

公交信号优先控制策略研究综述

A Review of Prioritizing Signal Strategies for Bus Services

马万经, 杨晓光

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

MA Wan-jing, YANG Xiao-guang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

摘要: 公交信号优先是提高公交系统运行速度和可靠性的重要手段。回顾公交信号优先控制40多年的研究成果,以总结该领域的总体研究脉络。对被动优先、主动优先、实时优先以及与其他设施相结合的信号优先控制策略进行了综述分析。研究表明,公交信号优先控制策略的发展历程是:控制的实时性逐步提高,优化要素的考虑逐渐全面,控制对象日益扩大,控制策略逐步系统化、适用性逐步增强。最后指出,公交信号优先控制多目标平衡、控制策略的协调与网络优先控制,以及控制与调度策略的协调优化是后续研究的重点,而公交车辆行程时间预测以及如何应对预测偏差带来的影响仍然是信号优先控制中的关键问题。

Abstract: Prioritizing signal timing for public transit vehicles effectively improves the reliability and travel speed of bus services. Through reviewing the research in the past 40 years, this paper summarizes the general study trend on the prioritizing signals for bus services. Particularly, the paper analyzes the four types of prioritizing signal strategies: passive, active and adaptive, and combination with other facilities. The analysis results show that the development of prioritizing signal for bus service has advanced into a practical control system that is real-time, comprehensive with control multiple objects. The paper concludes that the future research on signal priority for buses should focus on multi-objective, coordination, and network priority as well as the coordination between signal control and bus dispatching. The key issue is still bus travel time prediction and how to cope with the adverse effect of forecasting error.

关键词: 公共交通; 公交信号优先控制; 信号协调控制; 发车频率; 车头时距波动

Keywords: public transportation; prioritizing signals for bus services; signal coordination; frequency of bus service; headway deviation

中图分类号: U491.5⁺4

文献标识码: A

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目“专用道优先控制与公交调度协调优化方法研究”(50808142)

作者简介: 马万经(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 交通系统控制。E-mail: mawanjing@tongji.edu.cn

最早的公交信号优先控制是1967年文献[1]在洛杉矶所做的公交信号优先控制实验。在现实巨大需求和美好预期的驱动下, 公交信号优先控制理论逐渐吸引了交通控制领域、公共交通领域乃至交通设计和交通安全领域众多研究者的注意。早期公交信号优先控制研究倾向于将公交信号优先(bus signal priority)与强制信号优先(priority and preemption)归结为同一类问题。随着研究的深入, 二者的区别逐渐被指出^[2-3]。NTCIP(National Transportation Communications for ITS Protocol) 1202第二版给出了公交信号优先的定义: “在信号控制交叉口给予公交车辆相对于其他车辆的优先权, 这种优先不应导致相应的信号机脱离正常运行状态”。而强制信号优先的定义为“交通信号从正常状态切换到特殊状态, 以满足紧急救援车辆、轨道交通等的通行, 即需要中止正常的信号运行来提供特殊信号服务”^[2]。这两个定义从本质上体现了优先级思想: 一般公交车辆的优先级大于普通社会车辆, 紧急车辆(紧急救

援车辆、轨道交通等)的优先级最高。

1 控制策略的分类

文献[4]结合文献[5 – 7]相应观点和研究成果，将公交信号优先控制策略分为被动优先策略(passive priority strategies)、主动优先策略(active priority strategies)和实时优先策略(real-time priority strategies)，见表1，这一分类方法被广泛接受。文献[2]进一步对三种优先策略做出界定：1)被动优先。针对离线方案进行优化，不考虑交叉口是否有公交车辆到达，同时不需要车辆检测/优先申请生成系统。2)主动优先。为检测到的特定车辆提供优先，包括相位延长、提前激活相位、公交车辆专用相位等多种方法。3)实时优先。基于实时检测数据提供信号优先的同时，以某一指标为目标优化方案。公交信号优先控制策略还可以依据控制范围、优化目标及控制策略依托的设施类型进行划分，见图1。

1.1 被动优先

直观判断，被动优先在降低公交车辆延误上应有一定作用，但文献[6]以加拿大多伦多皇后大道为案例、利用 TRANSYT-7F 模型进行的研究表

明，被动优先在这一点上并没有明显作用。文献[6]认为这是由 TRANSYT-7F 模型本身的局限性以及假定车辆固定时刻、固定间隔到达车站决定的。而在实际运行中，受停靠时间、道路状况等影响，公交车辆到达车站的时刻是随机的。文献[5]研究了一种被动优先的公交信号周期优化模型，但没有描述模型的稳定性。文献[8]给出一种利用被动优先和主动优先策略进行干线协调控制的方法，指出公交车辆流量较大且运行状态稳定时，被动优先能实现较好的控制效果。文献[9 – 11]研究了基于时空优化和发车频率的被动优先方法，将被动优先扩展到交叉口时空资源组合优化和控制与静态调度的协调层面。文献[12 – 13]将被动优先策略与左转相位设计及公交停靠站的布局关联起来进行研究。目前尚无文献给出在常见的信号配时软件(如 PASSER, MAXBAND, SYNCHRO 或 SOAP 等)中整合被动优先策略的方法^[14]。

