

9-1-2020

Decision Strategy Models of Merge Influence Area for Outside Vehicles Based on Vehicle-vehicle Communication

Xiaofang Yang

1. Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;;

Guo Qian

2. Chongqing Zhongshe Engineering Design Co. Ltd., Chongqing 400000, China;;

Fu Qiang

3. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Decision Strategy Models of Merge Influence Area for Outside Vehicles Based on Vehicle-vehicle Communication

Abstract

Abstract: In the on-ramp merging area, appropriate driving decisions should be made by observing the running environment and estimating the driving characteristics of the surrounding vehicles, which usually led to the inordinate traffic flow. To solve this problem, *the decision strategy models were built for vehicles in the on-ramp merging area, and the operating rules for the new decision strategy were updated.* Furthermore, the space-time trajectory, the lane changing in merging and upstream area and the average speed in the two different circumstances were analyzed by numerical experiments. The results show that in the condition of vehicle-vehicle communication environment, where there are a few lane changing phenomena; the average speed increases by 32.4% maximally, and in different vehicle input circumstance the speed fluctuation decreases by 76.7%, the traffic capacity increases by 13.3%.

Keywords

vehicle-vehicle communication, merging area, decision strategy models, operating rules

Recommended Citation

Yang Xiaofang, Guo Qian, Fu Qiang. Decision Strategy Models of Merge Influence Area for Outside Vehicles Based on Vehicle-vehicle Communication[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 1112-1119.

基于车车通信合流影响区外侧车辆决策模型

杨晓芳¹, 郭倩², 付强³(1. 上海理工大学交通系统工程系, 上海 200093; 2. 重庆中设工程设计股份有限公司, 重庆 400000;
3. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 在入口匝道合流区, 驾驶员通过观察运行环境及估计周边车辆行驶特征, 做出的相应的驾驶决策, 常会使车流紊乱。针对该问题, 从车车通信环境下获得的周边车辆运行全信息入手, 建立上匝道合流影响区车辆决策机制模型, 并更新了新决策机制情况下运行规则。数值试验分析车辆在两种不同环境下的时空轨迹图、合流区及上游换道情况、平均行程速度。结果表明: 在车车通信环境及决策机制模型条件下, 合流区只有很低水平的换道; 平均行程速度最大提高了 32.4%, 在不同车辆输入情况下速度波动降低了 76.7%, 通行能力提高了 13.3%。

关键词: 车车通信; 合流区; 决策机制模型; 运行规则

中图分类号: U495

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 05-1112-09

Decision Strategy Models of Merge Influence Area for Outside Vehicles
Based on Vehicle-vehicle CommunicationYang Xiaofang¹, Guo Qian², Fu Qiang³

(1. Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Chongqing Zhongshe Engineering Design Co. Ltd., Chongqing 400000, China;

3. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the on-ramp merging area, appropriate driving decisions should be made by observing the running environment and estimating the driving characteristics of the surrounding vehicles, which usually led to the inordinate traffic flow. To solve this problem, *the decision strategy models were built for vehicles in the on-ramp merging area, and the operating rules for the new decision strategy were updated.* Furthermore, the space-time trajectory, the lane changing in merging and upstream area and the average speed in the two different circumstances were analyzed by numerical experiments. The results show that in the condition of vehicle-vehicle communication environment, where there are a few lane changing phenomena; the average speed increases by 32.4% maximally, and in different vehicle input circumstance the speed fluctuation decreases by 76.7%, the traffic capacity increases by 13.3%.

Keyword: vehicle-vehicle communication; merging area; decision strategy models; operating rules

引言

快速路是相对封闭的系统, 车辆通过匝道驶入快速路时会在入口匝道处形成合流区。



收稿日期: 2014-04-29 修回日期: 2014-10-23;
基金项目: 国家自然科学基金(51008196; 51308409);
上海市一流学科(系统科学)(XTKX2012);
作者简介: 杨晓芳(1975-), 女, 山西新绛, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为智能交通系统、交通控制与诱导系统理论、交通设计、交通规划与管理;
郭倩(1985-), 女, 山东省曹县, 硕士, 助工, 研究方向为设计师, 道路工程、交通规划。

国外对于匝道合流区进行了广泛的研究, 取得了较为深入的研究成果, kou 与 Machemehl^[1]于 1997 年对高速公路合流区驾驶员的合流行为开展了专研^[2], Evans, Elefteriadou, Gautam 等于 2000 年运用 Markov 链对合流失败导致停车的概率进行了研究^[2], Bunker 与 Troutbeck 对合流区延误进行了研究^[3], Hall 与 Agyemang 对合流区通行能力进行了研究^[4]。

近年来我国合流区的研究也取得了一定成果,但依然缺乏车车通信环境下入口匝道合流区的交通流研究,只是逐渐开始车车通信领域的相关研究,史丹丹、朱正旺等人在车车通信环境的基础上,提出了一种新的改进 STCA 交通流模型^[6];杨帆、云美萍等人提出了传统交通环境和车路协同系统(CVIS)下的车辆决策机制,建立了 CVIS 下的单车道微观交通流模型^[7]。然而以上研究都是车车通信环境基于普通路段进行的,在匝道合流区会呈现哪些改变亟待研究。

