

有限数据条件下智能体仿真模型构建方法

叶建红¹, 高磊¹, 孙中文², 汪道歌³, 周碧云²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 宝马(中国)服务有限公司, 上海 200030; 3. 江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 与传统的集计评估模型不同, 智能体仿真模型能够捕捉个体之间的行为交互, 在交通政策精细化评估中具有优势。但智能体仿真模型对数据要求较高, 在实践中面临活动计划生成、参数标定和结果验证等难点。基于MATSim建立了在有限数据条件下面向应用研究的可操作、可复现的智能体仿真模型, 并且以上海市拥堵收费评估场景为例详细介绍了模型的建模流程和关键技术。重点介绍基于手机轨迹数据的活动计划生成方法以及模型的参数标定和结果验证细节。结果表明, 智能体仿真模型能够满足交通政策评估需求, 基准场景的上海市域出行方式划分平均相对误差为8%、快速路交通量平均相对误差为17%。进而从集计和个体两个层面对仿真结果进行分析, 展示了智能体仿真模型的应用潜力。

关键词: 智能体仿真模型; MATSim; 交通政策评估; 出行行为分析; 手机轨迹数据; 上海市
Method for Constructing Agent-Based Simulation Models with Limited Data

YE Jianhong¹, GAO Lei¹, SUN Zhongwen², WANG Daoge³, ZHOU Biyun²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. BMW (China) Services Co., Ltd., Shanghai 200030, China; 3. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: Unlike traditional aggregate evaluation models, agent-based simulation models can capture the behavioral interactions among individuals, offering advantages in the refined evaluation of transportation policies. However, agent-based simulation models require high-quality data and face challenges in practice, such as generating daily activity schedule, calibrating parameters, and validating results. This paper establishes an operational and reproducible agent-based simulation model based on MATSim, designed for application research with limited data. Using the congestion charging evaluation scenario in Shanghai as an example, the modeling process and key techniques are elaborated. The focus is on daily activity schedule generation methods based on mobile phone trajectory data and parameter calibration and results validation details of the model. The results show that the agent-based simulation model is capable of meeting the transportation policies evaluation needs, with an average relative error of 8% for travel mode classification and 17% for estimation of traffic volume on expressways in the baseline scenario of Shanghai. The simulation results are analyzed at both aggregate and individual levels, demonstrating the application potential of the agent-based simulation model.

Keywords: agent-based simulation model; MATSim; transportation policies evaluation; travel behavior analysis; mobile phone trajectory data; Shanghai

收稿日期: 2023-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于出行场景的共享交通与公共交通竞合关系测算及优化方法研究”(52172320)、中央高校基本科研业务费专项资金项目“多模式交通竞合理论与分析方法研究”(22120210542)、中央高校基本科研业务费专项资金项目“城市出行服务体系规划方法研究”(2023-4-ZD-01)、中国博士后科学基金“基于多智能体的城市出行高精度仿真方法研究”(2023M741429)

作者简介: 叶建红(1981—), 男, 安徽东至人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智慧出行服务、交通规划、交通政策, 电子邮箱 12107@tongji.edu.cn。

通信作者: 高磊(1993—), 男, 山西忻州人, 博士研究生, 研究方向为智能体仿真模型、组合出行行为分析, 电子邮箱 leigao@tongji.edu.cn。

0 引言

随着城镇化进入高质量发展的新阶段,城市交通发展已经从增量为主转向存量优化、从注重大规模基础设施建设转向综合提升设施利用效率^[1-2]。这种转变要求评估工具能够更加科学、精细地评估交通政策实施的预期效果,特别是对个体出行行为的影响。既有研究表明,个体出行行为不仅受到交通拥堵、交通事故等外部环境的影响,还受到个体之间行为交互的影响^[3]。然而,传统四阶段模型^[4]和数学解析模型^[5]难以刻画个体之间的行为交互。

近年来,智能体仿真模型(Agent-Based Simulation Model)备受关注。与集计的四阶段模型和数学解析模型不同,智能体仿真模型将出行者视为独立、异质的智能体(Agent),其行为同时受系统环境和其他智能体的影响^[6]。智能体仿真模型是一个自下而上的模型,上层的交通特征是下层的智能体交互作用的结果。此外,智能体仿真模型可以探索数学解析方法无法给出的交通动态性特征。这些特性使得智能体仿真模型在交通政策评估研究中具有独特优势^[7-8]。

1 智能体仿真模型应用研究概况

1.1 模型主要工具及特点

智能体仿真模型源于计算社会科学,强调社会系统特征不是简单的个体特征叠加,而是由个体间交互产生的结果^[9-10]。基于这一认识,交通领域开发了一系列智能体仿真模型^[8],如 MATSim, TRANSIMS, GAMA, SimMobility 等。其中, MATSim 因开源、持续维护、可扩展性以及支持大规模交通场景的并行运算等特征在众多平台中脱颖而出^[11]。MATSim 通过迭代求解每个智能体活动计划的最大效用^[12]以达到仿真系统的纳什均衡。在迭代过程中, MATSim 通过调整活动计划的部分组件(如出行方式、出发时间、出行路径等)生成新的活动计划,并且计算活动计划的效用。智能体活动计划的效用由活动效用和出行效用两部分组成,计算公式为:

$$S_{plan} = \sum_{q=0}^{N-1} S_{act,q} + \sum_{q=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)}, \quad (1)$$

