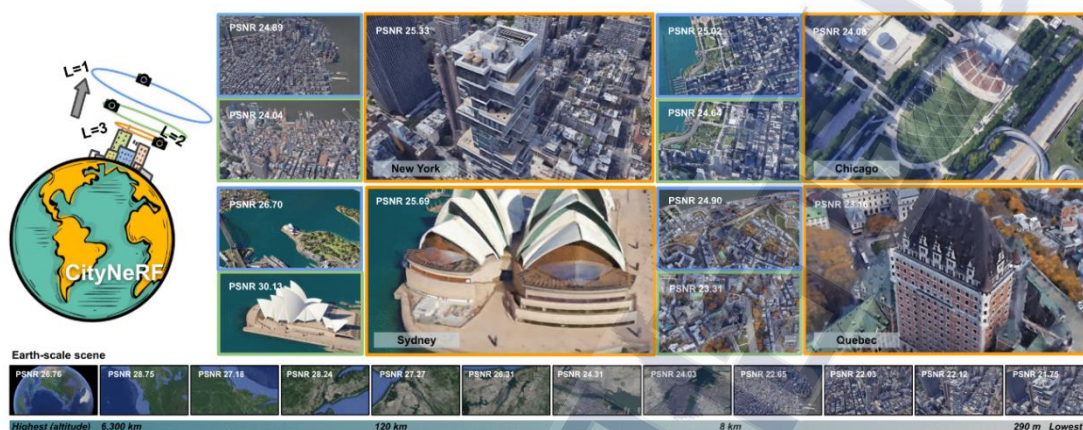


来源：中国信息通信研究院

图 6 数字孪生低代码平台功能框架

自动化建模方式降低广域空间模型生产成本。近年来，神经辐射场（NeRF）技术概念火热，结合 AI 深度学习，实现二维图像到三维场景的快速生成，高效构建大尺度、精细化数字孪生城市模型，缩减传统三维建模成本。以 Google 为代表的地图厂商，基于 NeRF 技术，进一步推进大场景神经视图的合成，将快速三维建模能力扩展至城市域，并结合 AI 技术实现细节的自动修复。此外，视频融合建模成为数字孪生城市发展重点，通过创建视频画面与空间位置的关系，将 AI

结构化计算与时空计算结合，为数字孪生城市供给连续的单体化对象，实现视频画面和三维场景的无缝融合、沉浸式浏览，打造时空动态感知、回溯和推演的“虚实共生”。



来源：CityNeRF: Building NeRF at City Scale⁵

图 7 基于 NeRF 的城市级自动化建模

泛在感知数据快速接入进一步夯实基础支撑。今年以来，我国正式进入“物超人”时代，物联感知终端规模化部署，织密了城市神经网络，进一步夯实数字孪生城市基础支撑。城市感知体系中多项目、多用户、海量设备设施异构数据的生产，对统一数据标准和先进接入技术提出新的需求，针对不同的应用场景、业务需求和网络架构，亟需构建有效的部署管理方式来应对设备动态更新的需求。随着物联网技术与新一代信息技术融合创新，物模型标准体系持续完善，软硬件进一步解耦，物联网资源虚拟化及面向多场景的动态重构能力实现突破，物联网感知终端接入门槛降低，部署及服务响应的伸缩性、敏捷

⁵ Xiangli Y,Xu L,Pan X, Zhao N, Rao A, Theobalt C, Dai B, Lin D. CityNeRF: Building NeRF at City Scale. arXiv:2112.05504,2021

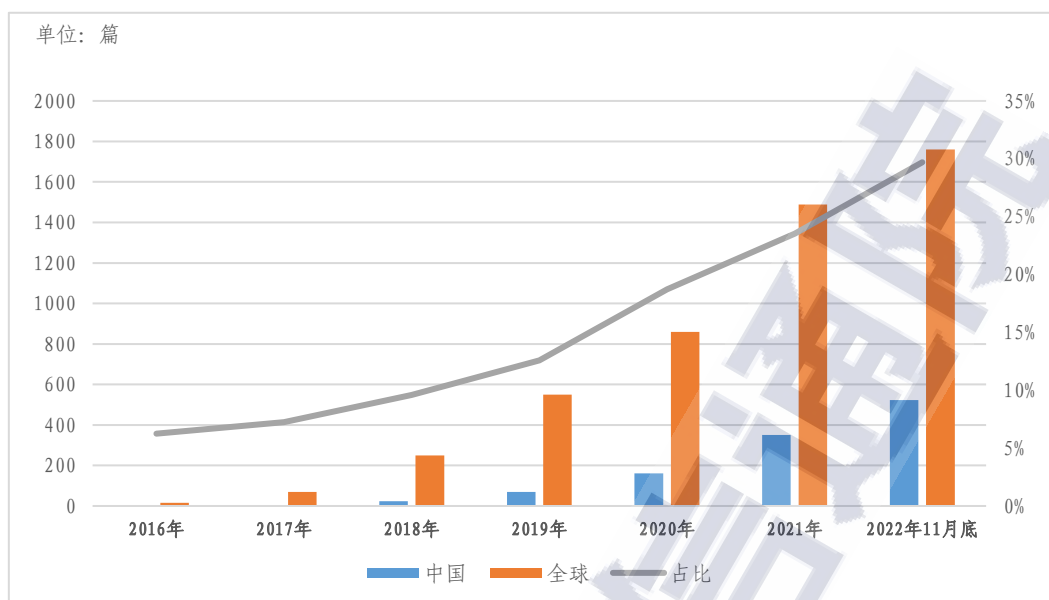
性、智能性大幅提升，推动万物互联向万物智联迈进。

（八）学术科研：学术研究活跃，仿真决策颇受关注

全球数字孪生学术研究持续活跃，我国论文研究数量保持领先。

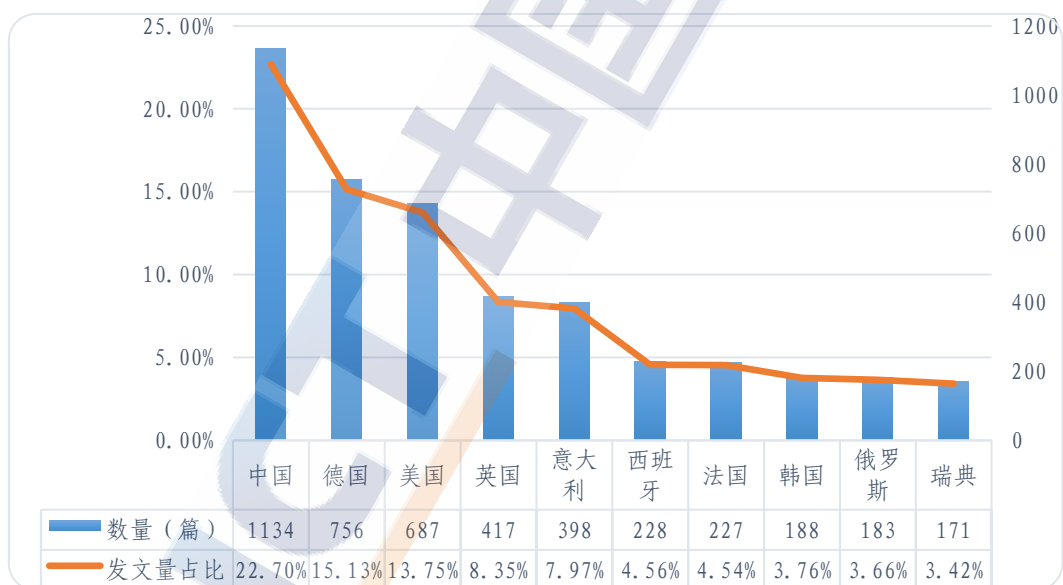
根据中国信通院整理统计，全球数字孪生领域发文总量整体呈现逐年增长的趋势，尤其 2018 年以来势头活跃。我国论文发布数量与全球趋势保持一致，且占全球论文的比例持续攀升。基于 Web of science 数据库检索⁶，2022 年 1 月-11 月底全球发表 1761 篇数字孪生相关文章，其中中国发文占 30%。中国、德国、美国、英国、意大利等国家是全球数字孪生领域论文产出最多的国家。从总量上来看，中国论文研究数量居首位，占总发文量的 22.7%，德国发文量占比 15.1%，美国占比 13.7%，成为全球学术研究的重要部分，推动数字孪生技术创新与发展。

