

考虑集卡影响的上匝道合流区通行能力模型

吴志周¹, 范宇杰², 张剑桥¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海城市建设设计研究总院, 上海 200125)

摘要: 基于合流区交通流的作用机理, 通过实际观测数据对VISSIM仿真参数进行标定, 建立考虑集装箱卡车影响因素的上匝道合流区通行能力分析的仿真模型, 进而利用仿真模型定量分析主线外侧车道流量、集卡混入率两因素对上匝道合流区通行能力的影响, 得到考虑集卡影响的上匝道合流区实际通行能力回归模型, 并通过实测数据进行验证。

关键词: 上匝道; 合流区; 通行能力; 集装箱卡车; VISSIM仿真

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Model of Merge Capacity Under Impact of Container Trucks

WU Zhizhou¹, FAN Yujie², ZHANG Jianqiao¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: Based on the traffic flow mechanism analysis and field data collection in the merge area, the VISSIM simulation model is established and calibrated to analyze the merge capacity under the impact of a large number of container trucks. Then, a multivariate regression model of merge capacity is constructed by taking into the consideration these two parameters, the traffic volume and the mixed rate of container trucks on shoulder lane. Finally, a case study is introduced to verify the model.

Key words: on-ramp; merge area; traffic capacity; container trucks; VISSIM simulation

上匝道是快速路等连续流设施的物理瓶颈, 集装箱卡车(集卡)由于载重大、加减速小、换道所需时间和距离长, 在合流区运行效率低, 更易造成快速路合流区的拥堵。美国《道路通行能力手册(HCM)》

虽然指出重型车辆对合流区的影响区别于对基本路段的影响, 但并没有给出定量的分析和说明, 上匝道合流区通行能力依然是通过折算成标准小汽车获得。在集卡流量较大的上匝道合流区, 由于集卡需寻找主线外侧车道的可穿越间隙, 从匝道变道汇入主线, 其通行能力可能远低于规范的理想推荐值^[1]。因此, 研究多集卡环境下的快速路上匝道合流区实际通行能力有助于完善上匝道合流区的交通流理论研究, 也为集疏运功能快速路上匝道的交通管理、设计提供理论支持。

1 国内外研究现状

国内外对各种合流现象下的上匝道合流区通行能力进行了广泛的研究。文献[2]通过对德国高速公路的实际流量、车速的分析处理, 以外侧车道的流量作为影响因素建立了上匝道合流影响区通行能力模型; 文献[1]建立了主线外侧车道流量、主线流量及上匝道汇入主线流量的回归关系模型, 从比较宏观的角度探讨了上匝道通行能力; 文献[3]利用实际调查数据建立了加速车道合流点分布概率的经验模型, 对可接受间隙理论的原型进行了形式上的修正, 提出上匝道合流区的混合车流通行能力经验模型; 文献[4]利用间隙接受理论, 认为快速路主线外侧车流车头时距分布符合爱尔朗分布, 建立了主线不同流量下上匝道汇入主线的通行能力模型。但是, 以上文献对大型车的界定和分类不明确, 未对考虑大型车影响的通行能力进行深入研究。同时, 由于不易获得充足交通流数据, 通过统计分析建立上匝道合流区通行能力回归模型, 往往理论根据不强; 基于间隙接受理论的上匝道混合交通流通行能力模型通常计算复杂, 车头时距分布又难以确定, 且不适用于主线单车道流量大于 $1\ 200\ \text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况。

收稿日期: 2012-04-23

基金项目: 上海市科技攻关项目(11DZ2291400)

第一作者: 吴志周(1975—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统。E-mail: wuzhizhou@tongji.edu.cn

通讯作者: 范宇杰(1988—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为交通信息工程及控制。E-mail: fantasy.fyj@163.com

随着计算机技术的飞速发展,利用计算机可重复性、可延续性模拟仿真交通运行状况的特点,对于再现复杂交通环境条件下的交通流运行特性、弥补观测数据的不足等问题都有着其他方法和手段无可比拟的优势,因此仿真方法逐渐被应用在合流区交通流研究中.文献[5]针对标准小汽车交通流,利用VISSIM仿真构建了上、下匝道连接段的仿真模型,并结合实测数据对模型参数进行了标定,得到快速路匝道连接段通行能力;文献[6]运用线圈和人工调查获得高速公路实际交通流数据,对合流区和分流区进行了VISSIM仿真的相关参数标定;文献[7]运用交通仿真手段研究了匝道合流区和下匝道连接段的合流与分流行为.

