

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.04.021

2010HCM 交织区通行能力分析方法的适用性研究

周晨静, 荣建, 冯星宇

(北京工业大学 交通工程研究中心, 北京 100124)

摘要: 首先以相同数据分别定量分析了2000版和2010版美国《道路通行能力手册》中交织区通行能力分析方法中的交织速度和非交织速度计算模型, 设计了不同交织区交通运行的组合条件, 对2010版交织区速度计算模型进行了定性分析。认为2010版美国《道路通行能力手册》对非交织车流运行速度计算存在重复折减, 致使非交织车流运行速度预测过低, 交织车流运行速度大于非交织车流运行速度, 与实测运行特性不相符。在此基础上, 对2010版交织区通行能力分析速度计算模型进行了探讨和改进, 选取天津市卫昆立交桥交织区作为调查对象, 开展了交织区交通流运行状态调查, 并从定量和定性两方面对改进模型进行了效果分析。结果表明: 改进模型在预测精度和特性描述上均有所提升。

关键词: 交通工程; 交织区; 定性和定量分析; 交织速度; 非交织速度; 通行能力

中图分类号: U491.1⁺22

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2015)04-0118-06

Study of Applicability of Weaving Area Capacity Analysis Method of 2010HCM

ZHOU Chen-jing, RONG Jian, FENG Xing-yu

(Research Center of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The weaving speed and non-weaving speed calculation models in the capacity analysis procedure of weaving section in 2000 edition and 2010 edition of Highway Capacity Manual (HCM) are quantitatively analysed by using the same data. A set of operation conditions of different weaving segment is designed to make a qualitative analysis for weaving area speed calculation model in the 2010 edition. It is believed that there exists repeat reduction for no-weaving traffic flow speed calculation in 2010 HCM, which leads to the low prediction of no-weaving traffic flow speed, and the weaving traffic flow speed is greater than the no-weaving traffic flow speed that is not consistent with the actual operation characteristics. Based on these work, the disadvantages of the weaving area speed calculation model in 2010 edition of HCM is discussed and improved. Taking the weaving area at Tianjin Weikun interchange as the research object, the operation state of traffic flow in the weaving area is investigated, and the improved model is analyzed from quantitative and qualitative aspects. The result shows that the prediction accuracy and characteristic description of the improved model are all better than the original model.

Key words: traffic engineering; weaving area; qualitative and quantitative analysis; weaving speed; no-weaving speed; capacity

0 引言

交织定义为行驶方向大致相同的两股或多股车流沿着相当长的路段不借助于交通控制设施进行交

叉运行^[1]。在道路上, 1个进口紧接1个出口, 或多个进口紧接1个出口, 或多个进口紧接多个出口时, 进出口之间的路段上形成交织区。由于交织路段通行能力低于基本路段通行能力, 是道路系统的瓶颈,

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家科技重大专项项目(2013ZX01045-003-002)

作者简介: 周晨静(1987), 男, 河南安阳人, 博士研究生。(zhouchenjing@emails.bjut.edu.cn)

在高速公路和城市快速路系统中往往是交通拥堵的常发地带。交织区通行能力分析对于合理设计道路系统、提升道路系统整体效率有着重要意义。

交织区通行能力分析包括美国《道路通行能力手册》(HCM) 分析方法、理论计算方法^[2-5]和仿真分析方法^[6-7], 其中以美国 HCM 分析方法应用最为广泛。美国 HCM 自 1950 年开始研究交织区通行能力分析, 至 2010 年更新最新研究方法, 历经 4 次调整^[8-12]。2010 版 HCM^[12] 中交织区通行能力分析将交织区分为同侧和异侧两种类型, 基于交织区交通流运行特征, 分析交织区内交织行为产生的强度, 给出通行能力和速度计算模型。该版方法是交织区通行能力分析的一次重大变革, 分析流程和思想更具实际物理意义, 得到广泛认可。

然而, 2010HCM 交织区通行能力分析方法的适用性研究的缺乏是推广应用的主要障碍。本研究以实测数据为基础, 从定性、定量两个层面对 2010 版 HCM 交织区通行能力分析中的速度计算模型进行适用性分析, 并针对性提出模型改进方法, 完成模型标定工作。

表 1 交织区运行速度案例计算结果 (单位: km/h)

Tab. 1 Calculation result of cases of running speed in weaving area (unit: km/h)

