

匝道系统减速车道对高速公路交通流的影响^{*}

李盛春^{1)†} 孔令江¹⁾ 刘慕仁¹⁾ 郑容森²⁾

1) 广西师范大学物理与电子工程学院, 桂林 541004)

2) 玉林师范学院物理与信息科学系, 玉林 537000)

(2008 年 6 月 21 日收到, 2008 年 10 月 20 日收到修改稿)

主要研究匝道系统减速车道对高速公路交通流的影响. 在开放边界条件下, 以 NaSch 模型为基础, 建立了含减速车道的出口匝道系统双车道元胞自动机交通流模型. 通过计算机数值模拟, 得出不同参数控制下的密度、速度、流量和车辆产生概率关系图像, 并与不设减速车道的匝道系统进行比较.

关键词: 元胞自动机, 匝道, 减速车道, NaSch 模型

PACC: 0550

1. 引 言

随着道路交通问题的日趋严峻, 交通问题已成为近年来研究的热点课题, 各种描述交通流的理论相继被提出. 其中元胞自动机模型由于其自身的优越性, 如算法简单、灵活可调、可有效地在计算机上进行模拟等, 被广泛地应用于交通流的研究.

最初的元胞自动机模型是描述单车道的 184 号规则模型, 在此基础上发展起来了考虑车辆随机加减速的 NaSch 模型^[1]、含高速车并可随机减速的 FI 模型^[2]、模拟城市交通的二维 BML 模型^[3]等. 这些模型的提出, 使我们对道路交通问题的认识更加深刻.

瓶颈效应对交通流有重大的影响, 瓶颈问题包括进出口匝道、交叉路口、收费站路口、狭窄路段等, 瓶颈问题的解决, 有利于提高道路交通速度和流量. 对于进口匝道对交通流的影响, 人们已经进行了广泛而深入的研究^[4-18], 而出口匝道对交通流的影响并未引起足够的重视. 本文主要采用开放边界条件下的元胞自动机 NaSch 模型, 对高速公路出口匝道含减速车道的交通流进行研究, 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.

2. 模 型

减速车道可分为外置和内置两种. 文献 [19] 分别对不设减速车道和设置外置减速车道的情况进行了详细研究. 不设置减速车道时, 转出车辆与正常行驶车辆没有严格分流, 对平均速度有较大影响. 设置外置减速车道后, 如文献 [19] 图 7 所示, 在车辆产生概率和转出概率不是很大的情况下有很大的自由相空间, 说明转出车辆不是太多时可能不必专门设置外置减速车道, 而用内置的减速车道就可以.

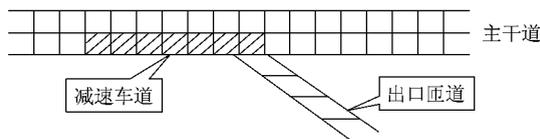


图 1 含减速车道的出口匝道示意图

本文研究含有内置减速车道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. 把每条车道视为长度为 L 的一维离散格点链, 某时刻格点为空或被一辆车占据, 车辆最大速度为 $V_{\max} = 5$. 右车道距出口匝道长为 L_1 的地方开始设置减速车道. 车辆以一定概率 P_{out} 转出车道, 如果转出的车辆原先在左车道则条件允

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10362001, 10562001, 10762005), 广西壮族自治区自然科学基金 (批准号: D007017) 和广西壮族自治区研究生教育创新计划 (批准号: 2007106020711M68) 资助的课题.

[†] E-mail: lishengchun2008@163.com

许必须转到减速车道并以 $V_{\max} = 2$ 减速行驶;原先在右车道则进入减速车道后以 $V_{\max} = 2$ 减速行驶.右车道上不转出的车辆转到左车道行驶.

车辆在开放边界条件下自左往右运动,每一时步由车道上 NaSch 演化和转道演化两个子步骤完成.

(1)NaSch 模型演化规则为:

①加速:

$$V_i^j\left(t + \frac{1}{3}\right) \rightarrow \min(V_{\max}^j, V_i^j(t) + 1);$$

②确定性减速:

$$V_i^j\left(t + \frac{2}{3}\right) \rightarrow \min\left(V_{\max}^j\left(t + \frac{1}{3}\right), \text{gap}_i^j(t)\right);$$

③以概率 P 随机慢化:

$$V_i^j(t + 1) \rightarrow \max\left(V_i^j\left(t + \frac{2}{3}\right) - 1, 0\right);$$

④位置更新:

$$X_i(t + 1) \rightarrow X_i(t) + V_i^j(t + 1).$$

(2)转道规则为:

①超车规则:

$$\text{gap}_i^j(t) < \min(V_i^j(t) + 1, V_{\max}^j);$$

②安全性原则:

$\text{gap}_i^{\text{other}}(t) > \text{gap}_i^j(t)$ 在减速区域不需要此条件);

$\text{gap}_i^{\text{back}} > \text{gap}_{\text{safety}}, \text{Rand}(\) < P_i$ (在减速区域概率为 1).

