

一种单点被动公交优先控制算法及其效益评价

别一鸣¹, 朱 慧¹, 王殿海², 马东方¹, 宋现敏¹

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130025; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 分析了周期时长与交叉口人均延误、车均延误指标的关系, 确定了周期时长的计算方法; 为进一步减少人均延误, 提出了在不发生拥堵前提下根据各相位乘客数量分配富余绿灯时间的绿信比优化方法; 最后采用算例验证的方式, 分别计算了当交叉口实施单相、多相被动公交优先前后的交叉口效益, 并与无公交优先控制方案进行对比分析。结果表明: 被动公交优先算法的控制效益与公交优先相位数存在密切关系, 当优先相位数较少时, 该算法能有效减少交叉口人均延误。

关键词: 被动公交优先; 信号控制; 效益评价; 人均延误; 孤立交叉口

中图分类号: U 491. 51

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)04-0522-07

交叉口的公交信号优先是减少公交车行程时间、提高公交车服务水平的有效方法。当前单点公交信号优先方法主要分为2类^[1-2]: 1) 主动公交优先。当检测到公交车辆即将到达交叉口时, 采取绿灯延长、红灯早断、增加或跳跃相位等方法实时调整交叉口信号控制方案, 实现对公交车辆的动态检测及响应^[3-8]。2) 被动公交优先。信号机根据社会车辆及公交车辆运行的历史运行数据(小时流量、公交线路数、车均乘客数等), 采用静态配时方法适应公交车的到达规律, 使交叉口运行的配时方案利于公交车通行^[9-10]。

在公交车流量较小时, 主动公交优先方式能较好地每个到达公交车提供优先, 但是当公交车流量较大时, 频繁的绿灯延长或者提前启亮易扰乱交叉口交通流正常运行, 此时应该采用被动公交优先方法根据公交车及社会车辆运行规律优化信号配时。信号交叉口被动公交优先的内容较为丰富, 包括相位相序设计、道路空间资源改造、信号配时参数优化、公交车发车间隔优化等。国外对被动公交信号优先研究的较早, 例如著名的 TRANSYT-7F 系统采用基于公交权重的方法进行信号配时优化; Mirchandani 等^[2]认为当公交车流量较大、社会车辆流量较小时, 被动公交优先能取得较好效果。国内对被动公交优先的研究还处于理论阶段, 一些学者提出了基于交叉口时空资源优化或人均延误最小等指标的周期、绿信比优化方法^[9-13]。

作者从信号配时的角度出发, 分析了被动公交优先下的周期和绿信比等配时参数与交叉口控制效益(如人均延误、车均延误等指标)的关系, 建立了基于人均延误的信号配时优化方法; 然后采用算例验证的方式, 针对四相位交叉口计算了实施单相、双相、三相及四相公交优先前后的交叉口控制效益, 并对算法的应用条件、应用效果进行了详细分析。

1 信号配时优化方法

1.1 优化目标的确定

传统的交叉口信号配时方法(如韦伯斯特模型)以车均延误最小为优化目标优化周期时长、以等饱和度和原则分配绿信比, 该方法将公交车辆与社会车辆同等看待。实际上, 交通运输的目的是为了实现人的移动, 而不是车的移动^[11], 公交车单车载客量远大于社会车辆载客量, 给予公交车优先可以有效减少交叉口

收稿日期: 2009-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908100); 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG17B02)。

作者简介: 别一鸣(1986—), 男, 河南驻马店人, 博士研究生。

人均延误,体现“以人为本”的控制思想.因此,作者选择交叉口人均延误最小作为信号配时优化目标,符合公交优先宗旨.

1.2 周期时长优化方法

根据韦伯斯特延误模型,交叉口第 i 相位车均延误计算公式为^[14]

$$\bar{d}_i = \frac{(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_i)} + \frac{x_i^2}{2q_i(1 - x_i)} - 0.65 \left(\frac{C}{q_i} \right)^{1/3} x_i^{(2+5\lambda_i)} \quad (1)$$

式中 y_i 为相位 i 流量比; x_i 为相位 i 饱和度; C 为交叉口周期时长(s); g_i 为第 i 相位的绿灯时长(s); q_i 为第 i 相位的关键流量(标准辆/s); λ_i 为第 i 相位的绿信比.

y_i 的计算公式为

$$y_i = q_i / S_i \quad (2)$$

式中 S_i 为第 i 相位关键车道的饱和流量(标准辆/s).