⁶ 基于 Web of science 核心合集，选取范围包括 SCI-EXPANDED、CPCI-S 和 ESCI 数据库，检索 2010-2022 年关于数字孪生的学术论文。截止时间 2022 年 11 月 22 日。



来源：中国信息通信研究院整理

图 8 全球/全国数字孪生相关论文发布情况



来源：中国信息通信研究院整理

图 9 各国数字孪生相关领域发表论文数量

数字孪生研究热点聚焦五大主题，城市仿真、社会化模拟研究进一步深化。当前数字孪生学术研究主要聚焦在模拟仿真、智能制造、

信息物理系统、机器学习等技术、模型应用五大主题领域，所依托的场景中频次较高的有智能制造、工业 4.0、设计、增材制造、城市模型计算等。我国高校在城市仿真、社会化模拟方面研究进一步深化，面向多智能体仿真、数字孪生实时仿真、基于不完整信息和不明确机理的数据驱动混合模型仿真等都出现了一批重大科研成果。例如，清华大学在《自然》上发表的“人类移动行为涌现城市发展规律”成果，基于大规模城市模拟仿真平台，推断符合社会复杂规律的数字人居住、就业等系列行为，揭示了城市宏观演化发展规律从人类微观移动行为中涌现的内在机理。此外，中科院数字孪生与平行系统仿真、北京大学博雅智城政策决策仿真优化等，在复杂系统管理控制、城市规划决策分析等领域均形成较大影响力。

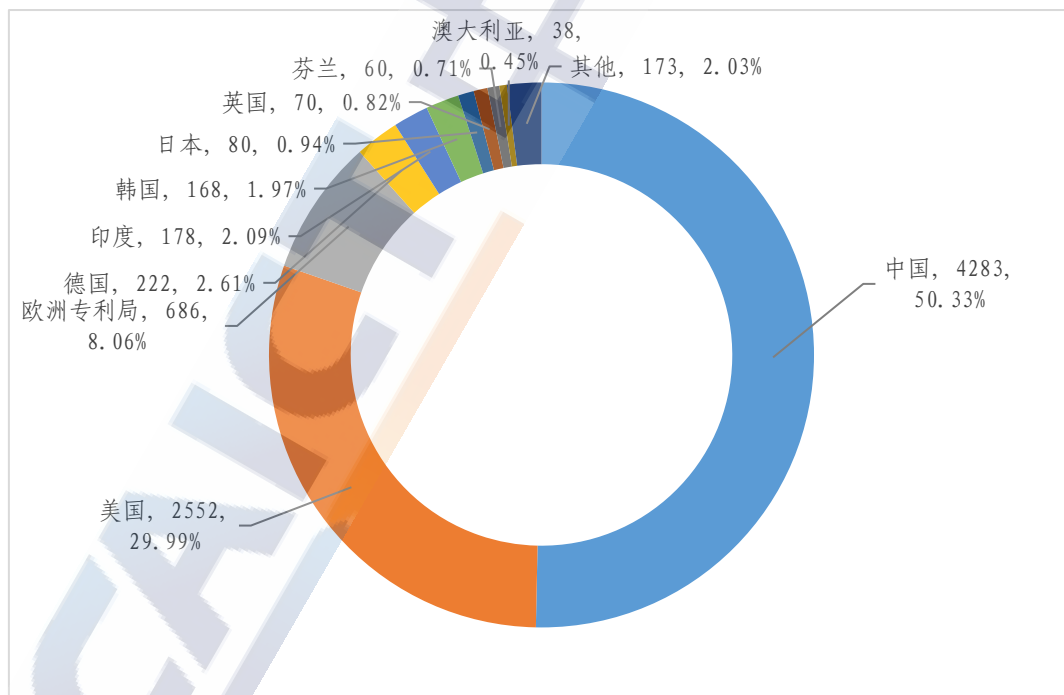
（九）标准专利：行业领域发力，专利申请快速增长

数字孪生城市标准化工作全面展开，行业领域发力明显。2021 年以来，中国通信标准化协会（简称 CCSA）成立数字孪生城市特设工作组、数字孪生网络工作组；全国信息技术标准化技术委员会成立城市数字孪生专题组、工业数字孪生专题组、数字孪生工作组；全国智能建筑及居住区数字化标准化技术委员会成立 BIM/CIM 标准工作组。此外，中国互联网协会、中国信息协会、工业互联网产业联盟、中关村智慧城市产业联盟等联盟协会组织开展数字孪生技术相关团体标准制定工作。据不完全统计⁷，截至 2022 年 8 月，我国共研究或制定

⁷ 数据来源：全国标准信息公共服务平台、全国团体标准信息平台

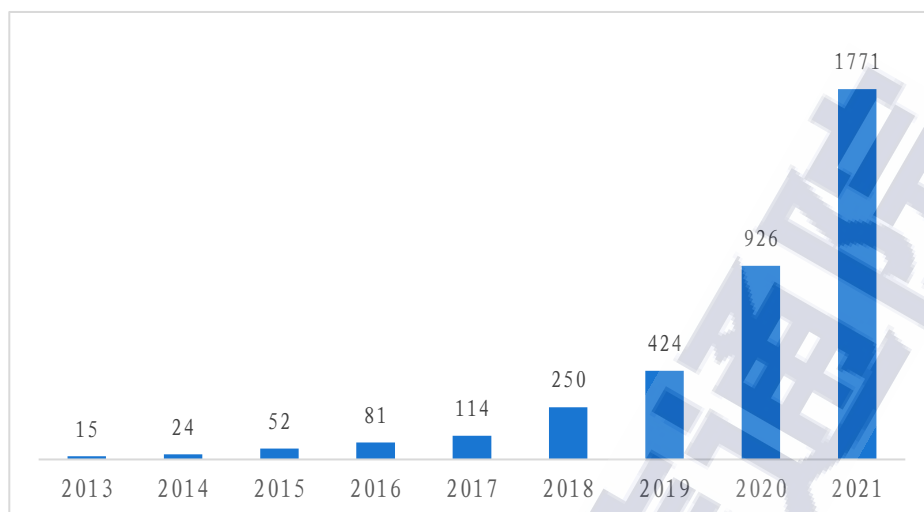
数字孪生技术相关标准超 50 项，其中包括 14 项国家标准、18 项行业标准以及 20 项团体标准。标准方向主要集中在城市、网络、水利、工业、建造等领域。

