

基于车路协同技术的 BRT 信号优先控制方法研究

周 莉, 王一喆, 刘洋东

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要: 针对交叉口延误过大制约着快速公交系统的发展问题, 基于车路协同技术, 通过预测 BRT 车辆行程时间并确定到达时间窗在信号周期中的定位, 以交叉口总体人均效益最大化为目标, 兼顾乘客乘坐舒适性、车辆运行状态、社会车辆交通效益等因素提出了绿灯延长、红灯早断和相位插入等 3 种 BRT 单点交叉口信号实时优先控制方法。最后以济南市 BRT 一号线北园大街无影山路交叉口为背景, 基于 VISSIM 仿真软件进行信号优先控制方案的验证。结果显示: 该方案可以使交叉口人均延误平均降低 18.60%, BRT 车辆运行速度平均提升 7.28%。

关键词: 智能交通; 信号优先控制; 城市快速公交; VISSIM

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 2096-3432(2017) 06-60-05

Study on Signal Priority and Control Method of BRT Based on Vehicle Infrastructure Integration

ZHOU Li, WANG Yi-zhe, LIU Yang-dong

(The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: As a high efficiency and low-cost public transport, the Bus Rapid Transit system has been recognized as an effective means of solving urban transport problems. However, more and more delays at signalized intersections restricted the development of BRT. Based on the Vehicle Infrastructure Integration, this paper has researched the model of signal priority of BRT with green extension, red reduction and phase insertion in isolated intersection. The model is based on the prediction of the travel time and arriving time window of BRT. The objective is to maximize passenger benefit, with the consideration of BRT running status, ride comfort, background vehicle benefit, among others. At last, this paper selects a typical intersection of Jinan BRT Line One to do simulation experiments using VISSIM. According to the result, this model can reduce the average passenger delay by 18.60 percent and improve the average travel speed of BRT by 7.28 percent.

Key words: intelligent transportation; signal priority control; bus rapid transit; VISSIM

0 引言

随着城市的扩张与发展, 公共交通已成为城市居民不可或缺的出行交通方式。尽管城市公共交通系统具有投资低、运力大、收费低、线路灵活等特点,

但其依然面临着与社会车辆争夺路权以及其他线路干扰运行等问题。其中快速公交(Bus Rapid Transit, 简称 BRT) 为缓解城市交通问题提供了 1 种有效的方式, 快速公交系统(BRT) 通过专用路权来实现快捷、准时、舒适和安全的公共交通服务, 但相对于常

收稿日期: 2016-12-08.

作者简介: 周 莉(1992—), 女, 硕士, 研究方向为智能交通系统工程及交通数据处理与建模分析。E-mail: 16wangyizhe@tongji.edu.cn.

通讯作者: 王一喆(1993—), 男, 博士, 研究方向为车路协同控制及应用与智能交通系统工程。E-mail: 16wangyizhe@tongji.edu.cn.

规公共交通系统,BRT系统在减少路段行程时间、站点停靠时间的同时,也使得信号交叉口的延误问题更加突出^[1]。

车路协同技术(Vehicle Infrastructure Integration, VII)为提高BRT的运行效率带来新思路。通过车路协同技术,可以对BRT车辆在通过交叉口的过程中给予信号优先权,通过绿灯延长、红灯早断和相位插入等主动优先控制策略^[2],提高BRT的运营效率。但车路协同技术在BRT车辆的应用上尚有不成熟之处,特别是BRT交叉口信号优先的控制理论和方法尚需完善。因此,本文针对路中型专用车道BRT车辆,基于车路协同技术预测BRT车辆行程时间,并根据BRT到达时间窗在信号周期中的定位设计单点交叉口信号实时优先控制方案,具有较好的实际应用价值。

1 文献综述

近年来,BRT在信号控制交叉口的延误占总行程时间的比例不断增加,如何进一步提升BRT服务质量逐步成为研究热点。重点分为行程时间预测与信号主动优先控制2方面。

在公交车辆行程时间预测方面,Kevin N Balke等人建立预测模型,预测了公交车到达交叉口停车线以及车站的行程时间,并进一步通过研判模型决定是否给予信号优先控制。结果表明:该策略可以显著降低公交行程时间^[3]。Wonho Kim提出了考虑近端公交停靠站的信号优先控制策略,利用VISSIM仿真软件对该控制策略进行仿真。结果表明:该模型能显著提高公交运营平顺性且对信号配时影响较小^[4]。

