

网联环境下基于可选相位优化框架的公交信号优先

殷炬元¹, 黎淘宁², 孙 剑¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市公安局交通警察总队, 上海 201315)

摘要: 提出了面向公交信号优先(TSP)的可选相位优化框架, 并开发了实时公交信号优先算法。对双环相位结构进行改进, 通过加入数个可选公交相位组成多种相位配置场景, 可融合相位的重现、调换和插入等多种调整功能, 实现绿灯时间、周期和相序同时优化。建立混合整数线性规划模型, 设计基础配时偏差线性化表征社会车效益, 降低计算复杂度。案例研究显示, 提出的算法与主动优先相比, 公交的延误和停车次数分别降低 33.1% 和 15.1%, 社会车方面分别降低 17.7% 和 12.6%。

关键词: 交通工程; 公交信号优先(TSP); 实时信号控制; 网联车; 混合整数线性规划; 相序优化

中图分类号: U491. ; 232

文献标志码: A

Transit Signal Priority Based on Optional Phase Optimization Framework in Connected Vehicle Environment

YIN Juyuan¹, LI Taoning², SUN Jian¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Bureau of Public Security Traffic Police Corps, Shanghai 201315, China)

Abstract: An optional phase optimization framework for transit signal priority (TSP) was proposed and a real-time TSP algorithm was developed. Dual-ring phase structure was improved by adding optional transit phases for multiple phase settings to integrate phase repetition, reverse and insertion and other functions. Hence, the green times, cycle length and phase sequence can be optimized simultaneously. A mixed integer linear programming signal control optimization model was built, using the deviation of background signal timings as vehicle loss function, which was linearly designed and computationally cost-effective. Results of a case study show that compared with the active TSP algorithm, the proposed algorithm reduces transit delay and stops by

33.1% and 15.1% respectively, and vehicle delay and stops by 17.7% and 12.6% respectively.

Key words: traffic engineering; transit signal priority (TSP); real-time signal control; connected vehicle; mixed integer linear programming; phase sequence optimization

公交信号优先是公共交通、交通控制和智能网联等领域的热点^[1]。传统的公交信号优先(TSP)主要依赖定点检测器获取公交动态信息, 如在公交车道停车线上下游设置感应线圈检测器以实施优先策略^[2-3]。此类方法的局限性在于检测器布设数量有限, 难以兼顾公交到达预测的及早性和精确性要求, 从而限制了优先效果^[4]。

近年来, 随着网联汽车和移动通信等技术的发展, 网联环境所能提供的交通检测数据引起关注, 如车载定位、手机定位和网联车通信等系统采集的交通数据, 包括车辆实时的位置、速度、加速度和乘客信息等。研究者对网联数据在交通管理和控制方面的应用做了大量探索, 包括交通流量^[5]、密度^[6]、车辆排放^[7]和排队长度^[8]等交通状态信息的估计以及交通信号控制的优化^[9-10]。

网联环境也为公交信号优先的升级带来了重要机遇。比起传统的依赖定点检测的公交优先方法, 网联环境下公交能够实时连续地上传位置、速度和乘客数量等信息, 有助于提升公交到达时间预测精度以及将人均效益纳入考虑, 从而提高公交信号优先效果^[11-13]。此外, 先进的网联技术能够更好地实现速度引导^[14-15]、驻站时间控制^[16-17]以及车辆间协调和时空一体优化^[16]等公交优先策略。虽然网联技术为公交信号优先研究提供了新的思路, 但是目前仍需面对以下 2 个关键问题:

收稿日期: 2022-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(52125208, 52232015); 上海市科委项目(22dz1203200)

第一作者: 殷炬元(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为智能交通管理与控制。E-mail: yjy_tongji@qq.com

通信作者: 孙 剑(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通、交通仿真。

E-mail: sunjian@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

(1) 公交优先对其他车流带来的负效益。给予公交优先权难免会对非公交流向社会车的效益造成损害^[13], 使用社会车的延误来表征这种负效益是目前最普遍的做法^[14,18-19]。然而, 延误的计算公式复杂, 会产生混合整数非线性规划(MINP)问题而降低计算效率, 同时延误的计算值与实际值通常相差较大, 尤其在过饱和条件下, 难以估计误差对控制效果的影响^[20]。使用饱和度代替延误^[4,21]能够在一定程度上减小模型的复杂度, 但仍不能避免MINP问题。

(2) 信号控制仍有优化空间。按照《安徽省城市道路交叉口信号控制设计规范》(DB34/T 2423—2015)提出的控制等级划分, 现有的公交信号优先研究对于信号控制调整手段考虑较少, 大多停留在Ⅱ—Ⅳ级。如: 固定周期和相序, 仅调整绿灯时间^[11-15,21-22]; 固定绿灯时间和周期, 仅切换相位^[2]; 固定相序, 仅调整周期和绿灯时间^[23]等。充分挖掘信号控制的优化空间, 整合多种信号控制手段, 并以模型最优为依据, 对于提高公交信号优先效果具有重要意义。

提出了一种网联环境下基于可选相位优化框架的实时公交信号优先算法。对经典双环相位结构进行改进, 提出一种以相序深度优化为特色的框架, 通过加入数个可选公交相位组成多种备选的相位配置场景, 在优化模型中整合了相位重现、相位调换和相位插入等多种相序调整方式; 利用网联环境提供的实时公交到达信息, 将公交的所有到达、离开情形同各相位绿灯时间、周期时长和相序等信号控制要素相关联, 转化为模型的约束条件, 实现以上要素的同时优化; 将线性的基础配时偏差作为社会车效益函数以设计优化目标, 并结合场景离散化方法, 将原问题转化为求解一组混合整数线性规划(MILP)问题, 降低了模型复杂度, 满足了公交实时优先计算效率要求。最后, 在城市交叉口高峰流量场景实验中验证了算法的有效性。

1 方法概述

以单个交叉口及其进口道为研究范围, 对问题的背景信息作以下设定:

(1) 以典型十字路口为例, 共有 8 个信号相位, 对应 8 个受信号控制的流向(右转均不受信号控制), 即东直、西左、北直、南左、西直、东左、南直和北左, 表示为 Φ_i , 其中 i 表示流向或者相位的索引。

