

基于元胞自动机的公交车靠站换道行为研究^{*}

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 350002)

摘要: 为研究非机动车密度对公交车进站的影响, 选取福州市区 2 处典型的直线式公交停靠站点, 通过无人机视频获取路段车辆信息; 将公交车进站强制换道分为保守型和激进型, 在考虑车辆延误损失和风险损失的基础上, 量化公交车与非机动车博弈双方的收益, 建立保守型强制换道决策模型; 考虑相邻车辆最小安全距离, 建立公交车激进型强制换道模型, 提出一种强制换道元胞自动机仿真模型。仿真结果表明, 公交车激进型强制换道概率随着非机动车密度和公交车密度的增大而增大。

关键词: 城市交通; 公交车; 换道行为; 保守型; 激进型; 元胞自动机

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0027-05

占用非机动车道停靠公交是目前中小城市常见公交停靠形式, 公交车进站停靠需短暂占用非机动车道, 阻断非机动车流, 从而迫使非机动车停车等待或冒险占用相邻机动车道换道超车, 时间成本和风险成本增加。研究不同交通流量下路段交通状态十分重要, 可为城市公交站点形式选择提供理论支撑。文献[5-8]从公交站区域整体入手, 研究直线式公交停靠站内有公交车停靠时对周围局部交通流的影响, 探索公交车停靠期间社会车辆运行规律。文献[9-12]以自行车为研究对象, 分析了公交车进站换道过程对非机动车运行的影响。邱得玲将到达分布和随机效用理论相结合, 建立了不同密度、不同到达分布情况下换道概率公式。周志俊通过分析公交车进站运行状态、后续交通流到达率和疏散率, 建立了交通流随机延误模型。邱凌云通过分析公交车速度、自行车与公交车相对位置、夹角对驾驶人行为决策的影响, 建立了基于模糊推理的冲突模型。现有

针对直线式公交停靠站区域的研究集中于公交车与小汽车之间的冲突影响, 对公交车与非机动车之间影响的研究较少。分析非机动车交通量大小、不同公交车停靠需求下公交车激进型强制换道比例对公交系统的运营与管理具有理论指导意义。

1 模型构建

驾驶人因追求理想行驶速度、停靠需求等, 需驶入相邻车道的行为称为换道行为, 根据换道原因不同分为自由换道和强制换道。与自由换道不同, 强制换道为必要性换道行为。在公交车进站的场景中, 随着公交车与公交停靠站距离的减少, 公交车驾驶人变更车道的需求增强。距离缩短至最迟换道点处时, 如果右侧仍存在非机动车干扰而无法直接换道, 公交车驾驶人只能采取减速、停车等待等措施等待换道时机。研究区域为公交站点及其上游区域 (见图 1)。

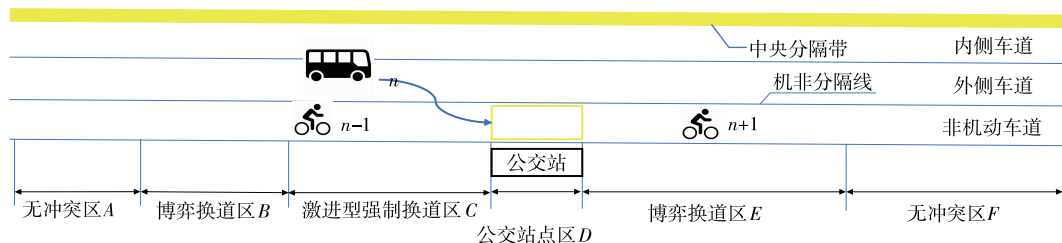


图 1 研究区域示意图

对于公交车停靠站及其上游区域, 公交车驾驶人的强制换道决策可分为保守型和激进型 2 个阶

段。在博弈换道区域 B 中, 公交车能根据实际情况选择是否进行换道, 根据驾驶员性格和驾驶习惯的

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51608123)

