

文章编号:1671-1637(2016)05-0151-08

有轨电车信号优先时长阈值优化模型

周洋帆^{1,2}, 贾顺平^{1,2}, 陈绍宽^{1,2}, 韦伟^{1,2}

(1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要:以车辆延误和交叉口饱和度为约束条件,针对绿灯提前和绿灯延长2种优先策略,建立了求解有轨电车信号优先时长阈值的优化模型,考虑了有轨电车车身长度的影响,通过案例对模型进行验证。分析结果表明:绿灯提前策略下优先时长的阈值为0~13 s,绿灯延长策略下优先时长的阈值为5~11 s;以出行者作为研究单元时,不同的非优先相位的公交车辆数对应不同的整体效益曲线,而以车辆作为研究单元时,不同的非优先相位的公交车辆数只对应一条整体效益曲线;非优先相位的公交车辆数的临界值为16 veh,非优先相位的车辆到达率的临界值为 $0.115 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$,红灯时长的临界值为101 s,这些参数超过临界值后,不再适合给有轨电车设置信号优先。本文提出的有轨电车信号优先时长阈值的优化模型为给予有轨电车合理范围内的信号优先提供了依据。

关键词:轨道交通;有轨电车;信号优先;优先策略;优先时长阈值;出行者延误

中图分类号:U482.1

文献标志码:A

Optimization model signal priority time threshold of tram

ZHOU Yang-fan^{1,2}, JIA Shun-ping^{1,2}, CHEN Shao-kuan^{1,2}, WEI Wei^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Traffic and Transportation,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Vehicle delay and intersection saturation were taken as constraint conditions, early green and extended green priority strategies were used, and the model of solving signal priority time threshold of tram was built. The influence of tram length was considered, and the model was verified through real case. Analysis result shows that the priority time thresholds under early green strategy are 0-13 s, and the priority time thresholds under extended green strategy are 5-11 s. When travelers are regarded as research units, different bus numbers under non-priority phase correspond to different overall benefit curves. When vehicles are regarded as research units, different bus numbers under non-priority phase correspond to only one overall benefit curve. The critical value of bus number under non-priority phase is 16 veh, the critical value of vehicle arrival rate under non-priority phase is $0.115 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, and critical value of red time is 101 s. When they exceed critical values, it is not suitable to set signal priority for tram. The optimization model of signal priority time threshold of tram in this paper provides basis for giving signal priority of tram within reasonable range. 1 tab, 11 figs, 24 refs.

Key words: rail transit; tram; signal priority; priority strategy; priority time threshold; traveler delay

收稿日期:2016-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(71390332);国家973计划项目(2012CB725406);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015YJS090)

作者简介:周洋帆(1989-),女,河南商丘人,北京交通大学工学博士研究生,从事城市轨道交通研究。

导师简介:贾顺平(1963-),男,山西山阴人,北京交通大学教授,工学博士。

Author resumes: ZHOU Yang-fan(1989-), female, doctoral student, +86-10-51682264, 13114226@bjtu.edu.cn; JIA Shun-ping(1963-), male, professor, PhD, +86-10-51682264, shpjia@bjtu.edu.cn.

0 引 言

现代有轨电车是一种中等运量的城市公共交通,近年在中国迎来了全面发展的阶段。截至 2014 年底,中国共有 8 个城市运营有轨电车线路共计 141 km,在建线路 312 km^[1]。但是受到城市道路特别是信号交叉口的影响,有轨电车与社会车辆之间存在通行矛盾。为了充分发挥其快速便捷的性能,有必要对有轨电车在信号交叉口的优先通行进行研究。

现代有轨电车虽然在国内外已经有超过 30 年的运营历史,但是专门针对其信号优先的研究大都以定性分析、归纳总结和较为基础的测算为主,定量化和模型化的研究还比较缺乏。王舒祺将有轨电车的优先控制分为时间优先和空间优先 2 类^[2];Sermis 等详细描述了雅典有轨电车信号优先方案,包括绿波方法和感应信号优先方法^[3];Gatenby 等介绍了英国诺丁汉有轨电车系统,包括道路监测系统和信号优先系统^[4];Shalaby 等以多伦多核心区国王街上的有轨电车线路为背景,提出了 4 种优先仿真场景^[5];Mstsumoto 等对有轨电车车站进行了信号优先控制仿真^[6];Jeong 等在 MAXBAND 的基础上提出了 TRAMBAND 模型,通过干线信号协调得到有轨电车绿波带^[7];Zhou 等改进了既有的 AM-BAND 模型并将其用于有轨电车的干线信号协调^[8]。

