

基于乘客延误的公交优先信号交叉口优化模型

郭瑞军 张岩

(大连交通大学 交通运输工程学院 辽宁 大连 116028)*

摘要: 以公交优先为导向,针对城市单点信号控制交叉口,建立了一种新的模型:以交叉口乘客延误最小为优化目标求解周期时长,根据各相位乘客流量比和饱和度确定各相位绿信比,将两者结合建立了基于公交优先的单点交叉口定时信号配时优化模型。在此基础上,利用交叉口非优先相位的过剩绿灯时间,确定绿灯延长和红灯早断策略的控制参数,可以设计单交叉口感应信号控制方法。以实际交叉口为例,利用 VISSIM 仿真软件对基于公交优先的单交叉口信号控制优化方法进行建模,并得出了不同方案下的交叉口车均延误、乘客延误和平均停车次数。结果表明:优化方法能一定程度降低交叉口的车均延误和乘客延误,能降低公交车辆和社会车辆的停车次数。

关键词: 城市交通; 公交优先; 定时信号控制; 感应信号控制; 仿真

文献标志码: A **DOI:** 10.13291/j.cnki.djdxac.2019.05.001

合理的公交优先定时信号控制在考虑交叉口整体效益的同时可以降低公交车辆的延误,国内外学者对公交优先信号控制方法进行了大量研究。Michae^[1]针对快速公交系统(BRT),考虑了与小汽车混行场景下的公交专用车道、公交线路和公交优先,提出一种新的线性框架以保证道路使用者的公平性,结果表明了公交优先可显著地减少系统总的乘客旅行时间。Liu Q 等^[2]针对单个交叉口,在交叉口通行能力不受影响的前提下,以单周期车辆延误最小为目标构建相应的公交优先信号配时模型。李曙光等人^[3]针对单点十字路口绿色交通的控制问题,给出一种考虑路段上公交车和小汽车物理排队的自适应公交优先信号优化设置方法。Lin 和 Yang 等人^[4]将主动控制方法分为基于规则的方法和基于模型的方法,研究发现信号优先控制能改善公交运行的有效性和可靠性、减少公交行程时间。Lee 和 Shalaby^[5]利用实时行程时间预测来实现基于规则的信号优先控制,提出了两个新的策略:绿灯早断和排队清空,通过与典型的主动信号优先控制及无信控优先控制进行仿真对比,新方法能显著减少公交延误并改善服务特性。针对公交专用道,He 和 Guler^[6]提

出设置预信号的设施、使用方法和相关参数,仿真对比表明,执行自适应控制算法的预信号会导致交叉口水均延误的减少。何必胜等^[7]从空间和时间两个方面对预信号设置进行了研究,提出具有"要"、"抢"、"跳"功能的公交优先预信号感应控制的方法,仿真结果表明公交优先预信号感应控制较无公交优先固定控制和公交优先预信号固定控制方式能大大降低主干道直行公交车和社会车辆延误。葛晓燕^[8]以降低燃油消耗和车辆尾气排放为目标,对基于公交优先预信号设置进行了配时优化。Liu H 等^[9]通过使用图解分析和仿真分析的方式对实施绿灯延长和红灯早断控制策略进行对比评价。杨远舟等^[10]采用元胞自动机模型对公交优先信号控制策略进行了模拟实验,结果表明使用绿灯延时和红灯早断控制策略可提升公交车辆的通行效益。

综上,对于主动和被动优先的公交优先,以车均延误为目标可做出信号配时,而以人均延误则应用较少,由于公交车和私家车乘客人数的显著不同,以人均延误更能突出公交优先的目标。本文将定时控制与感应控制方法结合,提出基于乘客延误最小的单交叉口公交优先的信号控制优化方

* 收稿日期: 2018-10-10

作者简介: 郭瑞军(1977-)男,副教授,博士,主要从事道路交通系统工程的研究

E-mail: rjguo@163.com.

