

基于元胞自动机模型的道路突发瓶颈现象研究*

盛 鹏 赵树龙 王俊峰[†] 左 航

(四川大学计算机学院, 视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 成都 610064)

(2009 年 9 月 1 日收到; 2009 年 12 月 14 日收到修改稿)

针对特殊交通事件诱发的道路突发瓶颈现象, 结合驾驶员在瓶颈现象发生前后的行为变化, 提出了一个考虑驾驶员在瓶颈处驾驶特性的元胞自动机模型, 并利用该模型分析了瓶颈现象对驾驶特性的影响. 结果发现, 该模型可以刻画不对称换道和瓶颈处抢道行为所产生的一些复杂的交通现象. 研究表明, 在瓶颈处实行不对称交替通行可以提高系统流量.

关键词: 元胞自动机, 道路突发瓶颈, 不对称换道规则, 交替通行控制

PACC: 0550, 0560

1. 引 言

在实际交通中, 道路主道和匝道交通参量的复杂交错变化往往会诱发不同的交通现象, 主道和匝道汇合处的车辆通行状况通常决定了整个道路的通行能力, 因此常被称为道路的天然瓶颈. 针对主道和匝道的各类复杂现象, 国内外学者运用多种交通流模型对其进行了深入探讨. Helbing^[1]采用宏观模型研究了入匝车流对主路的影响. Kerner^[2]基于实测数据分析了含出入匝道高速公路的交通流特性, 并对堵塞形成机制进行了深入研究, 合理地解释了道路瓶颈处崩溃和成核效应等现象. Tang 等^[3]以考虑匝道作用的改进速度梯度模型为基础, 分析了高峰时段对匝道口处交通流的影响.

元胞自动机(CA)是一种时间和空间都离散的数学模型, 非常适合描述交通流这类复杂的非线性系统, 同时因其简单灵活, 国内外学者运用其再现和研究了道路中各种复杂交通现象^[4-14]. NaSch 模型^[4,5]是由 Nagel 和 Schreckenberg 提出的应用于交通流中的元胞自动机模型. 假定车辆随机分布在一维离散的格点链上, v_n 和 x_n 分别表示第 n 辆车的速度和位置, v_{\max} 为最大速度. NaSch 模型将车辆演化过程分为加速、减速、随机慢化和位置更新四个阶段. 在加速阶段, 如果车辆速度没有达到 v_{\max} 就增

加 1, 即

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

在减速阶段, 如果车辆速度 v_n 大于前车间距 d_n , 则 v_n 降至 d_n , 即

$$v_n \rightarrow \min(v_n, d_n),$$

其中 $d_n = x_{n+1} - x_n - 1$. 在随机慢化阶段, 车速 v_n 以概率 p 降低 1, 即

$$v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0).$$

在位置更新阶段, 车辆以新获取的速度向前更新位置, 即

$$x_n \rightarrow x_n + v_n.$$

针对单车道模型的不可换道和超车等局限性, 国内外学者结合实际驾驶过程的不同特点, 对车辆换道问题进行了深入研究. Rickert 等^[4]参考车间距作用提出了双车道换道规则; Chowdhury 等^[12]结合实际交通的换道特点, 以 NaSch 模型为基础, 引入对称性换道规则, 提出了对称双车道元胞自动机(STCA)模型; Nagatani 等^[13,14]考虑不同交通状况对驾驶员换道行为的影响, 依据换道动机和安全原则提出了三类换道规则; Tang 等^[15-17]详细分析了跟驰模型中的各类换道行为对交通流的影响. 与此同时, 学者们以双车道换道行为为对象, 利用 CA 模型深入分析了道路主道和匝道的各类交通现象^[18-22]. Jia 等^[18]利用 CA 模型刻画了入匝和出匝附近的交通行为; 雷丽等^[19]以 Fukui 和 Ishibashi 提出的 FI 模

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA01Z208, 2008AA022503)和国家自然科学基金(批准号:60705005, 60772150)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wangjf@scu.edu.cn

型为基础,研究了交替通行控制策略对高架路主道和上匝道车流的影响;滕亚帆等^[20]采用改进 NaSch 模型分析了具有信号灯控制的主道为双车道的入匝道系统交通流特性;梅超群等^[21,22]以 CA 模型为基础,分别对高速路的入匝控制和城市快速路系统中不同路段的交通问题进行了深入研究.

在道路网络中,除了存在主道和匝道构成的天然瓶颈外,交通事件诱发的道路突发瓶颈现象也不时发生.例如,由于天气变化、道路损坏和车祸等特殊事件造成并行车道中的某车道的特定路段临时关闭,会形成突发的道路临时瓶颈现象,如图 1 所示.针对该类现象,Jia 等^[23]详细分析了在不同车辆密度分布下受瓶颈影响的上游路段长度对交通流的影响,得到瓶颈通行能力不受其长度影响的结论.

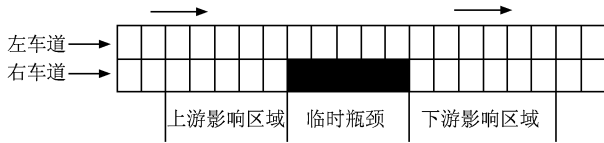


图 1 道路临时瓶颈现象示意图

本文针对特殊交通事件诱发的道路突发瓶颈现象,结合驾驶员在瓶颈现象发生前后的行为变化,提出了一个考虑驾驶员在瓶颈处驾驶特性的 CA 模型,并利用该模型分析了不对称换道、瓶颈处抢道行为和不对称交替通行控制策略对道路交通流的影响.

2. 道路模型

首先定义用两条分别由 N 个元胞组成的一维首尾相连的离散元胞链来表示双车道,每个元胞表征实际长度为 7.5 m ,并最多只能由一辆车占据.车辆随机分布在 N 个离散的元胞中,边界为周期边界条件. ρ 表示道路上的车辆密度(车辆所占元胞数与总元胞数之比),车辆分为快车和慢车(设快车的车长为 1,慢车的车长为 2),车辆的速度按照车型随机分布在 $0-v_{\max}$ 之间, f_{slow} 表示慢车占车辆总数的比例.

