

文章编号: 1005-0523(2020)01-0132-11

停靠站附近间歇式公交专用道适用条件探究

董友邦^{1,2}, 李锐^{1,2}, 曹怡^{1,2}, 陈悦新³

(1.河海大学土木与交通学院,江苏南京 210024;2.江苏省交通基础技术工程研究中心,
江苏南京 210024;3.南通理工学院建筑工程学院,江苏南通 226002)

摘要:基于 STCA 模型和公交优先权的概念,结合直线式公交停靠站附近的交通流运行特性,在优化车辆跟驰规则和换道规则的基础上,建立三车道元胞自动机车辆换道模型。运用建立的模型,分别对设置完全式公交专用道(DBL)和间歇式公交专用道(IBL)的道路交通运行情况进行局部仿真。考虑车辆换道率和公交发车频率,从基本图、时空图、平均速度和速度稳定性方面对比分析,进一步探究 IBL 策略的适用条件。结果表明,当车辆密度大于 20 veh/km 且公交车发车频率小于 200 veh/h 时,IBL 策略较 DBL 策略效果更好。此时允许部分社会车辆进出公交专用道,虽然车辆换道率更高,但并不会对路段交通流造成负面影响,反而能提升车辆通行效率和道路资源利用率,减轻交通拥堵。

关键词:直线式停靠站;间歇式公交专用道;车辆换道;元胞自动机

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.01.019

在公交优先战略的实施下,公交专用道为公交车的运行提供了一条畅通、快捷的绿色通道,符合城市公共交通优先发展的核心目标。然而,在实际应用阶段,设有公交专用道的城市路段却出现一种尴尬的现象:当公交专用道利用率低而相邻车道达到饱和甚至超饱和状态时,整条路段交通运行状况并不能得到明显改善。尤其是在车流高峰期,经常出现道路资源分配不合理的情况,此时仍拥有大量剩余通行能力的公交专用道却不能被其他社会车辆所利用,造成道路资源的严重浪费。近些年,间歇式公交专用道(intermittent bus lane, IBL)被广泛认为是可以解决这一问题的新手段,其使用可变信息标志(VMS)、嵌入路面的感应装置或无线通信来控制社会车辆进出公交专用道^[1-2]。这些策略既保证了公交车优先通行的优势,同时又减轻了周围车道交通压力。

Viegas 和 Lu^[3]最早提出通过调节交叉口信号配时来满足公交车的优先通行间歇式公交专用道系统,允许一部分社会车辆进入公交专用道行驶。Zhu^[4]通过模型仿真比较双车道完全式公交车道(dedicated bus lane, DBL)和间歇式公交车道的优劣,结果显示当公交车流量较小时,向部分社会车辆开放公交专用道会获得一定成效。Yang 等^[5]、Xie 等^[6]通过仿真软件对是否为社会车辆开放公交专用道进行仿真,通过制定动态车道分配策略改善公交系统运行效率。谢秋峰等^[7]、常玉林等^[8]提出关于间歇式公交专用进口道的控制系统,在间歇式公交专用进口道起始处动态控制公交进口道的实时开放,解决了交叉口进口道公交优先与道路资源利用的矛盾问题。邱丰、李文权等^[9]研究了一种改进的 IBL 策略对双车道道路交通流的影响,探讨了适合实施 IBL 策略的交通条件,并设想 IBL 策略在三车道的应用上效果会更好。

收稿日期:2019-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51508161);江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20181307);中国博士后基金面上项目(2018M630505)

作者简介:董友邦(1994—),男,硕士研究生,研究方向为交通控制与管理。

通讯作者:李锐(1984—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为交通运输规划与控制。

另外,由于 IBL 策略的应用,就不得不考虑公交车辆和社会车辆混行而产生的车辆换道行为。车辆换道行为是交通流理论的重要组成部分,是形成交通瓶颈的重要因素之一^[10]。Zheng、Ahn 等^[11]通过进一步研究车辆运行轨迹,得出车辆换道行为是引起交通振荡的主要原因。但 Feng 等^[12]认为车辆换道并不只是带来消极影响,他们从时间和空间两个方面对自由换道行为进行量化,探究车辆换道积极影响和消极影响的临界点。Pan 等^[13]提出了一种新型的中观多车道模型,能够同时模拟强制换道和自由换道行为,以捕捉实际多车道中的交通动态。徐良杰等^[14]通过构建城市交叉口色彩诱导视觉改善模型,改善车辆在进口道渐变段的频繁换道现象。陈峻等^[15]在考虑公交车和其他社会车辆车速明显差异的基础上,引入公交车流量、社会车辆流量、公交车比例等参数,建立了改进的混合机动车运行速度模型。魏丽英^[16]采用非对称换道规则对混合交通流中的车辆换道行为进行模拟,得出公交车影响因子的存在会明显降低车辆换道率的结论。Lee^[17]以美国地区三车道路段为例,通过数据分析得出公交车站附近自行车道的存在、公交车停靠时间和驾驶员对路段的熟悉等因素,是致使大量车辆换道行为出现的原因。

上述研究从不同场景、不同角度分别对公交专用道的利用率和车辆换道进行了研究,且大部分研究集中于城市交叉口,对公交停靠站范围路段考虑间歇式公交专用道的混合交通流研究较少。本文将 IBL 策略的应用与车辆换道影响结合起来,对两种车辆的跟驰规则和换道规则进行优化,建立三车道元胞自动机车辆换道模型。然后通过 MATLAB 编程,对 IBL 策略和 DBL 策略下直线式公交停靠站附近车辆运行状况进行局部仿真,探究设置两种不同公交专用道策略下的交通流差异。最后,考虑公交车发车频率,从基本图、时空图、平均速度和速度稳定性方面进行量化分析,进一步探究间歇式公交专用道的适用条件及发挥效果,为缓解交通拥堵、提升交通效率等策略的提出和应用提供理论支撑与决策支持。