式中: S_{plan} 为活动计划的效用; N 为智能体活动计划中活动的数量/个; $S_{act,q}$ 为活动 q

的活动效用; $S_{trav,mode(q)}$ 为活动 q 对应的出行效用。

图 1 为 MATSim 的仿真过程,其核心是求解智能体活动计划。首先输入初始活动计划数据及相应的供应设施数据,在交通流模拟中求解活动计划中的各项出行细节,如出行时耗、出行距离、出行路径等。其次,评估含有详细活动信息和出行信息的活动计划的效用,重新调整、生成活动计划中的出行细节,如改变出行方式、出行路径等,直到仿真系统中每个智能体活动计划的效用没有明显变化,结束仿真。随后对仿真结果进行分析。

1.2 模型应用研究进展

智能体仿真模型在评估交通政策的实施效果方面展现出巨大的潜力。例如,评估拥堵收费政策对交通拥堵的缓解效果^[13]、评估公共交通运营时刻表优化方案^[14]、评估停车优化方案以平衡区域停车需求^[15]、评估新兴共享出行方式以鼓励私人小汽车用户转向共享出行^[16]等。He B. Y. S. 等^[17]通过建立交通政策评估平台研究纽约实施拥堵收费政策对个体和交通系统的影响。P. Manser 等^[18]强调模型刻画交通网络供应与外部因素动态变化的能力,评估了大型公共交通网络系统的设计方案。J. Narayan 等^[14]设计并评估了一种结合传统固定时刻表公共汽车交通与定制公交的新型公共汽车交通系统。M. Kii 等^[19]测试了曼谷城市副中心建成后的交通系统变化。R. A. Waraich 等^[15]测试了停车场规划方案。S. Bahrami 等^[16]测试了引入自动驾驶技术解决停车拥堵的方案。这些研究展示了智能体仿真模型在交通政策评估方面的优势。然而在实践中,智能体仿真模型仍面临一系列的技术难点^[20],主要体现在以下 3 个方面。

1) 活动计划生成。

当前解决方案包括标准化的基于活动的模型(Activity-Based Model, ABM)^[18-21]和简单扩样模型(Simple Multiplier Model, SMM)^[22]。基于活动的模型依靠人口合成模型(synthetic

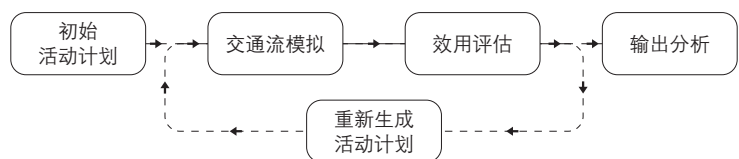


图 1 MATSim 仿真过程

Fig.1 MATSim simulation process

population model)和一系列联合选择模型生成具有社会经济属性的活动计划。虽然该模型能够较为准确地反映研究区域出行者的社会经济属性特征以及基本的活动和出行特征,但这种方法对数据要求苛刻,通常需要详细的人口普查数据和大规模的出行调查数据,数据获取难度较大。同时,由于联合多个选择模型,致使基于活动的模型结构复杂、实施难度较大。简单扩样模型直接在交通调查数据的基础上进行倍乘扩样,虽然能在一定程度上放宽基于活动的模型的数据需求,但极大依赖出行调查数据的规模及质量。近年来,手机轨迹数据被用于活动计划生成^[23-25],这类数据以高时空分辨率的个体移动特征著称,但是缺乏活动类型、出行方式等关键属性。

2) 模型参数标定。

参数标定包含行为数据采集、参数求解、参数初始化、参数调整等步骤。当前主流的参数标定方法包括经济学模型和穷举法。经济学模型借助交通调查数据并采用多项Logit模型对活动和出行参数进行求解和初始化。相关研究多集中于国外,由于不同国家和地区的交通供需水平不同,既有研究所拟合的参数在多数情况下不能直接应用于中国城市交通场景。穷举法通过指定参数数量和搜索空间对参数进行网格搜索,即使是引入先验知识,这种方法计算的时间复杂度和空间复杂度仍然较高。

3) 模型结果验证(validation)。

既有研究详细介绍了基准场景(又称现状场景)的验证指标,但忽略了评估场景的验证。并且,基准场景的验证指标在不同的研究和应用间存在差异,缺乏统一标准。例如,P. Manser等^[18]使用道路交通量、典型公共交通车站客流量以及道路行驶速度作为基准场景的验证指标;M. Kilani等^[26]使用方式划分、道路交通量、出行时耗分布作为验证指标;Zheng N.等^[13]仅使用方式划分作为验证指标。

2 智能体仿真模型构建流程和关键技术

针对智能体仿真模型在实际应用中存在的问题,本文在数据资源有限的条件下构建了面向应用研究的可操作、可复现的智能体仿真模型,并对模型构建过程中的各个环节进行详细说明。首先,借助手机轨迹数据生

