

基于驾驶行为的城市道路车辆主观换道模型研究

刘敬华¹, 吉文超², 李 帅³(1.深圳市市政设计研究院有限公司,广东 深圳 518029;2.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽 合肥 230088;
3.河南凯瑞车辆检测认证中心有限公司,河南 焦作 454950)

摘 要: 车辆换道行为因其运行环境复杂,所涉及的交通因素众多,容易引起交通冲突,从而降低道路交通系统的安全性。对车辆换道行为的动态特性及其对车流运行的影响机理进行建模与研究,对提高交通系统的运行效率有重要意义。基于城市道路车辆换道行为的特征,改进了元胞自动机模型细化车辆换道过程;考虑驾驶员特性、车辆类型的影响,采用模糊推理理论描述驾驶员的换道决策,进而建立了城市道路驾驶员主观换道模型。通过将实测交通流数据与仿真输出数据进行对比,验证模型的有效性。结果表明,所建立的模型输出结果与实测数据的误差较小,说明模型具有一定的有效性。

关键词: 城市交通;车辆换道模型;元胞自动机;模糊控制理论;MATLAB 仿真

中图分类号: U491.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)07-0232-06

0 引 言

交通拥堵产生的原因可以从宏观和微观两个角度来分析。从宏观角度来看,交通需求大于道路供给,导致服务水平下降,交通流速度降低,引发交通拥堵;从微观角度来看,交通拥堵还与驾驶行为有关。车辆换道作为城市道路中最为常见的驾驶行为之一,对交通的运行效率同样会产生不可忽视的影响。

由于车辆换道过程的复杂性,大多数研究均从实车实验入手,通过分析实车数据的特性与规律,划分车道变换的不同形式及阶段。Worrall^[1]对在多车道路上的换道行为进行了宏观分析,通过在芝加哥高速公路上采集到的30组换道数据,研究了车辆的换道模式以及换道频率分布情况,并对驾驶员可接受的换道间隙进行了研究。Gipps^[2]提出了一种由驾驶员换道意图产生的决策模型。该模型主要模拟城市道路中车辆的换道行为,考虑了交通信号、障碍物以及车辆类型对驾驶员换道行为的影响。仿真验证结果表明,模型在各种城市道路条件下均有很好的模拟效果。Moridpour^[3]针对重型车辆提出了一种专用的模糊推理车道变换模型,模型验证结果表明,该专用的重型车辆模糊推理模型相比于不考虑车型的换道模型具有更高的可靠性。贾顺平^[4]对驾驶员在换道过程中的信息处理过程进行了分析,应用模

糊数学的方法,建立了基于模糊逻辑控制的车辆跟驰模型,仿真结果表明,所建模型能够有效反映驾驶员在跟车过程中的实际运行情况。Balal^[5]提出了一种二元模糊推理系统来模拟高速公路上车辆的变道行为,通过NGSIM数据对模型进行训练和测试,结果表明,该模型预测驾驶员的换道行为准确率达到了99.5%。

本文在考虑车辆之间相互影响的基础上,改进传统交通流元胞自动机模型,对车辆换道过程进行了细化,考虑了换道车辆与周围车辆的交互影响,并结合模糊推理理论对驾驶员换道决策过程进行了分析,最终建立考虑驾驶行为的城市道路车辆主观换道模型。

1 基于元胞自动机的交通模块构建

1.1 路段划分及元胞尺寸

以3车道为例,本文将宽3.5 m的车道划分成4条一维的网格,每个元胞宽0.875 m。小型车长度取6 m,大型车长度取12 m,将每个元胞长度取1.5 m。小型车和大型车宽度均取1.75 m。因此,小型车总共占据8个元胞,大型车总共占据16个元胞。以小型车为例,相关元胞划分如图1所示。