1 模型建立

由于元胞自动机模型具有空间离散、时间离散和状态离散的特性,能够较好地反映出交通流的随机演化的特点;因此,通过制定相关规则可以较好地模拟交通流的运行规律。本文基于元胞自动机模型,考虑车辆类型、车道限制及公交停靠等因素,建立直线式公交停靠站范围路段的三车道车辆换道模型。

1.1 参数选取

为了评价两种策略下公交停靠站范围交通流的稳定性和通行效率,需要选定合适的评价参数,这些参数不仅可以在实际道路交通中调查得出,也可以从模型仿真过程中检测得到,可以进一步进行模型的相互验证。

1) 车流密度

$$\rho(t) = \frac{N(t)}{n \cdot m} \quad (1)$$

式中: n 表示车道数量; m 表示道路长度,km; $N(t)$ 表示第 t 时刻该路段所有车道上存在的车辆数,Veh。

2) 空间平均车速。空间平均车速为某个瞬时刻该段道路上所有车辆瞬时速度的平均值,便于动态关注车速变化。为了描述车辆通行效率,文章中所指的速度均指行程车速,而非行驶车速。

$$\bar{v}_i(t) = \frac{1}{N_i(t)} \cdot \sum_k^{N_i(t)} v_k(t) \quad (2)$$

式中: $\bar{v}_i(t)$ 表示第 i 车道的上所有车辆瞬时平均速度,m/s; $N_i(t)$ 表示第 t 时刻 i 车道存在的车辆数,Veh; $v_k(t)$ 表示第 k 辆车在 t 时刻的速度,m/s。

3) 交通流量。单位时间内通过某一固定点的车辆数,根据交通流理论,交通流量可以定义为车流密度与空间平均速度的乘积。

$$q = \rho \cdot \bar{v}_i(t) \quad (3)$$

4) 车辆换道率。在一定长度的路段上,单位时间内的平均换道次数占总车辆数的比例,公式如下:

$$R_c = \frac{\sum_{t=1}^T N_c(t)}{\sum_{t=1}^T N(t)} \quad (4)$$

式中: $N_c(t)$ 表示第 t 时刻内该路段内车辆换道总次数。

5) 空间速度方差

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_k^{N(t)} (v_k(t) - \bar{v}_i(t))^2 \quad (5)$$

空间速度方差反映了整个公交停靠站范围内车流的速度稳定性,方差越小,说明该路段上交通流越稳定。

1.2 跟驰规则

NS 模型是 Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年提出的一维交通流元胞自动机模型^[18]。在 NS 模型中,考虑到车辆的加速和随机慢化的情况,引入随机慢化概率,将道路划分成等大的元胞网格,以每秒移动的网格数量来定义车速,车辆跟驰为加速、减速、随机慢化、位置更新 4 个步骤。TT 模型^[19]在 NS 模型的基础上增加了慢启动规则,用以描述车辆从零速度启动时的延误现象。另外,由于 NS 模型只能模拟一条车道上的交通流情况,无法反映车辆换道的过程,故在 NS 模型基础上,Chowdhury 等^[20]引入车辆换道规则,提出了双车道元胞自动机模型(STCA 模型),并得到广泛认可。

由于公交车辆与社会车辆车型差异,在速度、启动性能和制动性能上都有所区别;因此,跟驰规则也应有所区别。一方面,驾驶员在接受信息进行判断,再到执行操作,需要一定的反应时间;另一方面,由于公交车辆需要在停靠站停靠,难免会出现阻碍该车道后车通行的情况。在没有设置完全式公交专用道的路段,社会车辆受到前面道路停靠公交车辆的阻碍,会出现急减速或变换车道的情况。综合以上因素,在 NS 模型跟驰规则的基础上,结合 TT 模型中车辆慢启动规则,增加考虑车辆类型和驾驶员反应时间,对三车道路段上车辆运行的跟驰规则进行了优化,使之更加细致地反映驾驶行为和交通流现象。

1) 加速过程

$$\left. \begin{aligned} V_n^{\text{car}}(t+1) &= \min(V_n^{\text{car}}(t) + a_n^{\text{car}}, V_{\text{max_car}}, d_n(t) - \text{carlen}_{\text{car}}) \\ V_n^{\text{bus}}(t+1) &= \min(V_n^{\text{bus}}(t) + a_n^{\text{bus}}, V_{\text{max_bus}}, d_n(t) - \text{carlen}_{\text{bus}}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $V_n^{\text{car}}(t)$ 和 $V_n^{\text{bus}}(t)$ 分别表示车辆 n 在 t 时刻社会车辆和公交车辆的速度大小; $V_n^{\text{car}}(t+1)$ 和 $V_n^{\text{bus}}(t+1)$ 分别表示下一时刻社会车辆和公交车辆的速度大小; $V_{\text{max_car}}$ 和 $V_{\text{max_bus}}$ 分别表示社会车辆和公交车辆的最大行驶速度值; a_n^{car} 和 a_n^{bus} 分别为社会车辆和公交车辆的加速度值; $d_n(t)$ 表示当前车辆与前方车辆的车头间距; $\text{carlen}_{\text{car}}$ 和 $\text{carlen}_{\text{bus}}$ 表示两种车辆的车长,故 $d_n(t) - \text{carlen}_{\text{car}}$ 即表示当前车辆与前方社会车辆的安全距离。该式表示车辆在加速过程中,车辆下一时刻的速度大小取值不能超过安全距离,以免发生碰撞。