Peter G等^[5]分别测试了条件公交优先、完全公交优先及部分公交优先对交叉口的影响,实验结果表明:条件公交优先运行情况相对较好。杨晓光等^[6]提出了公交优先信号配时参数的确定方法,并建立了系统最优的线性规划模型,通过算例演示了定周期条件下公交优先信号的确定过程。马万经等^[7]将公交优先分为“早点”和“晚点”2种情况分别进行考虑,提出面向“早点”和“晚点”车辆的“增加延误”和“减少延误”2类策略。袁野^[8]针对绿灯延长和绿灯提前启亮2种方式,采用面积三角形法建立相应的目标函数,并通过饱和度作为重要指标来约束目标函数,提出基于绿灯急切度的控制方法,并通过算例验证模型的可靠性。Albright E等^[9]研究了基于公交准点率以及交叉口效益的公交优先控制对减少“迟到公交”延误的效用。结果表明,在低流量情况下,公交优先控制更有效用。

通过文献综述可以看出,集中于研究公交优先实现的逻辑或算法的相关文献较多,然而这些理论仅通过数值解析方法进行信号优先控制,尚未形成系统性的成果,无法直接运用于BRT的实际运营。同时,公共交通和社会车辆的协调研究的还不够充分,即公交优先可能会对社会车辆造成负面影响,甚至可能会引起交通事故。

2 单点交叉口BRT信号优先控制逻辑

2.1 单点交叉口BRT信号优先控制思想

城市快速公交系统均配置了车载GPS装置,可以实时得到BRT的运行地点及其与时时刻表的偏差,从而得知其运行正点、晚点情况。本文提出的单点优先控制方法基于以下思想:

1) BRT条件优先

根据BRT配置的车载GPS,当BRT驶离上一停靠站时即判断其运行正点情况,对于晚点BRT在交叉口给予信号优先控制,以保证其运行的可靠性。

2) 节能,提高乘坐舒适性

本文考虑对于部分运行正点,但是到达停车线的时刻位于红灯初期或红灯末期的BRT给予优先控制,既不会对社会车辆造成较大的影响,又可起到节能和提高乘坐舒适性的作用。

3) 考虑交叉口整体效益

本文在执行BRT单点交叉口优先控制之前,会进行以人均延误为单位的优先控制前后交叉口整体交通效益对比,仅当交叉口总体人均延误降低时,才执行BRT单点优先控制。

2.2 BRT单点交叉口在线优先控制流程

BRT单点交叉口在线优先控制流程分为以下步骤:

步骤1 交叉口上游检测器检测是否有BRT到达,若有则预测其到达本交叉口停车线时刻中值 t_{TTA} 、边界间距 σ ,从而得到其到达交叉口停车线时间段,转入步骤2;若无则保持原有信号配时方案;

步骤2 将BRT到达交叉口停车线时间段在周期中进行定位,分别得到其到达时间下界、中值、上界在周期中的相位分布,转入步骤3;

步骤3 根据BRT到达时段在周期中的相位分布情况对应不同的信号优先控制方案,包括绿灯延长、红灯早断和相位插入,转入步骤4;

步骤4 根据车载GPS数据判断BRT运行情况,若BRT晚点,或虽未晚点,但是属于优先控制的范围,则进入步骤5,否则优先控制判断逻辑结束,

保持原有控制方案不变,逻辑回到起点;

步骤5 根据步骤4的判断,若BRT符合优先控制申请条件,计算优先控制措施实施前后交叉口总人均延误的变化,若交叉口总人均延误降低,则实施步骤3中的优先控制方案;若交叉口总人均延误未降低,则保持原有控制方案不变,逻辑回到起点。

3 BRT 行程时间预测及在周期中的定位

3.1 BRT 行程时间预测方法

埋设于交叉口上游的BRT检测器检测到BRT时,即预测其行驶到交叉口停车线的时间段。检测器距离停车线的距离需满足BRT在两者之间的行驶时间大于系统响应时间。本文将检测器距停车线的距离设为100 m。

采用线性模型预测BRT到达停车线的时间段。将预测到达时间的计算值做为到达时段的中值,预测到达时间的标准差做为到达时段上下界相对于中值的偏移。对于拥有专用路权的BRT来说,可将其行程时间预测模型表达如下:

$$t_{TTA} = t_l + t_s \quad (1)$$

式中 t_{TTA} 为BRT预测到达停车线时段的中值; t_l 为BRT从检测器至停车线的行驶时间(s); t_s 为BRT停靠时间(s)。

行程时间预测模型的方差可用下式计算:

$$\sigma^2 = s_d^2 \left(1 + \frac{1}{N} \right) + S_{a1}^2 (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 + \cdots + S_{aN}^2 (x_{Ni} - \bar{x}_N)^2 \quad (2)$$

