

城市道路 U 形转向交通流特性模拟分析*

郭宏伟[†] 高自友 谢东繁

(北京交通大学交通运输学院系统科学所, 北京 100044)

(2010 年 6 月 25 日收到; 2010 年 9 月 12 日收到修改稿)

以 NaSch 模型为基础建立设置 U 形转向的路段交通流模型, 对其特性进行模拟分析. 结果表明, U 形转向路口对交通流影响显著, 会导致在较小进车概率时发生自由流状态到拥挤状态的相变, 相应的临界流量也随之降低. 设置双 U 形转向系统的相变、临界流量等交通流特性与单转向系统具有明显差异, 其系统效率较高. 在实际交通规划与管理时应避免设置单转向系统, 以减小 U 形转向的负面影响.

关键词: 交通流, 元胞自动机, U 形转向, 相变

PACS: 89.40.-w, 45.70.Vn, 05.70.Fh

1. 引言

交通问题已经成为影响城市发展的世界性问题. 为描述交通流所表现出来的复杂非线性现象, 如临界相变、迟滞等, 研究人员提出跟驰模型、元胞自动机模型 (cellular automation, CA)、流体模型、气体动力学模型等一系列模型^[1-2]. 其中元胞自动机模型因其算法简单、可有效地在计算机上进行模拟等优越性, 被广泛应用于交通流研究^[3-8].

基于 CA 的交通流模型除研究基本路段交通特性外, 还关注交叉口、匝道、收费站等交通瓶颈^[9-14]. 对交通瓶颈进行深入研究, 可以有效提高交通流运行效率, 缓解交通拥堵. 城市道路中 U 形转向 (通常称为车辆掉头) 是一种常见的交通组织形式, 除设置在交叉口外, 也会设置在一些路段中部以方便车辆行驶, 或者以右转加 U 形转向代替左转的方式来减少左转排队^[15]. 车辆在 U 形转向路口进行转向时, 需要利用对向车流的安全间隙以较慢速度完成, 这一过程会造成车流的延误, 使得 U 形转向路口具有明显的瓶颈效应. 文献^[15]对城市道路的 U 形转向路口的设置、交通特性和安全进行了详细分析. Combinido 和 Lim 对交叉口处右转加 U 形转向的交通组织方式进行模拟^[16], 验证了该系统存在自由流到拥堵流的相变, 并指出 U 形转向在

交通流量较低和车辆间相互影响较少时才能发挥有效作用. 文献^[17, 18]采用实测数据对交叉口处 U 形转向路口的通行能力进行分析, 获得 U 形转向路口对不同形式的城市道路产生的影响. Carter 等人对信号交叉口处设置 U 形转向后的交通影响和安全状况进行分析^[19]. Combinido 和 Lim 构建的元胞自动机模型基于右转加 U 形转向的交通组织方式, 未考虑路段中设置 U 形转向的情况, 该模型所表示的交通系统在实际交通中并非最常见的. 其他对 U 形转向的研究多侧重于转向通行能力, 相对于匝道、交叉口等交通瓶颈的研究非常有限, 加之多采用基于实测数据进行统计分析的方法, 往往无法系统地描述 U 形转向对道路交通流的影响及其自身特点. 因此, 本文以路段中部 U 形转向路口为研究对象, 建立基于 CA 的 U 形转向交通流模型. 通过计算机模拟, 定量分析 U 形转向对路段交通流特性的影响, 如流量分布规律以及对应的相图和时空图, 同时也对转向交通流的特征进行研究. 研究得出的结论能够为 U 形转向瓶颈点的管理与设计提供参考.

2. 模型

本研究构建了一个双向四车道道路系统, 如图 1 所示. 系统中包含直行和转向两种车辆, 转向车

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB705500), 国家自然科学基金 (批准号: 70631001, 70701004) 资助的课题.

[†] E-mail: hwguo. bjtu@gmail.com

辆通过内侧车道(B,C 车道)设在路段中部的 U 形转向点完成转向. 车道被划分为 L 个元胞, 每个元胞在每一时刻的状态为空或被一辆车速为 v 的车辆占据. 为精确刻画 U 形转向的交通流特性, 此处将元胞长度定为 3.75 m, 所有车辆均占用两个元胞. 取最大速度 $v_{\max} = 5$, 对应实际速度为 67.5 km/h. 设道路长度为 240 个元胞, 对应实际长度为 900 m,

并将道路分为四个部分(以 A,B 车道为例,C,D 车道与之相同): S1 和 S4 为自由行驶区域, 其长度分别为 87 个和 118 个元胞, 两种车辆采用相同的换道规则; S2 为强制换道区域, 长度为 30 个元胞, A 道内的转向车辆开始向 B 道换道, B 道内的转向车辆则禁止换道, 直行车辆仍然自由行驶、换道; S3 区域为转向区域, 长度为 5 个元胞, 转向车辆在此完成转向.

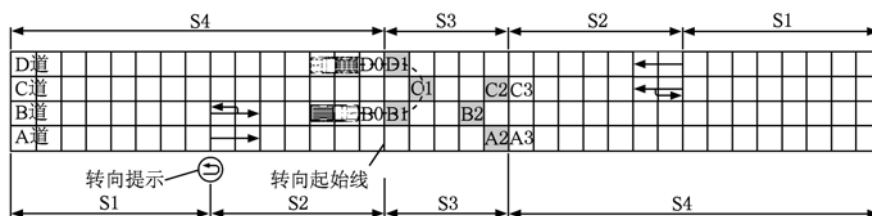


图 1 路段中设 U 形转向的交通系统示意图

2.1. U 形转向规则

系统中 B 道、C 道为直行和 U 形转向共用车道, A 道、D 道为直行车道. 此处以由左至右行驶车辆为例进行说明. 当转向车辆到达转向起始线后, 必须等 C 道和 D 道满足安全条件时才能进行转向, 以免发生事故. 当满足安全条件时, 转向车辆依次经过 B1, C1 和 D1 三个元胞并最终在 D 道完成 U 形转向. 考虑车辆转弯半径与速度的关系, 取转向速度 $v_u = 1$. 若以 L_{C1} (L_{D1}) 表示 C1 (D1) 元胞位置, 以 x_{Chead} (x_{Dhead}) 和 v_{Chead} (v_{Dhead}) 分别表示 C1 (D1) 元胞上游首车的位置和速度, t_{Chead} (t_{Dhead}) 为车辆到达 C1 (D1) 元胞的时间, 即

$$t_{\text{Chead}} = \frac{L_{C1} - x_{\text{Chead}} - 1}{\min(v_{\text{Chead}} + 1, L_{C1} - x_{\text{Chead}} - 1, v_{\max})},$$

$$t_{\text{Dhead}} = \frac{L_{D1} - x_{\text{Dhead}} - 1}{\min(v_{\text{Dhead}} + 1, L_{D1} - x_{\text{Dhead}} - 1, v_{\max})}.$$

