

DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2018.07.15

网联环境下基于站点时刻表的公交信号优先方法

柏海舰,任桂香,董瑞娟,卫立阳

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院 安徽 合肥 230000)

摘要: 为了提高公交车准点率,考虑到网联交通环境下车辆信息可知,根据公交车旅行时间及预测到达交叉口的时间建立公交车优先通行策略选择模型;根据公交车到达停车线时间、延误时长和到达时刻在绿灯相位的位置计算生成新的配时方案。通过仿真计算,结果表明:运用建立的优先通行策略选择模型,公交车的平均准点率可提高 26.67%,总平均旅行时间可减少 27.41%,且可通过少量增加交叉口社会车辆延误大幅度减少交叉口公交车的人均延误。

关键词: 交通运输工程;公共交通;公交信号优先;公交时刻表;网联环境;准点率

中图分类号:U 491

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2018)07-085-07

Transit Signal Priority Method Based on Schedule Under Connected Vehicle Environment

BAI Haijian, REN Guixiang, DONG Ruijuan, WEI Liyang

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, P.R. China)

Abstract: In order to improve bus punctuality rates, considering the location of the vehicle can be known in the network traffic environment, the priority traffic strategy selection model was established according to bus travel times and the time forecast to reach the intersection. At the same time, a new timing scheme was generated according to the time the bus arrives at the parking line, the length of the delay time, and the location of the green light at the arrival time. Finally, it is shown by simulation and calculation: the average punctuality rate of the bus can be increased by 26.67%, the total average travel time reduced by 27.41%, and a small increase of social vehicle delays can significantly reduce the average bus delay at intersections.

Key words: traffic and transportation engineering; public transport; transit signal priority; bus schedule; connected vehicle environment; punctuality

0 引言

公共交通是缓解城市道路交通压力的一种有效方法,已有研究中很多策略被用于提高运输能力和服务质量,如快速公交、公交专用道等。在所有策略中,公交信号优先更经济且易实现^[1]。公交信号优先是提高公交运行效率的重要手段,在保证不对整个交通口或干线车辆运行产生严重影响的前提下,减少公交车辆的交叉口延误,提高公交车辆的准点率,改善公交车辆的运行效率,对可持续发展的城市交通具有重要意义。关于公交优先的研究,大致分为两个方

面。一是建立优化模型优化信号周期及配时参数,这方面研究居多。国内一些学者分别选取不同指标为优化目标,如交通延误、停车次数、实时交通状况等建立优化模型得到新的信号周期与相位配时,从而体现公交优先的思想^[2-4]。二是制定优先控制策略,调整信号配时参数。马万经等研究了绿灯延长、红灯早断和插入相位 3 种单点公交优先感应控制策略,应用延误三角形方法建立了 3 种公交优先策略效益计算模型,以两相位信号控制为对象,计算分析了模型的正负效益,并通过仿真进行了验证分析^[5]。

目前,国内大多城市在制定公交时刻表时仅存

收稿日期:2017-05-05;修订日期:2018-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51308176)

第一作者:柏海舰(1980—),男,安徽青阳人,副教授,博士,主要从事交通运输规划与管理方面的研究。E-mail: baihaijian@hfut.edu.cn。

