

公交站点排队溢出控制方法

施卫国¹, 马万经¹, 刘兴永²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 临沂市规划建筑设计研究院, 山东 临沂 276037)

摘要: 为解决公交站点因需求集中而出现的排队问题, 以排队原因为切入点, 通过分析, 揭示了站点供给与公交需求之间的矛盾关系是造成公交排队的根本原因。建立了一种防止公交排队溢出的交叉口控制方法。首先, 建立公交延误模型和站点停靠时间模型。然后, 基于这两种模型和信号方案, 建立了公交溢出判断模型和公交准点判断模型。最后, 将这些模型应用到控制方案中, 提出了一种新的公交防溢出方法, 实现交叉口公交防溢出功能和公交优先控制。利用 VISSIM 软件对该控制方法进行了仿真分析, 结果表明该控制方法能够有效防止公交排队溢出进入交叉口。

关键词: 交通工程; 溢出控制; 仿真验证; 站点排队; 判断模型

中图分类号: U491.31

文献标志码: A

Traffic Control on Queue Spillbacks at Bus Stops

SHI Weiguo¹, MA Wanjing¹, LIU Xingyong²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Linyi Architectural Design & Research Institute, Co. Ltd., Linyi 276037, China)

Abstract: To address the issue of queue spillbacks at bus stops due to high traffic volumes, this study focused on the queue formation, analyzed the relationship between the capacity and the traffic demand at bus stops, and proposed an intersection control approach to avoid queue spillbacks at bus stops. Firstly, a bus delay model and a dwelling time model were built. Then, the judgement models of queue spillbacks and on-schedule buses were built based on the above two models. Finally, these models were applied to a traffic control scheme and an approach to avoiding queue spillbacks at bus stops was proposed, which could also provide bus priority control. VISSIM software was used for simulation validation and

the results demonstrated that the proposed control approach was able to prevent queue spillbacks at bus stops.

Key words: traffic engineering; spillback control; simulation validation; queue at bus stop; judgment model

在城市道路中, 公交运行主要的目标之一是服务水平最大化。然而, 受公交车辆、线路、交叉口以及停靠站点等因素影响, 公交车辆运行中总是会出现多种问题, 其中比较突出的是公交站点供需失衡问题及由此引发的一系列其他问题。公交站点作为影响公交运行的关键因素^[1], 其站点位置, 站点形式, 停靠时间等直接影响到公交运行中的服务效率及服务水平。随着科学技术的进步, 公交车辆运行中实时信息的获取越来越容易, 多公交运行状态的研究开始受到关注, 考虑公交实时信息的控制系统也逐渐发展起来^[2]。除直接在站点对公交车进行控制(即站点控制)外, 能有效缓解公交站点排队问题的方法还包括交叉口控制^[3-4], 这主要通过交叉口对公交车进行优先控制实现。此外, 对公交站点本身的优化设计^[5-6](如对其通行能力的优化利用)也是缓解公交站点排队问题的重要方法。

站点公交排队溢出主要是由于站点服务能力在长时间内无法满足公交需求导致公交排队累积而引起的。鉴于公交优先在应对和治理站点公交排队方面并不能控制站点公交需求, 反而会增加站点排队导致公交排队溢出, 因此需要建立一种新的控制方法, 减少交叉口处公交集中进站需求, 并对因公交排队溢出而导致交通运行瘫痪问题进行防治。

本文提出了一种交叉口控制方法, 该控制方法

收稿日期: 2019-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51722809); 国家重点研发计划(2018YFB1601000)

第一作者: 施卫国(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通设计与控制。Email: shiweiguo@tongji.edu.cn

通信作者: 马万经(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通设计与控制。

Email: mawanjing@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

针对交叉口远端公交停靠站,通过站点停靠车辆的等待时间和信号灯时长,来判断站点排队是否会出现溢出;兼顾公交运行可靠性,在防溢出控制的基础上,该控制方法又实现了公交优先功能。通过仿真分析对本文所提出的交叉口防溢出控制方法进行验证,结果证明该方法能够很好的防治站点公交排队溢出问题,同时也能实现公交优先功能。