当 C 道和 D 道同时满足安全条件 $t_{\text{Chead}} > 2$ 且 $t_{\text{Dhead}} > 3$ 时, 即转向车辆早于 C 道和 D 道上直行的首车到达 C1 和 D1 元胞, 车辆能够连续通过转向区域. 此时转向车辆依次占用 B1—C1, C1—D1 和 D1—D0 元胞完成转向, 并定义为完全转向. 此外, 如果仅 C 道满足安全条件而 D 道不满足时, 即 $t_{\text{Chead}} > 2$ 且 $t_{\text{Dhead}} \leq 3$ 时, 转向车辆进入 C 道并占用 B1—C1 元胞等待, 直到 D 道符合安全条件 ($t_{\text{Dhead}} > 2$) 才继续完成转向. 此时车辆需两次等待并分步完成转向, 因此定义为分步转向. 分步转向意味着转向难

度的增加, 转向车辆需要等待更长时间, 同时也造成直行车辆延误的增加.

2.2. 换道规则

根据实际道路情况以及交通规则, 系统中每个部分按照车辆性质设置不同换道规则. 以 x_n, v_n 表示第 n 辆车的位置和速度, d_n 表示第 n 辆车同前车 $n+1$ 之间的空元胞数量, 则 $d_n = x_{n+1} - x_n - l$, 其中 l 为车辆长度. 以 $x_{(n+1, \text{other})}$ 和 $x_{(n-1, \text{other})}$ 表示第 n 车在邻道上前车和后车的位置, $d_{(n, \text{fother})}$ 和 $d_{(n, \text{bother})}$ 表示第 n 辆车同邻道上前车和后车之间的空元胞数量, 则 $d_{(n, \text{fother})} = x_{(n+1, \text{other})} - x_n - l$, $d_{(n, \text{bother})} = x_n - x_{(n-1, \text{other})} - l$.

S1 区域内所有车辆为获得良好行驶条件而变换车道. 换道需同时满足动机条件和安全条件, 即

$$\begin{aligned} & \text{动机条件:} \\ & d_{(n, \text{fother})} > d_n \quad \text{且} \quad d_n < \min(v_n + 1, v_{\max}); \\ & \text{安全条件:} \\ & d_{(n, \text{bother})} > v_{n, \text{bother}}. \end{aligned} \quad (1)$$

如果上述条件均能满足, 则车辆以概率 p_c 换道.

S2 区域内, 转向车辆在获得转向提示后开始向 B 道换道, 应满足

$$\begin{aligned} & \text{动机条件:} \\ & [d_{(n, \text{fother})} \geq 1 \quad \text{或} \quad d_n = d_{(n, \text{fother})} = 0] \quad \text{或} \\ & [d_{(n, \text{fother})} \neq 0 \quad \text{且} \quad d_n - d_{(n, \text{fother})} \leq 2]; \\ & \text{安全条件:} \end{aligned}$$

$$d_{(n, \text{bother})} > \min[v_{(n, \text{bother})}, 3]. \quad (2)$$

如果转向车辆到达转向起始线后仍然无法进入 B 道,则在此等待直至 B1 和 B0 元胞为空时换入. 直行车辆则遵循自由换道规则.

S3 为 U 形转向区域,转向车辆按照转向规则进行转向,直行车辆则不变换车道. S4 区域内,所有车辆均自由换道,规则与 S1 区域相同.

2.3. 更新规则

除转向车辆在转向过程以外,所有车辆的状态都按照 NaSch 模型的演化规则进行速度和位置的更新^[3]. 更新规则为

加速:

$$v_n = \min(v_n + 1, v_{\max}); \quad (3)$$

减速:

$$v_n = \min(v_n, d_n); \quad (4)$$

随机减速:以概率 p ,

$$v_n = \max(v_n - 1, 0); \quad (5)$$

位置更新:

$$x_n = x_n + v_n. \quad (6)$$

3. 数值模拟

数值模拟采用开放边界条件:以 x_{head} 和 x_{last} 表示道路上的首车和尾车位置,当 $x_{\text{last}} > v_{\max}$ 时,一辆速度为 v_{\max} 的车辆以概率 p_{in} 进入元胞 $\min(v_{\max}, x_{\text{last}} - v_{\max})$ 并成为新的尾车;当 $x_{\text{head}} > L$ 时,首车以概率 p_{out} 驶出系统. 进入系统的车辆中转向车辆的比例为 p_{ut} ,转向车辆在转向点完成转向后成为直行车辆并最终驶出系统. 为消除暂态影响,每次模拟舍弃最初 10000 个时间步的结果,对后 50000 个时间步的结果进行统计. 统计速度时,首先对 t 时间步车道 i 上所有车辆速度求均值得到时刻速度均值 $\bar{v}_i(t)$,再求统计时段 T 内速度均值 $\bar{v}_i = \sum \bar{v}_i(t)/T$. 流量统计时,在每条车道设置 n 个虚拟探头,统计每个探头 t 时刻的流量 $\bar{q}_{ij}(t)$,则车道 i 在统计时段内的流量为 $\bar{q}_i = \sum [\sum_{j=1}^n \bar{q}_{ij}(t)/n]/T$. 考虑到 U 形转向产生的瓶颈效应,只对转向点上游路段进行流量统计.

数值模拟分两种场景进行. 场景一为单方向转向系统,仅 B 道车辆可以转向至 D 道;场景二为双向转向系统, B 道和 C 道上车辆均可实现转向^[15]. 考虑到实际交通状况以及简化模拟,假定所有车道的进车概率一致,车辆驶出车道的概率 $p_{\text{out}} = 1$,这种假设主要考虑城市道路系统中高峰时段道路

双方向上交通流量均较大的实际情况. 另外,根据驾驶行为特性,数值模拟时取随机减速概率 $p = 0.3$,换道概率 $p_c = 0.7$.

