

基于元胞自动机模型的 C 型交织区交通流特性¹⁾

江金胜^{*,†} 董力耘^{*,†,2)}

^{*}(上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

[†](上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072)

摘要 根据 C 型双侧交织区的车辆换道特征建立相应的换道规则, 采用多车道元胞自动机模型研究交织区系统的交通流特性. 通过数值模拟得到了不同交织区长度下的相图, 表明当主路和匝道交通流均为自由流时, 交织区长度对系统影响不大, 但当主路或匝道拥挤时, 交织区长度的增加可以明显改善入口匝道的交通流状况. 进一步讨论了主路畅通而交织流量较大情形下主路上的车辆密度、速度和换道频率分布, 发现换道集中在合流区和分流区附近, 并造成相应路段上的局部拥堵.

关键词 交通流, C 型交织区, 元胞自动机, 换道行为

中图分类号: O39, U491.2+34 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2012)06-0996-09

引言

交织区是各种类型道路中常见的道路结构之一. 在交织区内, 驾驶员为了在有限的时间和空间内驶入通向出口的合适车道, 会频繁地变换车道, 常出现强制换道的情况^[1]. 这样即使没有道路缩减等所形成的物理瓶颈, 也会对交织区车流产生严重的干扰, 容易造成交通拥堵并导致道路通行能力的下降. 研究各类交织区的交通流演化过程及相变机理对提高道路通行能力、缓解交通拥堵和优化交织区的设计具有重要意义, 因此引起了国内外学者的关注.

目前关于交织区的研究工作包括: 以经验公式、回归分析、神经网络、间隙接受理论和线性优化等方法建立交通通行能力评估模型或进行服务水平分析^[2-9]; 对交织区内的速度分布、换道行为和冲突事故进行实测分析^[10-12]; 还有一些学者采用交通流动力学模型或 CORSIM, VISSIM 等交通仿真软件对 A 型交织区、环形交织区、匝道斜织区内机动车动力学行为进行模拟和分析^[13-19], 其中采用元胞自动机模型的工作并不多见. 元胞自动机模型是 20 世纪 90 年代以后开始在交通流模拟中广泛使用的离散微观模型, 其规则简单灵活, 实现方便, 能够再现多种复杂的交通现象, 刻画交通系统的动力学相变过程. 雷丽等^[13] 首先采用 NaSch 元胞自动机模型^[20] 对高架路上主干道为单车道的 A 型交织区路段进行了数

值模拟和分析. Jia 等^[14] 采用细化的 NaSch 模型对主干道为双车道的 A 型交织区进行了数值模拟并分析了交织区长度和交织区的合流分流行为对系统的影响. 上述工作是针对 A 型交织区的, 且主要分析交织区长度对于流量的影响, 对于交织区内的换道行为没有进行详细的研究. C 型交织区是交织区的一种重要类型, 而针对此类交织区的研究不多且大多是通行能力评估以及对冲突事故的实测分析, 而缺乏对交织区内交通流微观运行特性的分析和研究.

本文研究 C 型交织区的一种重要类型, 即双侧交织区. 根据交织区内机动车的换道特征建立起相应的车辆换道规则, 采用多车道元胞自动机模型对交织区内交通流的相变、机动车的换道特征进行模拟和分析, 有助于加深对 C 型交织区内机动车流演化规律的认识, 并为交织区设计提供参考依据.

1 交织区建模

行驶方向相同的两股或多股交通流, 沿着一定长度的路段, 不借助交通控制设施而进行的交叉运行就称之为交织. 当一合流区后面紧接着一分流区, 或当一条驶入匝道紧接着一条驶出匝道, 并在两者之间有辅助车道连接时, 发生交织运动的路段部分称之为交织区^[1]. C 型交织区的特征是: 一个交织方向运行无需车道变换就能完成, 而另一个交织

2012-02-06 收到第 1 稿, 2012-04-16 收到修改稿.

1) 国家重点基础研究发展计划 (2012CB725404), 国家自然科学基金 (10972135, 11172164), 上海市教委科研创新项目 (11YZ12) 资助的课题和上海市高校创新团队资助项目.

2) E-mail: dly@shu.edu.cn

方向运行最少需要两次或两次以上的车道变换. 这样主干道至少是 3 车道.

图 1 给出本文所研究的 C 型交织区 (“双侧交织区”) 示意图: 主路为 3 车道, 由 A, C, E 3 个路段构成. 其中路段 C 为交织区, 介于入口匝道和出口匝道之间. 入口匝道 B 和出口匝道 D 均为单车道, 分别位于主路的两侧. 根据道路通行能力手册 [1], 所有的车辆均为交织车. 为方便起见, 本文将来自主路上游路段 A 可无需换道即能通过交织区 C 并从主路下游路段 E 离开系统的车辆称为通行车, 而将从入口匝道 B 进入交织区并经过两次换道后全部从另一侧的出口匝道 D 离开系统的车辆称为交织车. 即通行车 (交织车) 不会从出口匝道 D (主路下游路段 E) 离开系统. 如果从入口匝道进入 N 辆交织车, 它们将在交织区内进行 $2N$ 次换道. 与此同时, 还会诱发通行车的换道. 因此在交织区内车流的紊乱情况要远高于其他路段的道路情况. 此外入口匝道 B 与交织区 C 直接相连, 没有加速道, 在合流区形成了一个瓶颈.

