

文章编号:1001-7372(2013)02-0127-07

考虑可变速度调节的单点交叉口 公交信号优先控制方法

马万经¹, 吴明敏¹, 韩宝新¹, 刘好德², 吴洪洋²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029)

摘要:基于公交运行车速动态可变的运行环境,以公交运行状态最优为目标,提出了“最大可能优先通行”和“最优速度节能减排”2个控制原则;考虑公交车辆位置、车辆是否晚点、车辆速度、速度变化幅度、车辆到达时刻、信号控制参数变化范围等约束条件,针对需要优先通过和不需要优先通过2种情形,设计了信号控制方案和最佳速度调整规则簇,建立了运行速度与优先控制方案的协调优化方法。基于 VISSIM 仿真软件及其二次开发 COM 接口,设计了车路协同下信号优先控制的仿真平台,并对1个四相位信号控制交叉口进行了仿真分析。结果表明:与无优先和传统的感应优先相比,所提出的方法在降低公交车延误,恢复时刻表偏离,减少能源消耗,降低污染物排放和减小对于其他社会车辆影响上有显著的提高;参数敏感性分析进一步证明了不同交通量情况下该模型的适应性。

关键词:交通工程;公交信号;车路协同;速度引导;控制规则

中图分类号:U491.23 **文献标志码:**A

Bus Signal Priority Control Method for Isolated Intersection Based on Dynamic Variable Speed Adjustment

MA Wan-jing¹, WU Ming-min¹, HAN Bao-xin¹, LIU Hao-de², WU Hong-yang²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: With the objective of finding optimal bus operation based on information and communication environment provided by Connected Vehicle systems, two principles of integrated optimization were proposed: passing junction with priority and optimal speed with minimum fuel consumption and emission. Constraints such as location of bus, bus operation status, bus speed, change range of speed arriving time and signal timing were taken into consideration. Signal timing plan and optimal speed adjustment rules cluster were designed for two cases (passing junction with priority and without priority). Coordination and optimization method was established for operation speed and priority control. A VISSIM-based simulation platform was designed and used for simulation and evaluation of the proposed method. The results show that the proposed approach outperforms the no priority and conventional priority strategies (without bus speed adjustment) in terms of reducing bus delays, improving schedule adherence, saving energy,

收稿日期:2012-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51178345);交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 221 1210)

作者简介:马万经(1980-),男,内蒙古赤峰人,副教授,工学博士, E-mail: mawanjing@tongji.edu.cn.

reducing emission, and minimizing the impact on general traffic. The sensitivity analysis has further demonstrated the potential of the proposed approach to be applied in real-time bus priority control system under different levels of traffic.

Key words: traffic engineering; bus signal; connected vehicle system; speed adjustment; control rule

0 引言

公交信号优先是提高公交系统服务水平的关键技术手段之一^[1],自 Wilbur 等于 1967 年对 2 个信号控制交叉口通过手动控制信号提供公交优先的研究开始,经过近 50 年的研究,公交信号优先控制取得了长足的进步^[2]。文献[3]中将公交优先控制策略分为被动优先,主动优先和实时优先 3 种。被动优先策略基于历史数据进行优化^[4],主动优先和实时优先策略则基于实时数据进行控制方案的动态优化。无论是主动优先还是实时优先控制策略,都需要实时检测数据的支持来实现控制方案动态优化^[5-7]。其中,公交车辆运行速度或公交车辆行程时间是控制策略动态优化模型的主要输入参数,而其在优先控制过程中,公交车辆只能被动适应信号控制策略的变化,即公交车辆发出了优先申请之后,无法了解信号控制策略对此如何响应。在这个过程中,公交车辆不知道信号灯会如何变化,因而也就不能对自身运行状态进行相应的调整(如加速通过或者减速停车等)。文献[8]中认为这种类似的信息获取手段和控制模式限制了公交信号优先策略的优化效果。同时,Abur-lebdeh^[9]则在 2002 年指出,在交通控制系统中,通过信号控制与车辆速度的集成优化,可以显著提高系统的运行效率。然而,受限于检测和通信手段的因素,目前尚没有将车辆运行速度与信号优先控制策略进行协调优化来实现公交车辆主动适应信号控制方案变化的研究成果。