数字孪生相关专利数量保持高速增长，我国专利总量位居全球第一位。根据中国信通院统计，从全球来看，中国、美国、欧盟是数字孪生技术创新与应用的主要国家和地区。从数量来看，我国数字孪生专利总体数量保持领先，拥有数字孪生相关专利 4283 个，占比高达 50.33%，美国、欧盟、韩国、日本等紧随其后。从 2016 到 2020 年，我国数字孪生相关的专利数量呈现明显增长趋势，数字孪生技术与创新已经进入快速发展阶段，截至 2021 年，我国新增数字孪生相关申请专利 1771 件，同比增长 91%，成为数字孪生技术创新的核心力量。



来源：中国信息通信研究院

图 10 全球数字孪生专利数量占比情况



来源：中国信息通信研究院

图 11 我国数字孪生专利新增数量变化情况

（十）数字孪生城市前期探索已遇建设瓶颈

近两年来，数字孪生城市相关实践案例层出不穷，建设探索进入深水区。在取得宝贵经验的同时，数字孪生城市建设由于涉及技术复杂、实施参与方较多、业务深度广度较大，已初步暴露出应用浅化、场景与能力单一化同质化、技术与业务脱节、体系化不足、可持续运营乏力等若干问题挑战。

1. 数字孪生城市建设“有表无里”，渲染可视化与算法机理孪生发展不平衡。近年来，渲染引擎的广泛应用，推动数字孪生城市的可视化发展较为充分，但业务部门普遍反映数字孪生与业务脱节、两张皮现象严重，几何模型容易建，业务流程嵌入难，成熟的行业机理模型、业务规则难以与几何模型深度融合，是因为几何模型缺乏语义化描述，即实体对象的数字孪生体并没有全属性要素构建。亟

需增强数字孪生体的语义化表达，并由单体孪生向业务流程孪生、知识规则与机理算法孪生推进，切实解决业务痛点，发挥数字化对业务分析决策支撑的核心价值。

2.缺乏统一数字孪生体表达模型，三维空间数据与业务数据、语义数据融合不理想。一是广域三维数据表达多以“图层化+兴趣点”为主，与对象化、事件化的城市业务流程模式不匹配，导致业务数据融合难。二是业务数据普遍缺乏时序、位置属性，给实体对象、业务流程时空化改造带来不便，现行系统改造压力较大。三是三维空间数据表达缺乏统一标准，GIS、BIM、视频、3Dmax 等各条线厂商分头推进各自空间实体对象的表达方式，虽各有优势但缺乏整体性全局性考虑，导致业务应用发展整体上受限。

3.技术企业纵向与横向合作仍不紧密。一是横向上，企业同质化现象多，由于发展初级阶段对可视化需求旺盛，空间化特性较强，大多供给方都围绕可视化、空间计算构建基础能力，如空间剖切、空间查询、空间统计、光照分析等，面向深度应用场景需求的能力建设较少，如城市生命线的碰撞检测，基于孪生体的全流程轨迹溯源，基于孪生空间的水淹效果分析等。二是纵向上，上下游企业生态合作仍不足，从 GPU 计算到数据格式转化与数据治理、平台支撑能力到具体应用场景构建等环节，还未形成上下贯通的整体方案。

4.基于“三融五跨”业务场景驱动的总体设计体系还不健全，数字孪生高价值场景较少。数字孪生城市高价值典型应用

场景，如消防应急救援、城市管网管理、自然灾害预测等，需要集成通信、感知、位置、模型等多条线技术，整合政府多部门数据，打通跨系统业务流程，并明确技术间集成关系、多部门的业务数据需求清单、跨部门数据共享机制等。由于缺乏体系化的总体设计指引，以及缺乏业务部门的深度参与，导致在业务、数据、应用、技术等层面尚未形成融合设计方案，高价值、典型应用场景仍难以实现。

二、实施建议篇：基于孪生体理念推进孪生城市建设

当前数字孪生城市建设实施的最大瓶颈是城市的数字孪生体从未构建起来，数据未全方位融合，造成数字孪生应用价值未得到充分释放。亟需围绕“数字孪生体”进行数据融合、技术融合和业务融合，打造包含底层数据逻辑和配套能力组件、支撑九种孪生能力⁸的数字孪生城市新引擎，形成“全能力、服务型、低代码”的城市级数字孪生底座平台。

（一）更新城市总体架构，建设城市数字孪生底座

1. 数字孪生城市总体架构进一步迭代更新

经过五年来发展，数字孪生城市基本形成“三横四纵”的总体架构，“三横”为新型基础设施、智能运行中枢、孪生应用体系，“四纵”为组织保障体系、标准规范体系、网络安全防线、运营保障体系，具体如下。

⁸ 数字孪生城市白皮书（2020 年），九种能力是指物联感知、全要素表达、可视化呈现、数据融合供给、空间分析计算、模拟仿真推演、虚实交互、自学习自优化等。



来源：中国信息通信研究院

图 12 数字孪生城市总体架构

新型基础设施，承载城市全要素的数据采集、传输与计算，图形计算需求增强。主要包括端采集、网连接、智计算三部分内容，一是通过新型测绘、物联网等终端，采集城市静态、动态数据；二是通过5G、千兆光纤、北斗等网络设施，传输城市运行数据；三是通过边云超智能计算体系，尤其是GPU图形计算，来满足数字孪生城市对图形渲染的强大存储和计算需求。

智能运行中枢，融合多源数据和能力组件形成数字孪生底座，数字孪生体亟需突破。主要包括数据汇聚治理、数据深度融合、数据赋能应用三部分内容，一是依托城市大数据平台、城市感知平台、城市实景三维平台、城市信息模型平台等，全面汇聚城市运行相关数据；

二是围绕实体对象孪生、实体关系孪生、业务规则孪生，以分级分类形式，融合多元、多源、多态数据，打造城市级数字孪生底座平台；三是将底座平台能力以服务组件的形式向各类应用场景赋能。

孪生应用体系，实现城市多跨场景整体智治的愿景，八大典型场景逐渐“浮出”水面。主要包括面向城市整体智治的八大数字孪生典型场景，即综合治理、应急安全、交通物流、城市规建、水利流域、绿色低碳、工业制造、公共服务等多业务协同场景，以及其他行业领域按需开展数字孪生应用升级改造。

组织保障体系，助力数字孪生城市总体架构顺利实施。通过组织机构改革，建立总体设计、实施专班、项目统筹统建、首席信息官、首席数据官等机制和办法，保障总体架构顺利实施。

