

交叉口混合交通流元胞自动机模型及仿真研究*

张兴强^{1)†} 汪滢¹⁾ 胡庆华²⁾

1) (北京交通大学交通运输学院, 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

2) (天津经济技术开发区西区办公室, 天津 300462)

(2013年7月22日收到; 2013年9月23日收到修改稿)

本文以右转机动车和直行自行车为对象研究交叉口混合交通流特性. 基于交叉口机非干扰特性, 将机动车元胞模型和自行车元胞模型进行了耦合, 建立了考虑自行车穿越机动车延时、机动车穿越自行车间隙和冲突区占据处置等规则的交叉口混合交通流元胞自动机模型(NS-BCA). 对右转机动车与直行自行车混合交通流进行了仿真, 从流量-车辆到达率关系、交通流相位相变、交通流相位-到达率-混合交通流状态等方面研究了交叉口混合交通流的机非干扰机理.

关键词: 混合交通流, 机非干扰, 元胞自动机, 微观仿真

PACS: 05.50.+q, 05.20.Jj, 05.70.Fh, 64.70.-p **DOI:** 10.7498/aps.63.010508

1 引言

城市交叉口机非干扰严重降低了交叉口的通行能力, 增加交通事故隐患. 建立合理的微观交叉口混合交通流元胞自动机模型, 仿真分析交叉口混合交通流特性和机非干扰特性具有较好的理论意义. Hossain 等建立了基于机动车行为的模拟模型分析了混合车流速度与自行车比例之间的关系^[1]. Jiang 等在 EBCA1 和 EBCA2 模型中引入了随机慢化模拟自行车受干扰情况^[2]. Meng 建立了基于元胞自动机的摩托车与机动车的单车道混合交通流模型, 分析摩托车流量、摩托车换道概率和道路通行能力之间的关系^[3]. 李新刚等建立了直行自行车和右转机动车的交叉口模型, 引入连续两个时步内冲突点被同类车辆占据的概率来描述两股交通流在交叉口的冲突行为^[4]. 肖瑞杰等运用 NaSch 模型, 在周期性边界条件下, 通过计算机模拟研究了车辆的长度、最大速度和混合比例系数对混合交通流的影响^[5]. 田欢欢等基于 NaSch 模型, 对混合交

通流的能耗进行研究, 通过数值模拟研究不同最大速度、不同车长的混合交通流的能耗^[6]. 温坚等研究了在周期边界条件下, 最大速度、混合比例、车辆长度、随机减速概率对交通流模型能耗的影响^[7]. Zhang 建立了一种二维元胞自动机模型模拟平面交叉口机-非冲突特性^[8]. 钱勇生采用元胞机对公共运输车辆占用率对 2 车道混合交通流的影响进行了研究^[9]. 但是目前国内外在利用元胞自动机研究混合交通流时对交叉口内机非干扰特性考虑的较少. 因此本文对机动车 NaSch 模型和自行车 BCA 模型进行耦合, 建立平面交叉口混合交通流 NS-BCA 模型. 该模型规则主要由路段上车辆到达和驶出规则、路段上车辆演变规则和交叉口内车辆演变规则 3 部分组成. 建立了考虑自行车穿越机动车延时规则、机动车穿越自行车间隙规则和冲突区被占据时的处置规则的交叉口混合交通流元胞自动机 NS-BCA 模型. 并对右转机动车与执行自行车混合交通流进行了仿真, 从流量-车辆到达率关系、交通流相位相变、交通流相位-到达率-混合交通流状态等方面研究了交叉口混合交通流特性.

* 国家自然科学基金(批准号: 61104163)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangxq@bjtu.edu.cn

2 路段上车辆到达和驶出规则

2.1 机动车到达规则

R1: if $X_{\text{last}}(t) > V_{\text{max}}$, $X_{\text{last}}(t)$ 表示 t 时步机动车进口道 Lane1 上尾车位置; V_{max} 表示路段上机动车的最大速度.

R2: R1 成立时, $\xi(t) < p_m \Rightarrow X_{\text{new}}(t) = \min[X_{\text{last}}(t) - V_{\text{max}}, V_{\text{max}}]$. $\xi(t)$ 为 $[0, 1]$ 之间的均匀随机数; p_m 为机动车到达率; $X_{\text{new}}(t)$ 表示 t 时步向 Lane1 上注入一辆新的机动车位置.

2.2 机动车驶出规则

R3: if $X_{\text{first}}(t) > L_3$. $X_{\text{first}}(t)$ 表示 t 时步机动车出口道 Lane3 上头车位置; L_3 为 Lane3 的长度.

R4: R3 成立时, Lane3 上的头车驶出系统, 而紧跟其后的第 2 辆机动车成为新的头车.

2.3 自行车到达规则

R5: if $U_1(t) < 3$. $U_1(t)$ 表示 t 时步自行车车道 Lane2 上第一个元胞内自行车数量.

R6: R5 成立时, $\xi(t) < p_n \Rightarrow \Delta U_1(t) = 1$, $\Delta U_1(t)$ 表示 t 时步每次向 Lane2 上第一个元胞内注入新的自行车数量.

