DOI 10.15302/J-SSCAE-2021.03.020

城市虚拟交通系统与交通发展决策支持模式研究

王炜[1, 2, 3]，赵德[1, 2, 3]，华雪东[1, 2, 3]，周伟[1, 2, 3]

（1. 东南大学交通学院，南京 210096；2. 东南大学江苏省城市智能交通重点实验室，南京 210096；
3. 东南大学现代城市交通技术江苏高校协同创新中心，南京 210096）

摘要：本土化的城市虚拟交通系统与交通发展决策支持模式，在解决由快速城镇化引发且趋于严重的城市交通问题、克服现阶段智能交通系统存在的瓶颈方面具有重要意义。本研究依托大数据、互联网等信息技术，建立了由基础数据库、分析模型库、软件模块库、备选预案库组成的城市虚拟交通系统，涵盖其理论框架、系统功能、技术体系，据此提出覆盖城市土地开发、交通设施建设、交通运行管控、公共交通运营、交通政策制定等应用场景的交通发展决策支持模式。以重庆市为例，阐述了城市虚拟交通系统构建过程，完成重庆市新型冠状病毒肺炎疫情期间居民出行、车辆通行错峰方案的政府决策论证。结果表明，基于城市虚拟交通系统的交通发展决策支持模式在实际交通方案论证过程中具有及时性和有效性。研究建议，未来我国城市交通规划管理可注重城市虚拟交通系统的建设和运用，及时纳入新型信息技术成果以优化应用效果。

关键词：城市交通系统；道路网络；交通分析模型；虚拟交通系统；决策支持模式

中图分类号：TP39　　**文献标识码：**A

Virtual Urban Transportation System and Decision Support Mode for Transportation Development

Wang Wei[1, 2, 3], Zhao De[1, 2, 3], Hua Xuedong[1, 2, 3], Zhou Wei[1, 2, 3]

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Developing a localized virtual urban transportation system (VUTS) and a decision support mode for transportation development is significant for solving the increasingly severe urban traffic problems caused by rapid urbanization and for overcoming the current bottlenecks that restrain the intelligent transportation system development. Based on the advanced information technologies such as big data and Internet technologies, this study establishes a VUTS that is composed of four parts: basic databases, analysis models, software platforms, and alternative plans; the theoretic framework, systematic functions, and technical system of the VUTS are analyzed. Furthermore, a decision support mode for transportation development is proposed; it covers the application scenarios including urban land development, traffic facilities construction, traffic operation control, public transport operation, and traffic policy

收稿日期：2020-08-20；**修回日期：**2020-11-11

通讯作者：赵德，东南大学交通学院副研究员，研究方向为交通运输规划与管理；Email: zhaode@seu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“中国‘站城融合’发展战略研究”(2020-XZ-14)；中国工程院咨询项目“‘新基建’思维改造传统公路交通基础设施战略研究”(2021-XZ-04)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

making. Subsequently, we built the VUTS of Chongqing and provided plans for the municipal government regarding its decision on shifting peaks for residents and vehicles during the outbreak of the COVID-19 epidemic. The case results suggest that the decision support mode based on VUTS is effective in the demonstration of traffic plans. Therefore, we suggest that China attach importance to the VUIS and its application in urban traffic planning and management and incorporate new information technologies to optimize the application effects.

Keywords: urban transportation system; road network; traffic analysis model; virtual transportation system; decision support mode

一、前言

改革开放以来，我国城市交通发展经历了大规模建设、现代化管理、机动化转型、智能化服务 4 个阶段 [1]；仅用 40 年时间完成了发达国家一百多年的发展历程，发展速度之快、面临问题之复杂、技术难度之大世所罕见。这期间，我国城市交通的出行方式也经历了自行车主导、机动车 / 非机动车混行、机动车主导的转变。也要注意到，快速城镇化引发了居民出行机动化，城市交通问题趋于严重。根据国家统计局数据，2004—2019 年我国私人载客汽车保有量从 1.07×10^7 辆增长至 2.07×10^8 辆（增长 19.4 倍），而城市道路里程仅从 2.23×10^5 km 增长至 4.59×10^5 km（增长 2.1 倍）。城市交通系统供需严重失衡，交通拥堵、安全事故、环境污染等一系列大城市交通问题不断涌现。

当前，我国城市交通处于交通结构转型期，城市交通系统的供需矛盾很大；在快速城镇化、出行机动化的双重压力下，单靠道路建设无法满足机动化出行需求。缓解城市交通问题的总体思路是建设公交主导型的城市交通系统供需平衡体系 [1~3]（见图 1），具体策略包括：①在交通源头，采用以公共交通为导向的城市土地开发（TOD）模式，降低交通需求，引导城市综合交通系统的供需平衡；②在交通设施建设过程中，构建以轨道交通为骨干的城市综合交通网络体系，加强城市综合交通体系的综合协同，优化交通供给；③在交通末端，发展公共交通优先的城市智能化交通管理系统，提高交通系统的通行效率。在具体的实施过程中，需要精明的交通规划、精致的交通设计、精细的交通组织、精准的交通管控等措施，最终实现城市交通系统从“增量积累”到“存量发展”、从“能力建设”到“效能提升”的功能性转变。