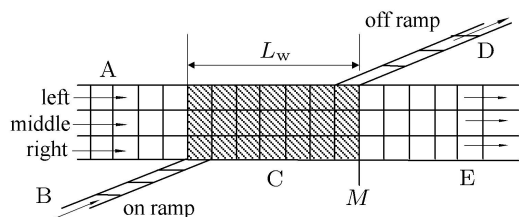


图 1 C 型交织区示意图

Fig.1 Schematic illustration of type C weaving section

本文中采用多车道元胞自动机模型模拟 C 型双侧交织区内机动车流的演化过程, 一般将车辆的行为分为运动和换道两个部分, 分别对应于车辆运动规则和车辆换道规则.

1.1 车辆运动规则

所有车辆均按照单车道元胞自动机模型向前行驶, 其更新规则采用经典的 NaSch 模型: 道路被分成离散的元胞, 每个元胞或空或被一辆车占据, 每辆车的速度可取 $0, 1, 2, \dots, v_{\max}$. 在 $t \rightarrow t + 1$ 的过程中, 车辆按如下规则并行更新:

- (1) 加速, $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$;
- (2) 减速, $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n)$;
- (3) 随机慢化, 以概率 p 减速,
 $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;
- (4) 运动, $x_n \rightarrow x_n + v_n$.

其中, x_n 和 v_n 分别表示车辆 n 的位置和速度, $d_n = x_{n+1} - x_n - l_{n+1}$ 表示车辆 n 和前车 $n + 1$ 的间距, l_{n+1} 为前车 $n + 1$ 车辆的车长, p 为随机慢化概率, v_{\max} 为车辆在所在道路上的最大速度, 通行车和交织车具有不同的 v_{\max} .

1.2 车辆换道规则

对所有的通行车, 均采用对称换道规则, 如果满足以下所有条件

$$\left. \begin{aligned} d_n &< \min(v_n + 1, v_{\max}) \\ d_{n,other} &> d_n \\ d_{n,back} &\geq v_{ob} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

则通行车以概率 p_{c1} 从本车道换至目标道上. 其中, $d_{n,other}$, $d_{n,back}$ 分别表示第 n 辆车与目标道上前后车辆之间的空元胞数; v_{ob} 表示目标车道上紧跟着第 n 辆车后面的车辆的速度. 其中, 中间车道上的通行车以等概率选择左车道或右车道作为它的目标车道. 而当左车道和右车道上的车辆同时向中间车道同一元胞换道时, 则以等概率选择其中一辆车换道至该元胞.

对交织区路段 C 上的交织车则采用不对称换道规则, 这些车辆在进入交织区和离开交织区时都要进行强制换道. 交织车禁止向右侧车道换道.

在交织区 (不含 M 点) 的右车道或中间车道上, 如果满足以下条件

$$\left. \begin{aligned} d_{n,other} &\geq 1 \text{ 或 } d_n = d_{n,other} = 0 \\ d_{n,back} &\geq v_{ob} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

右车道 (中间车道) 交织车以概率 $p_{c2}(p_{c3})$ 向中间车道 (左车道) 换道. $d_n = d_{n,other} = 0$ 表示下一时步, 无论在本车道还是目标车道上, 车辆都无法行驶; $d_{n,other} \geq 1$ 表示换道后可继续向前行驶.

如果一辆交织车行驶到 C 路段的分流点 M , 仍无法从右车道换至中间车道或从中间车道换至左车道上, 则令该车辆等待机会换道, 即在满足目标道对应位置无车的情况下, 若

$$d_{n,back} + 1 > \min(v_{ob} + 1, v_{ob,max}) \quad (3)$$

则以概率 1 换道, 表示强制换道对目标道后车的期望行驶不会造成很大的影响, 否则以概率 0.5 换道, 表示当前交织车的等待换道与目标道后车的期望行驶发生较大冲突时两车均以 0.5 的等概率换道或通行.

为了体现各种车辆在交织区的换道特征,换道概率 p_{c1} , p_{c2} 和 p_{c3} 在不同的路段随车辆类型不同而不同. 在所有路段通行车的换道概率 p_{c1} 都为 1, 而交织车向左换道概率在交织区的不同位置有所不同: 从右车道换至中间车道时, 在前 $1/3$ 路段范围内, p_{c2} 从 0 线性增加至 1, 在后 $2/3$ 路段范围保持为 1, 而从中间车道换至左车道时, 在前 $2/3$ 路段范围内, p_{c3} 从 0 线性增加至 1, 在后 $1/3$ 路段范围保持为 1.

在合流区交织车从入口匝道 B 进入交织区 C 时, 采用类似 Jiang 等^[21] 中采用的主干道上通行车优先的方式. 以 A_h 和 B_h 表示 A 路段和 B 路段上的头车, C_l 表示 C 路段上的最后一辆车. x_{Af} 和 x_{Bf} 分别表示 A 路段和 B 路段右侧的最前面元胞的位置. 计算在没有随机慢化情况下, A_h 和 B_h 两头车分别到达 x_{Af} 和 x_{Bf} 所需的时间 t_a 和 t_b .

$$\left. \begin{aligned} t_a &= \frac{x_{Af} - x_{Ah}}{\min(v_{\max}, x_{Cl} - x_{Ah} - 1, v_{Ah} + 1)} \\ t_b &= \frac{x_{Bf} - x_{Bh}}{\min(v_{\max}, x_{Cl} - x_{Bh} - 1, v_{Bh} + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当 $t_a > 1$ 或者 $t_b > 1$ 时, A 路段右车道和 B 道车辆的更新没有产生冲突. 但当 $t_a \leq 1$ 且 $t_b \leq 1$ 时, 将进入 C 路段右车道的优先权赋给最先进入 C 路段的那辆车, 即 t_a 和 t_b 中最小者所对应的车辆. 如果 $t_a = t_b \leq 1$, A_h 具有优先权. 这里与文献^[21] 的不同在于它计算的时间是车尾到达冲突点的时间, 而考虑现实中一般车头先通过冲突点的车辆有优先权, 本文计算车头到达冲突点的时间.

