

敏感换道对下匝道系统交通流的影响*

康瑞¹⁾ 杨凯^{2)†}

1) (中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉 618307)

2) (四川大学计算机学院, 成都 610064)

(2013年6月13日收到; 2013年8月23日收到修改稿)

在NaSh模型基础上, 充分考虑驾驶员在匝口指示牌的诱导作用下驾驶方式的变化, 定义了车辆在匝口上游的换道、直行驾驶规则, 提出了敏感换道的元胞自动机下匝道交通流模型. 通过计算机数值模拟, 结果表明: 敏感换道过程能减少直行车道上的转出车辆比例, 对非必要的换道行为有明显的抑制作用, 且随敏感换道区长度增加, 该作用越明显; 匝口提示位置并非越长越好, 系统转出车辆比例越小, 系统所需的最佳敏感换道区长度越短. 工程设计中根据转出车辆比例选取一个适宜距离安放匝口指示牌, 能有效增加系统流量和临界加入概率.

关键词: 交通流, 元胞自动机, 驾驶方式, 计算机数值模拟

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 50.70.Fh

DOI: 10.7498/aps.62.238901

1 引言

交通流模型是在交通运输系统的设计和控制的重要一步. 由于元胞自动机^[1] (cellular automata, CA) 模型能有效模拟交通流中车辆微观运动状态, 有利于了解车辆间的相互作用机理, 因而在交通流研究中得到广泛的应用与发展^[2-25].

1992年Nagel和Schreckenberg提出了考虑车辆逐步加速和随机减速的NS模型^[2], 该模型是一种典型的一维单车道CA模型, 适用于模拟高速公路的交通流. 1996年Fukui和Ishibashi基于高速驾驶理论提出了车辆迅速加速的FI模型^[3]. 2000年王雷、汪秉宏和胡斑比提出了WWH模型, 该模型仅当车间距小于车辆最大速度时才会随机减速, 且后车的速度不完全由车间距决定^[4].

近年来交通流研究的热点转向了更加实际和复杂的道路结构, 例如城市快速路下匝道系统. 研究表明, 下匝道系统是交通拥堵的多发地带, 这是由于从下匝道离开的车辆向下匝道一侧的车道换道会引起直行车辆减速甚至停止行驶, 从而在匝口的上游区域形成交通拥堵. 但在以往的研究中, 仅

考虑了匝道的结构、长度、车辆出匝道速度等因素对交通流的影响, 车辆在行驶过程中采用统一的直行、换道规则, 对匝口位置并不敏感, 因此转出车辆到达匝口后停在直行车道等候换道的现象在以往的交通流模型仿真中频繁出现. 而这种强制换道现象在实际的高速、快速路通行时并不多见. 这是由于交通指示牌能提示下匝道位置, 驾驶员在得知前方出现转出匝道后, 采用一定方式择道行驶, 而且距离匝口越近, 驾驶员的换道意识越强烈, 对道路的选择、匝口位置更敏感, 换道目的也不再是追求更快的行驶速度, 换道概率也会随着接近匝口而增大. 因此在建立交通流模型时考虑驾驶员在匝口上游行驶过程中改变换道规则、换道概率和直行规则, 能较好地还原下匝道交通系统中车辆提前择道行驶的现实情况, 与实际交通过程更相符. 根据以上分析, 本文提出了敏感换道的元胞自动机下匝道交通流模型 (sensitivity turning CA model), 考虑驾驶员对匝口位置的敏感程度, 定义了随行驶目的、位置变化的换道规则和换道概率. 采用开放边界条件对模型进行仿真, 分析了不同参数条件下的密度、速度、流量和车辆产生概率之间的关系, 得到一些有意义的结果. 并在此基础上分析了匝口

* 国家自然科学基金 (批准号: 31070915) 和中国民用航空飞行学院科研基金 (批准号: J2012-50) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: kimura521@sohu.com

指示位置对道路交通流的影响,对匝口指示的诱导效果进行了评估,可为合理设置匝口指示提供理论依据.

2 模型

本文研究的高速公路出口匝道模型如图 1 所示,道路交通系统是由两条并行的车道和一条匝道构成.将道路视为两条一维有序格点链,每一个格点即为一个元胞,每一个格点在每一时刻为空或被一辆车占据,定义两车道为直行车道和转出车道,并假定道路上行驶的均为最大速度相同的车辆.转出车道位置为 W 的元胞为匝道口,距匝道口长 L_1 处设置匝口指示标志,本文将 L_1 定义为敏感换道区,车辆在此范围内采用敏感换道方式

行驶,系统中车辆以概率 P_{out} 转出匝道.匝道口元胞是转出车辆的“刚性的”固定边界,如果到达该元胞还不能成功换道,必须停止等待合适的换道机会.车辆在开放边界条件下自左往右运动, $X_i(t)$ 表示第 i 辆车在 t 时刻的位置; V_{max} 表示车辆的最大速度; $V_i(t)$ 表示第 i 辆车在 t 时刻的速度; P 表示系统随机减速概率; P_i^{turn} 表示第 i 辆车在 t 时刻的换道概率, $V_i^{\text{hope}}(t) = \min(V_i(t) + 1, V_{\text{max}})$, 表示期望速度; P^{turn} 表示系统换道概率; $g_i(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻与前车的距离, $g_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$; $V_i^{\text{back}}(t)V_i^{\text{front}}(t)g_i^{\text{back}}(t)g_i^{\text{front}}(t)$ 表示第 i 辆车在 t 时刻相邻车道后车、前车的速度和距离.本文模型每一时步演化分为两个步骤:各车道上的每一辆车按所定义的转道规则进行车道转换;在各自车道上根据直行规则更新速度和位置.