2) 减速过程

$$\left. \begin{aligned} V_n^{\text{car}}(t+1) &= \min(V_n^{\text{car}}(t) - b_n^{\text{car}}, d_n(t) - \text{carlen}_{\text{car}}) \\ V_n^{\text{bus}}(t+1) &= \min(V_n^{\text{bus}}(t) - b_n^{\text{bus}}, d_n(t) - \text{carlen}_{\text{bus}}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: b_n^{car} 和 b_n^{bus} 分别表示社会车辆和公交车辆的减速度值。同样,减速过程中的最大速度同样不能超过安全距离。

3) 慢启动现象

$$\left. \begin{aligned} V_n^{\text{car}}(t)=0 \text{ 且 } \text{rand}(1)<P_{\text{slow}}, V_n^{\text{car}}(t+1)=0 \\ V_n^{\text{bus}}(t)=0 \text{ 且 } \text{rand}(1)<P_{\text{slow}}, V_n^{\text{bus}}(t+1)=0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: P_{slow} 表示慢启动概率; $\text{rand}(1)$ 表示计算机随机生成概率。即当车辆停下来后,不会立刻加速到原有速度,而是存在一段延误时间,当下一时刻车辆速度仍为 0 时,则近似认为车辆延误了 1 s。

4) 随机慢化

$$\left. \begin{aligned} V_n^{\text{car}}(t+1)=\max(V_n^{\text{car}}(t)-b_n^{\text{car}}, 0) \\ V_n^{\text{bus}}(t+1)=\max(V_n^{\text{bus}}(t)-b_n^{\text{bus}}, 0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)用来模拟道路上车辆随机慢化的现象,即车辆并非全是稳定匀速行驶的,会因驾驶员行驶习惯或道路情况进行随机减速。

5) 位置更新

$$\left. \begin{aligned} X_n^{\text{car}}(t+1)=X_n^{\text{car}}(t)+(1+\tau)V_n^{\text{car}}(t) \\ X_n^{\text{bus}}(t+1)=X_n^{\text{bus}}(t)+(1+\tau)V_n^{\text{bus}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $X_n^{\text{car}}(t)$ 和 $X_n^{\text{bus}}(t)$ 分别表示社会车辆和公交车辆的当前位置; $X_n^{\text{car}}(t+1)$ 和 $X_n^{\text{bus}}(t+1)$ 分别表示社会车辆和公交车辆在下一时刻的位置; τ 表示驾驶员反应时间,这里在 NS 模型的基础上额外增加了驾驶员反应时间,使之更加符合实际。

1.3 换道规则

驾驶员的换道行为一般受到换道动机和换道条件的制约。换道动机与驾驶员自身特性和相关交通法律法规有关,而换道条件反映实际的交通状况,为客观实在。STCA 模型据此给出了双车道路段上的车辆换道规则,但其主要针对高速公路,对城市三车道路段的应用效果不明显。故考虑城市路段存在直线式公交停靠站的情况下,将 STCA 模型扩展到三车道并建立新的换道规则。

由于我国实行左侧超车规则,所以一般来说,在城市三车道路段上,社会车辆在满足换道条件时优先向左换道,即社会车辆驾驶员向左换道的概率大于向右换道;另外,对于设置完全式公交专用道的路段来说,公交车辆仅在公交专用道行驶,不受社会车辆的干扰;而对于设置间歇式公交专用道的路段来说,允许一部分符合换道条件的社会车辆进入,不可避免会存在一些相互干扰,但若前方存在公交停靠站,社会车辆驾驶员一般会选择让行公交车,提前换道驶离专用道,以减少造成不必要的交通冲突。

另外,由于元胞自动机模型中空间和时间是离散的,故文章中公式所涉及距离与速度均不考虑量纲,直接以单位时间元胞数量进行比较。换道动机和安全条件相关要求如下:

换道动机:

$$\left. \begin{aligned} d_o > d_n \\ d_n - \text{carlen}_{\text{car}} < \min(v(t)+1, v(t)_{\text{max}}^{\text{car}}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: d_n 表示当前车道车辆与前车的车头间距; $\text{carlen}_{\text{car}}$ 表示社会车辆车身长度; $d_n - \text{carlen}_{\text{car}}$ 即表示车辆之间的安全距离; d_o 表示当前车辆与相邻车道前方车辆的车头间距; $v(t)_{\text{max}}^{\text{car}}$ 表示社会车辆的最大速度值。公式(11)表示当相邻车道有更大的空间且当前车道前方受阻时,会产生换道动机。

安全条件:

$$d_b - \text{carlen}_{\text{car}} > v(t)^b \quad (12)$$

式中: d_b 表示当前车道车辆与相邻车道后车的车头间距; $v(t)^b$ 表示当前车辆相邻车道后方车辆的当前速度值。此处表示车辆换道前,驾驶员会考虑到相邻车道后方的车辆速度值小于安全距离,以保证换道安全。

当车辆同时满足换道动机与换道条件时,将会以一定的概率进行换道。以设置间歇式公交专用道的路段为对象,允许社会车辆进出公交专用道,分别给出 IBL 策略下不同车道社会车辆的换道规则。其中,图 1 为 IBL 策略下中间车道社会车辆换道示意图。

