引文格式：安少帅,贾林瑞,张树森,等. 智慧城市视角下数字孪生技术的可持续应用路径探析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):25-29. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.02.006

智慧城市视角下数字孪生技术的可持续应用路径探析

安少帅，贾林瑞*，张树森，黎春杏
（深圳市深汕特别合作区智慧城市建设管理服务中心，广东 深圳 516471）

摘　要：数字孪生技术作为智慧城市发展的重要组成部分，通过创建物理世界和数字世界的映射，为城市管理提供了强大的监控、分析和决策支持。但数字孪生技术在实际应用中面临诸多挑战，包括数据集成成本、算法敏捷性、渲染效率，以及时空模拟和虚拟仿真的应用限制等。通过细致分析数字孪生技术在智慧城市建设中的应用，识别了关键领域的技术挑战，并提出了创新的解决方案。旨在为智慧城市的规划者、建设者和决策者提供实用的指导和建议，促进数字孪生技术的可持续应用，共同推动智慧城市向更高效、智能和可持续的方向发展。

关键词：智慧城市；数字孪生；时空模拟；虚拟仿真
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0025-05

Exploration of Sustainable Application Pathways for Digital Twin Technology from the Perspective of Smart City

AN Shaoshuai, JIA Linrui, ZHANG Shusen, LI Chunxing
(Shenzhen Shenshan Special Cooperation Zone Smart City Construction Management Service Center, Shenzhen 516471, China)

Abstract: Digital twin technology is a pivotal element in the evolution of smart cities, offering robust tools for surveillance, analysis, and decision-making by bridging the physical and digital realms. Despite its potential, the implementation of this technology encounters several obstacles, such as the expense associated with data consolidation, the need for more nimble algorithms, the quest for enhanced rendering performance, and constraints within the realms of spatio-temporal and virtual simulations. In this paper, we delved into an in-depth examination of how digital twin technology was leveraged in the context of smart city development. We pinpointed key technical challenges and introduced groundbreaking solutions. Our goal is to arm urban planners, developers, and policymakers with actionable insights and advice. By doing so, we aim to foster the sustainable integration of digital twin technology, propelling the progression of smart cities toward a horizon marked by heightened efficiency, intelligence, and sustainability.

Key words: smart city, digital twin, spatio-temporal simulation, virtual simulation

数字孪生所构建的“虚”与“实”关系，是实现城市精细化管理与智能决策的关键枢纽。从物理形态的城市向虚拟数字模型的映射过程，绝非简单的复制，而是需要精准且动态地反映城市中各类实体的固有特性与实时变化，这不仅是技术层面的深度挑战，更是对城市运营智慧的考验。在此映射进程中，数字孪生技术若要实现可持续应用，不能仅局限于单纯的技术突破，还需全方位考量成本效益、开发敏捷性、管理机制以及运营策略等多个维度。这其中，成本效益决定了技术落地的经济可行性，开发敏捷性影响着技术迭代的灵活性，管理机制与运营策略则关乎数字孪生体系管理与运营的高效性，每一个维度都相互关联、缺一不可。本文旨在提出一系列解决方案，以实现数字孪生技术在智慧城市建设中的经济可行性、技术迭代的灵活性，以及管理与运营的高效性，确保数字孪生技术在不断演变的外部环境中的长期发展和应用[1-3]。

1　数字孪生技术在智慧城市建设中面临多重挑战

1）数据汇聚与融合成本高：基础地理数据更新慢、成本高，行业数据难以自动化对接，大量非结构化数据处理效率低。需通过创新数据采集策略、丰富融合手段、降低治理成本，以实现高效数据汇聚。

2）分析算法与应用开发敏捷性不足：平台建设常忽略算法与组件的标准化、模块化沉淀，导致难以

第一作者简介：安少帅（1991—），硕士，工程师，从事智慧城市与数字政府信息化基础设施建设、公共数据管理与授权运营等工作，E-mail：18200353856@163.com。
通信作者：贾林瑞（1988—），博士，工程师，从事新型智慧城市与数字政府等信息化项目管理等工作，E-mail 1396927712@qq.com。

快速响应业务变化。需加强算法模块化共享与示范应用引领，提升平台灵活性和复用能力。

3）渲染效果与效率难以兼顾：现有方案常偏重空间精度与效率，局部优化依赖不同技术栈，难以实现统一平台目标。应通过协同化数据组织与渲染模拟同步，提升可视化效果与实时性。