成活动计划,以降低标准化的基于活动的模型生成过程的复杂性;其次,建立一套通用的模型参数标定方法;最后,分别构建基准场景和评估场景的验证指标。

2.1 总体框架

图2展示了智能体仿真模型的构建流程和关键技术。模型构建流程遵循场景构建—仿真计算、标定、验证—结果分析的顺序。仿真模型构建流程包括:首先,输入供给数据构建基准场景并对其进行计算、标定和验证;其次,在验证后的基准场景之上构建评估场景,对其进行计算、标定和验证;最后进行结果分析。其中,活动计划生成是场景构建的关键技术;参数标定和结果验证是场景计算、标定、验证的关键技术。因此,本文开发了基于手机轨迹数据的活动计划生成方法,包含活动类型判别和出行方式初始化;参数标定包含基准场景参数标定和评估场景参数标定;结果验证包含基准场景验证集和评估场景验证集。

本文以上海市为例构建智能体仿真模型,仿真模型中基准场景和评估场景的供给数据包括道路网络数据、公共交通网络和运营数据。道路网络包含约8.4万个路段、3.4万个节点,依据仿真人口规模将路网容量缩小至2%;公共交通网络包含双向线路约3300条(含城市轨道交通、公共汽电车、轮渡)、车站约3.5万个,公共交通运营数据包含公共交通运营时刻表和车辆信息。基准场景和评估场景的活动计划需求数据规模约40万人。为了详细说明仿真模型构建流程和关键技术的解决方案,以拥堵收费为例构建评估场景。依据文献[27]的提案在上海市内环内设置拥堵收费区,面积约30 km²,占内环内总面积的27%、中心城区面积的0.4%;采用边界收费规则,即进入拥堵收费区即收费,一天多次进入仅收取一次费用;设置3种收费标准,分别为10元、15元和20元;收费时段为早晚高峰时段;收费对象为除公共交通和非机动车之外的所有私人化出行方式,例如出租汽车、网约车、私人小汽车、摩托车等。

2.2 基于手机轨迹数据的活动计划生成方法

个体级的活动计划是构建智能体仿真模型的核心,其属性包含两部分:一部分是活

动信息，包括活动类型、活动时长、活动位置、活动开始时间、活动结束时间等；另一部分是出行信息，包括出行方式、出行路径等。手机轨迹数据虽然描述了个体在不同基站间移动的时空信息，但缺乏活动类型、出行方式等关键属性。因此，本文构建了基于规则系统的活动类型判别模型，将手机轨迹数据中的个体时空信息分为家、工作地、其他3类，依据距离分布对出行方式进行随机初始化。

1) 基于规则系统的手机轨迹数据活动类型判断。

模型考虑3类典型活动，分别为居家、工作和其他。基于规则系统对居家和工作活动进行判断，其中居家活动的判断规则为20:00—次日6:00至少有6h位于同一位置(一周内至少持续3天)，且该位置位于居住小区内；工作活动判断规则为8:00—18:00至少有6h位于同一位置(一周内至少持续3天)；将居家、工作以外的活动标记为其他类型。

智能体仿真模型一般需要从家出发且最后回到家的完整出行链，因此剔除没有居家

活动以及活动位置不在研究区域的用户。此外，仿真模型仅考虑工作日一天的活动和出行，因此剔除了当天0:00及以后没有回家的用户。

2) 基于距离分布的手机轨迹数据出行方式初始化。

尽管智能体仿真模型可以根据出行参数自动优化个体的出行方式，但求解非常耗时。为了提高仿真效率，本文采用基于分方式的出行距离分布来初始化活动计划中的出行方式，其中分方式的出行距离分布来自上海市第五次综合交通调查。

据此，最终生成约40万人的活动计划(约为上海市域常住人口的1.7%)，数据中包含个体每项活动的开始时间、结束时间、开始位置、结束位置、活动类型和出行方式，并且按活动的时间先后进行排序。