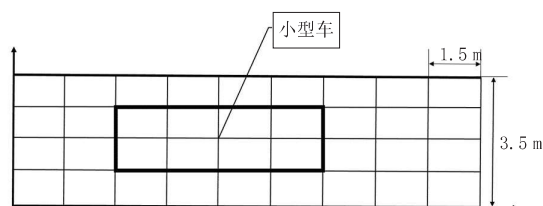


图1 车道及元胞车辆划分示意图

收稿日期: 2021-05-19

作者简介: 刘敬华(1977—),男,学士,高级工程师,从事道路交通规划设计工作。

1.2 速度设置

本文所建元胞自动机模型中规定用 $X_k(t)$ 表示第 K 辆车在 t 时刻的位置,用 $V_k(t)$ 表示第 K 辆车在 t 时刻的速度,结合城市道路车辆运行速度数据,模型中车辆的最大速度取 $V_{\max}=12$ 元胞/s(对应实际运行速度为 64.8 km/h), $V_k(t) \in [0, V_{\max}]$ 。相应的模型中车辆速度与实际速度的对应关系见表 1。

表 1 模型速度与实际速度换算表

模型速度 / (元胞·s ⁻¹)	实际速度 / (km·h ⁻¹)	模型速度 / (元胞·s ⁻¹)	实际速度 / (km·h ⁻¹)
0	0	5	27.0
1	5.4	6	32.4
2	10.8	7	37.8
3	16.2	8	43.2
4	21.6	9	48.6
10	54.0	11	59.4
12	64.8	13	70.2

2 基于驾驶行为的车辆换道模型构建

2.1 驾驶员主观换道行为定义

驾驶员主观换道不是必须要完成的,是驾驶员为了达到自身的期望速度或者接近期望速度,进行的车道变换,如图 2 所示。

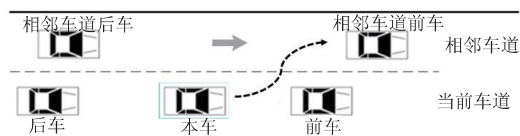


图 2 驾驶员主观换道示意图

驾驶员主观换道不仅是本车驾驶员个人换道意图的产生过程,也是本车驾驶员与周围车辆不断进行信息交互的过程:本车驾驶员产生换道意图→打开转向灯发送换道请求→后车驾驶员选择接受或者拒绝换道请求→本车驾驶员执行或放弃换道。下文有关驾驶员主观换道的建模也是基于这种与周围车辆进行信息交互的原则完成的。

2.2 驾驶员主观换道模型

2.2.1 主观换道意图模糊控制模型

2.2.1.1 输入变量及隶属度函数

驾驶员主观换道模糊控制器采用两个输入量、一个输出量的结构。输入量为本车换道后增加的驾驶利益(Driving Benefit) ΔD_b (见图 3),这是行驶利益层面;另一输入变量为本车与相邻车道后车的距离 D_r ,这是换道安全层面。输出变量为换道支持度 s 。图 4 为主观换道模糊推理换道结构图。

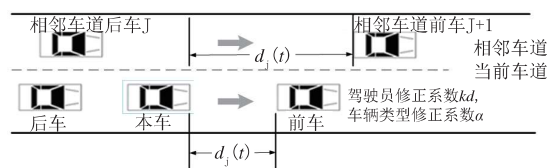


图 3 驾驶利益示意图

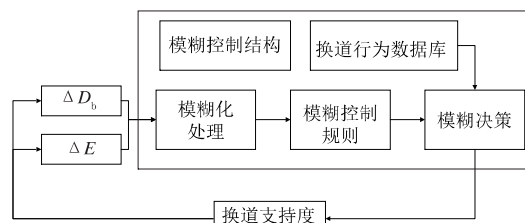


图 4 主观换道模糊推理换道结构图

(1) 驾驶利益表达式

本车与当前车道前车的间距越小,速度差越大,前车 $K+1$ 速度越低,当前车道的驾驶利益就越小;同理,本车在相邻车道上的投影与相邻车道前车的间距越大,速度差越小,相邻车道前车 $J+1$ 速度越高,相邻车道的驾驶利益越大。