1 车车通信下合流影响区运行规则

1.1 基本假设

对所需要建立的模型进行条件假设:

- (1) 模型建立的环境为快速路入口匝道合流影响区,车辆排队行驶并且可以相互通信;
- (2) 论文中所用的参数信息均可以获得,此处直接使用;
- (3) 忽略信息传递的时间延迟,假设车辆可以同时获得即时的交通信息;
- (4) 以标准小汽车为研究对象,不考虑不同车型对交通运行的影响。

1.2 决策机制

本文引入了匝道合流始发区概念:由文献[8]知在距合流始端 X_2 处开始有大多数车辆成功汇入主路,称此处为匝道合流始发区,如图 1 所示。主线外侧车道车辆到匝道合流始发区的距离为 L_{a1} ($L_{a1} = X_1 + X_2$),匝道车辆到匝道合流始发区的距离 L_{a2} ($L_{a2} = X_3 + X_2$)。其中 X_1 为上游合流影响区起始点至合流区起始端的距离; X_2 为合流区始端至车辆开始集中汇入主路处的距离; X_3 为可能与合流影响区主路外侧车辆产生冲突的匝道车辆位置至合流区始端的距离。匝道车辆的速度及其加速过程速度一般低于主线车辆速度,直接以直线距离 L_{a1} 与 L_{a2} 比较,增加了决策机制的安全性,即在匝道车辆加速过程中,在本次研究的决策机制控

制下的主线车辆仍然能确保不与匝道汇入车辆碰撞,保证了安全性。

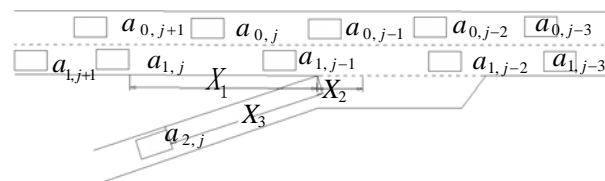


图 1 合流影响区示意图

以下是不同运行环境下采取的各种决策措施的详细阐述及决策机制建模,在模型中加速行驶时对安全车距的判断考虑了车辆的相对运动,即考虑了 j 车最大可能前进距离—车辆可获得的最大行驶速度与时间的乘积,其中考虑的是下一时刻车辆运行状态,取单位时间,则最大可能前进距离与最大行驶速度数值相同,即最大行驶距离可表示为 $\min[v_{i,j}(t)+1, v_{\max}^T]$ 。式中, $v_{i,j}(t)$ 为 i 车道 j 车在 t 时刻的行驶速度,对车辆的加速度施以逐步有限的限制,即每一时步中所有低于最高速度的车辆可将速度增加 1 个单位,则加速后的速度 $v_{i,j}(t)+1$; v_{\max}^T 为路段允许的最大速度。

1.2.1 加速行驶情形

当运行环境是以下之一时,车辆会加速行驶:

- (1) 当主线外侧车道车辆进入合流影响区 $L_{a1} < L_{a2}$, 由于匝道车速低于主线车速,在本道前车不造成限制的情况下,车辆会加速通过。即:

1) 当 $L_{a1} < L_{a2}$ 且 $d_{i,j}(t) + \min[v_{i,j}(t)+1, v_{\max}^T] \cdot T > s_0$ 时,则有合流区上游车辆加速,速度 $v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + a_1 \cdot T$ 。

2) 当 $L_{a1} < L_{a2}$, 且 $d_{i,j}(t) + \min[v_{i,j}(t)+1, v_{\max}^T] \cdot T \geq s_0$ 且合流区下游内侧车道行驶环境可能不优越于外侧车道,则内侧车辆会在下游某时刻换道至外侧车道,即 $x_{0,j-n}(t+n) = x_{i,j-n}(t+n)$ 时,则合流区上游车辆加速至与前车保持安全车距,速度 $v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + a_2 \cdot T$, 且 $x_{i,j-1}(t+1) - x_{i,j}(t+1) = S_0$ 。其中,合流区上游考虑合流影响区始端至合流区始端的范围,合流区下游考虑合流区末端至合流影响

区末端的范围。

$d_{i,j}(t)$ 表示 t 时刻 i 车道第 j 辆车与本车道前车之间的车头空距; T 为单位时间, 由于考虑的是下一时刻车辆运行状态, 取值为 1; s_0 为安全车距; $v_{i,j}(t)$ 中 t 时刻 i 车道第 j 辆车速度; $v_{i,j}(t+1)$ 中 $t+1$ 时刻 i 车道第 j 辆车速度; a_1, a_2 为加速度; $x_{0,j-n}(t+n)$ 为 $t+n$ 时刻主线内侧车道第 $j-n$ 辆车的位置; $x_{1,j-n}(t+n)$: $t+n$ 时刻主线外侧车道第 $j-n$ 辆车的位置; $x_{i,j-1}(t+1)$: $t+1$ 时刻 i 车道第 $j-1$ 辆车的位置; $x_{i,j}(t+1)$: $t+1$ 时刻 i 车道第 j 辆车的位置。