2.4 自行车驶出规则

R7: if $U_{L_2}(t) > 0$. $U_{L_2}(t)$ 表示 t 时步 Lane2 最右侧的元胞内自行车数量.

R8: R7 成立时, $U_{L_2}(t) = 0$, 将 Lane2 最右侧的元胞内自行车数量全部移出元胞.

3 路段上车辆演变规则

机动车在路段上按 NaSch 模型进行演化, 演化

规则包括加速、减速、随机慢化和车辆运动规则^[10]. 自行车在路段上按 BCA 模型规则进行演化^[11]. 驾驶员的反应时间 1 s; 右转机动车在路段上的最大速度 $V_{\text{max}} = 5$, 在距离冲突元胞 T 为 10 个格子时, 右转机动车出于安全的考虑开始减速, 其最大速度变为 $V_{\text{max}}^1 = 3$, 当右转机动车离开交叉口后, 其最大速度恢复为 $V_{\text{max}} = 5$; 自行车在路段上和交叉口内行驶时其最大速度 1.

4 交叉口内车辆演变规则

交叉口内右转机动车和直行自行车常常出现机非穿越的现象, 因此需要根据机非干扰特性制定合理的交叉口内车辆的演变规则, 从而真实地模拟这种机非干扰现象. 为此本文建立了交叉口内右转机动车与直行自行车相互穿越的 NS-BCA 模型规则.

规则 1 冲突元胞 T 的状态可用状态函数 $S(t)$ 表示. $S(t) = 0$ 表示冲突元胞 T 空闲; $S(t) = 1$ 表示冲突元胞 T 被机动车占据; $S(t) = 2$ 表示冲突元胞 T 被自行车占据.

规则 2 右转机动车头车提供给自行车穿越的延时距离 $D_{n_1}(t)$ 和时间 t_{n_1} ,

$$D_{n_1}(t) = L_1 - X_{n_1}(t), \quad (1)$$

$$t_{n_1} = \begin{cases} D_{n_1}(t)/V_{n_1}(t), & V_{n_1}(t) \neq 0, \\ 1, & V_{n_1}(t) = 0, \\ a \geq 2, & D_{n_1}(t) = 0, \\ & V_{n_1}(t) = 0, \\ & D_{n_1}(t) \neq 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_1 表示 Lane1 的长度; n_1 表示 t 时步在 Lane1 上头车; $X_{n_1}(t)$ 表示 t 时步右转机动车的头车位置; $V_{n_1}(t)$ 表示 t 时步右转机动车的头车速度.

规则 3 自行车穿越右转机动车延时概率

$$P_b = \frac{\exp(2.526 + 0.905 \times 3.5 \times D_{n_1}(t) - 1.530 \times 3.5 \times V_{n_1}(t))}{1 + \exp(2.526 + 0.905 \times 3.5 \times D_{n_1}(t) - 1.530 \times 3.5 \times V_{n_1}(t))}. \quad (3)$$

规则 4 右转机动车穿越直行自行车间隙概率

$$P_v = \frac{\exp(1.190 + 0.416 \times 3.5 \times V_{n_1}(t) - 3.517 \times 3.5 \times V_b + 2.596 \times 3.5 \times G_b)}{1 + \exp(1.190 + 0.416 \times 3.5 \times V_{n_1}(t) - 3.517 \times 3.5 \times V_b + 2.596 \times 3.5 \times G_b)}, \quad (4)$$

式中, V_b 为右转机动车穿越间隙后面自行车的速度, 其值为 0 或 1; G_b 表示自行车提供给机动车穿越的间隙距离.

规则 5 自行车穿越右转机动车延时规则.

R1: if $U_{L_1-1}(t) \neq 0, S(t) = 0, S(t-1) \neq 2$, 判断是否属于自行车穿越右转机动车延时的情况. $U_{L_1-1}(t)$ 表示车道 Lane2 上的元胞 X 内自行车的数量; $S(t-1)$ 表示冲突元胞 T 在 $(t-1)$ 时步状态.

R2: R1 成立时, 根据延时时间 t_{n_1} 划分 4 种自行车穿越机动车延时条件. 同时判断当主穿越自行车在决定穿越时, 与它同处于元胞 X 内的其他自行车在跟随穿越时是否会产生随机慢化现象.

R2-1: if $0 \leq t_{n_1} < 0.69$, 第 1 种条件.

R2-2: R2-1 成立时, $b_{L_1}(t) = 0$, 自行车全都拒绝进入元胞 T, 否则转入 R2-4.

R2-3: if $(b_{L_1-2}(t-1) > 0) \{b = b + 1\}$, 机非冲突计量规则. $b_{L_1-2}(t-1)$ 表示从 $(t-1)$ 时步到 t 时步, Lane2 上从元胞 $(L_1 - 2)$ 进入到元胞 X 内的自行车数量.

R2-4: if $0.69 \leq t_{n_1} \leq 1$, 第 2 种条件.

