

面向数字孪生城市的三维GIS基础软件技术创新及应用

Technology Innovation and Application of 3D GIS Basic Platform for Digital Twin Cities

李 濂 何 倩 李广明 王 博 李云霞 白杨建 LI Meng, HE Qian, LI Guangming, WANG Bo, LI Yunxia, BAI Yangjian

摘 要 当前,数字孪生城市已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。在深入推进数字孪生城市建设的过程中,对数据存储管理、数据处理融合、数据查询分析、数据可视化呈现等提出新的要求,GIS基础软件需要不断修炼“内功”,才能支撑构建更坚实的时空数字底盘。从数字孪生城市建设面临的新要求展开论述,重点介绍了SuperMap三维GIS基础软件技术在多尺度三维模型构建、全方位数据深度融合、三维空间计算与分析、可视化呈现能力等方面的创新进展,以及在城市规划与管理、数字园区运维管理、自然资源管理等领域的应用,最后总结了该技术方法的应用价值和后续探索方向。

Abstract Nowadays, the digital twin city has become an important exploration direction for smart city construction or urban digital transformation in China. In the process of in-depth construction of digital twin cities, new requirements are put forward in data storage management, data processing and fusion, data query and analysis, and data visualization. Facing these new requirements, the GIS basic platform needs continuous innovation to support the construction of a spatiotemporal digital foundation. This paper discusses the new requirements of digital twin cities for geographic information technology, focusing on the progress of SuperMap 3D GIS basic platform technology in multi-dimensional and multi-scale data model construction, comprehensive data fusion, 3D spatial analysis and calculation, visualization capabilities, and its applications in related fields such as urban planning and management, digital park operation and maintenance management, and natural resources management. Finally, the application value and follow-up exploration direction of this technical method are summarized.

关键词 数字孪生城市;三维空间建模;三维空间分析与查询;多源数据融合;可视化呈现;城市规划

Key words digital twin cities; 3D space modeling; 3D spatial analysis and calculation; multi-source data fusion; visual presentation; urban planning

文章编号 1673-8985 (2023) 05-0036-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230507

作者简介

李 濂

北京超图软件股份有限公司 三维研发中心
副总经理, limeng@supermap.com

何 倩

北京超图软件股份有限公司 三维研发中心
产品工程师

李广明

北京超图软件股份有限公司 三维研发中心
产品总监

王 博

北京超图软件股份有限公司 三维研发中心
产品总监

李云霞

北京超图软件股份有限公司 大客户一中心
总经理, 中级测绘工程师, 硕士

白杨建

北京超图软件股份有限公司
集团副总裁

0 引言

数字孪生城市是数字城市的目标,也是智慧城市建设的新高度^{[1]14}。我国自2017年10月提出数字孪生城市至今,先后经历了2017—2018年的概念培育期、2019年的技术方案架构期、2020年的应用场景试点期、2021年的整体性落地建设探索期,目前正逐步进入落地建设深水期^[2]。一方面,国务院、科技部、住建部、工信部、自然资源部、网信办及各地方政府先后发布相关政策,鼓励数字孪生

城市的发展^[3-6]。另一方面,随着城市化进程的加快,交通拥堵、能源短缺、环境污染等城市问题阻碍着城市居民生活质量的提高及社会的发展。如何提升城市现代化治理水平,是城市规划管理领域一直探索的命题。各地对“数字孪生城市”“智慧城市”等规划和建设的需求强烈^{[7]50}。此外,互联网、云计算、物联网、人工智能等新型先进信息技术(IT)的发展,为数字孪生城市的落地建设提供了有力的技术支撑^{[8]10, [9]19, [10]10}。因此,在国家/地方政策、城市建设需求和全新IT技术的驱动下,上海、雄安新区等地积极推动数字孪生城市建设,其落地效率大幅提升,逐步深入城市全要素表达、业务预警预测、场景仿真推演等多个环节^{[10]3}。

数字孪生城市的实现需要测绘地理信息、三维建模、物联标识感知、可视化渲染,以及云计算、人工智能、大数据等技术支撑^{[10]30, [11]49}。测绘地理信息技术可用于实现城市信息化,提供全时空基础数据、数据处理分析技术与能力支撑。其中,三维地理信息系统(GIS)可通过地理空间感知、地理可视化、地理设计、地理决策等地理智慧,整合和分析全时空城市基础数据,支撑城市实景可视化,为城市数字孪生提供有效的技术支撑^{[11]49}。但由于新型测绘和三维建模等技术的飞速发展,城市基础空间数据的种类愈加丰富、实时性越来越强、体量越来越大,在数据存储管理、数据处理融合、数据查询分析、数据可视化呈现等方面对三维GIS基础软件技术提出新的要求和挑战^{[8]30}:多源、异构、海量城市数据的单体化/结构化/语义化表达及高效存储;基于新型测绘、物联网感知等获取的城市静态、动态数据的全方位融合;基于三维空间分析实现城市运行发展过程的模拟分析;真实展现现实世界全貌,实现城市虚拟空间的可视再现。

本文拟从数字孪生城市建设面临的新要求展开论述,重点介绍SuperMap三维GIS基础软件技术在三维空间建模、海量多源异构数据管理、三维空间分析与计算、三维可视化与交互等方面的创新突破,并说明相关技术在城市规划管理等领域的应用情况,旨在为建设数

字孪生城市及相关典型应用场景提供三维空间建模和分析的技术支撑和方法参考。

1 数字孪生城市建设新要求

数字孪生城市致力于通过构建城市物理世界、网络虚拟空间的一一对应、相互映射、协同交互的复杂巨系统,再造一个与现实城市匹配、对应的“孪生城市”,以实现城市全要素数字化和虚拟化、城市全状态实时化和可视化、城市管理决策协同化和智能化^{[1]14}。