相对于主动优先和实时优先策略，国外被动优先策略的研究成果较少。这与欧洲特别是美国的应用背景即公交车辆流量较小有关，因为被动优先策略在流量较小时适应性较差^[2,11]。近年来，在中国等公交车辆流量较大的国家和地区，被动优先策略得到了一定发展。

表 1 公共汽车优先控制基本策略
Tab.1 Prioritizing signal strategies for bus services

策略类型	主要方法
被动优先策略	调整周期长度(adjustment of cycle length)
	重复绿灯(transit movement repetition in the cycle)
	绿灯时间分配(green time bias towards transit movement)
	相位设计(phasing design bias towards transit movement)
	针对公交运行的协调绿波(linking for transit progression)
主动优先策略	相位延长(phase extension)
	提前激活相位(early phase activation)
	公交车辆专用相位(special transit phase)
	相位压缩(phase suppression)
实时优先策略	延误优化(delay optimizing)
	交叉口控制(intersection control)
	网络控制(network control)

1.2 主动优先

主动优先策略随着公交信号优先控制研究的诞生而出现,是早期研究的重点,有很多研究成果。文献[15]提出的无条件优先策略能使公交车行程时间缩短25%,但在公交车发车频率较低的情况下,相交道路车辆延误增加。文献[1]对加州3.8英里(约6.1 km)道路上9个信号控制交叉口的公交信号优先控制系统分析发现,公交车行程时间减少23%。文献[16]通过建立微观仿真模型研究了5种优先控制策略:1)仅有绿灯延长;2)绿灯延长加红灯缩短,无恢复算法;3)绿灯延长加红灯缩短加恢复算法;4)红灯缩短,无恢复算法;5)红灯缩短加恢复算法。文献[17]提出一种新方法评价主动优先控制系统的效果,创造性地引入了感受延误(perceive delay)和预计延误(budgeted delay)两个参数,在公交信号优先控制评价中产生了很大影响。感受延误是实际延误在心理上的度量值,预计延误定义为行程时间(或延误)的平均值与标准差的和。研究发现,公交车预计延误(而非平均延误)的降低是公交信号优先控制更加可行的原因,即使公交车平均延误有

所增加,也可提供较好的服务(即延误的波动性减小)。文献[18]假设公交车辆到达交叉口时服从泊松分布,同时将绿灯时间的起始时刻作为变量,构建公交优先条件下交叉口公交车延误解析模型,结果表明:调整总的信号配时方案可提高公交优先的效益;公交优先方向社会车辆流量显著大于相交方向社会车辆流量时,公交信号优先带来的效益并不明显;公交车辆流量越大,效益越明显。文献[19]提出了实行公交信号优先控制的4个标准:1)人均延误降低;2)高峰时段公交车流量至少为10~15辆·h⁻¹;3)全天公交车双向流量不小于100辆;4)相交道路绿灯时间在满足最小绿灯时间的前提下可适当减少。文献[20]使用UTCS/BPS模型,发现公交信号优先控制带来的效益受信号相位结构和公交车站位置的约束:多相位信号使优先效益降低,随着公交优先相位的增加,信号协调效益消失,车均延误增加;公交车站设置在交叉口下游时,有利于发挥公交信号优先效益。文献[21]根据文献[17]的研究建议,在公交信号优先策略中引入了限制条件:仅当前一信号周期没有提供优先信号时,后一信号周期才

