

考虑驾驶员特性的一维元胞 自动机交通流模型^{*}

彭莉娟[†] 康 瑞

(四川大学计算机学院图形图像研究所, 成都 610064)

(2008 年 7 月 1 日收到, 2008 年 7 月 31 日收到修改稿)

在一维元胞自动机交通流 WWH 模型和 SDNaSch 模型的基础上, 建立了一种考虑驾驶员特性的元胞自动机交通流模型(Driver-SDNaSch 模型). 该模型将驾驶员分为激进型、保守型和中立型三类, 根据其不同的驾驶特性制定了各自的演化规则, 并以此对其进行状态更新; 同时考虑了前车速度为 0 的情况, 引入安全减速概率, 通过计算机对 Driver-SDNaSch 模型进行模拟, 给出了由三类驾驶员按不同比例组成的混合交通流的速度-密度图和流量-密度图, 并对此类混合交通流的特性进行了分析和讨论. 与 NaSch 模型和 SDNaSch 模型相比, Driver-SDNaSch 模型减少了车辆流的堵塞现象, 提高了道路的通行能力.

关键词: 交通流, 元胞自动机, 驾驶员特性, 计算机数值模拟

PACC: 0550

1. 引 言

元胞自动机是建立复杂系统的离散模型. 由于元胞自动机具有空间离散化、时间离散化、状态离散化、相互作用的局域化和动力学演化同步性等特点, 为研究由大量个体相互作用而形成的复杂现象提供了一个新的途径. 而交通流的非线性、复杂性和离散性与元胞自动机的特性相符合, 因此国内外学者将元胞自动机模型广泛应用于交通流的研究^[1-18].

1986 年, 由 Wolfram 提出最初的元胞自动机交通流模型——184 号规则^[1]. 之后, 由 Nagel 和 Schreckenberg 在 1992 年将其改进, 提出了著名的 NaSch 模型^[2]. NaSch 模型考虑了车辆的加速、减速、随机延迟和车辆位置的更新. 在 1996 年 Fukui 和 Ishibashi 提出了车辆迅速加速的模型, 即 FI 模型^[3]. 我国学者王雷、汪秉宏和胡斑比提出了一种介于 NS 模型和 FI 模型之间的模型(简称 WWH 模型)^[12]. 在 WWH 模型中, 仅当车间距小于车辆最大速度时, 后车才会随机减速, 且后车的速度不完全由车间距决定. 薛郁等在 2001 年提出了改进的 NaSch 模型, 在演化规则中考虑车辆之间的相对运动^[7]. 雷丽等在

2003 年在 NaSch 模型的基础上, 将随机延迟过程优先, 提出了敏感驾驶模型(SDNaSch 模型)^[8]. 2005 年, 牟勇彪等^[9]在文献 [2] 与文献 [8] 的基础上考虑了前车速度为 0 的情况, 提出了基于安全驾驶的元胞自动机交通流模型. 这些模型多为对相同性能的车辆构成的交通流进行研究, 而在实际的道路交通中, 驾驶员的特性对交通流的影响不可忽视. 本文在 WWH 模型和 SDNaSch 模型的基础上, 建立了一种考虑驾驶员特性的元胞自动机交通流模型(Driver-SDNaSch 模型). 已有的模型中, 都将驾驶员分为两类: 激进型和谨慎型, 前者一味地追求开快车, 后者过于谨慎小心, 这样的分类有一定的偏激性. 在实际的情况中, 有较多的驾驶员特性是介于以上两者之间的, 所以在本模型中, 我们将驾驶员分为三类: 一类为激进型(aggressive)驾驶员, 他们表现的特性是喜欢开快车, 与前车保持较小的车间距, 较少刹车, 让车辆尽量向前行; 一类是保守型(conservative)驾驶员, 他们表现的特性是以安全为主, 与前车保持较大的车间距, 为了安全而较多地刹车; 还有一类是介于激进型和保守型驾驶员之间, 我们称之为中立型(neutral)驾驶员, 他们不像激进型驾驶员那样较强烈地追求车速和让车辆尽量前行, 但他们也不像保

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60705005, 60736046)资助的课题.

