文章编号:1674-2974(2025)07-0177-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025077

考虑自动驾驶公交车影响的车辆换道行为研究

赖元文 ,丘勋涛 ,郭榕彬 ,王书易 †,张博深
(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116)

摘 要:针对城市道路上自动驾驶公交车与人工驾驶小汽车混合行驶交通流中跟驰、换道和停靠等行为的特殊性,以元胞自动机理论为基础,提出了一种考虑自动驾驶公交车影响的车辆换道模型,研究含有自动驾驶公交车的混合交通流特征.针对自动驾驶车辆行驶特性,并结合公交车在停靠站路段的行驶特征,对路段进行划分,分别构建自动驾驶公交车、常规公交车和小汽车的跟驰和换道规则,基于数值仿真实验对不同交通密度、公交车比例下的交通流特征进行了分析.结果表明,相同的道路交通条件下,港湾式公交停靠站对道路交通干扰较小,自动驾驶公交车的换道和停靠行为对道路交通的影响小于常规公交车.

关键词:交通工程;换道模型;公交停靠站;自动驾驶公交车;元胞自动机
中图分类号:U491.2 **文献标志码**:A

Research on Lane-changing Behavior Considering the Influence of Automated Driving Bus

LAI Yuanwen, QIU Xuntao, GUO Rongbin, WANG Shuyi†, ZHANG Boshen
(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: For the special characteristics of the behaviours of following, changing lanes and stopping in the mixed traffic flow of automated driving bus and manually driven cars, a vehicle lane-changing model considering the influence of automated driving bus is proposed based on the theory of cellular automata to study the characteristics of the mixed traffic flow containing automated driving bus. Based on the driving characteristics of automated vehicles and combined with the driving characteristics of buses at bus stops, the road sections were divided and the following and lane changing rules for autonomous buses, normal buses, and cars were constructed, respectively. Based on numerical simulation experiments, the traffic flow characteristics under different traffic densities and bus ratios were analysed. The results show that under the same road traffic conditions, the bay bus stop interferes less with the road traffic, and the lane changing and stopping behaviours of the automated driving bus have less impact on the road traffic than those of the normal bus.

Key words: traffic engineering; lane-changing model; bus stop; automated driving bus; cellular automata

* **收稿日期**:2024-04-16
基金项目:福州大学引进人才科研启动基金资助项目(511335), Project of Scientific Research Start-up Fund for Talents Introduced by Fuzhou University(511335)
作者简介:赖元文(1981—),男,福建上杭人,福州大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: syw@fzu.edu.cn

公交车出行作为城市公共交通的重要组成部分,是许多城市解决交通问题的重点发展方向之一.近年来,随着自动驾驶技术的发展,自动驾驶出租车、公交车开始在道路上试运行.相对于小汽车,公交车具有行程线路、运行时间和道路环境固定等特点,契合自动驾驶技术的应用需求[1].因此,有必要对自动驾驶公交车跟驰和换道行为进行细致分析,研究自动驾驶公交车的行驶对道路交通的影响,为缓解未来自动驾驶公交车的运行和停靠过程所带来的影响提供理论依据.

元胞自动机是一种在时间、空间和状态上离散的、抽象的动力学计算模型,在一些微观场景的研究方面起到了较大的作用,并广泛应用于交通领域的仿真研究当中,得到国内外学者的认可.Nagel 等[2]提出了最经典的 NaSch 模型,包括车辆加速、减速、随机慢化及位置更新等规则,并常与 Gipps[3]提出的经典车辆换道模型进行结合,能够很好地模拟实际交通运行情况.在后续的研究中,学者们在此基础上对跟驰和换道规则进行改进,陆续提出 VE 模型、TT 模型、FI 模型和 STCA 模型[4]等车辆换道模型,并考虑了公交车、非机动车和信号交叉口等因素的影响[5-7],对道路交通进行仿真模拟.随着车联网和自动驾驶技术的发展,元胞自动机在近年也被应用于自动驾驶车辆混合交通流的研究中.现有研究较多对反应时间的不同标定[8],或是设置不同的换道判断规则[9]和不同的随机慢化概率[10]体现手动驾驶与自动驾驶的区别,并考虑了高速路、交织区、交叉口、专用车道等多种道路情况[11-14],以及大型车、列队车辆等车辆影响[15-16],研究自动驾驶车辆的交通环境特征.

然而,公交车作为道路交通的重要组成部分,其换道和停靠等行为都会对交通产生重大影响,却较少在研究中被考虑,且多数元胞自动机交通模型的换道规则仅以车辆间的相对距离为判断,没有考虑到车辆的速度与相对位置的移动,导致对换道时机的判断不够准确.

本文在 NaSch 模型和 Gipps 模型的基础上,结合自动驾驶车辆特性,构建一种含有自动驾驶公交车和公交车停靠站的车辆换道模型,分析常规公交车和自动驾驶公交车的跟驰、换道和停靠等行为对混合行驶交通流的影响,能够对未来自动驾驶技术的发展、混行交通流的管理与控制等提供参考,对提高公交服务质量、缓解交通拥堵等具有现实意义.

1 模型建立

1.1 元胞尺寸选择

元胞自动机模型仿真交通流的研究中,根据研究对象的不同,对单个元胞尺寸的范围设定在 0.5~8 m.较大的元胞尺寸(3.75 m、5 m、7.5 m 及以上)导致仿真中车辆的加速度和减速度过大,影响仿真的效果.较小的元胞尺寸(0.5~1.5 m)能够改善仿真中的车流波动情况,但会增大仿真的计算量,降低仿真的运行效率.综合考虑车辆运行过程、道路宽度、仿真精度和运行效率,设定模型中单个元胞的长度为 2 m,宽度为 3.5 m.

1.2 车辆与路段模型设定

模型设定理想环境下,路段中含有两种类型混合交通流:自动驾驶公交车与小汽车、常规公交车与小汽车,不存在其他车辆.其中,自动驾驶公交车的等级设定为 L4 以上,有完全接管驾驶的能力.综合考虑我国相关规范规定对车辆尺寸的规定,以及行驶过程中驾驶员对前后车距的预留空间,模型统一设定小汽车长度为 6 m,常规公交车和自动驾驶公交车的长度为 10 m.

设定路段全长为 1 km,由三条车道并列组成,每个车道由 500 个元胞构成,在第 3 车道及车道外设置公交停靠站.为简化模型,路段中不设置交叉口、人行横道及公交专用道.小汽车在三条车道上均可自由行驶,公交车考虑到进站停靠的需求,仅在第 2 车道和第 3 车道行驶.结合公交车停靠站区域的行驶特性,将路段分为五个区域,如图 1 所示.