本车道的驾驶利益可表示为:

$$D_{b\text{本车道}} = (v_{k+1}(t) - v_k(t) + d_i(t)) \cdot \alpha_1 \quad (1)$$

同理可得,相邻车的驾驶利益表达式为:

$$D_{b\text{相邻车道}} = (v_{j+1}(t) - v_k(t) + d_i(t)) \cdot \alpha_2 \quad (2)$$

式中: $v_k(t)$ 为本车道本车速度; $v_{k+1}(t)$ 为本车在本车道相邻前车速度; $v_{j+1}(t)$ 为本车在本车道上相邻前车的速度; $d_i(t)$ 为本车与本车道相邻前车的距离; $d_i(t)$ 为本车与本车道上相邻前车的距离; α_1 为前车 $K+1$ 的车型修正系数; α_2 为相邻车道前车 $J+1$ 的车型修正系数。

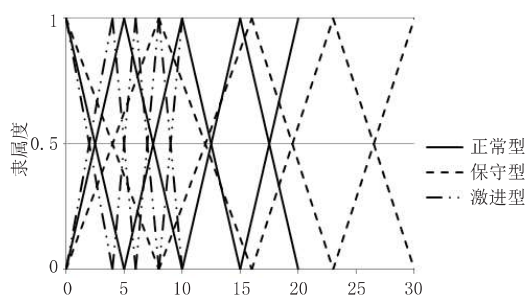
驾驶员换道意图的产生,往往是由于当前车道与相邻车道的驾驶利益差引起的,行驶效益差越大,本车驾驶员的换道需求越强烈。驾驶利益差可以表达为:

$$\Delta D_b' = D_{b\text{本车道}} - D_{b\text{相邻车道}} \quad (3)$$

引入驾驶员性格影响因子 k_d 修正车道效益差值。本车道与原车道的驾驶利益差 ΔD_b 的表达式为:

$$\Delta D_b = k_d \cdot \Delta D_b' \quad (4)$$

将正常型驾驶员的车道驾驶利益差值 ΔD_b 的论域范围设为 $\{0, 5, 10, 15, 20\}$,保守型驾驶员车道驾驶利益差值 ΔD_b 的论域范围设为 $\{0, 8, 16, 23, 30\}$,激进型驾驶员的车道驾驶利益差值的论域范围设为 $\{0, 4, 6, 8, 10\}$;模糊集为{小(S)、较小(RS)、中(M)、较大(RL)、大(L)}。不同类型驾驶员的驾驶利益差 ΔD_b 隶属度函数如图 5 所示。

图5 不同型驾驶员驾驶利益差 ΔD_0 隶属度函数图

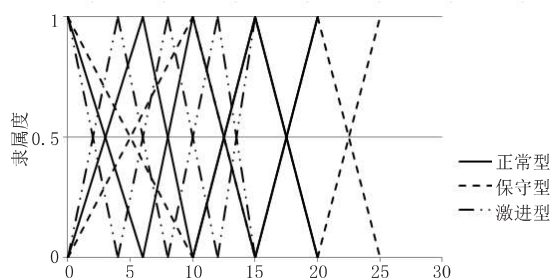
驾驶利益差会使得驾驶员产生换道意图,但能否换道还要取决于与相邻车道后车的距离是否满足安全间距的要求。如图6所示,正常行驶下的驾驶员处于道路中间行驶,产生换道意图后便开始向相邻车道移动(假设驾驶员此次意图向左换道),观察安全距离,由状态1至状态2体现了驾驶员产生换道意图后的操作。