车路协同系统为在信号优先控制过程中实现车辆速度-信号控制方案的协调优化提供了基础条件^[10]。在车路协同环境下,公交车辆和信号控制机能够双向通信,即信号控制系统可以实时获得公交车辆的状态信息(如速度),也可将控制策略实时状态发送给相应的公交车辆。基于这一环境,本文中以公交专用道为背景,考虑车辆延误、油耗和排放多种目标,设计了公交车辆运行速度和信号优先控制策略的协调优化规则,并利用 VISSIM 仿真进行了控制规则的验证和流量、速度等多因素敏感性分析。

综上所述,车路协同环境下,优先控制策略既可

以改变信号控制参数实现公交优先通行,也可以在既定的控制策略下,改变车辆的运行速度,使得车辆平顺地通过交叉口(如降低红灯期间到达的公交车辆速度,使其在到达交叉口时信号恰好切换为绿灯,而不必在交叉口停车)。而车辆速度改变又会影响到车辆到达交叉口的时刻,进而反作用于控制策略。综上所述,本文中研究的问题可归结为:如何最优地协调公交车辆运行速度与信号优先控制策略,实现公交车辆优先通行,同时降低车辆的油耗和排放。

1 公交到达与通过的时间窗

1.1 基本假设

为便于策略的研究,本文中做以下假设:

- (1)交叉口区域内没有公交车站;
- (2)车路协同系统可以检测到车辆的运行状态,包括车辆的行驶速度和晚点状态,并且能为公交车和信号控制机提供实时的双向通信;
- (3)所有公交车都运行在公交专用道上,并且按照推荐车速行驶;
- (4)仅采用绿灯延长和红灯早断 2 种方法实现公交优先。

1.2 公交到达时间窗与通过时间窗

对于任意一辆公交车,根据其运行速度的上、下限可确定其在交叉口的到达时间窗。各个相位受绿灯时间、绿灯最大延长时间和红灯缩短时间的约束,也能确定一个该相位优先申请的通过时间窗,如图 1 所示。显然,2 个通过时间窗的关系决定着在速度调整与信号优先共同作用下,车辆是否能够通过道路交叉口。

公交车到达时间窗下限由检测到车辆的时刻、车辆的最大速度和信号周期长度决定,即到达时间窗下限是公交车以最大许可速度 v_{\max} 行驶到交叉口时,信号控制方案执行时刻与公交相位红灯起点的差值,即

$$w_s^a = (\frac{L}{v_{\max}} + T_0) \bmod(C) \quad (1)$$

式中: w_s^a 为公交车辆到达时间窗下限; L 为车辆检测位置到达交叉口停车线的距离; T_0 为公交车以当

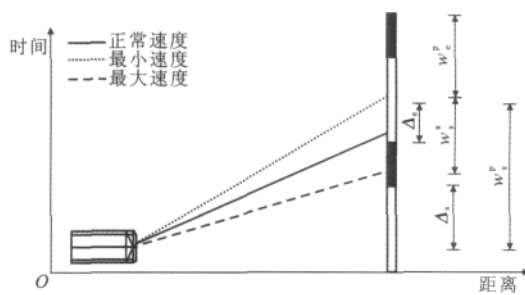


图1 公交到达时间窗与通过时间窗关系

Fig. 1 Bus Arrival Time Window and Passing Time Window
前速度正常行驶到达交叉口的时刻; C 为信号周期长度; $\text{mod}(\cdot)$ 表示取余数运算。

同理,公交车到达时间窗的上限由检测到车辆的时刻、车辆的最小许可速度 v_{\min} 和信号周期长度决定,可由下式求得

$$w_e^a = \left(\frac{L}{v_{\min}} + T_0 \right) \text{mod}(C) \quad (2)$$

式中: w_e^a 为公交车到达时间窗上限。

公交车通过时间窗的下限由最大红灯早断时间决定,即

$$w_s^p = g_s - \Delta_s \quad (3)$$

式中: w_s^p 为公交车通过时间窗下限; g_s 为公交通行相位绿灯起亮时刻; Δ_s 为公交相位绿灯早起(红灯早断)最大时间。

公交车通过时间窗的上限由最大绿灯延长时间决定,即

$$w_e^p = g_e + \Delta_e \quad (4)$$

式中: w_e^p 为公交车通过时间窗上限; g_e 为公交通行相位绿灯结束时刻; Δ_e 为公交相位绿灯延长最大时间。

2 协调规则设计

2.1 速度与控制协调原则

为了解决上述问题,实现车辆速度和信号控制策略的最佳协调,根据优先通行和节能减排的要求,分别确立如下协调原则:

(1)最大可能优先通行原则。在优先允许范围内,针对晚点车辆,调整车辆速度和信号灯配时,最大限度给予公交车优先,使公交车辆平顺地通过交叉口,并降低车辆在交叉口的延误。

(2)最优速度节能减排原则。面向所有车辆,在不能通过交叉口的情况下,调整车速使得车辆能够以节能减排的最优状态到达交叉口停车。

2.2 协调优化规则

在上述协调原则的指导下,协调优化规则分为

前车影响判断规则、优先通行判断规则、优先通过规则和不优先调整规则,总体流程如图2所示。

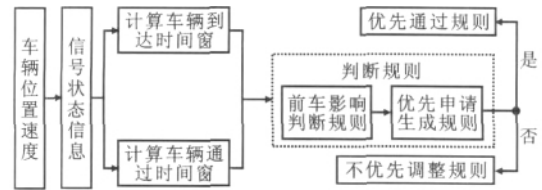


图2 车辆速度与信号配时协调流程

Fig. 2 Flowchart for Coordination of Speed and Signal Plan

2.2.1 前车影响判断规则(规则1)

规则 1.1:若无前车,则跳过规则1。

规则 1.2:有前车时,且前车的通过时间在本车到达时间窗之外,则前车无影响,跳过规则1。

规则 1.3:有前车时,且前车的通过时间在本车到达时间窗之内;如果前车优先状态为1,或前车以当前速度不能绿灯通过,则将本车到达时间窗的下限设置为前车到达时刻与安全时距之和(即前车到达且超过安全时距后到达),否则转入规则1.4。其中,优先状态为二元变量,优先状态为1表示优先,优先状态为0表示不优先。

规则 1.4:前车速度调整。根据本车到达时间窗下限,计算前车需要提高的速度,取该速度和前车速度最大值两者之间的较小值为推荐速度,判断前车以相应速度行驶,是否在绿灯范围内,如是,则将前车速度调整为推荐速度;如否,则以绿灯时间起点为基准,反推能够在绿灯时间通过的最大速度为前车推荐速度,并将该时刻加上安全时距设置为本车的到达时间窗下限。

2.2.2 优先申请生成规则(规则2)

规则 2.1:车辆以当前速度行驶,到达交叉口时刻落在绿灯范围之内,则将其通过时间窗上、下限分别设置为绿灯结束和绿灯开始时刻,优先状态设置为0;否则转入规则2.2。

规则 2.2:车辆以当前速度行驶,到达交叉口时刻落在绿灯范围之外,则调用车辆状态进行判断,如果不晚点,则将优先状态设置为0;否则置为1。

2.2.3 优先通过规则(规则3)

如果车辆优先通行状态为1,启用优先通过规则,包括:①为车辆通过速度调整规则;②信号优先的调整规则。

规则 3.1:车辆通过速度调整规则。判断到达时间窗下限是否处于通过时间窗之内,如是,则选取最大速度为推荐速度,并转入规则3.4调整信号,否则转入规则3.2。

规则 3.2: 如果到达时间窗上限处于通过时间窗之内, 则取通过时间窗下限作为车辆到达时刻, 计算车辆速度, 取其为推荐速度, 并转到规则 3.3; 否则转入规则 3.4。

规则 3.3: 如果到达时间窗与通过时间窗没有交集, 则取推荐速度为当前车速, 转入规则 3.4。

规则 3.4: 优先信号调整规则。根据以推荐速度行驶的到达时刻与绿灯起、终点的关系, 确定选择绿灯延长或红灯早断控制策略, 并计算信号的调整时间。

2.2.4 不优先速度调整规则(规则 4)