有轨电车信号优先的研究较少,但公交信号优先和 BRT 信号优先方面有广泛深入的研究。张伟等选取了有信号优先的北京快速公交 1 号线和没有信号优先的 2 号线,通过调查比较了二者的运行时间和平均速度,表明信号优先的效果显著^[9];Wei 等提出了以所有车辆的耗油量和尾气排放为目标的公交信号优先策略^[10];马万经等以节能减排和最优通行行为控制原则,建立了可变速公交运行与优先控制的协调优化方法^[11];Mirchandani 等将公交信号优先和车辆调度问题相结合,解决了故障公交后续车辆利用信号优先减少乘客延误的问题^[12];Kim 等研究了多个信号优先申请下的优先处理方法^[13];Koehler 等提出了公交车辆在车站的离开时间与交叉口信号协同控制的方法^[14];Bagherian 等建立了一种将公交信号优先对车辆延误的作用考虑在内的延误方程^[15]。

上述研究以信号优先为切入点,涉及各个方面,

优先策略一般作为给定条件。然而,优先程度的不同对社会车辆和优先车辆的影响不同,因此,有必要为信号优先设定一个合理的阈值。杨远舟等利用元胞自动机通过比较停车次数、排队长度和车辆延误,给出了信号优先时长的最大值^[16]。在信号优先研究方法方面,除元胞自动机外,常用的模拟方法还有遗传算法^[17-18]、VISSIM 仿真^[19-20]、Paramics 模拟^[12]等,虽然它们能够模拟较为真实的道路场景,但是需要还原复杂的路网,并且复制性较差。另一类方法是解析法,Liu 等利用韦伯斯特图解法研究了信号优先对公交车辆和其他车辆延误的影响,并用仿真证明了方法的有效性^[21];朱晓宁等为多路公交优先建立了信号优化的双层规划模型^[22];孙煦等建立了信号优化的双层规划模型并利用遗传算法对模型进行了定量求解^[23];杨晓光等建立了公交信号优先的系统最优线性规划模型,提出了以乘客为对象的延误最小化目标^[24]。

实际上,交通出行是人的转移,将人延误代替车延误作为优化目标符合公交优先的宗旨。基于此,本文借鉴人延误优化目标和韦伯斯特图解法的思想,针对绿灯提前和绿灯延长 2 种优先策略,以交叉口整体效益为优化目标,建立了求解有轨电车信号优先时长阈值的优化模型。此外,与 BRT 和其他道路公交有所不同,有轨电车具有车身长度长、载客量大、灵活性较差等特点,本文考虑了有轨电车身长度的影响,并且分车道组进行延误计算,为给予有轨电车合理范围内的信号优先提供依据。

1 信号优先时长阈值建模

信号优先时长阈值建模最终目标是得到有轨电车信号优先时长 t 的阈值上下限,令 t_{\min} 为阈值的下限, t_{\max} 为阈值的上限。

1.1 阈值的下限

在绿灯提前策略下,有轨电车与一般公交车无差别,提前启动的绿灯只要保证优先车辆的车头能够越过进口道的停车线即可,有轨电车便会在绿灯时间内通过交叉口,因此, $t_{\min} \geq 0$ 。

在绿灯延长策略下,由于有轨电车的车身较长,仅保证有轨电车车头越过停车线显然不够,有轨电车在穿越交叉口时,会与下一相位已经开始通行的

车辆互相影响,因此,需要设置最小优先时长,保证有轨电车车头越过出口道的停车线,此时有

$$t_{\min} = \frac{L}{v} \quad (1)$$

式中: L 为交叉口宽度; v 为有轨电车通过交叉口的平均速度。

1.2 阈值的上限

阈值的上限问题可以看作是有轨电车优先的交叉口信号优化问题,找到满足约束条件并使目标函数取到最大的 t ,便得到了 t_{\max} 。2 种策略的求解方法无差别,优化模型为

$$\max P = I(t) \quad (2)$$

$$W \leq 60 \text{ s} \quad (3)$$

$$S \leq 1.5 \quad (4)$$

式中: P 为交叉口的整体效益; $I(t)$ 为优先时长为 t 时的目标函数; W 为单个车辆的延误; S 为交叉口处车道的饱和度;式(3)、(4)为约束条件。

