

交叉口BRT控制策略和适用条件仿真研究

杨柳¹, 梁淼¹, 曹森², 李文芳²

(1.长沙理工大学交通学院,湖南长沙 410114;2.黄河交通学院,河南焦作 454950)

摘要:为了解决交叉口设置快速公交系统(Bus Rapid Transit, BRT)专用道以及设置BRT固定信号优先导致高峰期道路利用率下降、CO₂排放增多、交叉口通行速度减小的问题,该文在将BRT专用道设置为间歇式以及是否启用BRT主动信号优先控制的基础上,提出了4种交叉口BRT控制策略。以设置路中式BRT专用道的十字路口为研究对象,基于城市交通模拟(SUMO)软件和其二次开发接口,采用Python语言编程实现了4种控制策略的模拟,通过模拟试验,对比分析了在不同交叉口总交通量 Q 时各策略的实施效果。结果表明:①当 Q 在0~2 400 veh/h的低等交通量区间时,执行不开放专用道且不启用信号优先的策略效果最好;②当 Q 在2 400~4 800 veh/h的中等交通量区间时,执行开放专用道但不启用信号优先的策略效果最好;③当 Q 在4 800~7 200 veh/h的高等交通量区间时,执行开放专用道且启用信号优先的策略效果最好。该研究明确了不同BRT控制策略的适用流量范围。

关键词:公共交通;快速公交系统;交叉口;间歇式专用道;主动信号优先;建模与模拟试验

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

Simulation Research on BRT Control Strategies for Intersections and Applicable Conditions

YANG Liu¹, LIANG Miao¹, CAO Sen², LI Wenfang²

(1. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2. Huanghe Jiaotong University, Jiaozuo, Henan 454950, China)

Abstract: The setting of bus rapid transit (BRT) dedicated lanes at intersections and the priority of BRT fixed signals lead to a decrease in road utilization rate, an increase in CO₂ emission, and the deceleration of vehicles at intersections during peak hours. To address these issues, four BRT control strategies for intersections were proposed by changing BRT dedicated lanes into intermittent ones and controlling BRT active signal priority. The study focused on intersections implementing median-road BRT dedicated lanes. Based on the simulation of urban mobility (SUMO) software and its secondary development interface, this study succeeded in simulating four control strategies by using Python programming language. Through simulation experiments, the implementation effects of various strategies were compared when the total traffic volume Q at the intersections was in different values. The findings indicate that: ① When Q is in the low traffic volume range of 0–2 400 veh/h, the strategy of not opening the dedicated lane and not enabling signal priority has the best effect. ② When Q is in the medium traffic volume range of 2 400–4 800 veh/h, the strategy of opening the dedicated lane but not enabling signal priority has the best effect. ③ When Q is in the high traffic volume range of 4 800–7 200 veh/h, the strategy of opening the dedicated lane and enabling signal priority has the best effect. The study clearly defines the applicable flow range for different BRT control strategies.

Keywords: public transport; bus rapid transit; intersection; intermittent dedicated lane; active signal priority; modeling and simulation experiment

0 引言

快速公交系统(Bus Rapid Transit, BRT)是一种介于快速轨道交通与常规公交之间的新型公共客运系统,现已成为常见的公共交通运输方式^[1]。BRT

在城市公共交通优先战略中发挥重要作用,设置公交专用道及交叉口信号优先可进一步保障公交优先^[2]。但城市交叉口设置BRT专用道会导致高峰期道路利用率下降,固定BRT信号优先会使交叉口通行速度下降。因此,合理的BRT控制策略可以有效

收稿日期:2025-01-27(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52372296);湖南省教育厅项目(编号:20A009)

作者简介:杨柳,男,博士,讲师。E-mail: yangliu2005@csust.edu.cn

解决上述问题,对提高交叉口运行效率有重大意义。

Eichler等^[3]对比了间歇式公交专用道与普通公交专用道的交通流特性和经济效益,提出了一种能利用可变信号清空社会车辆的间歇式公交专用道策略;谢秋峰等^[4]通过设置间歇式公交专用进口道进行仿真对比发现:当进口道交通量未达到饱和状态时,设置间歇式公交专用进口道可以使道路总体通行能力更优;蒋诚等^[5]和Chen等^[6]提出,通过动态控制BRT车道的使用权限,可以显著提高BRT车道利用率,缓解交叉口拥堵;宋现敏等^[7]提出了一种新型动态公交专用道,可显著提升道路资源时空利用率,减少社会车辆与公交车辆对道路资源的需求冲突;林盈盈等^[8]对间歇式公交专用道的准入容量进行研究,提出了基于车联网环境容量约束的控制策略;Furth等^[9]通过对交叉口实施不同公交信号优先控制,分析车辆延误变化,发现实施完全公交信号优先控制会导致交叉口车辆延误不降反增;陈光勤^[10]在设置BRT专用进口道的十字路口,给予BRT车辆有条件的信号优先,提高了BRT的系统服务质量;张建鹏等^[11]和杨远舟等^[12]构建了BRT信号优先的元胞自动机模型,研究了不同信号优先控制下BRT对交叉口车流的影响;汪林^[13]和徐洪峰等^[14]提出干道BRT主动信号优先方法和公交信号优先干线联动控制方法;张鹏等^[15]提出了一种基于交叉口双站台设计的BRT优先控制方法;韩印等^[16]提出了一种多模式调度与沿线交叉口信号配时协同优化的控制方法。