式中 σ^2 为行程时间预测模型方差; s_d 为因变量的样本标准差; s_a 为自变量的样本标准差; N 为模型中自变量的个数,本文中取5; x_i 为自变量的样本值; \bar{x} 为自变量的样本平均值。

在某些情况下,若式(2)不能很好地计算模型方差及标准差,可以在之后的仿真过程中将 σ 设置为可变参数(如3 s)进行分析。

求得 t_{TTA} 和 σ^2 之后,则BRT到达交叉口停车线的时间段为:

$$[t_{TTA} - \sigma, t_{TTA} + \sigma] \quad (3)$$

3.2 BRT 到达时刻在信号周期中的定位

根据BRT到达交叉口停车线的时间段,需要对其下界、中值、上界进行在周期中的定位,从而得知预测时间段的下界、中值、上界各处于周期中的哪个相位。具体的步骤如下:

1) 将以s为单位的预测行程时间段加到现在的时刻上;

2) 去除1)中时间周期的整数倍;

3) 余下的时间段即为预测时间段在周期中的定位;

4) 判断下界、中值、上界各处于哪个相位。

将其用数学表达,则为下式:

$$\text{mod}([t_{\text{now}} + t_{TTA} - \sigma, t_{\text{now}} + t_{TTA} + \sigma], C) \quad (4)$$

式中 t_{now} 为检测到BRT的时刻(s); C 为控制周期时长(s); σ^2 为行程时间预测模型方差; t_{TTA} 为BRT预测到达停车线时段的中值;

4 BRT 单点交叉口信号优先控制方案

本文提出的BRT交叉口单点优先控制方案包括3种措施:绿灯延长、红灯早断和相位插入^[10]。

4.1 BRT 绿灯相位延长

当BRT车辆到达相位为绿灯时,检测器检测到BRT车辆到达的同时判断该BRT车辆是否可以在此次绿灯相位结束前通过交叉口。若不能通过,延长本次绿灯时长使得BRT车辆不停车直接通过交叉口。在该策略中,需要以最大绿灯时间作为约束,目的是为了不对其他相位车辆造成较大的负面影响。

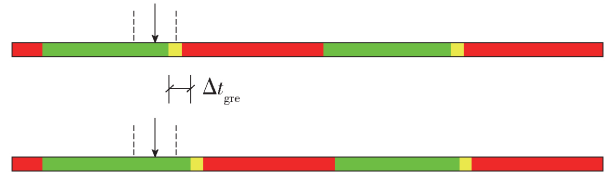


图1 BRT 绿灯延长模式一

4.1.1 绿灯延长模式①

该种模式下对应的优先控制方案为BRT绿灯延长。绿灯延长的时长应当满足BRT的通行需求并保证该相位绿灯时长不超过最大绿灯时长。绿灯延长的时长为:

$$\Delta t_{gre} = \min[\sigma, g_{lmax} - g_l] \quad (5)$$

式中 Δt_{gre} 为BRT绿灯相位绿灯延长的时长(s); g_{lmax} 为BRT绿灯相位最大绿灯时间(s); g_l 为BRT绿灯相位原方案时长(s)。其余参数含义同上。

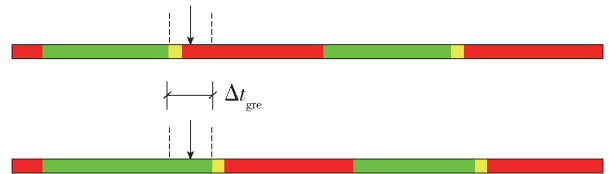


图2 BRT 绿灯延长模式二

4.1.2 绿灯延长模式②

该种模式下对应的优先控制方案为BRT绿灯

延长. 绿灯延长的时长应当满足 BRT 的通行需求并保证该相位绿灯时长不超过最大绿灯时长. 绿灯延长的时长为:

$$\Delta t_{gre} = \min [2\sigma g_{\max} - g] \quad (6)$$

式中参数含义同上. 2σ 的取值是为了满足 BRT 的通行需求.

4.2 BRT 红灯相位早断

当 BRT 车辆到达相位为红灯时, 检测器检测到 BRT 车辆的到达, 为了使得 BRT 车辆不停车通过交叉口, 提早结束本相位红灯. 在该策略中, 需要以最小红灯时间作为约束, 目的是为了不对其他相位车辆造成较大的负面影响.