二、城市虚拟交通系统与决策支持模式需求分析

（一）构建公交主导型城市交通系统供需平衡体系

公交主导型城市交通系统供需平衡体系极具价值，其构建依赖于城市交通系统的智能化、政府职能部门的协同决策。一方面，当前的城市智能交通系统建设存在技术瓶颈，基于大数据技术解决城市

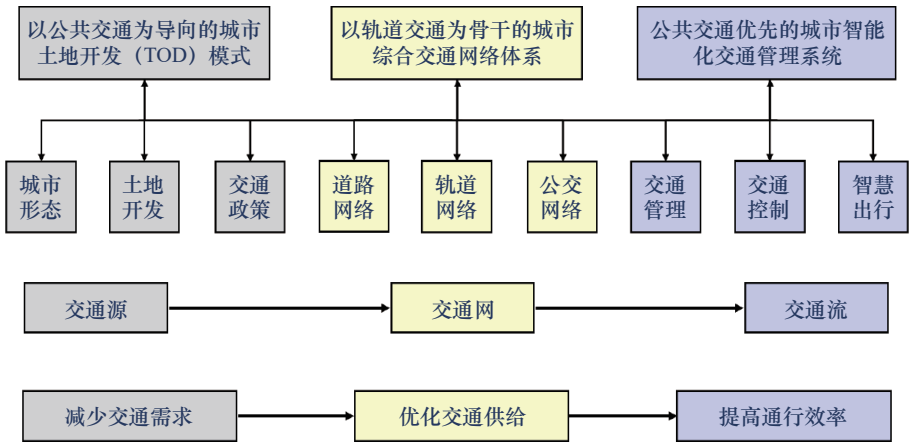


图 1　公交主导型城市交通系统供需平衡体系

交通问题的专业分析与仿真能力尤为缺乏；另一方面，政府各职能部门的业务相对独立，与城市交通系统相关联的部门业务方案论证“各自为政”，难以实现协同决策。

我国亟需建立基于大数据、人工智能（AI）等前沿技术的城市虚拟交通系统与交通发展协同决策支持模式，通过海量交通数据的汇集、融合、应用，交通分析模型的构建、优化，提高城市交通规划与管控的精准化、科学化水平 [4,5]；运用“统一的数据、统一的方法、统一的软件”，形成共享的协同决策支持平台；构建城市交通系统多个管理部门的协同机制，赋予“城市交通大脑”“交通优化的思维能力”，切实提升对政府决策的支持能力与效率。

（二）支撑城市交通规划与管理方案决策

城市虚拟交通系统能够突破当前城市智能交通系统建设的技术瓶颈，真正将交通大数据用于提升城市交通系统规划、建设、管理水平。基于相关理论模型、系统软件、测试平台，突破交通大数据应用由“交通状态感知”上升为“出行需求认知”的关键技术，形成可为诸多政府决策环节（如城市土地利用、交通政策制定、交通设施建设、交通管理控制等）提供精细化、定量化、可视化、快速反应的决策支持模式，确保“城市交通大脑”具有“交通优化的思维能力”。

发展城市虚拟交通系统，旨在融合来源于多个管理部门的交通数据，构建统一的交通数据库，提供统一的交通分析方法，建立共享的仿真平台，支持交通仿真结果可视化。在具有共享特征的城市虚拟交通系统上，支持实现多部门联合与协作的决策支持模式，形成决策方案论证的虚拟仿真技术一体化流程体系，可以随时待命、快速响应，有效应对政府的宏观、中观、微观等不同层面的交通规划与管理方案决策需求。

（三）开发本土化的城市虚拟交通系统仿真能力

城市综合交通系统的主体通常是由数百万人、数百万车辆在超级大型交通网络上的出行行为所组成的复杂系统，开展相关仿真分析必须采用大型平台软件。在城市道路网络仿真方面，众多商业交通仿真软件整合了交通仿真研究的各类模型和算法，已经广泛用于真实城市的仿真平台构建。宏观交通仿真主要由交通的供给、需求、分配模型组成，基本理论为交通“四阶段法”，适用于分析城市基础设施建设或行政管理方法对全局交通的影响；国外代表性的软件有 TransCAD [6]、Emme [7]、PTV Visum [8]、Cube [9] 等。

当前，国外交通仿真规划软件在国内应用市场具有垄断地位，尽管具有灵活的分析与显示功能，但难以适应我国复杂多样的交通环境、多模式混合的交通特征，突出表现在：使用的交通模型与标定参数主要基于国外的交通运行特征，照搬到我国的实际交通应用“水土不服”；仅侧重城市规划和交通规划，无法从反映国情的交通管理措施、交通控制策略、交通政策法规出发来开展交通网络运行情况分析，也未考虑国内实际应用面临的各类情景；运行过程中需要用户基于专业判断来逐一操作，而非专业人士很难根据特定的业务需求来有效使用。因此，亟待开发符合国情、易于应用的国产城市交通分析平台软件，以服务于我国城市多部门协作的交通方案决策，助力“城市交通大脑”建设。