图6 换道意图产生示意图

(2) 本车与相邻车道后车距离 D_r

当本车 K 的速度 $V_k(t)$ 大于相邻车道后车 J 的速度 $V_j(t)$ 时,本文假设驾驶员在换道过程中继续保持当前车速匀速行驶,并且横向位移速度始终为 1 元胞/s,本文中一个仿真步长 $T=1$ s,经历 3 个仿真步长 ($3T$) 后,本车完成换道。将本车与相邻车道后车距离 D_r 的论域范围取为 $\{0, 6, 10, 15, 20\}$,将激进型和保守型驾驶员的论域范围分别取为 $\{0, 4, 8, 12, 15\}$, $\{0, 10, 15, 20, 25\}$ 。模糊集为{小(S)、较小(RS)、中(M)、较大(RL)、大(L)}。不同类型驾驶员此种情况下本车与相邻车道后车距离 D_r 的隶属度函数如图7所示。

图7 本车与相邻车道后车距离 D_r 的隶属度函数 ($v_k(t) > v_j(t)$)

当本车 K 的速度 $V_k(t)$ 小于等于相邻车道后车 J 的速度 $V_j(t)$ 时,换道车辆在换道过程中被相邻车道后方车辆追尾的概率较大。为了能够实现换道目的而又不被追尾,本文假设在该种情况下本车驾驶员在换道过程中以纵向加速度 α 加速行驶 3 个仿真步长。这三个仿真步长依次为:产生换道需求后,第一个步长本车行驶至车道分界线处;第二个步长切入,即骑线占据本车道和目标车道;第三个步长换道完成退出本车道至目标车道。设本车驾驶员换道时的最小安全间距净距为 $S_{\min}$,如图8所示。

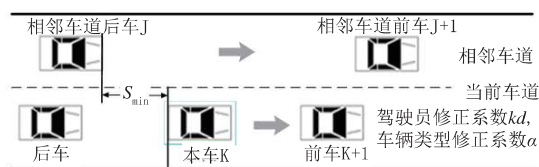


图8 最小安全距离示意图

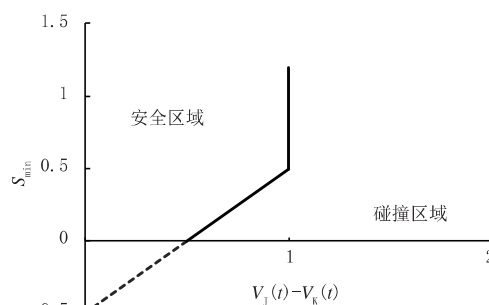
换道过程经历 3 个仿真步长 ($3T$): 在第 1 个仿真步长内,本车行驶至车道分界线处,此时本车的速度为 $V_k(t+1)=V_k(t)+1$,后车仍以当前车速继续行驶,速度为 $V_j(t+1)=V_j(t)$ 。在第 2 个和第 3 个仿真步长内,后车驾驶员以加速度 α_d 制动。结合实际道路行驶情况,本文中取本车的换道加速度 $\alpha=1$ 元胞/s² (对应的实际加速度为 1.5 m/s²),相邻车道后车的制动减速度 $\alpha_d=2$ 元胞/s² (对应实际的减速度为 3 m/s²)。

a. 若第一个仿真步长结束后,后车 J 的速度已经小于或者等于 K 的速度, $V_j(t) \leq V_k(t)+1$,即 $V_j(t)-V_k(t) \leq 1$,则本车可在保证安全的状况下顺利完成换道。因此只需考虑在第 1 个仿真步长下的安全距离。

第 1 个仿真步长内:

$$S_{\min 1} \geq V_j(t) \cdot T_r - (V_k(t) \cdot T + \frac{1}{2} \alpha T^2) \quad (5)$$

此种情况下,最小安全间距 $S_{\min}$ 和速度差 $V_j(t)-V_k(t)$ 的关系如图9所示。

图9 第1个仿真步长内最小安全间距 $S_{\min}$ 和速度差 $V_j(t)-V_k(t)$ 的关系图

第1个仿真步长结束后,元胞的更新规则为:

速度更新: $V_k(t+1)=V_k(t)+1, V_J(t+1)=V_J(t)$ 。

位置更新: $X_k(t+1)=V_k(t)+X_k(t), Y(t+1)=Y(t)+1, X_J(t+1)=V_J(t)+X_J(t)$ 。

b. 若第2个仿真步长结束后,后车J的速度已经小于或者等于K的速度。 $V_J(t)-2 \leq V_k(t)+2$, 即 $V_J(t)-V_k(t) \leq 4$ 。