(2) 当主线外侧车道车辆进入合流影响区 L_{a1} 大于 L_{a2} , 可以适当加速先于匝道车辆到达合流高发区, 且本车道前车对其不造成限制时, 车辆会有加速意愿。

1) 当匝道车辆获得目标车辆加速信息时, 在无前车限制时会全速行驶, 若匝道车辆全速行驶仍不能先于加速的目标车辆先到达匝道合流始发区, 目标车辆可以成功加速通过合流区。

当 $L_{a2} < L_{a1} < (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$ 且 $d_{i,j}(t) + \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T] \cdot T \geq s_0$, $L_{a2} / \min[V_{2,j}(t) + n, v_{\max}^T] > L_{a1} / \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$ 时, 则合流区上游车辆可成功加速, 即 $v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + a_3 \cdot T$ 。

2) 当匝道车辆获得目标车辆加速信息时, 在无匝道前车限制时会全速行驶, 若匝道车辆全速行驶能先于加速的目标车辆到达匝道合流始发区, 则匝道合流车辆全速行驶先于目标车辆到达匝道合流始发区, 目标车辆不能成功加速通过合流区。

当 $L_{a2} < L_{a1} < (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$, 且 $d_{i,j}(t) + \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T] \cdot T \geq s_0$, $L_{a2} / \min[V_{2,j}(t) + n, v_{\max}^T] < L_{a1} / \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$ 时, 则合流区上游车辆不能成功加速通过合流区, 以适当加速度行驶与匝道汇入车辆保持安全距离后跟驰匝道汇入车辆。

$$\text{即 } v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + a_4 \cdot T \text{。}$$

$V_{2,j}(t)$ 表示 t 时刻匝道车辆的速度; a_3, a_4 为加速度。

1.2.2 跟驰于前车情形

(1) 当主线外侧车道车辆进入合流影响区 $L_{a1} < L_{a2}$, 主线外侧车辆先于匝道车辆到达, 但受本道前车限制时, 车辆会以保持与前车安全车距的速度跟驰于前车。即:

当 $L_{a1} < L_{a2}$, 且 $d_{i,j}(t) \approx S_0$ 时, 则合流区上游车辆跟驰于前车, 即

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j-1}(t)$$

$x_{i,j-1}(t)$ 表示 t 时刻 i 车道第 $j-1$ 辆车的位置。

(2) 当主线外侧车道车辆进入合流影响区 $L_{a1} > L_{a2}$, 可以适当加速先于匝道车辆到达合流高发区, 但又受本道前车或邻道通行环境限制时, 车辆也会以保持与前车安全车距的速度跟驰于前车。即:

1) 当 $L_{a2} < L_{a1} < (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$, 且 $d_{i,j}(t) \approx S_0$, 邻道无可插入间隙, 即 $x_{|l-i|, j-1}(t) - x_{|l-i|, j+1}(t) < 2s_0 + L_0$ 时, 则合流区上游车辆跟驰于前车, 即 $x_{i,j}(t+1) = x_{i,j-1}(t)$ 。

2) 当 $L_{a2} < L_{a1} < (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$, 且 $d_{i,j}(t) \approx S_0$, 且 $x_{|l-i|, j-1}(t) - x_{|l-i|, j+1}(t) > 2s_0 + L_0$, 且 $v_{|l-i|, j-1}^{\text{other}}(t) < v_{i,j-1}(t)$ 时,

则合流区上游车辆跟驰于前车, 即 $x_{i,j}(t+1) = x_{i,j-1}(t)$ 。

$x_{|l-i|, j-1}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车邻道前车的位置; $x_{|l-i|, j+1}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车邻道后车的位置; L_0 : 标准车车身长度; $v_{|l-i|, j-1}^{\text{other}}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车邻道前车车速; $v_{i,j-1}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 $j-1$ 辆车前车速度; $x_{i,j-1}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 $j-1$ 辆车的位置。

1.2.3 跟驰于匝道汇入车辆

当主线外侧车道车辆进入合流影响区 $L_{a1} > L_{a2}$, 且在允许范围内的加速也无法先于匝道车辆到达合流高发区, 邻道的行驶条件也不优越时, 车辆会以保持安全车距的速度跟驰于匝道汇入车辆。即:

当 $L_{a1} > (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$,
且 $x_{|l-i|, j-1}(t) - x_{|l-i|, j+1}(t) > 2s_0 + L_0$, $\bar{v}_{2m}(t) > v_{|l-i|, j-1}^{\text{other}}(t)$
时, 则合流区上游车辆跟驰于匝道汇入车辆。

