

考虑远端停靠站的交叉口公交优先控制方法

马万经, 谢涵洲

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 建立了考虑交叉口端停靠站排队的公交到站时间计算模型. 在此基础上, 提出以交叉口和停靠站构成的系统为对象的信号优先控制总体逻辑和优化模型. 模型以公交车辆在出口道停靠站时刻表偏差最小和社会车流延误最小为优化目标, 能够响应公交车辆“早到”和“晚点”两种情形, 同时考虑了相位长度约束、优先策略适用条件约束、公交停靠站排队长度约束和相位饱和度约束. 算例针对不同停靠车辆数下信号优先进行了分析, 结果表明, 不考虑远端停靠站排队和公交运行状态无条件提供优先, 可能导致更大的公交运行时刻表偏移值; 缺乏对远端停靠站排队的考虑, 可能导致交叉路口的信号优先策略失效. 而本模型能够较好地解决上述问题, 取得信号优先的满意解.

关键词: 停靠站; 公交信号优先; 信号控制交叉口; 公交时刻表

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Bus Signal Priority Strategy for Isolated Intersection with Far-side Bus Stop

MA Wanjing, XIE Hanzhou

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

Abstract: A model to calculate bus delay at intersection with far-side bus stop was first built, then a new bus signal priority control strategy was proposed. The system composed by intersection and far-side bus stop was adopted as control object. A multi-objective model, composed by minimization schedule deviation and minimization average delay of other motor vehicles, was built. Two kinds of buses, “early bus” and “late bus” were considered in the optimization process of the model. Constrains including phase length, queue length, strategy adaptability and degree of saturation of every movements were also considered in the model. The results of a case study show that the efficiency of bus signal priority is

affected evidently by the queue at far-side bus stop. It may lead to a larger bus schedule deviation and priority invalidation if the queue at far-side bus stop and bus status are neglected in the signal optimization process. With the proposed model, the above problems can be solved and the pareto-optimal solution can be obtained.

Key words: far-side bus stop; bus signal priority; signalized intersection; bus schedule

公交信号优先能够提高公交系统运行速度和可靠性. 从1967年Wilbur等人的研究开始, 在理论研究和实践中都取得了相当的进展^[1]. 停靠站及其位置对信号优先的影响在1993年已经提出^[2], 相关的研究认为, 车辆在进口道的停靠站上停靠时间波动程度难以准确预测, 进而控制系统不能准确判断车辆到达交叉口的具体时刻, 信号优先的效益也就无法有效充分发挥. 其后, 众多研究都指出这一问题, 对如何解决这一问题的信号优先策略进行研究^[3-5], 提出了停靠站设置在交叉口远端(出口道)利于信号优先的观点.

停靠站设置在交叉口出口道, 的确会消除进口道停靠对车辆到达交叉口停车线时刻的影响, 可提高交叉口信号优先的效率. 然而, 出口道停靠站排队对信号优先实际效率的影响几乎被忽略了. 显然, 如果车辆在交叉口得到优先后, 到达下游停靠站尚需排队才能进站, 无论从车速还是准点率的角度, 交叉口优先取得的效益都可能被排队延误部分抵消. 此外, 停靠站超长排队溢出后, 还会影响上游交叉口的正常运行. 实际上, 停靠站的排队几乎无法避免, 因为停靠站的通行能力本身就是在一定失效概率的基础上确定的^[6], 特别是在我国城市公交流量较大、线

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(50808142)

第一作者: 马万经(1980—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为交通控制与公交优先. E-mail: mawanjing@tongji.edu.cn

路较多的情况下,停靠站车辆排队的情况更普遍.

笔者研究了带有远端停靠站的交叉口信号优先控制问题,在解析停靠排队对公交车辆延误影响的基础上,提出了基于公交准点的总体优先控制逻辑、公交优先申请生成模型和以车辆准点与优先对社会车流影响最小的多目标优先策略优化模型.案例分析表明,不考虑远端停靠站排队和公交运行状态的无条件优先,可能导致更大的公交运行时刻表偏移;缺乏对远端停靠站排队的考虑,可能导致交叉口的信号优先策略失效.而本模型能较好地解决这些问题.