法,首先为单交叉口公交优先定时信号控制优化,考虑公交车辆载客量大等特点分别以乘客延误、相位乘客流量比及饱和度为优化目标对周期时长和绿信比进行优化设计;然后以定时方法为基础,利用交叉口非优先方向各相位的过剩绿灯时间,确定绿灯延长和红灯早断策略的控制逻辑和控制参数。

1 交叉口信控优化

1.1 交叉口车均延误模型

美国道路通行能力手册(2010)中提出了计算交叉口交通延误的公式^[11],其表达式为:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \quad (1)$$

式中, d 表示交叉口某进口方向的车均延误,s/veh; d_1 表示均匀延误,s/veh; d_2 表随机附加延误,s/veh; d_3 表示初始车队排队延误,在通常情况下取 $d_3 = 0$,s/veh.其中,

$$d_1 = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\min[x, 1/\lambda])} \quad (2)$$

$$d_2 = 900T \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8KIX}{C_{ap}T}} \right] \quad (3)$$

式中, C 表示周期时长,s; λ 表示相位绿信比; x 表示各进口车道组饱和度; T 表示分析时段持续时间,一般取15 min,即 $T = 0.25$ h; K 表示控制设置的修正系数,其缺省值为0.5; I 表示上游车辆过滤修正系数,其缺省值为1; C_{ap} 表示各进口方向的通行能力,pcu/h.

1.2 交叉口乘客延误模型

交叉口乘客延误模型以车均延误模型为基础,考虑车辆到达率及车均载客量,可以分为有无私公交专用道两种情况:

1.2.1 无私公交专用进口道交叉口乘客延误计算模型

利用HCM2010延误计算公式,当交叉口未设有公交专用进口道时,公交车辆和社会车辆相互混合行驶,在同一进口车道组运行的车辆具有相同的延误,所以交叉口乘客总延误为交叉口各个进口车道组的车均延误与对应的车辆到达率以及车均载客量的乘积之和,交叉口乘客延误可由单位时间内交叉口产生的乘客总延误与单位时间内通过交叉口的乘客总量的比值表示:

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} d_{ij} q_{ij} p_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij} p_{ij}} \quad (4)$$

式中, D_p 表示交叉口乘客延误,s; n 表示交叉口相位数; m^i 表示交叉口第 i 相位的进口方向数量; d_{ij} 表示交叉口第 i 相位 j 进口方向的车均延误,s; q_{ij} 表示交叉口第 i 相位 j 进口方向的车辆到达率,pcu/h; p_{ij} 表示交叉口第 i 相位 j 进口方向的平均载客量。

1.2.2 设置公交专用进口道后交叉口乘客延误计算模型

如果交叉口设有公交专用进口道,则在公交专用进口道通行方向公交车辆与社会车辆分道行驶,公交专用进口道与社会车道有着不同的车辆到达率以及饱和流率,那么在公交专用进口道和社会车道产生的车辆延误就会不同.所以设有公交专用进口道的交叉口乘客延误计算模型为:

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} d_{ij}^b q_{ij}^b p_{ij}^b + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} d_{ij}^c q_{ij}^c p_{ij}^c}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^b p_{ij}^b + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^c p_{ij}^c} \quad (5)$$

式中, d_{ij}^b 为交叉口第 i 相位 j 进口方向公交专用进口道的车均延误,s; d_{ij}^c 为交叉口第 i 相位 j 进口方向社会车道的车均延误,s; q_{ij}^b 为交叉口第 i 相位 j 进口方向公交专用进口道的车辆到达率,bus/h; q_{ij}^c 为交叉口第 i 相位 j 进口方向社会车道的车辆到达率,pcu/h; p_{ij}^b 为交叉口第 i 相位 j 进口方向公交专用进口道上车辆的平均载客量,per/bus; p_{ij}^c 为交叉口第 i 相位 j 进口方向社会车道上车辆的平均载客量,per/pcu.

