

基于相位优先度规则的单点公交优先控制策略

董玉璞, 李克平, 倪颖

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了丰富决定信号切换的关键交通事件, 并进行合理平衡和协调, 达到多目标优化, 提出了相位优先度的概念, 根据关键交通事件的触发计算相位优先度, 在此基础上设计了一种在双环相位结构下基于相位优先度规则的单点公交优先信号控制策略, 该规则包括起始相位选择规则、屏障内相位切换规则和屏障间相位切换规则。仿真测试和分析结果表明, 相对定时控制、基本感应控制, 该控制策略可以有效地减少公交车辆延误, 社会车辆也同时受益, 达到多目标主体的利益平衡; 与基于相位优先度规则的自适应控制相比, 该控制策略保证了公交优先的有效性。

关键词: 交通控制; 公交优先控制策略; 相位优先度; 双环相位结构

中图分类号: U491.232

文献标志码: A

Isolated Transit Signal Priority Control Strategy Based on Phase Priority Degree Rule

DONG Yupu, LI Keping, NI Ying

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

Abstract: In order to enrich the key traffic events, which determine signal transition, and balance them to achieve multi-objective optimization, the concept of phase priority degree is proposed. Phase priority degree is calculated by key traffic events triggering. Under the dual-ring phase structure, the isolated transit signal priority control strategy based on phase priority degree rules is introduced. The logic rules include rules for initial green combination generation, rules for phase transition in barriers and rules for phase transition between barriers. Simulation analysis shows that in comparison with the fixed time control and basic actuated control, the proposed control strategy can reduce delay of transit vehicles efficiently, delay of general vehicles is also reduced to achieve benefit balance among multi-objectives; compared to adaptive control based on phase priority degree,

the proposed control strategy insures the effectiveness of transit priority.

Key words: traffic control; transit signal priority control strategy; phase priority degree; dual-ring phase structure

公交信号实时优先控制是主动优先技术的发展, 制定的优先策略考虑了公交车辆与社会车辆效益平衡、多申请排序等问题^[1]。实时优先开拓了包括基于优化模型、基于规则的自适应公交优先控制方法。

国内外学者对基于优化模型的优先控制方法进行了较多的研究, 包括基于元胞自动机、启发式算法、动态优化、智能体、双层模型和动态规划等模型的实时公交优先策略^[2-7], 它们共同的局限性在于: ①车辆到达预测信息的可靠性亟待提高; ②优化模型计算繁复, 特别对于中国道路社会交通及公共交通复杂的路况信号切换过程中效益降低。

相对而言, 基于规则的实时优先控制策略研究较少。文献[8-11]在改进的双环相位结构下设计了一种基于规则的单点公交优先控制策略, 但是该规则判断的交通事件较少, 并且在判断过程中优先照顾绿灯相位的利益, 而较忽略红灯相位的通行请求。韩平超^[12]、柳祖鹏等^[13]提出了一种基于绿灯需求度的相位切换决策流程, 设计了绿灯相位、红灯相位下绿灯需求度的计算方法, 在此基础上进行相位切换决策。该研究绿灯需求度计算方法简单, 对于红灯相位下考虑公交优先的绿灯需求度计算不科学, 仿真测试结果显示公交优先的效益有限, 并且该方法相位结构固定, 为传统的两相位和四相位设计, 不能实现动态相位组合。Li Ruimin等^[14]提出了一种基于时刻表的多目标公交信号优先模型, 该模型根据一系列规则分别对迟到和早到公交车辆实施不同的优

收稿日期: 2013-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(51178343)

第一作者: 董玉璞(1984—), 女, 博士生, 主要研究方向为交通信息工程及控制。E-mail: dongdong805@163.com

通讯作者: 倪颖(1984—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为交通控制、交通仿真。E-mail: ying_ni@tongji.edu.cn

先策略. 该方法应用的相位结构简单(三相位), 并且需要预测公交车辆到达交叉口的时刻, 存在不稳定性.

本文丰富决定信号切换的关键交通事件数目, 在关注公交车辆相关交通事件的同时增加社会车辆相关交通事件的判断, 给予绿灯相位通行权的同时考虑红灯相位的通行请求; 在关键交通事件优先等级制定的基础上计算相位优先度, 并丰富相位结构, 实现相位的自由搭接和跳转; 提出在双环相位结构下以相位优先度为基础、基于规则的单点公交优先信号控制策略, 对关键交通事件多目标主体进行合理平衡和协调, 达到多目标优化, 改善以往研究中过多关注公交车辆优先而造成社会车辆延误大幅度增加以致公交优先较多停留在理论研究阶段而在实践中较难实施的弱点.

1 相位相序结构

相位相序结构包括相位组合方案和相位切换方案, 它们决定了相位组合和相位切换的灵活性以及相位切换决策方法的复杂程度. 美国国家电气制造商协会 (National Electronic Manufacturers Association, NEMA) 制订的交通控制技术标准中, 针对一个“十字形”交叉口建立了具有 8 个机动车相位的双环相位结构, 如图 1 所示. 双环结构包含环 A 和环 B; 屏障把南北相位和东西相位分开, 东西方向的 4 个相位组成屏障 1, 南北方向的 4 个相位组成屏障 2; 右转机动车相位与紧邻的直行机动车相位同步获得通行权.

