

6-2-2020

## Modeling and Simulation of Merging Behavior at Urban Expressway On-ramp

Zuo Kang

*Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Qiyuan Liu

*Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Sun Jian

*Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, 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.

---

## Modeling and Simulation of Merging Behavior at Urban Expressway On-ramp

### Abstract

**Abstract:** In order to analyze the causation and evolution process of early on-set breakdown at bottlenecks deeply, *the lane changing motivation model was established* based on the whole vehicles' trajectory data at Hongxu Road on-ramp bottleneck in Shanghai China. The results show that prediction accuracy of the lane change motivation model is more than 73%. *On this basis, the on-ramp microscopic traffic flow simulation proto type system ORBSIM was established with calibrated critical gap and IDM model in the C++ platform.* The simulation results show that the ORBSIM can recur traffic flow characteristics and early on-set breakdown phenomenon. For further engineering using, *this model was developed and integrated in micro simulation system TESS NG, and the results show that the model can simulate the merging behavior more effective at urban expressway on-ramp in different traffic situations in China.*

### Keywords

urban expressway, bottleneck, merging behavior, logit motivation model, micro simulation system TESS NG

### Recommended Citation

Zuo Kang, Liu Qiyuan, Sun Jian. Modeling and Simulation of Merging Behavior at Urban Expressway On-ramp[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1895-1906.

## 城市快速路匝道汇入行为建模及仿真

左康, 刘启远, 孙剑

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为深化快速路瓶颈早发性失效的致因和演化过程分析, 以上海市延安高架虹许路瓶颈点车辆轨迹数据为基础, 建立了汇入区车辆换道动机模型, 结果表明, 模型分类预测精度可达到73%以上。标定了间隙接受模型和IDM跟驰模型, 基于C++建立了仿真原型系统ORBSIM。仿真结果表明该系统能再现实际交通流运行特征以及早发性失效现象。该汇入模型经过进一步工程化, 被整合应用于自主开发的微观仿真系统TESS NG, 有效的对上海快速路不同情况的汇入行为进行精准表征。

**关键词:** 城市快速路; 瓶颈; 汇入行为; 换道动机模型; 微观仿真系统 TESS NG

中图分类号: U491.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 09-1895-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201709004

## Modeling and Simulation of Merging Behavior at Urban Expressway On-ramp

Zuo Kang, Liu Qiyuan, Sun Jian

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to analyze the causation and evolution process of early on-set breakdown at bottlenecks deeply, the lane changing motivation model was established based on the whole vehicles' trajectory data at Hongxu Road on-ramp bottleneck in Shanghai China. The results show that prediction accuracy of the lane change motivation model is more than 73%. On this basis, the on-ramp microscopic traffic flow simulation proto type system ORBSIM was established with calibrated critical gap and IDM model in the C++ platform. The simulation results show that the ORBSIM can recur traffic flow characteristics and early on-set breakdown phenomenon. For further engineering using, this model was developed and integrated in micro simulation system TESS NG, and the results show that the model can simulate the merging behavior more effective at urban expressway on-ramp in different traffic situations in China.

**Keywords:** urban expressway; bottleneck; merging behavior; logit motivation model; micro simulation system TESS NG

## 引言

瓶颈点是指道路上的某一局部路段由于通行能力不足或突发事件而导致的车流速度下降、



收稿日期: 2017-05-20 修回日期: 2017-07-17;  
基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金(51422812), 上海市科委国际科技合作项目(16510711400);  
作者简介: 左康(1992-), 男, 湖北武汉, 硕士生, 研究方向为交通流理论与仿真。

车流密度增加的车辆排队现象<sup>[1]</sup>, 是导致快速路拥堵的直接原因。快速路瓶颈包括常发性瓶颈和偶发性瓶颈, 偶发性瓶颈对交通流的干扰是突发性的、短时性的, 而常发性瓶颈则是重复性的、周期性的。匝道汇入区就属于常发性瓶颈中的一种。文献[2]指出, 快速路匝道汇入区瓶颈是加速车道车流与主线车流高度相互作用所导致的, 匝道车辆的破坏性换道以及主线车辆的连锁反应

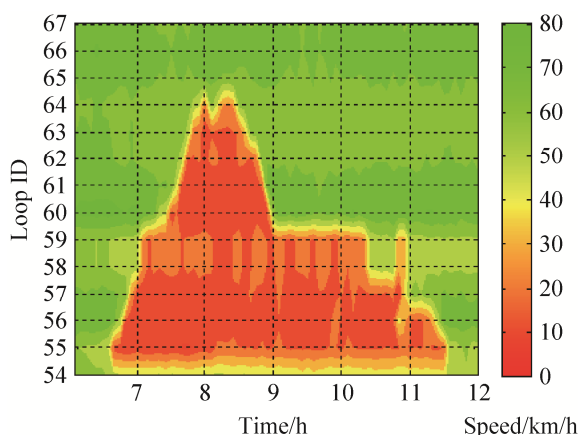
<http://www.china-simulation.com>

• 1895 •

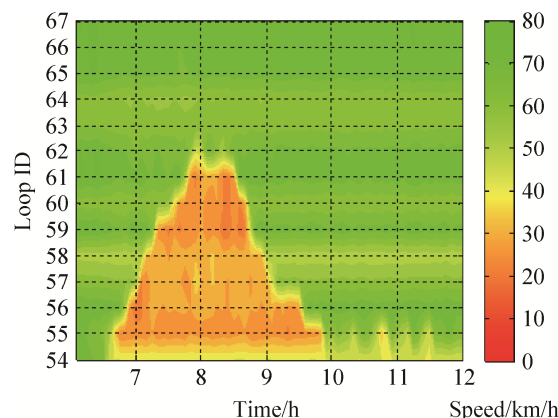
是瓶颈的失效重要致因。因此,研究驾驶行为特性对从微观层面出发分析瓶颈失效的机理至关重要。