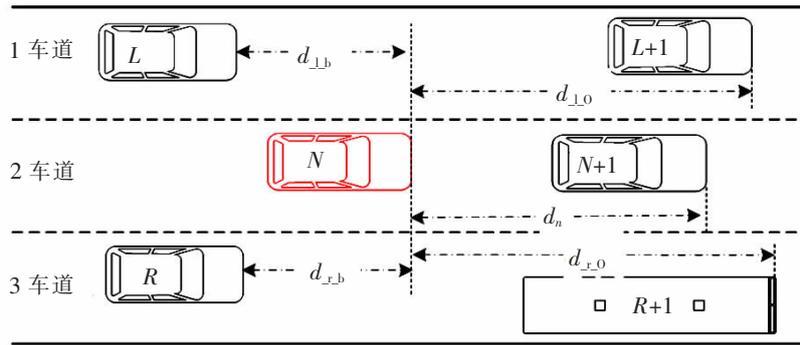


图 1 IBL 策略下中间车道车辆换道示意图

Fig.1 Schematic diagram of lane change of vehicles in the middle lane under IBL strategy

1) 内侧车道换道规则。内侧车道即图 1 中的 1 车道,一般来说在此车道上行驶环境较好,车辆速度较快。当该车道车辆前方受到阻碍,判断中间车道是否符合换道条件和安全条件,以概率 P_{rc} 向右进行换道。具体换道规则如下:

$$\left. \begin{aligned} d_n - carlen_{car} < \min(v(t)+1, v(t)_{\max}^{car}) \\ d_{r,o} > d_n \\ d_{r,b} - carlen_{car} > v(t)^b \\ rand(1) \leq P_{rc} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $d_{r,o}$ 表示相邻右侧车道前方车辆与当前车道车辆的车头间距; $d_{r,b}$ 表示相邻右侧车道后方车辆与当前车道车辆的车头间距; P_{rc} 表示符合条件的车辆向右侧车道换道的概率。

2) 中间车道换道规则。中间车道即图 1 的 2 车道,当该车道车辆前方受到阻碍,判断左侧车道和右侧车道是否符合换道条件和安全条件,若只有左侧车道符合条件,则以概率 P_{lc} 向左换道;若只有右侧车道符合条件,则以概率 P_{rc} 向右换道;若左侧车道和右侧车道均符合条件,则优先以概率 P_{lc} 向左换道。具体换道规则如下:

1) 向右换道:

$$\left. \begin{aligned} d_n - carlen_{car} < \min(v(t)+1, v(t)_{\max}^{car}) \\ d_{1,o} > d_n \\ d_{1,b} - carlen_{car} > v(t)^b \\ rand(1) \leq P_{rc} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2) 向左换道:

$$\left. \begin{aligned} d_n - carlen_{car} < \min(v(t)+1, v(t)_{\max}^{car}) \\ d_{r,o} > d_n \\ d_{r,b} - carlen_{car} > v(t)^b \\ rand(1) \leq P_{rc} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $d_{1,o}$ 表示相邻左侧车道前方车辆与当前车道车辆的车头间距; $d_{1,b}$ 表示相邻左侧车道后方车辆与当前车道车辆的车头间距; P_{lc} 表示符合条件的车辆向左侧车道换道的概率,其他参数含义同上。

3) 外侧车道换道规则。外侧车道即图 1 的 3 车道,设置为公交专用道,若为完全式公交专用道(DBL),则该车道只允许公交车辆行驶,禁止其他社会车辆进入,故此时该车道内不存在换道行为。若为间歇式公交专用道(IBL),则允许其他车道部分社会车辆进入;若公交专用道内社会车辆前方受到阻碍,判断是否符合换道条件和安全条件,以概率 P_{lc} 向左进行换道驶出。此时社会车辆换道规则如下:

$$\left. \begin{aligned} d_n - carlen_{car} &< \min(v(t)+1, v(t)_{max}^{car}) \\ d_{\perp a} &> d_n \\ d_{\perp b} - carlen_{car} &> v(t)^b \\ rand(1) &\leq P_{lc} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

2 仿真及分析

2.1 仿真参数设置

为便于仿真分析,先做如下假设:

1) 模拟路段长度含公交停靠站在内为 200 m,不考虑交叉口。

2) 公交停靠站泊位为 3 个泊位,公交车辆到站停靠状态简化为以 1 cell/s 低速前进,且认为每辆公交车停靠时间相等。

3) 不考虑车辆换道执行过程时间差异。

在模拟过程中,结合实际调查数据,设每个元胞长度为 2 m,仿真路段为 100 个元胞(200 m),车道数为 3;公交停靠站含 3 个泊位,长度为 15 个元胞(30 m),公交车辆平均停靠时间为 20 s;社会车辆在公交停靠站范围内的最大速度为 10 个元胞(72 km/h);公交车速度最大为 6 个元胞(43.2 km/h);类似的,其他参数设置如表 1 所示。仿真时长为 6 000 s,仿真时间间隔 1 s,取后 2 000 s 仿真数据进行分析;整个模拟过程采用周期边界条件。

表 1 模型参数
Tab.1 Parameters of model

参数	社会车辆	公交车
大小 $carlen/(cell)$	2	4
最大速度 $v_{max}/(cell/s)$	10	6
加速度 $a/(cell/s)$	2	1
减速度 $b/(cell/s)$	2	1
向右换道概率 P_{rc}	0.6	0
向左换道概率 P_{lc}	0.9	0
随机慢化概率 P_s	0.3	0.3
慢启动概率 P_{slow}	0.5	0.7
反应时间 τ/s	0.5	0.5

2.2 DBL 和 IBL 策略对比分析

由于在文献[4]中已经得出在车辆中高密度时 IBL 策略优于不设置专用道的策略,所以这里暂不考虑无公交专用道的道路交通流场景,只对比 DBL 和 IBL 策略下交通流的差异。