考虑到公交车辆与小汽车的当量转换 q_i 的计算方法为

$$q_i = q_{bi}n_v + q_{ci} \quad (3)$$

式中 q_{bi} 为相位 i 关键车道的公交车流量(辆/s); n_v 为公交车对社会车辆的当量转换系数,即在流量计算上 1 辆公交车等于 n_v 辆当量小汽车; q_{ci} 为相位 i 关键车道的社会车辆流量(辆/s).

由于式(1)中第3项在延误计算中所占比例很小,为了计算方便,只考虑前2项,即

$$\bar{d}_i = \frac{C(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_i)} + \frac{x_i^2}{2q_i(1 - x_i)} \quad (4)$$

交叉口车均延误计算公式为

$$\bar{D}_c = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{d}_i C q_i}{\sum_{i=1}^n C q_i} \quad (5)$$

交叉口人均延误计算公式为

$$\bar{D}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{d}_i (C q_{ci} P_{ci} + C q_{bi} P_{bi})}{\sum_{i=1}^n C q_i P_i} \quad (6)$$

式中 n 表示交叉口关键相位数; P_{bi} 表示相位 i 对应关键车道的公交车车均载客数(人/车); P_{ci} 表示相位 i 对应关键车道的社会车辆车均载客数(人/车); $P_i = \frac{C q_{bi} P_{bi} + C q_{ci} P_{ci}}{C q_i}$ 为相位 i 的车均乘客数(人/车).

为了直观反映周期时长与人均延误、车均延误的关系,作者首先采用举例的方法进行描述.设某四相位交叉口 4 个相位对应关键进口道的流量为 300、290、270、270 辆/h,对应公交车流量占各关键进口道总流量的比例分别为 0.3、0.2、0.4、0.6.公交车对社会车辆的当量转换系数(n_v)为 2.0,则各关键车道的标准流量分别为 390、348、378、432 标准辆/h.饱和流率为 2 000 标准辆/h,公交车均载客数为 25 人/车,社会车辆车均载客数为 1.2 人/车,绿灯间隔时间为 3 s.

采用韦伯斯特周期优化模型计算得到以车均延误最小为优化目标的周期,该模型为

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \quad (7)$$

式中 L 为交叉口总损失时间(s); Y 为交叉口总流量比.

根据式(5)计算得到最佳周期为 102 s,依据等饱和度原则为各关键相位分配绿灯时间,将交叉口运行周期分别从 70 s 逐渐增加到 160 s,交叉口车均延误、人均延误与周期时长关系曲线如图 1 所示.

由图 1 可以看出,在相同周期时长下,车均延误略大于人均延误;随着周期的增加,车均延误与人均延误均呈现先减小后增加的趋势,在周期等于 102 s(即韦伯斯特周期)时均达到最小.即人均延误最小和车均延误最小所对应的最佳周期相同.之所以得出上述结论是因为:1)从理论上讲,式(3)与式(4)结构基本相同,只是在自变量系数上存在差异,所以人均延误与车均延误随周期的变化趋势相同且对应共同的最

佳周期. 2) 实际运行中, 从单个周期来考虑, 单个公交车的延误大小对交叉口人均延误存在重要影响; 而从长远角度来考虑(如十几分钟或 1 h), 公交车与社会车辆随机到达, 机动车是乘客的载体, 其延误与乘客延误直接相关, 只有减小机动车的延误才能减小乘客延误, 而被动公交优先正是对较长时间段内车流运行进行优化的配时方法. 作者采用 VISSIM 软件模拟了低、中、高等多种交通状态下的运行情况, 通过对输出的评价指标进行分析, 也得到了相同的结果, 由于篇幅限制, 不一一赘述.