R2-5: R2-4 成立时, if $\xi(t) < P_b$, 判断自行车是否穿越右转机动车延时. 否则转到 R2-8.

R2-6: R2-5 成立时, 主穿越自行车选择穿越机动车, 同时判断与主穿越车同处于元胞 X 内的其他自行车是否会产生随机慢化现象.

$$V_{n_1}(t+1) = \min [V_{n_1}(t) + 1, V_{\max}^1, L_1 - X_{n_1}(t)],$$

$$\text{if } (\xi(t) < (1 - P_b)) \{b_{L_1-1}(t) = \max\{\min[U_{L_1-1}(t), 3] - 1, 1\}\}$$

$$\text{else } \{b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3]\},$$

$$\text{if } (0.69 \leq t_{n_1} < 1) \{b = b + 1\}, \quad (5)$$

式中, $b_{L_1-1}(t)$ 表示 t 时步元胞 X 内的自行车进入冲突元胞 T 的数量.

R2-7: R2-5 不成立时, 自行车停留在元胞 X 内等待, 机动车无干扰通过. 如果存在自行车速度由 1 减速成 0 的情况, 则计算一次交通冲突.

$$b_{L_1-1}(t) = 0,$$

$$\text{if } (b_{L_1-2}(t-1) > 0) \{b = b + 1\}. \quad (6)$$

R2-8: if $1 < t_{n_1} \leq 1.70$, 第 3 种条件.

R2-9: R2-8 成立时, if $\xi(t) < P_b$. 判断自行车是否穿越右转机动车延时. 否则转到 R2-12.

R2-10: R2-9 成立时, $b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3]$. 主穿越自行车选择穿越机动车, 元胞 X 内的其

他自行车会跟随穿越而不产生随机慢化现象.

R2-11: R2-9 不成立时, $b_{L_1-1}(t) = 0$, 自行车受机动车干扰而停留在元胞 X 内等待.

R2-12: if $t_{n_1} > 1.70$, 第 4 种条件.

R2-13: R2-12 成立时, $b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3]$, 自行车穿越机动车, 不产生随机慢化现象.

规则 6 右转机动车穿越自行车间隙的规则.

R3: if $U_{L_1-1}(t) \neq 0, S(t) = 0, S(t-1) = 2$, 判断是否存在自行车间隙.

R4: R3 成立时, if $0 \leq t_{n_1} \leq 1$, 判断当前时步内右转机动车是否能够到达冲突元胞 T.

R5: R4 成立时, 判断从 $(t-1)$ 时步到 t 时步, 车道 Lane2 上是否有自行车从元胞 $(L_1 - 2)$ 进入到元胞 $(L_1 - 1)$ 中. 当规则 R4 中条件不成立时, 转到规则 R9.

$$\text{if } (b_{L_1-2}(t-1) > 0) \{V_b = 1\},$$

$$\text{else } \{V_b = 0\}. \quad (7)$$

R6: if $\xi(t) < P_v$, 判断机动车是否穿越.

R7: R6 成立时, 右转机动车占用冲突元胞 T. 如果存在自行车速度由 1 减速成 0 的情况, 则计算一次交通冲突.

$$b_{L_1-1}(t) = 0,$$

$$\text{if } (b_{L_1-2}(t-1) > 0) \{b = b + 1\}. \quad (8)$$

R8: R6 不成立时, 机动车将会拒绝穿越自行车的间隙, 此时至少有一辆自行车选择进入冲突元胞 T, 元胞 X 内的其他自行车出于安全考虑则以慢化概率 $(1 - P_b)$ 进入元胞 T. 为了避免与进入元胞 T 的自行车相撞, 机动车必须减速行驶到冲突元胞 T 前面的元胞 Y, 计算一次交通冲突.

$$V_{n_1}(t+1) = \min[V_{n_1}(t) + 1, V_{\max}^1, L_1 - X_{n_1}(t)],$$

$$\text{if } (\xi(t) < (1 - P_b)) \{b_{L_1-1}(t) = \max\{\min[U_{L_1-1}(t), 3] - 1, 1\}\},$$

$$\text{else } \{b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3]\},$$

$$\text{if } (0 \leq t_{n_1} < 1) \{b = b + 1\}. \quad (9)$$

R9: R4 不成立时, $b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3]$. 即 $t_{n_1} > 1$, 机非之间互不干扰, 元胞 X 内的自行车进入冲突元胞 T 时不会产生随机慢化现象.

规则 7 冲突区被占据时的处置规则.

R10: if $S(t) = 1$, 判断冲突元胞 T 是否被机动车占据.

R11: R10 成立时, 判断元胞 X 内是否有自行车, 来计量机非冲突.

$$\begin{aligned} & \text{if } (U_{L_1-1}(t) \neq 0) \\ & \begin{cases} b_{L_1-1}(t) = 0, \\ \text{if } (b_{L_1-2}(t-1) > 0) \{b = b + 1\}. \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

R12: R10 不成立时, 分 2 种情况.

R12-1: if $0 \leq t_{n_1} \leq 1$, 第 1 种情况.