在发车时刻和到达终点或返回发车点的时刻, 公交车只要在规定时间内到达终点或返回起点, 即为准点。对于中间站点运行状态没有规定^[6], 导致乘客候车时间过长或几辆公交车同时到达站点现象时有发生。准点率不仅包括终点运行准点性还包括中间站点运行准点性。对于晚点公交车, 如何通过信号交叉口的公交优先控制, 减少公交车交叉口延误, 尽可能使其到达时间接近时刻表时间, 同时降低对周边道路的负面影响, 用以解决现有公交信号配时技术未考虑公交准点率不足问题, 是研究的主要目的。国内外对基于时刻表的公交优先研究较少, 国外学者侧重于对时刻表的评价方法研究及公共交通可靠性评价^[7-8]。阴炳成等将满足时刻表为公交优先申请依据, 运用绿灯延长和相位提前激活两种方法给予晚点公交优先^[9]; 宋现敏等发明公开了基于运行时刻表的公交优先信号配时方法, 采用绿灯提前启亮和绿灯时间延长两种优先方式在交叉口给予公交优先, 其目的在于给予晚到公交优先, 和使其到达下游站点尽量接近时刻表有一定区别^[10]。以上学者的研究并没有考虑公交车晚点时间的长短与到下一相位绿灯开启时间长短的比较, 且只考虑了绿灯早启和绿灯延长两种优先方式, 有一定缺陷。笔者从制定优先策略入手, 将绿灯相位时间分段, 采取绿灯早启、绿灯延长、相位插入 3 种优先方式, 根据公交晚点时间与到下一相位绿灯开启时间长短的比较采用不同的优先策略, 建立公交车优先通行策略选择模型。

1 变量定义与表达

车联网技术巨大的信息采集及处理功能为本研究服务。网联环境下, 可以克服传统检测技术的一些缺点, 如车辆位置的检测与预测更加精确, 车辆速度、加速度、乘客数也能更准确的提取, 且公交车与交通信号控制器之间的双向通信也能更加快速的传递信息。笔者考虑的是单个交叉口和其上下游的公交站点, 当公交车在每个站点或者某些重要站点能尽量准点时, 为整条线路的准点奠定基础。假设在网联环境下公交车的行驶时间可以准确的预测, 如图 1, 公交车从上游站点 n 出发, 经过时间 T 到达下游站点 $n+1$ 。

1.1 公交行程时间预测

定义公交行程时间^[11]为公交车从上游站点出发到下游站点所花费的时间, 其表达式如式(1):

$$T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

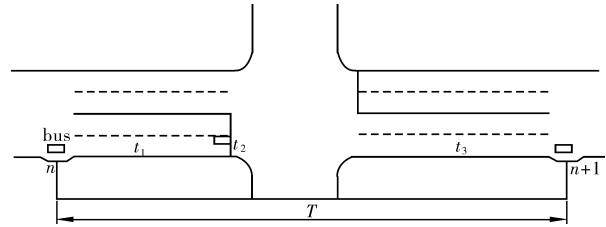


图 1 交叉口示意

Fig. 1 Schematic diagram of intersection

式中: t_1 为公交车从上游站点到停车线行驶时间; t_2 为公交车在停车线停靠时间, t_2 按式(2)进行确定; t_3 为公交车从停车线到下游站点行驶时间。

$$t_2 = \begin{cases} 0, & \text{公交车到达停车线为绿灯} \\ t_g - (t + t_1), & \text{公交车到达停车线为红灯} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_g 为公交车离开停车线的时刻; t 为公交车从上游站点出发的时刻。

在网联环境下 t_1 和 t_3 可准确预测。

1.2 晚点程度

晚点程度^[10]表示公交车晚点到达下游站点相比正点时刻表的偏离程度, 晚点程度临界值设为 β , 晚点程度 d_i 用式(3)表示:

$$d_i = \frac{t_w - t_z}{h} \quad (3)$$

式中: d_i 为第 i 辆公交车与运行时刻表的晚点程度; t_w 为公交车晚点到达下游站点的时刻; t_z 为公交车正点到达下游站点的时刻; h 为公交车发车时间间隔。

公交车在交叉口会产生延误, 即使在交叉口给予优先, 能降低的延误时间也小于该交叉口的一个信号周期。所以, 当公交车的延误大于一个信号周期, 则可调整公交车的速度, 使其减少在路段上产生的延误时间, 以保证公交车准时到达下一个站点。

1.3 效益函数

效益函数 PI 表示实施优先策略前后的效益问题, 并包含下游交叉口等待此公交的乘客数的延误变化, 其表达式如式(4):

$$PI = \sum_{j=1}^n O_j \Delta D_j + O_{bus} \Delta D_{bus} + \Delta D_p \quad (4)$$