2.3 参数标定

2.3.1 基准场景参数标定

基准场景参数标定是确保智能体仿真模型反映现状交通系统运行状况的关键步骤。

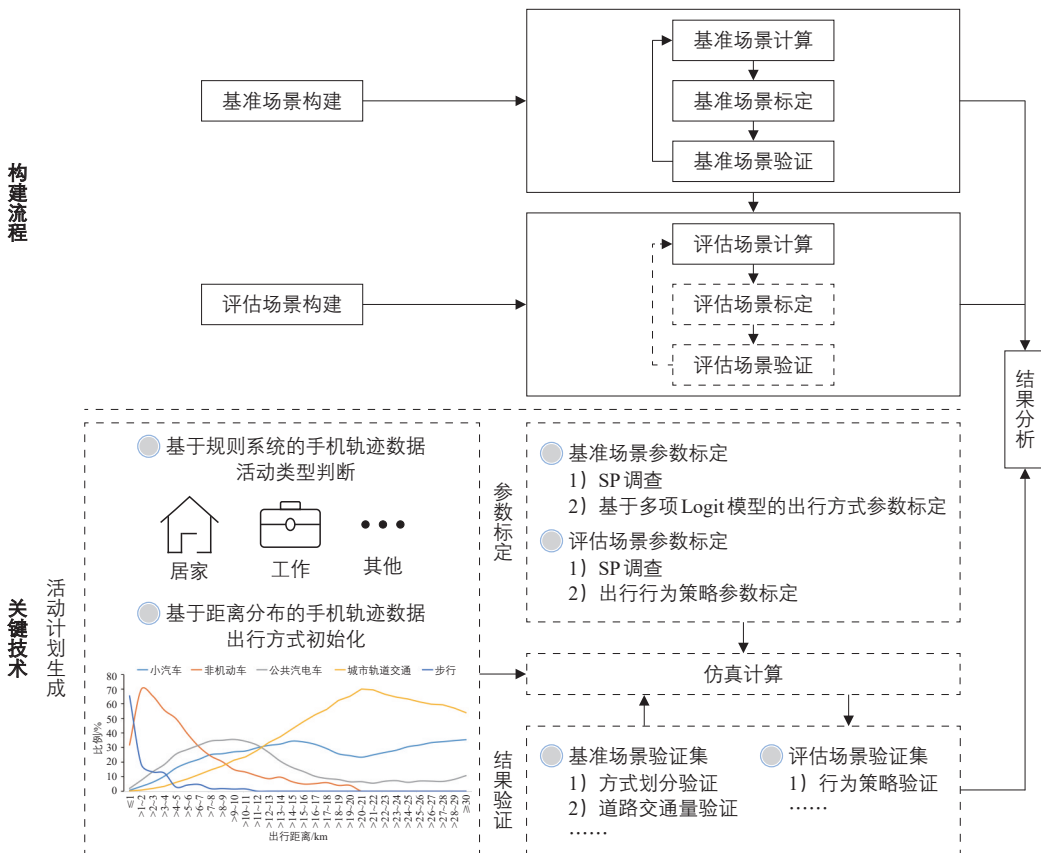


图2 智能体仿真模型总体框架

Fig.2 Overall framework of the agent-based simulation model

基准场景参数分为活动和出行两大类。活动参数通常涉及各类活动的典型时长。基于手机轨迹数据中相应活动时长的平均值设定本文模型不同类型活动时长：居家活动10 h、工作活动8 h、其他活动2 h。出行参数用于描述各方式的出行效用。本文通过多项Logit模型计算出行参数，数据来源于2020年3月实施的一项方式选择意向(Stated Preference, SP)调查问卷，数据和模型参数详见文献[28]。活动 q 对应的出行效用

$$S_{trav, mode(q)} = C_{mode(q)} + \beta_{trav, mode(q)} t_{trav, mode(q)} + \beta_m c_{trav, mode(q)}, \quad (2)$$

式中： $C_{mode(q)}$ 为出行方式选择模型各出行方式的常数项； $\beta_{trav, mode(q)}$ 为各方式出行时耗的系数； $t_{trav, mode(q)}$ 为各方式的出行时耗/h； β_m 为出行费用的系数； $c_{trav, mode(q)}$ 为各方式的出行费用/元。

2.3.2 评估场景参数标定

出行者在不同的交通政策下可能会调整出行行为，智能体仿真模型通过刻画出行行为的变化进而评估交通政策对宏观交通系统的影响。评估场景参数主要指个体发生出行行为变化的概率，例如改变出行方式、出行路径或出发时间的概率。以上海市拥堵收费评估场景为例介绍参数标定细节。

受拥堵收费影响最大的群体是私人小汽车用户，他们可能会选择不同的出行行为策略规避收费，例如改变出发时间、出行路径、出行方式等。本文于2020年11月通过SP调查收集拥堵收费政策下私人小汽车用户出行行为意愿的变化情况。该问卷根据出行目的地的地理位置设置两组收费情景：第一组出行目的地在拥堵收费区内，出行者可以通过改变出发时间或出行方式规避收费；第二组出行目的地不在拥堵收费区内但其行驶路线经过收费区，出行者可以通过绕行、

改变出发时间或出行方式规避收费。

通过SP调查数据计算并初始化不同收费标准评估情景的不同出行行为策略参数。例如收费标准为10元时，约35%的出行者选择改变出行方式，则该情景下改变出行方式策略参数初始值设置为0.35，同理可初始化其他出行行为策略参数。为了确保评估场景与SP调查数据中人群行为一致，采用网格搜索方法对初始化参数进行微调。

2.4 结果验证

2.4.1 基准场景验证

基于以下假设设定基准场景：1)出行方式备选集包括小汽车、城市轨道交通、公共汽电车、自行车以及步行；2)所有出行者都有机会使用以上5种交通方式，其中小汽车指私人机动化方式的集合，包含出租汽车、网约车、私人小汽车；3)仅考虑上海市域内的活动和出行，不考虑跨城出行；4)不设定公共交通的容量限制。基准场景主要关注3种验证指标以反映交通运行状况，分别为出行方式划分、道路交通量、道路平均速度。验证使用的数据来源于《2020年上海市综合交通发展年度报告》^[29](以下简称《年报》)。

1) 出行方式划分验证。

智能体仿真模型的总体优化目标是最大化个体的活动—出行总效用，因此，仿真模型在执行过程中会调整出行方式以最小化出行负效用。例如，如果为距离公共交通车站过远的活动分配公共交通出行，则会导致较大的出行负效用甚至不能满足活动开始时间的约束，此时模型会更改为其他出行方式。因此，需要验证模型最终的出行方式划分是否与实际一致。