标准规范体系，确保数据可信互认，系统互联互通。通过元数据、数据目录、数据融合、技术集成关系、应用组件等标准制定，确保可信互认、互联互通。

网络安全防线，保障数字孪生城市安全运行。主要包括基础设施安全、数据安全、系统安全等。

运营保障体系，形成投入收益可持续发展的建设模式。通过完善建设运营机制、收益分配制度等，建立技术运营团队，形成可持续运营格局。

2.城市级数字孪生底座平台具有新内涵

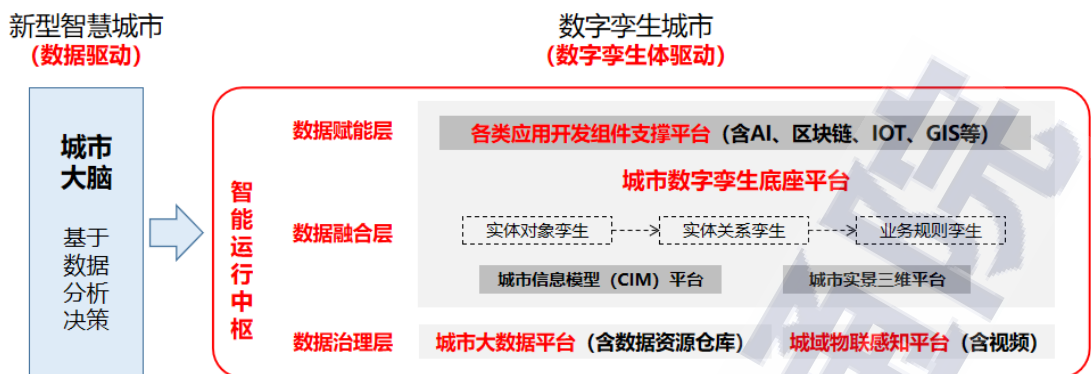
数字孪生城市是新型智慧城市建设新模式。智慧城市建设模式是

不断发展演化的，与上一阶段智慧城市建设相比，**内容形式上**，数字孪生城市建设更加注重城市全实体要素数字化表达，并针对全实体要素进行全方位数据融合，在多源数据深度融合基础上，系统性整体性重塑和实现城市“三融五跨”智慧应用场景；**技术能力上**，除了云计算、大数据、AI、IOT 等技术，数字孪生城市更注重通过 GIS、BIM、IOT、仿真、VR/AR 等多技术引擎集成加持，实现城市运行动态感知、虚拟空间可视再现、智能分析仿真推演等能力。

构建数字孪生底座平台是城市大脑未来演进方向、发展核心要义。

数据驱动的城市大脑在数据层面更侧重于对城市数据的汇聚、监测、治理和分析决策，为智慧城市应用提供数据分析服务；在能力层面更侧重于通过整合基础技术支撑能力、融合通信能力及应用开发能力等，对外部应用提供共性支撑能力，支持智慧城市应用。数字孪生驱动的城市数字孪生底座平台是在城市大脑的基础上，围绕实体对象、实体关系、业务规则开展数据融合，并形成视觉可视化、孪生体可编辑、业务规则可分析计算、数字空间可交互的新底座平台，对上层应用场景提供九种孪生能力⁹。

⁹ 数字孪生城市白皮书（2020 年），九种能力是指物联感知、全要素表达、可视化呈现、数据融合供给、空间分析计算、模拟仿真推演、虚实交互、自学习自优化等。



来源：中国信息通信研究院

图 13 城市数字孪生底座平台与城市大脑、现有系统的关系

城市级数字孪生底座平台与城市大数据平台、CIM 平台、实景三维平台、物联网平台有着紧密的关联关系，是现有基础平台有机整合的结果。目前各地建设的实景三维平台和 CIM 平台，从数据组成和价值作用来说，可以称之为城市数字孪生的一次表达，是城市数字孪生底座平台的建设基础。数字孪生城市底座，本质是城市全要素的数字化语义化表达，可称之为城市数字孪生的二次表达，为上层应用场景提供标准化的全面的数据供给。城市大数据平台、城域物联感知平台为数字孪生底座平台提供海量的动静态运行数据，是数字孪生城市数据融合的源泉，是孪生底座构建的关键基础。

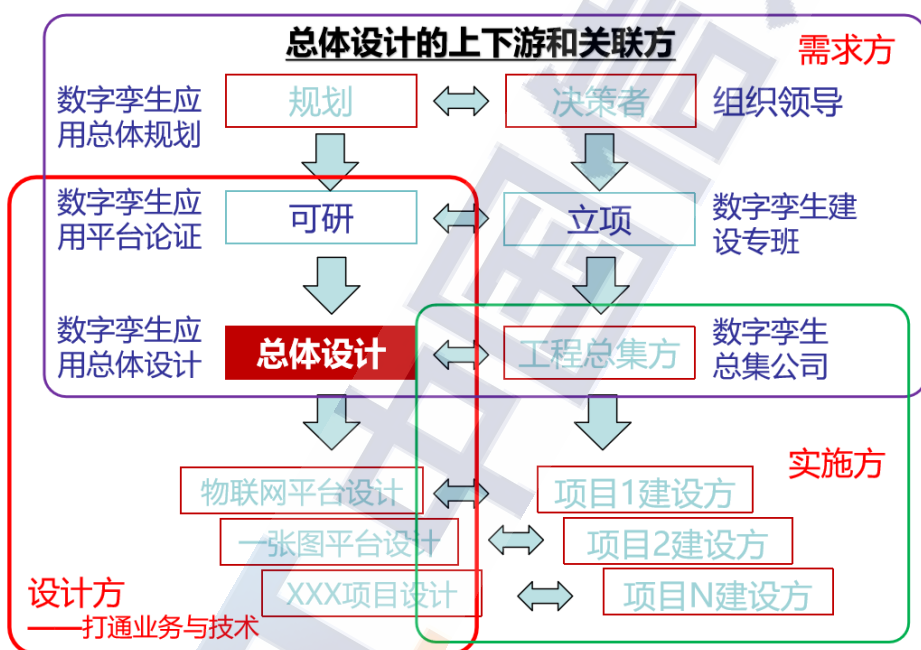
（二）应用总体设计方法论，推进底座平台体系设计

1. 明确总体设计在建设中的定位

数字孪生应用是具有“三融合五跨越”¹⁰特性的复杂巨系统。数

¹⁰ 三融合五跨越，指的是技术融合、业务融合、数据融合，跨层级、跨地域、跨系统、跨部门、跨业务协同。

数字孪生底座平台是涉及多异构网络、异构系统、异构应用组成的数字项目集群，是体系工程/系统工程（System of System）。由于缺乏总体设计，当前系统建设往往背离整体性系统性，存在碎片化、割裂化的项目式设计建设与建设，导致业务敏捷性差、互通性协作性差、需求侧体验不佳。总体设计有助于理顺需求方、集成商、项目实施方等多利益相关方协同合作关系，划清协作界面。



来源：中国信息通信研究院

图 14 总体设计在数字孪生城市建设中的定位

2.搭建从愿景到项目的总体设计任务框架

总体设计支撑实现数字孪生城市总体愿景。首先将城市发展愿景分解为典型的业务场景。其次，通过“业务架构设计”，不断解剖细化业务流程，形成“数字孪生体”“数字孪生支撑能力”。基于数字孪生体开展“数据架构设计”，融合多源数据要素；基于“数字孪生

支撑能力”设计“应用组件架构”，形成“组件式、中台化”架构；将应用组件对应到具体实现技术上，搭建“技术集成架构”。最后，将四类架构设计为具体实施项目（建设载体），组织系列工程项目建设，确保数字孪生城市整体落地。



来源：中国信息通信研究院

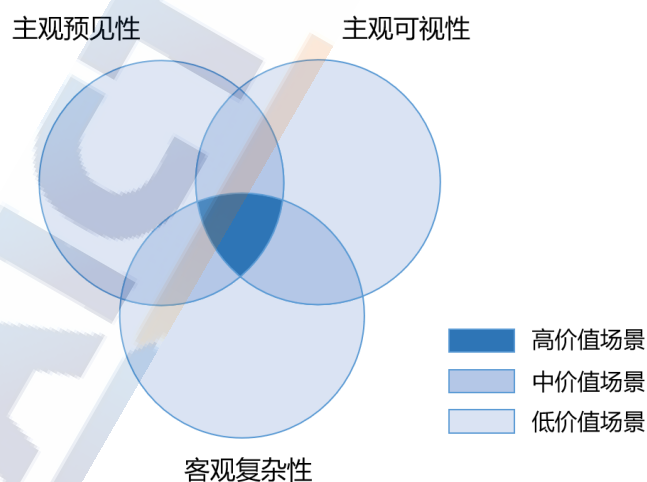
图 15 数字孪生城市总体设计任务框架

（三）坚持高价值场景驱动，筛选并解剖具体场景

数字孪生融合了感知、建模、渲染等多种数字技术优势，从技术实现来看，在体制顺畅、机理清晰、数据完备等条件满足的情况下，数字孪生在城市应用场景中几乎“无所不能”。从投入产出效益来看，有些场景“可孪生”但“不必孪生”，因此孪生场景要从“可有可无”的低价值路线向“必要孪生”的中高价值路线上探求，真正做到“孪有所值”。