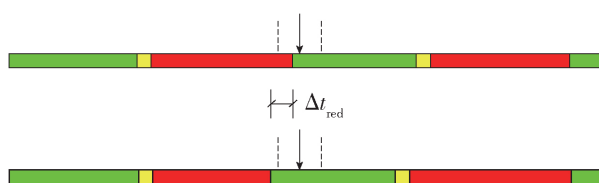


图3 BRT 红灯早断模式一

4.2.1 红灯早断模式①

该种模式下对应的优先控制方案为 BRT 红灯缩短. 红灯缩短的时长应当满足 BRT 前一相位的最小绿灯时间. 红灯缩短的时长为:

$$\Delta t_{red} = \min \left[\sigma r - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + I_i) - g_{nmin} \right] \quad (7)$$

式中 Δt_{red} 为 BRT 红灯缩短的时长 (s); σ 为 BRT 到达时段下界与中值的偏移 (s); r 为 BRT 相位红灯时长 (s); n 为除 BRT 相位外的相位总数; g_i 为 BRT 绿灯相位之外其它相位的原方案绿灯时长 (s); I_i 为 BRT 绿灯相位之外其它相位的绿灯间隔时间 (s); g_{nmin} 为 BRT 绿灯相位前一相位的最小绿灯时间 (s).

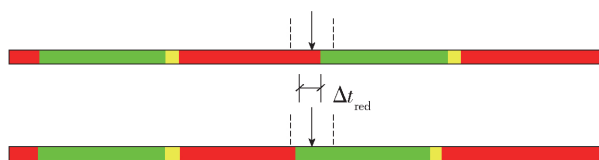


图4 BRT 红灯早断模式2

4.2.2 红灯早断模式2

该种模式下对应的优先控制方案为 BRT 红灯缩短. 红灯缩短的时长应当满足 BRT 前一相位的最小绿灯时间. 红灯缩短的时长为:

$$\Delta t_{red} = \min \left[2\sigma r - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + I_i) - g_{nmin} \right] \quad (8)$$

式中各参数含义同上.

4.3 BRT 绿灯相位插入

当 BRT 车辆到达相位为红灯, 且下一相位仍不允许 BRT 车辆放行, 为了使 BRT 车辆得以不停车通过交叉口, 可在当前相位和下一相位之间插入一个允许 BRT 车辆通行的绿灯相位.

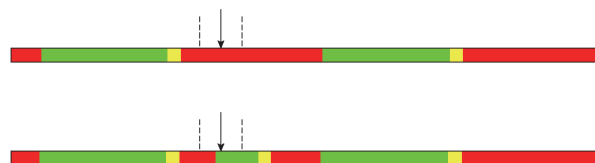


图5 BRT 相位插入模式

在该模式中, BRT 到达时段的上界、中值、下界均位于 BRT 红灯相位, 且三者没有全部位于 BRT 绿灯相位上一相位. 针对这种模式, 采取 BRT 绿灯相位插入.

假设 BRT 到达时段下界位于第 m 相位 (非 BRT 上一相位) 的绿灯期间, 则 BRT 绿灯相位插入时刻应满足第 m 相位的最小绿灯时间. BRT 绿灯相位的插入时刻为:

$$t_{ins} = \max \left[t_{TTA} - \sigma, \sum_{i=1}^{m-1} (g_i + y_i) + g_{mmin} \right] \quad (9)$$

式中 t_{ins} 为 BRT 绿灯相位插入时刻 (s); m 为 BRT 到达时段下界位于的相位; g_{mmin} 为第 m 相位的最小绿灯时间 (s); y_i 为第 i 相位社会车辆流量比; 其余参数含义同上.

5 优先控制方法验证与仿真分析

根据前文所述 BRT 单点交叉口信号优先控制核心算法, 以济南市 BRT 一号线北园大街与无影山路交叉口为仿真背景, 借助交通仿真软件 VISSIM 中的 COM 接口进行二次开发, 分别在交叉口主干路 (包含 BRT 专用车道) 进口道全部社会车辆流量为 600、800、1 000 和 1 200 pcu/h 的条件下进行系统控制结果的验证. 交叉口次干路进口道全部社会车辆流量固定在 600 pcu/h.

首先在北园大街无影山路交叉口同一周期不同社会车辆流量条件下, 在对于 BRT 进行信号优先控制, 得到交叉口的人均延误, 在计算人均延误时 BRT 车辆平均乘客人数设置为 70 人, 社会车辆平均乘客人数为 1.5 人. 通过仿真得出, 在交叉口主干路进口道社会车辆流量分别为 600、800、1 000、和 1 200 pcu/h 的条件下交叉口人均延误绝对值分别降低 7.1、6.3、6.3 和 6.7 s, 交叉口总人均延误平均降低 18.6%, 具体结果参见图 6.