由上述结论可以看出: 基于车均延误的周期优化模型同样适用于基于人均延误的被动公交优先信号周期优化. 由于车均延误计算公式相对简便, 在被动公交优先下优化信号周期时, 可以以车均延误最小为优化目标求解最佳周期, 该周期同时也体现了人均延误最小.

1.3 绿信比优化方法

绿信比优化方面, 如果单纯考虑人均延误指标优化交叉口信号配时, 通常为乘客数多的相位分配较多绿灯时间, 为乘客数少的相位分配较少绿灯时间, 造成前者绿灯时间过长而浪费、后者绿灯时间过短而产生过饱和现象. 其主要原因在于公交车载乘客数与社会车辆车载乘客数的差异, 实际中交叉口各相位乘客数与机动车数并非正比关系, 乘客数多的相位机动车通过交叉口并不一定需要较多绿灯时间, 反之亦然. 过饱和相位的车均延误及人均延误指标会随着饱和度的增加迅速增大, 进而影响到交叉口整体效益. 作者提出的绿信比分配原则为: 首先保证交叉口交通流的正常运行, 即在各相位不产生拥堵的基础上尽可能多地为乘客量大的相位分配绿灯时间, 不能单纯根据乘客数分配绿灯时间.

关键相位 i 饱和度 x_i 的计算公式为

$$x_i = \frac{y_i}{\lambda_i} = \frac{y_i C}{g_i} \quad (8)$$

设交叉口各相位临界饱和度为 x_{cr} , 如果饱和度超过 x_p , 则交叉口将会发生拥堵. 如果 $x_i \leq x_p$, 则 $\frac{y_i \times C}{g_i} \leq x_p$, 即

$$g_i \geq \frac{y_i \times C}{x_p} \quad (9)$$

因此, 为了关键相位 i 饱和度不超过 x_p , 该相位最小分配绿灯时间为

$$g_{ia} = \max \left(g_{imin}, \frac{y_i \times C}{x_p} \right) \quad (10)$$

式中 g_{imin} 为第 i 关键相位最小绿灯时间(s);

以此类推, 交叉口各关键相位最小分配绿灯时间之和为 g_a

$$g_a = \sum_{i=1}^n g_{ia} \quad (11)$$

那么交叉口总富余绿灯时间为

$$g_{mar} = (C - L) - g_a \quad (12)$$

$g_{mar} \leq 0$ 代表交叉口当前配时不能满足交通需求, 不存在富余绿灯时间.

在确保交叉口各关键相位饱和度不超过 x_{cr} 后, 问题的关键变为如何分配交叉口总富余绿灯时间 g_{mar} . 作者依据各优先相位的公交车流量比例, 将富余绿灯时间全部分配给优先相位, 即第 i 相位所分配的富余

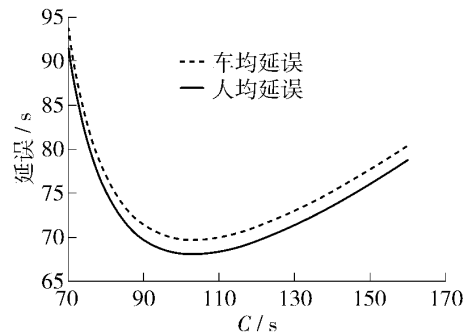


图1 周期时长与人均延误、车均延误关系曲线

Fig. 1 Relation curve of cycle length to average vehicle delay and average people delay

绿灯时间

$$g_{imar} = g_{mar} \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i}$$

(13)

式中 ρ_i 为第 i 相位关键车道公交车流量与该车道总流量之比,若第 i 相位为非优先相位,则使 $\rho_i = 0$,即该相位不参与富余绿灯时间的分配. 因此,相位 i 绿灯时间 g_i 为

$$g_i = g_{ia} + g_{imar}$$

(14)

综上,本文信号配时的优化方法为:在确定的绿信比分配原则下,采用迭代的方法求解满足优化目标函数(交叉口人均延误最小) 的周期时长. 该周期时长与对应的各相位绿信比即为所求的最佳信号配时参数. 即:

优化目标

$$\min \quad \overline{D_p}$$

(15)

约束条件为

$$g_i \geq g_{imin}$$

$$C_{min} \leq C \leq C_{max}$$

$$\sum_{i=1}^n g_i + L = C$$

式中 C_{min} 与 C_{max} 分别为交叉口运行的最小周期与最大周期(s) .