2.1. STCA 模型

STCA 模型的演化过程通常是将每个时间步划分为以下两个时间子步:第一个子步,车辆按照设定的规则进行换道;第二个子步,车辆在各自车道上按照 NaSch 模型进行更新^[12].在 STCA 模型中,

车辆从当前车道换至相邻车道的条件如下:

$$\begin{aligned} d_n(t) &< \min(v_n(t) + 1, v_{\max}), \\ d_{n,\text{fore}}(t) &> d_n(t), \\ d_{n,\text{back}}(t) &> v_{\max}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $d_{n,\text{fore}}(t)$ 和 $d_{n,\text{back}}(t)$ 分别表示第 n 辆车在 t 时刻与相邻车道前车和后车的间距.

针对 STCA 模型换道规则的单一性和保守性,王永明等^[24]考虑了驾驶员的性格差异后引入弹性换道规则,提出 STCA-1 和 STCA-2 模型.相对于 STCA 模型,STCA-1 和 STCA-2 模型考虑驾驶员换道的目的是追求速度更大化,而没有必要在换道后进行减速.因此,文献[24]在单车道更新规则中没有随机减速过程.在 STCA-1 模型中,车辆的换道条件如下:

$$\begin{aligned} d_n(t) &< \min(v_n(t) + 1, v_{\max}), \\ d_{n,\text{fore}}(t) &> d_n(t), \\ d_{n,\text{back}}(t) &> 1 + \min(v_{n,\text{back}}(t) + 1, v_{\max}) \\ &\quad - \min(v_n(t) + 1, v_{\max}), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $v_{n,\text{back}}(t)$ 表示在 t 时刻相邻车道的后车速度.对于 STCA-2 模型,车辆的换道条件如下:

$$\begin{aligned} d_n(t) &< \min(v_n(t) + 1, v_{\max}), \\ d_{n,\text{fore}}(t) &> d_n(t), \\ d_{n,\text{back}}(t) &> 1 + v_{\max} - \min(v_n(t) + 1, v_{\max}). \end{aligned} \quad (3)$$

对比以上三类换道规则可以看出,与传统的 STCA 模型相比,STCA-1 和 STCA-2 模型考虑了车辆与相邻车道后方车辆速度差的影响,弱化了换道的安全条件,以充分利用道路资源^[24].

2.2. 新换道模型

STCA 类模型(在本文的研究中 STCA 类模型特指 STCA 模型、STCA-1 模型和 STCA-2 模型)的换道规则都是针对道路路况正常的情况.当道路出现临时瓶颈现象后,驾驶员心理通常会发生相应变化.在现实生活中,由于通行车道和关闭车道通行能力的差异,驾驶员通常认为提前进入通行车道,可以保证其更快通过瓶颈,从而形成一类不对称的换道心理,即在瓶颈上游影响区域内,通行车道的驾驶员尽量不换道,而关闭车道的驾驶员则尽量换道.另外,因瓶颈现象发生后上游区域的车速会明显降低,故驾驶员能够比平时更准确地估计车速进行换道,这在一定程度上能够弥补 STCA-1 模型无法准确判断邻道后车车速的不足.

根据上述驾驶员的驾驶行为变化, 本文以 STCA-1 模型为基础, 提出一个刻画不对称换道行为的不对称双车道元胞自动机模型 (unsymmetric two-lane cellular automata, 简记为 UTCA). UTCA 模型针对通行车道和关闭车道的驾驶员换道心理的差异, 为两车道制定不同的换道规则. 在 UTCA 模型中, 对于通行车道上的车辆, 如果其满足下式中的所有条件:

$$\begin{aligned} d_n(t) &= 0, \\ d_{n,fore}(t) - d_n(t) &\geq 2, \\ d_{n,back}(t) &> 1 + \min(v_{n,back}(t) + 1, v_{max}) \\ &\quad - \min(v_n(t) + 1, v_{max}), \end{aligned} \quad (4)$$

则该车将以概率 p_0 从通行车道换至关闭车道上. 这里 $d_n(t) = 0$ 表示下一时间步在本车道上无法行驶, $d_{n,fore}(t) - d_n(t) \geq 2$ 表示邻道的行驶条件优于本车道, p_0 为换道概率 (本文中取 $p_0 < 0.2$). 同理, 对于关闭车道上的车辆, 如果其满足下式中的所有条件:

$$\begin{aligned} d_{n,fore}(t) &\geq 1, \\ d_n(t) - d_{n,fore}(t) &< 2, \\ d_{n,back}(t) &> 1 + \min(v_{n,back}(t) + 1, v_{max}) \\ &\quad - \min(v_n(t) + 1, v_{max}), \end{aligned} \quad (5)$$

则该车将以概率 $1 - p_0$ 从关闭车道换至通行车道上. 这里 $d_{n,fore}(t) \geq 1$ 表示下一时间步在邻道上能够行驶, $d_n(t) - d_{n,fore}(t) < 2$ 表示本车道的行驶条件优于邻道.

比较换道条件(4)和(5)式可知: 条件(4)式反映了当通行车道无法行驶且邻道行驶条件良好时, 通行车道的车辆以低概率选择换道, 刻画了该车道驾驶员不愿换道的心理; 条件(5)式体现了关闭车道的驾驶员期望向通行车道换道的心理.

2.3. 瓶颈口的快慢车抢道模型

在实际交通中, 对道路的天然瓶颈一般采用信号灯进行协调控制. 当道路临时瓶颈现象发生后, 通常会出现以下情景: 在最初阶段, 由于交通管理人员不能及时到达, 瓶颈口处两车道车辆进入瓶颈的顺序是一种自发的动态交替通行. 与强制控制策略相比, 这类自发交替通行顺序是“动态无序”的. 所谓自发, 是指该顺序是由驾驶员的主观行为所决定; 同时, 由于驾驶员的选择受车型、车辆位置和驾驶习惯等因素的影响, 因而其顺序又是动态无序的.

结合上述分析, 本文以影响等待队列头车驾驶

员的各类因素 (车辆类型、速度和位置等) 为主要依据, 建立瓶颈口车辆交替进入模型 (以具有良好驾驶习惯的驾驶员为主要研究对象, 忽略各类不顾驾驶安全的强行抢道行为). 由于该模型主要考虑车型对驾驶员的影响, 因此在本文中将其称为快慢车抢道模型.