(2) 东西方向直行各设有一条公交专用道, 公交与同流向的社会车在同相位通行。

(3) 网联环境能够提供每辆公交实时的预计到达停车线的时刻, 表示为 A_n , 其中 n 表示公交的索引。

(4) 基础配时信息为已知输入, 即各个相位的绿灯时间 G_i^{base} 、周期 C^{base} 。基础配时是指在不考虑公交优先的情况下, 根据当前或历史交通运行信息制定的最优配时方案。根据前文可知, 网联环境可提供当前交通状态的估计以及信号控制的优化, 其输出结果能够作为基础配时与本算法对接。本研究不在此做详细探讨, 相关研究可见文献[5,8-10]。

本研究提出方法的概览如图 1 所示。以滚动优化的形式, 每隔一定时间或者在特定事件发生时, 对未来一个周期的总时长、各相位绿灯时间以及相位顺序和结构进行优化。

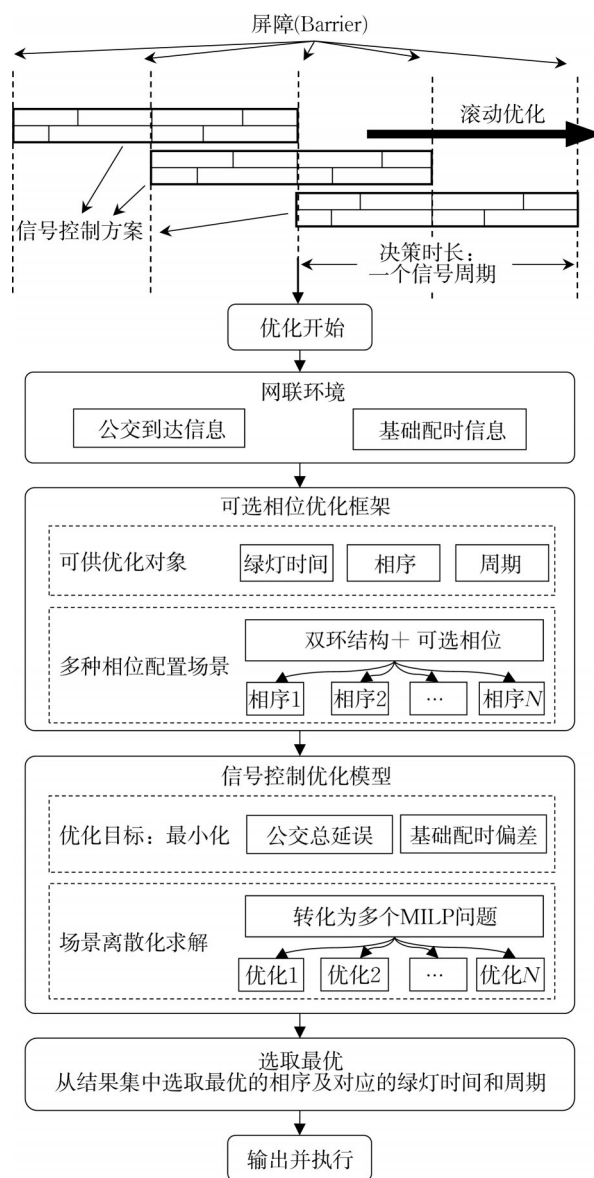


图 1 方法概览

Fig.1 Overview of the method

2 可选相位优化框架

双环相位结构是由美国提出的经典信号控制相位结构框架,已被学术界和工业界广为采用,标准形式如图2所示。双环相位结构的特点在于环1和环2在一

个周期内各包含4个冲突相位和2个屏障(Barrier),东西方向的4个相位处于屏障1内,南北方向的4个相位处于屏障2内,各屏障内的相位时间可调整但需保证屏障处的相位开始或结束时刻相等。双环结构因其良好的适用性和灵活性,也被公交信号优先领域广泛使用。

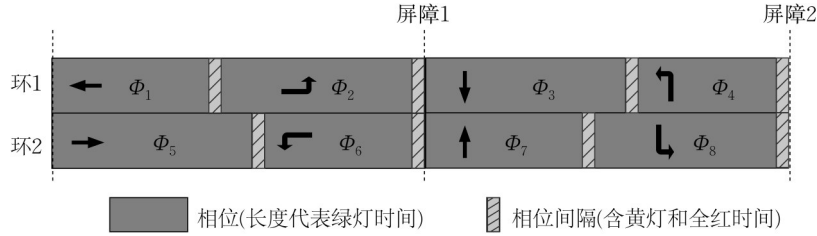


图2 双环相位结构

Fig.2 Dual-ring phase structure

在标准双环结构的基础上做以下改进： Φ_1 和 Φ_5 原为东直和西直相位，同时也服务于同流向公交，为使公交尽快通过交叉口，允许 Φ_1 和 Φ_5 在同一信号周期内被选择激活最多3次，称这些可能被选择的相位为可选相位，表示为 Φ_{1a} 、 Φ_{1b} 、 Φ_{1c} 和 Φ_{5a} 、 Φ_{5b} 、 Φ_{5c} ，因此环1和环2的默认相位顺序分别为 $(\Phi_{1a}) \rightarrow \Phi_2 \rightarrow (\Phi_{1b}) \rightarrow \Phi_3 \rightarrow (\Phi_{1c}) \rightarrow \Phi_4$ 和 $\Phi_{5a} \rightarrow \Phi_6 \rightarrow$

$(\Phi_{5b}) \rightarrow \Phi_7 \rightarrow (\Phi_{5c}) \rightarrow \Phi_8$ ，括号表示可选。如何设置这些可选相位是算法需要决策的内容，如图3所示。注意，由于增加了可选相位，相位总数变为12，所有相位索引的集合记为 Ω^{all} ： $\{1a, 1b, 1c, 2, 3, 4, 5a, 5b, 5c, 6, 7, 8\}$ ，可选相位索引的集合记为 Ω^{opt} ： $\{1a, 1b, 1c, 5a, 5b, 5c\}$ ，但流向的数量保持不变，其索引的集合记为 Ω^{m} ： $\{1, 2, \dots, 8\}$ 。