在匝道汇入区主要有跟驰和换道这两种驾驶行为,而描述这两种驾驶行为的模型是影响类似于匝道汇入区这种瓶颈仿真结果的关键<sup>[3]</sup>。现有的仿真模型都是基于简单的假设所实现的,如:车辆在汇入过程中速度是定值<sup>[4-5]</sup>、车辆在汇入过程中加速度是定值<sup>[6-7]</sup>、车辆的跟驰行为仅受当前车道前车影响<sup>[8]</sup>、换道的可接受间隙为定值<sup>[9]</sup>等,这些假设与实际情况存在差异<sup>[10]</sup>,也导致了仿真结果的失真。图 1 给出了广中路上匝道瓶颈 2009-09-27 实测的速度时空图,以及利用 VISSIM 和 Trans Modeler 的缺省值仿真出的速度时空图。根据图 1 的对比结果可知,VISSIM 仿真软件虽然仿真出了瓶颈出现及消散的过程,但在影响范围、影响时间和车辆速度上都与实际情况存在明显差异,而 Trans Modeler 仿真软件则根本就没有仿真出瓶颈的情形,在仿真时段内,仿真区域一直处于畅通的状态。

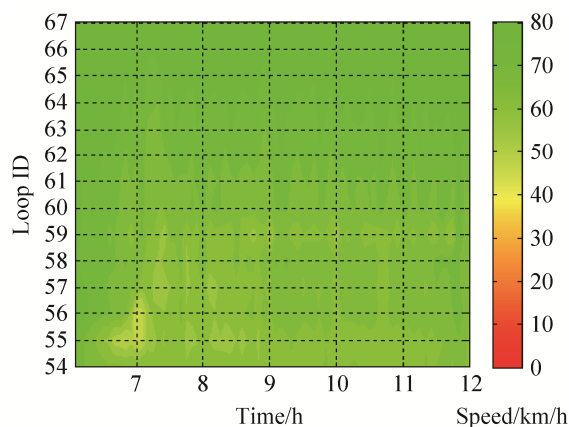
由此可见,现有的仿真软件并不能准确再现现实的情形,因此,建立符合我国城市快速路匝道汇入区的驾驶行为模型及仿真系统。便显得尤为迫切,本文正是从这方面入手开展研究。



(a) 实际情况



(b) VISSIM 仿真结果



(c) Trans Modeler 仿真结果

图 1 入匝道瓶颈区仿真与实际速度时空图对比

Fig. 1 Comparison of speed contour map between simulation and real situation at on-ramp bottleneck area

## 1 文献综述

Choudhury et al.<sup>[11]</sup>, Sun et al.<sup>[12]</sup>, Zheng 等<sup>[13]</sup>均认为快速路的匝道汇入行为是造成交通冲突与引发 breakdown 的重要因素。加速车道车辆换道进入主线,进而引起车辆的交互是瓶颈失效的致因之一。换道模型最早由 Gipps<sup>[14]</sup>提出,他提出了一个驾驶员是否换道的决策框架,他认为决定车辆能否安全顺利地换道的最重要因素是交通设施布置是否合理, Toledo<sup>[15]</sup>将换道行为分为了 4 个分项决策,包括目标车道选择,目标间隙选择,间隙接受和加减速。Wang et al.<sup>[16]</sup>据此建立了自由流状态下,考虑加减速和间隙接受的换道模型,并引出了自由流换道发生时的交互行为:换道协作(主动换道以让换道车辆汇入)和换道谦让(减速以创造间

隙)。Choudhury et al.<sup>[11]</sup>用协作和强迫换道的间隙接受延伸出新的 4 个分项换道决策。Hidas<sup>[17]</sup>将换道分为自由, 协作, 压迫 3 种类型。换道类型的划分显著地增强了换道建模的理论。换道行为特征的研究包括驾驶员因素, 交通环境因素, 车辆因素等影响, Kashani<sup>[18]</sup>使用跟驰理论对基于不同年龄的驾驶员反映特性的换道行为进行研究, 随后, Deffenbacher<sup>[19]</sup>将驾驶员按性格分为冲动与保守进行换道研究, 得到不同的评价指标, Kondyli 等人均在此基础上构建了不同的换道模型。其中, Kondyli<sup>[20]</sup>收集了拥挤和自由流两种状态下的快速路汇入数据, 得出 3 种汇入类型在不同交通流状态下的比例, 并通过划分驾驶员类别(冒进, 保守)进行数据分析; Wang et al.<sup>[21]</sup>着重于加速车道长度对汇入行为的影响, 在考虑加速车道长度和驾驶员警戒性的因素下, 更长的加速车道并没有使汇入的间隙选择成功率增加; Daamen<sup>[22]</sup>在建立换道决策模型中加入自由流, 拥挤流因素, 得出结论自由流的入匝道汇入行为通常发生在加速车道的前半部分, 拥挤流状态下则更倾向于在加速车道后半部分进行汇入, 同时 Daamen 研究并证实最小间隙接受时间范围在 0.75~1 s 之间。

换道模型中间隙接受模型应用最为广泛, 间隙接受理论揭示了每个驾驶员均有一个确定的关键间隙, 在换道行为的过程中, 只要一个间隙大于该关键间隙便视为可接受的间隙, 交通仿真软件 VISSIM, Aimsun 均对间隙接受进行了模型标定, Moridpour<sup>[23]</sup>在考虑小客车和大货车的分类条件下建立不同车辆类型的间隙接模型, Ben-Akiva<sup>[24]</sup>对于间隙接受行为划分成了两层决策, 并建立相应模型等。

本文则将换道划分为动机产生, 车道选择, 间隙选择以及换道执行 4 个过程, 并以此建立汇入区车辆的换道模型。

## 2 研究对象

车辆间的交互模型主要包括跟驰模型和换道

模型。其中, 跟驰模型的研究也已比较全面, 故而本文主要关注汇入区车辆的换道行为。另一方面, 汇入区车辆可区分为主线车辆和匝道车辆。其中主线车辆的换道行为为自主性换道, 车辆会依据驾驶环境自由进行车道, 而匝道车辆的换道则为强制性换道, 车辆必须汇入主线。

