

智慧城市仿真模型组织架构

曹阳^{1,2}, 甄峰^{1,2}

1. 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

2. 江苏省智慧城市设计仿真与可视化技术工程实验室, 南京 210093

摘要 智慧城市建设为系统化认知城市运行提供了多源丰富的数据支撑, 也为城市模型的发展带来了新的契机。围绕城市要素组织机理与城市系统运行表达两个方面梳理了智慧城市仿真模型构建基础, 从模型概念内涵、组成要素、框架结构与主要功能4个层面阐述了仿真模型的具体组织形式, 从城市规划方案评估、城市设计感知交互与城市运行管理决策3个方面探讨了仿真模型的具体应用场景。

关键词 智慧城市; 大数据; 活动空间; 城市仿真模型

随着智慧城市建设的不断深入, 密集的物联传感网络从不同层面感知城市的运行与发展, 也相应记录了海量的城市要素运行轨迹, 这些大数据主要体现在要素主体与活动个体层面, 反映了人与空间相互作用关系^[1-3]。它们具有以下特征: 1) 数据的覆盖范围较广, 一般可以覆盖区域或城市的大部分地区; 2) 数据质量普遍较高, 相对调研统计数据有较高的时空精度。在城市研究过程中, 这些体量扩充迅速、维度健全多样、类型不断丰富的要素运行数据为描述和理解城市空间结构提供了新的渠道^[4]。同时, 大数据也刻画出城市活动主体与场所空间的相互作用关系, 反映了人在活动过程中对城市空间的需求, 这也为城市模型研究提供了绝好的数据支撑环境。现有城市空间模型主要关注于实体空间环境的演变规律, 缺乏对个人与场所空间相互作用机制的深入探索, 难以满足现阶段多源异构

城市要素运行数据的系统整合与分析, 亟需提出问题导向下对城市运行多源数据整合、管理、分析、可视化等过程进行综合考虑的城市模型体系。在此背景下, 基于要素活动视角的城市仿真模型作为城市要素联系与空间发展的抽象化表达, 受到了地理、规划、管理等多个城市研究领域研究者的关注^[5-6]。

早期的城市仿真模型从只考虑地表平面二维场景中地物关系的表达, 逐步发展到城市三维空间中要素结构关系的静态展现。这一时期主要以“数字城市”“三维城市”建设为标志, 通过计算机技术、3S技术(遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS))以及大规模存储技术对城市进行多分辨率、多尺度、多时空及多种类的场景空间描述, 仿真建模的对象也主要是城市地物空间^[7-8]。而现阶段城市仿真模型的研究主要涉及两个方面: 一是对城市要素间关联关系与作用

收稿日期: 2018-07-15; 修回日期: 2018-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571146, 41701178); 江苏省建设系统科技项目(2016JH09)

作者简介: 曹阳, 博士生, 研究方向为智慧城市与规划信息化, 邮箱: 834154997@qq.com; 甄峰(通信作者), 教授, 研究方向为智慧城市、信息地理, 电子邮箱: zhenfeng@nju.edu.cn

引用格式: 曹阳, 甄峰. 智慧城市仿真模型组织架构[J]. 科技导报, 2018, 36(18): 47-54; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.18.005

机理的建模分析;二是通过虚拟现实、场景还原等新型人机交互技术,实现对城市大面积三维地形、建筑空间及各要素运行过程的动态可视化表达。从建模内容看,城市仿真模型不同于传统城市模型只注重城市实体空间的表达,而更加注重对城市内各类要素关联、协同关系的探索。从表达方式来说,城市仿真模型有别于传统的数字线划图、航空影像图等抽象的城市空间表现形式,相应地更强调对要素运行的时空变化特征的动态展示^[9]。

智慧城市建设的核心目标是通过整合城市各类传感网络、数据资源及生产要素,解决城市发展问题、提高社会经济运行效率与质量,进而引导城乡要素体系的合理流动^[10-12]。基于城市仿真模型对城市不同的发展情景进行动态模拟,可以为城市规划决策提供分析依据,也为城市管理部门科学预测未来城市在重大政策、挑战、事件及风险等环境下的发展方向、承载及应变能力提供有力支撑,提高城市建设的时效性及城市管理的有效性,促进城市的可持续发展^[13]。本文具体阐述城市仿真模型的概念内涵、组成要素、逻辑架构及关键技术。

