

考虑公交港湾式停靠的多速混合城市 交通流元胞自动机模型研究^{*}

钱勇生 汪海龙 王春雷

(兰州交通大学交通运输学院, 兰州 730070)

(2007 年 3 月 10 日收到, 2007 年 8 月 30 日收到修改稿)

在 Nagel-Schreckenberg 提出的元胞自动机模型基础上, 建立了考虑公交车辆和港湾式公交停靠站的多速混合车辆单车道城市交通流元胞自动机模型. 通过计算机模拟, 给出了随机减速概率、混合车流密度、公交车辆平均停靠时间、公交车辆占有率和港湾式公交车站间距对混合车流速度和流量的影响图. 对混合车流的特性进行了分析和讨论.

关键词: 元胞自动机, 港湾式公交停靠站, 混合交通流模型, 计算机模拟

PACC: 0550

1. 引 言

现代社会普遍面临着严重的交通问题, 单凭兴建城市道路及其他交通设施并不足以解决城市交通拥堵问题. 如果不能正确地理解、预测、调度和控制城市网络中的交通流, 最大效能地提高行车效率, 城市交通状况将无法得到改善. 由于交通流在时间、空间上具有高度的随机性、动态性和复杂性, 表现出丰富的非线性特征, 传统的交通流模型(如流体力学模型、气体动力学模型、车辆跟驰模型等)都对此难以解释. 元胞自动机(cellular automata)模型具有空间离散化、时间离散化、状态离散化的特点, 其算法简单灵活, 易于在计算机上进行模拟, 这使元胞自动机模型与其他的连续性模型相比运算速度更快. 当模拟交通流量较大的城市道路时, 更能体现元胞自动机交通流模型的优势, 因而在交通流研究中得到广泛应用和发展^[1].

最早用元胞自动机思想对交通流进行研究的是 Cremer. 最原始元胞自动机交通流模型是 Wolfram 所命名的 184 号元胞自动机^[2]. 作为对 Wolfram184 号模型的推广, 德国学者 Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年提出的元胞自动机模型^[3], 简称 NS 模型. NS 模型考虑了汽车的逐步有限加速和随机慢化的可能性, 汽车的行进速度也不限于每时步仅能前进一个格

点. 作为 NS 模型的一种简化, 日本学者 Fukui 和 Ishibashi^[4]在 1996 年提出了新的一维交通流模型, 简称 FI 模型. FI 模型将 NS 模型的逐步加速改为直接加速, 随机慢化改为仅对最大速车辆随机慢化. 美国科学家 Biham 等^[5]在 1992 年提出了二维交通流元胞自动机模型, 简称 BML 模型. BML 模型能呈现城市交通网的畅通到阻塞的相变情况.

实际城市交通流由公交车、小汽车等不同性能和类型的车辆构成, 而目前建立的元胞自动机模型, 出于简化问题与突出重点的考虑, 主要研究由相同类型的车辆构成的交通流问题^[2,3]. 刻意选取无公交站点的路段, 以消除公交车辆进出站对其他车辆的影响^[1-11].

公交车辆是城市交通中最重要车型之一, 由于其具有固定运行线路、固定停靠站、车型大、运行速度低等特点, 其对城市交通流的影响十分明显, 合理的组织公交车流是解决城市交通问题的核心. 因此, 在进行城市交通流问题研究时应充分考虑公交车辆和公交停靠站对城市交通流的影响.

由于城市交通流元胞自动机模型普遍采用的元胞长度和运行车速与实际情况差异较大, 故不能准确反映城市交通流的特性. 本文在对城市交通流进行充分研究的基础上, 重新标定了元胞长度、运行车速, 提出了周期边界条件下考虑公交车辆和港湾式公交停靠站影响的城市混合交通流单车道元胞自动

^{*} 甘肃省自然科学基金(批准号 3ZX062-B-25-003)资助的课题.

机模型.为了能更好反映真实交通特性,该模型在公交车站处加入了公交车低速进站、慢速启动机制,并运用智能交通系统原理在公交车站处实现了公交车的优先出站.