3.1. U 形转向对交通流的影响

U 形转向车辆对交通流的影响主要体现为进车概率 p_{in} 和转向比例 p_{ut} 对系统流量分布的影响. 图 2 为场景一中各车道流量分布. 可以看出,流量曲线上的转折点 ($p_{\text{in}}^c, p_{\text{ut}}^c$) 将交通流状态划分为自由流状态和拥堵流状态,该转折点为开边界条件下交通流状态转变点,即交通状态临界相变点^[16,20]. 随着进车概率 p_{in} 的增加, A 道的流量 q_A 先线性增加(自由流状态),当 p_{in} 大于临界值 $p_{A_{\text{in}}}^c$ 时,流量达到饱和值 q_A^c ,并基本保持稳定(拥堵流状态). B 道、C 道和 D 道的流量也具有类似的变化趋势,相应的临界进车概率为 $p_{B_{\text{in}}}^c, p_{C_{\text{in}}}^c$ 和 $p_{D_{\text{in}}}^c$,饱和流量为 q_B^c, q_C^c 和 q_D^c . 不同的是, A 道和 B 道在进车概率大于临界进车概率时,流量先减小,然后保持不变. 而 C 道和 D 道在进车概率大于临界进车概率后流量保持稳定. 随着转向比例 p_{ut} 的增加,流量曲线转折点对应的临界进车概率呈现减小趋势. A 道和 B 道在 $p_{\text{ut}} > 0.4$ 时临界进车概率保持不变,而 C 道和 D 道则在 $p_{\text{ut}} > 0.1$ 时临界进车概率即保持稳定. 当 $p_{\text{ut}} = 0.1$ 时,各车道的饱和流量关系为 $q_B^c < q_A^c < q_C^c < q_D^c$. 由此可以看出 U 形转向对交通流影响显著,成为诱发交通流相变的原因,直接导致转向车道(B 道)及其邻近车道(A 道)的流量明显下降.

下面对造成这种现象的原因进行分析. 当 p_{ut} 和 p_{in} 较小时, C 道和 D 道流量较小,转向车辆容易获得安全间距. 此时转向车辆对交通流造成影响较小,因此各车道流量均随 p_{in} 的增大而增大. 当 p_{in} 增大时, C 道和 D 道的流量随之增大,安全间距出现的频率减小,使得转向车辆开始在 B0 元胞上游排队等候,直接导致 B 道流量降低. 同时, A 道上有部分转向车辆因无法进入 B 道而在转向起始线附近等待,进而造成 A 道流量降低. 随着 p_{in} 进一步增大 ($p_{\text{in}} > 0.4$ 时), C 道和 D 道基本达到饱和,单位时间内完成转向的车辆数量趋于一致,转向车辆对各车道的影响也趋于稳定. 另外, p_{ut} 的增大造成 A 道和 B 道拥堵加剧,也会导致流量降低. 可以说, U 形转向的瓶颈效应增加了交通流相变的概率,使其在进车概率较小时即进入拥挤状态.

作为对比,场景二为双向转向系统,由于该系

统结构具有对称性,因此以车道 A 和 B 为例,其流量随 p_{ut} 和 p_{in} 的分布情况如图 3 所示. 可以看出,场景二中各车道流量随 p_{in} 的增加,也会出现临界进车概率 p_{Ain}^c 和 p_{Bin}^c ,并由此进入拥堵状态. 与场景一不同的是,当进车概率大于临界值时,各车道饱和流

量均保持不变. 此外,随着 p_{ut} 的增加, p_{Ain}^c 和 p_{Bin}^c 的值减小,对应的饱和流量 q_A^c 和 q_B^c 也在减小. 当 $p_{ut} > 0.2$ 时,临界进车概率和饱和流量均保持稳定. 当 p_{ut} 和 p_{in} 较大时,场景二中 A 和 B 车道的饱和流量要高于场景一,即 U 形转向对其影响相对较小.