不同选择不同换道位置,定义为保守型强制换道行为;随着公交车与公交停靠站距离的缩小,公交车到达激进型强制换道区域 C 时,公交车换道需求强烈,在保证安全的情况下将截断非机动车流,强制换道至非机动车道进行停靠。因此,判断车辆强制换道决策类型在于判断公交车是否能在激进型强制换道区域前进行换道操作。公交车进站换道决策流程见图 2。

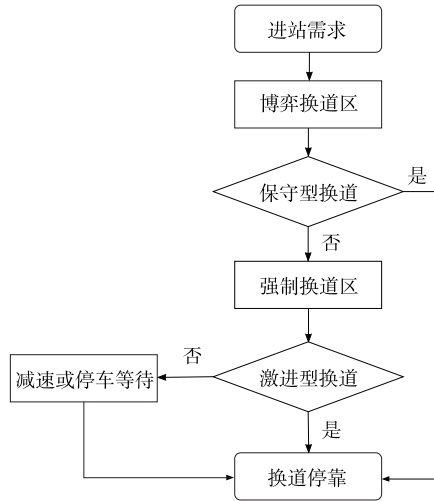


图2 公交车进站换道决策流程

1.1 保守型强制换道决策模型

公交车为满足工作需求,在临近公交停靠站时便产生换道需求。在博弈换道区域 B 中,当右侧非机动车与公交车距离大于博弈距离 D^c 时,相互之间影响不大,公交车换道位置受驾驶员性格影响;当右侧非机动车与公交车距离小于 D^c 时,两者之间存在冲突风险,由于冲突双方皆不完全掌握对方的博弈信息,公交车与非机动车进行非完全信息博弈。

为模拟公交车与非机动车之间的换道冲突,引入非完全信息博弈理论对 CA 模型换道规则进行改进,建立保守型强制换道决策模型如下:

$$\begin{cases} Y_n^{\text{bus}}(t+1) = Y_n^{\text{bus}}(t) + 1, d_n^{\text{右后}} > D^c, \\ \quad \text{rand}(1) < P_{\text{change}} \\ Y_n^{\text{bus}}(t+1) = Y_n^{\text{bus}}(t) + 1, \text{return}_n^{\text{bus}}(t) > \\ \quad \text{return}_m^{\text{bike}}(t) \\ Y_n^{\text{bus}}(t+1) = Y_n^{\text{bus}}(t) + v_n^{\text{bus}}(t), \\ \quad \text{return}_n^{\text{bus}}(t) < \text{return}_m^{\text{bike}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Y_n^{\text{bus}}(t)$ 为 t 时刻第 n 辆公交车所在车道编号(内侧车道为 1 号车道,外侧车道为 2 号车道,非机动车道为 3 号车道); $d_n^{\text{右后}}$ 为第 n 辆车与其右后方相邻车辆的距离; P_{change} 为公交车驾驶人换道概率,受

驾驶员性格影响; $\text{return}_n^{\text{bus}}(t)$ 、 $\text{return}_m^{\text{bike}}(t)$ 分别为第 n 辆公交车、第 m 辆非机动车的博弈收益,由式(2)、式(3)求得; $v_n^{\text{bus}}(t)$ 为 t 时刻第 n 辆公交车的速度。

$$\text{return}_n^{\text{bus}}(t) = w_1^{\text{bus}} D_n^{\text{bus}} + w_2^{\text{bus}} R_n^{\text{bus}} \quad (2)$$

$$\text{return}_m^{\text{bike}}(t) = w_1^{\text{bike}} D_m^{\text{bike}} + w_2^{\text{bike}} R_m^{\text{bike}} \quad (3)$$

