

高速跟驰交通流动力学模型研究*

陈永^{1)†} 张薇²⁾

1) (兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730070)

2) (兰州交通大学交通运输学院, 兰州 730070)

(2019年8月19日收到; 2019年10月30日收到修改稿)

为研究道路交通中的高速跟驰物理现象, 针对高速跟驰车辆特点, 综合考虑了驾驶员换道决策行为以及随机慢化等因素, 结合前景理论等方法, 提出了一种用于模拟道路交通中高速跟驰物理现象的动力学模型(简称 HCCA 模型). 通过计算机数值模拟, 研究了高速跟驰交通流物理现象演化机理及高速跟驰特性. 结果表明: 与对称的双车道元胞自动机动力学模型相比, 本文建立的 HCCA 动力学模型能够再现道路高速跟驰物理现象, 并得到了道路小间距高速跟驰率超过 7% 的结果与实测结果相符合, 最后模拟得到了丰富的交通物理现象, 再现了自由流、同步流及运动阻塞等复杂交通物理现象.

关键词: 交通流, 高速跟驰, 动力学模型, 元胞自动机**PACS:** 45.70.Vn, 89.40.-a, 05.50.+q**DOI:** 10.7498/aps.69.20191251

1 引言

交通流理论是运用物理学、数学和力学等原理方法来描述交通特性的一门交叉学科, 它能够更好地解析交通物理现象及其本质, 提高道路运营效率. 元胞自动机 (cellular automaton, CA) 是一种定义在离散时间维度上通过空间局部规则并行演化的动力学模型, CA 相当于传统物理学中的近距离作用的“场”, 它是模拟非线性复杂系统的一种有效动力学工具^[1,2]. CA 动力学模型广泛应用于物理、材料、社会学、非线性科学等领域的研究工作中^[3-7].

CA 动力学模型把交通流看作由大量粒子相互作用的复杂动力学系统, 通过对单个车辆动力学行为分析, 演化出整个物理系统的宏观性质, 从而实现了对交通中各种物理现象的规律性研究, 国内外众多学者对此开展了大量的研究工作^[8-13]. Nagel

和 Schreckenberg^[14] 提出的单车道 NaSch 模型是一种典型的 CA 动力学模型, 可模拟交通堵塞现象及时走时停波等物理现象. Chowdhury 等^[15] 在单车道 NaSch 模型的基础上, 提出了对称的双车道元胞自动机 (symmetric two-lane cellular automata, STCA) 模型, STCA 动力学模型引入换道规则对道路换道交通流物理特征进行了研究; 彭莉娟和康瑞^[16] 建立了一种考虑驾驶员特性的 CA 模型, 研究了驾驶员类型对交通流的影响; 董长印等^[17] 对混入智能车的下匝道瓶颈路段交通流进行了研究; Deng 和 Feng^[18] 考虑提出了一种基于层次分析的换道决策交通流模型; 郑亮等^[19] 从驾驶员对车速和间距判断行为角度, 建立了基于驾驶员行为的 CA 模型. 张柠溪等^[20] 考虑了司机驾驶行为差异, 引入相邻车辆的动态车间距, 提出一种改进的单车道 CA 模型; Krzysztof^[21] 研究了路段停车对交通流、速度和行驶时间的影响; Damian 等^[22] 通过改进 NaSch 模型研究了变道和过度等待对道路

* 国家自然科学基金 (批准号: 61841303, 61963023) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: edukeylab@126.com

交通的影响; Zhao 等^[23]考虑前车速度等因素,建立了车联网环境下交叉口交通流的 CA 模型. 上述研究从不同角度模拟得到了许多交通物理现象,揭示了交通流的内在特征.

然而,交通流的自身特点和复杂性使得目前的交通流动力学模型仍然不能完善地解决交通问题. 国内一些学者通过架设的视频采集设备长时间连续拍摄了国内上海、北京等典型大城市多个高架或快速路段的交通流录像采集,建立了一个包含 210920 组交通流实测的大样本交通实测数据库,通过对这些实测数据的统计分析,发现道路上存在一些车速较高的车辆,车速大于它与前车的车头间距,在数据集中的小间距车辆并非都是低速行驶,其速度明显高于通常处于该密度时应有的速度,即存在“高速跟驰”现象^[24]. 文献^[24]指出传统的交通流模型无法模拟出“高速跟驰”现象,需要新的交通模型对此物理现象进行描述和分析.

目前针对交通流动力学的影响性研究中,大部分研究基于 NaSch 模型,但是 NaSch 模型无法模拟出高速跟驰现象,这是因为在 NaSch 模型安全防护中要求车速始终要小于或等于两车车头间距,不会出现车速大于车头间距的情况. 此外,目前对于高速跟驰交通行为的部分研究中^[2,20],仅仅考虑了单车道行为,未考虑换道条件下高速跟驰行为的分析,显然单车道情况过于理想化.

针对目前交通流 CA 模型的不足以及高速跟驰物理现象缺乏有效动力学模型描述的问题,本文以 CA 理论为基础结合前景理论等方法,提出了一种高速跟驰交通流动力学 (highspeed carfollowing cellular automat, HCCA) 模型,利用此模型仿真分析了道路中高速跟驰车流物理现象演化机理和车辆高速跟驰特性,研究结果对于道路高速跟驰物理现象解释与丰富交通流理论有一定的指导和参考意义.

2 现有双车道 STCA 模型局限性分析

在交通流理论中, NaSch 模型是一个重要的交通流动力学模型,但是 NaSch 模型是单车道模型,无法模拟出道路上驾驶员换道行为. Chowdhury 等^[15]在 NaSch 模型的基础上,引入了换道规则,建立了 STCA 交通动力学模型. STCA 模型换道车辆的空间关系示意图如图 1 所示.

图 1 中,双车道 STCA 的演化过程中,将每个演化时间划分为两个时间步:第 1 个时间步内,车辆按照设定的换道规则完成换道;在第 2 个时间步内,换道后按照单车道 NaSch 模型规则进行速度和位置的更新.

其中,第一个时间步换道规则需满足以下两个先决条件: 1) 换道动机,当前车道的驾驶条件无法满足驾驶员的驾驶需求,此时如果旁道上的道路行驶条件优于当前车道上的行驶条件,当前车辆会以 p_{change} 概率进行换道; 2) 安全条件,换道过程中对自身车辆以及其他车辆是安全的. 根据上述换道规则的描述,对于图 1 所示的右车道中车辆 n 对应的换道条件如下:

1) 换道动机

$$d_n(t) < \min(v_n(t) + 1, v_{\text{max}}),$$

$$d_{n,\text{other}}(t) > \min(v_n(t) + 1, v_{\text{max}});$$

2) 安全条件

$$d_{n,\text{back}}(t) \geq d_{\text{safe}}.$$

这里, $v_n(t)$ 表示车辆 n 在 t 时刻的速度; v_{max} 表示车辆的最大车速; $d_n(t)$ 表示 t 时刻车辆 n 与前车的车头间距; $d_{n,\text{other}}(t)$ 表示 t 时刻 n 车与旁道上前车之间的间距; $d_{n,\text{back}}(t)$ 表示 t 时刻 n 车与旁道上后车的间距; d_{safe} 是换道车辆与旁道上后车的安全距离,一般取值为 $v_{\text{max}} \cdot p_{\text{change}}$ 表示车辆换道概率,

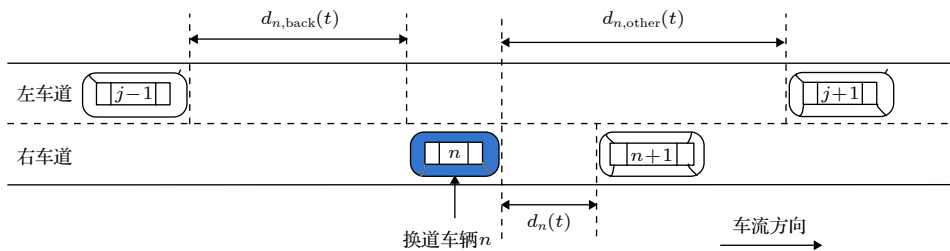


图 1 换道车辆的空间关系示意图

Fig. 1. Diagram of spatial relations of lane-changing vehicles.