[†] E-mail: qiluo@126.com

守型驾驶员习惯多刹车,随时与前车保持安全距离,他们在条件允许的情况下会加速前进,而在有必要的时候刹车.本文研究在周期性边界条件下,由以上三类驾驶员驾驶车辆而构成的交通流现象.

2. 考虑驾驶员特性的一维元胞自动机交通流模型

驾驶员由激进型(AGG),保守型(CON),中立型(NEU)三种类型组成,他们分别对应的概率为 p_{AGG} , p_{CON} , p_{NEU} , 满足约束条件

$$p_{AGG} + p_{CON} + p_{NEU} = 1.$$

以 $X_i(t)$ 表示第 i 个车辆在 t 时刻的位置; V_{\max} 表示车辆的最高速度; $V_i(t)$ 表示第 i 个车辆在 t 时刻的速度, $V_i(t) \in [0, V_{\max}]$; $gap_i(t)$ 表示第 i 个车辆在 t 时刻与前方紧邻车辆的间距,

$$gap_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1;$$

$\Delta X_i(t)$ 表示第 i 个车辆从 t 时刻到 $t+1$ 时刻的位移量,满足

$$\Delta X_i(t) = X_i(t+1) - X_i(t);$$

p_A , p_C , p_N 分别表示三类驾驶员驾驶车辆的减速概率; p_{safe} 表示当前车速度为 0 时,后车安全性减速概率.对于三种类型驾驶员驾驶的车辆交通流的更新规则如下:

加速规则 对于 AGG 车辆,有

$$V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) = \min(gap_i(t), V_{\max}),$$

对于 CON, NEU 车辆,有

$$V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) = \min(V_i(t) + 1, V_{\max}).$$

随机减速 对于 AGG 车辆,如果 ($gap_i(t) < V_{\max}$) 则

$$V_i\left(t + \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} \max\left(V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) - 1, 0\right) & (\text{概率 } p_A), \\ V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) & (\text{概率 } 1 - p_A). \end{cases}$$

对于 CON 车辆,有

$$V_i\left(t + \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} \max\left(V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) - 1, 0\right) & (\text{概率 } p_C), \\ V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) & (\text{概率 } 1 - p_C). \end{cases}$$

对于 NEU 车辆,如果

$$(gap_i(t) + \Delta X_{i+1}(t) < V_i\left(t + \frac{1}{3}\right)),$$

则

$$V_i\left(t + \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} \max(gap_i(t) + \Delta X_{i+1}(t) - 1, 0) & (\text{概率 } p_N), \\ V_i\left(t + \frac{1}{3}\right) & (\text{概率 } 1 - p_N). \end{cases}$$

安全减速 如果

$$V_{i+1}(t) = 0,$$

若前车速度为 0,对于 AGG 车辆,CON 车辆和 NEU 车辆,有

$$V_i(t+1) = \begin{cases} \max\left\{\min\left(V_i\left(t + \frac{2}{3}\right), gap_i(t) - 1\right), 0\right\} & (\text{概率 } p_{\text{safe}}), \\ \min\left(V_i\left(t + \frac{2}{3}\right), gap_i(t)\right) & (\text{概率 } 1 - p_{\text{safe}}). \end{cases}$$