三、城市虚拟交通系统与决策支持模式的基本原理和框架体系

（一）城市虚拟交通系统与决策支持模式的原理

城市虚拟交通系统对居民出行需求、道路交通流、综合交通网络等现实交通系统参与对象进行数字化抽象，经由数学分析模型模拟现实交通系统的演化规律与供需平衡机理，在计算机上构建与现实交通系统具有相同交通特征的数字交通系统。以此为基础，发展“统一的数据、统一的方法、统一的软件”，形成共享仿真平台与决策支持模式。

城市虚拟交通系统与决策支持模式，重在为“智慧城市”建设提供全方位的交通领域分析与仿真技术支撑：进行各类业务方案（如城市土地开发、交通政策制定、交通设施建设、交通管理控制等）对城市交通系统产生影响的定量化、可视化综合评估与系统优化，开展跨部门协作方案（涉及城市规划、交通建设、交通管理、公共交通、交通政策等）的制定、政府决策方案的论证分析，促进城市交通

系统的跨部门协同与无缝衔接，支撑政府高效科学的决策与管理（见图 2）。

（二）城市虚拟交通系统与决策支持模式框架体系

城市虚拟交通系统由基础数据库、分析模型库、软件模块库、备选预案库四部分组成（见图 3）。①基础数据库是系统的基础，对多源交通大数据进行提取、加工、融合形成标准化数据库，直接连接到虚拟仿真平台开展交通系统分析。②交通分析基础模型库是内核，起到“城市交通大脑”的思维能力构建作用；依据城市交通系统构成要素的基本特征，描述并运用新型城镇化背景下的城市交通系统的演化规律与供需平衡机理。③交通仿真软件模块库是支撑，具有友好的人机交互界面，构建相应的交通数学模型，提供可靠的交通仿真功能，生成详细的数据指标报告、动态直观的可视化结果。④备选预案库是交通发展决策支持模式的拓展应用，相关过程涉及多管理部门协同，方案实施也需经过反复调整、评估、优化；面向业务功能的分析流程完善，可“一键式”开展仿真流程，合理放宽对方案设计、系统分析、仿真评估的人员专业能力需求。

四、基础数据库：交通大数据的快速获取与融合技术

随着大数据和智能交通技术的不断发展，交通领域的数据规模空前庞大，对海量交通数据的挖掘分析已成为交通领域发展的重要方向 [10,11]。城市交通大数据主要分为静态基础、动态出行、实时流量 3 类，具有体量巨大、模态多样、真假共存、价值丰富等特征 [12]。目前，我国交通大数据碎片化、

