

换道行为对交叉口进口道交通流的影响

程国柱¹, 王浩宇¹, 孙雪岩²

(1. 东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 威海市第一中学, 山东 威海 264200)

摘要: 不同类型驾驶人对城市道路信号控制交叉口车道排队长度的敏感性有差异, 进而导致选择换道的位置也不相同。为探究这种差异对交叉口进口道交通流的影响, 构建城市道路信号控制交叉口进口道元胞自动机模型, 探讨不同驾驶风格下换道行为对交叉口进口道各车道累计通过车辆数、平均车辆密度和平均运行速度的影响。结果表明: 保守型驾驶人比例越高, 各个车道的排队不均匀现象越明显; 不同驾驶风格比例对左转车道的通行效率影响较小、对直行车道的通行效率影响较大; 激进型驾驶人比例越高, 直行车道交通流受换道行为的影响越大、通行效率降低的幅度越大; 保守型驾驶人比例越高, 直行车道交通流受换道行为的影响越小, 对通行效率的影响也越小。最后指出, 通过采取措施引导驾驶人提前选择合适的行驶车道, 可有效减少拥堵区域换道行为的发生进而提升交叉口整体通行效率。

关键词: 交通控制; 元胞自动机; 换道行为; 交叉口进口道; 交通流; 驾驶风格

The Impact of Lane-Changing Behavior on Traffic Flow at Intersection Approaches

CHENG Guozhu¹, WANG Haoyu¹, SUN Xueyan²

(1. School of Civil and Traffic, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China; 2. Weihai No.1 High School, Weihai Shandong 264200, China)

Abstract: Different types of drivers exhibit various sensitivities to queue lengths at urban signalized intersections, leading to variations in their choice of lane-changing locations. To investigate the impact of these differences on traffic flow at intersection approaches, this paper establishes a cellular automaton model for signalized intersection approaches on urban roads. This model explores how lane-changing behavior under different driving styles affects the cumulative number of vehicles passing through each lane, average vehicle density, and average operating speed at intersection approaches. The results indicate that higher proportion of conservative drivers leads to more substantial uneven queuing phenomenon across lanes. The proportion of different driving styles, while having minor impact on the efficiency of left-turn lanes, significantly affects the efficiency of through lanes. As the proportion of aggressive drivers increases, the impact of lane-changing behavior on the traffic flow of through lanes intensifies with greater reduction of traffic efficiency. Conversely, a higher proportion of conservative drivers results in lower impact of lane-changing behavior on the through-lane traffic flow and smaller effect on traffic efficiency. Finally, this paper suggests that using measures to guide drivers in selecting appropriate lanes in advance can effectively reduce lane-changing behavior in congested areas and enhance the overall traffic efficiency at intersections.

Keywords: traffic control; cellular automaton; lane-changing behavior; intersection approach; traffic flow; driving style

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目“寒区道路交通系统低碳智能化与安全提升技术”(JD22A014)

作者简介: 程国柱(1977—), 男, 河北大成人, 博士, 教授, 交通工程系主任, 研究方向为道路交通安全、交通规划与设计, 电子邮箱 guozhucheng@126.com。

0 引言

作为城市道路网络的节点, 交叉口容易

出现较为严重的交通拥堵, 高峰时段车辆排队长度不断累加、车辆在队列中肆意穿插, 影响城市道路网络的整体运行效率。因此,

有必要针对城市道路交叉口研究驾驶人换道行为对进口道交通流的影响。研究发现,作为一种离散的交通流模型,元胞自动机能够捕捉交通流中的复杂非线性行为。在该模型中,每个元胞代表道路上的一个小空间单元,元胞之间的相互作用规则定义了车辆如何根据周围车辆的状态进行决策,从而形成车辆之间的交互。这些规则直接影响交通流的运行状态。通过调整规则,元胞自动机能够捕捉交通流的复杂动态,包括交通拥堵、交叉口排队与换道行为等。

既有元胞自动机相关研究主要集中于高速公路,对城市道路交叉口的研究相对较少。通过改进路内停车元胞自动机,张月等^[1]探究了巡游速度对道路通行能力和延误的影响规律。邹常丰等^[2]构建了无信号控制T型交叉口元胞自动机模型,分析不同驾驶行为情况下左转车辆对交叉口交通流的影响。在信号控制交叉口方面,袁定强等^[3]构建了T型交叉口元胞自动机,分析了U型转向车道布设对交叉口交通流的影响。周文海等^[4]构建了信号控制条件下细化的依赖于速度的随机慢化(Velocity-Dependent Randomization, VDR)模型,验证了信号控制策略对道路通行效率的影响。汪垚等^[5]构建了交叉口元胞自动机模型,分析不同性格驾驶人的驾驶行为对交叉口通行效率的影响。成卫等^[6]通过构建交叉口元胞自动机模型分析机非混行环境下车辆变道对交叉口通行能力的影响。