如果车辆优先通行状态为 0, 则启用不优先速度调整规则。

规则 4.1: 到达时间窗与绿灯时间没有交集, 则推荐车辆以当前速度行驶并到达停车线停车; 否则

转入规则 4.2。

规则 4.2: 以当前速度行驶的到达时刻是否在绿灯时间内, 如在, 则以当前速度为推荐速度, 否则, 转入规则 4.3。

规则 4.3: 以到达时间窗与绿灯时间交集内绿灯开始时刻作为基准点, 反推车辆速度, 作为推荐速度。

根据上述规则, 用表 1 定义的参数描述整个控制规则的执行逻辑, 如图 3 所示, 图 3 中 v_0 为公交车辆当前运行速度; T_0 为公交车前车以当前速度正常行驶到达交叉口的时刻; δ 为二元变量, $\delta=1$ 表示有前车, $\delta=0$ 表示无前车; θ 为二元变量, $\theta=1$ 表示晚点, $\theta=0$ 表示不晚点; ϵ 为优先状态二元变量, $\epsilon=1$ 表示优先, $\epsilon=0$ 表示不优先; ϵ' 为前车优先状态二元变量, $\epsilon'=1$ 表示优先, $\epsilon'=0$ 表示不优先; L' 为

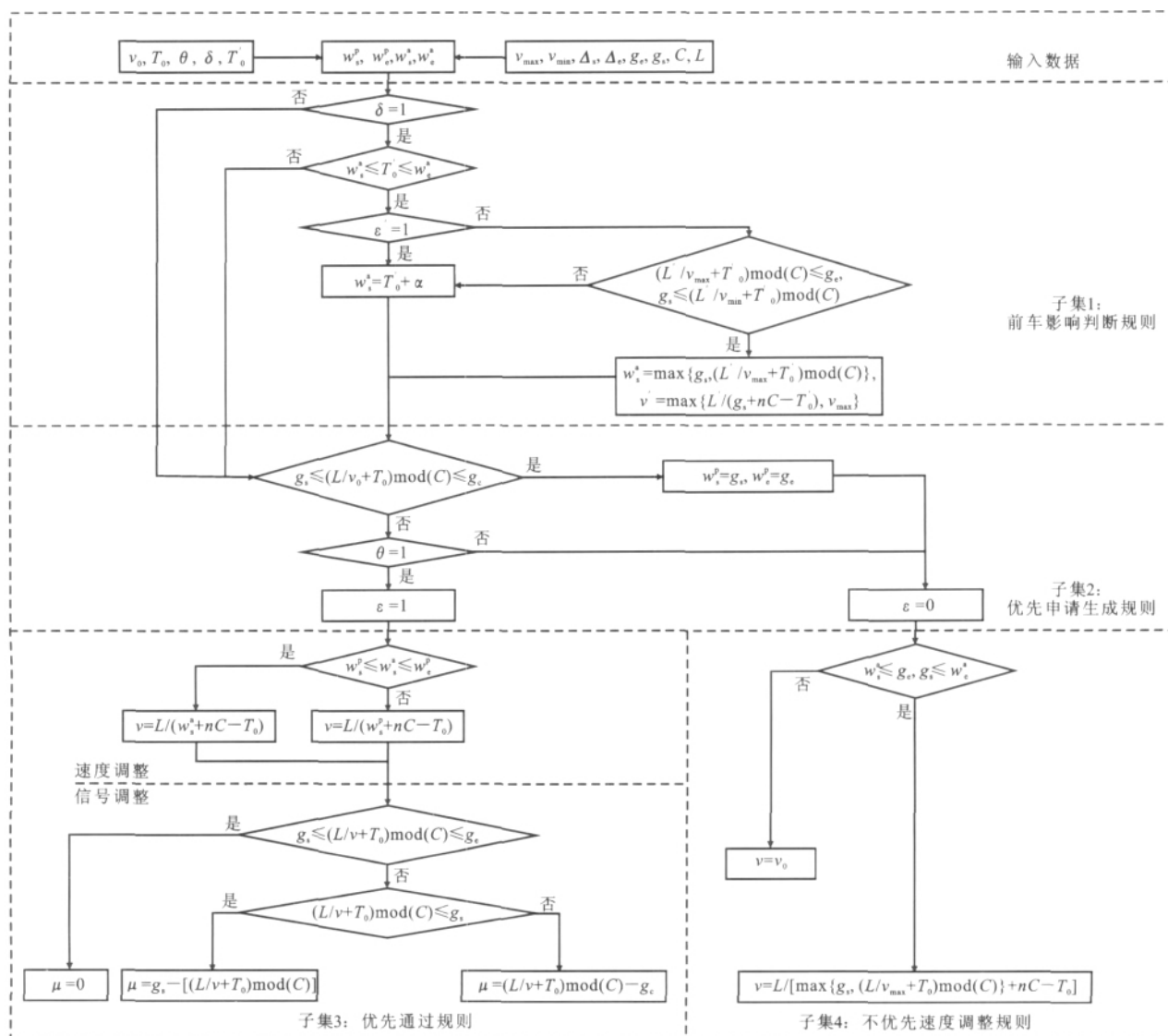


图3 规则执行逻辑

Fig. 3 Flowchart of Control Rules

前车距离交叉口停车线的距离; α 为车辆停车的安全时距; v 为车辆推荐速度; n 为正整数,使所求得的 v 满足 $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$; μ 为优先调整时间。

3 算例分析

3.1 试验设计

为了分析控制策略的效果及参数的敏感性,基于 VISSIM 及其二次开发 COM 接口设计了仿真平台。该平台具有如下功能:①能够实时获取路段、车辆、信号灯配时等信息;②能够对车辆速度进行调整;③能够根据控制规则实时改变信号灯配时;④能够输出策略施行后的相关数据评价。在此平台的基础上,选取济南市北园大街快速公交(BRT)系统中无影山路四项位信号交叉口进行控制策略评价分析,交叉口基本布局,相位设计和交通流量如图4所示。