综上所述,学者们对BRT专用道和BRT信号优先两方面都进行了大量研究,间歇式BRT专用道和BRT主动信号优先都可以在一定条件下提高交叉口通行效率,但鲜见关于两者协同控制方面的研究。本文考虑设置间歇式BRT专用道以及是否启用BRT主动信号优先控制,提出4种交叉口BRT控制策略,通过模拟试验研究控制策略的适用条件,为交叉口BRT的运行管理提供参考。

1 专用道设置方法与BRT控制策略

1.1 间歇式BRT专用道的设置方法

BRT专用道主要分为路中式BRT专用道和路侧式BRT专用道两种。其中,路中式BRT专用道是指在双向通行的道路上,靠近道路中心线的BRT专用车道;路侧式BRT专用道是指靠近道路边线的BRT专用车道。采用路中式BRT专用道时,不易受外界干扰因素影响,便于封闭管理,车速快且畅通性

好,但需设专门的行人过街设施,对道路横断面要求较高;采用路侧式BRT专用道时,快速公交停靠站设置在路边,乘客上下车方便,对道路宽度要求也较低,不会占用过多道路资源,但易受外界干扰因素影响,车速较慢,独立性较差。综合考虑,本文选择路中式BRT专用道作为研究对象。

间歇式BRT专用道是指在一定条件下,开放BRT专用道给非BRT车辆使用的一种车道管理措施。非BRT车辆能否驶入BRT专用道,依靠可变信息标志和纵向嵌入路面的指示灯来提示,当路面指示灯亮起时,表明BRT专用道不开放,非BRT车辆不能驶入,如图1所示。

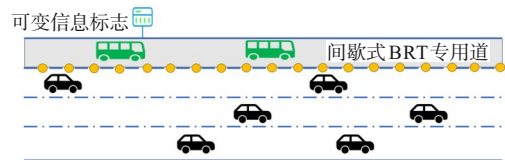


图1 间歇式BRT专用道示意图

Figure 1 Intermittent BRT dedicated lane

1.2 BRT主动信号优先控制方法

BRT主动信号优先主要包括绿灯延长、红灯早断、相位插入、相位跳跃、相位转换5种方法。其中:前2种方法不改变原有相位,后3种方法会改变原有相位相序,对非BRT车辆通行造成较大影响。本文采用绿灯延长和红灯早断联合实施的BRT主动信号优先控制方法。

(1) 绿灯延长

当控制系统感应到BRT车辆即将到达交叉口停车线时,该方向信号灯即将变成红灯且绿灯未达到最大绿灯时长时,延长绿灯时间,待BRT车辆通过交叉口停车线后,控制系统按照预置信号配时运行,如图2(a)所示。

(2) 红灯早断

当控制系统感应到BRT车辆即将到达交叉口停车线时,该方向信号灯处于红灯状态且下一相位为BRT优先相位,当前相位已满足最小绿灯时长条件后结束该相位,切换到下一相位,BRT车辆通过交叉口停车线后,控制系统按照预置信号配时运行,如图2(b)所示。

1.3 BRT控制策略

为提高交叉口通行速度,降低CO₂排放,考虑将BRT专用道设置为间歇式,即根据是否开放BRT专

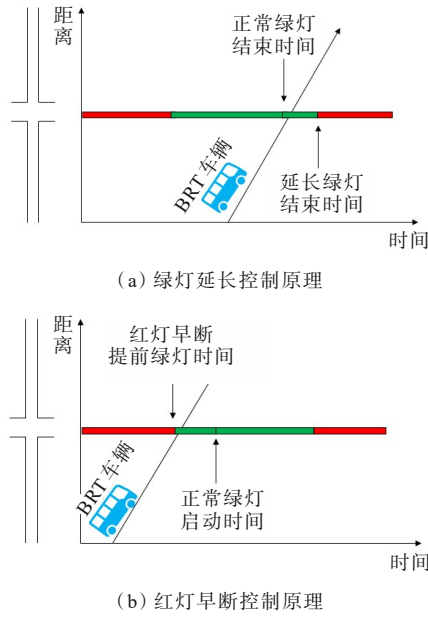


图 2 主动信号优先控制原理图

Figure 2 Principle of active signal priority control

用途以及是否启用 BRT 主动信号优先控制,提出 4 种 BRT 控制策略,如表 1 所示。具体表述如下:① 专用道上仅允许 BRT 车辆通行,车辆运行遵从 BRT 信号优先规则;② 专用道上仅允许 BRT 车辆通行,车辆运行遵从预置信号配时规则;③ 允许非 BRT 车辆进入专用道,车辆运行遵从 BRT 信号优先规则;④ 允许非 BRT 车辆进入专用道,车辆运行遵从预置信号配时规则。

