文章编号:1005-0523(2022)01-0082-07

考虑非机动车影响的公交车进站决策模型研究

苏灿航,高圣涵,郭建钢,廖飞宇

(福建农林大学交通与土木工程学院,福建 福州 350000)

摘要:为了研究直线式公交站点及上游区域内公交车与非机动车的冲突关系,选取福州市区两个典型的直线式公交站点,利用无人机获取公交车辆进站和非机动车的行驶轨迹,提取公交车换道点的实际位置。将完全信息静态非合作博弈与元胞自动机仿真模型相结合,探求冲突双方的纳什均衡值,并改进元胞自动机换道规则,提出了一种基于完全信息静态非合作博弈的改进型元胞自动机模型,用于模拟公交车占用非机动车道停靠情况下交通流运行状态。以换道点空间分布比例作为校验指标,校验结果表明,仿真值与实际值的误差均低于8%,说明改进型元胞自动机仿真模型能较好反映交通流实际运行情况;并以公交车近距离换道概率为指标,仿真结果表明,公交车近距离换道概率与非机动车交通量正相关。

关键词:非合作博弈;纳什均衡;元胞自动机;公交车辆;强制换道

中图分类号:U491.1+7 **文献标志码**:A

本文引用格式:苏灿航,高圣涵,郭建钢,等. 考虑非机动车影响的公交车进站决策模型研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):82-88.

Research on the Decision Model of Bus Arrival Considering the Influence of Non-Motorized Vehicles

Su Canhang, Gao Shenghan, Guo Jiangang, Liao Feiyu

(College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: In order to study the conflict relationship between buses and non-motorized vehicles in linear bus stops and the upstream area, two typical linear bus stops in downtown Fuzhou were selected, and drones were used to obtain the trajectory of buses entering the station and non-motor vehicles and extract the actual location of the bus lane change point. Combining the full-information static non-cooperative game with the cellular automata simulation model, exploring the Nash equilibrium value of the conflicting parties, and improving the cellular automata's lane changing rules, the paper proposes an improved element based on the full-information static non-cooperative game The cellular automata model was used to simulate the traffic flow operation state when the bus occupied the non-motorized lane and stops. Taking the spatial distribution ratio of lane changing points as the verification index, the verification results show that the error between the simulation value and the actual value is less than 8%. It shows that the improved cellular automata simulation model can better reflect the actual operation of traffic flow. Taking the probability of a short-distance bus lane change as an indicator, the simulation results show that the probability of a short-distance bus lane changing is positively correlated with the traffic volume of non-motor vehicles.

收稿日期:2021-07-09
基金项目:国家自然科学基金项目(51608123)

Key words：non-cooperative game; Nash equilibrium; cellular automata; public transportation vehicle; forced lane change

Citation format：SU C H，GAO S H，GUO J G，et al. Research on the decision model of bus arrival considering the influence of non-motorized vehicles[J]. Journal of East China Jiaotong University，2022，39(1)：82-88.

公交车在运营过程中需要经常性的进出站换道行为，这种换道行为不仅影响着交通流的运行，尤其在机非混行道路上公交车与非机动车之间存在着严重冲突。当公交车占用非机动车道进站停靠时，公交车后方的非机动车辆只能停车等待或者占用相邻机动车道行驶，容易与机动车道上行驶的车辆发生冲突，存在安全隐患。研究公交车进出站过程中与非机动车之间的冲突十分必要。