1.场景筛选：研判筛选“孪有所值”高价值场景

要从客观复杂性、主观预见性和主观可视性三种特性方面进行综合考量，判别孪生场景的应用价值。客观复杂性是指在城市规划、建设和管理过程中，孪生的实体对象具有复杂性，一般可通过其规模、属性、要素、关系构成等维度进行判别。主观可视性是指在业务场景中，城市管理者对实体对象具有必要的可视化诉求，这种诉求可能出自跨专业合作便于拉齐认知的需要，也可能源于实体对象具有稀缺性、不易保存等。主观预见性是指城市管理者对管理对象的状态趋势具有必要的预测诉求，这种诉求可能源于试错成本极高、管理难度极大等情况。其中，复杂性反映了孪生对象的客观特征，可视性、预见性反映了业务场景应用的主观需要。具体来看，城市地下空间等不易观测场景、危化品运输等高危隐患场景、路口拥堵等因素复杂场景、城市规划等全局预判场景等，将成为数字孪生城市优先选择的高价值场景。



来源：中国信息通信研究院

图 16 数字孪生场景价值判别方法

2.场景解剖：识别数字孪生体对象与业务流程

数字孪生城市业务，是已有的智慧城市、城市数字化业务的一部分，要识别分解出具有数字孪生特色属性较强的场景，进而识别关键数字孪生对象，并对其所需的数据和能力组件进行需求分解。

识别数字孪生体对象以及相关的业务流程。对确定的数字孪生业务场景，基于 ER 实体数据模型以及孪生体分析，识别并构建数字孪生单体需求。对于数字孪生构建，既可以采用面向对象的方式，构建基于属性、时空关系、状态、能力等孪生体，也可采用实体-组建-系统（ECS）思想，将任何孪生体对象，组合合适的的能力组件，构成面向业务场景的数字孪生基础能力，进而避免过度依赖问题。通过分析业务场景，识别业务规则与要求，开展面向数字孪生的业务流程管理（BPM），针对重点业务环节，构建日常态和应急场景下的流程闭环，为基于数字孪生体的数据治理与能力组件分解奠定基础。

（四）重构数字孪生体属性，开展数据融合治理

当前，数字孪生城市以图层基础结构的时空框架，较好地支持了同类要素的表达和空间分析，但在面向微观单元的多源信息汇聚和面向微观单元的计算分析方面支持不足，因此需要扩展实体化、语义化、支持人机兼容理解和物联实时感知的数字孪生体表达，满足语义化分析应用、软件化开发编辑的需要。



来源：中国信息通信研究院

图 17 数字孪生体数据融合思路

1. 孪生体化：推进全要素实体分级分类表达与管理

数字孪生体是现实世界事物的对象化镜像表达。传统的城市空间信息以图层的方式组织，不同精度、不同类型的数据存放在不同的图层。随着应用的深入以及数据维度的增加，这种数据结构的问题逐渐显现，表现在图层过多之后，图层数据的更改会导致所有图层数据变动，导致图层间数据不一致。同时，同一空间实体的数据散落在不同图层中，查询使用不便。面向实体对象的唯一表达成为单体化重要基础，将同一实体的不同模型数据汇聚、组织、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逐一表达，有力促进孪生体的语义化扩展、孪生体的数据编织、孪生体的对象管理，实现城市孪生体的软件定义和资产化管理。

2.语义化：建立孪生体对象的统一语义融合模型

语义化是对数字孪生体自身属性及相互关系进行一致性描述，以实现“人机兼容理解”，计算机可识别、可理解、可操作的过程。城市数字孪生体的语义化可参考资源描述框架进行语法表达。按照统一规则或模型，实现数字孪生体属性及实体关系的标准化描述，便于计算机进行表达和理解，为后续计算分析奠定基础，语义化程度应结合场景需求确定。在概念层，数字孪生体的语义化表达应包括孪生体类别名称、属性及属性描述、孪生体关系等。基于知识图谱“三元组”形式的语义描述规则，实现统一规则下的孪生体属性、关系描述，实现数字孪生体的语义化表达，有利于实现实体关系孪生、业务规则孪生。

3.标识化：促进现有系统与数字孪生底座平台融合

基于实体统一时空编码开展业务数据挂接融合。建立针对数字孪生体的唯一标识编码是实现数字世界万物关联索引的基础，是实现城市各类事物的相互识别、连接，支撑各类数字孪生城市应用搭建的前提。当前，国际编码、行业编码乃至企业编码在信息系统中的混用，导致同一事物的信息难以有效追溯和聚合，信息孤岛现象加重，增加信息系统建设和运营的成本。在数字孪生城市建设中，应该将空间身份编码、人口法人信息编码、物品设备编码等不同业务领域的唯一标识编码进行融合打通，建立基于统一编码体系的城市不同类型事物信息的关联规则，实现虚拟世界中各类数字孪生体的有效标识和关联索

引。在实际的工作中，依据数字孪生城市统一标识编码标准（新编或者参照已有标准），实现数字孪生体不同模态数据的集成管理，实现“一码多态”。在此基础上，实现与专题数据、社会经济数据的关联，建立地理实体数据、人口、法人、经济、建筑物等基础数据的融合，支持行业应用。

推进业务数据的时空化，完善时空语义属性。空间和时间是业务数据的重要属性，对业务数据在空间、时间和时空变化中的特性进行分析和可视化，对业务价值挖掘和效能提升具有重要价值。时空数据挖掘在多个领域得到应用，如交通管理、疾病监控、环境监测、公共卫生等。当前城市管理和运营相关的业务多实现了时间信息的记录，但缺乏与城市空间框架的关联，业务数据的空间化存在不足；未来数字孪生底座平台应该充分发挥时空基座的作用，结合业务场景需要，为业务数据补充提供空间位置信息，实现业务数据的时空化，为城市业务的时空智能分析计算奠定基础。

4.可编织：形成面向应用场景构建的软件定义能力

针对数字孪生体及其属性开展数据自由编织与动态整合。为支持以数字孪生体为核心的多源异构数据融合，需要建立数据编织的理念，通过数据虚拟化、主动元数据管理、自动化数据平台、数据知识图谱，实现业务驱动下数字孪生体相关数据的动态整合、个性化配置。数据虚拟化减少了物理数据的迁移，将数据留在最能保证质量的地方，形成高质量的数据底座。数据知识图谱则强调应用 AI 知识处理等新手

段挖掘城市数字资产，为用户提供更积极主动的数据服务，方便用户更好地掌握数据知识信息。可编织的数字孪生体，实现“拿来即用、按需裁剪、弹性资源、自主设计”，更好地服务应用场景的数据需求。