1 问题描述

如图1所示,当设置在交叉口远端的停靠站存在公交车辆排队时,即使后续的公交车辆在交叉口得到信号优先,但受排队的影响,其进入停靠站的真实时刻并不一定会比在交叉口未得到优先的情形早.也就是说,车辆进入停靠站的时刻,不但受到交叉口延误的影响,还受到停靠站排队的影响.因此,以车辆准点到达停靠站为目标的优先策略,必须考虑停靠站排队的可能影响.综上,本文研究的就是考虑交叉口出口道停靠站排队延误后的单点交叉口信号优先策略最优化问题.优化的目标为车辆准点到达交叉口远端的停靠站,同时考虑在公交优先情况下将社会车流的不利影响最小化,并考虑最小绿灯时间和安全等约束条件.

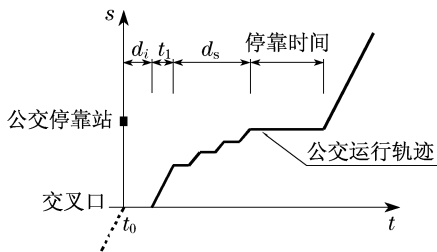


图1 远端停靠站延误对信号优先的影响

Fig.1 Impacts of far-side bus stop on bus signal priority

注:公交车从驶离交叉口停车线到达停靠站的时间为 t_1 ; d_s 和 d_i 分别为停靠站延误时间和交叉口延误时间.

2 信号优先控制方法

设交叉口公流量为 q_b ; 车辆到达交叉口时刻为 t_0 ; 停靠站的服务能力 λ 服从正态分布; 停靠站残留排队车辆数为 n ; 停靠站与交叉口出口道的距离为 L ; 公交车运行速度为 v_b ; 公交车长度为 l_b ; 信号控制周期为 T ; 公交相位有效绿灯时间为 g_b .

2.1 总体控制逻辑

根据前述分析,针对单点交叉口,以公交车辆准点为目标的优先控制策略总体逻辑流程如图2所示.根据这一逻辑流程,从以下两个方面深入研究:①公交优先申请生成模型,解决是否给予该公交车优先权的问题;②公交优先策略优化模型,解决最优的公交优先策略生成问题.

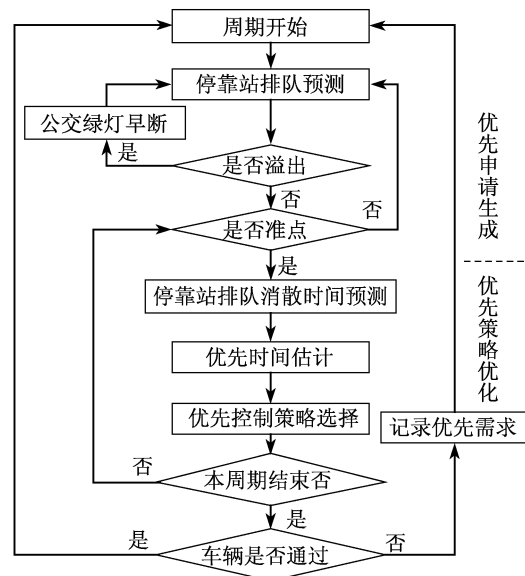


图2 总体逻辑流程

Fig.2 Bus signal priority control logic

以下模型研究仅针对一个进口道当前到达的公交车辆状况,而不考虑多进口道多车辆到达的情形.

2.2 公交优先申请生成条件

是否给与一辆公交车以优先权,由排队条件和准点条件共同决定.定义排队条件二元变量 R_q 为排队条件

$$R_q = \begin{cases} 1, & Q_b \leq Q_{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

即交叉口出口道公交车辆排队 Q_b 不大于最大排队长度 Q_{\max} , Q_{\max} 由停靠站排队车辆数 n_b 和 L 决定.准点条件

$$R_t = \begin{cases} 0, & -\Delta \leq t - t_r \leq \Delta \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δ 为公交时刻表偏移值上限; $-\Delta$ 为公交时刻表偏移值下限,准点条件即刻表偏移值是否超出许可范围; t_r 为车辆到达停靠站的真实时刻.

