

基于微观交通仿真的道路预约出行效益研究*

王灵丽, 黄敏, 薛田莉, 李焯焯

中山大学智能工程学院 / 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006

摘要: 针对预约出行效益, 开发了基于SUMO的城市道路预约出行仿真平台。该平台以真实出行需求作为非预约车流输入, 利用基于A*算法的实时路径规划算法为预约车辆规划路径, 实现预约机制下的真实路网交通运行情景模拟。基于该仿真平台, 研究了预约车辆与非预约车辆混行情景下的个体层面和系统层面的出行效益变化。仿真实验结果显示: (1) 预约出行能够大大缓解道路交通拥堵状况; (2) 随着预约出行率的上升, 出行效益提高, 但总体增幅呈减小趋势; (3) 重点对途径瓶颈路段规律出行群体和远距离出行群体推广出行预约, 能够实现出行效益的大幅度提升。

关键词: 智能交通系统; 预约出行; 交通仿真; 出行效益

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 06-0089-10

The benefits of travel reservation in urban road based on microscopic traffic simulation

WANG Lingli, HUANG Min, XUE Tianli, LI Yetao

School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University / Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China

Abstract: A simulation platform for travel reservation in urban road based on SUMO is developed to explore the change of traffic benefit brought by travel reservation. In order to realize the simulation of real traffic operation scenario under the reservation mechanism, the simulation platform takes real travel demand as the input of non-reserved traffic flow, and uses the real-time path planning algorithm based on A* algorithm to plan the path for reserved vehicles. Based on the simulation platform, the change of travel benefits at individual level and system level in the case of mixed driving between reserved vehicles and non-reserved vehicles is studied. Simulation results show that: (1) travel reservation can greatly alleviate traffic congestion; (2) with the increase of reservation rate, travel benefits increase, but their overall growth trend decrease; (3) promoting travel reservation for key promotion objects which include group passing regularly through the bottleneck and group traveling long distances, travel efficiency can be greatly improved.

Key words: intelligent transportation system; travel reservation; traffic simulation; travel benefits

当前, 传统的增加供给的手段已经无法满足人们日益增长的出行服务需求。即时通信、物联网、大数据等高新技术通过交通资源统筹分配实现了用户出行需求与交通系统供给的全局优化和

* 收稿日期: 2022-03-02

录用日期: 2022-03-21

网络首发日期: 2022-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1600400); 广东省普通高校青年创新人才项目(2018GkQNCX064)

作者简介: 王灵丽(1996年生), 女; 研究方向: 智能交通系统; E-mail: wanglli55@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 黄敏(1975年生), 女; 研究方向: 智能交通系统; E-mail: huangm7@mail.sysu.edu.cn

匹配^[1-2]。预约出行就是这样一种需求管理手段。通过预约的方式(出行提前买票预约)来提前获取需求信息从而优化供需的匹配在铁路、航空、航船等交通领域的也已成共识,但道路出行的预约模式尚未建立。随着智能网联汽车普及,无人驾驶技术已是大势所趋^[3],道路交通系统变革条件趋于成熟,道路预约出行将迎来发展机遇。预约出行能够通过促进交通供需平衡的手段缓解道路交通拥堵,提升路网交通运行效率,因此推广道路预约出行具有重要意义。

目前关于道路预约出行的研究相对较少。北京交通发展研究院为国内道路预约出行的主要倡导者,进行了回龙观道路预约出行实践分析^[4]、网联车辆协同服务下的预约出行技术路线设计^[5]、道路预约出行交通组织模式研究^[6]等。在国外,Zhao等^[7]提出城市中心区域驶入预约管理策略,建立了整数规划模型进行预约名额分配,有效缓解了城市中心区域拥堵状况;Menelaou等^[8]设计了一种考虑路段临界饱和度的出行路线预约算法,通过SUMO仿真验证了缓解实际路网交通拥堵的有效性。预约出行的相关研究主要集中在公路通行预约^[9-11],例如:Su等^[12]对一个小规模公路网进行了交通仿真,从总延误时间和二氧化碳排放量两个评价指标对有无预约系统进行了比较,结果表明预约系统对交通状况的优化效果显著;Liu等^[13]基于Vickrey瓶颈模型将预约需求与高速公路通行能力相匹配,发现可以有效缓解公路瓶颈交通拥堵。

但由于道路交通系统的复杂性,道路预约出行实施难度较大,仍处于起步阶段。针对现有研究的不足,本文基于SUMO二次开发完成了道路预约出行仿真平台,研究了预约车辆与非预约车辆混行情景下的个体层面和系统层面的出行效益变化规律。并进一步提出了预约出行重点推广对象的概念,研究两类重点推广对象的预约出行对出行效益的提升效果。

1 预约出行仿真平台开发

预约出行系统根据出行者的预约信息,包括出发时间和出行起讫点,为出行者安排出行方案。本文将所有出行需求视为刚性需求,对于预约出行者的预约请求均予以响应。从微观仿真角度出

发,本文采取利用Python编程语言和SUMO软件的TraCI接口技术,基于真实路网和个体出行需求开发了预约出行仿真平台。该平台可实现基于实时路况信息的个体预约出行路线规划与仿真,直观反映道路网络的交通运行状况,输出个体和系统出行效益评价参数,为城市道路预约出行规划的设计与评估提供支持。