5.可计算：支持基于属性关联和业务规则的城市计算

应用知识图谱技术，基于数字孪生体语义属性，开展城市计算。

数字孪生城市建设的重要目标是支持城市计算的实现，即通过对城市异构海量数据的整合、分析和挖掘，实现城市环境下“信息－物理－社会”三元空间的智能融合，为现代城市复杂事件的综合感知、分析理解以及决策服务提供计算支持。数字孪生体通过语义化，实现信息空间多模态数据间的语义融合问题，通过数据编织，实现城市对象属性的有效关联，为跨时空关联、海量异构数据融合、属性特征自动提取奠定基础，更好地实现复杂事件的溯源分析，支持城市管理的推断和决策。

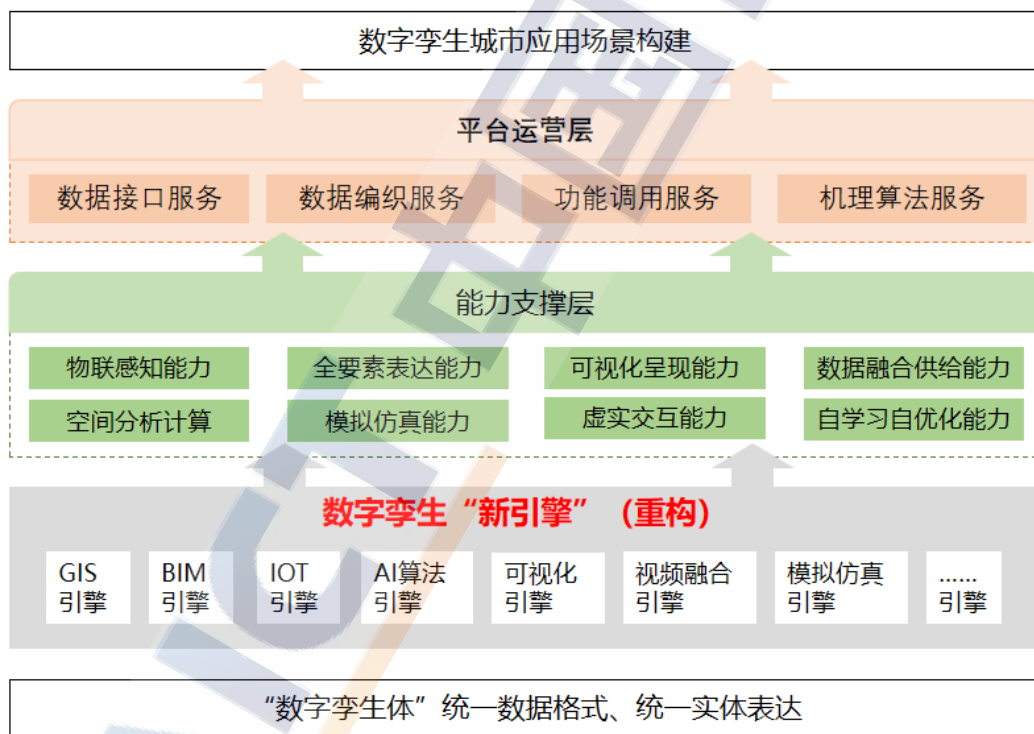
6.可运营：推动数字孪生体资产化价值化发展

建立数字孪生体数据库，实现清晰的数字孪生体资产管理。依据元数据规范对数字孪生体数据资源描述，结合业务需求明确分类方法进行排序和编码，形成数字资产目录，便于对孪生体相关数据资源进行检索、定位和获取。记录数字孪生体资产的来源、分布、产生、消亡，通过数字孪生体唯一标识检索不同历史时期、不同空间表达的数据情况。提供分级分类的数据服务、服务的统一管理及服务统一监

控，支持面向各类用户对数字孪生体的查、治、管、用，有效满足数据管理和共享需求。

（五）集成融合成熟引擎，形成全能力服务型平台

由于数字孪生涉及技术较多，集成关系复杂，导致长期以来数字孪生城市建设效果仍处于浅层次应用阶段，有效实现 GIS 引擎、BIM 引擎、IOT 引擎、游戏引擎、VR 引擎、AI 引擎、视频引擎等多引擎融合应用或相互兼容应用，将成为下一阶段数字孪生底座平台新的发展和研究方向。



来源：中国信息通信研究院

图 18 数字孪生底座平台应用架构

1.能力引擎需重构：先拆后组重构“新引擎”

基于数字孪生体统一格式，先拆后组重构“新引擎”，摆脱传统引擎的数据依赖性。数字孪生“传统引擎”是基于一定业务需求、一定数据格式而形成的处理能力，因此传统引擎对数据存在依赖性。随着数字孪生应用的不断深入和覆盖范围的不断扩大，当前可视化引擎、GIS 引擎、BIM 引擎等传统引擎难以满足应用需求。数字孪生底座平台需要集成多引擎技术能力，在城市统一的数字孪生体数据格式、实体数据表达结构上，拆解现有 GIS 引擎、BIM 引擎、渲染引擎、地址引擎、仿真引擎、IOT 引擎等基础引擎，重组形成“数字孪生底座”新引擎，为上层应用提供所有基础“功能组件”，支撑实现物联感知、全要素表达、可视化呈现、数据融合供给、空间分析计算、模拟仿真推演、虚实交互、自学习自优化等全方位能力。

2.底座应开放兼容：实现上下游引擎互通兼容

充分发挥专业引擎能力，底座平台应以开放架构实现上下游引擎的互通、兼容和适配。引擎发展主要朝着两个方向演进，一是能力域更强，二是兼容性更好，随着各类引擎加快研发步伐，引擎复杂度更高，如何兼容并蓄将成底座平台核心要求。硬件层，需适配国产化 CPU、GPU 等，如 X86 架构的海光、ARM 架构的鲲鹏、龙芯等，显卡有摩尔线程的 MTT 系列、ARM 的移动 GPU 等。基础软件层，需适配基础软件有中标麒麟操作系统等。应用软件层，需基于统一数据结构、

语义模型，开展 AI 类引擎与端侧、云测渲染类引擎兼容、IOT 引擎与端侧、云测渲染类引擎融合、GIS 类引擎与端侧、云测渲染类引擎融合等，相互之间形成互通接口，对外提供 API、SDK 等开放开发接口，支撑上层应用构建。

3. 平台组件化运营：服务化供给数据，接口化支撑开发

基于全引擎能力融合的底座平台需能力对外服务，提供丰富的数据服务或功能开发接口。底座平台按照数据安全定级和用户鉴权规定，提供适应多行业、多场景、多主题的统一标准数据服务和功能服务的调用及管理接口。一是数据服务，主要包含各类数字孪生体的数据服务，以及服务的统一管理和统一监控。二是数据编织服务，只针对数字孪生体，开展数字孪生体的自由组合编辑，以及数字孪生体内部属性内容与类型的自由编织。三是功能服务，除基础的空间分析能力外，包括 DOM 变化监测、地下管网碰撞、位置大数据分析等应用功能。四是算法能力服务，包含水淹、人流、交通流等专业领域仿真推演能力等。底座平台还需提供低代码的场景构建能力，支撑业务人员参与场景创新和建设。