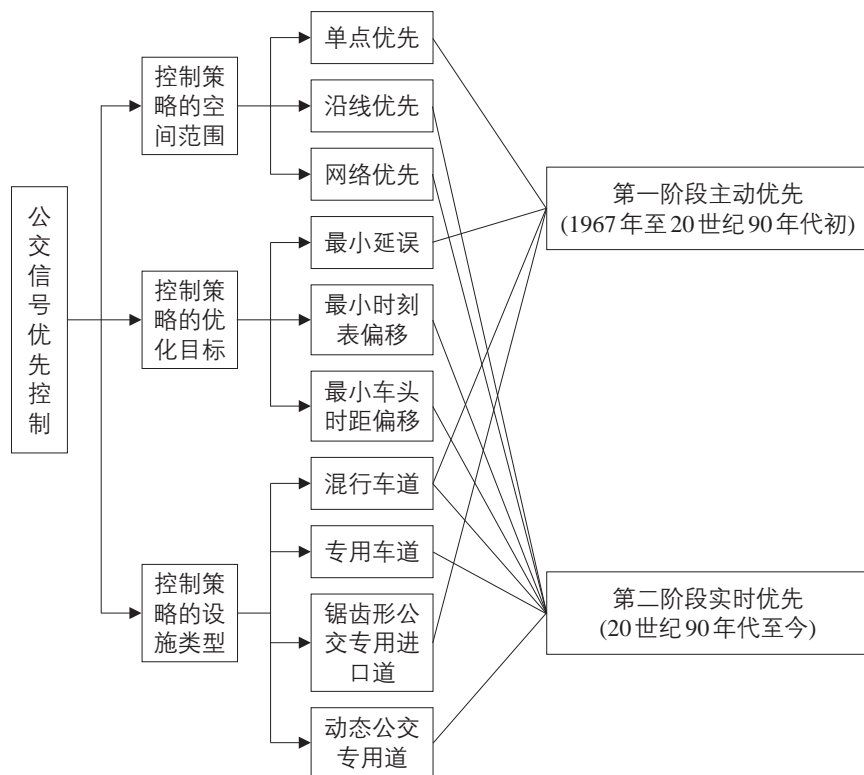


图1 公交信号优先控制策略及研究历程

Fig.1 The development of research on prioritizing signal strategies for bus services

能提供,并指出实施公交信号优先时必须权衡获得的效益与带来的交叉口通行能力损失。文献[21]是降低公交信号优先对非优先车流影响的典型研究。为了优化公交信号优先控制策略,后续研究逐渐考虑了交叉口上下游公交车站影响、道路等级和功能、交通是否拥挤等因素。

20世纪90年代中期起,主动优先策略研究逐渐被实时优先代替,研究成果较少。公交信号优先也由绝对优先阶段发展到相对优先阶段。越来越多的研究者开始考虑以时刻表或车头时距为依据的优先策略。从这一阶段起,国内学者开始陆续发表公交信号优先控制策略的研究成果:文献[22]研究了基于逻辑规则的控制方法,增加公交信号优先控制策略的多样性;文献[23-25]对主动优先控制逻辑作了改进。同时,公交信号优先控制策略的效益评价也得到了深入分析^[26]。

总体来看,主动优先控制策略围绕基本方法及其改进方法进行研究,并试图通过仿真和实践评价控制策略的效果,其总体研究框架见图2。引入补偿策略和限制策略的目的在于降低公交信号优先对社会车辆的不利影响,对于单点交叉口非优先相位而言,这两种策略会使社会车辆获得一定的效益,但同时也使本信号周期的公交车辆丧失获得优先的机会。单点交叉口优化范围的局限性使公交信号优先常常打断交叉口间社会车辆的信号协调。同时,由于公交信号优先策略相对独立,即在进行公交信号优先时较少考虑社会车辆的运行状态,主动优先控制系统尚不能对公交车辆与社会车辆的运行效益进行合理平衡与协调。主动优先控制策略的这些缺陷驱动了实时优先策略研究的开展。

1.3 实时优先

实时信号优先策略以文献[7,27]研究为标志性开端。文献[7]使用元胞自动机模型预测车辆行程时间、排队长度、饱和交通量以及信号运行状态,但没有考虑下一秒钟决策对未来长期控制效果的影响,而仅仅是为下一秒作出最优决策。文献[27]研究的SPPORT(Signal Priority Procedure for Optimization in Real Time)程序基于用户预先设定的交叉口请求绿灯事件的优先级列表运行,对几

套信号控制方案进行评价并从中找出最符合原定事件优先级的控制方案。由于SPPORT基于预先设定的优先级列表寻找方案,因而其生成的方案并非最优。

文献[28]将自适应公交调度(adaptive transit operation)策略和自适应交通控制(adaptive signal control)策略同时进行应用研究。自适应控制以公交车辆、社会车辆延误费用和社会车辆停车费用组合为目标函数优化控制方案。文献[8]指出影响公交优先策略选择及其效益发挥的因素有路网结构和特征、路网交通状态以及公交车辆发车频率与运行特征。文献[29]研究了公交车辆在交叉口的有条件优先方法,并在荷兰Eindhoven实施,结果显示,在绝对优先条件下社会车辆延误成倍增长,但在有条件优先下却没有明显变化。文献[30]研究了整合公交信号优先控制功能的自适应交通控制系统框架,指出公交信号优先与整个信号控制系统融为一体时才更有效,集协调控制、单点交叉口控制和公交优先控制为一体的控制系统能显著降低公交车辆延误,且对社会车辆影响较小。