1.1 仿真路网搭建

仿真路网包括基础路网生成、信控方案设置以及虚拟停车场构建。基础路网通过NETCONVERT应用程序导入OSM文件到SUMO中生成,实现将真实路网转换成SUMO可读的XML文件格式。SUMO的路网模型是以XML文件格式描述的一个有向图。生成基础路网后,根据真实路网的信号控制方案设置信号灯,完善路网通行规则,以提升仿真可靠性。进一步地,将交通路网中被闭合链分隔出的空间区域定义为虚拟停车场,如图1所示。以虚拟停车场作为车辆出行起讫点,可以实现车辆出行的完整封闭描述。车辆作为交通系统中的移动对象,其建模及描述应具有封闭性,即:车辆作为基本计算单元,即使完成某次出行,也不能直接从系统中消失。也就是说,车辆的驻停及运动都应被完整刻画。因此,引入虚拟停车场可以弥补地面空间在道路网络之外的空白,实现仿真路网作为道路交通系统信息承载平台的空间封闭性。一般来说,车辆的在途状态是以路段(或节点)来承载,车辆的驻停状态则以虚拟停车场来承载。因而,车辆在系统中的运动状态都能



图1 仿真路网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulation road network

被描述和加载, 车辆对象的行为是封闭的, 更符合真实交通运行。

1.2 仿真车流输入

首先, 对车辆类型参数进行设置。车辆类型参数包括车型、跟驰模型、换道模型等, 不同车辆类型的主要参数取值如表1所示。其余参数统一取值, 具体为跟驰模型使用Krauss模型, 换道模型使用LC2013, 最小间隙距离取2.5 m, 驾驶员反应时间取0.5 s, 驾驶员熟练程度系数

取0.05^[14]。

需要一提的是, 不同于当前许多交通仿真研究通过集计的方式输入车流^[15]或者输入虚拟车流^[16], 本文所开发的仿真平台对每一真实个体出行行为进行了精细化模拟与管控, 明确了每一个体的出发时刻和出行路径, 并通过在网个体出行行为的累加, 刻画真实道路系统状态。其中, 车流的输入分为非预约车辆输入和预约车辆输入两部分。

表1 不同车型的参数取值

Table 1 Parameter values of different vehicle types

车型	车身长度/m	最大速度/(m·s ⁻¹)	最大加速度/(m·s ⁻²)	最大减速度/(m·s ⁻²)
小型车辆	5.0	11.1	2.5	5.0
大型车辆	8.0	11.1	1.8	4.5

1.2.1 非预约车辆出行路径还原 对于非预约车辆, 出行路径由驾驶员主观意愿决定。假设非预约车辆出行习惯固定, 不轻易改变出行行为。那么, 非预约车辆可根据原始需求文件, 于原始时刻出发按照其原始出行路径行驶。

基于车牌识别数据, 本文利用基于行程时间估计的车辆出行路径重构方法^[17]还原了车辆出行路径, 生成了原始需求文件。通过车牌识别数据特征, 该方法以路径行程时间作为重要判别依据, 来实现车辆出行链的提取与出行路径的补充。然后, 基于原始需求文件, 生成SUMO仿真可读取的rou文件, 实现每一非预约车辆的出发时刻和出行路径在仿真平台上的精准还原。

1.2.2 预约车辆出行路径实时规划 预约出行的内涵是根据出行需求及实时路网运行状况, 为车辆出行分配道路资源, 实现交通资源供给和车辆需求的匹配。对于预约车辆, 系统采取中心式诱导策略, 即: 针对具体OD, 基于所采集的路网运行状态参数, 计算得到最优出行路径, 并下发给预约车辆。车辆个体与系统的交互如图2所示。

1.3 仿真交互实现

预约车辆出行仿真利用SUMO的TraCI接口与Python编程语言进行仿真平台的二次开发实现。基于TraCI接口, 仿真过程中SUMO与Python的交互如图3所示。

Python通过TraCI接口控制SUMO仿真进程为:

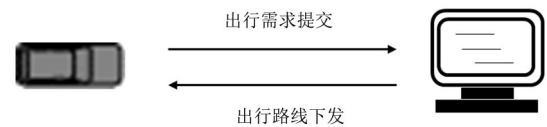


图2 预约出行模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of travel reservation mode

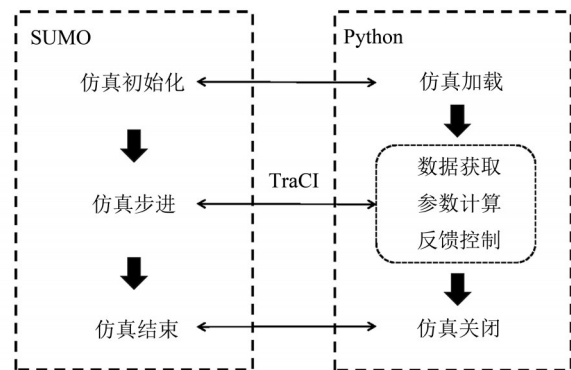


图3 基于TraCI接口的仿真交互

Fig. 3 Simulation interaction based on TraCI interface

(1) 仿真初始化。Python通过一系列仿真加载语句实现SUMO仿真初始化, 初始化内容包括路网模块、需求模块以及检测器模块等。

(2) 仿真步进。Python控制仿真步进; 并利用TraCI接口获取路段平均速度和平均空间占有率, 计算路段平均行程时间, 更新加权网络; 针对特定OD执行预约出行路径规划算法, 为预约车辆指定最优路径出行, 进行SUMO仿真。

