

交通流的一维元胞自动机敏感驾驶模型*

雷 丽¹⁾²⁾ 薛 郁¹⁾³⁾ 戴世强¹⁾

¹⁾ 上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

²⁾ 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061)

³⁾ 广西大学物理系, 南宁 530004)

(2002 年 11 月 19 日收到, 2003 年 1 月 8 日收到修改稿)

在一维交通流元胞自动机 NaSch 模型的基础上, 优先考虑驾驶员的不确定性敏感预期行为, 将随机延迟过程放在确定性减速之前, 从而建立一种新的一维元胞自动机交通流模型——敏感驾驶模型(简称 SDNaSch 模型), 并根据所给出的车辆状态演化的并行更新规则作了数值模拟. 模拟得到的基本图表明, 与 NaSch 模型相比, 道路交通量有较大提高, 接近于实测数据, 说明新模型能更贴切地描述交通现象; 某些密度区域流量出现两个分支, 表明在临界点附近存在亚稳态, 而且会出现畅行相与阻塞相的相分离界面. 从车辆速度分布演化的时空斑图, 可以看到宽幅运动阻塞相的出现以及畅行相→宽幅运动阻塞相和宽幅运动阻塞相→畅行相的相变. 接着, 计及实际交通情况, 考虑行驶车辆中一部分是敏感驾驶, 而其余车辆按 NaSch 模型规则行驶, 数值模拟结果进一步证明, 敏感驾驶因素对车流的作用是很大的, 随着敏感驾驶车辆的增多, 道路容量也随之提高.

关键词: 交通流, 元胞自动机模型, 亚稳态, 相分离, 交通相变

PACC: 0550, 0520, 6470

1. 引 言

交通问题成为困扰大中城市发展的“瓶颈”之一. 1991 年上海市的航测资料表明: 交通高峰期间, 车辆平均速度不到 15km/h, 最低速度仅为 4km/h, 低于步行速度^[1]; 在德国每年的交通阻塞造成的经济损失在 1000 亿美元左右^[2]. 因此, 交通研究对社会经济和日常生活的发展具有非常重要的作用. 在交通过程中可观察到非平衡的相变^[3]、交通阻塞的形成与消散、时停时走交通、“幽灵”式交通阻塞、自组织临界性、亚稳态区域和同步交通等非线性现象^[4]; 对这些交通现象的深入研究有助于节省投资费用, 减少经济损失. 例如纽约市的林肯隧道是将曼哈顿与新泽西州连接起来的交通要道, 通过对入口交通灯的管理, 使交通处于高流量的亚稳态, 输出流量增加 20%, 从而节省了修筑另一条隧道的费用^[5]. 对交通过程的研究, 必须进行交通观测实验, Treiterer^[6]对交通流进行实测, 证实了沿交通流向上游传播的运动波的存在, 运动波理论是由 Lighthill

和 Whitham^[7]首先提出的, 而且假定流量是局域密度的单值函数. 近几年的交通观察实验表明, 交通流的流量-密度关系是相当复杂的, 在低密度畅行运动区域, 车辆各自以平均速度 \bar{v} 运动, 流量 q 与密度 ρ 近似地成比例 $q \approx \rho \bar{v}$; 在中等密度情况下, 系统的畅行状态以及拥挤状态可能维持较长的时间, 对高速公路的实测数据进行详细的分析, 结果发现流量并不是密度的单值函数, 在流量-密度的基本图上某些密度区域流量出现两个分支, 表明亚稳态的存在. 上面一个分支对应较大的流量, 此时车辆之间的相互作用可以忽略不计, 没有出现阻塞; 下面一个分支对应于较小的流量, 会显示出畅行相与阻塞相分离现象, 实测数据证明了这一点, 阻塞下游的流量小于最大流量. 在德国高速公路上观测实验得到的结果表明交通流存在畅行运动→同步态→运动阻塞的相变, 其中显示出流量下降、滞后现象以及成核效应等现象^[2]. 为了更好地解释观测到的现象, 人们建立了各种交通流模型, 传统的交通研究方法主要是重现观测到的流量-密度关系和不稳定的交通流区域, 然而, 最近的研究指出对交通模型最重要的是

* 国家自然科学基金(批准号 19932020)资助的课题.