### 2.1 研究重点

团队前期研究表明, 跟驰行为对瓶颈的影响较小, 换道行为是瓶颈失效的重要致因。就换道行为而言, 换道的过程主要涉及 4 个步骤: ①产生换道动机; ②选择目标车道; ③选择插车间隙; ④执行换道。但对于仿真系统来说, 主要是针对前 3 个步骤进行建模。就步骤③而言, 团队前期已经对匝道车辆的间隙选择行为进行了详细的研究, 并取得了一定的研究成果, 而这些研究方法同样适用于主线车辆, 故而本文选择对经典间隙接受模型进行标定, 使其更适应于中国的驾驶环境, 并满足不同的间隙选择类型; 就步骤②而言, 匝道车辆有明确的目标车道, 即与匝道相邻的主线车道, 而对主线车辆, 处于最内侧车道的车辆只能向外侧车道换道, 而处于其他车道的车辆通过对实际数据分析可得, 有 80%以上选择了向内侧车道换道<sup>[1]</sup>, 故对匝道汇入区而言, 研究意义不大, 本文不作讨论; 但就步骤①而言, 匝道车辆因其必须要在有限的区域内汇入主线, 故车辆一进入汇入区就有明确的换道动机, 即汇入主线, 而主线车辆的换道属于自主性换道, 产生换道动机的原因有很多, 可能是车道的偏好, 也可能是对当前的驾驶环境不满意等, 而现有的模型对这方面的研究较少, 此外, 现有的仿真模型大都基于简单的规则或用阈值来确定换道动机, 与实际的驾驶行为存在明显的差异, 因此本文对主线车辆换道动机做详细的研究。

### 2.2 数据采集

本文使用了上海虹许路匝道汇入区视频数据, 所用的视频时长为 15 min。上海市虹许路匝

道汇入区共有 3 条主线车道和 1 条加速车道, 加速车道长约 133 m, 车辆的速度主要集中在 70 km/h 以下, 涵盖了从自由流到拥堵的过程, 实际流量为 1 317 辆/15 分。该瓶颈点的几何线型图 2 所示。

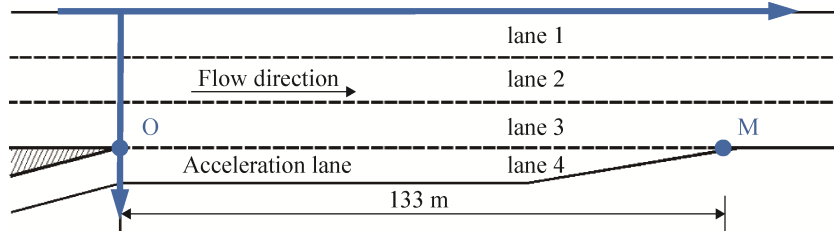


图 2 上海市虹许路瓶颈点的几何线形

Fig. 2 Road geometry of Hongxu on-ramp bottleneck in Shanghai

### 2.2.1 换道样本和非换道样本的定义

**换道样本:** 从车辆出现在研究范围内(OM 区域)到车辆离开研究范围为止, 若车辆的横坐标有跨越车道分割线坐标的情况出现, 则称为换道样本。每跨越一次车道分割线记为 1 个换道样本, 若在研究区域内一辆车跨越了多条车道分割线, 如先跨越了车道 3 与车道 2 之间的分割线, 再跨越了车道 2 与车道 1 之间的分割线, 则记为 2 个换道样本 (3→2, 2→1)。

**非换道样本:** 从车辆出现在研究范围内到车辆离开研究范围为止, 车辆的横坐标始终处于相邻的两条车道分割线坐标之间的样本称为非换道样本。

### 2.2.2 换道过程中关键时刻的定义

与跟驰行为不同, 车辆在换道的过程中有几个关键时刻值得注意, 分别是: 换道时刻、决策时刻和动机时刻, 如图 3 所示。在本研究中, 这几个时刻的定义分别为:

**换道时刻:** 车辆前保险杠中点坐标跨越车道分割线坐标的前一个时刻;

**决策时刻:** 换道时刻前车辆开始发生连续横向偏移起始时刻, 或者转向灯亮起时刻;

**动机时刻:** 对于上海虹许路数据, 车辆速度分布范围较广, 故分段定义动机产生时刻, 当决策时刻车辆的速度 > 40 km/h, 取决策时刻前的第 8 帧 (0.12 s × 8 = 0.96 s) 作为动机产生时刻, 当决策时刻车

图 2 给出了瓶颈区的基本道路设施结构, OM 为加速车道段, O 点为加速车道初始端, M 点为加速车道尾端。本研究的范围在 O 到 M 之间。在后续的分析中, O 点为坐标原点。

辆的速度 ≤ 40 km/h, 取决策时刻前的第 16 帧 (0.12 s × 16 = 1.92 s) 作为动机产生时刻; 对于样本而言, 取决策时刻前的第 10 帧 (0.1 s × 10 = 1 s) 作为动机产生时刻。

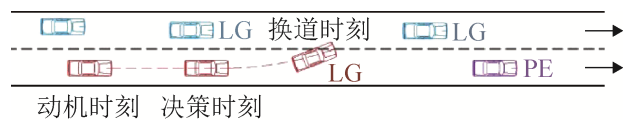


图 3 换道过程中的各关键时刻

Fig. 3 Key moment during lane change

本研究假设, 对于非换道样本, 其没有换道时刻和决策时刻, 但就换道动机而言每个驾驶员在每个时刻都有潜在的换道动机, 当车辆在当前时刻所受的影响较小时, 换道动机相对较弱, 车辆将继续在当前车道上行驶; 而当车辆在当前时刻所受的影响较大时, 换道动机便成熟, 驾驶员会继而比较相邻车道与当前车道的驾驶环境, 若相邻车道的驾驶环境优于当期车道, 则换道动机增强, 驾驶员确定目标车道, 并选择合适的间隙执行换道, 相反则换道动机减弱, 车辆继续在当前车道行驶。因此, 在本研究中, 我们将非换道样本在行驶过程中的某一随机时刻作为动机时刻。

### 2.2.3 可能影响换道动机的特征变量

在大多数的仿真软件中, 换道的动机仅与车辆自身的运动状态有关, 如车辆的减速度大小和减



速持续时间,但实际上动机的产生还与车辆所处的位置、当前车道前方的交通状况等有关,本研究考虑了下列可能影响车辆换道动机的因素,如表 1 所示。

### 2.2.4 样本采集

根据上述方法确定换道车辆和非换道车辆的

动机时刻,并提取动机时刻各车辆所对应的特征值。选择各特征值均非空的样本作为研究所用样本,非换道样本通过随机选取的方式使其在数量上基本与换道样本保持一致。瓶颈点各车道换道和非换道样本量的情况如表 2 所示。

