

考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型

张柠溪 祝会兵 林亨 黄梦圆

One-dimensional cellular automaton model of traffic flow considering dynamic headway

Zhang Ning-Xi Zhu Hui-Bing Lin Heng Huang Meng-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双出口房间人群疏散的实验研究和数学建模

Experimental features and mathematical model of pedestrian evacuation from a room with two exits

物理学报.2014, 63(9): 094501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094501>

中小学门口道路上学期间的一个元胞自动机模型

A cellular automaton model for the road in front of elementary and middle school gates during students going to school

物理学报.2014, 63(9): 094502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094502>

交叉口进口道换道行为研究及建模

Research and modeling of the lane-changing behavior on the approach

物理学报.2014, 63(4): 044501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044501>

基于元胞自动机模型的高速公路可变速度限制交通流特性分析

Characteristic analysis of traffic flow in variable speed limit section of freeway based on cellular automaton model

物理学报.2012, 61(24): 244503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.244503>

基于跟车行为的双车道交通流元胞自动机模型

Two-lane cellular automaton traffic model based on car following behavior

物理学报.2012, 61(24): 244502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.244502>

考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型*

张柠溪 祝会兵† 林亨 黄梦圆

(宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

(2014年6月10日收到; 2014年7月7日收到修改稿)

基于 NaSch 元胞自动机交通流模型, 考虑司机复杂的性格特征和驾驶行为差异, 引入相邻车辆的动态车间距, 提出了一个改进的单车道元胞自动机交通流模型. 通过数值模拟得到了流量-密度关系, 在中高密度区域呈现出一种弥散分布的状态而非惟一确定的关系, 再现了交通系统中的自由流、同步流及宽幅运动阻塞, 表明道路上即使没有交通瓶颈也会出现同步流和拥挤交通, 同时揭示了在同步流中存在的车辆高速跟驰现象, 高速跟驰率与交通实测结果较为符合.

关键词: 三相交通流, 元胞自动机模型, 动态车间距, 高速跟驰

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.64.024501

1 引言

在传统的交通流理论中, 交通流量与密度之间或者车速与车间距之间存在着某种单一的关系^[1-6], 交通流可以处于稳定、亚稳态和不稳定状态, 亚稳态和不稳定状态下的交通流一旦遇到扰动就会引起交通振荡. 但是, 近年来 Kerner 等^[7,8]通过交通实测与分析, 提出了三相交通流理论, 指出拥挤交通中的稳定状态分布在基本图上一个很大的二维区域内, 此时流量与密度互不相关, 车流的运动状态可以分为自由流、同步流和宽幅运动阻塞. 在车流演化过程中存在三种形式的相变, 即从自由流到同步流的相变、从自由流到宽幅运动阻塞的相变以及从同步流到宽幅运动阻塞的相变.

Kerner 的三相交通流理论由于与实测结果比较接近, 因此近年来引起了广泛的关注, 尤其是同步流现象更是成为研究的热点. 研究表明, 不同的司机为适应交通环境而采取的速度调节, 是产生同步流的重要原因, 只要交通流模型中充分考虑司机的驾驶行为, 就能够模拟交通流的复杂特性^[9]. 另外, 许多研究发现, 司机的心理活动是个复杂的

因素, 会对交通拥堵的产生和传播产生重要的影响^[9-11], 如预期反应和过分反应^[12]是拥挤交通振荡的重要原因.

由于缺少精确的交通实测数据^[13], 传统交通流理论与三相交通流理论之间的分歧一直处于争论的焦点. Jiang 等^[14]为了弥补这一缺憾, 在一段开放式的道路上进行了大规模的跟车试验, 通过对试验数据的分析, 得出了与三相交通流理论一致的结论.

另外, 吴胜春等^[15]通过对交通观测数据的研究指出, 中国城市高架或快速路交通流存在着一个重要特征——“高速跟驰”现象, 就是车辆的速度大于它与前车的车头间距. 观测发现, 在交通畅通的高密度区域, 有超过7%的车辆速度明显高于通常处于该密度时应有的速度, 属于高速跟驰状态, 这是一个值得关注的现象, 但还没有一个模型能很好地展现这个特点.

