引文格式：任福,韩昊英,宋彬,等. 生成式 AI 驱动数字孪生城市建设的思考[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):24-31. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.06.004

生成式 AI 驱动数字孪生城市建设的思考

任　福[1,2,3]，韩昊英[4]，宋　彬[5]，郭建晓[1]，彭　博[1]，陈雨杭[1]，张　琛[6]，
张淳聪[1]，盛兆阳[1]，闫雪峰[1]，王成瑞[1]

（1. 武汉大学 资源与环境科学学院，湖北　武汉 430079；2. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室，湖北　武汉 430079；
3. 自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室，湖北　武汉 430079；
4. 澳门城市大学 城市与可持续发展研究院，澳门特别行政区；5. 北京飞渡科技股份有限公司，北京　102600；
6. 深圳大学 智慧城市研究院，广东　深圳　518060）

摘　要：智慧城市建设正朝着兼具精细化、实时化和智能化的数字孪生城市阶段演进。本文在梳理智慧城市、实景三维、时空大数据、地理空间智能和数字孪生城市相关研究基础上，思考生成式 AI 驱动数字孪生城市建设的认知转向，提出由对象维、过程维和场景维构成的分析框架，并从数字孪生体生成、时空大数据轻量化治理、高逼真渲染与动态仿真协同、典型场景集成应用等方面归纳其技术实现路径。研究认为，只有将生成式 AI 能力置于真实数据、物理规律、业务规则和治理责任的约束之中，数字孪生城市才能由以三维可视化展示为主的空间映射系统转变成为支撑城市认知、模拟、推演和治理决策的新型时空基础设施。

关键词：数字孪生城市；时空大数据；数字孪生体；城市治理

中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0024-08

Some Thoughts on the Generative AI-driven Development of Digital Twin Cities

REN Fu[1,2,3], HAN Haoying[4], SONG Bin[5], GUO Jianxiao[1], PENG Bo[1], CHEN Yuhang[1], ZHANG Chen[6], ZHANG Bocong[1], SHENG Zhaoyang[1], YAN Xuefeng[1], WANG Chengrui[1]

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan 430079, China;
3. Key Laboratory of Digital Cartography and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China;
4. Institute of Urban and Sustainable Development, City University of Macau, Macao Special Administrative Region China;
5. Beijing Feidu Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China;
6. Research Institute for Smart City, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The development of smart cities is evolving towards the stage of digital twin cities, characterized by enhanced refinement, real-time capabilities, and intelligence. Building upon a comprehensive review of research concerning smart cities, real scene 3D modeling, spatio-temporal big data, geospatial intelligence, and digital twin cities, this paper explored the cognitive shift in generative AI-driven digital twin city construction, proposed an analytical framework comprising three dimensions, including object, process, and scenario, and outlined technical realization paths across several key domains, such as the generation of digital twin entities, lightweight governance of spatio-temporal big data, the synergy between high-fidelity rendering and dynamic simulation, and the integrated application of typical scenarios. The study contends that only by constraining generative AI capabilities within the bounds of authentic data, physical laws, operational business rules, and governance responsibilities, the digital twin city can be transformed from a spatial mapping system primarily focused on 3D visualization into a novel spatio-temporal infrastructure that supports urban cognition, simulation, projection, and governance decision-making.

Key words: digital twin city, spatio-temporal big data, digital twin entity, urban governance

数字中国建设是推进国家治理体系和治理能力现代化的重要内容。《数字中国建设整体布局规划》提出，要夯实数字基础设施和数据资源体系，推动数字技术与经济、政治、文化、社会、生态文明建设深度融合，并以数字化驱动生产生活和治理方式变革。在此背景下，城市治理的数字化、智能化需求凸显，智慧城市建设正朝着数字孪生城市方向演化发展。

数字孪生城市并不是数字城市、实景三维和智慧城市平台的机械叠加，而是在真实城市基础上构建可感知、可表达、可分析和可应用的数字化系统。已有

项目来源：教育部基础学科和交叉学科突破计划（JYB2025XDXM111）。
第一作者简介：任福（1976—），博士研究生，教授，研究方向为行业专题地图服务、地理信息系统开发与应用等，E-mail：Renfu@whu.edu.cn。

研究认为，数字孪生城市由物联网、人工智能、城市信息模型和多源数据融合等技术共同支撑，其核心在于对城市对象和运行过程进行数字化表达与模拟[1-2]。近年来，新型基础测绘、实景三维中国建设和地理信息科技的发展，提高了城市空间要素采集、建模和表达能力，为数字孪生城市建设提供了基础数据和框架[3-4]。但是，从实景三维建模走向数字孪生建模，还需要解决全要素表达、动态过程建模、数据模型与机理模型融合、智能服务支撑等问题[5]。数字孪生城市的发展重点正在从静态空间表达转向动态感知、过程模拟和治理应用[6]。