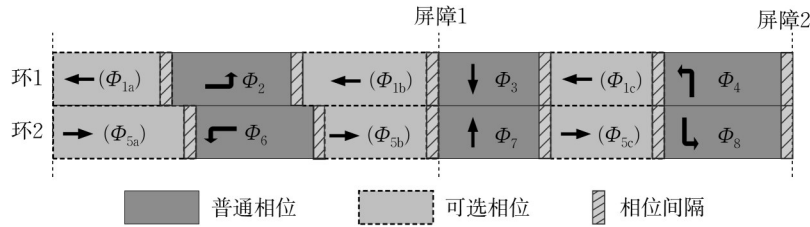


图3 可选相位优化框架

Fig.3 Optional phase optimization framework

用0-1变量 ρ_i 表示可选相位 Φ_i 是否设置，1表示设置，0表示不设置，则 $\rho = (\rho_i, i \in \Omega^{\text{opt}})^T$ 即为算法需要决策的变量之一。为了避免将 ρ 作为决策变量代入模型导致复杂的MINP问题，本算法采用场景离散化方法，将 ρ 所有取值情况离散为有限数量场景，并作为已知量代入每个场景，这样就转化为求解多个MILP问题。获得各个场景的最优值和最优解后，再从中选取最优场景，则该场景对应的相位设置情况和绿灯时间即为本次决策输出的最优配时方案。

为了使相位优化更加合理，对 ρ 取值作出以下规定： ρ_{1a} 与 ρ_{1b} 不能同时为零， ρ_{5a} 与 ρ_{5b} 同理； ρ_{1c} 与 ρ_{5c} 必须同时为0或1。因此，可行的相位设置场景共有18种，如 $\rho = (1, 1, 1, 0, 1, 1)^T$ 即为其中一种。

该框架的特点在于对双环相位结构的适用性和

功能性进行了拓展。在该框架下，周期、绿灯时间和相序可同时优化，并且在相序方面实现了深度优化，用数学模型整合了多种常见的基于规则式的相位调整手段，如相位重复、相位调换和相位插入等，使相位调整方式更加灵活而合理，如图4所示。

3 信号控制优化模型

3.1 优化目标

算法优化模型的目标函数为

$$\min F = \gamma F^{\text{bus}} + (1 - \gamma) F^{\text{car}} \quad (1)$$

式中： F^{bus} 是公交车效益函数； F^{car} 是社会车效益函数； γ 是权重调节系数，取值在0到1之间，代表管理者对于2种竞争关系的效益在优化目标中的权衡。

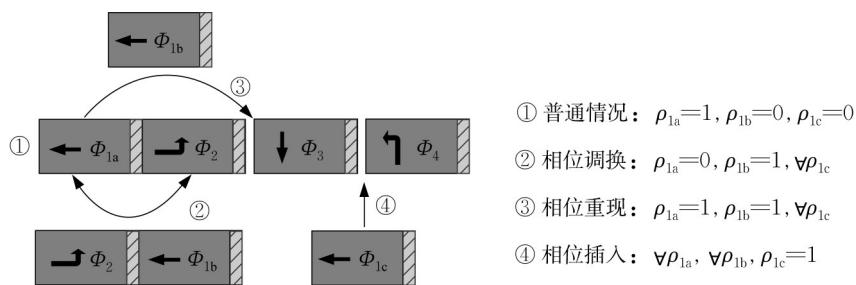


图4 框架内包含的多种相位调整方式

Fig.4 Multiple types of phase adjustment in the framework

γ 取值越大,公交优先效果越明显,反之,社会车效益维护越明显。实践中可根据仿真实验和历史经验确定 γ 取值。 F^{bus} 和 F^{car} 的计算式如下所示:

$$F^{\text{bus}} = \sum_{n \in B^{\text{all}}} d_n \quad (2)$$

$$F^{\text{car}} = \frac{\text{Card}(\Omega^{\text{m}})}{\sum_{i \in \Omega^{\text{m}}} G_i^{\text{base}}}.$$

$$\sum_{i \in \Omega^{\text{m}}} |C^{\text{base}}(G_i + G_i^{\text{pre}}) - G_i^{\text{base}}(C + C^{\text{pre}})| \quad (3)$$

式中: d_n 是第 n 辆公交的延误; B^{all} 是当前决策所考虑的全部公交索引的集合; G_i 是 Φ_i 的绿灯时间; C 是周期时长; G_i^{pre} 是 Φ_i 上一周期的绿灯时间; C^{pre} 是上一个周期时长; $\text{Card}(\Omega^{\text{m}})$ 是求 Ω^{m} 中元素个数; C^{base} 是基础配时中的周期时长; G_i^{base} 是基础配时中 Φ_i 的绿灯时间。

F^{bus} 用公交总延误表征,公交总延误越小,公交效益越高。为了简化公交延误的计算,不考虑加速以及排队形成和消散部分的延误。

为了应对使用延误表征社会车效益较为复杂的问题,算法设计了基础配时偏差作为 F^{car} ,如式(3)所

示。由于基础配时为不考虑公交优先情况下的社会车效益最优,公交优先引起的偏差必定导致社会车效益下降,因此该偏差是社会车效益的间接体现,偏差越小,社会车效益越高。 F^{car} 中含有上一周期已发生的绿灯时间和周期,是为了使当前优化对历史结果具备记忆性,从而有利于滚动优化的稳定性。例如,若上一周期为 G_i 分配过小,则当前周期会倾向于为 G_i 分配更多使两周期的平均值较为接近 G_i^{base} ,从而避免某些相位在滚动优化中被持续增长或压缩。

对式(3)中绝对值项做进一步线性化处理以成为MILP问题,目标函数如下所示:

$$\min F = \gamma \sum_{n \in B^{\text{all}}} d_n + (1 - \gamma) \sum_{i \in \Omega^{\text{m}}} (k_i - h_i) \quad (4)$$