表 1 采集影响变道因素的变量

Tab. 1 Variable in lane-changing motivation model

编号	指标含义	变量名及计算公式	单位
1	换道车辆	换道车辆所处的当前车道	$L_i$ /
2	所处的位置	换道车辆所处的纵向位置	$Y=Y_S/L_{acc}$ /
3		换道车辆的速度	$V_S$ m/s
4	换道车辆自身的运动状态	换道车辆的加速度	$A_S$ m/s <sup>2</sup>
5		换道车辆持续减速帧数(加速度小于 0m/s <sup>2</sup> 的帧数)	$E_{dec}$ /
6		与当前车道前车的车间空距	$S_{pre}=Y_{pre}-Y_S-L_{pre}$ m
7	与当前车道前车的相对运动状态	与当前车道前车的车间时距	$T_{pre}=S_{pre}/V_S$ s
8		与当前车道前车的速度差	$\Delta V_{pre}=V_{pre}-V_S$ m/s
9	受外部刺激的影响	受当前车道前车的影响帧数 $V_S < 40$ km/h 时, $S_{pre} < 7$ m, $V_S \geq 40$ km/h 时, $S_{pre} < 20$ m	$E_{pre}$ /
10		受当前车道后车的影响帧数(定义与 $E_{pre}$ 相同)	$E_{back}$ /
11	下游的交通状况	当前车道前方 3 辆车平均速度(若只有两辆前车则是两辆车的平均值,若只有一辆则是该辆车的值)	$V_{ave}=\sum V_{prei}$ m/s
12	与下游交通状况的相对状态	与当前车道前方三辆车平均速度的差	$\Delta V_{ave}=V_{ave}-V_S$ m/s

注:其中,  $L_{pre}$  为当前车道前车的车身长度。

表 2 数据采集样本信息  
Tab. 2 Information of samples

所处车道	1	2	3	总计
换道样本	21	123	249	393
非换道样本	164	137	87	388
总计	185	260	336	781

## 3 换道动机模型

如前文所述,匝道车辆为强制性换道,车辆必须换道到主线,因而有其特有换道动机的。这里主要考虑主线车辆的换道动机。

### 3.1 主线动机模型

本文利用 logit 回归,建立主线车辆的换道动机模型。对于匝道汇入区这样的区域而言,车辆所处的位置是影响驾驶员换道动机的一个重要因

素,故需要将其考虑到换道动机模型中。此外,车辆的加速度大小以及减速时长会影响驾驶员的换道动机,其余一些因素,如当前车辆与当前车道前车的时距、空距、速度差等也可能影响驾驶员的换道动机,建立的初始换道动机模型如式(1)所示。

$$P=1-\frac{1}{1+\exp(\sum_{i=1}^{12}\alpha_i\beta_i+c)} \quad (1)$$

式中:  $\beta_i$  为所有可能影响换道动机的因素;  $\alpha_i$  为各影响因素所对应的系数;  $c$  为常数项。

用数据对式进行标定,结果如式(2)所示。

$$P=1-\frac{1}{1+e^{-0.3056L_1-1.246L_2-0.012Y-0.009}} \quad (2)$$

## 3.2 精度分析

### 3.2.1 混淆矩阵

用混淆矩阵对模型的预测精度进行评价, 结果如表 3 所示。

表 3 模型预测结果  
Tab. 3 Prediction result of model

已观测	已预测		正确百分比/%
	非换道	换道	
非换道	284	104	73.20
换道	103	290	73.80
总计百分比/%	49.55	50.45	73.50

无论是对非换道行为还是换道行为的预测, 基于 Logistic 回归的的预测精度都达到 70% 以上, 且两类样本的预测精度也很平衡, 且两类样本间预测精度的差异为 0.6%。

### 3.2.2 ROC 曲线

除了混淆矩阵外, 模型的有效性还能用受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic curve, ROC) 来验证<sup>[25]</sup>。ROC 曲线是以灵敏度为纵坐标, 特异性为横坐标来绘制曲线的, 纵坐标表示将一个接受的状态预测为接受的状态的概率, 而横坐标表示将拒绝的状态预测为接受的状态的概率。通常可以用 ROC 曲线下的面积来评价模型的准确性, 面积越接近于 1, 说明模型的越具有有效性。当 ROC 曲线下的面积 < 0.5 时, 说明模型不符合实际情况; 当 ROC 曲线下的面积 = 0.5 时, 说明诊断方法完全不起作用; 当 ROC 曲线下的面积在 0.5~0.7 之间, 说明模型的准确性较低; 当 ROC 曲线下的面积在 0.7~0.9 之间, 说明模型有一定的准确性; 当 ROC 曲线下的面积 > 0.9 时, 说明模型的准确性较高。本研究所得的模型在 ROC 曲线下的面积分别如图 4 所示。

基于 Logistic 回归所建立的换道动机模型, 其结果在 ROC 曲线下的面积分别为 0.826, 因此本研究认为该模型是有效的。

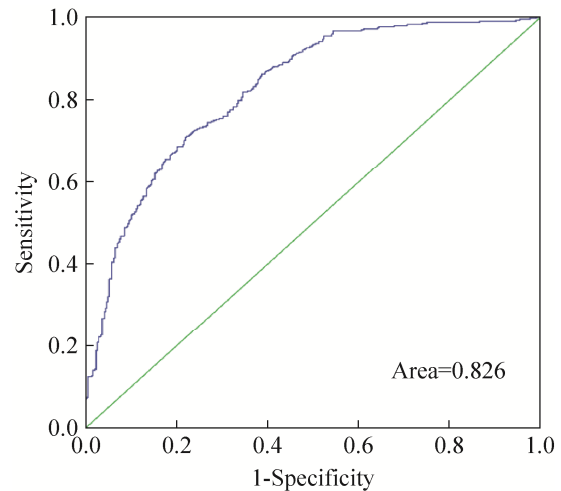


图 4 ROC 曲线  
Fig. 4 ROC curve

## 4 仿真测试

本研究基于 C++ 搭建了匝道汇入区微观交通仿真系统平台 ORBSIM (On-ramp Bottleneck Simulation), 利用各类模型和规则实现车辆的交互过程。