能够描述非线性现象及其特性^[8]. 元胞自动机理论是一个描述非线性现象的强有力的工具, 近年来, 应用元胞自动机理论的交通流模型越来越多地应用于大尺度的交通流模拟研究, 先后有 Nagel 和 Schreckenberg^[9]提出的 NaSch 模型以及 Fukui 和 Ishibashi 提出的 FI 模型^[10]. 我国学者汪秉宏等人成功地给出了 FI 模型的解析解^[11]并对其进行了系统而深入地研究^[12,13], 而 NaSch 模型已经应用于 TRANSIMS 项目对运输系统的模拟^[14]以及发布在互联网上的杜伊斯堡(Duisburg)市交通的在线实时模拟^[15], 所作的数值模拟结果能重现交通流从畅行运动到堵塞(congestion)的起止波(start-stop wave)临界“相变”过程.

本文试图对 NaSch 模型进行改进, 更强调车辆在行驶过程中驾驶员的敏感的预期调节过程, 在车辆较多的情况下, 他们有可能随时刹车, 以调节速度, 将这种调节过程置于确定性减速之前, 以此重新确定速度和位置更新规则, 这种改进取得了良好的效果, 模拟结果更接近于实测的数据.

2. 各种一维元胞自动机交通模型

NaSch 模型考虑了车辆加速、减速、随机反应和车辆位置更新四个过程, 车辆速度 $v_n(t) \in [0, v_{\max}]$, 车辆随机地分布在长度为 L 的一维离散的格点链上, 每一格点最多仅能由一个车辆所占据, $x_n(t)$ 表示第 n 个车辆在 t 时刻的位置; $v_n(t)$ 表示第 n 个车辆在 t 时刻的速度, v_{\max} 表示最大速度; $gap_n(t)$ 表示第 n 个车辆在 t 时刻与前方紧邻的车辆间距, $gap_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - 1$; P 表示车辆延迟刹车概率.

根据 NaSch 模型, 车辆状态演化的并行更新规则为^[9]

- 1) 加速过程: $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$;
- 2) 减速过程: $v_n \rightarrow \min(v_n, gap_n)$;
- 3) 以概率 P 随机延迟过程: $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;
- 4) 位置更新: $x_n \rightarrow x_n + v_n$.

其中随机延迟刹车以一定的概率 P 出现, 以模拟车辆的不确定性减速行为. 在交通流理论中, 单向车道元胞自动机的交通流 NaSch 模型是一个重要的模型, 所进行的数值模拟与真实的交通行为符合得较好. 但是, 用 NaSch 模型所作的数值模拟中, 在

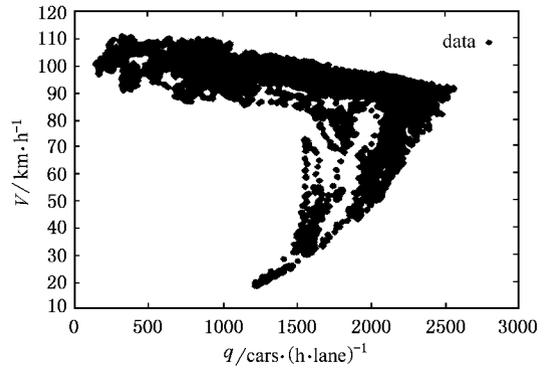


图1 加利福尼亚一条公路上实测数据得到的平均速度与车流量($q - V$)关系图(最大流量 $q_{\max} = 2500 \text{ cars}(\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$)

同样条件下, 给出的最大的交通流量小于实测数据, 图1为在加利福尼亚一条公路上6min内的实测数据取平均而得到的平均速度与车流量($q - V$)关系图^[14], 其最大流量为 $2500 \text{ cars}(\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$, 远大于 NaSch 模型数值模拟得到的最大流量 $1800 \text{ cars}(\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$, 而且 NaSch 模型不能发现在临界点附近存在亚稳态^[2], 这说明该模型的车辆演化规则尚不能尽如人意. 针对这一不足, 人们引入慢启动(slow-to-start)规则以及考虑前车状态影响, 对 NaSch 模型作进一步的改进, 先后提出速度相关的随机延迟刹车模型(VDR)^[16]、 T^2 模型^[17]、BJH模型^[18]、虚拟速度模型^[19]、两步模型^[20]以及相对速度模型^[21,22]. 用这些模型所作的数值模拟均优于 NaSch 模型, 并且在临界点附近发现亚稳态的存在以及相分离现象. VDR模型、 T^2 模型和 BJH模型的研究表明随机延迟刹车概率对交通流的状态变化起很大的作用, 而且能反映出交通的非线性现象.

