

借道左转交叉口的适用条件与特性分析

罗丹丹, 陈 群

(中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 基于车流波动理论和 VISSIM 软件仿真分析, 研究交叉口适宜设置借道左转车道的车流量临界条件。通过波动理论分析得到设置借道左转车道的临界计算公式, 以实例计算和 VISSIM 仿真分析进行验证, 并基于 VISSIM 软件, 对交叉口设置借道左转车道前后各运行指标的差异进行对比分析。仿真结果表明, 在左转车流量较小并以不饱和流率驶入借道左转车道时, 不宜设置借道左转车道, 在适宜设置借道左转车道的流量条件下, 借道左转车道的设置能有效提高交叉口左转通行能力, 并降低左转车辆的平均延误、行程时间、排队长度、停车时间等, 借道左转车道的设置不一定会增加左转车辆的停车次数, 其与左转车流量有关。

关键词: 借道左转; 波动理论; 仿真分析; 临界条件; 评价指标

中文引用格式: 罗丹丹, 陈群. 借道左转交叉口的适用条件与特性分析[J]. 计算机工程, 2019, 45(6): 21-25, 31.

英文引用格式: LUO Dandan, CHEN Qun. Applicable conditions and characteristics analysis of contraflow left-turn intersection[J]. Computer Engineering, 2019, 45(6): 21-25, 31.

Applicable Conditions and Characteristics Analysis of Contraflow Left-turn Intersection

LUO Dandan, CHEN Qun

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

【Abstract】 Based on the traffic wave theory and VISSIM software simulation analysis, the critical condition of traffic flow that is appropriate for the intersection to set the Contraflow Left-turn Lanes (CLL) is studied. The critical calculation formula of setting left-turn lane is obtained by wave theory analysis and verified by example calculation and VISSIM simulation analysis. Based on the VISSIM software, the difference between the operational indicators before and after the intersection setting the left-turn lane is analyzed. Simulation results show that when the left-turn traffic flow is small that enters the CLL with unsaturated flow rate, it is not advisable to set the CLL. When the traffic condition which is appropriate to set the CLL, the setting of CLL can effectively improve the left-turn capacity and reduce the average delay, schedule time, length of queue, parking time, etc. The setting of CLL may not increase the number of the parking times, which is related to the left-turn traffic flow.

【Key words】 contraflow left-turn; wave theory; simulation analysis; critical condition; evaluation indexes

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0050895

0 概述

左转车辆是影响整个平面交叉口通行能力的重要因素, 针对日益突出的人、车、路矛盾, 研究人员采用非传统的交通组织方式, 如 U 型远引左转交叉口^[1]、主路优先交叉口^[2]、左转位移交叉口^[3]等, 借道左转交叉口在此背景下被提出并应用。借道左转的概念由我国河北省邯郸市交警支队提出, 借道左转方案主要应用可变车道以及预信号的设置技术, 是依据不同时段交通流对特定车道上的行车方向

或者行车种类进行动态调整的一种交通组织方式^[4], 且以预信号进行控制。我国在 2003 年引入预信号的概念^[5], 并将其应用于公交优先管理与控制中, 取得了显著成效, 随后文献[6]提出一种具有公交优先的交通信号控制技术, 可将公交优先策略应用于工程实际。文献[7]对可变车道进行研究, 并提出可变车道的设置与控制方法, 其对可变车道和预信号的研究成果为借道左转交叉口的提出和应用打下理论基础。在借道左转交叉口的概念提出之后, 文献[9-13]对其进行了较为全面的研究, 给出借道

基金项目: 国家自然科学基金(50908235)。

作者简介: 罗丹丹(1992—), 女, 硕士研究生, 主研方向为交通运输工程; 陈 群, 教授、博士。

收稿日期: 2018-03-22 **修回日期:** 2018-05-02 **E-mail:** chenqun631@csu.edu.cn

左转交叉口的几何设计和信号配时优化目标程序,分析了驾驶员在借道左转交叉口的驾驶行为,并验证了借道左转车道的有效性;文献[14-15]也相继对借道左转的左转车流运行特性作出了影响评价。以上研究结果均表明,借道左转车道的设置能有效提高交叉口车辆的运行效益,但由于借道左转的研究尚处于起步阶段,对设置借道左转车道的适用条件缺乏分析,因此对其运行特性尚有较多研究空间。