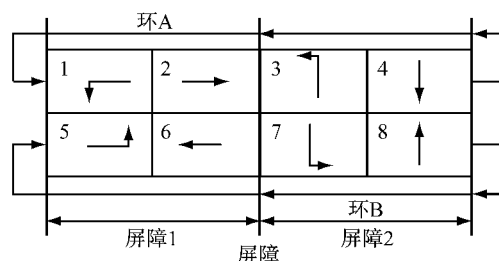


图 1 NEMA 双环相位结构

Fig.1 NEMA dual ring phase structure

相位组合方案用以描述允许同步获得通行权的所有相位组合关系, 每个环里的相位只能与非冲突相位(同屏障内的不同环中的相位)同时放行, 产生 8 种可能的相位组合方案, 分别为相位组合 1 和 5, 1 和 6, 2 和 5, 2 和 6, 3 和 7, 3 和 8, 4 和 7, 4 和 8.

相位切换方案用以描述当前绿灯相位组合与下一绿灯相位组合的更迭关系. 根据相位切换对象的位置关系, NEMA 双环结构相位切换过程包含屏障内切换、屏障间切换及起始相位组合选择. 假定: ① I 和 J 是起始相位; ② I' 和 J' 是 I 和 J 的屏障内冲突相位, 属于末尾相位. 相位切换过程如图 2 所示.

分析相位切换过程的基本规律如下: ①对于起始相位组合 $I+J$, 存在 2 种备选的过渡相位组合 $I'+J$, $I+J'$ 以及一种末尾相位组合 $I'+J'$. ②对于相位组合 $I+J$, 若首先切断相位 I 的绿灯时间, 可切换至相位组合 $I'+J$ 或 $I'+J'$; 若同步切断相位 I, J 的绿灯时间, 切换至相位组合 $I'+J'$, 进入屏障间相位切换. ③屏障间相位切换时, 必须同时切断相位组合 $I'+J'$ 的绿灯时间, 并从 4 种备选相位组合中确定起始相位组合 $M+N$.

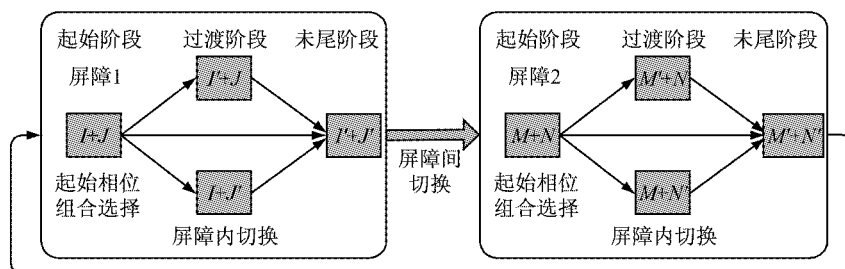


图 2 双环结构相位切换过程

Fig.2 Phase transition process of dual ring structure

2 交通事件优先等级及相位优先度制定

2.1 交通事件及优先等级制定

在交叉口的控制对象中, 公共交通流和社会交通流构成了多目标主体, 每个目标主体包含不同关

键交通事件, 关键交通事件的触发会产生通行权的请求, 引导交叉口信号控制策略的制定. 通行权的大小通过交通事件优先等级表征. 本文的关键交通事件包含公交车辆到达与离开、车辆排队、车辆等待通行、车流连续性等. 其中公交车辆到达与离开事件只能由公共交通流触发, 而后 3 种关键交通事件既能

由社会车辆触发也能由公交车辆触发,与公交交通流的组织形式相关。在设有公交专用道的情况下,公交专用道需检测全部4类交通事件(只检测公交车辆),非公交专用道检测后3种交通事件(只检测社会车辆);在未设公交专用道的情况下,车道检测4类交通事件(检测公交车辆以及社会车辆的混合车流)。

(1) 公交车辆的到达与离开。公交车辆到达与离开的检测方法是设置检入与检出检测器。检入检测器放置在停车线上游,其计算如式(1)所示;检出检测器紧贴停车线放置于其后(下游)。

$$L_{\text{check-in}} = V_{\text{bus}} \times T_{\text{priority}} \quad (1)$$

式中: $L_{\text{check-in}}$ 为公交检入检测器距停车线距离; V_{bus} 为公交车辆的行驶速率; T_{priority} 为公交单位延长时间。

公交车辆未驶出检出检测器前该事件的优先等级为恒值 P_{LA} ,保持优先等级不变,如式(2)所示。这种方法可保证实施绿灯延长策略时公交车辆在没有通过停车线前一直保持通行权;实施红灯早断策略时当检测到检入检测器与检出检测器间存在公交车辆时一直保持通行权请求;当所有公交车辆都驶出检出检测器后,该交通事件结束,优先等级归零。

$$P_{\text{Lbus}} = \begin{cases} P_{\text{LA}} & N_{\text{bus}} > 0 \\ 0 & N_{\text{bus}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{Lbus} 为公交车辆的到达与离开事件的优先等级; N_{bus} 为检入检测器与检出检测器间的公交车辆数。

(2) 车辆排队。车辆排队交通事件的检测方法是设置排队检测器,在车辆排队长度小于阈值 L_{queue} 时不会触发排队事件通行权的产生,反之则赋予车辆排队事件 P_{LB} 的优先等级,如式(3)所示。检测器的放置位置与判断该事件触发所设定的排队长度阈值相同。

$$P_{\text{Lqueue}} = \begin{cases} P_{\text{LB}} & L \geq L_{\text{queue}} \\ 0 & L < L_{\text{queue}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{Lqueue} 为车辆排队事件优先等级; L 为车辆排队长度; L_{queue} 为排队长度阈值。