1 模型设计

提出的控制方法主要是针对交叉口远端公交停靠站,该方法的控制目标是防止出现由于公交优先而导致的公交车辆排队溢出问题,同时提高公交车在公交优先交叉口的准点性。控制逻辑主要分为两部分,如图1所示。

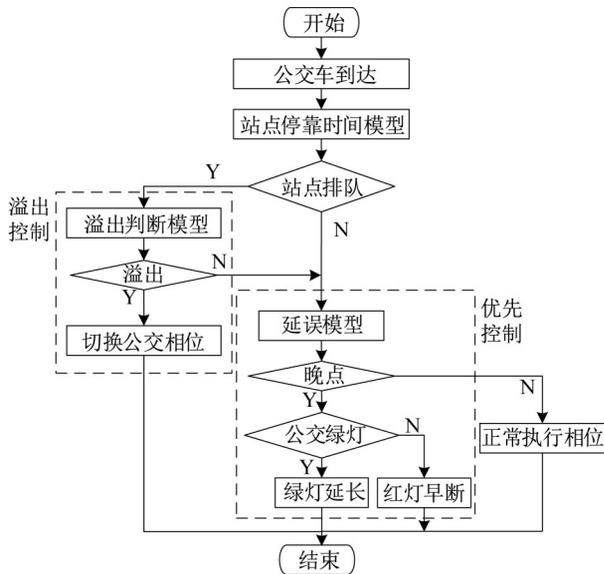


图1 公交优先防溢出控制流程

Fig.1 Flowchart of bus priority control with spillback avoidance

从图1可以看出,当公交车辆到达交叉口时,检测器会检测到车辆。首先,溢出控制模块根据公交车辆站点停靠时间模型及站点公交排队情况计算公交进站排队等待时间。然后,溢出判断模型得到时间后根据站点停靠车辆情况判断公交车辆是否会引起排队溢出,如果会则切断公交信号,如果不会在继续执行信号控制方案。之后,公交优先控制模块根据公交车辆延误情况判断进站公交车是否晚点。如果车辆准点到达交叉口信号控制方案执行正常方案,如果车辆到达交叉口出现晚点并且不会造成溢出,则会发出优先申请;如果车辆提前到达公交站

或引发公交溢出,那么将会发出公交绿灯早断信号。最后,根据优先申请结果选择执行红灯早断或绿灯延长的公交优先方式。

1.1 控制模块

1.1.1 溢出控制模块

判断公交车辆溢出需要满足两个条件。①公交车车辆的等待时间大于剩余绿灯时间,用数学公式表示见式(1);②排队车辆数已经超过了站点和道路所能容纳的最大车辆数,见图2。图中LN为站点到交叉口这段空间中所能容纳的最大车辆数,N是站点泊位数(即站点最大能同时服务车辆数)。第2个条件用式(2)表示。根据公交车辆停靠时间的统计结果,公交车辆平均停靠时间 t_d 可以依据上海市通行能力项目中公交停靠时间调查数据做统计回归分析得到模型取值12s^[7]。判断公交车辆溢出的约束条件可以用式(3)表示,如果满足条件,判定产生溢出则 $O=1$,否则 $O=0$ 。

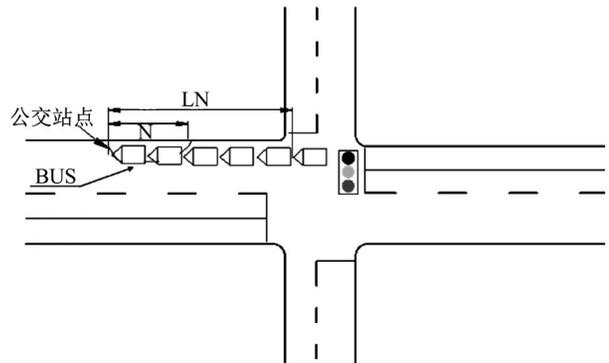


图2 公交车辆溢出示意图

Fig.2 Illustration of bus spillbacks

$$d_{q_i} \geq g_{gr} \tag{1}$$

$$n_i + N \geq LN \tag{2}$$

$$O = 1, \text{若} \begin{cases} \text{int}(\frac{n_i}{N} + 1) \times 12 \geq g_{gr} \\ n_i + N \geq LN \end{cases} \tag{3}$$