上述研究都没有将重车的影响考虑在内,如集装箱卡车等.鉴于获得大量、全面的实际数据较难,因此,本文以VISSIM仿真为手段,通过数据调查建立多集卡合流区仿真模型,利用仿真技术具有可重复性、可延续性的特点,研究分析主线外侧车道流量、主线外侧车道集卡混入率与上匝道合流区通行能力之间的关系,在此基础上提出考虑集卡影响因素的快速路上匝道合流区通行能力多元线性回归模型.

2 交通调查

选择同济高架(整体式高架类型^[8])某上匝道合流区作为调查地点.采用视频检测作为调查手段,使用设备为Video Trace视频检测系统主机、监视器、3台数码摄像机及支架,配备调查人员3人,检测器布设于匝道连接段附近区域合适位置.图1为调查对象上匝道合流区断面及检测设备布设示意图.

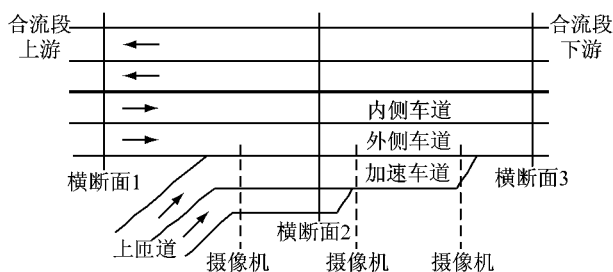


图1 合流区断面及检测设备布设示意

Fig.1 Diagram of merge area section and detectors distribution

通过对上海外高桥港区周边居民、交通协管、集卡驾驶员的问卷以及现场勘探,确定交通调查时段为周三的15:00~19:00,覆盖非高峰时段(15:00~

17:00)和高峰时段(17:00~19:00).

调查内容:①道路设施基础数据采集,包括上匝道连接段几何形式及尺寸,主要为车道数及车道分布、车道宽度、加速车道长度、匝道类型、交通标志等;②交通流数据采集,包括实测主线、匝道以及加速车道的交通流数据,包含车型比例、交通组成、流量、速度、车头时距.

3 仿真模型建立

根据调查获得的道路基础数据和交通流数据建立VISSIM仿真基础模型,将车辆从匝道汇入主线状态下的驾驶员跟车行为和变道行为参数作为校正目标参数,利用仿真输出得到的主线车头时距、车辆从匝道汇入主线的流量与实际调查数据进行校核,若误差在允许范围内,认为仿真模型能够较好地模拟上匝道合流区的交通流运行状态,可以进行方案的分析;否则需对目标参数进行修正,直到满足仿真验证要求为止.

3.1 仿真建模

3.1.1 道路参数输入

借助谷歌地图6.0获取调查区域的空间俯视图,快速路为双向4车道,主线单车道宽度为3.75 m.在VISSIM中需输入的快速路合流区道路参数包括:1条加速车道、2条上匝道车道、2条同向主线车道,其中合流区渐变段长度为50 m,加速车道长度为200 m.

3.1.2 车辆类型与交通组成

仿真模型中仅考虑小汽车和集卡2种车型,其中,集卡不考虑载货状态,其他车辆类型交通量合并入小汽车交通量中;交通组成根据实际调查得到的车辆混入率和流量确定.各参数具体见表1.车辆的期望速度由调查得到的非高峰小时自由流车速累计曲线获得.

3.1.3 驾驶行为参数标定

在上匝道合流区,加速车道上准备汇入主线的车辆会不断地发生跟驰和变道行为,因此,需对这2种行为的参数进行正确标定,它们是影响仿真模型准确性的关键.跟车行为仿真选用Wiedemann 99模型^[9],变道行为仿真选用自由车道选择方式^[9],经校正后各类型车辆的跟车行为和变道行为模型参数的标定值见表2^[10].