4）时空模拟与虚拟仿真应用程度低：缺乏统一数据组织与存储一体化机制，制约了城市复杂系统的动态模拟能力。需制定跨行业数据标准、优化算力基础，增强仿真与决策支持能力。

5）管理机制与运营体系复杂：跨部门数据权属、标准与共享机制不健全，传统项目建设周期长、维护成本高。应强化关键指标分析与精细化运营，构建高效、可持续的管理体系。

2 数字孪生技术在智慧城市建设中的可持续解决方案

针对数字孪生技术在智慧城市建设中所面临的挑战，本文从技术应用成本、开发敏捷性、时空模拟以及管理机制等关键领域分别进行创新应用的思路阐述，期望通过不断的技术创新和机制优化，推动数字孪生技术在智慧城市的建设中向更高效、更智能的方向发展。

2.1 丰富数据融合手段

2.1.1 挖掘新型时空数据的整合应用

新型时空数据的涌现，为智慧城市的构建提供了前所未有的信息深度与广度。这些数据类型，如腾讯位置大数据、地图出行数据、移动信令数据以及POI数据，不仅成为监测城市运行状态的重要工具，更因其时效性强、分辨率高、颗粒度细和采集成本低等特性，为城市动态的实时反映和微观现象的捕捉提供了强有力的数据支撑[4]。与传统时空数据相比，这些数据的高精度地理空间定位能力，使得城市管理者能够精确识别和响应城市中微小的地理变化和个体行为模式[5]。

这些数据在智慧城市的不同应用场景中展现出巨大的潜力。例如在交通管理领域，通过深入分析出行数据和位置大数据，不仅可以优化交通流量，减少拥堵，还能预测并规划交通基础设施的布局，提升城市交通系统的效率和响应能力。此外，通过对POI数据进行时间序列分析，城市规划者能够洞察区域内各类基础设施和工商行业的发展动态，从而为城市基础设施的优化和政务服务的改进提供数据驱动的决策支持[5]。

2.1.2 研究低成本三维数据采集模式

用全景图，全景视频代替倾斜摄影建模，探索低成本三维数据采集模式。全景图和全景视频通常通过特殊的拍摄技术，如使用多个摄像机或一个摄像机进行360°拍摄，通过图像拼接和畸变校正技术形成无缝的全景画面，可提供高度逼真的场景体验，使用户仿佛身临其境。相较于传统手工建模和无人机倾斜摄影建模，全景技术的数据采集效率会显著提高，同时建模效率也会极大提高，无需依赖高性能的显卡设备，基于拍摄设备本身即可直接合成，通过5G等通信技术，可实现全景数据的实时传输。而且全景技术还规避了倾斜建模过程中的纹理断裂和不连续现象，整体观感质量会有更大提升。

同时随着VR技术的跨越式发展，全景照片可提供成本最低的VR沉浸式体验。目前部分VR设备可直接浏览全景照片，进行沉浸式体验。随着各类全景相机技术的发展，全景技术不仅可以实现静态照片的沉浸式体验，还可以实现全景视频等动态内容的交互式浏览，VR应用效果将得到进一步提升。

2.1.3 尝试多精度三维数据建模方法

3D高斯泼溅通过模拟真实世界中的光照和物理现象，来增强模型的视觉效果和真实感[6]。这种技术能够根据场景中的物体表面特性，计算出相应的高光和阴影效果，从而使得3D模型在视觉上更加细腻和逼真。运用3D高斯泼溅技术进行渲染，能够更好地凸显模型细节，将高精度模型的优势充分展现出来，进一步提升整体视觉效果。其他类似的技术包括neural radiance fields（NeRF），这是一种基于深度学习的方法，用于从一组稀疏的二维图像中重建出复杂的三维场景[7]。NeRF技术通过神经网络来预测场景中任意位置的体积密度和颜色，进而渲染出高质量的三维视图。基于这些AI进行场景合成的技术，可以在无人机倾斜摄影采集技术的框架下，通过自动化的特征提取和场景理解技术，基于降低航线覆盖率的方式提高建模效率。这种方法可以减少所需的飞行次数和拍摄的照片数量，同时保持或提高最终3D模型的质量。

2.1.4 探索多源互联网开放数据的汇聚方案

在当前互联网技术的快速发展背景下，Web 2.0和短视频等平台的广泛应用对各行各业产生了显著影响。在导航地图、房地产中介、O2O服务平台以及在线教育平台等领域，用户生成内容（UGC）的积累已