2. 模型的建立

将道路视为长度为 L 的一维离散格点链,每一个格点在每一时刻或为空或被一辆车占据,道路上车流由公交车辆和小汽车组成,它们具有不同的最大速度和车辆长度.城市道路与高速公路相比,车辆运行速度低、车头间距小,为了更精确地反映城市道路交通状况,将元胞长度定为 3.75 m ,小汽车占用两个元胞,公交车辆占用 4 个元胞,港湾式公交停靠站占用 6 个元胞.车辆 k 在 t 时刻的状态由其本身的速度 $V_k(t)$ 来表示,

$$V_k(t) \in [0, V_{\max}],$$

其中 V_{\max} 为车辆的最大限速.如果车辆 k 为公交车,则 $V_{\max} = 3$,记作 $V_{\max, \text{bus}}$,对应实际速度为 40.5 km/h ;如果车辆为小汽车,则 $V_{\max} = 5$,记作 $V_{\max, \text{car}}$,对应实际速度为 67.5 km/h .

用 $X_k(t)$ 表示第 k 辆车在 t 时刻的位置,则在 t 时刻第 k 辆车与前方紧邻车辆之间的距离 $D_k(t)$ 可表示为

$$D_k(t) = X_{k+1}(t) - X_k(t) - l_{k+1},$$

其中 l_{k+1} 表示第 $k+1$ 辆车的长度.

2.1. 港湾停靠站处公交车辆运行规则

如图 1 所示,车辆从左向右行驶,斜线部分表示一辆即将驶入车站的公交车辆, $d(t)$ 表示 t 时刻第 k 辆公交车与其前方紧邻港湾式公交车站之间的距离.如果

$$d(t) < V_{\max, \text{bus}},$$

则

$$V_k(t+1) = \min\{d(t), V_k(t+1)\},$$

否则按 NS 规则运行.

实现了公交车辆进站前的减速运行,并保证车头在后面某一时刻能到达 A 位置.当车头到达 A 位置以后,车辆以 $V_{\max} = 1$ 运行到 C 位置,实现了公交车辆车站处的低速运行.然后判断港湾内是否有公交车辆停靠,如果港湾停靠站内有公交车辆停靠,则该辆公交车在位置 C 处停车等待;如果港湾内无公交车辆停靠,则该辆公交车在下一时刻完全驶入港湾停靠站,车头运行到位置 B 处,等待乘客上下车.公交车辆达到规定停靠时间后向道路上行驶车辆发出离站请求信号,当位置 $A-C$ 之间元胞为空时,公交车辆开始出站,车头运行到位置 D 处,并以 $V_k(t+1) = 1$ 开始加速离开停靠站.

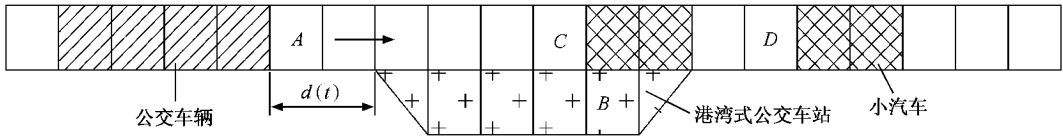


图 1 公交车港湾停靠站运行示意图

2.2. 港湾停靠站处小汽车运行规则

如图 1 所示,当小汽车车头运行至 $A-C$ 区域时,首先感应港湾式停靠站内公交车辆是否有出站请求信号,如果没有则正常行驶,如果有出站请求信号,则车辆减速运行到位置 C 处停车等待公交车辆出站,当公交车辆出站开始运行后,小车按更新规则运行.

2.3. 车辆状态演化的更新规则

车站外的每一辆车,其状态都按照 NS 模型的演化规则进行速度和位置的并行更新.车站内车辆先按 NS 模型的演化规则进行速度和位置的并行更

新,然后再按停靠站运行规则进行修正.下面给出 NS 模型的演化规则.