3.2 仿真模型校核验证

模型校核与验证的主要方法为:以5 min为数

表 1 车辆主要性能参数及交通组成

Tab.1 Main vehicle performance parameters and traffic composition

车型	车辆性能参数						
	长度/m	宽度/m	重量/kg	最大加速度/(m·s ⁻²)	最小加速度/(m·s ⁻²)	最大减速度/(m·s ⁻²)	最小减速度/(m·s ⁻²)
小汽车	4.5	1.8	800~2 000	8.0	6.0	-13.0	-10.0
集卡	16.0	2.5	23 000~58 000	5.0	3.7	-8.0	-5.0

车型	交通组成			
	主线流量/(veh·h ⁻¹)	主线混入率/%	上匝道流量/(veh·h ⁻¹)	上匝道混入率/%
小汽车	390	39	98	27
集卡	611	61	266	73

表 2 仿真模型参数标定

Tab.2 Calibrated parameters of the simulation model

车型	跟车行为参数标定				变道行为参数标定				
	停车间距/m	期望车头时距/s	前后车的纵向摆动约束距离/m	进入跟驰状态的阈值	跟车状态的阈值		最大减速度/(m·s ⁻²)	可接受的减速度/(m·s ⁻²)	最小车头空距/m
					速度差为负	速度差为正			
小汽车	1.00	1.20	2.00	-7.5	-0.3	0.3	-13	-10	1.5
集卡	2.00	1.50	4.00	-8.0	-0.4	0.4	-8	-5	2.5

据采样间隔获得仿真与实测的主线车头时距、从加速车道汇入主线的车辆数。根据得到的仿真数据与实测数据,对其进行检验。

利用 t 检验^[11],建立假设 H_0 :假设仿真模型中的车头时距与实测的平均车头时距相等。从表 3 可

知,由 t 检验结果得到,在 95% 的置信水平下,VISSIM 仿真模型中的各类主线车头时距和实测平均车头时距并无显著差异,因此仿真模型可以用来描述实际的车辆跟驰行为。

表 3 95% 置信水平下的车头时距 t 检验结果

Tab.3 “ t ” test of headway on the confidence level up to 95%

车头时距类型	车头时距/s		t 值	置信区间	是否拒绝	是否有显著差异
	实测	仿真				
小汽车-小汽车	1.4	1.3	-0.231	[-0.458,0.258]	否	否
集卡-集卡	4.3	4.1	-0.263	[-0.313,0.243]	否	否
小汽车-集卡	2.9	3.0	0.015	[-0.189,0.341]	否	否
集卡-小汽车	3.0	3.0	0.111	[-0.340,0.378]	否	否

图 2 是仿真与实测的变道汇入主线的车辆数。利用秩和检验^[11],建立假设 H_0 :假设仿真得到的变道车辆数与实测变道车辆数相等。

从表 4 可知,由秩和检验结果得到,在 95% 的置信水平下仿真模型中的变道车辆数和与实测数量并无显著差异,因此仿真试验的结果可以用来描述实际车辆从加速车道变道汇入主线的变道行为,仿真的结果具有可信性。

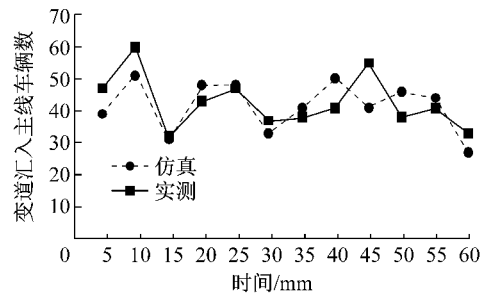


图 2 仿真与实测的变道汇入主线的车辆数比较
Fig.2 Comparison of lane volume variation by simulation model and the insitu data

表 4 95% 置信水平下的变道车辆数秩和检验结果

Tab.4 Rank sum test of the number of changing-lane vehicles on the confidence level up to 95%

显著性水平	仿真样本量	实测样本量	秩和	置信区间下限	置信区间上限	是否拒绝	是否有显著差异
0.05	12	12	152.5	116.500	183.950	否	否

4 通行能力分析

交通设施的通行能力是指在通常的道路、交通和管制条件下,在一定时间段内能合情合理地期望人或车辆通过车道、道路中某一点或均匀断面的最大小时流率.由于交通设施类型和分析目的不同,计量通行能力的单位有 $\text{per} \cdot \text{h}^{-1}$, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$ [1].

对于多集卡环境下的匝道合流区而言,由于驾驶行为不同,匝道合流区的标准小汽车折减系数同基本路段的有明显差异,且目前并没有专门针对合流区集卡与标准小汽车折算系数方面的研究.考虑到研究对象匝道的集卡高混入率,本文在进行上匝道的通行能力仿真试验分析时只考虑进入匝道的车型全部为集卡的情况,主线的车辆组成包括小汽车和集卡,因此最终得到的上匝道合流区通行能力是单位小时内通过加速车道汇入主线车道的最大集卡车辆数,计量单位为 $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$.