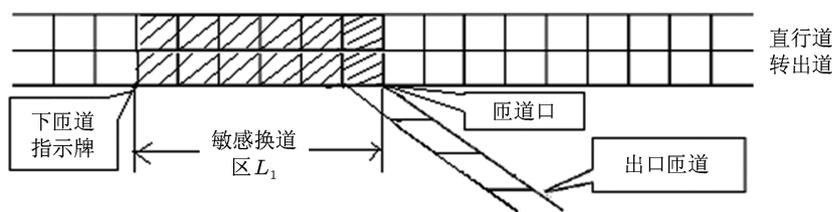


图 1 含敏感换道区的出口匝道示意图

1) 直行车道换道规则

当 $X_i(t) \leq W$ 且 $X_i(t) \geq W - L_1$ 时,以 $P_i^{\text{turn}}(t)$ 换道:

直行车辆

$$P_i^{\text{turn}}(t) = \min\left(1 - \frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}, P^{\text{turn}}\right),$$

$$g_i(t) < V_i^{\text{hope}}(t), V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t), V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t);$$

转出车辆

$$P_i^{\text{turn}}(t) = \max\left(\frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}, P^{\text{turn}}\right),$$

$$g_i(t) \times (1 - P_i^{\text{turn}}(t)) < V_i^{\text{hope}}(t),$$

$$V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t) + V_i^{\text{front}}(t) \times P_i^{\text{turn}}(t),$$

$$V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t) + V_i(t) \times P_i^{\text{turn}}(t).$$

当 $X_i(t) > W$ 或 $X_i(t) < W - L_1$:

所有车辆

$$P_i^{\text{turn}}(t) = P^{\text{turn}},$$

$$g_i(t) < V_i^{\text{hope}}(t), V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t),$$

$$V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t).$$

2) 转出道换道规则

当 $X_i(t) \leq W$ 且 $X_i(t) \geq W - L_1$ 时,以 $P_i^{\text{turn}}(t)$ 换道规则:

直行车辆

$$P_i^{\text{turn}}(t) = \max\left(\frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}, P^{\text{turn}}\right),$$

$$g_i(t) \times (1 - P_i^{\text{turn}}(t)) < V_i^{\text{hope}}(t),$$

$$V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t) + V_i^{\text{front}}(t) \times P_i^{\text{turn}}(t),$$

$$V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t) + V_i(t) \times P_i^{\text{turn}}(t);$$

转出车辆

$$P_i^{\text{turn}}(t) = \min\left(1 - \frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}, P^{\text{turn}}\right),$$

$$g_i(t) < V_i^{\text{hope}}(t), V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t),$$

$$V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t).$$

当 $X_i(t) > W$ 或 $X_i(t) < W - L_1$:

所有车辆

$$P_i^{\text{turn}}(t) = P^{\text{turn}},$$

$$g_i(t) < V_i^{\text{hope}}(t), V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t),$$

$$V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t).$$

3) 直行规则

加速过程

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

以概率 p 随机减速过程

$$V_i(t+2/3) = \max(V_i(t+1/3) - 1, 0).$$

若直行车道上的转出车辆, 或转出车道上的直行车辆满足 $X_i(t) \leq W$ 且 $X_i(t) \geq W - L_1$ 及 $V_i(t) > g_i^{\text{front}}(t) + V_i^{\text{front}}(t) \times P_i^{\text{turn}}(t)$, 减速

$$V_i(t+1) = \max(\min(V_i(t+2/3), g_i(t) - 1), 0).$$

若直行车道上的转出车辆, 或转出车道上的直行车辆满足 $X_i(t) \leq W$ 且 $X_i(t) \geq W - L_1$ 及 $V_i^{\text{back}}(t) > g_i^{\text{back}}(t) + V_i(t) \times P_i^{\text{turn}}(t)$, 减速

$$V_i(t+1) = \max(V_i(t+2/3), \min(g_i(t) + V_{i+1}(t) - 1, V_{\max})).$$

其他情况下, 安全减速过程

$$V_i(t+1) = \min(V_i(t+2/3), g_i(t)).$$

本文模型车辆演化规则描述了以下过程: 在敏感换道区内, 直行车辆选择在直行车道上行驶, 下匝道车辆选择在转出车道上行驶, 越接近匝口, 换道意图越强烈. 模型定义 $\frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}$ 表示设车辆 i 接近匝口的程度, 在敏感区内随车辆前进, $\frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}$ 取值由 0 逐渐变为 1, 直行车道上的转出车辆和转出车道上的直行车辆转道概率定义为

$$P_i^{\text{turn}}(t) = \max\left(\frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}, P^{\text{turn}}\right),$$

表示当车辆距匝口较远时按照系统转道概率转道, 随着车辆接近匝口, 转道概率由系统转道概率逐渐增加为 1. 而直行车道上的直行车辆和转出车道上的转出车辆则相反, 转道概率定义为

$$P_i^{\text{turn}}(t) = \min\left(\frac{X_i(t) - (W - L_1)}{L_1}, P^{\text{turn}}\right),$$