$\bar{v}_{2m}(t)$ 为匝道汇入车辆平均速度。

1.2.4 换道至内侧车道

(1) 当主线外侧车道车辆进入合流影响区 L_{a1} 大于 L_{a2} , 可以适当加速先于匝道车辆到达合流高发区, 而邻道行驶条件优于本道时, 车辆会产生换道意愿, 能否换道成功还取决于邻道车辆是否采取了限制措施。

当 $L_{a2} < L_{a1} < (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$,
且 $d_{i,j}(t) \approx S_0$, $d_{|l-i|, j}^{\text{other}}(t) \geq S_0$, $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) \geq S_0$,
 $v_{|l-i|, j-1}^{\text{other}}(t) > v_{i, j-1}(t)$ 时, 则合流区上游车辆换道产生换道意愿。

此时, 目标车辆采取换道准备, 适当加速向内侧车道靠近, 而邻道后车会根据外侧车辆至内侧车道后是否对自己行驶产生干扰并结合自身行驶能力采取措施。

1) 当 $v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) = v_{\max}^T$ 或者
 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + [(v_{i,j}(t) + 1) - v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)] \cdot t > S_0$

则邻道后车不采取限制目标车辆换道措施, 目标车辆换道至内侧车道。

2) 当 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + [(v_{i,j}(t) + 1) - v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)] \cdot t < S_0$ 且
 $v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) < v_{\max}^T$ 时, 邻道后车会加速限制目标车辆换道, 则目标车辆不能成功换道。

3) 当 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + [(v_{i,j}(t) + 1) - v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)] \cdot t \geq S_0$ 且
 $v_{i,j}(t) + 1 < v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)$

且 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + (v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + 1) \cdot t > x_{i,j}(t) + [v_{i,j}(t) + 1] \cdot t$,
则邻道后车会加速限制目标车辆换道, 则目标车辆不能成功换道。

(2) 当主线外侧车道车辆进入合流影响区 $L_{a1} > L_{a2}$, 且允许范围内的加速也无法先于匝道车辆到达合流高发区, 邻道前后车间隙可以插入, 且邻道行驶条件优于本道时, 车辆产生换道意愿, 能否换道成功还取决于邻道车辆是否采取了限制措施。

当 $L_{a1} > (L_{a2} / V_{2,j}(t)) \cdot \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]$, 且
 $x_{|l-i|, j-1}(t) - x_{|l-i|, j+1}(t) > 2s_0 + L_0$, 且 $d_{i,j}^m(t+n) \approx S_0$,
且 $\bar{v}_{2m}(t) < v_{|l-i|, j-1}^{\text{other}}(t)$ 时, 则合流区上游车辆换道产生换道意愿。

1) 当 $v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) = v_{\max}^T$
或者 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + [(v_{i,j}(t) + 1) - v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)] \cdot t > S_0$

则邻道后车不采取限制目标车辆换道措施, 目标车辆换道至内侧车道。

2) 当 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + [(v_{i,j}(t) + 1) - v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)] \cdot t < S_0$ 且
 $v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) < v_{\max}^T$ 时, 邻道后车会加速限制目标车辆换道, 则目标车辆不能成功换道。

3) 当 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + [(v_{i,j}(t) + 1) - v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)] \cdot t \geq S_0$ 且
 $v_{i,j}(t) + 1 < v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)$ 且 $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + (v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t) + 1) \cdot t >$
 $x_{i,j}(t) + [v_{i,j}(t) + 1] \cdot t$, 则邻道后车会加速限制目标车辆换道, 则目标车辆不能成功换道。

$d_{i,j}^m(t+n)$ 为 $t+n$ 时刻 i 车道第 j 辆车与匝道汇入车辆车头空距; $v_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车邻道后车速度; $d_{|l-i|, j}^{\text{other}}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车与邻道前车间距; $d_{|l-i|, j+1}^{\text{other}}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车与邻道后车间距。

2 车车通信环境下合流影响区运行规则

2.1 主线合流影响区上游车辆的速度分布

2.1.1 加速行驶车辆的速度

就 1.2 决策机制中以加速度 a_1, a_3 运行的情况分析如下: 根据获得的周边车辆的实时信息, 车辆以稳定的加减速行驶至合流区, 同时减少与匝道汇入车辆的冲突, 如图 1 所示。

因为 $\{\min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]\}^2 - v_{i,j}^2(t) = 2a_1(X_1 + X_2)$

所以 $a_1 = a_3 = \frac{\{\min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]\}^2 - v_{i,j}^2(t)}{2(X_1 + X_2)}$

则 $v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) +$

$$\frac{\{\min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]\}^2 - v_{i,j}^2(t)}{2(X_1 + X_2)} \cdot T$$