(3) 仿真结束。Python 设定仿真时长, 当仿真运行到设定时长, SUMO 结束仿真进程并关闭。

1.4 出行效益评价指标

本文选取车均行程时间作为个体出行效益评价指标, 选取路网运行指数、路网流量分布均衡指数作为系统出行效益评价指标。

路网交通运行指数(TPI, traffic performance index)是指路网平均车速与路网平均自由流车速之比, 用于衡量交通运行效率。其计算公式为

$$TPI = \bar{v}/\bar{v}_f, \quad (1)$$

其中 \bar{v} 为路网平均车速; \bar{v}_f 为路网平均自由流车速。路网运行评价标准如表 2 所示。

表 2 路网交通运行评价分级标准^[18]

Table 2 Grading standards of road network traffic operation evaluation^[18]

TPI	≤0.3	0.3~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0
等级	堵塞	拥挤	较畅通	畅通

路网流量分布均衡指数(TDEI, traffic distribution equilibrium index)是指所有路段负荷度方差, 表征全网所有路段负荷度的离散程度, 用于衡量路网流量分布均衡程度。其计算公式为

$$TDEI = \frac{1}{n} \sum_{e_{ij} \in E} (f_{ij} - \bar{f})^2, \quad (2)$$

其中 n 为路段总数; f_{ij} 为有向路段 e_{ij} 的负荷度, 是路段实际交通流量 q_{ij} 与通行能力 c_{ij} 的比值, 即 $f_{ij} = q_{ij}/c_{ij}$; \bar{f} 为所有路段的负荷度均值, $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}$ 。

2 预约出行路径规划模型与算法

本文假设预约车辆服从率为 100%, 会严格按照预约路线出行。

2.1 实时路径规划模型

出行路径实时规划是预约出行的核心。本仿真平台在保障系统效益、促进路网均衡的前提下为用户提供最小化个体出行成本的路径。考虑路段负荷度, 以出发时刻计算得到的行程时间最短路径, 作为预约车辆的最佳出行路径。其中, 行程时间是时变的。将道路交通网络抽象成有向加权时变网络 $G(V, E, W^t)$ 。其中, 路段结点集表示为 $V = \{v_i\}$, v_i 为路段结点, 用于描述交叉口或道

路端点; $E = \{e_{ij}\}$ 为有向路段集, e_{ij} 表示连接以路段结点 v_i 为起点、以 v_j 为终点的有向路段, 可记为 $e_{ij} = (v_i, v_j)$; $W^t = \{w_{ij}^t\}$ 为有向路段权值集, w_{ij}^t 为时刻 t 对应的有向路段 e_{ij} 的权值, 具有时变性。从起点 s 到讫点 r 的预约出行路径规划模型为

$$\min \sum_{e_{ij} \in E} w_{ij}^t \cdot x_{ij}, \quad (3)$$

s.t.

$$\sum_{e_{ij} \in E} x_{ij} - \sum_{e_{ji} \in E} x_{ji} = \begin{cases} 1, & i = s, \\ -1, & i = r, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, \quad (5)$$

$$w_{ij}^t = \begin{cases} T_{ij}^t, R_{ij}^t < 0.8, & e_{ij} \in E, \\ \infty, & \text{其他}, \end{cases} \quad (6)$$

其中 T_{ij}^t 为时段 $[t-K, t]$ 有向路段 e_{ij} 的平均行程时间; R_{ij}^t 为时段 $[t-K, t]$ 有向路段 e_{ij} 的平均空间占有率; K 为参数统计间隔, 本文取 300, 实时更新。对于诱导拥堵延迟发生问题, 所建立的实时路径规划模型通过路段负荷度约束 $R_{ij}^t < 0.8$, 一定程度上降低了突发严重拥堵的发生可能性。

2.2 基于 A* 算法的实时路径规划算法

A* 算法是一种启发式的静态路网最短路径搜索算法, 结合了广度优先搜索和深度优先搜索, 搜索效率高于经典路径搜索算法^[19-20], 如 Dijkstra 算法、Floyd 算法等, 其估价函数为

$$f_{s,r}(n) = g_s(n) + h_r(n), \quad (7)$$

其中 $f_{s,r}(n)$ 表示从起点 s 经由节点 n 达到讫点 r 的最小代价估计; $g_s(n)$ 表示从起点 s 到节点 n 的实际最小代价; $h_r(n)$ 表示从节点 n 到讫点 r 的最小代价估计。

显然, A* 算法的搜索效率以及搜索结果的优劣主要取决于启发式函数 $h_r(n)$ 的选取与改进。 $h_r(n)$ 越接近从节点 n 到讫点 r 的实际代价, 搜索效率越高, 结果越准确。为了对时变网络下的预约出行路径规划模型进行求解, 提升求解效率和保证求解结果的准确性, 对 A* 算法中的 $h_r(n)$ 进行了模型适应性改进, 使之适用于动态时变交通网络。具体如下:

(1) $t = 0$, 即正式仿真起始时刻, 基于 Dijkstra 算法计算路网全源行程时间最短路径, 并记录全源最短行程时间 $f_{s,r}^0(r)$, 以此作为下一时刻 A* 算法确定搜索方向的启发式信息。