（六）构建多方协同机制，助力可持续建设运营

1. 以多方协同的工作模式引领全面数字化转型

从单环节孪生走向全局整体数字孪生，亟需创新供需多方协同的建设模式。数字孪生城市作为全面数字化转型的动力，需要打破单个

系统、单项技术、单个主体的建设模式，从整体性、全局性、系统性统筹推进建设。**需求方侧亟需加强跨部门协调**，大数据局、规划建设局、自然资源局等政府部门提供基础数据、平台和工具，各业务部门提出数字孪生场景建设需求，由数字孪生城市建设主管部门对需求进行统筹，形成数据、平台、场景协同。**供给侧需加强多产业主体协同**，供给侧数字孪生产业主体包括 GIS 和新型测绘、孪生建模、可视化渲染、仿真推演、感知标识、交互控制等各环节企业，但面临同质化竞争严重、上下游生态合作不足问题，可通过开放互联标准的企业合作、专利授权服务、联合运营、联合设立公司等模式，调动不同环节企业形成产业链组团式创新，实现多方资本、人才、技术、数据等要素互补汇聚、共建共享的生态创新格局。此外，**需探索创新供需多方主体协同的工作机制**，如苏州工业园区创新提出数字孪生创新坊工作机制，汇聚大数据局等相关政府部门、科研机构、企业、高校等多方产业与技术资源，打通各部门业务需求的业务协调方，有效调动技术产业力量，形成多方参与开发、敏捷迭代演进的建设模式。

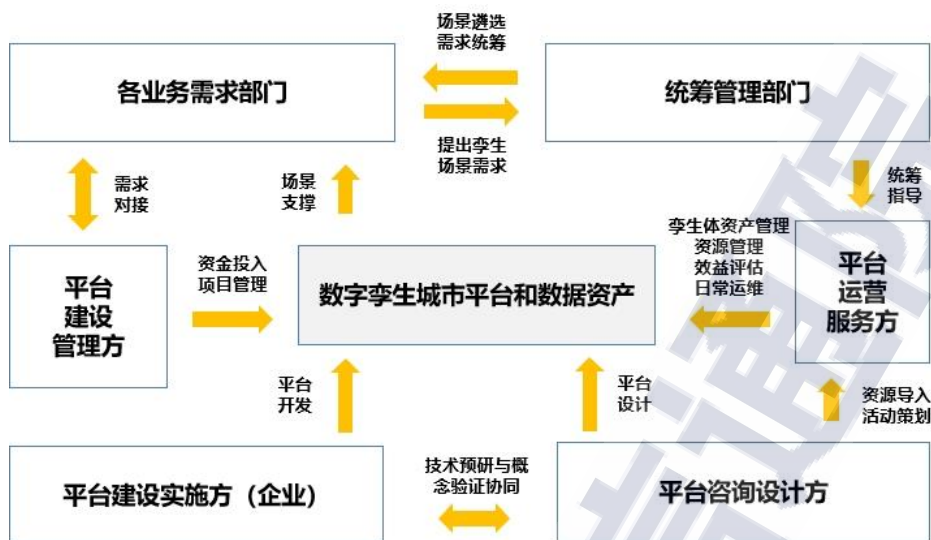
2.以政企协同的分类建设机制引领可持续运营

从依靠财政投资模式走向社会化可持续建设，亟需针对具体项目采用多样化政企协同建设机制。目前数字孪生城市项目多以政府主导，依靠财政资金投入，难以长期持续，需要针对项目性质和盈利能力进行分类，进一步激发市场化力量共同建设。**一是非经营性项目**。该类项目不具备盈利空间，资金来源主要靠政府财政收入，一般由政府出

资向数字孪生企业购买服务进行建设，适用场景包括数字孪生流域、政务虚拟人等。二是**准经营性项目**。该类项目具有一定的盈利空间，但需要由政府引导或授权，通过政府搭建平台、授权数据、提供工具、制定标准规范等方式，为企业数字孪生建设降低门槛，适用场景包括数字孪生楼宇、数字孪生招商、数字孪生路演等。三是**经营性项目**。该类项目能够通过提供服务收回投资并获得回报，由企业投资市场化运作，政府不直接干预但可提供开放数据、开放平台，为企业数字孪生建设提供基础支撑，适用场景包括数字孪生停车场、数字孪生商圈等。

3.以共建平台公司的运营机制实现专业化运营

创新建立数字孪生底座平台和孪生体资产的专业运营公司。数字孪生城市底座平台和其上沉淀的数字孪生体是数字孪生城市最核心的数字资产，需要有专业化公司进行资产管理和运营，挖掘数字孪生城市价值。未来各地可成立专业化运营公司负责数字孪生城市的孪生体资产管理、资源管理、效益评估、日常运维等工作，不断丰富孪生体数字资产、提升数字孪生城市平台对各场景的支撑能力，促进数据、能力和资源高效利用。同时，引入平台咨询设计方、平台建设实施方、平台建设管理方共同参与数字孪生城市平台和数字资产运营。



来源：中国信息通信研究院

图 19 数字孪生底座平台运营架构

（七）建立成熟度评估模型，推动以评促建迭代发展

1. 建立数字孪生城市五级成熟度共性模型

数字孪生城市成熟度共性模型亟需建立。数字孪生城市项目数量和应用深度逐年攀升，供需两侧对平台能力、孪生效果、运营成效评估仍缺乏统一评价模型和方法。当前，产学研界从孪生精度、场景深度出发提出了部分成熟度模型，但尚未形成从城市、园区整体出发、涵盖数据、技术、战略、人才、运营等多维度的数字孪生城市成熟度模型。例如，北京航空航天大学提出了六等级数字孪生成熟度模型，并应用于数字孪生机器人、数字孪生车间评价¹¹；工业4.0研究院从孪生“精度”出发提出了“数字孪生水平”五等级模型¹²，但从城市、园

¹¹ 陶飞，张辰源，戚庆林，张贺. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统. 2022. 28(5): 1267-1281

¹² 工业 4.0 研究院. 数字孪生体报告[M]. 北京, 2021.

区整体出发，涵盖多维度的数字孪生城市成熟度共性模型尚未建立。

基于五大能力域，构建数字孪生城市成熟度模型，分五级评估成熟度等级。一是明确数字孪生城市评估的5大能力域，针对城市、园区，从5大能力域评估数字孪生城市的成熟度，包含技术与平台、应用与场景、设施与数据3大内部能力域和战略与人才、运营与安全2大外部能力域。二是提出数字孪生城市L1-L5级的等级特征，分别为起始级（外观孪生，实景呈现）、应用级（机理孪生，点状应用）、集成级（孪生互动，综合集成）、优化级（智能优化，动态推演）、引领级（虚实共生，创新引领）。数字孪生城市成熟度模型作为共性模型，可根据不同区域发展特征和战略导向，定制化设计能力域和能力子域。同时，数字孪生城市成熟度模型可以灵活调整指标权重，支撑数字孪生城市项目不同阶段的个性化评估。



来源：中国信息通信研究院

图 20 数字孪生城市成熟度模型构成

2.成熟度模型为建设评估提供方法参考

倡导数字孪生城市项目在建设前、建设中、建设后“三阶段”开展优先级、成熟度和成效度的评估，促进数字孪生城市建设急用先行、迭代完善和长效运营。建设前，成熟度模型可用于评估数字孪生城市项目的优先级，侧重对战略匹配度、需求迫切度、要素就绪度维度评估，促进高价值项目优先落地。建设中，成熟度模型有助于评估数字孪生城市重点项目的成熟度，识别项目优劣势，推动项目建设逐步升级、迭代完善。建设后，成熟度模型可用于数字孪生城市成效度评估，重视对孪生效果、服务协同、经济效益、社会效益等维度的评估，引导政企协同探索数字资产增值、平台运营增值等商业模式，持续拓展面向企业端、消费者端（B 端、C 端）的数字孪生服务，推动数字孪生城市长效化运营、可持续发展。