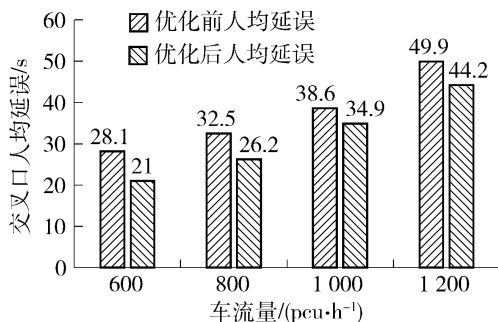


图6 优化前后交叉口人均延误

接下来对交叉口社会车辆流量为 600 pcu/h, 800 pcu/h, 1000 pcu/h 和 1200 pcu/h 的情况下分别做 50 次仿真实验分析, 得出 BRT 平均运行速度。结果显示, BRT 的平均运行速度分别提升 7.12%, 7.10%, 7.55% 和 7.35%, 具体结果参见图 7。通过分析可知, 优先控制方案为相位插入模式的出现频率仅 3.98%, 说明相位插入对于交叉口正常交通运行会产生较大影响, 会导致额外的延误增加和安全问题, 因此较少采用。优先控制方案为绿灯延长的模式和优先控制方案为红灯早断的模式出现频率分别为 38.94% 和 34.96%, 说明绿灯延长方案和红灯早断方案出现频率比较接近, 但绿灯延长方案出现次数略多于红灯早断方案出现次数。与此同时, 在仿真中有 22.12% 的频率为维持原有信号配时方案不变。

综上, 通过仿真分析得出本文所提出的城市快速公交信号优先控制方案可以在降低交叉口总延误的同时, 提升 BRT 的运行速度, 具有较好的应用价值和前景。

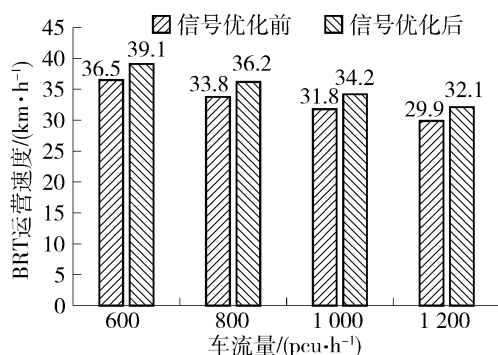


图7 优化前后 BRT 运行速度

6 结束语

本文研究了在车路协同条件下, 设计单点交叉口 BRT 信号优先控制系统的工作流程及核心算法, 考虑交叉口整体效益、BRT 晚点情况等因素, 根据

BRT 在信号周期中到达时刻分别提出了绿灯延长、红灯早断和相位插入等 BRT 车辆单点实时条件优先控制方法。通过交通仿真软件 VISSIM 中的 COM 接口进行 BRT 信号优先控制系统软件程序的开发。仿真结果表明, 本文所提出的单点交叉口 BRT 信号优先控制方案可以有效降低交叉口人均延误, 提高 BRT 的运行速度和效率, 具有较高的应用价值。本文的不足之处在于仅考虑单点交叉口信号优先的情况, 未考虑交叉口群和考虑停驻站的优先控制策略, 这也是未来需要重点研究的方向。

参考文献:

- [1] 陶玲. 信号交叉口 BRT 优先方法及技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [2] Lin Y, Yang X, Zou N, et al. Transit signal priority control at signalized intersections: a comprehensive review [J]. Transportation Letters the International Journal of Transportation Research, 2015, 7(3): 168-180.
- [3] Kevin Balke, Conrad Dudek, Thomas Urbanik II. Development and evaluation of intelligent bus priority concept [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, (1727): 12-19.
- [4] Wonho Kim. An Improved Transit Signal Priority System for Networks with Nearside Bus Stops [C]. Washington. D. C.: Transportation Research Board 84th Annual Meeting, 2004.
- [5] Peter G, Furth Theo, H J Muller. Conditional bus Priority interSUction: better service quality with less traffic disruption [C]. Transportation Research Board. 2000, 17(3): 101-114.
- [6] 杨晓光, 林瑜, 杭明升. 信号控制交叉口公共汽车优先信号确定方法研究 [J]. 中国公路学报, 2009 (21): 101-104.
- [7] 马万经, 吴志周, 杨晓光. 基于交叉口群公交优先协调控制方法研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 105-111.
- [8] 袁野. 基于交叉口公交优先控制方法研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- [9] Albright E. Factors Influencing Effectiveness of Transit Signal Priority and Late-Bus Recovery at Signalized-InterSUction Level [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2311(4): 186-194.
- [10] 王一喆, 刘洋东. 基于车路协同技术的现代路面电车速度引导和信号优先控制系统 [C]. 中国智能交通年会, 2014.