

公交车停靠诱发交通瓶颈的元胞自动机模拟^{*}

李庆定 董力耘[†] 戴世强

(上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

(2009 年 2 月 5 日收到, 2009 年 2 月 26 日收到修改稿)

利用双车道元胞自动机模型, 研究公交车停靠对道路混合交通流的影响. 针对港湾式和非港湾式两种不同公交车站设置, 在开放边界下模拟了公交车停靠所产生的交通瓶颈问题, 给出了车辆入流概率-公交车比例相平面上的相图, 区分了自由流相和拥挤相, 研究了相图各区中公交车站附近的平均密度和速度分布图, 比较了两种公交车站情况下的道路交通流的动力学特征. 研究发现, 当公交车比例较小时, 与非港湾式车站相比, 港湾式车站可以显著改善车站处的交通状况.

关键词: 元胞自动机, 混合交通流, 交通瓶颈, 公交车站

PACC: 0550

1. 引 言

目前城市交通流分析引起了物理学界和应用数学界的广泛注意. 大量的交通实践表明公共交通是一种大运量、高效、节能、少污染和安全的集约式城市交通客运方式, 在有限的资金、资源投入条件下, 优先进行公共交通建设能有效缓解城市交通的供求矛盾. 因此公共交通对道路交通流的影响成为一个研究热点.

近年来人们对公交线路问题采用各种不同的模型进行研究, 如元胞自动机模型^[1-3], 车头时距模型^[4, 5], 车辆跟驰模型^[6, 7], 其中元胞自动机模型由于概念简单、计算效率高并易于模拟而得到广泛的应用^[8-15]. 最近 Zhao 等考虑了公交车站与交叉路口之间相互作用对交通系统的流量的影响, 用元胞自动机模型研究了公交车站与交叉路口之间的距离及公交车在公交车站处的停车时间对交通流量的影响^[16, 17]; 钱勇生等人采用细化元胞自动机模型讨论了主干道为单车道情况下港湾式车站下车辆随机减速概率、混合车流密度、公交车的停车时间等对车流速度和流量的影响^[18]. 这些工作已经考虑到公交车站与交叉路口之间复杂相互作用以及停车时间等因素的影响, 但是仅由公交车停靠所形成的暂时交通

瓶颈对道路交通流影响的机理尚未深入探讨, 尤其是公交车停靠在不同类型公交车站对交通流影响的定量比较, 对于真实交通中公交车站的设置有较大的参考价值.

本文利用元胞自动机模型, 研究开放边界条件下, 当公交车站处于路段中间时, 公交车停靠在两种典型公交车站所形成的交通瓶颈, 并讨论不同类型公交车站对混合交通流的影响和公交车站附近路段车流的平均密度和速度分布特征.

2. 建 模

在我国大多数城市里, 公交车站主要有两种形式, 一种是非港湾式车站(如图 1(a)所示), 即公交车直接停靠在运行车道上, 需要占用部分车道, 但是具有设计简单、建造费用较低和容易改造等优点; 另一种是港湾式车站(如图 1(b)所示), 即增设一条辅道供公交车停靠, 公交上下客在原车道外完成, 很大程度上减少了对原车道车流的影响, 但是公交车进出站不便, 有占用空间资源大、建造费用高和不易改造等缺点.

本文同时研究上述两种情况. 根据公交车行驶的特点, 我们将车道上游远离车站的部分、车站上游影响区域路段、车站和下游非车站的部分分别记为:

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB705500)和国家自然科学基金(批准号: 10532060, 10672098)资助的课题.

[†] E-mail: dly@shu.edu.cn

A, D, B 和 C 四个区,道路的具体划分情况如图 1 所示.下面对行驶规则和换道规则作进一步的说明.