综上,可构建优先申请生成模型如下:

$$R_b = \begin{cases} 1, & R_q + R_t = 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

当 R_b 为 1 时,代表生成优先申请,否则不发出优先

申请. 车辆准点到站时刻 t 由公交调度系统决定; t_r 是决定此条件的关键参数, 由车辆到达交叉口时刻 t_0 、交叉口到停靠站排队车辆队尾的正常行驶时间 t_l 、交叉口延误 d_i 和停靠站延误 d_s 共同决定.

如图1所示, 在停靠站位于出口道且有公交专用道的情况下, 信号控制系统中, t_0 即公交车到达停车线的时刻, 一般可相对准确预测, 为简化问题, 假设其为已知. 由此, 准点条件的关键即转化为已知 t_0 的条件下 t_r 的预测问题.

2.3 公交到站时间 t_r 及停靠站延误计算模型

由图1可以看出

$$t_r = t_0 + t_l + d_i + d_s \quad (4)$$

忽略车辆的排队和加减速延误, 车辆在交叉口的信号控制延误近似为到达时刻剩余红灯时间, 即

$$d_i = R_i \quad (5)$$

式中, R_i 为车辆到达交叉口的剩余红灯时间.

设停靠站停靠车辆数为 n , 则公交车辆从通过停车线到到达停靠站车辆排队队尾正常行驶时间 t_l 按停靠站排队消散时间 (n/λ) 与车辆到达停靠站所需要的时间 ($d_i + L/v_b$) 的对比情况分两种情形计算. 如果 $n/\lambda < d_i + L/v_b$, 表明车辆到达停靠站前不受停靠站排队的影响, 此时 $t_l = L/v_b$; 如果 $n/\lambda \geq d_i + L/v_b$, 表明车辆到达停靠站前受到停靠站排队的影响, 在队尾等待进站, 此时间为从停车线到达排队队尾所需时间, 如图1所示. 详细计算公式如下:

$$t_l = \begin{cases} \frac{L + l_b \lambda d_i - n l_b}{v_b - l_b \lambda}, & d_i + \frac{L}{v_b} \leq \frac{n}{\lambda} \\ L/v_b, & n/\lambda < d_i + L/v_b \end{cases} \quad (6)$$

相应地, 公交车在停靠站的延误时间也分为两种情况, 可由公式(7)求得

$$d_s = \begin{cases} \frac{L - \frac{L + l_b \lambda d_i - n l_b}{v_b - l_b \lambda} v_b}{l_b \lambda}, & d_i + \frac{L}{v_b} \leq \frac{n}{\lambda} \\ 0, & n/\lambda < d_i + L/v_b \end{cases} \quad (7)$$

2.4 信号优先策略优化模型

综合前述分析, 建立考虑远端停靠站的信号优先控制优化模型如下.

(1) 目标函数 信号控制方案的调整, 不但影响公交车辆的运行效益, 也影响到社会车流的效益. 因而目标函数由衡量公交优先效益的公交时刻表偏移值的平方和社会车流延误两部分共同构成.

车辆状态的偏移值

$$D_b = (T_0 - t_r)^2 \quad (8)$$

社会车流车均延误

$$D_v = \sum_{i=1}^m q_i d_i / \sum_{i=1}^m q_i \quad (9)$$

由此建立信号优先多目标优化模型, 其目标函数为

$$\min F(C) = [D_b, D_v] \quad (10)$$

根据这一目标函数的形式, 结合优先申请的生成条件, 可以看出, 该模型既考虑了公交车流的准点运行, 也考虑社会车流的效益; 不但对晚点公交车辆——满足条件 $t_0 - t_r > \Delta$ 的车辆进行优先控制, 也对早到的公交车辆—— $t_0 - t_r < -\Delta$ 的车辆进行控制. 这样控制的结果, 不但会促使车辆准点运行, 而且有利于实现车辆车头时距的均匀.