(2) $t \neq 0$, 令 $h_r^t(n)$ 等于上一时刻求解的起点 n 到迄点 r 的最短路径行程时间 $f_{n,r}^{t-1}(r)$, 即

$$f_{s,r}^t(n) = g_s^t(n) + h_r^t(n), \quad (8)$$

$$h_r^t(n) = f_{n,r}^{t-1}(r), \quad t \neq 0. \quad (9)$$

所提出的实时路径规划算法不考虑突发拥堵情况, 核心思想认为连续短时间内的路网交通状

况变化小, 故将最小代价估计取上一时刻求解的节点 n 到迄点 r 的最短路径行程时间。以此在保证求解结果准确性的同时, 快速找到准确的搜索方向, 减少拓展节点数, 提高算法效率。对于某一时刻 $t(t \neq 0)$, 产生的多对 OD 需求, 具体算法流程如图 4 所示。

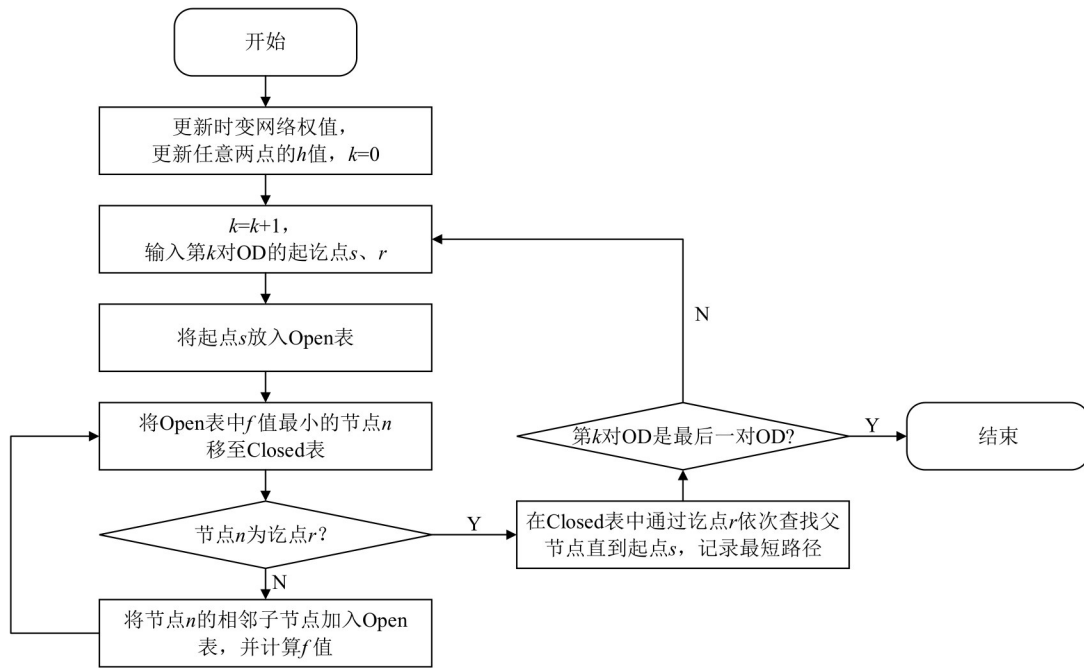


图4 基于A*算法的实时OD路径规划算法流程图

Fig. 4 Flow chart of real-time OD path planning algorithm based on A* algorithm

3 实例分析

选取安徽省宣城市的中心城区路网作为研究区域, 如图 5 所示。车辆个体出行数据为 2018 年 12 月 27 日 7:15~8:30 的车牌识别数据。



图5 研究区域

Fig. 5 Study area

3.1 仿真场景构建

利用 SUMO 仿真软件完成路网搭建以及通行规则设置等构建工作, 如图 6 所示。其中, 通行规则设置内容包括车道转向规则设置、交叉口信号控制方案设置以及虚拟停车场的构建。实验路网共包含 19 个交叉口(其中 16 个信号交叉口), 27 个路段以及 9 个虚拟停车场。

仿真实验基于真实获取的车牌识别数据, 通过基于行程时间估计的车辆出行路径重构算法还原车辆出行路径, 生成仿真实验所需的出行需求数据, 其具体属性如表 3 所示。在该研究区域, 当天早高峰(7:30~8:30)出行车辆数为 9 995 辆, 总出行次数为 12 384 次。

基于早高峰的车辆出行需求数据进行仿真实验, 于特定时空精准投放车辆, 以模拟真实交通运行场景。首先, 在仿真预热阶段输入 7:15~7:30 的车辆真实出行数据; 然后, 在正式仿真阶段以