根据《城市道路工程设计规范》(CJJ37—2012),新建道路信号交叉口服务水平按照三级水平设计,控制单个车辆的延误为 50~60 s,以 60 s 作为单个车辆延误的最大值。中国城市道路交叉口的设计多以延误为约束,并没有明确要求饱和度的大小。饱和度大于 1 会引起部分车辆二次等灯,过高会造成车辆排队和拥堵,因此,将交叉口饱和度作为约束条件,其值等于信号周期内车辆的到达量与有效绿灯时间内通行能力的比值。交叉口的整体效益是优先时长的函数。信号优先会给优先相位带来正效益,给非优先相位带来负效益。若以车辆为研究单元,那么该效益可以用所有车辆减少和增加的延误总和来衡量。然而,有轨电车编组灵活,载客量为 150~300 人。以出行者为研究单元,交叉口的整体效益可用所有出行者减少和增加的延误总和来衡量,因此,若整体效益大于零,表示执行优先能给交叉口的通行者带来正效益,且整体效益值越大,正效益越大,反之则带来负效益。

在信号周期不变的条件下,绿灯提前会导致前一相位的红灯提前到来,绿灯延长会导致后一相位的绿灯推迟到来。绿灯提前优先策略与绿灯延长优先策略下交叉口的整体效益 P_1 、 P_2 分别为

$$P_1 = D_2 - D_1 \quad (5)$$

$$P_2 = E_2 - E_1 \quad (6)$$

式中: D_2 、 D_1 分别为执行绿灯提前后优先相位所有出行者减少的总延误和其前一相位所有出行者增加的总延误; E_2 、 E_1 分别为执行绿灯延长后优先相位

所有出行者减少的总延误和其前一相位所有出行者增加的总延误。

2 延误的计算方法

延误的计算需要借助韦伯斯特图解法^[21],但 1 个相位通常有 2 个以上车道组,不同车道组的车辆到达及车辆组成不同,因此,在韦伯斯特图解法的基础上以车道组为研究单位,车道组用 j 表示。

2.1 绿灯提前策略

2.1.1 绿灯提前策略下优先相位减少的延误

令交叉口的信号周期为 C ,优先相位红灯时长为 r_2 ,并假设车辆均匀到达,车道组 j 的到达率为 p_{2j} ,离开率为 q_{2j} 。检测到有轨电车需要的绿灯提前时长为 t ,那么优先相位的绿灯开始时刻将由 t_1 向前移至 t_2 ,移动时长为 t ,绿灯提前策略下优先相位减少的延误见图 1。优先相位所有车辆减少的总延误 d_2 为图 1 中阴影部分的面积,该面积可以通过对车辆到达、离开曲线函数在相应区间上的积分得到,此时有

$$d_2 = \sum_j \frac{p_{2j}t(2r_2 - t)}{2(1 - p_{2j}/q_{2j})} \quad (7)$$

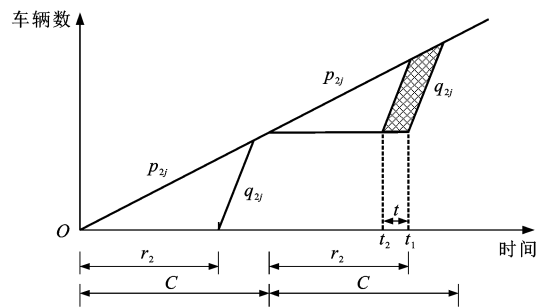


图 1 绿灯提前策略下优先相位减少的延误

Fig. 1 Decreased delay of priority phase under early green strategy

假设第 i 种车辆类型的车辆换算系数为 k_i ,载客人数为 λ_i ,在车道组 j 的到达率为 n_{ij} ,那么,优先相位所有出行者减少的总延误为

$$D_2 = \frac{d_2}{\sum_j r_2 p_{2j} / (1 - p_{2j} / q_{2j})} \cdot \sum_i \sum_j \lambda_i k_i \frac{r_2 n_{ij}}{1 - p_{2j} / q_{2j}} \quad (8)$$