首先,设置公交车发车频率为 100 veh/h,IBL 策略下允许符合换道条件的社会车辆以 0.8 的概率进入公交车专用道,分别对 DBL 和 IBL 策略下道路交通流进行仿真模拟,得到密度-流量基本图和密度-换道率变化图如图 2、图 3 所示。从图 2 可以看出,随着车辆密度的增加,两种专用道设置策略下流量呈先增加后下降的趋势,符合基本图的规律。其中,车辆密度在 0~20 veh/km 时,DBL 策略和 IBL 策略的流量增长趋势基本吻合;而随着车辆密度的继续增加,IBL 策略下交通流量相比 DBL 策略更高,流量提升最高达 25 %(车辆密度 43 veh/km 处);当流量达到最高点时,DBL 策略的密度为 35 veh/km,随后开始进入拥堵状态,而 IBL 策略

下车辆密度接近 50 veh/km 才进入拥堵状态。由此说明,IBL 策略至少在车辆密度 35~50 veh/km 内应用效果更好,因为此时车流还没有进入拥堵状态。

另外,从图 3 可以看出,随着车辆密度的增加,车辆换道率也随之不同程度地先增加后减少。同样,在 20 veh/km 密度以下,两种策略下的车辆换道率基本相同,此时 1,2 车道上的车流均为自由流,换道需求较低;而随着密度增加,IBL 策略下的车辆换道率大于 DBL 策略,这是因为允许部分社会车辆进出公交专用道后,车辆换道率提升。当车辆密度达到 80 veh/km 以上的高密度时,两种策略下的车辆换道率再次重合,说明此时道路已经十分拥堵,难以满足换道条件。再结合图 2 来看,当车辆密度在 20~40 veh/km 时,IBL 策略相比 DBL 策略来说,增加的车辆换道率并没有对通过的车辆流量造成负面影响,反而提高了该路段通行能力,这符合 Feng^[12]关于换道行为的论断。

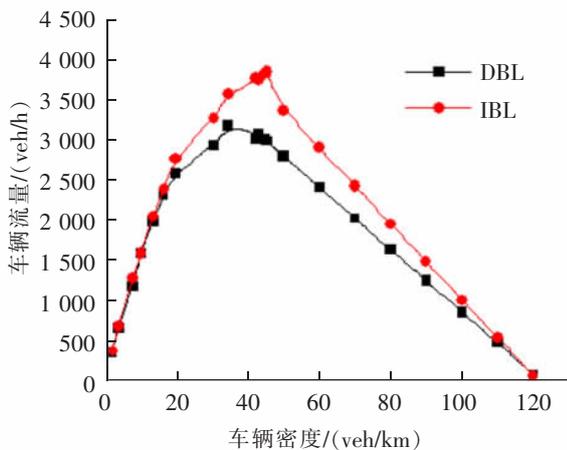


图 2 流量-密度对比图

Fig.2 Comparison of flow and density of vehicles

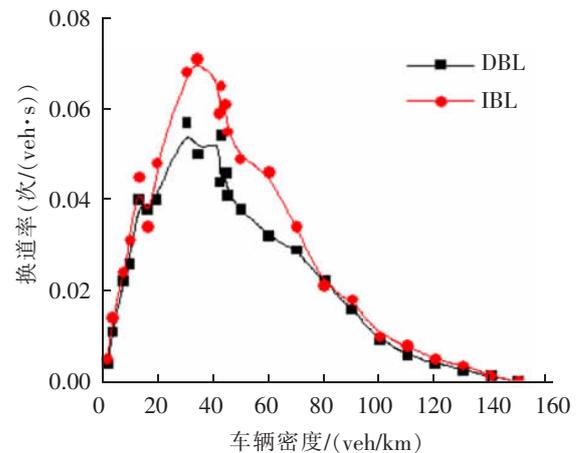
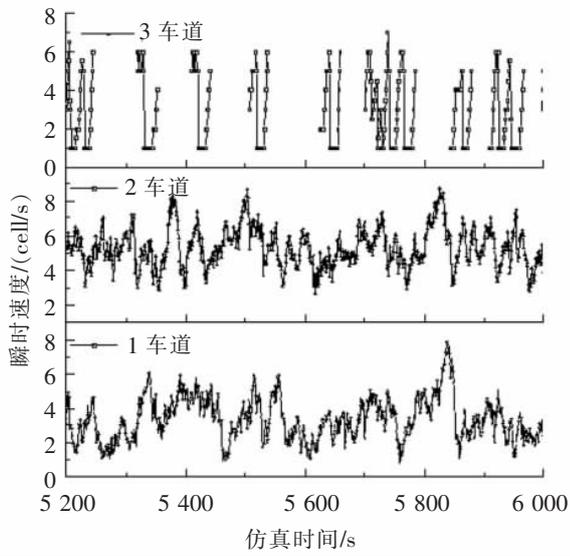


图 3 换道率对比图

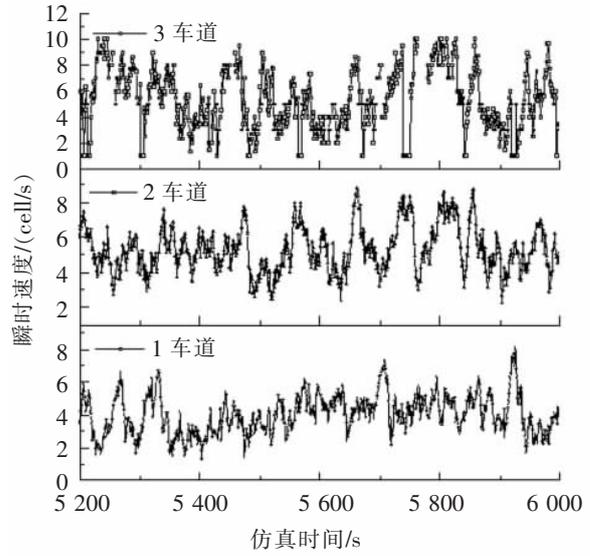
Fig.3 Comparison of lane change frequency and density of vehicles