R12-2: R12-1 成立, 右转机动车减速行驶到冲突元胞 T, 计算一次交通冲突. 否则转到 R11-6.

$$\begin{aligned} V_{n_1}(t+1) &= \min[V_{n_1}(t) + 1, V_{\max}^1, L_1 - X_{n_1}(t)], \\ (0 \leq t_{n_1} < 1) \{b = b + 1\}. \end{aligned} \quad (11)$$

R12-3: if $U_{L_1}(t) < 2$, 判断冲突元胞 T 内自行车的数量是否小于 2. 成立则转到 R12-4, 否则转到 R12-5.

R12-4: R12-3 成立时, 判断元胞 X 内自行车进入冲突元胞 T 时是否会产生随机慢化现象.

$$\begin{aligned} & \text{if } (\xi(t) < (1 - P_b)) \{b_{L_1-1}(t) \\ & = \max\{\min[U_{L_1-1}(t), 3 - U_{L_1}(t)] - 1, 0\}, \\ & \text{else } \{b_{L_1-1}(t) \\ & = \min[U_{L_1-1}(t), 3 - U_{L_1}(t)]\}. \end{aligned} \quad (12)$$

R12-5: $b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3 - U_{L_1}(t)]$. 当冲突元胞 T 内自行车数量大于等于 2 时, 元胞 X 内的自行车进入冲突元胞 T 时不会出现随机慢化现象.

R12-6: if $t_{n_1} > 1$, 第 2 种情况.

R12-7: R12-6 成立时, $b_{L_1-1}(t) = \min[U_{L_1-1}(t), 3 - U_{L_1}(t)]$, 不存在机非干扰.

5 基于 NS-BCA 的右转机动车与直行自行车仿真

本文以右转机动车和直行自行车为研究对象 (图 1), 仿真元胞如图 2 所示. Lane1 为右转机动车入口车道, 长度 $L_1 = 799$ 元胞; Lane3 为右转机动车出口车道, 长度 $L_3 = 200$ 元胞; Lane2 为直行自行车出口车道, 长度 $L_2 = 1000$ 元胞. 元胞 T 是自行车和右转机动车的冲突区, 设置在自行车道和机动车道上的第 800 个元胞格子交叉处; 元胞 X 和元胞 Y 则分别表示紧邻冲突元胞 T 的自行车道元胞和机动车道元胞. 每个元胞大小为 $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$, 一辆机动车占据 2 个元胞, 一个元胞最多容纳 3 辆自行车. 模型仿真步长为 1 s , 采用开口边界条件. 为获取研究所需的流量数据, 在距离元胞 T 上游的机动车道和非机动车道的第 100 个元胞内设置虚拟探测器, 测 10000 个时步内通过探测器的机动车和自行车数量. 机动车流量 q_m (辆/时步) 为通过机动车道上第 700 个元胞的机动车数量, 自行车流量 q_n (辆/时步)