城市具有明确的空间边界、物理规律和业务规则。生成式人工智能（generative artificial intelligence，Generative AI）目前已在图像识别、自然语言处理、多模态理解和内容生成等方面的应用持续拓展，这为数字孪生城市建设提供了新方法。生成式AI驱动数字孪生城市建设不能仅停留在内容生成和交互增强等应用层面，而应进一步探究其如何嵌入城市对象表达、运行过程模拟和治理场景应用之中。生成式AI可以参与城市对象识别、场景补全、语义标注、知识抽取、任务分解和情景生成，提高数字孪生城市建模、更新和应用的效率；但生成式AI结果在提高建模和交互效率的同时，也造成了语义失真、空间关系错误、过程解释不足等“幻觉”困境。

本文提出从对象、过程和场景3个维度的分析框架，并深入思考生成式AI驱动数字孪生城市建设的实现技术路径及难点。

1　从“复刻城市”走向“理解城市”

数字孪生城市建设目标是实现城市中对象实体的持续感知、运行过程的深度理解和决策规划的动态推演，这必然要克服许多难题：①城市空间布局和运行状态持续变化，长短不一的动态更新周期制约了孪生模型的表征能力；②众源数据在尺度、格式、语义和业务规则上的差异，会影响城市对象、事件过程和治理关系的整体认知。生成式AI正与多模态大模型、知识图谱、时空分析模型和仿真推演等方法融合来生成更逼真的城市三维场景，从静态模型走向动态更新，从数据汇聚走向语义组织，推动数字孪生城市摆脱对现实城市的单一复刻，从视觉呈现走向治理支撑，为实现对城市状态、城市过程和城市问题综合解决提供技术支撑。

1.1　静态模型难以表征动态城市

数字城市阶段的首要任务是把现实空间转化为可表达、可浏览的数字对象。实景三维中的地理实体建模，本质上是对现实世界几何空间及其关联属性、关系的抽象与数字化[7]。数字城市借助倾斜摄影测量、激光点云、建筑信息模型(building information modeling，BIM)、城市信息模型（city information modeling，CIM）等技术和多源时空大数据，特别是海量遥感影像数据，实现将建筑物、道路、地形地貌和基础设施等高精度映射到数字空间。

相对静态的城市空间形态难以表征动态城市，数字孪生城市更需要准确反映人流、物流、交通流和信息流的持续变化，即增强城市状态更新、过程表达和情景推演的能力，还需克服数据缺失、纹理不足、资料不完整或场景变化过快等问题。生成式AI在泛化性、通用性和多任务适应性等方面的优势，有力地推动了场景解译和地理信息生产方式的变革[8]。生成式AI能够辅助完成场景补全、建筑立面重建、对象属性推断和运行状态模拟等浅层任务，还能回答城市处于何种状态、这一状态如何形成、未来可能怎样演化、不同治理措施又将带来什么影响等深层次问题，但其生成内容必须接受真实观测数据、物理机制、时序规律和专业知识的检验，避免虚假细节导致错误推演决策。

1.2　数据汇聚难以直接形成认知

城市实体不是只以几何形状存在，还携带类别、属性、功能、约束和关系等信息。数字孪生城市建设离不开类型、尺度、格式、更新频率等多种多样的大数据，海量数据也面临着统一组织、处理以及在同一语义框架下被理解和调用的挑战[9]。

单凭多源数据汇聚难以获得城市运行状态的完整认知，数字孪生城市亟需实现从“数据平台”向具备情境理解和自主表达能力的“认知平台”跨越，进一步形成可以追溯、校验、迭代的语义治理能力。地理空间知识图谱和知识库管理系统等恰好可为这种跨越提供技术支撑，能够将分散的地理空间知识资源汇聚起来，建立可计算的认知框架[10]。通过多模态大模型，能够在影像、点云、文本、表格和传感数据之间建立更灵活的关联；通过自然语言理解和结构化抽取，可以把规划文本、管理规则、应急预案和业务流程转化为可计算的语义单元；通过生成式标注和知识补全，则可以提高城市地物分类、属性识别和关系抽取的效率，使多源数据在同一语义体系下真正可理解、可关联。

在城市治理场景中，同一空间对象同时承载规划、产权、管理、运营和文化等多重语义，生成式AI

输出的标签、对象关系和场景解释，仅凭视觉相似性或语料关联进行判断会造成语义错配，需要在行业标准、业务规则和专家知识的框架下，与现实数据相互印证。

1.3 视觉呈现难以充分支撑治理决策

虚实交互空间的形成和发展，正在改变城市信息的表达和服务方式[11]。动态三维场景、高逼真渲染和沉浸式交互等视觉呈现技术利于提高城市管理者、专业人员和公众的空间认知能力，但难以充分支撑多维问题和多重约束交织的复杂城市场景的快速响应、动态推演和科学决策。数字孪生城市需要通过知识引导、数据驱动和算法支撑的混合模式，提升时空信息的供给、分析和知识服务能力，同时进一步解决时空依赖嵌入、模型可靠性和泛化能力等问题[12-13]。

当前流行的AI智能体可以将城市管理者提出的自然语言问题转化为数据查询、模型调用和场景生成任务，辅助形成规划方案、应急预案和运营策略，并在数字环境中进行比较分析，提升复杂场景的表达和推演效率；但AI智能体生成内容的完整性、场景呈现的逼真度和方案设计的可行性，并不意味着可以直接转化为城市治理决策依据，还需要经得起真实数据的检验，并受到业务规则和专业知识的约束。