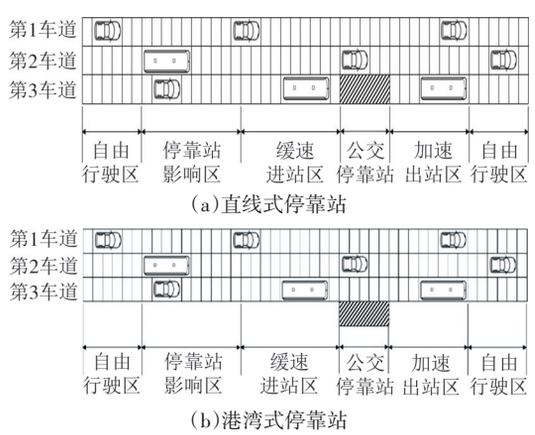


图 1 公交停靠站路段元胞自动机模型

Fig.1 Cellular automata model for bus stop section

根据实际调研并结合相关文献[17],对路段区域长度进行划分,分别取自由行驶区、停靠站影响区、缓速进站区、公交停靠站和公交加速出站区的长度为38 m、150 m、70 m、10 m、50 m和340 m.

1.3 车辆运行规则

1.3.1 车辆跟驰规则

NaSch模型将车辆的跟驰分为加速、减速、随机慢化和位置更新四个步骤[2]. 考虑Gipps模型提出的安全距离理论[3],本文将车辆的跟驰规则分为四个步骤:判断安全速度、速度更新、随机慢化以及位置更新.具体规则如下.

1) 判断安全速度

$$[v_{n,\mathrm{safe}}(t)]=\left[-b_{\max}\mu+\sqrt{b_{\max}^2\mu^2+v_{n,\mathrm{before}}^2(t)+2b_{\max}d_n}\right] \tag{1}$$

式中:$v_{n,\mathrm{safe}}(t)$表示第n辆车在t时刻跟随前方车辆行驶所需保持的安全速度;d_n表示第n辆车与前方车辆之间的距离;$b_{\max}$表示车辆最大减速度;$v_{n,\mathrm{before}}(t)$表示t时刻前方车辆的行驶速度;μ表示驾驶员反应时间;函数$[x]$表示不超过x的最大整数. 参考相关研究[18-19],当车辆为小汽车和常规公交车时,反应时间μ取值为1.5 s;当车辆为自动驾驶公交车时,反应时间μ取值为0.5 s.

2) 速度更新

加速过程:若t时刻第n辆车的速度小于安全速度和车辆的最大速度,驾驶员期望更高的行驶速度,车辆将以加速度a进行加速:

$$v_n(t+1)=\min\{v_n(t)+a,v_{\max},v_{n,\mathrm{safe}}(t)\} \tag{2}$$

减速过程:若t时刻第n辆车的速度大于安全速度,为了保证行驶的安全性,驾驶员将采取制动措施减速至安全速度:

$$v_n(t+1)=\max\{v_n(t)-b_{\max},v_{n,\mathrm{safe}}(t)\} \tag{3}$$

匀速过程:若t时刻第n辆车的速度等于安全速度,车辆将保持该速度继续行驶:

$$v_n(t+1)=v_{n,\mathrm{safe}}(t) \tag{4}$$

3) 随机慢化

设定随机慢化概率P_{slow},当系统随机生成的概率小于P_{slow}时,车辆将以常规减速度b进行减速:

$$v_n(t+1)=\max\{v_n(t)-b,0\} \tag{5}$$

自动驾驶车辆具有交通数据快速处理以及定速巡航的功能,运行过程较为稳定,理想情况下可实现随机慢化概率为0[20]. 因此,模型设定自动驾驶公交车的速度更新不含随机慢化步骤.

4) 位置更新

从t时刻至t+1时刻,第n辆车在道路上的横坐标位置由$X_n(t)$更新为$X_n(t+1)$,其中$v_n(t+1)$表示第n辆车在t+1时刻的行驶速度.

$$X_n(t+1)=X_n(t)+v_n(t+1) \tag{6}$$

1.3.2 小汽车换道规则

1) 正常换道

STCA换道模型[4]提出,当相邻车道前方空间更大,且移动过程中不与相邻车道后方车辆发生碰撞的情况下,车辆将执行换道. 小汽车在道路上行驶的自由度较高. 结合Gipps安全距离理论[3]对STCA换道模型进行改进,小汽车的正常换道过程如图2和式(7)所示:

$$\begin{cases}v_{n,\mathrm{safe}}(t)<v_n(t)\\ v_{n,\mathrm{othersafe}}(t)>v_{n,\mathrm{safe}}(t)\\ v_{n,\mathrm{back}}(t)\leqslant v_{n,\mathrm{backsafe}}(t)\end{cases} \tag{7}$$

$$v_{n,\mathrm{othersafe}}(t)=\left[-b_{\max}\mu+\sqrt{b_{\max}^2\mu^2+v_{n,\mathrm{other}}^2(t)+2b_{\max}d_{n,\mathrm{before}}}\right] \tag{8}$$

$$v_{n,\mathrm{backsafe}}(t)=\left[-b_{\max}\mu+\sqrt{b_{\max}^2\mu^2+v_n^2(t)+2b_{\max}d_{n,\mathrm{back}}}\right] \tag{9}$$

式中:$v_{n,\mathrm{othersafe}}(t)$表示小汽车在目标车道上的安全行驶速度;$v_{n,\mathrm{other}}(t)$表示目标车道前方最近车辆的速度;$v_{n,\mathrm{back}}(t)$表示目标车道后方最近车辆的速度;$v_{n,\mathrm{backsafe}}(t)$表示若小汽车换至目标车道,目标车道后方车辆所需要的行驶安全速度;$d_{n,\mathrm{before}}$表示小汽车与目标车道前方最近车辆的距离;$d_{n,\mathrm{back}}$表示小汽车与目标车道后方最近车辆的距离.

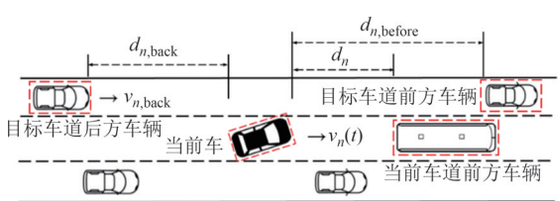


图2 小汽车正常换道示意图

Fig.2 Normal lane change of cars

在实际道路交通中,即使在某时刻满足了换道条件,驾驶员也并不一定选择换道[21]. 因此,当小汽车前方车辆类型为小汽车、常规公交车或自动驾驶公交车时,分别设定换道概率为P_{carfree1}、P_{carfree2}和P_{carfree3}.