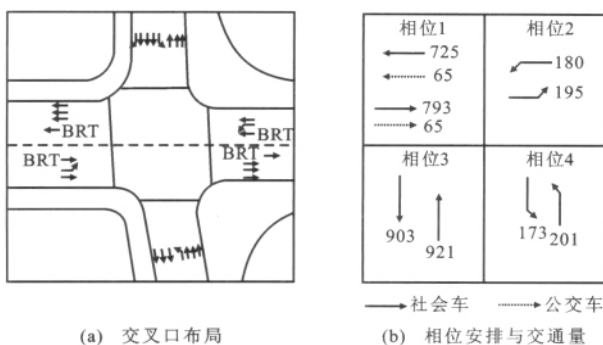


图4 仿真评价交叉口基本参数

Fig. 4 Intersection Parameters Used in Simulation Evaluation

分别对交通量和优先申请量、公交车速度限制范围、信号允许调整时间(最大绿灯延长时间和最大红灯早断时间)在不同参数水平下进行了仿真,参数水平见表1。

表1 不同参数水平说明

Tab. 1 Explanation of Different Parameter's Level

流量	低流量(Q-I)	正常流量(Q-II)	高流量(Q-III)
优先申请量	70%的基本流量	基本流量	1.3倍基本流量
速度	低速度(V-I)	正常速度(V-II)	高速度(V-III)
限制范围/(km·h ⁻¹)	25~35	20~40	15~45
优先状况	短(T-I)	正常(T-II)	长(T-III)
允许时间/s	4	6	8

每次仿真时间为3 600 s,为防止仿真偶然误差对仿真结果影响,取每类试验10次仿真平均值进行分析。

3.2 仿真结果分析

为了分析策略实施效果,本文中对比了无优先

(NO-TSP)、常规感应优先(C-TSP)、本文中提出的基于规则组合优先(RIO-TSP)情况下信号控制效果。

3.2.1 不同优先允许时间的影响

图5为在不同的优先允许时间水平下,公交车和社会车辆延误的对比。由图5可知:RIO-TSP相比其他控制方式在降低公交延误方面优势明显。以T-II为例,同无优先和感应优先相比,RIO-TSP控制下,公交车平均延误分别降低了39.3%,21.5%。RIO-TSP同时能够减少信号优先对于社会车辆的影响,相比常规感应控制,RIO-TSP控制下,社会车辆延误的增长率比感应优先降低了15.4%。