1.3 边界条件

文中采用如下开放边界条件^[22]: 对 A 路段和 E 路段各车道的进出车方式与 B 路段和 D 路段相同, A 路段各车道和 B 路段的进车概率分别为 a_1 和 a_2 . 在 A 路段各车道和 B 路段上游入口处进车, 入口处包含 v_{\max} 个元胞且最靠近入口元胞对应 $x = 1$. 即在元胞 $(1, 2, \dots, v_{\max})$ 中产生车辆并进入车道. 在每一个更新过程的最开始, 监测 A 路段各车道和 B 路段上的最后一辆车以及 E 路段各车道和 D 路段上的第一辆车的位置, 以 B 路段和 D 路段为例, 记 B 路段上的最后一辆车为 B_l , D 路段上的第一辆车为 D_h , 如果 $x_{B_l} > v_{\max}$, 则一辆速度为 v_{\max} 的车以 B 路段进车概率进入元胞 $\min[x_{B_l} - v_{\max}, v_{\max}]$. 同时如果 $x_{D_h} > x_{D_f}$ (x_{D_f} 是 D 路段右侧最前面的元胞), 车辆 D_h 将驶出系统.

2 模拟和讨论

在模拟中, 路段 A, B, D 和 E 各车道均划分为 $300 \times v_{\max}$ 个元胞, 路段 C 各车道均划分为 L_w 个元胞. 为保证出口匝道在入口匝道的下游, $L_w \geq 2$. 每个元胞的实际长度为 7.5m, 每一时步对应于 1s. 模型中各参数取值为: 所有车辆车身长均为 7.5m, 对于通行车(交织车): $v_{\max} = 5(3)$, $p = 0.1$. 在各路段末端设置虚拟探头来记录流量. 模拟时前 4×10^4 步内不作统计, 以消除非稳态影响, 记录随后 1×10^5 个时步内的各平均统计量.

2.1 相图

交织区长度 L_w 是一个重要参数, 它限制驾驶员在一定的时间和空间范围内必须完成所有要求的车道变换. 因此当交织区长度减少时, 车道变换的频率和对主路车流的干扰都会增大. 图 2 给出了 L_w 分别取 2, 20 和 50 等时以 (a_1, a_2) 为相空间的相图. 当 $L_w = 2$ 时, 相图分为 4 个区: 在 I 区, 路段 A 和入口匝道 B 都是自由流状态; 在 II 区, 路段 A 是自由流状态, 而入口匝道 B 是拥挤流状态; 在 III 区, 路段 A 是拥挤流状态, 而入口匝道 B 是自由流状态; 在 IV 区, 路段 A 和入口匝道 B 都是拥挤流状态, 在这个相区, 各路段流量均达到一个平台值. 由于交织区长度过小, 交织车辆必须在很短的距离上实现换道, 此时换道以强制等待换道为主, 如果不能换道就必须停车等待机会换道, 加剧了合流处的瓶颈效应. 交织车辆严重影响交织区的通行效率. 当 L_w 取 20 和 50 时, 与 $L_w = 2$ 相比, 在相图中多出了 V 相区. 在 V 区, 入口匝道 B 达到最大车流量, 而路段 A 为自由流. 同时比较在无通行车进入的情形下交织车的最大流量, 发现当 $L_w = 2$ 时比 $L_w = 20$ 和 50 时的要小很多, 这是因为 $L_w = 2$ 时, 由于交织区内的强制换道, 使得该瓶颈处的交织车最大速度实质上为 1, 入口匝道 B 的最大流量较小, 而当 $L_w = 20$ 和 50 的时候, 无主路进车的情况下, 交织车最大速度都可达到其本身的最大速度, L_w 对交织车的影响非常小, 两者 V 区的下边界线基本重合. 当 a_1 较小时, 随着 L_w 的增加, 通行车对交织车影响减弱. 当 L_w 超过一定阈值, 通行车的影响可以忽略. 从相图中可以发现, 当 L_w 增大时, 交织车辆与通行车辆的冲突减弱, 相图的相区范围和边界发生变化. I 区和 V 区明显增大, 说明交织区长度的增加可以缓解交织区内车辆的冲突, 改善了交织区的交通状况.

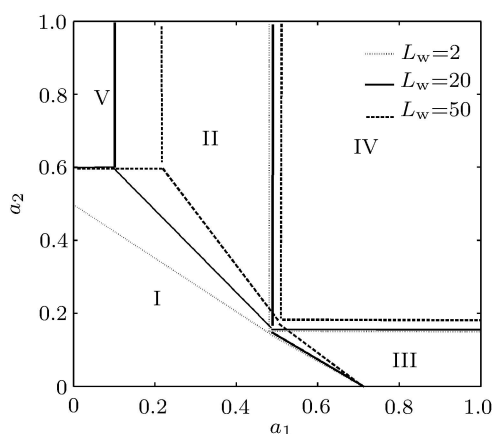
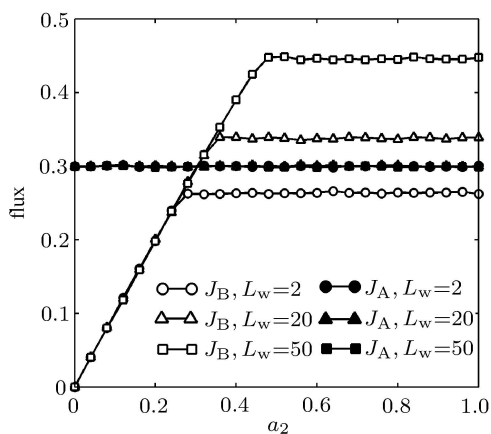