在 VDR 和 T^2 模型中, 仅仅对速度为零的车辆使用慢启动, 而对其他速度不为零的车辆以相同概率延迟刹车. 两步模型将 NaSch 模型的时间步分成两部分, 用基于跟车模型的思想来描述车辆运动. 相对速度模型引入了依赖于平均密度的减速概率并借鉴了二维绿波模型的思想, 文献[23]在该模型的基础上采用开放性边界条件进行了计算机模拟. 我们在交通观测中进一步发现, 实际交通中, 驾驶员对确定性减速过程与随机延迟刹车过程的顺序是不相同的, 研究证实, 优先考虑后者的模型的数值模拟所得的流量大于 NaSch 模型结果, 同时在基本图上发现临界点附近亚稳态的存在以及在时空斑图上出现畅行相与阻塞相的相分离现象.

3. 模型和数值模拟

在 NaSch 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,然后再不确定地延迟刹车.我们的实际观测表明,更可能出现的情况是:先不确定性地延迟刹车,然后再减速行驶.特别是驾驶员具有敏感预期行为,当车辆由于随机延迟刹车时,此时道路上车辆还很密集,车辆密度很大,预期前方的车间距小于车速,那么就会迫使跟车进行减速,因此,我们将随机延迟刹车过程放在确定性减速过程之前,主要是模拟车辆驾驶的不确定预期行为,这是该模型与 NaSch 模型明显不同之处,我们称之为敏感驾驶的 NaSch 模型,简称 SDNaSch 模型.这样,将 NaSch 模型的车辆状态演化的并行更新规则修改为

1) 加速过程: $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t)+1, v_{\max})$,

该过程模拟所有的驾驶员都期望达到最大的速度;

2) 以概率 P 随机延迟过程:

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

该过程表示驾驶员的随机延迟减速行为;

3) 减速过程: $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n, gap_n)$,

该过程表示车辆为了避免相互碰撞进行确定性减速;

4) 位置更新: $x_n \rightarrow x_n + v_n(t+1)$,

该过程表示每辆车按照前面 1)~3) 的步骤得到的速度更新自己的位置.

我们用长度为 L 的一维离散的格点链来表示一条单向车道.根据上述规则进行数值模拟,可以得到描述交通过程的基本图($q-\rho$).数值模拟的实际道路长度 L 为 7.5km,用 1000 个格点来表示,相当于每个格子的大小对应的实际道路长度是 7.5m,车辆的速度分布在 $0-v_{\max}$ 范围,位置分布在 1000 个一维离散的格点上,边界为周期边界条件,最大速度 $v_{\max} = 5 \text{ cells/s}$ 相当于实际车速 135km/h, N 是分布在 L 上的车辆总数, v_i 是第 i 辆车的速度.计算公式为

$$\text{车辆密度} \quad \rho = \frac{N}{L}, \quad (1)$$

$$\text{平均速度} \quad V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{T+t_0-1} v_i(t), \quad (2)$$

$$\text{平均车流量} \quad q = \rho V. \quad (3)$$

实际模拟中,我们选取 $P = 0.25$,每一次运行取 $2 \times$

10^4 时间步进行数值模拟,开始的 $t_0 = 10^4$ 时间步不进行统计,以便消除暂态的影响,以后的 $T = 10^4$ 的每一时间步中对速度 $v_i(t)$ 进行统计,将经过 10^4 时间步的速度进行时间平均,这样就得到每一次运行的平均速度 V .取样本数为 30,即基本图上的每一个点是 30 次运行的平均值.规则中将 NaSch 模型的减速步骤 2) 与随机延迟刹车步骤 3) 调换一个顺序, Chowdhury 等人^[24]及 Schadschneider^[25]曾经提到过这种调换顺序问题,而没有发表详细分析结果,他们认为经过这样的调换后模拟的结果不会出现自发交通阻塞现象.但是,我们根据上述规则模拟,经过 $8 \times$