因此只需考虑前2个仿真步长下的安全距离。

第1个仿真步长表达式如第a点中所示。

第2个仿真步长内:

$$S_{\min 2} \geq V_J(t) \cdot T_r + (V_J(t) \cdot T - \frac{1}{2} \alpha_d T^2) - (V_k(t) \cdot 2T + \frac{1}{2} \alpha (2T)^2) \quad (6)$$

此种情况下,最小安全间距 $S_{\min}$ 和速度差 $V_J(t)-V_k(t)$ 的关系如图10所示。

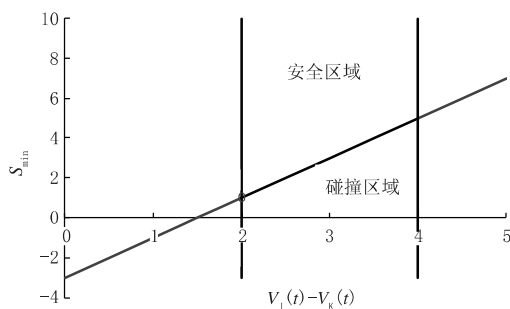


图10 第2个仿真步长内最小安全间距 $S_{\min}$ 和速度差 $V_J(t)-V_k(t)$ 的关系图

第2个仿真步长结束后,元胞的更新规则为:

速度更新: $V_k(t+2)=V_k(t+1)+a, V_J(t+2)=V_J(t+1)-\alpha_d$ 。

位置更新: $V_k(t+2)=V_k(t+1)+X_k(t+1), Y_k(t+2)=Y_k(t+1)+1, X_J(t+2)=V_J(t+1)+X_J(t)$ 。

c. 若第3个仿真步长结束后,后车J的速度已经小于或者等于K的速度, $V_J(t)-4 \leq V_k(t)+3$, 即 $V_J(t)-V_k(t) \leq 7$, 因此需考虑前3个仿真步长下的安全距离。同上:

第1和第2个仿真步长表达式如第b点中所示。

第3个仿真步长的表达式为:

$$S_{\min} \geq V_J(t) \cdot T_r + (V_J(t) \cdot 2T - \frac{1}{2} \alpha_d (2T)^2) - (V_k(t) \cdot 3T + \frac{1}{2} \alpha (3T)^2) \quad (7)$$

此种情况下,最小安全间距 $S_{\min}$ 和速度差 $V_J(t)-V_k(t)$ 的关系如图11所示。

第3个仿真步长结束后,元胞的更新规则为:

速度更新: $V_k(t+3)=V_k(t+2)+a, V_J(t+3)=V_J(t+2)-\alpha_d$ 。

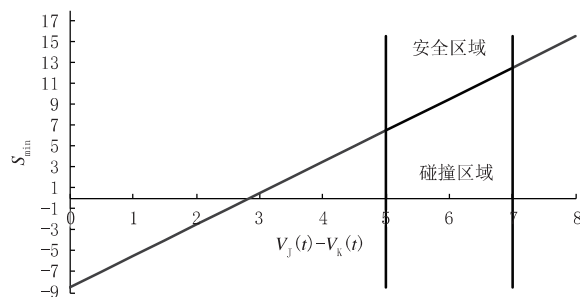


图11 第3个仿真步长内最小安全间距 $S_{\min}$ 和速度差 $V_J(t)-V_k(t)$ 的关系图

2) $-\alpha_d$ 。

位置更新: $V_k(t+3)=V_k(t+2)+X_k(t+1), Y_k(t+3)=Y_k(t+2)+1, X_J(t+3)=V_J(t+2)+X_J(t)$ 。

