

# 面向数字孪生城市的智能化全息测绘研究

王爱民

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 数字孪生城市以物理与虚拟空间融合为核心, 本文面向数字孪生城市, 研究智能化全息测绘。先阐述其理论基础, 接着构建技术架构, 涵盖数据采集、处理、分析挖掘与应用层。再探讨关键技术, 包括高精度三维建模、动态数据采集更新等。最后研究数据管理与共享, 涉及存储管理、安全隐私保护及共享平台建设。研究成果为数字孪生城市建设提供技术支撑。

**关键词:** 数字孪生城市; 智能化全息测绘; 技术架构; 关键技术; 数据管理与共享

**引言:** 随着城市化进程加速, 城市管理面临诸多挑战。数字孪生城市概念兴起, 为城市规划、建设与管理提供新思路。智能化全息测绘作为数字孪生城市关键支撑技术, 能实现城市全要素数字化映射与动态更新。研究面向数字孪生城市的智能化全息测绘, 对提升城市治理水平、推动城市可持续发展具有重要意义, 是当前城市信息化建设的重要方向。

## 1 数字孪生城市与智能化全息测绘的理论基础

### 1.1 数字孪生城市理论框架

数字孪生城市以物理空间与虚拟空间的深度融合为核心特征, 其概念内涵涵盖城市运行全要素的数字化映射<sup>[1]</sup>。理论框架包含4个构成要素: 物理实体层通过传感器网络实现状态感知, 数据感知层完成多源数据采集与传输, 模型构建层基于物理规律与数据驱动构建虚拟模型, 交互应用层提供决策支持与公众服务。各层级通过数据流动与算法驱动形成闭环系统, 实现城市运行状态的实时更新与动态推演。物理空间与虚拟空间的映射关系体现为双向动态关联, 物理实体状态变化通过5G网络实时传输至虚拟模型, 传输延迟控制在10毫秒以内; 虚拟模型的分析结果通过控制指令反向指导物理空间优化, 形成虚实共生、持续演化的城市运行体系。

### 1.2 智能化全息测绘理论体系

全息测绘突破传统测绘对单一维度信息的依赖, 通过多源数据融合与全要素采集, 构建覆盖地理空间、社会属性及动态行为的完整信息图谱。其特点表现为数据获取的全空间性、信息表达的全要素性及模型更新的全时态性, 核心要素涵盖空间基准统一、多模态数据整合及语义化建模。智能化技术通过机器学习、知识图谱及边缘计算等手段, 赋予全息测绘自主感知、智能分析与动态优化能力。应用原理体现在数据采集阶段的自适应调度、处理阶段的自动化特征提取及建模阶段的智能化

关联分析, 机制上形成“感知-处理-决策-反馈”的闭环链条。这种技术融合使测绘成果从静态地图向动态数字底座演进, 为数字孪生城市提供实时、精准、可计算的空间信息支撑。

## 2 面向数字孪生城市的智能化全息测绘技术架构

### 2.1 数据采集层

多源异构数据采集是构建数字孪生城市的基础, 需整合地理空间、城市运行及社会经济等多维度信息。地理空间数据采集依赖激光雷达、倾斜摄影等技术, 通过高精度点云与三维影像捕捉城市地形地貌与建筑轮廓, 为虚拟模型提供几何基准。城市运行数据采集则通过传感器网络与物联网设备实现, 覆盖交通流量、能源消耗、环境监测等动态指标, 确保虚拟空间与物理世界状态同步。社会经济数据采集结合大数据挖掘与统计调查方法, 提取人口分布、经济活动等非空间信息, 丰富城市数字孪生的语义内涵。数据采集需满足时空精度与同步性要求, 地理空间数据需达到厘米级精度, 城市运行数据需实现毫秒级响应, 社会经济数据需保持时间序列的连续性, 以支撑虚实空间的精准映射与动态交互。

### 2.2 数据处理层

数据处理层通过清洗、融合与建模技术, 将原始数据转化为结构化知识<sup>[2]</sup>。原始数据往往存在噪声干扰、缺失值等问题, 直接使用会影响分析结果的准确性。因此, 数据清洗与预处理是数据处理的第一步, 它能够提高数据质量, 为后续分析奠定基础。数据清洗与预处理针对噪声干扰与缺失值问题, 采用滤波算法与插值方法提升数据质量, 为后续分析奠定基础。数据融合与集成聚焦多源数据关联, 通过特征匹配与语义对齐技术, 实现地理空间、运行状态与社会属性的有机整合, 构建统一的数据底座。数据建模与表达则采用三维建模与语义标注方法, 将点云数据转化为可计算的几何模型, 并赋予建