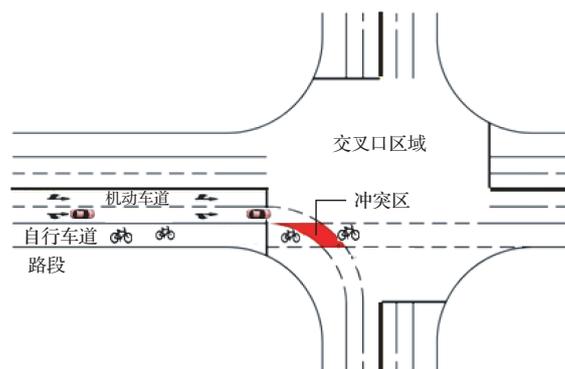


图 1 直行自行车与右转机动车运行过程

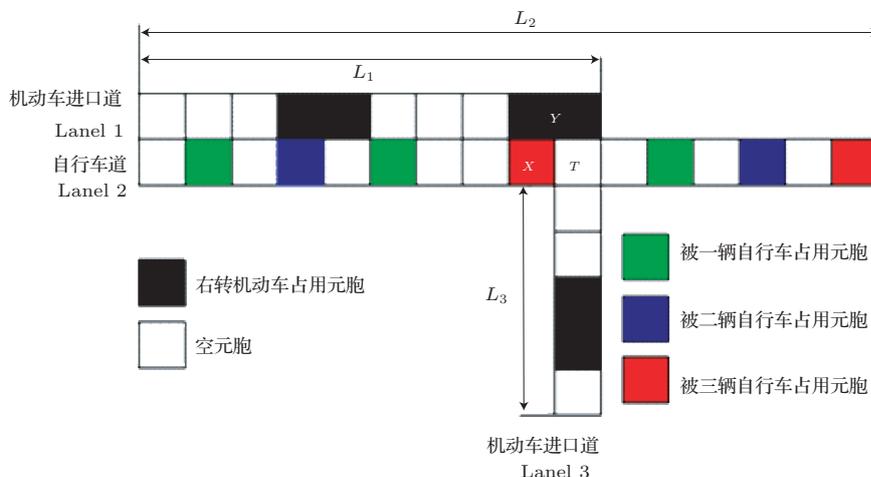


图 2 NS-BCA 模型元胞空间划分

× 车道)为自行车道上从第699个元胞进入到第700个元胞内自行车的数量之和,最后均取平均值。 p_m 和 p_n 分别为机动车和自行车的到达率。

5.1 流量与车辆到达率的关系

图3为机动车流量 q_m 与到达率 p_m 和 p_n 的关系。由图可知,存在一个临界机动车到达率 p_m^c 将机动车流分成自由流和饱和流,流量 q_m 先随 p_m 的增加而线性增长。但当 $p_m > p_m^c$ 时,流量 q_m 变为临界值 q_m^c ,表明机动车道由自由流变成饱和流,流量趋于稳定。随着到达率 p_n 继续增加,机动车饱和流量 q_m^c 降低,当 $p_n > 0.44$ 时,机动车的饱和流量 q_m^c 趋于稳定。图4为自行车流量 q_n 与到达率 p_n 和 p_m 的关系。由图可知,存在一个临界到达率 p_n^c 将自行车流分成自由流和饱和流,流量 q_n 先随 p_n 的增加而线性增长,但是当 $p_n > p_n^c$ 时,流量 q_n 变为临界值 q_n^c ,表明自行车道由自由流变成饱和流,流量趋于稳定。当 p_m 继续增加,自行车饱和流量 q_n^c 越来越小。 $p_m > 0.12$ 时, q_n^c 趋于稳定。通过图3和图4可以看出,只有当 $p_m > p_m^c$ ($p_n > p_n^c$)时,机动车和自行车之间才会产生明显的相互干扰。

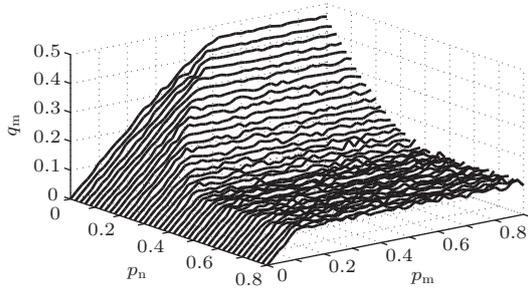


图3 机动车道流量与到达率的关系

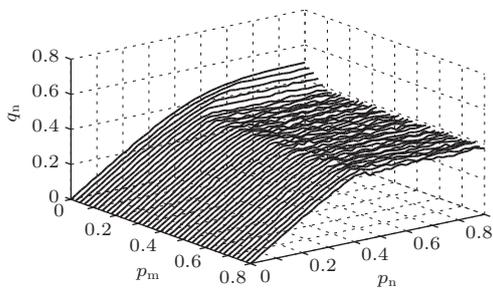


图4 自行车道流量与到达率的关系

图5和图6分别为机动车(自行车)饱和流量与自行车(机动车)到达率的关系。随着自行车(机动

车)到达率增加,机动车(自行车)饱和流量先减少,最后趋于稳定。通过对比分析可知,机动车饱和时自行车到达率增加所导致的饱和流量 q_m^c 减少程度大于自行车饱和时机动车到达率增加所导致的饱和流量 q_n^c 减少程度。这表明自行车流对机动车流的干扰大于机动车流对自行车流的干扰,这与自行车灵活性大,群体穿越冲突区有关。在NS-BCA模型中,机动车流量和自行车流量均存在从自由流到饱和流的相变,流量 q_m (q_n)的大小不仅取决于到达率 p_m (p_n)还取决于到达率 p_n (p_m)。右转机动车和直行自行车之间的相互干扰导致了机动车和自行车饱和流量的降低,因此该模型能描述右转机动车和直行自行车之间的干扰特性。

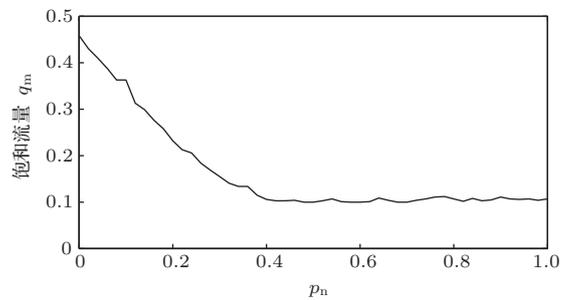


图5 机动车饱和流量与自行车到达率关系

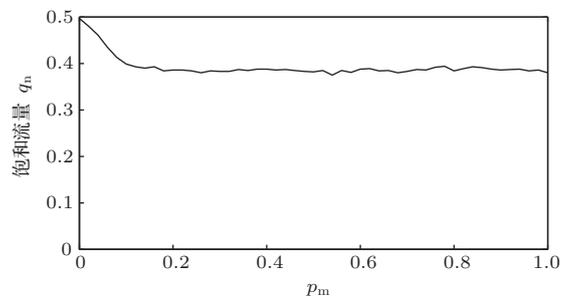


图6 自行车饱和流量与机动车到达率关系

5.2 机动车道和自行车道交通流相位分析

图7为到达率(p_m, p_n)的相位图。在区域I中,机动车道和自行车道均为自由流。在区域II中,机动车道是自由流,而自行车道是饱和流。在区域III中,机动车道是饱和流,自行车道是自由流。在区域IV中,机动车道和自行车道均为饱和流。为揭示区域I, II, III, IV的混合交通流运行规律,绘制了基于任一点(p_m, p_n)机动车道和自行车道的时空图。在机动车流时空图中,黑色为元胞被1辆机动车占

据, 空白表示元胞空闲. 在自行车流时空图中, 白色、绿色、蓝色和红色分别表示元胞空闲、被1辆自行车占据、被2辆自行车占据、被3辆自行车占据.