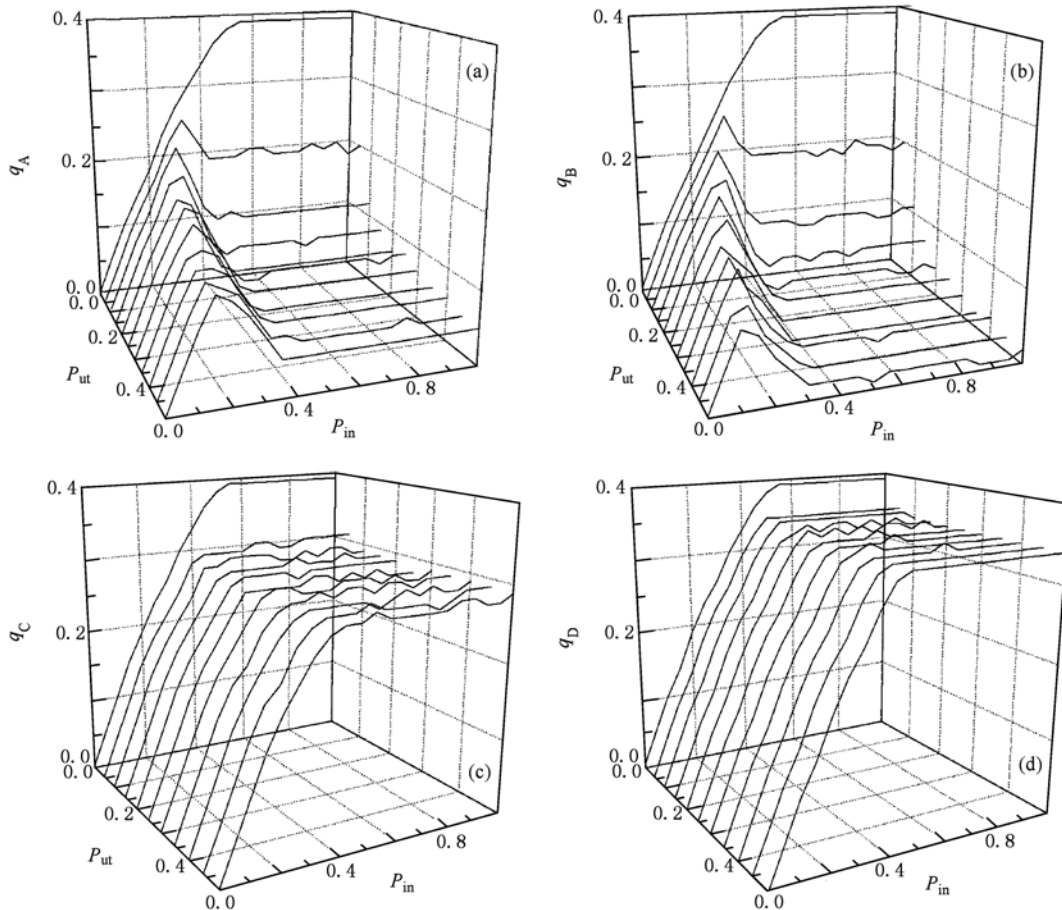


图 2 场景一中各车道流量分布 (a) A 道; (b) B 道; (c) C 道; (d) D 道

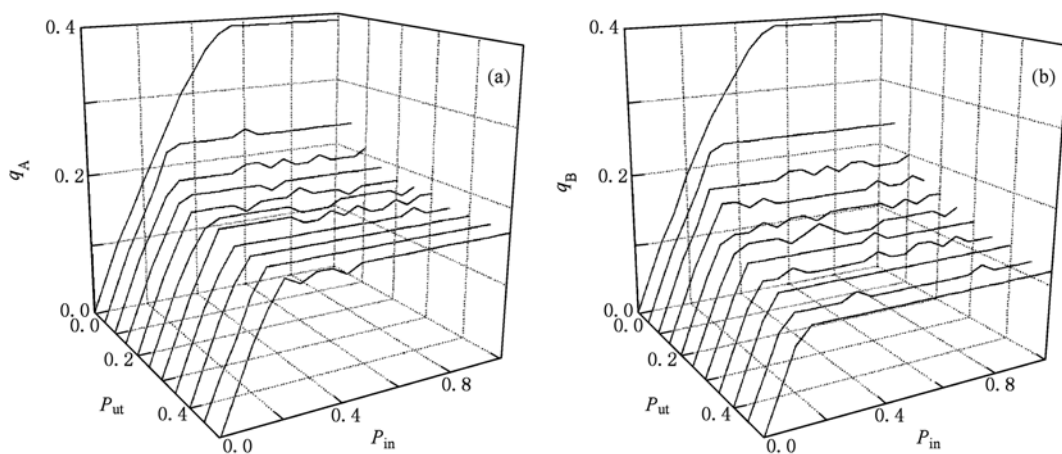


图 3 场景二中各车道流量分布 (a) A 道和 C 道; (b) B 道和 D 道

场景二的流量变化成因在 p_{in} 较小时 ($p_{in} < 0.2$) 同场景一类似. 但是随着 p_{in} 的增大, 两个转向点上流都出现排队, 造成各自所在车道流量降低, 限制了流量随 p_{in} 增加的速度, 使得转向车辆获得安全间距的可能性增加. 当 p_{in} 大于临界相变值时, 流量达到饱和而不再变化, 因而不同于场景一中流量先减小再稳定.

为理解不同 p_{in} 和 p_{out} 条件下各条车道的交通流状态, 图 4 和图 5 分别给出了场景一中各车道在自由流状态 ($p_{out} = 0.1, p_{in} = 0.15$) 和拥挤流状态 ($p_{out} = 0.3, p_{in} = 0.5$) 时的时空图. 自由流区域中, 各车道

状况相似, B 道在转向起始线附近出现短暂排队现象, 但队列很快消散, 而 C 道则受到分步转向车辆的阻挡也出现排队现象, D 道因完成转向车辆速度较低而导致部分车辆减速行驶. 总体上讲, 在自由流区域内转向车辆对主路交通产生轻微影响. 而在拥挤流区域, A 道和 B 道均出现严重拥堵, 特别是 B 道出现连续拥堵带, 并向上游传播, A 道也因转向车辆无法换道而出现拥堵. 另外, 转向车辆还对 C 道和 D 道产生影响: C 道因分步转向车辆的阻挡而产生拥堵, D 道也因完成转向车辆的速度较低而受到影响.

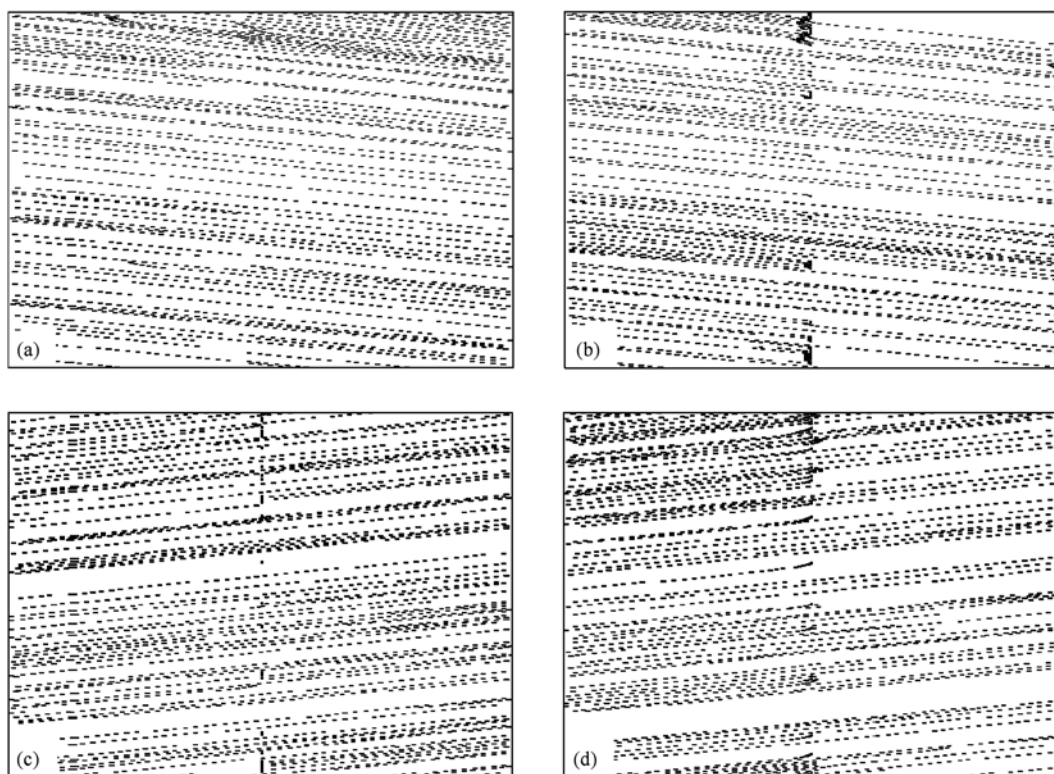


图 4 场景一中 $p_{out} = 0.1, p_{in} = 0.15$ 时系统各车道的时空图(时间演化方向为从上至下, (a) 和 (b) 位置演化方向为从左至右, (c) 和 (d) 位置演化方向为从右至左, 水平中心位置为转向点) (a) A 道; (b) B 道; (c) C 道; (d) D 道