	案例 1			案例 2			案例 3			案例 4		
	S_w	S_{nw}	ΔS									
2000 版	82.0	89.7	-7.6	80.4	99.0	-18.8	47.6	86.3	-38.6	64.0	100.6	-36.6
2010 版	87.8	85.1	2.8	95.7	101.3	-5.5	85.4	83.6	1.8	77.6	52.2	25.6

注: ΔS 为交织区非交织车流与交织车流运行速度差, 其他参数同式 (2)。

表 1 显示, 2010 版 HCM 交织通行能力分析计算方法得出的 4 个结果中在 3 种情况下交织车流运行速度大于非交织车流运行速度, 与工程实践经验不相符, 因此进一步分析模型的适用性。以 2010 版 HCM 交织区分析案例 1^[13] 描述交织区为对象, 以交织区长度、交织区流率和交织流量比为控制指标, 设计 3 组分析方案 (如表 2) 进行模拟分析, 计算交织区运行速度, 结果如图 1 ~ 图 3 所示。

表 2 分析方案设计

Tab. 2 Designed analysis scheme

方案	L_s/m	$Q/(pcu \cdot h^{-1})$	VR
1	300 递增至 1 380, 间隔 30	5 588	0.357
2	440	1 000 增至 6 000, 间隔 200	0.357
3	440	5 588	0.01 增至 0.5, 间隔 0.01

注: L_s 为交织区长度; Q 为交织区总交通流率; VR 为交织流量比

1 问题提出与分析

2010 版 HCM 交织区通行能力分析以交织车流和非交织车流运行特性为基础, 两种车流运行速度计算模型如下:

非交织车流运行速度计算模型

$$S_{nw} = FFS - 0.011 5LC_{min} - 0.007 7 \frac{Q}{N}, \quad (1)$$

交织车流运行速度计算模型

$$S_w = 24 + \frac{FFS - 24}{1 + 0.088 4 \left(\frac{LC_{all}}{L_s}\right)^{0.789}}, \quad (2)$$

式中, S_{nw} 为交织区非交织车流运行速度; S_w 为交织区交织车流运行速度; FFS 为分析道路自由流车速; LC_{min} 为交织车流完成交织行为的最小换道次数; Q 为交织区总交通流率; N 为交织区车道数量; LC_{all} 为交织车流换道次数总量; L_s 为交织区长度。

以 2000 版 HCM 交织区分析章节案例 1 ~ 4 为分析对象, 分别应用 2000 版和 2010 版交织区速度分析方法进行计算, 结果如表 1 所示。

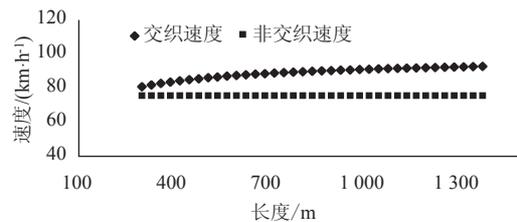


图 1 长度变化条件下交织区运行速度

Fig. 1 Running speed in weaving area varying with length

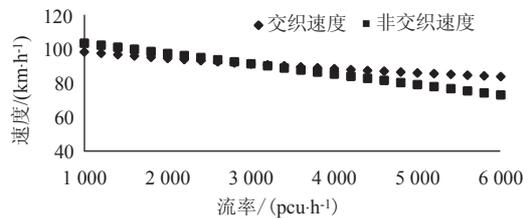


图 2 流率变化条件下交织区运行速度

Fig. 2 Running speed in weaving area varying with flow rate

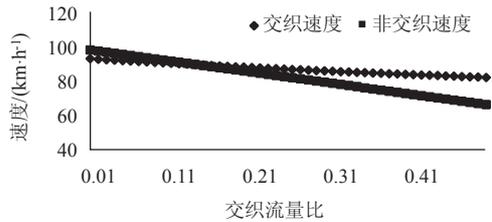


图3 交织流量比变化条件下交织区运行速度

Fig. 3 Running speed in weaving area varying with weaving flow ratio

关于交织区运行特性的研究表明^[14-18], 交织区长度对交织区车流运行速度有显著影响, 表现为驾驶员驾驶车辆通过交织区的紧迫程度, 且交织区长度越短, 交织车流速度下降趋势越快。对应于2010HCM 交织区运行速度分析方法表现为单位距离上交织次数(交织强度)越大, 交织车流运行速度越小, 非交织车流运行速度也会减少, 但减少幅度不应大于交织车流。交织车流运行速度显示结果(图1)与该特性相符, 但交织车流运行速度不应高于非交织车流。运行结果(图2、图3)显示, 在低流率、低交织流量比条件下, 非交织车流运行速度大于交织车流; 随着流率(交织流量比)的增加, 交织车流和非交织车流运行速度均减少, 但是非交织车流运行速度减少幅度大于交织车流, 导致出现非交织车流运行速度小于交织车流运行速度的结果, 与交织区交织车速不大于非交织车速的实际特性不符。另外, 交织区总车道数量和交织车道数量为车辆行驶提供了横向空间, 车道数量越多, 车辆行驶车道选择自由度越大, 交织区非交织车流运行速度越大。

