

文章编号:1001-7372(2017)09-0109-07

基于车速引导的交叉口公交优先多 申请优化控制模型

张 鹏¹, 李文权², 常玉林¹, 谢君平¹

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为了解决交叉口高饱和以及公交优先多申请导致的公交优先效果不佳的难题,考虑公交运行车速可以引导调节的环境,以公交车的延误与停车次数加权最小为目标,以周期时长和相位饱和度为约束条件,将每辆公交车的车速调整量和交叉口信号相位时长一起作为优化变量,建立了公交车速引导和交叉口信号配时集成优化的整数线性规划模型。其中,采用0-1变量表示公交车停车次数以及公交车是否能够在到达周期内通过。分析结果表明:当交叉口高负荷,公交车到达时刻调整量上限为 ± 8 s时,与背景信号配时相比,车速优化模型的公交车人均延误减少14.35 s(降低27.71%),停车次数减少1次(降低14.29%);信号优化模型的公交车人均延误减少12.39 s(降低23.93%),停车次数减少1次;而所提出的集成优化模型可以使公交车人均延误减少40.68 s(降低78.56%),停车次数减少3次(降低42.86%),超过单方面信号优化与单方面车速引导产生的公交优先效果之和;即使考虑到信号配时与车速引导相结合,但是采用先到先服务的方法只能使公交车人均延误减少17.29 s(降低33.39%),停车次数减少1次。当交叉口饱和度过高,信号配时调整余地不大时,可以通过适当增加公交车车速调整量达到理想的公交优先效果。

关键词:交通工程;公交信号优先;整数线性规划;多优先申请;车速引导

中图分类号:U491.54 **文献标志码:**A

Optimal Control Model of Multiple Bus Signal Priority Requests for Isolated Intersection Based on Speed Guidance

ZHANG Peng¹, LI Wen-quan², CHANG Yu-lin¹, XIE Jun-ping¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of passing the isolated intersection where there were high traffic saturation and multiple priority requests for buses, a mix integer linear program (MILP) model integrated with intersection signal timing and bus speed was proposed. With the consideration that the bus speed could be conducted and adjusted, the bus speed adjustment and intersection signal phase duration optimization were regarded as variables, and the aim was to minimize the bus delay and stop times. The constraints were the cycle length and phase saturation. In the model, 0-1 variable was adopted to express bus stop times and whether a bus can pass through in the arrival cycle. The results show that, with high traffic saturation of the

收稿日期:2016-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51208232);江苏省高校自然科学基金项目(13KJB580003);

江苏大学高级专业人才培养项目(12JJD056)

作者简介:张 鹏(1982-),男,江苏徐州人,副教授,工学博士,E-mail:zhangpeng547@126.com。

intersection, the maximum adjustment of bus arrival time is ± 8 seconds. Compared with the original signal timing scheme, the bus delay per person decreases by 14.35 s (27.71%), whilst bus stop times decrease by 1 (14.29%) based on "the bus speed optimization model". The bus delay per person decreases by 12.39 s (23.93%) and bus stop times decreases by 1 (14.29%) based on "the signal timing optimization model". The bus delay per person decreases by 40.68 s (78.56%) and bus stop times decreases by 3 (42.86%) based on the new model presented in this paper, which have gone beyond the sum of individual signal optimization and speed guidance. Furthermore, even if the signal timing and bus speed guidance are taken into consideration, the bus delay per person decreases by 17.29 s (33.39%) and bus stop times decreases by 1 (14.29%) with the FCFS (first come first serve). Ideal bus signal priority effect can be achieved by increasing the adjustment quantity of the bus speed with high traffic saturation of intersection and limited signal timing adjustment.