2) 协作换道

当相邻车道上的交通状态不满足安全条件时,

驾驶员可向后车发出换道信号,后车也有可能配合前车的换道行为.因此,小汽车的协作换道规则如图3和式(10)表示:

$$\begin{cases} v_{n,\text{safe}}(t) < v_n(t) \\ v_{n,\text{othersafe}}(t) > v_{n,\text{safe}}(t) \\ v_{n,\text{back}}(t) > v_{n,\text{backsafe}}(t) \\ v_{n,\text{back}}(t) - b_{\max} \leqslant v_{n,\text{backsafe}}(t) \end{cases} \tag{10}$$

$$v_{n,\text{back}}(t+1) = v_{n,\text{backsafe}}(t) \tag{11}$$

小汽车协作换道规则与正常换道规则的不同在于,目标车道后方车辆的速度$v_{n,\text{back}}(t)$小于两车之间的所需要保持的安全速度$v_{n,\text{backsafe}}(t)$,不能确保车辆换道过程中不发生碰撞,因此,需要后方车辆减速至安全速度,从而保证换道过程的安全性.当小汽车后方车辆类型为小汽车、常规公交车或自动驾驶公交车时,分别设定协作换道概率为P_{carco1}、P_{carco2}和P_{carco3}.

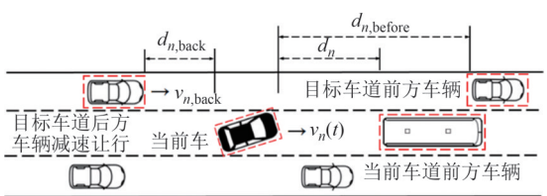


图3 小汽车协作换道示意图

Fig.3 Collaborative lane change of cars

1.3.3 公交车换道规则

与小汽车不同,公交车在道路上的换道会受到公交停靠站影响.此外,在面对不同的交通情况时,公交车驾驶员的换道意愿也不相同.因此,本文基于公交车运行特点,将含有公交停靠站的路段分为5个区域,每个区域的换道规则和换道概率不同.

1) 自由行驶路段换道规则

①正常换道.

在自由行驶路段上,公交车不受公交停靠站影响.对于常规公交车,其正常换道的规则和换道动机与小汽车相同.当常规公交车前方车辆类型为小汽车和常规公交车时,分别设定正常换道概率P_{busfree1}和P_{busfree2}.

自动驾驶公交车可以根据传感器、车载雷达、车载终端与路侧单元等设备获取道路范围L_c内所有车辆的速度与位置信息,并同时对多个对象进行计算与判断[22-23].在自由行驶时,自动驾驶公交车将不断检测前方L_c范围内前车道和相邻车道的车辆平均速度情况.因此,自动驾驶公交车在自由行驶区的正常换道规则为:

$$\begin{cases} v_{n,\text{safe}}(t) < v_n(t) \\ v_{n,\text{othersafe}}(t) > v_{n,\text{safe}}(t) \\ v_{n,\text{back}}(t) \leqslant v_{n,\text{backsafe}}(t) \\ \bar{v}_o(t) > \bar{v}_a(t) \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} \bar{v}_a(t) = \dfrac{v_{a,1}(t) + v_{a,2}(t) + \cdots + v_{a,k}(t)}{k} \\ \bar{v}_o(t) = \dfrac{v_{o,1}(t) + v_{o,2}(t) + \cdots + v_{o,m}(t)}{m} \end{cases} \tag{13}$$

式中:$\bar{v}_a(t)$、$v_{a,k}(t)$和k分别代表t时刻自动驾驶公交车当前行驶车道关注范围内的车辆平均速度、第k辆车的速度和车辆总数;$\bar{v}_o(t)$、$v_{o,m}(t)$和m分别代表t时刻自动驾驶公交车相邻车道关注范围内的车辆平均速度、第m辆车的速度和车辆总数.当$\bar{v}_o(t) > \bar{v}_a(t)$时,且此时相邻车道上的交通条件满足正常换道规则,自动驾驶公交车将进行换道.

②协作换道.

对于常规公交车,自由行驶路段上的协作换道规则与动机和小汽车相同.当常规公交车后方车辆类型为小汽车和常规公交车时,分别设定协作换道概率P_{carco1}和P_{carco2}.对于自动驾驶公交车,出于行驶安全的考虑,在不满足安全换道条件的情况下不进行换道,即在自由行驶时不考虑协作换道.

2) 停靠站影响区动态概率换道规则

常规公交车在接近公交停靠站时,其换道动机及规则和自由行驶路段相同,但换道意愿会随着公交停靠站的接近而变化[24].因此模型设定,在停靠站影响区,当满足换道条件时,常规公交车以动态换道概率P_b进行变换车道,主要分为式(14)所示的两种情况.

受公交停靠需求的影响,行驶在第2车道的公交车需要在公交停靠站换至第3车道,方便进站停靠,如图4所示,这会给公交车驾驶员造成一定的心理影响.因此,在常规公交车不断行驶接近公交停靠站过程中,公交车驾驶员的换道概率表示为:

$$\begin{cases} P_{b23} = 1 - (1 - P_0)\dfrac{d_b}{L} \\ P_{b32} = P_0\dfrac{d_b}{L} \end{cases} \tag{14}$$

式中:P_{b23}和P_{b32}分别表示停靠站影响区常规公交车从第2车道换至第3车道和第3车道换至第2车道的换道概率;L为停靠站影响区的长度;d_b为常规公交车至停靠站影响区末端的间距;P_0为停靠站影响区常规公交车在停靠站影响区的初始换道概率.由式(14)可以看出,常规公交车与停靠站影响区末端

之间的距离d_b越小,驾驶员选择越倾向于换至第3车道,并避免换至第2车道.

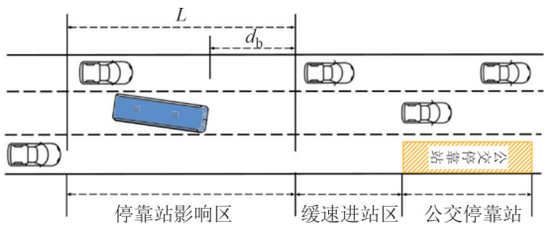


图4　公交车停靠站影响区换道示意图

Fig.4　Lane change of buses in stop impact section

3)　缓速进站区强制换道规则

出于对行驶安全、乘客舒适性及换道需求的考虑,公交车在缓速进站区时需要以较为安全的速度v_{slow}行驶:

$$v_n(t+1)=\begin{cases}v_{slow}, v_{n,safe}(t)\geqslant v_{slow}\\ v_{safe}, v_{n,safe}(t)<v_{slow}\end{cases}\tag{15}$$

缓速进站区已非常接近公交停靠站,公交驾驶员的换道需求非常强烈,若此时公交车已在第3车道行驶,则不再变换车道.若公交车仍在第2车道行驶,满足换道条件时将以100%的概率进行换道.若公交车行驶至缓速进站区段末端却仍未换至第3车道,公交车将停车等待换道.具体换道规则如下.

①正常换道.

