

交叉口进口道换道行为研究及建模*

魏丽英 王志龙† 吴荣华

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

(2013年9月9日收到; 2013年10月10日收到修改稿)

为了对信号交叉口上游车辆换道行为进行分析, 以元胞自动机交通流理论为基础, 结合自由换道模型及强制换道模型提出了进口道附近路段的综合换道模型, 并对原有强制换道模型进行改进. 通过对综合换道模型进行模拟, 得出进口道附近交通流的时空关系及密度关系图. 模拟结果表明, 车流密度在 $[0, 0.2]$ 及 $[0.4, 0.6]$ 范围时, 进口道换道率变化率较高; 同时在中低密度下, 随着换道率的增加, 平均车速逐渐降低, 但在高密度下, 车速随换道率变化并不显著.

关键词: 进口道, 强制换道, 自由换道, 综合换道

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.63.044501

1 引言

交通流理论作为一门复杂的交叉性学科, 一直以来受到了学者的广泛关注. 研究交通流理论的方法有概率论法、流体力学法、系统动力学法等. 元胞自动机是一种能在时间、空间、状态等实现多维离散的动力系统^[1]. 由于这些特点有利于通过简单的编程实现研究复杂系统的目的, 因此, 元胞自动机理论近年来被引入至交通流领域的研究中, 并得到快速发展和广泛应用. 1992年, Nagel和Schreckenberg^[2]提出了经典的NaSch模型, 描述了车辆运行过程中最基本的加减速行为及位置更新过程. 在此基础上, 诸多学者提出了Fukui-Ishibashi模型、Takaysu-Takaysu模型、Benjamin-Johnson-Hui模型、VDR模型等多个改进的元胞自动机模型^[2-12]. 在道路交通系统中, 换道行为是最基本的车辆运行行为之一. 换道行为的产生使车辆的跟驰行为变得复杂化, 即车辆在运行过程中不仅受到前车的影响, 还受到了相邻车道车辆行为的影响. 由于换道行为对交通流的影响显著, 因此国内外诸多学者对该行为进行了研

究^[13-19]. 研究中考虑了快慢车等诸多因素的影响. 当交通流密度较高时, 过多的换道无益于系统整体的运行效率. 然而, 当车辆有特殊换道需求时, 即使高密度条件下, 机动车驾驶员仍然会选择强制换道. 这种强制换道行为主要表现为进口道附近车辆为驶入目标车道而进行的非自由换道^[16]. 本文通过对强制换道行为的研究, 基于车辆转向需求的因素对已有强制换道模型进行了改进, 并结合自由换道模型提出了综合换道模型. 该模型较为真实地描述交叉口上游的车辆换道行为, 对深入研究进口道交通流行为及优化进口道交通资源配置有积极意义.

2 进口道换道模型

2.1 车辆跟驰模型

无论车辆在行驶过程中是否换道, 都需满足跟驰规则, 因此, 跟驰模型是换道模型的基础. 为将车辆跟驰行为描述得更细致, 本研究的跟驰模型在NaSch模型的基础上增加了慢启动规则, 并对速度更新中的加减速规则进行了如下改进:

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB725403)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 71101008)、中央高校基本科研业务费 (批准号: 2012JBM057) 和国家留学基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 11120900@bjtu.edu.cn

加速 $v(t+1) \rightarrow \min(v(t)+1, v_{\max}, v'(t+1))$;
 慢启动 $\text{flag} = 1, v(p_s) \rightarrow 0$;
 减速 $v(t+1) \rightarrow \min(v(t)-1, v'(t+1))$;
 随机慢化 $\text{if}(\text{rand} < p)\text{then} : v(t+1) = \max(v(t+1)-1, 0)$;
 位置更新 $x(t+1) = x(t) + v(t+1)$;

式中, $v(t)$ 表示 t 时刻小汽车的速度, v_{\max} 为车辆的最大速度, $v'(t+1)$ 为车辆在 $t+1$ 时刻能够达到的车速, 由 t 时刻与前导车的距离及前导车速度计算得出; flag 表示本车当前加、减速状态 (0 或 1), 当车辆由于前导车的行为而减速时, $\text{flag} = 1$, 则下一时刻该车将以 $1 - p_s$ 的概率向前行驶; rand 是产生的随机数; p 为随机慢化概率; $x(t)$ 为车辆 t 时刻所在道路位置的坐标值. 其中:

$$v'_{(t+1)} \rightarrow \sqrt{2(d_n(t) + (v_{n+1}(t))^2/2)},$$

$$d_n(t) = S - l,$$

$d_n(t)$ 为车辆与前导车间的距离, $v_{n+1}(t)$ 为前导车 t 时刻的速度, S 为车头间距, l 为车身长度.