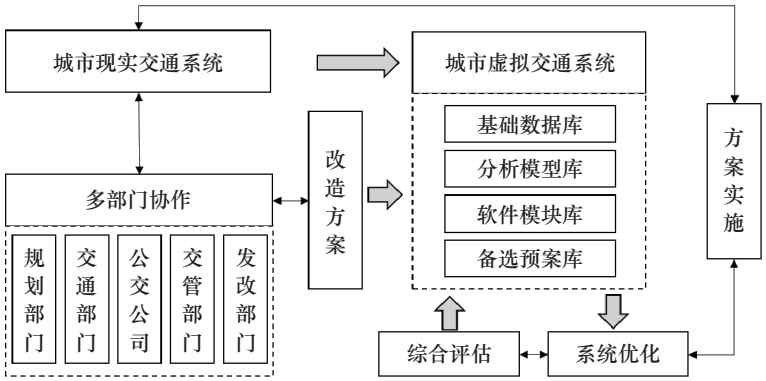


图 2　城市虚拟交通系统与决策支持模式的应用原理

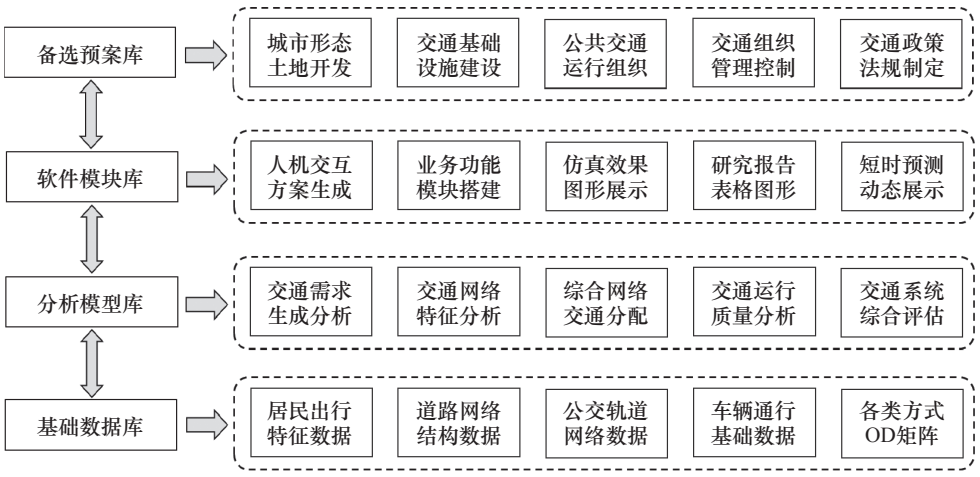


图 3　城市虚拟交通系统的体系构成

注：OD 表示起迄点出行分布。

各自为政、共享程度低等现象依然突出，相应价值未能充分挖掘和利用。本文基于城市虚拟交通系统，发展了 3 类交通大数据快速获取与融合技术：城市交通网络数据库快速构建技术、城市人口数据库快速构建技术、交通流量时间序列快速构建技术（见图 4）；分别以开放街道地图（OSM）交通网络数据、LandScan 人口分布数据、射频识别（RFID）交通流量数据为应用对象，通过数据处理与算法建模，完成交通路网数据、交通分区人口数据、交通网络实时流量数据的快速获取与融合。

快速构建城市大规模路网拓扑结构，需要依托成熟的地图服务商（如高德地图、百度地图、谷歌地图等）。文中提出了一种基于 OSM 数据库的城市交通网络数据库快速构建技术，解析 OSM 地图的下载图元，提取 OSM 数据库中的节点、路段数据并进行清洗整合，据此构建交通网络的拓扑结构、生成城市虚拟交通系统所需的路网基础数据库文件。实际应用表明，该技术可以在分钟级时间内构建 1 个大型城市的综合交通网络基础数据库。

在城市人口数据库快速构建方面，目前较多使用人口普查数据、手机信令数据、全球定位系统（GPS）数据、土地利用数据等。文中主要采用 LandScan 数据来推算交通小区的人口数据，这是因为 LandScan 数据采用地理信息系统与遥感影像相结合的方法计算并公布了世界范围内各城市 1 km 格网分辨率的人口分布数据；采用一种基于栅格数据和面积比修正的交通小区人口数据统计方法，对包含交通小区边界的矩形进行调整以修正栅格内的人口高程值，进而累加得到交通小区总人口，据此快速构建交通小区人口数据库。

交通流量时间序列数据的主要来源有道路传感器、道路视频监控、GPS 数据、RFID 数据等。文中主要采用 RFID 数据来构建交通流量的时间序列，这是因为 RFID 数据库提供路段实时流量、路网路段拥堵情况等信息，与居民出行与交通网络数据库之间存在较大的关联性；在城市交通系统路段交通流时间演化预测模型、网络交通流空间演化仿真模型的基础上，构建了城市交通网络交通流时空分布一体化预测模型、时空演变一体化推演机制，据此实现城市交通网络宏观空间分布预测与重要交通节点微观实时推演的一体化。

五、分析模型库：大数据环境下的城市交通分析模型体系

当前在交通工程领域中，城市交通问题的解决方案仍以传统的交通分析模型为基础，模型分析功能与精度有限。互联网、大数据、AI、第五代移动通信、虚拟仿真等前沿技术为交通领域带来了新机遇；交通大数据呈现海量化和多元化的趋势，对交