式中: d_{q_i} 为第*i*辆车等待进站的排队延误,计算见式(5); g_{gr} 为公交绿灯剩余时间; n_i 为第*i*辆车前面的排队车辆数($0 \leq n_i \leq$ 最大排队车辆数)。

1.1.2 优先生成模块

优先生成模块主要是判断到达交叉口的公交车是否需要提出优先申请。公交车的不准点主要是由于车辆延误导致的,主要是交叉口延误和站点延误。

交叉口红灯延误模型:交叉口处检测器检测到公交车辆到达,根据公交车车速可以计算出公交车

辆到达交叉口的时间,然后结合信号配时可以得到车辆到达交叉口时所需要等待的红灯时长。如果公交车到达交叉口时前面没有车辆排队,公交车在交叉口处的延误是红灯等待时间可以使用式(4)计算得到,式中排队车辆数取值0。如果公交车到达交叉处会形成排队,则其在交叉处的红灯延误为理想条件下的红灯等待时间加上排队等待时间,交叉口处公交红灯延误计算流程见图3, t_{bi} 为第*i*辆公交车与*i-1*辆公交车车头时距。

$$d_{ri} = [c - (t_i + \Delta t) m_{\text{取余}c}] + n_q t_q \quad (4)$$

式中, c 为交叉口信号灯信号周期时长; t_i 为第*i*辆公交车到达检测器位置时信号灯所处时刻; Δt 为公交车从检测器到停止线所需要的行程时间; n_q 为前面排队车辆数; t_q 为平均排队时间, $t_q = L_b/v_b$; L_b 为公交车身长度; v_b 为公交行驶速度; $m_{\text{取余}}$ 为取余数。