本文利用车流波动理论和 VISSIM 仿真,分析设置借道左转车道的左转车流量临界条件,并研究借道左转车道对交叉口运行的影响。

1 车流量临界条件理论分析

借道左转交叉口几何示意图如图 1 所示。借道左转交通组织方式的运行原理是将距交叉口停车线适当距离位置的中央隔离护栏设置开口,在开口处设置预信号灯,与主信号灯联动控制,当预信号灯绿灯亮时,左转车辆可通过开口驶入借道左转车道,并在与传统左转车道停车线平齐位置停车候行,当主信号左转绿灯启亮时,借道左转车道与传统左转车道上的车辆同时获得通行权,实现车辆左转。

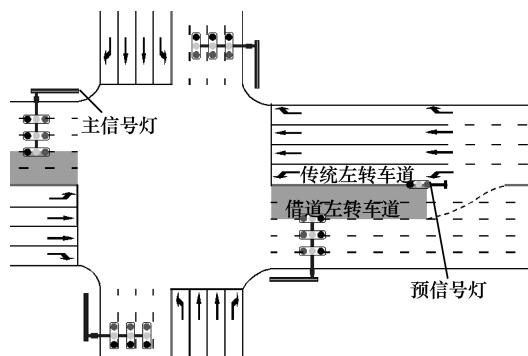


图 1 借道左转交叉口示意图

根据借道左转交叉口的运行规则和控制原理,若交叉口左转车流量不大,则在不设置借道左转车道的情况下,大部分左转车辆能在一个信号周期之内完成左转,设置借道左转车道的意义就不大,所以只有在传统左转车道已不能满足左转交通需求时,才考虑设置借道左转车道,即要求交叉口左转服务水平较低,车流的延误较大。

从车辆的安全性角度出发,借道左转交叉口信号配时必须保证驶入借道车道的左转车辆在一个主信号左转绿灯时间内全部驶离交叉口;从资源利用的合理性角度出发,交叉口的车道在空间上和时间上均不应该造成浪费。假设在预信号左转绿灯开启时,传统左转车道上的排队长度未超过借道车道长度,到达的左转车辆可以在开口处进行车道抉择,车辆若选择从借道左转车道通过,则会造成传统左转车道浪费,若选择从传统车道通过,则会造成开口处

预信号绿灯时间浪费,极大地降低了传统左转车道和借道左转车道的利用率,且进入借道左转车道的车辆必须在一个主信号左转绿灯时间内全部驶离交叉口,考虑借道左转车辆的运行安全及主预信号的协调控制,增加了交叉口交通组织的复杂度。因此,从常理上分析,若在预信号开启时,传统左转车道上的排队长度未超过借道车道长度,则不宜设置借道左转车道。

本文利用车流波动理论^[16-17]进行分析,左转车辆到达交叉口在主信号停车线处遇红灯后,车流队列迅速从高密度低密度的状态转变成零速度高密度的状态,即停车状态,形成集结波 W_2 向后传播,当主信号左转绿灯启亮后,头车起动离开交叉口,产生消散波 W_1 向后传播,如图 2 所示。

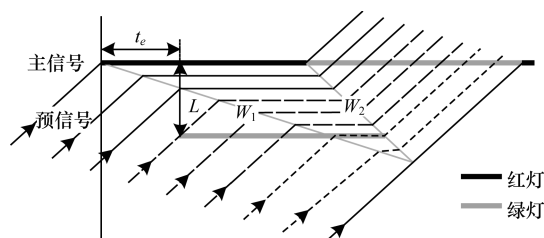


图 2 波动理论分析示意图

按照波速计算公式可得式(1)、式(2)。

$$W_1 = \frac{Q}{3600n(k_3 - k_1)} \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{s}{3600n(k_2 - k_1)} \quad (2)$$

其中, Q 为左转车辆到达量, s 为左转饱和流率, n 为传统左转车道条数, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为为堵塞密度、停车线处车辆启动密度与上游左转车辆运行密度。