成为一种普遍现象。这些平台收集了大量用户行为数据和交互信息，不仅数据量增长迅速，时效性强，而且数据类型多样，包括文本、图像、视频、音频和传感器数据等。这些数据的多样性和丰富性，为构建智慧城市的数字孪生底座提供了具有人文特色的重要数据资源。通过运用网络爬虫技术或API调用，结合数据清洗与预处理步骤，可以高效地将这些数据应用于城市规划、基础设施布局、交通管理以及公共安全监控等多个领域[8]。

随着人工智能（AI）和机器学习技术的不断进步，自动化的数据采集与分析流程将变得更加高效。例如，自然语言处理（NLP）技术能够自动从文本数据中提取有价值的信息，而计算机视觉技术（OpenCV）则能够对图像和视频内容进行深入分析，为决策制定提供有力的数据支持。尽管此类数据的获取成本相对较低，但在使用过程中必须遵循严格的法律法规，包括但不限于数据隐私保护和版权法规。

2.2　打造协同参与界面

2.2.1　充分意识到数据治理的重要性与挑战

数据治理在智慧城市数字孪生平台的建设中扮演着至关重要的角色。它是确保数据的准确性、可用性和安全性的基础，是维持各类上层应用持续保持活力和创新潜力的关键因素。通过有效的数据治理，可以实现包括台账数据、视频监控、物联感知数据等多源异构数据的整合。这不仅可以降低行业应用的开发难度，而且提高了信息支撑的广度和深度，避免了决策过程中的信息孤岛和片面性问题。

数据治理工作涉及多个环节，如数据汇聚、标准化、质量管理、服务提供和数据共享等。在理论框架方面，国际上有DAMA（国际数据管理协会）等组织提供指导[9]，国内则有DCMM（数据管理能力成熟度模型）等标准指引[10]。在实际操作中，需要结合实际情况进行多个技术栈不同分析方法的融合应用。

2.2.2　以用户体验为核心推动数据化协同工作

为了推动多部门合作和跨业务系统的协同，必须尽可能降低数据治理的门槛。这包括开发易于使用的数据处理工具、制定统一的数据标准、提供数据治理培训和建立跨部门的沟通机制。将用户体验放在首位，通过简化操作流程、提供直观的用户界面，使得非专业人员也能参与到数据治理工作中，逐步实现“人人都是数据分析师”的目标。

高效易用的数据治理流程可以实现业务型关系数据（如台账和报表）与时空数据的低成本融合应用，提高数字孪生技术覆盖的应用场景，确保更多不同行业主管部门之间的数据共享和协同工作，从而实现智慧城市各个领域的数据化管理和决策支持，推动智慧城市的整体发展。

2.3　算法模块化共享

2.3.1　算子模块化与算法可继承

数字孪生技术作为一种前沿的信息化手段，在不同行业中的应用展现出广泛的适应性和灵活性。尽管各行业面临的具体问题和所需算法模型存在差异，但算法模型中的模块化算子往往具有跨领域的通用性和可复用性。例如，查询分析、路径导航、缓冲区建立和叠加分析等算子（图1），在多种场景下均显示出其价值和潜力。传统上，工程师需依靠个人能力从头开始实现这些复杂算法，这无疑会带来巨大的时间和经济成本。然而，通过算法模块化，可以显著降低软件开发的门槛，使得具备基本计算机知识的业务人员也能参与到应用开发中来。这种跨专业的技术与业务融合，有助于减少沟通障碍，提高需求调研和原型设计的精准度，从而避免因需求不明确而导致软件开发成本的不必要增加。在完成信息化基础设施的初步建设后，通过模块化算法的开发和标准化算法的应用，可以实现功能的持续升级和扩展，而无需重复进行大规模的重建工作，从而节约了研发资源，提高了开发效率。



图1　空间分析中常见的算子和控件

2.3.2　数据共享与算法共享并重

在智慧城市的构建过程中，数据是基础，算法是核心，数据共享与算法共享是推动信息化进程的两大支柱。软件开发工程师和大数据算法工程师所积累的

算子与算法是极其宝贵的虚拟资产，它们代表了专业知识和技术经验的结晶。为了提升复杂算法的开发效率、降低开发成本，并增强软件开发的可读性、可扩展性和协作性，这些算子和算法应当通过一个协作界面实现集成和共享，以支持将重复性和机械化的操作自动化。算法的持续沉淀和集成，将不断丰富智慧城市数字孪生底座的功能性和扩展性。这种直接使用和标准化接口的提供，将进一步促进数字孪生技术的普及，降低技术门槛，使得更多的业务人员和开发者能够参与到智慧城市的建设中来。