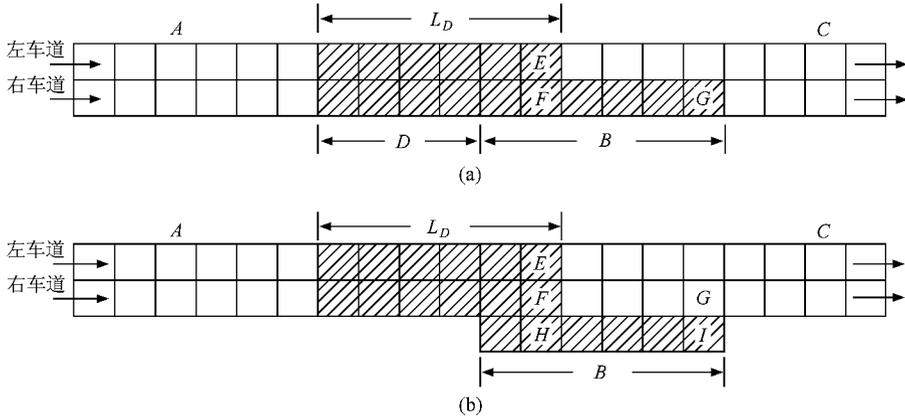


图 1 公交车站示意图 (a)非港湾式车站 (b)港湾式车站

2.1. 行驶规则

本文采用 NaSch 元胞自动机模型描述车辆的运动^[8].在这一模型中,道路划分为离散的格子(即元胞),每个元胞或者是空的,或者被一辆车占据,每辆车的速度可以取 $0, 1, 2, \dots, v_{\max}$.在 $t \rightarrow t+1$ 的过程中,模型按如下规则并行演化:1)加速 $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$;对应于司机期望以最大速度行驶的特性.2)减速 $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n)$;反映司机为了避免和前车发生碰撞而采取的减速措施.3)随机慢化,以概率 p 减速 $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;反映各种不确定因素造成的车辆减速.4)运动 $x_n \rightarrow x_n + v_n$,车辆按照调整后的速度向前行驶.其中 v_{\max} 为最大速度, x_n 和 v_n 分别表示 n 车的位置和速度, $d_n = x_{n+1} - x_n - l_{n+1}$ 表示 n 车和前车 $n+1$ 车的间距, l_{n+1} 为前方 $n+1$ 车的车长. NaSch 模型的演化规则虽然比较简单,却可以描述“幽灵塞车”等实际交通现象.

2.2. 换道规则

在双车道情况下,必须引入换道规则,将单车道的 NaSch 模型推广到双车道系统中.在模拟过程中,把每个时间步划分为两个子时间步:在第一个子步内,车辆按照换道规则进行换道;在第二个子步中,各车道上的车辆按照单车道的行驶规则进行更新.下面对换道规则做具体说明.

在 A, C 路段行驶的公交车与其他车辆一样,换道的目的是为了获得更好的行驶条件,因此公交车与其他车辆均采用对称换道规则.如果满足下式中所有 3 个条件:

$$\begin{aligned} d(i) &< \min(v(i) + 1, v_{\max}), \\ d_o(i) &> d(i) + 2, \\ d_{o,back} + v(i) &> v_{\max}. \end{aligned} \quad (1)$$

当前车将从当前车道换至目标车道上,其中 $d(i)$ 表示当前车与同一车道上相邻前车的间距, $d_o(i)$, $d_{o,back}(i)$ 表示当前车与目标车道上相邻前车和后车的间距, $v(i)$ 为当前车的速度. $d(i) < \min(v(i) + 1, v_{\max})$ 表示当前车道上没有很好的行驶条件. $d_o(i) > d(i) + 2$ 表示目标车道上的行驶状况比当前车道好得多. $d_{o,back}(i) + v(i) > v_{\max}$ 是安全条件.

当公交车行驶到车站上游附近路段时,驾驶员一般都会调整自己的驾驶状态(减速并换至目标车道).在模型中,将 D 路段称为公交车的过渡路段,公交车在 D 路段的最大速度设为 v_{\max}^D ;为了便于进站停靠,公交车驾驶员倾向于在右道上行驶,因此在 D 路段部分(非港湾式车站时,它的长度在左车道为 L_d ,右车道为 D 段加上 B 段;港湾式车站时,左右车道均为 L_d),对公交车采用特殊的换道规则.