如前文所述, 车辆的交互模型主要是跟驰模型以及换道模型, 以下将介绍该系统中使用的跟驰模型以及换道模型。

### 4.1 跟驰模型

在该仿真系统中, 使用的是智能驾驶 (IDM-Intelligent Driver Model) 模型, 具体形式如式 (3), (4) 所示。

$$a_n = a' \left[ 1 - \left( \frac{v_n}{v_0} \right)^\alpha - \left( \frac{S^*(v_n, \Delta v)}{S_n} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

$$S^*(v_n, \Delta v) = S_0 + v_n T + \frac{v_n \Delta v}{2\sqrt{a'b}} \quad (4)$$

式中:  $a_n$  为跟驰车辆的加速度;  $a'$  为最大加速度;  $v_n$  为跟驰车辆速度;  $v_0$  为期望速度;  $\Delta v$  为跟驰车辆与引导车辆的速度差;  $S_n$  为跟驰车辆与引导车辆间车间空距;  $S^*(\cdot)$  为期望间距;  $S_0$  为停车间距;  $T$  为安全跟车时距;  $b$  为舒适减速度;  $\alpha, \beta$  为参数。

使用该模型不用对跟驰状态和自由行驶状态进行区分, 且模型中的最大加速度 ( $a'$ ) 和舒适减速



度(b)两项能防止模型产生不符合实际的加速度或减速度。

基于上海虹许路的实际数据用遗传算法对上式进行标定, 具体结果式(5), (6)所示。

$$a_n = 1.35 \left[ 1 - \left( \frac{v_n}{23.63} \right)^4 - \left( \frac{S^*(v_n, \Delta v)}{S_n} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$S^*(v_n, \Delta v) = 4.8 + 1.04v_n + \frac{v_n \Delta v}{2\sqrt{1.35 \times 1.09}} \quad (6)$$

## 4.2 换道模型

在换道行为中, 根据换道意图的不同可分为自主性换道和强制性换道。因其换道过程不同, 故在仿真系统中需设定不同的仿真流程及模型。就快速路匝道汇入区而言, 主线上车辆的换道行为属于自主性换道, 而匝道/加速车道上车辆的换道行为属于强制性换道, 根据换道意图可分为自主性换道和强制性换道, 就快速路汇入区而言, 主线上车辆的换道行为属于自主性换道, 而匝道/加速车道上车辆的换道行为属于强制性换道, 故需将模型分开。

### 4.2.1 动机模型

自主性换道首先需要对换道动机的产生进行判断。在该仿真系统中使用的是本文所提出的换道动机模型, 如下式所示。若根据车辆运动状态所得到的概率值低于概率阈值, 则概率性地产生换道动机; 若根据车辆运动状态所得到的概率值大于等于概率阈值, 则产生换道动机, 具体如式(1)。同时提出修正概率值如式(7)所示。

$$P' = \begin{cases} P, & P < \lambda \\ 1, & P \geq \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P$  为概率值;  $P'$  为修正概率值;  $\lambda$  为概率阈值。

匝道车辆的强制性换道行为有其特殊之处, 如越接近汇入区尾端, 驾驶员的换道动机越强烈。故在该仿真系统中, 根据车辆距汇入区尾端的距离设置了不同的换道概率阈值, 如下式所示, 当车辆换道动机的强度大于该阈值时, 则进行间隙的选择并执行换道。没能在到达汇入区尾端之前汇入主线的

车辆将在汇入区尾端排队, 依次汇入主线。

$$P' = \begin{cases} 0.95, & 0 \leq D \leq 0.15L_{acc} \\ 0.7, & 0.15L_{acc} < D \leq 0.3L_{acc} \\ 0.5, & 0.3L_{acc} < D \leq 0.6L_{acc} \\ 0.4, & 0.6L_{acc} < D \leq L_{acc} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P$  为换道概率;  $D$  为距加速车道尾端距离;  $L_{acc}$  为加速车道长度。

### 4.2.2 车道选择

如前文所述, 主线车辆进行换道时 85%以上都是向内侧换道, 故而为了简化仿真系统的复杂性, 在该案例中用实际的换道方向百分比来代替目标车道选择模型, 具体设置如表 4 所示。而对于匝道汇入车辆, 目标车道均为路肩车道。

表 4 选择各换道方向的概率  
Tab. 4 Direction probability of lane-changing

当前车道	向内侧换道概率	向外侧换道概率
中间车道	0.86	0.14
路肩车道	0.89	0.11

### 4.2.3 间隙选择

在选定目标车道后, 则对目标车道是否有合适的允许安全地执行换道的间隙进行评估。在该平台中, 使用的是 TransModeler 间隙选择模型, 如式(9), (10)所示。只有当前车辆与目标车道前车和后车的实际间隙都大于关键间隙的时, 车辆才会接受该间隙执行换道, 否则则继续留在当前车道行驶。

$$G_{lead} = \exp(c_{lead} + \alpha_{lead} \max(0, \Delta V_{lead})) + \beta_{lead} \min(0, \Delta V_{lead}) - \gamma_{lead} V + \varepsilon_{lead} \quad (9)$$

$$G_{lag} = \exp(c_{lag} + \alpha_{lag} \max(0, \Delta V_{lag})) + \beta_{lag} \min(0, \Delta V_{lag}) - \gamma_{lag} V + \varepsilon_{lag} \quad (10)$$

式中:  $G_{lead}$  和  $G_{lag}$  分别为当前车辆与目标车道前车和后车的关键间隙;  $\Delta V_{lead}$  和  $\Delta V_{lag}$  分别为当前车辆与目标车道前车和后车的速度差;  $\varepsilon_{lead}$  和  $\varepsilon_{lag}$  为干扰项;  $c_{lead}$ ,  $c_{lag}$ ,  $\alpha_{lead}$ ,  $\alpha_{lag}$ ,  $\beta_{lead}$ ,  $\beta_{lag}$ ,  $\gamma_{lead}$ ,  $\gamma_{lag}$  为参数。