为实现城市全要素的数字化表达,需要综合利用航天卫星摄影、航空摄影、激光雷达扫描、倾斜摄影、移动测量系统和探地雷达系统等“空—天—地—地下”数据采集方法,大规模快速获取地形、影像、点云、倾斜摄影三维模型、地下管线、地质体等不同类型的空间数据^[12];利用传统三维建模软件和BIM(Building Information Modeling)建模软件,构建建筑白模、城市精细模型及BIM等数据,来表达建筑物、构筑物、地下管线等要素;还要利用三维GIS技术来高效存储和表达海量多源异构三维数据。但随着城市基础空间数据的不断集成应用,需要结合分布式等技术来提升海量空间数据存储的性能和扩展性,并构建更加完善的空间模型体系,实现对城市建筑、交通网络等要素及其语义信息的统一表达,同时需要建立高效的数据组织方式和合理的空间索引机制,从而支撑海量空间数据的快速调度。

为更准确全面地呈现和表达“孪生城市”,需要具有将城市地理空间数据、轨迹数据、空间媒体数据与社会经济数据等在统一时空框架下融合的能力^{[9]37}。这不仅需要将不同来源的数据进行处理和融合,实现数据的全方位整合和统一,还需要利用人工智能、机器学习和深度学习等技术,对海量三维空间数据进行分析 and 挖掘,提取城市运行规律和趋势,为城市规划决策提供科学依据。其中,轨迹数据是指通过北斗定位系统、全球定位系统等获取的交通轨迹数据、飞机航线数据、人员移动数据等;空间媒体数据是指带有地理空间位置信息的文本、图像、视频等媒体数据;社会经济数

据是指人口空间分析等包含地理空间位置信息的社会经济统计数据。

为优化空间要素布局,支撑城市仿真计算、动态推演和态势预测,需要具备与三维空间数据相关的计算、分析、查询能力^{[9]40},如布尔运算、凸包等三维空间数据计算能力,量算、裁剪、可视域分析等基础的三维空间分析能力,城市生命线的碰撞检测、基于孪生空间的淹没分析等面向具体业务需求的三维空间分析能力,从而支持城市规划管理、应急救援管理等领域在数字世界进行方案评估、分析、优化等,以建立更加高效智能的城市现代化治理体系。

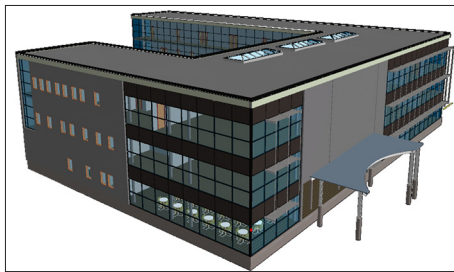
为真实展现现实世界全貌,实现城市全运行状态的可视化,需要利用GPU实时渲染技术、OpenGL、WebGL等,开发高性能、多终端的三维可视化渲染引擎,真实展现城市样貌、自然环境、城市交通等各种场景,以及实时浏览和探索城市数字孪生体;还需要集成增强显示(VR)、虚拟现实(AR)、混合现实(MR)等技术,使决策者和公众能够身临其境地感知城市的运行状况,提高建设数字孪生城市的准确性和公众参与度。

2 面向数字孪生城市的三维GIS基础软件技术

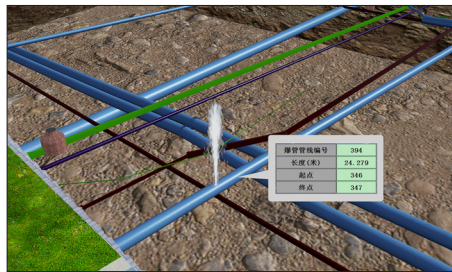
结合数字孪生城市及相关应用业务系统建设的实际需求,针对城市全空间对象统一表达难、海量多源异构数据精准融合难、面向深度应用需求的空间分析功能少、城市场景高真实感可视化难等技术难题,SuperMap三维GIS基础软件技术不断完善,多尺度三维模型构建、全空间多源数据高效管理、智能三维空间分析与计算、高保真三维可视化与交互等多项核心技术不断创新。

2.1 多尺度三维模型构建

城市全要素数字化表达的实质是对城市物理实体的三维模型表达^{[9]29},全域统一的高精度、精细化时空基准框架是关键基础,即从宏观到微观、从室外到室内、从地下到地上,通过多细节层级的三维模型实现现实世界到数



a 三维体数据模型表达的建筑物



b 三维网络数据模型表达地下管线



c 体元栅格表达5G信号场

图1 城市全要素的数字化表达示例

Fig.1 Examples of digital representation of all elements of a city

资料来源: SuperMap GIS软件截图。

字世界的精准映射^[114]。因此,三维GIS基础软件需要具备空天/地表/地下一体化、室内室外一体化、宏观微观一体化的全空间表达能力,以实现城市全要素的数字化、结构化、语义化表达^{[13]326, [14], [15]1041, [16]123}。其中,城市全要素的结构化和语义化表达是进行三维空间计算、查询和分析,以及空间数据挖掘的基础。这要求模型需要描述对象的几何特征、拓扑关系、语义特性等信息。