式中: w_1^{bus} 、 w_2^{bus} 、 w_1^{bike} 、 w_2^{bike} 为权重系数; D_n^{bus} 、 D_m^{bike} 分别为公交车、非机动车延误损失,由式(4)求得; R_n^{bus} 、 R_m^{bike} 分别为公交车、非机动车风险损失,可通过对实际采集数据进行分析获得礼让、不礼让 2 种博弈情况下的驾驶人风险损失(见表 1,括号中前者为公交车风险损失,后者为非机动车风险损失)。

$$\begin{cases} D_n^{\text{bus}} = \frac{d_m^{\text{bike}}}{v_m^{\text{bike}}} + \frac{v_n^{\text{bus}}}{a_n^{\text{bus}}} \\ D_m^{\text{bike}} = \frac{d_n^{\text{bus}}}{v_n^{\text{bus}}} + \frac{v_m^{\text{bike}}}{a_m^{\text{bike}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_m^{bus} 、 d_m^{bike} 分别为公交车、非机动车至冲突点的距离; a_n^{bus} 、 a_m^{bike} 分别为公交车、非机动车的加速度。

表 1 驾驶人风险损失设定

工况	风险损失	
	公交车换道	公交车不换道
非机动车礼让	(0,0)	(0,0)
非机动车不礼让	(-1,-2)	(0,0)

1.2 激进型强制换道决策模型

公交车在博弈换道区域 B 中无法进行换道进站时,驶入激进换道区域 C 后换道需求强烈。车辆与公交站距离等于换道所需最短距离且公交车位于非机动车前方时,公交车大概率会选择强制换道,截断非机动车流进入公交停靠站;若存在并行非机动车,公交车根据实际情况选择是否换道,不满足换道条件时将停车等待换道时机,在满足式(5)的条件下进行强制换道。

$$\begin{cases} S_n^{\text{bus,右前}} > r_1 v_{n+1}^{\text{bike}} \\ S_n^{\text{bus,右后}} > r_2 v_{n-1}^{\text{bike}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_n^{\text{bus,右前}}$ 为公交车与右前方非机动车的距离; r_1 、 r_2 分别为公交车与右侧前方、后方非机动车车头时距,根据文献[16], $r_1=1\text{ s}$, $r_2=1.2\text{ s}$; v_{n+1}^{bike} 为公交车右前方非机动车的速度; $S_n^{\text{bus,右后}}$ 为公交车与右后方非机动车的距离; v_{n-1}^{bike} 为公交车右后方非机动车的速度。

若位于激进换道区域 C 中的公交车仍不满足换道条件,则公交车以减速度 b_n^{bus} 减速行驶,以增加与右前方非机动车的距离 $S_n^{\text{bus,右前}}(t + \Delta t)$,表达式

如下:

$$\begin{cases} S_n^{\text{bus,右前}}(t + \Delta t) = S_n^{\text{bus,右前}}(t) + \\ \Delta t(v_{n+1}^{\text{bike}} - v_n^{\text{bus}}) \\ v_n^{\text{bus}}(t + \Delta t) = \max(v_n^{\text{bus}} - \Delta t b_n^{\text{bus}}, 0) \end{cases} \quad (6)$$

同时,公交车向右变道的趋势将迫使右后方非机动车以减速度 b_{n-1}^{bike} 减速行驶,两者之间的距离 $S_n^{\text{bus,右后}}(t + \Delta t)$ 由下式表示:

$$\begin{cases} S_n^{\text{bus,右后}}(t + \Delta t) = S_n^{\text{bus,右后}}(t) + \\ \Delta t(v_n^{\text{bus}} - v_{n-1}^{\text{bike}}) \\ v_{n-1}^{\text{bike}}(t + \Delta t) = \max(v_{n-1}^{\text{bike}} - \Delta t b_{n-1}^{\text{bike}}, 0) \end{cases} \quad (7)$$

2 仿真模拟分析

元胞自动机模型是一种时间、空间和状态都离散的数学模型,主要由元胞、邻居、规则和元胞空间组成。

2.1 仿真模型标定

2.1.1 仿真参数

以福州市某双向八车道(包括两侧非机动车道)道路西往东路段(长 300 m)为试验对象,在天气良好的工作日晚高峰 17:50—18:50 利用无人机在高空(120 m)拍摄视频数据。常规公交车长度为 9~12 m,非机动车长度为 1.36~2 m,车道宽度为 3.5 m。为简化元胞自动机仿真模型,设定元胞尺寸为 3 m×3 m,1 个元胞占据 1 条车道。根据实际情况对仿真模型参数进行标定,标定结果见表 2。