当车辆 n 车在当前车道行驶达不到预期速度而旁边有足够的空间时, 该车就以换道概率 p_{change} 进行换道, 否则仍在本车道行驶.

在第二个时间步内, 换道后的车辆均按照 NaSch 动力学规则进行演化:

- 1) 加速过程, $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t) + a, v_{\text{max}})$;
- 2) 安全防护, $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), d_n(t))$;
- 3) 以概率 $P_n(t+1)$ 随机慢化, $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1) - b, 0)$;
- 4) 车辆运动, $x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t+1)$.

通过对现有双车道 STCA 模型规则分析, 可以发现目前的双车道 STCA 模型中, 存在如下问题.

问题 1 STCA 模型无法模拟出“高速跟驰”现象. 这是因为通过对 STCA 模型分析可知, STCA 模型在第二个时间步换道后采用的依然是 NaSch 单车道动力学模型演化, 在换道后安全防护规则是 $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), d_n(t))$, 出于安全防护的目的, 在下一演化时间 $t+1$ 内, 车速要求小于或者等于该车与前车的车头间距 $d_n(t)$, 不会出现车速大于两车间距的情况. 根据“高速跟驰”的定义在道路上存在一些车速较高的车辆, 车速大于它与前车的车头间距, 显然根据 STCA 规则是无法模拟出“高速跟驰”的交通物理现象.

问题 2 STCA 模型换道概率为固定值. 在 STCA 模型中当满足换道动机和换道安全条件后, 左车道和右车道驾驶员驾驶的车辆在同样换道概率 p_{change} 约束下进行换道, 显然这与实际交通情况不符. 在实际交通中, 驾驶员执行车道变化的主要原因是当前行驶状态与驾驶期望值无法得到满足, 在车辆行驶的过程中不同类型的驾驶员对驾驶期望车速不同. 在换道过程中, 不同类型的驾驶员为适应交通环境应采取不同驾驶行为. 高速跟驰交通流实测文献 [24] 中也指出不同特征的驾驶员驾驶行为会影响到高速跟驰现象的发生, 驾驶员的行为会对交通特性有较大的影响. 在道路交通中, 一般将驾驶员类型分为激进型驾驶员和其他类型驾驶员 [16,24]. 激进型驾驶员表现的特征为喜欢开快车, 较少采用刹车, 以便让车辆尽量向行驶; 而其他类型驾驶员, 特征主要表现为以驾驶安全为主, 在驾驶的过程中一般与跟驰的车辆保持较大的跟车间距. 在 STCA 模型中, 未对驾驶行为进行细化, 对于不同类型的驾驶员换道频率均采用固定值, 存在较大的局限性. 在实际交通中, 换道频率

应体现出不同驾驶员的换道决策过程, 换道频率不应采取固定值.

问题 3 STCA 模型中道路随机慢化概率为固定值. 在 STCA 模型中, 在换道后车辆在各自车道上更新演化时, 所有的车辆都具有相同的随机慢化减速概率, 并且该减速概率值不会随着演化时间和道路环境的变化而动态调整变化. 显然 STCA 动力学模型采取固定减速概率值与实际道路交通情况不相符, 在实际的交通系统中, 每辆车的减速慢化概率应该是在每个演化时间 t , 驾驶员根据道路情况不断实时动态调整变化的.

3 高速跟驰交通流动力学模型建立

针对 STCA 动力学模型上述存在的问题, 本文提出了一种 HCCA 模型, 用于对高速跟驰交通流物理现象演化机理及道路高速跟驰特性的分析. 建立 HCCA 模型时, 从以下三方面对 STCA 模型进行了改进: 1) 针对 STCA 模型无法模拟出“高速跟驰”的问题进行改进, HCCA 模型中对于激进型驾驶员驾驶的车辆引入了考虑前车运动动态效应的预估车速; 2) 针对原始 STCA 模型换道概率为固定值的不足, HCCA 模型结合前景理论, 在换道选择时进行驾驶员换道决策代替固定换道概率; 3) 针对 STCA 模型道路固定慢化概率的问题进行改进, HCCA 模型改进后根据前后车速度差和车间距实时进行慢化概率调整. 以下分别对三方面的改进进行具体说明.

3.1 高速跟驰模拟改进

通过对 STCA 模型分析可知, 在演化的过程中安全间距计算时采用的方法是将前车作为静止的粒子进行处理, 没有将前车的运动效应对两车间距的动态影响进行考虑, 从而导致不会出现车速大于它与前车的车头间距的情况, 即不会出现“高速跟驰”现象. 本文 HCCA 模型建立时, 结合激进型驾驶员在驾驶的过程中与前车保持较小跟驰间距的特点, 对于激进型驾驶员驾驶的车辆在跟驰间距计算时, 前车不再是静止的粒子而是考虑前车的动态预估车速, 将激进型驾驶员的安全防护过程修改为

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), d_n(t) + v'_{n+1}(t+1)), \quad (1)$$

式中 $v'_{n+1}(t+1)$ 是激进型驾驶员跟驰前车的预估

车速, 该预估车速是前车按照 NaSch 演化得到的最小安全车速, 通过下式计算:

$$v'_{n+1}(t+1) \rightarrow \min(v_{\max} - 1, v_{n+1}(t), \max(0, d_{n+1}(t) - 1)). \quad (2)$$

通过上述改进后的 HCCA 交通动力学模型, 克服了 STCA 模型无法模拟高速跟驰的距离约束问题, 同时又确保了换道车辆与周围车辆不会发生碰撞.

此外, 在换道过程中, 对于激进型驾驶员, STCA 在换道动机判断时也未考虑旁道前车的运动效应. 本文 HCCA 模型建立时, 对于激进型驾驶员在换道过程中, 考虑前车的动态运动效应后对前车同样计算预估车速, 采用如下的规则进行判定:

$$d_n(t+1) < \min(v_n(t) + 1, v_{\max}) + v'_{n+1}(t+1), \\ d_{n,\text{other}}(t+1) > \min(v_n(t) + 1, v_{\max}) + v'_{n+1}(t+1). \quad (3)$$

3.2 换道概率改进

在 STCA 模型中, 驾驶员的换道概率 p_{change} 是一个固定值, 道路上的所有驾驶员在满足换道条件时都按照这个固定值约束下进行换道, 容易超出“乒乓换道”的问题, 与真实交通情况有较大的差异. 一般在实际交通情况下, 在换道安全条件允许的情况下, 驾驶员根据自身的行为特性并综合道路情况进行换道来达到最佳的行车速度, 该换道过程是一个驾驶员决策过程. 换道决策过程是驾驶员对当前行车过程中获取的收益或损失与驾驶员个人驾驶期望值进行比较的过程. 为了表示该决策过程, 本文结合前景理论来对驾驶员决策过程进行模型表示.

前景理论 (prospect theory) 由 Kahneman 和 Tversky 提出, 用来描述和预测人们在不确定条件下的实际决策行为的理论, 相比于期望效用理论存在先验主观的缺点, 前景理论更适合于描述面临风险和不确定性问题的选择过程, 其研究结果更符合人们的实际选择^[25,26]. 在本文研究的驾驶员换道行为中, 在满足换道安全条件下, 驾驶员对于换道的选择就是一种不确定条件下的选择决策行为. 前景理论在决策选择时, 首先由决策者设定一个参照点, 并将决策的各种可能计算相对参照点的收益或损失; 然后决策者依据价值函数对收益和损失进行评价, 并依据决策权重函数计算后进行主观概率风

险选择^[25].

根据前景理论基本原理, 本文对驾驶员的换道决策相应的数学定义如下.

1) 换道行程时间前景值

每个驾驶员对到达下一个道路位置的时间有一个心理预期 k :

$$k = \frac{x_{i+1}^1(t) - x_i^1(t)}{v_{\max}}, \quad (4)$$

式中 $x_{i+1}^1(t)$ 表示 1 车道上 $i+1$ 车的位置, $x_i^1(t)$ 表示 1 车道上 i 车的位置, $x_{i+1}^1(t) - x_i^1(t)$ 表示两车之间的间距, v_{\max} 表示 i 车下一时刻获得的最大的期望速度, k 表示 i 车行驶到 $i+1$ 车的位置所期望的最短的时间.