文献[31]研究了紧急事件车辆优先的效益和损失情况,并把公交信号优先作为信号优先的一种情况进行研究。文献[32]将动态交通信号优化算法应用于公交信号优先,公交车辆在交叉口的到达时刻和驶离时刻都不再是常量,而是与时间相关的变量,公交优先请求根据实际交通流条件赋予适当权值。文献[33]研究了基于提前检测器和到达时间窗的公交优先控制算法,指出检测到的公交车辆的时刻与公交车辆实际到达停车线的时刻间隔较小,从而限制了提供优先的程度,特别是在行人过街清空时间较大时这种限制更为明显,这一研究是从控制策略角度应对公交车辆运行波动的典型案例。文献[34]提出一种基于再励学习思想以及智能体(Agent)的有条件公交信号实时优先控制算法,通过控制车头时距优化公交运行状况,与有条件优先算法相比,该控制算法能有效控制车头时距波动,同时对相交道路车辆的影响较小。

文献[35]评价分析了从各种公交信号优先状态到正常信号协调状态的过渡策略,但并没有得出某种过渡策略优于其他策略的结论。文献[36]

发现,在路网上实行实时公交信号优先会改变驾驶人路径选择行为,即会重新分配路网交通流。文献[37]应用仿真软件评价了公交信号实时优先控制策略。文献[38]运用优先图描述了双环(Dual Ring)结构,并以此建模优化包括公交优先在内的信号控制方案,给出数值算例比较分析了模型在处理多优先申请时的优越性,但其提出的整数规划模型没有考虑公交信号优先对社会车辆的影响。

国内公交信号实时优先研究大致始于20世纪末。文献[39]研究了混合交通条件下公交信号实时优先模式。几乎在同一时期,文献[40]研究了锯齿形公交专用进口道预信号与主信号的协调方法及延误计算方法。文献[41]在此基础上研究了公交预信号控制与设计的结合问题。文献[42]对预信号的设置方法作了进一步探索。文献[43]研究了信号控制交叉口公交优先信号的确定方法,提出了系统最优的线性规划模型。文献[44]分析了公交信号实时优先控制的有效交通量。文献[45-48]对公交信号实时优先的系统结构、控制算法、仿真评价等进行了一系列研究。文献[49]提出了以站间公交车辆行程时间偏差最小为

目标的交叉口群公交信号实时优先协调控制策略,同时研究了公交车辆“晚点”和“早到”两种情形,对比分析了控制策略对公交车辆延误和车头时距波动的影响。面对多申请问题,文献[50]和[51]分别提出了基于决策树的公交优先排序模型和动态规划模型,以处理公交车辆优先需求较多条件下的优先顺序。

公交信号实时优先控制研究历经10多年,一方面,对主动优先控制中遇到的问题,如公交车辆与社会车辆效益平衡、多申请排序等展开了深入研究;另一方面,开拓了包括基于规则、基于滚动优化和基于智能体等的优化控制方法。实时优先策略中,最小化公交车辆延误仍是最主要的研究目标,公交车辆时刻表延误通常作为判断是否需要进行实时优先的依据,其研究框架见图3。

1.4 与设施结合的控制策略

除了单独的公交优先信号控制研究外,在信号控制与设施结合层面也有一系列研究成果,比较具有代表性的有3类:1)动态公交专用车道(Intermittent Bus Lane, IBL);2)排队绕行车道(Queue Jump lane, QJL);3)公交专用车道动态优先(Bus Lane with Intermittent Priority, BLIP)。

文献[52]首次提出了动态公交专用车道,其基本思想为:当公交车道上无公交车辆时,所有车辆可共用公交车道和社会车道;当公交车辆到达时,社会车辆禁入公交车道;随着公交车辆的移动,后续社会车辆可以继续使用公交车道。该方法不要求公交车辆前的社会车辆离开公交车道,因此,提供动态公交专用车道时,须在交叉口采用公交信号优先策略。

排队绕行车道的基本思想为:当公交车辆到达有排队的交叉口时,可使用右转专用车道绕开排队车辆。文献[53]指出,该方法在配合公交信号优先后能显著降低公交车辆在交叉口的延误。

公交专用车道动态优先由文献[54]提出,并在PATH(Partners for Advanced Transit and Highways)计划的支持下推出了专项研究报告,其基本思路为:当公交车道无公交车辆时,所有车辆可共用公交车道和社会车道;当检测到公交车辆到达时,在公交车道一段范围内提前要求社会