从上海市域、中心城区、中心城区以外地区3个空间尺度验证基准场景的出行方式

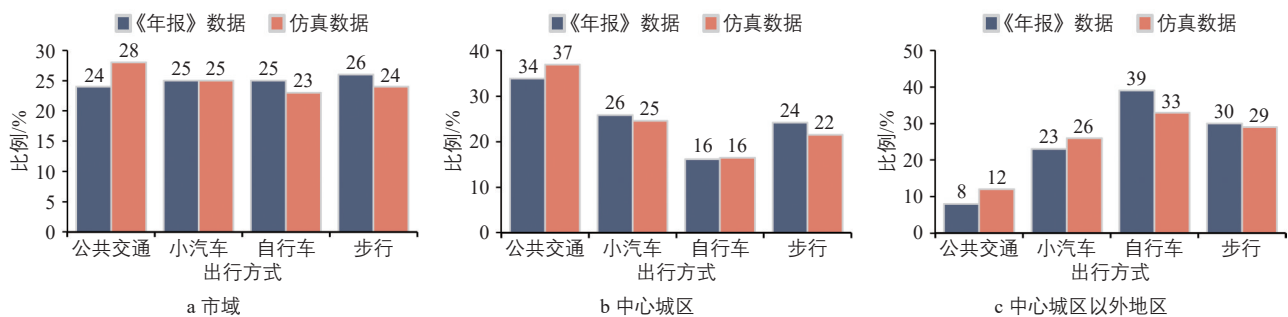
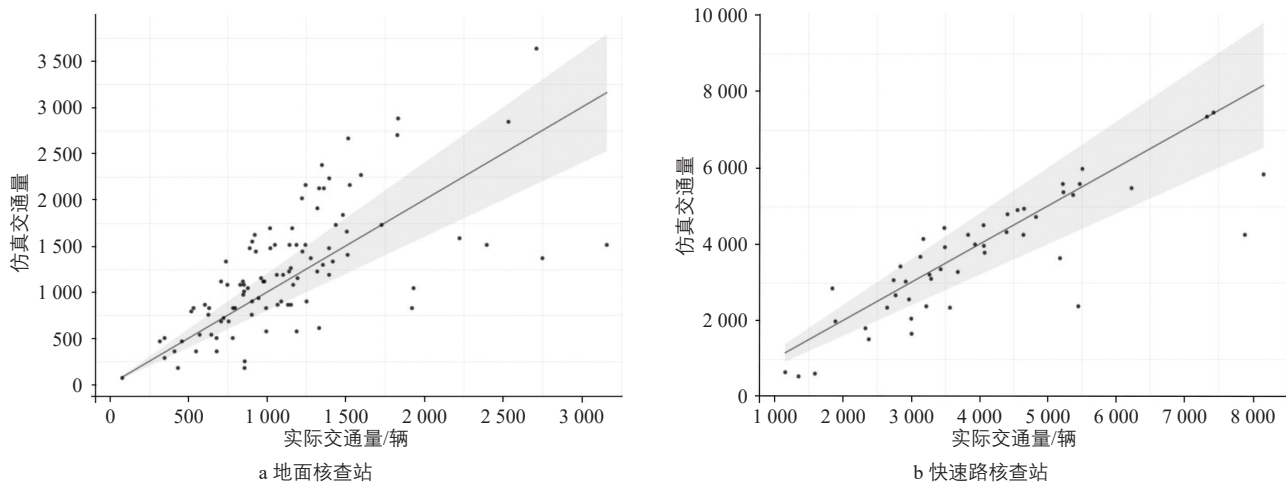


图3 出行方式划分仿真数据与《年报》数据对比

Fig.3 Comparison of simulation results for travel mode classification and the Annual Report data



注：灰色阴影部分为20%的误差区间。

图4 道路交通量仿真数据与《年报》数据对比

Fig.4 Comparison of simulation results for road traffic volume and the Annual Report data

划分(见图3),其中中心城区包括中心城区内部和进出中心城区的出行。3个空间尺度的出行方式划分平均相对误差分别为8%,3%和13%,仿真数据与《年报》数据基本一致。

2) 道路交通量验证。

对比上海市仿真道路交通量与实际交通量,涉及道路交通量核查站148个,其中地面核查站100个、快速路核查站48个,结果如图4所示。全市域仿真的道路交通量与实际交通量平均相对误差为27%,其中,地面道路交通量相对误差为30%、快速路交通量相对误差为17%。快速路作为上海市道路网络骨干,仿真误差在20%以内,说明智能体仿真模型基本合理,但地面道路交通量相对误差稍大。

3) 道路平均速度验证。

仿真的道路平均速度与实际速度基本一致,包括上海市内环内主要干路和部分快速路,时间为早高峰时段(7:00—9:00)(见表1)。

2.4.2 评估场景验证

为验证评估场景参数标定的有效性,对比不同收费标准与进出/穿越拥堵收费区组合情景下仿真与SP调查的出行行为策略比例(见图5),结果显示智能体仿真模型准确率达到80%以上。其中,不同收费标准下进出拥堵收费区情景的仿真结果与SP调查结果基本一致,而穿越拥堵收费区情景的仿真结果表现较差,仿真结果高估了改变出行路径的比例、低估了改变出行方式和缴费通行的比例。