作为对比, 图 6 和图 7 给出了场景二在自由流和拥挤流状态的时空演化情况. 图 6 所示的自由流状态时各车道交通流状况同场景一类似, 较明显的差别是场景二中 A 道会受到由 C 道转向的车辆影响, 在转向区域内出现短时排队, 但总体上未对 A 道造成明显影响. 图 7 所示的拥挤流状态中, A 道的拥堵带要小于场景一中的 A 道, 而 B 道中因等待转向形成的排队长度较小, 且队列消散速度要优于场景一. 通过对比可以看出场景二描述的系统因双方向都能转向而限制了直行流量, 使得完成 U 形转

向的难度有所降低, 进而缓解了转向车辆对交通流的影响. 特别是 p_{in} 和 p_{out} 都比较大时, 双转向系统瓶颈效应要小于单转向系统.

相图是研究交通流状态及其演化过程的重要途径和方法^[4,12-14,16,20]. 根据流量曲线上相变点 (p_{in}^c, p_{out}^c) 来区分各个相区, 直观地反映交通流状态同交通流变量间的关系, 从而表现整个系统的宏观信息. 图 8 绘出两种场景在相空间 (p_{in}, p_{out}) 上的相图, 以表示交通流状态随进车概率、转向比例的分布情况. 从图 8(a) 可以看出, 场景一中各车道交通

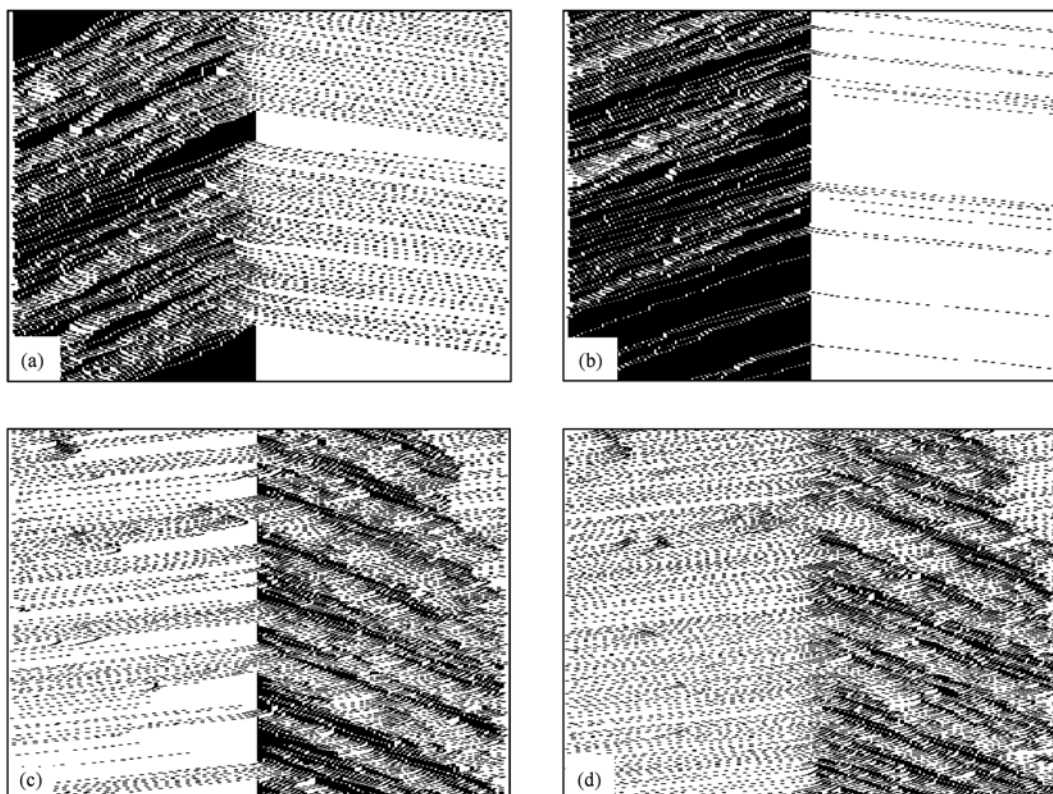


图5 场景一中 $p_{ut} = 0.3, p_{in} = 0.5$ 时系统各车道的时空图(其他说明同图4) (a)A道;(b)B道;(c)C道;(d)D道

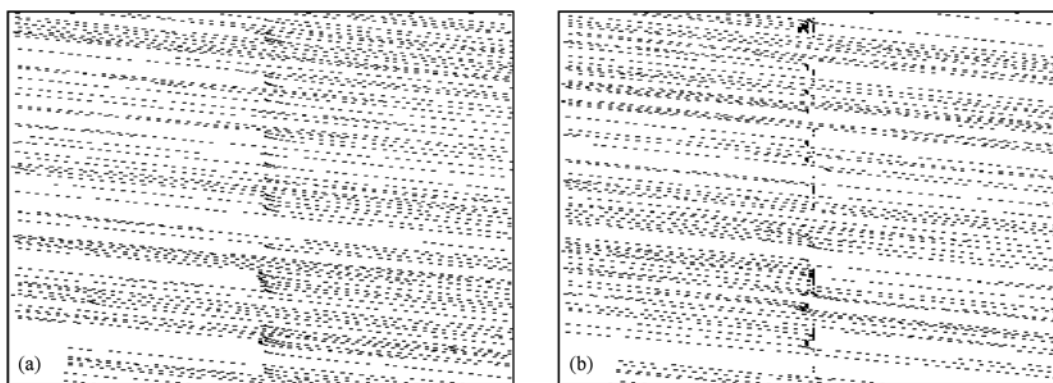


图6 场景二中 $p_{ut} = 0.1, p_{in} = 0.15$ 时系统各车道的时空图(时间演化方向为从上至下,位置演化方向为从左至右,水平中心位置为转向点) (a)A道;(b)B道