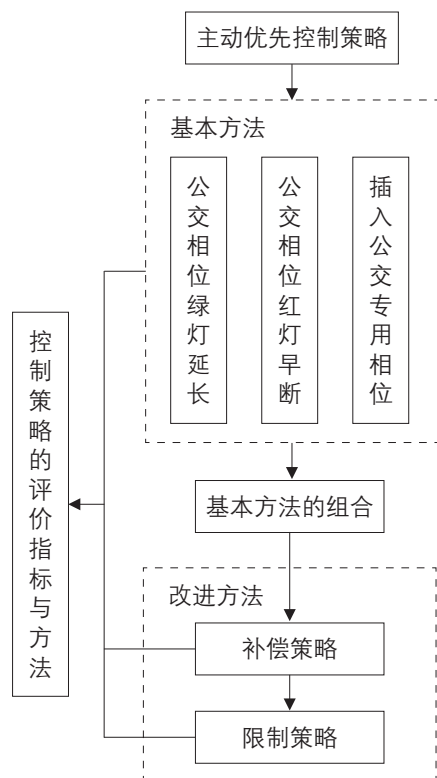


图2 主动优先控制策略研究框架

Fig.2 Framework of active signal priority for buses

车辆驶出; 与动态公交专用车道一样, 随着公交车辆的移动, 后续社会车辆又可以使用公交车道。当公交车辆的发车间隔在 10~15 min 或更大时, 这种方法比较适用。

此外, 交叉口附近公交车站的布局对信号优先效益也有一定影响。一般认为, 设置在进口道的公交车站对公交车辆到达交叉口时间预测的准确性会产生影响。

2 控制策略的发展历程

公交信号优先控制的研究历程可分为两个主要阶段, 即以主动优先为主的第一阶段和以实时优先为主的第二阶段。被动优先的研究在两个阶段中都有些成果, 但相对较少。

1) 第一阶段: 1967年至20世纪90年代初。

该阶段以文献[1]的公交信号优先控制实验为开端, 以降低交叉口延误为目标, 主要针对混行车道(公交车辆与社会车辆混行)研究单点交叉口主动优先策略, 研究成果在欧洲及美国得到了一定应用。20世纪80年代, 公交信号优先研究和实践转入低潮, 其原因可归结为: 公交信号优先系统不能较好地满足社会车辆需求, 经常打断社会车辆的信号协调, 社会车辆受到显著的不利影响^[8]。这一阶段的公交信号优先策略独立于社会车辆信

号控制策略, 且大多针对单点交叉口。研究结果没有很好地解决信号优先程度、优先频率等问题, 没能解决信号协调问题, 也没能在公交车辆和社会车辆的运行效益间找到平衡点。车辆信息检测手段及通信手段落后也是造成公交信号优先控制效益未能充分发挥的重要因素^[8, 27]。

2) 第二阶段: 20世纪90年代至今。

进入20世纪90年代后, 随着交通拥堵加剧以及公交优先相关技术的发展, 公交信号优先研究重新成为热点。这一阶段的研究主要从三方面展开: ①如何降低公交信号优先对社会车辆的影响; ②如何协调公交信号优先控制策略与社会车辆信号控制策略; ③如何将公交信号优先控制融入整个信号控制系统。这一阶段, 公交信号优先策略的控制对象逐渐从单点交叉口转向沿线相邻交叉口群, 控制目标逐渐从单纯追求公交车辆延误最小转向最小化性能指标(Performance Index, PI)值, 或最小化公交车辆时刻表延误以及车头时距偏移; 控制方法由逻辑判断转向基于规则和优化方法; 优先策略不再独立于社会车辆信号控制, 而是与社会车辆控制策略一起进行协调优化。该阶段的研究一定程度上缓解了第一阶段出现的问题, 并推动了UTOPIA/SPOT, SUPPORT等一系列具有公交信号优先控制功能的系统研发和应用。