(1) 加速过程:如果

$$V(t) < D_k(t),$$

则

$$V(t+1) = V_{\max}.$$

(2) 确定性减速过程:如果

$$V(t) > D_k(t),$$

则

$$V(t+1) = D_k(t).$$

(3) 以概率 p 随机减速过程:如果

$$V(t) = V_{\max},$$

则

$$V(t+1) = (p, V_{\max} - 1).$$

(4)位置更新:

$$X(t+1) = X(t) + V(t+1).$$

3. 计算机模拟与数值分析

为具体分析交通流系统的动力学性质,定义双车道上车流总密度为 ρ ,小汽车密度为 ρ_c ,公交车的密度为 ρ_b , t 时刻小汽车的平均速度为 $\overline{V}_c(t)$,公交车的平均速度 $\overline{V}_b(t)$.

$$\rho = \rho_c + \rho_b,$$

$$\rho_b = \frac{N_b \times 4}{L},$$

$$\rho_c = \frac{N_c \times 2}{L},$$

$$\overline{V}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N_c} V_k(t),$$

$$\overline{V}_b(t) = \frac{1}{N_b} \sum_{k=1}^{N_b} V_k(t).$$

这里 N_c 为系统中小汽车总数; N_b 为系统中公交车总数; N_b' 是道路上公交车辆数,不包括港湾式停靠站内的车辆;车流量 Q (简称流量)指在某一时间段内通过某一元胞的车辆数;引入公交车辆占有率

$$f = \frac{N_b}{N_b + N_c},$$

$$0 \leq f \leq 1;$$

公交车站间距为 s ;公交车辆在港湾式车站内的平均停靠时间为 t_{bs} .

本文模拟时取车道由 2000 个格点组成,对应的实际道路长度约为 7.5 km,采用周期性边界条件.初始时刻,两种车辆按一定的混合比例系数 f 均匀分布在车道上,模型每一次运行演化 2×10^4 时步.记录最后 10^3 时步中每一时步内的所有速度 $V_k(t)$ 求得每一时步的平均速度,然后将得到的 10^3 个速度值再作时间平均,得到一次运行的平均速度.

图 2 给出了 $s = 200$, $t_{bs} = 20$ s, $f = 0$, ρ 取不同值时流量、速度随密度的变化图.图 2(a)中 $f = 0$,道路上只有小汽车,此时模型变为 $V_{\max} = 5$ 的 NS 模型,当减速概率 $p = 0.1$ 时,最大流量为 1527/h,随着减速概率 p 的增大,最大流量显著减小,当 $p = 0.8$

时,最大流量只有 866/h.由图 2(a)还可以看出,当车流密度较低和较高时,随机减速概率对交通流量的影响不太显著.这是因为当车流密度较小时,道路上的车辆少,车头间距大,一辆车的随机减速不会影响到其他车辆的正常行驶.而当车流密度过大时,由于车头间距小,整体运行速度低,随机减速概率的变化已经影响不到总体流量的变化.由图 2(b)可以看出,当密度 ρ 小于 0.4 时,平均速度受随机减速概率 p 的影响大.这是因为车流密度在 0.0—0.4 之间时,道路上车流量少,大多数车辆的运行车速可以达到 V_{\max} ,满足 NS 随机减速的要求(达到最大速度的车辆减速).而当 ρ 在 0.4—1.0 之间时,道路上行驶的车辆处于相互黏滞状态,随着车流密度的增加达到最大车速的车辆越来越少,随机减速概率对车流平均速度的影响也因此变小,这与实际情况相符.

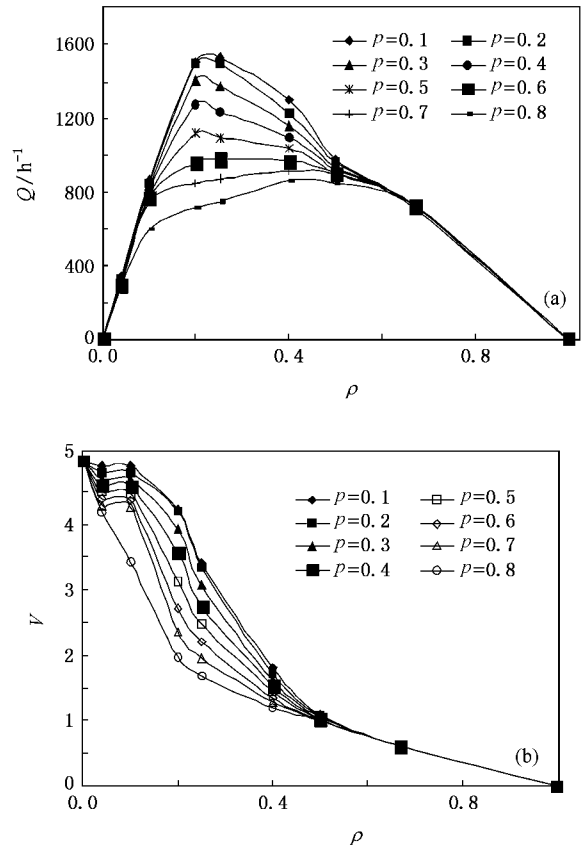


图 2 $s = 200$, $t_{bs} = 20$ s, $f = 0$, ρ 取不同值时流量、速度随密度的变化 (a) 流量随密度的变化 (b) 速度随密度的变化