表 1 4 种 BRT 控制策略

Table 1 Four BRT control strategies

策略	专用道		主动信号优先	
	开放	不开放	启用	不启用
A		✓	✓	
B		✓		✓
C	✓		✓	
D	✓			✓

2 驾驶行为模型

2.1 跟驰模型

用于描述人类驾驶车辆的跟驰模型主要有 GM 模型、IDM 模型、Krauss 模型等。GM 模型虽形式简单但通用性较差, IDM 模型参数明确但缺乏随机性,而 Krauss 跟驰模型为安全距离类模型^[17],其核心思想为:在保证安全间距(即前车紧急制动后保证不碰撞)的前提下,车辆随之减速,让车辆运行速度尽可能大,这符合城市道路驾驶人特性。本文采用城市

交通模拟软件 (Simulation of Urban Mobility, SUMO) 中改进的 Krauss 模型,主要参数有: a 为加速度 (m/s^2), b 为减速度 (m/s^2), v_{max} 为最大速度 (m/s), L 为车长 (m), t_{au} 为前后两车期望时间间隔 (s), D_{mingap} 为安全间距 (m), P_{sigma} 为驾驶人熟练度 [$P_{sigma} \in (0, 1)$], 熟练度越高取值越小。

Krauss 模型表达式如下:

$$v_s(k) = v_1(k) + \frac{g(k) - v_1(k)\mu}{\frac{v_1(k) + v_f(k)}{2 + b} + \mu} \quad (1)$$

$$v_1(k) = v(k) + aT \quad (2)$$

$$v_s(k) = (-b\mu) + \sqrt{(\mu b)^2 + v_1^2(k) + 2bg(k)} \quad (3)$$

$$v_e(k) = \min[v_{max}, v_1(k), v_s(k)] \quad (4)$$

$$v_r(k) = \max[0, v_e(k) - P_{sigma} \cdot a \cdot \text{rand}()] \quad (5)$$

$$P_{k+1} = P_k + v_r(k)T \quad (6)$$

式中: v_1 为前车速度; v_f 为后车速度; g 为前后车距离; μ 为驾驶人反应时间,取 1.5 s; v_1 为理论变化速度; T 为仿真步长; v_s 为车辆安全行驶速度; v_e 为期望速度; v_r 为实际行驶速度; $\text{rand}()$ 为仿真随机数; P_{k+1} 为车辆移动后位置; P_k 为车辆初始位置。

根据实际调查数据标定,并参考 SUMO 官网和文献[17-19], Krauss 车辆跟驰模型参数可在车辆需求文件中自主设置,参数取值如表 2 所示。

表 2 Krauss 跟驰模型参数取值

Table 2 Krauss car-following model parameters

车型	最大加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	最大减速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	最大速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	车长/ m	安全间距/ m	驾驶人熟练度	期望时间间隔/ s
小客车	0.0	5.0	16.7	5	0.0	0.5	1.5
轻型货车	0.5	4.5	16.7	6	0.0	0.5	1.5
普通公交车	1.0	0.0	16.7	12	1.0	0.5	0.0
快速公交车	0.0	4.0	16.7	18	1.5	0.5	0.0

2.2 换道模型

本文使用 SUMO 软件进行模拟试验,其自带 3 种换道模型: SL2015、DK2008 和 LC2013。其中, SL2015 模型资料缺乏且测试不足, DK2008 模型较为稳定但功能有限且过时,而 LC2013 模型以换道动机为原则,能够区分战略性换道、协作性换道、战术性换道和法规性换道 4 种不同的换道行为^[20],且该模型还具有动态决策和速度调整的特点,能适应多种交通场景,符合交叉口复杂的换道情形^[21-23]。因此,本文采用 LC2013 换道模型,换道所需的最短距离计算公式为:

$$d_c(k) = \begin{cases} v(k)\alpha + 2l \\ v(k)\beta + 2l \end{cases} \quad (7)$$

式中： $d_c(k)$ 为 k 时刻所计算的换道到目标车道的最短距离； $v(k)$ 为需换道车辆在 k 时刻的速度； α 、 β 为换道到相邻车道的比例系数； l 为换道车的车身长度。

参考SUMO官网,并根据实际调查数据进行标定,本文采用LC2013换道模型的参数取值,如表3所示。

表3 LC2013换道模型参数取值

Table 3 LC2013 lane-changing model parameters

参数名称	释义	取值区间	取值
lcStrategic	值越小,换道时间越长	$[0, +\infty]$	1
lcCooperative	值越高,采取协作性换道行为概率越高	$[0, 1]$	1
lcSpeedGain	值越小,换道意愿值越低	$[0, +\infty]$	1
lcKeepRight	值越小,从超车道超车后,换道到右侧车道时间越长	$[0, +\infty]$	1
lcImpatience	值越大,驾驶人换道行为越激进	$[-1, 1]$	0

3 模拟试验

以采用路中式BRT专用道的双向八车道十字路口为研究对象,BRT车辆沿主干道1直行,在交叉口停车线处设置检测器E1,检测4个方向的每个检测区间内交叉口所有车辆的平均速度,如图3所示。通过SUMO的交通控制接口(Traffic Control Interface, TraCI)输出4个方向每个检测区间内交叉口所有车辆的CO₂排放。