筑、道路等要素功能属性，形成支持智能分析的数字孪生体，使数据能够更好地服务于城市的分析和决策。

### 2.3 数据分析与挖掘层

数据分析与挖掘层挖掘数据潜在价值，支撑城市运行优化。城市运行过程中产生了大量的数据，这些数据蕴含着丰富的信息，通过数据分析和挖掘，可以发现城市运行的规律和问题，为城市的优化提供科学依据。空间分析技术拓展传统方法，结合深度学习实现复杂空间模式识别，如交通拥堵预测与土地利用优化。时序分析技术提取城市运行数据的时间特征，通过趋势预测模型为资源调度提供依据。关联分析技术探索数据要素间隐含关系，例如能源消耗与气候条件的耦合规律，为决策制定提供跨领域洞察，帮助城市管理者做出更科学、更合理的决策。

### 2.4 数据应用层

数据应用层通过可视化与交互技术，推动数字孪生城市从模型到实践的转化。数字孪生城市的最终目的是为城市的规划、建设和管理服务，因此需要将数据以直观、易懂的方式呈现出来，方便用户使用和决策。三维可视化与虚拟现实技术将城市数字孪生以直观方式呈现，辅助规划方案比选与公众参与。规划与管理决策支持系统基于全息数据模拟城市发展情景，评估不同策略的长期影响。实时监测与预警模块跟踪城市运行状态，对异常事件快速响应。公众服务模块则通过个性化推荐与交互设计，提升城市服务的可达性与满意度，使数字孪生城市真正惠及广大市民。

## 3 面向数字孪生城市的关键智能化全息测绘技术

### 3.1 高精度三维建模技术

高精度三维建模是数字孪生城市空间表达的核心。三维模型能够直观地展示城市的地理空间信息，为城市的规划、建设和管理服务提供重要的参考<sup>[3]</sup>。高精度的三维模型能够更准确地反映城市的实际情况，提高决策的科学性和准确性。基于多源数据融合的构建方法整合激光雷达点云、倾斜摄影影像及地面测量数据，通过特征匹配与几何约束实现模型的高精度还原。针对复杂场景，采用分块建模与全局优化策略，先对建筑、道路等要素进行局部精细构建，再通过空间基准统一实现整体无缝拼接。模型精细化处理聚焦细节增强与冗余去除，利用曲面拟合与纹理映射技术提升几何精度，通过拓扑检查与误差修正确保模型逻辑一致性。优化技术则针对存储与计算效率，采用多分辨率表达与轻量化压缩，在保留关键特征的同时降低数据体量，为实时渲染与动态分析提供支撑，使三维模型能够更好地服务于数字孪生城市的

应用。

### 3.2 动态数据采集与更新技术

动态数据采集与更新是维持数字孪生城市时效性的关键。城市是一个动态变化的系统，其运行状态随时都在发生变化。需要及时采集和更新城市的数据，以保证数字孪生城市能够真实反映城市的实际情况。实时传感器网络布局需兼顾覆盖范围与数据密度，通过空间插值与需求分析确定关键节点位置，采用无线传输与边缘计算相结合的方式实现数据高效回传，单节点数据传输速率可达100Mbps。采集策略根据数据类型动态调整，交通流量等高频数据采用事件触发模式，触发阈值设置为每车道50辆/小时，环境参数等低频数据采用定时采样模式，采样间隔为15分钟，以平衡精度与能耗。动态数据处理依赖流式计算框架，通过并行处理与增量更新机制实现数据实时清洗与特征提取，模型更新则采用增量式重构方法，仅对变化区域进行局部优化，避免全量重建的计算开销，确保虚拟空间与物理世界状态同步，更新周期最短为2小时，为数字孪生城市的动态管理提供有力支持。

### 3.3 语义信息提取与标注技术

语义信息提取与标注赋予数字孪生城市认知能力。语义信息能够使数字孪生城市不仅仅是一个简单的数据集，而是一个具有理解和分析能力的智能系统。通过对语义信息的提取和标注，可以让数字孪生城市更好地理解城市的运行规律和需求，为城市的决策提供更准确的依据。提取方法结合自然语言处理与计算机视觉技术，从全息数据中识别建筑功能、道路等级等语义特征，通过知识图谱构建实现要素间关联推理。算法设计注重多模态融合，将影像纹理、点云几何与传感器读数交叉验证，提升语义识别的准确率。标准化标注遵循开放地理空间信息标准，采用分层分类体系对语义信息进行结构化编码，确保不同系统间的互操作性。存储管理则构建语义数据库，通过索引优化与查询加速技术实现高效检索，为智能分析提供语义驱动的数据支撑，提高数字孪生城市的智能化水平。