(3) 车辆等待通行。车辆等待通行交通事件的检测方法是设置头车检测器,当头车等待时间超过阈值 T_{wait} 时该交通事件触发,并产生通行权,赋予该事件 P_{LC} 的优先等级,如式(4)所示;检测器紧贴停车线放置于其前(上游)。

$$P_{\text{Lwait}} = \begin{cases} P_{\text{LC}} & t_{\text{wait}} \geq T_{\text{wait}} \\ 0 & t_{\text{wait}} < T_{\text{wait}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{Lwait} 为车辆等待通行事件优先等级; t_{wait} 为头车等待时间; T_{wait} 为头车等待时间阈值。

(4) 车流连续性。车流连续性交通事件的检测方法是设置车间时距检测器。检测器放置在停车线上游,其计算如式(5)所示。

$$L_{\text{gap}} = V \times t_{\text{gap}} \quad (5)$$

式中: L_{gap} 为车间时距检测器距停车线距离; V 为车辆行驶速率; t_{gap} 为车辆车间时距。

设置车间时距阈值 T_{gap} 为连续2辆车的最大允许车间时距。当检测器采集的车间时距小于等于 T_{gap} 时形成连续的车流,该交通事件触发,并产生通行权,赋予该事件 P_{LD} 的优先等级,如式(6)所示。

$$P_{\text{Lgap}} = \begin{cases} P_{\text{LD}} & t_{\text{gap}} < T_{\text{gap}} \\ 0 & t_{\text{gap}} \geq T_{\text{gap}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{Lgap} 为车流连续性事件的优先等级; T_{gap} 为车间时距阈值。

2.2 相位优先度

在信号控制交叉口,各个方向的交通流中包含着公交优先控制多目标主体所对应的各类交通事件,每个交通事件的触发都会引起通行权的变更和产生,各方向或相位之间通行权的不同会引导信号切换,为了表征某时刻各相位对通行权的需求程度,引入了相位优先度的概念,相位优先度的计算是本控制策略的基础。其中相位组合优先度、屏障优先度分别为屏障内比较、屏障间比较计算。

(1) 相位优先度。相位优先度为该相位中触发的所有交通事件优先等级最大值,相位优先度的计算如式(7)所示。

$$P_{\text{Di}} = \max(P_{\text{LE1}}, \dots, P_{\text{LEn}}) \quad (7)$$

式中: P_{Di} 为相位 i 的相位优先度; P_{LEn} 为相位 i 中交通事件 E_n 的优先等级, n 为相位 i 中交通事件总数。

(2) 相位组合优先度。相位组合优先度是指相位组合中2个相位优先度之和,计算如式(8)所示。

$$P_{\text{DCi,j}} = P_{\text{Di}} + P_{\text{Dj}} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{DCi,j}}$ 为相位组合 i, j 的优先度;

(3) 屏障优先度。屏障优先度为该屏障内4个相位优先度最大者,计算如式(9)所示。

$$P_{\text{DBi}} = \max(P_{\text{Di}}, P_{\text{Dj}}, P_{\text{Di}'}, P_{\text{Dj}'}) \quad (9)$$

式中: P_{DBi} 为屏障 i 的优先度。

3 基于相位优先度规则的公交优先控制策略

NEMA 双环相位结构框架下,在交通事件优先

等级、相位优先度算法的基础上,面向单个信号控制交叉口设计基于相位优先度规则的公交优先控制策略,如图 3 所示. 对应于双环结构相位切换的过程,它包括 3 个规则:①屏障内相位切换规则(Rules for

Phase Transition in Barrier);②屏障间相位切换规则(Rules for Phase Transition across Barrier);③起始相位组合选择规则(Rules for Initial Green Combination Generation).