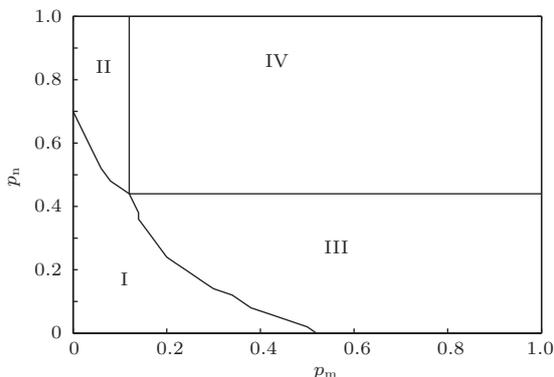


图7 交通流相位图

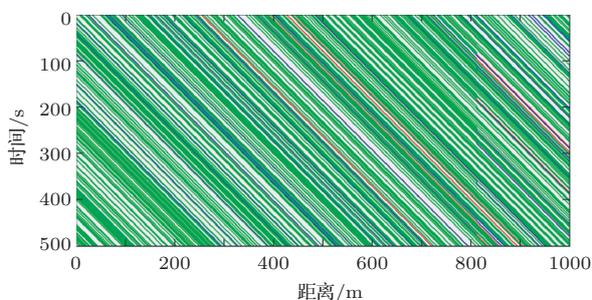


图8 $(P_m, P_n) = (0.1, 0.1)$ 自行车道的时空图

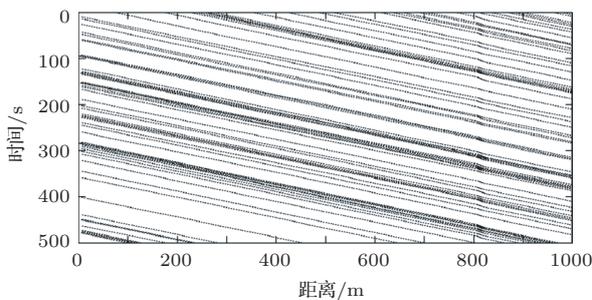


图9 $(P_m, P_n) = (0.1, 0.1)$ 机动车道的时空图

区域I中, 机动车道和自行车道均为自由流, 流量 q_m 和 q_n 随到达率 p_m 和 p_n 线性增长. 图8和图9分别为区域I $(p_m, p_n) = (0.1, 0.1)$ 自行车道和机动车道的时空图. 由图可知, 机动车和自行车可以自由通过交叉口冲突元胞T, 仅有少数机动车因为自行车干扰而在冲突元胞T前面稍等片刻才能通过, 机非干扰很少; 在冲突元胞T上游的自行车道上, 元胞为绿色或蓝色, 自行车流处于自由流

状态. 在下游自行车道上, 红色元胞占一定比例, 这是由于受到机动车干扰, 部分自行车在冲突元胞T前面排队等候, 在冲突元胞T前会出现积聚3辆自行车, 然后以3辆自行车同时放行向下游运动.