目前对换道决策模型的研究主要集中在深度学习[1-2]、神经网络模型[3-6]以及博弈论模型[7-11]。换道的类型主要分为自由换道和强制换道[12-13]。刘悦棋将交通量、公交车数和离站路程作为输入变量，建立以进站换道点数量为输出值的 BP 神经网络模型[14]。张介通过建立拥堵状态下车辆不同决策下的收益矩阵，计算纳什均衡值，建立最优强制换道策略模型[15]。乔阳结合停靠站附近公交车辆与社会车辆的运行规则，利用元胞自动机模型研究公交车进站时换道点距离站台长度和穿越车道数对交通安全和效率的影响[16]。吴鼎新建立了基于跟车对组合的元胞自动机模型，在此基础上建立了间歇优先公交专用道中小汽车为公交车强制换道的 BLIP-SCP 模型[17]。巴兴强等应用概率统计方法，提出一种基于强制换道概率的公交车进站换道决策模型[18]。向红艳等以交通量、公交车数和离站路程为输入变量，建立基于 BP 神经网络的公交进站换道决策模型[19]。

通过分析可以发现：现有换道决策研究大多建立在单一车辆类型（主要为小汽车）之间的换道博弈，并未考虑不同车辆类型之间的相互影响。对公交车的换道决策模型研究较少，尤其是考虑非机动车影响的公交车换道决策模型研究甚少。针对不同类型或者多类型车辆之间的相互影响，分析其换道行为具有理论意义和工程应用价值。

1　数据采集

选择福州市 2 个设置于非机动车道路段的直线式公交车站，站点位置距离信号控制交叉口大于 80 m，道路两侧为居民区，无路段出入口影响。在天气良好的工作日晚高峰 17：50—18：50 进行无人机拍摄。考虑到公交车与非机动车的冲突主要发生在非机动车道与最右侧车道，故仅采集最右侧车道、非机动车道两条车道车辆运行数据，位置信息采集区域如图 1 所示。

将视频导入轨迹追踪软件 TRACKER 中，提取公交车与非机动车的轨迹信息。对轨迹数据进行平滑处理。记录公交车换道进站点位置，以 3 m 为一区间将换道点位置进行统计分析，获得晚高峰时期公交车换道概率。

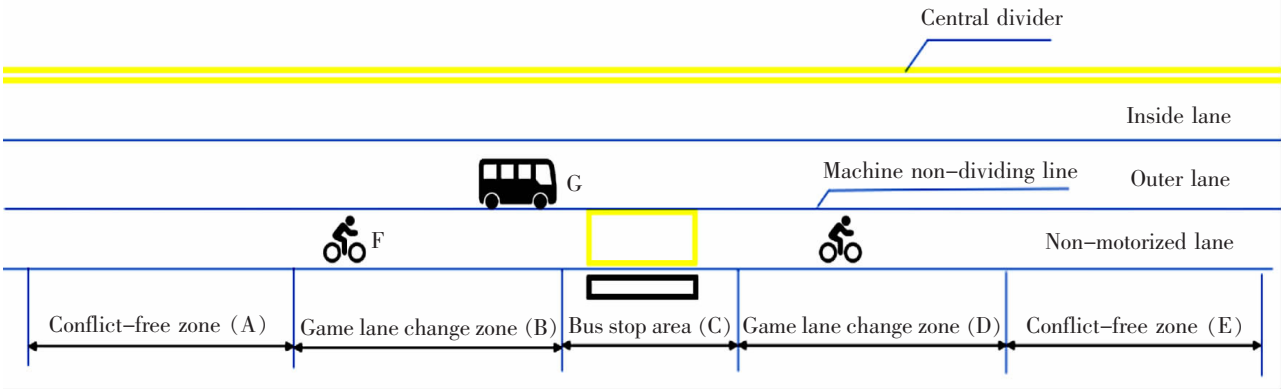

图 1　研究区域示意图

Fig.1　Schematic diagram of the study area

2 博弈换道模型建立

2.1 博弈换道收益矩阵

公交车G由原始位置准备换道,换道时假设除公交车G以及相邻右后方非机动车F外其余车辆皆按照原先行驶状态行驶,即横向位移及加速度均为0。公交车与非机动车可能发生的碰撞为公交车右侧与非机动车前部碰撞或追尾(图1)。