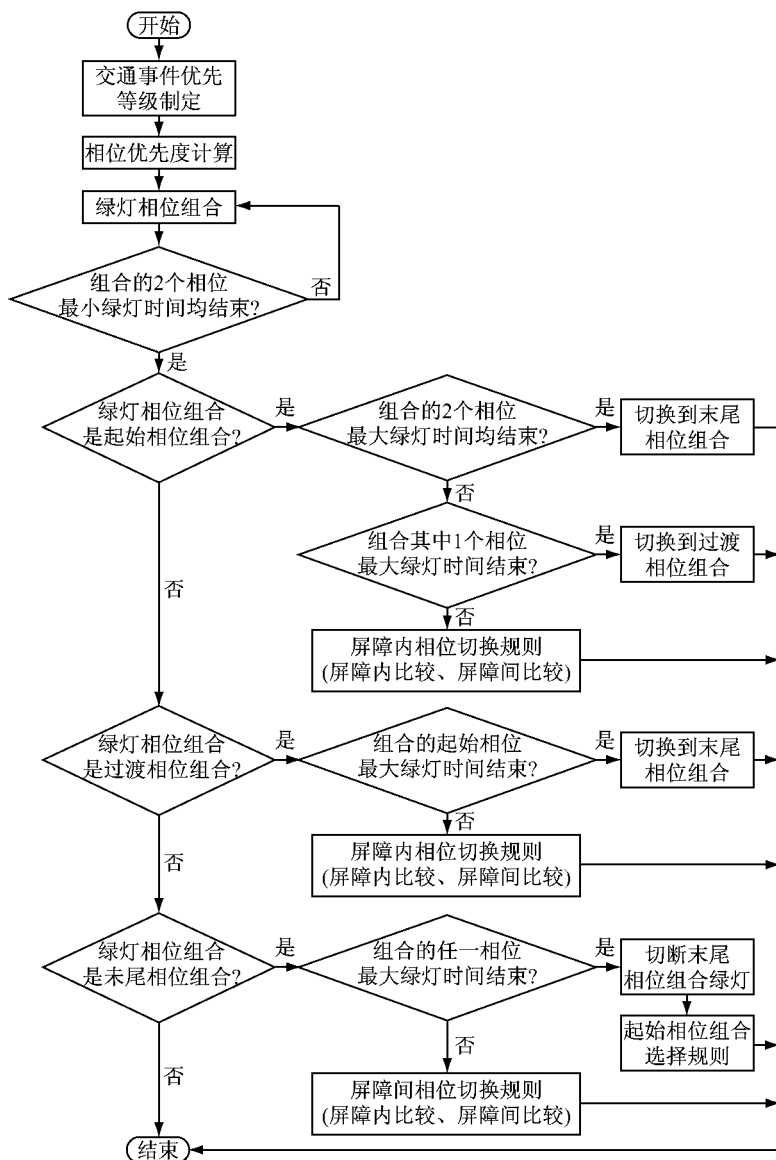


图 3 基于相位优先度规则的单点公交优先控制流程

Fig. 3 Flow chart of isolated transit signal priority control strategy based on phase priority degree rule

绿灯相位组合为起始相位组合或过渡相位组合时应用屏障内相位切换规则,绿灯相位组合为末尾相位组合时应用屏障间相位切换规则和起始相位组合选择规则. 在基于规则的相位切换判断过程中进行全局比较,包括屏障内比较和屏障间比较,判断 8 个相位中最大优先度所在相位,从其非冲突相位中选择较大的优先度相位进行组合,判断是否为当前绿灯相位组合,在此基础上利用规则进行相位切换判断.

同时基于相位优先度规则的公交优先控制策略

在实施过程中受到信号控制外部框架的约束,机动车相位最小绿灯时间用以保证行车安全、行人安全过街和一定数量的排队车辆完全通过停车线,在此期间不应进行相位切换决策;最大绿灯时间用以满足连续交通流的通行需求,同时保证冲突相位行人、机动车等待时间不过长,超过该值则应进行相位切换. 根据绿灯相位组合阶段的不同信号控制外部框架的判断如图 3 所示.

(1) 判断当前绿灯相位组合所含 2 个相位最小绿灯时间是否满足,当 2 个相位的绿灯时间都大于

其最小绿灯时间时进行绿灯相位组合最大绿灯时间判断,分 3 种相位组合情况分析;否则继续当前相位组合绿灯。

(2) 绿灯相位组合是起始相位组合时,当组合中的 2 个相位绿灯时间均大于其最大绿灯时间时,切换到末尾相位组合;当组合中只有 1 个相位最大绿灯时间结束时,切断突破最大绿灯时间相位的绿灯,切换到过渡相位组合;当组合中的相位绿灯时间均小于其最大绿灯时间时,进入屏障内相位切换规则模块,进行起始相位组合切换决策。

(3) 绿灯相位组合是过渡相位组合时,只需判断过渡相位组合中的起始相位绿灯时间,当大于其最大绿灯时间时,切断其绿灯并切换到末尾相位组合;否则进入屏障内相位切换规则模块,进行过渡相位组合切换决策。

(4) 绿灯相位组合是末尾相位组合时,当组合中的任一相位绿灯时间大于其最大绿灯时间时,同时切断组合中的 2 个相位绿灯,进入起始相位组合选择规则模块,选择下一屏障的起始绿灯相位组合;否则进入屏障间相位切换规则模块,进行末尾相位组合切换决策。

3.1 起始相位组合选择规则

起始相位组合为屏障内最大相位优先度所在相位与 2 个非冲突相位中较大相位优先度所在相位进行组合,即当前屏障内 4 个相位组合优先度最大者。

针对起始相位选择规则,定义以下变量: P_{DiAj} 为屏障 i 的环 A 相位 j 的优先度; P_{DiBj} 为屏障 i 的环 B 相位 j 的优先度。

具体的起始相位选择规则如下:①如果 $P_{DiAj} \geq P_{DiA(j+1)}$, $P_{DiBj} \geq P_{DiB(j+1)}$,那么起始相位组合为 iA_j, iB_j ,进入屏障内相位切换规则判断,否则执行步骤②;②如果 $P_{DiAj} < P_{DiA(j+1)}$, $P_{DiBj} \geq P_{DiB(j+1)}$,那么起始相位组合为 $iA(j+1), iB_j$,进入屏障内相位切换规则判断,否则执行步骤③;③如果 $P_{DiAj} \geq P_{DiA(j+1)}$, $P_{DiBj} < P_{DiB(j+1)}$,那么起始相位组合为 $iA_j, iB(j+1)$,进入屏障内相位切换规则判断,否则起始相位组合为 $iA(j+1), iB(j+1)$,进入屏障内相位切换规则判断。