1.3 基于乘客延误最小的周期时长确定

为研究乘客延误与周期时长的关系,依据等饱和度原则将各相位的绿信比转化为含有周期时长 C 的表达式.同时表示出各进口道组饱和度、各进口方向通行能力.其中等饱和度原则是指依据相位绿信比与相位各进口车道组流率比的最大值成正比的原则对绿信比进行分配,具体表达式如下:

$$\lambda_i = \frac{y_{i\max}(C-L)}{YC} \quad (6)$$

式中, λ_i 表示第 i 相位的绿信比.

则在各相位饱和度 <1 的条件下,交叉口第 i 相位 j 进口方向的车均延误 d_{ij} 可以写为:

$$d_{ij} = \frac{C \left[1 - \frac{(C-L)y_{imax}}{CY} \right]^2}{2 * (1 - y_j^i)} + 900T \left\{ \left[\frac{CYy_j^i}{(C-L)y_{imax}} - 1 \right] + \sqrt{\left[\frac{CYy_j^i}{(C-L)y_{imax}} - 1 \right]^2 + \frac{8KIy_j^i Y^2 C^2}{s_{ij} T y_{imax}^2 (C-L)^2}} \right\} \quad (7)$$

式中, L 为周期总损失时间; y_{imax} 为交叉口第 i 相位所有进口方向流率比的最大值, 即第 i 相位的关键流率比; Y 为交叉口各相位关键流率比之和; y_j^i 表示交叉口第 i 相位 j 进口方向的流率比; s_{ij} 为交叉口第 i 相位 j 进口方向的饱和流率。

由式(4)、(6)可知, 在交叉口各相位各进口方向的车辆到达率、饱和流率以及平均载客量一定的条件下, 影响交叉口乘客延误的变量为周期时长 C 。在绿信比分配方法确定的情况下, 一定存在一个最优的周期时长使得交叉口乘客延误最小, 周期时长过长或过短都会产生较大的乘客延误。以交叉口乘客延误最小为目标建立周期时长优化模型:

$$\min D_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} d_{ij}^b q_{ij}^b p_{ij}^b + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} d_{ij}^c q_{ij}^c p_{ij}^c}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^b p_{ij}^b + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^c p_{ij}^c} \quad (8)$$

$$\text{s. t. : } \begin{cases} C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ \sum_{i=1}^n g_{ei} + L = C \\ g_{ei} \geq g_{imin} \end{cases} \quad (9)$$

式中, C_{\min} 表示交叉口最小周期时长; C_{\max} 表示交叉口最大周期时长; g_{ei} 表示交叉口第 i 相位的有效绿灯时间; g_{imin} 表示第 i 相位最小绿灯时间。

交叉口最大和最小周期时长由以下过程确定^[11]: 根据交叉口各进口方向所容许的最大排队长度求解各进口方向所容许的最大红灯时间, 从而得出交叉口最大周期时长 C_{\max} 。交叉口最短周期时长 C_{\min} 可由各相位的最小绿灯时间之和确定。

1.4 绿信比优化

根据交叉口各相位的乘客流量比对各相位绿信比进行分配, 即相位绿信比正比于乘客流量比。以交叉口各进口方向饱和度不大于某一定值 x_p (可取 0.9) 和相位绿灯时间满足最小绿灯时间作为约束条件^[11], 建立绿信比优化模型。

设交叉口第 i 相位 j 进口方向的饱和度为 x_j^i , 则:

$$x_j^i = \frac{y_j^i}{\lambda_i} \leq x_p \quad (10)$$

由式(10)可得:

$$\lambda_i \geq \max \left[\frac{y_1^i}{x_p}, \dots, \frac{y_j^i}{x_p}, \dots, \frac{y_{m_i}^i}{x_p} \right],$$

$$\text{令 } \max \left[\frac{y_1^i}{x_p}, \dots, \frac{y_j^i}{x_p}, \dots, \frac{y_{m_i}^i}{x_p} \right] = \lambda_{imin}^1 \frac{g_{imin}}{C} = \lambda_{imin}^2,$$