既有研究为理解交叉口交通流运行规律提供了有益启示,但很少有研究探讨驾驶人的换道行为对交叉口进口道交通流的影响。鉴于此,本文构建城市道路信号控制交叉口进口道元胞自动机模型,将目标车道排队长度对驾驶人换道意图的影响融入换道规则中,设定两种驾驶人类型,以探究不同驾驶

风格下换道行为对交叉口进口道交通流的影响,为规范驾驶人换道行为、优化交叉口信号控制策略和车道设置提供参考。

1 信号控制交叉口进口道元胞自动机模型运行规则

1.1 模型概述

本文研究对象为城市道路信号控制交叉口,以基于安全距离的元胞自动机模型作为基础模型,通过添加换道规则构建信号控制交叉口进口道元胞自动机模型。如图1所示,模型设置元胞长度为0.5 m,车辆长度4 m占用8个元胞;道路长度500 m,导流线长度25 m;车道数为4条,从道路中心线由内向外分别为左转、直行、直行、右转车道。

相比于高速公路,城市道路交叉口进口道的车辆行驶速度更低,强制换道行为更加频繁,而且车辆排队随信号周期的变化而产生和消散。当目标车道存在较长的排队队列时,驾驶人完成换道的操作难度和风险也会随之增加,排队长度越长,驾驶人寻找合适的换道时机和间隙越困难。因此,本文认为目标车道排队长度可能对驾驶人的换道意图和决策产生负面影响,并在现有换道模型研究的基础上加入排队长度作为影响因素,重新构建模型运行规则。

1.2 自由换道规则

自由换道指驾驶人为寻求更加舒适的驾驶环境而产生的换道行为,相较于强制换道的需求低,是非必要的换道行为。在交叉口进口道附近,车辆的主要目的是驶入其目标车道,如果盲目追求更高的行驶速度而变换其他换道,可能会导致车辆严重偏离目标车道而无法完成转向行为。为了避免这种情况,本文对自由换道规则进行规定:驾驶人只能向目标车道方向进行换道以避免严重偏离目标车道。当车辆进入目标转向车道时,可能存在多条有相同转向功能的车道供选择,此时引入自由换道规则还可以保证有相同转向功能的车道排队长度不会相差太多。模型自由换道概率取0.3。

元胞自动机中的速度、加减速速度与常规意义上的定义不同。元胞自动机中的车辆在某时刻的速度定义为车辆从该时刻到下一时刻向前移动的距离,加减速度的定义为车辆

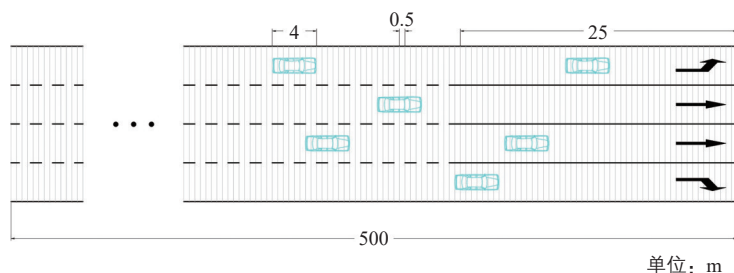


图1 城市道路信号控制交叉口进口道元胞自动机模型示意

Fig.1 Illustration of cellular automaton model for signalized intersection approaches on urban roads

从该时刻到下一时刻速度的变化值。车辆在当前车道行驶受到限制时会产生换道意图。本车与当前车道前车的间距小于本车当前的速度，且本车与目标车道前车的间距大于本车当前的速度时，表明目标车道前方更为宽敞、换道后可以更顺畅地行驶。为防止本车换道后与目标车道后车发生碰撞，需要确保本车与目标车道后车的间距大于目标方向后车当前的速度。计算公式为：

$$gap_{m,n} < \min(v_n(t) + a_n, v_{\max}), \quad (1)$$

$$gap_{m+dir,n} > \min(v_n(t) + a_n, v_{\max}), \quad (2)$$

$$gap_{m+dir,n-1} > v_{m+dir,n-1}, \quad (3)$$

式中： $gap_{m,n}$ 为本车与当前车道前车间距/元胞，其中 m 为车道编号， n 为车辆编号； $v_n(t)$ 为本车在 t 时刻的速度/元胞； a_n 为本车常规加速度/元胞； $v_{\max}$ 为本车最大行驶速度/元胞； $gap_{m+dir,n}$ 为本车与目标车道前车间距/元胞，其中 dir 为本车目标车道方向，从道路中心线由内向外对车道进行编号，目标车道在本车所在车道左侧则 $dir=-1$ ，目标车道在本车所在车道右侧则 $dir=1$ ； $gap_{m+dir,n-1}$ 为本车与目标车道后车间距/元胞； $v_{m+dir,n-1}$ 为目标车道后车行驶速度/元胞。