2.2 自由换道模型

车辆换道行为产生的基础是存在换道动机, 换道动机具体表现为获得更大的速度、驶离拥堵车队、驶入目标车道等. 换道行为根据换道动机的不同可分为自由换道和强制换道^[16]. 自由换道是指车辆为达到更大的活动空间和运行速度等原因引起的换道行为; 强制换道则相反, 其换道行为的产生往往是由于其他因素, 且换道后车辆速度并不一定会提高. 引起强制换道的因素有路口转弯、路面出现突发状况等.

在自由换道过程中, 判断是否换道的条件包括安全条件及能否获得更大的速度, 因此, 自由换道的规则如下:

安全条件 $v_{\text{targ}}(t+1) > v_{\text{targb}}(t) + 1$;
 速度条件 $v_{\text{targ}}(t+1) > v_{\text{other}}(t+1)$;
 速度更新

$$\left\{ \begin{array}{l} v(t+1) = v_{\text{targ}}(t+1), \\ \quad \text{需同时满足以下3个条件:} \\ 1) v_{\text{targ}}(t+1) > v_{\text{targb}}(t) + 1, \\ 2) v_{\text{targ}}(t+1) > v_{\text{other}}(t+1), \\ 3) p > p_c; \\ v(t+1) = v_s(t+1), \text{其他情况;} \end{array} \right.$$

位置更新

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1);$$

$$y(t+1) = y(t) + \text{turn};$$

规则中, t 指当前时刻, $t+1$ 指下一时刻, v_{targ} 指如果换道至目标车道能达到的预测速度, v_{targb} 指目标车道后方车辆的速度, v_{other} 指如果车辆行驶在目标车道以外的车道上能达到的预测速度, v 是指车辆在某时刻的实际速度, p 指系统产生的随机数, p_c 为换道概率, v_s 是指车辆不换道而直行的速度, x 指车辆在道路上的纵向位置, y 指车辆在道路上的横向位置, turn 指车辆换道参数 (向左换道时 turn 为 -1 , 向右换道时 turn 为 1 , 直行时 turn 为 0).

2.3 强制换道模型

在进口道^[20]换道行为方面, 由于不同转向车辆必须在进入进口道行驶前运行至目标转向车道, 图 1 为进口道示意图. 这种换道行为的动机并非为获取更大的运行空间或速度, 而是为了运行至目标车道. 因此判断该换道行为为强制换道行为.

强制换道与自由换道的区别通过换道概率表现出来. 在对强制换道模型的研究中, 有学者在自由换道模型的基础上研究了换道概率与离进口道距离之间的关系, 并建立了强制换道模型^[16], 其换道概率的确定如下:

$$p_d = 0.55/\varphi, \tag{1}$$

$$\varphi = l/50 \quad (0 \leq l \leq 50); \tag{2}$$

p_d 为强制换道概率, φ 为换道压力, l 为离路口导行线的距离.

上述模型中强制换道概率 p_d 与 l 成反比例关系, 描述出强制换道概率随与进口道距离减小而增大的趋势. 然而, 在实际进口道中, 当 l 小于某个数值时, 只要满足安全条件, 车辆都会选择换道, 因此, 强制换道概率 p_d 与 l 的关系不应该是反比例曲线, 而是符合 S 形曲线 (如图 2 所示). 因此, 本研究建立强制换道概率模型:

$$p_d = m_1 / (1 + e^{((L-m_2 \cdot x)/m_3)}), \tag{3}$$

式中, m_1, m_2, m_3 分别为调节参数, 其中 $m_1 = 1 + e^{(1-m_2) \cdot L/m_3}$, 以确保当 $x = L$ 时, p_d 的值为 1 . x 与 L 表示车辆纵向位置以及车道长度, $x = L - l$.

由该模型得出的 p_d 与 x 的关系如图 2 所示 (未标定前的走势图).