Key words: traffic engineering; bus signal priority; MILP; multiple priority request; speed guidance

0 引言

公交信号优先是提升公交系统服务水平,增强公交吸引力的关键技术之一。公交信号优先控制可以分为被动优先、主动优先和实时优先 3 种^[1]。无论上述哪种优先策略,都是信号灯单方面的优化调整,而公交车只能被动适应信号控制策略的变化。Wadjas 等^[2]认为类似这种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。特别是近年来,中国城市公交流量越来越大,在交叉口短时内到达多辆公交车已经很常见,仅仅调整信号配时难以满足公交优先的需求,公交优先战略受到严峻挑战。

对于公交优先多申请所产生的优先冲突问题,较为简单的做法是采用先到先服务的规则,但是在考虑各个优先申请的总延误后,该规则未必是最佳的优先方式。Zeng 等^[3]考虑到公交车到达交叉口时刻的随机性,建立了一种随机混合整数非线性规划模型用于公交优先的实时控制,在交通拥堵情况下能够有效处理公交优先多申请的冲突。Xu 等^[4]选择公交行车延误作为评价指标,建立了优化模型以解决公交优先多申请的冲突问题,在信号配时方面采用传统的绿灯延长和红灯早断的方法。Ye 等^[5]选择公交车内乘客延误和下一站公交乘客等待延误作为评价指标,建立了公交优先多申请的优先级模型。

上述研究都是只从信号配时这一个方面来解决公交优先多申请中的优先冲突问题。近年来,一些学者开始将车速引导的方法引入到公交优先控制领

域。所谓“车速引导”,就是通过路侧动态车速诱导屏或者车载设备告知驾驶人最佳的行驶车速,尽量避开前方路口的红灯,达到降低车辆延误、减少停车次数的目的^[6-8]。

郑晨等^[9]提出通过车速引导控制公交车到达交叉口时刻,对有站点的交叉口利用红灯时间完成上下客,无站点交叉口在绿灯结束前驶离交叉口^[9]。王宝杰等^[10]应用卡尔曼滤波实时预测公交车路段行驶时间,对 BRT 车辆行驶车速进行诱导,有效减少了 BRT 车辆在交叉口停车等待绿灯现象的发生。Yang 等^[11]基于车联网环境,研究了交叉口进口处公交车与社会车辆的放行顺序优化,仿真结果表明,该方法可以减少所有乘客的延误。但是上述研究仅仅是公交车速的优化,没有涉及信号配时的协同优化。

马万经等^[12]基于车路协同环境,以公交运行状态最优为目标,设计了信号控制方案和最佳车速调整规则,仿真结果表明,该方法可以显著降低公交车延误。但是该研究主要是针对交叉口 1 个进口的单车车速诱导和配时的协调优化方法,人为设计的优先规则,也难以在理论上达到最优控制效果。

Hu 等^[13]基于车路通信环境,研究公交车速引导与交叉口信号配时协同优化,采用“绿灯再分配”方法实现公交车有条件的优先。该方法对于公交发车频率低的情况具有良好的效果,但是当公交车发车频率高时,效果如何还有待检验。接着, Hu 等^[14]以人均延误最小为优化目标,研究了公交车连续通过路口的智能协调控制方法,避免了公交车在上游交叉口节省的延误时间在下游交叉口浪费掉。但是

该文献采用的信号优化措施是绿灯再分配,没有考虑周期时长的优化,也没有对公交优先多申请情况的应用效果进行分析。然后, Hu 等^[15]以人均延误最小为优化目标建立了公交信号优先规则,来解决公交优先申请存在冲突的问题。但是信号优化措施依然是绿灯再分配,对于公交优先多申请而言必然会增加相位个数,增加相位转换的损失时间,影响交叉口通行效率,特别是有多辆公交车在短时内同时到达交叉口的情况(这种情况在中国交通高峰期非常普遍)。

综上所述,为了适应中国城市公交流量大、发车频率高的特征,解决交叉口公交优先多申请导致的公交优先效果不佳的难题,本文以优先申请的公交车总人均延误与公交停车次数加权最少为目标,对每辆公交车的车速调整量和交叉口的信号相位的起终点进行集成优化,以期达到最佳的公交优先效果。考虑到交通信号实时控制对模型求解速度的要求,本文建立的是一种 0-1 线性规划模型;最后通过算例分析,验证模型的优化效果。