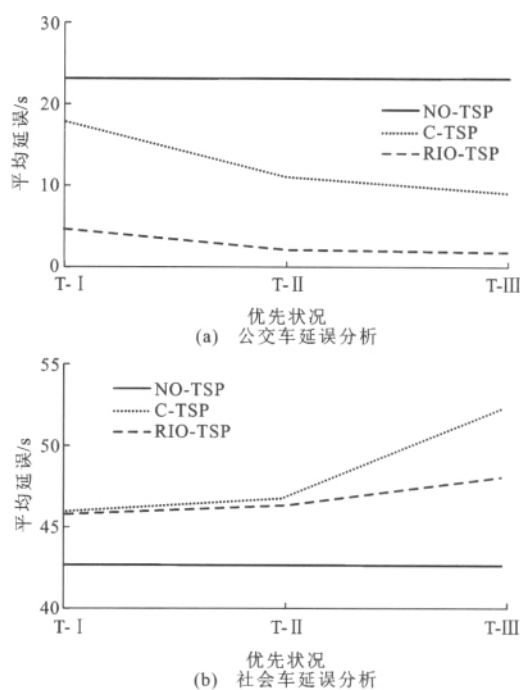


图5 不同优先允许时间影响

Fig. 5 Impacts of Available Priority Time

公交车延误随着优先允许时间的增加而减少,且优先允许时间越长,公交延误越小。但公交延误降低的变化率在T-II后趋于平缓,因此在后文的研究中选择T-II作为公交优先允许的时间限制。

3.2.2 不同速度限值的影响

为了使模型得到更好的应用,本文中对不同速度限制(速度上限和下限)对于控制效果的影响进行分析,结果见图6。

从图6可以看出:随着速度范围变大,公交平均延误逐渐降低,能量消耗和污染物排放也有着相同的变化趋势。但速度限值超过一定范围之后,随着公交车速度变化范围的增加,公交车延误变化渐趋平缓。结果表明,存在一个速度变化范围的界限值,