图 2 中把路段划分成 l_1, l_2, l_3 三部分, 其中 l_1 路段离交叉口进口道较近, 在该路段, 强制换道概率接近 1, l_2 路段中强制换道概率呈 S 形曲线急剧上升, l_3 路段离交叉口进口道较远, 强制换道概率很小.

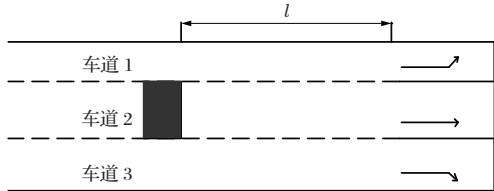


图 1 进口道示意图

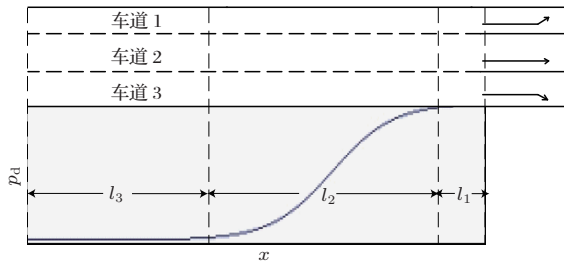


图 2 p_d 与 x 的关系走势图

2.4 综合换道模型

在实际中, 换道行为往往是一个综合的过程, 换道动机错综复杂, 强制换道只是其中一部分. 为较好描述进口道换道行为, 将强制换道概率和自由换道概率综合, 建立进口道综合换道概率模型

$$p_c = p_f + (1 - p_f)p_d, \quad (4)$$

式中, p_c 为综合换道概率, p_f 为自由换道概率, 取 0.55^[16]. 模型中 p_c 与 x 的关系如图 3 所示.

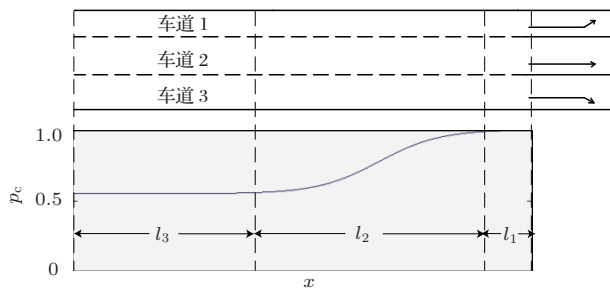


图 3 p_c 与 x 的关系走势图

3 仿真过程与结果分析

参数设置: 元胞长度 5 m, 小汽车占 1 个元胞, 公交车等大型机动车占 2 个元胞; 小汽车最大速度为 3, 大车最大速度为 2; 大车比例为 0.2; 车辆随机慢化概率为 0.01, 慢启动概率为 0.25. 进口道有 4 条车道, 其中左转车比例 0.2, 直行车比例 0.6 (两条车道), 右转车比例 0.2, 交叉口信号周期为 100 s, 绿灯时长为 50 s, $m_2 = 1.3, m_3 = 100$, 道路长度为 1000 个元胞, 共模拟 1000 s. 得到 4 条车道的时空图如图 4 所示.

时空图表示车辆位置与时间的关系. 图中连续黑线表示车辆一直在该车道上行驶, 间断线表示车辆驶离或进入该车道. 图 4 (a), (b), (c) 三张小图由于受信号灯控制 (右侧为停车线), 因此右侧有间断的锥形条纹出现, 图 4 (d) 没有这一现象是由于设置中右转车道上的车辆不受信号灯控制.