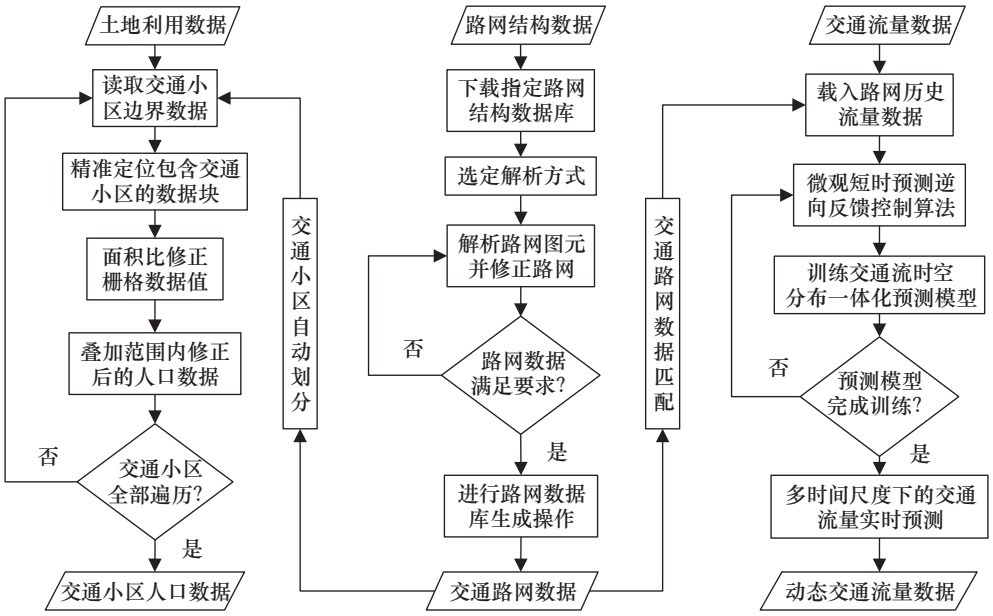


图 4　交通大数据的快速获取与融合技术架构

通分析模型的架构产生极大影响，因此重构城市交通分析模型体系势在必行。

交通大数据克服了传统交通抽样调查的局限性，基于大数据可以揭示新型城镇化背景下的城市交通系统的演化规律与供需平衡机理。大数据环境下的新一代城市交通模型体系应包括：交通网络运行分析模型、交通需求生成分析模型、交通需求分布－方式组合分析模型、公共交通网络分析模型、交通管理控制影响分析模型、交通政策法规影响分析模型、综合交通网络分配模型、城市交通系统综合评估模型等。

长期以来，我国在解决城市交通问题上缺乏跨部门协同机制，而单一部门的业务不能反映交通系统各组成单元之间的相互作用关系。大数据环境下的城市交通分析模型体系中，需要结合城市交通系统特征与交通要素特性，构建反映规划、城建、交通、交管、发改等部门协同的交通要素相互作用关系模型（见图 5）。

六、软件模块库：大规模交通网络交通仿真技术与软件实现

为了满足对具有中国特色的交通管理措施、交通政策法规进行交通网络运行仿真分析的需求，建立具有自主知识产权的交通仿真平台软件，本课题组汇集 30 多年来在城市交通领域方面的科研成果，组织开发了我国第一款城市虚拟交通仿真平台软件——“交运之星 –TranStar”。平台功能涵盖城市土地开发、交通设施建设、交通运行管控、公共交通运营、交通政策制定等业务方向的交通方案设计与交通分析功能，逐步成为“智慧城市”建设、“城市交通大脑”建设不可或缺的基础软件；具有高效的运行与仿真速度，包含上万条路段级别路网的“一键式”仿真过程完成时间为分钟级；支持开展方案结果的深入评估。相关软件模块库的主要功能如下。

完善的基础数据支持功能。对海量异构交通大数据进行导入、分析，快速处理不同来源的交通大数据，如传统的交通出行调查数据、RFID 数据、GPS 数据等。具有数据处理能力的扩展功能，保障对多类型交通分析案例的应对能力，适应不同用户的使用需求。

系统的交通需求分析功能。软件模块库既可开展以传统“四阶段法”为基础的交通发生吸引预测、交通分布、交通方式划分等分析过程，又可实现基于大数据的交通需求预测及一体化仿真，如基于优势出行距离的交通方式划分、基于 RFID 数据的 OD 矩阵分析预测等。

关键的交通运行分析功能。用户对交通网络阻抗进行深入分析，准确反映土地开发、设施建设、

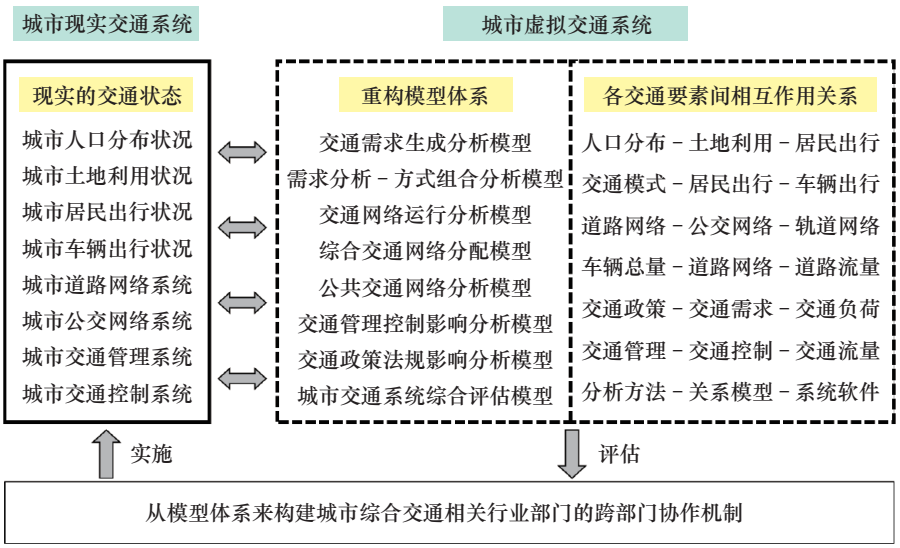


图 5　跨部门协同的交通要素相互作用关系

公交运行、管理控制、政策制定等交通措施对各种出行方式所对应的交通阻抗，更好服务于综合交通系统一体化交通分析的要求。

科学的综合效能评价功能。评价功能在方案设计、建模仿真、最终决策之间起到纽带作用。例如，网络分析评价模型将各分析模块的仿真结果进行提炼和转化，获得直观的交通系统运行指标；用户在完成交通仿真后将全面掌握当前网络运行状态，明晰土地利用和路网规划方案、交通管控政策和措施等对交通系统整体效能产生的影响。