上匝道合流区通行能力主要受到以下3个因素的制约:①主线外侧车道上的车流特性;②匝道车辆接受空档的特性;③匝道车辆连续跟车行驶的特性.其中,因素①是由主线外侧车道流量和不同车型的混入率决定的;因素②和因素③则是由匝道车流特性和主线外侧车道车流特性共同决定的.由于本文中定义匝道车辆只有集卡,匝道车流特性变化稳定,因此,本文利用 VISSIM 仿真从2个方面来对多集卡的上匝道合流区通行能力的影响进行研究:主线外侧车道流量(shoulder lane volume, SLV)及主线外侧车道集卡混入率(mixed rate of container truck on shoulder lane, MIX).

4.1 影响因素分析

4.1.1 主线外侧车道流量对上匝道合流区通行能力的影响

文献[2]提出的上匝道合流区通行能力模型认为外侧车道的流量决定着合流区的流量,从而决定上匝道合流区通行能力.因此,在研究实际通行能力时需将主线外侧车道流量的影响考虑在内.

利用 VISSIM 仿真模型在不同主线外侧车道流量情况下对上匝道合流区通行能力的影响进行仿真分析.针对不同主线外侧车道的集卡混入率,将流量为 $100 \sim 1\,000 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 以采样间隔每 $50 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 递增的方式进行仿真.

由图3可以得到不同集卡混入率情况下主线外侧车道流量与上匝道合流区通行能力的关系.总体上,通行能力随着主线外侧车道流量的增加而减少.

当主线流量增加到一定程度后,不论集卡混入率是多少,通行能力都会下降到一个稳定值.以主线外侧车道集卡混入率为50%为例,随着主线外侧车道流量的增大,合流区通行能力总体呈现下降趋势.在低饱和度状态,主线外侧车道流量每增加 $50 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$,合流区通行能力平均下降7%,当主线外侧车道流量增大到 $700 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时,上匝道合流区通行能力趋于定值.这主要是因为主线外侧车道交通量在高饱和度、低服务水平时可穿越间隙较少造成的.所以,此时应考虑对合流区主路和上匝道采取信号控制来提高合流区通行能力,缓解拥堵及其导致的交通流延误.

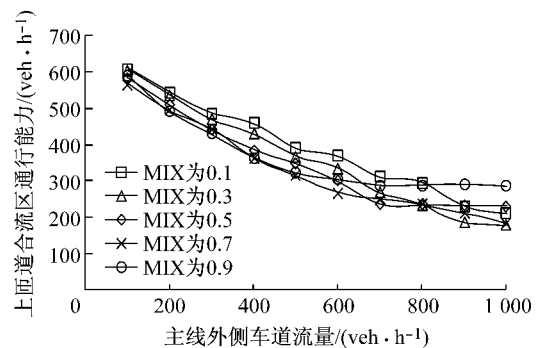


图3 主线外侧车道流量与上匝道合流区通行能力的关系
Fig.3 The relationship between the traffic volume on shoulder lane and on-ramp merge capacity

4.1.2 主线外侧车道集卡混入率对上匝道合流区通行能力的影响

HCM[1]中明确指出,主路的车型组成也会影响上匝道合流区通行能力.当主路外侧道路交通组成发生变化时,由于集卡和小汽车提供的可穿插间隙时长不同,提供的合流机会就有差异,从而影响上匝道合流区通行能力.

利用 VISSIM 仿真模型,在主线外侧车道不同的集卡混入率情况下对上匝道合流区通行能力的影响进行仿真分析.针对不同主线外侧车道流量,对主线外侧车道集卡混入率为10%~90%以采样间隔每10%递增的方式进行仿真.

由图4可知不同主线外侧车道流量情况下主线外侧车道集卡混入率与上匝道合流区通行能力的关系,总体上,通行能力随着主线外侧车道集卡混入率的增加而减少.当主线集卡混入率增加到一定程度后,通行能力反而会略有上升.以主线外侧车道流量为 $500 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 为例,随着主线外侧车道集卡混入率的增加,合流区通行能力总体呈现下降趋势.主线外侧车道集卡混入率每增加10%,合流区通行能力

平均下降 5%，当主线外侧车道的集卡混入率超过 80%后，上匝道的集卡通行能力略有上升，最大上升幅度达到 7%。这是因为在主线外侧车道的交通流中，随着集卡混入率的提高，集卡与其他车辆的安全距离增加，导致前后车的平均车头时距增加，进而增加了上匝道车辆汇入主线的可穿越间隙机会，最终导致上匝道合流区通行能力的提高。