目前, 交通流模型有很多种, 而作为微观模型之一的元胞自动机交通流模型由于其简单性和易于计算机操作而得到广泛的应用, 其中最重要的元胞自动机交通流模型之一是由 Nagel 和 Schreken-

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB725404)、国家自然科学基金(批准号: 11372147)、宁波市自然科学基金(批准号: 2014A610026)和宁波大学王宽诚基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhuhuibing@nbu.edu.cn.

berg 于 1992 年提出的 NaSch 模型^[1], 这是一个随机的单车道元胞自动机交通流模型, 把车道视为长度为 L 的一维离散格点链, 分布着 N 辆车, 假定只有一种车型, 每一个格点在每一个时刻或为空或被一辆车占据, 每辆车的状态由它的速度 v_n 表示 ($n = 1, 2, \dots, N$), 速度 v_n 允许在 $\{0, 1, 2, \dots, V_{\max}\}$ 的范围内取值, V_{\max} 是允许的最大车速. 用 x_n 表示第 n 辆车的位置, $d_n = x_{n+1} - x_n - 1$ 表示第 n 辆车与前面第 $n + 1$ 辆车之间的车间距, 在每个时间步 $t \rightarrow t + 1$, 所有车辆的位置和状态按照下面的演化规则并行更新.

步骤 1 加速过程: $v_n(t + 1) = \min(v_n(t) + 1, V_{\max})$.

步骤 2 减速过程: $v_n(t + 1) = \min(v_n(t), d_n(t))$.

步骤 3 以延迟概率 p 随机慢化过程: $v_n(t + 1) = \max(v_n(t) - 1, 0)$.

步骤 4 位置更新: $x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1)$.

NaSch 模型尽管简单, 却可以描述一些实际交通现象, 如自发产生的堵塞以及拥挤交通中的时走时停波等现象, 但利用 NaSch 模型对高速公路建模得到的交通流量值低于实际测得的流量值^[16]. 在此基础上, 人们也提出了一些改进的元胞自动机交通流模型^[17-19], 目的是使模型更加接近实际. 但这些模型都属于传统的交通流模型, 与交通实测结果有一些差异, 如不能再现流量-密度的二维弥散分布特性等. 因此, 如何对传统的交通流模型进行修正和拓展, 使其能更好地展示实际交通的本质特征, 一直是人们关注的问题.

本文在 NaSch 模型的基础上, 考虑司机的不同驾驶特征和动态车间距, 提出了一个改进的元胞自动机交通流模型, 再现了流量-密度的二维分布区域, 通过对车辆的时空演化图、速度时间序列以及对应的车间距分析, 研究中国城市交通流的实际特征以及驾驶行为对交通流动力学特性的影响.

2 考虑动态车间距的元胞自动机模型

当道路上车辆密度较高时, 司机通常会根据前方车辆的车速和车辆间距来控制自己的车速. 倘若行驶条件比较平稳, 则司机会适当减小安全距离, 进行高速跟驰, 这一现象已在交通观测中被发现^[15], 为了避免追尾, 司机也会对前车的运动状态

进行预判. 为模拟这一交通现象, 我们假设前车的演化规律可用下式表示:

$$v_{n+1}^e = \min(v_{n+1}^e + 1, V_{\max}), \quad (1)$$

$$v_{n+1}^e = \min(v_{n+1}^e, d_{n+1}), \quad (2)$$

$$v_{n+1}^e = \max(v_{n+1}^e - 1, 0), \quad (3)$$

这里, v_{n+1}^e 是指前车的预期车速, d_{n+1} 是指前车与它前面车辆的车间距. (1) 式表示在下一时刻, 首先前车会加速, 但不能超过它的最大速度; (2) 式表示前车为了避免碰撞会减速; (3) 式是出于安全考虑, 把前车的随机刹车行为当作必定发生的事件来对待. 这样, NaSch 模型中的第二步演化规则就变成下面的形式:

$$v_n = \min(v_n, d_n + v_{n+1}^e). \quad (4)$$

这样, 新模型考虑了前车的运动过程, 前后车辆之间的车间距遵循同步的变化规律, 改变了 NaSch 模型中把当前时刻的车间距作为下一时刻车辆运动极限空间的规则, 因此我们命名这个模型为动态车间距模型 (dynamic headway model, DHD 模型). 显然, 只有驾驶技术比较熟练、性格比较勇猛的司机才会考虑动态车间距来调整车速, 并且, 同一个司机在这一时刻采取高速跟驰, 下一时刻由于环境或心理的原因可能不采取高速跟驰. 因此, DHD 模型中我们选取比例为 r 的部分车辆采用如 (4) 式所示的减速步, 即考虑动态车间距, 这些车辆按照下面的演化规则更新车辆的速度和位置; 其余车辆按照 NaSch 模型的演化规则更新车辆的速度和位置.

考虑动态车间距的车辆演化规则包括以下四个步骤:

1) 加速, $v_n(t + 1) = \min(v_n(t) + 1, V_{\max})$;

2) 减速,

$$v_{n+1}^e(t + 1) = \min(v_{n+1}^e(t) + 1, V_{\max}),$$

$$v_{n+1}^e(t + 1) = \min(v_{n+1}^e(t), d_{n+1}(t)),$$

$$v_{n+1}^e(t + 1) = \max(v_{n+1}^e(t) - 1, 0),$$

$$v_n(t + 1) = \min(v_n(t), d_n + v_{n+1}^e(t + 1));$$

3) 以延迟概率 p 随机慢化, $v_n(t + 1) = \max(v_n(t) - 1, 0)$;

4) 位置更新, $x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1)$.

当 $r = 1$ 时, 表示所有的车辆在行进过程中都会考虑与前车的动态间距; 当 $r = 0$ 时, 全部车辆采用 NaSch 模型的车辆更新规则; 当 $0 < r < 1$ 时, 部

分车辆按照新的演化规则, 其余车辆按照 NaSch 模型更新车辆的速度和位置. 由于不同的环境和驾驶员心理变化, 考虑动态车间距的车辆比例 r 的取值在不同的时刻都会有所不同.

3 数值模拟与分析

利用上述车辆更新规则开展数值模拟, 采用周期性边界条件, 取每个元胞格子的长度为 7.5 m, 格子可以是空的, 也可以被一辆车所占据, 我们模拟的道路长度取为 $L = 1000$, 对应于真实的道路长度 7500 m. 一个时间步长相当于 1 s 时, 这正好与人们的反应时间相当. 考虑到城市快速路的限速, 取最大车速为 $V_{\max} = 3$, 车辆的速度值就在 0 与最大速度之间取值. 车辆的初始位置和速度都随机分布.

数值计算中用到的计算公式有:

$$J = \rho \cdot v, \quad (5)$$

这里, J 是平均流量, ρ 是总体车辆密度, v 是平均速度. 而 ρ 和 v 分别表示如下:

$$\rho = N/L, \quad (6)$$

$$v = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{T+t_0-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t), \quad (7)$$

这里, N 是分布在所选路段上的车辆数, $v_n(t)$ 是第 n 辆车在 t 时刻的速度, T 是所选样本的总时间长度. 在数值计算过程中, 为了消除暂态影响, 前 1×10^5 时间步的结果不纳入统计计算中.

3.1 流量分析

在任何情况下, 司机的性格都千差万别, 有些勇猛, 有些谨慎, 有些司机这一时刻谨慎, 可下一刻又表现得比较勇猛, 因此, 在每个时刻勇猛司机的比例都会变化. 我们认为勇猛司机在行驶中会考虑动态车间距, 实际上, 对应于同一个密度值, 勇猛司机比例 r 的取值可以是 0—1.0 之间的任何数, 但为了方便计算, 我们取 0—1.0 之间间隔 0.1 的数.