2.1.2 仿真规则

(1) 加速。如果车辆速度 v 未达到该车辆类型的最大速度 v_{\max} ,则速度增加 1,即 $v \rightarrow \min(v + 1, v_{\max})$ 。

表 2 仿真参数标定

参数名称	仿真数值/个	实际数值	参数名称	数值
路段长度	100	300 m	公交车慢化概率	0.1
道路宽度	4	12 m	非机动车慢化概率	0.4
公交车最大速度	3	9 m/s	仿真时长	1 000 s
非机动车最大速度	2	6 m/s		

(2) 减速。如果车辆间距 d 小于该车辆速度 v ,则进行减速操作,即 $v \rightarrow \min(v, d - 1)$ 。

(3) 随机慢化。如果车辆速度 $v \neq 0$,则以概率 P 进行减速操作;否则不变,即以概率 P 使得 $v \rightarrow \min(v - 1, 0)$ 。

(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。1) 保守型换道。若车辆位于保守型换道区域,则进行保守型强制换道操作。当右侧非机动车与公交车距离大于博弈距离 D^c 时,产生随机数 $rand$,若其小于换道概率 P_{change} ,则公交车进行换道操作;当右侧非机动车与公交车距离小于博弈距离 D^c 且换道收益大于不换道收益时,公交车进行换道操作。2) 激进型换道。当车辆位于激进型换道区域且满足式(5)的要求时,进行激进型强制换道操作。

2.2 仿真结果分析

为研究非机动车密度对激进型强制换道的影响,分别在公交车密度 $K_{\text{bus}} = 1$ 和 $K_{\text{bus}} = 2$ 的情况下进行仿真。

2.2.1 非机动车道轨迹图

在其他参数不变的情况下,通过改变路段公交

车密度和非机动车密度等参数进行仿真,记录非机动车道车辆轨迹数据,获得不同车辆密度下非机动车道轨迹图(见图 3)。

对比图 3(a)、(c)、(e),在 $K_{\text{bus}} = 1$ 的情况下,公交车进站仅受右侧非机动车交通流状态的影响,在非机动车密度 $K_{\text{bike}} = 4$ 的情况下交通运行状态良好,未出现明显排队;随着非机动车密度的增加,公交站点处排队长度明显增大,直至 $K_{\text{bike}} = 30$ 时,部分时段公交停靠站上游出现多车等待现象,影响范围增大至 10 个元胞,非机动车向内侧机动车借道超车概率增大。

对比图 3(b)、(d)、(f),在 $K_{\text{bus}} = 2$ 的情况下,当公交站点已停靠有公交车辆时,即将进站的公交车不仅受右侧非机动车的影响,还受已停靠公交车的制约,在非机动车密度较小时对整体交通流运行状态的影响较小,随着非机动车密度的增加,影响范围加大,至 $K_{\text{bike}} = 30$ 时影响范围已增加至 20 个元胞。

对比 $K_{\text{bus}} = 1$ 、 $K_{\text{bus}} = 2$ 交通流状态下车辆轨迹图,相同非机动车交通量情况下,公交车进站影响范围随着公交车密度的增大而增大,非机动车借道超车比例增大。