1.3 强制换道规则

排队时车辆间隙往往很小，无法满足车辆换道需求，极大加剧了驾驶人换道困难程度。本文认为换道行为不仅仅与车辆和交叉口的距离有关，还应考虑目标车道排队长度对驾驶人的影响。为了更好地研究驾驶人的换道行为，本文根据驾驶风格将驾驶人分为激进型驾驶人和保守型驾驶人两类。

1.3.1 换道概率

刘有军等^[7]认为车辆换道概率与车辆和交叉口停止线的距离有关，越靠近停止线，车辆换道概率越大，这种关系可以使用反比例函数描述。而魏英丽等^[8]提出，车辆在未到达交叉口停止线的一段距离内，只要满足换道安全条件都会选择换道，该研究将换道概率与车辆和交叉口停止线的距离关系调整为S形曲线。

1) 激进型驾驶人。

激进型驾驶人换道行为受目标车道排队长度影响较小，更倾向于在排队长度较短的车道行驶以减少延误、更快速地驶离交叉

口。该类驾驶人将最迟换道位置作为换道临界点，只要在最迟换道位置处满足换道安全条件，驾驶人一定会选择换道。本文选择S形曲线构建换道概率模型，激进型驾驶人换道概率计算公式^[9]为：

$$p_d^a = \frac{m_1}{1 + e^{\left(\frac{L - m_2(x + L_0)}{m_3} \right)}}, \quad (4)$$

式中： p_d^a 为激进型驾驶人强制换道概率； m_1 、 m_2 、 m_3 为调节参数； L 为道路总长度/元胞； x 为车辆与导流线末端间距离/元胞； L_0 为导流线长度即禁止变道区域长度/元胞。

2) 保守型驾驶人。

保守型驾驶人在换道过程中优先考虑完成换道行为的难易程度。由于目标车道排队中的车辆间隙较小，完成换道操作难度较大，因此该类驾驶人换道时表现为尽早驶入目标车道而非在进口道附近插入排队队列中。保守型驾驶人将目标车道排队队列末尾作为换道临界点，此时只要满足换道安全条件，驾驶人就会选择换道。保守型驾驶人换道概率计算公式为：

$$p_d^c = \frac{m_1}{1 + e^{\left(\frac{L - m_2(x + \max(L_{que}, L_0))}{m_3} \right)}}, \quad (5)$$

式中： p_d^c 为保守型驾驶人强制换道概率； L_{que} 为当前车道排队长度/元胞。

1.3.2 换道意图

1) 激进型驾驶人。

当目标车道排队长度明显高于所在车道排队长度时，激进型驾驶人很少选择换道而是倾向于在当前车道继续行驶以降低自身延误，只有当无法自由行驶时才会寻找时机插入目标车道。具体换道规则为：均匀排队状态下，当目标车道排队长度低于或接近车辆所在车道排队长度，车辆会根据换道概率判断是否进行换道(见图2a)。不均匀排队状态下，当目标车道排队长度明显大于车辆所在车道排队长度，车辆会根据当前位置与目标车道排队长度进行判断(见图2b)。若车辆当前横向位置尚未处于目标车道排队队列中，则会选择继续在当前车道驾驶；若车辆当前横向位置已经处于目标车道排队队列中，则会根据换道概率寻找时机进行换道。

2) 保守型驾驶人。

保守型驾驶人会考虑目标车道排队长度

对换道困难程度的影响,更倾向于在到达目标车道排队队列末尾前完成换道。具体换道规则为:若车辆当前横向位置尚未处于目标车道排队队列中,车辆会根据换道概率判断是否进行换道;若车辆横向位置已处于目标车道排队队列中,只要满足换道安全条件车辆就会进行换道(见图3)。

1.3.3 换道安全条件

考虑车辆在交叉口行驶速度较低且换道需求较高,本文适当降低了换道安全条件以提升换道成功率,只要车辆目标方向存在允许其完成换道的间隙即可满足强制换道的安全条件。换道安全条件公式为:

$$\begin{aligned} d_{m+dir,n-1} &\geq 0 \\ d_{m+dir,n+1} &\geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $d_{m+dir,n-1}$ 为本车与目标车道后车间距/元胞; $d_{m+dir,n+1}$ 为本车与目标车道前车间距/