3.2 屏障内相位切换规则

当前相位组合为起始相位组合和过渡相位组合时相位切换过程遵循屏障内相位切换规则,对两者的切换规则分别进行说明,具体规则框架见图 4。

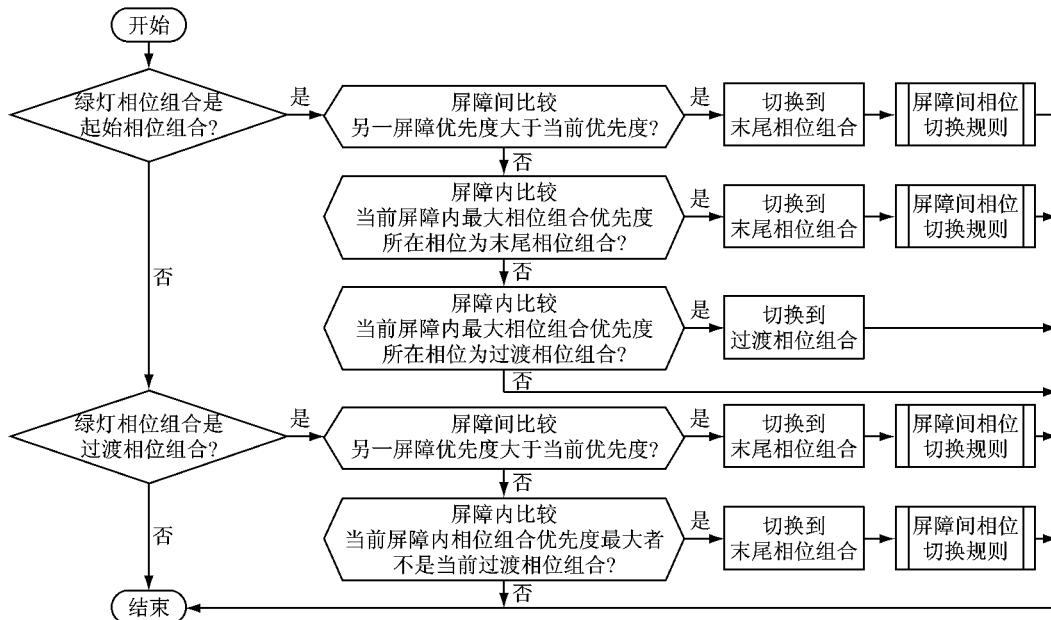


图 4 屏障内相位切换规则框架

Fig.4 Structure of rules for phase transition in barriers

(1) 起始相位组合为当前绿灯相位组合时,首先进行屏障间优先度比较,当另一屏障优先度大于当前屏障优先度时,直接切换到末尾相位组合,进入屏障间切换规则判断;否则进行屏障内优先度比较,切换到当前屏障内 4 个相位组合优先度最大者,有 3 种可能性:继续服务当前相位组合;切换到过渡相位

组合,继续进行屏障内相位切换规则判断;切换到末尾相位组合,进入屏障间切换规则判断。

(2) 过渡相位组合为当前绿灯相位组合时,首先进行屏障间优先度比较,当另一屏障优先度大于当前屏障优先度时,直接切换到末尾相位组合,进入屏障间切换规则判断;否则进行屏障内优先度比较,

当前屏障内相位组合优先度最大者为当前过渡相位组合时继续服务当前相位组合;否则切换到末尾相位组合,进入屏障间切换规则判断。

针对屏障内相位切换规则,定义以下变量: P_{DiAs} 为屏障 i 的环 A 起始相位的优先度; P_{DiAe} 为屏障 i 的环 A 末尾相位的优先度; $P_{DCiAs, iBs}$ 为起始相位组合 iAs, iBs 的优先度; P_{DBi} 为当前屏障 i 的优先度。

具体的屏障内相位切换规则如下。其中步骤(1)至步骤(2)为起始相位组合 iAs, iBs 的规则判断(步骤(1)为屏障间比较,步骤(2)为屏障内比较),步骤(3)为过渡相位组合 iAs, iBe 的规则判断,步骤(4)为过渡相位组合 iAe, iBs 的规则判断。

(1) 如果 $P_{DBi+1} > P_{DBi}$, 那么切换到末尾相位组合 iAe, iBe , 进入屏障间相位切换规则判断, 否则执行步骤(2)。

(2) 如果 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs}, P_{DCiAe, iBe}) > P_{DCiAs, iBs}$, 执行如下步骤①, 否则继续服务起始相位组合 iAs, iBs ; ① 如果 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs}, P_{DCiAe, iBe}) = P_{DCiAs, iBs}$, 那么切换到过渡相位组合 iAs, iBe 并执行步骤(3), 否则执行如下步骤②; ② 如果 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs}, P_{DCiAe, iBe}) = P_{DCiAe, iBs}$, 那么切换到过渡相位组合 iAe, iBs 并执行步骤(4), 否则执行如下步骤③; ③ 如果 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs},$

$P_{DCiAe, iBe}) = P_{DCiAe, iBe}$, 那么切换到末尾相位组合 iAe, iBe , 进入屏障间相位切换规则判断。

(3) 如果 $P_{DBi+1} > P_{DBi}$ 或者 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs}, P_{DCiAe, iBe}) > P_{DCiAs, iBs}$, 那么切换到末尾相位组合 iAe, iBe , 进入屏障间相位切换规则判断, 否则继续服务过渡相位组合 iAs, iBe 。

(4) 如果 $P_{DBi+1} > P_{DBi}$ 或者 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs}, P_{DCiAe, iBe}) > P_{DCiAe, iBs}$, 那么切换到末尾相位组合 iAe, iBe , 进入屏障间相位切换规则判断, 否则继续服务过渡相位组合 iAe, iBs 。

3.3 屏障间相位切换规则

依据双环结构屏障间切换的规则,在屏障处切换的 2 个末尾相位绿灯必须同时切断,制定屏障间切换规则。

当前相位组合为末尾相位组合时相位切换过程遵循屏障间相位切换规则,首先进行屏障间优先度比较,当另一屏障优先度大于当前屏障优先度时,切断末尾相位组合,进入起始相位组合选择规则判断;否则进行屏障内优先度比较,当前屏障内相位组合优先度最大者为末尾相位组合时继续服务当前相位组合,否则切断末尾相位组合,进入起始相位组合选择规则判断。具体规则框架见图 5。