换道后的行驶时间为 t_1 :

$$t_1 = \frac{x_{i+1}^2(t) - x_i^1(t)}{\min(v_i^1(t) + a, v_{\max})}. \quad (5)$$

不换道的行驶时间为 t_2 :

$$t_2 = \frac{x_{i+1}^1(t) - x_i^1(t)}{v_i^1(t)}. \quad (6)$$

$x_{i+1}^2(t) - x_i^1(t)$ 表示 2 车道上前车 $i+1$ 和 1 车道 i 车的相对间距, $v_i^1(t)$ 表示 i 车的速度, t_1 表示驾驶员如果换道计算得到的时间, t_2 表示驾驶员如果不换道计算得到的时间.

2) 选择概率权重函数

方案 i 的收益为

$$y_i = k - t_i, \quad (7)$$

方案 i 的价值为

$$v_i = \begin{cases} (y_i)^\alpha, & y_i \geq 0, \\ -\lambda(-y_i)^\beta, & y_i < 0. \end{cases} \quad (8)$$

在前景理论研究, 经过大量测试, Kahneman^[26] 将参数标定为 $\alpha = 0.89$, $\beta = 0.92$, $\lambda = 2.25$, 最符合决策者心理特征, 本文也采用同样的取值. 换道后行驶中存在不确定性: 拥堵或不拥堵. 设拥堵概率为 p , 计算驾驶员对拥堵的感知概率如下:

在收益时

$$W^+(p) = \frac{(p)^x}{[(p)^x + (1-p)^x]^{1/x}}; \quad (9)$$

在损失时

$$W^-(p) = \frac{(p)^\delta}{[(p)^\delta + (1-p)^\delta]^{1/\delta}}. \quad (10)$$

根据 Kahneman^[26] 的标定, 参数取值为 $\chi = 0.61$, $\delta = 0.69$.

3) 计算换道或不换道的前景值

计算各驾驶员换道不同方案的前景值, 方案 i 的前景值 EV_i 为

$$EV_i = \sum W^+(p)v_i + \sum W^-(p)v_i. \quad (11)$$

根据 (11) 式, 如果方案 i 的前景值 EV_i 越大, 说明方案 i 相对于驾驶员的收益越大, 驾驶员会选择前景值大的方案 i 进行换道决策.

3.3 慢化概率改进

在 STCA 模型中, 所有车辆的随机慢化概率的取值为常数, 与实际交通情况不符. 本文 HCCA 动力学模型构建时考虑了跟驰车辆之间速度相对差及两车安全间距等因素, 改进后每辆车的慢化概率 $P_n(t+1)$ 的计算公式如下:

$$P_n(t+1) = f(v_n(t)) \cdot g(d_n(t)). \quad (12)$$

这里 $f(v_n(t)) = \lambda_1 e^{-\lambda_1(v_n(t)-v_{n+1}(t))}$,

$$\lambda_1 = N \left/ \sum_{n=1}^N v_n(t), \right.$$

N 为道路上车辆总数量. $f(v_n(t))$ 表示跟驰车辆之间速度相对差对随机慢化概率的影响值, 该函数值越大说明当前车辆具有较大的慢化减速概率, 反之慢化概率值较小. $g(d_n(t))$ 表示两车安全间距对随机慢化概率的影响值, $g(d_n(t)) = \lambda_2 e^{-\lambda_2(d_n(t)-v_{\max})}$,

$$\lambda_2 = N \left/ \sum_{n=1}^N d_n(t), \right.$$

$d_n(t)$ 为两车间距. 该函数表示当两车间距大于安全间距即最大车速时, 车辆随机慢化概率较小, 反之随机慢化概率随之变大.

3.4 HCCA 动力学模型演化规则

通过上述改进后, 本文建立的高速跟驰 HCCA 动力学模型演化规则定义如下.

1) 换道条件, 当车辆满足以下条件时, 进行换道:

$$\begin{cases} d_n(t) < \min(v_n(t) + 1, v_{\max}), \\ d_{n,\text{other}}(t) > \min(v_n(t) + 1, v_{\max}), \\ d_{n,\text{back}}(t) \geq d_{\text{safe}}, \\ EV_n = \sum W^+(p)v_n(t) + \sum W^-(p)v_n(t). \end{cases}$$

2) 确定每辆车 $t+1$ 时刻随机慢化概率 $P_n(t+1)$:

$$P_n(t+1) = f(v_n(t)) \cdot g(d_n(t)).$$

3) 加速过程:

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t) + a, v_{\max}).$$

4) 安全防护过程:

①如果是激进型驾驶员, 防护为

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), d_n(t) + v'_{n+1}(t+1)),$$

②如果是其他类型驾驶员, 防护为

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), d_n(t)).$$

5) 车辆 n 以概率 $P_n(t+1)$ 随机慢化过程:

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1) - b, 0).$$

6) 车辆运动:

$$x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t+1).$$

这里 a 为车辆加速度, b 为车辆减速度, $x_n(t+1)$ 表示 $t+1$ 时间车辆 n 在道路中的位置, $d_n(t)$ 表示 t 时刻车辆 n 与前车 $n+1$ 之间的距离, $P_n(t+1)$ 为车辆 n 在 $t+1$ 时刻的随机慢化概率值, 该值通过 (12) 式计算得到; EV_n 为车辆 n 的换道决策前景值, 通过 (4)—(11) 式计算得到.

4 数值模拟与仿真分析

模型建立后, 在数值模拟过程中左右车道由长度均为 L 的离散格子组成, 采用周期型边界条件, 每个元胞长度为 7.5 m, 系统演化刷新间隔为 1 s, 当 $v_{\max} = 5$ cell/s 时, 对应的物理速度为 135 km/h. 在数值模拟仿真时, $L = 1000$, 演化时步取演化 10^4 步, 为了消除初始随机值影响, 每次记录演化达到稳态的后 1000 步作为仿真时步, 迭代运行 20 次后样本数据取平均值, 车辆加速度 a 和减速度 b 均为 1 cell/s². 初始时, 车道上激进型和其他类型的驾驶员驾驶车辆按比例 P_a, P_n 随机分布在左右车道上.

4.1 高速跟驰物理现象模拟分析

为了验证本文提出的 HCCA 动力学模型的有效性, 下面对高速跟驰物理现象进行模拟和分析. 文献 [24] 中通过拍摄国内上海、北京、西安、郑州等城市的快速路段的交通流, 发现在实测数据集中, 存在着“高速跟驰”的现象, 并且在小间距跟驰

数据中,发现存在超过7%的“高速跟驰”车辆.为了便于与文献实测结果比较,数值模拟时采用与文献 [24] 中相同的定义来描述高速跟驰,即用车头间距与车速的比值进行定义,通过 HCCA 动力学模型演化得到了 5 组激进型驾驶员不同占比下的小间距高速跟驰率结果曲线,如图 2 所示.

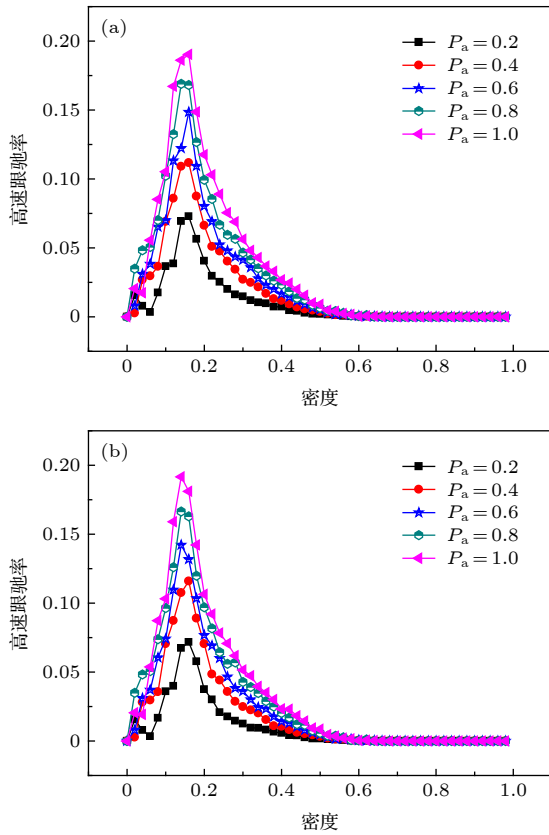


图 2 不同激进型驾驶员比例下高速跟驰率 (a) 左车道高速跟驰率; (b) 右车道高速跟驰率
 Fig. 2. Rate of high speed car-following and density relationship diagram under the different probability of aggressive drivers: (a) Rate of high speed car-following in left lane; (b) rate of high speed car-following in right lane.