2.3.1. 头车类型相同

在两车道的等待队列头车类型相同的前提下, 驾驶员通常以车辆位置和速度作为主要参考依据. 当两车道头车的当前位置相近时, 因关闭车道的车辆换道到通行车道需要一定时间, 从安全性考虑, 关闭车道的驾驶员通常会选择让通行车道的车辆优先进入瓶颈路段; 当两头车的间距超过一定距离后, 关闭车道的车辆会优先进入瓶颈路段. 该情况用公式描述如下: 当满足

$$\begin{aligned} x_{close}(t) - x_{open}(t) - l &\leq v_{open}(t) \Delta t_{change} \\ &\quad + d_{change} + d_{safe, min}, \end{aligned}$$

就有

$$G_{enter}(t+1) = \begin{cases} 1 & (\text{以概率 } p_1) \\ -1 & (\text{以概率 } 1 - p_1). \end{cases} \quad (6a)$$

当满足

$$\begin{aligned} x_{close}(t) - x_{open}(t) - l &> v_{open}(t) \Delta t_{change} \\ &\quad + d_{change} + d_{safe, min}, \end{aligned}$$

就有

$$G_{enter}(t+1) = -1. \quad (6b)$$

这里 $G_{enter}(t+1)$ 表示在 $t+1$ 时刻头车在瓶颈处的通行状态, $G_{enter}(t+1) = 1$ 表示通行车道的头车进入, $G_{enter}(t+1) = 0$ 表示发生堵塞, $G_{enter}(t+1) = -1$ 表示关闭车道的头车进入; $x_{open}(t)$ 和 $x_{close}(t)$ 分别表示在 t 时刻通行车道和关闭车道的头车位置; $v_{open}(t)$ 表示在 t 时刻通行车道头车的当前速度; l 为车辆长度; Δt_{change} 为换道时间, 取 $\Delta t_{change} = 1$; d_{change} 为车辆换道延误时间造成的滞后距离, 取 $d_{change} = 1.5$; $d_{safe, min}$ 为安全缓冲距离, 取 $d_{safe, min} = 1$; p_1 为通行车道的头车进入瓶颈路段的概率, 取 $p_1 > 0.75$.

2.3.2. 头车类型不同

当两车道的等待队列头车类型不同时, 驾驶员除了考虑当前车辆的位置和速度, 通常还会考虑车辆自身机动性等因素.

首先, 讨论快车处于通行车道而慢车处于关闭车道的情况. 由于慢车处于关闭车道并且其机动性不如快车, 故慢车司机通常会让快车优先进入; 另

外,偶尔也会发生鲁莽的慢车司机与快车抢道事件,造成瓶颈口处堵塞. 该情况描述如下:当满足

$$x_{\text{close}}(t) - x_{\text{open}}(t) - l \leq v_{\text{open}}(t) \Delta t_{\text{change}} + d_{\text{change}} + d_{\text{safe, min}},$$

就有

$$G_{\text{enter}}(t + 1) = \begin{cases} 1 & (\text{以概率 } p_1), \\ -1 & (\text{以概率 } 1 - p_1). \end{cases} \quad (7a)$$

当满足

$$x_{\text{close}}(t) - x_{\text{open}}(t) - l > v_{\text{open}}(t) \Delta t_{\text{change}} + d_{\text{change}} + d_{\text{safe, min}},$$

就有

$$G_{\text{enter}}(t + 1) = \begin{cases} 0 & (\text{以概率 } p_2), \\ -1 & (\text{以概率 } 1 - p_2). \end{cases} \quad (7b)$$

这里 p_2 为慢车司机的抢道概率,取 $p_2 < 0.1$.

然后,重点分析快车处于关闭车道而慢车处于通行车道的情况. 在该情况下,当两头车的位置相距较近时,慢车驾驶员通常会因其位于通行车道

(不需要换道),认为自己应该优先进入瓶颈路段;而另一方面,在这种情况下快车驾驶员会因其机动性比慢车好(在一定时间内能够超过慢车),也认为自己应该优先进入. 基于慢车驾驶员和快车驾驶员这样相互矛盾的心理,导致该情况下的头车抢道行为最为复杂. 下面以头车类型、当前位置和速度为依据,将该情况分为场景 I、场景 II、场景 III 和场景 IV 四类场景进行描述,如图 2 所示. 同时,为了更好地描述图 2 中快慢车的位置和速度差异,本文将头车的速度差异换算为相应的位置差异,用当量位置差异 $\delta(t)$ 描述在 t 时刻两车的位置和速度差异,即

$$\delta(t) = (x_{\text{truck}}(t) - x_{\text{car}}(t)) + (v_{\text{truck}}(t) - v_{\text{car}}(t)) \Delta t_{\text{change}}, \quad (8)$$

其中 $x_{\text{car}}(t)$ 和 $x_{\text{truck}}(t)$ 分别表示在 t 时刻快车和慢车的位置, $v_{\text{car}}(t)$ 和 $v_{\text{truck}}(t)$ 分别表示在 t 时刻快车和慢车的速度. 此外,定义抢道安全距离 D_{safe} , 并取 $D_{\text{safe}} = l + d_{\text{safe, min}}$.