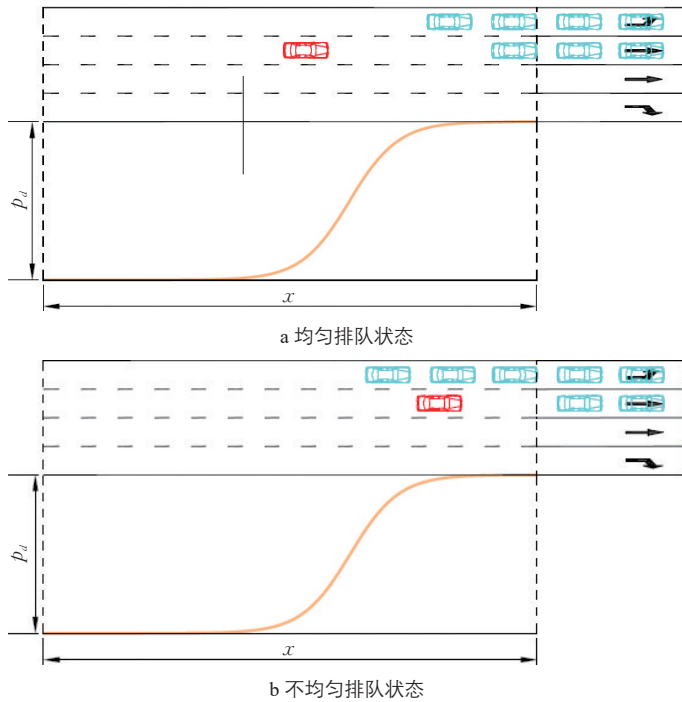


图2 激进型驾驶人换道示意

Fig.2 Illustration of lane-changing behavior of aggressive drivers

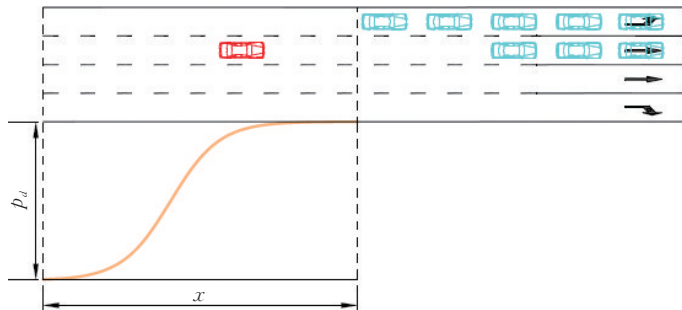


图3 保守型驾驶人换道示意

Fig.3 Illustration of lane-changing behavior of conservative drivers

元胞。

1.3.4 随机慢化概率

针对车辆产生换道意图但由于不满足换道安全条件而未能完成换道的情况,本文提出提升车辆随机慢化概率的策略,即通过降低换道失败车辆行驶速度延长其在道路上行驶的时间从而增加换道机会。模型设置随机慢化概率为0.25,换道失败车辆的随机慢化概率为0.9。提升随机慢化概率的规则为:

$$P_{slow} \rightarrow P_{highslow}, \quad (7)$$

式中: P_{slow} 为随机慢化概率; $P_{highslow}$ 为提升后的随机慢化概率。

1.3.5 自锁互相换道

为了应对模型运行过程中多辆待换道车辆停在最迟换道位置处而阻塞进口道导致无法正常通过车辆的情况,本文引入自锁互相换道机制。当具有换道意图的车辆在最迟换道位置等待时,如果其目标方向影响其换道的车辆也在等待换道且二者换道方向刚好相反,那么车辆可以在最迟换道位置等待时间超过3 s后与目标方向待换道车辆完成位置调换。自锁互相换道机制公式为:

$$\begin{aligned} t_{wait} &\geq 3 \\ dir_{m,1} + dir_{mE,1} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: t_{wait} 为本车在最迟换道位置等待时间/s; $dir_{m,1}$ 为本车(即 m 车道头车)与交叉口停止线间距离/元胞; $dir_{mE,1}$ 为 mE 车道头车与交叉口停止线间距离/元胞,其中 mE 为本车目标方向车道。

1.4 跟驰规则

跟驰规则是构建元胞自动机模型的基础,常见的元胞自动机跟驰模型有NaSch模型^[9]、巡航驾驶极限模型^[10]、慢启动TT模型^[11]、FI模型^[12]等。其中Gipps跟驰规则被广泛应用于元胞自动机模型并被证明具有较高的精度^[13],因此本文模型也选择这一跟驰规则。Gipps跟驰规则的演化分为以下4个步骤。

1) 安全距离计算。

安全距离指车辆为了避免前车采取紧急制动时发生碰撞而应与前车保持的间距,计算公式^[9]为:

$$x_{n-1}(t) + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} - l_{n-1} \geq x_n(t) + v_n(t)\tau_n + \frac{v_n(t)^2}{2b_n}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} gap_{safe,n} &= x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_{n-1} \\ &= v_n(t)\tau_n + \frac{v_n(t)^2}{2b_n} - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$v_{safe,n}(t) = -b_n \tau_n + \sqrt{b_n^2 \tau_n^2 + b_n \left\{ 2(x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_{n-1}) - \tau_n v_n(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{b_{n-1}} \right\}}, \quad (11)$$

