

考虑延迟概率因素对混合车辆敏感驾驶 交通流模型的研究*

邝 华 孔令江 刘慕仁†

(广西师范大学物理与信息工程学院, 桂林 541004)

(2003 年 11 月 21 日收到, 2004 年 2 月 17 日收到修改稿)

在交通流 NS 模型的基础上, 考虑混合车辆之间存在的速度差异, 不同车辆的驾驶员在对前车的敏感驾驶随机减速行为过程中其延迟概率是不同的, 从而提出了一维多速混合车辆敏感驾驶元胞自动机交通流模型. 通过计算机数值模拟得到了混合车辆在不同参数下的基本图. 结果表明, 与 NS 模型、SDNS 模型相比, 道路交通流量有较大的提高, 而且还展现出了亚稳态、相分离等复杂的实际交通行为现象. 结合实际情况, 对混合交通的特性进行了分析和讨论.

关键词: 元胞自动机, 混合交通流模型, 亚稳态, 相分离, 计算机模拟

PACC: 0550

1. 引 言

近年来, 由于在交通过程中观察到非平衡相变、自组织临界性、相分离、同步交通和亚稳态等各种非线性现象, 从而引起了人们的极大关注^[1,2]. 作为模拟复杂系统行为有效工具的元胞自动机 (cellular automaton, 简称 CA) 模型已经被广泛地应用于交通流研究^[3-16], 并取得了许多成果.

在 CA 交通流模型的研究中, 先后有 Nagel 和 Schreckenberg 提出的考虑车速分布的随机加速、减速的 CA 模型^[3] (简称 NS 模型), Biham, Middleton 和 Levine 提出的模拟城市交通的二维 CA 模型^[4] (简称 BML 模型), 以及 Fukui 和 Ishibashi 提出的含高速车并可随机减速的 CA 模型^[5] (简称 FI 模型). 这些模型都显示出: 当车辆密度由低到高增加到一个临界值时, 车流会突然发生从自由运动相转变为阻塞相的临界相变现象. 当采用 NS 模型模拟公路的交通流问题时, 在相同条件下所作的数值模拟给出的最大交通流量小于实测数据, 而且不能发现临界点附近存在亚稳态. 于是人们对 NS 模型作了进一步的

改进, 先后提出了与速度相关的随机延迟刹车模型^[6] (VDR 模型)、 T^2 模型^[7]、BJH 模型^[8]、相对速度模型^[9] 等各种各样的改进模型, 使这些模型能够描述交通中的非线性现象. 最近文献 [10, 11] 优先考虑驾驶员的不确定性敏感预期行为, 将 NS 模型过程中的随机延迟过程放在确定性减速过程之前, 从而建立了敏感驾驶模型 (SDNS 模型), 该模型的数值模拟再现了交通中复杂的亚稳态、相分离等现象, 这说明敏感驾驶对车流的影响作用是很大的. 以上交通流模型研究的都是单一车辆对交通的影响情况, 然而实际交通中车道上一般都是由不同性能或不同类型的车辆混合行驶, 因此研究混合车辆的交通流问题更具有实际意义.

本文具体考虑车道上有两种类型的车辆: 一种类型的车辆具有的最大速度为 $V_{\max} = 5$, 其速度变化区间为 $V \in [0, 5]$, 这类车我们称为快车; 另一种类型的车辆具有的最大速度为 $V_{\max} = 3$, 其速度变化区间为 $V \in [0, 3]$, 我们称这类车为慢车. 这两类车辆混合在一条单行车道上行驶, 同时应用 SDNS 模型的思想, 考虑不同类型车辆延迟概率不同, 从而建立了混合车辆敏感驾驶交通流模型. 数值模拟表明:

* 国家自然科学基金 (批准号: 10062001) 广西壮族自治区自然科学基金 (批准号: 0007017) 教育部科学技术重点研究项目 (批准号: 02115) 和广西壮族自治区“新世纪百千万人才工程”专项基金 (批准号: 2001204) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jmlmr@mailbox.gxnu.edu.cn

混合车辆敏感驾驶交通流模型的交通流量要比相同条件下 NS 模型、SDNS 模型的交通流量大,而且还展现出了亚稳态、相分离等复杂的交通行为现象.结合实际情况,对混合交通的特性进行了分析和讨论,为实际的混合交通流研究奠定了一定的基础.