此时公交车的换道动机不再是为了取得更高的行驶速度,而是为了进站停靠,换道条件仅考虑与第3车道前方和后方车辆的距离是否满足最低安全需求,即不发生碰撞,且不考虑前方车辆类型,换道规则为:

$$\begin{cases}d_{n,before}>1\\ d_{n,back}>\min(v_{n,back}(t)+a, v_{max})\end{cases}\tag{16}$$

②协作换道.

若公交车与第3车道后方车辆间距离并不满足安全换道条件,则需要后方车辆减速让行,才能换道驶入第3车道行驶,换道规则为:

$$\begin{cases}d_{n,before}(t)>1\\ d_{n,back}(t)\leqslant\min(v_{n,back}(t)+a, v_{max})\\ v_{n,back}(t)-b_{max}\leqslant d_{n,back}(t)\end{cases}\tag{17}$$

$$v_{n,back}(t+1)=d_{n,back}(t)\tag{18}$$

发生协作换道时,后方车辆将减速至式(18)计算得到的速度,且不再进行换道.当常规公交车后方车辆类型为小汽车和常规公交车时,分别设定缓速进站区协作换道概率为P_{busco3}和P_{busco4}.

③停车等待.

若公交车行驶至缓速进站区段末端仍未换入第3车道,将会在原地停车等待,当换道条件满足$d_{n,back}>\min(v_{n,back}(t)+a, v_{max})$时,方可换道进入停靠站.

1.3.4　公交车进出停靠站规则

1)　港湾式停靠站

港湾式停靠站需设置额外的道路区域,即额外的纵坐标,除公交车停靠外,车辆不可出现在该额外区域内.当停靠站未被占用时,公交车可从第3车道换道进入停靠站.完成停靠后,在满足式(19)的安全条件下,公交车可换至第3车道离开停靠站.

$$\begin{cases}d_{n,before}>1\\ d_{n,back}\geqslant\min(v_{n,back}(t)+a, v_{max})\end{cases}\tag{19}$$

2)　直线式停靠站

直线式停靠站设置在第3车道上,因此停靠站的纵坐标与第3车道纵坐标相同.当停靠站未被占用时,公交车可沿着第3车道直接驶入停靠站.当公交车完成停靠行为后,可沿着当前车道直接驶离公交停靠站.

1.4　车辆换道概率

为确定模型中的换道概率取值,考虑到换道行为中驾驶员的主观性,针对不同的交通场景设置调查问题,开展问卷调研.共收集小汽车驾驶员调研问卷95份、常规公交车驾驶员调研问卷57份,根据调查结果,计算平均换道概率,如表1所示.

表1　换道概率取值

Tab 1　Probability of lane-change

概率	取值/%	概率	取值/%
$P_{carfree1}$	77	$P_{busfree1}$	66
$P_{carfree2}$	88	$P_{busfree2}$	64
$P_{carfree3}$	83	P_{busco1}	80
P_{carco1}	66	P_{busco2}	78
P_{carco2}	70	P_{busco3}	92
P_{carco3}	100	P_{busco4}	91
P_0	65	—	—

2　仿真模拟分析

2.1　仿真环境及参数设置

利用MATLAB软件,对本文模型进行编程仿真,在MATLAB软件中建立3×500数组矩阵,代表3条长1 km的车道,利用矩阵储存车辆的位置、类型和速度

等信息,并根据行驶规则编写相应的矩阵变化规则,实现模型的仿真运行.结合有关规定及相关研究[25],对仿真的参数进行取值,如表2所示.

表2 仿真参数设定

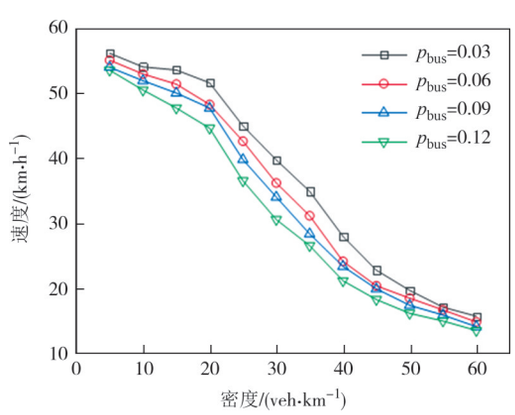
Tab.2 Simulation parameter setting

参数	参数含义	取值
T	仿真时长	1 500 s
a	车辆加速度	1 cell/s
b	车辆常规减速度	1 cell/s
b_{max}	车辆最大减速度	3 cell/s
V_{car}	小汽车速度	0~8 cell/s
V_{bus}	公交车速度	0~6 cell/s
v_{slow}	缓速进站区公交车安全行驶速度	3 cell/s
t_{bus}	公交车停靠时长	20~40 s
P_{slow}	车辆随机慢化概率	10%

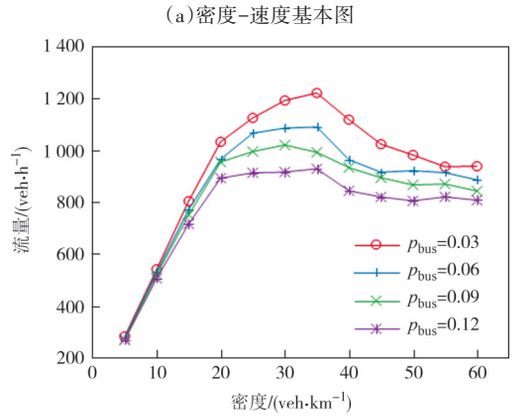
2.2 仿真结果分析

2.2.1 交通流基本情况

当道路不含公交停靠站时,道路交通不受其他因素干扰,在不同的常规公交车和自动驾驶公交车占仿真车辆总数的比例p_{bus}和p_{auto}下,其速度、流量与密度的基本图如图5和图6所示.



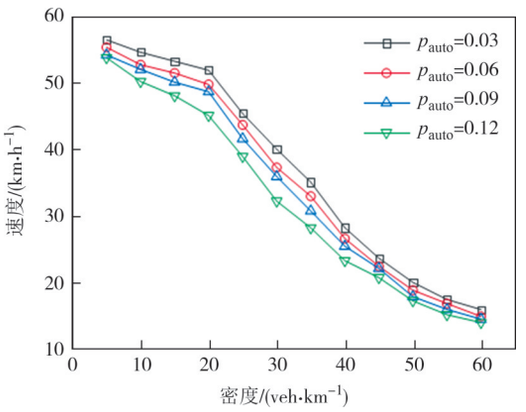
(a)密度-速度基本图



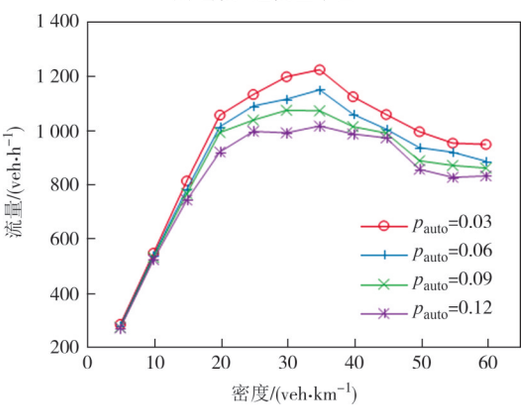
(b)密度-流量基本图

图5 不同常规公交车比例下的基本图

Fig.5 Basic diagram under different normal bus mixing ratios



(a)密度-速度基本图



(b)密度-流量基本图

图6 不同自动驾驶公交车比例下的基本图

Fig.6 Basic diagram under different automated driving bus mixing ratios

当道路交通密度较低时,车辆都能获得较为自由的行驶条件,保持较高的速度行驶.密度开始上升时,平均速度开始逐渐下降,当密度超过20 veh/km时,速度的下降趋势加快.当密度为35 veh/km时,道路通行能力达到最大值,道路交通流量开始随着密度的增长逐渐下降.因此,在后续的仿真中设定道路密度为35 veh/km.