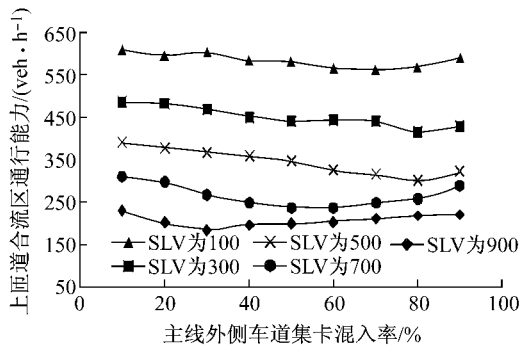


图 4 主线外侧车道集卡混入率与上匝道合流区通行能力的关系

Fig. 4 The relationship between the mixed rate of container trucks on shoulder lane and on-ramp merge capacity

4.2 经验回归模型

将上匝道合流区通行能力作为因变量，主线外

侧车道的流量、集卡混入率作为自变量，利用仿真数据建立在多集卡环境下考虑集卡车辆影响的上匝道合流区实际通行能力多元线性回归模型。

$$C_{con} = m_1 S_{LV} + m_2 M_{IX} + m_3 \quad (1)$$

式中： C_{con} 为上匝道合流区通行能力， $veh \cdot h^{-1}$ ； S_{LV} 为主线外侧车道流量， $veh \cdot h^{-1}$ ； M_{IX} 为主线外侧车道集卡混入率，%； m_1, m_2, m_3 为待计算的回归系数。

利用软件 SPSS 16.0 得到表 5 中的共线性统计指标：两自变量的容忍度都为 1，方差膨胀因子值也不大，可以认为上述两自变量之间无相互影响，不存在共线性。计算得到模型中各参数的回归系数，多元线性回归模型为

$$C_{con} = 583.83 - 23.55M_{IX} - 0.39S_{LV} \quad (2)$$

为更准确地表述多自变量回归方程的实际拟合程度，克服样本决定系数这一缺点，本文选择调整相关系数 R^2 来评价变量间相关性的优劣，经 SPSS 16.0 计算，得到上式的调整 R^2 为 0.873，两自变量与因变量间存在着较强的相关性。如表 6 所示的方差分析结果表明，当回归方程包含上述 2 个自变量时，显著性指标小于 0.001，即拒绝回归系数为零的原假设。因此，最终得到的回归方程应该包括主线外侧车道流量和集卡混入率 2 个自变量，且最终方程的拟合效果较好。

表 5 回归分析与相关性检验结果

Tab.5 Regression analysis and correlation testing

回归系数	非标准化系数		标准回归系数	t 值	显著性指标	共线性统计	
	回归系数	标准误差				容忍度	方差膨胀因子
截距	583.831	9.292		62.832	0		
M_{IX}	-23.552	5.520	-0.277	-19.390	0	1.000	1.000
S_{LV}	-0.392	0.011	-0.934	-34.229	0	1.000	1.000

表 6 方差分析结果

Tab.6 The results of variance analysis

方差分析	平方和	自由度	均方	F 值	显著性指标
回归值	1 981 311.731	2	990 655.865	587.925	0
残差值	283 080.795	168	1 685.005		
合计	2 264 392.526	170			

图 5 是根据仿真数据拟合得到的上匝道合流区通行能力与主线外侧车道流量、集卡混入率之间关系的曲面图。可见，随着主线外侧车道流量、集卡混入率的增大，通行能力减小，且主线外侧车道流量的增加造成上匝道合流区通行能力的下降要大于主线外侧车道集卡混入率对其产生的影响。因此，对于提高上匝道合流区通行能力而言，有效的主线流量控制管理的作用大于对主线交通组成的控制管理。

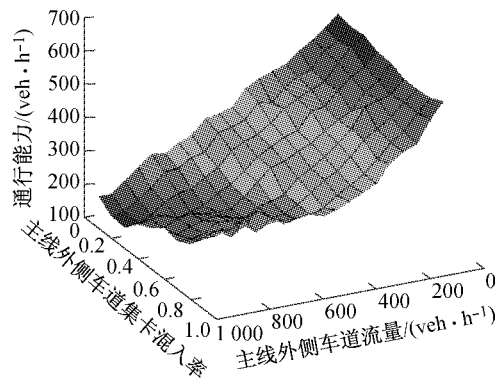


图 5 上匝道合流区通行能力与主线外侧车道流量、集卡混入率的关系

Fig. 5 The relationship among traffic volume, mixed rate of container trucks on shoulder lane, and on-ramp merge capacity

