

网联交通环境下公交优先信号控制与轨迹协同优化

蒋贤才, 梁辰

(东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 传统公交优先信号控制策略对社会车辆通行效率影响较大。针对这一问题, 利用网联自动驾驶汽车(Connected and Automated Vehicles, CAVs)轨迹可控与网联人工驾驶汽车(Connected Human-driven Vehicles, CHVs)轨迹可诱导的技术优势, 提出一种基于轨迹优化的公交优先信号控制(Transit Priority Control based on Trajectory Optimization, TPC-TO)策略。该策略通过延迟开启或提前结束冲突车流绿灯时间, 并对冲突车流中的车辆实施轨迹优化, 在保障公共汽电车优先通行的同时, 有效减少对社会车辆通行利益的侵占。仿真结果表明, 相较于传统公交优先信号控制策略, TPC-TO策略使交叉口整体车均延误下降了18.4%。进一步分析表明, CAV渗透率、公共汽电车和社会车辆交通量, 以及社会车辆目标车速等因素对TPC-TO策略的实施效果有显著影响。

关键词: 交通工程; 公交优先信号控制; 轨迹优化; 网联交通; 公交专用车道

Transit Priority Control and Trajectory Coordination Optimization in a Connected Traffic Environment

Jiang Xiancai, Liang Chen

(College of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

Abstract: Conventional transit priority signal control strategies considerably reduce the operational efficiency of general traffic. To address this issue, this paper leverages the controllable trajectories of Connected and Automated Vehicles (CAVs) and the inducible trajectories of Connected Human-driven Vehicles (CHVs) to propose a Transit Priority Control based on Trajectory Optimization (TPC-TO) strategy. The proposed strategy adjusts signal timing by delaying the onset or advancing the termination of green phases for conflicting traffic flows, while applying trajectory optimization to vehicles within those flows. This approach ensures priority for buses and trolleybuses while reducing encroachment on the right-of-way of general vehicles. Simulation results indicate that, compared to conventional TPC strategies, the TPC-TO strategy reduces the average vehicle delay at intersections by 18.4%. Further analysis indicates that CAV penetration rate, traffic volumes of buses, trolleybuses, and general vehicles, as well as the target speed of general vehicles, have significant effects on the performance of the TPC-TO strategy.

Keywords: Traffic engineering; transit priority control; trajectory optimization; connected traffic; dedicated bus lanes

收稿日期: 2025-02-05

基金项目: 国家重点研发计划项目“自主式交通复杂系统体系架构研究”(2020YFB1600400)

作者简介: 蒋贤才(1974—), 男, 重庆梁平人, 博士, 教授, 研究方向为道路交通控制, 电子邮箱 jxc023@126.com。

引用格式: 蒋贤才, 梁辰. 网联交通环境下公交信号优先控制与轨迹协同优化[J]. 城市交通, 2026, 24(2): 37-47.

Jiang Xiancai, Liang Chen. Transit priority control and trajectory coordination optimization in a connected traffic environment[J]. Urban Transport of China, 2026, 24(2): 37-47.

0 引言

公共交通是城市客运交通的主体, 发展公共交通是缓解城市交通拥堵的根本途径,

这一理念已受到各国政府的高度重视。国内外学者持续关注并研究改善公共交通出行的相关政策、法规及方法, 在公共汽电车优先信号控制(以下简称“公交优先信号控制”)

研究方面主要聚焦以下几点。

1) 特定道路与交通条件下的公交优先信号控制。

针对受道路几何条件限制或现有交通控制方式制约的不利场景,国内外学者提出了相应解决方案。例如,Chen Yongheng等^[1]构建了一种基于公交预信号的可变公交车道控制方法;吴兵等^[2]提出了一种面向短间距交叉路口的主动公交优先信号控制方法;徐洪峰等^[3]针对逆向左转弯路口设计了一种全感应公交优先信号控制技术;Liu Haiqiang等^[4]提出了一种兼顾社会车辆效益和协调相位状态的公交优先信号控制方法。上述研究在保障公共汽电车优先通行的同时,提高了道路时空资源的利用效率。然而,公交优先信号控制策略引发的通行利益侵占问题仍然没有得到根本性改善。

2) 多目标联合优化的公交优先信号控制。

网联交通凭借车辆状态可测的技术优势,正在颠覆传统基于统计理论的交通控制模型,为公交优先信号控制提供了新的优化思路。优化方法逐渐从传统的单向优化向双向(协同)优化转变,优化目标也从单一目标向多目标拓展。例如,基于车速引导的交叉路口公交优先信号控制^[5-6]、交通信号与车辆轨迹的联合优化控制^[7-8]、信号时长与相位方案协同优化控制^[9],这些方法旨在提升公共汽电车和社会车辆的整体运行效益,进一步缓解公交优先信号控制带来的利益侵占问题。尽管在网联交通环境下,信号控制参数与车辆轨迹的联合优化能够避免使用绿灯延长、红灯缩短、插入专用相位等传统公交优先信号控制策略,但由于公共汽电车运行时间的刚性约束,仍可能侵占非优先信号相位车辆的通行利益,导致这些相位所对应交通流出现短时超负荷运行。

3) 基于深度强化学习的公交优先信号控制。

深度强化学习在交通控制领域的应用,为公交优先信号控制带来了新思路。Long Meng等^[10]提出了一种带无效动作掩码的扩展对弈双深度Q学习算法(eD3QNI),旨在降低公共汽车延误;Yu Jiajie等^[11]基于深度强化学习,构建了包含公共交通优先发展策略的多模式交通网络分散信号控制方法。上述方法的控制尽管成效显著,却都高度依赖历史数据积累和模型训练,可移植性差,难以直接应用于新建交叉路口的信号控制。

综上所述,现有研究通过优化车辆轨迹和信号参数,或引入深度学习算法,在一定程度上提升了交叉路口的时空资源利用效率和公共汽电车通行效率。然而,目前仍存在两方面不足:1)既有公交优先信号控制方法尚未充分利用网联交通的技术优势;2)车辆轨迹与信号控制之间的协同程度仍较低,制约了交叉路整体通行效率的进一步提升。基于此,本文以网联交通环境为背景,提出一种基于轨迹优化的公交优先信号控制(Transit Priority Control based on Trajectory Optimization, TPC-TO)策略,旨在实现公共汽电车优先通行的同时,有效减少对社会车辆通行利益的侵占。

1 问题描述

传统交通环境下的公交优先信号控制策略,因交通信息的非对称性和信号控制方案调整缺乏预见性,在实施过程中往往导致交叉路口各相位交通负荷不均衡,进而引发交通拥堵和冲突加剧。在网联交通环境下,可利用网联自动驾驶汽车(Connected and Automated Vehicles, CAVs)的可控性和网联人工驾驶汽车(Connected Human-driven Vehicles, CHVs)的可诱导性,通过轨迹优化实现公共汽电车与冲突车辆在冲突区的时空分离,以最大限度降低公交优先信号控制策略带来的利益侵占程度。基于轨迹优化的公交优先信号控制策略示意如图1所示。

本文的优化思路如下:旨在以社会车辆均延误最小为目标,建立车辆轨迹与交通信号控制参数的联合优化模型,从而提升交叉路口整体通行效益。在优化结果基础上,预测公共汽电车通过交叉路口各冲突区的时间窗,识别与之冲突的信号相位及相应车流;基于公共汽电车通过冲突点的时间窗,采取延迟开启(或提前结束)冲突车流绿灯时间,或对冲突车流中的冲突车辆实施轨迹优化的策略,为公共汽电车穿越交叉路口预留通行时间窗,从而达到减少公共汽电车优先通行对社会车辆利益侵占的目的。