通过在GIS基础软件中拓展定义,表达三维实体对象的三维体数据模型和表达道路、管线等三维网络系统的三维网络数据模型,构建并实现不规则四面体网格(TIM)和体元栅格(Voxel Grid)两类三维场数据模型,实现对象、网络和场3类空间数据概念模型的升维,形成全空间表达的数据模型体系,可支撑城市全空间数据的高效管理、计算和分析。其中,三维体数据模型是用于表达边界明确、内部均值的体状地物,例如建筑、地质体等现实中存在的对象或者阴影体等抽象的对象^{[16]124, [17]},常采用边界表示法(Boundary Representation, BR)、实体几何构造法(Constructive Solid Geometry, CSG)等^{[13]326}来表达,具有拓扑闭合性、高精度、多细节层次(LOD)、实例化存储等特性。三维网络数据模型可用于描述对象之间的连接关系,是进行爆管分析、关键设施分析、最佳路径分析等三维网络分析的数据基础。三维场数据模型可用于描述空气污染场、地震场、空中电磁信号场等空间中连续的、非均值的空间现象或要素^[18]。通过三维体数据模型、三维网络数据模型和体元栅格,可表达城

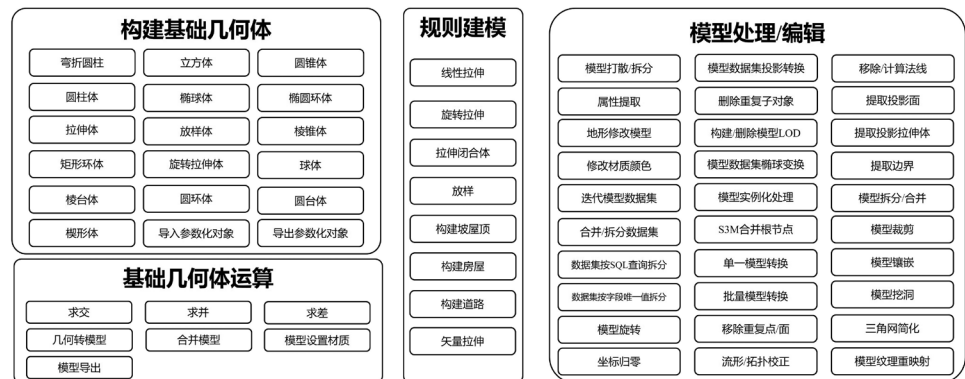


图2 模型运算算子
Fig.2 Model operators

资料来源:笔者自绘。

市建筑、地下管线、5G信号场等城市全空间数据(见图1)。

为实现各种城市复杂场景的精细化、实时化、智能化和自动化构建,提供了规则化建模、参数化建模和符号化建模等能力,可基于点/线/面/拓扑网络数据等城市基础地理信息实现大规模三维模型的快速构建。其中,规则化建模是基于二、三维点/线/面数据和拉伸、放样等规则建模能力,来快速构建建筑等模型对象。参数化建模是通过控制体现三维模型几何特征的变量化参数,来实现批量构建建筑白模、巷道、道路等模型对象^[19]。符号化建模是通过构建场景要素三维模型符号库,调用符号来快速构造三维场景,通常是基于二维点/线/面/拓扑网络数据和三维点/线/面/自适应管点符号,来快速构建植被、花草、河流、管线等对象。另外,为满足大规模模型数据的精细化、定制化、自动化构建需求,还提供了丰富的模型运算算子(见图2),通常会由使用者自主控制场景要素的模型方位、大小、材质和纹理等参数,

从而满足三维模型构建过程的交互需求。

城市数字孪生模型因涉及全生命周期过程,不同物理实体对象不论是外观还是内部结构都可能发生不确定性变化,需要持续不断地迭代更新^{[15]1044}。因此,对于局部变化大的倾斜摄影三维模型,实现了数据的局部动态更新能力,能基于变化信息定向、定点地更新任意范围的倾斜摄影三维模型数据(见图3);对于以对象化变化为主的精细模型、BIM等数据,实现了数据的定向更新能力,能基于变化对象的包围盒或标识号(ID)等信息定向、定点地更新模型数据的几何信息及属性信息。

2.2 多源异构空间数据的高效管理

构建城市数字孪生体的数据有结构化与非结构化的、动态与静态的、地上与地下的、室内与室外的、大尺度与精细化的,实现“多源”数据的精确匹配和深度融合是现实城市向数字城市精准映射的关键^{[10]28}。因此,针对通过新型基础测绘技术、BIM等三维建模技术和物联网

(IoT) 技术获取的多源异构数据,提供一种从数据接入、数据处理、服务发布到多端应用的全流程数据管理技术,可将各类场景要素进行深度融合,将物联感知数据与地理实体建立关联,实现大范围城市三维场景完整、精细的数字描述,以更好地服务应用场景的数据需求。通过逐顶点坐标转换、数据配准和数据平移、旋转能力,可将多源异构时空数据的空间坐标系进行统一,实现在地球曲率影响下的数据精确匹配。当多源异构空间数据间存在缝隙、重叠、压盖等问题时,可对BIM数据、地形、倾斜摄影三维模型等进行压平、裁剪、挖洞、镶嵌及设置缓坡等处理,实现数据的平滑衔接和纹理自然拼接(见图4)。

通过倾斜摄影测量和激光雷达扫描获取的倾斜摄影三维模型和点云通常不会将建筑、地面、树木等地物区分出来,无法直接进行后续的分析应用,因此需要通过切割、重建、矢量叠加等操作处理,将数据中的各类地物构建为三维独立对象,并实现各对象挂接属性以及属性查询与分析等^[20]。基于矢量面叠加的虚拟动态单体化是最便捷的单体化方法之一,该方法

通过将矢量面(地物边界)动态叠加到倾斜摄影三维模型和点云表面,可实现二、三维一体化的可视化表达与对象化查询及分析(见图5)。另外,如何从点云和倾斜摄影三维模型中快速提取应用中所需的地物信息是数据处理的重要一环。通过机器学习、深度学习等技术,可对点云数据进行自动或半自动化分类(见图6),基于深度学习技术可从倾斜摄影三维模型自动提取地物轮廓,从而实现点云和倾斜摄影三维模型的自动化处理^[21-22]。