结合上述分析:当 $V_k(t)=0$ 元胞/s, $V_J(t)=1$ 元胞/s 时,最小安全间距 $S_{\min}=0.5$; 当 $V_k(t)=0$ 元胞/s, $V_J(t)=11$ 元胞/s 时(城市道路取车速最大值为60 km/h,对应的速度为11元胞/s), $S_{\min}=24.5$, 故 $S_{\min}$ 的取值区间在[1, 25]。

结合上述分析结果以及城市道路交通流实测数据,对于正常型驾驶员,将本车与相邻车道后车距离 D_r 的论域取为{1, 10, 20, 30, 40}, 对应的激进型和保守型驾驶员的论域分别为{1, 8, 15, 20, 25}, {1, 15, 30, 45, 60}。模糊集为{小(S)、较小(RS)、中(M)、较大(RL)、大(L)}。以正常型驾驶员为例,此种情况下本车与相邻车道后车距离 D_r 的隶属度函数如图12所示。

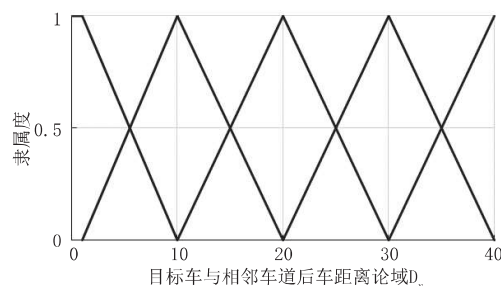


图12 本车与相邻车道后车距离 D_r 的隶属度函数 ($V_k(t) \leq V_J(t)$)

2.2.1.2 模糊控制规则

驾驶员换道意图模糊规则见表2。

表2 驾驶员换道意图模糊推理规则表

换道(Y/N)	车道驾驶利益值 ΔE				
	S	RS	N	RL	L
本车与相邻车道后车距离 D_r	S	N	N	N	N
	RS	N	N	N	Y
	M	N	N	Y	Y
	RL	N	Y	Y	Y
	L	Y	Y	Y	Y

2.2.2 相邻车道后随车决策分析

本节针对激进型驾驶员可接受的最小临界距离 S_{cr} 进行讨论。

结合上文讨论,当本车速度 $V_k(t)$ 大于相邻车道后车的速度 $V_j(t)$ 时,本车驾驶员的换道请求往往会被接受,因此只考虑本车速度 $V_k(t)$ 小于或者等于相邻车道后车的速度 $V_j(t)$ 的情况。此种情况下,同样按照本车匀速换道或者加速换道两种情况讨论,最小可接受临界距离 S_{cr} 为刚好不需要相邻车道后车激进型驾驶员刹车时所需的安全距离。

本车匀速换道条件下:

$$S_{cr} \geq v_j(t) \cdot T_r + v_j(t) \cdot 2T - v_k(t) \cdot 3T \quad (8)$$

此种情况下,最小可接受临界距离 S_{cr} 与速度差 $V_k(t) - V_j(t)$ 的关系如图 13 所示。

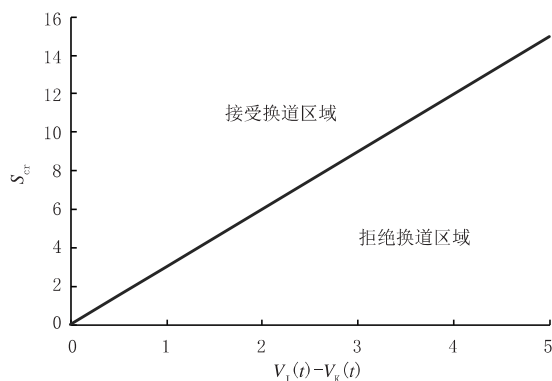


图 13 匀速换道下最小可接受临界距离 S_{cr} 和速度差 $V_j(t) - V_k(t)$ 的关系图

a. 本车加速换道条件下

$$S_{cr1} \geq v_j(t) T_r - (V_k(t) + \frac{1}{2} \alpha T^2)$$

$$S_{cr2} \geq v_j(t) \cdot T_r + v_j(t) \cdot T - (V_k(t) \cdot 2T + \frac{1}{2} \alpha (2T)^2)$$

$$S_{cr3} \geq v_j(t) \cdot T_r + v_j(t) \cdot 2T - (V_k(t) \cdot 3T + \frac{1}{2} \alpha (3T)^2)$$