本文提出的轨迹优化包括两层含义。第一层是基于实时到达的社会车辆信息,采用车辆轨迹与交通信号控制参数联合优化的方法,确定交叉路口的信号配时方案以及该方案下社会车辆的优化轨迹。该层优化不考虑车辆换道行为,假设所有车辆在进入交叉路口通

信控制区域时均已驶入各自的目标车道。社会车辆的轨迹优化范围限定于从进入通信控制区域到驶离停车线的路段，长度约为150~200 m，优化手段为实时调整车辆的加、减速度。第二层优化发生在接收到公共汽车优先通行请求时。此时，首先考虑对公共汽车实施轨迹优化，判断能否将其加速行驶后通过交叉口的时间整合至已优化信号配时方案中公共汽车所在的绿灯相位，从而避免采用绿灯延长、红灯缩短、插入专用相位等主动公交优先信号控制策略所带来的弊端，即打乱原有信号配时方案并侵占社会车辆通行利益。若公共汽车可通过加速

实现上述整合，则对其执行轨迹优化；否则，公共汽车保持原速行驶，此时确定与之冲突的信号相位及冲突车辆，通过延迟开启(或提前结束)冲突车流的绿灯时间，或对冲突社会车辆实施轨迹优化，以确保公共汽车在通过冲突点时具备独占的时空条件。

2 公交优先信号控制方法

2.1 联合优化模型

本文以社会车辆车均延误最小为优化目标，建立车辆轨迹与交通信号控制参数的联合优化模型，以提升交叉口整体通行效益。

$$F = \min \frac{\sum_l \sum_d \sum_j D_{jdl}}{\sum_l \sum_d V_{dl}}, \quad (1)$$

$$D_{jdl} = \begin{cases} t_{l,k} + \rho_{jdl} - t_{jdl} - x_{dl}/v_{dl}, & \text{若 } t_{jdl} + x_{dl}/v_{min} \in [t_{l,k-1} + g_{l,k-1}, t_{l,k} + \tau + v_{min}/a_{acc}] \text{ 且 } (j-1)h_{dl} \leq g_{l,k} \\ \rho_{jdl} - x_{dl}/v_{dl}, & \text{若 } t_{jdl} + x_{dl}/v_{min} \in [t_{l,k} + \tau + v_{min}/a_{acc}, t_{l,k} + \sum g_{l,k}] \text{ 且 } (j-1)h_{dl} > g_{l,k} \\ \max\{0, \max[t_{l,k} + \tau + ih_{dl}, t_{l,k} + \tau + \rho_{jdl}(t_{l,k})] - t_{jdl} - x_{dl}/v_{dl}\}, & \text{其他} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： F 为车均延误/(s·pcu⁻¹)； D_{jdl} 为车道组 l 中车道 d 上车辆 j 的延误/s； V_{dl} 为车道 d 上的交通量/pcu； $t_{l,k}$ 为第 k 周期车道组 l 的绿灯启亮时刻； ρ_{jdl} 为车辆 j 行驶至交叉口停止线的最短时间/s； t_{jdl} 为车辆 j 进入交叉口通信控制区域的时刻； x_{dl} 为车道 d 从路段起点至停车线的距离/m； v_{dl} 为车道 d 上行驶车辆的平均速度/(m·s⁻¹)； v_{min} 为交叉口范围内社会车辆的最小限速/(m·s⁻¹)； $g_{l,k}$ 为第 k 周期车道组 l 的绿灯时长/s； τ 为启动反应时间/s，头车若为CAV，则取 τ_a ，若为CHV，则取 τ_h ； a_{acc} 为社会车辆的最大加速度/(m·s⁻²)； h_{dl} 为车道 d 的饱和车头时距/s； $\rho_{jdl}(t_{l,k})$ 为考虑前车阻挡的情况下，车辆 j 从时刻 $t_{l,k}$ 开始，由当前位置 $x_{jdl}(t_{l,k})$ 行驶至交叉口停止线的最短时间/s。

式(2)中的3种情形分别对应车辆到达交叉口时的不同通行状态：情形1，车辆到达交叉口边界时，前方排队车辆尚未消散，需经历2次停车；情形2，车辆到达边界前，前方排队已完全消散，仅需1次停车即可通过；情形3，车辆在绿灯期间内到达边界且前方无排队，可不停车直接通行。

综合考虑CAV的可控性与优化所得的相位绿灯时长，可估算CAV专用车道上第 j 辆CAV抵达交叉口停止线的最短时间，其计算模型为：

$$\rho_{jdl}(t_{l,k}) = \begin{cases} \rho'_{jdl}(t_{l,k}), & \text{若 } j=1 \\ \max[\rho'_{j-1,dl}(t_{l,k}) + h_{dl}, \rho'_{jdl}(t_{l,k})], & \text{若 } j>1 \end{cases}, \quad (3)$$

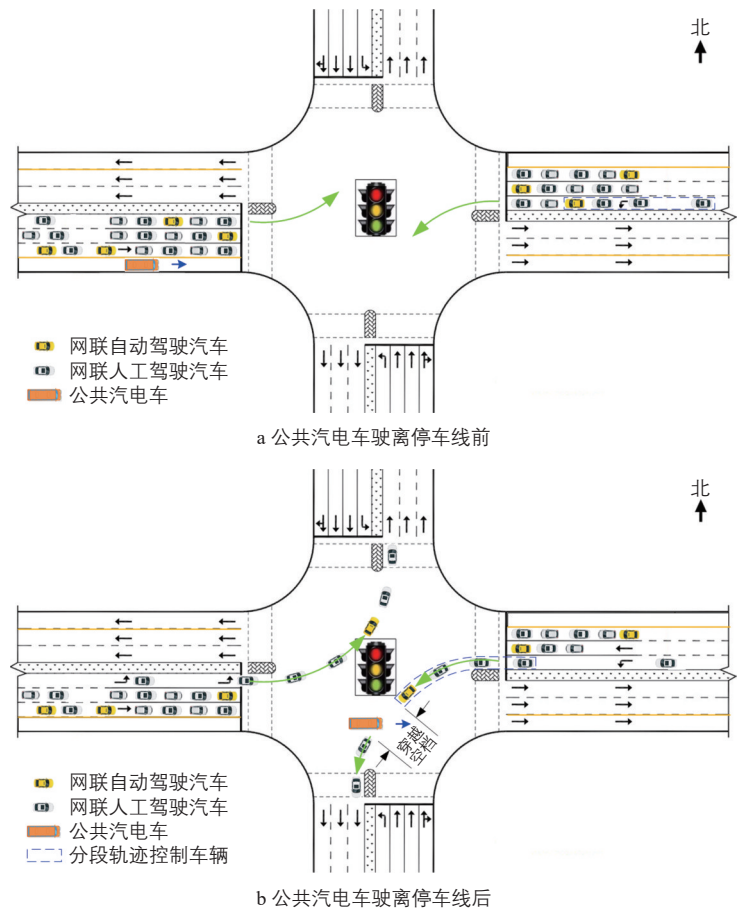


图1 网联交通环境下公交优先信号控制策略示意

Fig.1 Schematic of transit priority signal control strategy in a connected environment