在上述仿真基础上,其他条件保持不变,DBL 策略下流量最高点时的车辆密度为 35 veh/h,对两种策略下车辆运行速度情况进行仿真分析,探究在 DBL 策略转变为 IBL 策略时流量的提升是否对交通流运行效率造成影响。选取 5 200~6 000 s 仿真时间,得到两种策略下不同车道车辆运行瞬时速度变化,如图 4 所示。在图 4(a)中,1,2,3 车道的车辆平均速度分别为 3.34,5.29,2.81 cell/s,空间速度方差分别为 1.54,1.29,3.28,此时 1,2 车道交通流量已达到饱和,接近拥堵状态;由于 2 车道车辆换道进入 1 车道概率大于 1 车道车辆换道驶出概率,所以 1 车道较 2 车道更为拥堵。3 车道(即完全式公交专用道)内车辆瞬时速度为 1~6 cell/s,分布较为稀疏,道路资源利用率低。因为该车道只存在流量为 100 veh/h 的公交车辆,且公交车辆需要进站停靠,所以速度极差较大。

在 IBL 策略下,允许中间车道符合换道条件的社会车辆以 0.8 的概率进入公交专用道,得到不同车道车辆瞬时速度分布图如图 4(b)所示。此时进入专用道的社会车辆的流量为 355 veh/h,1,2,3 车道的平均速度为 4.02,5.39,5.31 cell/s,相较于 DBL 策略下的车辆平均瞬时速度均有不同程度的提高,3 条车道内车辆总的平均速度增幅为 28%。空间速度方差分别为 1.41,1.68,5.44,相较于 DBL 策略,2,3 车道速度稳定性下降,这是因为此时换道率增加造成速度波动。3 车道(间歇式公交专用道)帮忙分担了 1,2 车道的交通压力,车辆流量增加的同时平均速度也有所提升,但空间速度方差增幅明显,这是因为此时专用道上公交车辆和社会车辆混行,由于两种车型速度差异和公交车辆需要停靠的特性,造成这一数值的增加。所以此时以公交车辆的运行速度为主要指标,进一步分析社会车辆对公交运行效率的干扰。在 IBL 策略下得出的公交车辆平均速度为 2.62 cell/s,相较于 DBL 策略的公交平均速度降幅不超过 10%,对公交车辆运行影响不大,这是因为 IBL 策略依旧是以公交优先为目标,社会车辆必须让行公交车辆;而对比该路段整体平均速度和流量增幅均为 25%以上,可一定程度上认为该路段整体通行效率是提升的。



(a) DBL

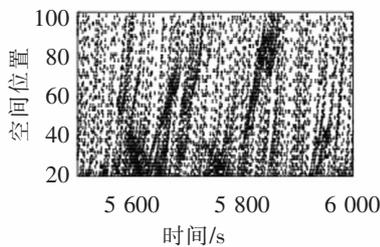


(b) IBL

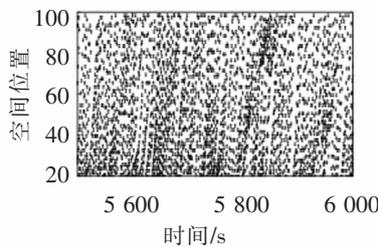
图 4 DBL 策略和 IBL 策略下速度分布图

Fig.4 The velocity of vehicles under DBL and IBL strategies

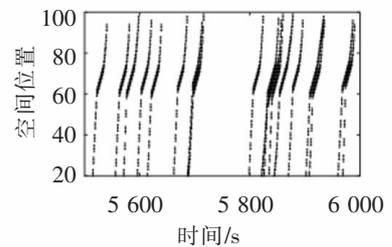
直观的 DBL 策略和 IBL 策略下的交通流时空演化图如图 5、图 6 所示。从图 5 可以看出,在 DBL 策略下 1 车道车流出现多处交通瓶颈,2 车道车流相对稳定,3 车道由于只允许公交车辆行驶,造成道路资源的严重浪费。再对比图 6,比较直观地看出 1 车道车流的交通瓶颈明显减少,2 车道变换不大,3 车道在增加道路通行能力的前提下,社会车辆的进出对公交车辆的正常运行并没有造成显著影响。所以,通过对比两种策略下车流时空演化图,更加直观地验证了上述分析得出的一些结论。



(a) 1 车道时空图



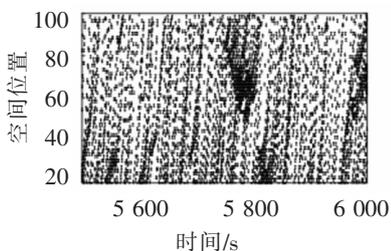
(b) 2 车道时空图



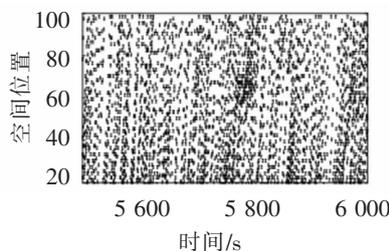
(c) 3 车道时空图

图 5 DBL 策略下 3 条车道时空分布图

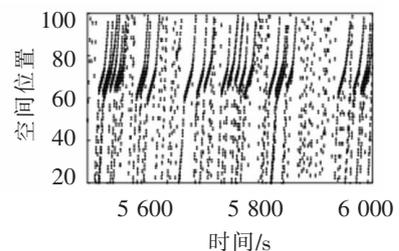
Fig.5 Time-space evolution of three lanes under DBL strategy