其中 $x_i(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻在某车道上的位置, V_i^j 表示第 j 车道第 i 辆车的速度, V_{\max}^j 对应车辆的最大速度, P_d 为随机慢化概率, P_l 为转道概率, $\text{gap}_i^j(t)$ 为 j 车道两相邻车辆的间距. t 时刻与前方紧邻车辆 ($i + 1$) 的间距为 $\text{gap}_i^{\text{back}}(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$. $\text{gap}_i^{\text{other}}(t)$ 为 i 车与邻道前方紧邻车辆间距, $\text{gap}_i^{\text{back}}$ 为 i 车辆与邻道后方紧邻车辆间距. 安全距离 $\text{gap}_{\text{safety}} = \max(V_{i-1}^j(t) + 1, V_{i-1\max}^j)$.

3. 计算机模拟与讨论

系统由两条 L 个离散格点的车道组成,某时步 t 两车道上总车数为 N_t ,则此时步车道平均密度为

$$\rho_t = \frac{N_t}{2L}, \text{平均速度为 } \bar{V}_t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} V_i(t).$$

车辆以一定概率 α 在车道初始处产生,以概率 β 在主干道最右驶出车道,以概率 P_{out} 转出出口匝道.取车道长为 L

$= 1000$,匝道在 500 处,右车道距匝道 L_1 的地方开始设置减速车道.演化时步为 100000,取后 80000 时步

作时间平均,则密度为 $\rho = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \rho_t$,平均速度为

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \bar{V}_t, \text{平均流量 } J = \rho \bar{V}.$$

为消除随机性对结果的影响,再对 20 个样本作系综平均.

3.1. 减速车道长度对交通流的影响

图 2(a)(b)和(c)分别为不同减速车道长度下的密度-车辆产生概率、平均速度-车辆产生概率和

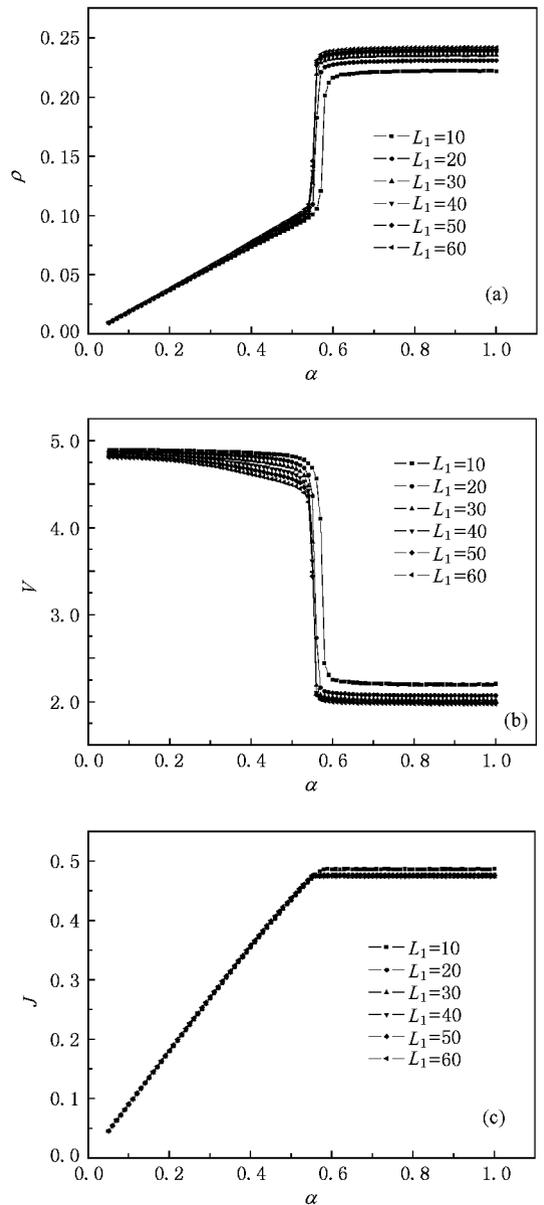


图 2 (a)(b)与(c)分别为不同减速车道长度下密度、速度和流量随产生概率变化关系图

流量-车辆产生概率图像. 其中的参数为: 随机慢化概率 $P = 0.1$, 转道概率 $P_1 = 0.5$, 转出概率 $P_{out} = 0.2$, 主干道消失概率 $\beta = 1.0$, 减速车道 $L_1 = 10, 20, \dots, 60$.