1 线性规划模型的建立

1.1 问题描述

假设:1个周期内的公交优先申请(申请相位、载客量、当前车速)在周期开始之前全部已知;所有公交车都运行在公交专用道上,驾驶人按推荐车速行驶;交叉口区域内没有公交站台。公交车以当前车速到达交叉口停车线的时刻可以预测,每辆公交车运行速度的上下限已知。

在不改变基本信号控制相位结构(相位数、相位顺序)的前提下,只考虑最为常用的绿灯延长和红灯早断的方法,对每个相位的绿灯起止时刻及每辆优先申请公交车的通行车速进行集成优化,以期达到降低公交车延误,减少公交车停车次数的目的。

1.2 约束条件

如图1所示: P_{i0} 为公交车*i*到达检测位置的时刻; L 为检测位置到交叉口停车线的距离; v_i 为公交车*i*在检测位置的车速; v_{\min} 、 v_{\max} 分别为公交车*i*的最小、最大许可车速; P_i 为公交车*i*到达检测位置后以车速 v_i 行驶到达交叉口停车线的时刻; p_i^- 为公交车*i*以车速 v_{\max} 行驶到达停车线的时刻与 P_i 相比的提前量($p_i^- > 0$); p_i^+ 为公交车*i*以车速 v_{\min} 行驶到达停车线的时刻与 P_i 相比的滞后量($p_i^+ > 0$);则

$$\begin{aligned} P_i &= P_{i0} + L/v_i, p_i^- = L/v_i - L/v_{\max}, \\ p_i^+ &= L/v_{\min} - L/v_i \end{aligned} \quad (1)$$

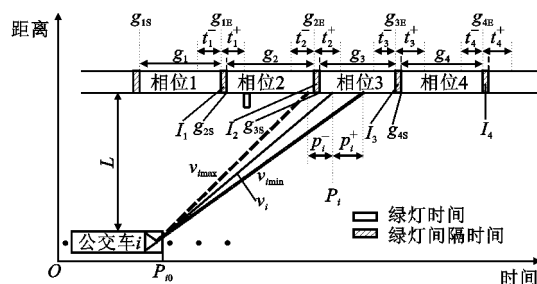


图1 公交到达时刻与通过相位之间的关系

Fig.1 Relationships Between Bus Arrival Time and Passing Phase

公交车*i*实际到达交叉口停车线的时刻为

$$P_{iz} = P_i + \Delta p_i - p_i^- \leq \Delta p_i \leq p_i^+ \quad (2)$$

式中: Δp_i 为公交车*i*从检测位置到交叉口停车线之间的行驶时间调整量。

如图1所示:对于一个四相位的交叉口而言,它所在的背景信号(本文假设1个周期内社会车辆的交通流量可以预测且均匀到达,当该周期没有公交优先申请时,信号配时只需满足社会车辆的通行,称之为背景信号)相位长度为 g_k ($k=1,2,3,4$,下同);相位*k*与下一相位的间隔时间为 I_k ;相位*k*的绿灯起始时刻为 g_{ks} ,绿灯结束时刻为 g_{kE} ; t_k^- 为相位*k*绿灯的最大缩短时间($k_k^- > 0$); t_k^+ 为相位*k*绿灯的最大延长时间($k_k^+ > 0$);则

$$\begin{aligned} g_{kE} &= g_{ks} + g_k + \Delta t_k - t_k^- \leq \Delta t_k \leq t_k^+, \\ k &= 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (3)$$

$$g_{(k+1)s} = g_{kE} + I_k \quad k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

绿灯时间调整的同时需要考虑对社会车辆的影响,即每一相位的饱和度和周期总长度都应该有个上限。总周期时长不能超过上限 C_{\max} ,每一相位饱和度最大不能超过 x_{\max} ,即

$$g_{4E} + I_4 - g_{1s} \leq C_{\max} \quad (5)$$

$$x_k = y_k \frac{g_{kE} - g'_{kE}}{g_{kE} - g_{ks}} \leq x_{\max} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