图 2 中横坐标代表道路的车流密度,纵坐标代表高速跟驰率,其中图 2(a) 为左车道高速跟驰率随密度变化的关系图,图 2(b) 为右车道高速跟驰率随密度变化的关系图.从图 2 整体可以发现,在左车道和右车道中,无论激进型驾驶员在何种占比下,高速跟驰率都会随着道路密度的增大呈现出先增大后减小的趋势.这是因为车辆跟驰行驶时实际是一种粒子动力学系统,道路上每辆车可以看作是一个粒子,粒子之间保持一定的跟随间距避免碰撞,在同一激进型驾驶员比例下,在道路低密度区,车流中车辆基本处于自由流状态,此时粒子之间跟

驰前后间距较大,不会出现当前粒子速度大于它与前方粒子间距的情况,即高速跟驰现象不易出现.例如从图 2(a) 和图 2(b) 可以看出,在左右车道低密度区,例如左车道道路密度 ρ 小于 0.12 时、右车道道路密度 ρ 小于 0.14 时,此时交通处于自由流状态,不易出现小间距高速跟驰现象.另外当在高密度区域,由于道路中车辆密度非常大,道路逐渐进入阻塞相,此时也不会出现高速跟驰现象,如左车道和右车道当道路密度大于 0.52 时,此时进入堵塞相,高速跟驰现象逐步消失.在其余左右车道中高密度区均会出现高速跟驰现象,而且小间距高速跟驰率整体随着道路密度的增大而呈现出减小的趋势.

对于文献 [24] 实测数据中发现的小间距存在超过 7% 的“高速跟驰”车辆统计规律,从本文采用 HCCA 动力学数值模拟仿真得到的图 2(a) 中可以发现:当左车道中激进型驾驶员比例 $P_a = 0.4$ 情况下,道路密度 ρ 为 0.12 时,小间距高速跟驰率为 8.56%;道路密度 ρ 为 0.14 时,小间距高速跟驰率为 10.91%;道路密度 ρ 为 0.16 时,小间距高速跟驰率为 11.17%,上述结果符合实测数据中存在的小间距超过 7% 的规律.同样在图 2(b) 中右车道也满足同样的规律,例如当激进型驾驶员比例 $P_a = 0.2$ 情况下,道路密度 ρ 为 0.16 时,小间距高速跟驰率为 7.17%.当激进型驾驶员比例 $P_a = 0.4$ 情况下,道路密度为 0.1 时,小间距高速跟驰率为 7.04%;道路密度为 0.12 时,跟驰率为 8.73% 等.从以上数据结果可以发现,本文建立的 HCCA 较好地再现了道路交通流中高速跟驰现象,并且数值模拟结果与文献 [24] 实测统计结果相符合,说明了本文建立的 HCCA 动力学模型的有效性.

为了验证本文建立的动力学 HCCA 动力学模型数值模拟结果与实测数据的拟合程度,利用文献 [27] 中高架路实测数据包括上下班高峰时段、普通时段和雪天三个不同路况样本数据进行平均误差分析,即把某一路况样本总共 N 次实测得到的车速数据 v_i^m 与各种速度密度关系计算公式得到的对应速度 v_i 进行误差比较,平均误差计算公式如下:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i^m}{v_i} - 1 \right). \quad (13)$$

采用本文 HCCA 动力学模型与文献 [27] 中 Greenshields 模型、Greenberg 模型、Underwood 速度计算模型进行平均误差比较,结果如表 1 所列.

表 1 不同速度密度关系计算的误差比较

Table 1. Comparison of calculation errors of different velocity-density models.

速度密度计算模型	高峰时段误差	普通时段误差	雪天误差
Greenshields模型	-0.24	-0.11	-0.28
Greenberg模型	0.51	0.56	0.29
Underwood模型	0.26	0.49	0.22
本文HCCA模型	-0.02	0.03	-0.07

通过表 1 可以看出对于不同的路况实测数据, 采用本文建立的 HCCA 交通动力学模型相对其他速度密度计算模型的平均误差最小, 能够较好地拟合实测结果. 此外, 从图 2 可以发现如下高速跟驰物理规律, 在道路中高密度区间, 随着激进型驾驶员比例的增加, 相同交通流密度下的高速跟驰率也随之增大. 例如图 2(b) 中, 右车道交通流密度为 0.16 时, 当激进型驾驶员比例为 0.2 时, 高速跟驰率为 7.17%; 当激进型驾驶员比例为 0.4 时, 高速跟驰率为 11.59%; 当激进型驾驶员比例为 0.6 时, 高速跟驰率为 13.18%; 当激进型驾驶员比例为 0.8 时, 高速跟驰率为 16.30%; 当激进型驾驶员比例为 1.0 时, 高速跟驰率为 18.10%.

通过上述定量分析可以发现, 在实际车流中不同特征驾驶行为对交通流物理特性有较大的影响, 在道路交通流中, 激进型驾驶员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, 在该驾驶特征行为下其速度明显高于通常处于高密度时应有的速度, 上述激进型驾驶员的驾驶行为是导致道路交通流中出现高速跟驰物理现象的主要原因. 此外, 在同一路段密度条件下, 当激进型驾驶员所占的比例越大时, 会导致道路上高速跟驰行为的车辆比例也随之增大, 从而呈现出高速跟驰率随着激进型驾驶员比例增大而增大的现象.

4.2 不同密度下时空特性分析

下面对不同密度条件下道路演化的时空特性进行分析. 仿真时取不同类型驾驶员混合比 $P_a = 0.2$, $P_n = 0.8$, 通过改变左右车道不同的车辆密度 ρ_1 和 ρ_2 , 仿真得到了不同车流密度下左右车道的时空分布图, 取其中不同密度下的三组模拟结果, 如图 3—5 所示. 图 3 是在左车道交通流密度 $\rho_1 = 0.2$ 、右车道交通流密度 $\rho_2 = 0.1$ 、STCA 换道概率

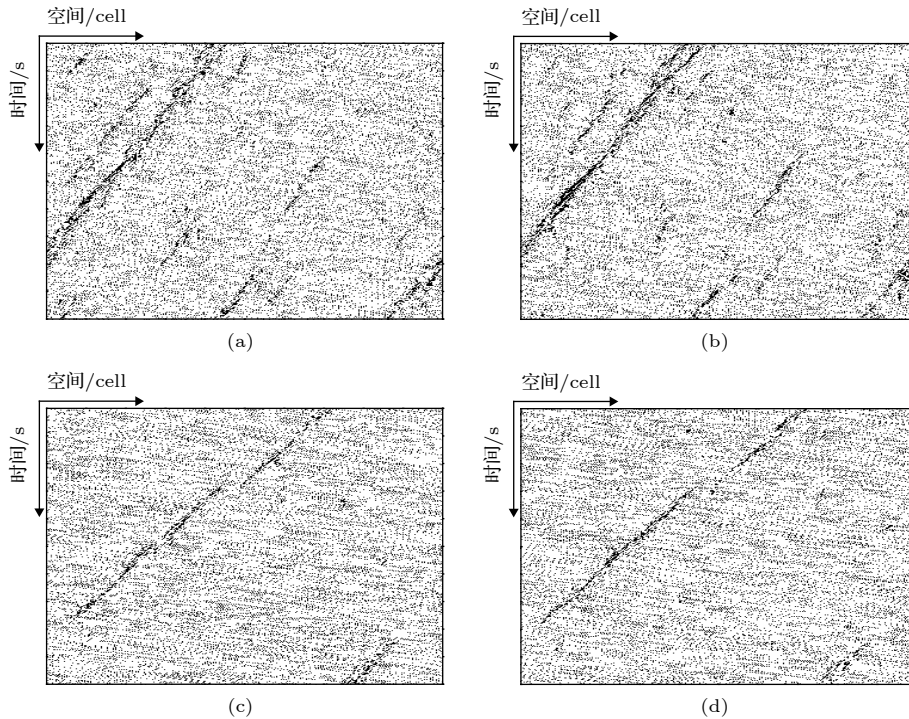


图 3 $\rho_1 = 0.2$, $\rho_2 = 0.1$, 不同车道时空图 (a) STCA 演化左车道; (b) STCA 演化右车道; (c) HCCA 演化左车道; (d) HCCA 演化右车道

Fig. 3. Space-time diagrams of different lanes under the condition of $\rho_1 = 0.2$ and $\rho_2 = 0.1$: (a) Left lane evolution with STCA rules; (b) right lane evolution with STCA rules; (c) left lane evolution with HCCA rules; (d) right lane evolution with HCCA rules.