1 智慧城市仿真模型建构基础

城市仿真模型是以城市要素运行数据为基础,对各领域活动主体与场所空间交互联系内在机制与外在表现的统一描述。它一方面通过对要素运行交互作用关系进行描述,分析其运行规则并建构机理模型;另一方面结合虚拟现实、三维动态建模等最新技术,从多尺度、多维度、多时序等不同维度对城市要素运行过程进行动态可视化表达。

1.1 城市要素组织机理

城市仿真模型的核心功能之一就是对城市各类要素协同关系与内在运行机理的分析,而已有的城市机理分析主要借助于城市空间模型展开。城市空间模型经历了从理论概念模型、数学分析模型向计算机模拟模型发展的过程^[14-16]。特别是20世纪90年代后,随着计算机硬件技术和地理信息技术的快速发展,大量的地理空间统计分析方法被集成应用于城市模型研究中,重点进行城市要素交互作用与空间扩张的演化模拟。根据城市模型构建时是否考虑时间属性,可以具体分为静态模型与动态模型两大类。

早期静态城市模型的研究不考虑时间维度,主要是对城市现状发展要素进行基本统计,并初步探讨了不同尺度空间要素相互作用关系。随着城市不断发展演化,在积累了历年城市时序数据的基础上,动态城市模型逐步成为学界研究重点。从研究尺度,城市模型具体又分为宏观模型与微观模型:宏观尺度的城市模型研究,主要采用系统动力学方法,构建微分方程模型,研究城市居住区、商业区等大范围地块间相互作用与区位选择等。但受限于数据来源与研究尺度的限制,宏观动态模型往往时间跨度较大、无法反映精细时空尺度下城市内各主体运行过程中产生的自组织性、突发性与系统复杂性特征。目前,随着城市发展到一定体量、城市发展规模的确定与稳固,城市模型研究的重点转向反映城市内部各主体活动运行过程内在联系的内容中来,借助类似离散动力学、元胞自动机、分形理论、多代理人模型^[17],从微观视角研究城市内部要素运行规律与机制成为当前阶段研究的重点和近期的趋势(表1)。

表1 现有城市仿真模型主要分类
Table 1 Main classification of urban simulation models

研究尺度	起始时期	建模方法	研究内容	代表模型
区域	20世纪60年代	空间相互作用理论、离散选择理论	研究区域要素空间相互作用、离散选择效应等	POLIS(美国)、 DRAM/EMPAL(美国)
城市	20世纪80年代	最大熵理论、地租理论、空间投入产出理论	基于空间投入产出等理论模型研究土地利用经济效应变化规律	MEPLAN(英国)、 TLUMIP(美国)
小区	20世纪90年代	元胞自动机理论、基于个体建模	基于个体建模等方法探索地块发展变化特征与离散选择效应	URBANSIM(美国)、 PECAS(加拿大)
网格	20世纪90年代	元胞自动机理论、基于规则建模	基于元胞自动机等微观建模方法探索城市主体活动与空间演化关系	SLEUTH(美国)、 BUDEM(中国)、 AGENTCITY(加拿大)

1.2 城市系统运行表达

城市仿真模型另一项重要功能是对城市空间中要素运行状况的可视化表达。早期的城市可视化模型研究,受限于计算机二维图形软硬件显示技术,视角主要集中在图形显示的算法上,同时借助于GIS技术带来的行业应用,成果主要以二维专题地图的形式展现。自20世纪90年代开始,三维GIS可视化技术为城市可视化模型在城市宏观规划与微观设计等工程领域的应用提供了可能(图1)。英、美、澳等国家的科研院校在城市三维空间信息自动获取与空间建模方面已取得显著进展,相继研发了应用于不同领域的三维可视化城市模型,通过集成大量的城市要素运行实时数据,通过实时交互方式再现城市的三维立体景观,进而整合城市各部门业务数据,在可视化的基础上提供各类分析功能,例如在城市设计领域,设计者可以在虚拟环境中通