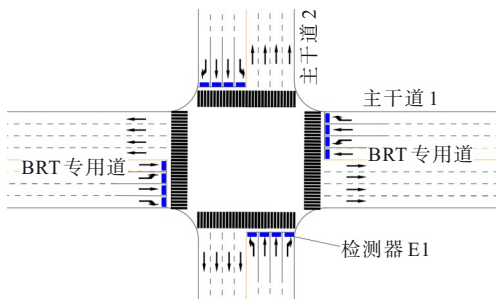


图3 交叉口示意图

Figure 3 Intersection

根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)^[24],本文以控制延误、负荷度、排队长度作为评价指标,将信号交叉口服务水平分为4个等级。其中,负荷度小于0.6为一级;在0.6~0.8之间为二级;在0.8~0.9之间为三级;大于0.9为四级。结合相关文献^[18,25-26],确定一级服务水平对应低等交通量区间(交叉口总交

通量 Q 取值为 $0 < Q \leq 2\,400$ veh/h);二级服务水平对应中等交通量区间($2\,400 < Q \leq 4\,800$ veh/h);三、四级服务水平对应高等交通量区间($4\,800 < Q \leq 7\,200$ veh/h)。基于SUMO对道路、车辆进行建模,通过设置是否允许非BRT车辆进入BRT专用道来实现BRT专用道的开放。使用Python语言结合SUMO软件的TraCI接口进行二次开发,获取道路、车辆和信号配时方案的参数信息。当启用BRT信号优先时,通过二次开发实现1.2节中提到的绿灯延长和红灯早断联合实施的BRT主动信号优先控制。

交通组成考虑小客车、轻型货车、普通公交车和快速公交车。其中,轻型货车比例选定为0.3,普通公交发车间隔和BRT发车间隔相同。小客车、轻型货车、常规公交车和快速公交车分别使用SUMO中基于HBEFA3/PC_G_EU4、HBEFA3/LDV、HBEFA3/Coach和HBEFA3/Bus的排放模型。

交叉口低等交通量、中等交通量、高等交通量区间对应的普通公交和BRT发车间隔分别为13~15 min/veh、9~10 min/veh、2~4 min/veh,换算成1 h内出现的普通公交和BRT车辆数为4~5 veh、6~7 veh、15~30 veh,以1 200 veh/h为步长制定流量输入方案^[18,25-26],如表4所示,4个方向的流量输入相同。在SUMO中定义车流的路径,4个方向的车流按照“左转:直行:右转=1:3:1”的转向比例分配^[27]。

表4 流量输入方案

Table 4 Traffic input scheme

流量方案	轻型货车比例	交叉口总交通量/(veh·h ⁻¹)	快速公交、普通公交数量/veh
1		1 200	4~5
2		2 400	4~5
3	0.3	3 600	6~7
4		4 800	6~7
5		6 000	15~30
6		7 200	15~30

最后形成6种流量方案下4种BRT控制策略的24组模拟试验方案。模拟采用7 200 s的时长,以120 s作为一个检测区间,共采集60个样本。其中,前120 s是系统预热时间,不纳入统计范围,每组试验重复20次,并对结果取平均值。

4 结果分析与讨论

4.1 低等交通量条件下的BRT控制策略分析

当总交通量在低等交通量区间($0 < Q \leq 2\,400$

veh/h)时,车辆行驶处于自由流状态或较好的稳定流状态。在4种BRT控制策略下,交叉口车辆平均速度对比如图4所示,CO₂排放量对比如图5所示。

由图4可知:当总交通量为1 200 veh/h时,交叉口实施策略B的车辆平均速度略大于策略D,但明显大于其他策略的;当总交通量为2 400 veh/h时,交叉口实施策略B的车辆平均速度明显大于其他策略的。

由图5可知:在两种总交通量条件下,策略B和策略D的平均CO₂排放量均最小。这是因为在交通量较小的情况下,是否开放BRT专用道对车流运行影响不大,而启用信号优先对车流顺畅运行会产生干扰。当总交通量为1 200 veh/h时,实施4种策略的CO₂排放量波动相似;当总交通量为2 400 veh/h时,实施策略B和策略D的CO₂排放量波动比策略A和策略C的小。这是因为随着交通量的增大,启动信号

优先使得车流运行的连续性发生变化,导致CO₂的排放出现较大波动。

因此,当总交通量在低等交通量区间($0 < Q \leq 2\,400$ veh/h)时,实施策略B更有利于提高交叉口的通行速度,降低CO₂排放量。

4.2 中等交通量条件下的BRT控制策略分析

当总交通量在中等交通量区间($2\,400 < Q \leq 4\,800$ veh/h)时,车辆行驶处于较差的稳定流状态。在4种BRT控制策略下,交叉口车辆平均速度对比如图6所示,CO₂排放量对比如图7所示。

由图6可知:当总交通量为3 600 veh/h和4 800 veh/h时,在模拟开始阶段,实施策略B的交叉口车辆平均速度较大。这可能是仿真开始阶段交通量较小,在4.1节中也提到当交通量较小时应该实施策略B。随着交通量的增大,与实施其他3种策略相比,实施策略D的交叉口车辆平均速度最大。