式中: k_i 和 h_i 是引入的用于绝对值项线性化的辅助变量。因此,以基础配时偏差作为 F^{car} 既能有效表征社会车效益,达到调节公交和社会车效益的目的,又避免了非线性问题带来的复杂性,提高计算性能。

3.2 决策变量

优化模型的决策变量如表1所示。

表1 决策变量

Tab.1 Decision variables

变量	含义	单位	变量类型
$g_i, i \in \Omega^{\text{all}}$	Φ_i 的绿灯时间	s	整数
C	周期时长	s	整数
$d_n, n \in B^{\text{all}}$	第 n 辆公交的延误	s	连续
$\delta_{n,i}, n \in B^{\text{all}}, i \in \Omega^{\text{opt}}$	第 n 辆公交是否在 Φ_i 通过,1代表是		0-1整数
$k_i, i \in \Omega^{\text{m}}$	用于计算 F^{car} 的辅助变量		
$h_i, i \in \Omega^{\text{m}}$			连续

注意 G_i 与 g_i 的区别: G_i 是原始双环结构中 Φ_i 的绿灯时间,而 g_i 是可选相位优化框架下 Φ_i 的绿灯时间,后者是实际上的决策变量。两者之间的对应关系如下所示:

$$G_1 = \sum_{i \in \{1a, 1b, 1c\}} \rho_i g_i \quad (5)$$

$$G_5 = \sum_{i \in \{5a, 5b, 5c\}} \rho_i g_i \quad (6)$$

$$G_i = g_i, i = 2, 3, 4, 6, 7, 8 \quad (7)$$

3.3 约束条件

(1)绿灯时间上下限为

$$g_i \leq g_i^{\text{max}}, i \in \Omega^{\text{all}} \quad (8)$$

$$g_i \geq g_i^{\min}, i \in \Omega^{\text{all}} \quad (9)$$

式中: g_i^{\max} 和 g_i^{\min} 分别是 Φ_i 绿灯时间的上下限。 g_i^{\min} 要保证行人和非机动车的最小通过时间。

(2) 周期上下限为

$$C \leq C^{\max} \quad (10)$$

$$C \geq C^{\min} \quad (11)$$

$$C \leq C^{\text{base}} + \Delta C \quad (12)$$

$$C \geq C^{\text{base}} - \Delta C \quad (13)$$

式中: C^{\max} 和 C^{\min} 分别为周期的上下限; ΔC 为周期寻优范围。式(12)和式(13)表示只在 C^{base} 上下浮动 ΔC 的范围内搜寻最优周期。

(3) 双环周期约束为

$$\sum_{i \in \{1a, 1b, 1c\}} \rho_i (g_i + I_i) + \sum_{i \in \{2, 3, 4\}} (g_i + I_i) = C \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \{5a, 5b, 5c\}} \rho_i (g_i + I_i) + \sum_{i \in \{6, 7, 8\}} (g_i + I_i) = C \quad (15)$$

式中: I_i 是相位间隔, 包含黄灯和全红时间。

(4) 双环屏障约束为

$$g_2 + I_2 + \sum_{i \in \{1a, 1b\}} \rho_i (g_i + I_i) = g_6 + I_6 + \sum_{i \in \{5a, 5b\}} \rho_i (g_i + I_i) \quad (16)$$

$$\rho_{1c} (g_3 + I_3) = \rho_{5c} (g_7 + I_7) \quad (17)$$

$$\rho_{1c} (g_{1c} + I_{1c}) = \rho_{5c} (g_{5c} + I_{5c}) \quad (18)$$

式(16)代表双环的屏障1相同。式(17)和式(18)表示若同时设置 Φ_{1c} 和 Φ_{5c} , 因 Φ_3 、 Φ_4 、 Φ_7 、 Φ_8 与 Φ_{1c} 、 Φ_{5c} 是冲突方向, 则不能存在重合; 若都不设置, 则该约束不存在。

(5) 若当前场景不设置 Φ_i , 则公交不可能在 Φ_i 通过。

$$(1 - \rho_i) \sum_{n=1}^N \delta_{n,i} = 0, i \in \Omega^{\text{opt}} \quad (19)$$

(6) 若公交来自东直流向, 则不可能在 Φ_{5a} 、 Φ_{5b} 和 Φ_{5c} 通过; 若公交来自西直流向, 则不可能在 Φ_{1a} 、 Φ_{1b} 和 Φ_{1c} 通过。

$$\sum_{n \in B^e, i \in \{5a, 5b, 5c\}} \delta_{n,i} + \sum_{n \in B^w, i \in \{1a, 1b, 1c\}} \delta_{n,i} = 0 \quad (20)$$

式中: B^e 和 B^w 分别表示来自东直和西直的公交集合。

(7) 一辆公交只能在决策周期的某一个相位通过或者无法在该周期任何相位通过。

$$\sum_{i \in \Omega^{\text{opt}}} \delta_{n,i} \leq 1, n \in B^{\text{all}} \quad (21)$$

(8) 若公交未在决策周期任何相位内通过, 则认为其在周期终点通过。

$$C^{\text{start}} + C \leq A_n + d_n + M \sum_{i \in \Omega^{\text{opt}}} \delta_{n,i}, n \in B^{\text{all}} \quad (22)$$

式中: C^{start} 为决策周期开始时刻; M 为一个预设的足够大的常量, 如 100 倍 C^{base} 。若公交未在决策周期的任何相位通过, 则该约束发挥作用, 即 d_n 最小能取 $C^{\text{start}} + C - A_n$ 。由于本研究的算法应用于公交专用道场景且公交流量不会过高, 因此在计算公交延误时不考虑排队长度以及加减速的影响。

(9) 若公交在某相位通过, 其到达时间不晚于该相位绿灯终点, 其通过时间不早于该相位绿灯起点。

$$M \delta_{n,i} \leq M + G_i^{\text{start}} + g_i - A_n, n \in B^{\text{all}}, i \in \Omega^{\text{opt}} \quad (23)$$

$$M \delta_{n,i} \leq M - G_i^{\text{start}} + d_n + A_n, n \in B^{\text{all}}, i \in \Omega^{\text{opt}} \quad (24)$$

$$G_i^{\text{start}} = C^{\text{start}} + P_i (g + I), i \in \Omega^{\text{all}} \quad (25)$$