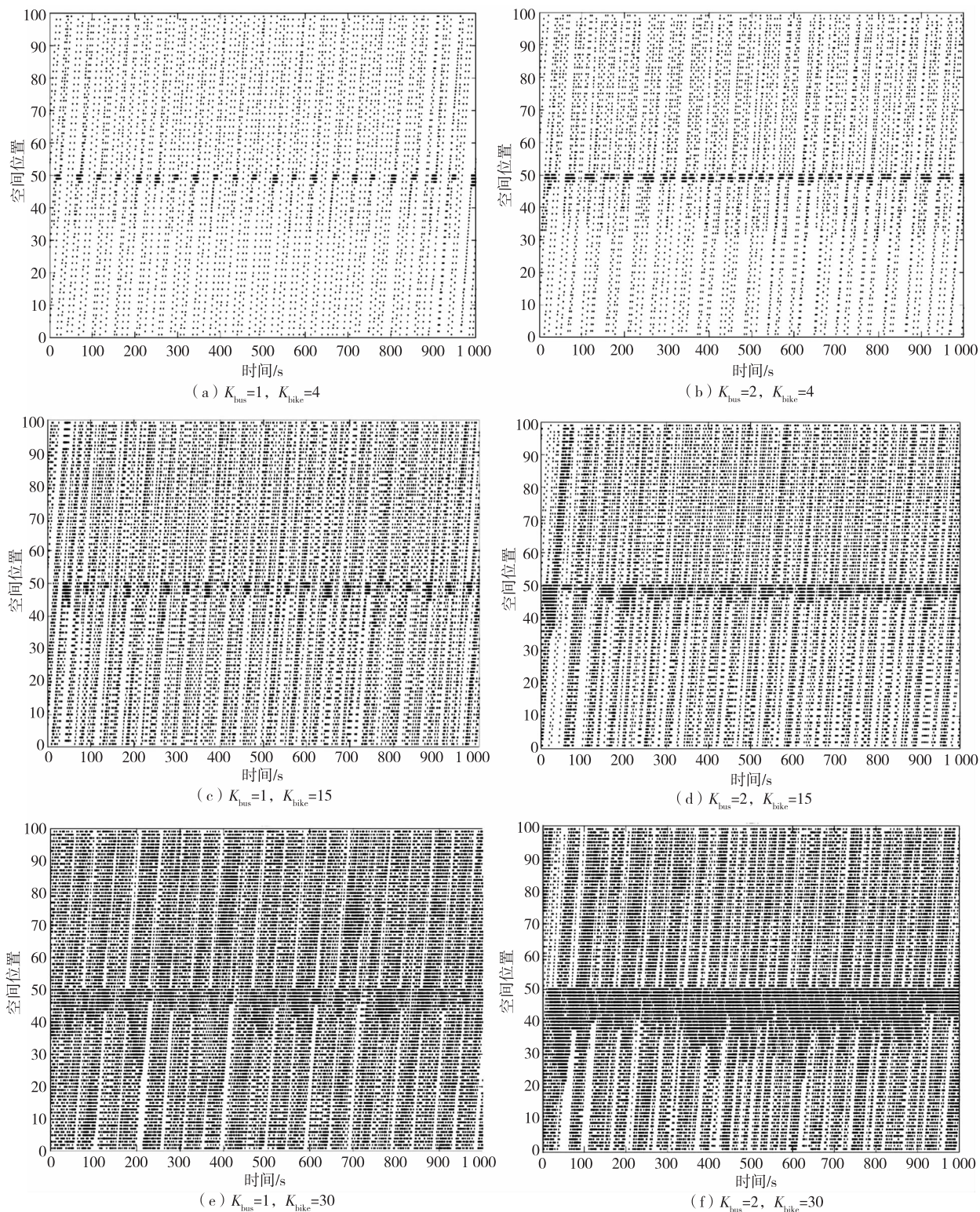


图3 非机动车道轨迹图

2.2.2 激进型换道概率

相比于激进型换道,保守型换道的碰撞风险较低,受公交车驾驶人驾驶习惯和性格影响较大,不进行过多阐述。公交停靠站及其上游区域车辆延误主

要受公交车激进型换道概率影响,为探究研究区域内非机动车密度对公交车进站换道决策的影响,分别记录不同车辆密度下公交车激进型换道概率,经过重复仿真试验,求取激进型换道概率均值(见图4)。