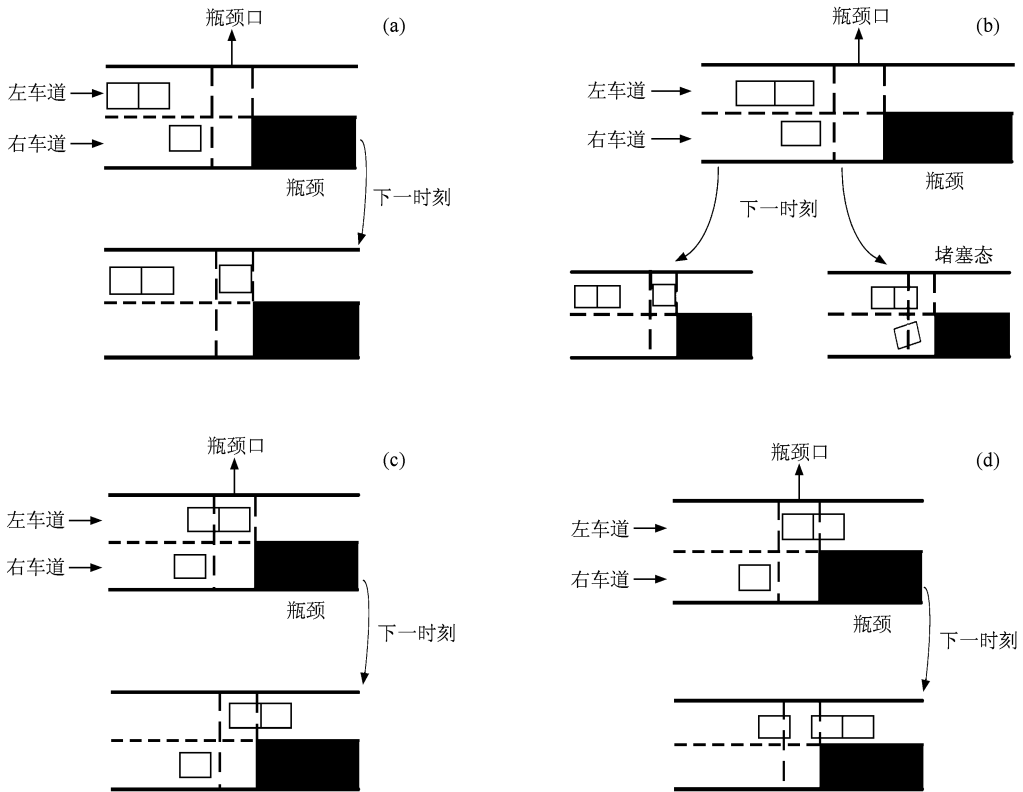


图 2 瓶颈现象发生处的车辆抢道行为示意图 单格和双格分别表示快车和慢车. (a) 场景 I, (b) 场景 II, (c) 场景 III, (d) 场景 IV

如图 2(a) 所示,在场景 I 下,因快车的当量位置优于慢车,故其顺利超车,优先进入瓶颈路段,即当 $\delta(t) < -D_{\text{safe}}$ 时,

$$G_{\text{enter}}(t + 1) = -1. \quad (9a)$$

如图 2(b) 所示,在场景 II 下,因快慢车的当量位置接近,故两车互不相让. 该场景下,如果快车强

行超车成功,那么快车将进入瓶颈路段,否则发生堵塞,即当 $-D_{\text{safe}} \leq \delta(t) \leq 0$ 时,

$$G_{\text{enter}}(t+1) = \begin{cases} 0 & (\text{以概率 } p_3), \\ -1 & (\text{以概率 } 1-p_3), \end{cases} \quad (9b)$$

其中 p_3 为道路发生堵塞的概率,本文中取 $p_3 > 0.8$.

如图 2(c) 所示,在场景 III 下,因慢车的当量位置优于快车,且其部分车体已进入瓶颈口,故快车等慢车通过后再进入瓶颈路段,即当 $0 < \delta(t) < D_{\text{safe}}$ 时,

$$\begin{aligned} G_{\text{enter}}(t+1) &= 1, \\ v_{\text{car}}(t+1) &= 0. \end{aligned} \quad (9c)$$

如图 2(d) 所示,在场景 IV 下,因慢车的当量位置优于快车,且其车体已完全进入瓶颈口,故快车减速换道后跟随慢车进入瓶颈路段,即当 $\delta(t) \geq D_{\text{safe}}$ 时,

$$\begin{aligned} G_{\text{enter}}(t+1) &= 1, \\ v_{\text{car}}(t+1) &= 1. \end{aligned} \quad (9d)$$

3. 数值模拟

本文以 STCA 类模型为参照,分析 UTCA 模型中驾驶员行为对交通流的影响.在模拟过程中,将每个时间步划分为两个时间子步.第一个子步,车

辆在不同区域按照不同的规则进行换道.在瓶颈的上游影响区域执行 UTCA 模型的换道规则;对瓶颈现象发生处的等待队列的头车按照快慢车抢道模型决定其进入瓶颈路段的顺序(本文所有涉及瓶颈现象的实验,在无交替控制策略的前提下皆以快慢车抢道模型为瓶颈路段的控制模型);其他区域仍以 STCA-1 规则进行换道.第二个子步,按照 NaSch 模型更新单车道的车辆.

实验中,设左车道为通行车道,右车道为关闭车道,每条车道的长度为 4000,瓶颈路段始于 1800 处,其长度为 200,快车和慢车的最大速度分别为 5 和 3.同时,根据文献[23]中瓶颈通行能力不受影响区域长度影响的结论,设置瓶颈影响区域长度为 900(即车辆 5 min 的正常行驶距离).为消除非稳态的影响,连续运行 2×10^5 时间步,舍去前 1.5×10^5 时间步的数据,对后 5×10^4 时间步的道路车辆平均速度 V 和平均流量 Q 等参数进行统计;为分析慢车对交通流的影响,假设在车流中掺入不同比例的慢车,组成混合车流.

首先,以道路时空斑图为研究对象,分析临时瓶颈现象对交通流的总体影响.取密度 $\rho = 0.1$ 和 $f_{\text{slow}} = 0.1$,采用 STCA-1 模型的换道规则,对比瓶颈现象发生前后道路车流变化情况,结果如图 3 所示.