从图 3(a)和(b)中可以看出, 不同减速车道长度下的临界产生概率大致是相同的. 在产生概率 α 很小的时候, 转出的车辆不多, 在减速车道上减速行驶的车辆也不多, 所以对交通流的影响不大. 随着 α 的增大, 转出的车辆增多, 在减速车道上减速行驶的车辆也相应地增多, 导致主干道上(包括减速车道)的车辆密度增大, 平均速度减小. 原因是转出的车辆减速行使, 而且影响正常行驶车辆的速度. 达到相变点后, 车辆密度急剧增加, 平均速度急剧减小, 接着形成一个平稳的平台. 因为此时系统处于高密度状态, 很难发生超车的情况, 正常行驶的车辆受到转出车辆的抑制.

从整体来看, 当 α 较大时, 减速车道设置越长车辆平均速度就越小. 主要原因是转出的车辆较早进入减速状态, 造成车辆间的相互影响. 但是在实际中, 减速车道设置过小, 容易造成转出的车辆为避免错过出口匝道而强行进入减速车道的情况, 从而引发交通事故.

从图 3(c)中可看出, 减速车道的长度对主干道上的车流量并没有影响, 不同减速车道长度下的车流量都是相同的. 因为转出概率都是 $P_{out} = 0.2$, 留在主干道上的车辆个数都是相同的. α 较小时, 在减速车道处的车辆可以转到左道, 不受慢车的影响, 所以对主干道来说流量并没有受到影响. α 较大时, 减速车道长度不同, 密度和速度也不同, 但它们的乘积 $J = \rho \bar{v}$ 是个定值, 所以流量还是相同的.

从以上分析中可知, 为了保证主干道的平均速度, 应当适当减小减速车道的长度; 而为了增加车辆行驶的安全性, 应适当增加减速车道的长度. 减速车道长度对流量没有影响. 因此, 在实际中应根据车流情况设置适合的减速车道长度.

3.2. 转出概率对交通流的影响

为了研究转出概率对交通流的影响, 我们先考虑以车辆产生概率 α 和转出概率 P_{out} 为变量的相空间图. 图 3 为相空间图像, 其中的参数为: 随机慢化概率 $P = 0.1$, 转道概率 $P_1 = 0.5$, 主干道消失概率 $\beta = 1.0$, 减速车道长度 $L_1 = 30$.

相空间可分为两个区域 I, II. 在区域 I, 主车

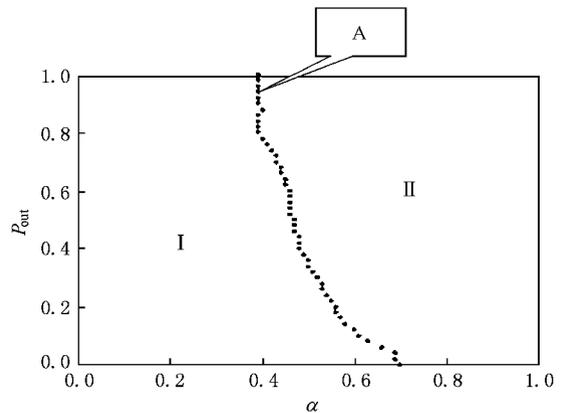


图 3 以产生概率 α 和转出概率 P_{out} 为变量的相空间图

道上的车辆是自由畅通的; 在区域 II, 主车道上的车辆呈堵塞状态. 从图中可以看出, 产生概率 α 较小时, 主车道是畅通的. 当 α 增大到 0.4 左右, P_{out} 较小时还是畅通的, 但 P_{out} 较大(如图 A 处)就开始出现堵塞. 虽然此时产生概率不是很大, 但转出的车辆多, 在减速车道上减速行驶的车辆多, 容易造成堵塞. 当 α 继续增大, P_{out} 较小甚至没有转出也会发生堵塞, 因为车辆增多, 车辆之间的相互影响就大, 容易发生堵塞.

接下来考虑不同转出概率 P_{out} 下的交通流基本图.

图 4(a)(b)和(c)分别为不同转出概率下的密度-车辆产生概率、平均速度-车辆产生概率和流量-车辆产生概率图像. 其中的参数为: 随机慢化概率 $P = 0.1$, 转道概率 $P_1 = 0.5$, 主道消失概率 $\beta = 1.0$, 减速车道长度 $L_1 = 30$, 转出概率 $P_{out} = 0.00, 0.25, \dots, 1.00$.