过动态交互的方式对建筑单体及街道片区进行全方位感知,为制定设计方案提供决策依据。中国在这一领域的研究虽然起步较晚,但通过借鉴国外先进技术与案例经验,有针对性地结合中国城市发展特点与需求开展了积极的应用尝试,也取得了较好成果^[18-20]。但现有的三维场景模型主要局限在表达城市实体场景的物物关系,缺乏对城市要素主体的运行过程,特别是与居民、企业等城市主体间交互关系的可视化表达。随着智慧城市建设,促进城市实体空间与活动空间产生更多交互,基于动态要素运行数据驱动且全程可控的城市运行过程仿真建模成为城市可视化模型研究的新趋势。城市仿真模型有别于传统空间模型,是在城市实体空间建模的基础上,重点对城市要素运行的活动空间进行仿真化表达,通过虚拟现实等方式,进一步加强可视化表现的交互性与过程上的直观性。

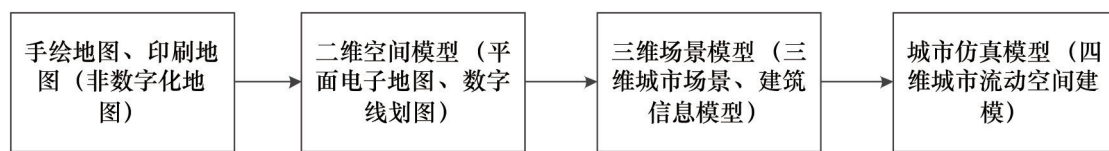


图1 城市可视化模型发展历程

Fig. 1 Development track of urban visualization model

2 智慧城市仿真模型组织架构

智慧城市仿真模型以城市问题为导向,从城市运行中各活动主体行为与要素流动过程着手,建模分析各业务子系统要素组织体系与交互作用机制,进而通过模拟仿真方法对城市系统要素运行进行可视化表达,以支撑各行业业务应用与城市管理决策。以下从模型概念内涵、组成要素、逻辑架构以及关键技术4个方面阐述智慧城市仿真模型组织架构。

2.1 模型概念内涵

城市运行与管理过程中涉及到的各项要素都与空间位置有关。智慧城市仿真模型即综合运用计算机三维仿真、虚拟现实、GIS及数据库等技术,根据数理模型分析方案与城市发展现状对城市运行开展虚拟三维仿真建模,集成城市规划建设、行业要素运行管理等信息,形成融空间信息和属性信息于一体、支撑用户实时交互的可视化三维仿真环境。与传统城市模型的物质空间研究视角不同,智慧城市仿真模型在表达物质空

间要素组织关系的基础上,更侧重于表达城市中生活的人及与之相关联的城市要素等一系列时空活动过程。这就需要城市仿真模型对实体空间环境中要素运行过程进行全方位感知、要素模拟并预测人的活动对城市空间的影响,进而对活动空间进行可视化表达(图2)。其中,城市主体活动不单指居民个体,也包含了对城市政府、组织、企业等不同尺度城市活动主体等运行

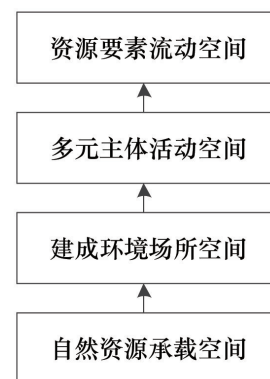


图2 城市空间层级组织关系

Fig. 2 Organizational relationship of urban space level

规律与内在联系的分析,最终为智慧城市的建设与管理提供科学支撑。

2.2 模型组成要素

针对城市不同层级空间组织关系,继续梳理组成城市仿真模型的具体要素,主要包括4个方面:1) 自然环境要素,主要涵盖城市中水、空气、植被等自然资源条件。考虑到城市资源禀赋与承载能力是支撑城市运行的基础本底,将自然要素分解为土地环境、生态环境和能源环境3个组成部分。2) 场所空间要素,具体表现城市空间组织过程中的4项核心功能,包括交通网络

要素、居住空间要素、生产空间要素及休憩空间要素。3) 社会资源要素,在功能空间进行组织布局的基础上,进一步根据不同业务类型对社会资源要素进行整理分类,具体包括教育文化、医疗卫生、科技创新、生活服务等公共服务要素。4) 活动主体要素,主要指城市多元主体间交互联系、相互协同所形成的社会关系网络,涉及政府部门、企业团体及居民个体等不同规模、体量的活动主体,通过主体之间的相互联系带动了城市各项资源要素的有机组织与协同运行(图3)。