对于在 D 路段左车道上行驶的公交车,如果满足如下两个条件:

$$\begin{aligned} d(i) &\geq 0, \\ d_{o,back}(i) + v(i) &\geq v_{o,back}, \end{aligned} \quad (2)$$

只要当前公交车换道后不会与目标车道后车发生碰撞,公交车都将从左车道换至右车道.同时右车道上行驶的公交车禁止向左换道.如果左车道上第 i 辆车为公交车,且其前车 $i+1$ 车已经超过 E 位置,则调整 $d(i) = x_E - x_i$.当左车道上公交车行驶到 E 位置的时候仍未换至右车道,则该公交车将停在该位置,以等待换道机会.公交车驶入车站(B 路段)后,

必须在车站处停靠一定的时间 T_s .

对于非港湾式车站,右车道上的公交车直接驶进公交车站,或者左车道 E 位置处的公交车直接换道进入车站.对于港湾式车站,如图 1(b)所示,公交车到了 F 后,如果 H 位置处没有公交车停靠,则该公交车将进入 B 路段 H 处停靠,以供乘客上下车.另外, B 路段上公交车行驶到位置 I 后,并且公交车在站牌处的停站时间超过了时间 T_s ,如果满足下式中的条件,

$$\begin{aligned} d_{o_back}(i) &> 0, \\ d_o(i) &> 0, \end{aligned} \tag{3}$$

则该公交车将换道至干道(右车道)上继续行驶.

2.3. 边界条件

采用如下开放边界条件:假设各车道上最左端单元对应于 $x = 1$,最左端的车辆标记为 x_{last} .入口段包括 v_{max} 个元胞,也即车辆可以从元胞 $(1, 2, \dots, v_{max})$ 进入车道.在 $t \rightarrow t + 1$ 的时间步内,当道路上车辆位置更新完成后,监测车道上最左端车辆及最右端车辆的位置 x_{last} 和 x_{lead} ,如果 $x_{last} > v_{max}$,则速度为 v_{max} 的车将以概率 α 进入元胞 $\text{mir}[x_{last} - v_{max}, v_{max}]$,所有入流车按照一定的比例 R 设置为公交车.在车道出口采用完全开放边界条件,即当 $x_{lead} > L$ (L 是道路上最右边元胞的位置),车辆 x_{last} 将驶出系统,下一辆车成为新的头车且将无阻碍地运行.

3. 数值模拟结果与分析

在数值计算中,我们将主干道上每条车道划分为 $L = 1000$ 个元胞的一维元胞链,其中将过渡路段 D 长度为 $l_d = 30$ 将公交车站 B 长度为 $l_b = \alpha$ 车站

内最多可同时容纳三辆公交车), A 段长度为 $l_a = L/2 - l_d$.港湾式车站情况下将 C 段长度为 $l_c = L/2$,而非港湾式车站时主干道左车道中 C 区长度为 $L/2$,右车道 C 区划分为 $l_c = L/2 - l_b$ 个元胞.车辆分为普通车和公交车两种,其中普通车占据一个元胞,公交车占据两个元胞.除在过渡路段 D 内公交车减速进站的情况外,两种车均采用同样的最大速度 v_{max} .计算中使用如下模型参数为 $v_{max} = 3, v_{max}^D = 2, p = 0.26$,其中 v_{max}^D 为公交车在过渡路段的最大速度.根据交通运输合作研究项目(TCRP)19(1996)^[19],公交车在高峰区间平均停靠时间超过 30 s ,在本文中取 $T_s = 30\text{ s}$.每个元胞的实际长度为 7.5 m .一个迭代时间步对应 1 s .统计时舍去前 40000 时间步,以排除暂态影响,用此后 160000 时间步通过路段 A 内的一个虚拟探头来确定流量和速度.需要说明的是,在统计中将一辆公交车计为两辆普通车.