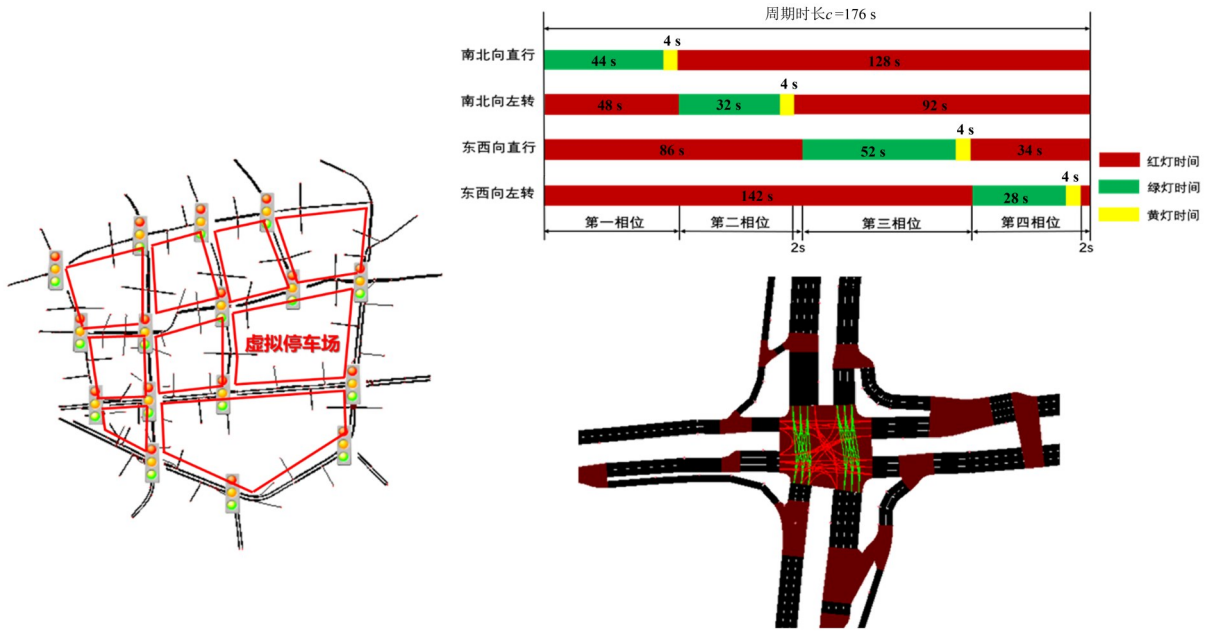


图6 SUMO 仿真基础模型
Fig. 6 Basic modeling of SUMO simulation

表3 出行需求数据属性说明¹⁾

Table 3 Attribute description of travel demand data

字段名	属性说明	示例
Veh_id	车辆id	*****3425
Type	车型	01
Ftime	出发时间	2018/12/27 07: 55: 30
Route	出行路径	1018—1010—1012—1011—1013

1) 01代表货车、公交类大型车;02代表私家、小汽车类小型车。

7:30~8:30的车辆出行数据作为需求数据输入仿真系统，非预约车辆按照需求数据中的原始出行路径行驶，预约车辆则根据预约出行路线规划算法重新规划的路径行驶。仿真运行场景如图7所示。

3.2 预约出行渐进推广效益

基于城市道路预约出行仿真平台，研究预约出行渐进推广过程中预约车辆与非预约车辆混行情景下的出行效益变化。预约车辆的确定方法为采取分层抽样方法，以各起点为统计单位从出行车辆中按预约比例随机抽取。在本实验中，控制

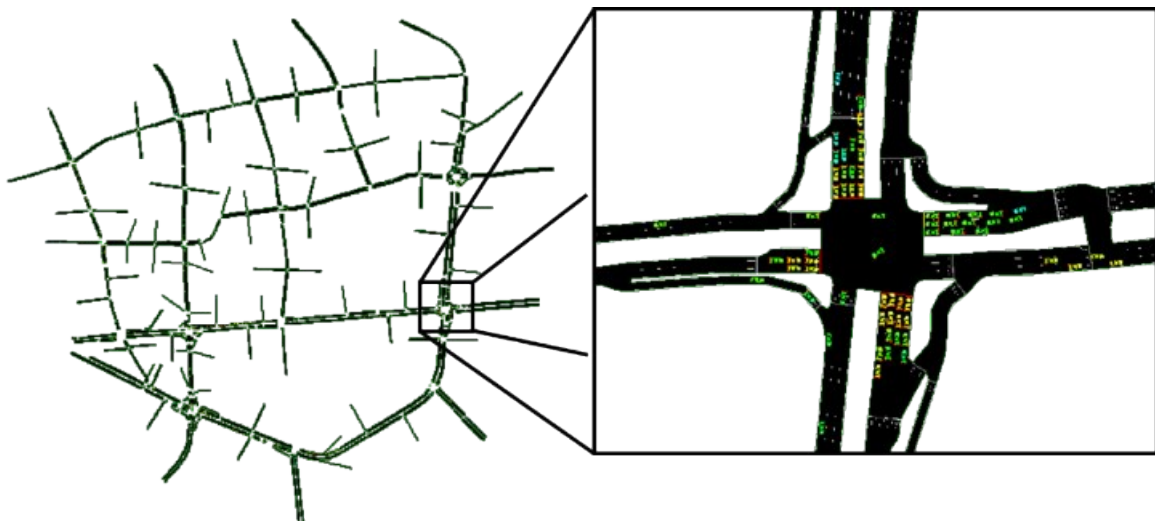


图7 仿真运行场景
Fig. 7 Simulation operation scenario

预约出行率从0到100%并以10%的幅度递增, 即共10组实验。出于对仿真随机性的考虑, 重复实验20次, 取样本均值作为结果指标值。

3.2.1 个体出行效益 随着预约出行率的提高, 预约车辆、非预约车辆和全体车辆的车均行程时间变化情况如图8所示, 由图可以看出:

(1) 对于预约车辆: 交通供给和需求一定时, 预约车辆的平均出行时间基本不随预约出行率的改变而改变, 本文的预约车辆平均出行时间稳定在307 s左右, 降幅达17%。