来源：中国信息通信研究院

图 21 数字孪生城市成熟度模型“三阶段”应用

三、建设展望篇：数字孪生城市建设助力中国式现代化

在国家治理能力与治理体系现代化总体要求下，各地城市将全面开展数字孪生城市的实施探索，针对海量城市实体对象、实体关系、业务流程与规则，基于数字孪生体的数据融合组织、技术引擎重构、平台能力运营、应用场景创新将成为发展的必经之路。

（一）“多源”孪生体数据深度融合，数据组织应用将发生较大调整

短期看，基于数字孪生体的技术实现与数据模型需要新规范指引。一是多源异构数据融合需技术规范引导。构建孪生体的数据有结构化与非结构化的、动态与静态的、图层与单体的、地上与地下的、室内与室外的、大尺度与精细化的，“多源”数据融合难度较大，将是短期内突破重点。二是实体对象分级分类方案需城市级统筹谋划。城市属于广域复杂业务场景，城市实体对象具有大小空间包含、跨行业门类领域存在等特性，如何从城市整体出发系统性构建分级分类实体划分方案将成共同命题。三是数字孪生体的统一语义模型内涵需要形成标准规范。任一数字孪生体将包含几何、标识、时空、能力等若干基本属性语义，需通过标准规范指引，形成既有利于城市计算又有利于业务实现的统一语义表达模型。

长期看，城市海量数字孪生单体有望形成新型数字资产，数据难运营困境将得以改善。一是数字孪生体融合跨行业数据，具有高价值属性。数字孪生体的属性语义较为丰富，尤其是政府管理的、高价值

的公共数据，“单体化”的组织方式有利于形成独立的便于流通的新型数字资产。二是数字孪生体的分级分类精细化管理有利于数据合规运营。孪生体数据包含几何与非几何、行业与共性、大颗粒度与细颗粒度等不同形态数据，借鉴 Autodesk、CGTrader 等三维模型共享平台经验，未来将搭建数字孪生模型共享平台，为政企客户、社会公众提供孪生体模型服务。三是数字孪生单体的加密探索，促进数据高效运营。应用区块链、数字水印等加密技术，对孪生单体进行加密处理，有利于解决碎片化数据难以运营的难题。

（二）“多能”数字孪生引擎或出现，推动技术产业及城市建设模式变化

基于统一数字孪生体语义表达，有望重构数字孪生技术生态。一是既不同于 GIS 引擎也不同于渲染引擎的数字孪生新引擎或将出现。重计算轻实体化的 GIS 引擎、重可视化轻计算的渲染引擎都难以满足数字孪生城市现实发展需求，既能实现单体软件化编织开发，又能开展深度学习计算的“多能”数字孪生新引擎或将出现。二是现有引擎将围绕统一语义表达模型进行升级改造。在更丰富语义加持下，现有可视化、GIS、BIM 等图形引擎的呈现表达、分析计算将面临一定程度的升级改造，形成更强能力的技术引擎。三是围绕“孪生体”各技术引擎将积极开展深度合作。数字孪生需集成多个技术引擎，单个引擎难以满足业务场景构建需求，企业间将围绕“孪生体”统一格式、统一语义开展引擎层面深度合作。

多能力的城市数字孪生底座，将带动并激活条线技术产业。一是带动传统数据治理产业发展。多能力的城市数字孪生底座需要共享融合城市大数据资源，以及数据围绕实体对象的组合，将对数据采集汇聚、质量清洗、挖掘分析、共享交换等带来新需求。二是激活 AI、VR/AR、元宇宙等新技术产业进入城市计算赛道。长期以来 AI、区块链、VR/AR 等新技术在城市领域难以发挥技术优势，数字孪生体的语义丰富有助于 AI 知识图谱构建，三维模型可视化有助于增强现实推广，数据流动促进区块链应用。三是培育技术应用产业。城市数字孪生底座平台将以 PaaS 平台形式，逐渐向行业应用解决方案提供商开放能力，将培育形成一批数字孪生技术应用类企业，或带动原有行业厂商向数字孪生应用厂商转变。

城市数字孪生底座平台将成为新型基础设施，并推动形成政府引导、企业共建模式。一是数字孪生底座平台基础设施化趋势明显。基于城市全量数据要素融合与全面技术能力整合，数字孪生底座平台将以城市数字孪生体以及低代码环境支撑城市级、行业级、园区级、企业级、个体级数字孪生应用场景搭建，尤其今年以来，交通、能源、水利、园区等领域加速数字孪生进程，底座平台逐渐成为城市级新型基础设施。二是基于 PaaS 平台，政企协力合作，形成良性建设格局。数字孪生底座平台需要政府引导，整合多条技术路线企业技术能力，吸引上下游企业合作建设，并最终为城市相关应用领域提供公共应用能力，不断迭代创新数字孪生应用场景，形成政企良性合作模式。

（三）“多跨”应用场景将加速推进，有力支撑中国式现代化发展模式

基于数字孪生体的数据融合组织方式将打破业务壁垒，助力城市整体智治愿景实现。一是跨部门跨行业跨系统跨平台的业务数据将得以充分共享、开发利用。长期以来，跨部门数据共享交换未能有效发挥出数据要素价值，其中原因之一是数据的深度融合后的增值价值未被挖掘，数据易开发利用性差，通过数字孪生体的打造，将进一步促进业务数据共享，以及数据的便利化应用。二是条线业务流程将得以更新、优化、重构，促进城市各条业务整体智治。“多跨”应用场景是多部门协作实现城市整体智治愿景的重要抓手，如一网统管、应急救援、防洪防涝等。城市原有条线业务流程是基于行业数据建立完成的，数字孪生体将具备全量数据服务提供能力，且可以按需进行数据编织供给条线业务，有利于“多跨”应用场景实现，有利于压缩、升级和重构业务运行模式。

系统化迭代式的总体设计模式将推动业务融合与协同。一是中国式现代化、大部制改革、一网统管等战略和业务发展要求下，数字孪生城市整体性系统性推进需求迫切。新冠疫情大流行下，加速推动城市整体性、系统性治理进程，未来围绕“一网统管”、大应急、大安全、大服务等更多领域，将持续开展跨部门业务流程打通，数据资源高效流动，前瞻性考虑、总体性设计将发挥重要作用。二是数字孪生城市进入实施期，政府普遍从关注技术能力到关注业务协同、业务价

值、业务效果的场景转变。近年来，数字孪生可视化技术发展充分，但与业务场景严重脱节，致使“虚拟服务现实”的数实交互、决策推演等高价值场景难以实现，总体设计从业务架构出发，围绕具体“多跨”业务场景，通过跨部门业务流程原子化拆解和系统性重构，形成数据架构和应用架构，指导高价值数字孪生场景落地。

城市探索实践经验将带动和赋能工业、能源、交通、水利等行业繁荣发展。一是以数字孪生单体为基础打造城市精细化治理体系。传统城市治理条线分割、成片管理、整体实施的方式，导致城市运行规律及问题隐蔽难寻。基于不同尺度的城市数字孪生单体，城市治理由大区域向微单元、地下空间、建筑结构内部等“看不见、摸不着”的场景深入，基于孪生体属性、指标等，分析计算孪生体间逻辑关系、业务规则关系，判断城市运行发展态势与趋势，实现精细化治理。二是**城市数字孪生单体将共享赋能工业、能源、交通、水利等行业。**将城市综合管廊、建筑楼宇、货运枢纽、水利设施等数字孪生单体共享给行业部门，带动数字孪生流域、数字孪生道路，数字孪生电网、数字孪生工厂等行业数字孪生发展。

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-83473001-603939

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