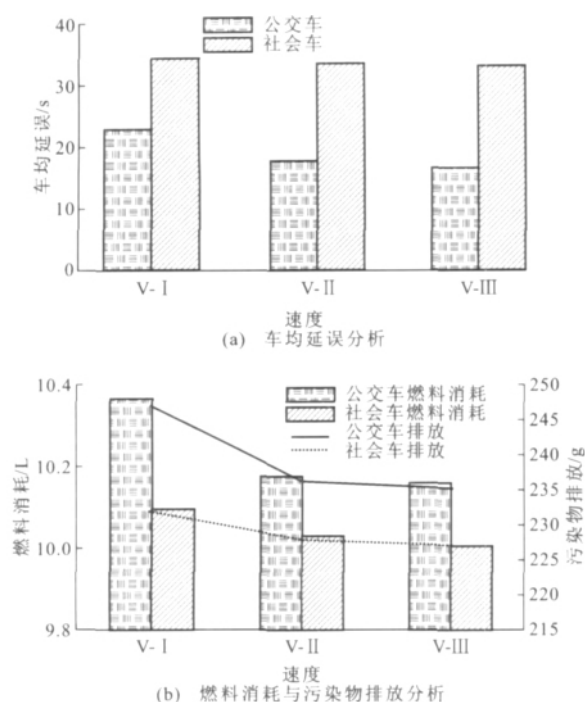


图 6 不同速度组合下的控制效果

Fig. 6 Performances at Different Bus Speeds

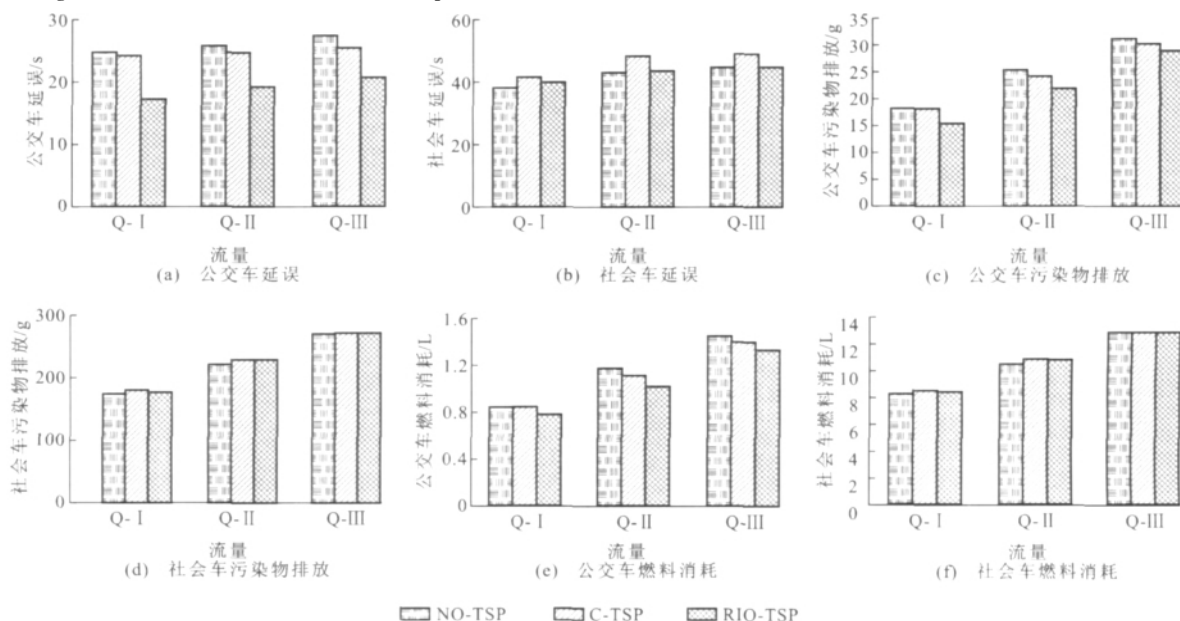


图 7 不同需求水平下的控制效果

Fig. 7 Performances at Different Demands

C-TSP 节省 4.4%~13.5%)和公交车污染物排放(相对 NO-TSP 减少 7.6%~16.8%, 相对 C-TSP 减少 4.3%~15.3%)。对社会车辆而言, RIO-TSP 控制下社会车辆能源消耗和污染物排放比 C-TSP 均有降低。这进一步证明了 RIO-TSP 在能源消耗和污染物排放方面的优势。

3.2.4 对公交服务率的影响

以公交车停车率(停车数与车辆总数之比)和优

使得优化模型能够显著降低公交车延误、能源消耗和污染物排放的同时,还能不引发因为过低或者过高的行驶速度造成顾客舒适度降低或安全隐患的增加。

3.2.3 不同交通需求水平的影响

为了进一步验证本文中提出的 RIO-TSP 效果,对比了不同交通需求水平下的车辆延误、污染物排放和能源消耗,如图 7 所示。由图 7 可知:相比无优先和感应优先, RIO-TSP 在不同的流量水平下都可以很好地降低公交车的延误(相比于 NO-TSP 降低 24%~30.1%, 相比于 C-TSP 降低 16.8%~28.8%),说明其在提高公交车服务水平上具有很大的优势。

RIO-TSP 能够弱化优先对社会车辆的影响,相对于 C-TSP 策略, RIO-TSP 控制下社会车辆的延误降低了 42%~93%,与 NO-TSP 和 C-TSP 相比, RIO-TSP 在不同的流量水平下均可以降低公交车能源消耗(相对 NO-TSP 节省 7.2%~15.5%, 相对

先申请服务率(优先总数与申请总数之比)作为评价指标,分析不同流量下公交车服务率,结果如图 8 所示(其中 B-D 表示公交处于晚点状态, B-ND 表示公交处于准点状态)。由于 C-TSP 下, B-ND 对应的为常规信号优先中处于准点状态的公交车,对于该类型车辆,常规策略不进行控制,因而图 8(a)中显示其服务率为 0。