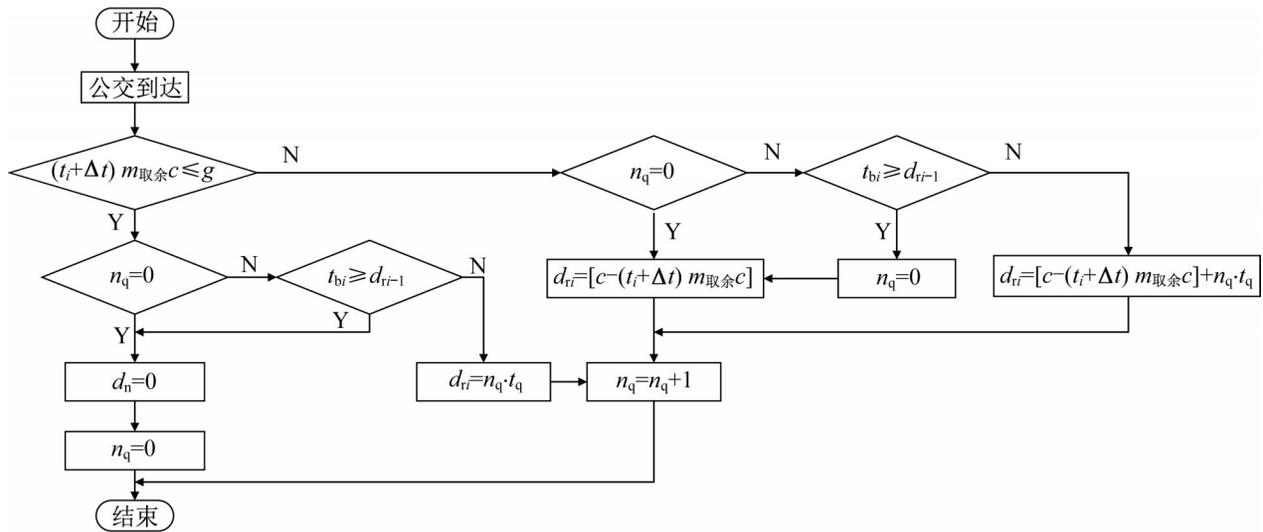


图3 交叉口公交红灯延误计算流程

Fig.3 Calculation of bus delay at red lights at the intersection

站点延误模型:公交高峰时段会有大量公交车进站,由于站点的通行能力或进站规则的影响,车辆往往需要排队等待空泊位,这种排队延误在一定程度上也会影响公交车的准点性,严重可能会造成串车。使用式(5)可以计算公交车在站点的排队延误。

$$d_{qi} = \alpha \text{int} \left(\frac{n_i}{N} + 1 \right) \times t_d \quad (5)$$

式中: d_{qi} 为第*i*辆车等待进站的排队延误; α 为与*N*和*t_d*有关的系数; n_i 为第*i*辆车前面的排队车辆数($0 \leq n_i \leq n_{\text{max}}$);*N*为公交站停靠泊位数;*t_d*:车辆平均停靠时间。

系数 α 是与泊位数和公交服务时间的变化程度有关,理想条件下公交车稳定运行,系数 α 可以设置为1。高峰期公交车以*N*辆车为组团进入停靠站,因此第*i*辆公交车需要等待的车辆数 w_i 可以通过式(6)计算得到,因此第*i*辆车需要的平均等待时间 d_{qi} 即可通过式(5)计算得到。

$$w_i = \text{int} \left(\frac{n_i}{N} + 1 \right) \quad (6)$$

需要设定公交车交叉口红灯延误和站点排队延误的阈值,作为控制逻辑发出优先申请的控制条件。式(7)为公交红灯延误和排队延误判断模型,如果有一方延误超过阈值则会发出优先申请。

$$\begin{cases} P_i = 1, \text{ if } d_{ri} + d_{qi} > D \\ \text{否则} \\ P_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_i 为公交优先申请标志,赋值1表示公交晚点需要优先,0表示不需要优先;*D*为公交延误阈值,一般不超过公交车发车间隔以防止串车。

本文所研究的方法中对交叉口公交控制提供有4种控制方案,分别为正常执行(E),红灯早断(R),绿灯延长(G)和绿灯切换(C)。

溢出情况下,控制策略选择模型见式(8)。无溢出情况下的优先又分为公交信号灯为绿灯($S=1$)和信号灯为红灯($S=0$)两种情况。当交叉口有优先申请,信号灯为绿灯时,则执行绿灯延长控制方案;信

号灯为红灯时,信号控制方案将会执行红灯早断控制方案,并依据后续相位交通量饱和度对早断时长进行补偿,使执行完优先方案后信号控制能够重新回到正常背景控制方案。无溢出情况下信号控制方案选择模型见式(9)。

$$O = 1 \Rightarrow C \tag{8}$$

$$O = 0 \begin{cases} P_i = 0 \Rightarrow E \\ P_i = 1 \begin{cases} S = 0 \Rightarrow R \\ S = 1 \Rightarrow G \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

式中: $O=1$ 表示产生溢出, $O=0$ 表示没有溢出。

1.2 仿真验证

为了验证所提控制方法的运行效果,使用

VISSIM 4.30-01 软件进行仿真实验。其中信号控制方案通过可视化编程工具 VisVAP 2.14 来完成。

交叉口为十字交叉口,东西方向为双向八车道,南北方向为双向四车道,交叉口形状见图4,其中交叉口东西方向道路两侧为公交专用道,图中用灰色填充表示,用方框代表检测器。公交停靠站为交叉口出口道路边直线式公交停靠站,能够同时容纳3辆公交车进站停靠。公交车平均行驶速度为40km/h,站点停靠时间服从均值为20方差为3的正态分布。