式中: G_i^{start} 为 Φ_i 绿灯起点时刻; g 为绿灯决策变量的列向量, $g = (g_i, i \in \Omega^{\text{all}})^T$; I 为相位间隔的列向量, $I = (I_i, i \in \Omega^{\text{all}})^T$; P_i 为 Φ_i 在决策周期内出现顺序的行向量, $P_i = (P_{i,j}, j \in \Omega^{\text{all}})$ 。若 Φ_i 和 Φ_j 都存在 ($i \neq j$), Φ_j 领先于 Φ_i , 且两者所处双环结构中的同一环, 则 $P_{i,j} = 1$, 否则, $P_{i,j} = 0$ 。例如, 在环 1 ($\Phi_{1a} \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow \Phi_{1c} \rightarrow \Phi_4$) 和环 2 ($\Phi_{5a} \rightarrow \Phi_6 \rightarrow \Phi_{5b} \rightarrow \Phi_7 \rightarrow \Phi_8$) 所表示的相序中, 表示 Φ_{1c} 和 Φ_8 在决策周期内顺序的行向量分别为 $P_{1c} = (1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 和 $P_8 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。由于决策中每个场景的相位设置情况预先已确定, P_i 是已知量。

(10) 引入辅助变量用于目标函数中绝对值项线性化的约束, 如下所示:

$$k_i \geq G_i + G_i^{\text{pre}}, i \in \Omega^{\text{m}} \quad (26)$$

$$k_i \geq 2G_i^{\text{base}}, i \in \Omega^{\text{m}} \quad (27)$$

$$h_i \leq G_i + G_i^{\text{pre}}, i \in \Omega^{\text{m}} \quad (28)$$

$$h_i \leq 2G_i^{\text{base}}, i \in \Omega^{\text{m}} \quad (29)$$

4 案例研究

以深圳市皇岗路-红荔路交叉口为例, 验证本研究提出的实时公交信号优先算法(以下简称“实时优先”)的有效性。案例交叉口的东西进口(红荔路)各设有一条直行公交专用道, 于早晚高峰期间使用, 其布局如图5所示。该交叉口社会车辆和公交的早高峰调查流量如表2所示。注意, 表2中社会车和公交的流量单位分别为 $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$, “公交”专指专用道上的公交流量。

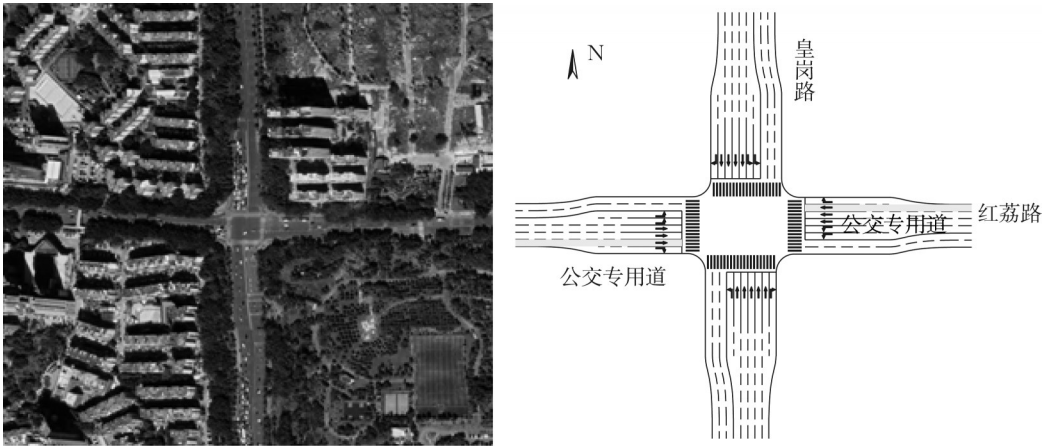


图5 案例交叉口布局

Fig.5 Layout of the studied intersection

表 2 案例交叉口调查流量

Tab.2 Survey volumes of the studied intersection

东进口车辆流量				西进口车辆流量				南进口车辆流量				北进口车辆流量		
左转	直行	右转	公交	左转	直行	右转	公交	左转	直行	右转		左转	直行	右转
520	500	200	115	300	500	560	125	150	1 840	590		310	2 430	375

使用一款行业内常用的交通仿真软件 Vissim 按照图 5 和表 2 的信息建立仿真模型并完成基本标定。利用 Matlab 编程,并通过 Com 接口连接 Vissim 实现公交信号优先的全过程在线运行。在仿真中模拟网联环境下公交实时上传定位信息,预测到达信息并推送至决策中心,决策中心根据实时优先算法获取最优信号控制方案,再将方案及时返回至交叉口控制系统并执行。在一台 8-GB i7-7700 个人电脑上进行实验,结果显示每次信号控制决策平均耗时仅 0.216 s,满足实时优先计算效率的要求。

主动公交优先算法(以下简称“主动优先”)已在国内外的大量实践中取得一定效果,并且红灯早断、绿灯延长和相位插入等主动优先手段与本算法具有一定关联性,因此本算法还将与其进行比较。主动优先算法采用《公交优先信号控制规范》(DB34/T 3536—2019)中推荐的典型案例,该案例代表了国内目前主流的公交信号优先水平,即公交专用道停车线的上游 100 m 处和下游 5 m 处分别设置检入和检出检测器,可以实施公交相位的红灯早断、绿灯延长和相位插入等主动优先手段。主动优先算法在仿真中的实现方式与实时优先类似。

实时优先和主动优先所需的基础配时相同,均来自于信号控制优化软件 Synchro 的优化结果。Synchro 软件以交叉口各个流向的平均小时流量为输入,计算得到以平均延误和停车次数构成的综合指标最优的定时控制方案,因此称这种方法为“定时