状态的相变点将相图划分为五个区域,不同区域中每个车道都存在自由流(F)或拥挤流(J)两种不同状态. 区域 I 中,所有车道均为自由流,即 F-F-F-F 状态,直行车流的车间距能够使转向车辆顺利通过,转向车辆和直行车流之间的相互作用很小. 区域 II 的状态为 F-J-F-F,即随着 p_{ut} 和 p_{in} 的增大,车道 B 由自由流转变为拥挤流,转向车辆开始在 B 道上排队,而其他车道仍处于自由流状态. 区域 III 的状

态为 J-J-F-F,车道 A 和 B 交通流状态因停止等待的转向车辆而变为拥挤状态. 区域 IV 中车道 C 的交通流也因受到转向车辆的影响而发生相变,此时各车道交通流状态为 J-J-J-F. 区域 V 中所有车道均为拥挤流,即 J-J-J-J. 通过对比图 8(a)中各区域的交通流状态,可以看出随着 p_{ut} 和 p_{in} 的增大,设置 U 形转向方向上的车道(A 道和 B 道)先由自由流转变为拥挤流,其他车道则后发生相变. 场景二的相图可

划分为三个区域,如图 8(b)所示. 相图中三个区域对应的交通流状态分别为 F-F-F-F, F-J-J-F 和 J-J-J-J,即受 U 形转向直接影响的 B 道和 C 道先由自由流转变为拥挤流,这一点和场景一是一致的. 尽管场景二中的 F-F-F-F 状态区域大于场景一,但并不

能因此判定场景二所描述的双瓶颈效应的影响比场景一所描述的单瓶颈效应严重,因为场景二在 F-F-F-F 状态时各车受转向车辆直接影响车道的流量高于场景一,时空图(图 5 和图 7)的对比也可以证实这一点.

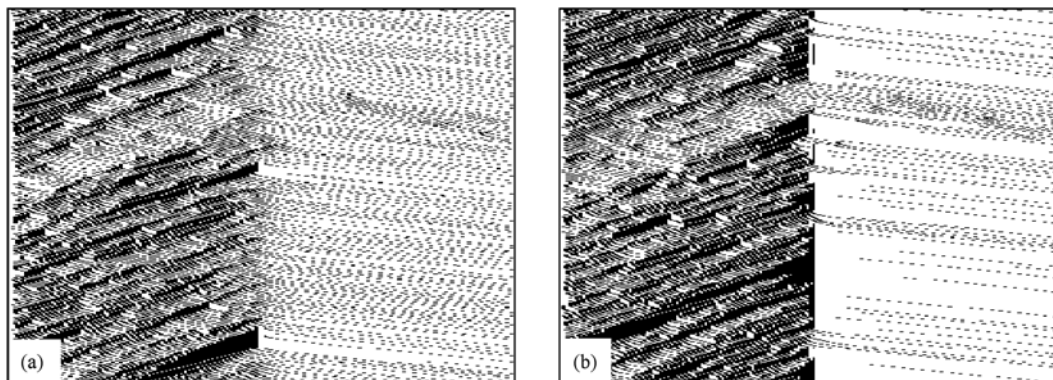


图 7 场景二中 $p_{in}=0.3, p_{in}=0.5$ 时系统各车道的时空图(其他说明同图 6) (a) A 道; (b) B 道

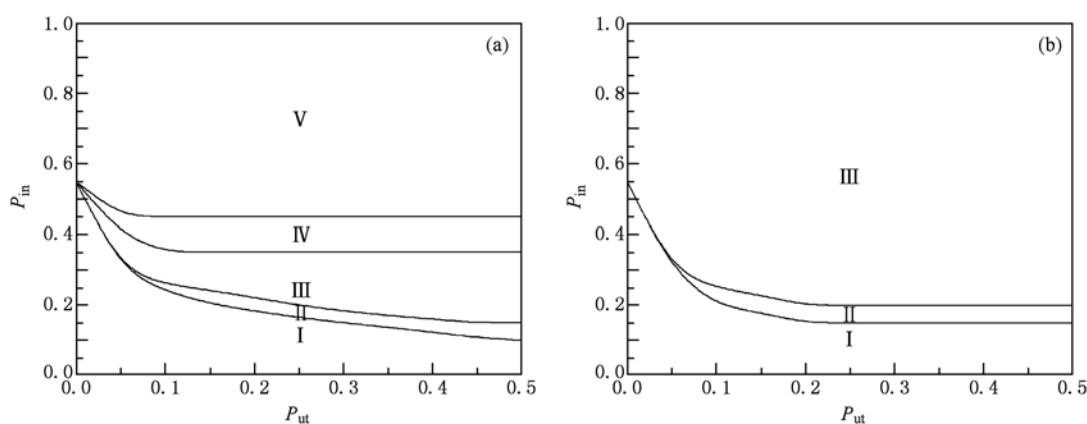


图 8 空间(p_{in}, p_{out})上的相图 (a) 场景一; (b) 场景二

3.2. 转向车辆交通流特性分析

本节将从转向流量、转向时间以及完全转向比例分布三个方面对 U 形转向交通特性进行分析. 图 9 为转向流量的分布情况. 图 9(a) 所示的场景一中,转向流量随 p_{in} 增大而增大,当 p_{in} 大于临界值时开始减小,并最终保持不变. 临界值分布范围在 0.15 至 0.25 之间,并且最大转向流量随 p_{in} 的增大而增大,当 $p_{in} > 0.4$ 时转向流量趋于稳定. 场景二的转向流量分布则呈现较大差异:转向流量随 p_{in} 增大而增大,当大于某临界值后(分布范围在 0.15 至 0.25 之间)保持不变,同时最大转向流量值也随 p_{in} 的增加而增加. 从转向流量对比可以看出,场景二

在进车概率较大时也具有稳定的转向流量,从而保证转向车道内排队的消散速度,缓解拥堵程度并减少拥堵时间. 从这一点上看,场景二优于场景一.