$$\rho'_{jdl}(t_{l,k}) = \begin{cases} 2\sqrt{x_{jdl}(t_{l,k})/a_{acc} + 0.5[v_{cross}^2 + v_{jdl}^2(t_{l,k})]/a_{acc}^2} - [v_{cross} + v_{jdl}(t_{l,k})]/a_{acc}, & \text{若 } x_{jdl}(t_{l,k}) \leq [v_{max}^2 - 0.5v_{cross}^2 - 0.5v_{jdl}^2(t_{l,k})]/a_{acc} \\ [v_{max} - v_{jdl}(t_{l,k})]/a_{acc} + (v_{max} - v_{cross})/a_{acc} + \{x_{jdl}(t_{l,k}) - 0.5[v_{max}^2 - v_{jdl}^2(t_{l,k})]/a_{acc} - 0.5(v_{max}^2 - v_{cross}^2)/a_{acc}\}/v_{max}, & \\ \text{若 } x_{jdl}(t_{l,k}) > [v_{max}^2 - 0.5v_{cross}^2 - 0.5v_{jdl}^2(t_{l,k})]/a_{acc} \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $\rho'_{jdl}(t_{l,k})$ 为未考虑前车阻挡的情况下，车道组 l 中车道 d 上车辆 j 从时刻 $t_{l,k}$ 开始，由当前位置 $x_{jdl}(t_{l,k})$ 行驶至交叉口停车线的最短时间/s； $x_{jdl}(t_{l,k})$ 为车辆 j 在时刻 $t_{l,k}$ 时距离路段起点的距离/m； v_{cross} 为交叉口车辆的目标车速/($m \cdot s^{-1}$)； $v_{jdl}(t_{l,k})$ 为车辆 j 在 $t_{l,k}$ 时刻的速度/($m \cdot s^{-1}$)； v_{max} 为交叉口范围内社会车辆的最大限速/($m \cdot s^{-1}$)。

式(3)和式(4)共同用于判断车道组 l 中车道 d 上车辆 j 能否与前车形成饱和和车队。其中，式(3)用于判断车辆 j 与前车之间是否存在行驶干扰。若车辆 j 的实际行驶状态不满足式(4)所假设的无干扰理想条件，则表明其可能受到前车阻挡，需进一步判断能否整合进入饱和和车队。若能整合，则车辆以饱和和车头时距依次驶离停车线；若无法整合，则表明前车对车辆 j 不构成跟驰约束，此时车辆 j 的最短通行时间可直接由式(3)计算得出。其中，式(4)计算的是在无前车干扰的情况下，车辆 j 从位置 $x_{jdl}(t_{l,k})$ 到达交叉口停车线所需的最短时间。式(4)包含两种情形：情形1，车辆仅经历加速-减速或减速-加速过程，中间无匀速行驶阶段；情形2，车辆行驶过程包含三段：加速、匀速、减速。

此外，为判断车辆能否追上前车并形成跟驰状态，引入追及时间计算公式：

$$\psi_{jdl}(t) = [v_{jdl}(t) - v_{min}]/a_{acc} + \{x_{jdl}(t) - (j-1)(L_v + d_s) - 0.5[v_{jdl}^2(t) - v_{max}^2]/a_{acc}\}/v_{min}, \quad (5)$$

式中： $\psi_{jdl}(t)$ 为车道组 l 中车道 d 上车辆 j 在时刻 t 追上前方车辆尾部所需的时间/s； L_v 为社会车辆长度/m； d_s 为连续行驶车辆之间期望保持的安全距离/m。

2.2 车辆跟驰约束条件

为准确刻画网联交通环境下不同类型车辆的跟驰行为，本文对CHV和CAV分别采用不同的跟驰模型。

1) CHV跟驰模型。

CHV采用S. Panwai等^[12]改进的Helly跟驰模型，以更好地拟合真实世界的交通数据，其计算公式为：

$$a_{jdl}(t) = \alpha_1[v_{j-1,dl}(t) - v_{jdl}(t)] + \alpha_2\{[x_{j-1,dl}(t) - x_{jdl}(t) - L_v] - d_s - \tau v_{jdl}(t)\}, \quad (6)$$

式中： $a_{jdl}(t)$ 为车道组 l 中车道 d 上车辆 j 的加速度/($m \cdot s^{-2}$)； α_1, α_2 为模型系数。第一项反映了前车与跟驰车辆之间的相对速度，第二项则体现了连续车辆之间的相对距离。

2) CAV跟驰模型。

CAV采用智能驾驶模型(Intelligent Driver Model, IDM)，其计算公式为：

$$a_{jdl}(t) = a_{acc} \left\{ 1 - \left(\frac{v_{jdl}(t)}{v_{cross}} \right)^4 - \left\{ \frac{s^*[v_{jdl}(t), \Delta v_{jdl}(t)]^2}{s_{jdl}(t)} \right\} \right\}, \quad (7)$$

$$s_{jdl}(t) = \Delta x_{jdl}(t) - L_v, \quad (8)$$

$$s^*[v_{jdl}(t), \Delta v_{jdl}(t)] = d_{ai} + d_h v_{jdl}(t) - \frac{v_{jdl}(t) \Delta v_{jdl}(t)}{2\sqrt{a_{acc} a_1}}, \quad (9)$$

式中： s^* 为车辆 j 与前车 $j-1$ 的期望动态间距/m； $\Delta v_{jdl}(t)$ 为车辆 j 与前车 $j-1$ 的速度差/($m \cdot s^{-1}$)； $s_{jdl}(t)$ 为车辆 j 与前车 $j-1$ 的实际间隙/m； $\Delta x_{jdl}(t)$ 为车辆 j 与前车 $j-1$ 的位置差/m； d_{ai} 为静止时车车间隙/m； d_h 为车辆跟驰时相邻车辆的安全时距/s； a_1 为CAV跟驰车辆采取的期望加速度/($m \cdot s^{-2}$)。

2.3 公交优先信号控制方法

本文提出的公交优先信号控制采用分层引导策略，对社会车辆与公共汽电车的运行状态实施差异化管控。在无公共汽电车优先通行请求的情况下，社会车辆依据联合优化模型确定的轨迹，通过定向加速或减速实现通行效率优化。当接收到公共汽电车优先通行请求时，控制策略进一步细化：若公共汽电车与当前放行的社会车辆在空间上不存在冲突，则社会车辆维持原有的定向加速或减速引导控制；若存在空间冲突，则根据冲突位置的不同采取两种控制方式。

1) 冲突位于放行车流边缘：当公共汽电车与放行社会车流的头车或尾车存在冲突

时, 调整信号控制方案, 通过延迟开启或提前关闭该流向的绿灯相位, 为公共汽电车预留通行空档。

2) 冲突位于放行车流中部: 当公共汽电车与放行社会车流的中间车辆存在冲突时, 保持原有信号控制方案不变, 仅对存在冲突的社会车辆实施定向减速引导, 使其在冲突点为公共汽电车让行出安全通行的时空档。