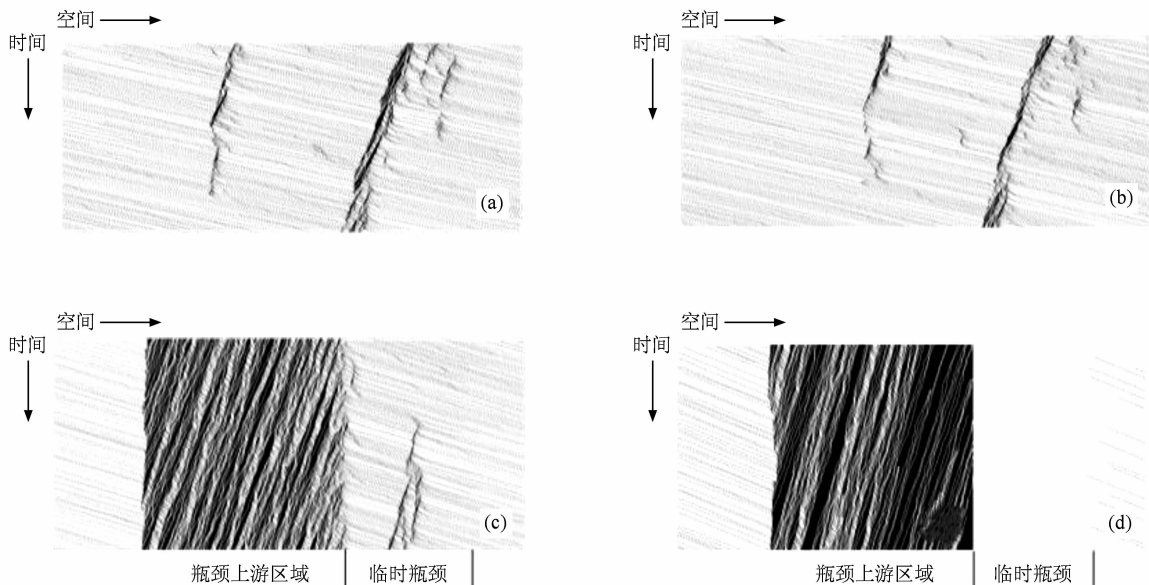


图 3 道路瓶颈现象发生前后的时空斑图 (a) 瓶颈现象发生前的左车道, (b) 瓶颈现象发生前的右车道, (c) 瓶颈现象发生后的左车道, (d) 瓶颈现象发生后的右车道

从图 3(a) 和 (b) 可以看到,瓶颈现象发生前,由于采用 STCA-1 模型的对称换道原则,道路左右

车道的相图基本一致(与文献[24]的结论一致),部分区域出现时停时走现象,且持续时间较长,其余

区域为自由流. 从图 3(c) 和 (d) 可以看到, 瓶颈现象发生后, 时空斑图被瓶颈作用划分为具有不同特征的四类区域. 一是完全不受瓶颈影响的自由流区域, 位于离瓶颈路段较远的上游和下游; 二是受瓶颈现象影响明显的上游区域, 两车道的车辆在该区域内形成等待队列, 出现频繁的时停时走现象且不时出现堵塞(因左车道为通行车道, 其靠近瓶颈处的堵塞相明显少于右车道); 三是瓶颈路段处, 右车

道中该区域的时空斑图显示为空白(因路段关闭), 左车道在该区域的时空斑图与等密度下的单车道时空斑图类似; 四是瓶颈附近的下游区域, 因瓶颈路段位于右车道, 所以右车道在该区域的车辆数低于左车道的对应值.

然后, 以 STCA 类模型和 UTCA 模型作对比, 分析瓶颈现象发生前后四类换道行为对速度 V 和流量 Q 的影响.

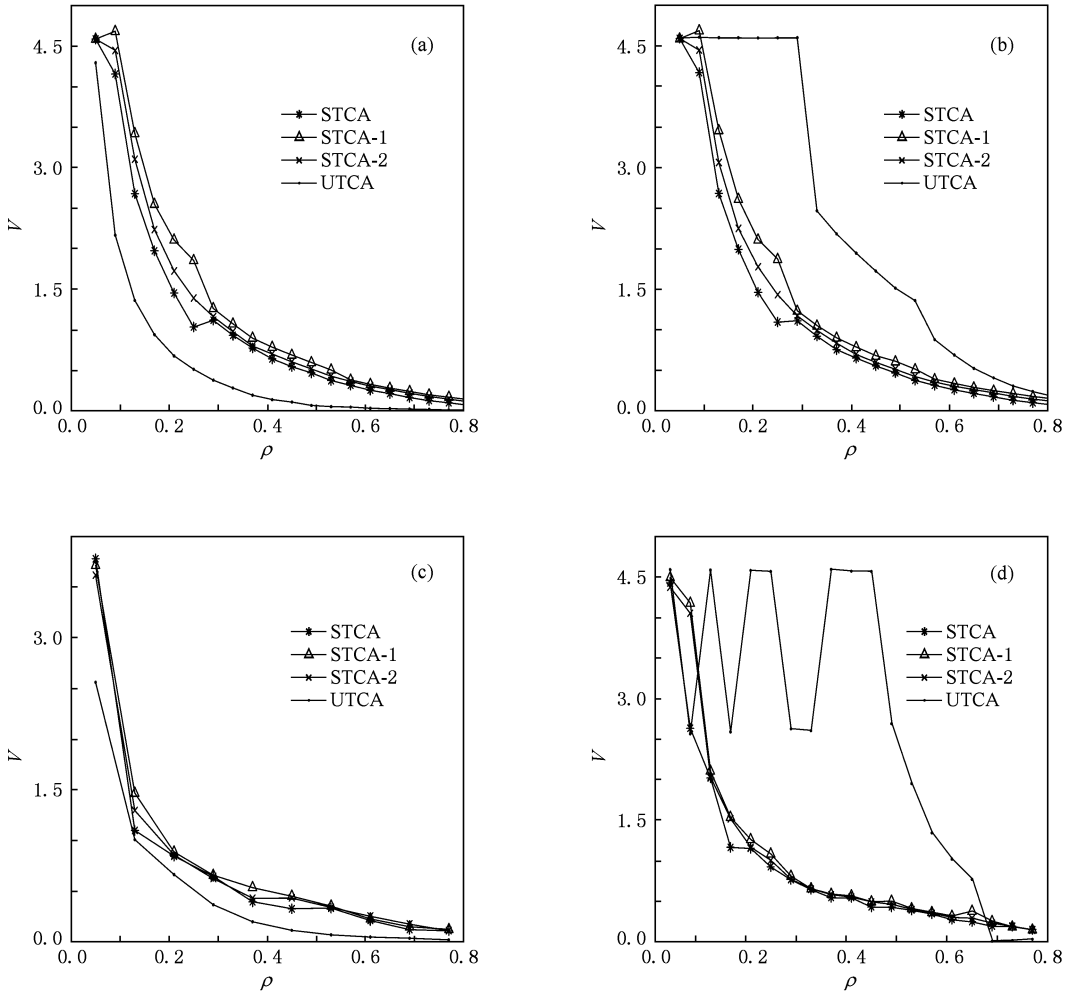


图 4 瓶颈现象发生前后不同模型的速度-密度图 (a) 瓶颈现象发生前的左车道, (b) 瓶颈现象发生前的右车道, (c) 瓶颈现象发生后的左车道, (d) 瓶颈现象发生后的右车道

对比图 4(a) 和 (b) 可以看到: 瓶颈现象发生前, 在 UTCA 模型中, 由于大部分车辆换道到左车道而右车道相对空闲, 使得两车道的平均速度出现不对称变化; 在等初始化道路密度下, UTCA 模型的左车道的平均速度明显低于其右车道的对应值, 同时也低于其他模型的对应值; 因 UTCA 模型的右车道相对空闲(其道路实际密度低于其他换道模型的对

应值), 所以该车道的平均速度大于其他模型, 且能够在较大密度范围内保持自由流的通行状态.