2. 模 型

将道路视作长度为 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.两种最大速度不同(一种为 $V_{\max} = 5$,另一种为 $V_{\max} = 3$)的车辆混合分布在道路上,每一种类型的车辆状态由其本身的速度 V 所表示, $V \in [0, V_{\max}]$. 用 $x_i(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻的位置,则 $\text{gap}_i(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - 1$ 表示第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆之间的间距.

在 NS 模型中,车辆状态演化步骤的减速过程在随机延迟刹车过程之前,即驾驶员先减速,然后再以相同的延迟概率不确定性地刹车.在 SDNS 模型中,驾驶员先以相同的延迟概率不确定性地刹车,然后再减速行驶.而对于混合车辆模型,不同类型的车辆的驾驶员先以不同的延迟概率不确定性地刹车,然后再减速行驶.这是因为实际交通中,不同类型的车辆之间存在着速度差异,这使车辆之间相互干扰性增大,驾驶员在瞬间接收和处理信息的随机性增强,对车速变化较敏感.具体表现在快车与慢车的驾驶员在对前车的敏感驾驶随机减速行为过程中其延迟概率是不同的,一般快车的延迟概率 p_1 要大于慢车的延迟概率 p_2 ,即 $p_1 \geq p_2$. 这样,我们建立混合车辆的状态演化规则如下:

(1) 加速过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \min(V_i(t) + 1, V_{\max}).$$

(2) 快车以概率 p_1 ,慢车以概率 p_2 随机延迟过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \max(V_i(t) - 1, 0).$$

(3) 确定性减速过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \min(V_i(t), \text{gap}_i(t)).$$

(4) 位置更新:

$$x_i(t+1) \rightarrow x_i(t) + V_i(t+1).$$

在每一演化时步 $t \rightarrow t+1$ 中,格点上的每一辆车,其状态都按照以上演化规则进行速度和位置的并行更新.

3. 数值模拟结果和讨论

用长度为 L 的一维离散的格点链来表示一条单向车道,车辆总数为 N ,总密度

$$\rho = \frac{N}{L};$$

快车数为 N_1 ,其密度

$$\rho_1 = \frac{N_1}{L};$$

慢车数为 N_2 ,其密度

$$\rho_2 = \frac{N_2}{L};$$

t 时刻的平均速度为

$$\bar{V}_t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} V_i(t);$$

平均车流量

$$J = \bar{V}_t \rho.$$

为了考虑不同车辆之间的混合程度,引入混合比例系数 f ,其中 f 满足

$$\rho_1 = \rho(1 - f),$$

$$\rho_2 = \rho f \quad (0 \leq f \leq 1).$$

当 $f < 0.5$ 时,表示快车数多于慢车数;当 $f > 0.5$ 时,表示慢车数多于快车数;当 $f = 0.5$ 时,表示快车数与慢车数相等.本文模拟单车道由 1000 个格点组成,快车最大速度为 $V_{\max} = 5 \text{ cells/s}$,慢车的最大速度 $V_{\max} = 3 \text{ cells/s}$.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 随机混合分布在车道上,且其初速度都为零,演化时步为 50000 步,记录后面运行的 2000 步中每一时步内的速度 V_i ,然后将得到的 2000 个速度值再作时间平均,得到一次运行的平均速度

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} V(t).$$

为了消除初始位形的随机性对结果的影响,再对 20 个样本取平均.

3.1. 本模型与 NS 模型、SDNS 模型比较

图 1 为相同条件下,数值模拟不同模型得到的基本图.