基于虹许路的实际数据, 利用遗传算法对上式进行标定, 结果如式(11), (12)所示。

$$G_{\text{lead}} = 0.7[\exp(1.54 - 6.21\max(0, \Delta V_{\text{lead}}) - 0.13\min(0, \Delta V_{\text{lead}}) - 0.008V + \varepsilon_{\text{lead}}) + 1.5] \quad (11)$$

$$G_{\text{lag}} = 0.7[\exp(1.426 + 0.64\max(0, \Delta V_{\text{lag}}) - 0.24V + \varepsilon_{\text{lag}}) + 1.5] \quad (12)$$

式中各参数含义同式(9), (10),  $\varepsilon_{\text{lead}} \sim N(0, 0.845^2)$ ,  $\varepsilon_{\text{lag}} \sim N(0, 0.954^2)$ 。

#### 4.2.4 换道执行

若有合适的间隙, 车辆便会实施换道。在该仿真系统中, 直接定义了一个完成换道所需的时间, 来执行换道, 该值一般取 2~3 s<sup>[26]</sup>。

## 5 仿真结果分析

本文以上海市延安路高架虹许路入匝道瓶颈点为研究对象建立仿真, 仿真区域道路的几何线型如图 2 所示, 且在主线和匝道前段各设置 200 m 作为预热。

### 5.1 流量-密度图

利用该平台, 按不同流量输入进行仿真, 获取瓶颈处的流量-密度关系如图 5 所示。

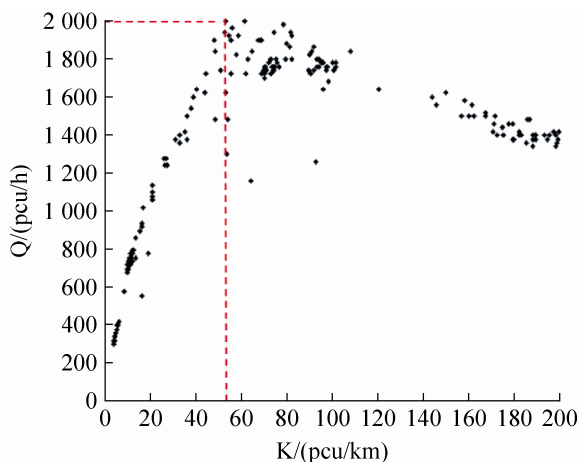


图5 瓶颈处流量-密度关系图

Fig. 5 Relationship between flow and density of bottleneck

由图 5 可知, 由仿真平台所得到的该瓶颈处的最大流量为 2 000 pcu/h, 当取最大流量时密度约为 55 pcu/km, 可得失效速度在 36 km/h 左右, 与实际情况相符, 故认为该仿真系统基本有效。

### 5.2 瓶颈区域内的拥挤流和消散流

PQF(Pre-queue flow)为瓶颈点下游断面在瓶颈失效开始前(即畅通阶段)5 min(或 15 min)的流量折合成的小时流量; QDF(Queue discharge flow)被定义为整个瓶颈失效过程中以 5 min 为间隔所得流量的平均值所折合成的小时流量。在现有的研究中, 常将速度阈值最为判断瓶颈失效的衡量标准, 参照前期研究<sup>[27-30]</sup>, 取速度阈值为 40 km/h 来识别瓶颈失效的起止时间, 结果如图 6 所示。

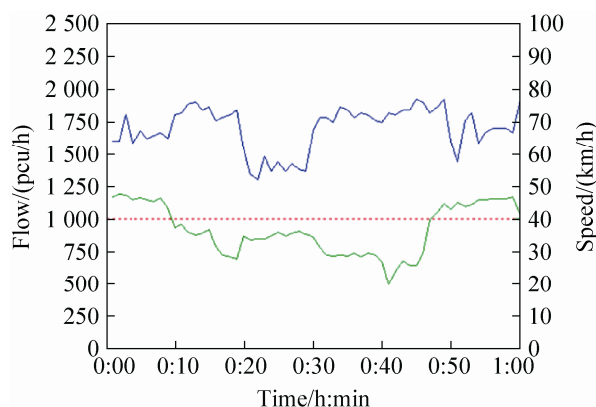


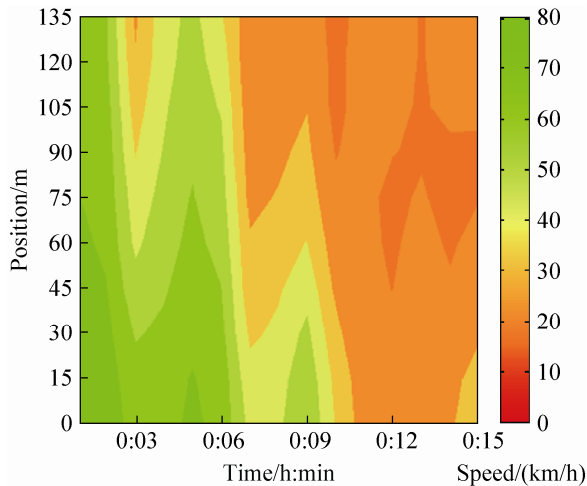
图6 瓶颈失效识别

Fig. 6 Breakdown distinguish of bottleneck

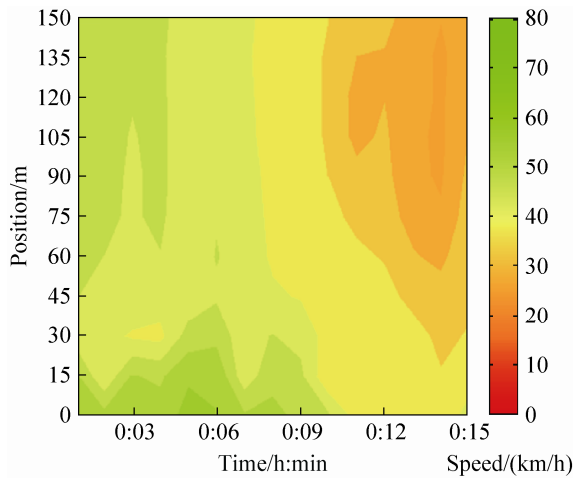
由图 6 可知, 该瓶颈从 10 min 左右的时候开始失效, 失效一直持续了约 38 min, 直到 48 min 左右时才开始慢慢恢复。计算得其 PQF 为 1664veh/h/lane, QDF 为 1890veh/h/lane, PQF 比 QDF 小 11% 左右。组内前期的研究表明, 虹许路段 PQF 为 1630veh/h/lane<sup>[1]</sup>, 仿真所得的值与实际相符合, 同时该瓶颈点发生早发性失效现象(PQF<QDF), 说明仿真系统较为有效。