为 0.2、随机慢化概率 0.2 的条件下, 采用 STCA 模型与改进后 HCCA 交通动力学模型分别得到的时空图. 从图 3 可以看出采用原始 STCA 模型和 HCCA 动力学模型, 随着时间的演化左右车道基本都可以趋于交通流平衡状态. 但是采用 STCA 模型得到的左右车道时空图 (图 3(a) 和图 3(b)), 与采用 HCCA 动力学模型得到的时空图 (图 3(c) 和图 3(d)) 相比较, 采用 STCA 模型在左车道和右车道相邻区域都出现了较多局部的拥塞情况, 拥塞呈现非规律性的特点, 拥堵空间分布与 HCCA 模型拥堵空间相比范围更广, 如在道路 420 cell, 450 cell, 500 cell, 650 cell, 900 cell 等多处都出现了拥塞情况, 而且拥堵的范围随着时间拥堵进行反向传播, 拥堵持续时间更长, 如道路 450 cell 处拥堵持续约 750 个时间演化步. 这是由于 STCA 模型采用固定换道概率和固定慢化概率而造成的, 在 STCA 模型中所有车辆均采用同样的换道概率约束值, 导致车道间出现车辆频繁来回切换, 产生乒乓换道现象, 此时会造成小区域的交通振荡, 换道后在更新过程中因为采用固定慢化概率, 导致车辆无法动态调整减速值, 从而形成非规律性多处拥塞现象. 图 3(c) 和图 3(d) 是采用 HCCA 动力学模

型得到的时空图, 与 STCA 模型相比, 拥塞现象大幅度减少, 局部小范围堵塞区域会快速消融, 这是因为改进后的 HCCA 换道决策过程不再采用固定换道频率, 而是考虑了驾驶员换道决策行为, 更加符合实际交通中驾驶员的行为特征, 该过程减少了乒乓切换现象的发生. 此外 HCCA 动力学模型采用动态实时慢化概率, 在道路演化过程中局部拥堵能够在较短的时间内进行消解, 大部分车辆可以快速恢复到自由流状态.

仿真实验时, 继续增大道路交通流密度以得到不同道路密度下的交通流时空分布特征, 首先增加单侧车道密度, 图 4 是在左车道交通流密度增加至 $\rho_1 = 0.3$, 右车道保持交通流密度 $\rho_2 = 0.1$ 条件下得到的时空图, 可以看出与图 3 相比, 当加大一侧左车道车流密度后, 随着车流密度逐渐增加, 在中密度车流情况下, 图 4 左车道和右车道较多区域出现了走走停停的交通波现象, 道路较多区域出现运动阻塞相, 并随着时间向车道上游传播, 堵塞带更宽, 不能在较短的时间内恢复. 在中高密度道路条件下, 采用固定换道概率的 STCA 动力学模型演化, 车辆的频繁换道行为会同时引起左右车道的交通车流波动. 图 4(c) 和图 4(d) 是采用本文建立

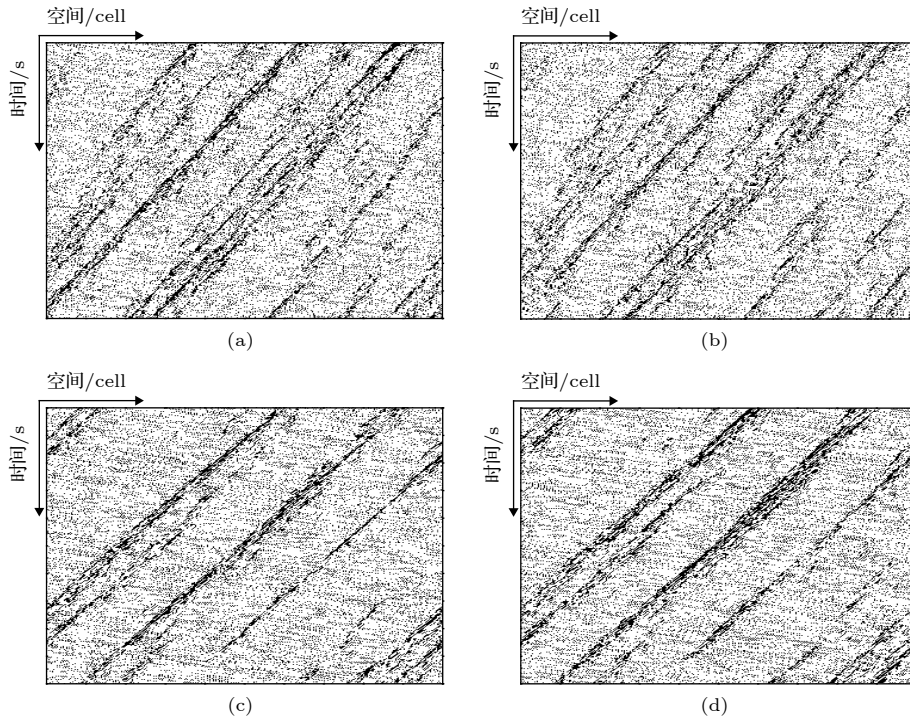


图 4 $\rho_1 = 0.3, \rho_2 = 0.1$, 不同车道时空图 (a) STCA 演化左车道; (b) STCA 演化右车道; (c) HCCA 演化左车道; (d) HCCA 演化右车道

Fig. 4. Space-time diagrams of different lanes under the condition of $\rho_1 = 0.3$ and $\rho_2 = 0.1$: (a) Left lane evolution with STCA rules; (b) right lane evolution with STCA rules; (c) left lane evolution with HCCA rules; (d) right lane evolution with HCCA rules.

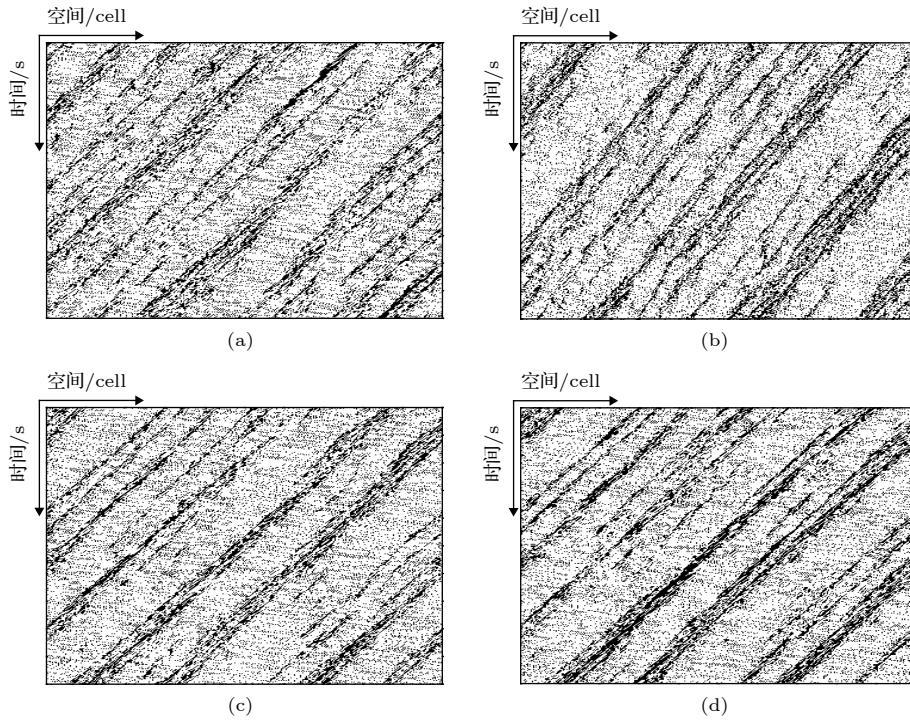


图 5 $\rho_1 = 0.3, \rho_2 = 0.2$, 不同车道时空图 (a) STCA 演化左车道; (b) STCA 演化右车道; (c) HCCA 演化左车道; (d) HCCA 演化右车道

Fig. 5. Space-time diagrams of different lanes under the condition of $\rho_1 = 0.3$ and $\rho_2 = 0.2$: (a) Left lane evolution with STCA rules; (b) right lane evolution with STCA rules; (c) left lane evolution with HCCA rules; (d) right lane evolution with HCCA rules.