图 1 是 DHD 模型通过数值模拟得到的流量-密度分布图, 正如 Kerner 所说, 实际测量的流量是散布在流量-密度平面上的一个二维区域中的点, 它们可简化成低密度自由流阶段的一条曲线和中、高密度拥挤流阶段的一个二维区域^[8,9]. 图中的低密度区域, 点据比较集中, 流量与密度的关系接近

于一一对应关系, 但是在中高密度区域, 流量值弥散分布在一个二维区域, 这个现象与我国交通实测得到的流量-密度关系也相符合^[20]. 对于相同的密度值, 流量值随着 r 值的增大而增大, 当 r 取 1.0 时, 流量最大, 当 r 取 0 时, 即 NaSch 模型, 此时流量最小, 说明新模型提高了流量值.

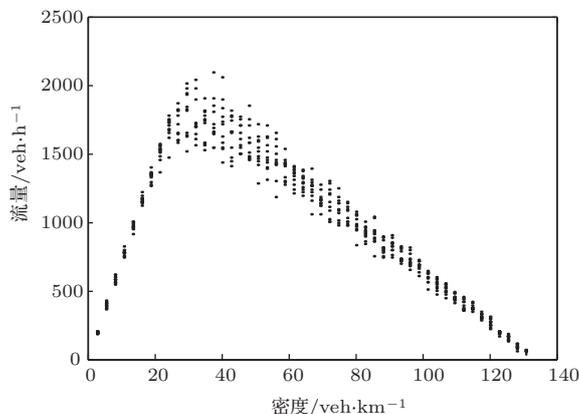


图 1 DHD 模型的流量-密度

仔细分析这一现象, 在低密度时, 车辆之间的互相影响比较小, 不管勇猛的司机比例是多少, 模拟得到的结果基本一致, 表明此时司机的性格差异对流量的影响不大, 在图上就表现为点据重合. 但是, 在中高密度区域, 是否考虑勇猛司机的驾驶特点会对模拟结果产生重要影响, 这是因为在这个区域, 车辆之间的影响已不容忽视, 司机的性格差异就会对流量产生重要影响. 在 DHD 模型中, 由于考虑司机的不同性格组成, 所以在流量-密度图上出现了符合三相交通流理论和实测结果的弥散分布的点据.

3.2 车辆运动分析

图 2(a)—(d) 给出了密度分别为 0.1, 0.15, 0.25 和 0.5 时单车道前后相邻两辆车的速度及车间距随时间的变化曲线, 其中速度-时间变化图中的实线表示前车, 点划线表示后车, 为了便于比较, 速度的单位取为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 车间距的单位取为 m, 在计算中我们取最大速度为 $V_{\max} = 3$, 对应实际速度 $81 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 或 $22.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 当密度 $\rho = 0.1$ 时, 如图 2(a) 所示, 前后车的速度都维持在较高的水平, 且速度相近, 车间距在一个较小的区间波动, 并且远远大于每秒钟车辆运动的距离, 系统处于自由流, 这时速度与车间距之间有惟一确定的关系, 也就是密度与流量之间有惟一确定的关系.