2 深度嵌入：对象、过程与场景

AI驱动数字孪生城市建设聚焦于城市对象表达、孪生过程组织和治理场景应用3个方面。城市对象并非只有地物的几何形态，还包含功能语义和运行关联；数字孪生也不是固定的建模工程，而是感知、生成、仿真、应用不断衔接的过程；孪生系统最终还需要进入具体治理场景，在可见、可算、可演和可用之间形成递进关系（表1）。

表1 AI驱动数字孪生城市建设多维框架

视角	主要内容	AI嵌入方式	约束条件
对象	空间要素、功能语义、运行关联	几何补全、纹理修复、对象识别、语义标注、关系抽取	真实测绘数据、统一空间基准、行业标准、业务规则
过程	感知、生成、仿真、应用	数据插补、模型生成、流程拆解、情景构造、结果解释	物理机制、时序逻辑、历史数据、模型校验
场景	可见、可算、可演、可用	多模态表达、知识组织、方案比较、交互服务、服务转译	真实性验证、语义校核、不确定性控制、治理责任

2.1 对象：空间要素、功能语义与运行关联

从对象维度看，城市并不是由孤立的三维模型构成，而是由建筑、道路、设施、生态空间、人口活动和治理事件等多类要素共同组成的复杂系统。城市空间要素对象是数字孪生城市的基础。

城市对象的几何形态、空间位置和外观特征，解决“城市有什么、在哪里、形态如何”的问题；在真实测绘数据和统一空间基准约束下，生成式AI可以辅助完成几何补全、纹理修复、对象识别、模型快速生成和场景补全，服务于城市对象的识别、描述、关联和调用。

功能语义是在空间要素基础上进一步赋予城市对象类型、属性、功能和业务含义，解决“对象意味着什么”的问题；同一建筑、道路或公共空间，在不同治理场景中可能承担不同功能，在行业标准、管理规则和专家知识约束下，生成式AI可以辅助开展自动标注、文本抽取、知识补全和规则转换，提高语义构建效率。

运行关联关注城市对象、运行事件和人群活动之间的关联，解决“对象之间如何相互作用”的问题；许多城市问题并不产生于单个对象，而产生于交通、客流、商业、公共服务和应急保障等多要素耦合过程，在可靠数据、时空逻辑和业务规则约束下，生成式AI可以辅助关系抽取、场景推理和情景生成。

2.2 过程：感知、生成、仿真与应用

生成式AI深度嵌入数字孪生城市“感知–生成–仿真–应用”的连续过程中，参与数据获取、模型构建、过程推演和场景服务等关键环节。

对地观测理论与技术的发展，推动快速、精确、实时的空间信息服务不断演进[14]。卫星遥感、航空摄影、无人机、车载移动测量、物联网传感器和视频监测等观测技术能够获取城市对象运行状态的多源数据。这些原始观测数据通常存在时空不连续、分辨率不一、噪声干扰等问题，难以直接用于数字孪生体的构建与更新。生成式AI可以对缺失数据进行插补，对低质量影像进行增强，对不同传感器的观测结果进行对齐和归一化处理，有助于提高城市状态感知的连续性和可用性。

传统测绘建模技术依赖测量、重建和人工编辑等，追求对既有对象实体的数字化复刻。生成式AI则能够在城市对象关系复杂、场景要素密集的情况下，生成所需的三维模型、纹理贴图和语义标签，还可以根据任务需求自动拆解流程、组织推理步骤并形成垂直应用方案。

传统仿真方法多基于机理模型或统计模型，对交通流、客流、灾害演进、设施运行等过程进行数值模拟，但其参数标定和情景设置依赖大量人工经验，难

以应对城市复杂场景的快速变化。在物理机制、历史数据和业务规则约束下，生成式AI可以辅助生成初始情景、参数组合和推演说明，并在多模态数据之间建立映射关系，使仿真过程更容易被理解和比较。

在城市运行监测、交通组织、文旅服务、会展保障、低空管理、基础设施运维、公共安全和应急管理等应用场景，生成式AI可以将复杂的时空数据、模型输出和业务规则转化为相对清晰的文本说明、方案建议和交互指令。

2.3　场景：可见、可算、可演与可用

生成式AI以“可见、可算、可演、可用”4种方式深度嵌入数字孪生城市应用场景体系，推动其由空间表达、系统分析、情景推演走向治理应用，从“观看城市”走向“治理城市”（图1）。