首先我们研究入车概率 α 与车辆流量之间的关系,图 2 给出了 4 种典型的情况.当公交车比例 $R = 0$ 时,道路上没有公交车,港湾式与非港湾式两种情况均简化为普通的双车道情况.发现当 $\alpha < \alpha_c$ 时(以 $R = 0$ 曲线为例),路段 A 上的车流仍未达到饱和状态,为自由流,当 $\alpha > \alpha_c$ 时,路段 A 上流量达到最大值(约为 0.46)并保持流量不再变化.当 $0 < R < 1$ 时为混合交通流的情形.由于公交车的停靠,不同类型公交车站的设置对于路段交通的影响出现了较大的差别:当 R 较小($R = 0.1$)时,非港湾式车站停靠的公交车辆会导致饱和流量的明显下降(约为 0.29),而港湾式车站使饱和流量略有下降(约为 0.42).可见当公交车比例较小时,港湾式车站可显著减少对路段交通流的影响.当 $R \approx 0.1$ 时两种情况下饱和流量的差值达到最大.随着 R 的进一步增大($R = 0.18$),两种情况下的饱和流量都继续下降,

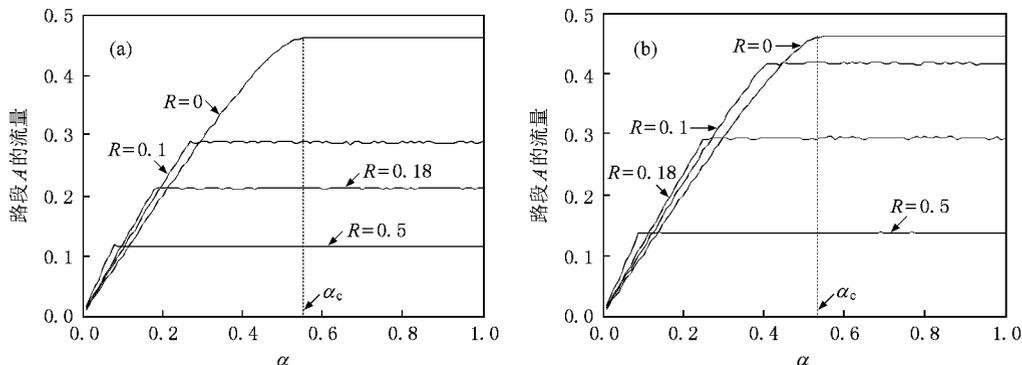


图 2 入车概率与流量之间的基本图 (a)非港湾式 (b)港湾式

而当 R 较大时(如 $R = 0.5$),可以发现两种情况下的上游饱和和流量接近,港湾式车站的优势并不明显,这是因为港湾式车站不能同时容纳所有的进站车辆而在行车道上形成公交车排队进站的情况,与非港湾式车站类似.由自由流到拥挤流的相变依赖于车站的类型、公交车的比例和公交车平均停靠时间等因素.

根据入流概率与流量之间的关系,我们给出了以 (α, R) 为相空间的相图(见图 3).港湾式和非港湾式两种情况的相图均可划分为两个区:在 I 区中, A 路段车道上的车辆处于自由流状态;II 区内, A 路段车道上的车辆处于拥挤流状态, A 路段上车流达到饱和态.两相之间的分界线由不同参数下的临界入流概率 α_c 所确定.由图 3 可见,港湾式车站时处于自由流的区域(I 区)上要大于非港湾式车站,尤其是公交车比例较小的情况.值得注意的是,当公交车比例很小($R < 0.04$)时,非港湾车站导致 α_c 的急剧下降,而港湾式车站使 α_c 略有上升.这表明即使公交车比例很小,停靠在非港湾式车站的公交车都会对道路交通流产生相当大的影响,导致饱和和流量的下降,较易进入拥挤流的状态,而港湾式车站则可以提高道路的通行能力,缓解交通阻塞.这与文献 [18] 的结果是一致的.当公交车比例较小时,虽然 α_c 都有所下降,但是在同样公交车比例的时,两种情况下 α_c 的差值变大,当 $R \approx 0.1$ 达到最大值.从图 2 中知道,较大的 α_c 表明在更大的入流概率范围内保持自由流状态和具有较高的通行能力.这也说明了港湾式车站能在一定程度上改善局部交通.随着公交车比例 R 的进一步增大, α_c 变得越来越小,说明车流更容易进入拥挤状态,通行能力逐渐降低(参看图 4).两种情况下的相分界线逐渐趋于一致,说明港湾式车站的改善作用逐渐减弱.