确定性减速 如果

$$V_{i+1}(t) \neq 0,$$

若前车速度不为 0,则对于 AGG 车辆,有

$$V_i(t+1) = V_i\left(t + \frac{2}{3}\right),$$

对于 CON 车辆和 NEU 车辆,有

$$V_i(t+1) = \min\left(V_i\left(t + \frac{2}{3}\right), gap_i(t)\right).$$

位置更新 对于 AGG 车辆,CON 车辆和 NEU 车辆,有

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1).$$

在本模型中,对 AGG 车辆采用 FI 模型的加速机制,对跟驰车辆采用 NaSch 模型的随机延迟,即 WWH 模型的车辆状态演化更新规则^[10].对 CON 车辆和 NEU 车辆都基于 SDNaSch 模型,即将随机延迟过程优先,在确定性减速前面.对 NEU 车辆,采用 NaSch 模型的加速机制,但在随机延迟过程中,增加条件 $gap_i(t) + \Delta X_{i+1}(t) < V_i(t)$,即当当前车速大于前方间距和前车从 t 时刻到 $t+1$ 时刻的位移量之和时,才以概率 p_N 随机延迟.对于三类驾驶员驾驶的车辆,我们都增加安全驾驶的考虑,即当前车速为 0 时,后面紧邻的车辆以一定的安全概率减速,这样更符合实际情况.

3. 计算机模拟与数值分析

我们用长度为 L 的一维离散格点链来表示一

条单车道, L 为 7.5 km, 每个格子大小为 7.5 m, 车辆的速度分布在 $0-V_{\max}$ 范围内, V_{\max} 为每秒可通过 5 个格子的长度, 相当于实际车速 135 km/h, 采用周期性边界条件. 初始时, 车道上三种类型驾驶员驾驶的车辆按比例 p_{AGG} , p_{CON} , p_{NEU} 随机分布在车道上, 系统的密度、速度和流量如下:

$$\rho = \frac{N}{L} = \frac{N \times p_{AGG} + N \times p_{CON} + N \times p_{NEU}}{L}$$

$$= \rho_{AGG} + \rho_{CON} + \rho_{NEU}, \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i(t), \quad (2)$$

$$J = \rho \times V. \quad (3)$$

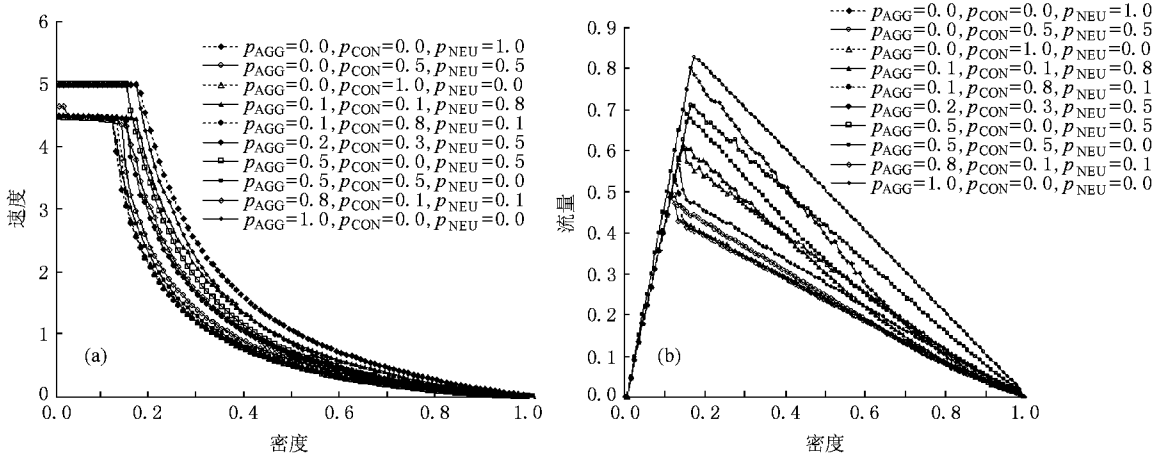


图 1 三类驾驶员在不同混合比例下的平均速度 V 和流量 J 与密度 ρ 的关系图 (a) V 与 ρ 的关系图 (b) J 与 ρ 的关系图

模型每一次运行 2×10^4 时步, 为了消除初始状态随机性的影响, 取最后 10^4 时步对速度进行计算, 每一次运行的平均速度 $\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} V(t)$, 对 10 个样本取平均. 数值模拟的结果如图 1 所示.