(2) 约束条件 包括相位最大最小绿灯约束, 优先时间调整范围的约束、交叉口出口到停靠站排队约束和相位饱和度约束, 如式(11). 相位最大最小绿灯时间约束是为了确保每个相位行人和机动车通行安全; 相位饱和度约束是为了避免信号优先造成其他相位过饱和; 优先时间调整范围约束用来确保信号控制方案的调整不会造成各相位绿灯时间违反其他约束条件; 排队长度约束为停靠站的排队车辆数不超过停靠站到交叉口整个空间内的容许量.

$$\left. \begin{aligned} g_{\min, j} &\leq g_j \leq g_{\max, j} \\ \Delta g_{\min, j} &\leq \Delta g_j \leq \Delta g_{\max, j} \\ Q_b &\leq Q_{\max, b} \\ x_j &\leq x_{\max, j} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $g_{\min, j}$, $g_{\max, j}$ 和 g_j 为相位 j 的最小、最大绿灯时间及真实绿灯时间; $\Delta g_{\min, j}$ 和 $\Delta g_{\max, j}$ 为相位 j 可调整绿灯时间 Δg_j 的最小和最大取值范围; Q_b 和 $Q_{\max, b}$ 分别为远端停靠站的排队和最大允许排队长度; x_j 和 $x_{\max, j}$ 分别为相位 j 的饱和度和最大容许饱和度.

(3) 实现方法 通过红灯缩短、绿灯延长和插入公交相位三种方法实现优先控制, 实现方法的选择需要根据具体信号控制方案、公交车辆到达时刻的信号状态及流量条件等判断, 并已有相关研究^[7-8].

3 算例分析

采用具有公交专用道的单点信号控制交叉口、一个进口道公交车辆到达的情形仿真. 停靠站设在交叉口远端(图3). 停靠站距交叉口 60 m, 单一公交车长度 12 m. 忽略停车间距, 则有 Q_{\max} 为 5 辆.

交叉口为两相位信号控制, 信号周期 $C = 120$ s, 绿灯间隔时间为 8 s. 设公交专用道一条, 与其同相位的社会车道一条, 流量 $q_1 = 600$ pcu · h⁻¹ ·

lane⁻¹,相交道路机动车道一条,流量为 $q_2 = 800 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{lane}^{-1}$. 社会车道饱和和流量均取 $s_1 = s_2 = 1800 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$,按等饱和度配时公交相位绿信比 0.4,非公交相位绿信比 0.53. 此时,两个相位的机动车流饱和度均为 0.83. 设两个相位的最大绿灯时间为 75 s,最小绿灯时间为 30 s.

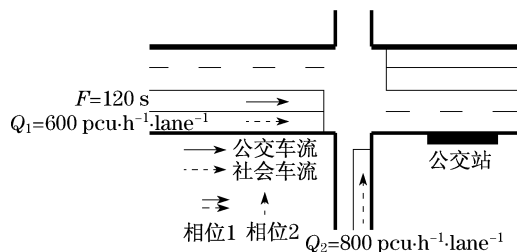


图3 分析模型示意图

Fig.3 Analysis module

注:puu表示车辆, lane表示车道.

设在既定信号控制方案下,公交车在公交相位绿灯结束 5 s 后时到达停车线. 而公交车在到达停车线之后的第 62 s 到达下游停靠站为定点,时刻表的许可偏差为 $\pm 10 \text{ s}$. 系统需要根据前述研究优化信号控制方案.

3.1 判断是否需要优先

根据式(1),(2),(3),停靠站车辆数的不同,车辆是否需要优先的判断也不同. 取停靠车辆数 1~5,判断是否优先,结果如表 1 所示. 由表可见,所有情况都会生成信号优先申请.

3.2 约束条件计算

由于车辆在绿灯结束后 5 s 到达,根据文献[8]的研究,绿灯延长为可选策略,故延长 5 s 绿灯时间. 对此,首先需要计算约束条件.

表 1 优先申请生成情况

Tab.1 Generation of bus priority requests

参数	停靠车辆数				
	1	2	3	4	5
Δ/s	16	16	28	58	88
R_b	1	1	1	1	1

延长 5 s 后,公交相位绿灯时间为 53 s,非公交相位绿灯时间为 59 s,满足相位最大最小绿灯约束. 当停靠车辆数在 1~5 时,满足公交排队约束. 下面通过优先策略不引起当前周期非优先相位过饱和为条件,计算最大绿灯延长时间 $g_{\text{ex}}(g_{\text{ex}} = \Delta g_i)$.