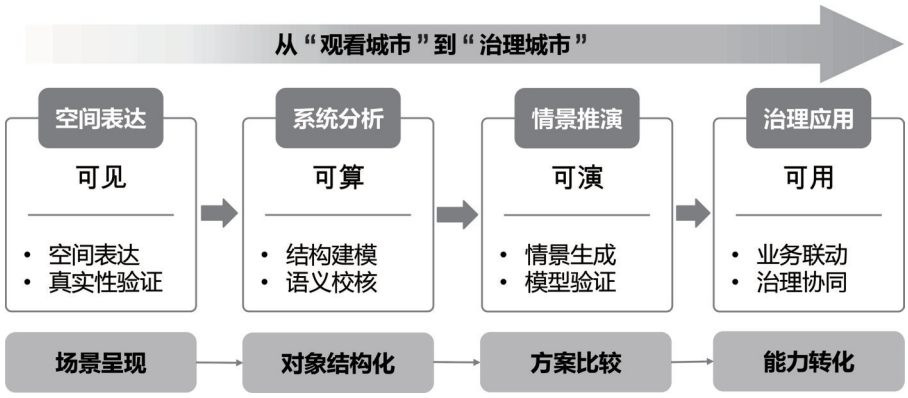


图1　AI深度嵌入数字孪生城市场景的递进逻辑

“可见”是指嵌入空间表达场景，将“看见场景”转为“理解场景”。泛地图研究表明，视觉表达正从单一图面走向多空间、多媒介、多维度融合的综合呈现[15]。城市问题的识别、协商与治理一般要通过可视化方式被呈现、共享和讨论。在高密度城市中，地下、地上、空中和室内空间多维交织，多维可视化自然成为空间协同治理的重要技术方法。生成式AI可以增强三维场景生成、图像理解和多模态表达能力，使复杂城市空间以更加直观的方式进入治理场景。

“可算”是指嵌入系统分析场景，形成机器生成、专家校核和业务验证相结合的建模流程。地图科学研究表明，地图已不仅是传统纸面表达，而是与数据、模型和服务相结合的综合表达体系[16]。城市空间需要从图形对象转化为计算对象，对象、属性、关系和过程需要以参数化、结构化、语义化的方式被表达。数字孪生城市亦要具备可计算的语义结构、参数体系和时空关系，才能从展示层面转至分析层面。生成式AI可以辅助知识图谱构建、语义规范化、动态参数提取和跨源数据关联等，提高城市建模效率。

“可演”是指嵌入情景推演场景，通过模型验证、敏感性分析和专家审议为决策提供更有依据的可能性判断。智能地图制图研究表明，智能化表达不能脱离人的认知判断和学科交叉支撑[17-19]。城市治理需要在风险发生前开展情景推演、过程模拟与方案比较。数字孪生城市通过动态模型、情景生成和过程模拟，使不同政策路径、空间干预和资源配置的影响能够被提前评估。生成式AI可以通过自然语言交互、情景生成、方案比较和结果解释，降低复杂推演的使用门槛。

“可用”是指嵌入治理应用场景，既要看技术指标和生成效果，又要看其能否支撑真实场景中的持续运行、业务联动和治理协同。无论表达多精细、模型多复杂、推演多智能，如果系统不能稳定融入具体业务流程，其作用仍然难以形成效能。数字孪生城市的可用性主要体现在可维护、可演进、可解释和可协同。可维护要求系统能够稳定运行；可演进要求新数据、新模型和新场景能够持续接入；可解释要求决策过程能够被理解和追溯；可协同要求不同部门、系统和主体之间能够实现数据互通与过程联动。生成式AI可以提升人机交互效率、辅助业务生成和增强公共服务能力，使数字孪生系统更容易进入日常治理场景，但也会带来模型漂移、运行成本和责任归属等问题[20]。

生成式AI能够增强上述4个场景中的表达、分析、推演和交互能力，但也会带来风险。“可见”要防止虚假真实，“可算”要防止语义错配，“可演”要防止无依据推演，“可用”要防止责任模糊。数字孪生城市建设的核心是要在技术与治理之间建立平衡，形成可验证、可解释、可协同、可持续的城市治理模式。

3　建设难点分析

3.1　构建数字孪生体生成理论框架

数字孪生城市建设首要问题是如何生成真正可用于表达、分析和推演的数字孪生体。数字孪生体并不

只依赖三维空间数据，还需要接入动态实时数据、业务与衍生数据以及规划、仿真、反馈等知识性数据。

数字城市实践已积累了三维模型、遥感影像、点云、BIM、物联网感知、业务台账以及模型仿真等多源数据资源，但通常分散于不同部门、平台和业务系统之中，在数据格式、空间尺度、更新频率、语义标准和管理口径等方面存在明显差异。生成式AI技术能够在模型补全、语义识别、内容生成和情景构建等环节发挥作用，但若缺乏数字孪生体生成理论框架，其应用往往容易停留在局部对象生成或单一场景表达层面，难以支撑城市级数字孪生系统的持续更新、综合分析和协同应用。