图 3 是在 $s = 200$, $t_{bs} = 20$ s, $p = 0.2$, ρ 取不同值的情况下流量、速度随公交车辆占有率 f 的变化.由图 3(a)可以看出,当 f 从 0 到 0.4 之间变化时, f 对

流量和速度的影响都比较明显.这是因为 f 较低时,道路上车流以小汽车为主,车辆自由度较高,而每增加一辆公交车就会多形成一个阻塞区域,对流量的影响相当显著.随着公交车辆在道路上逐渐增多,小汽车的速度几乎全部受到公交车辆的限制,公交车辆继续增加时, f 对流量的影响相对减弱.通过对比图 3(a)(b)可以看出,随机减速概率对流量的影响小,而对速度的影响大,公交车辆占有率对流量和密度的影响最为显著.这说明混合车辆在单车道行驶过程中,车辆间的相互影响大,整个车道的流量和速度基本由公交车辆的占有率和速度决定.这是因为在单车道上,若一辆小汽车前面紧邻公交车辆,由于小汽车的速度大,很快便会赶上公交车辆,除了在港湾式停靠站外不能超越公交车辆,于是为了避免发生碰撞,小汽车不得不减速行驶.如果公交车辆占有率大,道路上行驶的小汽车几乎都会受到公交车辆的制约,小汽车的速度不能超过公交车辆的最大速度.若公交车辆前面紧邻的是小汽车,由于公交车辆不能紧随小汽车,致使相邻两车间的车间距逐渐拉大,形成了道路间隙.这种间隙不能由公交车辆后面的小汽车进行超车来填补,这就产生了道路空位,致使道路使用效率降低,通行能力下降,平均速度减小.这可通过时空演化斑图的对比看出.

图 4(a)(b)分别是 $f = 0.0$, $\rho = 0.2$, $\rho = 0.2$ 和 $\rho = 0.28$ 时 $V_{max} = 5$ 的 NS 模型时空演化斑图;图 4(c)(d)分别是 $s = 200$, $t_{bs} = 20$ s, $\rho = 0.28$, $\rho = 0.2$, $f = 0.17$ 和 $f = 0.35$ 时的混合车辆模型时空演化斑图.图 4 给出的是 1000 个格点从 18000 到 18400 时步的演化过程,车辆从左向右运动,横轴表示车辆位置,纵轴表示时间,以黑点表示占有车辆的位置,白点表示空格点.由图 4(a)(b)对比可以看出, ρ 越小随机阻塞区域越少,说明 ρ 越小道路上车辆自由行驶空间越大,与实际情况相符.由图 4(c)(d)对比可以看出,公交车辆占有率 f 对道路的利用率影响十分显著,当 f 较小时,系统中的公交车辆较少,港湾式停靠站数量基本可以满足需求,由公交车辆在港湾式公交车站外停车等待进站造成的交通阻塞不明显,如图 4(c)所示.而当 f 较大时,港湾式停靠站数量满足不了公交车辆的停靠需求,部分公交车辆在港湾式停靠站外停车等待,使得后方小汽车无法继续行驶,导致停靠站旁出现大面积阻塞区域,而公交车辆前方由于没有小汽车填补,出现了大面

积空白区域,如图 4(d)所示.由图 4(b)(d)对比可以发现,NS 模型与混合车辆模型都出现了明显的局部阻塞,相比之下,NS 模型阻塞区域更加随机,道路利用率明显要比混合车辆模型高.混合车辆模型由于有公交车辆和公交停靠站的影响,可以从图中看出明显的空白区域和公交车站处的堵塞区域.因此在组织和规划交通时,应该尽量将公交车辆和小汽车进行分离,修建公交专用车道.