基于联合优化模型的优化结果, 为实现上述公交优先信号控制, 需首先识别与公共汽电车存在空间冲突的社会车流及其中的冲突车辆。

$$\begin{cases} t_{ibl,\min} = t_{is} + [2a_{ibl}(x_{sf} + L_b) - (2v_{b,\max}^2 - 2v_{b,\text{cross}}^2)] / 2a_{ibl}v_{b,\max} + (2v_{b,\max} - v_{b,\text{cross}}) / a_{ibl} \\ t_{ibl,\max} = t_{is} + [2a_{ibl}(x_{sf} + L_b) - v_{b,\text{cross}}^2] / 2a_{ibl}v_{b,\min} + v_{b,\text{cross}} / a_{ibl} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $t_{ibl,\min}$ 和 $t_{ibl,\max}$ 分别为车道组 l 中公交专用车道 b 上公共汽电车 i 通过停车线的最早时刻和最晚时刻; t_{is} 为公共汽电车 i 离开车站 s 的时刻; a_{ibl} 为公共汽电车 i 的加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); x_{sf} 为车站 i 至交叉口停车线 f 的距离/m; L_b 为公共汽电车的长度/m; $v_{b,\text{cross}}$ 为公共汽电车 i 驶离交叉口的目标车速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

2) 考虑车站影响的出发时刻修正。

当存在公共汽电车站时, 上游路段至车站区段不实施轨迹优化, 公共汽电车先匀速行驶, 再匀减速进站; 离开车站后, 再对公共汽电车实施轨迹优化。公共汽电车离开车站的时刻

$$t_{is} = t_{ibl} + [(2a_{ibl}x_{is}(t_{ibl}) - v_{ibl}^2(t_{ibl}))] / 2a_{ibl}v_{ibl}(t_{ibl}) + v_{ibl}(t_{ibl}) / a_{ibl} + t_{ibl,sv} \quad (11)$$

式中: t_{ibl} 为车道组 l 中公交专用车道 b 上公共汽电车 i 进入交叉口通信控制区域边界的时刻; $x_{is}(t_{ibl})$ 为公共汽电车 i 在 t_{ibl} 时刻与路段起点的距离/m; $t_{ibl,sv}$ 为公共汽电车 i 在车站 s 的停靠时间/s。

3) 基于时间区间比对的公共汽电车优先通行策略判定。

将 $t_{ibl,\text{bus}}$ 与各车道组的绿灯显示时段进行比对, 根据二者相交关系确定相应的公共汽电车优先通行策略。

设交叉口包含公共汽电车的车道组个数为 m , 全部车道组个数为 n 。定义冲突矩阵 $C = [c_{lu}]_{m \times n}$, 其中 $c_{lu} = 0$ 表示车道组 l 与车道组 u 无冲突或合流关系, $c_{lu} = 1$ 表示二

2.3.1 冲突车流界定

当公共汽电车 i 进入交叉口通信控制区域时, 以最高运行速度 $v_{b,\max}$ 和最低运行速度 $v_{b,\min}$ 为边界, 对其通过停车线的时间区间 $T_{ibl,\text{bus}} = [t_{ibl,\min}, t_{ibl,\max}]$ 进行约束。将该时间区间与当前信号周期各车道组的绿灯显示时段进行比对, 即可界定与公共汽电车存在冲突的车流。界定方法如下:

1) 公共汽电车通过停车线的最早和最晚时刻。

式(10)给出了基于车速诱导的公共汽电车通过停车线最早和最晚时刻的计算方法。

者存在交叉冲突。令 $T_{u,k}$ 为第 k 周期车道组 u 的绿灯显示时间区间, 则根据 $t_{ibl,\text{bus}}$ 与 $T_{u,k}$ 的交集关系, 分以下4种情形进行判定。

情形 1: 若 $T_{ibl,\text{bus}} \cap T_{u,k} = T_{ibl,\text{bus}}$, 且 $l = u$ (对应图 2a), 表明公共汽电车在其所在车道组的绿灯时段内可完全覆盖其通过停车线的时间需求。此时公共汽电车可直接通行, 无需实施轨迹优化。

情形 2: 若 $T_{ibl,\text{bus}} \cap T_{u,k} = T_{ibl,\text{bus}}$, 且 $l \neq u$ (对应图 2b), 则车道组 u 中的交通流为可能的冲突车流。需进一步界定车道组内的具体冲突车辆, 并对其实施轨迹优化。

情形 3: 若 $l = u$ 且 $T_{ibl,\text{bus}} \cap T_{u,k} \subset T_{ibl,\text{bus}}$ (对应图 2c), 表明公共汽电车所在车道组的绿灯时段仅能部分覆盖其通行需求, 冲突位于绿灯时间的起始或结束阶段。此时, 若满足 $\Delta t = t_{u,k} + g_{u,k} - t_{ibl,\min} \geq L_b/v_{b,\text{cross}} + t_{sa}$ 或 $\Delta t = t_{ibl,\max} - t_{u,k} \geq L_b/v_{b,\text{cross}} + t_{sa}$ (其中 $g_{u,k}$ 为第 k 周期车道组 u 的绿灯时长/s, t_{sa} 为预留安全时间/s), 则可通过优化公共汽电车行驶轨迹, 使其加速或减速, 将通行时间调整至

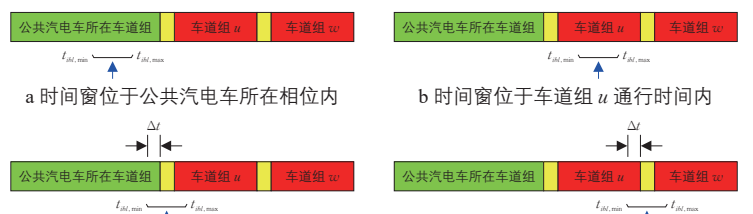


图 2 公共汽电车通过停车线的时间区间与各车道组的绿灯显示时段比对
Fig.2 Comparison between time windows for buses and trolleybuses passing the stop line and green phase intervals of each lane group

所在车道组的绿灯时段内。

情形4: 若 $l \neq u$ 且 $T_{ibl, bus} \cap T_{u, k} \subset T_{ibl, bus}$, 并满足情形3中不等式条件(对应图2d), 则车道组 u 中的交通流为可能的冲突车流, 冲突同样位于该车道组绿灯时间的起始或结束阶段。

对于上述情形中识别出的可能冲突车道组 u , 需进一步筛选确认。对每一个 u , 检查冲突矩阵中对应元素 $c_{iu} = 1$ 是否成立: 若成立, 则保留该车道组; 否则, 予以剔除。若剩余车道组的绿灯时间一致, 则将这些车道组中的交通流直接确定为冲突车流; 若不一致, 为最大限度减少对整体交通流的影响, 将剩余车道组按绿灯时间分类, 选择分类后数量较少的一类车道组中的交通流作为冲突车流。

针对不同情形, 采取相应的冲突消解策略: 对于情形2, 采取冲突车流断链轨迹控制策略, 通过优化冲突车辆的行驶轨迹, 在冲突点处为公共汽电车预留可穿越的时间空间。对于情形4, 采取信号配时调整策略, 通过延迟开启或提前关闭冲突车流的绿灯时

$$t_{sz} = \begin{cases} \tau + \sqrt{\frac{2(d_{fz} - d_s)}{a_{jdl}(t)\cos\theta}}, & \text{若 } d_{fz} \leq v_{\text{cross}}^2 / 2a_{jdl}(t)\cos\theta \\ \tau + \frac{v_{\text{cross}}}{a_{jdl}(t)\cos\theta} + 2a_{jdl}(t)\cos(d_{fz} - d_s) - v_{\text{cross}}^2 / 2a_{jdl}(t)\cos\theta v_{\text{cross}}, & \text{若 } d_{fz} > v_{\text{cross}}^2 / 2a_{jdl}(t)\cos\theta \end{cases}, \quad (14)$$