最优”,作为参与对比的第 3 种方法。实验所需参数取值如表 3 所示。

表 3 实验所需参数取值

Tab.3 Parameter values for case study

参数符号	参数含义	单位	取值
γ	目标函数权重调节系数		0.6
ΔC	周期寻优范围	s	25
C^{\max}	最大周期时长	s	180
C^{\min}	最小周期时长	s	80
g^{\max}	最大绿灯时间	s	60
g^{\min}	最小绿灯时间(直行)	s	15
g^{\min}	最小绿灯时间(左转)	s	10
I	相位间隔	s	5

研究时长为 4 h,在实时优先算法控制下共产生 124 个信号周期。图 6 和图 7 展示了整个研究时段实时优先算法输出的信号控制结果,图 6 展示了相序的统计结果,图 7 展示了每个周期和相位的信号配时。

从图 6 可以看出,在实时优先算法控制下研究时段内共出现 13 种不同的相序,可选相位优化框架包含的 6 个可选相位均有使用记录,包含了相位重现、相位调换和相位插入等相序调整手段,说明实时优先算法对相序进行了深度优化,可选相位配置以及相序的调整灵活多变,对公交到达做出了充分的响应。

从图 7 可以看出,在实时优先算法控制下,由于公交到达的时变性,信号配时随时间而发生变动。

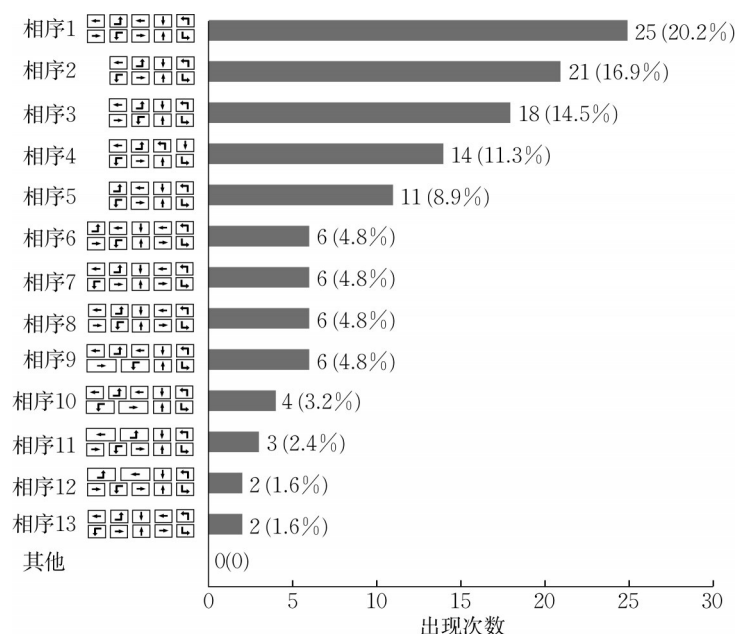


图6 实时优先算法输出的相序统计

Fig.6 Count of phase sequences from real-time TSP algorithm

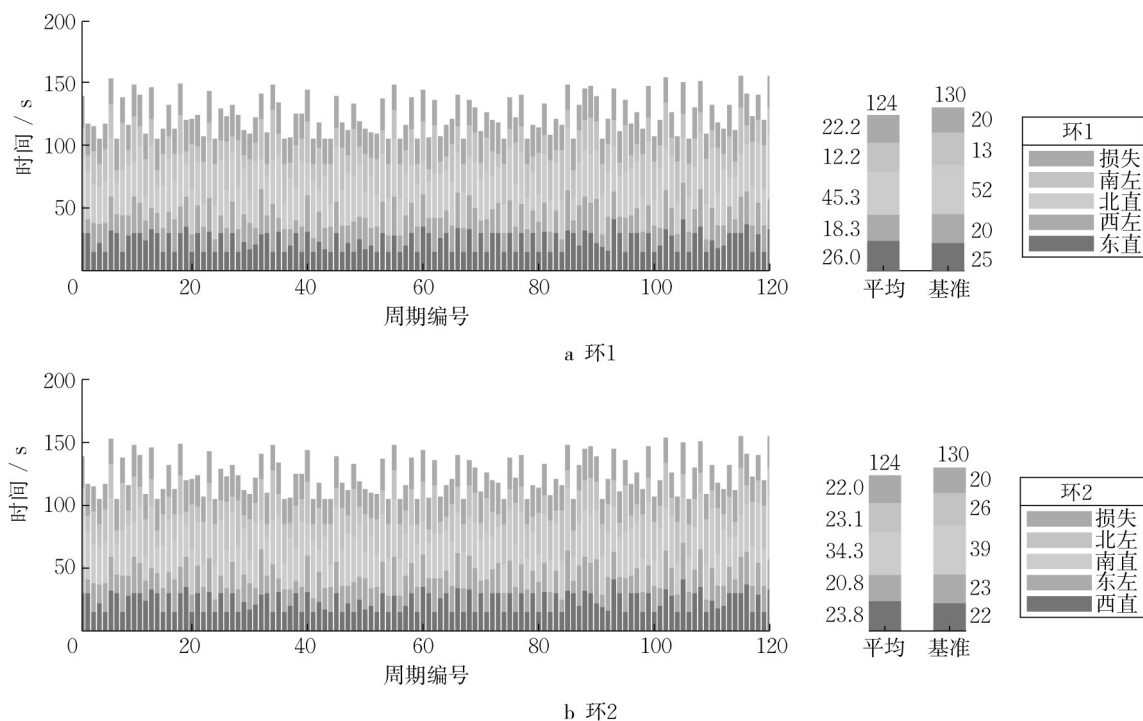


图7 实时优先算法输出的各周期信号配时结果

Fig.7 Cycle-by-cycle signal timings from real-time TSP algorithm

从整个研究时段来看,与定时最优的周期和各相位配时相比,平均周期仅改变了6 s(4.6%),各相位的平均绿灯时间也改变较小(均小于12.8%),说明考虑了基础配时偏差的模型限制了信号配时的改变。因此,实时优先算法既具备对公交到达时变特征的响应性,又保证基础配时不遭受较大破坏。

图8和图9展示了3种控制方法下各个流向与交叉口整体的社会车与公交的延误和停车次数,详细结果如表4所示。与定时最优相比,实时优先将公交的延误和停车次数降低了60.2%和30.5%,公交优先效果显著;此外,与主动优先相比,实时优先在社会车和公交的效益方面均优于前者,社会车和