距离匝口越近, 转道概率越小, 由系统转道概率逐渐减小为 0. 与传统双车道模型不同, 本文模型定义了受转道概率影响的转道意图产生、安全判断标准. 转道意图产生条件为 $g_i(t) \times (1 - P_i^{\text{turn}}(t)) < V_i^{\text{hope}}(t)$, 说明随 $P_i^{\text{turn}}(t)$ 接近 1, $g_i(t)$ 对产生转道意图的作用逐渐减小, 意味着转道目的逐渐变为单纯地选择合适的车道, 而与是否能加速无关. 判断与相邻车道前、后车的安全条件为

$$V_i(t) \leq g_i^{\text{front}}(t) + V_i^{\text{front}}(t) \times P_i^{\text{turn}}(t),$$

$$V_i^{\text{back}}(t) \leq g_i^{\text{back}}(t) + V_i(t) \times P_i^{\text{turn}}(t),$$

说明随 $P_i^{\text{turn}}(t)$ 接近 1, 判断车距时逐渐加入前车、本车辆在此时步产生的位移, 充分考虑车辆的相对运动, 以使安全条件更容易达到, 以提高换道成功率, 刻画了比传统模型更激进的转道过程. 同时车辆在直行过程中以成功换道为目标对车速进行调节: 若与相邻车道前车车距离太近不能换道, 减速过程为

$$V_i(t+1) = \max(\min(V_i(t+2/3), g_i(t) - 1), 0),$$

车辆可减速至 $g_i(t) - 1$ 增加车距. 若与相邻车道后车距离太近不能换道, 减速过程为

$$V_i(t+1) = \max(V_i(t+2/3), \min(g_i(t) + V_{i+1}(t) - 1, V_{\max})),$$

考虑速度限制时加入前车位移, 有效控制车辆减速. 以上过程反应了直行、转出车辆对匝口位置的敏感性及自发的分流行为, 这一现象与实际交通过程相符.

3 计算机模拟与数值分析

设每个格子大小为 7.5 m, 一条单车道共有 1000 个格点, 长度 L 为 7.5 km. 设时间步长为 1 s, 车辆最大速度 $V_{\max} = 5$, 意义为每秒可通过 5 个格子的长度, 相当于实际车速 37.5 m/s. $W = 500$, 匝口位于转出车道第 500 个格点处. 设初始时刻车道上全空, 然后在系统始端以一定的概率 α 不断地加入车辆, 直行车辆在车道末端以概率 β 离开, 转出车辆在匝口以概率 γ 离开, 从而形成一个开放系统的交通流状态. 系统 t 时刻的密度、速度、流量、转道比例定义如下:

$$\rho(t) = \frac{N(t)}{L}, \quad (1)$$

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

$$J(t) = \rho(t) \times \bar{V}(t). \quad (3)$$

模型每一次演化时步为 20000 步, 为了消除初始状态随机性的影响, 记录后 10000 时步中每一时步车辆的平均速度, 再对 10000 个平均速度根据时间做平均计算, 得到每一次运行的平均速度

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \bar{V}(t). \quad (4)$$

为了消除初始构型的随机性对结果的影响, 再对 10 个样本取平均, 得到系统运行的平均速度. 相同方法得到系统平均流量、车辆比例.

图 2 所示, 当路段末端、转出匝道畅通时 ($\beta = 1.0, \gamma = 1.0$), 随 α 增加, 平均流量、密度线性增长达到临界值后进入平台区域, 保持常量不变, 此时系统流量饱和, 这表明 α 只在一定范围内影响系统流量和密度. 当 L_1 取值为 $[0, 100]$ 时, 系统流量峰值和 α 临界值均随 L_1 增大而增加, 系统密度峰值随 L_1 增大而减少. $L_1=0$ 时, 系统无敏感换道区域, 车辆以加速为目的换道、直行, 对匝口位置不敏感, 此时 α 临界值为 0.3, 流量峰值为 0.23, 而 $L_1 = 20, 40, 60, 80, 100$ 时, α 临界值增加比例为 47%, 73%, 87%, 95%, 100%, 流量峰值依次增加比例为: 58%, 87%, 102%, 110%, 116%, 这说明 L_1 越大, α 对流量、密度的影响范围越大, 系统能够承载的流量越大, 车辆换道造成的系统阻塞发生越晚. 但流量、临界值增加幅度、密度减小幅度, 随 L_1 增加而减少. 当 $L_1 = 120$, 系统流量峰值不增反减, 这是由于车辆敏感换道会增加车辆之间相互作用, 在敏感换道过程中, 为了成功换道车辆可能会减速,

因此 L_1 范围过大会造成系统提前产生拥堵. 由此可知匝口指示牌设置不宜过远, 车辆过早地择道行驶反而影响系统通行能力.