图 2 不同交织长度 L_w 时 (a_1, a_2) 为相空间的相图

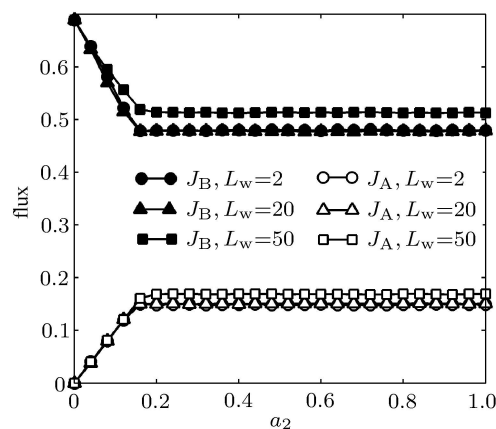
Fig.2 Phase diagrams in (a_1, a_2) space with different L_w

2.2 在典型参数下的流量变化曲线

下面结合相图, 分别给出 a_1 或 a_2 固定时, 主路上游和入口匝道流量随 a_2 或 a_1 变化曲线. 这里主路流量指 3 个车道的平均流量, 而非 3 个车道的流量之和. 图 3 给出在给定 a_1 时, 不同 L_w 的情况下, 上游流量 J_A 和入口匝道 J_B 与 a_2 之间的关系. 当 $a_1 = 0.3$ 时, 主路为自由流, 其流量不随 a_2 变化. 而入口匝道的流量则先随 a_2 的增加而近似线性增大, 当超过一个临界值时, J_B 达到一个饱和值, 出现一个流量平台, 即该饱和流量基本保持一个常数值, 说明入口匝道的流态从自由流过渡到拥挤流的状态. 由图 3(a) 可见, 随着 L_w 的增加, 入口匝道的饱和流量和临界 a_2 值都明显增大, 表明交织区长度的增加, 可以显著改善入口匝道上的车况. 当 $a_1 = 0.8$ 时, 主路为拥挤流, 先随着 a_2 的增加而减小, 此时入口匝道的流量却相应增大. 当 a_2 达到一个临界值时, 主路和入口匝道的流量均出现一个平



(a) $a_1 = 0.3$



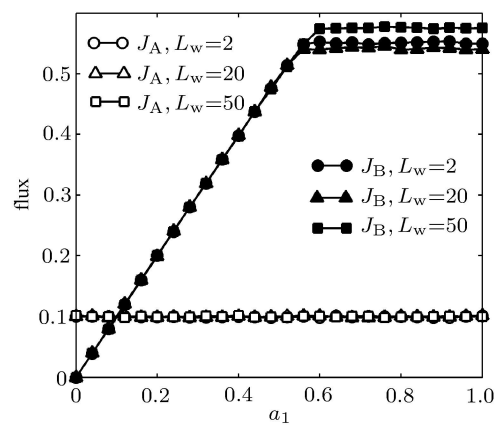
(b) $a_1 = 0.8$

图 3 不同 L_w 下的流量随 a_2 的变化曲线

Fig.3 The flux as a function of a_2 with different L_w

台值, 此时主路和入口匝道的交通流处于一个平衡状态, 即两个路段上的车流状态均为拥挤流. 由图 3(b) 可见, 当主路为拥挤流时, $L_w = 2$ 和 $L_w = 20$ 时的相应流量基本相等. 当 $L_w = 50$ 时, J_A 和 J_B 的平衡态值略有增大, 但不如主路为自由流态时对改善入口匝道流态那么明显. 这表明, 随着 a_1 的增加, 交织区长度的增加对系统流量的改善效果逐渐减弱.

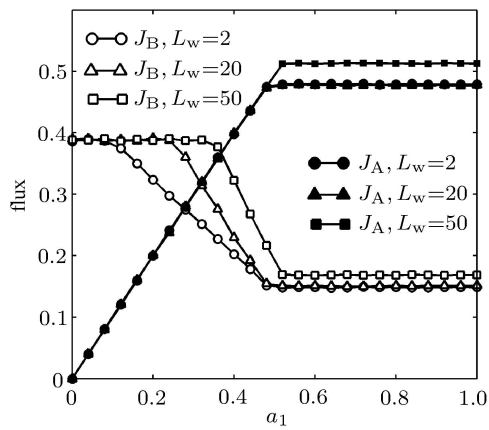
图 4 给出在给定 a_2 时, 不同 L_w 的情况下, 上游流量 J_A 和入口匝道 J_B 与 a_1 之间的关系. 当 $a_2 = 0.1$ 时, 入口匝道为自由流, 其流量不随 a_1 变化. 而主路的流量则先随 a_1 的增加而近似线性增大, 当超过一个临界值时, J_A 达到一个饱和值, 出现一个流量平台, 即该饱和流量基本保持一个常数



(a) $a_2 = 0.1$

图 4 不同 L_w 下的流量随 a_1 的变化曲线

Fig.4 The flux as a function of a_1 with different L_w



(b) $a_2 = 0.4$

图 4 不同 L_w 下的流量随 a_1 的变化曲线 (续)