的 HCCA 模型演化, 与采用 STCA 模型演化得到的图 4(a) 和图 4(b) 相比, 可以看出 STCA 模型演化存在大量无规则的抖动堵塞区域, 而 HCCA 模型演化后系统拥堵相明显减少, 堵塞相逐步趋于稳态, 大部分区域内车辆都处于畅行状态. 图 5 是在图 3 条件的基础上同时增加左右车道的道路交通流密度, 在左车道交通流密度 $\rho_1 = 0.3$ 、右车道交通流密度 $\rho_2 = 0.2$ 条件下得到的时空图, 可以看出随着密度的增加, 左车道和右车道出现了畅行相和运动阻塞交替转变的现象. 不同的是图 5(a) 和图 5(b) STCA 模型演化后依然存在着大量随机的自由流和阻塞流不规则重叠的部分, 堵塞区域不存在明确的自由流和阻塞流的分界线, 随机局部堵塞较难消融. 与采用 STCA 演化的左车道和右车道相比, HCCA 动力学模型得到的图 5(c) 和图 5(d) 中, 左右车道演化过程中虽然也出现了交通拥堵现象, 但小的堵塞区域随着时间的演化在向上游传播的过程中会逐步消散, 出现了自由流和阻塞相清晰分离的相分离的物理状态. 这是因为 HCCA 模型克服了 STCA 模型采用固定换道概率的不足, 采用换道决策后, 驾驶员通过对当前行车过程中获取的收益或损失与个人驾驶期望进行匹配决策, 实时

调整换道决策来调节自己的驾驶行为, 可以有效地减少局部堵塞区域的形成.

从上述三组不同密度下时空图分布可以看出, 与 STCA 模型相比, 改进后的 HCCA 模型仿真结果表明拥堵能在更短的时间内消退, 相比于 STCA 模型采用固定换道概率、固定慢化概率的不足, HCCA 模型中不同类型驾驶员可以根据不确定条件下的交通场景实施相应的决策行为, 从而使交通流堵塞消融的效率更高, 交通更能保持畅通状态.

4.3 不同密度下速度分布分析

下面对 HCCA 模型稳定跟车状态下速度分布规律进行分析. 同样取不同类型驾驶员混合比 $P_a = 0.2, P_n = 0.8$, STCA 模型换道概率 $P_{\text{change}} = 0.2$, 慢化概率 $P = 0.2$, 仿真车辆最大车速为 5 cell/s. 通过改变左右车道不同的道路密度 ρ_1 和 ρ_2 , 仿真得到了不同车流密度下的速度分布图. 当左车道和右车道密度均为 0.08 时, 得到了相应的速度分布图. 其中图 6(a) 与图 6(b) 是采用原始 STCA 模型得到的左车道和右车道在低密度下的速度分布图, 可以看出, STCA 模型演化下左车道

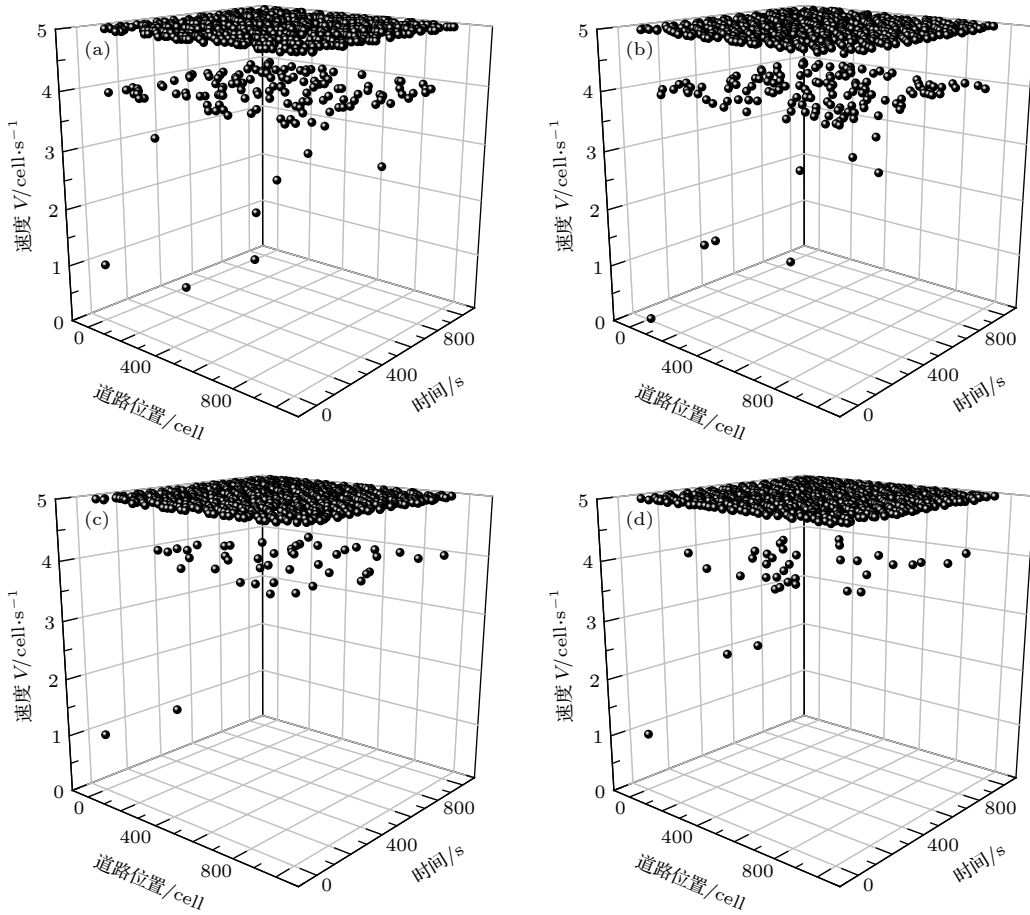


图 6 $\rho_1 = 0.08, \rho_2 = 0.08$, 速度分布图 (a) STCA 演化左车道; (b) STCA 演化右车道; (c) HCCA 演化左车道; (d) HCCA 演化右车道

Fig. 6. Velocity distribution diagram of different lanes under the condition of $\rho_1 = 0.08$ and $\rho_2 = 0.08$: (a) Left lane evolution with STCA rules; (b) right lane evolution with STCA rules; (c) left lane evolution with HCCA rules; (d) right lane evolution with HCCA rules.

和右车道大部分车辆车速在 4 cell/s 到最大车速 5 cell/s 之间波动, 部分车辆受固定换道概率影响, 速度波动较大. 在同等条件下改进后的 HCCA 动力学演化后速度分布如图 6(c) 和图 6(d) 所示, 可以看出采用本文提出的 HCCA 动力学模型的大部分车辆车速都维持接近最大车速 5 cell/s 处于畅行交通相, 这是因为在 HCCA 动力学模型下, 驾驶员可以根据道路情况实时调整慢化概率和换道决策行为, 在低密度道路情况下, 大部分车辆处于自由流驾驶情况, 个别车辆速度动态调整可以保持较高的行驶车速, 从而使得交通流保持更加平稳, 与实际情况较符.