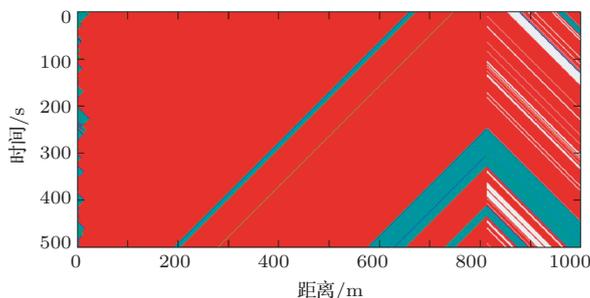


图10 $(P_m, P_n) = (0.08, 0.6)$ 自行车道的时空图

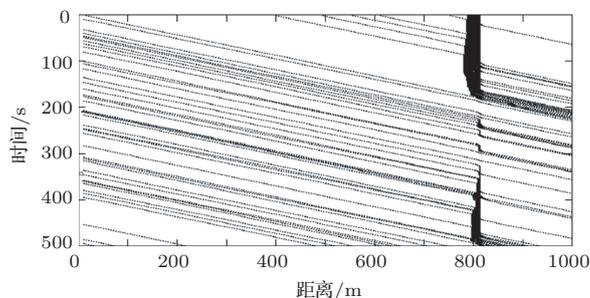


图11 $(P_m, P_n) = (0.08, 0.6)$ 机动车道的时空图

区域II中, 机动车道是自由流, 自行车道是饱和流, 自行车道临界饱和流 q_n^c 只取决于 p_m , 流量 q_n 随到达率 p_m 线性增长. 图10和图11分别为区域II $(p_m, p_n) = (0.08, 0.6)$ 自行车道和机动车道的时空图. 由图可知, 随着自行车流量增大, 右转机动车通过交叉口冲突元胞T的难度有所增大, 出现机动车在交叉口冲突元胞T上游排队, 排队长度不太长, 经过一定时间机动车连续放行排队逐渐消散. 机动车流量受到自行车的干扰影响较小, 机动车和自行车基本上以集簇形式连续交替通过交叉口冲突元胞T. 在元胞T上游的自行车道上, 由于自行车交通流受到右转机动车干扰, 当自行车流量很大, 自行车道出现交通拥堵.

在区域III中, 机动车道是饱和流, 自行车道是自由流, 饱和流 q_m^c 大小只取决于 p_n , 流量 q_n 随到达率 p_n 线性增长. 图12和图13分别为区域III中 $(p_m, p_n) = (0.6, 0.2)$ 自行车道和机动车道的时空图. 由图可知, 机动车受到自行车交通流干扰而断断续续通过冲突元胞T, 同时机动车流量很大, 在

元胞T上游的机动车道形成启停波和交通拥堵; 自行车流受到机动车干扰, 冲突元胞T下游的自行车道上较多元胞为红色, 表明自行车在元胞T前排队等待, 然后以3辆自行车同时向下游放行; 在元胞T上游的自行车道没有出现交通拥堵.

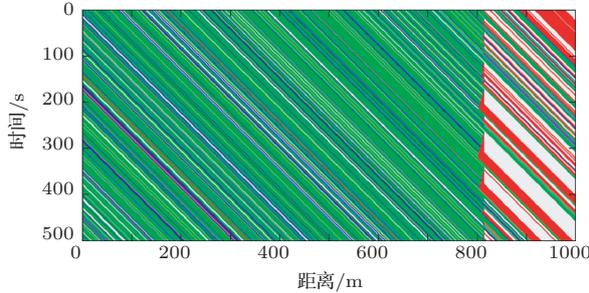


图12 $(P_m, P_n) = (0.6, 0.2)$ 自行车道的时空图

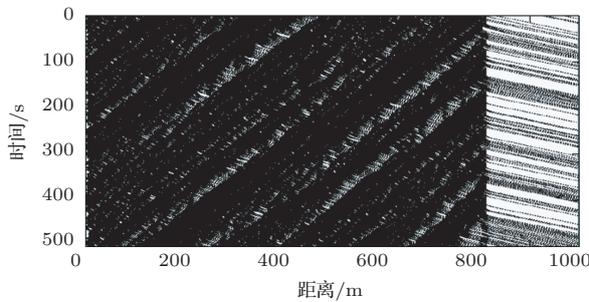


图13 $(P_m, P_n) = (0.6, 0.2)$ 机动车道的时空图

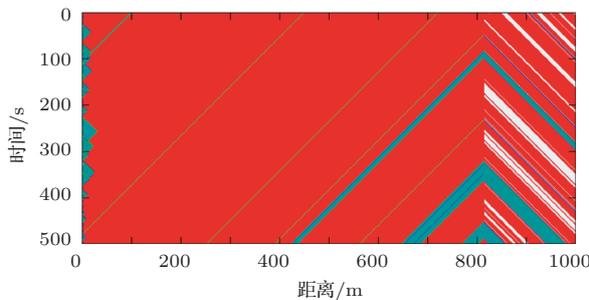


图14 $(P_m, P_n) = (0.6, 0.6)$ 自行车道的时空图

在区域IV中, 机动车道和自行车道均为饱和流, 饱和流量 q_m^c 和 q_n^c 基本为常值, 机动车和自行车的干扰趋于稳定. 图14和图15分别为区域IV中 $(p_m, p_n) = (0.6, 0.6)$ 自行车道和机动车道的时空图. 由图可知, 由于机动车流和自行车流量均很大, 由于二者之间的相互干扰, 在冲突元胞T上游的车道1和车道2上均出现交通拥堵, 而且自行车流和机动车流基本上都是以集簇的形式连续交替通过

交叉口.

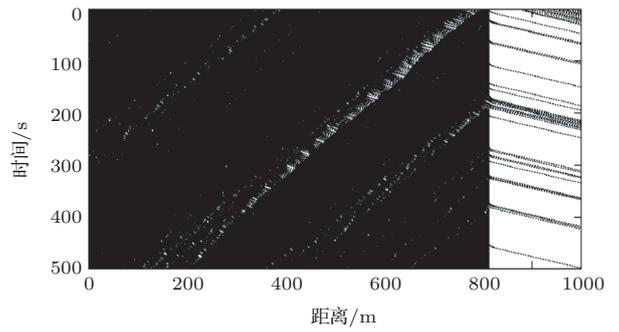


图15 $(P_m, P_n) = (0.6, 0.6)$ 机动车道的时空图

6 结 论

1. 基于交叉口机非干扰特性, 对NaSch和BCA模型进行耦合, 建立了考虑自行车穿越机动车延时规则、机动车穿越自行车间隙规则和冲突区被占据时的处置规则的平面交叉口混合交通流NS-BCA模型.