式中: O_j 为第 j 辆社会车辆的载客数; ΔD_j 为优先策略前后社会车辆的延误之差; O_{bus} 为公交车的载客数; ΔD_{bus} 为优先策略前后公交车的延误之差; ΔD_p 为优先策略前后下游站点乘客延误变化, 表示为:

$$\Delta D_p = (t_w - t'_w) Q_i \quad (5)$$

式中: t'_w 为优先后公交车到达下游站点的时刻; Q_i 为下游站点等待此公交车的乘客数。

当 $PI > 0$ 时, 绿灯延长、红灯早断或者相位插入

方案可行,对信号配时进行调整生成新的配时方案,下传至信号机,实现基于运行时刻表的公交优先。当 $PI < 0$ 时,维持原信号配时方案不变。

2 控制策略

考虑单个交叉口和其上下游公交站点,公交车从上游站点离开时模型开始生效,将公交车到达下游站点时刻和时刻表正点时刻进行比较,当晚点程度小于临界值,则按照原配时方案执行;当晚点程度大于临界值,根据不同情况选择不同优先策略,具体情况如图 2^[11]。

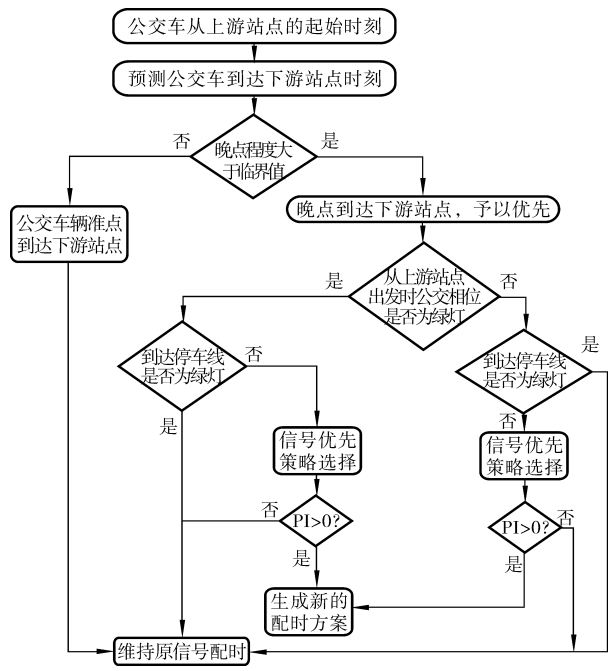


图 2 基于站点时刻表的公交信号优先流程图
Fig. 2 Flow chart of transit signal priority based on bus schedule

信号优先策略选择是根据公交车到达停车线时间、延误时间长短和到达时刻在此时绿灯相位的位置不同情况决定的,具体情况如表 1。

表 1 信号优先策略选择				
Table 1 Signal priority strategy selection				
上游站点 出发信号灯	到达停车 线信号灯	下一相位是 否公交相位	策略选择	
绿	红	否	绿灯延长或相位插入	
		是	绿灯早启	
红	红	是	绿灯早启	
		否	期间未经 绿灯相位	相位插入
			期间经过一个 绿灯相位	绿灯延长或 相位插入

3 信号优先控制算法

由表 2 可知,基于站点时刻表的公交信号优先使用 3 种优先策略,分别为绿灯延长、绿灯早启和相位插入,根据公交车到达停车线的不同情况选取不同的优先策略,生成不同的配时方案。

公交车从上游站点离开的时刻为 t ,经过时间 T 到达下游站点,晚点到达下游站点时刻为 t_w ,若此时达到下游站点的正点时刻为 t_z ,则公交车晚点时间用式(6)表示:

$$\Delta t = t_w - t_z \tag{6}$$

检测公交车从上游站点离开时刻信号灯的灯色,如果此时信号灯为绿色或者红色,到达停车线时为绿色,公交车直接通过交叉口。下文着重介绍到达停车线时信号灯为红色的两种情况。