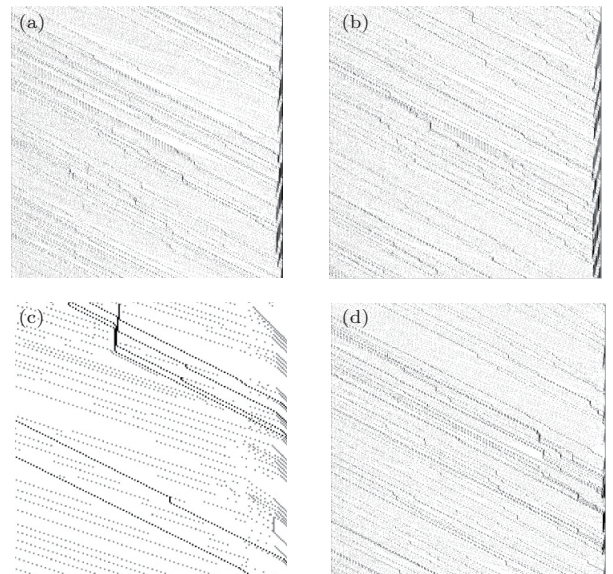


图 4 进口道模拟时空图, 密度 $\rho = 0.15$ (a) 左转车道时空图; (b) 左侧直行车道时空图; (c) 右侧直行车道时空图; (d) 右转车道时空图

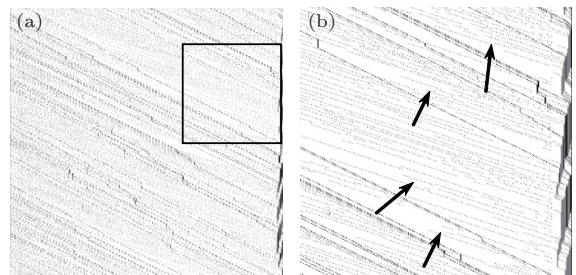


图 5 直行车道模拟时空图 (a) 进口道附近时空图; (b) 图 (a) 局部放大

图5(b)为图5(a)的方框内的放大图,从图5(b)中可以明显看到箭头所指区域有大量的间断线,由此判断在进口道附近有大量的车辆换道行为.

通过对模型换道率的模拟,得到换道率与密度的关系如图6所示.

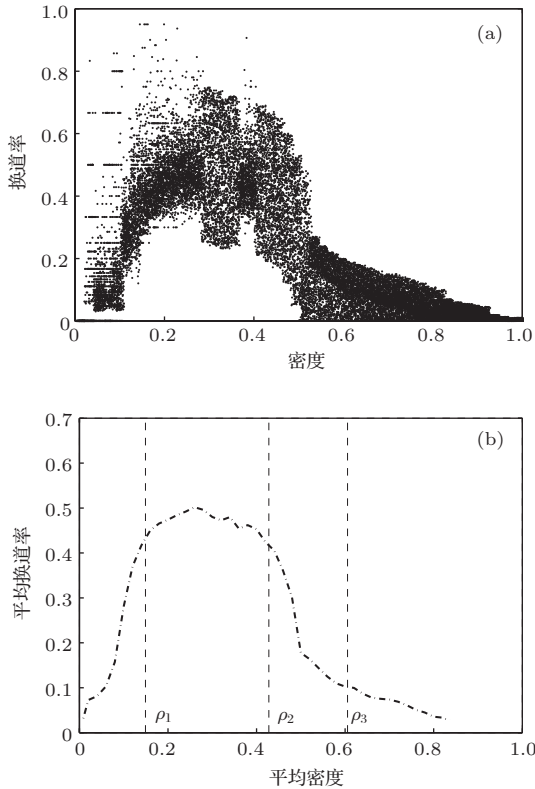


图6 换道率随密度的变化

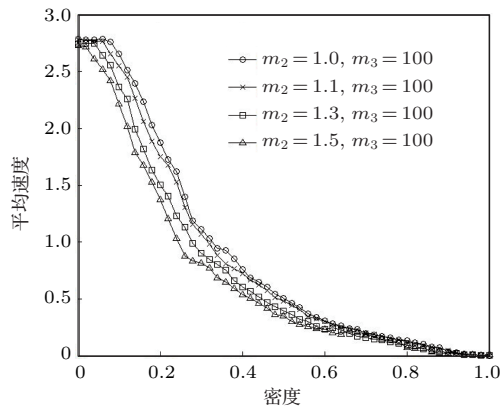


图7 不同换道率下的速度-密度关系

图6(a)为换道率与密度关系的散点,图6(b)为以密度间隔0.02统计平均换道率的曲线.模拟结果显示,车辆换道率随道路密度的变化大致分为4个区间.在 $0 < \rho < \rho_1$ 区间,随着路网密度的上升,换道率快速上升;在 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 区间,换道率的变

化较为平缓,集中在0.4—0.5之间,前半段处于缓慢上升趋势,后半段处于缓慢下降趋势;当 $\rho > \rho_2$ 时,在 $\rho_2 < \rho < \rho_3$ 区间内,换道率急速下降;而当 $\rho > \rho_3$ 后,由于密度较大,换道空间剩余不多,换道率较低,且呈现缓慢降低趋势.