式中: α 为本车 K 在换道过程中所采取的纵向加速度,取 $\alpha=1$ 元胞 /s²; T 为仿真步长, $T=1$ s; T_r 为驾驶员反应时间, $T_r=1$ s。

此种情况下,加速换道下最小可接受临界距离 S_{cr} 和速度差 $V_j(t) - V_k(t)$ 的关系如图 14 所示。

本车驾驶员最终是否成功换道的决策流程如图 15 所示。

3 模型仿真与验证

3.1 数据来源

本文通过将视频录像法采集的交通流数据作为模型输入的基础数据。

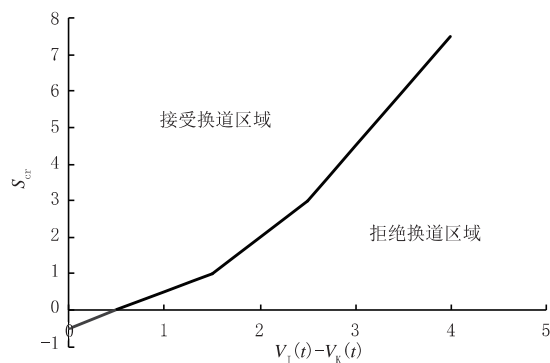


图 14 加速换道下最小可接受临界距离 S_{cr} 和速度差 $V_j(t) - V_k(t)$ 的关系图

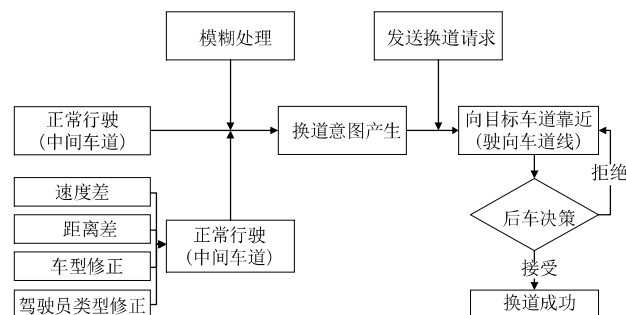


图 15 换道过程示意图

(1) 仿真中系统的初始流量按照实测数据输入,车型换算后的数据见表 3。

表 3 实际车型比例与仿真输入车型比例

时段	实际车型比例			仿真输入车型比例	
	小型车	中型车	大型车	小型车	大型车
7:00-7:05	288	5	8	288	12
7:05-7:10	302	6	8	302	13
7:10-7:15	307	4	9	307	12
7:15-7:20	315	4	5	315	8
7:20-7:25	316	6	9	316	14
7:25-7:30	322	5	8	332	12
7:30-7:35	335	6	4	335	9
7:35-7:40	344	5	4	344	8
7:40-7:45	338	4	6	338	9
7:45-7:50	331	4	6	331	9
7:50-7:55	315	3	8	315	11
7:55-8:00	312	6	5	312	10

3.2 仿真结果分析

3.2.1 流量输出结果分析

通过将仿真输出结果与流量输出结果进行对比分析,并计算两种情况下的最大交通流量、平均交通流量的误差,以此验证所建立的驾驶员主观换道模型的有效性。

由图 16 可以看出,仿真初期系统输出的交通流量要低于实际的交通流量,这是由于仿真开始一

段时间,系统还处于不稳定的状态。200 s 之后,系统逐渐趋于稳定,输出的流量与实际的流量差别较小,且总体趋势一致。仿真输出的最大交通流量为 360 veh/5 min,观测时间段内实际的交通流量为 351 veh/5 min,误差为 2.78%;仿真输出系统的平均交通量为 323 veh/5 min,观测时间段内实际的平均交通量为 335,误差为 6.5%。说明系统对交通流量的仿真与实际的拟合情况较好。