从图 1 可以看出,混合车辆敏感驾驶交通流模型得到的交通流量要比相同条件下 NS 模型、SDNS 模型得到的交通流量大,而且临界密度也较大.这

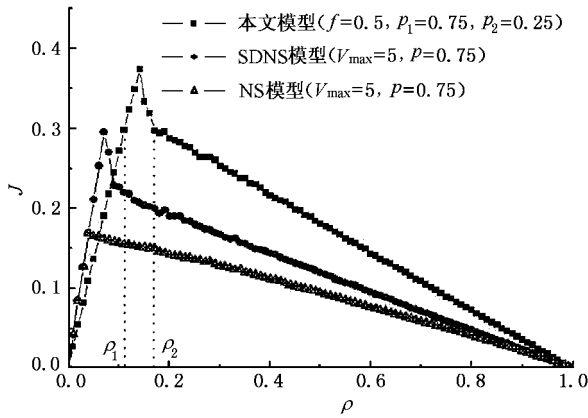


图 1 在 $f=0.5, p_1=0.75, p_2=0.25$ 条件下进行数值模拟得到的基本图与 NS 模型 ($V_{\max}=5, p=0.75$)、SDNS 模型 ($V_{\max}=5, p=0.75$) 的基本图比较

是由于随机延迟过程在减速过程之前,在车辆比较密集时预期前方的车间距小于车速有可能随机延迟,车速降了下来,随后就可能不必再进行确定性减速,但也可能再进行减速,应视车间距而定。在车辆均匀分布状态,这样的减速幅度小于 NS 模型,因此敏感驾驶的流量可以达到较大的值,即 SDNS 模型与本模型都会有较大的流量。但是又因为本模型中慢车具有的延迟概率 p_2 小于快车的延迟概率 p_1 ,而 p_1 又与 SDNS 模型中的延迟概率 p 相同,因此在车辆密度相同的情况下,本模型中车辆随机减速的总体概率比 SDNS 模型小,而流量要大于 SDNS 模型的流量,且不容易发生阻塞,其临界密度也较大。在车辆密度增大以后,车辆分布处于非均匀状态,敏感驾驶(即 SDNS 模型与本模型)的减速过程多于 NS 模型,类似于慢启动的行为,将导致车速进一步减小,部分跟随车发生链式反应,局域车辆密集拥挤,使流量快速减少。具体表现在基本图上,SDNS 模型与本模型在某些密度区域流量出现了两个分支,这表明亚稳态的存在。例如对于本模型,在 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 的密度区域流量出现了两个分支,上面一条分支对应较大的流量,此时没有出现阻塞相,而下面的一条分支对应于较小的流量,会出现畅行相与阻塞相分离现象,而这种现象在 NS 模型中是不会出现的。

图 2 为 $\rho_0=0.1, 0.25, 0.4; p=0.75; p_1=0.75, p_2=0.25$ 时三种模型的时空演化斑图,模拟的是 1000 个格点从 49520 到 50000 时步的演化过程,其中横轴表示车辆位置,车辆从左至右运动,纵轴表示时间,以黑点表示车辆的位置,白点表示空格点。从

图 2 可见,明显的黑色区域表示停止前进的车辆聚集在一起形成的交通阻塞相且向上游传播,灰色区域表示车辆畅通即自由相。由图 2(a)(b)(c)对比可看出,在低密度下,NS 模型与 SDNS 模型都出现了阻塞现象,而且 SDNS 模型出现的是相分离现象,但图 2(c)却未出现阻塞相,车辆仍处于自由运动状态,这说明三种模型的临界密度是不同的。随着密度的增大,从图 2(d)~(i)可知,SDNS 模型与本模型都出现了相分离现象,而且 SDNS 模型在相同密度下比本模型更加容易出现多分支的相分离现象,这是较长时间内存在亚稳态所导致的必然结果。这种现象在 NS 模型中也是不会出现的。

3.2. 混合比例系数 f 对交通流的影响

为了研究混合车辆所占比例不同情况下的交通状况,数值模拟了混合比例系数 $f=0.0, 0.25, \dots, 1.0, p_1=0.75, p_2=0.25$ 时的流量-密度图与速度-密度图(如图 3 所示)。当 $0 < f < 1$ 时,为两车混合行驶。从图 3 可以发现,随着 f 的增大(慢车所占比例增大),相应的流量和速度也都增大,且临界密度也随之增加,当 f 增加到 $f=1.0$ 时,车道上只有慢车,此时流量和速度都达到最大值。这说明混合车辆在单车道敏感行驶过程中车辆间的相互影响很大,车辆混合行驶的流量与速度主要由慢车的流量与速度决定。这是因为在单车道上,若一辆快车前面紧邻的车辆是慢车,由于快车的速度大很快便会赶上慢车但不能超越慢车,于是为了避免与慢车发生碰撞不得不减速行驶,此后快车的速度也不能超过慢车的最大速度,此时的快车相当于变成了慢车。又因为快车具有的延迟概率 p_1 大于慢车的延迟概率 p_2 ,这将导致快车的车速进一步减小,从而流量也快速减少。若慢车前面紧邻的车辆是快车,则慢车不能保持紧随快车,因此两车间的间距将拉大形成了道路间隙,这种大的间隙不能由慢车后的快车进行超车来填补,这就产生了道路空位在使用上的无效,其后果是使相同道路和交通条件下的通行能力降低、速度减小。