3.1 绿-红情况

公交车从上游公交站点离开时信号灯为绿色,到达停车线时信号灯为红灯,该种情况可以选择绿灯延长策略、绿灯早启策略或相位插入策略,具体情况根据到达时间、延误时间长短和到达时刻在此时绿灯相位的位置具体分析。

公交车到达停车线时,信号周期执行到 C_x 秒,公交车来的车道为 i 相位,此时为红灯;若为 $i+1$ 相位,此时为绿灯, g_{i+1}^x 表示绿灯执行到 x 秒, g_i 表示第 i 相位的绿灯时长, g_i^s 、 g_i^e 分别表示第 i 相位绿灯起始、结束时刻, g_i^{\min} 表示第 i 相位最小绿灯时长。

1) 当 $C - C_x + g_i^s \geq \Delta t$ 时,说明在 C_x 时刻给予公交车优先之后公交车会准时到达或者早到,则需延迟一段时间开启绿灯以保证准时达到。延迟之后的时间为 $t_g = C + g_i^s - \Delta t$ 。根据 t_g 时刻在绿灯相位绿灯时间执行的长短分为不同情况,如表 2、3;

2) 当 $C - C_x + g_i^s < \Delta t$ 时,说明在 C_x 时刻给予公交车优先之后公交车仍会延误,则可以尽量减少延误。根据公交车到达时刻 C_x 绿灯相位绿灯时间执行的长短分为不同情况,如表 2、3。

当 $g_{i+1,2} - g_{i+1,2}^{\min} < g_{i+1,2}^{\min}$ 时,把绿灯相位的时间段分为 3 部分,分别执行不同的策略,如表 2; 当 $g_{i+1,2} - g_{i+1,2}^{\min} > g_{i+1,2}^{\min}$ 时,把绿灯相位的时间段分为两部分,分别执行不同的策略,如表 3。

表 2 绿-红情况三段式优先控制算法

Table 2 Three-stage priority control algorithm of green-red situation

正在执行 绿灯相位	$C - C_x + g_i^s \geq \Delta t$			$C - C_x + g_i^s < \Delta t$		
	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻
$i+1$	$t_g - g_{i+1}^s < g_{i+1} - g_{i+1}^{\min}$	绿灯延长	延长到 t_g	$g_{i+1}^x < g_{i+1} - g_{i+1}^{\min}$	绿灯延长	延长到 C_x
	$g_{i+1} - g_{i+1}^{\min} \leq t_g - g_{i+1}^s < g_{i+1}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 $g_{i+1}^s + g_{i+1}^{\min}$	$g_{i+1} - g_{i+1}^{\min} \leq g_{i+1}^x < g_{i+1}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 $g_{i+1}^s + g_{i+1}^{\min}$
	$t_g - g_{i+1}^s > g_{i+1}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g	$g_{i+1}^x \geq g_{i+1}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 C_x
$i+2$	$t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2} - g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s	$t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2} - g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s
	$g_{i+2} - g_{i+2}^{\min} \leq t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 $g_{i+2}^s + g_{i+2}^{\min}$	$g_{i+2} - g_{i+2}^{\min} \leq t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 $g_{i+2}^s + g_{i+2}^{\min}$
	$t_g - g_{i+2}^s \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g	$t_g - g_{i+2}^s \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g
$i+3$	$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启			$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启		

注: 如果因插入相位影响下一相位的绿灯时间不能满足其最小绿灯时间, 则插入位置改为正好能保证下一相位可以满足最小绿灯时间的位置。(下同)

表 3 绿-红情况二段式优先控制算法

Table 3 Two-stage priority control algorithm of green-red situation

正在执行 绿灯相位	$C - C_x + g_i^s \geq \Delta t$			$C - C_x + g_i^s < \Delta t$		
	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻
$i+1$	$t_g - g_{i+1}^s < g_{i+1}^{\min}$	绿灯延长	延长到 t_g	$g_{i+1}^x < g_{i+1}^{\min}$	绿灯延长	延长到 C_x
	$t_g - g_{i+1}^s \geq g_{i+1}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g	$g_{i+1}^x \geq g_{i+1}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 C_x
$i+2$	$t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s	$t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s
	$t_g - g_{i+2}^s \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g	$t_g - g_{i+2}^s \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g
$i+3$	$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启			$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启		