在公交车临近公交车站时,即位于B区域时,当此区域范围内存在非机动车辆时,公交车与非机动车进行换道博弈,公交车与非机动车道后方非机动车为博弈的参与者。两者之间对于谁先通过冲突点做出博弈,在完全信息静态非合作博弈下,公交车的策略集 $J_G=(R,H)$,其中R表示进行向右换道,H表示减速或者停止礼让非机动车,策略对应的概率分别为 a_1 和 a_2;非机动车的策略集 $J_F=(L,D)$,其中L表示向左借道超车或加速通过,D表示减速或停车等待,策略对应的概率为 b_1 和 b_2。公交车和非机动车的收益分别用 Q_{ij} 和 q_{ij} 表示,则可以得到公交车与非机动车之间的博弈收益矩阵,见表1。

表1 公交车G与非机动车F博弈收益矩阵

Tab.1 The game profit matrix of Bus G and non-motorized Vehicle F

Strategy	L	D
R	(Q_{11},q_{11})	(Q_{12},q_{12})
H	(Q_{21},q_{21})	(Q_{22},q_{22})

设公交车G与非机动车F的期望收益值为 E_G 和 E_F。计算如下

$$\left.\begin{aligned} E_G&=\sum_{i=1}^{2}Q_i\left(\sum_{j=1}^{2}a_jb_i\right)\\ E_F&=\sum_{j=1}^{2}q_i\left(\sum_{i=1}^{2}a_jb_i\right)\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中:

$$\left.\begin{aligned}\sum_{i=1}^{2}a_i&=1\\ \sum_{j=1}^{2}b_j&=1\end{aligned}\right\}$$

2.2 换道收益函数

以安全性和效率性为目标函数,以期驾驶员能够获得更安全、快捷的驾驶方式。其中,通过车辆间的距离来衡量安全性,用时间收益函数来衡量效率性,在安全的基础上通过博弈理论获得更大的时间收益。收益函数为

$$Q=\omega_1J+\omega_2T \tag{2}$$

式中:Q 为驾驶员考虑的个人收益;J 为当前对象获得的安全收益;T 为当前对象获得的时间收益;ω_1,ω_2 分别为安全收益与时间收益的权重系数。

针对不同性格的驾驶员所追求的安全收益与时间收益比重不同,权重值满足

$$\left.\begin{aligned}&\omega_1+\omega_2=1\\ &0<\omega_1<1\\ &0<\omega_2<1\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

针对安全收益 J,主要从公交车G与非机动车F两者之间的距离来衡量,两者之间的距离与最小安全距离相比,与安全距离的正差值越大,表示安全收益越高;针对时间收益 T,主要以实际行驶时间与保持原速度到达目的地所需时间衡量,实际行驶时间与保持原速度所需时间的正差值越大表示时间收益越低,如下所示

$$\left.\begin{aligned}J&=\frac{S_{GF}-S_{min}}{S_{min}}\\ T&=\frac{t_{GF}-t_Y}{t_Y}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中:S_{GF} 表示公交车与非机动车的车头间距;S_{min} 为最小安全距离;t_{GF} 为公交车G或非机动车F按照当前策略行驶到达冲突点所需的时间;t_Y 为车辆按照原先行驶速度到达冲突点所需的时间。

2.3 纳什均衡

在公交车与非机动车的博弈中,驾驶人以一定的概率随机选择策略操作,在两者随机做出决策时,将随之产生双方收益矩阵,具体收益矩阵,见表2。

表2 考虑安全与时间因素收益矩阵

Tab.2 Income matrix considering safety and time factors

Strategy	L	D
R	$(-a_1J_G+a_2T_G,-b_1J_F+b_2T_F)$	$(a_1J_G+a_2T_G,b_1J_F-b_2T_F)$
H	$(a_1J_G-a_2T_G,b_1J_F+b_2T_F)$	$(a_1J_G-a_2T_G,b_1J_F-b_2T_F)$