从(3)式可以推出, m_2 越大换道概率越大.从图7可以看出,随着换道概率的不断增大,道路上车辆的平均速度逐渐减小,但这种减小在中低密度下表现较为显著.

4 结 论

本文通过对进口道附近车辆的换道行为进行分析,对原有强制换道模型进行改进,建立了结合自由换道和强制换道的综合换道模型.通过模拟可得出以下结论:

- 1) 随着交通流密度的不断增加,在 $[0, 0.2]$ 范围内换道率快速上升;在 $[0.2, 0.4]$ 范围内换道率先升后降,但变化率较低;在 $[0.4, 0.6]$ 范围内换道率急剧下降;当 $[0.6, 1]$ 范围内换道率缓慢下降,直至0为止;
- 2) 随着换道率的增加,平均车速逐渐降低,这种趋势在中低密度下较为明显,在高密度下并不显著.

参考文献

- [1] Wolfram S 1983 *Rev. Mod. Phys.* **55** 601
- [2] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221
- [3] Schreckenberg M, Schadschneider A, Nagel K, Ito N 1995 *Phys. Rev. E* **51** 2939
- [4] Wagner P, Nagel K, Wolf D E 1997 *Physica A* **234** 687
- [5] Chowdhury D E 1997 *Physica A* **235** 417
- [6] Helbing D, Tilch B 1998 *Phys. Rev. E* **58** 133
- [7] 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]
- [8] Kuang H, Kong L J, Liu M R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894 (in Chinese)[邴华,孔令江,刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
- [9] Jia B, Jiang R, Wu Q S 2004 *Phys. Rev. E* **69** 1539
- [10] Jia B, Jiang R, Wu Q S 2005 *Physica A* **345** 218
- [11] Peng G H, Sun D H, He H P 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 7541 (in Chinese)[彭光含,孙棣华,何恒攀 2007 物理学报 **57** 7541]
- [12] Li X G, Gao Z Y, Jia B, Jiang R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060501
- [13] Li X G, Jia B, Gao Z Y, Jiang R 2006 *Physica A* **367** 479

- [14] Zheng R S, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3516 (in Chinese)[郑容森, 谭惠丽, 孔令江, 刘慕仁 2005 物理学报 **54** 3516]
- [15] 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]
- [16] Liu Y J, Cao S 2009 *J. Trans. Informat. Secur.* **27** 78 (in Chinese)[刘有军, 曹珊 2009 交通信息与安全 **27** 78]
- [17] Qian Y S, Shi P J, Zeng Q, Ma C X, Lin F, Sun P, Yin X T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4037
- [18] He H D, Lu W Z, Dong L Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 040514
- [19] Fang Y, Chen J Z, Peng Z Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 108902
- [20] Wu J 2009 *J. Trans. Informat. Secur.* **27** 81 (in Chinese)[吴建 2009 交通信息与安全 **27** 81]

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

Wei Li-Ying Wang Zhi-Long[†] Wu Rong-Hua

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 9 September 2013; revised manuscript received 10 October 2013)

Abstract

In order to analyze the lane-changing behavior on the upstream of the intersections, based on the cellular automata traffic theory, a comprehensive lane-changing model for the traffic flow near the approach is proposed by combining the improved mandatory lane-changing model and discretionary lane-changing model. And the charts describing the scenarios of the space-time and traffic density for the traffic flow near the approach are obtained through simulation based on the comprehensive lane-changing model. Results show that the lane-changing rate at the approach is higher when the traffic density is in the ranges of $[0, 0.2]$ and $[0.4, 0.6]$. The average vehicle speed is gradually reduced as lane-changing rate increases under median low vehicle stream density, but the variation of vehicle speed with lane-changing rate is not significant under high vehicle stream density.

Keywords: approach, mandatory lane-changing, discretionary lane-changing, comprehensive lane-changing

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.63.044501

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725403), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 71101008), the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China (Grant No. 2012JBM057), and the China Scholarship Fund.

[†] Corresponding author. E-mail: 11120900@bjtu.edu.cn