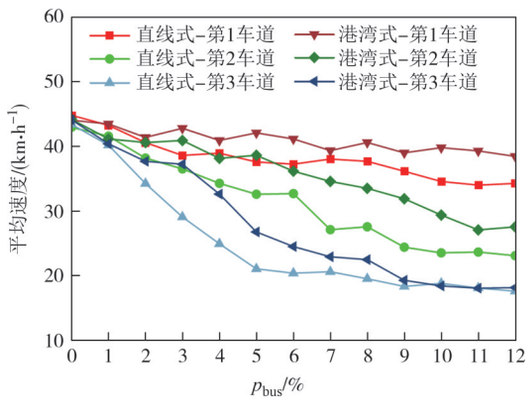
随着p_{bus}和p_{auto}的上升,道路的平均速度和流量都出现一定程度的下降,这是由于公交车的最大行驶速度比小汽车慢,且公交车占用道路空间多,公交车比例上升也就代表道路上有更多的低速车,同时也会使得同车道跟驰的小汽车无法以更快的速度行驶.

在公交车比例较低时,两种混行交通流的速度和流量的差别并不显著.随着公交车比例的上升,自动驾驶公交车混行交通流平均速度和流量逐渐高于常规公交车混行交通流.当公交车比例达到12%时,平均速度的最大差值达到2.39 km/h,流量的最大差值达到107.55 veh/h.在密度超过50 veh/km时,二者

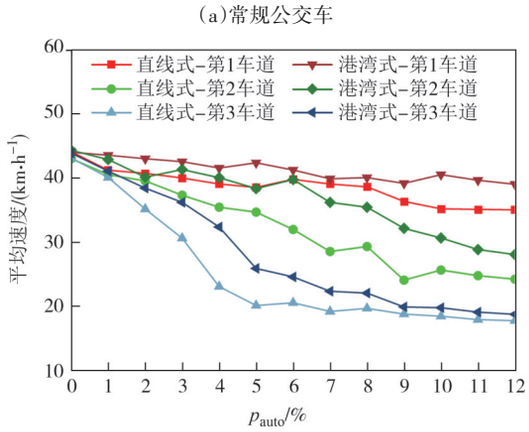
平均速度和流量的差距又再次减小.

2.2.2　车道速度

图 7 展示了各车道平均速度随公交车比例变化情况. 当公交车比例低于 4% 时,各车道的速度差别并不大. 随着公交车比例上升,各车道的车速逐渐下降,第 2 车道和第 3 车道的速度下降明显快于第 1 车道,当公交车比例大于 8% 时,第 1 车道的速度仍能保持在 40 km/h 左右,而第 2 车道的速度降至 30 km/h 以下,第 3 车道的速度降至 20 km/h 以下. 这是由于公交车需要进站停靠,在接近公交停靠站时需要低速慢行一段距离. 且随着公交车比例的上升,公交停靠站区域有可能出现排队进站以及停靠等待的现象,进一步降低了第 3 车道的速度.



(a)常规公交车



(b)自动驾驶公交车

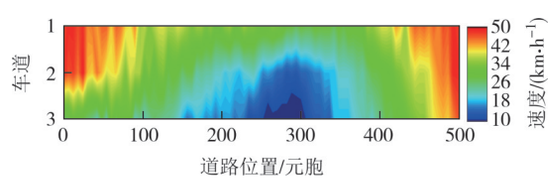
图 7　各车道平均速度图

Fig.7　The average speed in different lanes

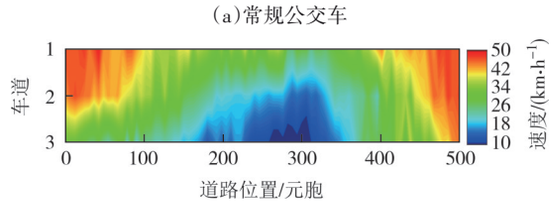
两种停靠站路段在第 1 车道的速度差距较小,而港湾式停靠站路段第 2 车道和第 3 车道的速度明显高于直线式停靠站路段,速度最大差值达到 7.8 km/h. 这是由于直线式停靠站设置在第 3 车道上,公交车的停靠会使得第 3 车道的小汽车被迫更换车道行驶,甚至有可能出现停车等待换道条件的情况,进一步降低车道平均速度. 而港湾式停靠站在公交车停靠时不占用道路行驶空间,对道路的正常交通运行影响较小. 但随着公交车比例超过 8%,港湾式停靠站也同样可能出现多辆公交车占用第 3 车道排队的现象,干扰道路交通的正常运行,两种路段的速度差距缩小.

对比常规公交车和自动驾驶公交车混行交通流的速度变化情况,当公交车比例较小时,道路交通较为自由,两种公交车混行交通流的速度差距并不大. 随着公交车比例的上升,自动驾驶公交车混行交通流的速度要略高于常规公交车,相同条件下速度最大差值分别为 3.64 km/h 和 2.57 km/h. 当公交车比例超过 8% 时,道路中公交车数量进一步增多,导致交通拥堵现象的出现,两种公交车混行交通流的速度差距也随之缩小.

图 8 和图 9 展示了公交车比例在 8% 情况下,路段各车道的速度分布情况,直线式停靠站对道路交通速度的影响范围要显著大于港湾式停靠站. 将速度低于 22 km/h 定义为低速区,在第 3 车道和第 2 车道港湾式停靠站路段的低速区范围约为[200,350]和[250,330],而直线式停靠站路段则为[150,350]和[200,350]. 在道路位置[0,200]范围内,港湾式停靠站路段的速度同样显著大于直线式停靠站路段.