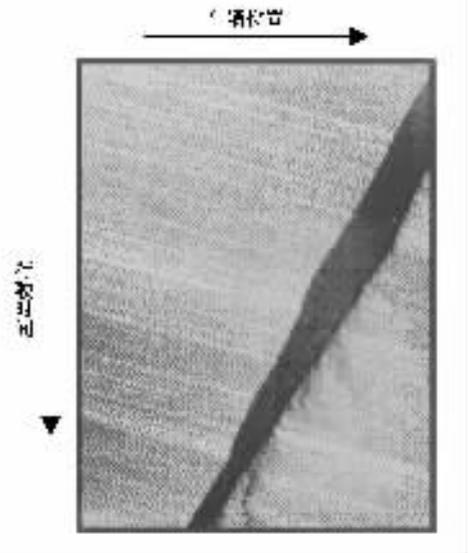


图2 由阻塞相和运动相组成的相分离现象($\rho = 0.168, v_{\max} = 5, L = 1000$).黑色区域表明停止车辆聚集在一起,引起下游流量下降(位置在 400—800 之间,时间 8×10^4 时步之后)

10^4 时步后,得到了图 2 所示的车辆位置-时间演化图,可以看到黑色区域停止前进的车辆聚集在一起形成阻塞相.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一下,车速降了下来,随后就可能不必进行确定性减速,但也可能再进行减速,视车间距而定.在车辆均匀分布状态,这样的减速幅度小于 NaSch 模型,因此,其流量可以达到比较大的值.但在车辆密度增大以后,车辆分布处于非均匀状态,减速过程多于 NaSch 模型,类似慢启动的行为,将导致车速进一步减小,部分跟车发生链式反应,局域车辆密集阻塞,流量快速减少.从数值模拟得到的基本图可以看到某些密度区域流量出现两个分支,这表明亚稳态的存在,亚稳态的出现由随机延迟概率决

定. 局域车辆密集很容易使驾驶员产生预期行为, 车辆随机延迟, 因此随机延迟概率与前方一定范围内的车辆密度有关. 当流量快速减少时, 上游流量大于下游, 这样的过程将会持续一段时间. 随着车辆密度增加, 局域车辆密集增多, 引起道路的流量突然减小, 出现由阻塞相和运动相组成的相分离现象. 相分离现象是较长时间存在亚稳态所导致的结果^[16]. 图 2 中出现很明显的相分离现象, 流量突然减小, 这种情形称为容量下降.

为了研究滞后现象, 参照文献 16 的结果, 我们从两个不同的初始条件出发进行数值模拟, 一个初始条件是所有车辆处于等间距的均匀分布; 另一个初始条件是由一个大尺度、静止的集团组成的大阻塞相. 由此得到有两个分支的基本图如图 3 所示, 从图中可以看出 SDNaSch 模型能够得到较大流量, 比 NaSch 模型的流量大得多, 约大于 40%. 因此与图 1 相比较, 接近于交通实测的流量数据(2500cars/h·lane). 在 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 密度附近, 流量曲线出现不连续, 上面一条分支对应交通流处于均匀状态, 阻塞相

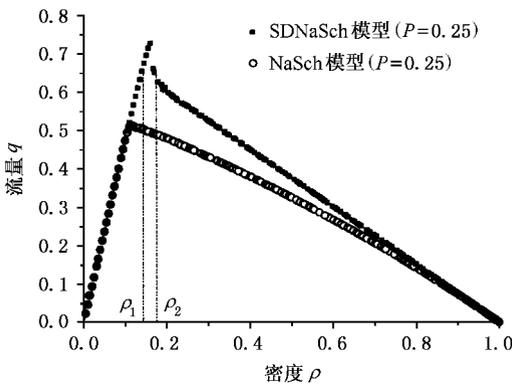


图 3 从两个不同的初始条件进行数值模拟得到的基本图, 即非均匀阻塞状态和均匀分布状态, 并与 NaSch 模型的基本图($v_{max} = 5, L = 1000, P = 0.25$)作了比较. 亚稳态区域在 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 范围

没有出现, 具有大流量. 密度在 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 范围内对应均匀状态的属于亚稳态区域, 在密度 $\rho \approx 0.156$ 时, 交通流量达到最大值; 下面一条分支对应交通流处于阻塞状态, 出现相分离, 流量迅速减少. 从模拟数据进行拟合计算, 当延迟概率 $P =$ 常数时, 满足如下所述的关系.