随着三维GIS在设施规划设计、建设与运行维护等全生命周期中的深化应用, BIM与三维GIS的集成与融合成为新的前沿技术,也是建设数字孪生城市的关键技术之一^[23]。为实现BIM与GIS的深度高效融合,提出一种BIM-GIS数据语义映射技术,采用GIS基础软件与BIM软件直接通信的技术方法,基于三维体数据模型实现BIM-GIS数据的无中转语义映射,可大幅度提高转换效率,减少几何信息和语义信息丢失,支持多达数十种BIM数据格式(见图7)。此外,通过构建多细节层次(LOD)模

型、三角网简化等几何轻量化处理,以及对属性的轻量化处理,来减少数据量,可提高数据查询、分析和可视化的性能。通过实例化技术保留BIM模型中的共享单元,实现BIM构件模型复用,避免数据膨胀。

在大规模多源异构空间数据的存储和管理方面,普通文件系统能力有限,传统关系型数据库性能不足、可扩展性有限,不能满足海量数据高效存储和快速入库的需求,需要采用Hadoop等分布式文件系统和分布式数据库,实现数据存储、管理优化;在数据计算和空间分析方面,单机处理算子不能满足大规模数据高效率处理的需求,需要将单机算子改造为分布式算子,以支持多机的分布式计算,还可以采用三维数据自动化处理(GPA)工具、算子和服务,搭建多源异构数据的自动化处理业务流(见图8)。

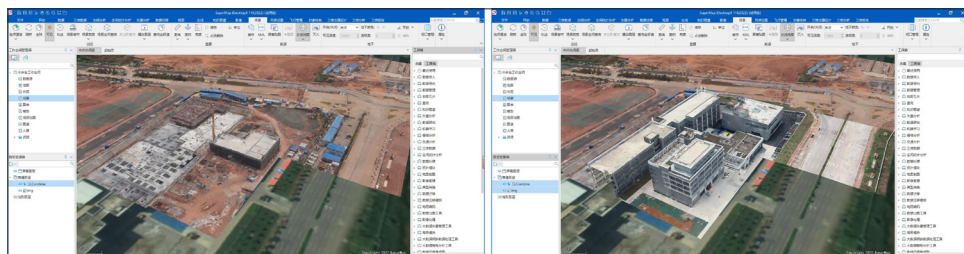


图3 倾斜摄影三维模型数据局部更新示例
Fig.3 Example of partial update of oblique photography 3D model data

资料来源: SuperMap GIS软件截图。

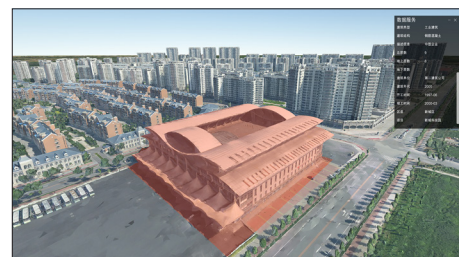


图5 单体化技术应用示例:高亮选中单体化后的倾斜摄影三维模型
Fig.5 Application example: highlighting a single building in oblique photographic 3D model

资料来源: SuperMap GIS软件截图。

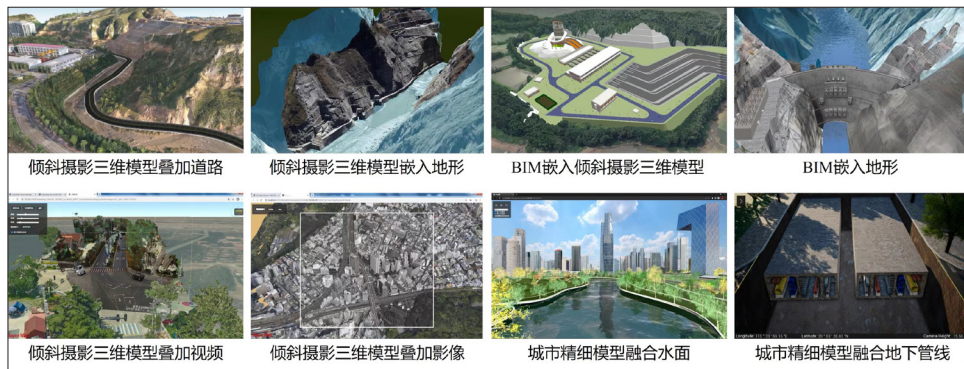


图4 多源异构数据融合示例
Fig.4 Examples of multi-source heterogeneous data fusion

资料来源: SuperMap GIS软件截图。

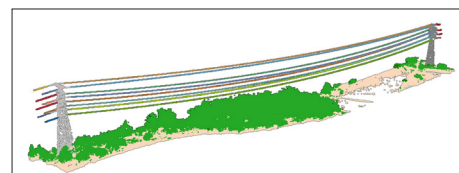


图6 基于人工智能技术的点云实例分割示例
Fig.6 Example of point cloud instance segmentation based on artificial intelligence technology

资料来源: SuperMap GIS软件截图。

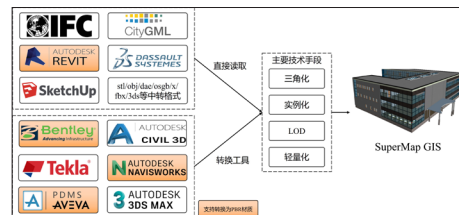


图7 BIM-GIS数据语义映射技术路线图
Fig.7 BIM-GIS data semantic mapping technology roadmap

资料来源: 笔者自绘。

2.3 三维空间计算、查询和分析

面对不同来源、不同格式空间信息的爆炸式增长,通常需要利用空间分析和空间决策工具,对空间事物和现象进行描述和解释,从而认识和把握地球和社会的空间运动规律,以进行虚拟、科学预测和调控^[24]。要实现城市综合治理的科学化、精细化和智能化,需要以城市数字孪生体为基础,在实现多源数据汇聚与管理的基础上,对多源数据进行计算、查询和分析,以实现对城市现象的仿真和事件态势的推演,从而支撑城市问题预判、解决预案生成和事后复盘分析等。