(a)常规公交车



(b)自动驾驶公交车

图 8　直线式停靠站路段各车道速度分布图

Fig.8　Speed distribution of each lane on road with linear bus stops

对比两种公交车的速度分布情况,自动驾驶公交车混行交通流的速度要略高于常规公交车. 在停靠站上游区域,自动驾驶公交车能保持的安全行驶速度 $v_{n,\mathrm{safe}}(t)$ 较大,所造成的低速区范围也较小;在停靠站下游区域,受公交停靠影响,第 3 车道上的车辆较少,公交车驶离停靠站进入第 3 车道后能较为自由地加速行驶,对道路交通的影响较小,两种公交

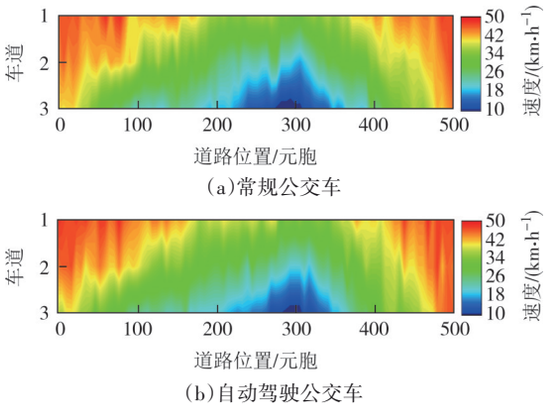


图9 港湾式停靠站路段各车道速度分布图

Fig.9 Speed distribution of each lane on road with bay bus stops

车混行交通流的速度较为接近.

2.2.3 换道次数

图10展示了路段换道次数随公交车比例变化情况.当公交车比例较低时,其行驶、换道和进出站行为对道路交通的影响较小.随着公交车比例的上升,道路上的低速车和车辆间的相互干扰也随之增多,对换道的需求也因此增长.当公交车比例超过4%时,港湾式停靠站路段的换道次数要明显少于直线式停靠站,且差异逐渐增大.当公交车比例大于8%时,停靠站区域出现了一定规模的公交排队和停车等待现象,路段的换道次数逐渐稳定.自动驾驶公交车为了更好地服务公交线路,换道行为可能更加频繁和主动,在两种停靠站路段的换道总次数比常规公交车多163次和48次,但其可以较快地融入目标车道,对前后车辆影响较小[26-28].

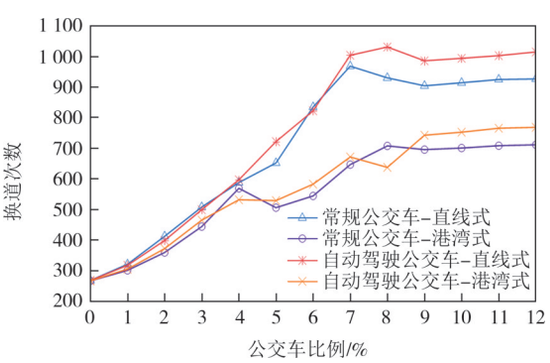


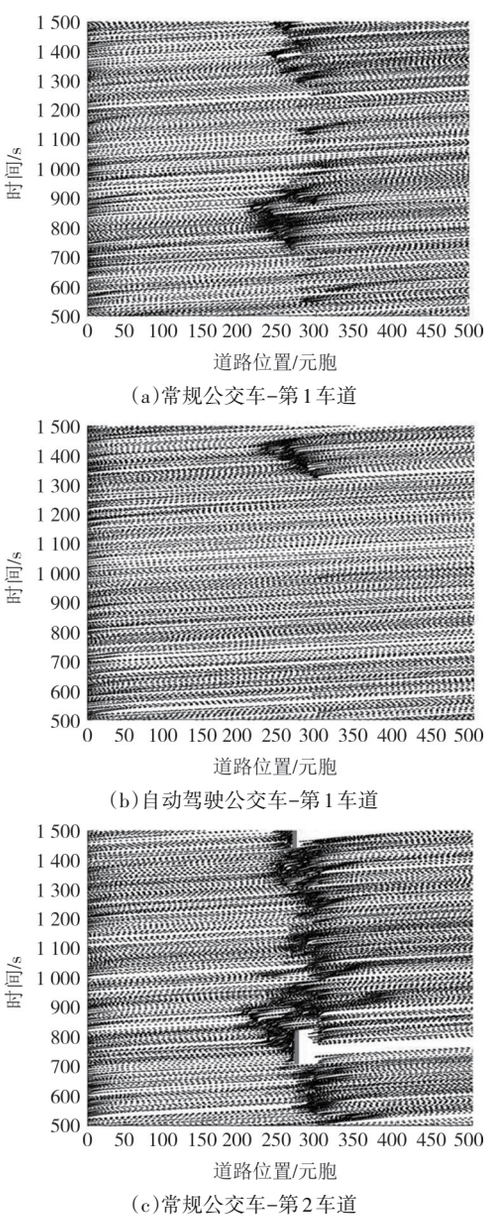
图10 公交停靠站路段换道次数变化

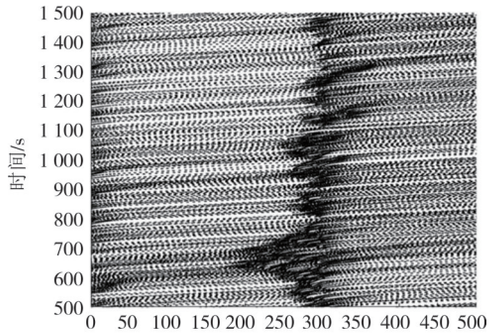
Fig.10 The number of lane changes on the road with bus stops

2.2.4 时空演化图

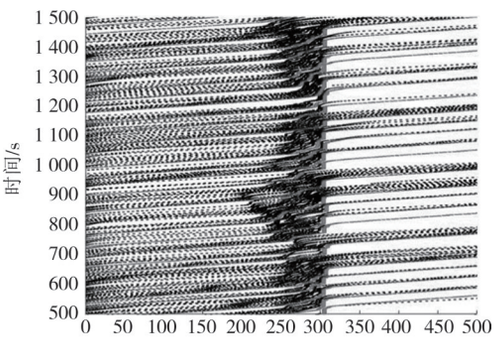
图11为公交车比例为8%的情况下,直线式公交停靠站路段的时空演化图.从图11(a)、(b)中可以看出,直线式停靠站第1车道的车辆行驶较为通畅,但仍在公交停靠站位置出现少量拥堵波动,持续一段时间后消散;第2车道受影响较为明显,如图11(c)、(d)所示,若第3车道的小汽车若遇到公交车停靠,则需要在公交停靠站位置从第3车道换至第2车道,有可能与第2车道行驶的车辆产生交通冲突与延误,出现较为明显的拥堵波动,且持续时间较长,消散速度慢;第3车道如图11(e)、(f)所示,由于公交车停靠时需占用道路空间,停靠站下游区域在这期间出现无车辆行驶的空置状态,停靠站上游区域的小汽车也需要找机会换至第2车道行驶甚至停车等待合适的换道时机,造成第3车道较为严重的拥堵和延误.