图 4 为混合车辆速度分布演化的时空斑图。从图 4 可以看出,该模型出现了明显的畅行相与阻塞相的分离界面,而且出现了宽幅运动阻塞相^[11]。当快车较多时(图 4(a) $f=0.2$),出现了许多窄幅阻塞相,随着慢车的增多(图 4(c) $f=0.8$),许多窄幅阻塞相就会合并成宽幅运动阻塞相。同时,从图 4(b)

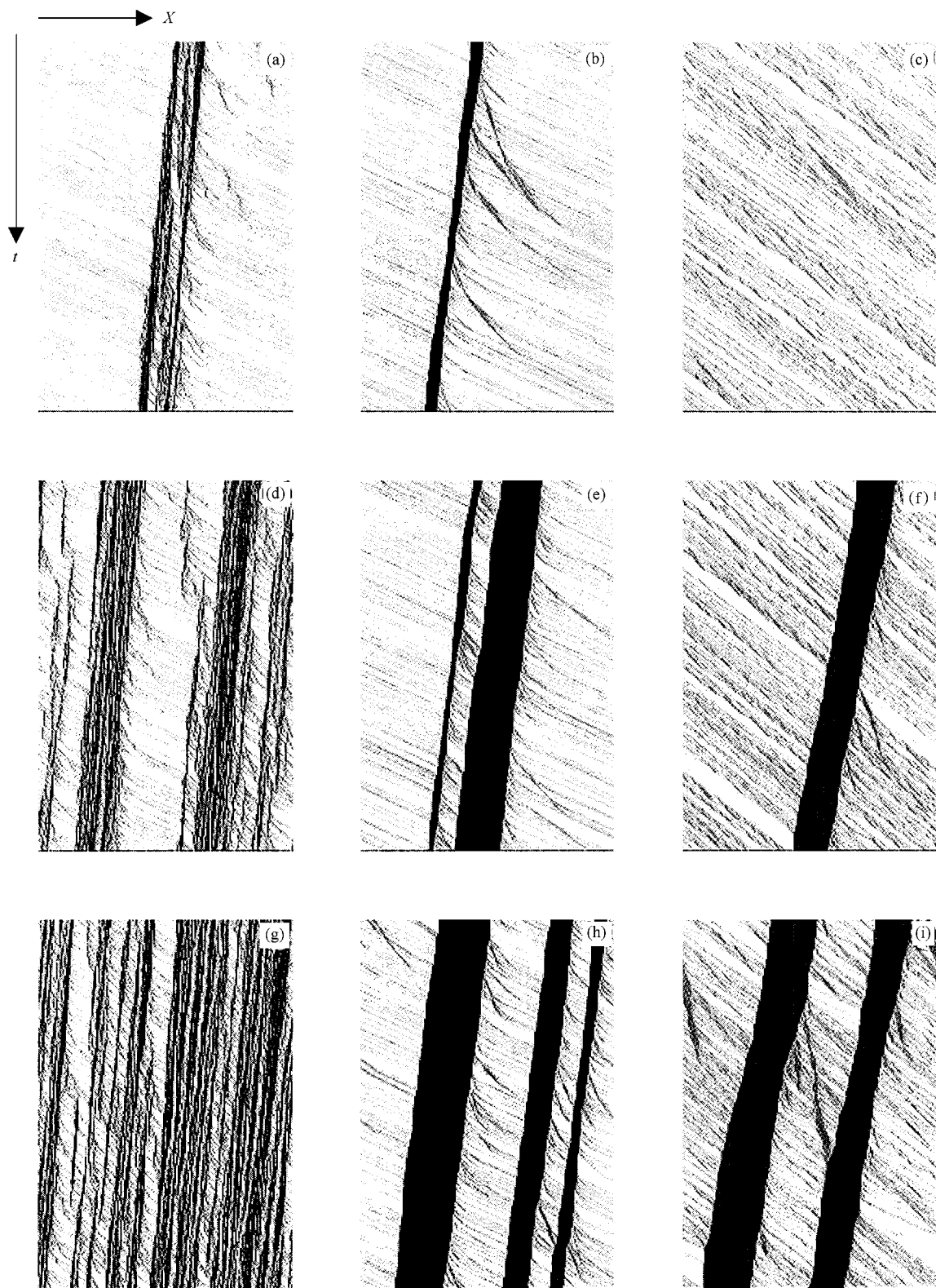


图2 时空演化斑图 (a)NS模型 $\rho_0 = 0.1, p = 0.75$ (b)SDNS模型 $\rho_0 = 0.1, p = 0.75$ (c)本模型 $\rho_0 = 0.1, p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$;
 (d)NS模型 $\rho_0 = 0.25, p = 0.75$ (e)SDNS模型 $\rho_0 = 0.25, p = 0.75$ (f)本模型 $\rho_0 = 0.25, p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$ (g)NS模型 $\rho_0 = 0.4, p = 0.75$ (h)SDNS模型 $\rho_0 = 0.4, p = 0.75$ (i)本模型 $\rho_0 = 0.4, p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$

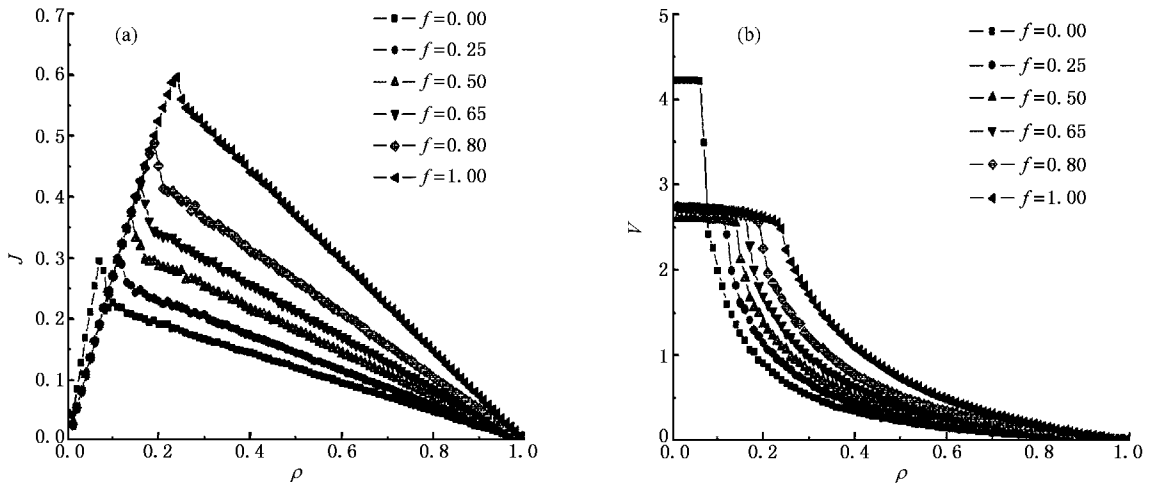


图3 混合车辆随参数 f 变化的基本图 (a) $p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$ 时, 流量随密度的变化; (b) $p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$ 时, 速度随密度的变化