如果 $P_{DBi+1} > P_{DBi}$ 或者 $\max(P_{DCiAs, iBs}, P_{DCiAe, iBs},$

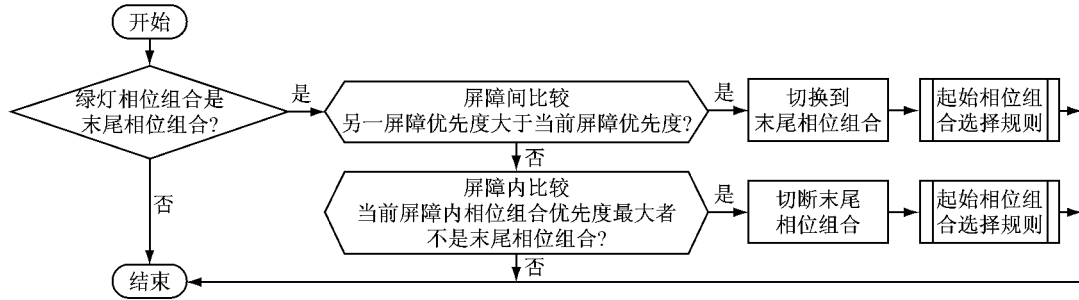


图 5 屏障间相位切换规则框架

Fig.5 Structure of rules for phase transition across barriers

$P_{DCiAe, iBs}) > P_{DCiAe, iBe}$, 那么同时切断末尾相位组合 iAe, iBe , 进入屏障 $i+1$ 起始相位组合选择规则判断, 否则继续服务末尾相位组合 iAe, iBe 。

4 仿真测试与分析

利用 VISSIM 微观仿真软件建立仿真模型, 并通过 VISVAP 外部信号控制模块编程实现基于相位优先度规则的单点公交优先控制策略。

4.1 仿真测试环境

以十字形渠化交叉口为研究背景, 道路条件如图 6 所示, 其中东西方向设有直行居中的公交专用

道, 南北方向无公交专用道。

由于现实中构建丰富复杂试验场景的困难性, 本文借助先进的微观仿真平台模拟不同交通事件参与、不同交通事件优先等级赋值、不同触发交通事件的参数取值在交叉口发生的情况, 丰富分析场景。基于仿真平台输出的人均延误效益指标进行初步的敏感性定性分析, 得到交通事件的优先等级最优赋值; 并在此基础上分析效益指标与交通事件触发参数之间的回归模型, 通过分析可得回归模型为 RBF (Radial Basis Function) 径向基神经网络, 在此基础上利用遗传算法求解神经网络得到各交通事件触发的最优参数取值。每个交通事件的优先等级赋值包

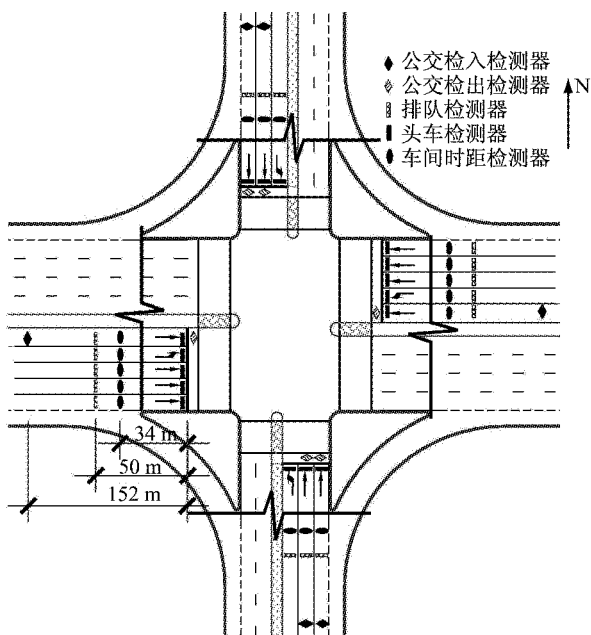


图 6 交叉口布局示意

Fig. 6 Sketch of intersection layout

括从最高到最低的 4 个等级,利用数值 1~4 代表优先等级的高低,数值越高,优先等级越高;公交车辆的到达与离开事件的触发参数 T_{priority} 包括 5 s, 7 s, 10 s, 12 s, 15 s, 共 5 个数值;车辆排队事件的触发参数 L_{queue} 包括 10~120 m 间以 10 m 的间隔取值,共 12 个数值;车辆等待通行事件的触发参数 T_{wait} 包括 10~50 s 间以 10 s 的间隔取值,共 5 个数值;车流连续性事件的触发参数 T_{gap} 依据美国信号控制手册的推荐值 3 s 设置,不进行优化分析。

各关键交通事件优先等级值分别为: $P_{\text{LA}}=4$, $P_{\text{LB}}=3$, $P_{\text{LC}}=2$, $P_{\text{LD}}=1$;各关键交通事件触发的参数经仿真优化后分别为: $T_{\text{priority}}=10$ s; $L_{\text{queue}}=50$ m; $T_{\text{wait}}=35$ s; $T_{\text{gap}}=3$ s. 按照前述公式计算各检测器布设位置,公交检入检测器、排队检测器、车车间时距

检测器分别距离停车线 152 m, 50 m, 34 m, 公交检出检测器紧贴停车线放置于其后(下游),头车检测器紧贴停车线放置于其前(上游);仿真测试的基础交通量见表 1,其中仅直行方向有公交车辆通行。