公交车G与非机动车F之间的博弈为2×2型的博弈问题,求解2×2型的纳什问题可以采用线性

方程组法。

当公交车选择右转换道时，非机动车能够选择左转换道或者减速停车等待，此时非机动车在左转换道或加速、减速停车等待的收益为

$$Q_1^G=b_1q_{11}+b_2q_{12} \tag{5}$$

$$Q_2^G=b_1q_{21}+b_2q_{22} \tag{6}$$

根据纳什均衡求解，可得

$$b_1q_{11}+b_2q_{12}=b_1q_{21}+b_2q_{22} \tag{7}$$

从而得到公交车 G 选择右转换道的概率 a_1，如下所示

$$a_1=\frac{q_{22}-q_{12}}{q_{11}+q_{22}-q_{12}-q_{21}} \tag{8}$$

同理，当非机动车 F 选择左转换道或加速通过时，公交车 G 选择向右换道或减速停止礼让非机动车，公交车选择右转换道的概率 b_1，如下所示

$$b_1=\frac{Q_{12}-Q_{21}}{Q_{11}+Q_{22}-Q_{12}-Q_{21}} \tag{9}$$

将 a_1 与 b_1 进行比较，如果 a_1 大于 b_1，则公交车 G 进行向右换道，非机动车 F 减速或停车等待；如果 a_1 小于 b_1，则公交车 G 减速停止，非机动车 F 加速通过。

3　仿真分析

3.1　元胞参数定义

1）元胞尺寸。常规电动自行车的长度为 1.36~2 m，宽为 45~78 cm，常规公交车的长度为 10 m，宽为 2.5 m。模型以常规电动车的占地为一个元胞，常规公交车的占地为长 3 元胞、宽 1 元胞的长方形矩阵排列元胞，1 个元胞的长度为 3 m，宽度为 2 m。

2）车辆速度。根据路段上电动车车速进行的实测数据可得，电动自行车的平均速度为 20 km/h，即 5.56 m/s，公交车的平均速度为 54 km/h，即 15 m/s。分别选取 2 个元胞/s 以及 5 个元胞/s 作为电动车以及公交车的最大速度，即电动车的速度区间为(0,2)，公交车的速度区间为(0,5)，临近公交站点时，公交车降低行驶速度。

3）元胞周期性边界条件。道路左侧为模型的起始位置，按照一定比例产生公交车以及电动车，当车辆从右侧边界驶出后，车辆从左侧边界驶入模型。

4）道路和车站形式。仿真路段为双向六车道道路，车道宽度为 3.5 m，车道长度为 300 m，即 100 元胞。公交停靠站位于道路中央，即 150 m 处，直线式公交停靠站形式，公交车占用非机动车道进行短暂停靠后驶离非机动车道。

5）交通量。根据实际调查结果，设置单向公交车流量为 49 pcu/h，非机动车流量为 226 pcu/h。

6）只考虑两个车道的系统，内侧车道供公交车行驶，外侧车道为非机动车道，定义车道长度为 100 元胞。在区域 A、E 中，公交车与非机动车各行其道，互不干扰。非机动车道中区域 C 为公交车站，公交车在区域 B 换道进站，在区域 D 换道出站，区域划分规则(图 1)。假定非机动车道上的一个元胞能够容纳 N 辆非机动车，所有的公交车都需要在公交车站停留 10 s 后离开。

3.2　更新规则

1）加速。如果车辆速度 $V<V_{max}$，则速度增加 1，即 $V=\min(V+1,V_{max})$。

2）减速。如果车辆间距 $d\leqslant V$，则 $V=\min(V,d-1)$。

3）随机慢化。如果车辆速度 $V>0$，则以概率 P 进行减速操作，否则不变，即以概率 P 使得 $V=\max(V-1,0)$。

4）位置更新。车辆以速度 V 向前移动更新位置，即 $X=X+V$。

5）换道规则。如果 $a_1>b_1$，则 $Y_n^G(t+1)=Y_n^G(t)+1$。

3.3　模型有效性验证

为确保构建的元胞自动机仿真模型的有效性，需要对其进行有效性检验。将“公交车换道点分布”作为仿真模型有效性的检验指标，主要是因为不管是仿真模型中还是实际数据调查中，该数据都易于获得，并且能够检验仿真模型与实际情况之间的差别。