图 1(a) 和 (b) 分别给出了单车道上三类驾驶员按不同比例混合组成的交通流仿真得到的速度-密度关系图和流量-密度关系图. 我们取了 10 组混合比例进行仿真, p_{AGG} , p_{CON} , p_{NEU} 的取值如图所示(按照图中顺序, 将混合比例的取值简称为 1—10 类), 随机减速概率 $p_A = p_C = p_N = 0.5$, 安全概率 $p_{safe} = 0.5$. 在仅有激进型驾驶员、仅有保守型驾驶员和仅有中立型驾驶员(10, 3 和 1 类)的情况下, 由图 1(a) 可以看出在低密度区, 10 类和 1 类的平均速度最大可达 $135 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 而 3 类的平均速度最大为 $121.04 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 这是因为激进型、保守型和中立型三类车辆的加速机制和随机减速机制不同. 激进型车辆在每个时步都可以加速到最大速度, 且只有当车间距小于 V_{\max} 时, 车辆才会以随机减速概率 p_A 减速. 保守型车辆每个时步速度最多只能加 1, 并且车辆会从任何速度 $V (V \in [0, V_{\max}])$, 以随机减速概率 p_C 减速到 $V-1$. 中立型车辆的加速机制虽然与保守型车辆一致, 但其随机减速机制不同, 中立型车辆

只有当车速大于前方车距与前车相对位移量之和时, 才以减速概率 p_N 减速. 所以在低密度区时, 经过一段时间运行后, 系统会处于高速畅通运行的状态, 车与车之间的间距足够大, 激进型和中立型车辆不用进行随机减速, 它们的车速能加速到 V_{\max} , 但保守型车辆仍会进行随机减速, 且随着随机减速概率的增大, 保守型车辆的平均速度变小. 随着密度的增加, 10 类在密度 $\rho = 0.16$ 时, 速度出现拐点. 3 类在密度 $\rho = 0.12$ 时, 速度出现拐点. 1 类的临界密度最大, $\rho = 0.17$. 激进型与中立型驾驶员混合的情况下 ($p_{AGG} = 0.5$, $p_{CON} = 0$, $p_{NEU} = 0.5$), 车辆的最大平均速度也可达到 V_{\max} , 但其临界密度却降低了, 车速在 $\rho = 0.14$ 时出现拐点. 其他几种混合比例的情况下, 临界密度的范围大概在 $0.12 \leq \rho \leq 0.14$, 只有在 $p_{AGG} = 0.1$, $p_{CON} = 0.1$, $p_{NEU} = 0.8$ (4 类) 的情况下, 临界密度 $\rho = 0.16$. 这表明当中立型驾驶员的比例较大时, 模型的临界密度较大. 由图 1(b) 可知, 1 类情况下, 模型得到较大的流量, $J = 0.828$, 大于 SDNaSch 模型. 在混合交通流中, 有保守型车辆的情况下(2—6, 8, 9 类), 可以看出无论保守型车辆所占比例的大小, 它们的流量曲线在低密度区重合, 流量随着密度线性增加, 这表明保守型车辆对交通流变化的趋势影响较大, 保守型车辆的加速机制和随机减速机制,

使得它成为制约车辆提速的因素. 因此保守型车辆越多, 随着密度的增加, 交通流的流量越小. 在 8, 9 类情况下, 流量曲线呈现了下凹的形状(已被实验证实^[9, 11]), 且在高密度区, 与仅有保守型车辆的流量曲线重合. 由此可见, 保守型车辆对激进型车辆的影响较大, 大于中立型车辆, 这与实际情况相符. 激进型车辆对加速的期望很大, 在每一个时步都想加速到 V_{max} , 这时, 若前方有一辆保守型车辆, 它一个时步速度最多加 1, 这就较大制约了激进型车辆的前进, 而中立型车辆和保守型车辆加速机制相同, 所以它受保守型车辆的影响小于激进型车辆. 在保守型车辆的比例较大的情况下(2, 3, 5, 8 类), 流量曲线出现了两个分支, 上面的一个分支流量较大, 车辆处于畅通运动相, 下面一个分支对应的流量较小, 会出现畅通相与阻塞相分离的现象, 交通流处于亚稳态^[8], 而这种现象在交通流中没有保守型车辆的情况下是不会出现的.