3.2 红-红情况

如果公交车离开上游站点时信号灯为红色且公交车到达停车线时也为红灯, 下一相位可能是公交相位也可能不是公交相位。当下一相位是公交相位时, 此时正在执行绿灯的相位达到最小绿灯时长时此相位绿灯早断, 提前开启公交车到达相位的绿灯, 即选择绿灯早启策略; 当下一相位不是公交相位时, 在公交车从上游站点到达停车线时间内可能未经过一个相位绿灯或者经过一个相位绿灯, 根据不同情况选择绿灯延长或者相位插入策略。

3.2.1 中间未经过一个相位绿灯时

1) 当 $g_i^s - C_x \geq \Delta t$ 时, 说明在 C_x 时刻给予公交车优先之后公交车会准时到达或者早到, 则需要延迟

一段时间开启绿灯以保证准时达到。延迟之后的时间为 $t_g = C_x + (g_i^s - C_x - \Delta t)$ 。设公交车到达的车道为 i 相位, 此时 $i+2$ 相位正在执行绿灯相位, 根据 t_g 时刻在绿灯相位绿灯时间执行的长短分为不同情况, 如表 4、表 5。

2) 当 $g_i^s - C_x < \Delta t$ 时, 说明在 C_x 时刻给予公交车优先之后公交车仍会延误, 则可以尽量减少延误。根据公交车到达时刻绿灯相位绿灯时间执行的长短分为不同情况, 如表 4、表 5。

3) 当 $g_{i+2} - g_{i+2}^{\min} < g_{i+2}^{\min}$ 时, 把绿灯相位的时间段分为 3 部分, 分别执行不同的策略, 如表 4; 当 $g_{i+2} - g_{i+2}^{\min} > g_{i+2}^{\min}$ 时, 把绿灯相位的时间段分为两部分, 分别执行不同的策略, 如表 5。

表 4 红-红情况三段式优先控制算法
Table 4 Three-stage priority control algorithm of red-red situation

正在执行 绿灯相位	$g_i^s - C_x \geq \Delta t$			$g_i^s - C_x < \Delta t$		
	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻
$i+2$	$t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2} - g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s	$g_{i+2}^x < g_{i+2} - g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s
	$g_{i+2} - g_{i+2}^{\min} \leq t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 $g_{i+2}^s + g_{i+2}^{\min}$	$g_{i+2} - g_{i+2}^{\min} \leq g_{i+2}^x < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 $g_{i+2}^s + g_{i+2}^{\min}$
	$t_g - g_{i+2}^s \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g	$g_{i+2}^x \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 C_x
$i+3$	$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启			$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启		

表 5 红-红情况二段式优先控制算法
Table 5 Two-stage priority control algorithm of red-red situation

正在执行 绿灯相位	$g_i^s - C_x \geq \Delta t$			$g_i^s - C_x < \Delta t$		
	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻	在绿灯相位的位置	策略选择	时刻
$i+2$	$t_g - g_{i+2}^s < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s	$g_{i+2}^x < g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 g_{i+2}^s
	$t_g - g_{i+2}^s \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 t_g	$g_{i+2}^x \geq g_{i+2}^{\min}$	相位插入	插入时刻为 C_x
$i+3$	$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启			$i+3$ 执行完最小绿灯后 i 相位绿灯早启		

3.2.2 中间经过一个相位绿灯时

1) 当 $C - C_x + g_i^s \geq \Delta t$ 时,说明在 C_x 时刻给予公交车优先之后公交车会准时到达或者早到,则需要延迟一段时间开启绿灯以保证准时达到。延迟之后的时间为 $t_g = C_x + (C - C_x + g_i^s - \Delta t)$ 。根据 t_g 时刻在绿灯相位绿灯时间执行的长短分为不同情况,如表 2、表 3。