在数据层面,针对采用三维表面模型来表达的TIN地形、倾斜摄影三维模型和城市精细模型,以及采用三维体模型来表达的BIM数据等,提供布尔运算、裁剪、镶嵌、挖洞等多种三维空间运算能力。在场景层面,提供包括三维空间量算、三维空间查询、三维缓冲区分析、可视域分析、淹没分析、三维网络分析等各种复杂的分析和查询能力(见图9)。此外, GPU加速技术已经越来越多地被应用于图形与非图形问题^[25],并且随着高配置图形硬件门槛的降低,可以将GPU强大的并行运算能力应用到三维空间分析和查询技术中。基于GPU的三维空

间分析和空间查询技术不仅可以在三维场景中交互地获取三维空间分析的结果,并实时渲染及输出三维体对象,基于分析结果(三维体对象)还能进一步进行基于GPU的三维空间查询,并实时反馈查询结果,可支撑大规模城市三维场景实时、交互的分析需求。

2.4 高保真三维可视化与交互

数字孪生城市的可视化呈现能力不仅要实现城市全要素内容的直观呈现(既可以渲染宏大开阔的城市大场景,也可以真实展示城市局部特征),而且要满足不同业务和应用场景的可视化需求,实现空间分析过程的可视化、城市历史演变和预测变化的可视化、仿真成果和设计效果的可视化、城市监管决策过程的可视化等,以有效支撑事件和业务的事前、事中、事后的全流程可视化。此外,还要满足面向公众的轻量化、普适化、多终端的应用可视化需求,通过结合VR、AR、MR、游戏引擎、室内导航等,为公众提供更具交互性、真实感、沉浸感的三维可视化体验,从而支撑实现数字空间和现实空间的实时交互^{[9]47}。

一方面,通过计算机图形学知识,实现多层次实时渲染呈现城市数字孪生体的能力(见图10)。基于WebGL/WebGPU图形可视化渲染技术研发了Web3D渲染引擎,支持多源异构数据的可视化表达、三维空间分析和查询,通过粒子系统、基于物理渲染的材质(PBR)、卷帘效果以及环境光遮蔽、屏幕空间反射、泛光、景深等多种后处理特效,实现在浏览器里高真实感地展示大规模三维场景,并提供丰富的应用程序接口(API),提升用户的Web开发及终端访问体验,满足各种在线业务系统的定制化需求。通过三维GIS与UE/Unity等游戏引擎的深度融合,将GIS基础软件的数据管理调度、三维空间分析和查询等能力与游戏引擎的高真实感场景表现能力紧密结合,可实现现实物理世界全貌的真实展现及基于此的空间分析计算,能有效支撑对渲染要求高的电子沙盘、规划展览等应用。基于VR技术,可模拟与现实世界相差无几的虚拟世界,提供更具沉浸感、交互性

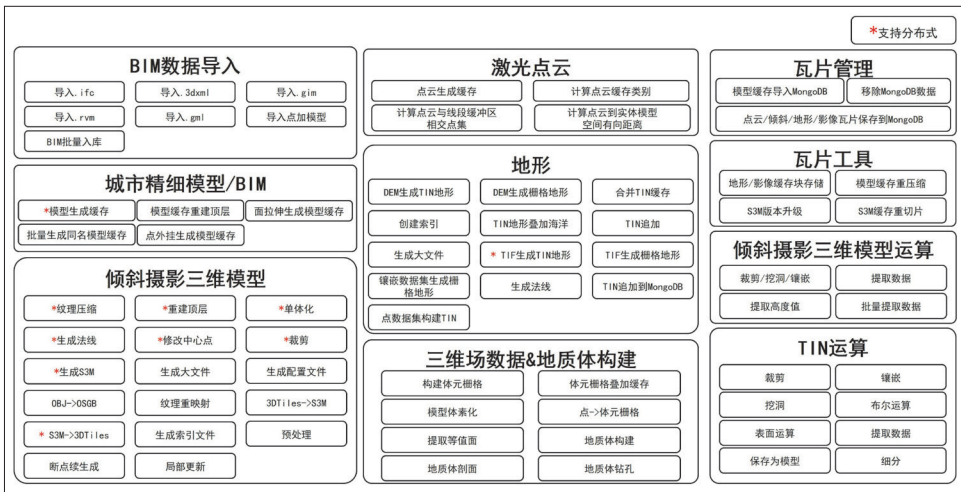


图8 多源三维数据处理自动化工具
Fig.8 Multi-source 3D data geospatial processing automation tools

资料来源:笔者自绘。



图9 三维空间分析与计算示例
Fig.9 Examples of three-dimensional space analysis and calculation

资料来源: SuperMap GIS软件截图。

的三维体验;基于AR技术,可将虚拟的数字化信息与真实世界相互叠加,从而实现对真实世界的“增强”;基于MR技术,可将现实环境与虚拟环境相互混合,实现物理对象和数字对象在可视化环境中的共存及实时互动。