当与前车车头空距接近安全车距时, 由于与前车之间有一定的加速空间, 车辆会以加速度 a_2, a_4 驶, 但又由于加速空间有限, 加速至与前车保持安全车距后再以前车速度跟驰行驶。

$$\text{因为 } v_{i,j-1}^2(t) - v_{i,j}^2(t) = 2a_2[x_{i,j-1}(t) - x_{i,j}(t) - s_0]$$

$$\text{所以 } a_2 = a_4 = \frac{v_{i,j-1}^2(t) - v_{i,j}^2(t)}{2[x_{i,j-1}(t) - x_{i,j}(t) - s_0]}$$

$$\text{则 } v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + \frac{v_{i,j-1}^2(t) - v_{i,j}^2(t)}{2[x_{i,j-1}(t) - x_{i,j}(t) - s_0]} \cdot T$$

式中: $x_{i,j}(t)$ 为 t 时刻 i 车道第 j 辆车的位置。

2.1.2 跟驰于前车行驶车辆的速度

选择跟驰行驶的后车由于受到前车限制没有换道条件或换道后无更优越的行驶环境, 则采取跟驰于前车行驶, 跟驰车辆不但会受到前车 $j-1$ 的影响, 还会受到次前车 $j-2$ 和再前车 $j-3$ 的影响, 由孙棣华等人提出的最优速度差(Optimal Velocity

Difference, OVD)模型 $\frac{dv_{i,j}(t)}{dt} = q[v + p(v_1 - v) - v_{i,j}(t)] + \lambda[v_{i,j-1}(t) - v_{i,j}(t)]$ 则目标车辆下一时刻速度 $v_{i,j}(t+1) = v$ 。其中: q 为跟驰车辆 j 的驾驶人对前车 $j-1$ 的敏感系数, 一般为时间的倒数; v 为跟驰车辆 j 的优化速度; v_1 为次前车 $j-2$ 的优化速度; λ 为前车与跟驰车速度差的反应系数。

2.1.3 跟驰于匝道汇入车辆的速度

后车由于无法先于匝道车辆到达合流影响区且临道也无更优越的行驶环境, 只能调整以汇入车辆的平均速度跟驰于匝道汇入车辆。

$$\frac{dv_{i,j}(t)}{dt} = q[v + p(v_1 - v) - v_{i,j}(t)] + \lambda_1[\bar{v}_{2m}(t) - v_{i,j}(t)]$$

则目标车辆下一时刻速度 $v_{i,j}(t+1) = v$ 。

λ_1 为汇入车辆的平均速度与跟驰车速度差的反应系数。

2.1.4 换道至内侧车道车辆速度

$$\text{当 } d_{|l-i|,j}^{\text{other}}(t) > \eta s_0 \text{ 时,}$$

则换道车辆下一时刻速度

$$v_{i,j}(t+1) = \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T];$$

$$\text{当 } s_0 < d_{|l-i|,j}^{\text{other}}(t) < \eta s_0 \text{ 时,}$$

则换道车辆下一时刻速度

$$v_{i,j}(t+1) = \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{|l-i|,j-1}^{\text{other}}(t)].$$

2.2 主线合流影响区上游车辆下一时刻位置分布

2.2.1 加速行驶车辆位置分布

单位时刻内行驶距离为 $\Delta x_{i,j}(t)$, 以加速度 a_1, a_3 行驶的车辆位置分布如下:

$$\text{因为 } \Delta x_{i,j}(t) = v_{i,j}(t) \cdot T + \frac{1}{2} a_1 \cdot T^2 = v_{i,j}(t) \cdot T +$$

$$\frac{\{\min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]\}^2 - v_{i,j}^2(t)}{4(X_1 + X_2)} \cdot T^2$$

则下一时刻位置

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t) \cdot T +$$

$$\frac{\{\min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T]\}^2 - v_{i,j}^2(t)}{4(X_1 + X_2)} \cdot T^2$$

以 a_2, a_4 行驶的车辆位置分布:

$$\Delta x_{i,j}(t) = v_{i,j}(t) \cdot T + \frac{v_{i,j-1}^2(t) - v_{i,j}^2(t)}{4[x_{i,j-1}(t) - x_{i,j}(t) - s_0]} \cdot T^2$$

则下一时刻位置

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t) \cdot T +$$

$$\frac{v_{i,j-1}^2(t) - v_{i,j}^2(t)}{4[x_{i,j-1}(t) - x_{i,j}(t) - s_0]} \cdot T^2$$

2.2.2 跟驰前车车辆位置分布

下一时刻位置

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \cdot T = x_{i,j}(t) + v \cdot T$$

2.2.3 跟驰于匝道汇入车辆的位置分布

下一时刻位置

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \cdot T = x_{i,j}(t) + v \cdot T$$

2.2.4 换道至内侧车道车辆位置分布

$$\text{当 } d_{|l-i|,j}^{\text{other}}(t) > \eta s_0 \text{ 时,}$$

下一时刻位置

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \cdot T = x_{i,j}(t) +$$

$$\min[v_{i,j}(t) + 1, v_{\max}^T] \cdot T$$

$$\text{当 } s_0 < d_{|l-i|,j}^{\text{other}}(t) < \eta s_0 \text{ 时,}$$

则下一时刻位置

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \cdot T = x_{i,j}(t) + \min[v_{i,j}(t) + 1, v_{|i-j|, j-1}^{\text{other}}(t)] \cdot T$$