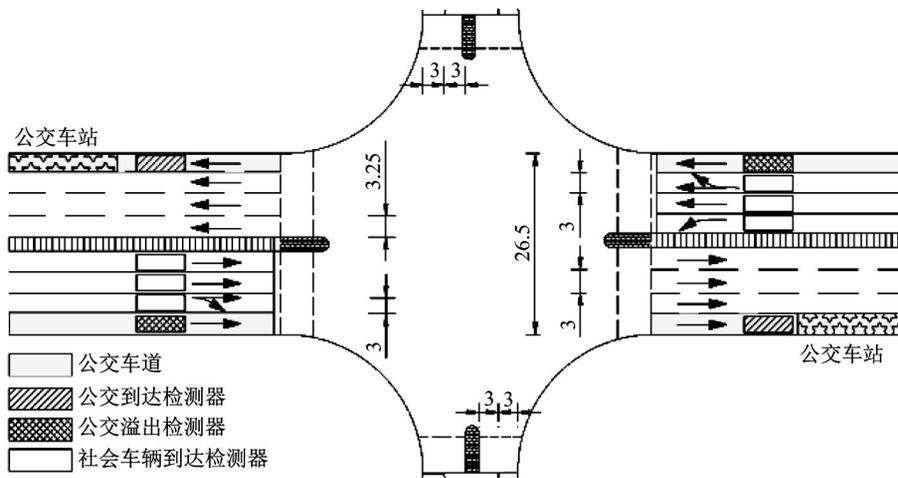


图4 仿真实验中交叉口示意(单位:m)

Fig.4 Illustration of the intersection in simulation experiments(Unit:m)

仿真中交叉口采用三相位配时方案,分别为东西方向直行,东西方向左转和南北方向3个相位,如图5所示。实验中车辆数据主要有4种情况下的车辆数据,分别为路网中无公交条件下、公交流量较低条件下、中等公交流量下的车辆数据和大公交流量下的车辆数据,如表1所示。对于不同的车辆数据,共设置两种信号配时方案,对于无公交、低公交流量

和大公交通流量条件下,各相位的绿灯时长分别为70s、20 s、60 s;对于中等公交流量的条件,各相位的绿灯时长分别为30 s、12 s、33 s。仿真实验中信号灯相位间隔设置为4s,其中有1s的全红时间和3s的黄灯时间。根据4种场景中公交车流量的不同,给出不同场景下信号控制方案和公交流量变动数据如下。

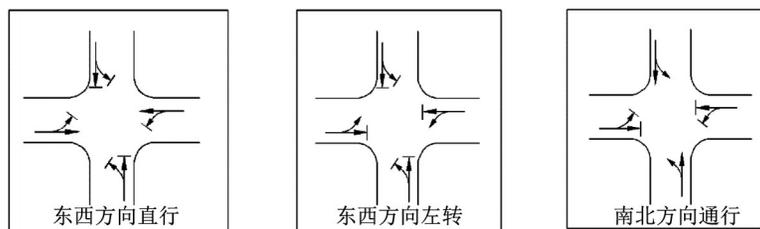


图5 交叉口相位相序方案

Fig.5 Phase sequence at the intersection

(1)低公交流量
公交绿灯延长最大延长5 s,公交红灯早断时间

最早为10 s,每一公交停靠站有4条公交线路,公交在停靠站的平均停靠时间为20 s。

表1 不同公交条件下社会车辆流量数据

Tab 1 Volume of social vehicles under different bus conditions

		东进口	西进口	南进口	北进口
无公交数据	右转/辆	150	150	231	217
	直行/辆	2 579	2 579	692	696
	左转/辆	271	271	77	87
低公交流量数据	右转/辆	150	150	231	217
	直行/辆	2 579	2 579	692	696
	左转/辆	271	271	77	87
中等公交流量数据	右转/辆	187	120	185	174
	直行/辆	688	960	554	557
	左转/辆	125	120	62	70
大公交流量数据	右转/辆	150	150	231	217
	直行/辆	2 579	2 579	692	696
	左转/辆	271	271	77	87