表1 道路平均速度仿真数据与《年报》数据对比

Tab.1 Comparison of simulation results for average road speed and the Annual Report data

km·h⁻¹

项目	道路平均速度	
	快速路 ¹⁾	内环内主要干路
《年报》数据	41.1	15.3
仿真数据	40.8	13.8

1) 快速路指内环高架、中环路、外环高速、南北高架和延安高架。

3 仿真结果分析

3.1 集计层面结果分析

与其他评估模型一致,智能体仿真模型能够在集计层面对结果进行分析。以上海市拥堵收费评估场景为例,对7:00—10:00不同收费标准下进出拥堵收费区小汽车出行量的变化和继续使用小汽车出行的平均出行时耗进行分析(见图6)。可以看出:1)随着收费标准提高,进出拥堵收费区的小汽车出行量明显下降。与基准场景相比,收费标准10元时小汽车出行量约下降15%,收费标准20元时小汽车出行量约下降38%。2)实施拥堵收费后,进出拥堵收费区的小汽车出行时耗显著降低,与基准场景相比,收费标准10元时平均出行时耗约下降16%,收费标准20元时平均出行时耗约下降7%,这可能是由于拥堵收费区的交通状况有所改善。

表2展示了7:00—10:00拥堵收费区交通运行指标变化情况。随着收费标准提高,拥堵路段比例持续下降、道路平均速度逐步上

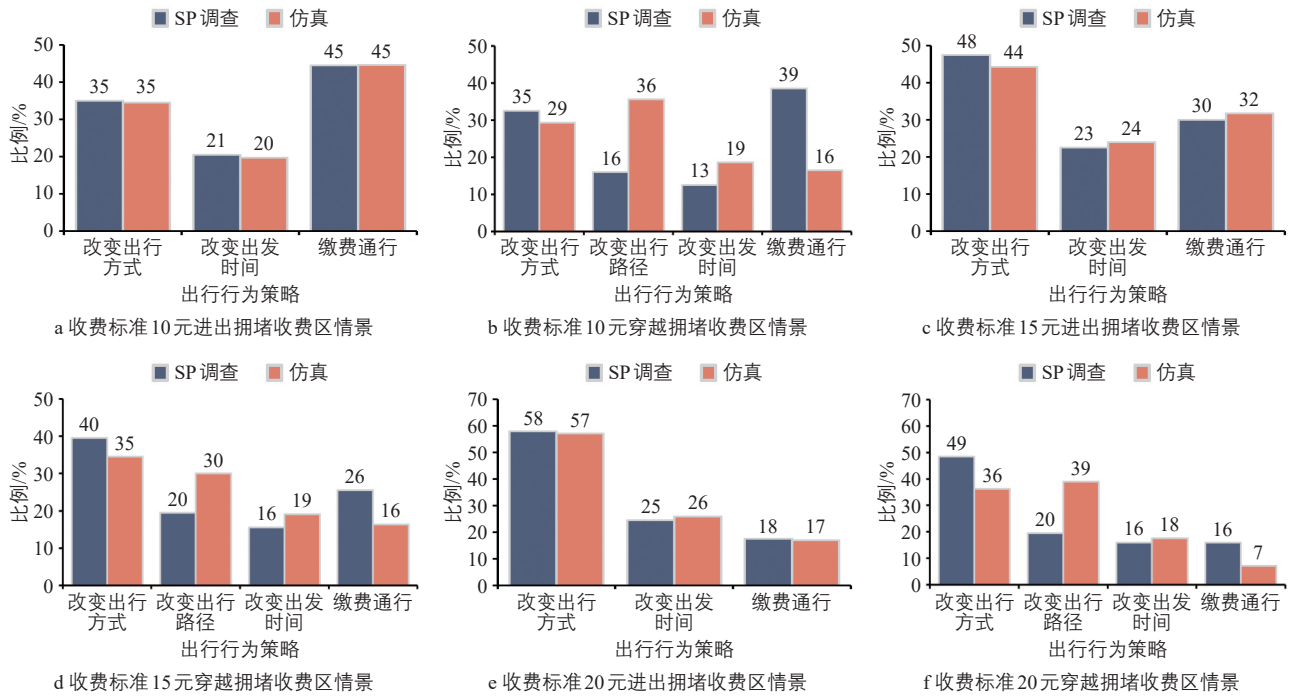


图5 出行行为策略比例仿真数据与SP调查数据对比

Fig.5 Comparison of simulation results for travel behavior strategy proportions and SP survey data