下面我们讨论入流概率固定时公交车站上游路段的流量与公交车比例的关系(见图 4).取主干道上入流概率为 0.7,此时交通流处于饱和状态.图中可见当公交车比例很小时,港湾式车站使道路流量略有提高.对于两种车站,总的趋势是流量随着公交车比例 R 的增大而减小.当 R 值较小时,流量随着公交车比例的增加迅速下降.当 R 超过 0.2 时,车流量随 R 的增大而减少的趋势放缓.此外港湾式情况下的通行能力始终大于非港湾式的情况.

由于现实中大比例公交车的情况较少出现,下面针对公交车比例较小时相图中不同区里的车辆行

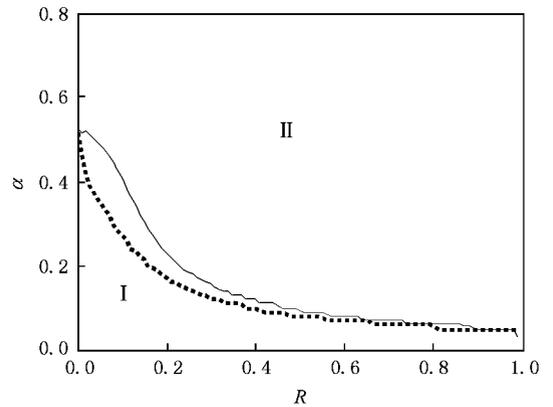


图 3 以 (α, R) 为相空间的相图(非港湾式(虚线),港湾式(实线))

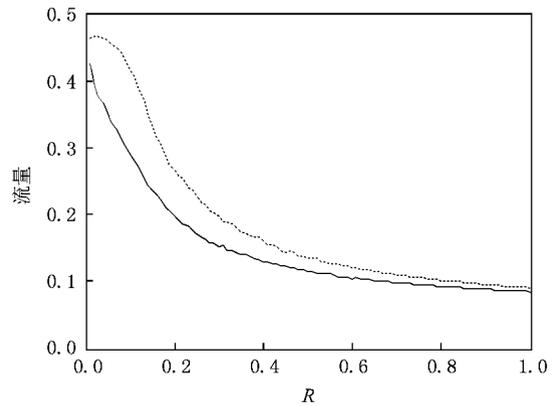


图 4 流量与公交车比例关系图($\alpha = 0.7$;虚线为港湾式,实线为非港湾式)

驶情况做进一步的分析.首先,研究车辆状态落在相图中 I 区的情况.根据前面的分析,我们取 $R = 0.1$, $\alpha = 0.25$,此时非港湾式和港湾式两种情况的车辆状态均落在 I 区.图 5 给出了此时车站上下游附近路段车辆平均密度和速度的分布.

发现当车流处于自由流相时,对于这两种车站,在离车站较远的上游和下游路段的平均密度或速度大小都基本相同,而左右两车道上的平均密度和速度分布基本一致.这表明公交车停靠的影响仅限于车站附近的区域.而在车站上游附近的 D 路段内,车辆密度(速度)有所增大(减小),尤其是右车道.这是当公交车进入路段 D 后,倾向于在右车道上行驶,这一特殊行驶行为导致了右道上的车辆密度(速度)要高于(低于)左车道上的.左车道上的行驶状况好于右车道.造成 D 路段内车辆密度(速度)增大(减小)的原因之一是公交车辆的减速进站($v_{\max}^D < v_{\max}$),另一原因是公交车的停靠.非港湾式情况下到

站公交车将在车站停靠一定时间,在干道上形成一个明显的密度峰值.相比之下,港湾式车站的影响要小得多.当公交车数量较少时,港湾式车站基本能够满足公交车的停靠要求,公交车在到达车站后能够马上入站停车,减少了对上游车辆的影响,所以左右

车道行驶情况的差异并不明显,在右车道形成的峰值较小.说明在 I 区,港湾式车站时在车站附近路段的车辆行驶状况明显好于非港湾式车站.另外,从密度分布图可以发现,公交车停靠在非港湾式车站比港湾式车站对上下游交通的影响范围更大.