由于道路交通流本身存在一定的不确定性，导致交通调查过程中存在一定的不稳定性，仿真模型获得的检验指标与实际交通调查获得的差值在 10%~15%皆认为该模型与现实相符，模型有效。将设定好的参数分别输入元胞自动机模型和 VISSIM 中进行重复实验 10 次，获取 4 000 仿真秒内公交车换道点空间分布，并取这 10 次实验的指标均值与实际调查所得换道点分布进行对比分析。核验换道点分布的核验结果，见图 2。仿真均值与实际值的误差情况，见表 3。

由图 2 可知，改进的元胞自动机仿真模型仿真效果优于 VISSIM 仿真，VISSIM 仿真实验中，公

交车换道概率分布较为均匀，区段1~6与实际误差较大，元胞自动机模型仿真均值与实际调查获得的公交车换道点分布情况较为接近，公交车换道点主要分布于公交站前33~63 m，集中于48~60 m。由表3可知，VISSIM仿真结果表明，公交车换道点分布较为均匀，主要集中于区段21中，换道比例为15.22%。元胞自动机模型换道点分布主要集中于区段7~20中，仿真均值与实际调查换道点分布比例之间的最大误差接近8%，最大误差值为7.96%，核验的结果均在15%的可接受范围内，故认为博弈换道模型能够较好的反应公交车占用非机动车道停靠情况下的交通流状态，仿真效果优于VISSIM仿真，该元胞自动机模型更符合实际情况。

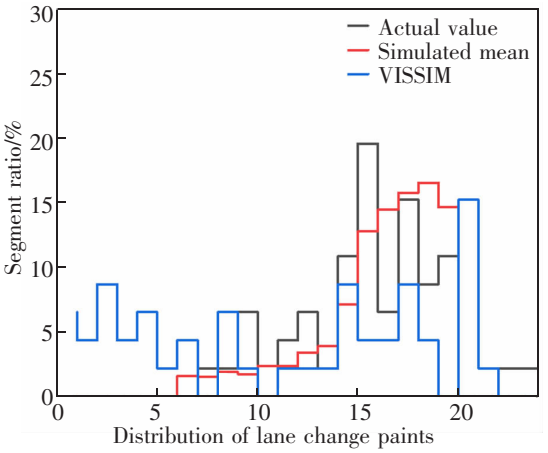

图2 换道点分布的核验结果

Fig.2 Verification result of lane change point distribution

表3 换道点分布的误差对比情况表

Tab.3 Error comparison of the distribution at lane change points

Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Measured value	0	0	0	0	0	0	0	2.17	2.17	6.52	0	4.35
Simulated mean	0	0	0	0	0	0	1.56	1.51	1.89	1.74	2.36	2.34
CA-error	0	0	0	0	0	0	1.56	0.67	0.29	4.78	2.36	2.00
VISSIM	6.52	4.35	8.70	4.35	6.52	2.17	4.35	0	6.52	2.17	0	2.17
VISSIM-error	6.52	4.35	8.70	4.35	6.52	2.17	4.35	−2.17	4.35	−4.35	0	−2.17
Section	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Measured value	6.52	2.17	10.87	19.57	6.52	15.22	8.70	10.87	0	0	2.17	2.17
Simulated mean	3.42	3.90	7.11	12.76	14.49	15.73	16.54	14.64	0	0	0	0
CA-error	3.10	1.73	3.76	6.80	7.96	0.51	7.84	3.77	0	0	2.17	2.17
VISSIM	2.17	2.17	8.70	4.35	4.35	8.70	4.35	0	15.22	2.17	0	0
VISSIM-error	−4.35	0	−2.17	−15.22	−2.17	−6.52	−4.35	−10.87	15.22	2.17	−2.17	−2.17