则相位 i 绿信比的最小值为:

$$\lambda_{imin} = \max[\lambda_{imin}^1, \lambda_{imin}^2] \quad (11)$$

设交叉口过剩绿灯时间 ΔG 表示除各相位最小绿信比所对应的绿灯时间以外的绿灯时间, 则根据式(11)可以对交叉口在满足各相位最小绿信比约束的条件下是否有过剩绿灯时间进行判断:

$$\Delta G = C - L - C \sum_{i=1}^n \lambda_{imin} \quad (12)$$

当 $\Delta G \leq 0$ 时, 无过剩绿灯时间; 当 $\Delta G > 0$ 时, 表示交叉口各相位绿信比之和大于各相位最小绿信比之和, 交叉口通行能力能够满足现状交通需求, 有过剩绿灯时间。

当存在过剩绿灯时间时, 根据各相位乘客流量在总乘客流量中所占的比例对其进行分配, 即:

$$\Delta g_i = \Delta G \frac{p_i}{p_t} = \frac{\sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^b p_{ij}^b + \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^c p_{ij}^c}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^b p_{ij}^b + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m^i} q_{ij}^c p_{ij}^c} \quad (13)$$

式中, Δg_i 为分配给第 i 相位的过剩绿灯时间; p_i 为第 i 相位的乘客流量; p_t 为交叉口总乘客流量。

此时交叉口各相位的绿信比为:

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{imin} C + \Delta g_i}{C} \quad (14)$$

2 单交叉口信号配时

2.1 定时信号配时

(1) 模型建立

将之前建立的基于交叉口乘客延误的周期时长优化模型以及基于乘客流量比和饱和度的绿信比优化模型结合, 可得到基于公交优先的单交叉口定时信号配时优化模型, 其目标函数为式(8), 约束函数在式(9)的基础上增加式(14), 即:

$$\text{s. t. :} \begin{cases} C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ \sum_{i=1}^n g_{ei} + L = C \\ x_j^i \leq x_p, \text{ 其中 } x_p \text{ 可取 } 0.9. \\ \lambda_i = \frac{\lambda_{i\min} C + \Delta g_i}{C} \end{cases} \quad (15)$$

(2) 模型求解

交叉口各进口方向的车辆到达率及饱和流率不受信号配时的影响, 则 x_j^i 可表达如下:

$$x_j^i = \frac{q_{ij}}{s_{ij} \lambda_i} \quad (16)$$

式中, s_{ij}^b 与 s_{ij}^c 表示交叉口第 i 相位 j 进口方向公交专用进口道和社会车道的饱和流率。

由于模型的计算是一个非线性规划问题, 直接计算工作量过大, 可使用 matlab 进行编程求解。利用 optimization 工具箱中的 fmincon 函数求解。

$$X = \text{fmincon}(\text{fun}, X_0, A, b, Aeq, beq, LB, UB) \quad (17)$$

式中, X 表示最优解向量; fun 表示目标函数; A, b 表示不等式约束; Aeq, beq 表示等式约束; LB, UB 表示求解参数的上界和下界。

2.2 单交叉口感应信号控制优化

为进一步提高公交车在交叉口处的通行效益, 充分利用定时信号控制方案中非优先方向各相位的过剩绿灯时间, 依据布设在交叉口公交专用道上的车辆检测器检测到的公交车实时到达信息, 在保证各相位绿灯时间满足其车流正常通行的前提下, 通过实施绿灯延长和红灯早断控制策略为部分公交车提供优先通行, 其控制策略及参数计算过程可参考文献[12]。

为便于研究, 可做以下假设:

(1) 交叉口第一相位设有公交专用进口道, 为公交优先相位, 其它相位为非公交优先相位。

(2) 交叉口每周期只执行一种控制策略(绿灯延长或红灯早断)。

3 单交叉口仿真方案设计及结果评价

3.1 数据收集

选取大连市甘井子区山东路-千河路交叉口作为仿真实例进行建模分析并验证。

(1) 交叉口基本概况

如图1所示, 山东路为南北向通行主干道, 交通流量较大且在道路两侧设有公交专用车道, 千河路交通流量相对较少, 选取山东路南北直行相

位作为公交优先相位, 其余相位为非优先相位。



图1 交叉口位置示意图

(2) 渠化设计及流量统计

选取调查时段为晚高峰(17:00~18:00), 该交叉口的渠化设计以及各进口方向的车辆到达率如表1所示。

表1 交叉口各进口方向车辆到达率

进口方向	进口道设置	社会车			公交车		
		pcu/h			pcu/h		
		直行	左转	右转	直行	左转	右转
西进口		584	186	143	0	0	18
东进口		541	195	156	0	24	0
南进口		730	242	153	96	16	26
北进口		755	231	168	92	0	0

(3) 基础配时方案

根据实际调查, 交叉口现为四相位信号控制, 周期为140s, 其相位相序以及信号配时参数, 如表2所示。

表2 现状交叉口配时方案

相位	交叉口	绿灯时间/s
第一相位		41
第二相位		30
第三相位		31
第四相位		26

3.2 仿真方案设计

以交叉口现状信号配时方案作为对照方案, 以单交叉口定时信号配时方案作为优化方案一;

并在方案一的基础上,利用 Vissim 软件的 VisVAP 进行逻辑控制并仿真,交叉口感应控制为优化方案二。

为了方便计算分析,需给定以下条件及参数值:

(1) 不考虑行人和非机动车对交叉口正常运行产生的影响;

(2) 交叉口单车道饱和流率为 1 500 pcu/h;

(3) 交叉口的相位相序设计以及相位间隔时间保持不变;

(4) 调查期间社会车辆平均载客量为 1.5 人/辆,公交车辆平均载客量为 35 人/辆。

优化方案一的定时信号配时参数和优化方案二的感应信号控制参数,如表 3 所示。

表 3 优化方案信号配时参数和控制参数

相位	定时信号控制 配时方案/s	各相位过剩 绿灯时间/s
第一相位	40	10
第二相位	23	3
第三相位	24	3
第四相位	21	3
周期时长	120	-

3.3 仿真方案结果评价分析

选取延误和停车次数指标对交叉口运行状况进行评价,得到各设计方案评价指标结果如下:

3.3.1 交叉口平均延误

通过行程时间检测器统计出各进口方向的车均延误,得到社会车辆平均延误、公交车辆平均延误及乘客延误统计如图 2 所示。

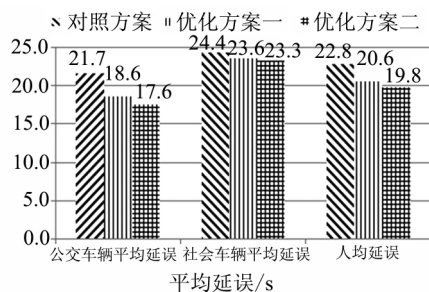


图 2 各方案平均延误对比

(1) 与对照方案相比,优化方案一和方案二的公交车辆平均延误分别减少了 14.3% 和 18.9%;社会车辆平均延误分别减少了 3.3% 和 4.5%;乘客延误分别减少了 9.6% 和 13.2%,说明优化方案的实施能够降低交叉口的整体延误;

(2) 方案二的公交车辆平均延误、社会车辆平均延误以及乘客延误均略小于方案一,说明感应信号控制能够进一步降低公交车辆在交叉口处的延误,同时社会车辆的延误没有明显变化。

3.3.2 交叉口平均停车次数

通过对交叉口车辆平均停车次数的统计,各方案公交车辆和社会车辆的平均停车次数统计如图 3 所示。

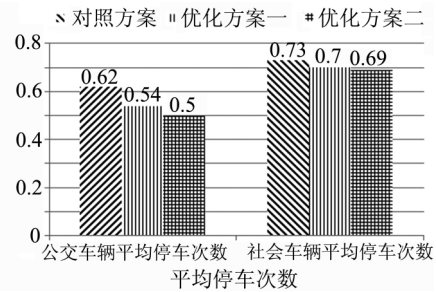


图 3 各方案平均停车次数对比

(1) 与对照方案相比,优化方案一和方案二的公交车辆平均停车次数分别下降了 12.9% 和 19.4%;社会车辆平均停车次数分别下降了 4.1% 和 5.5%,说明优化方案的实施能够提升交叉口的整体通行效率;