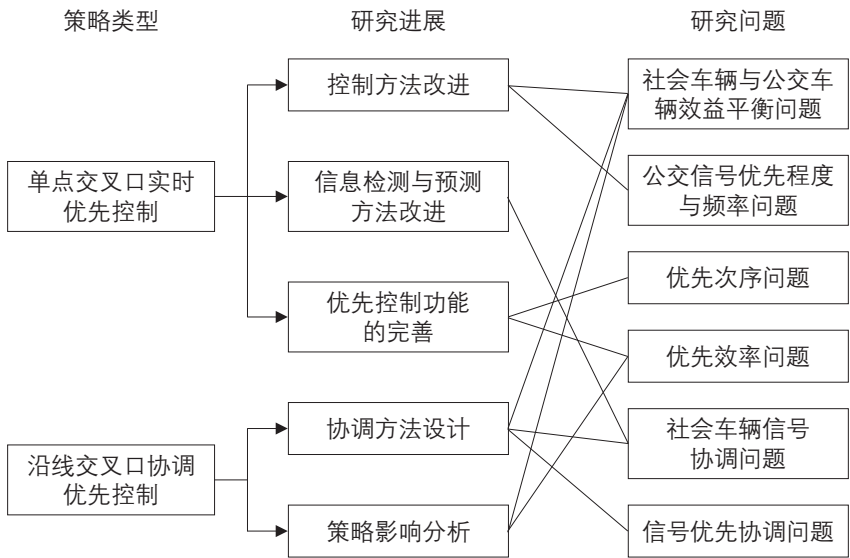


图3 实时优先控制策略研究框架
Fig.3 Framework of adaptive signal priority for buses

3 研究方向

公交信号优先控制策略研究在提高公交车辆行程速度、降低延误方面取得了很多成果,但仍有一些问题需要在未来研究中重点关注。

1) 公交信号优先控制效益与公交车辆、社会车辆的需求对比关系密切相关,在公交车辆流量较大时,多线路、多车辆优先权分配对公交信号控制效益亦有较大影响。如何在理论及实践上找到这一多目标优化问题的最佳解决途径,仍是后续研究的重点。

2) 在国内公交网络复杂、需求较大的背景下,相邻交叉口信号优先控制策略的协调以及网络公交信号优先控制问题等是受到普遍关注的问题,目前已获得国家“863”计划的立项。同时,在网络化背景下,如何评价公交信号优先的效益也是需要深入研究的问题。

3) 公交车辆到达交叉口停止线的确切时间是优化公交信号优先策略的基础条件,也是影响优先效益的关键因素。如何获得这一时间(预测)以及信号控制系统获得这一时间的最佳时刻(检测),对于控制方案优化、多申请排序等问题有重要影响。在某种程度上该问题可归结为面向信号控制的公交行程时间预测,其难点在于准确预测公交车辆到达车站的时间以及在交叉口的排队时间。

4) 大多数公交信号优先控制策略(包括相对优先策略),都以降低公交延误为目标(相对优先多以时刻表的偏移为依据),而忽略了对“早到”公交车辆控制策略的研究。对公交系统而言,早到车辆同样不利于控制系统的可靠运行,未来需要对这一方向作深入探索。

5) 公交车辆同时受运营调度系统和交通信号控制系统的调控。文献[50]初步研究了公交调度与信号优先的协调问题,但该问题的研究仍有待于进一步推进。

4 结语

40多年来,许多公交信号优先控制理论研究成果已在实践中得以应用。但是,理论研究和实

践均表明,已有的公交信号优先控制策略在控制对象特征把握、控制目标确定、控制系统结构以及控制方法等方面尚有许多不足。多目标平衡、协调与网络优先控制策略,以及公交调度策略与信号优先控制的协调优化是后续研究的重点。同时,公交车辆行程时间预测以及如何应对预测偏差带来的影响是公交信号优先控制研究需要重点关注的问题。

参考文献:

References:

- [1] Elias, Wilbur J. The Greenback Experiment-Signal Pre-emption for Express Buses: A Demonstration Project[R]. Report DMT-014, Sacramento: California Department of Transportation, 1976.
- [2] Bertini R L, Glasgow C, Peters J. An Overview of Transit Signal Priority[R]. Washington DC: ITS America, 2004.
- [3] Janice Daniel, Edward Lieberman, Raghavan Srinivasan. Assess Impacts and Benefits of Traffic Signal Priority for Busses [R]. FHWA-NJ-2004-013, Washington DC: FHWA, 2004.
- [4] Transit Cooperative Research Program. Improved Traffic Signal Priority for Transit[R]. TCRP PROJECT A-16, Washington DC: Transportation Research Board, National Research Council, 1998.
- [5] Sunkari S R, Beasley P S, Urbanik T, Fambro D B. Model to Evaluate the Impacts of Bus Priority on Signalized Intersections[J]. Transportation Research Record, 1995(1494): 117 - 123.
- [6] Yagar S. Efficient Transit Priority at Intersections [J]. Transportation Research Record, 1993(1390): 10 - 15.
- [7] CHANG Gang-len, Meenakshy Vasudevan, SU Chih-chiang. Bus-Preemption under Adaptive Signal Control Environments[J]. Transportation Research Board, 1995(1494): 146 - 154.
- [8] Alexander Skabardonis. Control Strategies for Transit Priority[DB/CD]. Washington DC: TRB, National Research Council, 2000.
- [9] 马万经, 杨晓光. 基于时空优化的单点交叉口公