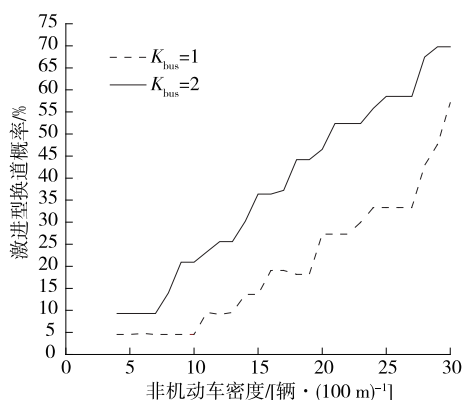


图4 激进型换道概率

由图4可知:激进型换道概率 P 随着非机动车密度增大而增大, $K_{bus}=1$ 、 $K_{bike}<7$ 时,非机动车密度增加对 P 的影响较小, $K_{bike}>7$ 时影响显著增加; $K_{bus}=2$ 、 $K_{bike}<10$ 时,非机动车密度增加对 P 的影响较小, $K_{bike}>10$ 时影响显著增加; $K_{bus}=2$ 时公交车激进型换道概率均大于 $K_{bus}=1$ 时公交车激进型换道概率, $K_{bus}=1$ 且 $K_{bike}>30$ 时,公交车激进型换道概率 P 皆大于50%; $K_{bus}=2$ 且 $K_{bike}>20$ 时,公交车激进型换道概率 P 皆大于50%。

3 结论

为探究公交车停靠站及其上游区域非机动车交通量对公交车进站的影响,将公交车强制换道进站停靠行为划分为保守型与激进型2种。从延误损失、风险损失2个方面分别计算公交车与非机动车的博弈收益,建立公交车保守型强制换道决策模型。考虑相邻非机动车最小安全间距,建立公交车激进型强制换道决策模型。通过轨迹图描述公交车强制换道对非机动车流的影响过程,通过仿真探究不同非机动车流量对公交车激进型强制换道比例的影响。结果表明,随着非机动车密度的增加,激进型强制换道概率增大,当激进型强制换道集中出现时,轨迹图中的停车波持续时间较长、影响范围更大。

该文未考虑路段中其他交通对象。下一步研究中将结合其他交通对象分析公交车、非机动车换道影响,分析不同交通流量情况下交通流运行特征,并以此为理论基础,研究非机动车后绕式公交站台设置条件。

参考文献:

- [1] 邱得玲.基于元胞自动机的公交站台设置形式研究[D].镇江:江苏大学,2019.
- [2] 朱停汀.城市道路车辆换道模型及换道决策研究[D].

锦州:辽宁工业大学,2018.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] DENG J H,FENG H H.A multilane cellular automaton multi-attribute lane-changing decision model[J].Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2019,529:121545.
- [7] 何伟,余诚强,杨命雅.不同公交站类型对交通的影响分析[J].闽江学院学报,2016,37(5):131-138.
- [8] 梁士栋,赵淑芝,马明辉,等.路段上游直线式公交站点对车辆延误影响分析[J].北京理工大学学报,2017,37(3):267-273.
- [9] 杨晓芳,方向明.考虑驾驶心理的机非冲突行为研究[J].华东交通大学学报,2020,37(6):81-87.
- [10] 刘贺子,陈涛.基于视频识别的混合非机动车速度分布模型[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(2):144-151.
- [11] 戈林娟.基于机非冲突分析的非机动车道连续通行空间优化研究[D].长沙:中南林业科技大学,2020.
- [12] 刘岩,付川云,王伟.基于贝叶斯 Logistic 模型的非机动车对机动车干扰行为研究[J].安全与环境学报,2020,20(6):2045-2051.
- [13] 邱得玲,常玉林,孙超,等.双向两车道直线式公交站台延误研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2020,34(3):60-65.
- [14] 周志俊.直线式公交车停靠站对交通流随机延误的影响[J].山东交通学院学报,2019,27(2):24-29.
- [15] 邱凌云.直线式公交站区域自行车交通行为研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [16] 钟异莹,陈坚,邵毅明,等.强制性换道的空间特征对分流区交通流的影响[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(5):114-120.
- [17] 刘悦棋.公交车进出站换道研究综述[J].交通运输工程与信息学报,2016,14(4):119-124.
- [18] 李海舰,徐梁,刘真余,等.公交车进出站对路段交通流干扰行为微观仿真的建模与实现[J].交通建设与管理,2008(10):64-69.

收稿日期:2021-07-30