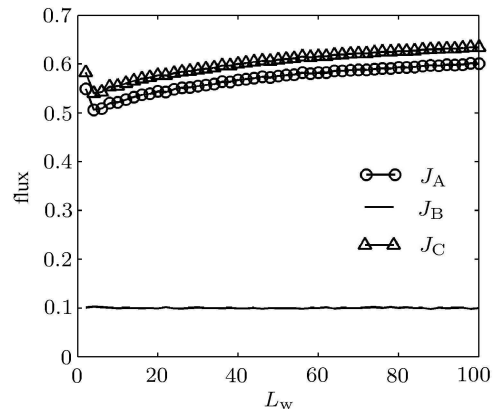
Fig.4 The flux as a function of a_1 with different L_w (continued)

值,说明主路的流态从自由流过渡到拥挤流的状态.由图 4(a)可见,随着 L_w 的增加,主路的饱和流量和临界 a_1 值略有增大,表明交织区长度的增加,对主干道上车况的改善不是很明显.当 $a_2 = 0.4$ 时,主干道流量较小时,入口匝道可以保持为自由流态,随着 a_1 的增大,入口匝道的流量开始下降,临界 a_1 的值随 L_w 的增加而增大.主路的流量先随 a_1 的增加而近似线性的增加.当超过一个临界 a_1 时,主路和入口匝道的流量均达到一个平台值,此时两路段的交通流处于平衡态.由图 4(b)可见,当入口匝道流量较大时,交织区长度的增加,会提高临界 a_1 和平台流量,对于入口匝道的车流更加明显.

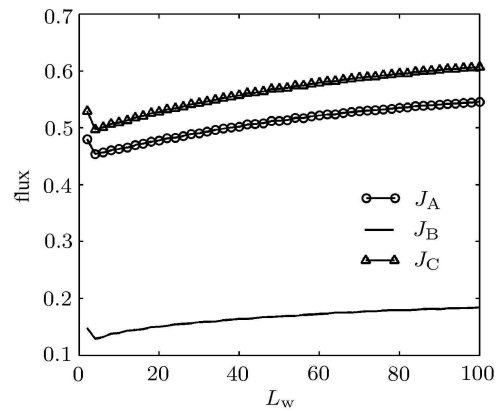
2.3 系统通行能力随 L_w 的变化曲线

下面考察系统通行能力与交织区长度 L_w 之间的关系.仍用 J_A , J_B 和 J_C 分别表示路段 A, B 和 C 的流量,并有 $J_C = J_A + J_B/3$.图 5(a)中,对应 $a_2 = 0.1$ 时的情况.这时,入口匝道 B 自由流,它的流量基本保持常量并约等于 a_2 .但路段 A 和交织区 C 流量不同:当 L_w 较小时,路段 A 流量和交织区 C 流量随 L_w 增大而减小,因为交织区长度虽然增加了,但也使车辆间的冲突变得复杂,这时候由于交织区长度还不足够长,容易形成交织车的等待换道,而等待换道的速度比交织车进入交织区的速度低,使得交织车进入交织区后,形成一定数量的交织车聚集以及通行车与交织车的相互混合,加剧交织车进入出口匝道的冲突.这种冲突势必影响通行车的行驶,也影响交织车本身的行驶.随着 L_w 继续增

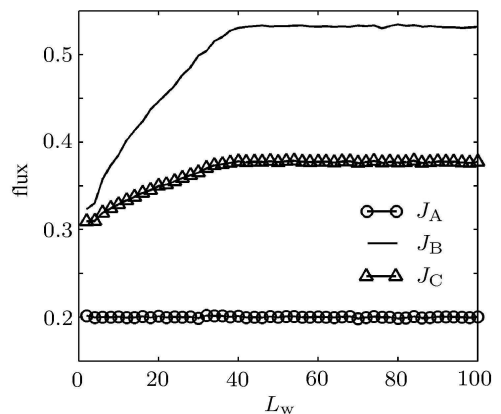
加,虽然交织车增多,但等待机会换道发生的频率减少,对通行车的影响随之减小以至于不断进入的交



(a) $a_2 = 0.1$



(b) $a_2 = 0.8$



(c) $a_1 = 0.2$

图 5 各路段流量与 L_w 之间的关系 (交织区的流量代表了系统通行能力)

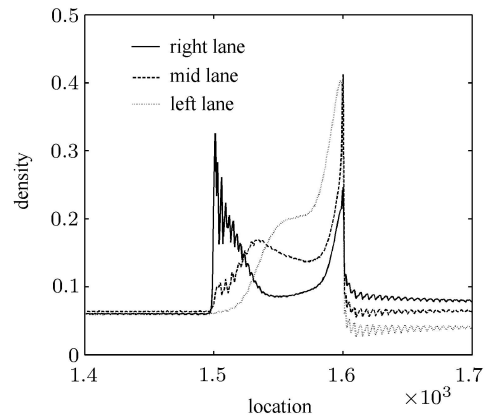
Fig.5 Flux versus L_w (the flux of weave section corresponds to the capacity of the system)

织车不会造成交织区的拥堵. 因而路段 A 流量和交织区 C 流量不断增加. 当 $L_w = 100$ 时, 交织区最大流量仍有缓慢增加的趋势. 图 5(b) 中, 对应 $a_2 = 0.8$ 时的情况, 与图 5(a) 中有些类似, 但入口匝道流量不再保持自由流, 其趋势与上游流量、交织区流量相同, 都是先减小后增加, 上游流量、交织区流量也有所减小. 这是由于交织区内的交织车不仅影响了通行车的通行效率, 同时也对入口匝道的高密度交织车进入交织区造成很大影响. 图 5(c) 中, 对应 $a_1 = 0.2$ 时的情况, 此时路段 A 为自由流. 随 L_w 的增加, 交织车和通行车的冲突减弱, 交织区流量随着入口匝道流量的增大而增大. 当 L_w 达到一个临界值时, 主路和入口匝道交通流达到平衡状态.