2) 当 $C - C_x + g_i^s < \Delta t$ 时,说明在 C_x 时刻给予公交车优先之后公交车仍会延误,则可以尽量减少延误。根据公交车到达时刻在绿灯相位绿灯时间执行的长短分为不同情况,如表 2、表 3。

3) 当 $g_{i+1\ 2} - g_{i+1\ 2}^{\min} < g_{i+1\ 2}^{\min}$ 时,把绿灯相位的时间段分为 3 部分,分别执行不同的策略,如表 2; 当 $g_{i+1\ 2} - g_{i+1\ 2}^{\min} > g_{i+1\ 2}^{\min}$ 时,把绿灯相位的时间段分为两部分,分别执行不同的策略,如表 3。

4 仿真分析

4.1 仿真条件与参数设置

4.1.1 路口渠化条件

选取城市某十字信号交叉口为目标交叉口进行公交优先控制仿真分析,上下游分别有一个公交站点,上游站点离交叉口 300 m,下游站点离交叉口 200 m。其中东西方向为主干道,交通量较大,双向

8 车道,其中直行车道两条,左右转车道各一条;南北方向为次干道,交通量较小,双向 6 车道,直行车道一条,左右转车道各一条。右转车辆不受信号控制,且对直行车流和左转车流无干扰。

4.1.2 交通量参数

据调查,得到交叉口流量,除公交车流量外,其他社会车辆均折换成标准当量小汽车,流量表如表 6,由于右转车辆不受控制,不考虑其延误,因此不将右转车辆列入其中。

表 6 交叉口流量
Table 6 Flows of intersection

方向		车道数/ 道	公交车流量/ (pcu · h ⁻¹)	小汽车流量/ (pcu · h ⁻¹)
东进口	左转	1	0	240
	直行	2	62	1 206
西进口	左转	1	0	315
	直行	2	65	1 005
南进口	左转	1	10	177
	直行	1	17	427
北进口	左转	1	0	247
	直行	1	15	400

4.1.3 原始信号参数

现状交叉口信号配时采用四相位控制方案,信号周期为 120 s,方案如表 7。

表 7 原始配时方案

Table 7 Original signal timing scheme

不同相位	相位 1	相位 2	相位 3	相位 4
旅行方向	东西直行	东西左转	南北直行	南北左转
相位时长/s	40	26	33	21

各车道饱和流量为 1 800 pcu/h,各相位最小绿灯时长为 15 s。由于右转车辆不受信号控制,因此不考虑右转车辆的延误。

4.1.4 公交车运行参数

公交车在第一相位到来,即公交车在东西直行方向,且以 120 s 的发车间隔出发,3 600 s 为一个运行周期。假设公交车平均载客数为 30 人,社会车辆载客数为 2 人,公交车速度 6~11 m/s,社会车辆 7~14 m/s,车辆以随机的速度到达交叉口,下游站点有 5 位乘客等待此公交车。由于公交车从上游站点出发模型生效,信号周期为 120 s,所以公交车对应的出发时刻有 120 种,编程进行数值计算,为了减少系统误差,运行 120 次。

4.2 公交车准点率分析

准点率分为平均准点率与总平均准点率,平均准点率为每一秒出发的车辆准点率的平均,总平均准点率为整个周期内所有车辆准点率的平均。设公交车准点时旅行时间为 60 s,假设在正点前后 5 s 范围内皆为准点,将运用笔者策略进行优先后的公交车准点率与原配时方案下的准点率进行比较,不同情况下公交车平均准点率、总平均准点率如图 3 和表 8。