表 1 仿真模型基础交通量参数

Tab.1 Basic traffic volumes in simulation model

辆 · h ⁻¹			
进口	转向	社会车辆	公交车辆
东	左转	200	0
	直行	1 200	80
	右转	150	0
南	左转	100	0
	直行	600	50
	右转	100	0
西	左转	200	0
	直行	1 200	80
	右转	150	0
北	左转	100	0
	直行	600	50
	右转	100	0

仿真运行时,每个场景选取 5 个不同的随机种子,仿真运行时段为 0~4 200 s,数据采集时段为 600~4 200 s,前 600 s 作为路网车流预加载阶段. 分别输出车均延误(全部车辆、社会车辆、公交车辆)和人均延误(全部车辆)作为评价指标. 其中小汽车、公交车辆人均载客量分别为 1.5 人 · 车⁻¹和 30.0 人 · 车⁻¹. 对比的控制策略包括:①定时控制,利用韦伯斯特公式计算常规四相位控制方案;②基本感应控制,双环结构下只考虑车流连续性的规则控制策略;③基于相位优先度规则的公交优先控制策略;④基于相位优先度规则的自适应控制策略,即在策略 3 的基础上不考虑公交优先(公交车辆的到达与离开)的自适应控制策略. 不同的交通负荷下 4 种控制策略的效益见表 2.

表 2 不同交通负荷下 4 种控制策略的交叉口效益指标

Tab.2 Intersection performance index under three traffic loads and four control strategies

控制策略	低流量				中流量				高流量			
	车均延误/s			全部车辆 人均延误/s	车均延误/s			全部车辆 人均延误/s	车均延误/s			全部车辆 人均延误/s
	全部 车辆	社会 车辆	公交 车辆		全部 车辆	社会 车辆	公交 车辆		全部 车辆	社会 车辆	公交 车辆	
定时控制	24.7	24.6	26.1	25.5	33.2	33.1	34.1	33.7	43.2	43.2	44.2	43.8
基本感应控制	22.1	22.0	23.2	22.7	27.8	27.7	28.0	27.9	31.7	31.7	30.8	31.1
公交优先控制	19.5	20.1	10.0	13.8	23.5	24.2	10.9	15.8	28.4	29.3	11.7	18.2
自适应控制	20.2	20.2	21.4	20.9	24.0	24.0	22.9	23.3	26.0	26.2	22.8	24.0

4.2 控制策略效益对比分析

在基础流量即低流量下,对比定时控制、基本感应控制和基于相位优先度规则的公交优先控制策略,分析仿真平台输出的评价指标,如图 7 所示. 基

于规则的公交优先控制策略可以使全部车辆、社会车辆的车均延误减少,公交车辆车均延误以及全部车辆的人均延误大幅减少,基本感应控制的效益其次,定时控制的效益最差. 说明实施基于规则的公交

优先控制策略不仅可以减少公交车辆的车均延误,社会车辆也同时受益,达到多目标主体的利益平衡.在中、高流量下可以得到类似的结论.

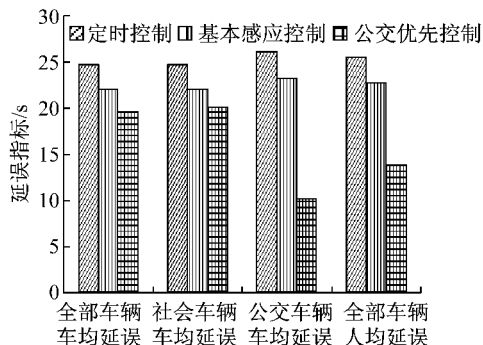


图7 低流量下不同控制策略效益对比

Fig.7 Comparison of control strategies with low traffic volume

分别对低、中、高流量下3种控制策略的效益进行对比,得到不同流量下的社会车辆和公交车辆的车均延误评价指标变化,如图8所示.

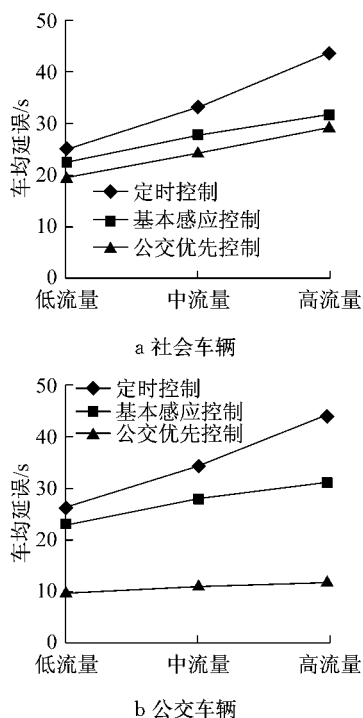


图8 3种控制策略在不同流量下的车均延误

Fig.8 Average delay variation of three control strategies with different volumes

由图8a可以看出,基本感应控制和公交优先控制策略在不同的流量下,社会车辆车均延误的变化趋势基本一致,平缓增大;但是定时控制随着流量的增加社会车辆的平均延误快速增加,流量越高前两者控制策略延误降低的幅度越大.说明定时控制不

能动态地反应交通流的变化,并且相位结构固定,而前两者控制策略利用灵活的双环结构和感应控制可以克服定时控制的缺点,从而降低社会车辆的车均延误.

由图8b可以看出,基于规则的公交优先控制策略在不同流量下公交车辆车均延误增幅很小,随着流量的增大对比定时控制和基本感应控制延误降低幅度越大.说明基于规则的公交优先控制策略可以稳定地控制和降低公交车辆车均延误.