另一方面,面向数据量大、结构复杂、精度较高的三维场景实时绘制需求,通过高效的数据组织方法将多源异构数据有效地管理起来,并根据数据的地理分布建立合理的空间索引机制,进而快速调度和查询大规模三维场景中任意范围的数据,实现海量三维数据的实时、高效可视化^[26]。目前,针对使用场景不同,可采用四叉树、八叉树、R树等多源异构数据进行空间划分,通过LOD、实例化及金字塔数据组织等多种技术手段,形成高效的数据输入/输出机制、数据调度机制、可见性判断算法等,以实现海量三维空间数据的高效渲染;还可通过顶层重建、几何压缩、纹理压缩等技术手段来缩减数据量大小,提升海量数据传输和加载速度,进一步提升用户

的三维可视化体验。

此外,为实现多源异构三维数据共享与多端应用,提出一种空间三维模型瓦片数据格式及配套的服务接口^[27-28],通过将倾斜摄影三维模型、点云、BIM、二/三维矢量、建筑白模、地质体、三维场等不同来源、不同格式的空间数据转换为自定义二进制格式的瓦片数据,可以规避后续处理多源异构数据的繁琐步骤,实现多源异构数据在移动端、桌面端、Web端、游戏引擎等多端的共享与互操作。

3 典型应用场景

3.1 服务城市规划与管理

数字孪生城市是城市建设发展运营中的切实要求,在构建地上地下一体化,反映城市运行发展状态,为城市规划与管理提供支撑等方面发挥着越来越重要的作用^[75]。通过多尺度三维模型构建技术,可实现城市数字孪生模型的快速构建,并基于多源异构空间数据高效管理技术,集成融合城市多源异构数据,包含地理矢量

数据、点云、倾斜摄影三维模型、城市精模数据、BIM数据等基础数据,以及城市各业务涉及的物联感知信息和城市综合信息等资源,可实现对城市宏观、中观、微观场景的数字化表达,对空气质量、交通和建筑设计等进行更真实的模拟。基于三维空间查询、红线检测、控高分析、天际线分析、日照分析等能力,识别城市运行规律,使得规划者可以评估不同规划管理方案的影响,并优化城市布局和资源配置,为改善和优化城市规划和管理提供有效的引导(见图11)。基于VR/AR/MR交互技术,构建交互式可视化环境,有助于公众参与城市规划和管理决策;基于Web3D引擎和游戏引擎等,实现三维高保真可视化,形象全面地展示城市全貌、方案设计、建设过程、运行情况等,可提升城市规划和管理过程中的多方参与效率。

3.2 支撑数字园区运维管理

在数字孪生城市这一先行概念的引导下,“数字孪生园区”理念也进入公众视野。数字孪生园区是数字孪生城市的重要表现形态,其体系结构与发展模式是数字孪生城市在一个小区域范围内的缩影,既反映了数字孪生城市的主要体系模式与发展特征,又具备了不同于数字孪生城市发展模式的独特性^[85]。通过合理布局供水、供电、供气、通信、道路等配套设施,将3D GIS与BIM、物联网、大数据、人工智能等技术结合,可加强园区各类资源的整合,实现产业园区内信息的及时感知、传递和处理,提升数字园区的建设、运营、服务和管理能力。例如,面向数字园区运维与管理(见图12),通过多源异构空间数据高效管理技术,能整合园区各领域数据资源,实现园区内地形、影像、二维点线面数据、三维点线面数据、BIM、倾斜摄影三维模型、城市精细模型、IoT数据、人口、规划项目数据等多源异构数据的汇聚、融合、入库与更新,从而提供权威、统一的数据底图;通过裁剪、属性查询、量算、通视分析等功能,实现园区建筑内部结构的分层展示、园区基础设施的可视化巡查浏览、园区设备的快速定位和属性信息查询等,有效支撑了



图10 基于新型IT技术实现城市地理环境的真实化表达示例

Fig.10 Based on new IT technology to realize the realistic expression of urban geographical environment

资料来源: SuperMap GIS软件及相关业务系统截图。

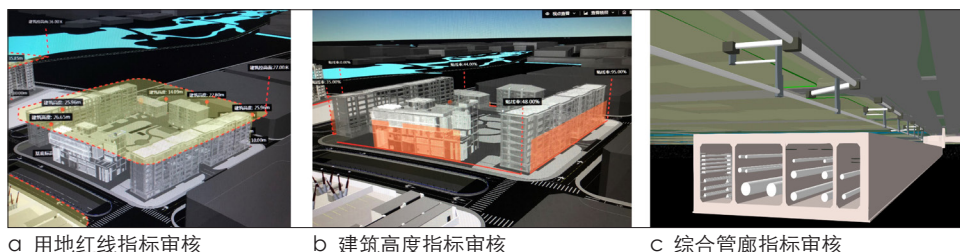
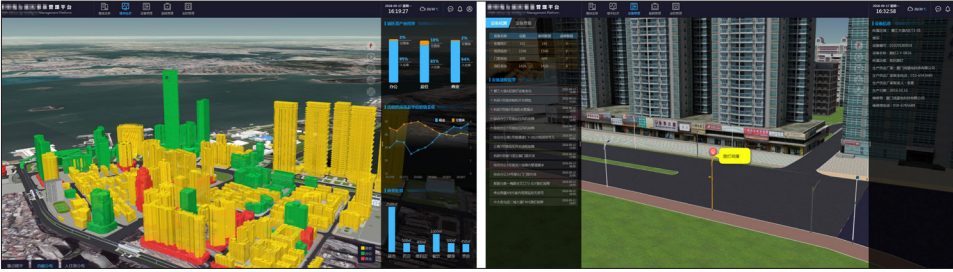


图11 三维空间分析赋能城市规划示例

Fig.11 Examples of 3D spatial analysis empowering urban planning

资料来源: 雄安规划建设BIM管理平台截图。



a 园区楼宇信息管理

b 园区设施故障快速定位

图12 SuperMap三维GIS软件技术赋能园区运维管理示例

Fig.12 Examples of SuperMap 3D GIS platform technology empowering park maintenance management