式中: d_{fz} 为冲突相位中社会车辆从停车线 f 行驶至冲突区 z 的轨迹长度/m; d_s 为连续行驶车辆期望保持的安全距离/m; θ 为车辆行驶方向与道路中线的夹角/ $^\circ$ 。

$$\begin{cases} t_{z1} = t_{is} + [2a_{ibl}(x_{sf} + x_{fz}) - v_{b, \text{cross}}^2] / v_{b, \text{cross}} + v_{b, \text{cross}} / a_{ibl} \\ t_{z2} = t_{is} + [2a_{ibl}(x_{sf} + x_{fz} + l_z + L_b) - v_{b, \text{cross}}^2] / v_{b, \text{cross}} + v_{b, \text{cross}} / a_{ibl} \end{cases}, \quad (15)$$

式中: t_{z1} 和 t_{z2} 为公共汽电车 i 到达和离开冲突区 z 的时刻; x_{sf} 为车站 s 至交叉口停车线 f 的距离/m; l_z 为冲突区 z 的长度/m。

式(15)对应于公共汽电车采用穿插冲突车流通行方案的情形, 即公共汽电车加速至目标车速后匀速通过冲突区, 无需实施轨迹优化。

3) 冲突车辆判定规则。

将式(13)计算得到的车辆到达时间 $t_{jdl, z1}$ 与式(15)计算得到的公共汽电车占用冲突区时间区间 $[t_{z1}, t_{z2}]$ 进行比对: 若 $t_{jdl, z1} \in [t_{z1}, t_{z2}]$, 则判定车辆 j 为冲突车辆。

对于判定的冲突车辆, 根据其在队列中

间, 为公共汽电车穿越交叉口内部冲突区预留通行时间。其计算方法为:

$$\Delta g_{l, k} = (L_b + x_{fz}) / v_{b, \text{cross}} + t_{sa}, \quad (12)$$

式中: $\Delta g_{l, k}$ 为第 k 周期车道组 l 延迟开启或提前关闭冲突车流的绿灯时间/s; x_{fz} 为停车线 f 至冲突区边界 z 的距离/m。

2.3.2 冲突车辆界定

在识别出与公共汽电车存在冲突的车流后, 需进一步界定该车流中的具体冲突车辆, 以便实施针对性的轨迹优化或信号调整。是否为冲突车辆基于车辆到达冲突区的时刻与公共汽电车占用冲突区的时间区间之间的关系判定。

1) 冲突车辆到达冲突区边界的时间计算。

$$t_{jdl, z1} = t_{l, k} + T_d + h_{dl} \times j + t_{sz}, \quad (13)$$

式中: $t_{jdl, z1}$ 为冲突相位绿灯启亮时, 车道组 l 中车道 d 上车辆 j 到达冲突区 z 的最短时间/s; T_d 为车道 d 启动损失时间/s; j 为车辆在车道中的排队序号; t_{sz} 为与公共汽电车 i 相冲突的车流车头从绿灯启亮时刻行驶至冲突区 z 所需的时间/s。

2) 公共汽电车占用冲突区间的计算。

公共汽电车 i 穿过冲突区 z 的时间区间 $[t_{z1}, t_{z2}]$ 计算公式如下:

的位置采取不同的控制策略: 当 $j \leq r$ 时(r 为最大排队车辆数), 表明车辆 j 处于排队状态。此时只需延迟该车辆的启动时间, 即可为公共汽电车留出通行空档, 延迟时长为 $t_{z2} - t_{z1}$; 当 $j > r$ 时, 表明车辆 j 为运动中的离散车辆。此时需对该车辆实施轨迹优化, 使其在 $t_{z2} + t_{sa}$ 时刻到达冲突区, 以确保公共汽电车安全通行。

2.4 公交优先信号控制策略实现方法

公交优先信号控制策略的具体实现方法, 主要包括信号控制调整和社会车辆轨迹优化两种手段。

2.4.1 延迟开启或提前关闭冲突车流绿灯时间策略

该策略对应于图2d情形。当公共汽电车与社会车流的冲突位于该车流绿灯时段的起始或结束阶段时,通过微调信号配时方案为公共汽电车预留通行空档。具体而言,需首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的时刻,并对其行驶轨迹进行优化,使其与调整后的信号方案相匹配。公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

2.4.2 冲突车流断链轨迹控制策略

该策略对应于图2b所示情形。当公共汽电车与放行社会车流的中间车辆存在冲突时,保持原信号控制方案不变,仅对冲突车辆实施轨迹优化。首先界定冲突车辆到达冲突区的时刻约束为 $t_{z2} + t_{sq}$,然后在此约束条件下,对冲突的社会车辆实施定向减速引导,使其在冲突点处为公共汽电车让行出安全通行的时间空当,从而实现公共汽车与冲突车辆的时间分离。

2.4.3 公交优先信号控制策略的4种实施情形

综合2.3.1节中基于时间区间比对的判定结果,公交优先信号控制的具体实施方案可分为以下4种情形:

图2a(无需干预):公共汽电车在其所在车道组的绿灯时段内可完全覆盖其通过停车线的时间需求,无需实施任何轨迹优化或信号调整。

图2b(断链轨迹控制):公共汽电车与放行社会车流的中间车辆存在冲突。在界定车道组 u 的冲突车辆后,对冲突的社会车辆实施定向加速或减速引导控制,实现公共汽电车与冲突的社会车辆的时间分离。

图2c(公共汽电车轨迹优化):公共汽电车所在车道组的绿灯时段仅能部分覆盖其通行需求,冲突位于绿灯的起始或结束阶段,且公共汽电车所在车道组与冲突车道组为同一组。此时对公共汽电车实施定向加速引导,使其将通行时间调整至所在车道组的绿灯时段内。

图2d(信号配时调整):公共汽电车所在车道组的绿灯时段仅能部分覆盖其通行需求,冲突位于绿灯的起始或结束阶段,但公共汽电车所在车道组与冲突车道组为不同组。此时公共汽电车保持匀速行驶,通过延

迟开启或提前关闭冲突车流的绿灯时间实现优先信号控制。

为确保公交优先信号控制策略的有效性与公平性,本文设置策略启动条件,从晚到程度、车辆满载率及综合效益3个维度对优先请求进行评估。仅当同时满足以下3个条件时,系统方启动公交优先信号控制策略。

1) 晚到程度条件。

$$T_{oqi} - T'_{oqi} > t_{is,max}, \quad (16)$$

式中: T_{oqi} 为第 o 进口流向 q 出口第 i 辆公共汽电车预测到达停车线的时刻; T'_{oqi} 为该车辆的计划准点到达时刻; $t_{is,max}$ 为系统可容忍的最大晚到时刻。当预测到达时刻晚于准点时刻且差值超过容忍阈值时,判定该车辆具有优先需求。

2) 车辆满载率条件。

$$P_{oqi}/P_{max} > R_{min}, \quad (17)$$

式中: P_{oqi} 为第 o 进口流向 q 出口第 i 辆公共汽电车的实际载客量/人; P_{max} 为公共汽电车 i 的最大载客量/人; R_{min} 为启动优先控制的载客率下限阈值。仅当公共汽电车载客率高于该下限时,系统方响应优先请求,以避免低效优先。

3) 综合效益条件。

$$E_{kb} - E_{kc} > 0, \quad (18)$$

式中: E_{kb} 为交叉口相位 k 实施公交优先信号控制产生的正效用,指因优先策略而减少的人员等待总延误/s; E_{kc} 为实施优先策略产生的负效用,指因优先策略导致的社会车辆增加的人员总延误/s。仅当正效用大于负效用时,系统方执行优先控制。