公交的延误分别降低17.7%和33.1%,停车次数减少12.6%和15.1%。

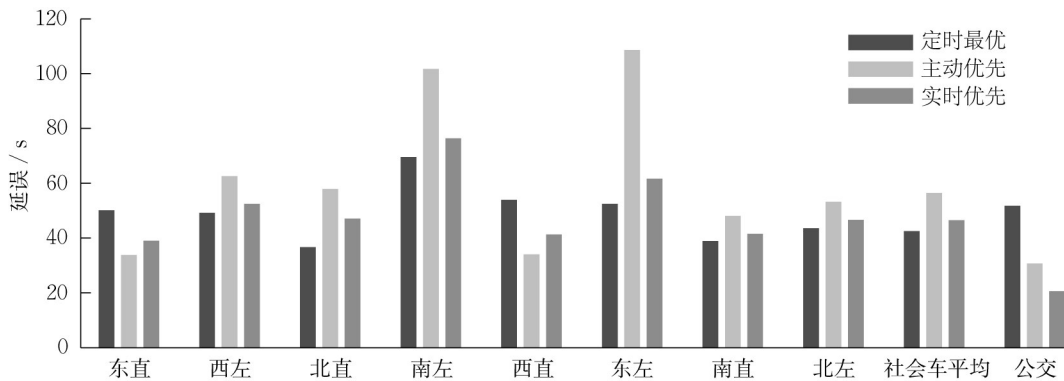


图8 平均延误

Fig.8 Average delay

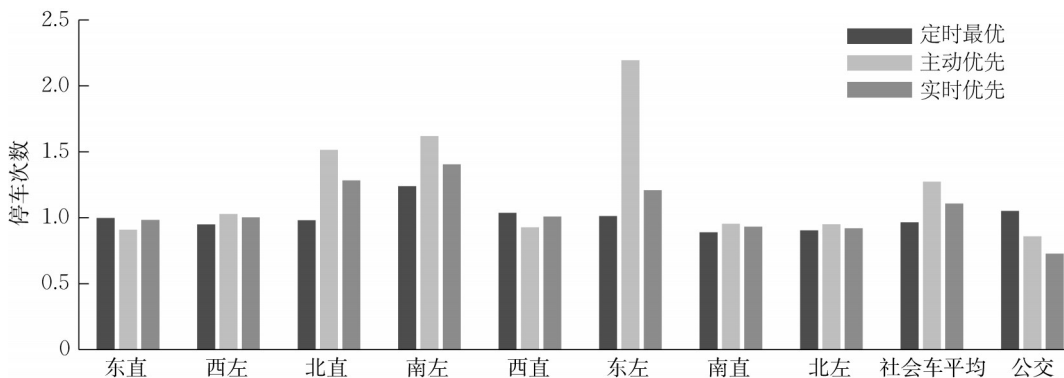


图9 平均停车次数

Fig.9 Average stops

表4 平均延误和停车次数详细结果

Tab.4 Details of average delay and stops

指标	方法	东直	西左	北直	南左	西直	东左	南直	北左	社会车平均	公交
平均延误/s	定时最优	50.2	49.2	36.7	69.6	54.0	52.5	39.0	43.6	42.6	51.8
	主动优先	33.9	62.6	58.0	101.7	34.1	108.7	48.2	53.3	56.5	30.8
	实时优先	39.0	52.5	47.1	76.5	41.3	61.7	41.6	46.6	46.5	20.6
	改善比例/%	实时优先相比定时最优									-9.2
停车次数	定时最优	1.00	0.95	0.98	1.24	1.04	1.01	0.89	0.90	0.96	1.05
	主动优先	0.91	1.03	1.52	1.62	0.93	2.19	0.95	0.95	1.27	0.86
	实时优先	0.98	1.00	1.28	1.40	1.01	1.21	0.93	0.92	1.11	0.73
	改善比例/%	实时优先相比定时最优									-15.6
		实时优先相比主动优先									12.6

从定时最优和2种公交优先方法的对比可看出,实现公交优先必然损害社会车效益,因为以公交优先为目的、以公交动态为依据的信号控制调整必然破坏对于社会车的最优性。然而,实时优先仅以社会车延误增加9.2%的代价获取公交延误降低60.2%的收益,明显优于定时最优。此外,从各个相位的延误和停车次数变化分布来看,实时优先比主动优先更加稳定。例如,主动优先引起了东左相位社会车延误和停车次数的剧烈增加,两者分别为

108.7 s和2.19,比定时最优增加了107%和117%,而实时优先东左相位社会车的延误和停车次数为61.7 s和1.21,仅比定时最优增加了17.5%和19.8%。

值得探讨的是,实时优先也可能带来一定的负面影响,如增大损失时间以及造成驾驶者的困惑等。在周期时长变化不大的情况下,相位数量的增加必然造成损失时间的增加,如图6中展示的“相序1”,一个周期中包含6个相位,比正常4个相位增加2个

信号间隔的损失时间。在非饱和情况下,相比于公交获得的优先效益,损失时间的增加并不会对总体产生明显负面影响,实验结果也予以印证。然而,当社会车流量接近饱和或过饱和时,损失时间的增加就会明显提升延误,说明该情形下相位数量不宜增加,同时也不宜给予公交过多优先权,应当适当减小式(1)中公交权重系数 γ 。另外,相序的频繁变化也可能引起一定的驾驶者困惑。一方面,这是感应、自适应控制和主动公交优先都会面临的问题,需要管理者在信号控制的高效与保守之间做权衡;另一方面,可通过在优化层限定相序变化范围以及在执行层采用相位提前预告等方式减小对驾驶者造成的困惑。

综上,实时优先在可选相位优化框架下对于绿灯时间、周期以及相序进行充分优化,同时实时优先算法将基础配时偏差作为社会车效益的表征是有效的,能够平衡公交和社会车效益,在实现公交优先的同时保证社会车效益不受过多损害。