由图 3 所示, 当 $P_{out} = 0.2$ 时, 系统流量、密度随 α 线性增加, 到达拐点后为常量. 当 $L_1 = 20$, 系统 α 临界值为 0.58, 流量峰值为 0.50. 而当 $L_1 = 60$ 时, α 临界值为 0.64, 流量峰值为 0.57, 当 $L_1 > 60$, 系统流量逐渐减少, 密度逐渐增加, 但数值差异很小, 流量曲线基本重合. 对比图 2, 3 可知, 系统流量、密度、 α 临界值受 L_1 影响程度与 P_{out} 有关. $P_{out} = 0.2$ 时系统转出车辆比例较小, 车辆换道造成的主干道车辆停止、减速情况比 $P_{out} = 0.4$ 时少, 因此车辆在距离匝口 60 个格点处开始敏感换道即可完成转出、直行车辆的分流, 由此可知, 系统转出车辆比例越小, 系统所需的最佳敏感换道区长度越小.

为了研究敏感换道区对车辆的分流作用, 统计匝口上游 200 个格点上出现转出车辆的比例, 给出当 $L_1 = 0, 100$ 时两车道上转出车辆比例随 α 变化三维图. 由图 4(a), (b) 所示, 当 $L_1 = 0, \alpha < 0.3$ 时, 系统车辆密度小, 匝口上游的转出车辆比例很小, 系

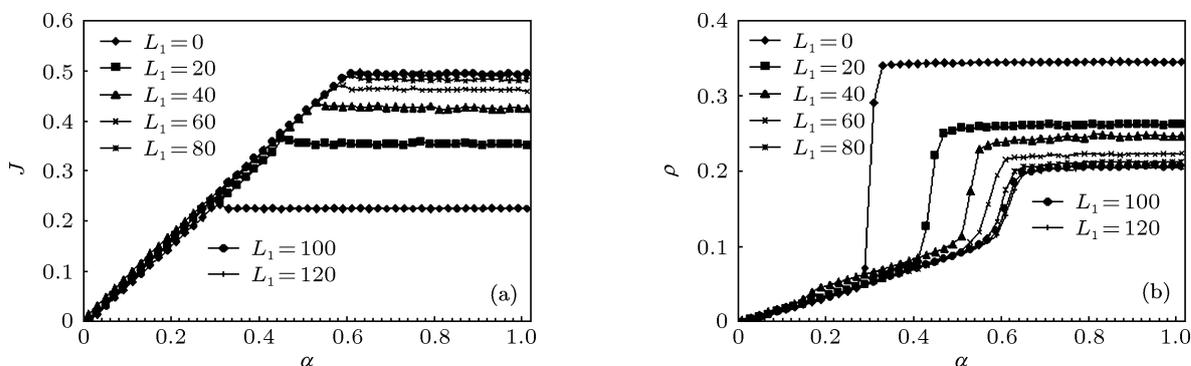


图 2 $P_{turn} = 0.5, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, P_{out} = 0.4$ 时系统流量、密度与 α 关系图 (a) $J-\alpha$; (b) $\rho-\alpha$

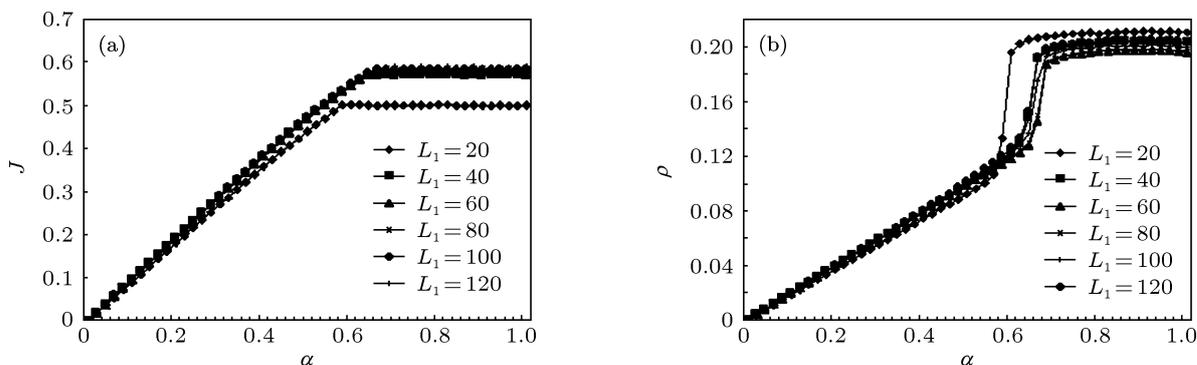


图 3 $P_{turn} = 0.5, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, P_{out} = 0.2$ 时系统流量、密度与 α 关系图 (a) $J-\alpha$; (b) $\rho-\alpha$