2 模型改进与分析

基于以上分析, 研究认为2010HCM 交织区非交织车流运行速度计算模型存在重复折减的现象, 致使非交织车流运行速度预测过低。因此针对性提出以下交织区运行速度计算改进模型。

非交织车流运行速度改进模型

$$S_{nw} = FFS - a LC_{\min} - b \frac{Q_{nw}}{N_{nw}}, \quad (3)$$

$$S_{nw} = FFS - a \frac{LC_{\min}}{N_w} - b \frac{Q}{N}, \quad (4)$$

$$S_{nw} = FFS - a \frac{LC_{\min}}{N_w} - b \frac{Q_{nw}}{N_{nw}}, \quad (5)$$

交织车流运行速度改进模型

$$S_w = 24 + \frac{FFS - 24}{1 + c \left(\frac{LC_{\text{all}}}{L_s} \right)^d}, \quad (6)$$

式(3)~式(6)中, Q_{nw} 为交织区非交织车流流率; Q_w 为交织区交织车流流率; N_w 为交织区交织车道数量; N_{nw} 为交织区非交织车道数量; a, b, c, d 为标定参数; 其他同上。

原始计算模型中, 非交织车流运行速度计算模型(式1)是由自由流速减去换道次数干扰, 再减去交织区流率增加导致整体运行速度降低的影响。在相同交织流量比条件下, 交织区流率增加必然引起换道次数增加, 交织区流率与换道次数相关性很大。模型改进思路为分离交织车流与非交织车流, 单独考虑两股车流增加对非交织车流运行速度的影响, 提供式(3)~式(5)作为改进模型。同时, 交织车流速度过大也是表1计算结果显示的内容之一, 研究提出式(6), 对交织强度影响进行重新标定。

3 数据采集与处理

选取天津快速路卫昆立交桥交织区作为数据采集地点, 利用磁感应交通流计数器 NC97 和交通数据采集仪 MetroCount5600 采集交织区交通运行数据。其中, NC97 采集数据间隔为 5 min, 可以获取车辆速度、占有率、平均车头时距、流量等信息; MetroCount5600 可以获取车辆运行速度、流量、车辆轴距等信息。交织区具体几何尺寸和设备布置如图4所示。数据采集时间为上午 7:00—12:00, 车辆组成以小客车为主, 分别用 NC97 和 MetroCount5600 获得车辆的地点车速。

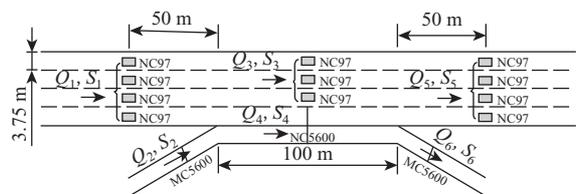


图4 交织区仪器布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of layout of equipment in weaving area

交织区具体构型为: 长度 L_s 为 100 m, 车道数 N 为 5, 交织车道数 N_w 为 2。通过以上调查仪器布置, 可以获得主线入口断面流量 Q_1 和速度 S_1 、匝道入口断面流量 Q_2 和速度 S_2 、主线非交织车道断面流量 Q_3 和速度 S_3 、主线交织车道断面流量 Q_4 和速度 S_4 、主线出口断面流量 Q_5 和速度 S_5 、匝道出口断面流量

Q_6 和速度 S_6 。其中交织区非交织断面流量 Q_{nw} 可认为是主线非交织车道断面流量 Q_3 , 交织区交织车道断面流量 Q_w 可由 $(Q_1 - Q_3 + Q_4 - Q_3)$ 计算得出, 交织区非交织速度 S_{nw} 可认为是主线非交织车道断面速度 S_3 , 交织速度 S_w 可认为是主线交织车道断面速度 S_4 , 路段自由流速度FFS可认为是主线出口断面速度 S_5 。