### 3.4 智能分析与决策技术

智能分析与决策技术是数字孪生城市价值实现的关键环节。数字孪生城市积累了大量的数据，如何从这些数据中提取有价值的信息，并为城市的决策提供支持，是智能分析与决策技术需要解决的问题。机器学习与深度学习模型构建聚焦城市运行规律挖掘，通过训练时空序列预测模型实现交通流量、能源消耗等指标的精准预测，利用图神经网络分析要素间复杂关联，为优化策略制定提供依据。决策支持系统设计面向城市规划、管理

与运行场景,集成多目标优化算法与仿真推演模块,对规划方案进行多维度评估,生成兼顾效率、公平与可持续性的决策建议<sup>[4]</sup>。系统交互界面采用可视化与自然语言处理技术,将分析结果转化为直观图表与语音指令,降低决策门槛,提升城市治理的智能化水平,使数字孪生城市能够更好地服务于城市的发展和管理。

#### 4 面向数字孪生城市的智能化全息测绘数据管理与共享

##### 4.1 数据存储与管理技术

大规模全息数据的存储架构需兼顾效率与扩展性。随着数字孪生城市建设的推进,产生的数据量越来越大,对数据存储和管理提出了更高的要求。需要采用先进的存储技术和管理方法,确保数据的安全、高效存储和快速访问。采用分布式文件系统与对象存储相结合的方式,将地理空间、运行状态及社会经济等多源数据按类型分区存储,通过数据分片与负载均衡技术提升读写性能。针对三维模型等非结构化数据,设计层次化存储策略,原始点云数据存储于高性能存储设备,衍生模型则迁移至低成本介质,实现成本与访问速度的平衡。数据版本管理通过时间戳与增量存储机制实现,每次更新仅记录变化部分,支持任意历史版本快速回溯,为城市演变分析提供完整时间轴。回溯机制结合元数据管理,记录数据修改时间、操作人员及变更内容,确保数据溯源的准确性与可审计性,保障数据的质量和可靠性。

##### 4.2 数据安全与隐私保护技术

数据安全防护贯穿全生命周期。在数字孪生城市建设中,数据包含了大量的敏感信息,如个人隐私、城市关键基础设施信息等。一旦数据泄露,可能会给城市和个人带来严重的损失。因此,必须加强数据安全与隐私保护,确保数据的安全性和保密性。传输阶段采用对称加密与非对称加密混合模式,对敏感数据如人口分布、能源消耗等进行端到端加密,防止数据泄露。存储阶段实施访问控制策略,基于角色权限模型分配数据操作权限,结合动态令牌与生物特征识别技术强化身份认证。隐私保护技术聚焦数据脱敏与匿名化处理,对涉及个人信息的全息数据,通过差分隐私算法添加噪声干扰,在

保证数据可用性的同时隐藏个体特征。针对空间数据隐私,设计空间泛化方法,将精确坐标转换为区域范围,平衡数据共享需求与隐私保护要求,保障数据在共享过程中的安全性和隐私性。

##### 4.3 数据共享与开放平台建设

制定统一的数据共享标准与协议是实现数据共享的基础。不同部门和系统产生的全息数据在格式、语义等方面存在差异,通过制定标准与协议,能够规范数据的表示和交换方式,确保数据在不同系统之间的无缝流通和共享<sup>[5]</sup>。数据开放平台的架构设计需充分考虑平台的可扩展性、安全性和易用性。采用分层架构设计,将平台分为数据层、服务层和应用层。数据层负责存储和管理全息数据,服务层提供数据访问、数据处理等服务接口,应用层则面向用户提供各种应用功能。通过合理的架构设计,能够提高平台的性能和稳定性,方便用户快速获取和使用全息数据。

##### 结束语

智能化全息测绘为数字孪生城市构建提供了关键技术支撑,从理论到技术架构,再到关键技术及数据管理与共享,形成完整体系。通过高精度三维建模、动态数据采集更新等技术,实现城市运行状态的精准映射与动态交互。数据共享与共享平台建设保障数据有效利用。这一系列成果助力城市实现更科学规划、高效管理与优质服务,推动城市向智能化、精细化方向发展。

##### 参考文献

- [1]肖婧仪,肖剑平,刘美春.基于数字孪生的地铁隧道智能监测系统建设探讨[J].地理空间信息,2024,22(5):111-115,126.
- [2]刘常帅,曾凡学.数字孪生可视化测绘平台在智慧城市建设中的应用[J].模型世界,2025(12):10-12.
- [3]安栋,刘栋栋.数字孪生技术在智慧城市测绘与规划中的融合应用[J].信息系统工程,2025(6):39-42.
- [4]饶俊清,汪琳.数字孪生可视化测绘平台在智慧城市建设中的应用[J].经纬天地,2024(1):97-100.
- [5]郑欣然.新型测绘在数字孪生城市建设中的应用[J].测绘科学技术,2025,13(3):171-178.