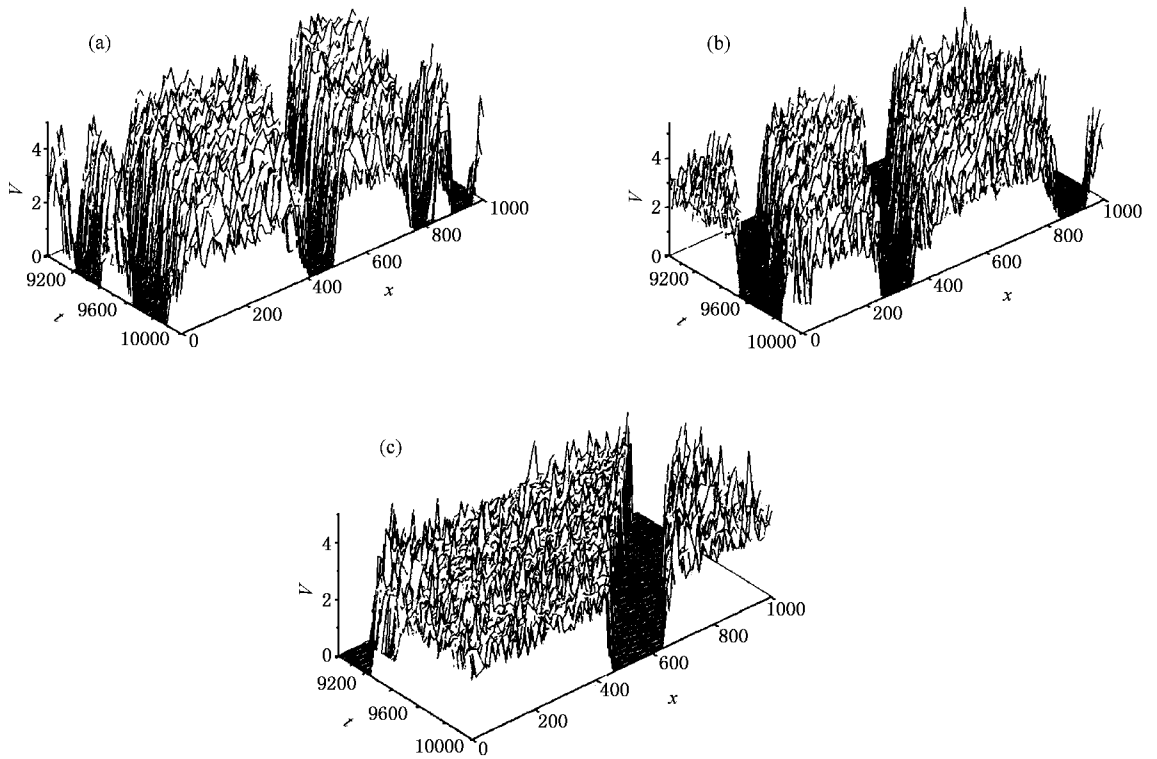


图4 $p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$ f 不同情况下的车辆速度分布演化图 (a) $\rho_0 = 0.3, f = 0.2, p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$; (b) $\rho_0 = 0.3, f = 0.5, p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$; (c) $\rho_0 = 0.3, f = 0.8, p_1 = 0.75, p_2 = 0.25$

中可发现, 实际交通中车辆从畅行相 \rightarrow 宽幅运动阻塞相和再由宽幅运动阻塞相 \rightarrow 畅行相的交通相变情况. 这说明在混合车辆中随着慢车所占比例的增大 (即随着 f 的增大), 出现的宽幅运动阻塞相的区域也就越大, 但是窄幅运动阻塞相的条数却减少了.

3.3. 延迟刹车概率对交通流的影响

为了研究延迟概率对混合车辆状态的影响, 数值模拟如图5所示. 图5(a)(b)和(c)(d)分别给出了 $f = 0.5, \rho_1 = 0.2, 0.35, 0.50, 0.65, 0.8, p_2 = 0.2$

和 $f = 0.5$, $p_1 = 0.65$, $p_2 = 0.2, 0.35, 0.50, 0.65, 0.8$ 时的流量-密度图、速度-密度图. 从图 5(a)(b) 可看出, 随着 p_1 的增加相应的流量最大值、速度最大值和临界密度都逐渐减小. 对于图 5(c)(d), 在 p_2 增加到 0.65 以前, 相应的流量最大值、速度最大值和临界密度的变化都不明显, 即延迟概率 p_1 起主要作用, 而 p_2 的影响不大, 只有当 $p_2 = 0.8$ 时变化才显著. 这是因为对于 SDNS 模型, 延迟概率是决定不同类型车辆的流量、速度的控制参数. 当快车延迟概率大于慢车延迟概率时, 在慢车的临界密度以前, 慢车的流量、平均速度都小于快车的流量和平均速度. 此时系统的流量由慢车的流量和平均速度决定. 但