由图7可知:在两种总交通量条件下,策略D的

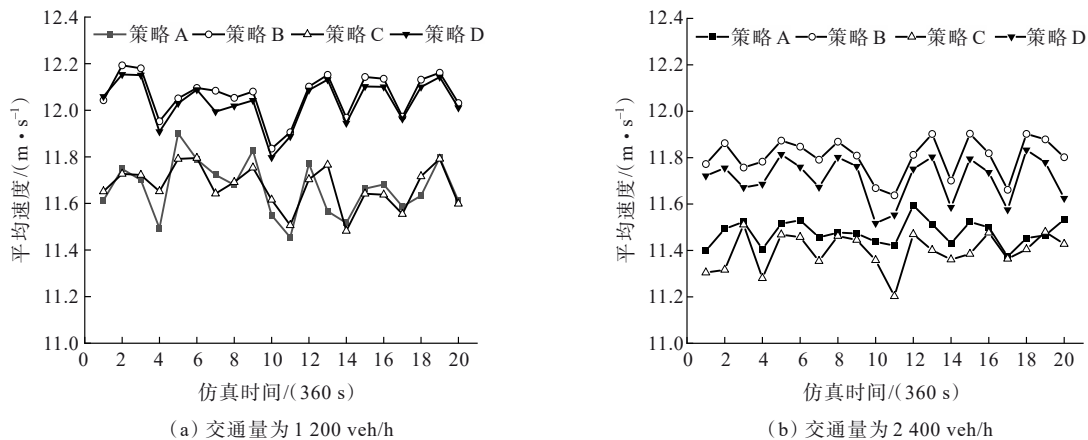


图4 低等交通量交叉口车辆平均速度

Figure 4 Average speed of vehicles at intersections with low traffic volume

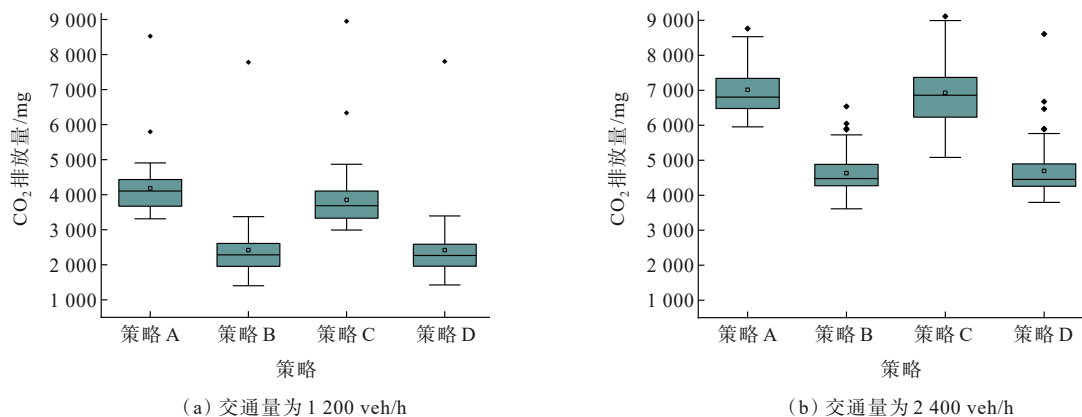


图5 低等交通量交叉口CO₂排放量

Figure 5 CO₂ emissions at intersections with low traffic volume

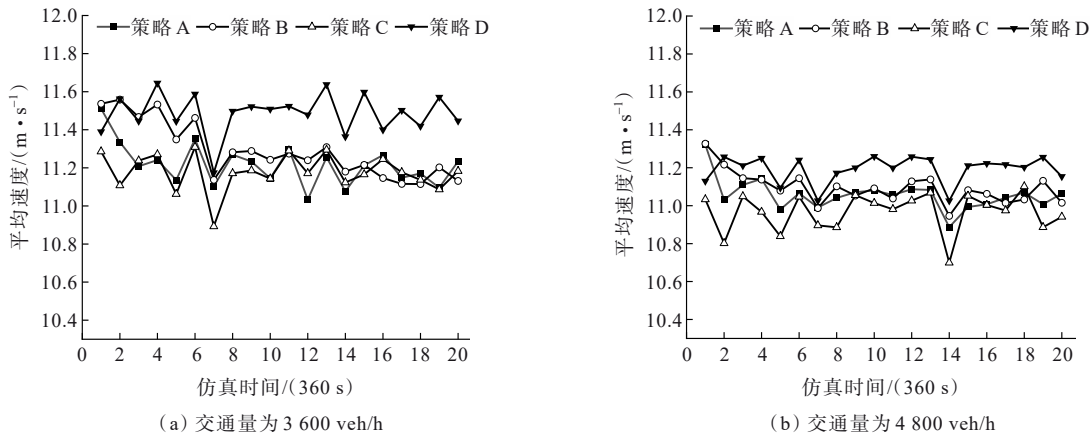
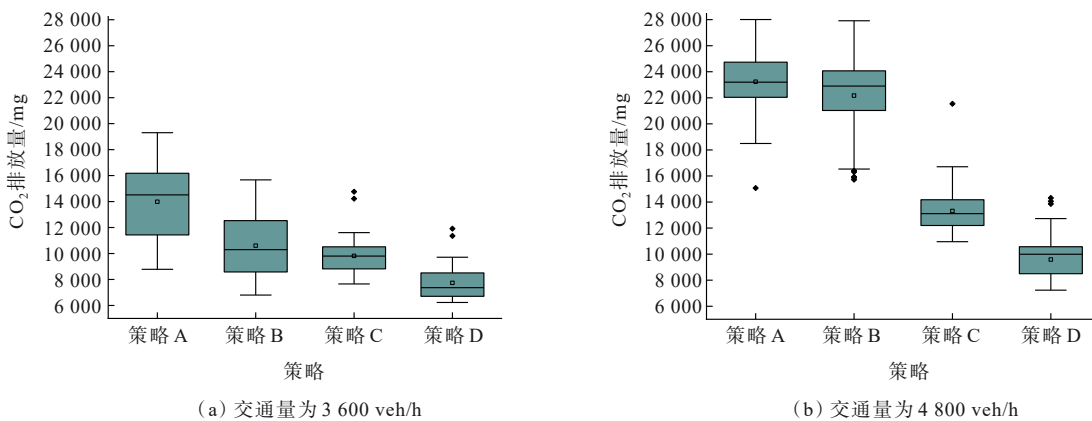