特色的人机交互设计功能。通过图形编辑功能，用户便捷地将土地利用开发调整、交通基础设施建设、交通管理控制、交通政策制定等方案加载到交通基础数据库，灵活开展交通分析、系统仿真、综合评估。

七、备选预案库：城市交通发展“一键式”决策支持模式

（一）备选预案库的主要作用

备选预案是交通仿真分析的应用场景，备选预案库则是针对城市虚拟交通系统仿真平台相关应用部门的业务需求而设计，包括相关部门涉及交通的业务预案、各预案交通仿真分析的“一键式”流程设计等。对于不具有交通工程专业背景的业务人员，结合业务工作需求，在备选预案库中选取合适的预案（或者适度修改预案）即可形成可用的业务方案，通过“一键式”操作流程，便捷开展交通方案的优化及全方位评价。

备选预案库将城市交通分析平台的基础数据库、分析模型库、软件模块库的相关功能模块进行组合，适应“一键式”操作流程设计；所提供的多角度、个性化的备选策略，能够覆盖大部分城市、常见类型的交通问题解决方案，为城市单一部门或多部门协作的交通方案制定提供协助。

（二）备选预案库的策略设计

跨部门协同仿真的“一键式”备选策略设计指，通过专用界面开展面向业务功能的模块组合选型，针对具体的业务功能进行流程指引，便于各部门基于“一键式”备选策略设计流程来完成具体业务的设计与评估。①城市规划业务领域主要有城市空间拓展与城市形态调整、城市土地开发强度与土地利用性质调整、城市人口规模与空间分布调整等备选策略。②交通设施建设业务领域主要有城市道路网络规划与设计、慢行交通系统规划与设计、城市道路 / 桥梁 / 隧道等设施的新建或改扩建、交通枢纽改扩建、交叉口改造等备选策略。③公共交通运营业务领域主要有地面公交网络规划与调整、轨道交通网络规划与调整、多模式公交网络运行组织、客运枢纽交通组织设计、城乡公交网络一体化规划等备选策略。④交通管理控制业务领域主要有常规交通管控方案（如单行线、潮汐车道、禁行管理、共乘车道、尾号限行）、智能化交通管控方案（如干线绿波、交叉口优化）、特殊事件交通管控方案（如道路施工、大型文体活动、突发事件）等备选策略。⑤交通政策制定业务领域主要有经济杠杆政策（如拥挤收费、差异化停车收费、公交票价），发展绿色交通政策（如私家车限购、车牌号竞拍、公交优先发展策略、新能源汽车优惠政策），交通对能源消耗、环境污染、经济发展的影响评价等备选策略。

（三）备选预案库的定量化、可视化评估技术

城市交通规划与管理相关方案的科学性、有效性亟需定量化的评估手段，拟定方案的实际效果也有待直观呈现，因此开展城市多部门协作的交通方案评估应以定量化、可视化评估技术为依托。

在交通方案定量化评估技术方面，深入研究国家级交通科技计划（如全国城市道路交通管理“畅通工程”、国家公交都市建设示范工程等）评价指标体系、绿色交通 / 慢行交通 / 共享交通等热点问题，综合参考领域的前沿研究成果、规范指南，从居民出行效率、路网运行效率、城市节能减排、系统经济效益等多个维度着手，构建服务于系统评价功能的指标体系，以此支撑城市交通规划、建设、管理的科学决策。

在交通方案可视化评估技术方面，依托图形系统，开展交通设计方案、交通运行状态、不同方案对比的图形分析；集成包括交通网络信息、交通管理信息、交通质量信息、公共交通分析、环境影响分析等在内的图形化展示功能，提升交通仿真成果的展示度；全面实现基础路网信息、管理信息、需