统计得出路段自由流速度为75.5 km/h; 以15 min为统计间隔, 得出上午7:00—12:00期间20组不同流量条件下交织区的运行速度数据, 见表3。

表3 调查数据表

Tab. 3 Survey data

Q	Q_w	S_{nw}	S_w	Q	Q_w	S_{nw}	S_w
2 068	1 048	60.51	40.03	2 704.00	1 060.00	63.12	43.48
2 808	1 368	60.38	39.71	2 836.00	1 288.00	63.13	44.06
2 860	1 240	63.00	42.12	2 492.00	1 180.00	69.34	48.16
3 256	1 332	63.42	41.89	2 572.00	1 104.00	63.05	42.82
3 124	1 292	68.62	43.29	2 452.00	1 020.00	62.18	45.08
3 200	1 308	62.78	41.34	2 576.00	1 032.00	62.14	44.23
2 660	2 124	63.73	42.38	2 408.00	1 228.00	72.75	43.24
2 692	1 244	70.92	44.50	2 404.00	1 016.00	58.53	49.07
2 816	1 156	60.44	48.60	2 240.00	928.00	63.24	50.22
2 700	1 128	60.86	40.68	2 376.00	820.00	62.14	49.10

注: Q 为总断面流量。 Q, Q_w 的单位为pcu/h; S_{nw}, S_w 的单位为km/h。

4 模型标定和验证

4.1 实测数据分析

按照2010HCM 交织通行能力分析方法在以上实测条件下进行交织区运行速度测算, 计算结果见图5。

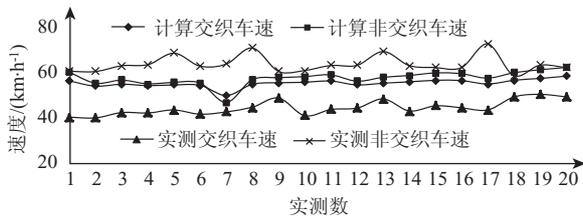


图5 交织区运行速度测算结果对比

Fig. 5 Comparison of calculation results of running speed in weaving area

图5显示, 由2010版HCM 交织区运行速度计算模型得出的交织车流速度与非交织车流速度差异比实测数据小。同时, 交织车流速度和非交织车流速度与实测值均有较大差异, 最大误差为40.52%,

平均误差在20%左右, 随机选取5组试验数据误差表如下。

表4 计算精度分析表

Tab. 4 Analysis table of calculation precision

交织速度/(km·h ⁻¹)		误差/%	非交织速度/(km·h ⁻¹)		误差/%
计算	实测		计算	实测	
56.25	40.03	-40.52	60.05	60.51	0.75
54.27	41.34	-31.26	55.26	62.78	11.97
49.67	42.38	-17.21	46.58	63.73	26.91
54.84	43.24	-26.84	57.43	72.75	21.07
58.32	49.10	-18.76	62.24	62.14	-0.14

4.2 模型标定

选取15组调查数据和2000版HCM 交织区分析数据, 对交织区非交织车流运行速度和交织车流运行速度改进模型进行非线性回归标定模型参数, 标定结果如表5所示。

表5 模型标定结果

Tab. 5 Model calibration result

模型形式	标定结果	拟合系数 R^2
$S_{nw} = FFS - a LC_{min} - b \frac{Q_{nw}}{N_{nw}}$	$a = 0.004, b = 0.002$	0.741
$S_{nw} = FFS - a \frac{LC_{min}}{N_w} - b \frac{Q}{N}$	$a = 0.008, b = 0.003$	0.761
$S_{nw} = FFS - a \frac{LC_{min}}{N_w} - b \frac{Q_{nw}}{N_{nw}}$	$a = 0.001, b = 0.011$	0.806
$S_w = 15 + \frac{FFS - 15}{1 + c \left(\frac{LC_{all}}{L_s}\right)^d}$	$c = 0.424, d = 0.880$	0.737

模型标定结果显示, 对于非交织车流车速, 式(5)拟合度最高, 最能反映非交织车流运行速度变化的影响, 体现出非交织车流运行速度受交织次数、交织车道数、非交织车流流量与非交织车道数的影响; 对于交织车流车速, 模型参数均比2010HCM有所提高, 表明交织强度对交织车流车速影响强度有所提升。

3.3 模型验证

从定量和定性两个层面对改进模型进行验证。在定量分析上, 利用剩余5组调查数据分析改进模型预测精度; 在定性分析上, 利用文中第1部分设计案例分析改进模型宏观趋势。