资料来源:某数字园区项目截图。

对园区产业、经济、安防、能耗等管理领域关键指标的综合监测分析;基于VR/AR/MR交互技术、Web3D引擎和游戏引擎等,能以多视角、多维度的方式实现园区各类型数据资源的真实呈现,不仅能宏观呈现园区特色、产业布局、交通优势,还能对园区内重点企业的数量、地理空间分布、规模、供水、能耗等信息进行可视化监测,并且通过集成视频监控、环境监控等还能对园区的环境温湿度、空气质量等进行可视化监测,有效提升数字孪生园区在企业能耗监管、环境监管等方面的运维管理效率。

3.3 服务自然资源智慧管理

城市自然资源是数字孪生城市建设的空间基底^{[8]29}。基于数字孪生技术和三维GIS基础软件技术的自然资源管理,在时空信息可视化的基础上强调了现实空间和数字空间的深度交互和映射联系,能满足自然资源二、三维一体化的综合管理需求,实现自然资源全要素的数字化和虚拟化、全状态的实时化和可视化、自然资源管理决策的协同化和智能化,有效提升自然资源调查监测、国土空间保护与合理利用、矿产资源勘查开发等综合管理效能。例如,在自然资源调查监测方面,利用全空间表达的数据模型体系可以构建数字孪生国土空间,直观表达地形、地貌、地物等数据,从而反映自然地理格局和自然资源状况;利用多源异构空间数据高效管理技术可以将三维地形、专题地图层、城市精细模型等数据进行整合,构建全要素三维可视化场景,实现土地、矿藏、水流、森林、山岭、草原、荒地、滩涂等分布在地下、地表和地上等不同维度

的多种空间自然资源的精细化管理;利用地形坡度坡向分析、淹没分析、三维空间查询、量测等能力,可以直观地分析、测量和查询各种自然资源分布情况,为宜农资源分级、耕地等级调查、森林病虫害监测、林草湿地监测评价等提供科学决策依据;基于Web3D引擎和游戏引擎等,实现三维高保真可视化,能生动、形象地再现地形地貌,直观、立体、真实展示特定范围的山、水、林、田、湖、草、沙等重点自然资源分布情况,更加直观地对河流、森林、草原、湿地、滩涂等所有自然生态空间进行清晰界定,从而有效提升自然资源动态监测的效率。

4 结语

本文从数字孪生城市建设新要求出发,阐述了面向要求的SuperMap三维GIS基础软件技术在多尺度三维模型构建、多源异构数据高效管理、三维空间分析与计算、三维可视化与交互等方面的创新。通过典型应用场景说明了该技术能够为城市规划管理、数字园区运营管理、自然资源智慧管理等应用提供技术支撑。例如,全空间数据模型体系可支撑实现城市、园区以及自然资源等全要素的数字化表达;多源异构数据高效管理技术能支撑实现城市、园区、自然资源的各类数据的汇聚、融合、更新;智能三维空间分析与计算能力可为城市规划管理、园区运维管理、自然资源管理过程中各类问题的分析判断提供科学决策依据;高保真三维可视化与交互技术可支撑实现城市规划管理、园区运维管理、自然资源管理的全流程可视化。

后续需进一步发展和完善三维GIS基础

软件技术,不断结合机器学习、人工智能、物联网等技术,融合BIM引擎、游戏引擎等,使三维空间建模、多源异构空间数据管理、三维空间分析计算等关键技术向更智能化的方向演进,以实现与现实世界的智能化感知和分析,从而推动实现城市模拟仿真推演、智慧城市自我优化运行等能力。

参考文献 References

- [1] 李德仁. 数字孪生城市, 智慧城市建设的新高度[J]. 中国勘察设计, 2020(10): 13-14.
LI Deren. Digital twin city, new height of smart city construction[J]. China Engineering Consulting, 2020(10): 13-14.
- [2] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2021年)[R]. 2021.
China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin cities research report (2021)[R]. 2021.
- [3] 新华网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-08-16]. http://www.xinhuanet.com/fortune/2021-03/13/c_1127205564.htm.
Xinghua Net. The outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-08-16]. http://www.xinhuanet.com/fortune/2021-03/13/c_1127205564.htm.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知: 国发〔2021〕29号[EB/OL]. (2022-01-12) [2023-08-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/12/content_5667817.htm.
The Central People's Government of the People's Republic of China. Notice of the 14th five-year digital economy development plan issued by the state council[EB/OL]. (2022-01-12) [2023-08-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/12/content_5667817.htm.
- [5] 中华人民共和国科技部, 中华人民共和国住房和城乡建设部. 科技部 住房和城乡建设部关于印发《“十四五”城镇化与城市发展科技创新专项规划》的通知: 国科发社〔2022〕320号[EB/OL]. (2022-12-06) [2023-08-16]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgnr/fgzc/gfxwj/gfxwj2022/202212/t20221206_183776.html.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice of The "14th Five-Year Plan" Special Plan for Urbanization and Urban

