

# 孪生技术赋能城市精细化管理

李香莲 靳海旺 贾庆华

甘肃省通信产业服务有限公司邮电规划咨询设计分公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16572

**[摘要]** 城市精细化管理是提升城市运行效率、改善居民生活质量的关键路径。数字孪生技术作为新兴信息技术,通过构建与物理城市高度映射的虚拟模型,整合多源数据并实时反馈城市状态,为城市精细化管理提供了创新手段。本文阐述了数字孪生技术在城市精细化管理中的应用原理,分析了其在城市规划、交通、公共服务等多领域的具体实践,探讨了面临的挑战与应对策略,旨在为城市管理者提供技术应用参考,推动城市治理向精细化、智能化迈进。

**[关键词]** 数字孪生技术; 城市精细化管理; 智慧城市; 数据融合; 智能决策

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A

## Digital Twin Technology Empowering Refined Urban Management

Xianglian Li Haiwang Jin Qinghua Jia

Postal and Telecommunications Planning, Consulting and Design Branch Gansu Provincial Communications Industry Service Co., Ltd.

**[Abstract]** Refined urban management represents a critical pathway for enhancing city operational efficiency and improving residents' quality of life. As an emerging information technology, digital twin technology constructs highly mapped virtual models of physical cities, integrating multi-source data and providing real-time feedback on urban conditions. This offers innovative means for advancing refined urban management. This paper elucidates the application principles of digital twin technology in urban precision management, analyses its practical implementation across multiple domains including urban planning, transportation, and public services, and explores the challenges encountered alongside corresponding strategies. It aims to provide technical application references for urban administrators, thereby advancing urban governance towards precision and intelligence.

**[Key words]** digital twin technology; urban precision management; smart city; data fusion; intelligent decision-making

### 引言

随着城市化进程的加速,我国城市化率已突破65%,超100万人口的城市达106个。城市规模的扩张使得人口、资源、环境等要素的交互日益复杂,传统的“粗放式”管理模式在应对交通拥堵、资源分配不均、应急响应迟缓等问题时逐渐捉襟见肘。据统计,我国一线城市早晚高峰平均通勤时间达45分钟以上,年均因交通拥堵造成的经济损失占GDP的2%;在城市内涝防治方面,2023年全国有31个城市因暴雨引发严重内涝,直接经济损失超500亿元。

城市精细化管理理念应运而生,强调通过精确、高效、协同的管理手段,优化城市资源配置,提升城市运行效能。数字孪生技术的出现为这一理念的落地提供了核心支撑。它以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,借助物联网、大数据、人工智能等

技术,实时采集城市运行数据,实现物理城市与虚拟模型的双向映射与实时交互<sup>[1]</sup>。例如,深圳利用数字孪生技术构建的城市交通模型,可提前5分钟预测交通拥堵点,准确率达92%,为交通疏导赢得宝贵时间;上海浦东的数字孪生城市平台实现了2000平方公里范围内的管网、建筑、交通等要素的动态建模,使地下管网故障定位时间从平均8小时缩短至1.5小时<sup>[2]</sup>。本文聚焦数字孪生技术在城市精细化管理中的应用,深入剖析其技术支撑与实践价值。

### 2 数字孪生技术赋能城市精细化管理的原理

#### 2.1 多源数据融合与实时感知

数字孪生技术的核心基础是构建全面的城市感知网络。通过在城市基础设施(道路、桥梁、管网)、建筑楼宇、交通工具等载体上部署千万级物联网设备(如毫米波雷达、红外传感器、

高清摄像头、智能水表电表),形成“空天地”一体化的数据采集体系<sup>[3]</sup>。这些设备可实时采集交通流量(采样频率达10次/秒)、空气质量(监测指标涵盖PM2.5、臭氧等12项参数)、能源消耗(精确到每栋建筑的实时用电量)、噪声水平(监测范围覆盖90%以上的居民区)等多维度数据。

利用边缘计算与云计算协同的数据融合技术,将不同格式、来源的数据进行清洗、转换与整合,形成统一的城市数据资源池<sup>[4]</sup>。例如,上海某区通过融合交通卡口数据(日均3000万条)、气象站数据(每小时更新)、手机信令数据(覆盖85%的常住人口),构建城市运行综合数据库,数据更新频率达秒级,数据准确率提升至98.7%,为精细化管理提供精准的数据基础。同时,采用联邦学习技术在保护数据隐私的前提下实现跨部门数据共享,解决了传统“数据孤岛”问题<sup>[5]</sup>。