2.3.3 串联数据与算法打造示范应用

在数字孪生底座的开发过程中，数据和算法的有机结合是实现平台功能的基础。为了使非专业用户能够快速把握平台的潜力和功能，平台应该具备低成本的示范应用搭建功能。这些示范应用不仅作为展示平台能力的窗口，也是教育和培训工具，使普通用户能够直接参与到应用的开发中。这种参与不仅促进了跨领域的数据交流，而且加强了数据在决策过程中的应用，激发了基于数据的创新。示范应用的实践将展示如何将数据转化为知识，将知识应用于决策，从而推动各行业主管部门在数据驱动的环境下实现更加明智和高效的工作模式。

2.3.4 遵守标准和规则保障系统可持续性

在数字化和智能化快速发展的当下，大数据、人工智能、物联网和区块链等前沿技术的融合已成为未来发展的显著趋势。这些技术的集成不仅为智慧城市的构建提供了强大的技术支撑，也对系统的可持续性和长期兼容性提出了更高要求。在智慧城市数字孪生平台的建设过程中，应坚持开放性和共享性的原则。平台的设计和开发应严格遵循技术选型的标准，确保数据格式与行业标准兼容，分析服务能够实现无缝集成。这种高度开放的策略不仅促进了平台的持续迭代和优化，也保证了平台能够广泛吸收和融合各种技术优势。

智慧城市数字孪生平台在建设过程中，应坚持以格式开放、服务共享为原则，严格把握技术路线选型，确保数据格式符合行业标准，分析服务做到无缝集成，以保证平台高度开放、博采众长与持续迭代。只有信息化系统建设不同模块都符合国际及国内相关标准，数字孪生技术的应用才能紧跟技术创新，持续兼容并包。

2.4 协同化数据组织

目前基于数字孪生技术进行时空模拟的应用在细分行业领域已经有一定探索，如杨滔等[11]借助数字孪生技术深入探究了城市规划设计中城市空间形态的智能生成问题，旨在定量揭示城市形态美学与社会经济环境等多重因素之间的协同关系，并探索城市发展的价值驱动力。这些研究展示了数字孪生技术在特定领域内的应用潜力，但在模拟更为复杂的整体城市治理过程，尤其是涉及广泛的人类社会活动时，仍然面临着挑战。

2.4.1 制定跨行业协同的统一数据组织方式

为解决渲染效率与模拟复杂度同步推进的矛盾[11]，英伟达（NVIDIA）提出了基于通用场景描述（OpenUSD）框架的解决方案[12]。OpenUSD提供了一种统一的数据描述方式，能够整合包括几何体、材质、动画和其他相关数据在内的3D场景，适用于需要高保真度的模拟和预测[13]。OpenUSD与NVIDIA的RTX渲染技术集成，可以提供实时的渲染和仿真能力，这对于需要实时反馈的时空模拟和推演预测至关重要。同时OpenUSD可以与AI技术结合，利用AI进行场景分析、预测和自动化设计，为时空模拟和推演预测提供了更高级的功能。

2.4.2 优化算力基础保障大规模模拟计算

基于通用场景描述（OpenUSD）的框架为智慧城市数字孪生系统提供了强大的数据集成能力，确保了来自不同来源和格式的数据能够在一个基于层次的、可扩展的架构下进行实时渲染和模拟[14]。然而，大规模3D场景处理中的性能优化问题仍是关键挑战。为提升系统性能，需要进一步升级算法架构和算力设施。这包括但不限于优化数据结构、改进渲染技术、增强计算资源管理，以及开发更高效的数据处理算法等[15]。通过这些综合性的优化措施，数字孪生系统将能够更好地服务于智慧城市的规划、建设、治理、运营和维护，为城市决策者提供强有力的支持。

2.5 精细化平台运营策略

2.5.1 通过日志监测分析平台运行关键指标

数字孪生平台作为智慧城市的核心底座，其平台的稳定性、易用性和安全性至关重要。为了确保数字孪生平台的软硬件资源能够及时响应用户需求的增长，关键性能指标的持续监控至关重要。通过存储效率和内存占用等指标的分析，可以为基础设施的适时升级提供依据，从而维持服务效率和用户体验的高标准。此外，通过细致的多时间维度分析，可以评估平台中各个图层、应用和用户的访问量，进而优化资源