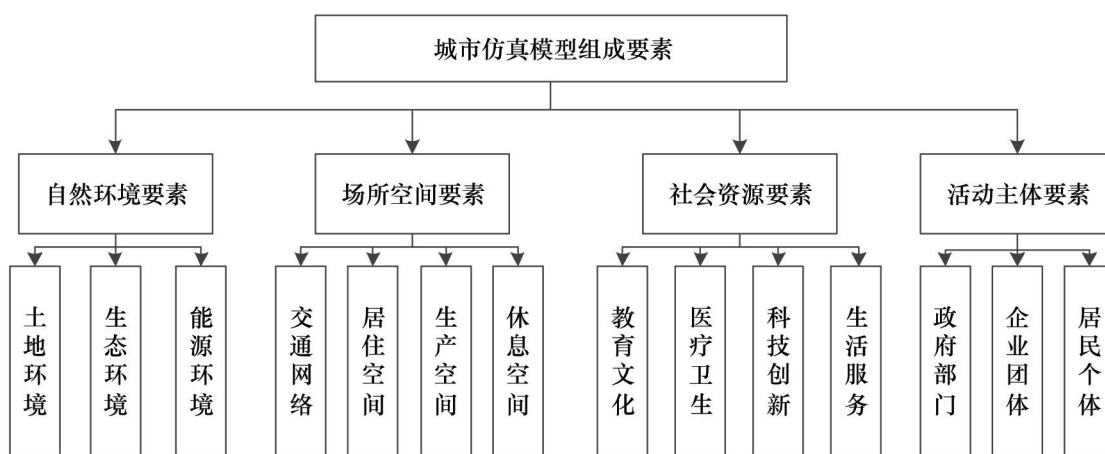


图3 智慧城市仿真模型要素组成

Fig. 3 Components of smart city simulation model

2.3 模型逻辑架构

城市规划与仿真系统的逻辑组织包括4个层次:1) 要素支撑层,包括自然资源要素、场所空间要素、社会资源要素与主题活动要素。具体对不同类型城市要素数据进行采集、整合与管理,提供统一的数据服务接口以方便业务应用与可视化模块的调用。2) 分析模块层,按照城市问题的分类,从评估、预测、管理等方面来构建城市规划与仿真模型集,并进行模型的管理。具体包括设施布局优化、社会资源调配、污染监测防治、资源承载调控、主体活动机理分析、交通运输管理、公共安全应对及产业经济发展等8个方面。3) 仿真可视化层,在问题分析的基础上,进一步对要素组织关系、空间布局与实时运行3个方面开展仿真可视化表达,为后期辅助决策提供可交互的展示方案。4) 功能应用层,基于统一数据服务系统和空间可视化系统,进行城市规划与仿真系统功能模拟,主要服务于城市空间要素模拟、城市资源优化配置模拟、城市空间发展政策评

估模拟及城市运行精细化管理等方面(图4)。

2.4 模型关键技术

2.4.1 城市要素关联整合

城市是一个复杂巨系统,城市的实际运转涉及到不同层面、不同领域要素资源的协同合作,城市仿真模型的首要功能就是梳理整合适应信息时代智慧城市发展要求的城市要素资源体系。它一方面涵盖了城市自然资源、地形地貌、基础设施及建筑环境等城市要素,包括城市地下(地下管线、地质资源)、地表(自然地貌、水土环境)、地上(交通网络、城市建筑等)等不同维度的城市空间,这些基础地物要素组成了真实的城市场景,也是城市各类主体活动的重要载体;另一方面,要素资源体系也涵盖了社会资源要素和主体活动,其中社会资源要素又包括了城市经济、教育、医疗、科技、安全等不同行业的社会服务资源,不同的资源要素在不同行业要素体系中分工协作,支撑了行业的高效运转,同时也带动了要素资源自身的循环流动;而主体活动