3 数值试验

根据上匝道合流区的运行特征分别对传统环境下 STCA(Symmetric Two-lane Cellular Automata) 模型运行规则和车车通信环境下运行决策规则进行计算机对比仿真。

STCA模型如下:

$$C_n = \begin{cases} 1 - C_n & d_n < \min\{v_n + 1, v_{\max}\}, \\ C_n & d_{n,\text{other}} > d_n, d_{n,\text{back}} > d_{\text{safe}} \\ C_n & \text{其它情况} \end{cases}$$

其中: C_n 为第 n 辆车所在的车道; d_n 为第 n 辆车与前方车辆间的距离; $d_{n,\text{other}}$ 为第 n 辆车与相邻车道前方车辆之间的距离; $d_{n,\text{back}}$ 为第 n 辆车与相邻车道后方车辆之间的距离; d_{safe} 为安全换道间距。

选取合流始端上游 450 m、下游 450 m 范围内影响区运行情况作为观察对比对象, 匝道进车率取 $\alpha = 0.2$, $X_1 = 450$ m, $X_2 = 30$ m, 内侧车道间隙是安全车距不同倍数时, 换至内侧车道车辆以不同速度行驶, 临界倍数 $\eta = 2.5$ 。

3.1 速度分布

如图 2, 随着输入车辆数的增加, 传统环境下车辆平均行程速度由 90 km/h 下降为 60 km/h, 而车车通行条件下车辆平均行程速度则能维持在较高水平, 这是由于车车通信条件下的信息互换以及较优的决策机制减少了车辆间的相互干扰, 使得车流在整体上获得较快的速度。

3.2 时空轨迹

合流影响区外侧车道后 80 s 时空轨迹如图 3 所示。

横向表示空间, 纵向表示时间, 轨迹线的斜率为速度。

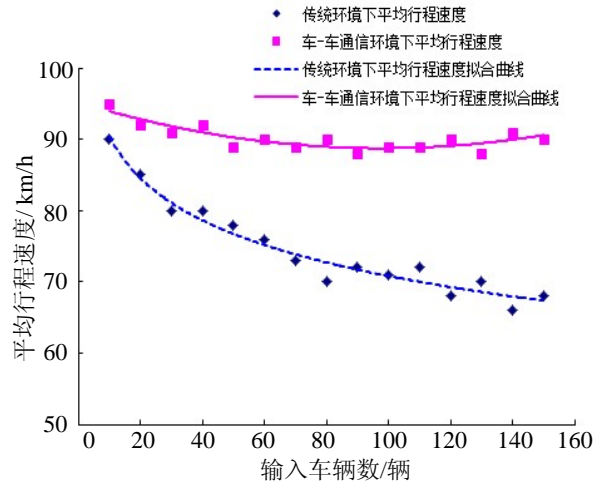
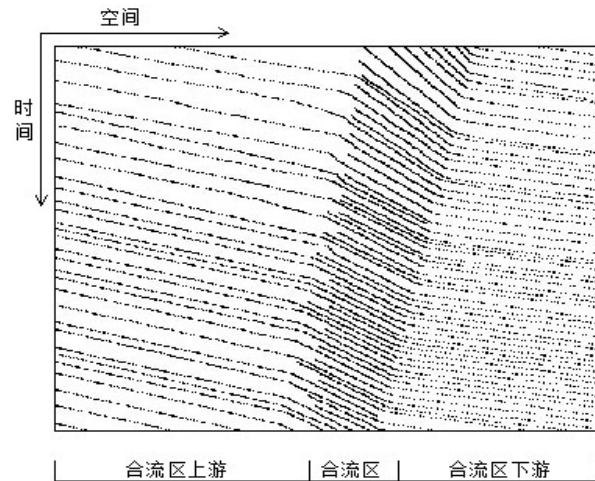
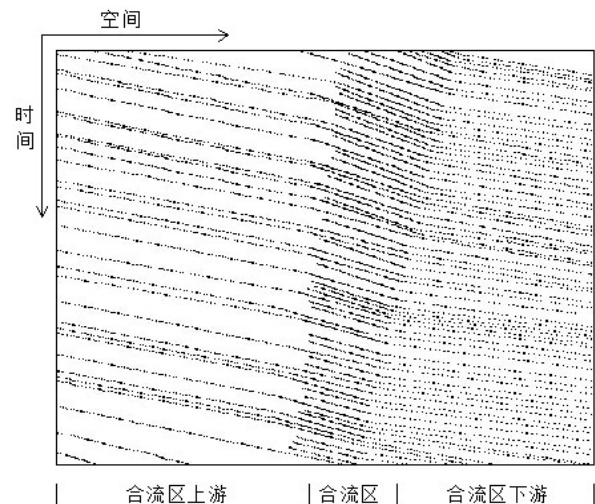