5 结论

(1)建立的可选相位优化框架拓展了双环相位结构的适用性和功能性,在每个周期中按一定顺序加入数个可选公交相位以组成多种备选的相位配置场景,可灵活整合相位重现、相位调换和相位插入等多种相序调整方式。

(2)将可选相位优化框架应用于城市典型的具有双向公交专用道的十字路口,利用网联环境提供的实时公交到达信息作为输入,开发了实时公交信号优先算法,通过滚动优化,实现了下一周期各相位绿灯时间、周期和相序的同时优化。

(3)将线性的基础配时偏差作为社会车效益函数以设计优化目标,并结合场景离散化方法,将原问题转化为一组混合整数线性规划问题,降低了复杂度。平均每次优化耗时0.216 s,满足公交实时优先计算效率要求。

(4)对所提出的算法在城市交叉口高峰流量场景下进行实验。结果表明,该算法对周期时长、绿灯时间和相序进行了合理优化,既具备对公交到达时变特征的实时响应能力,又保证基础配时不遭受破坏。研究时段内共出现13种相序,所有可选相位均有使用记录,与定时最优方案相比平均周期时长改变4.6%,各相位平均绿灯时间最大改变12.8%,平均偏差较小。

(5)所提出的算法与目前主流的公交主动优先方法相比在公交和社会车效益方面均占优,公交的延误和停车次数降低33.1%和15.1%,社会车方面分别降低17.7%和12.6%。此外,算法引起的延误和停车次数变化在社会车各个流向上的分布也更加稳定。

本研究聚焦于具有双向公交优先需求的典型十字路口,未来将进一步探讨网联技术在公交优先的应用潜力以及所提出的框架和算法的拓展性。例如,适用于多向公交优先需求和多种交叉口类型,实现公交运行速度、驻站时间和信号控制的协同优化。

作者贡献声明:

殷炬元:方法设计,算法开发,仿真实验,文稿撰写与修改。

黎海宁:方法设计,数据处理,文稿修改。

孙 剑:核心立意,主体设计,文稿修改。

参考文献:

- [1] 马万经, 杨晓光. 公交信号优先控制策略研究综述[J]. 城市交通, 2010, 8(6): 70.
MA Wan-jing, YANG Xiao-guang. A review of prioritizing signal strategies for bus services[J]. Urban Transport of China, 2010, 8(6): 70.
- [2] 董玉璞, 李克平, 倪颖. 基于相位优先度规则的单点公交优先控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 1181.
DONG Yupu, LI Keping, NI Ying. Isolated transit signal priority control strategy based on phase priority degree rule[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(8): 1181.
- [3] WANG Shan, NI Ying, LIU Zupeng, *et al.* A comparison of transit signal priority strategies with multi-step detection at isolated intersections [C] // IEEE, 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2015: 1684-1689.
- [4] ZENG Xiaosi, ZHANG Yunlong, 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.
- [5] ZHENG J F, LIU H X. Estimating traffic volumes for signalized intersections using connected vehicle data [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2017, 79: 347.
- [6] SEO T, KUSAKABE T, ASAKURA Y. Estimation of flow and density using probe vehicles with spacing measurement equipment [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2015, 53(6): 134.
- [7] SUN D, ZHANG K S, SHEN S W. Analyzing spatiotemporal

- traffic line source emissions based on massive didi online car-hailing service data [J]. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 2018, 62: 699.
- [8] YIN Juyuan, SUN Jian, TANG Keshuang. A Kalman filter-based queue length estimation method with low-penetration mobile sensor data at signalized intersections [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2018, 2672(45): 2534.
- [9] YIN Juyuan, CHEN Peng, TANG Keshuang, *et al.* Queue intensity adaptive signal control for isolated intersection based on vehicle trajectory data [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 1.
- [10] FENG Yiheng, HEAD K L, KHOSHMAHAM S, *et al.* A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 460.
- [11] HU Jia, PARK B B, PARKAN A E. Transit signal priority with connected vehicle technology [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2418(1): 20.
- [12] HU Jia, PARK B B, LEE Y. Coordinated transit signal priority supporting transit progression under connected vehicle technology [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 393.
- [13] HU Jia, PARK B B, LEE Y. Transit signal priority accommodating conflicting requests under connected vehicles technology [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2016, 69: 173.
- [14] WU Zhizhou, TAN Guishan, SHEN Jie, *et al.* A schedule-based strategy of transit signal priority and speed guidance in connected vehicle environment [C] // IEEE, 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2016: 2416-2423.
- [15] WANG Yinsong, MA Wanjing, YIN Wei, *et al.* Implementation and testing of cooperative bus priority system in connected vehicle environment: case study in Taicang City, China [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2424(1): 48.
- [16] LIU Jiahui, LIN Peiqun, RAN Bin. A reservation-based coordinated transit signal priority method for bus rapid transit system with connected vehicle technologies [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, 13(4): 17.
- [17] 王永胜, 谭国真, 刘明剑, 等. 车联网环境下的公交自适应优先方法 [J]. *计算机应用*, 2016, 36(8): 2181.
- WANG Yongsheng, TAN Guozhen, LIU Mingjian, *et al.* Adaptive priority method of public bus under Internet of vehicles [J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(8): 2181.
- [18] LI Meng, YIN Yafeng, ZHANG Weibin, *et al.* Modeling and implementation of adaptive transit signal priority on actuated control systems [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2011, 26(4): 270.
- [19] CHRISTOFA E, PAPAMICHAIL I, SKABARDONIS A. Person-based traffic responsive signal control optimization [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(3): 1278.
- [20] HAN Xu, LI Pengfei, SIKDER R, *et al.* Development and evaluation of adaptive transit signal priority control with updated transit delay model [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2438(1): 45.
- [21] MA W J, LIU Y, YANG X. A dynamic programming approach for optimal signal priority control upon multiple high-frequency bus requests [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2013, 17(4): 282.
- [22] QING He, HEAD K L, DING Jun. Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2014, 46: 65.
- [23] TRUONG L T, CURRIE G, WALLACE M, *et al.* Coordinated transit signal priority model considering stochastic bus arrival time [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 20(4): 1.