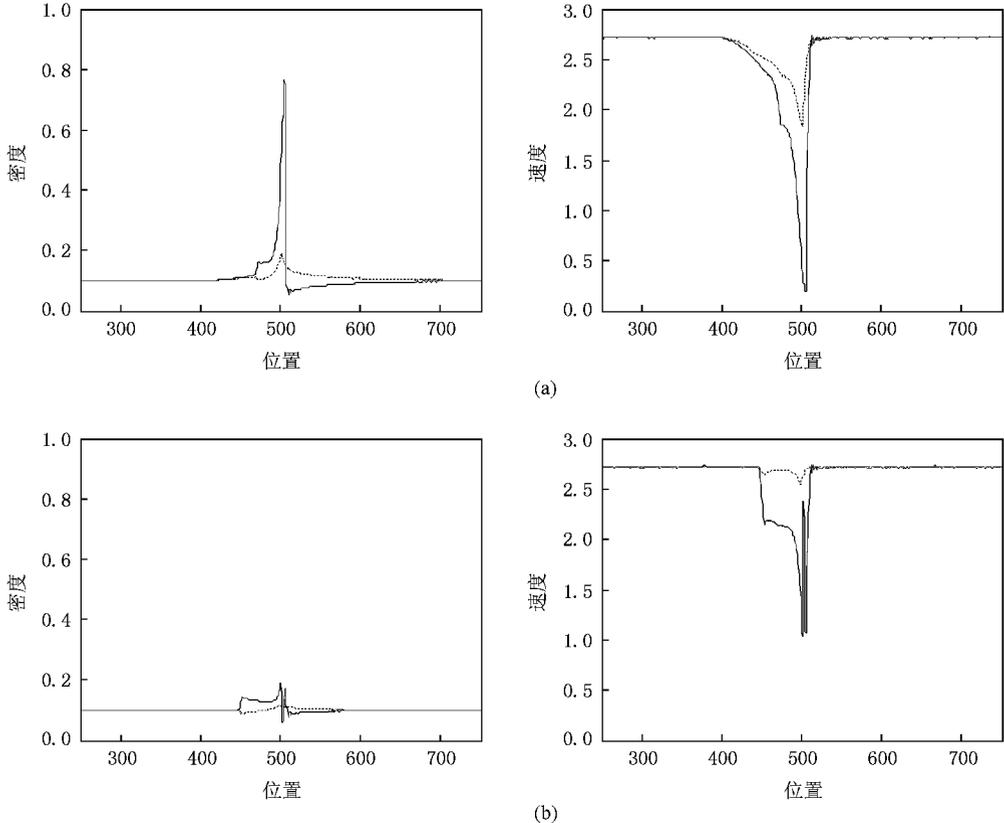


图5 主干道上速度密度分布图($R=0.1$, $\alpha=0.25$; 虚线为左车道, 实线为右车道) (a)非港湾式 (b)港湾式

在相图中的 II 区, A 路段处车流处于拥挤状态. 为了更多的了解在相图 II 区中车辆的行驶状态, 同样给出该种情况下的车辆平均密度和速度分布图 (见图 6). 为了确保非港湾式和港湾式两种情况的车辆状态均落在 II 区, 我们取 $R=0.1$, $\alpha=0.7$.

与图 5 相比, 两种情况下车站上下游路段平均密度和速度有明显差别. 在车站上游路段, 车辆的平均密度显著增大, 而平均速度则相应减少. 说明大量公交车排队进站停靠, 从而在车站处形成一个交通瓶颈, 其影响不能及时消除, 致使道路通行能力下降, 主道上车辆行驶状况恶化, 所形成的排队车辆向上游延伸, 公交车停靠的影响范围不再仅局限于 D 路段范围. 在公交车站上游的较长一段范围内, 右车道上的车辆平均密度均大于左车道上的车辆平均密度, 左车道上的行驶状况均好于右车道. 对于非港湾式车站, 到站而无法进站的公交车只能排队在右车

道上顺序进站, 会出现较为明显的公交车排队现象, 同时造成车道的阻塞. 对于港湾式车站, 随着公交车的数量增加, 车站的停靠能力已经无法满足停靠要求, 也会出现类似非港湾式车站的情况. 这在公交车比例更大的时候将会更加明显. 比较港湾式与非港湾式车站两种情况可以发现, 非港湾式车站的上游的平均密度明显大于港湾式情况的平均密度, 速度也更低. 表明港湾式车站时车辆行驶情况要好于非港湾式车站, 对车站上游的影响也较小. 另外同样在图 6 可以发现, 公交车在非港湾式车站停靠产生的影响范围比港湾式车站更大.