数字孪生体生成理论框架（图2）包括：①建立较为清晰的城市数据类型体系，既用于生成式AI训练和增强，也是生成结果校验的重要依据；②区分实体孪生体、语义孪生体和关系孪生体的生成逻辑，实体孪生体面向可感知、可测量的三维结构，强调几何、纹理和空间细节，语义孪生体面向对象的类型、属性、功能和约束，强调将文本、规则和知识转化为可计算表达，关系孪生体面向多实体之间的动态关联，强调对交通联系、环境耦合、人群活动和事件传播等关系进行抽取和组织；③引入思维链推理与约束校验机制，例如城市治理问题中通常涉及的“现象识别–原因分析–影响评估–方案生成–结果预测–反馈修正”等连续思维过程，具有较强的系统性和不确定性，生成式AI在真实观测数据、物理规律、业务规则、规划约束和专家知识的共同约束下，辅助完成任务拆解、场景构建、方案组织和表达优化；④构建面向城市治理过程的协同应用模式，将数字孪生体深度融入任务解析、数据构建、方案生成、仿真验证、决策执行和反馈记录等应用环节，推动物理世界任务与孪生世界方案之间的持续交互。

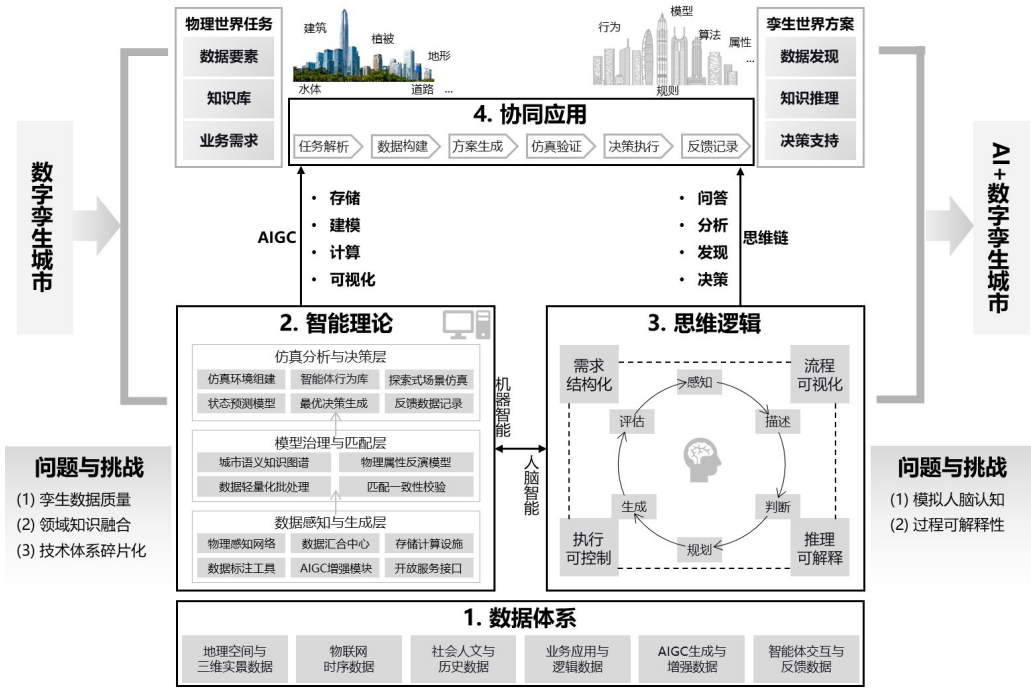


图2 数字孪生体生成理论框架

3.2 推进时空大数据轻量化治理

城市时空大数据轻量化治理是从数据规模导向转向任务适配导向，在数据规模扩张与系统效能约束之间寻找最优平衡点，是数字孪生城市能否从数据汇聚走向稳定运行和实际应用的前提条件。倾斜摄影、点云和BIM数据具有高几何复杂度，物联网（Internet of Things， IoT）、视频和业务数据具有高频更新与高语义密度特征，共同构成多源异构、多尺度、多时相、多维动态的时空大数据体系[21–22]。若缺乏面向应用场景的数据组织、精简表达和质量控制方法，海量数据反而会增加存储、传输、渲染、查询和更新的负担，导致模型加载缓慢、跨平台适配困难、更新成本升高和业务应用效率下降[23]。时空大数据轻量化治理的重点在于提高数据选择、结构优化、标准适配和质量评估的智能化水平[24–25]。

数字孪生城市中的数据价值，取决于其能否在特定场景下支撑空间识别、对象计算、状态感知和业务决策。轻量化治理不是简单压缩数据规模，不能以数据量最小化作为唯一目标，而是提升数据表达与治理任务之间的匹配程度，需要依据应用场景明确数据保

留范围、精度等级、语义粒度和更新频率，并对模型简化、格式转换和数据删减可能产生的影响进行评估。生成式AI可以参与这一过程中的数据识别、特征提取和规则生成，但其作用应嵌入专业数据治理流程之中，仅用于辅助判断数据价值和表达粒度，而不能替代人工审核与业务校验（图3）。