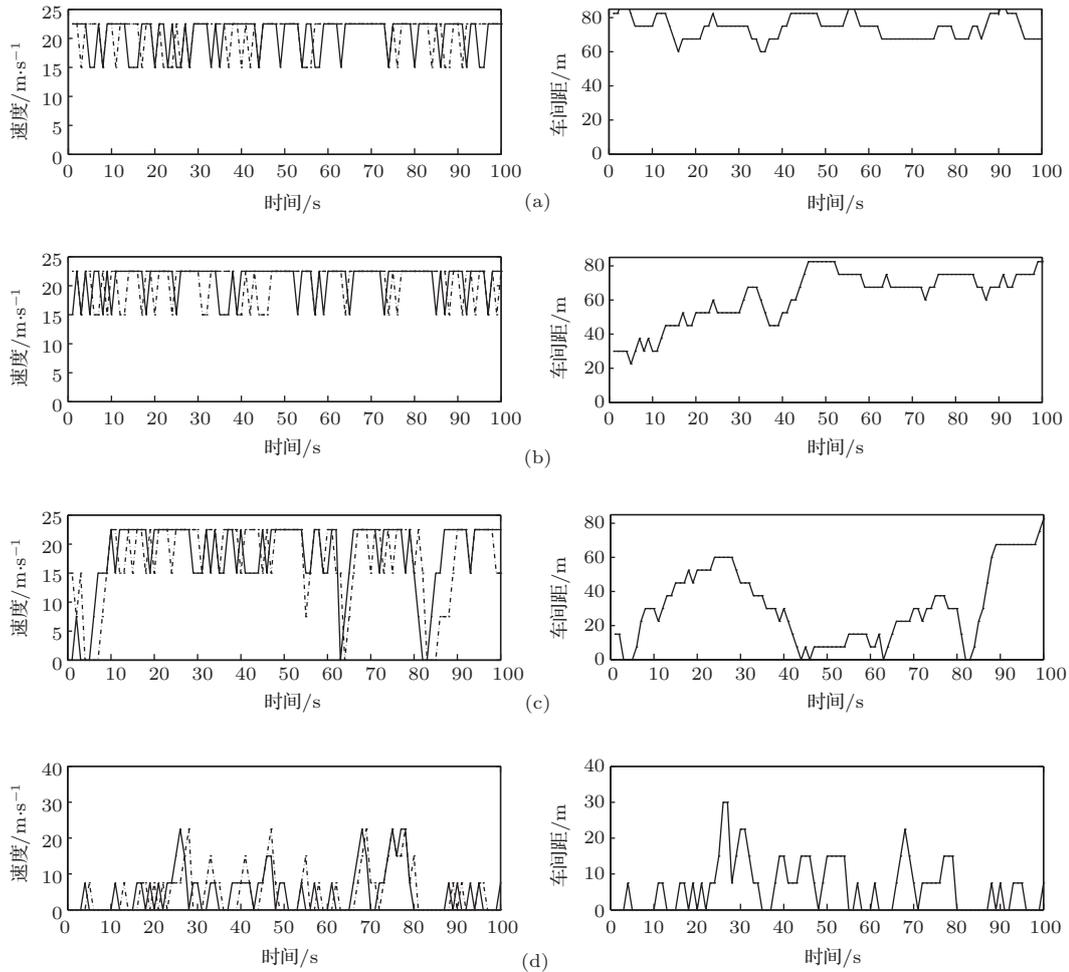


图2 前后车辆速度及车间距随时间的变化

当密度 $\rho = 0.15$ 时, 如图 2(b) 所示, 前后车的速度还维持在较高的水平, 但是车间距的波动明显增大, 这时速度与车间距之间已不存在惟一确定的关系, 这个特点与传统模型不同, 此时系统已演化成同步流状态, 在流量密度的关系图中出现了弥散分布的点(见图 1). 这一现象已有很多人在交通观测中发现, 而最近 Jiang 等^[14] 实施的跟车试验中也发现了这一现象, 而且即使没有瓶颈也会出现同步流, 我们的模型也验证了这一点. 另外, 可以看到, 在这个密度下, 大部分时段的车间距都大于车速, 但也有少数时间段的车间距小于车速, 表明已出现高速跟驰的现象.

当密度 $\rho = 0.25$ 时, 如图 2(c) 所示, 在部分时段, 两辆车还是保持较高的速度, 但有些时段, 速度有跌落, 甚至出现了速度为零的现象, 车间距的大小也有波动, 这时的系统仍是同步流状态, 只是其中有一些运动的阻塞成分, 此时在流量-密度关系图中(见图 1) 呈现的弥散点范围更广, 同时, 我们看

到, 在同步流的某些时段, 车间距小于该时刻的车速, 表明高速跟驰的现象已十分明显.

当密度 $\rho = 0.5$ 时, 如图 2(d) 所示, 车辆低速行驶, 很多时段出现了零速度, 这时宽幅运动阻塞已成为主要的状态, 车间距一般都不小于车速, 说明此时人们都会比较谨慎, 不会采取高速跟驰的驾驶方式.

为了对交通流的动力学特征有更深刻的了解, 我们通过模拟得到了车辆的时空演化图, 以及对应某辆车的运行轨迹(粗实线) 给出的速度演化曲线, 如图 3 所示, 其中时空演化图中的轨迹线是间隔一辆车得到的. 图 3(a)—(d) 图分别对应密度为 0.1, 0.15, 0.25, 0.5 时的情景, 勇猛司机的比例设定为 0.5.