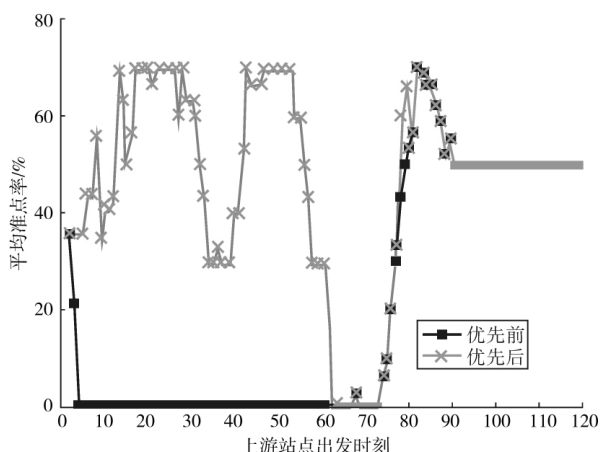


图 3 不同情况下公交车平均准点率

Fig. 3 Average punctuality rate of bus in different conditions

表 8 公交车总平均准点率和点平均旅行时间

Table 8 Total average punctuality rate and total average time of bus

运行参数	优先后	优先前	变化率/%
总平均准点率/%	46.82	20.15	+132.36
总平均旅行时间/s	67.88	93.52	-27.41

注:变化率=(优先后-优先前)/优先前 $\times 100\%$,"+"代表增加;"-"代表减少。(下同)

以提高公交车的准点率为目的,由图 3 和表 8 可知,笔者提出的策略能有效提高公交车的准点率,总平均准点率从 20.15% 提高到 46.82%,平均准点率能提高至 70%。准点率也有不提高的情况,这是由于策略的不同造成的:当公交车到达交叉口为绿灯或者不满足优先情况时则采用原配时方案,准点率将会不变;当公交车到达交叉口为红灯时,则根据时间的分布采取不同的策略,准点率也将会有差别。

4.3 公交车旅行时间分析

公交车旅行时间分为平均旅行时间与总平均旅行时间,平均旅行时间为每一秒出发的车辆旅行时间的平均,总平均旅行时间为整个周期内所有车辆旅行时间的平均。将优先后的公交车平均旅行时间、总平均旅行时间与原配时方案下的平均旅行时间、总平均旅行时间进行比较,结果如图 4 和表 8。

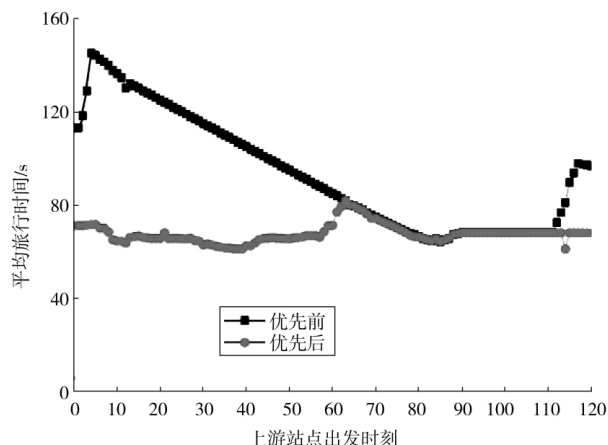


图 4 不同情况下公交车平均旅行时间

Fig. 4 Average travel time of bus in different conditions

由图 4 可知,优先前公交车平均旅行时间变化范围较大,公交车行驶过程很不稳定,优先后公交车平均旅行时间稳定在均值附近,系统稳定性增强。由表 8 和图 4 可知,运用笔者策略,公交车的总平均旅行时间减少 27.41%,平均旅行时间最高可减少 51.04%。当公交车到达交叉口为绿灯或者不满足优先情况时则采用原配时方案,公交车旅行时间将会不变,即图 4 中重叠部分;当公交车到达交叉口为红灯时,则根据时间的分布采取不同的策略,旅行时

间改变程度不同。

4.4 公交车和社会车辆人均延误分析

假设公交车平均载客数为 30 人,社会车辆载客数为 2 人,优先后公交车和社会车辆的人均延误和原配时方案下公交车和社会车辆的人均延误比较如表 9。

表 9 公交车和社会车辆总人均延误
Table 9 Total per capita delay of buses and socian vehicles

车辆类别	总人均延误 /s		变化率 /%
	优先后	优先前	
公交车	0.82	1.54	-46.75
社会车辆	17.55	17.42	+0.75

由表 9 分析可知,笔者策略能有效减少公交车的人均延误,减少总百分比达 46.75%。采用原配时方案时,公交车人均延误没有变化,采用笔者策略的优先方案时,人均延误有不同程度的减少。当公交车所在相位采取优先方案时,则会对周边社会车辆有一定程度的影响,社会车辆总人均延误如表 9。