从图 4(a)中可以看出, 不同转出概率下临界产生概率是不同的. 转出概率为 0 即没有转出时, 主车道没有发生临界相变. 转出概率越大临界相变点越小. 在相变点前, 主干道密度随转出概率增大而减小, 因为转出概率大, 留在主干道上的车辆就不多. 在相变点后, 密度随转出概率增大而增大, 因为转出概率大, 转出的车辆多, 在减速车道上减速行驶的车辆就会增多, 导致密度增大.

从图 4(b)和(c)可以看出, 无论在相变点前还是相变点后, 平均速度和流量都是随转出概率的增大而减小. 转出概率大, 在减速车道上减速行驶的车辆增多, 使平均速度减小. 而转出主车道的车辆多, 留在主干道的车辆就少, 使主干道流量减小.

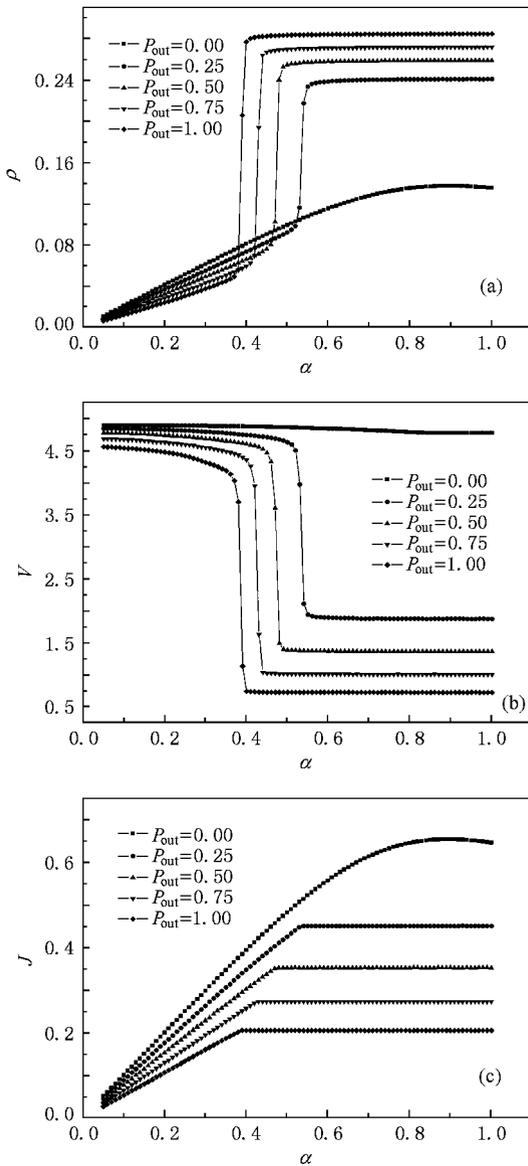


图4 (a)(b)和(c)分别为不同转出概率下密度、速度和流量随产生概率变化关系图

从以上分析中可知,在设置减速车道长度时,除了考虑车流量大小情况外,还需考虑转出主干道的车辆概率。

3.3. 减速车道设置与否对匝道附近平均速度的影响

为了具体描述设置减速车道前后由畅通相向阻塞相的演化过程,本文模拟了车辆运动过程中位置与运动时间的演化斑图。

图5(a)和(b)为左车道空间位置400—600格点处,时间为99600—100000的时空演化斑图。其中的参数为:产生概率 $\alpha = 0.5$,随机慢化概率 $P = 0.1$,转道概率 $P_1 = 0.5$,主道消失概率 $\beta = 1.0$,减速车道

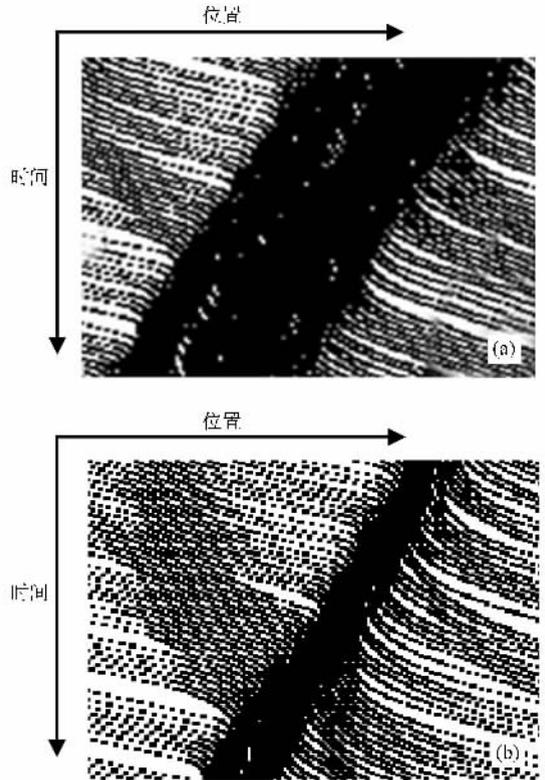


图5 产生概率为0.4时匝道附近左车道的时空演化斑图

长度 $L_1 = 30$,转出概率 $P_{out} = 0.2$ 。图5(a)不设减速车道的图像,图5(b)设置减速车道的图像。黑点表示车辆,白点表示空白区域。