- 交被动优先控制方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 86 - 90.
- MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Transit Passive Priority Control Method Based on Isolated Intersection of Optimization of Time-space[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 86 - 90.
- [10] 马万经, 杨晓光, 云美萍. 考虑公交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.
- [11] MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. A Passive Transit Signal Priority Approach for Bus Rapid Transit System[C]//ITSC 2007, Seattle: IEEE, 2007: 413 - 418.
- [12] 吴志周, 马万经, 杨晓光. 考虑信号优先的相邻公交停靠站最佳布置方法[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 146 - 150.
- WU Zhi-zhou, MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Optimal Location of Adjacent Bus Stops on Condition of Bus Signal Priority[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(1): 146 - 150.
- [13] MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Design Method of U-turn between Adjacent Intersections for Bus Priority[DB/CD]. Chengdu: ICCLTP, 2008.
- [14] Meenakshy Vasudevan. Robust Optimization Model for Bus Priority under Arterial Progression[D]. Washington DC: University of Maryland, 2005.
- [15] Ludwick J S. Bus Priority System: Simulation and Analysis, Final Report, The MitreCorporation[R]. UTMVA-06-0026-1, Washington DC: US Department of Transportation, 1976.
- [16] Vincent R A, Cooper B R, Wood K. Bus-Actuated Signal Control at Isolated Intersections-Simulation Studies of Bus Priority[R]. Report 814, UK: Transport and Road Research Laboratory, 1978.
- [17] Richardson A J, Ogden K W. Evaluation of Active Bus-priority Signals[J]. Transportation Research Record, 1979(718): 5 - 12.
- [18] Jacobson J, Sheffi Y. Analytical Model of Traffic Delays under Bus Signal Preemption: Theory and Application[J]. Transportation Research, 1981, 15B(2): 127 - 138.
- [19] Roark, John J. Synthesis of Transit Practice-Enforcement of Priority Treatment for Buses on Urban Streets [R]. Washington DC: National Cooperative Transit Research & Development Program, TRB, National Research Council, 1982.
- [20] Benevelli, David A, Essam Radwan A, Jamie W, Hurley Jr. Evaluation of a Bus Preemption Strategy by Use of Computer Simulation[J]. Transportation Research Record, 1983(906): 60 - 67.
- [21] Heydecker B G. Capacity at a Signal-controlled Junction Where There Is Priority for Buses[J]. Transportation Research, 17B(5): 341 - 357.
- [22] 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.
- [23] 别一鸣, 宋现敏, 朱慧, 王殿海. 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(21): 65 - 69.
- BIE Yi-ming, SONG Xian-min, ZHU Hui, WANG Dian-hai. Bus Priority Signal Control for Signalized Intersection without Bus Lane[J]. Computer and Communications, 2009, 27(21): 65 - 69.
- [24] 李赫楠. 单个交叉口公交信号优先控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- LI He-nan. Research on Methods of Transit Priority Signal Control of Isolated Intersection[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [25] 李凤, 王殿海, 杨希锐. 单点公交被动优先下信号配时方法研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27

- (3): 61 - 64.
- LI Feng, WANG Dian-hai, YANG Xi-rui. Signal Timing Method for Transit Passive Priority at an Isolated Intersection[J]. Computer and Communications, 2009, 27(3): 61 - 64.
- [26] 马万经, 杨晓光. 单点公交优先控制策略效益分析与仿真验证[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3309 - 3311.
- MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Efficiency Analysis of Transit Signal Priority Strategies on Isolated Intersection[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(12): 3309 - 3311.
- [27] Yagar S, Han B. A Procedure for Real-Time Signal Control that Considers. Transit Interference[J]. Transportation Research, 1994, 28B(4): 315 - 331.
- [28] LIN Guey-Shii, LIANG Ping, Paul Schonfeld, Robert Larson. Adaptive Control of Transit Operations[R]. Maryland: Transportation Studies Center University of Maryland, 1995: 6 - 10.
- [29] Furth P G, Muller T H J. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption[J]. Transportation Research Record, 2000(1731): 23 - 30.
- [30] Meenakshy Vasudevan. Robust Optimization Model for Bus Priority under Arterial Progression[D]. Maryland: University of Maryland, 2005.
- [31] Gene M, McHale, John Collura. Improving Emergency Vehicle Traffic Signal Priority System Assessment Methodologies[DB/CD]. Washington DC: TRB, National Research Council, 2003.
- [32] LIU Hong-chao, Alexander Skabardonis, ZHANG Wei-bin. A Dynamic Model for Adaptive Bus Signal Priority[DB/CD]. Washington DC: TRB, National Research Council, 2003.
- [33] Yann Wadjas, Peter G Furth. Transit Signal Priority Along an Arterial Using Advanced Detection[DB/CD]. Washington DC: TRB, National Research Council, 2003.
- [34] Kenny Ling. Transit Headway Control Through Conditional Signal Priority: A Micro-Simulation Based Approach Using Reinforcement Learning [D]. Toronto: University of Toronto, 2003.
- [35] Jon Obenberger, John Collura. Transition Strategies to Exit Preemption Control: State-of-the-Practice Assessment[DB/CD]. Washington DC: TRB, National Research Council, 2001.
- [36] Agrawal Bhuwan Bhaskar, Waller S Travis, Athanasios Ziliaskopoulos. Modeling Approach for Transit Signal Preemption[J]. Transportation Research Record, 2002(1791): 13 - 20.
- [37] François Dion, Rakha H. Integration of Transit Signal Priority With in Adaptive Traffic Signal Control Systems[DB/CD]. Washington DC: TRB, National Research Council, 2005.
- [38] Head, Larry, Gettman, Douglas, WEI Zhi-ping. Decision Model for Priority Control of Traffic Signals[J]. Transportation Research Record, 2006 (1978): 169 - 177.
- [39] 谭永朝. 混合交通条件下的公交优先模式[D]. 上海: 同济大学, 1997.
- TAN Yong-chao. Transit Priority Method with Mixed Traffic[D]. Shanghai, Tongji University, 1997.
- [40] WU Jian-ping, Nick Hounsell. Bus Priority Using Pre-signals[J]. Transportation Research Part A, 1998(32): 563 - 583.
- [41] 邵俊. 公共汽车交通专用道(路)系统设计与评价方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- SHAO Jun. Design and Evaluation Methodologies for Exclusive Bus Lane System[D]. Shanghai: Tongji University, 2000.
- [42] 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(5): 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(5): 78 - 82.
- [43] 杨晓光, 林瑜, 杭明升. 信号控制交叉口公共汽车优先信号确定方法研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(S1): 101 - 104.