图 2 中给出了本文模型在安全性减速概率 p_{safe}

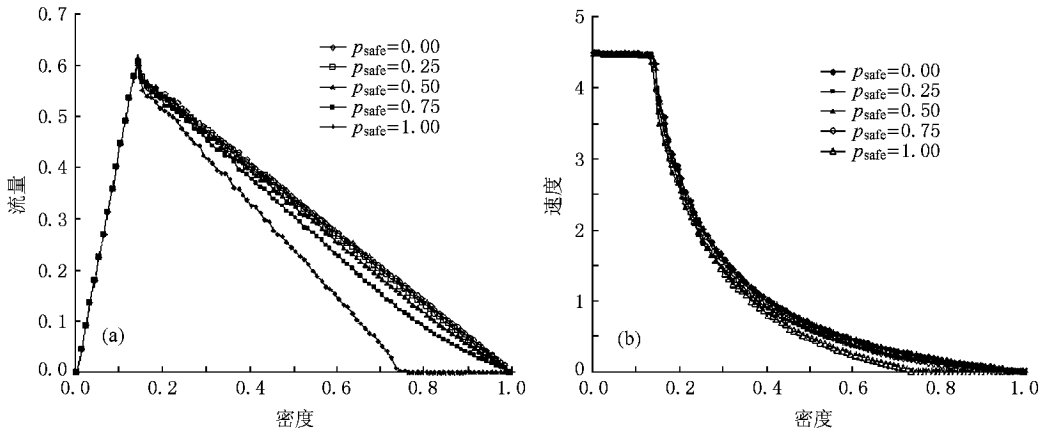


图 2 不同安全性减速概率取值下流量 J 和速度 V 与密度 ρ 关系图 (a) J 与 ρ 的关系图 (b) V 与 ρ 的关系图

图 3 为 NaSch 模型, SDNaSch 模型和 Driver-SDNaSch 模型的时空图. 随机减速概率为 0.25, 密度 $\rho = 0.16$, 图中给出的是 1000 个格点从 12000 到 14000 时步的演化过程, 车辆从左至右运动, 横轴表示车辆的位置, 纵轴表示运行时间. Driver-SDNaSch 模型中三类驾驶员的比例为 $p_{AGG} = 0.2$, $p_{CON} = 0.3$, $p_{NEU} = 0.5$, 安全概率 $p_{safe} = 0.5$. 由图 3(a) 可知, NaSch 模型中系统出现堵塞的区域比较多, 车辆位置的移动是非均匀的, 车流的运动与堵塞频繁交替出现. 图 3(b) 中可以看见很明显的堵塞相与运动相组成的相分离的现象, 这是由于随着车辆密度的增加, 局域车辆密集增多, 引起道路流量突然减小而

= 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 五种取值下的流量-密度曲线图和速度-密度曲线图, 三类驾驶员的比例为 $p_{AGG} = 0.2$, $p_{CON} = 0.3$, $p_{NEU} = 0.5$ (较符合实际情况), $p_A = p_C = p_N = 0.5$. 从图中可以看出, 在低密度区时, 流量不随安全概率 p_{safe} 的变化而变化, 他们的流量曲线完全重合, 最大流量 $J \approx 0.6$, 最大速度 $V \approx 4.5$, 临界密度 $\rho = 0.14$. 当密度增大, 大于临界密度后, 流量曲线就出现了不同的分支. 当 $p_{safe} < 0.5$ 时, 流量曲线的变化很小, 而当 $p_{safe} > 0.5$ 时, 流量在高密度区出现了较明显的减小, 且当 $p_{safe} = 1.0$ 时, 在密度 $\rho = 0.76$ 时, 系统的流量 J 和速度 V 减小到 0. 由此可知, 在这种驾驶员混合比例组成的交通流下, 安全驾驶的车辆在 50% 的比例以下时, 安全减速概率对系统的流量影响很小, 同时系统还能达到安全驾驶的目的. 但当安全驾驶车辆的比例较大时 (大于 50%), 在高密度区, 若要进行安全驾驶, 则要以降低车速为代价, 系统的流量比不考虑安全驾驶情况下的流量小.