从图中可以看出,不设减速车道时,匝道附近左车道比较容易堵塞。因为在匝道附近转出的车辆,为了保证安全性,需要减速行驶,而这些减速行驶的车辆影响了干道上车辆的正常通行。设置专门的减速车道后,转出的车辆在减速车道上减速行驶,其他车辆转到左车道正常行驶,因此保证了左车道的畅通。而且由于匝道附近快慢车分流,可以增加车辆驾驶的安全性。

4. 结 论

本文在NaSch模型基础上,采用开放边界条件,模拟了含减速车道的出口匝道交通流,并和没有减速车道的出口匝道交通流进行比较。结果表明,减速车道的长度和转出概率的大小对高速公路交通流有重大影响。

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,设置合适的减速车道,以增强道路交通系统的运行能力。

- [1] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys.(France)* **12** 2221
- [2] Fukui M , Shibashi Y 1994 *J. Phys. Soc. Jap.* **63** 2882
- [3] Biham O , Middleton A , Levine D 1992 *Phys. Rev. A* **46** R6124
- [4] Li W Q , Wang W , Li T Z , Li D M 2002 *J. Southeast Univ.* **32** 151 (in Chinese) [李文权、王 炜、李铁柱、李冬梅 2002 东南大学学报 **32** 151]
- [5] Dai S Q , Lei L , Dong L G 2003 *Acta Mech. Sin.* **35** 513 (in Chinese) [戴世强、雷 丽、董力耕 2003 力学学报 **35** 513]
- [6] Lee H Y , Lee H W , Kim D 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1130
- [7] Helbing D , Treiber M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 3024
- [8] Diedrich G , Santen L , Schadschneider A , Zittartz J 2000 *Int. J. Mod. Phys. C* **11** 335
- [9] Campar E G , Lev G , 2000 *Eur. Phys. J. B* **17** 159
- [10] Jiang R , Wu Q S , Wang B H 2002 *Phys. Rev. E* **66** 159
- [11] Berg P , Woods A 2001 *Phys. Rev. E* **64** 035602
- [12] Whuang D , 2002 *Int. J. Mod. Phys. C* **13** 739
- [13] Popkov V , Schadschneider L 2001 *J. Phys. A* **34** L45
- [14] Kerner M M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046138
- [15] Jiang R , Wu Q S 2006 *Physica A* **366** 523
- [16] Jia B , Jiang R , Wu Q S 2005 *Physica A* **345** 218
- [17] Nassab K , Schreckenberg M , Ouaskit S , Boulmakoul A 2005 *Physica A* **352** 601
- [18] Li F , Zhang X Y , Gao Z Y 2007 *Physica A* **374** 827
- [19] Jia B , Jiang R , Wu Q S 2004 *Phys. Rev. E* **69** 056105

The effects of decelerating lane in the off-ramp system^{*}

Li Sheng-Chun^{1)†} Kong Ling-Jiang¹⁾ Liu Mu-Ren¹⁾ Zheng Rong-Sen²⁾

1) (College of Physics and Electronic Engineering , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China)

2) (Department of Physics and Information , Yulin Normal College , Yulin 537000 , China)

(Received 21 June 2008 ; revised manuscript received 20 October 2008)

Abstract

In this paper , we study the effects of decelerating lane in the off-ramp system of freeway. Based on the NaSch model of traffic flow , a model of two-lane system with off-ramp is established. From the numerical simulations , we obtain the fundamental diagrams of traffic flow under different parameters. Moreover , we compare the road including decelerating lane with the road without it.

Keywords : cellular automaton , off-ramp , decelerating lane , NaSch model

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10362001 , 10562001 , 10762005) , the Natural Science Foundation of Guangxi Zhuang Autonomous Region , China (Grant No. 0007017) and the Innovation Program of Graduate Education of Guangxi Zhuang Autonomous Region , China (Grant No. 2007106020711M68).

[†] E-mail : lishengchun2008@163.com