图6 中等交通量交叉口车辆平均速度

Figure 6 Average speed of vehicles at intersections with medium traffic volume

图7 中等交通量交叉口 CO_2 排放量Figure 7 CO_2 emissions at intersections with medium traffic volume

平均 CO_2 排放量都是最小的,策略 C 和策略 D 的 CO_2 排放量波动较小。这是因为在中等交通量,开放 BRT 专用道能提高专用道利用率,减少其他车道车辆排队长度,使车辆能更快速地通过交叉口。

因此,当总交通量在中等交通量区间($2400 < Q \leq 4800 \text{ veh/h}$)时,实施策略 D 更有利于提高交叉口的通行速度,降低 CO_2 排放量。

4.3 高等交通量条件下的 BRT 控制策略分析

当总交通量在高等交通量区间($4800 < Q \leq 7200 \text{ veh/h}$)时,车辆行驶处于不稳定流或强制流状态。在 4 种 BRT 控制策略下,交叉口车辆平均速度对比如图 8 所示, CO_2 排放量对比如图 9 所示。

由图 8 可知:当总交通量为 6000 veh/h 和 7200 veh/h 时,实施策略 C,交叉口的车辆平均速度大于其他 3 个策略的。这是因为在交通量大的情况下,BRT 车辆发车间隔小,启用 BRT 信号优先能使车辆更快

速通过交叉口,开放 BRT 专用道能提高专用道利用率。

由图 9 可知:在两种总交通量条件下,实施策略 C 的平均 CO_2 排放量都小于其他 3 个策略的。在总交通量为 6000 veh/h 时,策略 A 和策略 C 的 CO_2 排放量波动较小;在总交通量为 7200 veh/h 时,4 种策略的 CO_2 排放量波动相似,这是交通量过大导致在 4 种策略下车辆的启停行为频率相似。

因此,当总交通量在高等交通量区间($4800 < Q \leq 7200 \text{ veh/h}$)时,实施策略 C 更有利于提高交叉口的通行速度,降低 CO_2 排放量。

5 结论

本文基于 SUMO 软件及其 TraCI 接口,使用 Python 语言进行二次开发,对提出的 4 种 BRT 控制策略和其适用条件进行研究,通过优化 BRT 运行状