E_{kb} 和 E_{kc} 分别按下式计算:

$$E_{kb} = \sum_{P_{min}} (\rho_{ibl} - x_{bl}/v_{bl}), \quad (19)$$

$$E_{kc} = \sum_j \sum_{P_j} D_{jdl}, \quad (20)$$

式中: ρ_{ibl} 为车道组 l 中公交专用车道 b 上公共汽电车 i 行驶至交叉口停止线的最短时间/s; x_{bl} 为车道组 l 中公交专用车道 b 的车道长度/m; v_{bl} 为车道组 l 中公交专用车道 b 上行驶车辆的平均速度/(m·s⁻¹); D_{jdl} 为车道组 l 中车道 d 上车辆 j 的延误/s; P_j 为社会车辆 j 的载客量/人。

式(19)计算的是执行优先策略后,优先公共汽电车及其同相位受益车辆减少的人员总延误;式(20)计算的是因优先策略导致的社会车辆增加的人员总延误。两者之差($E_{kb} - E_{kc}$)即为实施公交优先信号控制策略

的人员延误净效益。

3 车辆轨迹优化求解算法

3.1 公共汽电车轨迹优化

为实现车辆轨迹控制的平滑性, 本文采用匀加/减速策略对公共汽电车的轨迹进行优化, 其中加速度和减速度数值相等, 符号相反。

$$\text{加速度函数 } a_{ibl}(t) = \begin{cases} a_{ibl}, & t_{ibl} \leq t < t_1 \\ 0, & t_1 \leq t < t_2 \\ -a_{ibl}, & t_2 \leq t \leq t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k} \end{cases}, \quad (21)$$

$$\text{位移函数 } x_{ibl}(t) = \begin{cases} v_i(t_{ibl}) \times (t_1 - t_{ibl}) \mp 0.5a_{ibl}(t_1 - t_{ibl})^2, & t_{ibl} \leq t \leq t_1 \\ v_i(t_{ibl}) \times (t_1 - t_{ibl}) \mp 0.5a_{ibl} \times (t_1 - t_{ibl})^2 + (v_i(t_{ibl}) \mp a_{ibl}(t_1 - t_{ibl})) \times (t_2 - t_1), & t_1 \leq t \leq t_2 \\ x_{sf} + x_{je} - x_i(t_{ibl}), & t_2 \leq t \leq t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k} \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{目标车速约束 } v_{b,cross} = v_i(t_{ibl}) + a_{ibl}(t_1 - t_{ibl}) - a_{ibl}(t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k} - t_2). \quad (23)$$

绿灯提前关闭情形下, 公共汽电车需加速通过交叉口, 其轨迹优化求解算法如下:

$$\text{加速度函数 } a_{ibl}(t) = \begin{cases} a_{ibl}, & t_{ibl} \leq t < t_1 \\ 0, & t_1 \leq t < t_2 \\ -a_{ibl}, & t_2 \leq t \leq t_{l,k} \end{cases}, \quad (24)$$

$$\text{位移函数 } x_{ibl}(t) = \begin{cases} v_i(t_{ibl}) \times (t_1 - t_{ibl}) \mp 0.5a_{ibl}(t_1 - t_{ibl})^2, & t_{ibl} \leq t < t_1 \\ v_i(t_{ibl}) \times (t_1 - t_{ibl}) \mp 0.5a_{ibl} \times (t_1 - t_{ibl})^2 + (v_i(t_{ibl}) \mp a_{ibl}(t_1 - t_{ibl})) \times (t_2 - t_1), & t_1 \leq t \leq t_2 \\ x_{sf} + x_{je} - x_i(t_{ibl}), & t_2 \leq t \leq t_{l,k} \end{cases} \quad (25)$$

$$\text{目标车速约束 } v_{b,cross} = v_i(t_{ibl}) + a_{ibl}(t_1 - t_{ibl}) - a_{ibl}(t_{l,k} - t_2). \quad (26)$$

绿灯延迟启动情形下, 公共汽电车需减速等待绿灯, 其轨迹优化求解算法如下:

式(21)~(26)中: t_1 为车辆由匀加速(或匀减速)改为匀速的时间节点/s; t_2 为车辆由匀速改为匀减速(或匀加速)的时间节点/s。

3.2 冲突社会车辆轨迹优化

如图 2b 所示, 当公共汽电车与放行社会车流的中问车辆存在冲突时, 采用冲突车流断链轨迹控制策略。该策略的核心是, 在冲突车辆到达冲突区的时刻必须满足 $t_{c2} + t_{sa}$ 的约束条件下, 对冲突社会车辆实施轨迹优化, 其求解算法与公共汽车的轨迹优化算法相同。

4 仿真设计与结果分析

4.1 仿真参数设置

本文采用 MATLAB 数值仿真平台对所提出的公交优先信号控制策略进行验证。仿真以图 1 所示典型十字形交叉口为例, 各进口道通信控制区域长度均为 200 m, 通信控

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

如图 2c 和图 2d 所示, 公共汽电车轨迹优化的基本思路为: 首先确定公共汽电车到达停车线或冲突区的目标时刻, 然后据此设计其加/减速过程, 使车辆在指定时刻准确到达目标位置。由 2.4 节分析可知, 在图 2d 所示情况下, 公共汽电车穿过冲突区 z 的时间区间为 $[t_{l,k} + g_{l,k} - \Delta g_{l,k}, t_{l,k} + g_{l,k}]$ (对应绿灯提前关闭)或 $[t_{l,k}, t_{l,k} + \Delta g_{l,k}]$ (对应绿灯延迟开启)。

制区域边界至公共汽电车站的距离为 100 m。交叉口初始车道功能配置如下: 东、西、南、北 4 个进口方向均设置 1 条混合驾驶左转车道和 2 条混合驾驶直行车道; 东、西进口最右侧车道设置为混合驾驶右转车道, 南、北进口最右侧车道设置为公交专用车道。主要仿真参数取值如表 1 所示^[13]。各流向单位时间交通量设置如表 2 所示。假设所有申请优先通行的公共汽电车均达到系统设定的最大晚到时刻阈值, 以测试策略在极限条件下的控制效果。

对TPC-TO策略进行敏感性分析，考察关键参数变化对控制效果的影响。

4.3 仿真结果分析

基于表2所示的交通量条件进行仿真，各方案下的社会车辆车均延误结果见表3。可以看出，公交优先信号控制策略的实施会对社会车辆的车均延误产生显著影响。

方案1中，在整体输入交通量基本均衡的条件下，东西直行方向的社会车辆车均延误高于南北直行方向。经分析，其主要原因在于东进口直行第二车道随机生成车辆进入通信控制区域时的初始速度较低，导致在轨迹优化诱导过程中难以形成连续的饱和车队，从而影响了该方向的通行效率。

方案2中，除东西直行相位的社会车辆车均延误下降外，其余3个相位的车均延误均有所上升。这是因为当公共汽车满足优先通行条件时，东西直行车道对应的绿灯时间被延长，使得该相位能够释放更多车辆，因而延误降低；但与此同时，其余3个相位的车辆排队时间相应增加，导致延误上升。