假设主信号左转红灯开启至预信号绿灯开启时间差为 t_e ,左转排队长度未超过借道车道长度 L 是指集结波 W_1 在该时段内未传递到借道开口处,如式(3)所示。联立式(1)、式(3)可得式(4)。

$$L \geq |W_1| \cdot t_e \quad (3)$$

$$Q \leq \frac{3600n(k_1 - k_4)L}{t_e} \quad (4)$$

从图 2 可以看出,当预信号绿灯启亮时,排队车辆尚未排及开口处,如图中的实线;当预信号绿灯启亮后,到达的左转车辆在开口处可以选择继续前行,也可以选择驶入借道左转车道,如图中长虚线代表的车辆。如上文所述,无论车辆是选择借道车道还是传统车道,均会造成车道的时间和空间浪费。

图 2 代表的是一种极端情况,是基于在预信号绿灯启亮后所有到达的左转车辆,均只在传统车道上行驶而不进入借道车道的前提条件下,且消散波未追及集结波,才能出现在预信号绿灯关闭前排队长度超过借道车道的情况,如图中点虚线代表的车

辆部分,此部分车辆驶入借道车道,使借道车道得到利用,但前期长虚线代表的车辆不进入借道车道,造成预信号绿灯前期时间浪费,借道车道的利用率低。若不处于图 2 这种极端条件下,在预信号绿灯启亮后到达的车辆在开口处进行随机车道选择,本身左转车辆到达量较少,再在开口处进行分流,势必会使得借道左转车道和传统左转车道均不能得到有效利用;或者在预信号关闭前消散波已追及集结波,车辆的排队长度始终不能超过借道车道长度,车道利用率极低,不宜设置借道左转车道。综上所述,式(4)为是否应该设置借道左转车道时的流量临界约束式,当满足式(4)时,不宜设置借道左转车道。

2 案例分析

为了验证本文分析的合理性与准确性,并为 VISSIM 仿真定量分析提供实地数据,选取长沙市唯一借道左转交叉口芙蓉中路与营盘路交叉口进行实地调查。采用视频拍摄法记录车辆运行状态,对视频进行逐帧回放并对相应调查指标进行记录和处理,得到交叉口车辆的运行指标,包括交叉口几何条件、信号配时、车流量、车速、车头时距、车头间距、延误、停车次数等。

长沙市芙蓉中路与营盘路交叉口为典型的十字路口,只有南、北 2 个方向进口道设置了一条借道车道,南进口传统左转车道数为 2 条,借道车道长度为 63 m,北进口传统左转车道数为 1 条,借道车道长度为 43 m,信号周期时长为 194 s,交叉口采用南北、东西对称放行的方式,且 $t_c = 109$ s,如图 3 所示,其中,粗线代表红灯时长,浅色阴影代表绿灯时长,深色阴影代表黄灯时长,黄灯时长均为 6 s。交叉口左转车流量、车流密度、车辆运行参数调查结果分别见表 1~表 3。

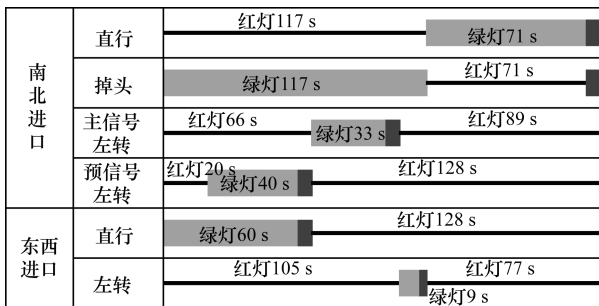


图 3 交叉口信号配时不压线

表 1 交叉口左转当量车流量 (pcu · h⁻¹)

车流量	位置	传统车道	借道车道	合计
到达量	南进口	538	216	754
	北进口	174	81	255
通过量	南进口	492	216	708
	北进口	174	81	255

表 2 左转交通密度调查值 (pcu · m⁻¹)

交通参数	参数含义	计算结果
k_1	堵塞密度	0.16
k_2	停车线处车辆启动密度	0.09
k_3	上游车流密度(北进口)	0.01
	上游车流密度(南进口)	0.04

表 3 交叉口主要交通参数

调查参数	结果	调查参数	结果
交叉口左转平均车速/(m · s ⁻¹)	5.20	北进口平均排队长度/m	26.7
平均加速度/(m · s ⁻²)	1.91	南进口平均排队长度/m	145.0
停车时平均车头间距/m	6.26	北进口平均延误/s	70.8
车辆驶离交叉口平均车头时距/s	3.20	南进口平均延误/s	174.9
上游左转车辆自由行驶速度/(m · s ⁻¹)	14.05		