配置，实现高活跃度模块的优先治理和低活跃度资源的合理释放。

2.5.2　基于量化分析结果制定数据责任更新机制

根据平台运行关键指标的结果分析，可以制定并调整平台所需数据的责任更新机制，明确不同模块的运营节奏和重要性。引入督办考核后，可以确保数据的准确性和时效性，强化平台的数据管理能力，确保数据管理的高效性和决策支持的可靠性。

3　结　语

本研究针对数字孪生技术在智慧城市发展中的关键应用及其面临的挑战，创新性地提出了低成本数据采集策略与数据融合治理技术，并探讨了构建协同参与的界面，推动算法模块化共享，以及通过示范应用引领技术革新等解决方案，均为智慧城市数字孪生平台的进一步发展指明了方向。此外，本研究强调了关键指标分析和精细化运营策略的重要性，这对于提高数字孪生平台的适应性和响应速度至关重要。通过持续监控关键性能指标，可以确保平台的软硬件资源能够及时适应用户需求的增长，从而保持服务效率和用户体验的高标准。

参考文献

[1] Chryssolouris G, Mavrikios D, Papakostas N, et al. Digital Manufacturing:History, Perspectives, and Outlook[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(5): 451-462

[2] 张明,郭亮,张蜀军,等. 耦合GIS和游戏引擎的数字孪生系统构建与实现[J]. 地理空间信息,2022,20(5):116-120

[3] 李毅,黄诗峰,臧文斌,等. 基于虚拟地理环境的数字孪生流域防洪应用技术探讨[J]. 遥感学报,2024,28(5):1330-1339

[4] 罗茜,焦利民. 地理位置大数据支持下的武汉人群活动模式识别与分析[J]. 时空信息学报,2023,30(1):86-94

[5] 葛丹东,郑艳艳,童磊. 基于POI数据挖掘的浙江省乡村旅游产业空间分异与影响因素研究[J]. 浙江大学学报(理学版),2023,50(4):483-494

[6] Xie H, Chen Z, Hong F, et al. Gaussian City: Generative Gaussian Splatting for Unbounded 3D City Generation[J]. arXiv Preprint arXiv:2406.06526

[7] 赵强,佘江峰,万奇峰,等. 神经辐射场应用于大规模实景三维场景可视化研究进展[J]. 遥感学报,2024,28(5):1242-1261

[8] 张恩嘉,龙瀛. 城市弱势区位的崛起:基于大众点评数据的北京休闲消费空间研究[J]. 旅游学刊,2024,39(4):16-27

[9] 韦苇,任锦鸾,李文姬. 基于国际比较的数据治理体系及优化策略[J]. 科技智囊,2022,27(7):1-7

[10] 马达,严玲玉. 基于DCMM的政府数据治理路径探究[J]. 网络安全和信息化,2023,7(8):46-48

[11] 杨滔,田颖,徐艳杰. 数字孪生赋能下的互动生成式规划与治理[J]. 上海城市规划,2023,32(5):4-10

[12] Jebens J, Agland S, Schmidt J, et al. Demystifying Open USD: End-to-end Data Pipelines and Workflows[M].Siggraph Asia 2023 Courses,2023

[13] Agbossou I. Urban Built Environment Visual Features Modeling for 3D GeoSimulation Using USD Standard Specifications[C]//International Conference on Innovation in Urban and Regional Planning. Cham: Springer Nature Switzerland,2023:169-182

[14] Agbossou I. Multi-scalar Urban Digital Twin Design: Architecture and OpenUSD Standards Based Methodology[J]. PriMera Scientific Engineering,2024,4(1):33-48

[15] 金河,刘涛,杜萍. 倾斜摄影测量数据轻量化处理工具设计与实现[J]. 地理空间信息,2024,22(10):75-78

（上接第24页）

三维坐标转换方法[J]. 测绘通报,2023(11):61-65

[11] 陈义,沈云中,刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,12(29):1101-1104

[12] 潘国荣,周莹,张德海. 坐标转换模型在盾构姿态计算中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(3):84-87

[13] 刘军,王鹤. 基于MATLAB的大地测量计算实验系统设计与实现[J]. 地理空间信息,2023,21(12):111-114

[14] 刘磊,何占国,郑作亚,等. 大角度三维坐标转换参数的一种迭代解法[J]. 测绘科学,2021,46(6):65-69,76

[15] 吴进二. 基于四元数法的空间坐标转换模型初探[J]. 地理空间信息,2020,18(5):120-122,125

[16] 张正禄. 工程测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2020

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市测量规范:CJJ/T 8-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011

[18] 国家测绘局. 全球定位系统(GPS)测量规范:GB/T 18314-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009