在以上仿真条件下, 增加道路密度, 得到左右车道密度都是 0.14 条件下速度分布图. 此时道路处于中密度条件下, 从图 7(a) 和图 7(b) 的速度分布图可以看出, 采用 STCA 规则演化的车辆速度受固定换道概率影响较大, 固定换道行为容易引起

局部交通冲突和振荡, 车辆速度变化剧烈, 部分车辆车速较低, 车速在时间和空间维度上发生了剧烈的无规则振荡, 部分区域出现短暂拥塞情况. 采用改进后 HCCA 模型的左右车道速度分布如图 7(c) 和图 7(d) 所示, 可以看出, HCCA 模型相比于 STCA 模型速度无规则振荡情况明显减少, 大部分车辆可以保持最大车速行驶, 可以形成局部稳定的畅行交通流.

4.4 不同驾驶员混合比对交通流的影响分析

下面分析不同类型驾驶员混合比对交通流的影响. 将激进型、其他类型的驾驶员驾驶车辆取不同的混合比例 P_a, P_n 进行仿真分析, 初始化时随机分布在左右车道. 采用 HCCA 动力学模型对 6 组不同类型驾驶员混合比例下进行系统演化, 分别得到左右车道的密度流量关系图, 如图 8 所示.

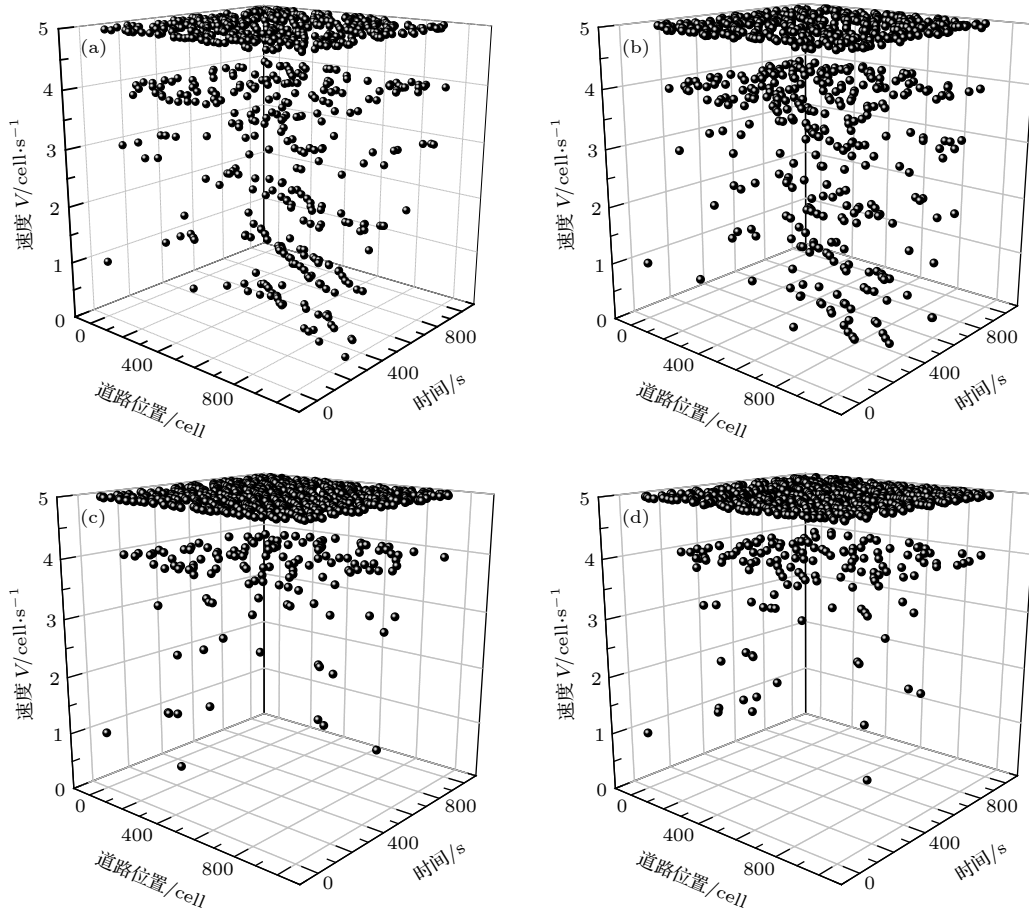


图 7 $\rho_1 = 0.14, \rho_2 = 0.14$, 速度分布图 (a) STCA 演化左车道; (b) STCA 演化右车道; (c) HCCA 演化左车道; (d) HCCA 演化右车道

Fig. 7. Velocity distribution diagram of different lanes under the condition of $\rho_1 = 0.14$ and $\rho_2 = 0.14$: (a) Left lane evolution with STCA rules; (b) right lane evolution with STCA rules; (c) left lane evolution with HCCA rules; (d) right lane evolution with HCCA rules.

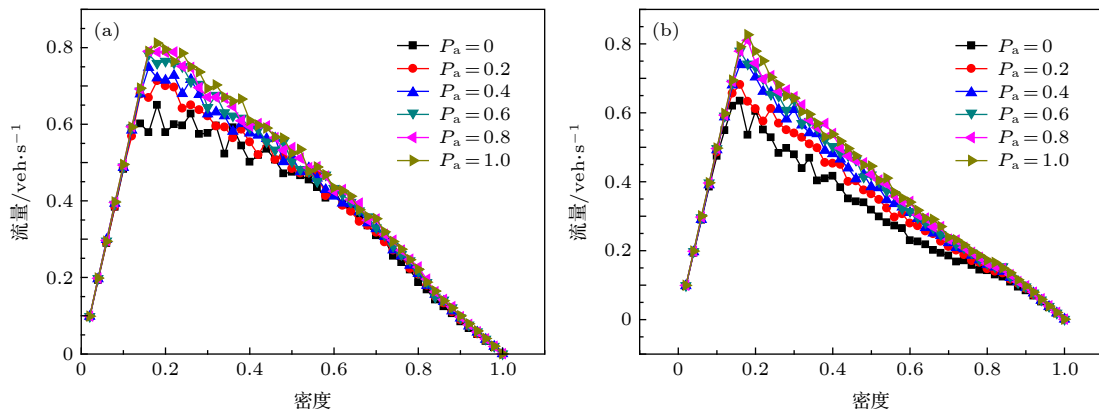


图 8 不同类型驾驶员混合比下密度与流量关系图 (a) 左车道密度流量关系; (b) 右车道密度流量关系图

Fig. 8. Density and flow relationship diagram under the mixing probability of different type drivers: (a) Density and flow relationship in left lane; (b) density and flow relationship in right lane.

采用 HCCA 模型进行动力学演化后, 呈现出与交通流规律一致的曲线走势, 密度较小时, 斜率近似为直线的为自由流相, 随着道路密度的逐步增大, 逐步向阻塞相转变. 从图 8(a) 和图 8(b) 可以看出,

在左右车道低密度区, 不同混合比下左右车道都可以很快达到最大流量, 这是因为在低密度下, 车辆之间的间距较大, 换道行为影响较小, 大部分车辆都已处于自由流的交通状态中, 此时左右车道平均

流量随密度的变化呈现线形增加关系. 此后从不同混合比例仿真曲线可以看出, 密度与流量的关系曲线会出现随着密度的变化逐步下降, 呈现出从自由流向阻塞流相变的过程. 在不同驾驶员类型混合比下, 流量与密度相变拐点不同. 在图 8(a) 中, 左车道中当车道上仅有激进型驾驶员 $P_a = 1.0$ 时, 拐点密度 $\rho = 0.32$, 大于该密度后交通流量基本逐渐呈现下降趋势; 当车道上激进型驾驶员比例 $P_a = 0.8$ 时, 拐点密度 $\rho = 0.3$; 当车道上激进型驾驶员比例 $P_a = 0.2$ 时, 拐点密度 $\rho = 0.2$; 当道路没有激进型驾驶员只有其他类型驾驶员时 ($P_a = 0.0$, $P_n = 1.0$) 时, 拐点密度 $\rho = 0.14$. 从图 8 仿真曲线还可以发现如下规律: 在道路中高密度区间内, 在同一道路密度下, 道路交通流量随着激进型驾驶员所占比例的增大而增大, 这一结论与文献 [16] 研究结论一致.