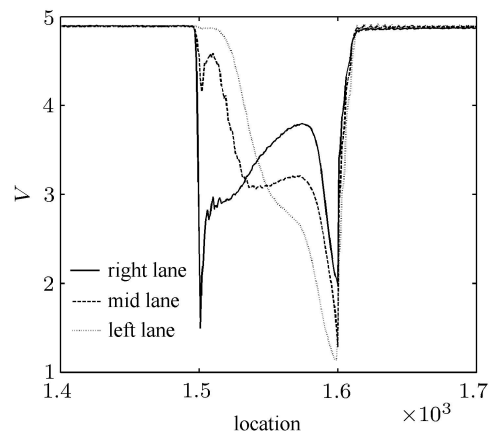
2.4 密度、速度和换道频率分布

下面考察 $L_w = 100$, $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.9$ 时的主干道上的车辆在交织区附近的密度和速度分布情况, 这时来自主道和上匝道流量大致相当, 匝道的车流量相当大. 由图 2 可推知, 当前所取参数范围处于相区 II, 此时主路处于畅行交通, 而入口匝道则为拥挤流的状态. 从图 6(a) 中可以看出, 在交织区的上游 3 个车道的密度基本一致, 下游的中间车道与上游车辆的平均密度相当, 而右车道则略高, 而下游左车道密度则略低. 这是由于交织车辆是经过左车道离开系统, 通行车辆为了避免拥堵, 而多倾向于右车道. 在交织区的下游, 3 条密度曲线有小幅度的振荡, 这是由于交织车在分流点附近强制换道的影响, 直行车在固定位置加速行驶离开交织区所形成的. 在交织区内, 由于交织车的最大速度小于通行车, 对通行车造成很大的阻碍, 3 个车道的密度都明显高于上游车道的平均密度. 在合流区附近下游, 车辆密度从右车道到左车道依次递减. 右车道在合流区处出现的峰值主要是受到入口匝道的影响, 交织车辆在合流处大多处于加速状态, 由于模型的离散化, 右车道合流处形成振荡的密度分布曲线. 在分流区附近上游, 车辆密度由右车道到左车道依次递增, 这主要是由于交织车在 3 个车道的分布引起的. 在分流点附近, 3 个车道均出现明显的峰值, 表明交织车辆通过出口匝道离开系统的行为造成了局部的拥堵.

图 6(b) 给出了相应的速度分布, 可见合流区和分流区附近的区域车辆速度明显降低, 但是仍处于缓慢运动状态. 对于此类交织而言, 3 个车道上都是交织车和通行车的混合车流, 而交织车相对于通行



(a) 密度分布
(a) Density distribution



(b) 速度分布
(b) Velocity distribution

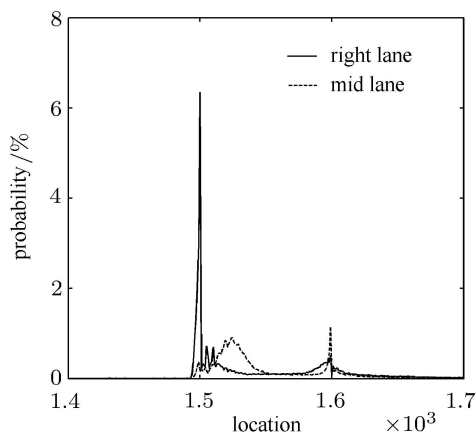
图 6 $L_w = 100$, $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.9$ 时主路上车辆密度和速度的空间分布

Fig.6 Density distribution and Velocity distribution of main road with $L_w = 100$, $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.9$

车而言是慢车. 与密度分布图相对应, 靠近合流点处速度由右车道到左车道依次增加, 在分流区则正好相反. 在交织区内, 车流的密度明显增大而车速明显减小. 可见在主路畅通和交织车流量很大的情况下, 当 $L_w = 100$ 时, 入口和出口匝道仍有较强的相互干扰, 不能把它们当做分离的匝道单独处理. 这与本文中交织车与通行车最大速度差别较大有关. 如果两种车最大速度接近, 虽然交织区内车辆密度和速度分布仍有上述趋势, 但是速度降低不明显. 另外当主路处于拥堵状态时, 由于瓶颈效应, 入口匝道的车流对于主路车流会有显著的影响. 上游车辆在交织区的上游形成拥堵, 出现交织区上游密度、交织区密度和交织区下游密度依次递减的情况. 此

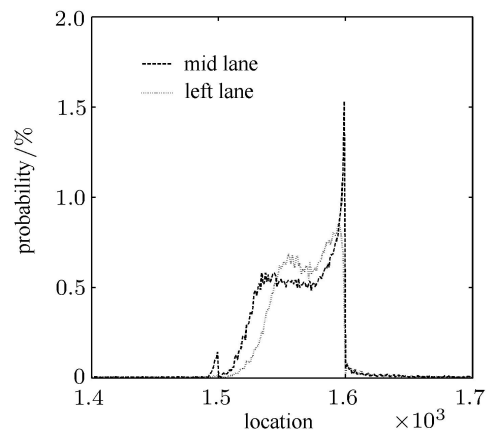
时入口匝道车流难以进入交织区,但是要进入出口匝道的交织车又会进一步加剧交通拥堵.因此在更大的交织长度下,入口匝道和出口匝道之间相互干扰明显,仍不能视为两个独立的匝道.