设社会车流的到达服从均匀分布,则绿灯延长时间 g_{ex} 对非优先车流延误影响如图 4 所示(图中, r 为红灯时间). 按饱和度约束,并取 $x_{\text{max},j}$ 为 1,则

$$g_{\text{ex}} \leq (s - q)T/s - r = 10.3 = 10 \text{ s}$$

即最大绿灯延长时间为 10 s,而该辆公交车仅需延长 5 s,故满足该约束.

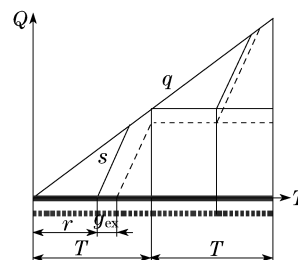


图4 绿灯延长对非优先社会车流延误影响

Fig.4 Impacts of green extension on no-priority movements

3.3 社会车流延误计算

根据图 4,绿灯延长后,非优先车流(各参数下标为 2)车均延误为

$$D_2 = s_2(r_2 - g_{\text{ex}})^2/2(s_2 - q_2)T$$

同理,优先车流(各参数下标为 1)车均延误为

$$D_1 = s_1(r_1 - g_{\text{ex}})^2/2(s_1 - q_1)T$$

3.4 模型结果分析

在确定以上参数之后,利用模型分析远端停靠站排队公交车辆数对公交车时刻表偏移、优先相位社会机动车延误、非优先相位社会机动车延误、社会车流加权总平均延误及公交车延误构成的影响,如图 5,6,7 所示.

图 5 反映了优先和不优先两种情形下,公交车时刻表偏移值 Δ 随 n_b 的变化趋势. 由此可知:

(1)当 n_b 小于 2 时,系统生成优先申请(无优先时, Δ 差超过上限值),但造成了车辆提前到达停靠站(早到),即优先造成 Δ 超出了下限,且幅度比无优先时更大. 车辆早到与晚点一样,这对同一线路后续公交车保持正常运行状态极为不利^[9]. 显然,此时提供信号优先并不能改善公交运行状态偏差.

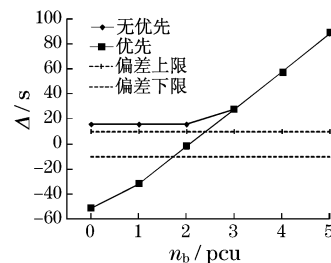


图5 停靠站排队车辆数对公交时刻表偏移值的影响

Fig.5 Impacts of bus queue on bus schedule deviation

(2)当 n_b 为 3 辆及以上时,系统同样能够生成优先申请,但在优先和非优先两种情形下, Δ 相同,即对公交车而言,优先并没有任何效益.

(3)当 n_b 为 2 辆时,相对于无优先,优先能将 Δ 从 +15.8 s 降低到 -2 s,且偏差幅度落在许可范围内.

综上,无论是否有停靠排队车辆,无条件地为公交车提供优先,可能会降低 Δ ,但也都有可能造成 Δ 绝对值的放大,交叉口远端停靠站的排队可能会使得交叉口的信号优先失效.图 6 从公交车延误构成的角度分析了信号优先失效的原因.

从图 6 可以看出,无优先情况下,公交车的延误完全取决于停靠站排队产生的延误;而在优先条件下,车辆总延误为交叉口信号延误与排队停靠延误之和.优先虽然降低了车辆在交叉口的信号延误,在相同排队车辆数 n_b 的情况下,增加了车辆的停靠延误.随着排队车辆数 n_b 的增加,排队延误的增加逐渐抵消了信号优先降低的车辆延误.这是图 5 所反映出来的信号优先失效的根本原因.

根据前面分析,当停靠车辆数 n_b 为 2,对于公交车而言能够取得正效益.以下对比分析停靠 2 辆车情况下,信号优先对于社会车流的影响.