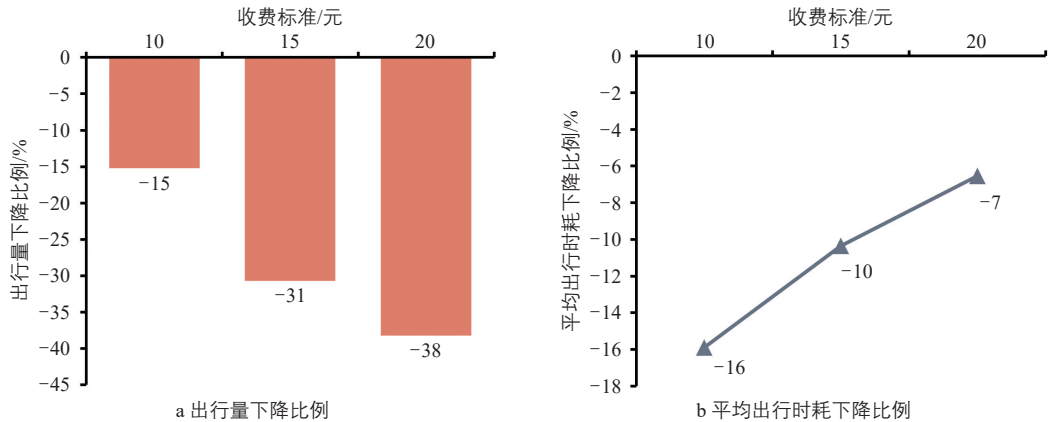


图6 与基准场景相比进出拥堵收费区的小汽车出行量和出行时耗变化

Fig.6 Changes in car travel volume and travel time entering and exiting congestion charging zones under different charging standards compared with the baseline scenario

表2 不同收费标准下拥堵收费区交通状况指标变化

Tab.2 Changes in traffic operation indicators in congestion charging zones under different charging standards

指标	基准场景	收费标准/元		
		10	15	20
拥堵路段比例/%	36	29	21	16
道路平均速度/(km·h ⁻¹)	22	26	31	35
道路拥堵指数	58(C)	49(B)	38(B)	30(B)

注：界定平均速度低于10 km·h⁻¹的路段为拥堵路段；道路拥堵指数计算方法见文献[30]，等级A为畅通、B为较畅通、C为拥堵、D为非常拥堵。

升、交通拥堵指数等级由拥堵变为较畅通。

除拥堵收费区交通运行指标外，研究收费区对其他区域交通运行造成的影响也是评

估拥堵收费政策有效性的重要方面，因此本文对上海市中心城区道路饱和度指标进行计算，并区分饱和度的上升和下降状态。图7以收费标准20元为例，展示了实施拥堵收费后7:00—10:00道路饱和度变化情况，绿色部分表示道路交通状况由拥堵和非常拥堵变为缓行、基本畅通、畅通状态，而红色部分则表示道路交通状况从缓行、基本畅通、畅通变为拥堵状态。可以看出实施拥堵收费后，上海市大部分拥堵收费区和内环内的道路交通状况将变得更好，但部分区域的交通状况仍会变差。总体而言，以上分析结果与减少收费区的小汽车出行量、改善区域小汽车出行状况的拥堵收费愿景相一致。

3.2 个体层面结果分析

采用智能体仿真模型进行交通政策评估的突出优势是能够观察个体出行行为层面做出的响应，例如通过改变出行方式或出发时间规避拥堵收费。图8展示了不同收费标准下进出拥堵收费区的小汽车出行者的行为变化，可以看出，随着收费标准提高人们逐渐放弃小汽车出行。平均出行时耗方面，采用缴费出行策略的出行者出行时耗最短，且随着收费标准提高平均出行时耗逐渐下降，这得益于拥堵收费区交通状况的改善；采用改变出行方式的出行者出行时耗显著高于继续使用小汽车，例如收费10元时，这类出行者的平均出行时耗为50 min，而另两类出行者的出行时耗约为30 min；针对继续使用小汽车的情况，采用改变出发时间与缴费出行策略的出行者出行时耗基本一致。

4 结束语

针对智能体仿真模型在实际应用中的难点和数据需求限制，本文提出一套完整、可操作、基于智能体仿真模型的交通政策评估解决方案。提出基于手机轨迹数据的活动计划生成方法，克服了标准化的基于活动的模型生成方法中数据获取难、建模复杂的问题；综合运用SP调查和多项Logit模型，解决了模型参数标定问题；建立验证指标集，验证了仿真模型结果的有效性；最后，从集计和非集计两个层面证明了模型的应用潜力。

未来工作中需要从以下方面提升模型精度。首先，尽管基于手机轨迹数据的活动计划生成方法能够有效地表达个体出行和活动，但其缺乏出行者的社会经济属性，如何为手机轨迹数据添加社会经济属性标签是未来建模过程中一项重要的工作，可尝试借助

深度学习技术了解出行活动与社会经济属性之间的复杂关系^[31-32]。其次，对仿真人口进行画像分类，通过标定每一类人群的活动—出行参数，更加细致地分析不同人群受交通政策影响的差异。最后，在基准场景参数标定和结果验证方面，可以增加公共交通车站和线路客流量验证指标，对评估场景中的出行行为策略也可以做进一步扩展，例如改变目的地、改变活动时长等。

参考文献：

References:

[1] 汪光焘, 陈小鸿, 叶建红, 等. 城市交通治理现代化理论构架与方法初探[J]. 城市交通, 2020, 18(2): 1-14.