3.4 非机动车交通量影响分析

为了探究非机动车交通量与公交车近距离换道概率之间的关系，设置不同交通量参数进行元胞自动机仿真。仿真结果表明，随着非机动车交通量的增加，公交车驾驶人在距离公交站小于6 m区段内进行换道的概率增加。非机动车交通量与近距离(换道距离 d<6 m)换道概率关系图，如图3所示。

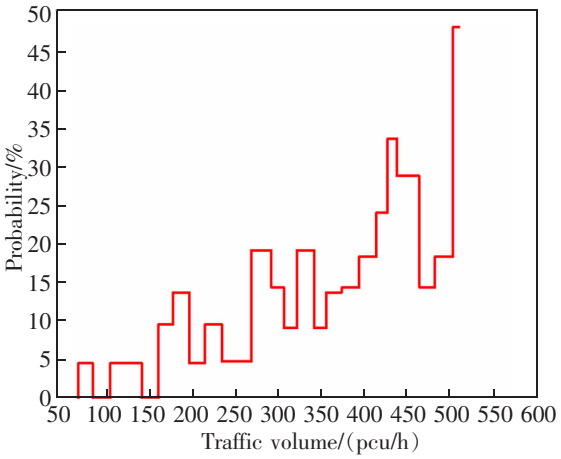

图 3　非机动车交通量与公交车近距离(d<6 m)换道概率关系曲线

Fig.3　The relation curve between the traffic volume of non-motor vehicles and the probability of short-distance (d<6 m) bus lane change

4　结论

1）通过分析两者之间的换道收益从而获得利益最大化的纳什均衡，引入完全信息静态非合作博弈理论，并改进元胞自动机换道规则，得到一种考虑公交车与非机动车的纳什均衡的改进型元胞自动机仿真模型，模拟公交车占用非机动车道停靠的交通场景。结果表明，仿真模型获得的公交车换道点分布与实际值的误差低于 8%。随着非机动车交通量的增加，公交车近距离(d<6 m)换道概率增加。

2）未考虑公交车比例对博弈换道的影响，后续研究可以根据不同时段、不同公交车比例情况对博弈决策模型进行改进，使该模型适用于更复杂的交通场景。

参考文献：

[1] 吕维. 基于深度增强学习的智能车安全并道决策研究[D]. 成都：电子科技大学，2019.
LV W. Decision-making research on safe lane change of intelligent vehicle based on deep reinforcement learning[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2019.

[2] 房哲哲. 基于深度学习的换道行为建模与分析[D]. 北京：北京交通大学，2018.
FANG Z Z. Modeling and analysis of the lane-changing behavior through deep learning[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2018.

[3] 李子龙. 基于人工神经网络的智能汽车循迹控制研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2019.
LI Z L. Research on intelligent vehicle tracking control based on artificial neural network[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2019.

[4] 张甫城. 基于机器学习的智能车辆换道决策和轨迹迹规划研究[D]. 西安：长安大学，2021.
ZHANG F C. Research on lane change decisions and trajectory planning of intelligent vehicle through machine learning[D]. Xi'an：Chang'an University，2021.

[5] 张佳鹏，李琳，朱叶. 基于强化学习的无人驾驶车辆行为决策方法研究进展[J]. 电子科技. 2021，34(5)：66-71.
ZHANG J P，LI L，ZHU Y. A review of research on decision-making method of autonomous vehicle based on reinforcement learning[J]. Electronic Science and Technology，2021，34(5)：66-71.

[6] 崔洁茗，余贵珍，周彬，等. 基于神经网络的车辆强制换道预测模型 [J/OL]. 北京航空航天大学学报.(2021-03-11)[2021-07-09]. DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0662.
CUI J M，YU G Z，ZHOU B，et al. The mandatory lane change decision making model based on neural network[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics.(2021-03-11)[2021-07-09]. DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0662.