图12为公交车比例为8%的情况下,港湾式公交停靠站路段的时空演化图.从图12(a)、(b)中可以

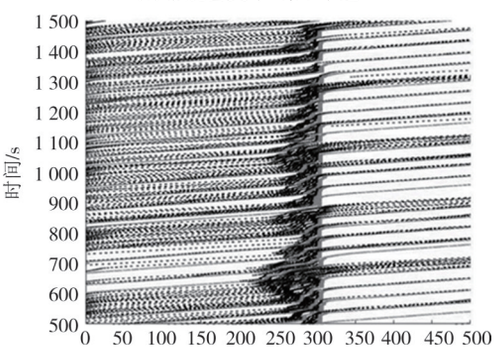




(d)自动驾驶公交车-第2车道



(e)常规公交车-第3车道



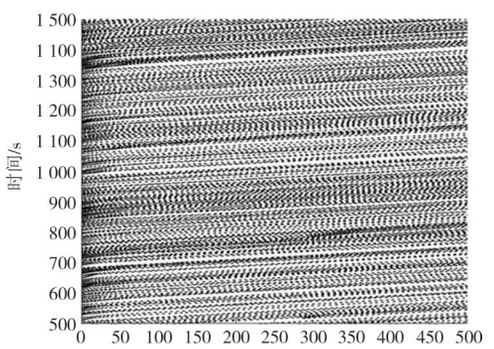
(f)自动驾驶公交车-第3车道

图 11　直线式停靠站路段时空演化图

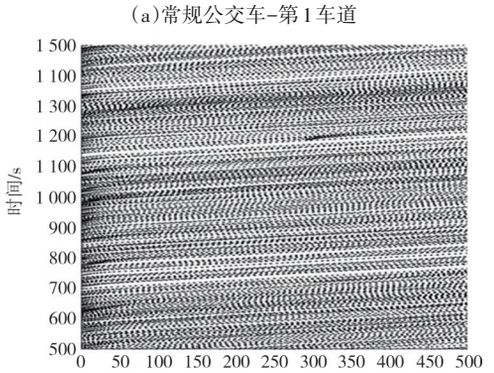
Fig.11　Spatial and temporal evolution of linear stop sections

看出,相对于直线式停靠站,港湾式停靠站路段第1车道的行驶条件通畅,几乎不存在拥堵现象;第2车道在停靠站区域同样会出现拥堵与延误,但影响范围小,持续时间短,消散较快,如图12(c)、(d)所示;由于公交停靠站设置在第3车道外,从图12(e)、(f)可以看出,在没有公交排队进站时,小汽车可直接通过公交停靠站区域,不受干扰,造成的拥堵与延误远小于直线式停靠站.

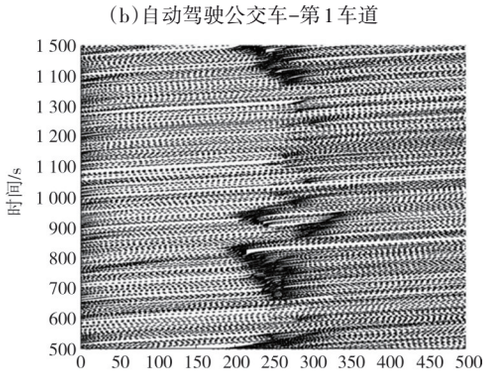
比较两种类型公交车的时空演化图,自动驾驶公交车混行交通流出现堵塞的范围和时长都要小于常规公交车混行交通流.图12(a)、(b)中,港湾式停靠站路段第1车道上两种公交车混行交通流都较为稳定,不存在拥堵和延误等现象;图11(a)、(b)和图12(c)、(d)中,道路交通都出现一定程度的拥堵现象,且自动驾驶公交车混行交通流的拥堵次数远小于常规公交车;图11(c)、(d)中,直线式停靠站路段第2车道上出现常规公交车难以换道进站,需在原地停车等待的时空演化图中断现象,严重干扰道路交通运行,而自动驾驶公交车在仿真时间内没有出现在第2车道停车等待现象;对比图11(e)、(f)和图12(e)、(f)可以观察到,虽然港湾式停靠站相对于直线式停靠站的公交停靠对道路交通的影响减小,但仍然存在拥堵带,且自动驾驶公交车混行交通流的拥堵带长度和出现次数皆少于常规公交车.相较于常规公交车,自动驾驶公交车对道路交通的干扰相对较小.



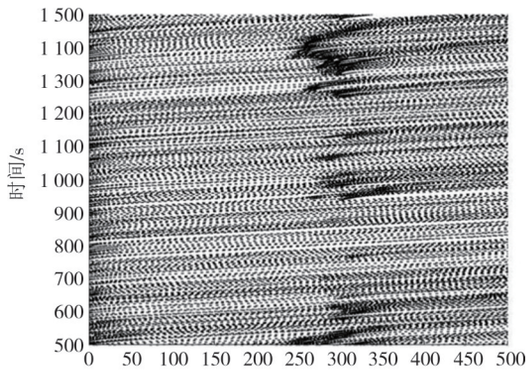
(a)常规公交车-第1车道



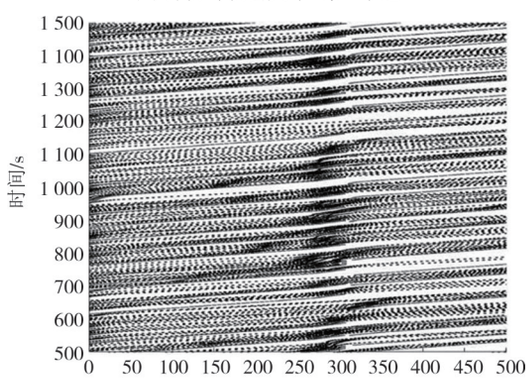
(b)自动驾驶公交车-第1车道



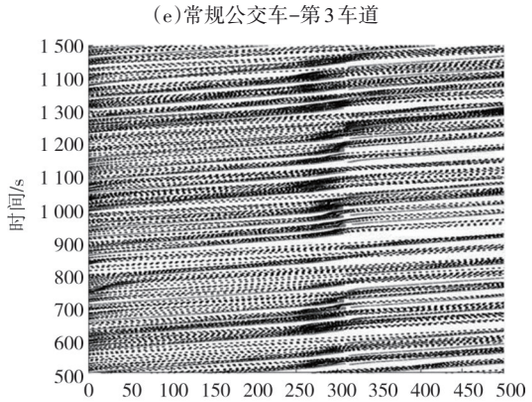
(c)常规公交车-第2车道



(d)自动驾驶公交车-第2车道



(e)常规公交车-第3车道



(f)自动驾驶公交车-第3车道

图12 港湾式停靠站路段时空演化图

Fig.12 Spatial and temporal evolution of the harbor-style stopping section

3 结 语

由于自动驾驶公交车与常规公交车在换道概率和换道策略方面存在不同,对路段整体交通流会造成一定影响,因此,本文构建公交停靠站路段元胞自动机车辆换道模型,对比自动驾驶公交车和常规公交车混合交通流场景,通过仿真模拟得出以下结论:

1)自由行驶路段密度超过20 veh/km时,路段的速度下降趋势加快,当密度达到35 veh/km时,道路的通行能力达到最大值;公交车比例达到12%时,自动驾驶公交车混合交通流和常规公交车混合交通流的平均速度最大差值达到2.39 km/h时,流量最大差值为107.55 veh/h.