(2) 中等公交流量

公交绿灯延长最大延长5 s, 公交红灯早断时间最早为5 s, 西出口道公交停靠站有8条公交线路, 发车频率为10 min, 东出口道停靠站有4条公交线路, 发车频率为10 min。

(3) 大公交流量

公交绿灯延长最大延长5 s, 公交红灯早断时间最早为10 s, 西出口道公交停靠站有10条公交线路, 发车频率为5 min, 东出口道停靠站有4条公交线路, 发车频率为6 min。

2 数据分析

2.1 排队数据分析

对比分析定周期控制、优先控制和防溢出控制三种方式下, 公交车辆在站点和交叉口的排队情况, 数据比较见表2和图6, 可以看出防溢出控制比起定周期控制和优先控制能够大大降低站点公交车辆排队情况, 站点排队长度最大能够降低37.5%。这说明防溢出控制逻辑能够有效防止公交停靠站排队溢出。对于交叉口处的公交排队情况防溢出控制比定周期控制下平均排队长度降低7.5%, 防溢出控制下的排队没有比定时控制高反而有所降低, 说明本文所提防溢出控制方法在防止公交站点溢出的同时并没有导致交叉口处公交的积累, 这也说明了防溢出控制方法在控制公交集中进站方面的有效性。

以10 min为周期统计1h内站点和交叉口处公交车排队情况见图7。定周期、优先和防溢出三类控制方法下溢出阶段(周期1)交叉口和站点的排队长度分别为13, 8, 11和8, 11, 5, 说明站点防溢出控制方法能够有效降低站点排队长度。随着公交车到

表2 不同控制方式下公交平均排队情况

Tab 2 Average bus queues under different control modes

信号控制方式	定周期控制	优先控制	防溢出控制
平均排队长(辆)			
交叉口	10.00	7.00	9.25
站点	5.50	7.20	4.50

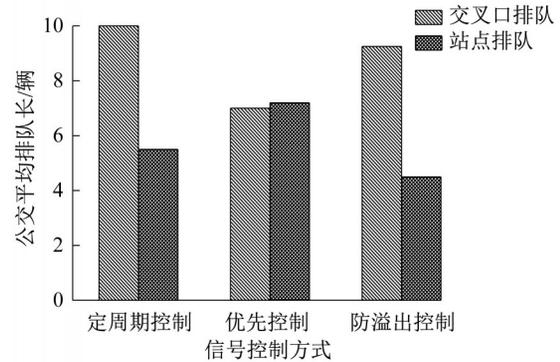


图6 不同控制方式下公交平均排队情况

Fig.6 Average bus queues with different control modes

达减少, 排队溢出逐渐消散, 此时防溢出控制与优先控制对公交排队的影响相同。在公交车正常到达阶段, 防溢出控制即可以执行定周期控制方案也可以执行优先控制体现出其灵活性。

2.2 准点分析

图8为公交车到站和离站时间曲线图, 从图中可以看出防溢出控制下公交离站时间与优先控制下总体一致, 这说明防溢出控制能够实现优先控制效果, 以保障公交准点性。注意到, 第60辆公交在优先控制和防溢出控制下的到站时间分别为1042s和1051s, 晚到9s。第61辆公交在优先控制和防溢出控制下的到站时间分别为1045s和1062s, 晚到17s。第62辆公交在优先控制和防溢出控制下的到站时间分别为1151s和1172s, 晚到21s。可以看出在防溢出控制下, 公交车到达站点时间可能会晚于优先控制10~20s左右, 但是离开时间几乎一致。说明防溢出控制方法能够在交叉口阻止溢出公交车辆进入, 防止出现排队溢出, 同时也能够实现公交优先的控制效果。因此所提控制方法能够有效的调整信号方案, 既可以防止公交集中进站需求超过站点服务能力产生溢出, 又可以使公交车运行更加准点。