是在慢车的临界密度以后, 快车的流量、平均速度都小于慢车的流量和平均速度. 此时系统的流量、平均速度由快车的流量和平均速度决定. 这从图 5 也可明显看出. 当快车延迟概率小于慢车延迟概率时, 慢车的流量和平均速度都小于快车的流量和平均速度. 因此, 此时系统的流量和平均速度由慢车的流量和平均速度决定. 这从图 5(c)(d) $p_2 = 0.8$ 的曲线可明显看出. 当快、慢车的延迟概率相同时, 在慢车的临界密度以前慢车的流量和平均速度比快车的流量和平均速度小, 而在慢车的临界密度以后快车和慢车的流量和平均速度相等, 因此系统的行为仍由慢车决定.

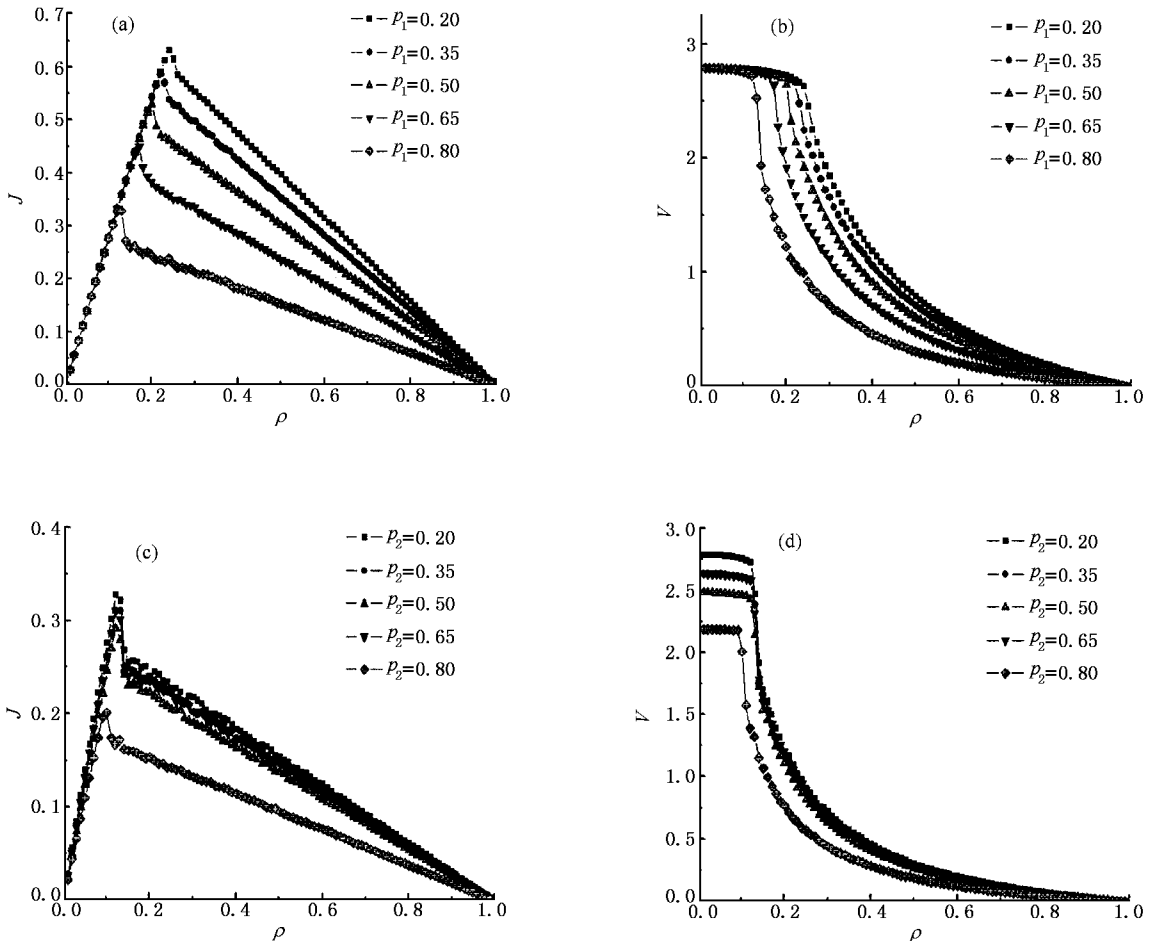


图 5 混合车辆随参数 p_1 、 p_2 变化的基本图 (a) p_1 不同 $f = 0.5$, $p_2 = 0.2$ 时流量随密度的变化; (b) p_1 不同 $f = 0.5$, $p_2 = 0.2$ 时速度随密度的变化; (c) p_2 不同 $f = 0.5$, $p_1 = 0.65$ 时流量随密度的变化; (d) p_2 不同 $f = 0.5$, $p_1 = 0.65$ 时速度随密度的变化