2)公交停靠站路段的速度随着公交车比例的上升而下降,换道次数则相反;公交车比例超过4%时,各车道速度和换道次数的差异逐渐显著,并在公交车比例超过8%后逐渐稳定;港湾式停靠站路段的低速区范围较小,车道速度较快.

3)自动驾驶公交车混行交通流在公交停靠站路段与常规公交车的速度最大差值为3.64 km/h,换道次数最大差值为163次;常规公交车混行交通流在时空演化图出现堵塞的范围和时长都要大于自动驾驶公交车.

研究结果可为智能公交车站的规划与设计、公交线路规划等提供依据,合理部署自动驾驶公交车,发挥其效能,将更好地服务城市交通.

参考文献

[1] 于斌, 王书易, 马羊, 等. 面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10):205-225.
YU B, WANG S Y, MA Y, et al. Review of driving adaptability of intelligent vehicles to as-built roadway infrastructures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 205-225. (in Chinese)

[2] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique Ⅰ, 1992, 2(12):2221-2229.

[3] GIPPS P G. A model for the structure of lane-changing decisions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1986, 20(5): 403-414.

[4] CHOWDHURY D, WOLF D E, SCHRECKENBERG M. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1997, 235(3/4): 417-439.

[5] 钱勇生, 汪海龙. 考虑公交车辆影响的城市交通流元胞自动机模型[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14):3358-3360.
QIAN Y S, WANG H L. New cellular automaton city traffic model considering public transport vehicles affect with mixed traffic flow[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3358-3360. (in Chinese)

[6] 王欢. 考虑非机动车影响的公交停靠特性分析与仿真评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
WANG H. Research on bus stop characteristics analysis and simulation considering the influence of non-motor vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)

[7] 马新露, 李贝, 许陈蕾. 信号倒计时影响下的进口道交通流分

析与建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5): 36-44.
MA X L, LI B, XU C L. Traffic flow on entrance lanes under the influence of signal countdown [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(5): 36-44.(in Chinese)

[8] 邱小平, 马丽娜, 周小霞, 等. 基于安全距离的手动 自动驾驶混合交通流研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(4): 101-108.
QIU X P, MA L N, ZHOU X X, et al. The mixed traffic flow of manual-automated driving based on safety distance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(4): 101-108.(in Chinese)

[9] 李珣, 曲仕茹, 夏余. 车路协同环境下多车道车辆的协同换道规则[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 97-104.
LI X, QU S R, XIA Y. Cooperative lane-changing rules on multilane under condition of cooperative vehicle and infrastructure system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(8): 97-104.(in Chinese)

[10] 侯培国, 曹军. 手动驾驶-CACC 自动驾驶车辆混合交通流建模与仿真[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(6): 94-102.
HOU P G, CAO J. Modeling and simulation of human-driven and CACC autonomous vehicle mixed traffic flow [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(6): 94-102.(in Chinese)

[11] VRANKEN T, SLIWA B, WIETFELD C, et al. Adapting a cellular automata model to describe heterogeneous traffic with human-driven, automated, and communicating automated vehicles [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 570: 125792.

[12] WU W J, XIONG K B, YANG L L, et al. Combined optimization of connected and automated vehicle distribution and ramp control for weaving scenario[J]. International Journal of Modern Physics C, 2023, 34(2): 2350025.

[13] 张建旭, 胡帅, 金宏意. 信号交叉口人机混驾交通流速度控制策略建模[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(8): 1697-1709.
ZHANG J X, HU S, JIN H Y. Modeling of traffic flow velocity control strategy for human-machine mixed driving at signalized intersections [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1697-1709.(in Chinese)

[14] YE L H, YAMAMOTO T. Impact of dedicated lanes for connected and autonomous vehicle on traffic flow throughput[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 512: 588-597.

[15] 孙立山, 赵昇辉, 孔德文, 等. 自动驾驶环境下合流区大型车屏障判别条件及交通影响[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(8): 851-859.
SUN L S, ZHAO S H, KONG D W, et al. Formation conditions and effects of large vehicle barrier on confluence area under automatic driving[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(8): 851-859.(in Chinese)

[16] 蒋阳升, 王思琛, 高宽, 等. 混入智能网联车队的混合交通流元胞自动机模型[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(5): 1025-1032.
JIANG Y S, WANG S C, GAO K, et al. Cellular automata model of mixed traffic flow composed of intelligent connected vehicles' platoon[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 1025-1032.(in Chinese)

[17] 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.(in Chinese)

[18] WANG S Y, YU B, MA Y, et al. Impacts of different driving automation levels on highway geometric design from the perspective of trucks [J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021(1): 5541878.

[19] WANG S Y, MA Y, LIU J Z, et al. Readiness of as-built horizontal curved roads for LiDAR-based automated vehicles: a virtual simulation analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 174: 106762.

[20] 张建旭, 胡帅. 混有 CACC 和 ACC 车辆的连续型元胞自动机交通流模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6340-6346.
ZHANG J X, HU S. Continuous cellular automata model of traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6340-6346.(in Chinese)

[21] BI L Z, WANG C E, YANG X R, et al. Detecting driver normal and emergency lane-changing intentions with queuing network-based driver models [J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2015, 31(2): 139-145.

[22] MIAO F, HAN S, LIN S, et al. Taxi dispatch with real-time sensing data in metropolitan areas: a receding horizon control approach [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 463-478.

[23] YU M, FAN W. Optimal variable speed limit control in connected autonomous vehicle environment for relieving freeway congestion [J]. Journal of Transportation Engineering, 2019, 145(4): 04019007.

[24] 魏丽英, 吴荣华, 王志龙. 考虑公交影响的进口道元胞自动机换道模型[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1327-1330.
WEI L Y, WU R H, WANG Z L. Cellular automata lane-changing model on approach considering affects of transit vehicles [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1327-1330.(in Chinese)

[25] 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.(in Chinese)

[26] TREIBER M, KESTING A. Modeling lane-changing decisions with MOBIL [C]//Traffic and Granular Flow' 07. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 211-221.

[27] LAVAL J A, DAGANZO C F. Lane-changing in traffic streams [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(3): 251-264.

[28] CHOUDHURY C F, BEN-AKIVA M E. Modelling driving decisions: a latent plan approach [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2013, 9(6): 546-566.