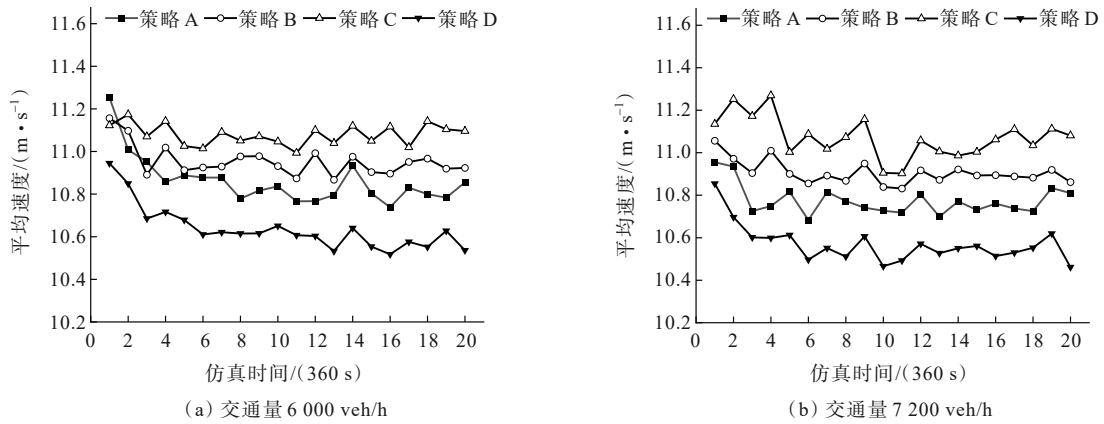


图8 高等交通量交叉口车辆平均速度

Figure 8 Average speed of vehicles at intersections with high traffic volume

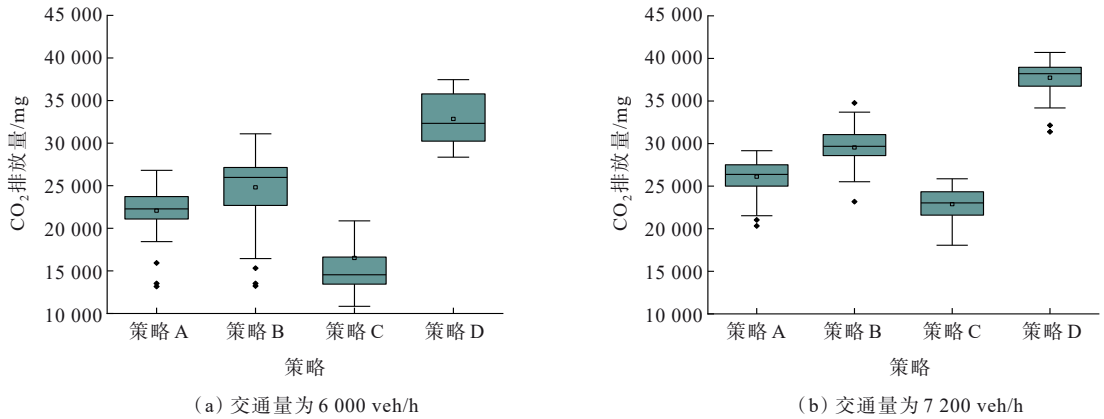


图9 高等交通量交叉口车辆CO₂排放量

Figure 9 CO₂ emissions from vehicles at intersections with high traffic volume

态,吸引更多人选择绿色出行,达到缓解拥堵、减少碳排放等目的。通过改变交叉口总交通量 Q ,形成不同的模拟试验方案,获取不同 Q 值时实施各种策略的交叉口交通流特征。选取车辆平均速度和平均 CO_2 排放量作为评价指标,经过对比分析和讨论,得出如下结论:

(1) 当 Q 在低等交通量区间时,是否开放BRT专用道对交叉口车辆平均速度和平均 CO_2 排放量的影响不大;当 Q 在中等交通量区间和高等交通量区间时,开放BRT专用道是有利的,启用BRT主动信号优先在高等交通量区间是有利的。

(2) 当 Q 在低等交通量区间时,控制系统执行策略B即“不开放BRT专用道且不启用BRT主动信号优先”的效果最好;当 Q 在中等交通量区间时,控制系统执行策略D即“开放BRT专用道但不启用BRT主动信号优先”的效果最好;当 Q 在高等交通量区间时,控制系统执行策略C即“开放BRT专用道且启用

BRT主动信号优先”的效果最好。

(3) 在低、中、高3种交叉口总交通量区间,从车辆平均速度和平均 CO_2 排放量两个评价指标来看,“不开放BRT专用道但启用BRT主动信号优先”的策略A不是最好的策略。

本文仅研究了轻型货车比例0.3和车流转向比例固定的情形,货车的种类、比例以及车流转向比例变化对控制策略的影响还有待进一步研究。随着自动驾驶技术的发展,今后的研究方向和重点将是自动驾驶环境下的交叉口BRT控制策略和适用条件。

参考文献:

References:

[1] MAESO-GONZÁLEZ E,PÉREZ-CERÓN P.State of art of bus rapid transit transportation[J]. European Transport Research Review,2014,6(2):149-156.