式中: y_k 为相位*k*的流量比; g'_{kE} 为上一周期相位*k*的绿灯结束时刻。

1.3 目标函数——延误

对于公交车*i*而言(假如申请通行相位为*k*),当公交车*i*的实际到达时刻在相位*k*结束之前时,则公交车*i*可以在本周通过;当公交车*i*的实际到达时刻在相位*k*结束之后,则公交车*i*在下一个周期通过。

当公交车*i*在本周期通过时($P_{iz} \leq g_{kE}$),其实际通过时刻与实际到达时刻的差值 c_{il} 可以分成2种情况:①当公交车*i*在相位*k*绿灯期间到达时,差值

为 0;②当公交车 i 在相位 k 绿灯开始之前到达时,差值为相位 k 绿灯开始时刻 g_{ks} 与公交车 i 实际到达时刻 P_{iz} 之差。上述 2 种情况可统一表达为

$$c_{i1} = t_{i1} - P_{iz} \quad (7)$$

式中: t_{i1} 为公交车 i 实际通过交叉口的时刻, $g_{ks} \leq t_{i1} \leq g_{ke}$; 由于 $c_{i1} \geq 0$, 且要求最小, 因此当 $P_{iz} \leq g_{ks}$ 时, $t_{i1} = g_{ks}$; 当 $g_{ks} \leq P_{iz} \leq g_{ke}$ 时, $t_{i1} = P_{iz}$ 。

同理, 当公交车 i 在下一周期通行时, 其实际通过时刻与实际到达时刻的差值 c_{i2} 可以表示为

$$c_{i2} = t_{i2} - P_{iz} \quad (8)$$

式中: t_{i2} 为公交车 i 在下一周期通行时的实际通过时刻, $g_{4E} + I_4 + \sum_{j=0}^{k-1} (g_j + I_j) \leq t_{i2} \leq g_{4E} + I_4 + \sum_{j=0}^{k-1} (g_j + I_j) + g_k$ (假定下一周期按背景信号配时运行); $g_{ke} < P_{iz} \leq g_{4E} + I_4 + \sum_{j=1}^{k-1} (g_j + I_j) + g_k$; 由于 $c_{i2} \geq 0$, 且要求最小, 因此, 当 $g_{ke} < P_{iz} \leq g_{4E} + I_4 + \sum_{j=1}^{k-1} (g_j + I_j)$ 时, $t_{i2} = g_{4E} + I_4 + \sum_{j=0}^{k-1} (g_j + I_j)$, 当 $g_{4E} + I_4 + \sum_{j=0}^{k-1} (g_j + I_j) \leq P_{iz} \leq g_{4E} + I_4 + \sum_{j=0}^{k-1} (g_j + I_j) + g_k$ 时, $t_{i2} = P_{iz}$ 。

本文将公交延误定义为: 公交车实际通过交叉口时刻与公交车以原车速(未经车速引导的车速)到达交叉口时刻之差。按照该定义, 公交车的延误可以为负值。

差值 c_{i1} , c_{i2} 与延误之间的关系如下

$$d_{i1} = c_{i1} + \Delta p_i, d_{i2} = c_{i2} + \Delta p_i \quad (9)$$

式中: d_{i1} 为公交车 i 在本周期通过时的延误; d_{i2} 为公交车 i 在下一周期通过时的延误。

公交车 i 的延误 d_i 要么是 d_{i1} , 要么是 d_{i2} , 即

$$d_i = \begin{cases} d_{i1} & P_{iz} \leq g_{iE} \\ d_{i2} & P_{iz} > g_{iE} \end{cases} \quad (10)$$

上述情况可以表示为

$$d_i \geq d_{i1} - Mx_i, d_i \leq d_{i1} + Mx_i \quad (11)$$

$$d_i \geq d_{i2} - M(1 - x_i), d_i \leq d_{i2} + M(1 - x_i) \quad (12)$$

$$P_{iz} - g_{iE} \leq Mx_i, P_{iz} - g_{iE} \geq M(x_i - 1) \quad (13)$$

式中: M 为一个大正数; x_i 为 0-1 变量, 当 $x_i = 0$ 时, $P_{iz} - g_{iE} \leq 0, d_i = d_{i1}$; 当 $x_i = 1$ 时, $P_{iz} - g_{iE} \geq 0, d_i = d_{i2}$ 。