由于驾驶员必须进入适合他们达到出口的车道,在交织区需要频繁地变换车道行驶,因而交织区内车流的紊乱程度,超过了公路基本路段上正常情况^[1].这种频繁的车道变换是交织区的主要运行特征,因此必须研究交织区内各车道上的换道分布.图7是 $L_w = 100$, $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.9$ 时各车道的换道频率分布情况.图7(a)给出通行车在中间和右车道向左换车的频率.可以发现右车道的通行车在合流点处出现一个向左换道的最大值,这是由于入口匝道的交织车必须在右车道上的合流点进入主道,必然引起主路上右车道直行车向左换道,与实际的交通情况相符.合流点附近下游中间车道向左换道的峰值是由于右车道上交织车向右换道引起的,见图7(c).值得注意的是,在分流区附近,从图7(a)和图7(b)都可以观察到换道频率的峰值.表明交织车在分流点处频繁的强制性换道,会引起通行车向左右两侧的频繁换道,见图7(c).图7(b)中交织区下游内通行车出现较多的向右换道,这是由于交织车逐渐进入中间和左车道,通行车为获得更好的驾驶条件而向右侧换道.由图7(c)可见,在右车道上的交织车换道主要集中在合流点附近下游和分流点处.由于交织车流量较大,虽然有中间车道上一部分交织车已经换到左车道,仍有很大比例交织车需要在分流点处通过强制换道到达出口匝道,形成一个很大的换道频率峰值.由于分流区附近,交织车和通行车均发生频繁地换道,而频繁换道的车辆会占用更



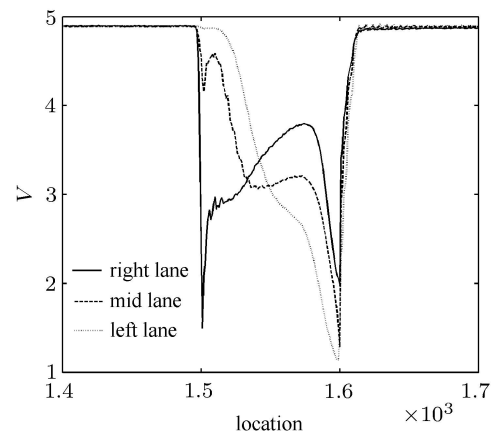
(a) 通行车向左换道频率

(a) Lane-changing frequency of passing cars from right to left



(b) 通行车向右换道频率

(b) Lane-changing frequency of passing cars from left to right



(c) 交织车向左换道频率

(c) Lane-changing frequency of weaving cars from right to left

图7 $L_w = 100$, $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.9$ 时主路上车辆的换道频率分布

Fig.7 Lane-changing frequency of cars in the main road with

$$L_w = 100, a_1 = 0.3, a_2 = 0.9$$

多的道路资源,从而加剧分流区的拥堵程度.在主路畅通的情况下,分流区的局部拥堵甚至比合流区更加严重,见图6(a).根据换道分布情况,在主路畅通的情况下,如果入口匝道流量较大,当交织区长度为100,入口和出口匝道仍有显著的影响,尚不能当做两个分离的匝道单独处理.

值得注意的是,当主路处于拥挤状态,则交织车很难在进入主路后很快换到中间车道上,因而在分流区处发生更加集中的强制换道,这将加剧分流区的交通拥堵,并不利于交织区上游交通拥堵的缓解.

3 结 论

本文针对一类C型交织区,即双侧交织区内车

辆的运动和换道特征进行了建模, 采用多车道元胞自动机模型进行了数值模拟, 分析了进车概率、交织区长度对系统的影响. 模拟结果表明随交织区长度的增加可以提高出现拥挤交通流时 C 型交织区道路通行能力. 进一步研究了在主路通畅, 而交织流量较大情况下的车辆密度、速度以及换道频率的空间分布, 可以发现在合流区和分流区附近会出现集中的换道, 并进而导致局部的拥堵和车速的明显降低. 当交织区长度为 100 时, 即使主路通畅, 如果入口匝道交织车流量较大, 入口和出口匝道之间仍然有较强的干扰. 通过对交织区进行建模和模拟, 可以方便地获得各种条件下, 尤其是极端情况下交织区系统通行能力变化的定量结果, 这是单纯依靠实测很难做到的. 另一方面, 必须借助于交通实测, 通过模型参数的标定, 并模拟出特定条件下的交通流特征, 如换道特征等, 这样才能在更一般的情况下得出定量上更加准确的模拟结果, 从而为交织区的设计提供可靠的参考依据.