WANG G T, CHEN X H, YE J H, et al. Contemporary theoretical framework and methodology for urban transportation management



注：以收费标准20元为例，指标计算时段为7:00—10:00。下降指饱和度数值从0.6以上下降至0.6以下；上升指饱和度数值从0.6以下上升至0.6以上。

图7 实施拥堵收费后上海市中心城区道路饱和度变化

Fig.7 Changes in road saturation in Shang city center after the implementation of congestion charging

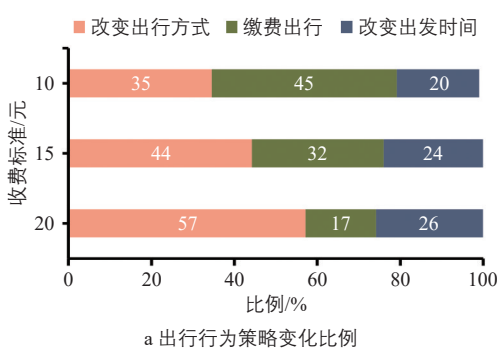
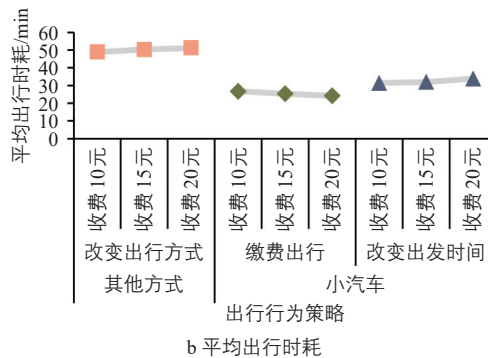


图8 不同收费标准下进出拥堵收费区的小汽车出行者的行为变化

Fig.8 Behavioral changes of car travelers entering and exiting congestion charging zones under different charging standards



- [J]. Urban transport of China, 2020, 18(2): 1-14.
- [2] 汪光焘. 城市交通治理的内涵和目标研究[J]. 城市交通, 2018, 16(1): 1-6.
WANG G T. Concept and objectives of urban transportation management[J]. Urban transport of China, 2018, 16(1): 1-6.
- [3] RASOULI S, TIMMERMANS H. Activity-based models of travel demand: promises, progress and prospects[J]. International journal of urban sciences, 2014, 18(1): 31-60.
- [4] ZHONG M, SHAN R, DU D, et al. A comparative analysis of traditional four-step and activity-based travel demand modeling: a case study of Tampa, Florida[J]. Transportation planning and technology, 2015, 38(5): 517-533.
- [5] MILLER E. The current state of activity-based travel demand modelling and some possible next steps[J]. Transport reviews, 2023, 43(4): 565-570.
- [6] CHEN B, CHENG H H. A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems[J]. IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(2): 485-497.
- [7] KAGHO G O, BALAC M, AXHAUSEN K W. Agent-based models in transport planning: current state, issues, and expectations[J]. Procedia computer science, 2020, 170: 726-732.
- [8] HUANG J Y, CUI Y K, LIU Z Y, et al. An overview of agent-based models for transport simulation and analysis[J]. Journal of advanced transportation, 2022(1): 1-17.
- [9] MACAL C M, NORTH M J. Tutorial on agent-based modelling and simulation[J]. Journal of simulation, 2010, 4(3): 151-162.
- [10] WALDROP M M. Free agents[J]. Science, 2018, 360(6385): 144-147.
- [11] NGUYEN J, POWERS S T, URQUHART N, et al. An overview of agent-based traffic simulators[J]. Transportation research interdisciplinary perspectives, 2021, 12: 100486.
- [12] HORNI A, NAGEL K, AXHAUSEN K W. The multi-agent transport simulation MATSim [M]. London: Ubiquity Press, 2016.
- [13] ZHENG N, WARAICH R A, AXHAUSEN K W, et al. A dynamic cordon pricing scheme combining the macroscopic fundamental diagram and an agent-based traffic model[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2012, 46(8): 1291-1303.
- [14] NARAYAN J, CATS O, VAN OORT N, et al. Integrated route choice and assignment model for fixed and flexible public transport systems[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2020, 115: 102631.
- [15] WARAICH R A, AXHAUSEN K W. Agent-based parking choice model[J]. Transportation research record: journal of the Transportation Research Board, 2012, 2319(1): 39-46.
- [16] BAHRAMI S, ROORDA M. Autonomous vehicle parking policies: a case study of the city of Toronto[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2022, 155: 283-296.
- [17] HE B Y S, ZHOU J K, MA Z Y, et al. A validated multi-agent simulation test bed to evaluate congestion pricing policies on population segments by time-of-day in New York City[J]. Transport policy, 2021, 101: 145-161.
- [18] MANSER P, BECKER H, HÖRL S, et al. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2020, 137: 1-15.
- [19] KII M, VICHIAN SAN V, LLORCA C, et al. Impact of decentralization and rail network extension on future traffic in the Bangkok metropolitan region[J]. Sustainability, 2021, 13(23): 13196.
- [20] BASTARIANTO F F, HANCOCK T O, CHOUDHURY C F, et al. Agent-based models in urban transportation: review, challenges, and opportunities[J]. European transport research review, 2023, 15(19): 1-20.
- [21] HE B Y, ZHOU J, MA Z Y, et al. Evaluation of city-scale built environment policies in New York City with an emerging-mobility-accessible synthetic population[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2020, 141: 444-467.
- [22] BEN-DOR G, OGULENKO A, KLEIN I, et al. Modeling the effect of congestion charge and parking pricing on urban traffic: example of Jerusalem[J]. Agile: GIScience series, 2022, 3(26): 1-4.

(下转第130页)