2.1.2 绿灯提前策略下非优先相位增加的延误

在这种情况下,令非优先相位红灯时长为 r_1 ,并假设车辆均匀到达,车道组 j 的到达率为 p_{1j} ,离开率为 q_{1j} ,绿灯提前策略下非优先相位增加的延误见图 2。非优先相位的绿灯开始于 t_3 ,在 t_2 时车辆到达率等于车辆离开率,延误为零,最后绿灯结束于

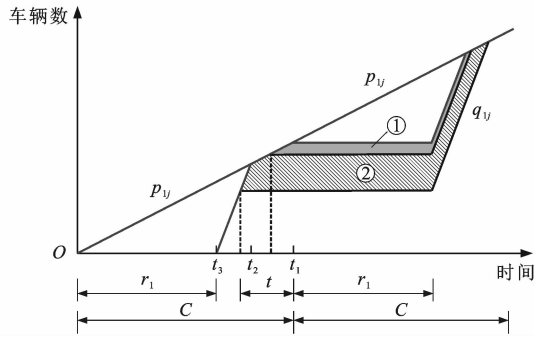


图2 绿灯提前策略下非优先相位增加的延误

Fig. 2 Increased delay of non-priority phase under early green strategy t_1 . 由于有轨电车的绿灯开始时刻提前了 t , 那么非优先相位原本绿灯结束时刻就要相应提前。若绿灯结束时刻由 t_1 移至 t_1 和 t_2 之间, 非优先相位所有车辆增加的总延误为阴影部分①的面积。若绿灯结束时刻由 t_1 移至 t_2 和 t_3 之间, 总延误为阴影部分①和②的面积之和, 此时信号周期内到达的车辆无法在一次绿灯内全部驶离, 部分车辆需要二次等灯, 黄灯时长和行人过街的最小绿灯时长分别为 y 和 g , 因此, 车道组 j 所有车辆增加的总延误 d_{1j} 、所有车辆的总延误 W_{1j} 与受影响车辆的持续时间 T_{1j} 的计算分为 2 种情况。

当 $0 \leq t \leq C - r_1 / (1 - p_{1j} / q_{1j})$ 时, 有

$$d_{1j} = \frac{p_{1j} t (2r_1 + t)}{2(1 - p_{1j} / q_{1j})} \quad (9)$$

$$W_{1j} = \frac{p_{1j} (r_1 + t)^2}{2(1 - p_{1j} / q_{1j})} \quad (10)$$

$$T_{1j} = \frac{r_1 + t}{1 - p_{1j} / q_{1j}} \quad (11)$$

当 $C - r_1 / (1 - p_{1j} / q_{1j}) < t \leq C - r_1 - y - g$ 时, 有

$$d_{1j} = \frac{p_{1j} (2r_1 + t)^2 - 2p_{1j} r_1^2 - q_{1j} (r_1 + t) (C - t - r_1)}{2(1 - p_{1j} / q_{1j})} \quad (12)$$

$$W_{1j} = \frac{[p_{1j} (C + r_1) - q_{1j} (C - t - r_1)]^2}{2p_{1j} (1 - p_{1j} / q_{1j})} \quad (13)$$

$$T_{1j} = \frac{C + r_1 - q_{1j} (C - r_1 - t) / p_{1j}}{1 - p_{1j} / q_{1j}} \quad (14)$$

所有车辆增加的总延误 d_1 、单个车辆的平均延误 W_1 、所有出行者增加的总延误 D_1 分别为

$$d_1 = \sum_j d_{1j} \quad (15)$$

$$W_1 = \frac{\sum_j W_{1j}}{\sum_j T_{1j} p_{1j}} \quad (16)$$

$$D_1 = \frac{d_1}{\sum_j T_{1j} p_{1j}} \sum_i \lambda_i k_i \sum_j T_{1j} n_{ij} \quad (17)$$

2.2 绿灯延长策略

2.2.1 绿灯延长策略下优先相位减少的延误

若检测到有轨电车需要的绿灯延长时间为 t , 那么优先相位的绿灯结束时刻会由 t_1 向后移至 t_2 , 移动时长为 t , 绿灯延长策略下优先相位减少的延误见图 3。优先相位所有车辆减少的总延误 e_2 为图 3 中阴影部分的面积, 同时可以求出优先相位所有出行者减少的总延误 E_2 , 令车道组 j 的受影响车辆的持续时间为 T_{2j} 。