式中： n 为本车； $n-1$ 为前车； l_n 为本车车身长度/m； $x_n(t)$ 为本车在 t 时刻的位置； τ_n 为本车驾驶人的反应时间/s； b_n 为本车常规减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)； $gap_{safe,n}$ 为本车与前车的安全距离/m； $v_{safe,n}(t)$ 为本车在 t 时刻的安全行驶速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

需要注意的是，安全距离计算公式中变量的单位是连续的，而元胞自动机中变量的单位是离散的，所以将该公式引入元胞自动机模型中时，需要将计算得到的 $gap_{safe,n}$ 和 $v_{safe,n}(t)$ 单位换算为元胞，并进行向下取整。

2) 速度变化规则。

当车辆与前车的间距大于安全距离时，车辆会加速行驶；当车辆与前车的间距等于安全距离时，车辆会匀速行驶，计算公式^[9]为：
$$v_n(t) = \min(v_n(t) + a_n, v_{\max}, v_{safe,n}(t), gap_n(t)), \quad (12)$$

$$v_n(t) \rightarrow \min(v_n(t), gap_n(t)), \quad (13)$$

式中： $gap_n(t)$ 为本车在 t 时刻与前车的距离/元胞。

当车辆与前车的间距小于安全距离时，车辆需要减速行驶，这时根据前车行驶速度存在两种减速规则。若前车速度不为0，则车辆遵从确定性减速规则^[9]，即

$$v_n(t) \rightarrow \max\{\min(v_{safe,n}(t), gap_n(t)), 0\}; \quad (14)$$

若前车行驶速度为0，车辆遵从安全减速规则^[9]，即

$$v_n(t) \rightarrow \max\{\min(v_{safe,n}(t), gap_n(t) - 1), 0\}. \quad (15)$$

3) 随机慢化规则。

为了模拟车辆在道路上行驶的不确定性，本文引入随机慢化规则。当车辆满足随机慢化概率条件时会以常规减速度进行减速^[9]，即：

$$\begin{cases} rand > P_{slow} \\ v_n(t) \rightarrow \max(v_n(t) - 1, 0) \end{cases}, \quad (16)$$

式中： $rand$ 为随机产生的概率。

4) 位置更新规则。

在确定所有车辆下一时刻的行驶速度后，令所有车辆按照自身速度行驶到达下一时刻位置^[9]，即

$$x_n(t) \rightarrow x_n(t) + v_n(t). \quad (17)$$

2 模型构建与初始状态分析

本文使用 MATLAB 编写元胞自动机模

型。为反映实际交通流运行情况，将单位时刻规定为1 s，并将速度和加减速单位换算为常规单位。模型采用开放边界，车辆从道路起始位置随机生成，并在驶离道路时消失。仿真参数具体设置为：车辆最大行驶速度 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，本车最大减速度 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，前车最大减速度 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，车辆常规加速度 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，车辆生成概率0.3，信号周期100 s，绿信比0.6。不同于大多数研究所模拟的车辆在换道区域才产生换道意图，本文认为驾驶人的换道意图在车辆生成时就已经产生，模型中设置车辆在生成区域选择换道的概率为0.7。为探究不均匀排队状态下不同类型驾驶人对交叉口进口道交通流的影响，将车辆选择左转车道为目标车道的概率适当调高。模型中设置车辆选择左转车道的概率为0.4，选择直行车道的概率为0.4，选择右转车道的概率为0.2。

本文设计了6组实验，涵盖驾驶风格比例的多种情况。具体设置包括激进型100%，激进型80%、保守型20%，激进型60%、保守型40%，激进型40%、保守型60%，激进型20%、保守型80%，保守型100%。通过实验全面考察不同驾驶风格比例对交叉口进口道交通流的影响。

仿真交叉口进口道排队状况时，在初始的3个信号周期(300 s)内封闭所有车道，只在道路起始点生成车辆，随仿真的运行生成不同驾驶风格比例的道路初始状态，以确保各车道初始状态的车辆平均密度相近。道路初始状态的车辆平均密度和各车道排队长度如表1所示。

仿真过程中，由于车辆的行为具有不确定性，初始状态下的排队长度并非严格呈线性关系。但仍然可以看出，当保守型驾驶人比例较高时，左转车道排队长度较长，直行的两条车道排队长度较短；相比之下，当激进型驾驶人比例较高时，各个车道排队长度相近。这是因为保守型驾驶人在发现目标车道(主要为左转车道)排队长度较长时会选择提前变道，由此出现各条车道排队不均匀的现象；而激进型驾驶人在行驶过程中主要考虑自身驾驶的舒适性，为了达到更高的行驶速度通常将换道行为延后，由此带来各车道排队长度相近，但存在大量待换道车辆排在队列中。