(a) 1 车道时空图



(b) 2 车道时空图



(c) 3 车道时空图

图 6 IBL 策略下 3 条车道时空分布图

Fig.6 Time-space evolution of three lanes under IBL strategy

综合以上分析,IBL 策略在车辆密度大于 20 veh/km 时,通过该路段的流量较 DBL 策略更高;在车辆密度为 35 veh/km,公交车发车频率为 100 veh/h 时,允许部分符合换道条件的社会车辆进出公交专用道,不仅

减轻其他车道交通压力,而且对该路段公交车辆平均速度影响不大,总体上提升该路段的道路通行能力。接下来将进一步探究 IBL 策略的适用条件。

2.3 IBL 策略的适用条件

保持车辆密度为 35 veh/km,公交车辆发车频率为 100 veh/h,改变允许进出专用道的车辆流量,继续进行仿真模拟,得到流量与换道率随进出专用道车辆流量变化的对比图,如图 7 所示。由图中可以得知,随着进入专用道的车辆增加,换道率随之增加,路段流量先增加后减少。这是因为在公交专用道内,虽然公交车辆密度较低,但仍需进行停靠,而进入专用道的社会车辆在受到公交车停靠阻碍时,又会寻找机会换道驶出专用道,因此换道率增加;在进入专用道的车辆流量达到 600 veh/h 后,车辆换道率继续增加,此时路段内车辆频繁进行换道,造成交通流紊乱,车辆平均速度降低,继而通过该路段的交通流量降低。因此,允许进入公交专用道的社会车辆是有限制的,如果进入的车辆太多,不仅不能达到提升路段通行能力的作用,反而与“公交优先”的理念相悖,得不偿失。

另外,公交车发车频率是影响可进出专用道社会车辆数的一个显著因素。结合上述分析步骤和评价标准,在车辆密度为 35 veh/km 下,通过设置不同公交车发车频率逐一对流量、平均速度、空间平均速度和时空图进行仿真分析,最终得到不同公交车发车频率下的最优进出专用道车辆流量图,如图 8 所示。这里评价可进出专用道最优流量的标准是:允许进出车流量能提升该路段整体流量和平均速度均为 20%以上,对公交车平均速度的影响不超过 10%,且从车辆时空图来看不会出现较大紊乱。当然,这里的标准只是提供一个参考举例,具体应结合实际应用场景和应用成本进一步研究。由图 8 可以得出,随着公交车辆发车频率的增加,可进出专用道的最优流量减少,尤其是公交车发车频率大于 200 veh/h 后,允许进入专用道的流量趋于稳定,说明此后 IBL 策略的优势提升已经不明显。

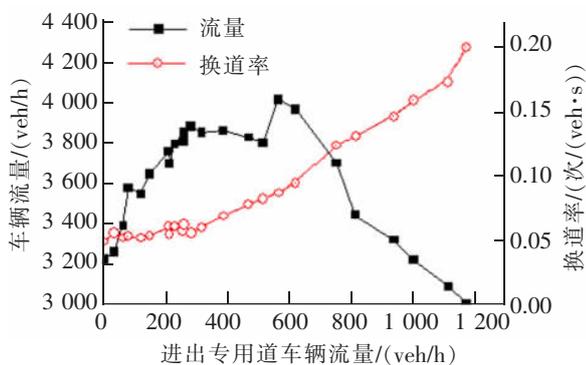


图 7 流量与换道率随进出专用道车辆流量变化对比图
Fig.7 Flow and lane change frequency with the flow in and out of the bus lane

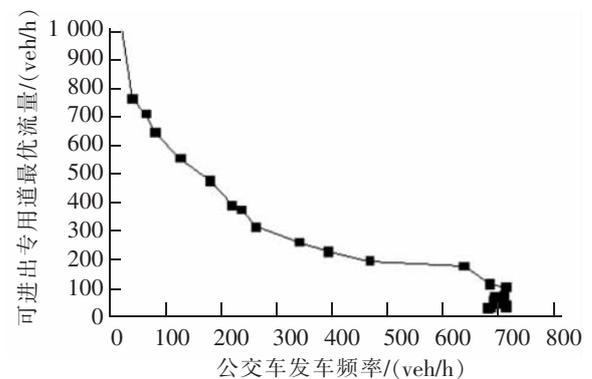


图 8 可进出专用道最优车辆流量随发车频率变化图
Fig.8 The optimal flow in and out of the bus lane with the departure frequency of buses

总之,从以上分析得出,若道路达到设置公交专用道的标准,车辆密度在 20 veh/km 以上,尤其是在 DBL 策略下达到流量峰值的车辆密度为 35 veh/km 时,IBL 策略的应用效果更好,其表现在:在保证“公交优先”的前提下,提高道路资源利用率、公交停靠站路段道路通行能力和车辆通行效率,缓解非公交专用道的交通压力,减轻交通拥堵。当公交车辆发车频率在 200 veh/h 以上时,虽然采用 IBL 策略相较于 DBL 策略依然有优势,但这种优势开始减弱,此时需要结合策略实施难度和一系列的经济性分析来决定是否值得采用 IBL 策略。

3 结论

考虑公交车辆和社会车辆的车型差异,通过优化车辆跟驰规则和换道规则,建立了三车道元胞自动机车辆换道模型,并对直线式公交停靠站附近路段的交通流进行仿真分析,比较设置完全式公交专用道和间歇式公交专用道的道路交通流情况,并尝试探讨了该情境下适合实施 IBL 策略的交通条件。研究发现,间歇