SDNaSch 模型中上分支对应均匀状态的流量为

$$q_f = \rho(v_{max} - P) = \rho v_f, \quad (4)$$

其中 v_f 是每辆车运行的期望速度, $v_f = 4.75$.

SDNaSch 模型中对应密度在 $\rho_2 < \rho < 1$ 之间的阻塞分支的流量为^[16]

$$q_c = (1 - \rho)(1 - P), \quad (5)$$

当密度 $\rho > \rho_1$ 时, 均匀状态的交通流是亚稳态, 扰动达到一定强度时使车流失稳, 导致流量迅速减小, 出现阻塞相.

实际交通中, 驾驶员对交通状态的敏感反应各不相同, 其中一部分敏感性比较强, 特别是年纪稍大的驾驶员、性格谨慎的驾驶员或者女性驾驶员, 往往比较小心地驾驶车辆, 一旦观察到车间距减小, 就会预先随机减速, 然后再决定确定性减速. 假设这部分敏感驾驶的车辆在车流中所占的比例为 c , 按 SDNaSch 模型规则行驶, 而其余的车辆按 NaSch 模型规则行驶. 图 4 为 c 取值不同的情况下数值模拟得到的基本图, 可以发现, 随着敏感驾驶车辆的增多, 道

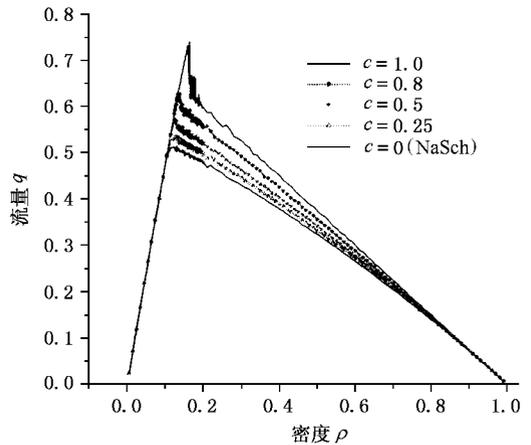


图 4 在敏感驾驶车辆所占比例不同的情况下, 数值模拟得到的基本图

路的容量也随之提高, 敏感驾驶因素对车流的作用是很大的. 从车辆速度分布演化的时空斑图(如图 5 所示)可以发现 SDNaSch 模型与 NaSch 模型的明显差别. NaSch 模型($c = 0$)没有明显的畅行相与阻塞相的分离界面, SDNaSch 模型($c = 1$)就出现了明显的畅行相与阻塞相的分离界面, 而且出现宽幅运动阻塞相^[26]. 当车流中敏感驾驶车辆较少时($c = 0.25-0.5$), 出现了许多窄幅阻塞相, 随着敏感驾驶车辆的增多($c = 0.8-1.0$), 许多窄幅阻塞相就会合并成宽幅运动阻塞相^[26]; 同时, 从图 5(b)可以看出, 在出现宽幅运动阻塞相之前, 车流处于畅行相, 它持续了一段时间, 当随机延迟起作用时, 导致了宽幅运动阻塞相的出现, 而且宽幅运动阻塞相消散的时候, 畅行相又出现, 这与 Kerner 观测到的畅行相 \rightarrow 宽幅