利用调查结果以及式(4)进行计算,北进口计算结果如式(5)所示,南进口计算结果如式(6)所示,从计算结果可以看出,南进口和北进口均不满足式(4),因此,南北进口均满足设置借道左转车道条件。

$$\frac{3\,600 \times 1 \times (0.16 - 0.01) \times 43}{109} = 213 < 255 \quad (5)$$

$$\frac{3\,600 \times 2 \times (0.16 - 0.04) \times 63}{109} = 499 < 754 \quad (6)$$

3 VISSIM 仿真分析与验证

VISSIM 仿真软件是分析评价城市规划方案和交通工程设计的有效工具,且 VISSIM 内置多种分析手段,能获得各种不同情境方案的具体数据结果,输出排队长度、停车次数和延误等性能指标^[18]。因此,本文采用 VISSIM 仿真软件进行分析。

3.1 模型建立

在假设交叉口各车道坡度为 0 且各车流之间互不干扰的前提下,根据借道左转交叉口的定义以及芙蓉中路与营盘路交叉口的实地调查数据,建立借道左转交叉口 VISSIM 基本路网模型。为了对比交叉口设置借道左转车道前后车辆运行特性的差异,需对交叉口设置借道左转车道之前的运行状态进行仿真分析,设置借道左转车道之前的交叉口参数除了不设置借道车道外,其余参数均与设置借道车道后的交叉口保持一致,以保证对比结果不会受到不相关因素的影响。

由于本文只研究借道左转交叉口左转车辆的运行特性,因此 VISSIM 仿真也只选取交叉口设置有借道左转车道的南北进口进行分析和评价。

3.2 参数标定与模型校验

由于交叉口各参数除了借道车道,其余参数均一致,故进行参数标定和模型校准时,只需对其中一

个模型进行校验即可,本文选择对设置借道车道之后的 VISSIM 仿真模型进行校验。

根据实际调查参数数据(见表2、表3)以及仿真经验值对参数进行调整。在南北进口输入实测左转交通到达量值进行仿真,即北进口输入流量 $Q = 225$ pcu/h,南进口输入左转流量 $Q = 754$ pcu/h,对比仿真结果与实测数据的差异。为了消除仿真系统随机性带来的影响,进行3次同等条件下的独立仿真取其平均值,得到在实际交通流量下南北进口左转车辆的平均延误和平均排队长度,将仿真结果与实测值进行对比,如表4所示。从表4可以看出,实测值和仿真值的偏差均在0.07以下,证明通过调整系统参数,已达到预期的仿真效果,能根据校准后的参数精确模拟路网交通。

表4 模型标定结果分析

评价指标	方向	实测值	仿真值	偏差
平均延误/s	北进口	70.8	73.0	0.031 1
	南进口	174.9	169.3	0.032 0
平均排队长度/m	北进口	26.7	24.9	0.067 4
	南进口	145.0	136.6	0.057 9

3.3 仿真运行分析

在 VISSIM 仿真运行开始时刻,车辆才驶入路网按照设定的运行规则运行,故初始仿真阶段路网上的交通分布不均,为了避免仿真运行初期车辆才进入路网以及车辆分布不均对数据分析结果造成影响,评价文件的配置剔除了仿真运行时间的前600 s,即数据采集从仿真时间的第600秒开始至第3600秒结束,时间间隔为第3000秒。由于得到的是3000 s的车辆运行数据,在后文数据处理与分析中,需要将仿真数据换算成标准小时3600 s的数据。

在通常情况下,随着道路的服务水平不断升高,交通流的运行状态会随之发生改变,本文针对在左转车道服务水平不断递增的条件下,对设置借道左转车道前后各运行指标的变化趋势进行分析。道路服务水平变化通过改变模型的输入交通量进行控制,北进口车辆到达量输入值以30 pcu/h为间隔,输入值变化范围为0 pcu/h ~ 450 pcu/h,南进口由于有2条传统左转车道,车辆输入值以60 pcu/h为间隔,输入值变化范围为0 pcu/h ~ 900 pcu/h。对设置借道车道前后南北各15组交通量数据分别进行独立仿真,且 VISSIM 仿真软件具有随机因素这一特性,单次仿真结果具有不稳定性,故对每组相同交通量情境进行3次独立仿真,取其平均值作为最终分析值,以保证仿真结果的可信度,真实反映交叉口实际运行状态。每次仿真均设置数据检测器、行程时间检测器、排队长度检测器3组检测器检测 VISSIM 系统运行过程,输出左转车辆的通过量、车道占用