求预测结果、仿真结果的图形化显示，便于应用者审视所制定交通方案的路网运行状况、检验规划调整或管理策略变化对路网运行产生的影响。

八、城市虚拟交通系统与交通发展决策支持模式的应用案例

（一）重庆市主城区城市虚拟交通系统构建

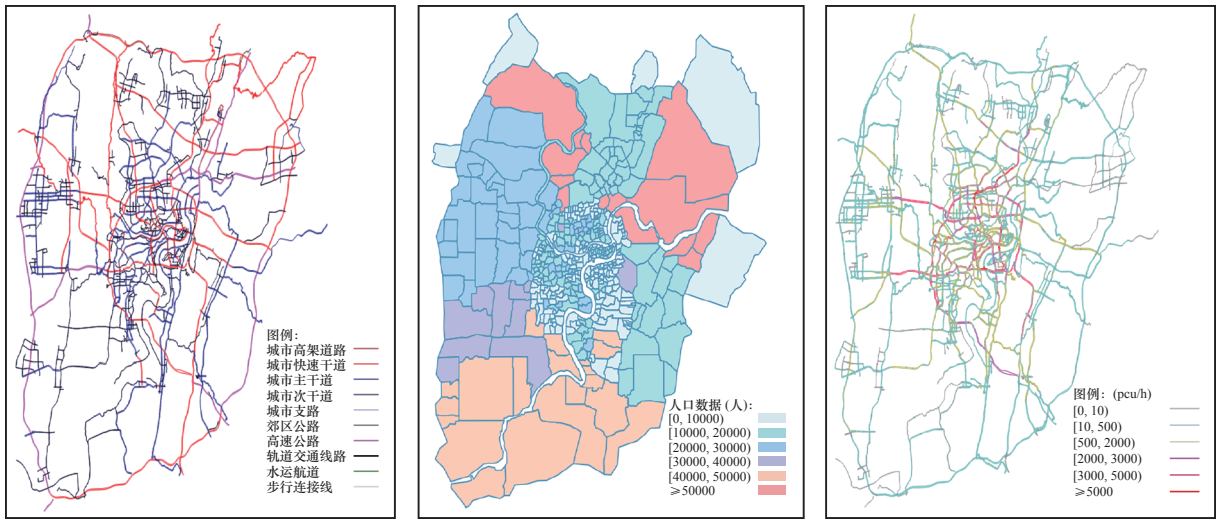
重庆市主城区城市虚拟交通系统以“交运之星 –TranStar”为基础开发，交通网络基础数据库基于 OSM 构建。全网络（含地面公交、轨道交通）共有 7324 个交通节点、15 482 个路段，道路里程为 4124 km（单向）。人口分布数据库基于 LandScan 数据平台构建，共有 467 个交通小区的人口分布。现状道路流量数据库依据重庆市 RFID 数据库构建，各类交通方式的 OD 矩阵基于 RFID 数据、重庆市居民出行特征数据分析获得。相关的基础数据如图 6 所示，重庆市主城区城市虚拟交通系统可以在 2 min 以内完成“一键式”仿真并给出评价结果。

（二）重庆市新型冠状病毒肺炎疫情期间居民出行上下班错峰方案仿真与评估

2020 年 3 月底以后，随着重庆市疫情逐渐好转，企业复工、生活恢复，逐步增加的小汽车出行需求导致了道路网络交通负荷增加，主要通道交通拥堵情况加重。为了在保障有效“抗疫”的同时科学有序地恢复居民出行，重庆市城建、交通、交管等管理部门提出了错峰上下班的建议，这就要求快速制定具体方案并形成方案评估报告。在“任务急、时间短、要求高、跨部门”实际状况下，本课题组借助重庆市主城区城市虚拟交通系统快速完成方案的制定、论证、仿真、评价，给出行业错峰（对城市部分行业实施错时上下班）、车辆错峰（对主要桥隧在高峰时段进行限号）两类方案的详细评估结果。

仿真获得的方案实施前后路段交通流量差值分布如图 7 所示。如实施行业错峰方案，全路段的平均速度将提高 1.78%、平均流量将下降 3.08%，主要通道的平均速度将提高 0.76%、平均流量将下降 4.32%；但涉及企事业单位较多，实施难度较大。整体来看，行业错峰方案可在一定程度上改善整个交通网络的交通质量，但仍然未能缓解主要通道的交通拥堵状况。

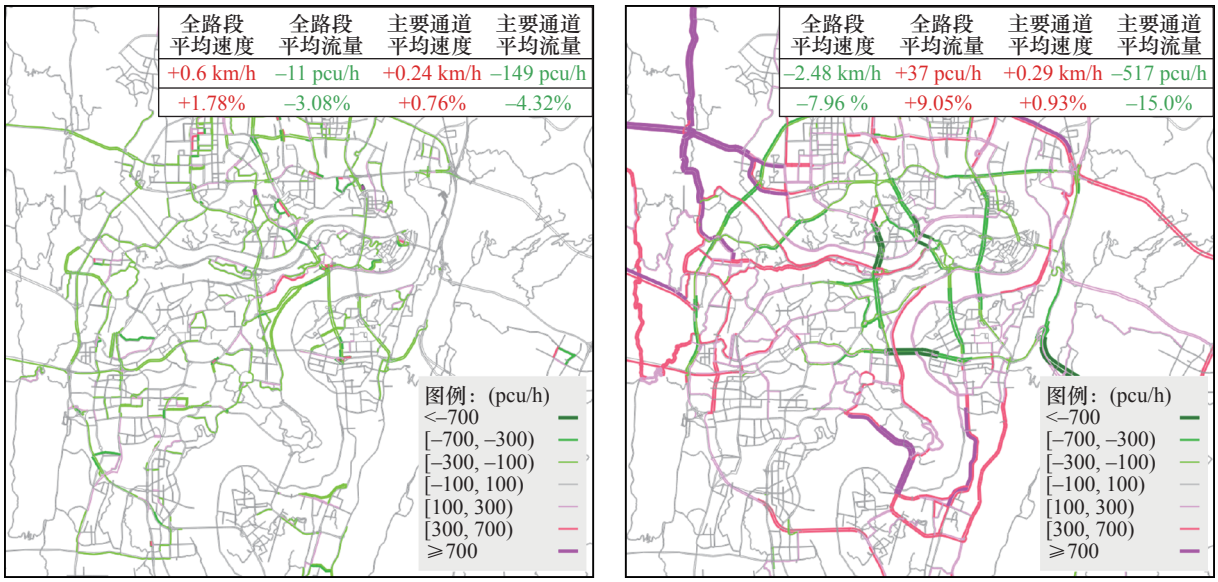
如实施车辆错峰方案，全路段的平均速度将下降 7.96%、平均流量将提高 9.05%，主要通道的平均速度将提高 0.93%、平均流量将下降 15.0%；仅涉及部分道路的管控，实施难度低，对居民的出行影响较小。鉴于车辆错峰方案仅针对主要通道的通行车辆实施，尽管在一定程度上增加了交通网络的交通压力，但将明显减轻主要通道的交通负荷，预