2.3 公交延误分析

从图9中可以看出, 公交延误在定周期控制、公交优先控制和防溢出控制下的延误分别为122.4 s、

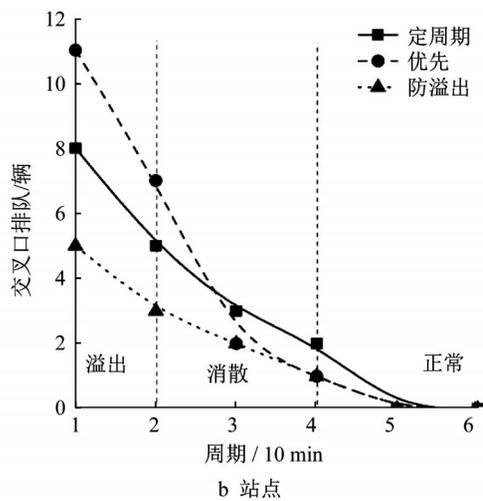
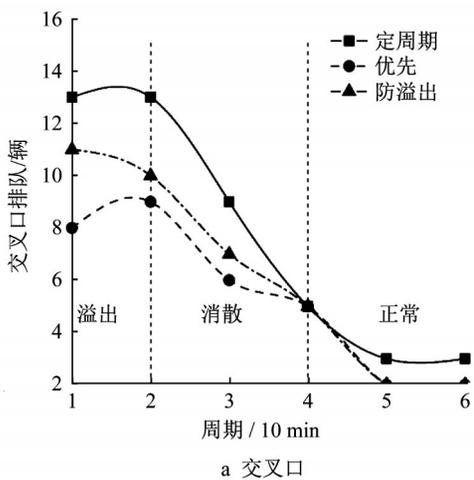