图 2 合流影响区平均行程速度对比图



(a) 传统环境时空轨迹图



(b) 车车通信车环境时空轨迹图

图 3 时空轨迹图

传统交通环境下，车辆通过合流区时速度有明显降低，阻塞出现频率高，持续时间长，使得道路资源无法充分利用。车车通信环境新决策机制下的时空轨迹图较为平顺，通过合流区速度有轻微波动，行驶时舒适度提高，能使道路资源得到充分的利用，通行能力增加，即使出现阻塞现象，持续时间也较短，而且出现阻塞的频率极低低于传统环境下。

3.3 合流区上游及合流区换道次数

在传统环境和车车通信决策机制下合流区上游及合流区不同流量输入水平条件下，后 1 000 s 合流区上游外侧车道换道总次数的比较如图 4、6 所示，并以输入密度为 0.6 时的换道情况为例，对信息环境下和传统环境下合流区上游及合流区外侧车道车辆随距离变化换道次数进行对比，以合流影响区上游起点为横坐标原点，以合流区上游指向合流区的方向为正方向。如图 5、7 所示。

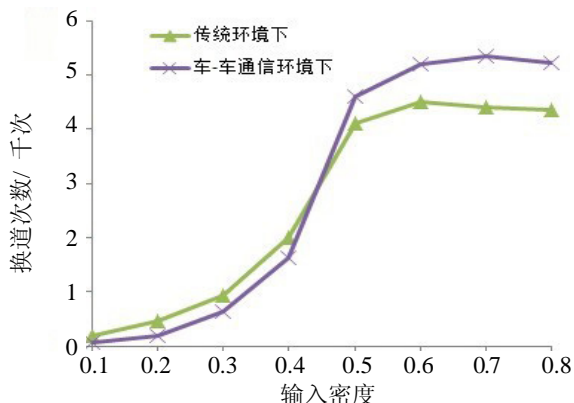


图 4 合流区上游外侧车道换道总次数对比图

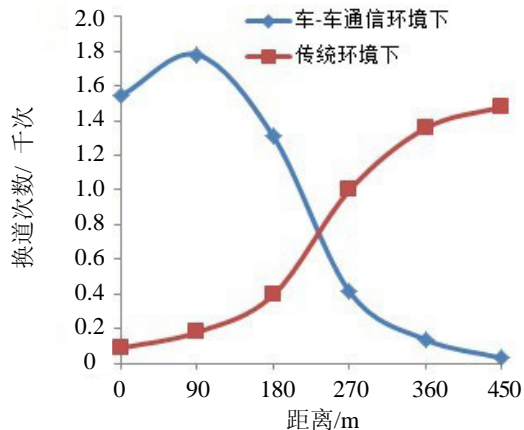


图 5 合流区上游外侧车道随距离变化换道次数图

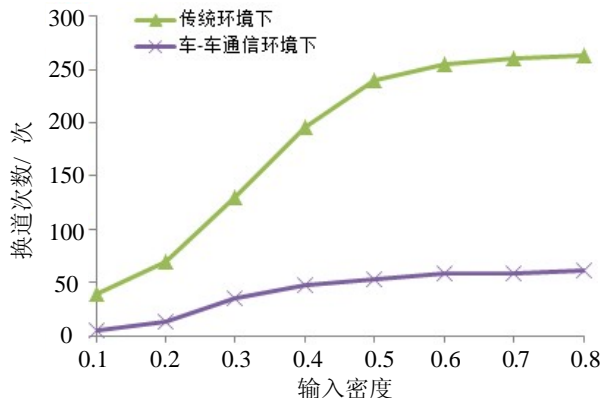


图 6 合流区外侧车道车辆换道总次数对比图

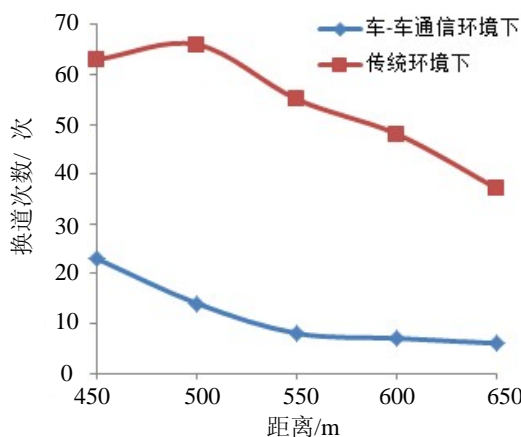


图 7 合流区外侧车道车辆随距离变化换道次数图

如图 4，在低密度时，合流区上游传统环境下外侧车道换道次数多于车车通信情况，这是由于传统环境下车辆由于不了解合流区情况盲目换道，而车车通信条件下车辆则能准确判断情况，因此换道较少。而高密度时，车车通行条件下，车辆又能较充分的利用外侧车道，从而使车流整体获得较优的状况，故外侧车道换道次数较高。