1.4 目标函数——停车次数

对于公交车 i 而言, 停车次数是 0 或者 1, 用 0-1 变量 s_i 来表示。当实际通行时刻与实际到达时刻的差值 c_i 小于 t_d (公交车停车前的减速时间) 时, 可

以避免停车, $s_i = 0$; 当 c_i 大于 t_d 时, 才会发生停车, $s_i = 1$ 。上述关系可以表示为

$$c_i = d_i - \Delta p_i \quad (14)$$

$$M(s_i - 1) < c_i - t_d \leq Ms_i \quad (15)$$

综上, 最终的数学模型如下

$$\left. \begin{aligned} & \min m_i(d_i + ns_i) \\ & \text{s. t.} \\ & \text{式(1) ~ (15)} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: m_i 为公交车 i 的乘客数量; n 为停车次数相对于延误的权重系数。

2 计算分析

假设一个四相位的信号交叉口, 按照交通负荷由低到高等有 3 种运行状态, 背景周期分别为 100, 140, 160 s, 相位间隔时间均为 3 s, 详细信息见表 1。

表 1 社会车辆交通流量及信号配时

Tab. 1 Traffic Flow of Social Vehicles and Signal Timings

参数		状态 1	状态 2	状态 3
流量比	相位 1	0.19	0.22	0.23
	相位 2	0.14	0.16	0.17
	相位 3	0.22	0.25	0.26
	相位 4	0.15	0.17	0.18
绿灯时长/s	相位 1	24	35	40
	相位 2	18	26	30
	相位 3	27	39	46
	相位 4	19	28	32
平均饱和度		0.80	0.88	0.90
周期时长/s		100	140	160

本文取周期时长上限 $C_{\max} = 160$ s, 每个相位的饱和度上限 $x_{\max} = 0.9$ 。因此, 状态 3 是一种极限运行状态, 在接下来的优化过程中, 信号配时不能改变, 只能优化公交车速; 状态 1 是低饱和状态, 信号配时调整余地较大; 状态 2 是高饱和状态, 信号配时调整余地较小。

假设某个周期将有 10 辆公交车到达, 其到达时刻、载客量和申请通行相位已知, 且随机生成, 如表 2 所示。每辆公交车停车前的减速时间为 5 s, 公交停车次数相对于延误的权重系数为 10。分别采用 4 种公交优先控制方法(本文模型、车速优化但不调整信号、信号优化但不调节公交车速、考虑车速调节和信号优化但是先到先服务)对算例进行优化计算, 并比较各种方法的优化效果。

首先, 应用本文模型针对不同交通负荷状态和公交车到达时刻调整量上限对算例进行优化计算。公交车人均延误如图 2(a) 所示, 公交车停车次数如图 2(b) 所示。

表 2 公交信息随机生成表
Tab. 2 Randomly Generated Information of Buses

序号	到达时刻距周期起点的时差/s	载客量/人	申请相位
1	51	19	3
2	34	80	2
3	65	66	2
4	54	56	4
5	8	50	2
6	17	48	1
7	126	94	3
8	23	55	3
9	87	43	3
10	49	96	1