造成的. 灰色区域表示车辆自由运动, 黑色区域表示车辆停止前进聚集在了一起, 它们组成了由畅行相向宽幅运动阻塞相转变和由宽幅运动阻塞相向畅行相转变的交通变化现象. 仿真表明随着密度的增加, 出现宽幅运动阻塞的区域会变大. 由图 3(c) 可知, 在本文模型中, 系统出现的堵塞相明显减少, 大部分区域内车辆是自由运动的. 深灰色区域表示车辆缓慢行驶的区域, 黑色区域不完全是车辆停止前进的堵塞相, 也存在速度为 1, 间距为 1 的同步相^[9]. 这是由于安全概率的引入让原本可能会发生完全停止的区域变成了缓慢行驶的区域.

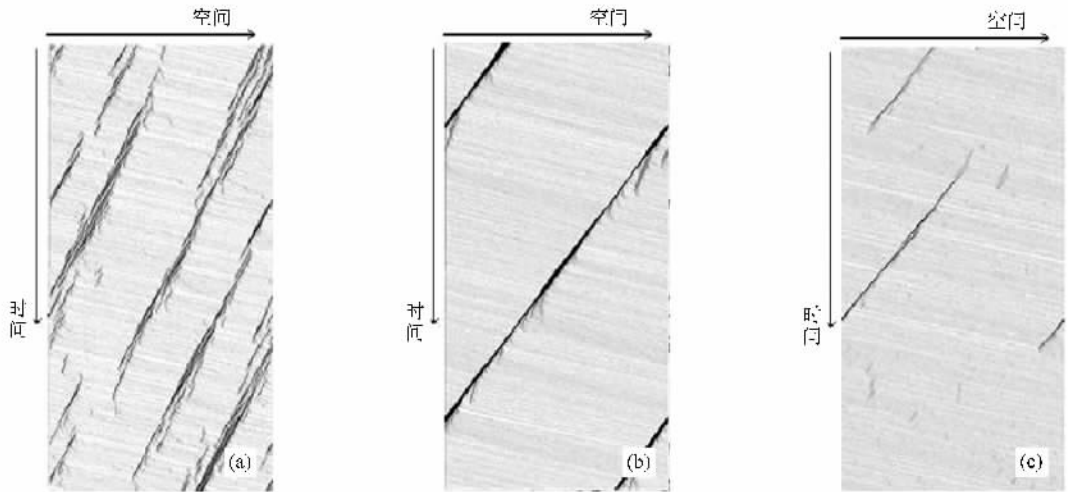


图 3 NaSch 模型 (a), SDNaSch 模型 (b) 和 Driuer-SDNaSch 模型时空图

4. 结 论

在实际的交通道路中, 驾驶员对整个交通流的影响是比较大的, 本文在 WWH 模型和 SDNaSch 模型的基础上, 建立了一种考虑驾驶员特性的元胞自动机交通流模型 (Driver-SDNaSch 模型). 模型中, 将驾驶员分为了激进型、保守型和中立型三类, 它们的演化规则不同. 将三类驾驶员按照不同的混合比例进行了计算机模拟, 通过数值分析表明, 在低密度区, 激进型和中立型驾驶员驾驶的车辆可达到最高速度, 随着密度的增加, 中立型驾驶员的比例较大时, 系统的临界密度较大. 保守型车辆对三类驾驶员

组成的混合交通流的影响力较大, 且对激进型车辆的影响大于中立型车辆. 通过改变安全减速概率 p_{safe} 的值, 观察流量的变化趋势可知, 在三类驾驶员的比例为 $p_{\text{AGG}} = 0.2$, $p_{\text{CON}} = 0.3$, $p_{\text{NEU}} = 0.5$ 的情况下, 安全驾驶的车辆在 50% 的比例以下时, 系统的流量所受的影响很小, 同时能达到安全驾驶的目的. 但当安全驾驶车辆的比例较大时, 在高密度区, 若要达到安全驾驶, 则系统的流量会受较多的影响, 流量比不考虑安全驾驶的情况小. 将本文模型与 NaSch 模型和 SDNaSch 模型进行比较, 结果表明本文模型减小了车辆速度的波动, 减少了车流的堵塞现象, 提高了道路的通行能力.