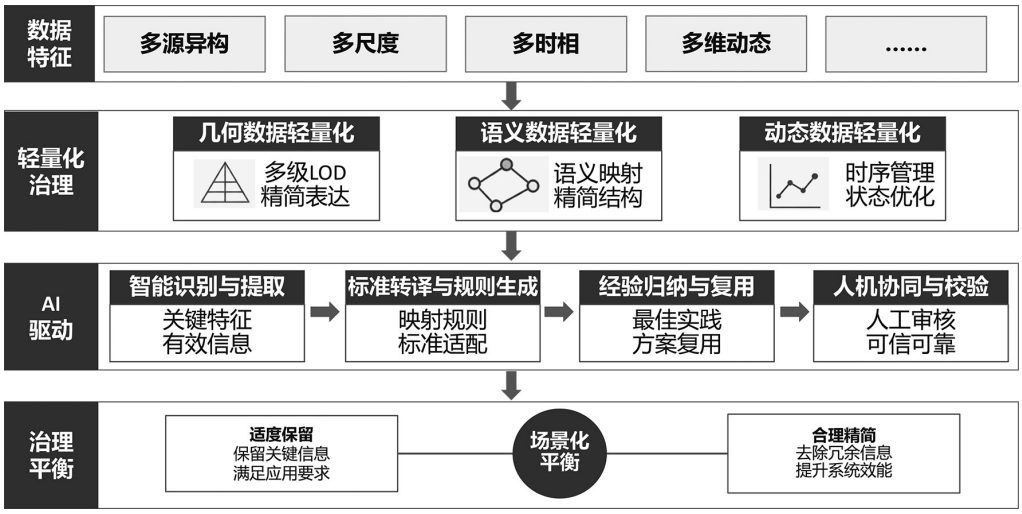


图3　时空大数据轻量化治理与标准化适配

轻量化治理需要同时处理几何、语义和时序3个层面的数据负担[26-27]。对于三维几何模型，应根据空间浏览、规划分析、应急指挥和移动端展示等不同需求，构建多细节层级（Level of Detail，LOD）体系，在保留主体轮廓、拓扑关系和关键构件的基础上，通过纹理压缩、参数化重建、实例化表达和模型切片减少冗余几何信息，可结合计算机视觉、机器学习、深度学习等方法，辅助识别重复构件、冗余结构和关键特征点，为模型裁剪和层级重构提供参考。对于语义数据，应在对象分类、属性字段、业务规则和标准编码之间建立稳定映射，减少同物异名、属性缺失、语义粒度不一致等问题，提升数据的结构化表达和机器可处理能力[28]，可使用生成式AI辅助生成格式转换说明、语义映射规则和数据质量检查结果，提高跨部门、跨平台数据处理效率。对于动态数据，应围绕事件流、状态更新和历史轨迹建立时序管理方法，在实时性、完整性和查询成本之间进行协调，避免高频数据无差别累积造成系统负载过高，可使用生成式AI实现异常状态识别、事件模式归纳和更新策略生成，但相关结果仍需依据业务规则和历史数据进行校正。

可见，轻量化治理实质上是精度保持、语义一致、时效保障和计算效率之间的综合协调。过度保留数据会降低系统运行效率，过度删减数据则可能削弱空间真实性、语义完整性和决策可靠性。部分几何细节、边界信息和低频业务数据，在常规展示中可能并不显著，但在安全评估、交通组织、应急响应和风险预警等场景中可能具有关键作用。只有将轻量化处理、标准化适配、质量控制和生成式AI辅助能力结合起来，数字孪生城市才能在复杂数据环境下保持可运行、可更新、可迁移和可应用。

3.3　强化高逼真渲染与动态仿真协同

数字孪生城市既要表达建筑、道路、设施、地形和环境等空间要素，也要表达交通运行、客流变化、设施状态、应急处置等动态过程。高逼真渲染主要解决城市空间如何被清晰、稳定和真实地呈现的问题，动态仿真则关注城市过程在不同条件下如何变化。二者如果相互脱节，三维场景则仅停留在展示层面，仿真结果也难以与具体空间对象和业务场景对应。

在实际建设中，渲染与仿真的衔接首先依赖统一的空间底座和数据接口。三维场景应为仿真模型提供对象位置、道路网络、建筑边界、设施分布和场景约束等基础信息；仿真模型输出的交通流量、客流密度、设施状态、风险范围等结果，也需回写到三维场景中，用于展示、比较和复核。这样，三维场景不只是可视化背景，而是仿真模型组织输入、表达输出和支持业务判断的空间载体。

在场景数据不完整、局部纹理缺失或对象更新不及时的情况下，生成式AI可用于辅助补全场景细节、识别变化区域和生成候选方案；在仿真应用中，生成式AI也可用于整理输入条件、生成情景方案、解释模型输出和形成文字说明。但这些结果不能直接替代测绘数据、机理模型和业务判断，特别是在交通组织、应急疏散、文旅高峰和城市安全等场景中，仿真结果需要经过真实数据、模型参数和业务规则的校验，不

能仅凭生成结果作出判断。

近年来，神经辐射场、三维高斯等技术为复杂对象重建和实时渲染提供了新的方法支撑[29]。但城市数字孪生不同于单体对象建模，其对象范围更大、数据来源更多、更新周期更长，且往往需要同时服务于展示、查询、分析和推演等多类任务。高逼真渲染应与动态仿真、交互分析和业务应用共同构成闭环，使数字孪生城市既能真实呈现城市空间，又能可靠表达城市过程（图4）。