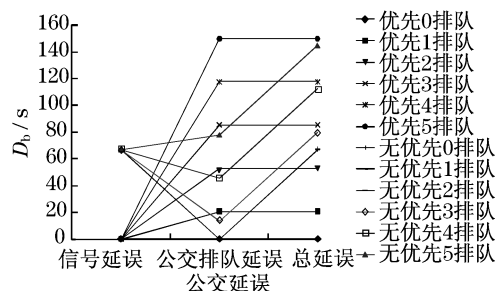


图 6 公交车延误构成分析

Fig. 6 Analysis of bus delay composition

图 7 反映了信号优先对于优先和非优先相位社会车流、公交延误及公交时刻表偏移值的影响.可以看出,信号优先导致非优先社会车流延误增加 25.8%,优先社会车流延误降低 38.5%,总车均延误降低约 6%,公交车均延误降低 20.9%,公交时刻表偏移值降低 87.3%.对此,模型(1)的解显然为延长 5 s 公交绿灯,而本模型能获得信号优先的满意解.

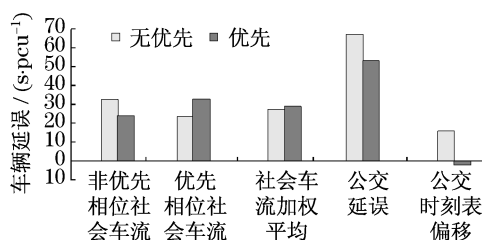


图 7 优先策略效益分析

Fig. 7 Analysis of bus signal priority efficiency

4 结语

案例分析表明,不考虑远端停靠站排队和公交运行状态的无条件优先,可能导致更大的公交运行时刻表偏移值;缺乏对远端停靠站排队的考虑,可能导致交叉口的信号优先策略失效.而本模型能够较好地解决上述问题.

信号优先对社会车流运行效益的影响,与原信号控制方案的目标以及优先车流和非优先车流的对比情况相关.原有的信号控制方案采取了等饱和配时方法,优先之后,社会车流车均延误取得了正效益.同时,以社会车流总车均延误作为优先策略的评价指标时,需要关注非优先相位的影响.故采用了非优先相位饱和度作为约束.在以后的研究中,还可以考虑引入非优先相位排队等约束条件.在实际应用中,还应根据具体数据对延误模型等进行校正.

参考文献:

- [1] Christopher Dickerson Hunter. Guidelines for the successful implementation of transit signal priority on arterials [D]. Washington D C: University of Washington, Department of Civil and Environmental Engineering, 2000.
- [2] Yagar S. Efficient transit priority at intersections [J]. Transportation Research Record, 1993(1390): 10.
- [3] Furth, Peter, SanClemente, et al. Near-side, far-side, uphill, downhill: impact of bus stop location on bus delay [J]. Transportation Research Record, 2006(1971): 66.
- [4] Kim Wonho. An improved bus signal priority system for networks with nearside bus stops [D]. Texas: Texas A & M University Department of Civil Engineering, 2004.
- [5] Ghanim Mohammad, Dion Francois, Abu-Lebdeh Ghassan. Projected transit arrival time prediction for transit signal priority with nearside bus stops [DB/CD]. Washington D C: National Research Council, Transportation Research Board, 2007.
- [6] Kittelson & Associates. Transit cooperative research program (TCRP), transit capacity and quality of service manual [R]. Washington D C: TCRP Project A-15, Transportation Research Board, 1999.
- [7] 马万经. 公交专用道信号优先控制理论研究 [D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2007.
MA Wan-jing. Bus signal priority control theories based on exclusive bus lane [D]. Shanghai: Tongji University, College of Transportation Engineering, 2007.
- [8] MA Wan-jing, YANG Xiao-guang, LIU Yue. Reuelopment and eueluation of a coordinated and conditiond bus signal pioty approach [J]. Trmsporeatim Research Record, 2010(2145): 45.
- [9] Lin Guey Shii, Liang Ping, Schonfeld Paul. Adaptive control of transit operations [R]. Washington D C: Transportation Studies Center University of Maryland, College Park, 1995.