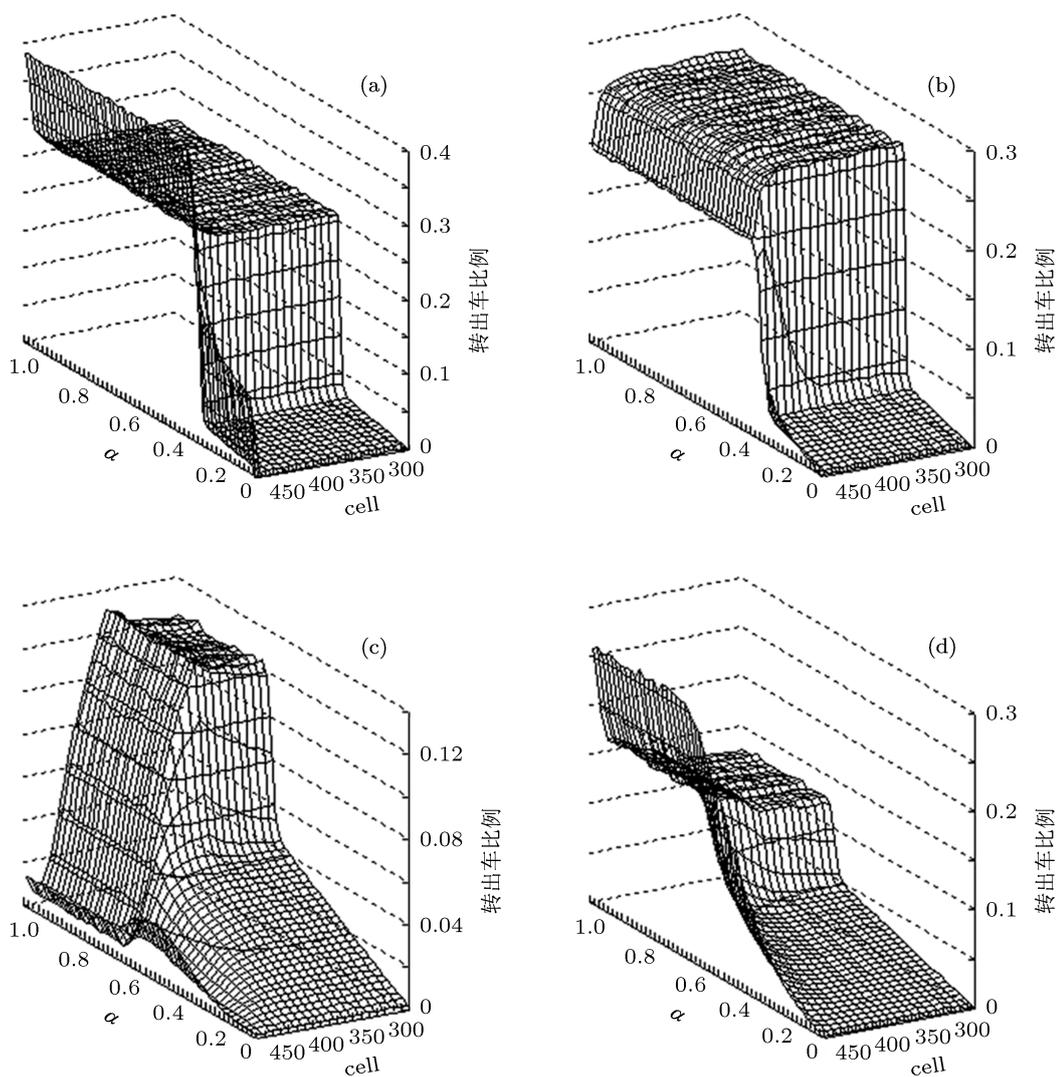


图4 $P_{\text{turn}}^{\text{sum}} = 0.5, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, P_{\text{out}} = 0.4, L_1 = 0, 100$ 时左右车道距匝口 200 个格点的转出车辆比例与 α 关系图 (a) $L_1 = 0$ 直行车道; (b) $L_1 = 0$ 转出车道; (c) $L_1 = 100$ 直行车道; (d) $L_1 = 100$ 转出车道

统处于畅行相, 车辆速度快, 直行车道上的转出车辆到达匝口处无法转出只能等待换道时机. 当 $\alpha > 0.3$ 两车道的转出车辆比例大幅度增加形成一个平台, 在接近匝口处出现不同变化趋势, 直行车道上的转出车辆增多, 转出车道上的转出车辆减少, 这是由于 α 增加, 车辆密度增大导致车距变小难以换道, 直行车道堆积大量无法换道等待的转出车辆. 由于临近匝口处, 直行车道上的车辆难以转入, 且转出车道上的转出车辆以 1.0 概率驶出匝口, 因此此处转出车道上转出车辆比例减少, 而直行车道上转出车辆比例大幅度增加. 由图 4(c), (d) 所示, 当 $L_1 = 100, \alpha < 0.6$ 时, 转出车辆比例随 α 增加而逐渐增大, 在第 400 个格点以后, 两图数据变化趋势相反, 直行车道转出车道比例减少, 曲面向下倾斜, 转出车道转出车辆比例增加, 曲面上倾斜. 当

$\alpha > 0.6$ 时, 两车道上的转出车辆比例大幅度增加后形成平台, 但和畅行相相同, 直行车道距匝口越近转出车辆比例越小, 而转出车道距离匝口越近转出车辆比例越大, 这说明在双车道下匝道交通流中, 不论畅行或阻塞, 车辆在距离匝口的一定区域内采用敏感换道方式行车, 能减少直行车道上的转出车辆比例, 将其集中在转出车道上, 大大减少车辆由于无法转出阻塞直行车道的情况. 由此可知本文提出的敏感换道规则能提前分流出、直行车辆, 使车流在达到匝口前就完成换道过程.