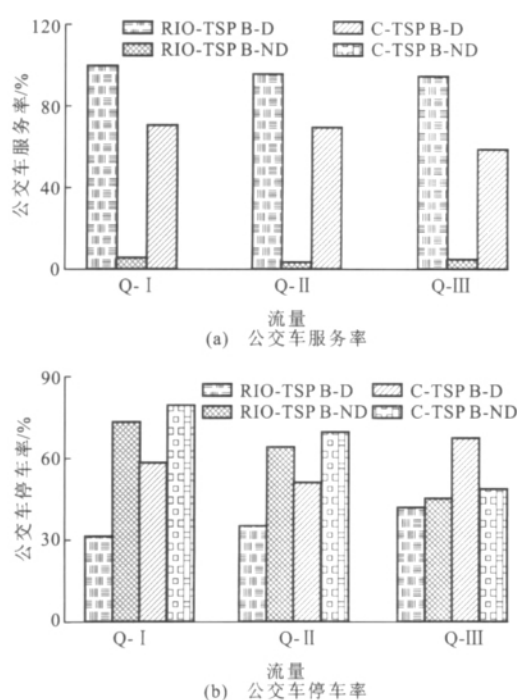


图 8 不同流量水平下公交服务率

Fig. 8 Ratios of Bus Services Under Different Vehicle Flows

从图 8 可以看出:

(1)RIO-TSP 对于不同的交通需求都要优于 C-TSP,尤其是对于出现了时刻表偏差需要服务的公交车,表明了 RIO-TSP 对于公交优先需求处理的效率更高,这点在公交优先系统中对于交叉口大量的公交优先需求十分重要,而中国公交的普遍特点就是密度大,因此,本文策略可以发挥极大作用。

(2)相对于 C-TSP,RIO-TSP 显著降低了晚点车辆和不晚点车辆在交叉口的停车率,表明 RIO-TSP 在降低能源消耗和污染物排放方面表的效果比常规感应控制方法优越。

(3)随着公交流量的增加,RIO-TSP 对晚点车辆和不晚点车辆的服务率有所降低,即公交流量也是影响 RIO-TSP 的一个因素。

4 结 语

(1)本文中提出的 RIO-TSP 在减少公交车延误,恢复时刻表偏离,减少能源消耗,降低污染物排放和减少对于其他社会车辆影响上均比 NO-TSP 和 C-TSP 策略上都有显著提高。

(2)交通需求水平、公交车速度限制和公交信号允许调整时间的敏感性分析将有助于选择合适的公交速度变化范围和恰当的最大绿灯延长和红灯早断时间。

(3)后续研究应进行更多的仿真或实地试验来评价模型应用效果。另外,如何通过多周期控制参数调整来提供更平滑的优先控制也是有价值的研究方向。

参考文献:

References:

- [1] EICHLER M,DAGANZO C F. Bus Lanes with Intermittent Priority;Strategy Formulae and an Evaluation [J]. Transportation Research Part B, 2006, 40 (9): 731-744.
- [2] HUNTER C D. Guidelines for the Successful Implementation of Transit Signal Priority on Arterials[D]. Seattle;University of Washington,2000.
- [3] HEAD K L. Improved Traffic Signal Priority for Transit[R]. Washington DC;TRB,1998.
- [4] 马万经,杨晓光. 基于车道的单点交叉口公交被动优先控制模型[J]. 中国公路学报,2010,23(5):96-101.
MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Lane-based Optimization Model of Passive Bus Priority Signal Timings for Isolated Intersection [J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(5):96-101.
- [5] VASUDEVAN M. Robust Optimization Model for Bus Priority Under Arterial Progression[D]. Washington DC;University of Maryland,2005.
- [6] MA W J, YANG X G, LIU Y. Development and Evaluation of a Coordinated and Conditional Bus Signal Priority Approach [J]. Transportation Research Record,2010,2145:49-58.
- [7] GHANIM M,DION F,ABU-LEBDEH G. Integration of Signal Control and Transit Signal Priority Optimization in Coordinated Network Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks[R]. Washington DC;TRB,2009.
- [8] WADJAS Y,FURTH P G. Transit Signal Priority Along an Arterial Using Advanced Detection [J]. Transportation Research Record,2003,1856:22-230.
- [9] ABU-LEBDEH G. Integrated Adaptive-signal Dynamic-speed Control of Signalized Arterials[J]. Journal of Transportation Engineering,2002,128(5):447-451.
- [10] ZHANG L,WEN P Y,CO P I, et al. Coordination of IVI and Transit Signal Priority on Transit Evacuations[R]. Washington DC;The National Center for Intermodal Transportation,2011.