(2) 方案二的公交车辆以及社会车辆平均停车次数均小于方案一,说明感应控制的实施能够进一步提升公交车辆在交叉口处的通行效率,社会车辆的正常通行未受影响。

4 结论

应用公交优先理念,通过确定单个交叉口乘客延误、相位乘客流量比及饱和度周期时长和绿信比,建立公交优先的单个交叉口定时信号配时优化模型;并利用交叉口非优先相位的过剩绿灯时间,提出了公交优先的单交叉口感应信号控制方法。结果表明,优化方法能一定程度降低交叉口的车均延误和乘客延误,降低公交车辆和社会车辆的停车次数。在单交叉口定时信号配时优化模型的基础上,公交优先感应信号控制的实施能进一步提升公交车辆在交叉口处的通行效率,同时社会车辆的正常通行未受影响。

实践中,行人和非机动车的存在对交叉口车辆的正常通行会造成一定的干扰,今后需对交叉口的各种交通流进行综合考虑,并针对多相位的公交优先信号控制方法进行深入探讨。

参考文献:

- [1] ISLAM T, HAI L V, HOANG N H, et al. A linear bus rapid transit with transit signal priority formulation [J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2018, 114: 163-184.
- [2] LIU Q, XU J M. Traffic Signal Timing Optimization for Isolated Intersections Based on Differential Evolution Bacteria Foraging Algorithm [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012(43): 210-215.
- [3] 李曙光, 魏靖雅, 折胜军. 考虑物理排队的自适应公交优先信号设置 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 93-99.
- [4] LIN X, YANG N, ZOU M, et al. Transit signal priority control at signalized intersections: a comprehensive review [J]. Transportation Letters, 2015, 7(3): 168-180.
- [5] JINWOO LEE, AMER SHALABY. Rule-based transit signal priority control method using a real-time transit travel time prediction model [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(1): 68-75.
- [6] HE H, GULER S L, MENENDEZ M. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 64: 28-44.
- [7] 何必胜, 宋瑞, 何世伟, 等. 交叉口公交优先预信号感应控制策略仿真实现 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(9): 1909-1914.
- [8] 葛晓燕. 基于公交优先预信号设置的信号优化研究 [J]. 新疆财经大学学报, 2015(4): 15-23.
- [9] LIU H C, ZHANG J, CHENG X D. Analytical Approach to Evaluating Transit Signal Priority [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(2): 48-57.
- [10] 杨远舟, 毛保华, 张建鹏, 等. 基于元胞自动机模型的快速公交信号优先仿真研究 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 90-95.
- [11] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual (special report 209) [M]. US: Washington D. C., 2010.
- [12] 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, 27(s1): 36-40.

Isolated Transit Signal Priority Control Model based on Passenger Delay

GUO Ruijun, ZHANG Yan

(School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: For isolated intersections, a new transit signal priority control model was proposed based on passenger delay. The cycle length can be solved when the minimum delay per person is regarded as optimization goal. The green signal ratio of each phase can be determined according to the passenger flow ratio and saturation of each phase. Based on bus priority, an optimization method of pre-timed signal timing for the single intersection was established by combining the two calculation methods. The excess green time of the non-priority phase at the intersection was fully used to determine the control logic and control parameters of the green-light extension and red-light early-break strategy. An induction signal control method based on bus priority was proposed for the single intersection. By selecting an intersection in Dalian and using VISSIM simulation software to model signal control optimization, average delay per vehicle, average delay per person and average stopping number can be derived in different timing schemes. The result reveals that the signal control optimization model can decrease the average delay per vehicle, average delay per person and decrease the stopping number of buses and social vehicles at intersections.

Keywords: urban transportation; bus priority; timing signal control; inductive signal control; simulation