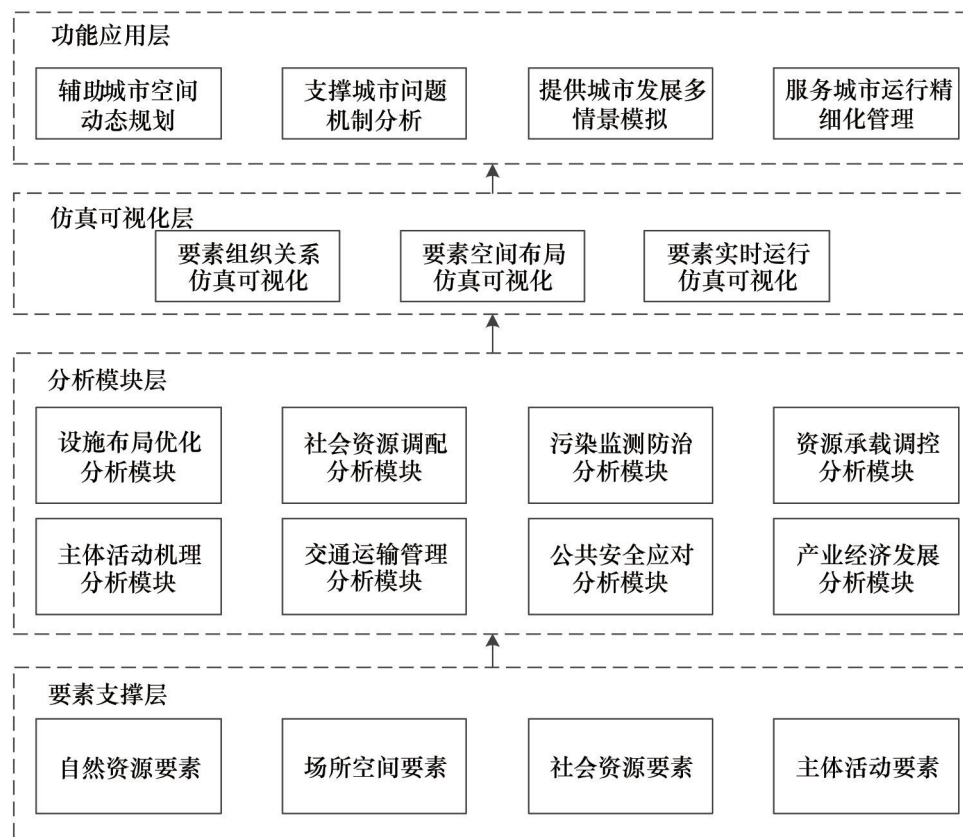


图4 智慧城市仿真模型逻辑架构

Fig. 4 Logical architecture of smart city simulation model

要素,则进一步深化了在社会要素运转流动中人的主体作用,正是由政府部门、企业团体及居民个体等不同层面活动主体间的联系,带动了各类资源要素的交互流动,以人为核心,促进了环境、场所、设施、社会等不同要素资源的关联协同。总体来说,城市仿真模型是在对要素资源进行关联整合的过程中,始终将各主体间的联系与活动作为出发点,通过对要素进行关联嵌套,构建完整的城市要素资源体系。

2.4.2 城市问题建模分析

智慧城市仿真模型有别于早期城市模型对不同城市要素进行拆分后,独立分析要素相互关系的思路,而是将城市不同系统领域的要素看做一个运行体系进行整体化考虑,通过系统中不同主体活动将各类要素资源进行协同整合,由此系统化建构服务于各领域业务应用的分支模块。不同模块针对不同类型的城市问题进行体系化分析,体现出模型研究应用的针对性与目的性。例如,传统城市模型对土地利用与交通环境关系的研究,一般止步于构建数理模型量化分析二者内部构成要素间相关显著性水平,但由于缺乏具体应用

场景,导致传统土地交通模型对实际指导作用不强。而以系统化思路构建的智慧城市仿真模型将交通运输管理体系作为整体进行考量,针对大城市遇到的道路拥堵等交通类城市问题,从居民的出行行为特征与规律分析入手,针对性地研究承载其出行过程中与交通行为交互作用的场所空间,进而分析交通对土地使用的反作用机理,从而指导实际交通规划,管理过程中的措施决策与政策制定。根据问题导向的系统化建模思路,智慧城市仿真模型从设施布局优化、社会资源调配、污染监测防治、资源承载调控、交通运输管理、公共安全应对、产业经济发展等方面构建分析子模块,通过对模块中各要素关系进行系统分析,全面把握具体城市问题的解决思路与方案。

2.4.3 城市运行动态仿真

考虑到城市系统中各类要素联系的错综复杂,传统的数理统计分析难以直观反映各要素在城市运行体系中的职能与作用,城市仿真模型借助三维建模、虚拟现实等最新可视化技术手段对城市运行进行过程化、全局化的直观展现。不同于传统可视化模型仅关注于