(2) 对于非预约车辆: 随着预约出行率的不断提高, 非预约车辆的平均出行时间逐渐下降, 下降速度整体呈现先快后缓的趋势。

(3) 对于全体车辆: 路网中全体车辆的平均出行时间随预约出行率的提高而降低, 并在预约出行率达到60%时趋向稳定; 再进一步提高预约率, 车均行程时间下降幅度变化微小。

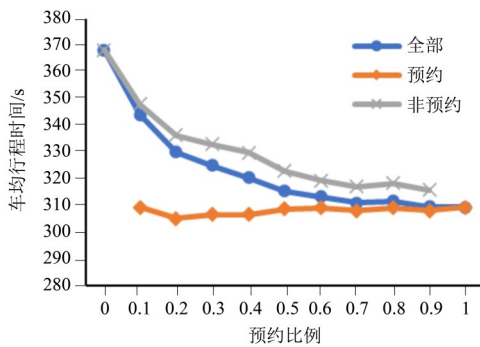


图8 不同预约比例下的车均行程时间
Fig. 8 Average travel time with different reservation ratios

综上所述, 道路预约出行系统中, 车辆个体选择预约出行能够得到基于实时路况的集中式路径规划方案, 从而使出行效益得到明显提升。随着预约出行的渐进推广, 预约出行率逐步提升, 预约车辆不再往几条道路上挤, 路网流量分布更为均衡, 非预约车辆的平均出行效益也随之得到一定程度的提升, 但提升幅度没有预约车辆大。与此同时, 全体车辆的平均出行效益也随着预约出行率的提高而提高, 并在预约出行率达到一定比例时趋向稳定, 即: 交通供给和需求一定时, 预约出行率达到一定比例后, 预约车辆和非预约车辆的出行开始到达一个平衡状态, 即使进一步增加预约出行受益群体, 个体的平均收益变化小。这说明道路交通系统不需要达到100%的预约出行

率就可以达到一个对于用户较优的平衡状态。

3.2.2 系统出行效益 随着预约出行率的提升, 路网运行指数变化如图9所示, 路网流量分布均衡指数变化如图10所示。从图中可以看出:

(1) 路网交通运行指数随车辆预约比例的上升而上升, 呈现先急后缓的趋势, 相应比例从0.3497提升至0.4566, 涨幅达31%, 实现了高峰时段路网交通运行评价等级从“拥挤”到“较畅通”的飞跃。预约出行推广初期, 路网交通运行指数提升明显, 道路交通系统运行明显更为畅通; 预约出行推广后期, 路网交通运行指数涨幅放缓, 即道路交通系统已达到相对平衡状态, 进一步转化非预约车辆, 亦无法实现路网运行效率较大的提升。

(2) 路网流量分布均衡指数则随车辆预约比例的上升而逐渐下降, 同样呈现先急后缓的趋势, 指数数值从0.1854降低至0.1337, 降幅达28%。预约车辆对路网流量分布均衡的改善明显, 使道路资源得到优化配置, 有效促进了供需平衡。路网流量分布均衡指数降幅先下降后趋向平稳的主要原因为: 在预约出行比例达到40%之前, 随着

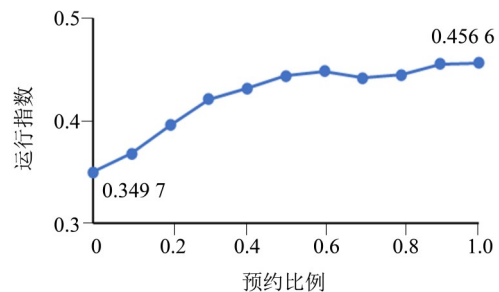


图9 不同预约比例下的路网交通运行指数
Fig. 9 TPI with different reservation ratios

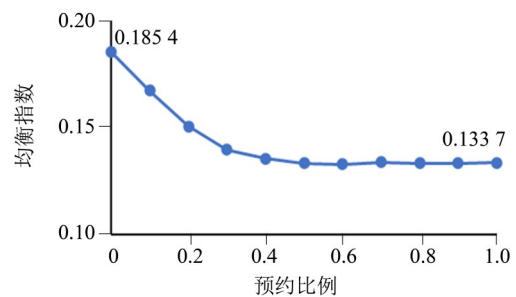


图10 不同预约比例下路网流量分布均衡指数
Fig. 10 TDEI with different reservation ratios

预约车辆的不断转化, 路网流量分布逐渐均衡; 在预约比例达到 40% 时, 达到该供给和需求条件下的路网流量分布均衡状态; 在预约出行比例达到 40% 之后, 路网流量均衡可调整空间较小, 路网流量分布均衡指数趋向平稳。

实施全体车辆预约出行前后的路网交通运行状态, 如图 11 所示。该图直观反映出预约出行的优越性, 可以提升道路交通网络系统出行效益, 使流量分布更均衡、道路交通运行更高效。