4.3 控制策略的公交优先有效性

基于规则的公交优先控制策略的主要目的是发挥公交车辆的特性,因此比较是否提供公交优先是一个重点.对比基于相位优先度规则的公交优先控制策略和基于相位优先度规则的自适应控制策略,前者提供公交优先,而后者仅考虑车辆排队、等待通行和车流连续性,不提供公交优先,图9表示了2种策略的效益变化分数,该效益变化分数的计算方法是提供公交优先的效益指标与不提供优先的效益指标差值除以不提供优先的效益指标,负值表示提供公交优先可以降低延误.

如图9所示,2种控制策略在不同流量下全部车辆的车均延误相差不大,但是公交优先控制策略的公交车辆车均延误却大幅度降低,从而减少了全部车辆的人均延误,说明了提供公交优先的有效性,并同时不对社会车辆造成负面影响.

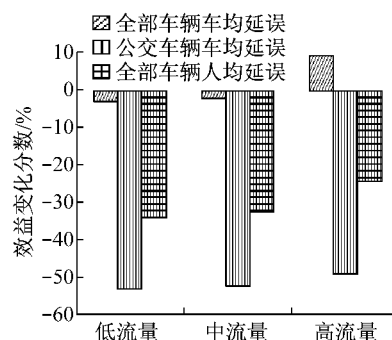


图9 基于规则的公交优先控制与基于规则的自适应控制相比效益变化分数

Fig.9 Control strategy based on phase priority degree rule performance without or with provision of transit priority

5 结语

设计的基于相位优先度规则的公交优先控制策略丰富了决定信号切换的关键交通事件数目,不仅关注公交车辆的到达与离开,同时关注车辆的排队、

等待通行以及车流连续性等交通事件,根据交通事件的触发计算相位优先度,表征某一时刻各相位对通行权的需求程度,根据起始相位选择规则、屏障内相位切换规则和屏障间相位切换规则等进行相位切换决策,给予绿灯相位通行权的同时考虑红灯相位的通行请求,达到多目标优化。

仿真测试和分析结果表明,与定时控制、基本感应控制相比,基于相位优先度规则的公交优先控制策略在不同的流量下都可以有效减少公交车车辆均延误,社会车辆也同时受益,到达多目标主体的利益平衡。与基于相位优先度规则的自适应控制相比,提供公交优先后2种控制策略的全部车辆车均延误相差不大,但是后者的公交车车辆均延误却大幅度降低,说明了提供公交优先的有效性。

本文提出的基于相位优先度规则的公交优先控制策略旨在提供公交优先的同时减少对社会车辆的负面影响,但该策略的普遍性在于可以应用优先等级及优先度概念,比如给予不同的公交车车辆不同的优先等级,实现特殊线路公交车车辆更高级别的优先等级优先通行;或者给予不同类型公交进口道的公交车车辆不同的优先等级,实现公交专用道上行驶的公交车车辆相对于混合车道上公交车车辆更高的优先等级等。

由于时间和技术条件所限,仅选取典型交叉口建立仿真模型,在一定的道路交通条件和信号控制条件下进行仿真测试,未与实际交通情况对比,具体应用于交叉口控制的效果有待实践检验。

参考文献:

- [1] Harriet R S, Brendon H, Miomir I. Transit signal priority (TSP): a planning and implementation handbook [EB/OL]. [2009-05-09]. <http://www.fta.dot.gov/do...ts/TSPHandbook10-20-05.pdf>.
- [2] Chang G L, Vasudevan M, Su C C. Bus-preemption under adaptive signal control environments [J]. Journal of the Transportation Research Board, 1995, 1494: 146.
- [3] He Q, Head L, Ding J. Heuristic algorithm for priority traffic signal control [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2259: 1.
- [4] Liu Hongchao, Alexander S, Zhang Weibin. A dynamic model for adaptive bus signal priority [C/CD] // 82th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: TRB, 2003.
- [5] Ling K. Transit headway control through conditional signal priority: a micro-simulation based approach using reinforcement learning [D]. Toronto: University of Toronto, 2003.
- [6] 孙煦, 陆化普. 公交优先下交叉口配时优化的双层模型与遗传算法 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(6): 859.
SUN Xu, LU Huapu. Bi-level optimization model of intersection timing about bus priority condition based on genetic algorithm [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(6): 859.
- [7] Ma W J, Liu Y, Yang X G. Dynamic programming model for optimal bus signal priority control with multiple requests [C/CD] // 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: TRB, 2011.
- [8] 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.
XU Hongfeng, LI Keping, ZHENG Mingming. Isolated transit signal priority control strategy based on logic rule [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 96.
- [9] Xu H, Zheng M. Impact of phase scheme on development and performance of a logic rule-based bus rapid transit signal priority [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(12): 953.
- [10] Xu H, Sun J, Zheng M. Comparative analysis of unconditional and conditional priority for use at isolated signalized intersections [J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(12): 1092.
- [11] Xu H, Zheng M. Impact of bus-only lane location on the development and performance of the logic rule-based bus rapid transit signal priority [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(3): 293.
- [12] 韩平超. 基于相位需求度的公交优先信号控制策略研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
HAN Pingchao. Research on transit signal priority control strategy based on phase need degree [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [13] 柳祖鹏, 李克平, 倪颖. 基于绿灯需求度的单点公交信号优先控制策略 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 408.
LIU Zupeng, LI Keping, NI Ying. Isolated transit signal priority control strategy based on demand degree of green [J]. Journal of Tongji University: National Science, 2013, 41(3): 408.
- [14] LI Ruimin, ZHANG Xiongfei. Bus rapid transit signal priority strategy based on schedule [C/CD]. // 91th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: TRB, 2012.