由图 5 可知, 当小于临界 α 时, 系统处于畅行相, 匝口上游区域系统换道率很小, 当 $L_1 = 0$ 时, 在接近匝口处系统换道率突然增大, 而当 $L_1 = 40, 100$ 时, 在距匝口 40、100 个格点处, 系统换道率逐渐增大, 形成倾斜的曲面. 当大于临界 α 时, 系统产生

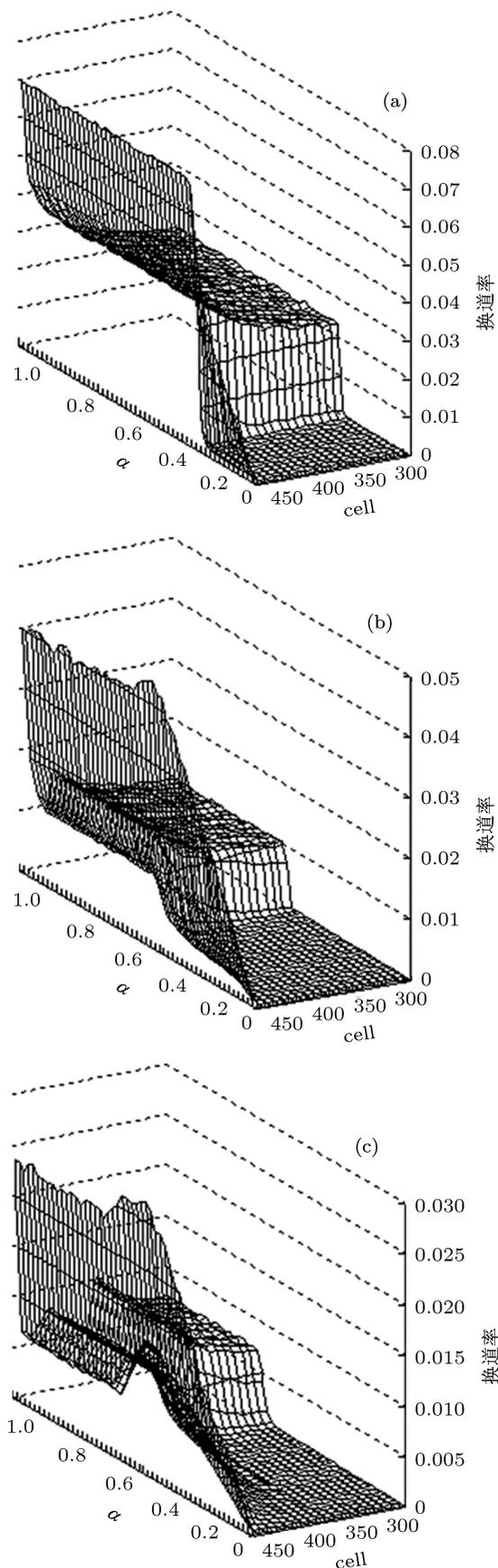


图5 $P_{\text{turn}} = 0.5, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, P_{\text{out}} = 0.4, L_1 = 0, 40, 100$ 距匝口 200 个格点的系统换道率与 α 关系图 (a) $L_1 = 0$; (b) $L_1 = 40$ (c) $L_1 = 100$

阻塞, 换道率均有显著增长形成一个平台区, 但当 $L_1 = 40, 100$ 时, 平台范围较窄, 在距匝口 40、100 个格点处先缓慢上升后下降, 曲面向下凹. 这是由于在车辆在敏感换道区不再以增加速度作为换道目的, 在直行车道上行驶的直行车辆、转出车道上行驶的转出车辆, 越接近匝口越不愿意换道, 因此换道率有明显下降趋势. 其中 L_1 越大, 平台面积越小, 曲面向下凹越明显, 说明本文构造的敏感换道规则对非必要的换道行为有明显的抑制作用, 且随 L_1 增加, 该作用越明显. 当距离匝口很近时, 三图均表现出换道率的大幅度增加, 说明不论是否存在敏感换道区, 匝口附近仍会出现换道频繁的现象. 但三图中的换道率峰值分别为 0.070643, 0.044017, 0.027094, 说明当车辆采用敏感换道原则行驶能提前分流车辆, 有效减少匝口处的换道频率, 减少车辆相互作用.

图 6 给出 $P_{\text{turn}} = 0.5, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, \alpha = 1.0, 0.5$ 时系统流量峰值随 L_1, P_{out} 变化的三维图. 由图 6(a) 可知, 当 $\alpha = 1.0$ 时, P_{out} 增加导致系统中转出车辆比例增加, 系统车辆密度减小, 流量峰值减少, P_{out} 较小时, 流量峰值随 L_1 增加而增加, 在图 6(a) 中形成一个上凸的曲面, 说明系统中转出车辆比例小时, 较长的敏感换道区能增加系统流量. P_{out} 在 $[0.76, 0.92]$ 范围内, 此时系统被分为两部分, 匝口前阻塞严重, 车辆平均速度很小, 密度很大. 匝口后为畅行相, 车辆密度很小. 当 $P_{\text{out}} \geq 0.92$, 处于匝口前区域的车辆越来越多, 匝口后区域的车辆越来越少, 系统平均速度的减少程度小于系统密度的增加程度, 因此 $P_{\text{out}} \geq 0.92$ 后, 系统流量增加, 图形曲面末尾上扬. 对比图 5(b) 可知, 当 $\alpha=0.5$ 时, P_{out} 增加导致流量峰值减小, P_{out} 较小时 $L_1 > 40$ 后流量峰值随 L_1 变化不明显, 在图 5(b) 中形成一个倾斜平面, 当 P_{out} 大于 0.8, 两图形基本一致. 由此说明 P_{out} 较大时, 系统流量峰值与 α, L_1 大小无关, 这是由于当过多车辆在匝口转出, 不论 L_1 大小同样会造成车辆拥堵, 导致匝口上游通行能力下降, 此时车辆不能按照 1.0 的进入率加入系统, 因此当 P_{out} 大于 0.8 时, 两图流量峰值变化趋势一致.