场景空间的展现,城市仿真模型更关注以城市主体活动为基础的城市要素运行过程的仿真可视化。具体来说,城市仿真模型以各城市要素为独立研究单元,从要素组织关系、要素空间布局、要素实时运行3个方面构建仿真可视化模块,多层次、动态性、过程化地仿真模拟城市运行现状,为城市研究者提供具有实时互动感知与空间位置关系的要素活动信息,进而为城市空间动态规划、城市运行精细化管理、城市发展情景模拟、重大事件预警防范、城市政策实施评估等多方面应用需求提供决策支撑。此外,在具体仿真过程中也需要充分考虑系统的复杂性,具体表现在:1) 城市系统不同要素分层组织与交互结构上复杂性;2) 城市发展中要素间并行中相互影响关系;3) 城市空间扩展模块的自适应性,以及各系统模块在运行过程中不断被重组与改造;4) 城市发展过程中受各种政策因素、自然因素、人为因素等偶发事件的干预和影响导致的不确定性。具体仿真模型在应用时可以根据城市问题类型进行适当的要素简化,以保证模型的灵活性与可用性。

3 智慧城市仿真模型应用场景

依托智慧城市在物联传感网络方面的建设基础,海量城市要素运行数据得以被有效感知与采集,仿真模型针对城市规划、建设、管理过程中的实际需求进行资源要素与模块功能的有机整合,对城市发展现状与未来发展情景进行动态仿真与可视化展示。这一方面丰富了多元主体对城市空间组织与运行过程的认知手段,另一方面也为城市空间动态规划与管理决策制定提供有力支撑。

3.1 支撑城市规划方案评估

城市仿真模型通过分析整合城市要素运行数据,通过虚拟现实等可视化手段对城市运行过程开展动态仿真展示,可以辅助管理部门模拟各项规划方案或治理政策对城市不同发展阶段所产生的影响,通过对调整参数后模型结果的比对,筛选出综合效果最优方案,可以有效提高城市规划和管理的科学性。具体可分为以下2个层面:1) 支撑城市层面用地布局的优化调整,包括对交通影响评估、能源消耗评估、环境影响评估、碳排放评价等方面。不同于传统场景模型的规划评估方式,城市仿真模型主要从居民、企业活动的微观层面识别城市活动主体对规划政策的认知与反馈,通过调

整城市用地、交通等要素的规划布局方案,动态仿真模拟城市主体在空间或政策变化时产生的响应过程,进而评估规划方案的适宜合理性,如用地开发强度和布局结构的合理性,规划方案对城市交通的影响,进而结合其他专业模型进行资源环境等方面影响的评估,通过多方案的科学评价,辅助规划决策的科学化制定。2) 支撑片区层面基础设施的精细化选址,城市仿真模型主要从微观视角模拟城市运行,注重和推崇“以人为本”的研究视角与建模理念,对于城市住区改造、公共服务设施、市政基础设施或交通基础设施布局等项目,通过其对城市活动主体的影响(如通过影响可达性改变居住和企业区位选择过程),在地块空间尺度进行评价,给出评估结论及项目选址建议。

3.2 增强城市设计感知交互

视觉分析在城市设计过程中具有重要作用,仿真模型的应用将会提高方案的交互性表达效果。城市仿真模型通过对城市内部地块尺度的精细化建模,可以使城市景观现状和规划设计的描述摆脱基于二维地图和三维实物模型的表现方式,代之以动态的仿真交互模式,使规划设计人员对城市景观现状和规划设计蓝图有生动、直观的了解和更深刻的认识。此外,传统的三维城市模型过多注重对场景的建模展示,缺乏对城市内部要素交互流动等活动空间的建模展示。通过城市仿真模型对城市系统要素的整合,能够避免传统三维场景模型在表述城市运行过程中的局限性与片面性,提供具有地理拓扑与位置关系的实时动态展示。在规划领域,仿真模型在微观尺度的城市设计工作中有以下4方面应用:1) 采用虚拟现实技术,能将各种规划设计的方案定位于现实环境中,考察加入规划方案后对小尺度场景空间及周边环境的影响,评价方案的合理性。2) 将设计方案进行实时动态的展示,根据设计要求进行方案的灵活调整,从而为规划设计人员快速、直观的感知设计方案效果带来方便。3) 实现城市设计师、政府管理人员和城市居民之间的交互与协同设计,借助仿真模拟系统平台推动公众参与和规划设计方案优化改进,实现智能化、人本化设计的良性互动。4) 通过城市仿真模型将规划方案进行前期模拟,在降低城市开发成本的同时还能够有效控制规划设计的时间,实现规划设计方案的快速生成。