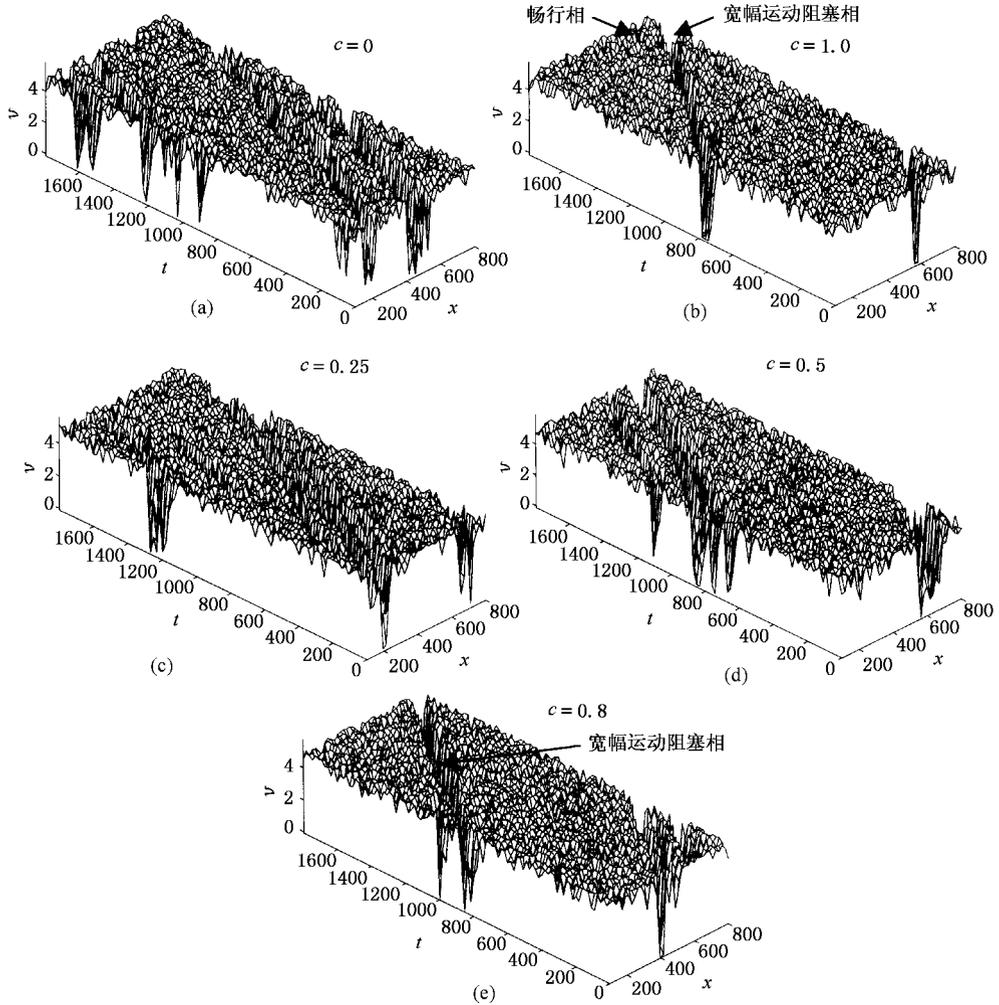


图5 敏感驾驶车辆所占比例不同的情况下,数值模拟得到的车辆速度分布演化图($\rho = 0.168$,位置 100—800, $t = 6000$ 时步后计时)

运动阻塞相和宽幅运动阻塞相 \rightarrow 畅行相的交通相变是一致的^[26]。

4. 结 论

近年来,交通流元胞自动机模型有了很大的发展,本文在 NaSch 模型的基础上,优先考虑行驶车辆中驾驶员的不确定的预期行为,提出随机延迟过程在确定性减速之前的一维交通流元胞自动机模型,并对交通流进行模拟,从而展示交通流的复杂行为,

证实了亚稳态的出现和相分离现象,从车辆速度分布演化的时空斑图,可以发现宽幅运动阻塞相的出现以及畅行相 \rightarrow 宽幅运动阻塞相和宽幅运动阻塞相 \rightarrow 畅行相的交通相变。这是由于将 NaSch 模型演化规则的顺序调换引起的结果,从而说明 NaSch 模型对改变演化步骤的顺序是相当敏感的。实际交通中,敏感驾驶因素对车流的作用是很大的,数值模拟表明敏感驾驶车辆越多,车流量就越大。本文的数值模拟反复进行了多次,模拟结果有很好的重复性,表明本文所采用的程序是可靠的、有效的。