模型预测精度分析结果如表6所示, 计算误差可以控制在10%以内, 较原始模型有很大提升。

以交织区长度、交织区流率和交织流量比为控制指标, 按表2设计方案进行宏观趋势分析, 计算交织区的运行速度, 结果如图6~图8所示。图6显

表6 预测精度分析表

Tab. 5 Analysis table of precision accuracy

交织速度/(km·h ⁻¹)			非交织速度/(km·h ⁻¹)		
预测	实测	误差/%	预测	实测	误差/%
65.48	62.14	5.38	47.06	44.23	6.40
67.49	72.75	-7.24	45.28	43.24	4.73
66.42	58.53	13.49	47.22	49.07	-3.78
66.95	63.24	5.85	48.15	50.22	-4.14
65.58	62.14	5.54	49.39	49.10	0.61

示交织区的车流速度随交织区长度的增加而不断增加,体现出交织区长度增加减少了交织车辆换道强度的紧迫感,且交织车流运行速度不大于非交织车流运行速度,随交织长度增加逐渐逼近非交织车流运行速度,与实际工程经验相符。图7显示随交织区流率的增加,交织车流与非交织车流运行速度均不断减小,且交织车流运行速度不大于非交织车流运行速度。图8显示在很低交织流量比条件下,交织区交织车流与非交织车流运行速度基本一致。而随着交织流量比的增加,交织流量增加,非交织流量减少,交织车流运行速度显著减少,非交织车流运行速度基本保持不变,也与实际工程经验相符。

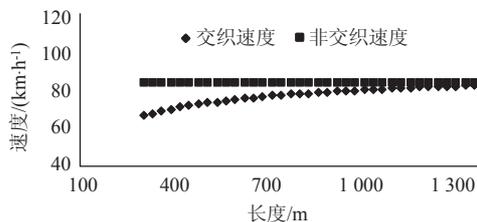


图6 长度变化条件下交织区运行速度

Fig. 6 Running speed in weaving area varying with length

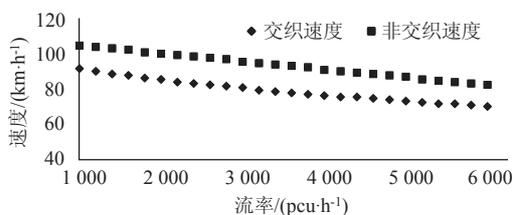


图7 流率变化条件下交织区运行速度

Fig. 7 Running speed in weaving area varying with flow rate

4 结论

2010版HCM交织区通行能力分析较以前版本有很大变动。通过模拟案例分析和实测数据分析发现,该方法交织区运行速度计算结果表现特性与实测交织区运行特性相违背,源于在进行非交织车

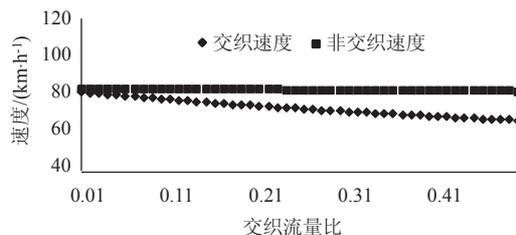


图8 交织流量比变化条件下运行速度

Fig. 8 Running speed in weaving area varying with weaving flow ratio

流运行速度计算时存在重复折减的现象;同时,交织强度系数影响过低也是造成计算得出交织车速大于非交织车速的原因之一。研究针对性地提出了改进模型,并进行了模型标定与验证工作,在一定程度上推进了交织区通行能力分析方法的改善。但因数据有限限制了模型精度的提升,希望能获取更多研究数据进一步完善计算模型。

参考文献:

References:

- [1] 任福田,刘小明,荣建.交通工程学[M].北京:人民交通出版社,2008:140-141.
REN Fu-tian, LIU Xiao-ming, RONG Jian. Traffic Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 140-141.
- [2] LERTWORAWANICH P, ELEFTERIADOU L. A Methodology for Estimating Capacity at Ramp Weaves Based on Gap Acceptance and Linear Optimization [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37 (5): 459-483.
- [3] LERTWORAWANICH P, ELEFTERIADOU L. Generalized Capacity Estimation Model for Weaving Areas [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133 (3): 166-179.
- [4] ROESS R P, ULERIO J M. Weaving Area Analysis in Year 2000 Highway Capacity Manual [J]. Transportation Research Record, 2000, 1710: 145-153.
- [5] AWAD W H, Estimating Traffic Capacity for Weaving Segments Using Neural Networks Technique [J]. Applied Soft Computing, 2004, 4 (4): 395-404.
- [6] ZAREAN M, NEMETH Z A. WEASIM: A Microscopic Simulation Model of Freeway Weaving Sections [J]. Transportation Research Record, 1988, 1194: 48-54.
- [7] SKABARDONIS A, CASSIDY M, MAY A D, et al. Application of Simulation to Evaluate the Operation of Major Freeway Weaving Sections [J]. Transportation