可以看到, 当 $\rho = 0.1$ 时, 如图 3(a) 所示, 轨迹线顺直, 速度平稳, 与图 2(a) 显示的自由流特性符合. 当密度 $\rho = 0.15$ 时, 在时空演化图中有些车辆出现了速度为零的瞬间, 但又迅速恢复前行, 就是

图中出现的小波纹, 但大部分轨迹线顺直, 我们选取的这辆车的轨迹线(粗实线)也表现为顺直, 对应的速度时间序列稳定, 这是Kerner提出的同步流现象, 而出现的小波纹被称为GP^[9], 即同步流中有一些运动的阻塞成分, 而轨迹线顺直部分就是SP, 即同步流中没有交通阻塞现象, GP与SP区域在不断地随时间转换.

当密度 $\rho = 0.25$ 时, 用粗实线表示的这辆车的轨迹线在大部分时间都是顺直的, 但在有些时段停滞, 对应的速度降为零, 速度的时间序列有平稳的区域也有降落的区域, 是同步流与宽幅运动阻塞并存的状态. 但同步流中GP区域增多, 与图3(a), (b)比较, 在相同的时间里车辆的运行距离缩短.

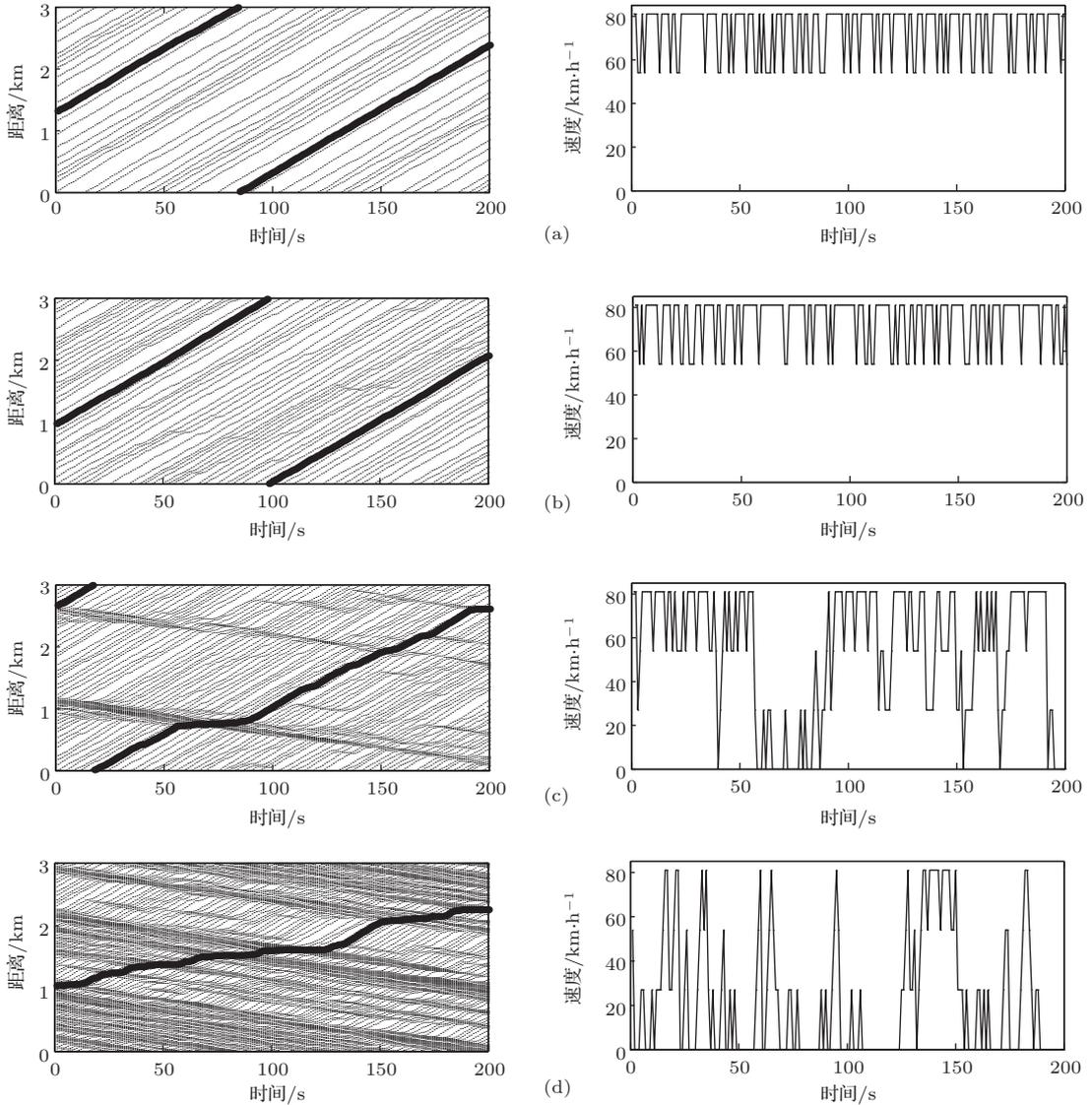


图3 车辆的时空演化及速度演化

当密度 $\rho = 0.5$ 时, 从粗实线的运行轨迹看, 停滞的时间增多, 经过的距离更短, 总体车辆的集簇区域也在增多, 在速度演化图中, 速度的时间序列呈现无规则的状态, 这时系统已转化为宽幅运动阻塞.

以上的分析表明, DHD模型能够展现交通系统中的自由流、同步流、宽幅运动阻塞, 与实际交通