3 换道行为对交叉口进口道交通流的影响

3.1 累计通过车辆数

统计3个信号周期内进口道各车道的累计通过车辆数，以此分析不同驾驶风格比例下交叉口各进口道的通行效率。由图4可以看出，不同驾驶风格比例下左转车道与直行车道2的通行效率相近，而直行车道1的通行效率随驾驶风格比例变化差异较大。这主要是由于存在许多以左转为目标方向的车辆在直行车道1等待插入左转车道的排队队列中。信号灯转绿时左转车道上的车辆开始行驶，车队中出现换道间隙，此时左转车道仍可以保持较为连续的交通流运行，但直行车道1被待换道车辆阻塞，导致其通行效率显著下降。

3.2 平均车辆密度

统计不同驾驶风格比例下各进口道平均车辆密度随信号周期的变化。由图5可以看出，两条直行车道的平均车辆密度相近且明

显低于左转车道的平均车辆密度，这主要是因为本文引入了自由换道规则，使得两条直行车道的车辆平均密度相近。直行车道1更靠近左转车道，受换道概率比较高的影响，其平均车辆密度略高于直行车道2。总体上左转车道平均车辆密度随保守型驾驶人比例升高呈现上升趋势，直行车道平均车辆密度随保守型驾驶人比例升高呈现下降趋势。具体来看：

1) 在驾驶风格比例相同的情况下，当保守型驾驶人比例小于40%时，直行车道各个信号周期的平均车辆密度相近，均无降低的趋势。当保守型驾驶人比例大于40%时，其比例越高，直行车道的平均车辆密度随信号周期的推移有明显的下降趋势。3个信号周期中，分别在60 s，160 s，260 s时平均车辆密度达到各个信号周期内的最低值；当保守型驾驶人比例达到100%时，3个时刻的平均车辆密度分别为0.076辆·m⁻¹，0.056辆·m⁻¹，0.024辆·m⁻¹，降幅达到68.4%。

2) 选取260 s这一时刻观察不同驾驶风格比例下的平均车辆密度，发现左转车道平均车辆密度随保守型驾驶人比例升高呈现上升趋势，而直行车道平均车辆密度随保守型驾驶人比例的升高显著降低。当保守型驾驶人比例由0变化为100%时，直行车道的平均车辆密度由0.118辆·m⁻¹降至0.024辆·m⁻¹，降幅达到79.7%。这是因为随着保守型驾驶人比例升高，更多车辆可以在不影响其他车辆正常行驶的情况下完成换道，从而减轻了交叉口附近由于换道产生的拥堵现象，提高了车辆的通行效率。

3.3 平均运行速度

统计不同驾驶风格比例下各车道平均运行速度随信号周期的变化。由图6可以看

表1 道路初始状态的车辆平均密度和排队长度
Tab.1 Average vehicle density and queue length in the initial roadway state

项目	驾驶风格比例					
	激进型 100%	激进型 80%、保 守型20%	激进型 60%、保 守型40%	激进型 40%、保 守型60%	激进型 20%、保 守型80%	保守型 100%
车辆平均密度/ (辆·m ⁻¹)	0.129 0	0.127 5	0.125 0	0.125 5	0.126 0	0.127 0
排 队 长 度/ m						
左转车道	488	496	464	522	620	590
直行车道1	476	502	458	424	450	410
直行车道2	448	496	472	424	428	416
右转车道	458	392	402	392	366	402

注：靠近左转车道的直行车道为直行车道1，远离左转车道的直行车道为直行车道2。

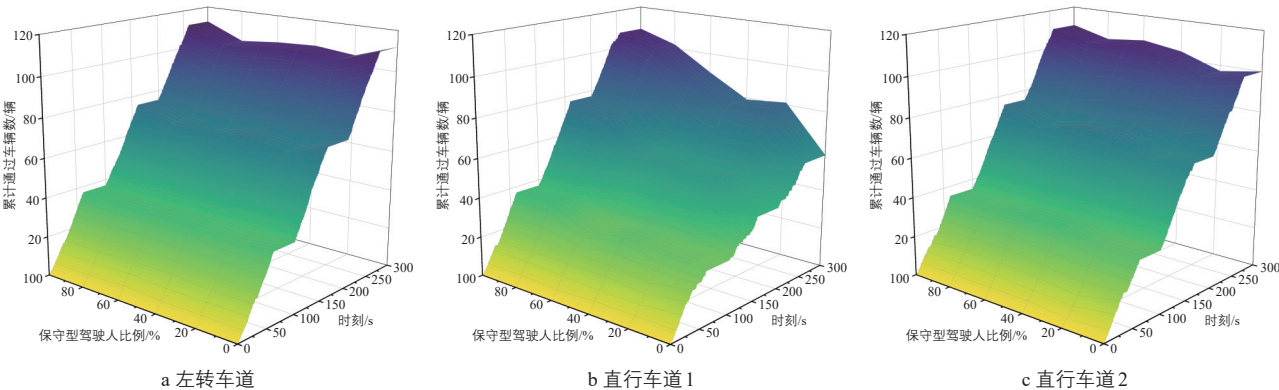


图4 交叉口进口道累计通过车辆数
Fig.4 Cumulative number of vehicles passing through intersection approaches