### 5.3 速度时空图以及评价指标

在仿真模型中可以对照线圈的实际布设位置设置检测器, 以记录模型运行过程中的车速、流量、占有率等数据, 从而能够实现仿真运行数据与实测数据的对比。速度等时空图可作为一种直观且准确的视觉评价方法。仿真和实际的速度时空图对比如图 7 所示。



(a) 实际情况



(b) 仿真结果

图 7 实际情况与仿真结果的速度时空图对比  
Fig. 7 Speed contour map comparing between simulation and reality

对比图 7 实际和仿真结果的直观感觉是: 仿真所得的瓶颈区车辆的速度要略高于实际, 使得仿真的拥堵程度没有实际严重, 这也导致了仿真与实际在拥堵的范围和时间上出现了差异。

除了直观地从速度时空图来评价系统的仿真精度外, 还可通过相应的指标来评价, 如 C1, C2, GEH 和 DevS。C1 和 C2 分别用以评价拥堵的时空范围匹配程度以及拥堵区域的速度匹配, 而 GEH 和 DevS 用以评价瓶颈区域整体的流量匹配程度和速度匹配程度。C1 和 C2 越接近于 1, 匹配程度越高; GEH 和 DevS 的值越小, 匹配程度越高。各指标计算结果如表 5 所示。

表 5 各指标值

Tab. 5 Value of parameters

指标	C1	C2	GEH	DevS
推荐值	>0.85	>0.65	<5	<15%
ORBSIM	0.8161	0.7180	0.6094	14.63%

由表 5 可得, 就对拥堵区域而言, 仿真结果在时空范围上与实际存在些许差异, 但速度结果却在推荐的范围内; 就瓶颈区域整体而言, 仿真结果在流量和速度上都达到了推荐值。由此可见, 本文所建立的仿真系统是科学有效的, 也更符合我国的驾驶行为特性。

此外, 仿真结果和实际情况在速度的差异上并没速度时空图所展现的那样大。仿真结果和实际情况在拥堵的空间和时间匹配度上的结果超出了推荐值的范围, 其可能是因为在该仿真系统中没有对换道的类型进行定义, 因而无法仿真不同类型的换道对交通流的影响程度, 而在所研究区域中, 压迫式换道占了半数以上<sup>[1]</sup>, 使得换道行为对交通流的影响有所缺失, 致使仿真区域的拥堵情况与实际有所偏差。这一点会在后续进行完善。

### 5.4 换道强度

分别将仿真系统的换道动机模型设为本文所建立的基于 Logistic 回归的模型以及 Trans Modeler 中所使用的模型, 保持仿真系统的其他模型和设置不变, 得到换道强度如图 8 所示。

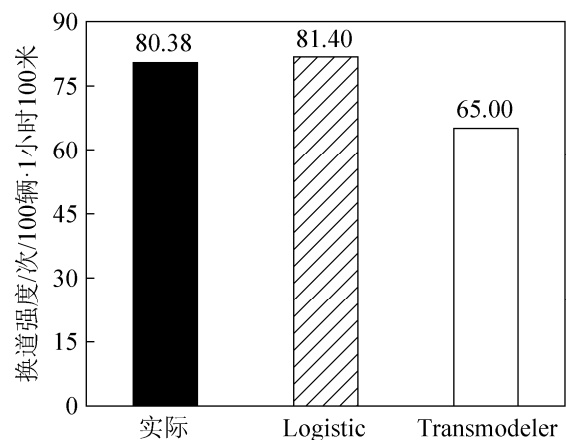


图 8 换道强度对比

Fig. 8 Comparison of lane changing intensity

换道强度的定义为每辆车每分钟每米的换道次数, 这里的换道强度是指匝道汇入区总的换道强度。如图 8 所示, 实际测得的换道强度为 80.38 次/100 辆车/1 小时/100 米, 利用基于 Logistic 回归的换道动机模型仿真得到的换道强度与实际的差异仅为 1.27%, 而利用基于 Trans Modeler 中换道动机模型仿真得到的换道强度与实际的差异为 18.23%。由此也可验证, 基于 Logistic 回归的换道动机模型要更符合实际的情况, 且该仿真系统有效。

## 6 模型在仿真系统中应用

### 6.1 系统介绍

TESS NG (Tongji nEtwork Simulation System Next Generation) 为团队开发具有完全自主知识产权的微观交通仿真软件。TESS NG 是在 TESS 研发试用 8 年后, 基于其工程应用, 用户反馈等方面的积累, 融合团队在微观交通系统建模及仿真领域的最新研究成果, 在 TESS 基础上升级更新而成。TESS NG 最主要特点为适应中国的驾驶环境, 在准确模拟中国驾驶人驾驶行为特征的基础上, 可以快速、有效的对不同交通对象和网络规模进行精细化模拟。

### 6.2 汇入模型在 TESS NG 中的应用

论文中所述汇入区域涉及的 logit 换道动机模型以及换道间隙选择模型在 TESS NG 系统应用时同时考虑到以下因素换道动机, 间隙选择产生的影响: (1) 不同交通流状况如车流密度、车型组成等; (2) 不同汇入线形如汇入交角, 汇入区长度等。基于此, 在 TESS NG 系统中进一步工程化完善, 使其适用于不同类型汇入区仿真的汇入模型。将仿真系统应用于上海市内环虹许路汇入段汇入区以及上海内环漕溪北路立交, 体现了良好的仿真效果, 可以有效对汇入段主线的车辆换道行为及汇入车辆的换道行为进行仿真。具体仿真参见图 9 及图 10 所示。