图 7 给出系统相图, 图 7(a) 所示为 $P_{\text{out}} = 0.4, \gamma = 1.0, P_{\text{turn}} = 0.5$ 时系统流量与 α, β 的关系, 将系统为三个不同的相: I 流量随 β 变化的相, II 流量随 α 变化的相, III 流量达到饱和, 与 α, β 变化无关的相. 当 L_1 增大时, 相图 I 区、II 区面积扩大, III 区

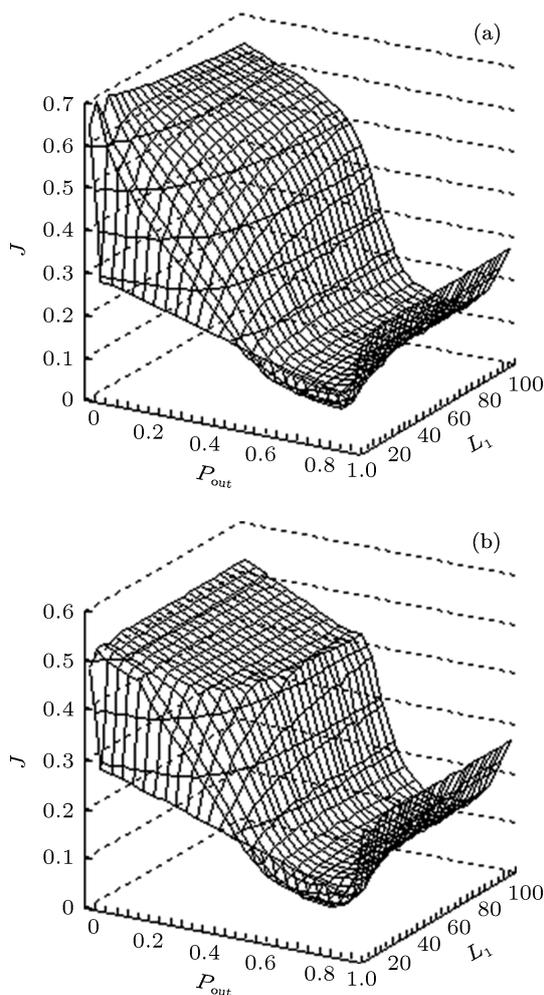


图6 $P^{\text{sum}} = 0.5, \beta = 1.0, \gamma = 1.0, \alpha = 1.0, 0.5$ 时系统流量峰值与 L_1, P_{out} 关系图 (a) $\alpha = 1.0$; (b) $\alpha = 0.5$

面积减小. 说明随着 L_1 增大, 系统流量将更多受到 α 和 β 的影响, 这是由于当车辆在距离匝口一定范围内敏感换道, 能提前分流下匝道车流, L_1 较大时分流作用明显, 能有效延缓系统阻塞产生, 因此 III 区面积减小. 其中当 L_1 增大时, I 区扩大面积大于 II 区, 说明随着 L_1 增大系统将更多受到 β 影响, 这是因为车辆分流作用明显, 车辆产生概率, 转出匝口概率及在上游换道过程已不再是系统产生拥挤的主要原因, 而直行车道是否畅通对系统是否产生拥挤影响很大, 因此增加 L_1 会使 β 对系统影响更为显著. 图 7(b) 给出 $\beta = 1.0, \gamma = 1.0, P^{\text{sum}} = 0.5$ 时, 以 α 和 P_{out} 为变量的相空间图, 分为两个不同的相: I 车辆畅行相, II 车辆阻塞相. 当 $P_{\text{out}} < 0.5$, 随着 L_1 增大系统 I 区域面积变大, II 面积变小, 说明当系统中转出车辆比例较小时, 敏感换道能将转出车辆换至转出车道, 该过程能有效减少系统阻塞. $P_{\text{out}} > 0.5$, 随着 L_1 增大系统 I 区域面积变小, II 面积变大, 说明当系统中转出车辆较多时, 过多车辆

采用敏感换道方式驾驶, 导致换道频率提高, 车辆之间的相互影响越大, 且过多车辆提前换至转出车道会导致转出车道阻塞, 最终漫延至直行车道, 在 α 较小时就达到流量饱和, 系统通行能力不高. 由此可知, 系统中转出车辆比例小于 0.5 时, 设置匝口指示牌能对车辆分流起到诱导效果, 但当转出车辆大于 0.5 时, 或车辆产生概率大, 消失概率小等原因导致系统阻塞, 匝口指示牌就无法起到分流作用.