率、行程时间、延误、排队长度等评价指标数据的评价文件,得到设置借道车道前后各评价指标随车流量变化而变化的情况。

3.4 VISSIM 仿真结果分析

对仿真输出数据结果进行整理统计并分析,得到在输入不同左转车流量的情况下,设置借道左转车道前后的车流量、行程时间、平均延误、平均停车时间、平均停车次数等对比数据,为了直观反映数据对比结果,将南北进口设置借道左转车道前后的各评价指标变化率分别以折线图进行绘制,如图4、图5所示。图4、图5中的指标变化率是指设置借道左转车道后相对于设置前的指标变化百分比,正值代表提高率,负值代表降低率。

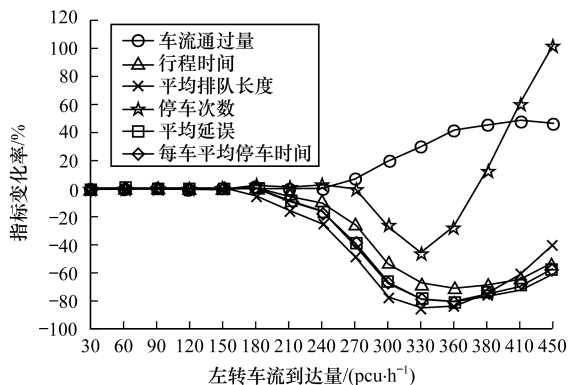


图4 北进口设置借道车道前后的指标变化率

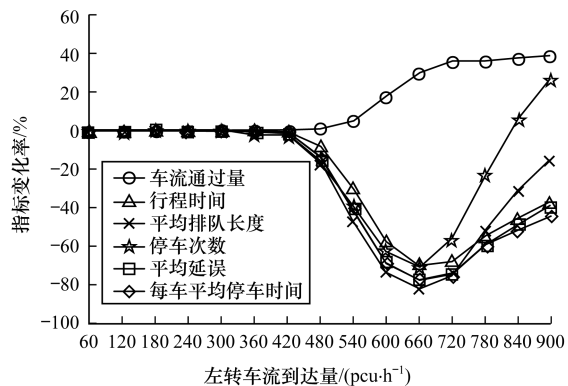


图5 南进口设置借道车道前后的指标变化率

从图4、图5可以看出,借道左转车道对交叉口运行的影响程度可以分为2种类型:基本无影响和有影响。

1) 基本无影响阶段

图4和图5中的指标变化趋势表明,在北进口左转车流量低于210 pcu/h、南进口左转车流量低于480 pcu/h时,交叉口设置借道左转车道前后各评价指标值区别甚微,变化率甚至接近0。虽然在北进口左转车流量高于180 pcu/h低于210 pcu/h、南进口左转车流量高于420 pcu/h低于480 pcu/h时,交叉口设置借道左转车道前后各评价指标值出现差异,

但这种差异性极小,这是由于在 VISSIM 仿真中车辆在开口处是进行随机车道选择的,当车流量快要或基本达到设置借道左转车道的条件时,借道车道会对车辆运行开始产生细微的影响,可以认为在该情况下借道车道的设置对交叉口左转车辆的运行基本无影响,设置借道左转车道的意义不大。

由前文基于波动理论分析的不宜设置借道左转车道的左转车流量临界值计算公式以及实例计算结果可知,理论上当北进口左转车流量小于 213 pcu/h、南进口左转车流量小于 499 pcu/h 时,不宜设置借道左转车道。由于 VISSIM 仿真具有随机性并且输入交通量间隔较大,VISSIM 仿真分析结果与理论计算结果有细微差距,但整体上相符,即 $210 \text{ pcu/h} \approx 213 \text{ pcu/h}$, $480 \text{ pcu/h} \approx 499 \text{ pcu/h}$,证实仿真结果与分析计算结果均具有可靠性,即当左转车流量满足式(4)时,不宜设置借道左转车道。