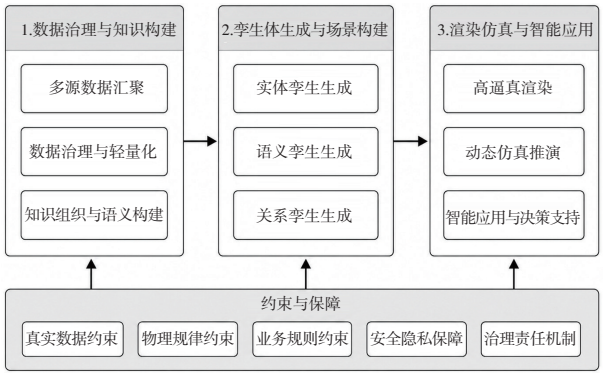


图4 高逼真渲染与动态仿真技术路线

3.4 形成面向典型场景的集成应用能力

数字孪生城市建设的关键之一是要将数据、模型、仿真和业务规则组织成面向典型场景的集成应用能力[30-31]。数字孪生城市已经具备时空数据汇聚、三维空间表达、实时状态感知和动态仿真推演等技术基础，但这些能力主要停留在分散调用和静态展示层面，难以直接转化为面向复杂治理任务的应用能力[32]。

典型场景包括交通组织、文旅服务、会展保障、应急管理、低空经济、设施运维和生态环境监测等，对数据类型、模型精度、更新频率、分析方法和结果表达具有不同要求。生成式AI重点在于围绕具体场景，将治理对象、事件状态、业务规则和任务目标转化为可识别的对象、可计算的关系、可调用的模型和可生成的智能化水平，从而缩短数字孪生技术能力与行业实践需求之间的距离。

从技术实现层面看，生成式AI主要通过场景语义解析、模型服务编排和结果表达生成等环节形成集成应用能力（图5）。场景语义解析用于从业务文本、感知数据、空间对象和历史案例中提取治理对象、事件状态、约束规则和目标条件，将自然语言任务转化为数字孪生系统可处理的结构化请求；模型服务编排用于根据任务目标调用时空数据库、三维模型、预测模型、仿真模型和知识库，将数据查询、空间分析、情景推演和规则判断连接为连续计算流程；结果表达生成用于将模型输出转化为成因解释、方案说明、风险提示、调度建议和报告文本，提高计算结果向业务行动转化的效率。

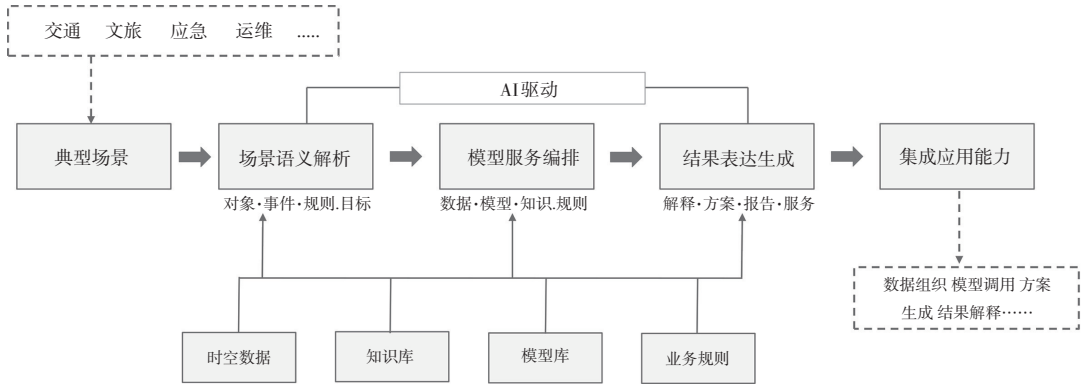


图5 面向场景任务的技术链条

为保证这种集成能力具备工程可实现性，生成式AI还需要与时空数据库、知识库、模型库和业务规则库协同运行。时空数据库提供位置、对象、状态和事件数据等；知识库提供概念关系、行业规范和历史案例等；模型库提供预测、仿真、评估和优化能力等；业务规则库提供权限、流程、阈值和责任约束等。生成式AI在其中承担任务解析、服务调度和结果表达功能，其生成内容需要具有数据来源、模型依据和规则约束。这样可以避免生成结果脱离真实场景，也可以减少模型“幻觉”、规则误读和责任边界模糊等问题。

4 结 语

城市的运行始终建立在真实的空间秩序、人群行为和规则边界之上，孪生不是对城市外观的逼真复刻，而是对城市运行逻辑的结构化映射。生成式AI技术的快速发展为数字孪生城市建设拓展了城市空间表达、语义建模、场景生成和方案推演的实现路径，但数字孪生城市的真正价值，也取决于其能否在真实数据、物理规律、业务规范和治理流程的约束下，形成可以解释、校验、持续更新的城市认知和决策支持能力。

因此，数字孪生城市建设重点不能满足于内容生成和可视化展示，而应围绕多源数据融合、生成结果可信验证、跨尺度推理、复杂场景仿真和人机协同治理等问题开展持续攻关，最终促使生成式AI实现更具实践价值的应用。