- [2] 张萌佳,陈思妤,刘剑武,等.面向流量剧烈波动交叉口的自适应多目标信号优化[J/OL].中外公路,1-13[2024-03-25].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240325.1141.004.html>.
ZHANG Mengjia, CHEN Siyu, LIU Jianwu, et al. Adaptive multi objective signal optimization for intersection with severe traffic fluctuations[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-13[2024-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240325.1141.004.html>.
- [3] EICHLER M, DAGANZO C F. Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an evaluation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(9):731-744.
- [4] 谢秋峰,李文权,贾晓欢,等.设置间歇式公交专用进口道的流量条件研究[J].交通运输工程与信息学报,2012,10(2):117-124.
XIE Qiufeng, LI Wenquan, JIA Xiaohuan, et al. Research on traffic flow conditions for set intermittent bus-only approach[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2012, 10(2):117-124.
- [5] 蒋诚,常玉林,孙超,等.交叉口快速公交车道共享策略及延误时间研究[J].科学技术与工程,2021,21(14):6032-6037.
JIANG Cheng, CHANG Yulin, SUN Chao, et al. Study on BRT lane about sharing strategy and delay time at intersections[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14):6032-6037.
- [6] CHEN X D, LIN X, HE F, et al. Modeling and control of automated vehicle access on dedicated bus rapid transit lanes[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 120:102795.
- [7] 宋现敏,张明业,李振建,等.动态公交专用道的设置及其仿真分析评价[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(5):1677-1686.
SONG Xianmin, ZHANG Mingye, LI Zhenjian, et al. Setting of dynamic bus lane and its simulation analysis and evaluation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5):1677-1686.
- [8] 林盈盈,董红召,张楠,等.容量约束的间歇式公交专用道控制策略[J].浙江工业大学学报,2023,51(3):271-281.
LIN Yingying, DONG Hongzhao, ZHANG Nan, et al. Control strategy for intermittent bus lane with capacity restriction[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2023, 51(3):271-281.
- [9] FURTH P G, MULLER T H J. Conditional bus priority at signalized intersections: Better service with less traffic disruption[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1731(1):23-30.
- [10] 陈光勤.快速公交车辆平面交叉口信号优先实现方法[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(1):41-46.
CHEN Guangqin. Signal priority operation for bus rapid transit vehicle at the intersection[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(1):41-46.
- [11] 张建鹏,廖唱,杨远舟,等.BRT信号优先的元胞自动机仿真研究[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(增刊1):61-67.
ZHANG Jianpeng, LIAO Chang, YANG Yuanzhou, et al. Simulation study on cellular automata with BRT signal priority [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(sup 1):61-67.
- [12] 杨远舟,毛保华,陈绍宽,等.快速公交信号优先对交通流影响仿真[J].深圳大学学报(理工版),2013,30(1):91-97.
YANG Yuanzhou, MAO Baohua, CHEN Shaokuan, et al. Effect of bus rapid transit signal priority effect on traffic flow[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2013, 30(1):91-97.
- [13] 汪林.基于预测的快速公交信号优先设计及效果仿真[J].公路交通科技,2017,34(6):129-135.
WANG Lin. Signal priority design for bus rapid transit based on prediction method and effect simulation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6):129-135.
- [14] 徐洪峰,郑启明,章琨,等.基于纵向平等的干道BRT信号优先方法[J].中国公路学报,2019,32(1):144-153,190.
XU Hongfeng, ZHENG Qiming, ZHANG Kun, et al. Signal priority technique for bus rapid transit system along an arterial based on vertical equity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1):144-153, 190.
- [15] 张鹏,汪鹏飞,孙超,等.基于交叉口双站台的BRT优先控制研究[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(3):83-88.
ZHANG Peng, WANG Pengfei, SUN Chao, et al. BRT priority control method based on two stations at intersection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3):83-88.
- [16] 韩印,唐煜,赵靖,等.快速公交多模式调度与沿线信号控制协同优化[J].铁道科学与工程学报,2022,19(9):2574-2582.
HAN Yin, TANG Yu, ZHAO Jing, et al. Integrated optimization of multi-mode scheduling and signal control for bus rapid transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9):2574-2582.
- [17] KRAUSS S, WAGNER P, GAWRON C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow[J]. Physical Review E, 1997, 55(5):5597-5602.
- [18] 朱凯舟.基于自动驾驶的道路平面交叉口复杂度模型及综合通行效益研究[D].扬州:扬州大学,2021.
ZHU Kaizhou. Research on the complexity model and comprehensive traffic efficiency of road level intersections based on autonomous driving[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [19] 杨柳,王创业,王梦言,等.设置自动驾驶小客车专用车道的六车道高速公路交通流特性[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(7):2043-2052.

- YANG Liu, WANG Chuangye, WANG Mengyan, et al. Traffic flow characteristics of a six lane highway with dedicated lanes for autonomous small buses[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023,53(7):2043-2052.
- [20] ERDMANN J. SUMO's lane-changing model (conference paper) [J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2015(13):105-123.
- [21] 程素娟,李英明,唐磊. SUMO平台下多种换道模型的仿真对比分析[C]//中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府. 2023世界交通运输大会(WTC2023)论文集(下册). 安徽理工大学矿业工程学院, 2023.
- CHENG Sujuan, LI Yingming, TANG Lei. Comparative analysis of simulation of multiple lane changing models under SUMO platform[C]//Chinese Association for Science and Technology, Ministry of Transport, Chinese Academy of Engineering, Hubei Provincial People's Government. Proceedings of the World Conference on Transportation 2023 (WTC2023) (lower volume). School of Mining Engineering, Anhui University of Science & Technology, 2023.
- [22] 雷青,王昭勇,吴玉荣,等. 高速公路收费站与平面交叉口联动控制方法[J]. 中外公路, 2024,44(6):269-275.
- LEI Qing, WANG Zhaoyong, WU Yurong, et al. Linkage control method for expressway toll stations and plane intersections[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024,44(6):269-275.
- [23] 刘卓,卢凯明,何佳,等. 面向人机混驾环境的交叉口车辆通行控制策略[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(6): 608-621.
- LIU Zhuo, LU Kaiming, HE Jia, et al. Control strategy for the mixed traffic flow of CAV and HV in intersection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(6): 608-621.
- [24] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 城市道路工程设计规范:CJJ 37—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd.. Code for urban road engineering: CJJ 37—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [25] 陈凯佳,赵靖. 基于VISSIM仿真的十字信号交叉口待行区适用性分析[J]. 中外公路, 2021,41(1):318-322.
- CHEN Kaijia, ZHAO Jing. Analysis of a applicability of signal intersection waiting area at signalized intersections based on VISSIM simulation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(1):318-322.
- [26] 蒋诚. 城市交叉口BRT专用道优化及共享方法研究[D]. 镇江:江苏大学, 2021.
- JIANG Cheng. Research on optimization and sharing methods of BRT dedicated lanes at urban intersections[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [27] 梁士栋,陈丽娟,王影,等. 信号交叉口直右动态车道优化设计及评价分析[J]. 公路交通科技, 2022,39(3):183-190.
- LIANG Shidong, CHEN Lijuan, WANG Ying, et al. Optimization design and evaluation analysis on dynamic straight-right lane at signalized intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022,39(3):183-190.