出，总体上左转车道平均运行速度较低，直行车道平均运行速度随保守型驾驶人比例升高呈现上升趋势。具体来看：

1) 在驾驶风格比例相同情况下，当保守型驾驶人比例小于40%时，直行车道3个信号周期的平均运行速度相近。当保守型驾驶人比例大于40%时，其比例越高，直行车道平均运行速度随信号周期的推移有明显的上升趋势。在3个信号周期中，分别在60 s，160 s，260 s时平均运行速度达到最高值。当保守型驾驶人比例达到100%时，3个时刻的平均运行速度分别为 $7.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $13.39\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $14.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，升幅达到102.9%。

2) 选取260 s这一时刻观察不同驾驶风格比例下的平均运行速度，发现直行车道的平均运行速度随保守型驾驶人比例升高显著上升，当保守型驾驶人比例由0变化为100%时，平均运行速度由 $3.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 升至 $14.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，升幅达到300.6%。这是因为激进型驾驶人大多会因提高自身行驶速度而选择排队长度更短的车道行驶，其换道行为更靠近交叉口停止线并停车等待换道时机，因而阻碍直行车道车辆正常行驶，导致道路产生阻塞。因此

激进型驾驶人比例越高，对直行车道平均运行速度影响越大。

4 结论

本文考虑目标车道排队长度对驾驶人换道行为的影响，将驾驶人分为激进型和保守型两类，制定相应换道规则，构建了城市道路信号控制交叉口进口道元胞自动机模型，分析不同驾驶风格下换道行为对交叉口进口道交通流的影响。主要结论如下：

1) 从初始化过程中模型运行数据可以看出，保守型驾驶人比例越高，各个车道排队不均匀现象越明显。不同驾驶风格比例对左转车道的通行效率影响较小、对直行车道的通行效率影响较大。

2) 激进型驾驶人比例越高，直行车道平均车辆密度越大、平均运行速度越低，即激进型驾驶人比例越高，其换道行为对直行车道影响越大、通行效率降低的幅度越大。相反，保守型驾驶人比例越高，直行车道通行效率受影响越小。