2. 基于NS-BCA对交叉口右转机动车与直行自行车混合交通流进行仿真分析, 得到以下结论:

- 1) 直行自行车流对右转机动车流的干扰大于右转机动车流对直行自行车流的干扰.
- 2) 机动车流和自行车流均存在从自由流到饱和流的相变, 流量 q_m 和 q_n 受到到达率 p_m 和 p_n 影响. 当机动车(自行车)饱和流量随着自行车(机动车)到达率的增加而降低. 自行车(机动车)到达率大于某一临界值时, 机非干扰程度趋于稳定, 机动车(自行车)饱和流量趋于稳定.
- 3) 当 p_n 较大而 p_m 较小时, 自行车道是饱和流而机动车道是自由流. 由于机非干扰, 机动车在交叉口冲突区前形成了排队现象, 但排队长度不长, 自行车道会在冲突区上游形成交通拥堵.
- 4) 当 p_m 较大而 p_n 较小时, 机动车道为饱和流, 自行车道为自由流. 由于机非干扰, 机动车断续通过冲突区, 在冲突区上游出现启停波和交通拥堵现象, 同时自行车也断续通过冲突区, 但没有在冲突区前形成长时间排队现象.
- 5) 当 p_m 和 p_n 均较大时, 机动车道和自行车道均为饱和流. 机非干扰于稳定, 饱和流量趋于稳定; 自行车和机动车都以集簇的形式连续交替通过交叉口, 机动车道和自行车道均出现交通拥堵.

参考文献

- [1] Hossain M, McDonald M 1998 *Environ. and Urban Systems* **22**(5) 89
- [2] Jiang R, Jia B, Wu Q S 2004 *Physics A* **37** 2063
- [3] Meng J P, Dai S Q, Dong L Y, Zhang J F 2007 *Physics A* **38** 0470
- [4] Li X G, Gao Z X, Jia B, Zhao X M 2009 *International Journal of Modern Physics*. **20** 209
- [5] Xiao R J, Kong L J, Liu M R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 740 (in Chinese)[肖瑞杰, 孔令江, 刘慕仁. 2007 物理学报 **56** 740]
- [6] Tian H H, Xue Y, Kang S J, Liang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4506 (in Chinese) [田欢欢, 薛郁, 康三军, 梁玉娟 2009 物理学报 **58** 4506]
- [7] Wen J, Tian H H, Kang S J, Xue Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7693 (in Chinese) [温坚, 田欢欢, 康三军, 薛郁 2010 物理学报 **59** 7693]
- [8] Zhang X Q, Chen P, Wang Zh 2012 *Journal of Beijing Institute of Technology* **21** 196
- [9] Qiang Y S, Shi P J, Zeng Q, Ma C X, Lin F, Sun P, Yin X T 2009 *Chinese Physics B* **18** 4037
- [10] Jia B, Gao Z Y, Li K P, Li X G 2007 *Models and simulations of traffic system based on the theory of cellular automaton* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [贾斌, 高自友, 李克平, 李新刚 2007 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟 (北京: 科学出版社)]
- [11] Nishinari K, Takahashi D 1998 *Phys. A* **31** 5439

Research and simulation on cellular automaton model of mixed traffic flow at intersection*

Zhang Xing-Qiang^{1)†} Wang Ying¹⁾ Hu Qing-Hua²⁾

1) (Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology of Ministry of Education, School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (West Zone Office of TEDA, Tianjin 300462, China)

(Received 22 July 2013; revised manuscript received 23 September 2013)

Abstract

In this paper, right-turning vehicle and straight-going bicycle are regarded as the objects for studying the mixed traffic flow characteristics at the intersection. Based on vehicle-bicycle interference characteristics, and the coupling between the vehicle cellular automaton model and the bicycle cellular automaton model, a kind of cellular automaton model (NS-BCA) is presented to analyze the mixed traffic flow of intersection, in which the delay rules of bicycle through vehicle, the gap rules of vehicle through bicycle, and the disposal rules of the occupied conflict zone are taken into consideration. The mixed traffic flow of the right-turning vehicle and the straight-going bicycle is simulated, and the vehicle-non vehicle interference mechanism in mixed traffic flow at the intersection is investigated according to the relationship between traffic volume and arriving rate, transformation of traffic flow phases, the relationship among traffic flow phase, arriving rate and state of mixed traffic flow.

Keywords: mixed traffic flow, vehicle-non vehicle interference, cellular automaton, microscopic simulation

PACS: 05.50.+q, 05.20.Jj, 05.70.Fh, 64.70.-p

DOI: 10.7498/aps.63.010508

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61104163).

† Corresponding author. E-mail: zhangxq@bjtu.edu.cn