### 2.2 高精度建模与仿真推演

基于地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)、激光点云等技术,对城市地形、建筑、管网等进行三维建模,构建毫米级精度的数字孪生模型<sup>[1]</sup>。模型包含城市地上(建筑、道路、绿化)、地下(供水、燃气、电力管网)、空中(通信基站、监控摄像头)等全要素,形成完整的城市数字镜像。例如,北京城市副中心的数字孪生模型涵盖215平方公里范围内的50万栋建筑、1200公里地下管网,建模精度达0.5毫米,可清晰呈现建筑内部的管线走向与设备状态<sup>[2]</sup>。

结合实时采集的数据,数字孪生模型可动态模拟城市运行状态,并通过时空预测算法推演未来发展趋势<sup>[3]</sup>。在交通领域,模型可模拟不同时段、天气条件下的车流变化,预测准确率达85%以上;在能源领域,能仿真不同季节的电力负荷曲线,为电网调度提供科学依据。成都在城市规划中,利用数字孪生模型模拟了3种不同开发方案下的交通流量、能源需求、环境承载能力,通过对比分析选择最优方案,使新区建成后的早晚高峰平均车速提升18%,能源消耗降低12%<sup>[4]</sup>。

### 2.3 智能决策与协同管理

借助深度学习、强化学习等人工智能算法,对数字孪生模型中的海量数据进行分析挖掘,生成精准的决策建议<sup>[5]</sup>。在交通管理中,基于深度Q网络(DQN)的信号配时算法可根据实时车流量动态调整红绿灯时长,使路口通行效率提升25%;在环境治理中,利用图神经网络(GNN)识别污染扩散路径,定位污染源的准确率达90%<sup>[1]</sup>。

通过构建跨部门的协同管理平台,实现城市管理各部门的联动响应<sup>[2]</sup>。平台整合公安、交通、环保、应急等12个部门的业务系统,当数字孪生模型监测到异常情况时,自动向相关部门推送预警信息与处置方案。例如,北京在应对2023年暴雨灾害时,基于数字孪生模型提前2小时预测出15处易积水区域,城市排水部门提前部署抽排设备,交通部门实施临时交通管制,应急部门准备救援物资,多部门协同作业使积水清理时间缩短30%,未发生人员伤亡事件<sup>[3]</sup>。

## 3 数字孪生技术在城市精细化管理中的应用实践

### 3.1 城市规划与建设的精准化

在城市新区规划中,数字孪生技术实现了规划方案的可视化模拟与量化评估<sup>[4]</sup>。雄安新区在规划阶段构建了全域数字孪生模型,覆盖1770平方公里土地,通过模拟不同产业布局下的人口流动、交通需求、公共服务配套等情况,优化了产业空间分布与基础设施规划。模型预测显示,采用“职住平衡”的规划方案可使居民平均通勤距离缩短至3公里以内,公共服务设施的覆盖率提升至95%。基于模型优化的规划方案实施后,新区首批建成区的职住比达到1:1.2,优于国内同类新区的平均水平<sup>[5]</sup>。

在城市更新项目中,数字孪生技术辅助评估建筑改造的可行性与影响<sup>[1]</sup>。上海某老旧小区改造时,利用BIM+GIS构建的数字孪生模型,精确模拟了建筑结构加固、加装电梯、管线改造后的空间变化与结构安全性。通过模型分析发现,原设计方案中的电梯井位置会影响建筑抗震性能,经优化调整后,既满足了居民出行需求,又确保了建筑安全。改造过程中,居民通过VR设备直观查看改造效果,参与方案优化的积极性提升,满意度达92%,较传统改造项目提高30个百分点<sup>[2]</sup>。