根据图 4(c) 和 (d) 可知: 瓶颈现象发生后, 左右车道的平均速度都明显低于正常状况, 且出现堵塞相的密度小于道路正常状态下对应的临界值, 这显然与瓶颈现象发生后道路局部出现车流拥挤的真实情况一致; 在 UTCA 模型中, 左车道的速度变化

趋势与正常状态相似,右车道的平均速度高于左车道和其他模型的平均速度,且在堵塞相的临界密度附近出现复杂的振荡变化.这是由于不对称换道规则导致车辆大部分集中在左车道而右车道却相对空闲,造成右车道的平均速度较大;

同时,由于瓶颈路段和堵塞事故的影响(根据实际交通现象,堵塞事故的不定时发生会导致等待队列的动态变化),导致右车道上速度为零的车辆数明显高于左车道,且时增时减,故右车道出现该类振荡现象.

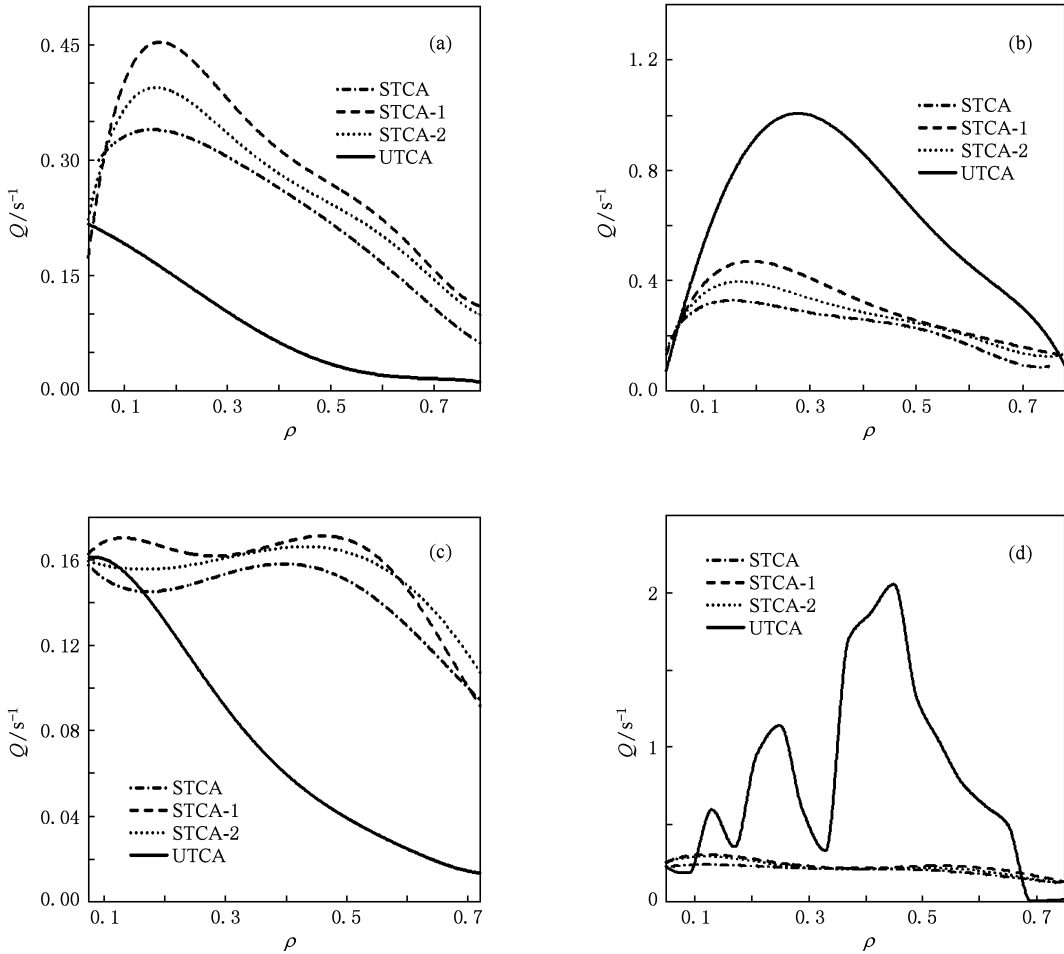


图5 瓶颈现象发生前后不同模型的流量-密度图 (a)瓶颈现象发生前的左车道,(b)瓶颈现象发生前的右车道,(c)瓶颈现象发生后的左车道,(d)瓶颈现象发生后的右车道

通过图 5(a)和(b)可以发现:瓶颈现象发生前,UTCA模型的左车道平均流量明显低于其他换道模型的平均流量,同时也低于右车道的平均流量;右车道的平均流量明显大于其他模型的平均流量,出现极大值的临界密度也高于其他模型.显然,上述流量差异与图 4(a)和(b)描述的速度差异一致,符合道路速度与流量的关系(同理,图 4(c)和(d)与图 5(c)和(d)的变化一致).此外,STCA类模型的实验结果与文献[24]一致,STCA-1模型比其他两种模型能更有效地利用道路资源.

化可知,瓶颈现象发生后,与STCA类模型相比,UTCA模型以通行车道为目标的换道行为导致左车道的速度和流量偏低,而右车道的速度和流量过高且出现不规则的振荡.这表明该类换道行为不但没有改善道路的通行状况,反而加重了通行车道的负荷,造成瓶颈上游区域出现频繁的局部堵塞.与之相对,STCA类模型不考虑瓶颈现象发生位置的影响,以车道通行状况为换道依据,既保证了道路流量的平稳变化,又有效地利用了道路资源,这在一定程度上减少了突发瓶颈现象的影响.