相较于方案2，方案3中4个相位的车均延误均有所下降，交叉口整体车均延误较方案2降低了6.0%。这一改善效果源于TPC-TO策略的本质特点：该策略仅对与公共汽车存在直接冲突的车流产生局部影响，造成其延误略微增大，但非冲突车流完全不受干扰；而方案2则会对后续多个相位产生连锁影响，导致整体延误大于TPC-TO策略。

为考察不同交通负荷下TPC-TO策略的适应性，以表2中的输入数据作为基准值，以其不同倍数作为输入量，分析不同交通量对TPC-TO策略效果的影响。不同输入交通量下社会车辆车均延误的变化趋势如图3所示；自适应控制与定时控制方式下，NTSP与TPC-TO两种策略的延误对比结果见图4。

仿真结果表明，随着输入交通量的增加，社会车辆的车均延误总体呈上升趋势。在相同条件下，TPC-TO策略在自适应信号控制下对社会车辆延误的控制效果优于定时控制，其原因在于：自适应信号控制能够根据车辆实时运行状态动态分配通行时间，从而为所构建的连续车队提供更匹配的放行条件，提高车辆整体的通行效率。相比之下，定时控制仅按照预设配时方案放行，信号放行时段与车队到达过程的匹配程度较低，且受公交优先信号控制策略影响的车辆数更多，因此实施TPC-TO策略后，社会车辆延

误的上升趋势更为明显。

当输入交通量达到表2中基准值的1.8倍

表1 仿真参数取值

Tab.1 Simulation parameter settings

参数名称	取值	参数名称	取值
最高速度/(m·s ⁻¹)	15	CHV反应时间/s	1.0
最低速度/(m·s ⁻¹)	4	CAV-CAV、CHV-CAV饱和车头时距/s	1
社会车辆期望速度/(m·s ⁻¹)	11	CHV-CHV、CAV-CHV饱和车头时距/s	2
公共汽车期望速度/(m·s ⁻¹)	8.3	CAV专用车道直行饱和流率/(pcu·h ⁻¹)	3 600
最大加速度/(m·s ⁻²)	4	人工驾驶车道直行饱和流率/(pcu·h ⁻¹)	1 800
社会车辆期望加速度/(m·s ⁻²)	2.5	CAV专用车道左转饱和流率/(pcu·h ⁻¹)	3 200
公共汽车期望加速度/(m·s ⁻²)	2	人工驾驶车道左转饱和流率/(pcu·h ⁻¹)	1 600
左转车流最短绿灯时间/s	12	CHV平均速度/(m·s ⁻¹)	8
左转车流最长绿灯时间/s	45	公共汽车发车间隔/min	6
直行及右转车流最短绿灯时间/s	12	公共汽车站停留时间均值/s	30
直行及右转车流最长绿灯时间/s	60	公共汽车站停留时间标准差/s	2
公共汽车车长/m	10	公共汽车载客数/人	20~50
社会车辆车长/m	4	公共汽车额定载客数/人	50
排队时相邻CAV安全距离/m	0.5	社会车辆车均载客数/人	1.2
连续车辆之间的安全距离/m	3.6	启动公交优先信号控制的载客率下限阈值	0.6
CAV反应时间/s	0.1	仿真时长/s	3 600

表2 单位时间交通量

Tab.2 Traffic volume per unit time

进口方向	左转		直行与右转	
	CHV	CAV	CHV	CAV
东	137	135	425	436
西	119	138	413	434
南	139	147	398	431
北	121	149	425	436

表3 不同方案的社会车辆车均延误仿真对比

Tab.3 Simulation comparison of average delay for general vehicles under different scenarios

方案	东西左转	东西直行	南北左转	南北直行	全部
方案1车均延误/s	16.81	30.23	16.80	18.83	22.68
方案2车均延误/s	19.58	29.73	19.63	24.35	25.24
方案3车均延误/s	17.39	30.23	17.09	21.32	23.73
方案3较方案2车均延误的变化率/%	-11.20	1.70	-12.90	-12.40	-6.0

后,自适应信号控制下TPC-TO策略与NTSP策略的车均延误趋于一致;而在定时控制方式下,这一现象在输入交通量达到基准值的1.65倍时即已出现。其原因在于:随着交通量增加,两种控制方式下因TPC-TO策略而产生额外延误的车辆数不断增多,社会车辆延误随之加速增长;但当交通量进一步接近

饱和时,策略实施所引发的交通扰动范围扩大,受公交优先信号控制执行条件的约束,TPC-TO策略的实际执行次数显著减少。特别是在多股车流交织的复杂场景下,受影响车辆数量进一步增加,导致TPC-TO策略的执行频率明显下降,使其控制效果逐渐接近无公交优先信号控制状态。

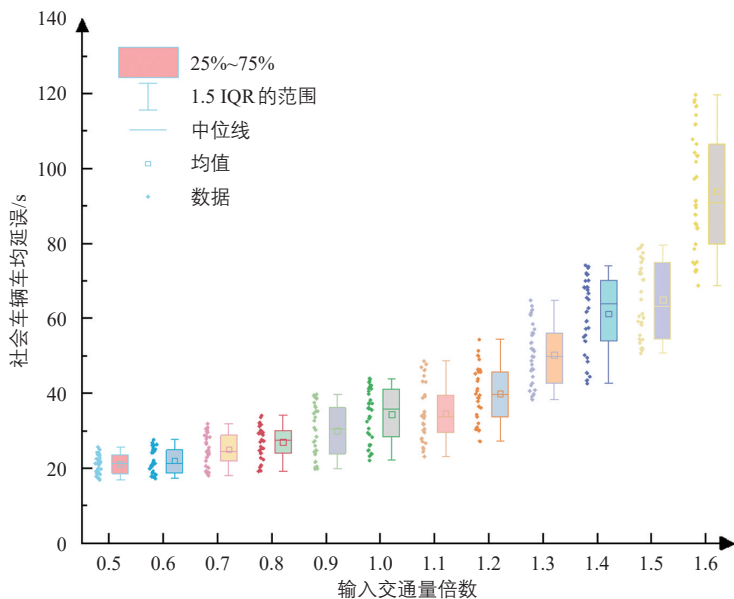


图3 TPC-TO策略下车均延误随输入交通量变化趋势

Fig.3 Variation trend of average vehicle delay with input traffic volume under the TPC-TO strategy

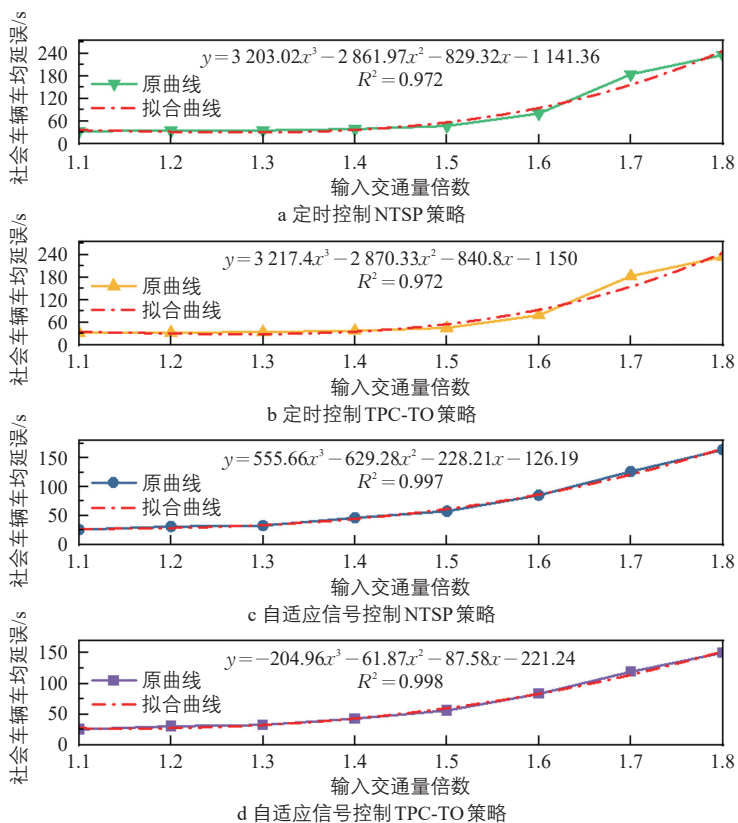


图4 定时控制和自适应信号控制下NTSP与TPC-TO两种策略的延误趋势

Fig.4 Delay trends of the NTSP and TPC-TO strategies under fixed-time and adaptive signal control