2 算例验证

以四关键相位交叉口为例,分别计算了该交叉口实施单相、双相、三相及四相公交优先情况下的最佳信号配时参数及各评价指标,并与无公交优先时的韦伯斯特信号配时及其效益指标进行对比分析. 交叉口流量如表 1 所示. 各相位的临界饱和度 x_{cr} 设为 0. 92,最小周期 C_{min} 为 60 s,最大周期 C_{max} 为 160 s,各相位最小绿灯时间为 10 s,绿灯损失时间为 3 s,则交叉口总损失时间为 12 s. 饱和流率 2 000 标准辆/时,车辆转换系数 n_v 为 2. 其他参数同 1. 2 节中算例的参数取值,交叉口运行图如图 2 所示.

表 2 中 $\overline{D_b}$ 指优先相位的公交车均延误. 单相公交优先指仅为相位 2 到达的公交车提供信号优先,双相公交优先考虑相位 2 与相位 4 两个直行相位,三相公交优先考虑相位 2 至相位 4 共 3 个相位,四相公交优先则为所有 4 个关键相位的公交车流提供优先. 为了体现优先相位与非优先相位的区别,在计算交叉口人均延误时,将非优先相位的公交车当作普通车辆看待,即公交车车载乘客数等于其当量小汽车的车载乘客数. 表中公交车均延误为优先相位每周期到达的公交车延误均值,等于优先相位的车均延误.

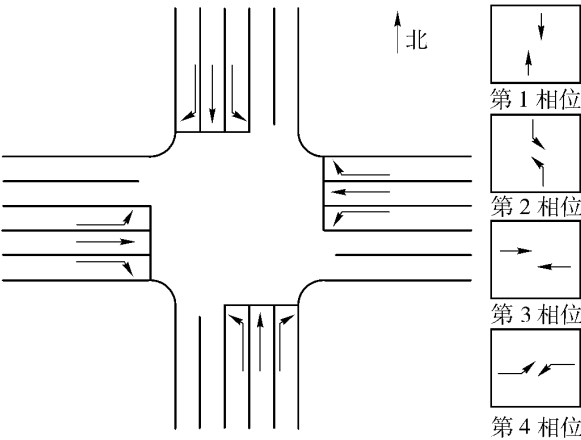


图 2 示例交叉口渠化及相位相序图
Fig. 2 Sketch of signal timing movements of the typical intersection

表 1 交叉口各关键相位的流量数据

Table 1 Volume data of critical phases of the intersection

相位	属性	$q/(\text{辆} \cdot \text{h}^{-1})$	ρ_i	$Q/(\text{标准辆} \cdot \text{h}^{-1})$
相位 1	左转	246	0.2	295
相位 2	直行	270	0.6	432
相位 3	左转	223	0.3	290
相位 4	直行	296	0.4	415

注:表中 q 代表关键相位对应关键车道的小时流量; Q 为将公交转化为标准小汽车后的关键车道标准流量。

表 2 2 种优化方法下的信号配时参数及效益指标对比

Table 2 Comparison of timing parameters and benefits indices under two optimization methods

优化方法	C/s	g_1/s	g_2/s	g_3/s	g_4/s	g_{f}/s	$\overline{D}_{\text{p}}/\text{s}$	$\overline{D}_{\text{c}}/\text{s}$	$\overline{D}_{\text{b}}/\text{s}$
无公交优先	81	14	1	13	14	—	51	52	52
单相公交优先	74	12	22	11	17	4	44	69	32
双相公交优先	79	13	22	12	20	5	45	64	41
三相公交优先	80	13	21	14	20	6	49	58	48
四相公交优先	82	14	22	14	20	6	51	53	53

通过表 2 中的各项指标可以得出以下结论:

1) 与无公交信号优先相比,考虑公交优先相位数越少,被动公交优先下的最佳周期越小、控制效益越佳;反之则 2 种信号优化方法的各项指标越相近。

被动公交优先条件下,当公交优先相位数较少时,交叉口应该执行较小周期时长。此时公交车红灯等待时间较短,便于通行权的迅速转换,使公交车快速通过,减少延误。例如,在单相公交优先情况下,最佳周期为 74 s,小于非公交优先下的韦伯斯特周期 81 s,同时公交车均延误由 52 s 减少至 32 s,人均延误由 51 s 减少至 44 s,说明被动公交优先配时算法具有较好的控制效益。

被动公交优先的绿信比分配原则实质上在尽可能的范围内为公交优先相位分配更多富余绿灯时间,减少公交车延误。在保证各相位不超过临界饱和度情况下,富余绿灯时间一般只有几秒或十几秒。当公交优先相位较多时,按照各相位公交流量比例分配富余绿灯时间后,各优先相位分配得到的富余绿灯时间差异非常小,导致最终绿灯时间与等饱和度原则下的分配时间较为接近,因此,对应最佳周期与韦氏周期也基本相同。由表 2 可以看出,当交叉口实施单相、双相公交优先时,公交车延误有明显降低;当实施三相、四相公交优先时,交叉口配时参数与韦伯斯特配时参数基本相同,各评价指标亦无明显差别。

2) 被动公交信号优先应只给予少数公交车流流量较大的相位优先。

由结论 1) 可知,多相被动公交优先几乎对交叉口控制效益没有改进,因此在实际应用中建议根据交叉口具体情况只给予 1 个或 2 个相位的车流优先。

被动公交信号优先通过将非优先相位的富余绿灯时间分配给优先相位,来降低优先相位的车辆延误及乘客延误。但是当非优先相位绿灯时间减少后,其车辆延误及乘客延误必将增加,如果非优先相位所增加的延误大于优先相位减少的延误,则此时被动公交优先将不适用。只有当优先相位的公交车流量明显大于非优先相位公交车流量时,优先相位减少的乘客延误才会大于非优先相位增加的乘客延误,此时被动优先才有意义。因此,被动公交信号优先只有在公交车流量较大时才适用。

在本算例中,将单相公交信号优先时优先相位(相位 2)的公交车流量比例设为 0.6,此时单相被动优先能显著降低交叉口人均延误,但是如果该相位公交车流量比例较小(如 0.1 或 0.2)时,则控制效益与不优先时相比无明显变化。

3) 提高优先相位的绿信比和缩短交叉口周期时长是有效的被动公交信号优先方法。

提高绿信比可以增大公交车在交叉口遇见绿灯的概率,减少停车延误。在满足各相位极限绿灯时间情况下,当优先相位数较少时,缩短周期可以减少公交车的红灯等待时间,虽然当周期较小时交叉口的富余绿灯时间也较少,但此时较少的富余绿灯时间即可带来优先相位绿信比较大幅度的提高和车辆延误较大幅度的下降。

3 结束语

信号交叉口的被动公交信号优先是减小公交车延误、提高公交车服务水平的重要手段。作者研究了周期时长与人均延误、车均延误的关系,并提出了一种旨在减小交叉口人均延误的绿信比分配化方法。最后结合算例分析研究了四关键相位交叉口分别实施单相、双相、三相及四相公交优先情况下的控制效益,并与常见的韦伯斯特信号配时方法进行了对比。数据分析结果表明:当实施单相和双相公交信号优先时本文所述方法对应的控制效果较为明显;而实施三相和四相公交优先时,交叉口的控制效益无明显改进。本文的研究成果可以为被动公交信号优先算法的实际应用提供指导。

参考文献:

- [1] SKABARDONIS A. Critical factors affecting transit signal priority [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1727: 20-26.
- [2] MIRCHANDANI P, HEAD L, KNYAZYAN A, et al. An approach towards the integration of bus priority and traffic adaptive signal control [C]//International Conference on Computer-aided Scheduling of Public Transport. Berlin: Springer, 2001: 319-334.
- [3] 刘红红,王鑫钥,杨兆升. 城市公共交通优先的信号控制策略[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 121-124.
LIU Hong-hong, WANG Xin-yue, YANG Zhao-sheng. Control strategies of urban transit signal priority [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5): 121-124. (in Chinese)
- [4] 张宇. 基于延误的单个交叉口公交优先信号控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2008.
ZHANG Yu. Research on methods of delay-based transit signal priority control at the isolated intersection [D]. Changchun: Traffic College of Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [5] MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Passive transit signal priority approach for bus rapid transit system [C]//Proceedings of Intelligent Transportation Systems Conference. Seattle: IEEE, 2007: 413-418.
- [6] 张卫华,陆化普. 公交优先的预信号控制交叉口车辆延误分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 78-82.
ZHANG Wei-hua, LU Hua-pu. Analysis of vehicle delay of intersections with pre-signals based on bus priority [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 78-82. (in Chinese)
- [7] 徐洪峰,李克平,郑明明. 基于逻辑规则的单点公交优先控制策略[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 96-102.
XU Hong-feng, LI Ke-ping, ZHENG Ming-ming. Isolated transit signal priority control strategy based on logic rule [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 96-102. (in Chinese)
- [8] 别一鸣,宋现敏,朱慧,等. 无公交专用道下的单点公交优先控制[J]. 交通信息与安全, 2009(增刊): 36-40.
BEI Yi-ming, SONG Xian-min, ZHU Hui, et al. Bus priority signal control for signalized intersection without bus lane [J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2009(S1): 36-40. (in Chinese)
- [9] 季彦婕,邓卫,王伟,等. 基于公交优先通行的交叉口相位设计方法研究[J]. 公路交通科技, 2004, 2(12): 118-112.
JI Yan-jie, DENG Wei, WANG Wei, et al. Study on the design of signal phase based on bus priority intersections [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 2(12): 118-112. (in Chinese)
- [10] 陈群,晏克非. 考虑公交优先的城市交叉口遗传算法信号配时研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 11(11): 133-138.
CHEN Qun, YAN Ke-fei. Research on signal timing for urban intersections with genetic algorithms optimizing with the idea of bus priority [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 11(11): 133-138. (in Chinese)
- [11] 张卫华,陆化普,石琴,等. 公交优先的信号交叉口配时优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 49-53.
ZHANG Wei-hua, LU Hua-pu, SHI Qin, et al. Optimal signal-planning method of intersections based on bus priority [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 49-53. (in Chinese)

- [12] 马万经, 杨晓光, 云美萍. 考虑公交车发车频率的信号优先控制方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1470-1475.
MA Wan-jing, YANG Xiao-guang, YUN Mei-ping. Transit signal priority strategies based on the consideration of bus frequency[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1470-1475. (in Chinese)
- [13] 马万经, 杨晓光. 基于时空优化的单点交叉口被动优先控制方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 86-90.
MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Transit passive control method based on isolated intersection of optimization of time-space[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 86-90. (in Chinese)
- [14] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 59-60.

Development and Evaluation of a Passive Bus Signal Priority Algorithm at Isolated Intersection

BIE Yi-ming¹, ZHU Hui¹, WANG Dian-hai², MA Dong-fang¹, SONG Xian-min¹

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Passive bus signal priority (BSP) at isolated intersections is one important measure to reduce bus delay and improve bus service. Firstly, the relationship between cycle length and evaluation indices such as average vehicle delay and average passenger delay are studied, and the optimal cycle length calculating method is determined. Then a green split optimization method, which allocates marginal green time to signal phases according to the number of passengers, is brought forward to reduce average passenger delay. At last, one intersection with four critical phases is taken as example to evaluate the performance of the algorithm. Evaluation index of one phase BSP and multiple phases BSP algorithms are attained respectively and control benefits are compared with timing schemes without BSP. Results show that the number of priority phases has a strong influence on the performance. Average passenger delay can be reduced significantly when one or two phases are given priority.

Key words: passive bus priority; signal control; benefits evaluation; average passenger delay; isolated intersection

(责任编辑 郑筱梅)