（a）道路交通网络结构　（b）交通小区人口分布　（c）道路交通流量分布

图 6　重庆市主城区城市虚拟交通系统的基础数据

注：图（b）中的界线表示自定义交通小区的边界。



(a) 行业错峰方案　　(b) 车辆错峰方案

图 7　重庆市错峰上下班方案实施前后的路段流量差值分布

注：图中的线条表示路网。

计主要通道的交通拥堵状态将得到有效缓解。整体来看，车辆错峰方案的可实施性较好，主要通道拥堵缓解效果显著，得到了重庆市相关管理部门的认可和采纳。

九、结语

本文提出了包含基础数据库、分析模型库、软件模块库、备选预案库在内的城市虚拟交通系统与交通发展决策支持模式。实例研究表明，该系统模式在论证实际交通方案时具有及时性、有效性。

为解决我国城市交通系统的供需矛盾、突破智能交通系统存在的瓶颈，未来交通规划管理应该注重城市虚拟交通系统建设，结合我国交通运行特点发展国产化的交通仿真软件系统。

在未来城市虚拟交通系统的建设过程中，建议注重融合大数据、AI 等新兴技术。例如，融合多源交通大数据，构建多维度的、精细化的城市基础数据库；引入 AI 技术，促进传统交通数学模型的发展，进一步提高交通模型计算结果的精确性。

参考文献

[1] 王炜, 陈峻, 过秀成. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2019.
Wang W, Chen J, Guo X C. Traffic engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2019.

[2] 杨涛, 张泉. 公交优先导向下的城市总体规划——构建公交都市的空间框架 [J]. 城市规划, 2011, 35(2): 22–25.
Yang T, Zhang Q. Transit oriented urban master plan: Towards the spatial framework of transit city [J]. City Planning Review, 2011, 35(2): 22–25.

[3] 王炜, 薛美根, 王媛, 等. 交通规划与管理决策支持系统的研发应用——中国城市交通发展论坛第24次研讨会 [J]. 城市交通, 2020, 18(1): 102–113.
Wang W, Xue M G, Wang Y, et al. Development of transportation planning and management support system: Highlight of the 24th Urban Transportation Development Forum in China [J]. Urban Transport of China, 2020, 18(1): 102–113.

[4] 张军, 王云鹏, 鲁光泉, 等. 中国综合交通工程科技2035发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 43–49.
Zhang J, Wang Y P, Lu G Q, et al. Development strategy for China's integrated transportation engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 43–49.

[5] 高柯夫, 孙宏彬, 王楠, 等. "互联网+"智能交通发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 101–105.
Gao K F, Sun H B, Wang N, et al. Development strategy of Internet Plus intelligent transportation [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 101–105.

[6] TransCAD. TransCAD transportation planning software [EB/OL]. (2016-01-01)[2020-07-15]. https://www.caliper.com/tcovu.htm.

[7] INRO. Emme multimodal transport planning software [EB/OL]. (2016-01-01)[2020-07-15]. https://www.inrosoftware.com/en/products/emme/.

[8] PTV Group. PTV vissim [EB/OL]. (2016-01-01) [2020-07-15]. https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/.

[9] Bentley. Transportation and land-use modeling [EB/OL]. (2016-

01-01)[2020-07-15]. https://www.citilabs.com/software/cube/.

[10] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1–161.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's traffic engineering research progress·2016 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 1–161.

[11] 陆化普, 孙智源, 屈闻聪. 大数据及其在城市智能交通系统中的应用综述 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 45–52.
Lu H P, Sun Z Y, Qu W C. Big data and its applications in urban intelligent transportation system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 45–52.

[12] 李德仁, 姚远, 邵振峰. 智慧城市中的大数据 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(6): 631–640.
Li D R, Yao Y, Shao Z F. Big data in smart city [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(6): 631–640.