- Research Record, 1898, 1225: 91-98.
- [8] OSTROM B, LEIMAN L, MAY A D. Suggested Procedures for Analyzing freeway Weaving Sections [J]. Transportation Research Record, 1993, 1398: 42-48.
- [9] SKABARDONIS A, KIM A. Weaving Analysis, Evaluation and Refinement [R]. Berkeley: University of California, 2010: 1-70.
- [10] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 1985 [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1985.
- [11] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 2000 [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2000.
- [12] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 2010 [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2010.
- [13] 陈金川. 道路交织区通行能力研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2000.
CHEN Jian-chuan. Research on Capacity of Road Weaving Sections [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2000.
- [14] 陈小鸿, 肖海峰. 交织区交通特性的微观仿真研究 [J]. 中国公路学报, 2001 (14): 89-91.
CHEN Xiao-hong, XIAO Hai-feng. Micro-simulation Study of the Characteristics of Weaving Area [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14 (S1): 89-91.
- [15] 周建, 邵长桥, 荣建. 城市互通立交桥区通行能力的仿真研究 [J]. 道路交通与安全, 2007, (2): 36-41.
ZHOU Jian, SHAO Chang-qiao, RONG Jian. Capacity Analysis of Urban Interchange Using Simulation Method [J]. Road Traffic & Safety, 2007 (2): 36-41.
- [16] 臧晓冬. 城市快速路互通立交交织区运行速度模型研究 [J]. 中外公路, 2011, 31 (1): 236-238.
ZANG Xiao-dong. Research of Travel Speed Model of Weaving Area at Urban Expressway Interchanges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31 (1): 236-238.
- [17] 钟连德, 荣建, 孙小端, 等. 快速路交织区运行分析研究 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32 (10): 907-912.
ZHONG Lian-de, RONG Jian, SUN Xiao-duan, et al. Expressway Weaving Area Operation Analysis [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32 (10): 907-912.

(上接第 117 页)

- XU Hui-zhi, CHENG Guo-zhu, PEI Yu-long. Study on Effect of Lane-changing Behavioral Characteristic to Capacity [J]. Sciencepaper Online, 2010, 5 (10): 749-753.
- [6] 徐慧智, 程国柱, 裴玉龙. 车道变换行为对交通流运行速度影响的研究 [J]. 中国科技论文在线, 2010, 5 (10): 754-762.
XU Hui-zhi, CHENG Guo-zhu, PEI Yu-long. Study on Effect of Lane-changing Behavioral Characteristic to Velocity [J]. Sciencepaper Online, 2010, 5 (10): 754-762.
- [7] JACQUES K S T, LEVINSON H S. Operational Analysis of Bus Lane on Arterials [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1997
- [8] 邹智军, 杨东援. 微观交通仿真中的车道变换模型 [J]. 中国公路学报, 2002, 15 (2): 105-108.
ZOU Zhi-jun, YANG Dong-yuan. Lane Changing Model for Micro Traffic Simulation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15 (2): 105-108.
- [9] 孙剑, 李克平, 杨晓光. 拥挤交通流交织区车道变换行为仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (13): 4174-4182.
SUN Jian, LI Ke-ping, YANG Xiao-guang. Simulation on Lane-changing Behavior under Congested Weaving Sections [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21 (13): 4174-4182.
- [10] 禹伟. 车道变换与交通拥挤致因关系的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
YU Wei. Research on Relationship between Lane-changing and Reason of Traffic Congestion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [11] 郭中华, 王伟, 陆建. 非港湾式公交停车对道路交通流的影响分析 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (11): 139-142.
GUO Zhong-hua, WANG Wei, LU Jian. Analysis of Road Traffic Flow Affected by Bus Stops without Bus Bay [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 139-142.
- [12] 陈峻, 王涛, 李春燕, 等. 城市公交车与社会车辆混合流速度模型及交通运行状态分析 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (1): 128-134.
CHEN Jun, WANG Tao, LI Chun-yan, et al. Speed Models of Mixed Traffic Flow on Bus-car and Vehicle and Analysis of Traffic Running State [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (1): 128-134.