[7] 王金祥，赵树恩，杨其芝，等. 基于博弈论组合赋权 TOPSIS 法的汽车碰撞危险态势评估[J]. 科学技术与工程，2020，20(8)：3315-3322.
WANG J X，ZHAO S E，YANG Q Z，et al. Situation assessment of vehicle collision risk based on TOPSIS model of game theory combination[J]. Science Technology and Engineering，2020，20(8)：3315-3322.

[8] 郭静秋，方守恩，曲小波，等. 基于强化协作博弈方法的双车道混合交通流特性[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2019，47(7)：976-983.
GUO J Q，FANG S E，QU X B，et al. Characteristics of mixed traffic flow in two-lane scenario based on cooperative gaming method[J]. Journal of Tongji University(Natural Science)，2019，47(7)：976-983.

[9] 周幸楠. 基于演化博弈论的车辆变道行为研究[D]. 北京：中国人民公安大学，2019.
ZHOU X N. Research on driver's lane-change behavior based on evolutionary game theory[D]. Beijing：People's Public Security University of China，2019.

[10] ALI Y，ZHENG Z D，HAQUE M M，et al. A game theory-based approach for modelling mandatory lane-changing behaviour in a connected environment[J]. Transportation

Research Part C:Emerging Technologies,2019,106:220–242.

[11] 李梦琦,张敬磊. 考虑愤怒情绪的驾驶员换道行为博弈分析[J]. 中国安全科学学报. 2020,30(2):165–170.
LI M Q,ZHANG J L. Game analysis of car drivers' lane–changing behaviors considering angry feelings[J]. China Safety Science Journal. 2020,30(2):165–170.

[12] ALI Y,HAQUE M M,ZHENG Z D,et al. A hazard–based duration model to quantify the impact of connected driving environment on safety during mandatory lane–changing[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2019,106:113–131.

[13] DENG J H,FENG H H . A multilane cellular automaton multi–attribute lane–changing decision model[J]. Physica A,2019,529:1–10.

[14] 刘悦棋. 公交车进站过程中的换道行为及影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
LIU Y Q. Bus entering lane–changing behavior and its impacts[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2018.

[15] 张介. 基于微观轨迹数据的山地城市港湾式公交站区车辆运行行为研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.
Zhang J. Research on vehicle operation behavior of bus station area based on microscopic trajectory data in mountainous city[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2019.

[16] 乔阳. 基于元胞自动机的公交车进站换道行为研究[D]. 西安:长安大学,2018.
QIAO Y. Study on lane changing behavior of buses at the stop based on cellular automata modeling[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.

[17] 吴鼎新. 间歇优先公交专用道的通行能力及其影响研究[D]. 南京:东南大学,2019.
WU D X.Study on capacity of bus lane with intermittent priority and its impacts[D]. Nanjing:Southeast University, 2019.

[18] 巴兴强,刘娇娇. 基于博弈论的公交进站换道决策行为研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学). 2019,33(2):111–116.
BA X Q,LIU J J. Research on decision making behavior of bus entering lane–changing based on game theory[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2019,33(2):111–116.

[19] 向红艳,刘悦棋,刘秀彩,等. 基于反向传播神经网络模型的公交进站换道决策行为分析[J]. 科学技术与工程, 2017,17(26):302–307.
XIANG H Y,LIU Y Q,LIU X C,et al. The decision making of bus entering lane–changing behavior analyzed by back–propagation neural network model[J]. Science Technology and Engineering. 2017,17(26):302–307.



第一作者:苏灿航(1998—),男,硕士研究生,研究方向为道路交通安全工程。E–mail:578119127@qq.com。



通信作者:郭建钢(1962—),男,教授,博士,研究方向为道路交通安全工程。E–mail:fafugjg@163.com。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)