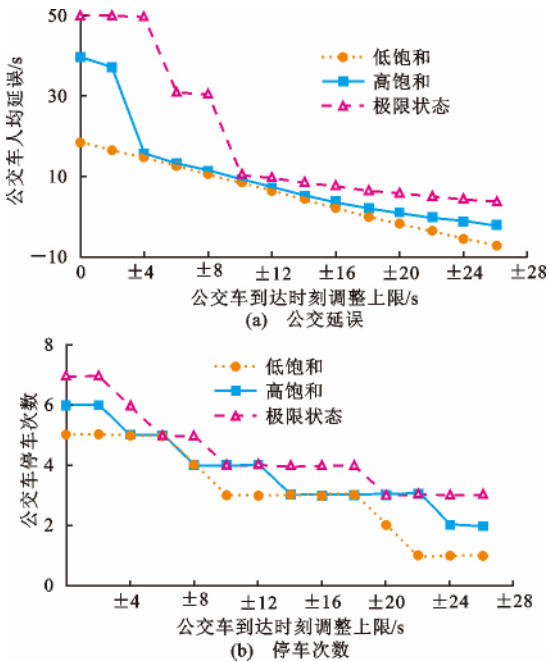


图 2 不同到达时刻调整量和交通负荷状态下的公交延误与公交停车次数

Fig. 2 Bus Delay and Bus Stop Times of Different Arrival Time Adjustment Under Different Traffic Loads

图 2(a)中,当公交车到达时刻的调整量上限相同时,交叉口饱和度越低则公交车人均延误越小,这是因为交叉口饱和度低信号配时的调整余地大,而交叉口饱和度高信号配时的调整余地小。但是这种差距随着公交车到达时刻调整量的增大变得越来越不明显。比如,当公交车到达时刻调整量上限超过 ± 4 s 时,“高饱和”和“低饱和”所产生的公交车人均延误几乎相等;当公交车到达时刻调整量超过 ± 10 s 时,“极限状态”和“低饱和”所产生的公交车人均延误差距很小。这说明,当某些路口饱和度很高而难以调整信号使公交优先时,可以通过加大调节公

交车到达时刻来达到公交优先的效果,不影响社会车辆的通行。

当交叉口“高饱和”且公交车到达时刻调整量上限为 ± 26 s 时,公交车人均延误为 -2.24 s。因为本文规定,当公交车加速不停车通过路口时,延误为负值。此时相位 1, 2, 3, 4 的结束时刻分别为: 33.97, 61.40, 102.24, 157.00 s; 公交车 1~10 的实际到达时刻分别为: 59.40, 31.97, 39.54, 31.97, 0, 100, 23, 61, 23 s; 10 辆车的延误分别为: 13.40, 2.97, -26 , 51.24, 28.97, -17 , -26 , 41.40, -22.60 , -26 s; 有 5 辆公交车加速不停车通过交叉口(延误为负数); 车辆 1, 2, 5 减速通过交叉口(不停车); 车辆 4, 8 以当前车速通过交叉口, 需要停车 1 次。

图 2(b)中,随着公交车到达时刻调整量上限的增大,公交车停车次数越来越少。当公交车到达时刻调整量上限为 ± 24 s 时,交叉口“低饱和”、“高饱和”与“极限状态”下,公交车停车次数分别降为 1 次、2 次和 3 次。本文优化模型可以导致 2 种公交不停车的情况,一种是加速通行,一种是减速在绿灯初期通行。以交叉口“高饱和”、公交车到达时刻调整量上限为 ± 14 s 为例,其停车次数为 3 次。此时相位 1, 2, 3, 4 的结束时刻分别为: 35, 62.65, 112, 157 s; 7 辆公交车不需要停, 其中有 5 辆车加速不停车通过路口, 分别为公交 3(到达时刻 51 s)、公交 6(到达时刻 3 s)、公交 7(到达时刻 112 s)、公交 9(到达时刻 73 s)、公交 10(到达时刻 35 s); 有 2 辆公交车减速不停车通过路口, 分别为公交 1(到达时刻 65 s)、公交 2(到达时刻 33 s)。

接下来,横向对比本文模型、车速优化模型(不调整信号)、信号优化模型(不调节车速)、先到先服务(调整信号和车速)4 种模型和方法对算例的优化效果。以交叉口处于“高饱和”状态,公交车到达时刻调整量上限为 ± 8 s 为例。交叉口信号配时优化结果及各相位的交通饱和度见图 3。