4. 结 论

本文采用双车道元胞自动机模型研究了公交车停靠在港湾式和非港湾式两种车站对道路交通流的

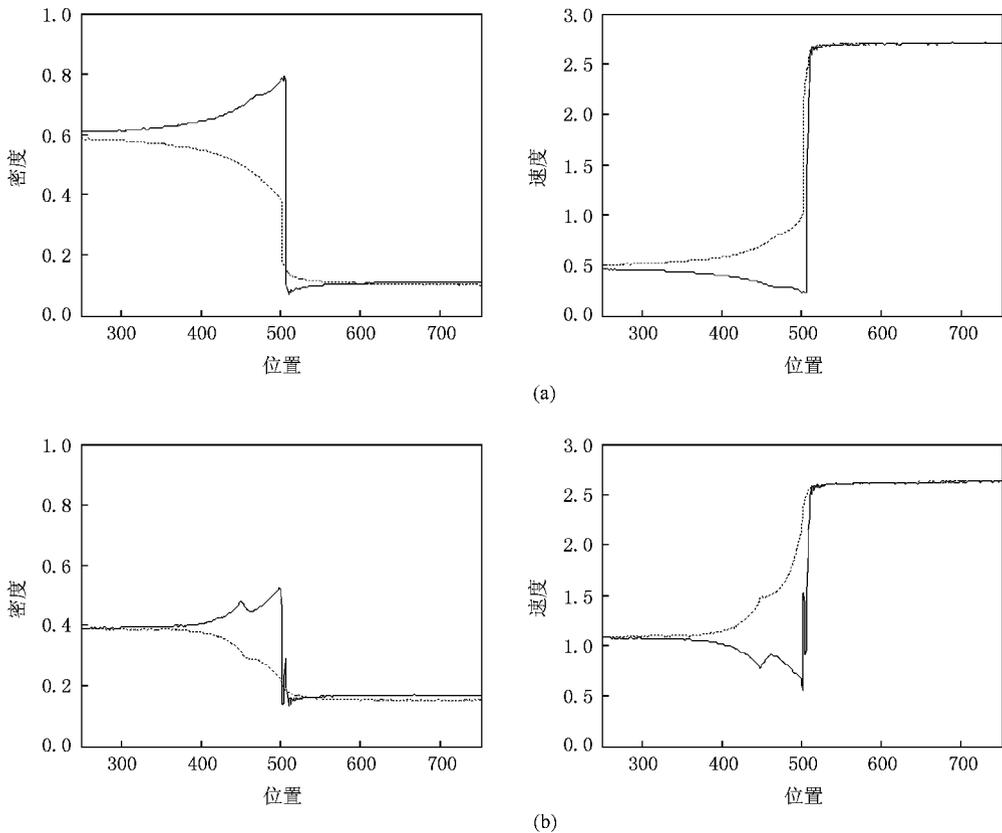


图6 主道上速度密度分布图 ($R=0.1$, $\alpha=0.7$; 虚线为左车道, 实线为右车道) (a) 非港湾式车站 (b) 港湾式车站

影响.对于这两种类型的车站,一般而言道路通行能力都随着公交车比例的增大而减小,但港湾式车站时道路通行能力要高于非港湾式车站.根据临界入车概率给出以 (α, R) 为相平面的相图,划分为自由流和拥挤流这两个区.从相图上可以发现当公交车比例为较小值时,港湾式车站情况下的自由流区要明显大于非港湾式车站,而随着公交车比例的逐渐增大,这种差别逐渐减小.考察了公交车比例较小时两个区中公交车站附近路段的平均密度和速度分布,与非港湾式车站相比,港湾式车站能够在一定程度上改善公交车在车站停靠对局部路段的不利影响,这种改善作用在当公交车比例较小的时候尤为明显.此外公交车停靠在港湾式车站对道路交通流的影响范围也明显地小于