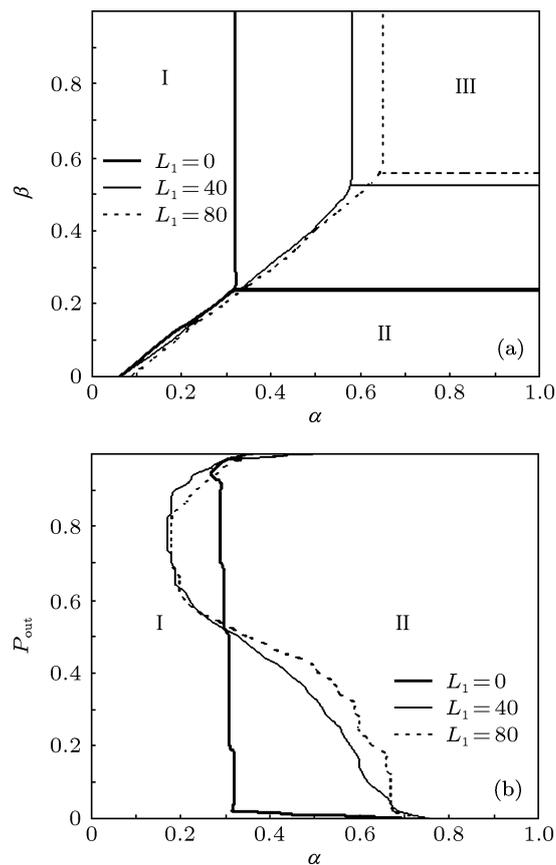


图7 以产生概率 α 和主干道消失概率 β 、转出概率 P_{out} 为变量的相空间图

4 结论

本文针对高速、快速公路中的下匝道系统的车辆提前分流现象, 充分考虑驾驶员在匝口指示牌的诱导作用下驾驶方式的变化, 定义了车辆在敏感换道区内的换道、直行驾驶规则, 提出了敏感换道的元胞自动机下匝道交通流模型.

采用开放边界条件进行数值模拟, 得到了以下结论: 不论畅行或阻塞, 车辆采用敏感换道方式行车, 能减少直行车道上的转出车辆比例; 敏感换道规则对非必要的换道行为有明显的抑制作用, 且随敏感换道区长度增加, 该作用越明显; 当系统中转

出车辆比例小于 0.5 时, 系统流量峰值和 α 临界值均随敏感换道区长度增加而增加, 系统密度峰值随敏感换道区长度增大而减小, 设置匝口指示牌能对车辆分流起到诱导效果. 因此, 在进行高速公路交

通控制和管理时, 应根据道路的车流和转出概率情况, 在合适的位置设置匝口指示牌, 以增强道路交通系统的运行能力.

- [1] Wolfram S 1986 *Theory and Application of Cellular Automata* (Singapore: World Scientific)
- [2] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* (France) **2** 2221
- [3] Fukui M, Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 2345
- [4] Wang B H, Wang L, Xu B M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1926 (in Chinese) [汪秉宏, 王雷, 许伯铭 2000 物理学报 **49** 1926]
- [5] Chowdhury D, Wolf D E, Schreckenberg M 1997 *Physica A* **235** 417
- [6] Song Y K, Zhao X M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5242
- [7] Li K P, Gao Z Y, Mao B H 2007 *Chin. Phys.* **16** 359
- [8] Chen R X, Bai K Z, Liu M R 2006 *Chin. Phys.* **15** 1471
- [9] Sheng P, Zhao S L, Wang J F, Zuo H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3831 (in Chinese) [盛鹏, 赵树龙, 王俊峰, 左航 2010 物理学报 **59** 3831]
- [10] 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]
- [11] Kang R, Peng L J, Yang K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4515 (in Chinese) [康瑞, 彭莉娟, 杨凯 2009 物理学报 **58** 4514]
- [12] Wang W, Guo X C 2000 *Traffic Engineering* (Nanjing: Southeast University Press) p156 (in Chinese) [王炜, 过秀成 2000 交通工程学 (南京: 东南大学出版社) 第 156 页]
- [13] Nagel K, Wolf D, Wagner P 1996 *Phys. Rev. E* **58** 1425
- [14] Huang D W 2002 *Phys. Rev. E* **66** 026124

Effects of sensitive changing-lane rule on the off-ramp traffic system*

Kang Rui¹⁾ Yang Kai^{2)†}

1) (Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

2) (College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610054, China)

(Received 13 June 2013; revised manuscript received 23 August 2013)

Abstract

Based on the NaSh model, the rules of straight movement and lane change are defined while considering the change of driving behavior under the guidance of traffic signs at ramp; besides, a traffic model with sensitive lane change under the cellular automation is proposed. Furthermore, computer numerical simulation result indicates that the procedure of sensitive lane change can effectively reduce the lane change ratio of the straight moving vehicles, thus obviously it has an inhibitory effect on unnecessary lane change; what is more, the longer the sensitive lane change zone, the more effective the inhibitory function is. However, the traffic signs at ramp cannot be set as far as possible. Lower the lane change ratio is, shorter the sensitive lane change zone needed is. The traffic signs at ramp are set with proper distance according to the lane change ratio can effectively increase systematic traffic flow as well as the critical entrance probability.

Keywords: traffic flow, cellular automata, driving rule, computer numerical simulation

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 50.70.Fh

DOI: 10.7498/aps.62.238901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31070915), and the Science Foundation of Civil Aviation Flight University of China (Grand No. J2012-50).

† Corresponding author. E-mail: kimura521@sohu.com