### 3.2 城市交通管理的智能化

构建全要素交通数字孪生系统,实现对道路、车辆、行人、公共交通的全方位监测与管理<sup>[3]</sup>。广州市在中心城区部署了5000余个交通传感器与3000路高清摄像头,将实时采集的车流量、车速、交通事故等数据反馈至数字孪生模型,利用长短时记忆网络(LSTM)预测未来1小时的交通拥堵趋势,准确率达88%。基于预测结果,系统自动生成信号灯配时方案与交通诱导信息,通过导航软件推送至驾驶员,使主干道通行效率提升20%,交通事故率下降15%<sup>[4]</sup>。

在智能停车管理方面,深圳市某商圈构建了涵盖20个停车场、5000个车位的数字孪生停车系统<sup>[5]</sup>。系统实时采集各停车场的车位使用情况,通过粒子群优化算法为驾驶员规划最优寻位路径,并同步显示停车场的出入口拥堵情况。应用该系统后,车辆平均停车时间从15分钟缩短至5分钟,停车场周转率提升60%,商圈周边的道路拥堵现象明显缓解<sup>[1]</sup>。

### 3.3 城市公共服务的高效化

在医疗资源配置中,数字孪生模型实现了医疗需求的精准预测与资源优化<sup>[2]</sup>。杭州市整合了人口普查数据、电子病历数据、医保结算数据等,构建了医疗资源数字孪生模型,可预测未来6个月内不同区域的慢性病发病趋势、急诊量变化等。基于模型预测,杭州在老年人口密集社区新增了8个社区卫生服务站,配备200余名家庭医生,使社区医疗服务的响应时间缩短至30分钟以内,三级医院的门诊压力降低12%<sup>[3]</sup>。

在教育资源配置上,北京市某区利用数字孪生技术分析了区域内人口结构变化、入学需求波动等情况,模拟了3种学区划分方案的教育资源均衡度<sup>[4]</sup>。通过对比分析,选择最优方案调整了6所学校的招生范围,使区域内各校的班额差控制在3人以内,优质教育资源的覆盖率提升至80%。同时,模型预测显示未来3

年入学人口将增长15%, 该区提前启动了2所学校的扩建工程, 避免了学位紧张问题<sup>[5]</sup>。

### 3.4 城市环境与安全管理精细化

在环境监测与治理中, 数字孪生技术实现了污染源头的精准定位与治理<sup>[1]</sup>。苏州市构建了涵盖大气、水、土壤的环境数字孪生模型, 整合了120个空气质量监测站、50个水质监测点、300个土壤采样点的数据, 利用机器学习算法识别污染扩散规律。模型成功定位了某工业园区的3处隐蔽污染源, 环保部门据此开展专项整治, 使区域内PM<sub>2.5</sub>浓度下降18%, 水质达标率提升至95%<sup>[2]</sup>。

在城市安全管理方面, 天津市在高层建筑密集区建立了数字孪生火灾防控模型, 包含500栋高层建筑的结构信息、消防设施分布、疏散通道等数据<sup>[3]</sup>。模型可模拟不同起火点、风力条件下的火势蔓延路径与烟气扩散情况, 据此优化了消防通道规划与灭火救援方案。在一次高层住宅火灾事故中, 基于模型生成的救援方案使消防员到达起火楼层的时间缩短40%, 成功避免了火势扩大<sup>[4]</sup>。

## 4 数字孪生技术应用面临的挑战与应对策略

### 4.1 数据安全与隐私保护难题

城市运行数据包含大量个人隐私(如出行轨迹、健康数据)与公共安全信息(如关键基础设施布局), 数据泄露风险较高<sup>[5]</sup>。据统计, 2023年我国智慧城市相关数据安全事件同比增长25%, 其中60%涉及个人信息泄露。

应对策略: 一是加强数据加密技术研发, 采用同态加密、差分隐私等技术, 在数据分析过程中保护原始数据<sup>[1]</sup>; 二是引入区块链技术构建数据共享的信任机制, 实现数据溯源与访问控制; 三是完善法律法规, 参照欧盟《通用数据保护条例》(GDPR), 加快制定《数据安全法》《个人信息保护法》的配套细则, 明确数据收集、使用、共享的边界。深圳市已试点“数据保险箱”模式, 企业可在不获取原始数据的情况下使用数据进行建模分析, 有效平衡了数据利用与隐私保护<sup>[2]</sup>。