3.3 辅助城市运行管理决策

城市仿真模型作为智慧城市的神经中枢,支撑了

各种动态信息实时接入、加载、时空关联与融合计算,为不同部门分析人员提供统一的研究本体框架,也为城市决策管理者多角度、全过程认识城市发展提供了统一的会商平台。对于城市管理部门来说,可以基于城市仿真模型相应地开发不同业务领域的应用系统,辅助不同领域的部门的业务操作,支撑管理人员对城市要素运行与城市问题成因进行全方位的认知与理解,进而提供管理人员进行全过程管理与实施把控。具体来说:1) 借助城市仿真模型,可以对城市空间的分布、利用效率、配置情况进行监测模拟,实时反馈城市空间运行状况,针对局部地区资源短缺、利用效率不高的困境,实现城市资源和能源的优化配置利用。2) 以城市运行轨迹数据为线索,对城市各类主体运行全过程进行实时跟踪与记录,通过动态仿真模型的形式,展现城市实时运行状态,对城市空间发展趋势进行模拟,服务城市现状评估与未来发展决策研判,提升城市管理决策水平。实际上,就是通过对城市各环节、城市政府、企业及居民活动的实时感知、分析、仿真模拟及可视化表达,在把握城市发展实时动态的同时,进一步预测未来城市在重大政策、挑战、事件及风险等环境下的变化方向、承载或应变能力,进而支撑城市管理者制定科学的应对决策和管理措施。

4 结论

在过去的几十年中,城市模型的不断迭代为地理、规划、管理等多领域的研究提供了量化的方法支撑,主要体现在通过计量模型对城市要素运行机理的深入挖掘,同时通过丰富的可视化手段对分析结果进行精细化展现。而随着信息技术的发展,加速了城市各领域要素间的时空交换,活动空间逐渐成为区域、城市研究的重点方向。

本文从城市主体活动视角,阐述了以要素交互活动为基础的城市仿真模型的构建思路与组织架构,并以城市问题为导向,从系统论的角度对城市各行业要素系统进行统筹整合。在此基础上,通过对系统要素信息的获取、集成,实现对产业、交通、社区、文化、生态等城市各要素资源的仿真模拟与动态协同,重点通过对居民活动大数据(位置数据、文本评价数据、图像数据、视频数据等)的挖掘与分析,对城市各类空间发展质量进行仿真建模与多情景分析,预测未来空间增长

趋势和规模,支撑城市未来发展的政策制定与运行管理。在今后的研究中,为了构建适用于各行业数据整合应用的城市仿真模型,首先需要构建一套应用于城市仿真领域的数据标准与体系,这套数据体系在时空维度上应更注重对城市各领域要素的统一三维描述,而在属性维度上则更侧重于对政府、企业、居民等各主体活动信息的记录,以支撑模型对城市不同类型主体活动信息的全过程动态仿真。

参考文献(References)

- [1] 迈克尔·巴蒂, 安德鲁·哈德逊-史密斯. 城市设计中的可视化分析: 智慧城市与大数据[J]. 城市设计, 2016(3): 6-15.
Michael Batty, Andrew Hudson-Smith. Visual analytics, smart cities, and big data in urban design[J]. Urban Design, 2016(3): 6-15.
- [2] 龚健雅, 王国良. 从数字城市到智慧城市: 地理信息技术面临的新挑战[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(2): 1-6.
Gong Jianya, Wang Guoliang. From digital city to smart city: New challenges to geographic information technology[J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(2): 1-6.
- [3] Jjumba A. High resolution urban land-use change modeling: Agent iCity approach[J]. Applied Spatial Analysis & Policy, 2012, 5(4): 291-315.
- [4] Pagliara F, Wilson A. The state-of-the-art in building residential location models[M]//Pagliara F, Preston J, Simmonds D. Residential location choice: Models and applicat. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 1-20.
- [5] Batty M. Smart cities, big data[J]. Environment & Planning B Planning & Design, 2012, 39(2): 191-193.
- [6] Goodchild M F. Citizens as sensors: The world of volunteered geography[J]. Geojournal, 2007, 69(4): 211-221.
- [7] 甄峰, 秦萧. 大数据在智慧城市研究与规划中的应用[J]. 国际城市规划, 2014, 29(6): 44-50.
Zhen Feng, Qin Xiao. The application of big data in smart city research and planning[J]. Urban Planning International, 2014, 29(6): 44-50.
- [8] 龙瀛, 茅明睿, 毛其智, 等. 大数据时代的精细化城市模拟: 方法、数据和案例[J]. 人文地理, 2014, 29(3): 7-13.
Long Ying, Mao Mingrui, Mao Qizhi, et al. Fine-scale urban modeling and its opportunities in the "Big Data" era: Methods, data and empirical studies[J]. Human Geography, 2014, 29(3): 7-13.
- [9] 朱庆. 三维GIS及其在智慧城市中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 151-157.
Zhu Qing. Full three-dimensional GIS and its key roles in