4. 总 结

本文在交通流 NS 模型的基础上, 考虑混合车

辆之间存在的速度差异、不同车辆的驾驶员在对前车的敏感驾驶随机减速行为过程中延迟概率的不同, 从而提出了一维多速混合车辆敏感驾驶元胞自动机交通流模型. 通过计算机数值模拟得到了混合

车辆在不同参数下的基本图,结果表明:在慢车的临界密度(包括临界点)以前,单车道上混合车辆交通流的流量与平均速度由慢车决定;在慢车的临界密度以后,交通流的流量与平均速度由延迟概率最大的车型决定.与NS模型、SDNS模型相比,道路交通流量有较大的提高,而且还展现出了亚稳态、相分离

等复杂的实际交通行为现象.总之,单车道混合交通易造成交通阻塞、车辆流量降低等现象.因此,交通中应该采用同方向不同车道车辆交通的分离,使混合车辆有序化,这样才可以更好的提高道路通行能力,改善交通环境.

- [1] Kerner B S , Konhäuser P 1993 *Phys. Rev. E* **48** R2335
- [2] Kerner B S , Rehborn H 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 3797
- [3] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221
- [4] Biham O , Middleton A , Levine D 1992 *Phys. Rev. A* **46** R6124
- [5] Fukui M , Ishibashi Y 1994 *J. Phys. Soc. Jap.* **63** 2882
- [6] Barlovic R , Santen L , Schadscheider A *et al* 1998 *Eur. Phys. J. B* **5** 793
- [7] Takayasu M , Takayasu H 1993 *Fractals* **1** 860
- [8] Benjamin S C , Johnson N F , Hui P M 1996 *J. Phys. A : Math. Gen.* **29** 3119
- [9] Xue Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese) [薛 郁 等 2001 物理学报 **50** 445]
- [10] Xue Y , Lei L 2002 *The Fourth International Conference on Nonlinear Mechanics* (Shanghai : Shanghai University Press) p919
- [11] Lei L *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷 丽 等 2003 物理学报 **52** 2121]
- [12] Kerner B S 2001 *Networks and Spatial Economics* **1** 35
- [13] Tan H L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2713 (in Chinese) [谭惠 丽等 2002 物理学报 **51** 2713]
- [14] Bai K Z *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2421 (in Chinese) [白克 钊等 2003 物理学报 **52** 2421]
- [15] Lü X Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1255 (in Chinese) [吕晓 阳等 2001 物理学报 **50** 1255]
- [16] Huang P H , Kong L J , Liu M R 2002 *Chin. Phys.* **11** 678

The study of the effect of delay probability on mixed vehicles sensitive driving traffic flow model^{*}

Kuang Hua Kong Ling-Jiang Liu Mu-Ren

(College of Physics and Information Technology , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China)

(Received 21 November 2003 ; revised manuscript received 17 February 2004)

Abstract

Considering that the maximum velocities for different types of vehicles are not the same and drivers may adopt different randomization brake probabilities , we proposed a one-dimensional sensitive driving cellular automaton model for mixed traffic flow based on the NS model . We presented the fundamental diagrams for different parameters by using computer numerical simulation , which show that the flux is higher than that of the NS model and the SDNS model . Moreover , some complicated behaviors of the model such as the metastable state and the separation of phases are also observed . Compared with the real traffic , the characters of this model are shown and analyzed .

Keywords : cellular automaton , mixed traffic flow model , metastable , phase separation , computer numerical simulation

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10062001) , the Natural Science Foundation of Guangxi Zhuang Autonomous Region , China (Grant No. 0007017) , the Key Program of Ministry of Education , China (Grant No. 02115) , and the Special Foundation of the Talent Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region , China (Grant No. 2001204) .