4.4 敏感性分析

4.4.1 CAV渗透率对车均延误的影响

在保持其他仿真参数不变的条件下,将CAV渗透率以步长0.1由0.1递增至1.0,仿真结果见图5。TPC-TO策略下,社会车辆车均延误随CAV渗透率的增大而逐渐改善。其原因为:CAV的饱和车头时距小于CHV,因此在相同的绿灯时间内能够放行更多车辆。当CAV渗透率增至1.0时,系统整体效益达到最佳。此时所有车辆均可实现协同优化,最大化利用绿灯时间,减少不必要的停车与启动延误,从而最大限度降低整体车均延误。

在低渗透率条件下,尽管CAV对交通流的改善作用有限,但依然能够通过优化行驶路径和提高通行效率,实现一定程度的延误减少。随着渗透率的提高,CAV逐渐在交通流中占据主导地位。其更短的跟车距离和更快的反应速度大幅提升了通行效率,从而显著降低社会车辆的车均延误。

4.4.2 公共汽电车发车频率对车均延误的影响

在保持其他仿真参数不变的条件下,将公共汽电车发车频率以步长5由10辆·h⁻¹递增至35辆·h⁻¹,仿真结果见图6。在TPC-TO策略下,社会车辆车均延误随发车频率的增大呈上升趋势;当发车频率超过20辆·h⁻¹后,社会车辆的车均延误骤增。其原因为:公共汽电车数量增多,其优先通行请求频次相应上升,导致社会车辆延误增长加剧。当发车频率超过20辆·h⁻¹后,同一信号周期内可能出现两次或更多次优先通行请求,严重干扰正常的信号配时方案,显著影响社会车辆的正常通行。由此可见,在高发车频率下,公交优先信号控制策略对社会车辆延误的负面影响明显增大。

5 结束语

基于网联交通环境下车辆运行轨迹的可控性,本文提出了一种面向公共汽电车穿越

冲突车流的优先通行方法——基于轨迹优化的公交优先信号控制(TPC-TO)策略。该方法综合运用延迟开启(或提前结束)冲突车流绿灯时间,以及对冲突车辆实施轨迹优化两种手段,在保障公共汽电车优先通行的同时,有效减少了对社会车辆通行利益的侵占。

仿真结果表明,相较于传统公交优先信号控制方法,本文提出的TPC-TO策略使交叉口整体车均延误下降了6.0%,对社会车辆的负面影响更小。该策略更适用于中低交通量环境,在此条件下,社会车辆延误主要源于信号控制策略本身,而非车流间的相互干扰。与定时信号控制方案相比,本策略在自适应信号控制方案下的延误增长幅度更小,表现出更好的适应性。

需要指出的是,本文提出的TPC-TO策略适用于设置有公交专用车道的交叉口。对于无公交专用车道的交叉口,如何通过轨迹优化实现公共汽电车的优先通行,仍是一项值得深入研究的课题。

参考文献:

References:

[1] Chen Yongheng, Li Wanning, Wu Changjian, et al. Method of the left-turning bus priority at intersections based on a variable lane[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2022, 38(2): 195-202.

[2] 吴兵,王海山,王艳丽. 考虑到达预测误差的短间距交叉口公交信号优先方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 91-98.

Wu Bing, Wang Haishan, Wang Yanli. An active transit signal priority method considering short-term prediction error[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(1): 91-98.

[3] 徐洪峰,陈虹瑾,张栋,等. 逆向左转交叉路口的全感应公交优先信号控制技术[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 214-225.

Xu Hongfeng, Chen Hongjin, Zhang Dong, et al. Hybrid fully-actuated signal control and transit signal prioritization at intersections with contraflow left-turn lanes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 214-225.

[4] Liu Haiqing, Teng Kunmin, Rai L, et al. Transit signal priority controlling method considering non-transit traffic benefits and coordinated phase states for multi-rings timing plan at isolated intersections[J]. IEEE Transactions on

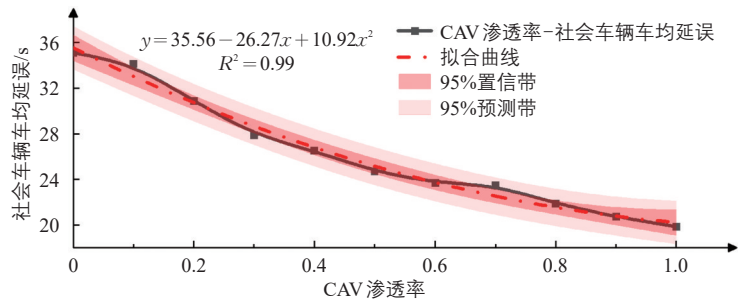


图5 TPC-TO策略下社会车辆车均延误随CAV渗透率变化趋势

Fig.5 Variation trend of average delay for general vehicles with CAV penetration rate under the TPC-TO strategy

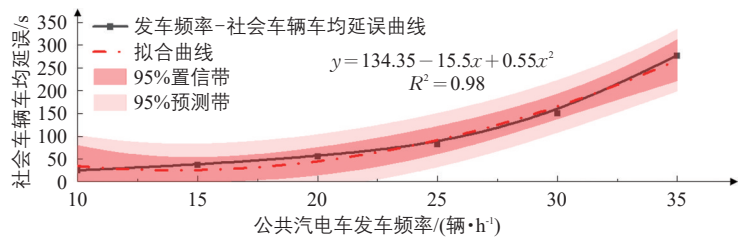


图6 TPC-TO策略下社会车辆车均延误随发车频率变化趋势

Fig.6 Variation trend of average delay for general vehicles with bus and trolleybuses departure frequency under the TPC-TO strategy

Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(2): 913-936.

[5] 胡兴华,朱晓宁,隆冰. 车路协同下考虑绿波协调的公交优先控制[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 74-82.

Hu Xinghua, Zhu Xiaoning, Long Bing. A bus priority control model considering green wave coordination under cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Transportation systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 74-82.

[6] 王雅薇,李欣,胡家华. 公交车生态车速引导与信号优先协同优化模型[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 240-252.

Wang Yawei, Li Xin, Hu Jiahua. Collaborative optimization model for bus eco-speed guidance and transit signal priority strategy[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 240-252.

[7] Ma Wanjing, Wan Lijuan, Yu Chunhui, et al. Multi-objective optimization of traffic signals based on vehicle trajectory data at isolated intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 120: 102821.

[8] 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, 2021, 13(4): 17-30.

(下转第58页)