### 4.2 技术标准与规范缺失

目前数字孪生技术在城市管理中的应用缺乏统一标准, 不同厂商的设备接口、数据格式、建模方法存在差异, 导致系统兼容性差<sup>[3]</sup>。某调研显示, 80%的城市在数字孪生建设中遇到不同系统难以对接的问题, 重复建设率达30%。

应对策略: 由住建部、工信部牵头, 联合科研机构、企业制定数字孪生城市的技术标准体系, 包括数据接口标准、建模精度规范、安全评估指标等<sup>[4]</sup>。参考工信部发布的《工业互联网数字孪生应用指南》, 加快制定城市管理领域的相关标准。上海市已发布《数字孪生城市建设导则》, 对模型构建、数据采集、系统集成等提出明确要求, 使不同部门的系统对接效率提升60%<sup>[5]</sup>。

### 4.3 建设成本与人才短缺

数字孪生城市建设成本高昂, 包含硬件设备采购、软件开发、数据处理、系统维护等环节, 某二线城市的数字孪生平台建

设投入超10亿元<sup>[1]</sup>。同时, 该领域需要既懂城市管理又掌握信息技术的复合型人才, 目前全国相关专业人才缺口达50万。

应对策略: 一是创新投融资模式, 采用“政府引导+社会资本参与”的方式, 设立数字孪生城市建设专项基金, 鼓励企业通过PPP模式参与项目建设<sup>[2]</sup>; 二是加强人才培养, 支持高校开设数字孪生、智慧城市等相关专业, 与企业合作建立实训基地; 三是推动技术国产化, 降低对国外软硬件的依赖, 某国产数字孪生平台的价格仅为国外同类产品的60%。深圳市通过“鹏城工匠”计划, 引进和培养数字孪生技术人才1.2万名, 为项目建设提供了人才保障<sup>[3]</sup>。

## 5 结论与展望

数字孪生技术通过多源数据融合、高精度建模、智能决策等功能, 在城市规划、交通、公共服务、环境安全等领域实现了精细化管理, 显著提升了城市运行效率与居民生活品质<sup>[4]</sup>。实践表明, 应用数字孪生技术的城市, 其交通通行效率平均提升20%, 公共服务响应时间缩短30%, 应急处置能力提高40%<sup>[5]</sup>。

未来, 随着5G、人工智能、量子计算等技术的进步, 数字孪生城市将向更高精度、更实时交互、更智能决策方向发展<sup>[1]</sup>。在技术层面, 量子计算的应用将使城市级仿真推演速度提升100倍, 实现秒级城市运行模拟; 6G技术的低时延特性将推动物理城市与虚拟模型的实时同步, 时延控制在10毫秒以内; 数字孪生与元宇宙的融合将打造沉浸式城市管理界面, 管理者可通过VR设备“进入”虚拟城市进行交互操作<sup>[2]</sup>。在应用层面, 数字孪生技术将向县域城市延伸, 形成“全域覆盖、分级管控”的管理体系<sup>[3]</sup>; 在社区治理中实现“最后一公里”的精细化, 通过数字孪生模型优化社区服务与安全管理。数字孪生技术将成为智慧城市建设的核心支撑, 推动城市治理体系与治理能力现代化, 为城市可持续发展提供强大动力<sup>[4]</sup>。

## 参考文献

- [1]王飞跃, 张楠. 数字孪生城市的理论与实践[J]. 自动化学报, 2023, 49(10): 2012-2025.
- [2]李伯虎, 柴旭东. 数字孪生技术及其应用现状[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(8): 2201-2215.
- [3]赵沁平. 虚拟现实、数字孪生、元宇宙辨析[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(11): 1725-1740.
- [4]陈俊宇, 陈智高. 数字孪生城市建设的关键技术与应用场域[J]. 科技导报, 2024, 42(15): 56-64.
- [5]王明远, 刘焕焕. 数字孪生在智慧城市管理中的应用与挑战[J]. 中国行政管理, 2023, (7): 112-118.

## 作者简介:

李香莲(1997--), 女, 汉族, 甘肃人, 大学本科, 中级工程师。研究方向: 信息化方向。

靳海旺(1997--), 男, 汉族, 甘肃人, 大学本科, 中级工程师。研究方向: 信息化方向。

贾庆华(1979--), 男, 汉族, 陕西人, 大学本科, 高级工程师。研究方向: 信息化方向。