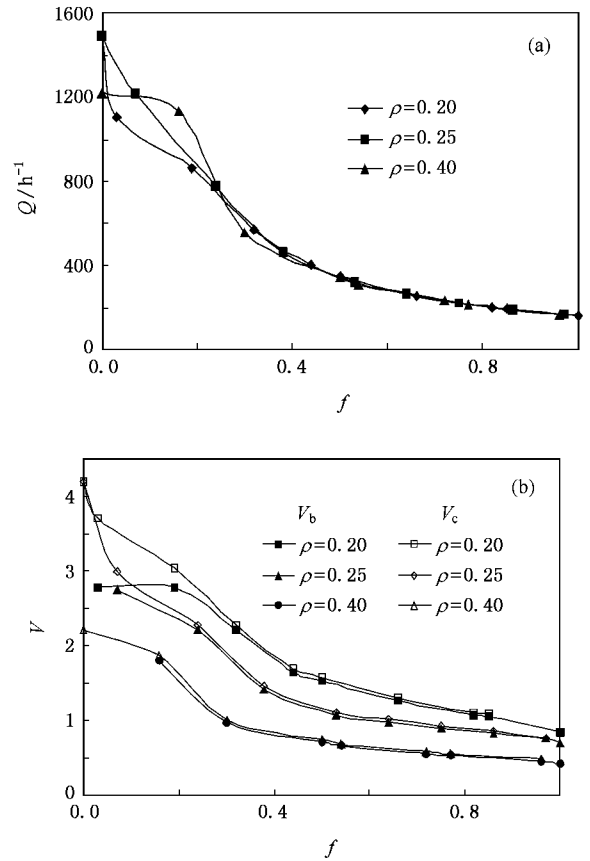


图 3 $s = 200$, $t_{bs} = 20$ s, $\rho = 0.2$, ρ 取不同值时流量、速度随公交车辆占有率的变化 (a)流量随公交车辆占有率的变化 (b)速度随公交车辆占有率的变化

除了公交车辆速度低对交通流造成了很大影响外,公交车辆在港湾式停靠站内的平均停靠时间 t_{bs} 和公交车站间距 s 是另外两个影响城市交通流的重要因素.图 5 给出了 $\rho = 0.30$, $\rho = 0.2$, $s = 200$, f 取不同值时得到的公交车辆在港湾式停靠站内的平均停靠时间 t_{bs} 与流量的关系.由图 5 可以看出, f 越大,受 t_{bs} 的影响越显著.这是因为一个港湾式停靠站内同时只能允许一辆公交车停靠,如果公交车数量较多,许多到站的公交车辆就必须在站外停车等