图 3(a)中,经本文模型优化计算后,交叉口周期时长为 160 s,车速优化模型的周期时长为 140 s(信号不调整),信号优化模型的周期时长为 139.60 s,先到先服务模型的周期时长为 133.45 s,所有周期时长均不超过周期上限 160 s。图 3(b)中,经本文模型优化计算后,交叉口各相位的平均饱和度为 0.82,车速优化模型的平均饱和度为 0.88,信号优化模型的平均饱和度为 0.88,先到先服务模型的平均饱和度为 0.9。交叉口所有相位的饱和度均不超

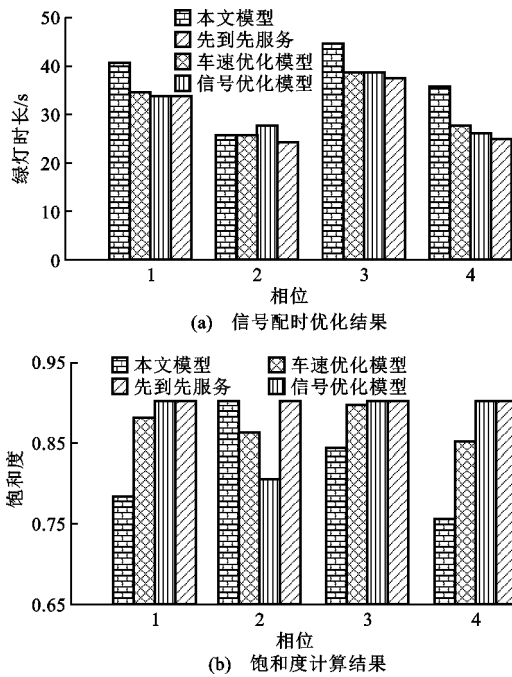


图3 不同模型的信号配时优化结果与相位饱和度计算结果
Fig. 3 Saturations Results and Optimization Results of Signal Timing of Different Models

过0.9。因此,本文公交优先控制模型对社会车辆的影响是可控的。

公交车速优化结果见表3,公交车人均延误和停车次数的优化结果见表4。

表3 不同模型的公交车速优化结果

Tab. 3 Optimization Results of Bus Speed of Different Models

优化模型	各公交车到达时刻/s									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
本文模型	43	42	57	46	0	9	118	15	79	41
车速优化模型	51	33	57	46	0	9	118	15	79	41
信号优化模型	51	34	65	54	8	17	126	23	87	49
先到先服务	43	32	57	46	0	9	134	15	79	41

表4 不同模型的公交延误和停车次数优化结果

Tab. 4 Optimization Results of Bus Delay and Stop Times of Different Models

优化目标	背景信号	本文模型	车速优化模型	信号优化模型	先到先服务
公交车人均延误/s	51.78	11.10	37.43	39.39	34.49
公交车停车次数	7	4	6	6	6

车速优化模型的公交车人均延误比背景信号(公交不优先)降低了14.35 s(27.71%),停车次数减少了1次;信号优化模型的公交车人均延误比背景信号降低了12.39 s(23.93%),停车次数减少1次;先到先服务的公交车人均延误比背景信号降低了17.29 s(33.39%),停车次数减少1次;本文模型

延误比背景信号降低了40.68 s(78.56%),停车次数减少了3次,优化效果最为明显,车速优化模型与信号优化模型所减少的延误之和(26.74 s)也远不及本文模型的延误降低量40.68 s。

3 结语

(1)本文建立了基于车速引导的交叉口公交优先多申请优化控制模型,通过对每辆公交行驶车速以及交叉口信号配时的协同优化,可以使尽可能多的公交车不停车通过交叉口(要么加速通过以降低延误,要么减速通过以减少停车次数)。算例分析表明:应用本文模型可以使公交延误和停车次数比现状有大幅度的减少;其公交延误、停车次数的降幅甚至超过了单方面的信号优先与单方面的车速优化2种方法降幅之和;即使考虑到信号配时与车速引导相结合,先到先服务的优化效果也远不如本文模型。