- Development Science and Technology Innovation* issued by the Ministry of Science and Technology and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development[EB/OL]. (2022-12-06) [2023-08-16]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxiifenlei/fdzdgnr/fgzc/gfxwj/gfxwj2022/202212/t20221206_183776.html.
- [6] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源部办公厅关于全面推进实景三维中国建设的通知: 自然资源办发〔2022〕7号[EB/OL]. (2022-02-24) [2023-08-16]. http://gi.mnr.gov.cn/202202/t20220225_2729401.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Notice of the general office of the ministry of natural resources on comprehensively promoting real-scene 3D construction of China[EB/OL]. (2022-02-24) [2023-08-16]. http://gi.mnr.gov.cn/202202/t20220225_2729401.html.
- [7] 鲍巧玲, 杨滔, 黄奇晴, 等. 数字孪生城市导向下的智慧规建管规则体系构建——以雄安新区规划建设BIM管理平台为例[J]. 城市发展研究, 2021, 28(8): 50-55, 106.
BAO Qiaoling, YANG Tao, HUANG Qiqing, et al. The construction of smart planning, construction and management rule system guided by digital twin city: with the BIM planning, construction and management platform of Xiong'an New Area as an example[J]. *Urban Development Studies*, 2021, 28(8): 50-55, 106.
- [8] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2019年)[R]. 2019.
China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin cities research report (2019)[R]. 2019.
- [9] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2020年)[R]. 2020.
China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin cities research report (2020)[R]. 2020.
- [10] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2022年)[R]. 2022.
China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin cities research report (2022)[R]. 2022.
- [11] 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.
ZHANG Xinchang, LI Shaoying, ZHOU Qiming, et al. The rationale and innovative thinking of building digital twin city[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(3): 147-152, 168.
- [12] 顾建祥, 杨必胜, 董震, 等. 面向数字孪生城市的智能化全息测绘[J]. 测绘通报, 2020(6): 134-140.
GU Jianxiang, YANG Bisheng, DONG Zhen, et al. Intelligent perfect-information surveying and mapping for digital twin cities[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(6): 134-140.
- [13] 李清泉, 李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 325-330.
LI Qingquan, LI Deren. Research on the conceptual frame of the integration of 3D spatial data model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998, 27(4): 325-330.
- [14] 朱庆. 三维GIS技术进展[J]. 地理信息世界, 2011, 9(2): 25-27, 33.
ZHU Qing. Technical progress of three dimensional GIS[J]. *Geomatics World*, 2011, 9(2): 25-27, 33.
- [15] 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.
ZHU Qing, ZHANG Liguang, DING Yulin, et al. From real 3D modeling to digital twin modeling[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 1040-1049.
- [16] 蔡文文, 冯振华, 周芹, 等. 面向数字化城市设计的三维GIS关键技术[J]. 地理信息世界, 2019, 26(3): 122-127.
CAI Wenwen, FENG Zhenhua, ZHOU Qin, et al. Key technologies of the three dimensional geographic information system (3D GIS) for digital city design[J]. *Geomatics World*, 2019, 26(3): 122-127.
- [17] 蔡文文, 王少华, 钟耳顺, 等. BIM与SuperMap GIS数据集成技术[J]. 地理信息世界, 2018, 25(1): 120-124, 129.
CAI Wenwen, WANG Shaohua, ZHONG Ershun, et al. Data integration technology of BIM and SuperMap GIS[J]. *Geomatics World*, 2018, 25(1): 120-124, 129.
- [18] 宋关福, 钟耳顺, 周芹, 等. 通用三维GIS场数据模型研究与实践[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(2): 1-7.
SONG Guanfu, ZHONG Ershun, ZHOU Qin, et al. Research and practice on general 3D field data model in GIS[J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(2): 1-7.
- [19] 汤圣君, 张叶廷, 许伟平, 等. 三维GIS中的参数化建模方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1086-1090, 1097.
TANG Shengjun, ZHANG Yeting, XU Weiping, et al. Parametric modeling method in three-dimensional GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9): 1086-1090, 1097.
- [20] 王勇, 郝晓燕, 李颖. 基于倾斜摄影的三维模型单体化方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(3): 178-183.
WANG Yong, HAO Xiaoyan, LI Ying. Study of method for achieving 3D model to be single based on oblique photogrammetry image[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(3): 178-183.
- [21] 王文娜, 张弓, 吴侃, 等. 三维建筑模型单体化的深度学习技术实现[J]. 测绘通报, 2022, 549(12): 14-18, 23.
WANG Wenna, ZHANG Gong, WU Kan, et al. Realize building monomerization of 3D model based on deep learning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022, 549(12): 14-18, 23.
- [22] 景庄伟, 管海燕, 臧玉府, 等. 基于深度学习的点云语义分割研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(1): 1-26.
JING Zhuangwei, GUAN Haiyan, ZANG Yufu, et al. Survey of point cloud semantic segmentation based on deep learning[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2021, 15(1): 1-26.
- [23] 武鹏飞, 刘玉身, 谭毅, 等. GIS与BIM融合的研究进展与发展趋势[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(1): 1-6.
WU Pengfei, LIU Yushen, TAN Yi, et al. Advances and trends of integration between GIS and BIM[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(1): 1-6.
- [24] 刘耀林. 从空间分析到空间决策的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007(11): 1050-1055.
LIU Yaolin. Thinking from spatial analysis to spatial decision making[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007(11): 1050-1055.
- [25] 翟巍. 三维GIS中大规模场景数据获取、组织及调度方法的研究与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
ZHAI Wei. Research and implementation of large scale scene data acquisition, organization and scheduling in 3D GIS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [26] 宋关福, 钟耳顺, 吴志峰, 等. 新一代GIS基础软件的四大关键技术[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(1): 1-8.
SONG Guanfu, ZHONG Ershun, WU Zhifeng, et al. Four key technologies of the next generation GIS platform[J]. *Journal of Geomatics*, 2019, 44(1): 1-8.
- [27] 中国地理信息产业协会. 空间三维模型数据格式: T/CAGIS 1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
China Association for Geospatial Industry and Sciences. Data format for spatial 3D model: T/CAGIS 1—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [28] 中国地理信息产业协会. 空间三维模型数据服务接口: T/CAGIS 2—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
China Association for Geospatial Industry and Sciences. Service API for spatial 3D model data: T/CAGIS 2—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.