3) 保守型驾驶人比例不足40%、激进

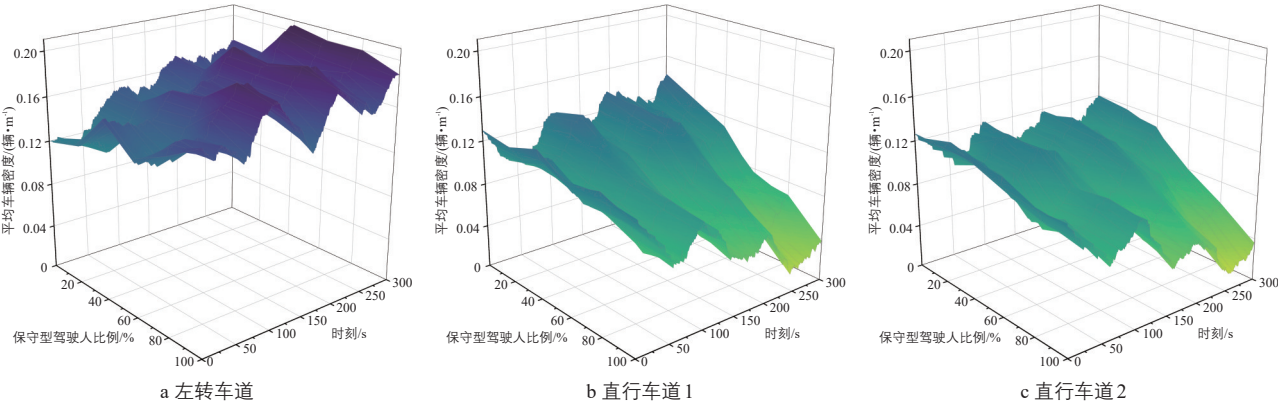


图5 交叉口进口道平均车辆密度
Fig.5 Average vehicle density at intersection approaches

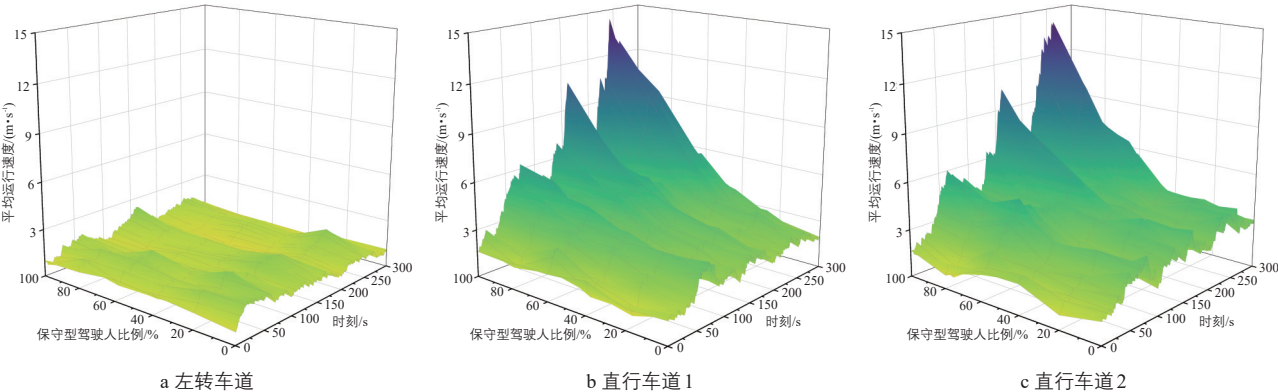


图6 交叉口进口道平均运行速度
Fig.6 Average operating speed at intersection approaches

型驾驶人比例超过60%时,直行车道主要受激进型驾驶人的影响,表现为平均车辆密度稳定在一个较高的数值,而平均运行速度在一个较低的数值波动;保守型驾驶人比例超过40%、激进型驾驶人比例低于60%时,直行车道平均运行速度和平均车辆密度开始受到保守型驾驶人显著影响,且保守型驾驶人比例越高,直行车道通行效率越高、拥堵现象越少。

基于以上研究成果,建议道路交通管理部门采取措施引导驾驶人提前选择合适的行驶车道,可以有效减少拥堵区域换道行为的发生、提升左转车道邻近的直行车道的通行效率,进而提升交叉口的整体通行效率。

参考文献:

References:

- [1] 张月, 孙立山, 孔德文, 等. 基于元胞自动机模型的路侧停车行为对交通流的影响研究[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(3): 154-162.
ZHANG Y, SUN L S, KONG D W, et al. Accessing the impacts of curb parking behavior on traffic flows through cellular automata models[J]. Journal of transport information and safety, 2022, 40(3): 154-162.
- [2] 邹常丰, 刘天阳, 胡宝雨. 无信号T型交叉口左转车辆驾驶行为对交通流的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 44-51.
ZOU C F, LIU T Y, HU B Y. Traffic flow influence of driving behavior of left-turning vehicles at unsignalized T-intersection[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2022, 41(2): 44-51.
- [3] 袁定强, 郭明旻, 张鹏, 等. 丁字路口车辆U形转向的元胞自动机模型[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(4): 595-605.
YUAN D Q, GUO M M, ZHANG P, et al. Cellular automaton model for U-turn vehicles at T-crossing[J]. Journal of Shanghai University (natural science edition), 2020, 26(4): 595-605.
- [4] 周文海, 李舒健, 董力耘. 非均匀路段交通流的元胞自动机模拟[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(4): 594-607.
ZHOU W H, LI S J, DONG L Y. Simulation of traffic flow on non-uniform road sections with cellular automaton model[J]. Journal of Shanghai University (natural science edition), 2022, 28(4): 594-607.
- [5] 汪焱, 柳冬, 程真, 等. 考虑驾驶人特性的多车道交叉口元胞自动机模型[J]. 公路, 2020, 65(8): 263-267.
- [6] 成卫, 周通, 李冰. 驾驶人变更车道对信号交叉口交通流的影响[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(3): 149-154.
CHENG W, ZHOU T, LI B. Influence of driver changing lane on traffic flow at signalized intersections[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (natural science), 2021, 46(3): 149-154.
- [7] 刘有军, 曹珊. 基于元胞自动机的强制换道模型研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 78-80.
LIU Y J, CAO S. Compulsory lane-changing traffic model based on cellular automaton[J]. Journal of transport information and safety, 2009, 27(3): 78-80.
- [8] 魏丽英, 王志龙, 吴荣华. 交叉口进口道换道行为研究及建模[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 196-200.
WEI L Y, WANG Z L, WU R H. Research and modeling of the lane-changing behavior on the approach[J]. Acta physica sinica, 2014, 63(4): 196-200.
- [9] 邱小平, 于丹, 孙若晓, 等. 基于安全距离的元胞自动机交通流模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 54-60.
QIU X P, YU D, SUN R X, et al. Cellular automata model based on safety distance[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2015, 15(2): 54-60.
- [10] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de physique I, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [11] NAGEL K, PACZUSKI M. Emergent traffic jams[J]. Physical review E, 1995, 51(4): 2909.
- [12] TAKAYASU M, TAKAYASU H. 1/f noise in a traffic model[J]. Fractals, 1993, 1(4): 860-866.
- [13] FUKUI M, ISHIBASHI Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1996, 65(6): 1868-1870.