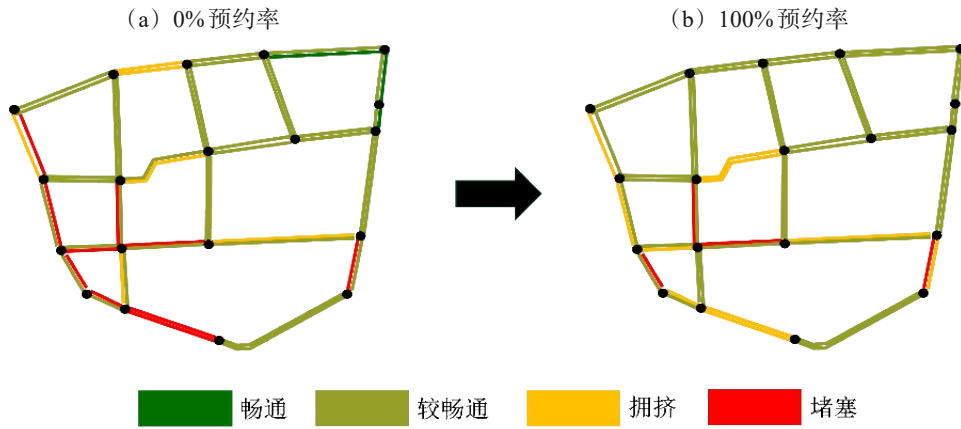


图 11 路网交通运行状态对比

Fig. 11 Comparison of road network traffic operation state

3.3 重点推广对象的预约出行效益

预约出行是未来车联网环境下缓解城市道路交通拥堵的最优解决方案, 在推广过程中需辅以激励政策^[21]。激励力度不仅视推广阶段而定, 还应视推广对象而定, 因为不同类型个体改变出行对效益的提升幅度有所不同。本文认为途径瓶颈路段的规律出行群体和远距离出行群体的出行改变对效益的提升程度大, 因此本节将研究上述两类群体实施预约出行的出行效益变化, 为预约出行的激励方案设计提供一定的依据。

3.3.1 途径瓶颈路段规律出行群体 从图 11 可以看出, 实现车辆全体预约后仍存在部分拥堵路段。其中, 路段 1012 的交通运行指数最小(0.13), 为路网的瓶颈路段, 是路网拥堵产生的主要源头。考虑对途经瓶颈路段的车辆群体(占比 16%)实施出行预约, 研究其出行效益变化, 结果如图 12 和 13 所示。从图中可以看出:

(1) 对比预约前, 预约车辆的车均行程时间降幅达 41%, 非预约车辆的车均行程时间也随之下降 7%。总体上来看, 全体车辆的车均行程时间下降 15%, 为 314 s。这接近全体预约出行的个体出行效益峰值水平, 说明对途经瓶颈路段的车辆群体实施出行预约, 个体出行效益提升显著。

(2) 从系统效益层面上看, 实施出行预约后,

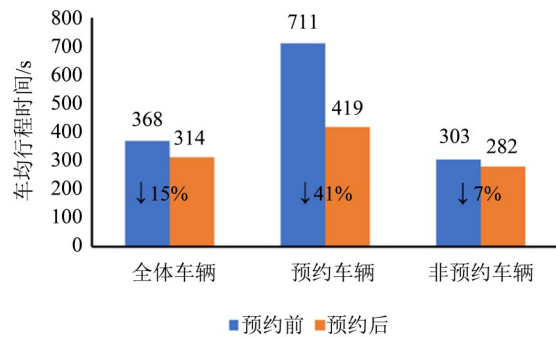


图 12 途径瓶颈路段群体预约前后的车均行程时间

Fig. 12 Average travel time of passing through the bottleneck before and after group reservation

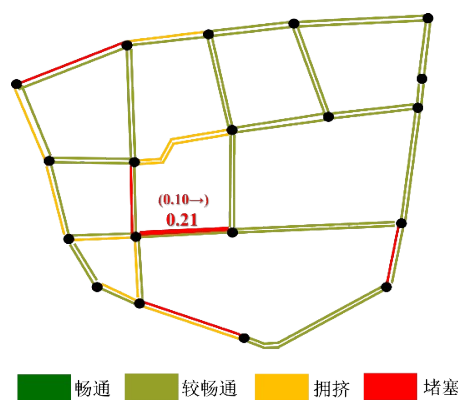


图 13 途径瓶颈路段群体预约后路网交通运行状态

Fig. 13 Traffic runing stateof passing through the bottleneck before and after group reservation

路网交通运行指数上升至0.444 3,路网流量分布均衡指数降低至0.128 1,系统出行效益得到显著提升。路网交通运行状态直观反映了路网运行状态的改善,虽然路段1012仍处于拥堵状态,但交通运行指数已提升了110%,通行效率上升。对途经瓶颈路段的车辆群体实施出行预约,使其中15%车辆出行不再经过瓶颈路段,有效缓解了瓶颈路段拥堵,进而提升了系统出行效益。因此,基于历史出行数据,将途经瓶颈路段的规律车辆群体列为重点推广对象,可以更大程度地提升预约出行效益。