- [1] Dai S Q *et al* 1997 *Ziran Zazhi* **19** 196 (in Chinese) [戴世强等 1997 自然杂志 **19** 196]
- [2] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [3] Kerner B S and Rehborn H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **87** 91
- [4] Kerner B S and Konhäuser P 1993 *Phys. Rev. E* **48** R2335
- [5] Newell G F 1959 *Oper. Res.* **8** 589
- [6] Treiterer J *et al* 1965 *Appx. IX to final Report* (Columbus : Ohio State Univ.) p202
- [7] Lighthill M J and Whitham G B 1955 *Proc. Roy. Soc. Ser. A* **22** 317
- [8] Helbing D *et al* 2001 *Trans. Res. Part B* **35** 183
- [9] Nagel K and Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221
- [10] Ishibashi Y and Fukui M 1994 *J. Phys. Soc. Japan* **63** 2882
- [11] Wang B H, Wang L, Hui P M, H B 1998 *The 20th IUPAP Inter. Conf. on Stat. Phys. Topic 2 T0791 PO 02/145*
- [12] Wang B H, Kuang L Q and Hui P 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]
- [13] Wang L and Wang B H 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 808 (in Chinese) [王 雷、汪秉宏 1999 物理学报 **48** 808]
- [14] Wagner P 1996 *Traffic and granular flow* (Singapore : World Scientific) p193
- [15] OLSIM *Physics of Transport and Traffic* University of Duisburg http://traffic.comphys.uni-duisburg.de.
- [16] Barlovic R *et al* 1998 *Eur. Phys. J. B* **5** 793
- [17] Takayasu M and Takayasu H 1993 *Fractals* **1** 860
- [18] Benjamin S C, Johnson N F and Hui P M 1996 *J. Phys. A : Math. & Gen.* **29** 3119
- [19] Li X B, Wu Q S and Jiang R 2001 *Phys. Rev. E* **64** 661
- [20] Dong L Y, Xue Y and Dai S Q 2002 *Appl. Math. and Mech.* (Engl. Ed.) **23** 363
- [21] Xue Y, Dong L Y and 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]
- [22] Xue Y 2002 *Shanghai University doctoral dissertation* (in Chinese) [薛 郁 2002 上海大学博士学位论文]
- [23] Tan H L, Liu M R and 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]
- [24] Chowdhury D *et al* 2000 *Physics Reports* **329** 199
- [25] Schadschneider A 2001 *Traffic flow : A statistical physics point of view* (Preprint submitted to Elsevier Science)
- [26] Kerner B S 2001 *Networks and Spatial Economics* **1** 35

One-dimensional sensitive driving cellular automaton model for traffic flow^{*}

Lei Li^{1,2)} Xue Yu^{1,3)} Dai Shi-Qiang¹⁾

¹⁾ Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

²⁾ School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

³⁾ Department of Physics, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(Received 19 November 2002 ; revised manuscript received 8 January 2003)

Abstract

Based on the NaSch cellular automaton traffic model, a new one-dimensional cellular automaton model (called SDNaSch model, for short) is proposed through preferentially considering the sensitive behaviour of drivers, in which the randomization brake is arranged before the deterministic deceleration. According to the new update rules of the evolution of vehicles, numerical simulation is conducted and leads to some new results. The fundamental diagram obtained by the simulation shows that the traffic capacity of a road is enhanced and closer to the observed data compared with that of the NaSch model. It is found from the fundamental diagram that there exist two branches in some density regions, which illustrates the existence of the metastable state near the critical point and the phase separation. According to the evolution pattern of the vehicle speed in space and time, the wide moving jams is reproduced with the phase transitions between free flow and wide moving jams. With the consideration of the actual traffic situation, *i. e.*, some drivers being sensitive and following the new rules, while others being not and following the original NaSch rules, the corresponding simulation verifies the remarkable effect of the sensitive driving factor on the characteristics of traffic flows. The traffic capacity rises along with the increase in the fraction of sensitive drivers.

Keywords : traffic flow, cellular automaton model, metastable state, phase separation, traffic phase transition

PACC : 0550, 0520, 6470

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19932020).