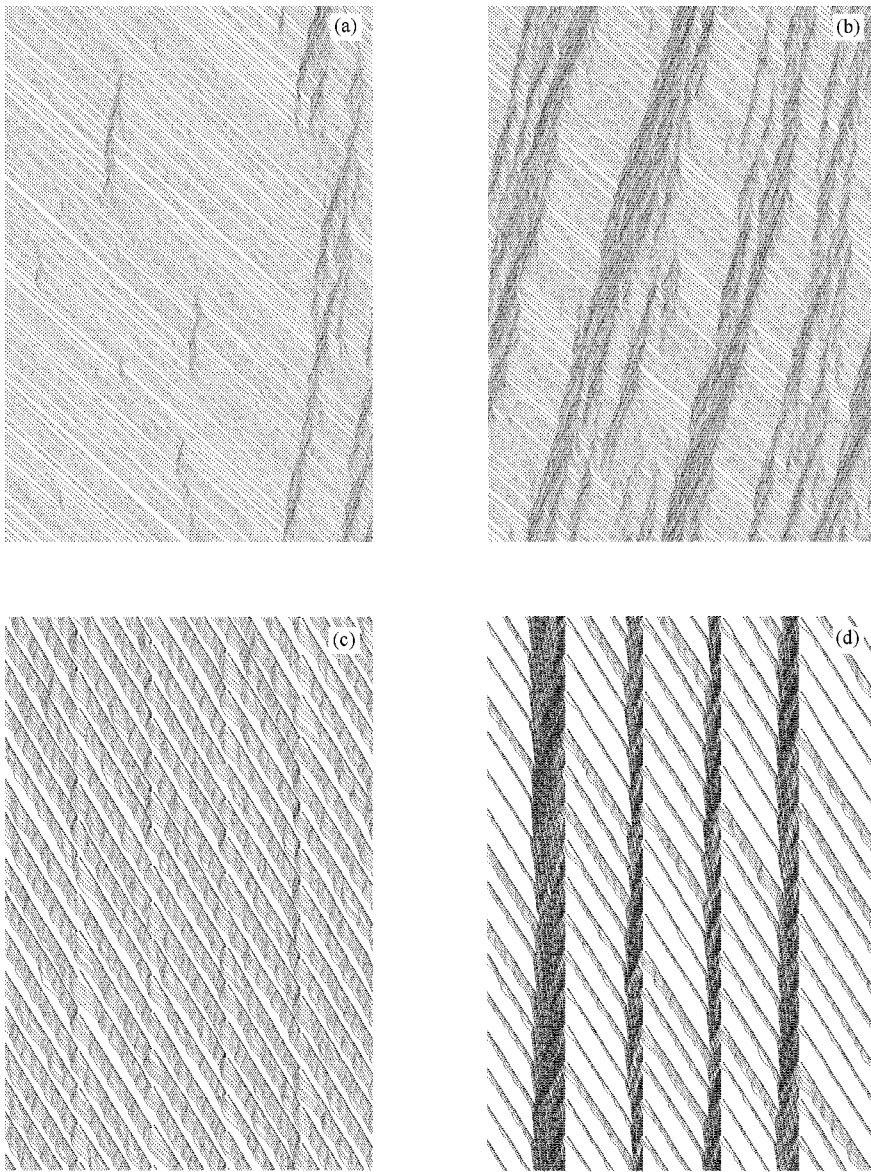


图4 $p=0.2$ 的时空演化斑图 (a) $f=0.0, \rho=0.2$ 的 NS 模型 (b) $f=0.0, \rho=0.28$ 的 NS 模型, (c) $s=200, t_{bs}=20\text{ s}, \rho=0.28, f=0.17$ 的混合车辆模型 (d) $s=200, t_{bs}=20\text{ s}, \rho=0.28, f=0.35$ 的混合车辆模型

待, 致使其后方的小汽车也必须停车等待. 当港湾式停靠站内部的公交车辆离开后, 随后的公交车辆才可以驶入港湾停靠. 当公交车数较多、公交车停靠时间较长时, 其对整个交通流的影响非常严重. 同时可以看出, 当 $f=0.03$ 时, t_{bs} 对流量的影响相当微弱. 这是因为 $f=0.03$ 时公交车辆较少, 港湾式停靠站内经常没有公交车辆, 公交车辆一到达就可以进站停靠不需要在站外等待, 减少了对小汽车的干扰. 所以在 f 较小时公交车辆停靠时间 t_{bs} 对交通流几乎没有影响.

图6给出了 $f=0.35, \rho=0.2, s=200, t_{bs}=20\text{ s}$,

ρ 取不同值时交通流量与港湾式停靠站间距之间的关系. 由图6可以看出, 交通流量随公交车站间距的增大逐渐减小. 这是因为公交车站间距越小, 整个系统中的公交车站数就相应增加, 公交车辆在港湾外停车等待的时间减少, 从而对整个系统的影响相对减弱. 当公交车站间距无限缩小时相当于多了一条公交车道, 所以道路通过能力相应变大. 当公交车站间距增加到一定值以后, 系统中便形成了以公交车辆打头的稳定脉冲式车流, 所以当公交车站间距继续增加时其对交通流量几乎没有影响.