非港湾式车站.当公交车数量较多时,港湾式车站的停靠能力不再能够满足公交车的停靠要求,出现了公交车直接停靠在干道上等待进站的排队现象,这样港湾式车站对车站附近路况的改善作用也相对减弱.在实际交通中如何选取车站类型,应当综合考虑空间资源占用,路况改善与建设成本等因素.

最后需要指出的是,本文对公交车采用固定的停靠时间,公交车进入车站的处理采用排队进出车站的形式,即先进先出.而真实交通中往往会出现多辆公交车同时进站,乘客上下车会影响实际停靠时间,公交车后到而先离开的情况也经常发生,因此有必要进一步细致研究公交车的停靠行为及其对路段交通流的影响.

- [1] O'Loan O J, Evans M R, Cates M E 1998 *Phys. Rev. E* **58** 1404
 [2] Chowdhury D, Desai R C 2002 *Eur. Phys. J. B* **15** 375
 [3] Jiang R, Hu M B, Jia B, Wu Q S 2003 *Eur. Phys. J. B* **34** 367
 [4] Nagatani T 2001 *Phys. Rev. E* **63** 036115

- [5] Nagatani T 2001 *Physica A* **296** 320
 [6] Nagatani T 2001 *Physica A* **287** 302
 [7] Huijberts H J C 2002 *Physica A* **308** 489
 [8] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221

- [9] Nagatani T 1995 *Phys. Rev. E* **51** 922
Chinese)[邝 华、孔令江、刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
- [10] Chowdhury D , Wolf D E , Schreckenberg M 1997 *Physica A* **235** 417
[15] Lei L , Dong L Y , Ge H X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6874 (in Chinese)[雷 丽、董力耘、葛红霞 2007 物理学报 **56** 6874]
- [11] Chowdhury D , Santen L , Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
[16] Zhao X M , Gao Z Y , Jia B 2007 *Physica A* **385** 645
- [12] Xue Y , Dong L Y , Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese)[薛 郁、董力耘、戴世强 2001 物理学报 **50** 445]
[17] Zhao X M , Gao Z Y , Li K P 2008 *Physica A* **387** 4649
- [13] Jia B , Jiang R , Wu Q S 2004 *Phys. Rev. E* **69** 2004
[18] Qian Y S , Wang H L , Wang C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2115 (in Chinese)[钱 勇生、汪海龙、王春雷 2008 物理学报 **57** 2115]
- [14] Kuang H , Kong L J , Ju M R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894 (in Chinese)[邝 华、孔令江、刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
[19] Koshy R Z , Arasan V T 2005 *J. Transp. Eng.* **131** 640

Investigation on traffic bottleneck induce by bus stopping with a two-lane cellular automaton model^{*}

Li Qing-Ding Dong Li-Yun[†] Dai Shi-Qiang

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics , Shanghai University , Shanghai 200072 , China)

(Received 5 February 2009 ; revised manuscript received 26 February 2009)

Abstract

In this paper , the influence of typical bus stops on traffic flow is investigated with the cellular automaton traffic model. For on-line and off-line bus stops , a two-lane cellular automaton model is proposed to simulate the traffic bottleneck induced by bus stopping under the open boundary condition. The phase diagram in the phase plane of injection probability and bus fraction is provided and two phases , i. e. , the free flow phase and congested flow phase , are distinguished. The distributions of the mean density and velocity near the bus stop in different traffic phases are given and the comparison of dynamical characteristics of traffic flows is made for different types of bus stops. It is found that using the off-line bus stop can significantly improve the traffic flow in its neighboring region , compared with the on-line bus stop in the case of small fraction of buses.

Keywords : cellular automaton , mixed traffic flow , traffic bottleneck , bus stop

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10532060 and 10672098).

[†] E-mail : dly@shu.edu.cn