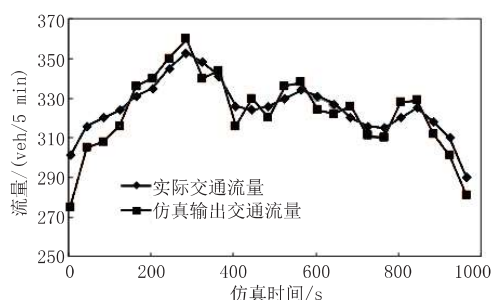


图 16 仿真输出结果与流量输出结果对比分析

3.2.2 换道次数与交通流量对比分析

通过将仿真输出的换道次数与实际输出的结果进行对比分析,并计算两种情况下的最大换道次数、平均换道次数的误差,以此验证所建立的驾驶员主观换道模型的有效性。

由图 17 可以看出,同样流量下仿真系统输出的换道次数值要高于实际的换道次数,可能是因为道路实际交通环境所致。系统在进行仿真时只考虑了车型因素和驾驶员特性因素,而在实际的驾驶过程中车辆受到诸多因素的影响(如车道宽、路面条件等),这可能导致实测换道次数的值要低于系统输入的值。数据对比方面:实测换道次数在 29~58 次/5 min,平均值为 44 次/5 min;仿真输出换道次数在 24~64 次/5 min,平均值为 48 次/5 min。系统仿真误差为 9.1%,可以说明所建换道模型的有效性。

4 结论

本文在传统元胞自动机换道模型的基础上对元

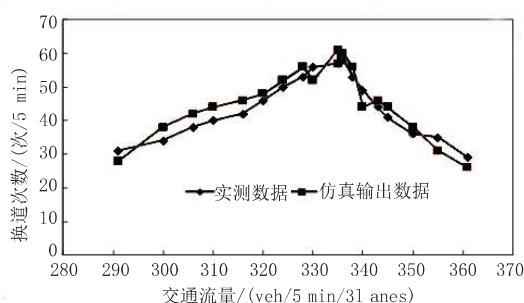


图 17 换道次数 - 流量输出结果对比分析

胞自动机模型进行了改进,对模型中的元胞进行了细分,详细分析了车辆换道过程的不同阶段,考虑换道车辆与周围车辆的交互作用,建立了驾驶员主观换道模型。利用 MATLAB 平台对所建模型进行了仿真验证,通过将仿真结果与实测数据对比,分析系统的流量输出、换道次数与流量关系和实测数据的差异,发现模型与实测数据的匹配程度较高,模型具有一定的有效性。本文所建立的考虑驾驶员特性的城市道路车辆换道模型,不仅是对现有换道理论研究的丰富,对规范驾驶员的换道行为以及交通管理也具有一定的指导意义,同时也有助于驾驶辅助系统的开发。

参考文献:

- [1] R.D.Worrall, A. G. R. Bullen. An Empirical Analysis of Lane Changing on multilane highways [J]. Highway Research Record, 1970 (303):30-43.
- [2] Gipps P G. A model for the structure of lane-changing decisions[J]. Transportation Research Part B, 1986, 20(5):403-414.
- [3] Moridpour S. Analysing the Performance of a Fuzzy Lane Changing Model Using Data Mining [M]//Data Mining in Dynamic Social Networks & Fuzzy Systems. Hershey: IGI Global, 2013:289-315.
- [4] 贾顺平, 李志鹏. 车辆跟驰模拟中的驾驶行为与模糊逻辑控制[J]. 北京交通大学学报, 2002, 26(5):62-66.
- [5] Balal E, Cheu R L, Sarkodie-Gyan T. A binary decision model for discretionary lane changing move based on fuzzy inference system[J]. Transportation Research Part C, 2016(67):47-61.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com