式公交专用道在一定条件下可以提升道路通行效率和道路资源利用率。当车辆密度大于 20 veh/km 且公交车发车频率小于 200 veh/h 时,设置间歇式公交专用道比设置完全式公交专用道效果更好。但是,允许社会车辆进出公交专用道的流量也不是没有限制的,当进入的车辆过多时,会显著提升路段上车辆的换道率,进而阻碍公交车辆的正常运行,加剧交通拥堵。所以,在 IBL 策略实施下,例如可以优先让载满 3 人的社会车辆进出公交专用道,提升人均出行效率,发挥其最大效果。

作为一种新型城市道路公交优先策略,IBL 在大规模应用之前还需要做很多工作。由于城市交通人、车、路和交通环境复杂,文章只探究了公交停靠站附近路段层面的 IBL 策略应用情况,将来还需进一步对整条路段甚至路网方面继续研究。另外,随着未来通信技术的发展,尤其是 5G 技术的商用,自动驾驶技术最终或将实现多车互联。以后不仅可以帮助车辆之间进行位置、速度、行驶方向和行驶意图的沟通,还可利用车辆间的无线互联,让多个车辆进行协作式决策,为间歇式公交专用道的应用提供更加完善的技术支持。

参考文献:

- [1] EICHLER M,DAGANZO CF. Bus lanes with intermittent priority: strategy formulae and an evaluation[J]. Transportation Research Part B, 2006, 40(9): 731-744.
- [2] GIRAO PS,ALEGRIA F,VIEGAS J, et al. Wireless system for traffic control and law enforcement[C]//International Conference on Industrial Technology, Mumbai, India, 2006: 1768-1770.
- [3] VIEGAS J, LU B. The Intermittent Bus Lane signals setting within an area[J]. Transportation Research Part C, Emerging Technologies, 2004, 12(6): 453-469.
- [4] ZHU H B. Numerical study of urban traffic flow with dedicated bus lane and intermittent bus lane[J]. Physica A, 2010, 389(16): 3134-3139.
- [5] YANG HONG,WANG WEI. An innovative dynamic bus lane system and its simulation-based performance investigation[C]//IEEE, Intelligent Vehicles Symposium, 2009: 105-110.
- [6] XIE XIAOYAN, CHIABAUT N, LECLERCQ L. Improving bus transit in cities with appropriate dynamic lane allocating strategies [J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2012, 2307(48): 1472-1481.
- [7] 谢秋峰,李文权,贾晓欢,等. 设置间歇式公交专用进口道的流量条件研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012, 10(2): 117-124.
- [8] 常玉林,董艳涛,张鹏. 间歇式公交专用进口道的优化控制系统研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(31): 96-100.
- [9] QIU FENG, LI WENQUAN, ZHANG JIAN, et al. Exploring suitable traffic conditions for intermittent bus lanes[J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49(3): 309-325.
- [10] CASSIDY M J, RUDJANAKANOKNAND J. Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 2005, 39(10): 0-913.
- [11] ZHENG ZUDUO, AHN S, CHEN DANJUE, et al. Freeway traffic oscillations: Microscopic analysis of formations and propagations using Wavelet Transform[J]. Transportation Research Part B, 2011, 45(9): 1378-1388.
- [12] FENG SHUMIN, LI JINYANG, DING NING, et al. Traffic paradox on a road segment based on a cellular automaton: impact of lane-changing behavior[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 428: 90-102.
- [13] PAN T L, LAM W H K, SUMALEE A, et al. Modeling the impacts of mandatory and discretionary lane-changing maneuvers[J]. Transportation Research Part C, Emerging Technologies, 2016, 68: 403-424.
- [14] 徐良杰,刘志. 基于车道选择的交叉口进口道导向系统改善方法[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(1): 14-19.
- [15] 陈峻,王涛,李春燕,等. 城市公交车与社会车辆混合流速度模型及交通运行状态分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 128-

- [16] 魏丽英,吴荣华,王志龙,等. 基于混合交通流的车辆换道行为[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(5):1321-1326.
- [17] LEE J T,KWEON Y J,DITTBERNER R,et al. Drivers'lane-changing behavior at bus stops on three-lane roadways[C]//Transportation Research Board Meeting, Washington,2014.
- [18] NAGEL K,SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique I,1992,2(12):2221-2229.
- [19] TAKAYASU M,TAKAYASU H. 1/f Noise in a traffic model[J]. Fractals,1993,1(4):860-866.
- [20] 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,1997,235(3/4):417-439.

Study on the Applicable Traffic Conditions of Intermittent Bus Lanes Near Bus Stops

Dong Youbang^{1,2},Li Rui^{1,2},Cao Yi^{1,2},Chen Yuexin³

(1.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Province Research Center for Traffic and Infrastructure Engineering Technology, Nanjing 210024, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China)

Abstract: Considering the traffic flow characteristics near the on-line bus stop, a three-lane cellular automaton vehicle lane-changing model is established by optimizing car-following rules and lane-changing rules. The model is based on the STCA model and emphasizes the bus priority. Using the established model, the road traffic operation of dedicated bus lane (DBL) and intermittent bus lane (IBL) is partially simulated. In light of the lane change frequency of vehicle and the departure frequency of buses, this paper makes a comparative analysis of the fundamental diagrams, time-space evolvment, average speed and speed stability, and further explores the applicable traffic conditions of IBL strategy. The results show that when the vehicle density is greater than 20 veh/km and the departure frequency of buses is less than 200 veh/h, IBL strategy is better than DBL strategy. At this time, some social vehicles are allowed to enter and leave the bus lane. Although the lane change frequency of vehicle is higher, it has no negative impact on the traffic flow of the section. Instead, it can improve the traffic efficiency and the utilization of road resources, and ease the traffic congestion.

Key words: on-line bus stop; intermittent bus lane; lane change; cellular automaton