由图 5，传统环境下主线外侧车道换道次数随着距离合流区距离的减小而增大，这是由于传统环境下合流区上游车辆对合流区交通环境的未知，不敢适时换道，而浪费了一定的换道机会，行至越接近合流区，由于与匝道汇入车辆的冲突而临时增多换道甚至强制换道以避免碰撞；而车车通信环境下由于对周边交通环境的准确获得，车辆可以科学合理的在合流区上游就采取换道措施，以获得更优越的通行环境，充分利用道路资源。并且随着接近合

流区换道次数逐渐减低,有效减少接近合流区才临时换道甚至强制换道的发生。

由图 6, 在出合流区, 传统环境下由于匝道车辆汇入的影响, 使得外侧车道车辆在合流区强制换道, 会加剧合流区车流紊乱, 甚至发生阻塞, 并且这种强制换道次数随着输入密度的增加而增大; 而车车通信环境下由于对合流区周边一定范围内交通环境的提前预知, 在合流区上游已经采取合理决策尽量减少在合流区强制换道的发生, 所以此时合流区车辆根据具体交通环境科学决策, 在不同输入密度情况下换道情况均大幅度降低, 从而降低了整个合流区车流扰动, 合流区车流更平顺, 在输入密度为 0.6 时, 合流区换道总次数比传统环境降低了 77.3%。

3.4 合流区基本图分析

将传统环境下和车车通信环境下合流区流量-密度基本图进行对比分析, 如图 8~9 所示。

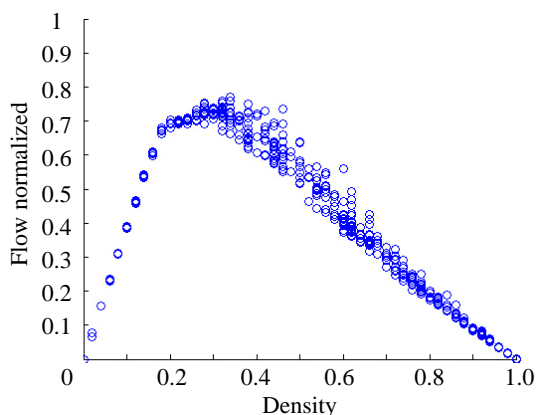


图 8 传统环境基本图

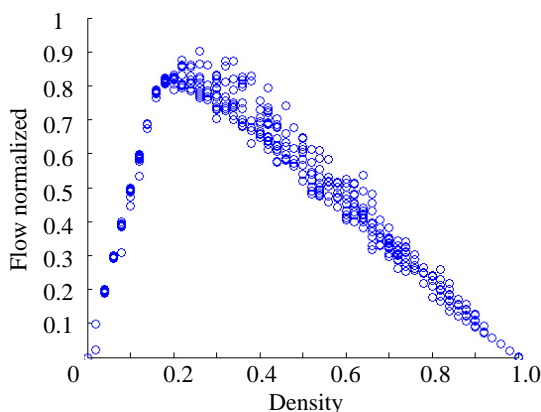


图 9 车车通信环境基本图

由图 8, 9 可知, 在密度 <0.2 时, 传统环境和车车通信环境基本一致, 因为在低密度和条件下, 车辆近似于自由行驶, 车与车之间几乎不相互影响, 车车通信环境没有体现出优势; $0.2 < \text{密度} < 0.35$ 时, 传统环境下的车流量在 0.70~0.75 之间波动, 不再增加, 而车车通信环境的下车流量依然有上升趋势, 最大流量达到 0.90, 因为随着密度的增大, 传统环境下, 车车之间的影响加强, 主道上的车会为了避免与汇入的匝道车辆发生冲突而可能强制换道, 交通流发生紊乱, 限制了车流量的增加; 当密度 >0.35 , 由于道路条件的制约, 两种环境下的交通流量都逐渐下降, 但同样密度条件下, 车车通信环境下的车流量大于传统环境下的车流量, 因为即使密度增大, 但车车通信环境下, 车辆清楚所处的交通环境, 不会盲目换道, 加、减速, 保证车流稳定有序地行进。

4 结论

从车头到匝道合流始发区的距离 L_{ai} 作为比较指标入手, 距离是非常直观呈现, 这与驾驶员行驶决策时首先做距离判断的思维习惯一致。并且考虑本道与邻道的运行情况, 建立了信息环境下合流影响区主线外侧车道车辆决策机制模型和运行规则模型, 进一步更新了新决策机制下的运行状态。通过计算机数据模拟表明新决策机制下车辆可以以较小的速度波动驶过合流区, 提高了驾驶舒适度, 并且通过在合流影响区进行科学、针对性换道提高道路利用率和合流区通行能力; 平均行程速度最大提高了 32.4%, 不同车辆输入量的情况下速度波动降低了 76.7%; 通行能力提高了 13.3%。

参考文献:

- [1] Kou C C Machemehl. Modeling driver behavior during merge maneuvers [R]. Austin, USA: Southwest Region University Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1997.
- [2] Evans Elefteriadou Gautam. Probability of breakdown at freeway merges using Markov chains [J]. Transportation Research Part B (S0191-2615), 2001, 35(3): 237-254.

(下转第 1126 页)