平均转向时间 T_{in} 能够反映系统转向效率. 这里将转向时间定义为转向车辆进入 B 道 S2 段直至完成 U 形转向这一过程所经历的时间,平均转向时间为统计时段内所有转向车辆的转向时间均值. 从图 10(a) 所示场景一的 T_{in} 分布情况可以看出, T_{in} 随 p_{in} 的增大而增大,并在 $p_{in} > 0.4$ 时保持稳定. 同时 T_{in} 也随 p_{out} 的增大而增大,且 p_{out} 影响显著. 图 10(b) 所示场景二的平均转向时间 T_{in} 也随 p_{out} 和 p_{in} 的增大而增大,并最终保持不变. 但是 T_{in} 开始保持稳定时的 p_{in} 值随 p_{out} 的增大而减小,从 0.4 减小至 0.2,即

系统进入 J-J-J 状态时的临界 p_{in} 值. 通过对比还发现当 $p_{in} < 0.1$ 时, 两种场景中 T_{ut} 基本一致, p_{in} 的影响不明显. 但随着 p_{in} 的进一步增大, 两种场景中 T_{ut} 的差异逐渐明显, 并且场景一中 p_{in} 的影响要远大于场景二. 造成这种差异的主要原因是场景一中 C

道和 D 道所在方向无转向车辆影响, 直行流量较大, 致使 B 道上车辆等待时间也一直增加, 进而总转向时间增加. 而场景二中因为双方向上均有瓶颈点的限流作用, 使得转向车辆等待时间受 p_{in} 和 p_{in} 的影响有限.

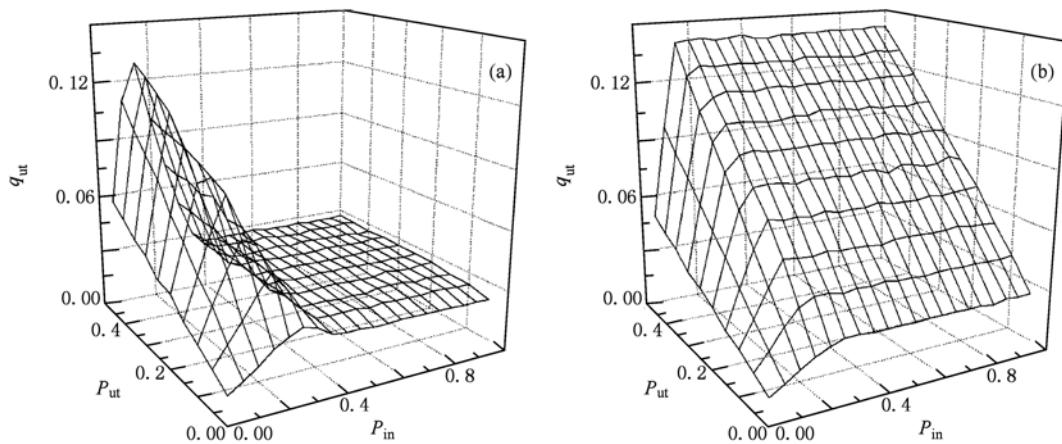


图9 转向流量分布图 (a) 场景一; (b) 场景二

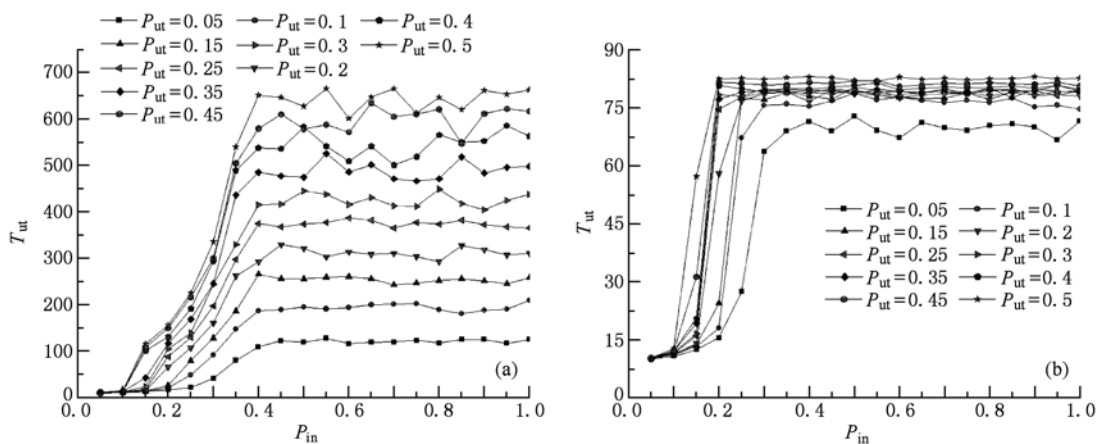


图10 平均转向时间分布 (a) 场景一; (b) 场景二

为进一步描述转向车辆交通特性, 还对完全转向车辆在转向车辆中所占比例 R_{ut} 的分布情况进行统计, 如图 11 所示. R_{ut} 越大, 表明连续完成转向的车辆比例越高, 完成 U 形转向的难度则越小. 在场景一中, R_{ut} 随 p_{in} 的增大而减小; 当 $p_{in} < 0.4$ 时, R_{ut} 随 p_{in} 的增大而减小, 当 $p_{in} > 0.4$ 时, R_{ut} 几乎为零, 即完全转向基本上不会发生, 车辆都需要分步完成转向. 在场景二中, R_{ut} 同样随 p_{in} 的增大而减小, 并在 $p_{in} > 0.2$ 时保持不变. 同场景一差异明显的是, 当 $p_{in} < 0.2$ 时, R_{ut} 随着 p_{in} 的增大而减小, 而 $p_{in} > 0.2$ 时则随 p_{in} 的增大而增大. 这种相反的趋势在 $p_{in} \geq$

0.2 且 $p_{in} > 0.15$ 时开始出现, 使 R_{ut} 呈现先减小后小幅增大, 最后保持稳定的分布特点. 从图 8(b) 可以看出, $p_{in} \geq 0.2$ 且 $p_{in} > 0.15$ 时各车道均处于拥挤流状态, p_{in} 进一步增加会加剧 U 形转向点上游路段拥堵, 导致直行流量下降, 同时转向难度也降低, 使得完全转向的比例有所增加. 即相图中区域 II 所表示的 F-J-J-F 状态的 R_{ut} 要略高于区域 III 所表示的 J-J-J 状态. 而场景一中只有一处起限流作用的转向点, C 道和 D 道的流量随 p_{in} 不断增大, 当出现图 8(a) 中 V 区所表示的 J-J-J 状态后, 在流量饱和的 C 道和 D 道上很难出现满足完全转向的安全条件. 该现象