5 实例验证

表7为高峰时段的合流区交通流量观测数据和式(2)的计算结果比较。需要说明的是,在高峰时段,由于调查对象匝道交通流中的车型主要是集卡,其上匝道混入率超过80%,且高峰时段加速车道车辆发生排队,说明实测车辆变道汇入主线的流量可以看作是上匝道合流区通行能力。利用式(2)计算得到多集卡环境下高峰时段实际通行能力。其中,实测值略偏大于计算的通行能力,这是因为上匝道的车流中还包括小比例的其他车辆。由计算得到,在匝道发生排队的高峰时段,利用模型计算得到的上匝道合流区通行能力与实际汇入流量的平均相对误差为6.0%,最大相对误差为8.1%,最小相对误差为4.9%。综上所述,式(2)能够较好地反映该上匝道合流区通行能力。

表7 高峰时段观测值与理论计算结果

Tab.7 Comparison of the measured volume and the computation value in peak hours

时段	主线外侧 车道流 量/veh	主线外侧 车道集卡 混入率/%	匝道是 否发生 排队	汇入流量		
				实测值/ veh	计算值/ veh	相对误 差/%
17:00~17:15	128	74	否	61	92	50.8
17:15~17:30	135	75	否	65	89	36.9
17:30~17:45	170	83	是	79	75	5.1
17:45~18:00	159	78	是	86	79	8.1
18:15~18:30	163	81	是	82	78	4.9
18:30~18:45	156	77	是	85	80	5.9
18:45~19:00	130	69	否	63	92	46.0

6 结论与展望

为了确定多集卡快速路上匝道合流区实际的通行能力及影响因素,借助仿真手段对其进行了研究。建立合流区仿真模型,通过实测数据对合流区集卡与小汽车的跟车以及变道行为参数进行标定,校核并验证了仿真模型的可靠性,证明利用VISSIM仿真软件对快速路合流区仿真具有可行性;利用仿真模型对多集卡环境下的上匝道合流区通行能力的影响因素进行分析,包括主线外侧车道流量及其集卡混入率对通行能力的影响;根据影响因素建立通行能力的多元线性回归模型。最后利用高峰时段的实测数据验证了模型。研究为集疏运功能快速路上匝道交通管理、设计提供理论支持,也丰富了上匝道合流区交通流理论的研究方法。

本文没有考虑上匝道集卡与其他车辆混行情况下的通行能力,并且合流区道路设计和交通设计、合流区交通管理控制等发生相应的变化也会引起其通行能力的变化,这些因素对上匝道合流区通行能力的影响还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2000 [S]. Washington: Transportation Research Board Publications, 2000.
- [2] Sigrid Westphal. Capacity of freeway on-ramps on German motorways [C]//The Second International Symposium on Highway Capacity. Victoria: ARRB Group Limited, 1994: 702-722.
- [3] 马俊来,王纬,李文权,等. 高速公路合流区上匝道混合车流通行能力经验计算法[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10):97. MA Junlai, WANG Wei, LI Wenquan, et al. Empirical capacity calculating method for expressway on-ramp mixer traffic flow [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10):97.
- [4] Sang G K, Young T S. Development of a new merge capacity model and the effects of ramp flow on the merge capacity[C]//Transportation Research Board. Washington D C: Nation Academy of Science, 2003: 4508-4527.
- [5] 慈玉生. 快速路匝道连接段通行能力与匝道设置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. CI Yusheng. On-off ramp junction capacity and ramp setting on urban expressway [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [6] Gabriel Gomes, Adolf May, Roberto Horowitz. Congested freeway microsimulation model using VISSIM [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1876(8):71.
- [7] Li D H, Leonard J D. Simulation of freeway merging and diverging behavior [C]//Proceeding of the 2003 Winter Simulation Conference. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003: 1693-1700.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ129—2009 城市快速路设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P R China. CJJ129—2009 Specification for design of urban expressway [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [9] Planung Transport Verkehr AG. Vissim user manual—V. 5. 30 [R]. Karlsruhe: Planung Transport Verkehr AG, 2010.
- [10] 孙剑,杨晓光,刘好德. 微观交通仿真系统参数校正研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1):48. SUN Jian, YANG Xiaoguang, LIU Haode. Study on microscopic traffic simulation model systematic parameter calibration [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1):48.
- [11] 李洁明,祁新娥. 统计学原理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007. LI Jieming, QI Xin'e. Principle of statistics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007.