图7 各周期下交叉口和站点排队情况

Fig.7 Queues at the intersection and the bus stop in cycles

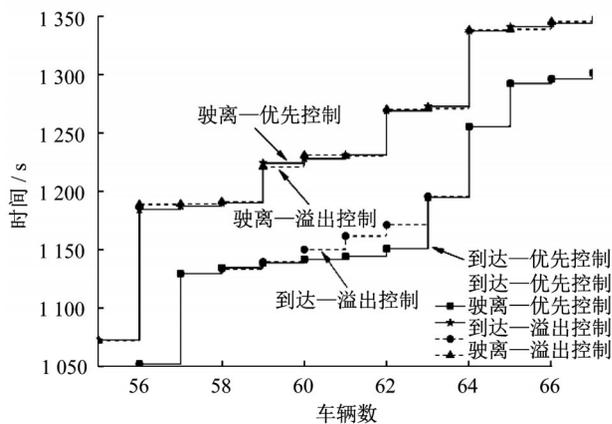


图8 公交车辆到站和离站时间分布图

Fig.8 Bus arrival and departure times

107.4 s和111.7 s。在站点排队溢出情况下,公交优先控制下的公交运行延误相比定周期控制降低了12.3%,而防溢出控制下的公交车延误仅比优先控

制上升了4.0%。说明防溢出控制可以有效阻止站点公交排队溢出车辆进入交叉口,同时不会过多增加公交车在交叉口处的延误。

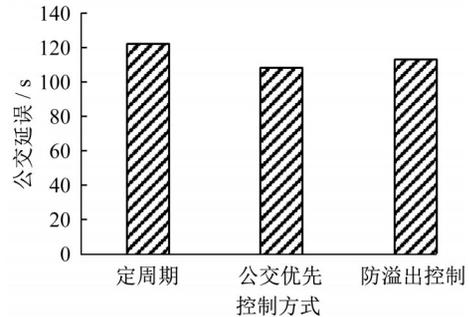


图9 不同控制方式下公交延误

Fig.9 Bus delays with different control modes

2.4 社会车辆延误分析

图10是不同控制方式下社会车辆在交叉口处的

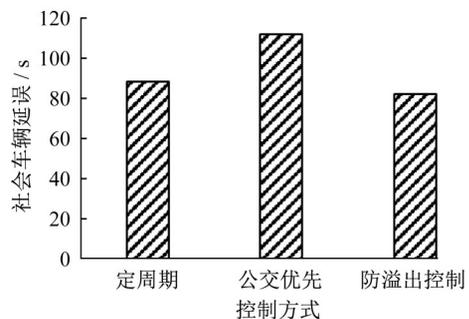


图10 不同控制方式下社会车辆延误

Fig.10 Social vehicle delays with different control modes

平均延误,定周期控制、优先控制和防溢出控制下的延误分别为88.1s、113.8s和82.6s。从图中可以看出,站点公交排队溢出后公交优先允许公交车继续进入交叉口,导致社会车辆延误大大增加,相比定周期控制增加29.2%。而防溢出控制则会将社会车辆延误降低到与定周期控制效果相当的水平,能够很好地保障社会车辆运行。

3 结论与建议

针对公交车进站排队溢出问题提出了一种新的控制方法。不同于传统的优先控制方式,该方法在固定周期信号配时的背景下,以溢出为限制条件,以准点为优先条件,既可以防止交叉口出现公交排队溢出,也可以提供定周期控制和公交优先控制。同时,针对不同的优先方案,可以通过信号补偿机制

回归到背景定周期方案。通过仿真分析验证了所提控制方法的有效性,包括:

(1)该方法能够有效解决站点排队溢出问题,防止公交集中进站超过站点服务能力。

(2)该方法能够提供定周期信号控制和公交优先控制,同时防止公交车辆排队溢出。由于其灵活性,该控制方法可以很好地部署在有多种控制需求的交叉口。

(3)与传统公交优先信号控制方案相比,该方法能够提高公交准点性,同时也能提高公交运行效率。

(4)该方法控制下的交叉口能在保障公交运行效率的前提下显著降低小汽车延误。

但是由于公交运行中会受到多种影响因素的作用,本文并没有对交叉口和站点以外的影响因素及控制优化方法进行研究。本文提出的控制方法仅面向交叉口远端公交停靠站,且在仿真中仅使用了一个典型的十字交叉口,我们将在后续研究中验证本文所提模型对于更多交叉口渠化、公交站点位置形式等的适用性。

参考文献:

- [1] 秦思. 多线路公交停靠站选型及站点优化技术研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
QIN S. Study on the selection of types of bus stops and site optimization technology for multi-line bus stops [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [2] CASEY R F, LABELL L N, PRENSKY S P, *et al.* Advanced public transportation systems: the state of the art [R]. Cambridge :U.S. Department of Transportation, 1991.
- [3] HERNANDEZ D, MUNOZ J C, GIESEN R, *et al.* Analysis of real-time control strategies in a corridor with multiple bus services[J]. Transportation Research Part B, 2015, 78:83.
- [4] BERREBI S J, CRUDDEN S Ó, WATKINS K E. Translating research to practice: Implementing real-time control on high-frequency transit routes [J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 2018, 111:213.
- [5] 邵俊, 杨晓光, 史春华. 部分锯齿形公交优先进口道的交通设计与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(10): 1175.
SHAO Jun, YANG Xiaoguang, SHI Chunhua. Signal design and analysis on partial indented bus priority approach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(10): 1175.
- [6] 付晶燕, 赵靖. 基于车均延误的快速公交停靠站布设位置[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(11):1676.
FU Jingyan, ZHAO Jing. Optimal layout of bus rapid transit stops at intersections based on delay analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(11):1676.
- [7] JIANG X K, YANG X G. Regression-based models for bus dwell time [C]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Qingdao: IEEE, 2014: 2858-2863.