图 9 内环虹许路段汇入区仿真

Fig. 9 Simulation of Hongxu Road on-ramp bottleneck on inner ring

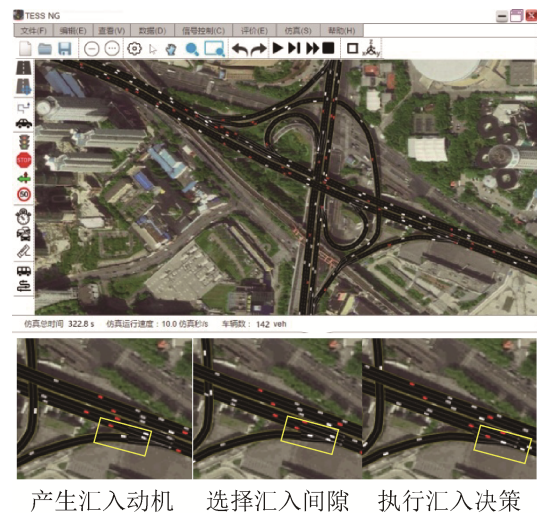


图 10 内环漕溪北路立交仿真

Fig. 10 Simulation of Caoyi South Road roundabout on inner ring

## 7 结论

由于车辆间的交互作用是导致快速路瓶颈失效的关键致因, 故对微观驾驶行为进行分析和建模有助于分析瓶颈失效的机理。本研究提取了上海市延安路高架虹许路入匝道瓶颈点车辆的全轨迹数据, 建立了主线车辆的换道动机模型; 在此基础上, 建立了基于 C++ 的入匝道瓶颈区仿真系统, 并以上海内环虹许路汇入区为例进行仿真, 并将模型进一



步应用于团队开发微观交通仿真软件 TESS NG, 可得到如下成果及结论:

(1) 在匝道汇入区, 车辆所处的位置对换道动机有显著影响。外侧车道车辆的换道强度和换道比例明显比内侧车道高, 在上海外侧车道车辆的换道强度为内侧车道的 6.7 倍, 换道比例分别为 10.92 倍。

(2) 在考虑车辆所处位置及相关影响因素的基础上, 建立了基于 Logistic 回归的换道动机模型。模型显示了较高的预测精度(73.5%)及较好的拟合效果(ROC 曲线下的面积分别为 0.826)。

(3) 以虹许路匝道汇入区为例进行 ORBSIM 仿真, 将仿真所得的流量-密度图、拥挤流和消散流、速度时空图以及换道强度与实际对比, 发现该仿真系统能再现实际的交通流状况, 各现象也与实际情况相符, 说明仿真系统科学有效。

(4) 进一步, 考虑到在不同交通流状况如车流密度、车型组成以及不同汇入线形如汇入交角, 汇入区长度等对汇入动机模型及间隙选择模型产生的不同影响, 将模型进一步工程化应用于 TESS NG 中, 可以有效的对中国城市快速路不同情况下的汇入行为进行微观表征。

### 参考文献:

- [1] 赵莉. 城市快速路入匝道瓶颈交通流失效机理研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013. (Zhao Li. Research on traffic breakdown mechanism of bottlenecks at urban expressway on-ramps [D]. Shanghai, China: Tongji University, 2013.)
- [2] Cassidy M J, Rudjanakanoknad J. Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp [J]. *Transportation Research Part B: Methodological* (S0191-2615), 2005, 39(10): 896-913.
- [3] Song R, Sun J. Calibration of a micro-traffic simulation model with respect to the spatial-temporal evolution of expressway on-ramp bottlenecks [J]. *Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International* (S0037-5497), 2016, 92(6): 535-546.
- [4] Blumenfeld D E, Weiss G H. Merging from an acceleration lane [J]. *Transportation Science* (S0041-1655), 1971, 5(2): 161-168.
- [5] Polus A, Livneh M. Comments on flow characteristics on acceleration lanes [J]. *Transportation Research Part A: General* (S0965-8564), 1987, 21(1): 39-46.
- [6] Glickstein A, Findley L D, Levy S L. Application of computer simulation techniques to interchange design problems [C]//*Highway Research Board Bulletin*. 1961, 291.
- [7] Perchonok P A, Levy S L. Application of digital simulation techniques to freeway on-ramp traffic operations [C]// *Highway Research Board Proceedings*. 1960, 39.
- [8] Salter R J, El-Hanna F I H. Highway ramp merging examined by simulation [J]. *Australian Road Research* (S0968-090X), 1976, 6(2): 30-39.
- [9] 臧志刚, 陆锋, 李海峰, 等. 7 种微观交通仿真系统的性能评价与比较研究 [J]. *交通与计算机*, 2007, 25(1): 66-70. (Zang Zhigang, Lu Feng, Li Haifeng, et al. Performance Evaluation and Comparison of Seven Microscopic Transportation Simulation Systems [J]. *Computer and Communications*, 2007, 25(1): 66-70.)
- [10] Hidas P. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (S0968-090X), 2002, 10(5): 351-371.
- [11] Choudhury C F, Ben-Akiva M E, Toledo T, et al. Modeling cooperative lane changing and forced merging behavior [C]// *Transportation Research Board 86rd Annual Meeting*. 2007.
- [12] Sun J, Ouyang J, Yang J. Modeling and Analysis of Merging Behavior at Expressway On-Ramp Bottlenecks [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (S0361-1981), 2014, 2421(1): 74-81.
- [13] Zheng Z. Recent developments and research needs in modeling lane changing [J]. *Transportation research part B: methodological* (S0191-2615), 2014, 60(1): 16-32.
- [14] Gipps P G. A model for the structure of lane-changing decisions [J]. *Transportation Research Part B: Methodological* (S0191-2615), 1986, 20(5): 403-414.
- [15] Toledo T, Koutsopoulos H, Ben-Akiva M. Modeling integrated lane-changing behavior [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (S0361-1981), 2003, 1857(1): 30-38.
- [16] Wang C, Coifman B. The effect of lane-change maneuvers on a simplified car-following theory [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (S1524-9050), 2008, 9(3): 523-535.