图 8 中通过 HCCA 动力学模型还可以模拟到 STCA 模型无法模拟得到的同步流交通现象. 例如在图 8(a) 中, 左车道中激进型驾驶员比例为 $P_a = 0.4$ 条件下, 在密度 [0.16, 0.32] 区间; 激进型驾驶员比例为 $P_a = 0.2$ 条件下时, 在密度 [0.2, 0.38] 区间等占比情况下, 交通流量与道路密度数据之间无明确的关系, 呈现出无规则弥散分布的特点, 表现为 STCA 动力学模型难以得到的同步流交通物理特性. 通过对图 8 分析还可以发现以下物理规律: 在同一密度条件下, 当激进型驾驶员占据驾驶员大部分比例时, 道路交通流量越大, 该结论与实际交通情况相符. 这是因为当道路中激进型驾驶员占比越大时, 大部分车辆会追求较小的跟驰间距和较高的行驶速度, 从而使得道路中的交通流量相应呈现出增大的趋势.

5 结 论

针对道路交通流中存在着“高速跟驰”的物理现象, 即在小间距车辆并非都是低速行驶, 其速度明显高于通常处于该密度时应有的速度, 存在超过 7% 的“高速跟驰”车辆, 这些交通物理现象需要适当的非线性动力学数学模型去描述的问题. 本文在双车道 STCA 的基础上, 结合前景理论等方法, 建立了一种模拟道路高速跟驰现象的 HCCA 模型. 模型建立时, 采用前景理论进行不确定条件下驾驶员的换道选择, 并结合激进型驾驶员的特点,

对激进型驾驶员跟驰的前车考虑了动态预估速度, 定义了 HCCA 动力学演化规则. 通过数值模拟再现了高速跟驰等交通流现象, 并得到了不同道路密度下不同特征驾驶行为下的时空特性、速度分布以及不同驾驶员混合比对交通流的影响分析. 结果表明: 1) 本文 HCCA 模型能够对道路中的高速跟驰物理现象进行有效模拟, 得到的小间距高速跟驰率超过 7% 的结果与实测结果相符合; 2) HCCA 模型能够重现亚稳态、相分离、自由流、同步流等复杂的交通物理现象, 克服了传统 STCA 模型无法模拟得到同步流的不足; 3) 激进型驾驶员的驾驶特征行为是产生高速跟驰物理现象的主要原因, 在同一道路密度下, 激进型驾驶员所占的比例越大, 小间距高速跟驰率与交通流量也越大. 本文提出的高速跟驰交通流动力学模型对于解析高速跟驰物理现象和丰富交通流理论有一定的参考意义与实用价值.

参考文献

- [1] Wolfram S 1983 *Rev. Mod. Phys.* **55** 601
- [2] Chen Y, He H, Zhang W, Zhou N 2018 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **50** 1219 (in Chinese) [陈永, 贺红, 张薇, 周宁 2018 *力学学报* **50** 1219]
- [3] Fang H, Xue H, Tang Q Y, Zhang Q Y, Pan S Y, Zhu M F 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 048102 (in Chinese) [方辉, 薛桦, 汤倩玉, 张庆宇, 潘诗琰, 朱鸣芳 2019 *物理学报* **68** 048102]
- [4] Souvik R 2019 *Physica A* **515** 600
- [5] Jin H, Guo R Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 020501 (in Chinese) [金辉, 郭仁拥 2019 *物理学报* **68** 020501]
- [6] Li Y, Chen M, Dou Z, Zheng X P, Cheng Y 2019 *Physica A* **526** 120752
- [7] Hou L, Liu J G, Pan X, Guo Q, Wang B H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 178902 (in Chinese) [侯磊, 刘建国, 潘雪, 郭强, 汪秉宏 2014 *物理学报* **63** 178902]
- [8] Mu R, Toshiyuki Y 2019 *Transp. Res. A* **124** 217
- [9] Xue S Q, Jia B, Jiang R, Li X G, Shan J J 2017 *Physica A* **487** 164
- [10] Pang M B, Ren B N 2017 *Chin. Phys. B* **26** 108901
- [11] Sun Y Q, Ge H X, Cheng R J 2019 *Physica A* **527** 121426
- [12] Zhang J, Wei Y F, Dong L G 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 240503 (in Chinese) [张稷, 李艳芳, 董力耕 2018 *物理学报* **67** 240503]
- [13] Echab H, Ez-Zahraouy H 2017 *Int. J. Mod. Phys. C* **28** 1750134
- [14] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221
- [15] Chowdhury D, Wolf D E, Schreckenberg M 1997 *Physica A* **235** 417
- [16] Peng L J, Kang R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 830 (in Chinese) [彭莉娟, 康瑞 2009 *物理学报* **58** 830]
- [17] Dong C Y, Wang H, Wang W, Li Y, Hua X D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 144501 (in Chinese) [董长印, 王昊, 王炜, 李焯, 华雪东 2018 *物理学报* **67** 144501]
- [18] Deng J H, Feng H H 2019 *Physica A* **529** 121545
- [19] Zheng L, Ma S F, Jia N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4490 (in

- Chinese) [郑亮, 马寿峰, 贾宁 2010 物理学报 **59** 4490]
- [20] Zheng N X, Zhu H B, Lin H, Huang M Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024501 (in Chinese) [张柠溪, 祝会兵, 林亨, 黄梦圆 2015 物理学报 **64** 024501]
- [21] Krzysztof M 2018 *J. Comput. Sci.* **28** 32
- [22] Damian N, Dailisan, May T 2019 *Physica A* **521** 715
- [23] Zhao H T, Liu X R, Chen X X, Lu J C 2018 *Physica A* **494** 40
- [24] Wu S C, Zheng X Q, Guo M M, Wu Z 2011 *Sci. Phys. Mech. Astron.* **41** 791 (in Chinese) [吴胜春, 郑贤清, 郭明昊, 吴正 2011 中国科学: 物理学 力学 天文学 **41** 791]
- [25] Tversky A, Kahneman D 1992 *J. Risk Uncertainty* **5** 297
- [26] Kahneman D 2003 *Am. Econ. Rev.* **93** 1449
- [27] Zheng X Q 2011 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [郑贤清 2011 博士学位论文 (上海: 复旦大学)]

Dynamic model of high speed following traffic flow*

Chen Yong^{1)†} Zhang Wei²⁾

1) (*School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*)

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

(Received 19 August 2019; revised manuscript received 30 October 2019)

Abstract

For the physical phenomenon of high-speed car following in the road traffic flow, all the vehicles with small spacing do not run at low speed. The speeds of the vehicles are significantly higher than those they normally should be when they are in this vehicles's density. There are more than 7% of high-speed following vehicles in the measured data. At present, the traditional traffic flow model cannot simulate the phenomenon of high-speed car following, so a new nonlinear dynamic mathematical model is needed to describe and analyze the physical phenomenon. In order to study the physical phenomenon of high-speed car following in road traffic, a traffic flow dynamics model for simulating the phenomena is proposed, which combines with the prospect theory and takes into account some factors such as driver's decision-making behavior and randomization. It is called HCCA (high-speed car following cellular automat) model. In the model, the prospect theory is used to analyze the driver's lane changing behavior under the uncertain conditions. Combined with the characteristics of the radical driver, the dynamic prediction speed is considered for the front car followed by the radical driver, and the HCCA dynamics rules of high-speed following traffic flow mechanics are defined. By the computer numerical simulation, the evolution mechanism and the characteristics of high-speed car-following flow are studied. The results show that compared with the symmetric two-lane cellular automata (STCA) dynamic model, the HCCA dynamic model established in this paper can simulate abundant traffic physical phenomena, and reproduce complex traffic phenomena such as free flow, synchronous flow and wide-range motion congestion. Finally, the phenomenon of high-speed car following is simulated and the results of high-speed car following rate over 7% with small spacing are in good agreement with the measured results. It overcomes the shortage that traditional STCA model cannot simulate the synchronous flow. It is found that the larger the proportion of radical drivers, the larger the high-speed car following rate and traffic flow with small spacing are under the same road density. The high-speed car following traffic flow mechanics model proposed in this paper has a certain reference significance and practical value for analyzing the physical phenomenon of high-speed car following and enriching the traffic flow theory.

Keywords: traffic flow, high speed car-following, dynamic model, cellular automata

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a, 05.50.+q

DOI: 10.7498/aps.69.20191251

* Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61841303, 61963023).

† Corresponding author. E-mail: edukeylab@126.com