分析得知,社会车辆的人均延误有增加有减少,整体成增加趋势,此种情况符合常理。由表 9 可知,社会车辆的人均延误仅增加 0.75%,在较大幅度减少公交车人均延误的同时对周边社会车辆的影响不大。

5 结 论

公交信号优先的相关理论已被提及多年,理论成果非常丰富,但公交车准点性的研究较少。笔者以提高公交车准点性为目标,提出车联网环境下基于站点时刻表的公交优先配时方法。根据公交车从上游站点出发及到达停车线时信号灯灯色选择不同的优先策略,并根据公交车到达停车线时间、延误时间长短和到达时刻在此时绿灯相位的位置生成新的配时方案。最后通过实例分析,分析结果表明:公交车的平均准点率提高 26.67%,总平均旅行时间减少 27.41%,公交车人均延误减少 46.75%的同时周边社会车辆的人均延误仅增加 0.75%,获得了较好的控制效果。

参考文献(References):

[1] HAO Yanxi ,WANG Yinsong ,YANG Xiaoguang. A schedule-based coordinated optimization model for Transit Signal Priority under Connected Vehicle environment[C]//2014 IEEE 17th International

Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE , 2014: 2578-2583.

[2] 万绪军 陆化普.实时自适应交通信号控制优化理论模型[J].交通运输工程学报,2001,1(4):60-66.
WAN Xujun,LU Huapu. A real time self-adaptive traffic signal setting optimization theory [J].*Journal of Traffic and Transportation Engineer-*
ing,2001,1(4):60-66.

[3] 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 Weihua,LU Huapu,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.

[4] 王正武 夏利民 罗大庸.单交叉口自适应公交优先控制[J].中国公路学报,2010,23(4):84-90.
WANG Zhengwu,XIA Limin,LUO Dayou. Adaptive transit priority control at isolated intersection [J].*China Journal of Highway and Transport*,2010,23(4):84-90.

[5] 马万经 杨晓光.单点公交优先感应控制策略效益分析与仿真验证[J].系统仿真学报,2008,20(12):3309-3313.
MA Wanjing,YANG Xiaoguang. Efficiency analysis of transit signal priority strategies on isolated intersection [J].*Journal of System Simulation*,2008,20(12):3309-3313.

[6] 宋晓梅,于雷.影响公交运行可靠性的因素分析及改善措施[J].综合运输,2009(3):59-62.
SONG Xiaomei,YU Lei. Factors analysis and improvement measures of influence on the reliability of public transportation [J].*China Transportation Review*,2009(3):59-62.

[7] CHANG J,COLLURA J,DION F,et al. Evaluation of service reliability impacts of traffic signal priority strategies for bus transit [J].*Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*,2003,1841:23-31.

[8] DANAHER A R. Transit capacity and quality of service manual [J].*Transportation Research Circular*,2003.

[9] 阴炳成 杨晓光.交叉口单点公共汽车交通优先控制方法研究[J].公路交通科技,2005,22(12):123-126.
YIN Bingcheng,YANG Xiaoguang. Study on the bus priority signal control theory of single intersection [J].*Journal of Highway and Transportation Research and Development*,2005,22(12):123-126.

[10] 王殿海 宋现敏 李志慧,等.基于运行时刻表的公交优先信号配时方法:CN:200910066886.9[P].2009-10-14.
WANG Dianhai,SONG Xianmin,LI Zhihui,et al. Bus priority signal timing method based on running schedule: CN: 200910066886.9 [P]. 2009-10-14.

[11] HU J,PARK B,PARKANY A. Transit signal priority with connected vehicle technology[J].*Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*,2014,2418:20-29.

(责任编辑:罗素琴)