现象符合较好.

3.3 高速跟驰率分析

吴胜春等^[15]通过对交通观测数据的分析, 发现了“高速跟驰”的现象, 即有些车辆的车速大于它与前车的车头间距. 他们发现高速跟驰现象主要出现在交通畅通的条件下, 它是总体交通畅通条件下

的时密时疏,在总体处于中低密度的高速交通中,有时会出现一段高密度的车辆,其速度却明显高于通常处于该密度时应有的速度.我们通过数值模拟也发现了类似的现象,如图2(b), (c)所示,在中低密度区域的同步流状态下有高速跟驰的现象.

图4是通过数值模拟得到的高速跟驰率随密度的变化曲线,勇猛司机的比例 r 分别取0.2, 0.5, 0.65, 0.8, 1.0. 这里,我们采用同文献[15]相同的定义来描述高速跟驰.从图中可以发现,在中等密度区域,高速跟驰率随着勇猛司机比例的增加而升高.实测数据表明[15],在中等密度下,通畅交通中存在超过7%的高速跟驰车辆.从图4中可以看到,当 $r > 0.65$ 时,某些密度值对应的高速跟驰率就会超过7%,与实测值较为符合.

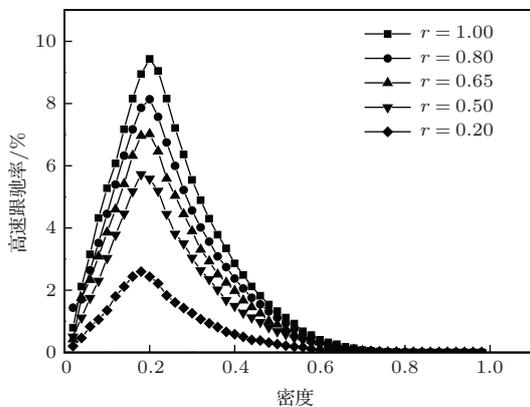


图4 DHD模型的高速跟驰率

另外,我们在模拟中发现,当 $r = 0$ 时,即NaSch模型,高速跟驰率为0,说明NaSch模型不能模拟高速跟驰的现象,这与NaSch模型的车辆更新规则有关,因为规则不允许出现车辆的速度大于它与前车车头间距的情况.