(下转第16页)

参考文献:

References:

- [1] Jean-Marc BLOSSEVILLE, Marie-Hélène MASSOT, Morgan MANGEAS. Praxitèle, un concept, un service, une expérimentation, bilan d' un prototype [J]. Transport Environment Circulation, 2000(161): 17 - 25.
- [2] Michael FLAMM. L'industrialisation de l'auto-partage

en Suisse[J]. Flux, 2008(72/73): 152 - 160.

- [3] Sylvie MATHON. Le stationnement résidentiel sur l'espace public: état des lieux, problèmes et perspectives [D]. Paris: Université Paris XII, 2008.
- [4] Christophe GUILLUY et Christophe NOYE. Atlas des nouvelles fractures sociales en France. Paris: Autrement, 2004.

(上接第78页)

- YANG Xiao-guang, LIN Yu, HANG Ming-sheng. Study of Solution for Transit Priority Signal[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14 (S1): 101 - 104.
- [44] 关伟, 申金升, 葛芳. 公交优先的信号控制策略研究[J]. 系统工程学报, 2001, 16(3): 176 - 180.
- GUAN Wei, SHEN Jin-sheng, GE Fang. Research on Traffic Signal Control Strategy for Bus Priority [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(3): 176 - 180.
- [45] 阴炳成. 公交专用道信号优先控制方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- YIN Bing-cheng. Methodologies of Transit Signal Priority for Exclusive Bus Lane[D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [46] 王伟, 杨新苗, 陈学武. 城市公共交通系统规划方法与管理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [47] 季彦婕, 邓卫, 王伟, 张卫华. 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, 21(12): 118 - 122.
- JI Yan-jie, DENG Wei, WANG Wei, ZHANG Wei-hua. Study on the Design of Signal Phase Based on Bus Priority Intersections[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(12): 118 - 122.
- [48] 杨兆生, 刘红红. 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.
- YANG Zhao-sheng, LIU Hong-hong. Control Strategies of Urban Transit Signal Priority[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5): 121 - 124.
- [49] 马万经, 吴志周, 杨晓光. 基于交叉口群公交优先协调控制方法研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 105 - 111.
- MA Wan-jing, WU Zhi-zhou, YANG Xiao-guang. A Coordinated Intersection-group Bus Signal Priority Control Approach[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 105 - 111.
- [50] 马万经. 公交专用道信号优先控制理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- MA Wan-jing. Transit Signal Priority Control Theories for Exclusive Bus Lane [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [51] 马万经, 杨晓光. 基于动态规划的公交信号优先多申请排序模型[J]. 清华大学学报, 2009, 49 (12): 1939 - 1943.
- MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. Serve Sequence Optimization of Multiple Bus Priority Requests Based on Dynamic Programming[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(12): 1939 - 1943.
- [52] Viegas J, Lu B. Widening the Scope for Bus Priority with Intermittent Bus Lanes[J]. Transportation Planning and Technology, 2001(24): 87 - 110.
- [53] ZHOU Guan-wei, Gan Albert, ZHU Xiao-xia. Determination of Optimal Detector Location for Transit Signal Priority (TSP) with Queue Jumper Lanes[J]. Transportation Research Record, 2006 (1978): 123 - 129.
- [54] Michael Eichler, Carlos F. Daganzo. Bus Lanes with Intermittent Priority: Strategy Formulae and An Evaluation [J]. Transportation Research Part B, 2006, 40(9): 731 - 744.