- smart city[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(2): 151-157.
- [10] 甄峰, 王波, 陈映雪. 基于网络社会空间的中国城市网络特征: 以新浪微博为例[J]. *地理学报*, 2012, 67(8): 1031-1043. Zhen Feng, Wang Bo, Chen Yingxue. China's city network characteristics based on social network space: An empirical analysis of Sina micro-blog[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1031-1043.
- [11] 甄峰. 基于大数据的规划创新[J]. *规划师*, 2016, 32(9): 45. Zhen Feng. The innovation of urban planning based on big data[J]. *Planners*, 2016, 32(9): 45.
- [12] 曹阳, 甄峰. 基于智慧城市的可持续城市空间发展模型总体架构[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(4): 430-437. Cao Yang, Zhen Feng. The overall architecture of sustainable urban spatial development model based on the construction of smart cities[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(4): 4373-4380.
- [13] 谢永达. 三维城市模型的构建及其在规划中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. Xie Yongda. 3D city model reconstruction and the study on its application in urban planning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [14] 付亚梁. 基于三维GIS的城市空间规划辅助决策支持系统实现[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010. Fu Yaliang. The support auxiliary decision system on urban space planning based on 3D GIS[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [15] 李苏旻. 虚拟现实技术在建筑与城市规划中的应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008. Li Xumin. Applied research of virtual reality technology in architecture and urban planning[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.
- [16] 吴志勇, 吕萌丽. 走向三维的城市规划管理: 以广州市为例[J]. *规划师*, 2007(7): 68-71. Wu Zhiyong, Lü Mengli. Toward three-dimension urban planning management: Taking Guangzhou as an example[J]. *Planners*, 2007(7): 68-71.
- [17] 艾丽双. 三维可视化GIS在城市规划中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004. Ai Lishuang. Research on the application of the 3D visualization GIS in city planning[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [18] 周茜, 夏清清. 数字化调查与可视化分析在城镇规划中的应用[J]. *规划师*, 2017, 33(4): 101-108. Zhou Qian, Xia Qingqing. Application of digital survey and visual analysis in town planning[J]. *Planners*, 2017, 33(4): 101-108.
- [19] 潘斌, 郭小明, 陈明明, 等. 面向智慧城市的3维城市在线可视化[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(3): 445-451. Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, et al. Online 3D city visualization for smarter cities[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(3): 445-451.
- [20] 席广亮, 甄峰. 基于可持续发展目标的智慧城市空间组织和规划思考[J]. *城市发展研究*, 2014, 21(5): 102-109. Xi Guangliang, Zhen Feng. Spatial organization and planning of smart cities based on the sustainable development goals[J]. *Urban Development Studies*, 2014, 21(5): 102-109.

The organization of smart city simulation model

CAO Yang^{1,2}, ZHEN Feng^{1,2}

1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Smart City Design Simulation and Visualization Technology Engineering Laboratory of Jiangsu Prtvince, Nanjing 210093, China

Abstract The construction of smart city has provided multi-source data support for systematic cognition of the city operation, and also brought new opportunities for the urban development model. This paper explains the construction foundation of the smart city simulation model from the aspects of urban elements organization mechanism and the urban system operation representation. Then, a concrete organization of the simulation model is elaborated in the following four parts: model concept connotation, component elements, framework structure and main functions. Finally, specific application scenarios of the simulation model are discussed including urban planning scheme evaluation, urban design perception interaction and urban operation management decision.

Keywords smart city; big data; activity space; urban simulation model ●



(责任编辑 王志敏)