4 结 论

在NaSch元胞自动机交通流模型的基础上,充分考虑司机复杂的心理活动和驾驶行为差异,本文提出了一个改进的单车道元胞自动机交通流模型,简称为DHD模型.模型中认为交通流中时常有一些性格比较勇猛的司机,他们开车时会根据动态车间距调整自己的速度.通过数值模拟显示,在中高密度区域,流量-密度关系呈现一种弥散分布的状态而非唯一确定的关系,通过对车辆的速度时间序列以及对应的车间距分析,并结合车辆的时空演化图,发现DHD模型能够模拟交通流中的自由

流、同步流以及宽幅运动阻塞,表明在无交通瓶颈的地方同样会出现同步流现象,也说明了在模型中只要细致考虑司机的驾驶行为,就能够揭示部分交通流的复杂特性.另外,在同步流中模拟得到了部分车辆的高速跟驰现象,高速跟驰率与交通实测结果符合.这个现象虽然是有风险的驾驶方式,但是它能提高道路的利用率,如何引导车辆既能有效利用道路资源又能保证交通安全,是我们需要解决的问题.DHD模型虽然是单车道交通流模型,但是这一思想可以用于双车道乃至多车道系统中,这也将是我们下一步的研究方向.

参考文献

- [1] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I (France)* **2** 2221
- [2] Mitarai N, Nakanishi H 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1766
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] Fang Y, Chen J Z, Peng Z Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 108902
- [6] Zheng Y Z, Zheng P J, Ge H X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 020503
- [7] Kerner B S, Rehborn H 1996 *Phys. Rev. E* **53** 4275
- [8] Kerner B S, Klenov S L, Wolf D E 2002 *J. Phys. A* **35** 9971
- [9] Kerner B S 2012 *Phys. Rev. E* **85** 036110
- [10] Orosz G, Wilson R E, Stepan G 2010 *Phil. Trans. R. Soc. A* **368** 4455
- [11] Yeo H, Skabardonis A 2009 In: Lam W et al eds. *18th International Symposium. Traffic Theory and Transportation* (vol. 1) (Hong Kong, China: Springer) p99
- [12] Laval J A, Leclercq L 2010 *Phil. Trans. R. Soc. A* **368** 4519
- [13] Kerner B S 2013 *Physica A* **392** 5261
- [14] Jiang R, Hu M B, Zhang H M, Gao Z Y, Jia B 2014 *PLoS ONE* **9** e94351
- [15] Wu S C, Zheng X Q, Guo M M, Wu Z 2011 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **41** 791 (in Chinese) [吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 吴正 2011 中国科学: 物理学 力学 天文学 **41** 791]
- [16] Wagner P 1996 In: Wolf D E et al. eds. *Traffic and Granular Flow* (Singapore: World Scientific) p139
- [17] Benjamin S C, Johnson N F, Hui P M 1996 *J. Phys. A* **29** 3119
- [18] Li X B, Wu Q S, Jiang R 2001 *Phys. Rev. E* **64** 066128
- [19] Zhu H B 2010 *Physica A* **389** 3134
- [20] Lin Z X, Guo M M, Zheng X Q 2010 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **42** 848 (in Chinese) [林展熙, 郭明旻, 郑贤清 2010 力学学报 **42** 848]

One-dimensional cellular automaton model of traffic flow considering dynamic headway*

Zhang Ning-Xi Zhu Hui-Bing[†] Lin Heng Huang Meng-Yuan

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(Received 10 June 2014; revised manuscript received 7 July 2014)

Abstract

Based on the NaSch cellular automaton traffic model, a modified single lane traffic model is proposed by considering the dynamic headway of successive vehicles, in which the complex characteristic and driving behavior difference between drivers are taken into account. The relationship between the flow rate and the traffic density is obtained by the numerical simulation, and it shows a two-dimensional region in the flow density plane. The three traffic phases, i.e., free flow, synchronized flow, and wide moving jams, are exhibited. It indicates that the synchronized flow and traffic jams can appear even if there is no traffic bottleneck. Besides, the high speed car-following phenomenon is indicated when the traffic is in the synchronized flow. The rate of the high speed car-following is in good agreement with the measured result.

Keywords: three-phase traffic flow, cellular automaton model, dynamic headway, high speed car-following

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: [10.7498/aps.64.024501](https://doi.org/10.7498/aps.64.024501)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725404), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11372147), the Natural Science Foundation of Ningbo, China (Grant No. 2014A610026), and the K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: zhuhuibing@nbu.edu.cn.