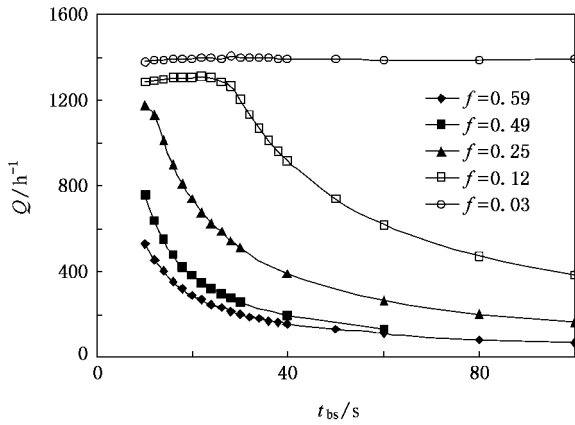


图 5 $\rho = 0.30, \rho = 0.2, s = 200$ f 取不同值时流量随公交车辆平均停靠时间的变化

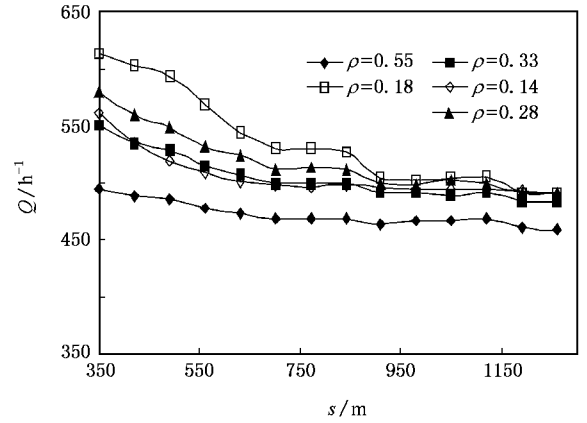


图 6 $f = 0.35, \rho = 0.2, s = 200, t_{bs} = 20$ s, ρ 取不同值时流量与港湾式公交车站间距之间的关系

4. 结 论

本文在 NS 模型的基础上,建立了混合车辆在单车道上考虑公交车辆和港湾式公交停靠站影响的交通流模型.从计算机数值模拟结果可看出,在单车道上,混合车流的流量与速度完全由公交车辆的占有率和速度决定.当公交车辆占有率较大时,公交车

辆平均停靠时间对整个交通流影响较大,港湾式公交停靠站在公交车辆占有率较小的情况下,对缓解交通拥堵、提高道路通行能力作用明显.同时,车辆的随机减速概率会对混合车流的运动状态起重要作用.因此,在实际中应该尽量将公交车辆与其他车辆进行空间上的分离,当条件有限的情况下必须设港湾式公交停靠站.

[1] Chowdhury D ,Santer L ,Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
 [2] Wolfram S 1983 *Rev. Mod. Phys.* **55** 601
 [3] Nagel K ,Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* [**2** 2221
 [4] Fukui M ,Ishibashi Y 1994 *J. Phys. Soc. Jpn.* **63** 2882
 [5] Biham O ,Middleton A ,Levine D 1992 *Phys. Rev. E* **48** 6124
 [6] Wang B H ,Guang L Q ,Xu L M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 906 (in Chinese) [汪秉宏、邝乐琪、许伯铭 1998 物理学报 **47** 906]
 [7] 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]
 [8] Tan H L ,Liu M R ,Kong L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2713 (in Chinese) [谭惠丽、刘慕仁、孔令江 2002 物理学报 **51** 2713]
 [9] Huang P H ,Kong L J ,Liu M R 2002 *Chin. Phys.* **11** 678
 [10] Zheng R S ,Tan H L ,Kong L J ,Liu M R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4616 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2005 物理学报 **54** 4616]
 [11] Kuang H ,Kong L J ,Liu 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]



The study of a cellular automaton traffic flow model with public transit ,harbor-shaped bus stop and mixed different-maximum-speed vehicles on single lane ^{*}

Qian Yong-Sheng Wang Hai-Long Wang Chun-Lei

(*College of Traffic and Transportation , Lanzhou Jiaotong University ,Lanzhou 730070 ,China*)

(Received 10 March 2007 ; revised manuscript received 30 August 2007)

Abstract

Based on the Nagel-Schreckenberg models of traffic flow , a cellular automaton traffic model with different-maximum-speed vehicles mixed on single lane is proposed , which considers public transit and harbor-shaped bus stop. The influence of deceleration probability , the density of vehicles , the average stop time of public transit vehicles , the proportion of public transit vehicles occupied in the mixed vehicles and the bus stop spacing on mixed traffic flow are analyzed by computer simulation. The model's traffic flow characters are presented and analyzed.

Keywords : cellular automaton , harbor-shaped bus stop , mixed traffic flow model , computer simulation

PACC : 0550

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province ,China (Grant No. 3ZX062-B-25-003).