2) 有影响阶段

当左转车流量不满足式(4)时(仿真流率北进口左转车流量高于 210 pcu/h、南进口左转车流量高于 480 pcu/h 时),为在借道左转车道产生影响阶段,设置借道左转车道后的左转通过量明显高于设置前(指标变化率为正值),而行程时间、排队长度、延误等指标明显低于设置前(指标变化率为负值),因此可以得出在一定左转流量条件下,通过设置借道左转车道能有效提高交叉口左转通行能力并降低车辆通过交叉口的行程时间和平均延误,提高交叉口车辆运行效益。

与上述指标变化趋势不同,左转车辆的平均停车次数指标出现阶段性变化。不论是南进口还是北进口,在左转车辆到达量适中(北进口 $210 \text{ pcu/h} \sim 360 \text{ pcu/h}$,南进口 $480 \text{ pcu/h} \sim 780 \text{ pcu/h}$)时,借道左转车道的设置使得左转车辆的停车次数降低(指标变化率为负值),而当车流量较高(北进口大于 360 pcu/h ,南进口大于 780 pcu/h)时,借道左转车道的设置使得左转车辆停车次数增加(指标变化率为正值)。因此,借道左转交叉口相比传统交叉口的左转车辆停车次数是提高还是降低,要根据左转交通量做进一步分析判断。由于本文采用间断式输入流量法进行的分析,无法精确定量分析停车次数变化的车流量临界值,因此本文分析只对设置借道左转车道前后的车辆停车次数随着左转车流量的变化而变化的趋势进行简要概述,如需对其定性定量分析,需要做进一步的研究,本文限于时间和篇幅,不再对其进行深入挖掘。但是从图 4 和图 5 每车平均停车时间指标的变化趋势线可以看出,不论停车次数是增是减,设置借道左转车道之后能使左转车辆的每车停车时间减少。

4 结束语

本文以借道左转交叉口左转车辆为研究对象,分析设置借道左转交叉口的左转流量临界条件,并研究了借道左转车道的设置对左转车辆运行的影响。首先应用车流波动理论对借道左转交叉口进行分析,在左转车流量较小时不宜设置借道左转车道,即当左转车流量满足式(4)时,预信号绿灯启亮而传统左转车道上的排队长度未超过借道车道长度,不应设置借道左转车道。然后以实际借道左转交叉口为原型建立 VISSIM 仿真模型并进行参数标定和校验,分别对交叉口设置借道左转车道前后进行仿真运行,在适宜设置借道左转车道的流量条件下即不满足式(4)时,借道左转车道的设置能提高交叉口左转通行能力并降低延误、行程时间、排队长度、停车时间。本文研究提供了适合设置借道左转车道的流量临界值判断依据,证实了借道左转车道的设置能有效提高交叉口的车辆运行效率,借道左转车道的设置不一定会增加左转车辆的停车次数。

参考文献

- [1] ZHAO Jing, MA Wan-jing, HEAD K, et al. Optimal intersection operation with median u-turn lane-based approach[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2439: 71-82.
- [2] HOLZEM A M, HUMMER J E, CUNNINGHAM C M, et al. Pedestrian and bicyclist accommodations and crossings on superstreets [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2486: 37-44.
- [3] JAGANNATHAN R, BARED J. Design and operational performance of crossover displaced left-turn intersections[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1881: 1-10.
- [4] 郭晓程. 平面信号交叉口设计优化方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [5] 许稷. 道路交叉口直右共用车道预信号控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [6] 徐颖燕, 沈国江, 孔祥杰, 等. 具有公交优先的交叉口信号控制技术[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 148-153.
- [7] 李丽丽, 曲昭伟, 陈永恒, 等. 可变车道的控制方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(1): 96-103.
- [8] 张野, 袁振洲. 信号交叉口左转专用可变车道设置研究[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(4): 26-30.
- [9] ZHAO Jing, MA Wan-jing, ZHANG H M, et al. Increasing the capacity of signalized intersections with dynamic use of exit lanes for left-turn traffic[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2355: 49-59.
- [10] ZHAO Jing, MA Wan-jing, ZHANG H M, et al. Two-step optimization model for dynamic lane assignment at isolated signalized intersections [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2355: 39-48.

(下转第 31 页)