- [1] Wolfram S 1986 *Theory and Application of Cellular Automata* (Singapore: World Scientific)
- [2] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* **12** 2221 (in French)
- [3] Fukui M, Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 2345
- [4] Knosp W, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016115
- [5] Hasebe K, Nakayama A, Sugiyama Y 2004 *Phys. Rev. E* **69** 017103
- [6] Peng L, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3007 (in Chinese) [彭麟, 谭惠丽, 孔令江, 刘慕仁 2003 物理学报 **52** 3007]
- [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] Lei L, Xue Y, Dai S Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷丽, 薛郁, 戴世强 2003 物理学报 **52** 2121]
- [9] Mou Y B, Zhong C W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5597 (in Chinese) [牟勇彪, 钟诚文 2005 物理学报 **54** 5597]
- [10] Wu K F, Kong L J, Liu M R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6275 (in Chinese) [吴可非, 孔令江, 刘慕仁 2006 物理学报 **55** 6275]
- [11] Barlovic R, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 1998 *Eur. Phys. J. B* **5** 793
- [12] Wang B H, Wang L, Xu B M, Hu B B 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1926 (in Chinese) [汪秉宏, 王雷, 许伯铭, 胡斑比 2000 物理学报 **49** 1926]
- [13] Lü X Y, Kong L J, Liu M R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1255 (in Chinese) [吕晓阳, 孔令江, 刘慕仁 2001 物理学报 **50** 1255]
- [14] Ge H X, Dai S Q, Dong L Y, Xue Y 2004 *Phys. Rev. E* **70** 066134
- [15] Guo S L, Wei Y F, Xue Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3336 (in Chinese) [郭四玲, 韦艳芳, 薛郁 2006 物理学报 **55** 3336]

- [16] Chen S D , Kong L J , Liu M R , Zhu L H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2517 (in Chinese) [陈时东、孔令江、刘慕仁、朱留华 2007 物理学报 **56** 2517]
- [17] Fu Y P , Gao Z Y , Li K P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5165 (in Chinese) [付印平、高自友、李克平 2007 物理学报 **56** 5165]
- [18] Qian Y S , Wang H L , Wang C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **4** 2115 (in Chinese) [钱勇生、汪海龙、王春雷 2008 物理学报 **4** 2115]

One-dimensional cellular automaton model of traffic flow considering drivers' features^{*}

Peng Li-Juan[†] Kang Rui

(*Institute of Image & Graphics , College of Computer Science , Sichuan University , Chengdu 610064 , China*)

(Received 1 July 2008 ; revised manuscript received 31 July 2008)

Abstract

Based on the WHH model and SDNaSch model for one-dimensional cellular automaton traffic flow , a Driver-SDNaSch model considering the drivers' features is established. In this model , drivers are classified into such three types as aggressive , cautious and neutral , and their states are updated following their respective evolution rules , which are made according to the different driving features of these three types. In addition , the safe deceleration probability is introduced when considering the condition of having a stationary vehicle ahead. By using the computer numerical simulation of the Driver-SDNaSch model , the velocity-density and flow-density diagrams of the mixed traffic flow , whose features are also analysed and discussed , with the three types of drivers in different proportions , are presented. The Driver-SDNaSch model , compared with the NaSch model and SDNaSch model , is believed to further reduce the traffic jams so as to increase the traffic capacity.

Keywords : traffic flow , cellular automaton , drivers ' features , computer numerical simulation

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60705005 , 60736046).

[†] E-mail : qiluo@126.com