参 考 文 献

- National Research Council. Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board (TRB), Washington D.C., 2000
- Awad WH. Estimating traffic capacity for weaving segments using neural networks technique. *Appl Soft Comput*, 2004, 4(4): 395-404
- Diah JM, Rahman MYA, Adnan MA, et al. Weaving section flow model at the weaving area of malaysian conventional roundabout. *J Transp Eng-Asce*, 2010, 136(8): 782-792
- Lertworawanich P, Elefteriadou L. Capacity estimations for type B weaving areas based on gap acceptance. *Traffic Flow Theory and Highway Capacity*, 2001, (1776): 24-34
- Lertworawanich P, Elefteriadou L. Generalized capacity estimation model for weaving areas. *J Transp Eng-Asce*, 2007, 133(3): 166-179
- Roess RP, Ulerio JM. Level of service analysis of freeway weaving segments. *Transport Res Rec*, 2009, (2130): 25-33
- Roess RP, Ulerio JM. Capacity of freeway weaving segments. *Transport Res Rec*, 2009, (2130): 34-41
- 赵靖, 白玉, 杨晓光. 基于回归分析的交织区通行能力模型. 城市交通, 2009, 7(5): 85-90 (Zhao Jing, Bai Yu, Yang Xiaoguang. A regression-based capacity model for weaving areas. *Urban Transport of China*, 2009, 7(5): 85-90 (in Chinese))
- 陈金川, 刘小明, 任福田等. 道路交织区运行分析研究进展. 公路交通科技, 2000, 17(1): 48-52, 56 (Chen Jinchuan, Liu Xiaoming, Ren Futian, et al. Overview of the research on the operation analysis of highway weaving sections. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2000, 17(1): 48-52, 56 (in Chinese))
- Bham GH. Intensity of lane changing at a freeway ramp weave section. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation, Chicago, IL, United states: American Society of Civil Engineers, 2006. 171-176
- Pulugurtha SS, Bhatt J. Evaluating the role of weaving section characteristics and traffic on crashes in weaving areas. *Traffic Inj Prev*, 2010, 11(1): 104-113
- 郭瑞军, 林柏梁. 环形交叉口交织区车流运行特性的研究. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(3): 29-34 (Guo Ruijun, Lin Boliang. Traffic operation performances at roundabout weaving sections. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(3): 29-34 (in Chinese))
- 雷丽, 董力耘, 宋涛等. 基于元胞自动机模型的高架路交织区交通流的研究. 物理学报, 2006, 55(4): 1711-1717 (Lei Li, Dong Liyun, Song Tao, et al. Study on the traffic flow of weaving section in elevated road system with cellular automaton model. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(4): 1711-1717 (in Chinese))
- Jia Bin, Li Xingang, Jiang Rui, et al. Traffic behavior around the weaving section in cellular automata model. *Int J Mod Phys C*, 2010, 21(3): 409-422
- Skabardonis A. Simulation of freeway weaving areas. *Traffic Flow Theory and Highway Capacity*, 2002, 1802: 115-124
- 陈小鸿, 肖海峰. 交织区交通特性的微观仿真研究. 中国公路学报, 2001, 14(z1): 90-93 (Chen Xiaohong, Xiao Haifeng. Micro-simulation study of the characteristics of waving area. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(z1): 90-93 (in Chinese))
- 狄宣, 张小宁, 张红军. 基于元胞自动机的快速路交织区建模仿真. 交通与计算机, 2008, 26(2): 23-26 (Di Xuan, Zhang Xiaoning, Zhang Hongjun. Traffic simulation of expressway transition area based on cellular automata. *Computer and Communications*, 2008, 26(2): 23-26 (in Chinese))
- 孙剑, 李克平, 杨晓光. 拥挤交通流交织区车道变换行为仿真. 系统仿真学报, 2009, 21(13): 4174-4178, 4182 (Sun Jian, Li Keping, Yang Xiaoguang. Simulation on lane-changing behavior under congested weaving sections. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(13): 4174-4178, 4182 (in Chinese))
- 熊胜辉, 李星毅, 施化吉. 基于元胞自动机的快速路交织区交通流仿真建模. 计算机应用, 2010, 30(2): 551-554, 570 (Xiong Shenghui, Li Xingyi, Shi Huaji. Traffic modeling and simulation of expressway weaving area based on cellular automata. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(2): 551-554, 570 (in Chinese))
- Nagel K. A cellular automaton model for freeway traffic. *J Phys I France*, 1992, 2(12): 2221-2229
- Jiang R, Jia B, Wu QS. The stochastic randomization effect in the on-ramp system: Single-lane main road and two-lane main road situations. *J Phys A-Math Gen*, 2003, 36(47): 11713-11723

22 Jia B, Jiang R, Wu QS. Traffic behavior near an off ramp
in the cellular automaton traffic model. *Phys Rev E*, 2004,

69(5): 056105

DOI: 10.6052/0459-1879-12-030

(责任编辑: 刘希国)

INVESTIGATION ON TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS AROUND A TYPE C WEAVING SECTION BASED ON CELLULAR AUTOMATON MODEL¹⁾

Jiang Jinsheng^{*,†} Dong Liyun^{*,†,2)}

^{*}(Shanghai institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China)

[†](Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy and Environment Engineering, Shanghai 200072, China)

Abstract The lane-changing rules are proposed on the basis of features of lane-changing behaviours in the two-sided type C weaving section. The multi-lane cellular automata model is adopted to investigate traffic flow in such a weaving section. The phase diagram is obtained by numerical simulation with different weaving lengths. It is shown that the weaving length has negligible effect on traffic states of the weaving section when traffic flows of both main road and on-ramp are free. However, the increase of weaving length can improve the traffic states of on-ramp when the traffic flow of main road or on-ramp is congested. Furthermore, the distributions of density, velocity and lane-changing frequency of vehicles are discussed in the case of free flow of main road and large on-ramp flux. It is found that lane-changing behaviours occur mainly on both merging and diverging areas and lead to local congestion correspondingly.

Key words traffic flow, type C weaving section, cellular automata, lane-changing behaviors

Received 6 February 2012, revised 16 April 2012.

1) The project was supported by the National Basic Research Program of China (2012CB725404), National Natural Science Foundation of China (10972135, 11172164), Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (11YZ12) and Shanghai Program for Innovative Research Team in Universities.

2) E-mail: dly@shu.edu.cn