参考文献

[1] 党安荣,甄茂成,王丹,等. 中国新型智慧城市发展进程与趋势[J]. 科技导报,2018,36(18):16-29

[2] 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

[3] 朱庆,张利国,丁雨淋,等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. 测绘学报,2022,51(6):1040-1049

[4] 李德仁,张过,沈欣洲. 论新型基础测绘与实景三维中国建设[J]. 测绘学报,2020,49(12):1495-1505

[5] 陆锋,余丽,余柏蒗. 地理信息科学发展与技术创新[J]. 地球信息科学学报,2024,26(4):767-778

[6] 杨元喜. 地理空间数字孪生与时空智能[J]. 测绘学报,2025,54(2):213-220

[7] 刘纪平,周婷婷,刘坡,等. 实景三维地理实体建模的思考与实践[J]. 测绘学报,2025,54(4):650-660

[8] 燕琴,顾海燕,杨懿,等. 智能遥感大模型研究进展与发展方向[J]. 测绘学报,2024,53(10):1967-1980

[9] 李德仁,姚远,邵振峰. 智慧城市中的大数据[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(6):631-640

[10] 仲腾,张雪英,许沛,等. 基于云原生的地理空间知识库管理关键技术与服务方法研究[J]. 地球信息科学学报,2024,26(9):2013-2025

[11] 张新长,廖曦,阮永俭. 智慧城市建设中的数字孪生与元宇宙探讨[J]. 测绘通报,2023(1):1-7,13

[12] 陈军,艾廷华,闫利,等. 智能化测绘的混合计算范式与方法研究[J]. 测绘学报,2024,53(6):985-998

[13] 王培晓,张恒才,张岩,等. 地理空间智能预测研究进展与发展趋势[J]. 地球信息科学学报,2025,27(1):60-82

[14] 李德仁. 论空天地一体化对地观测网络[J]. 地球信息科学学报,2012,14(4):419-425

[15] 郭仁忠,陈业滨,应申,等. 三元空间下的泛地图可视化维度[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(11):1603-1610

[16] 郭仁忠,陈业滨,赵志刚,等. ICT时代地图的科学概念及表达框架[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(12):1978-1987

[17] 王家耀,陈琳,程士源,等. 人工智能赋能地图科学数智化[J]. 测绘学报,2026,55(3):381-389

[18] 任福,盛兆阳,张琛,等. 智能地图制图思维结构与典型路径[J]. 时空信息学报,2026,33(1):13-23

[19] 任福,翁杰,王昭,等. 关于智能地图制图的几点思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(12):2064-2068

[20] Haraguchi M, Funahashi T, Biljecki F. Assessing Governance Implications of City Digital Twin Technology:A Maturity Model Approach[J]. Technological Forecasting and Social Change,2024,204:123409

[21] 王家耀,武芳,郭建忠,等. 时空大数据面临的挑战与机遇[J]. 测绘科学,2017,42(7):1-7

[22] 李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学[J]. 测绘学报,2016,45(4):379-384

[23] Jeddoub I, Nys G A, Hajji R, et al. Digital Twins for Cities: Analyzing the Gap Between Concepts and Current Implementations with Aspecific Focus on Data Integration[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2023,122:103440

[24] Weil C, Bibri S E, Longchamp R, et al. Urban Digital Twin Challenges:A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities[J]. Sustainable Cities and Society,2023,99:104862

[25] 汤磊,许小峰,程雨松,等. 城市数字孪生数据体构建新范式:全域、动态与智慧[J/OL]. (2025-09-09)[2026-06-31]. 地球信息科学学报, https://link.cnki.net/urlid/11.5809.P.20250909.1251.002

[26] Jin C, Lee Y, Lee S, et al. Lightweighting Process of Digital Twin Information Models for Smart City Services[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2024,28(4):1304-1320

[27] Quek H Y, Sielker F, Akroyd J, et al. The Conundrum in Smart City Governance:Interoperability and Compatibility in an Ever-growing Ecosystem of Digital Twins[J]. Data & Policy,2023,5:e6

[28] Shen S, Wu Y, Zhang H, et al. A Simplification Method for Large-scale Urban Point Clouds Considering Diversity of Terrain Object Features[J]. International Journal of Digital Earth,2025,18(1):2505993

[29] 马威,涂强,潘建平,等. 桥梁实景三维高斯辐射场建模[J]. 测绘学报,2024,53(9):1694-1705

[30] 郭仁忠,贺彪,赵志刚,等. 智慧城市逻辑架构与孪生平台技术需求[J]. 测绘学报,2025,54(5):777-784

[31] Bibri S E, Huang J, Jagatheesaperumal S K, et al. The Synergistic Interplay of Artificial Intelligence and Digital Twin in Environmentally Planning Sustainable Smart Cities:A Comprehensive Systematic Review[J]. Environmental Science and Ecotechnology,2024,20:100433

[32] 吴志强,王坚,李德仁,等. 智慧城市热潮下的“冷”思考学术笔谈[J]. 城市规划学刊,2022,66(2):1-11