下面研究不同换道模型对瓶颈口通行能力的

根据上述瓶颈现象发生前后速度和流量的变

影响.按照文献[20]中对瓶颈路段通行能力的定义,本文以瓶颈口的最大流量 Q_{\max} 作为瓶颈路段通行能力的衡量标准.以快慢车抢道模型作为瓶颈口的交替进入模型,分析在不同密度下采取不同的换道模型对瓶颈路段通行能力的影响.

从图6可以看出,在道路瓶颈口几何条件和进入原则固定的前提下,瓶颈路段的通行能力在不同的道路密度下基本不变.另外,对于不同的换道规则,其通行能力差别不大.因此,我们可以得到,瓶颈口的通行能力受道路密度和流量的影响较弱,主要由道路瓶颈口的各类因素决定.这与文献[20]中提出的匝道口通行能力受各车道车辆进入率和慢化率制约的结论相一致.

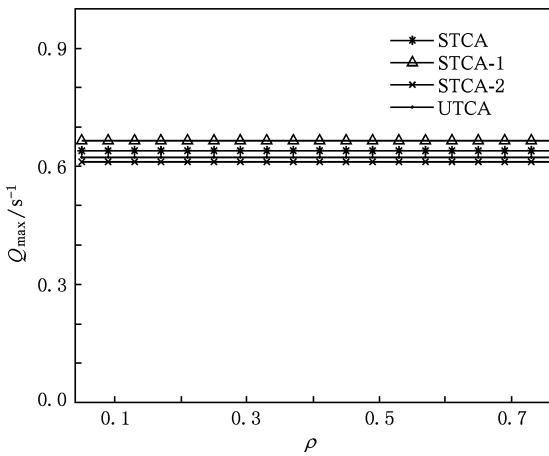


图6 不同模型的瓶颈路段通行能力-密度图

最后,重点讨论瓶颈口各类条件对其通行能力的影响.在实际交通中,瓶颈口的几何构型通常是固定的,因此瓶颈口处等待车辆的行为是决定其通行能力的主要因素^[20].此外,文献[25—27]也证明快慢车的比例会影响混合交通流的各类特性.以下将快慢车抢道模型作为瓶颈口的交替通行模型,分析快慢车分布对道路流量的影响,结果如图7所示.图7中, f_1 和 f_0 分别表示通行车道上全为快车和全为慢车; f_{same} 表示两车道快车比例相同,即 $f_{\text{open}} = f_{\text{close}}$, 其中 f_{open} 和 f_{close} 分别表示快车在通行车道和关闭车道的比例; f_{diff} 表示两车道快车比例不同,且满足关系 $f_{\text{open}} = 1 - f_{\text{close}}$.

从图7可见,当通行车道全为快车时,由于其处于通行车道,同时具备车道和车型优势,因此关闭车道的车辆很难与其竞争,所以该条件下发生堵塞的概率最小,道路流量最大;当通行车道全为慢车

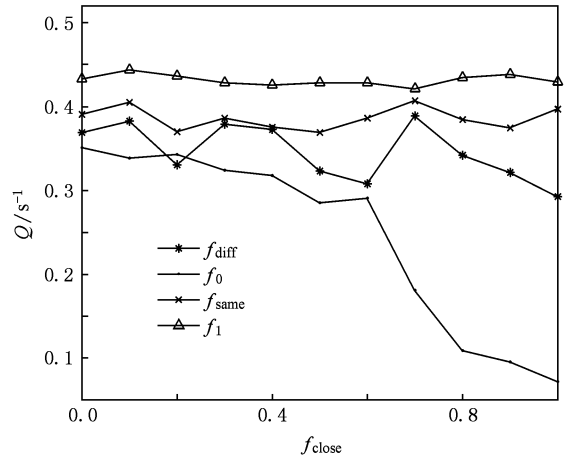


图7 快慢车分布比例与道路流量的关系

时,随着关闭车道中快车比例的增加,瓶颈口的快慢车抢道行为频繁发生,道路发生堵塞的概率逐渐增大,使流量逐渐减小;当两车道的快慢车不规则分布时,道路流量随快车在关闭车道车流中所占比例的变化而上下波动,介于以上两种极端情况之间.显然,该实验结果与实际交通中的一些现象相符.例如,当高速路段发生临时瓶颈后,在无交警管理的情况下,当瓶颈口处重型货车越多时,等待队列就越长,道路通行也越困难.

在实际交通中,对于道路的天然瓶颈和突发瓶颈,采取强制交替通行控制策略都是最有效的疏通手段.下面以不同交替控制策略为对象,分析其道路疏通能力.本文引入道路局部饱和度 θ 描述道路的畅通状况, $\theta = \rho_i / \bar{\rho}$, 即道路的局部密度与整体平均密度之比.由此可以看出, θ 越大表明道路局部聚集的车辆数越多,道路越不畅通.同时,因瓶颈上游区域受瓶颈影响最严重,故本文选取瓶颈上游区域(从道路起点到瓶颈口)的道路局部饱和度(其值为两车道的平均值)为道路通行状况的评价标准.

实验中,以 STCA-1 模型为换道模型,以 R 表示交替通行过程中两车道允许通行的车辆数之比, $R = N_{\text{open}} / N_{\text{close}}$, 其中 N_{open} 和 N_{close} 分别表示通行车道和关闭车道允许通行的车辆数. $R > 1$ 表示通行车道的通行时间长于瓶颈现象发生的车道的通行时间;反之, $R < 1$ 表示通行车道的通行时间小于瓶颈现象发生的车道的通行时间; $R = 1$ 表示两车道执行对等的交替控制策略; $R = R_s$ 表示自发交替控制时瓶颈处采用快慢车抢道模型,其中 R_s 为自发交替控制时两车道的通行车辆数之比.