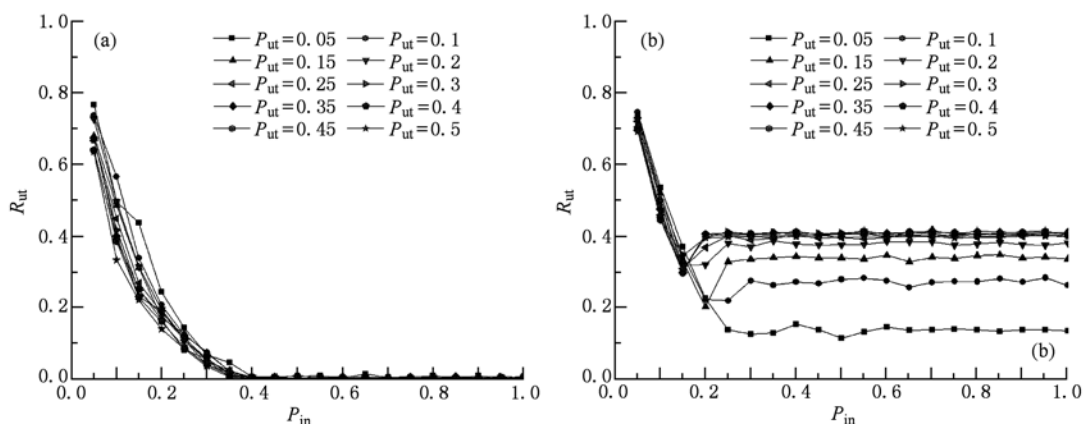


图 11 完全转向车辆比例分布 (a) 场景一; (b) 场景二

同图 10 所表示的现象均表明双向转向系统在 p_{ut} 和 p_{in} 均较大时的转向难度要低于单向转向系统.

需要注意的是,本研究中的随机减速概率 p 和换道概率 p_c 会对模拟结果产生一定影响,不同取值会改变临界相变点的值,但不会改变 U 形转向系统中临界相变等交通流现象,因此仅对最能反映驾驶行为特性的参数取值进行模拟. 另外,本研究采用双向进车概率均为 p_{in} 进行模拟,即双向车辆同时增大或减小. 实际中存在双向进车概率不相等的情况,此时进车概率较小方向上转向车辆数量较小,排队等候的转向车辆较少,并且对进车概率较大方向上转向车辆的影响也较少. 这种情况下 U 形转向系统的瓶颈效应有所减弱,因此研究采用了双方向车道上进车概率相同的假设条件.

4. 结 论

本文在 NaSch 模型的基础上,建立了城市道路

U 形转向交通流模型. 通过数值模拟和结果分析,发现 U 形转向点具有瓶颈效应,进车概率和转向车辆比例均成为诱发交通相变的重要因素. 随着进车概率和转向比例的变化,两种系统内各车道交通流均由自由流转变为拥挤流,并具有明显的相变临界点. 另一方面,两种场景所描述的转向交通流具有明显差异,双向转向系统的转向流量、平均转向时间以及转向难度均优于单向转向系统,尽管双向直行交通流都受到影响. 因此,在实际交通管理中,应尽量避免设置单 U 形转向结构,或者避免不同方向上两个 U 形转向点之间距离过大,从而减弱 U 形转向的负面影响. 实际交通中的 U 形转向组织涉及更多的因素,对交通流的影响也更为复杂,要进一步了解其内部规律,需要进行更深入研究,例如转向点间距的影响,安全间距的选择等.

[1] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199

[2] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067

[3] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* **12** 2221 (in France)

[4] Li S C, Kong L J, Liu M R, Zheng R S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2276 (in Chinese) [李盛春、孔令江、刘慕仁、郑容森 2009 物理学报 **58** 3014]

[5] Zheng Z Z, Wang A L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 489

[6] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3014 (in Chinese) [梅超群、黄海军、唐铁桥 2009 物理学报 **58** 3014]

[7] Jia B, Li X G, Jiang R, Gao Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6845 (in Chinese) [贾 斌、李新刚、姜 锐、高自友 2009 物理学报 **58** 6845]

[8] Bai K Z, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 040510

[9] Pan J X, Xue Y, Liang Y J, Tang T Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4169

[10] Tang T Q, Huang H J, Shang H Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050517

[11] Zhu L H, Chen S D, Kong L J, Liu M R, 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5674 (in Chinese) [朱留华、陈时东、孔令江、刘慕仁

- 2007 物理学报 **56** 5674]
- [12] Li X G, Gao Z Y, Jia B, Jiang R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060501
- [13] Song Y K, Zhao X M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5242
- [14] Lei L, Dong L Y, Song T, Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷 丽、董力耘、宋 涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]
- [15] FHWA, Publication No. : FHWA-HRT-07-033, 2007
- [16] Combinido J S L, Lim M T 2010 *Physica A* **389** 3640
- [17] Liu P, Lu J J, Cao B 2009 *Transp. Res. Rec.* **2130** 59
- [18] Liu P, Lu J J 2008 *J. Transp. Eng.* **134** 147
- [19] Carter D, Hummer J E, Foyle R S, Phillips S 2005 *Transp. Res. Rec.* **1912** 11
- [20] Popkov V, Santen L, Schadschneider A, Schütz G M 2001 *J. Phys. A* **34** L45

The influence of U-turn movement on the dynamics of traffic flow*

Guo Hong-Wei[†] Gao Zi-You Xie Dong-Fan

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

(Received 25 June 2010; revised manuscript received 12 September 2010)

Abstract

U-turn movement is a common form of traffic organization in urban streets. A traffic flow model for U-turn movement based on the NaSch cellular automaton model is proposed to simulate and analyze the dynamics of U-turn movement. The results indicated that the U-turn movement has significant effect on the traffic flow, and it is a typical bottleneck. The U-turn movement can cause phase transition at small probability of vehicle generation and the critical flow also decreases obviously. The system with two U-turn movement is different from the system with one U-turn movement in traffic features such as phase transition and critical flux. The one U-turn system has a good performance. It is suggested that the system with a couple of U-turns may help mitigate the negative effect of U-turn movement in traffic planning and management.

Keywords: traffic flow, cellular automaton, U-turn movement, phase transition

PACS: 89.40.-w, 45.70.Vn, 05.70.Fh

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 70631001, 70701004).

[†] E-mail: hwguo. bjtu@ gmail. com