3.3.2 远距离出行群体 对远距离出行的车辆群体(占比13%)实施出行预约,研究出行效益提升幅度。结果如图14和15所示。

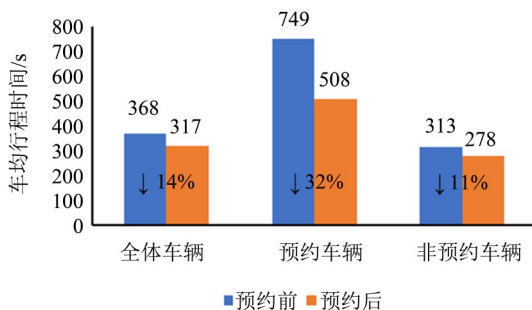


图14 远距离出行群体预约前后的车均行程时间

Fig. 14 Average travel time before and after group reservation

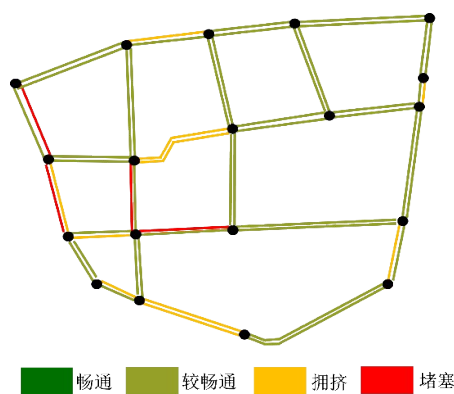


图15 远距离出行群体预约后的路网交通运行状态

Fig. 15 Traffic running state of traveling long distance after group reservation

对比出行预约前,预约车辆的车均行程时间降幅达32%,非预约车辆的车均行程时间也随之下落11%。从总体上来看,全体车辆的车均行程时间下降14%,为317 s。这接近全体预约出行的个体出行效益峰值水平,说明对远距离出行的车辆群体实施出行预约,个体出行效益提升显著。

从系统效益层面上看,实施出行预约后,预约车辆对道路交通产生积极影响,路网交通运行指数上升至0.447 1,路网流量分布均衡指数降低至0.118 9,系统出行效益显著提升。路网交通运行状态直观反映了路网运行状态的改善。对远距离出行的车辆群体实施出行预约,可使流量分布更均衡,有效提升路网的运行效率。类似地,吸引更多远距离出行车辆选择预约出行,可以更大程度地提升预约出行效益。

4 结论

本文设计开发了一个城市道路预约出行仿真平台。该仿真平台基于SUMO构建仿真路网,以真实出行需求数据作为非预约车流输入,同时结合Python进行二次开发,实现了基于A*算法的实时路径规划,为预约车辆规划出行路径,以达到模拟不同预约车辆集合下的混行交通运行场景的目的。通过仿真实验,得到主要结论如下:

1) 预约出行可以提升个体出行效益和系统出行效益,有效缓解路网交通拥堵状况。

2) 随着预约出行的渐进推广,预约出行率上升,出行效益随之提高,但总体增幅呈减小趋势。

3) 将途径瓶颈路段规律出行群体和远距离出行群体列为重点推广对象,能够实现出行效益的大幅度提升。实例表明,本文所开发的道路预约出行仿真平台可以模拟预约机制下的给定路网中由多个车辆个体组成的特定交通流状况,为城市道路预约出行规划、实施策略的设计与评估提供技术支持,具有广泛应用前景。

参考文献:

[1] LEVIN M. Congestion-aware system optimal route choice for shared autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part C, 2017, 82: 229-247.

[2] 龙建成,郭嘉琪. 动态交通分配问题研究回顾与展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 125-138.

- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6):1-197.
- [4] 郭继孚, 刁晶晶, 王倩, 等. 预约在城市交通中的应用——北京市回龙观地区的预约出行实践[J]. 城市交通, 2020, 18(1):75-82.
- [5] 郭继孚, 张建波, 孙建平. 大规模网联车辆协同服务研究进展[J]. 中国基础科学, 2021, 23(1):45-50.
- [6] 郭继孚, 刁晶晶, 综凯, 等. 预约出行模式展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5):160-164+173.
- [7] ZHAO Y, TRIANTIS K, EDARA P. Evaluation of travel demand strategies: A microscopic traffic simulation approach[J]. Transportation, 2010, 37(3):549-571.
- [8] MENELAOU C, KOLIOS P, TIMOTHEOU S, et al. Controlling road congestion via a low-complexity route reservation approach[J]. Transportation Research Part C, 2017, 81:118-136.
- [9] EDARA P, TEODOROVIĆ D. Model of an advance-booking system for highway trips [J]. Transportation Research Part C, 2007, 16(1):36-53.
- [10] 罗杰超. 出行预约模式在节假日高速公路场景的应用方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [11] 徐鹏展, 艾云飞, 耿丹阳, 等. 高速公路预约出行模式研究[J]. 公路, 2020, 65(7):211-216.
- [12] SU P, PARK B, LEE J, et al. Proof-of-concept study for a roadway reservation system: Integrated traffic management approach [J]. Transportation Research Record, 2013(2381):1-8.
- [13] LIU W, YANG H, YIN Y F. Efficiency of a highway use reservation system for morning commute [J]. Transportation Research Part C, 2015, 56:293-308.
- [14] MENELAOU C, TIMOTHEOU S, KOLIOS P, et al. Minimizing traffic congestion through continuous-time route reservations with travel time predictions [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(1):141-153.
- [15] MÁNUEL G, BALÁZS V, TAMÁS T, et al. Investigating the impacts of urban speed limit reduction through microscopic traffic simulation [J]. Communications in Transportation Research, 2021(1):100018.
- [16] 吴志林. 基于数据驱动的实时路况估计方法研究及系统开发[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
- [17] 黄敏, 王灵丽, 李轶. 一种基于行程时间估计的车辆出行路径重构方法: 中国, 10254452.2 [P]. 2021-07-20.
- [18] 孙娜. 基于多源数据的城市道路网络评价研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [19] QU S X. Research on dynamic route guidance system based on comparison of shortest path algorithms [J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(12):135-140.
- [20] 谷健. 基于RFID数据的城市交通流动态路径诱导研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [21] HU X B, CHIU Y C, ZHU L. Behavior insights for an incentive-based active demand management platform [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2015, 4(2):119-133.

(责任编辑 王海蓉)

(终校 本刊编辑部)