由图 8 可以看出:当 $0.1 < \rho < 0.6$ 时,快慢车抢道模型的局部饱和度最大,表明与强制交替通行控制策略相比,自发交替通行的疏导能力最低;当 $0.1 < \rho \leq 0.3$ 时,对称策略的局部饱和度明显低于不对称策略的饱和度,表明其道路疏通能力占优;当 $0.3 < \rho < 0.5$ (参见文献[2,9]中对同步流区域和同步流到堵塞相转变的分析,如文献[9]中图 2 和 3 所示,该密度区域为同步流到堵塞相过渡区域)的时候,不对称策略的局部饱和度明显小于对称策略的饱和度,特别是当 $R > 1$ 时,道路的局部饱和度更低;当 $\rho \geq 0.5$ 时,由于道路整体处于堵塞

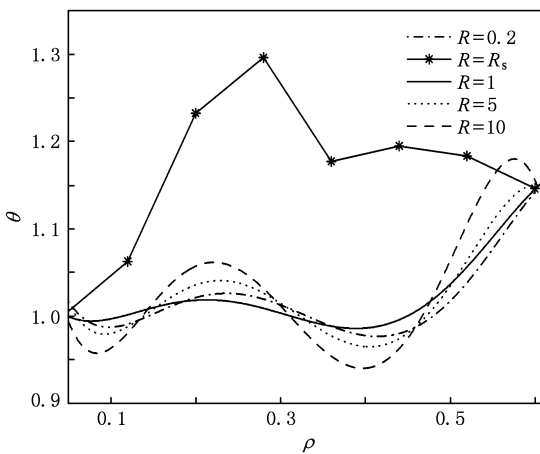


图 8 瓶颈上游的道路局部饱和度与密度的关系

相,各类交替控制策略的疏通能力大致相等。

以上研究结果表明,当道路密度处于临界密度区域时,在瓶颈口处采取不对称的交替控制策略在一定程度上能够改善道路的通行状况,避免堵塞发生。

4. 结 论

本文针对道路突发瓶颈现象引起的各类情况,充分考虑驾驶员在瓶颈现象发生前后的心理变化,以 STCA 模型为基础,提出符合驾驶员心理特性的不对称换道规则和瓶颈口抢道模型。同时,采用周期性边界条件进行数值模拟,真实地重现了突发瓶颈现象导致的一些交通状况。结果表明:车辆在瓶颈上游区域以通行车道为目标的不对称换道行为不但没有提高道路的通行能力,反而造成道路资源的不平衡分布;在快慢车不均匀分布的前提下,特别是慢车占据通行车道时容易出现快车强行抢道行为,诱发堵塞。另外,在瓶颈上游区域按照车型和车道对车辆进行分类排列,减少慢车在通行车道的比例,在一定程度上能够提高瓶颈的通行能力;当对关闭车道和通行车道采取不同的交替通行策略时,在特定密度范围内,适当地延长通行车道的通行时间能够减少瓶颈上游的等待队列长度,可有效地缓解交通压力。

- [1] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 107
- [2] Kerner B S 2004 *Physica A* **333** 379
- [3] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Gao Z Y, Zhang Y 2009 *Commun. Theor. Phys.* **51** 71
- [4] Rickert M, Nagel K, Schreckenberg M 1996 *Physica A* **231** 534
- [5] Nagel K, Wolf D E, Wagner P, Simon P 1998 *Phys. Rev. E* **58** 1425
- [6] Ishibashi Y, Fukui M 1994 *J. Phys. Soc. Jpn.* **63** 2882
- [7] Knosp W, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 2002 *J. Phys. A* **35** 3369
- [8] Xue Y, Dong L Y, Lei L, Dai S Q 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026123
- [9] Gao K, Jiang R, Hu S X, Wang B H, Wu Q S 2007 *Phys. Rev. E* **76** 0260105
- [10] Wang J F, Chen G S, Liu J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2850
- [11] Sheng P, Zhao S L, Wang J F, Tang P, Gao L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3347
- [12] Chowdhury D, Wolf D E, Schreckenberg M 1997 *Physica A* **235** 417
- [13] Kurata S, Nagatani T 2003 *Physica A* **318** 537
- [14] Nagai R, Nagatani T, Taniguchi N 2005 *Physica A* **350** 548
- [15] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Jiang R 2007 *Acta Mech. Sin.* **23** 49
- [16] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Jiang R 2008 *Acta Mech. Sin.* **24** 399
- [17] Tang T Q, Wong S C, Huang H J, Zhang P 2009 *J. Adv. Transp.* **43** 245
- [18] Jia B, Jiang R, Wu Q S 2004 *Phys. Rev. E* **69** 056105
- [19] Lei L, Dong L Y, Ge H X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6874 (in Chinese) [雷 丽、董力耘、葛红霞 2007 物理学报 **56** 6874]
- [20] Teng Y F, Gao Z Y, Jia B, Li F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1374 (in Chinese) [滕亚帆、高自友、贾 斌、李 峰 2008 物理学报 **57** 1374]
- [21] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4786 (in Chinese) [梅超群、黄海军、唐铁桥 2008 物理学报 **57** 4786]
- [22] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3104 (in Chinese) [梅超群、黄海军、唐铁桥 2009 物理学报 **58**

- 3104] (in Chinese)[邝 华、孔令江、刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
- [23] Jia B, Jiang R, Wu Q S 2003 *Int. J. Mod. Phys. C* **14** 1295
- [24] Wang Y M, Zhou L S, Lü Y B 2008 *China J. Highway Transp.* **21** 90 (in Chinese)[王永明、周磊山、吕永波 2008 中国公路学报 **21** 90]
- [25] Kuang H, Kong L J, Liu M R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894
- [26] 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]
- [27] Tang T Q, Huang H J, Zhao S G, Shang H Y 2009 *Phys. Lett. A* **373** 2461

Study of temporary traffic bottleneck based on cellular automaton model^{*}

Sheng Peng Zhao Shu-Long Wang Jun-Feng[†] Zuo Hang

(Key Laboratory of Fundamental Synthetic Vision Graphics and Image Science for National Defense,
School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(Received 1 September 2009; revised manuscript received 14 December 2009)

Abstract

In this paper, we propose a new cellular automaton model for studying the temporary bottleneck induced by a special accident. The difference in driver behavior between before and after the accident occurrences is taken into account to investigate the effect of the bottleneck on driving character. Simulation results show that the new model can reproduce some complicated traffic phenomena, such as the asymmetrically lane-changing and grabbing the entrance on the bottleneck, and a reasonable asymmetrically gear-alternating control regulation can enhance the outflow of the bottleneck.

Keywords: cellular automaton, temporary bottleneck in road, asymmetry lane-changing rule, gear-alternating control

PACC: 0550, 0560

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2008AA01Z208, 2008AA022503) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60705005, 60772150).

[†] Corresponding author. E-mail: wangjf@scu.edu.cn