(2)本文模型可以用于交叉口公交优先的实时智能控制,特别适合中国公交车线路多、发车频率高的情况;而且本文建立的是一种0-1线性规划模型,模型规模小,求解算法简单,求解速度快,完全可以满足交叉口实时控制的需求。

(3)当交叉口饱和度过高,信号调整余地较小时,路段长度和交通条件允许的情况下,可以通过适当提高公交车车速调整量来达到提升公交优先的效果,同时减少对社会车辆的影响。

(4)信号配时与车速引导相结合还可以大幅减少公交车的停车次数,从而改善公交乘车体验,提高公交服务水平,减少油耗和排放等,这些问题还需要进一步研究。当然,本文研究还存在一些不足,如信号配时优化方面采用的是传统的红灯早断和绿灯延长,没有考虑相位顺序的调整以及相位的组合等方法,关于此也需要深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 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 Control for Isolated Intersection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 96-101.
- [2] WADJAS Y, FURTH P G. Transit Signal Priority Along an Arterial Using Advanced Detection[J]. Transportation Research Record, 2003 (1856): 220-230.

- [3] ZENG X,ZHANG Y,BALKE K N,et al. A Real-time Transit Signal Priority Control Model Considering Stochastic Bus Arrival Time[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1657-1666.
- [4] XU M T, YE Z R, SUN H Q, et al. Optimization Model for Transit Signal Priority Under Conflicting Priority Requests[J]. Transportation Research Record, 2016(2539): 140-148.
- [5] YE Z R, XU M T. Decision Model for Resolving Conflicting Transit Signal Priority Requests[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(1): 59-68.
- [6] YANG Y D, CHEN S Y, SUN J. Modeling and Evaluation of Speed Guidance Strategy in VII System[C]//IEEE. Proceedings of the 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2010: 1045-1050.
- [7] CHEN S Y, SUN J, YAO J. Development and Simulation Application of a Dynamic Speed Dynamic Signal Strategy for Arterial Traffic Management [C]//IEEE. Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2011: 1349-1354.
- [8] 杨晓光, 马万经, 姚 佼, 等. 智慧主动型交通控制系统及实验[J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2014, 6(1): 43-53.
YANG Xiao-guang, MA Wan-jing, YAO Jiao, et al. Intelligent and Proactive Traffic Control System: Concept and Experiments [J]. Journal of Engineering Studies, 2014, 6(1): 43-53.
- [9] 郑 晨, 郑长江. 公交车车速诱导研究与应用[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34(1): 19-22.
ZHENG Chen, ZHENG Chang-jiang. Research and Application of Bus Speed Induction[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2013, 34(1): 19-22.
- [10] 王宝杰, 王 炜, 杨 敏, 等. 基于 Kalman 滤波行程时间预测的 BRT 车速诱导[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(1): 41-46.
WANG Bao-jie, WANG Wei, YANG Min, et al. BRT Speed Induction Based on the Kalman Travel Time Prediction[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(1): 41-46.
- [11] YANG K, GULER S I, MENINDEZ M. A Transit Signal Priority Algorithm Under Connected Vehicle Environment[C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2015: 66-70.
- [12] 马万经, 吴明敏, 韩宝新, 等. 考虑可变速速度调节的单个交叉口公交信号优先控制方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 127-133.
MA Wan-jing, WU Ming-min, HAN Bao-xin, et al. Bus Signal Priority Control Method for Isolated Intersection Based on Dynamic Variable Speed Adjustment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 127-133.
- [13] HU J, PARK B, PARKANY A E. Transit Signal Priority with Connected Vehicle Technology[J]. Transportation Research Record, 2014(2418): 20-29.
- [14] HU J, PARK B, LEE Y J. Coordinated Transit Signal Priority Supporting Transit Progression Under Connected Vehicle Technology [J]. Transportation Research Part C, 2015, 55: 393-408.
- [15] HU J, PARK B, LEE Y J. Transit Signal Priority Accommodating Conflicting Requests Under Connected Vehicles Technology [J]. Transportation Research Part C, 2016, 69: 173-192.