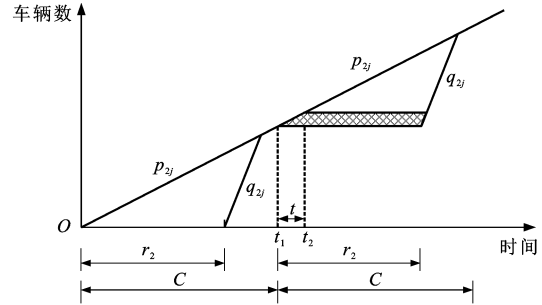


图3 绿灯延长策略下优先相位减少的延误

Fig. 3 Decreased delay of priority phase under extended green strategy

$$e_2 = \sum_j \left[t r_2 p_{2j} - \frac{t^2 p_{2j}}{2} (1 - p_{2j} / q_{2j}) \right] \quad (18)$$

$$E_2 = \frac{e_2}{\sum_j t p_{2j}} \sum_i \lambda_i k_i \sum_j T_{2j} n_{ij} \quad (19)$$

2.2.2 绿灯延长策略下非优先相位增加的延误

在这种情况下, 令非优先相位红灯时长为 r_3 , 并假设车辆均匀到达, 车道组 j 的到达率为 p_{3j} , 离开率为 q_{3j} , 绿灯延长策略下非优先相位增加的延误见图 4。 t_1 为非优先相位的绿灯开始时刻, 在 t_2 时刻车辆到达率等于车辆离开率, t_3 为绿灯结束时刻。若绿灯开始时刻由 t_1 后移至 t_1 和 t_2 之间, 非优先相位所有车辆增加的总延误为阴影部分①的面积; 若绿灯开始时刻由 t_1 后移至 t_2 和 t_3 之间, 部分车辆需要二次等灯, 总延误为阴影部分①和②的面积

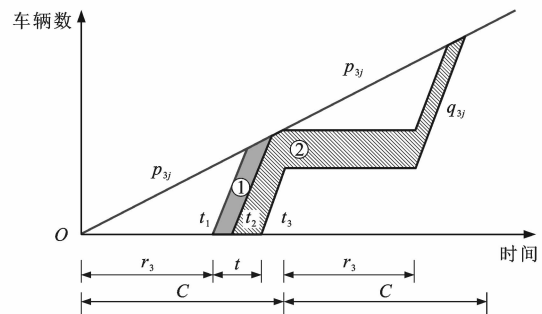


图4 绿灯延长策略下非优先相位增加的延误

Fig. 4 Increased delay of non-priority phase under extended green strategy

之和,因此,车道组 j 所有车辆增加的总延误 e_{1j} 、所有车辆的总延误 W_{2j} 、以及受影响车辆的持续时间 T_{3j} 的计算分为 2 种情况。

当 $0 \leq t \leq C(1 - p_{3j}/q_{3j}) - r_3$ 时,有

$$e_{1j} = \frac{p_{3j}t(2r_3 + t)}{2(1 - p_{3j}/q_{3j})} \quad (20)$$

$$W_{2j} = \frac{p_{3j}(r_3 + t)^2}{2(1 - p_{3j}/q_{3j})} \quad (21)$$

$$T_{3j} = \frac{r_3 + t}{1 - p_{3j}/q_{3j}} \quad (22)$$

当 $C(1 - p_{3j}/q_{3j}) - r_3 < t \leq C - r_3 - y - g$ 时,有

$$e_{1j} = \frac{p_{3j}(2r_3 + t)^2 - 2p_{3j}r_3^2}{2(1 - p_{3j}/q_{3j})} - q_{3j}r_3(C - t - r_3) \quad (23)$$

$$W_{2j} = \frac{p_{3j}(2r_3 + t)^2}{2(1 - p_{3j}/q_{3j})} - q_{3j}r_3(C - t - r_3) \quad (24)$$

$$T_{3j} = \frac{2r_3 + t}{1 - p_{3j}/q_{3j}} \quad (25)$$

此时所有车辆增加的总延误 e_1 、单个车辆的平均延误 W_2 、所有出行者增加的总延误 E_1 分别为

$$e_1 = \sum_j e_{1j} \quad (26)$$

$$W_2 = \frac{\sum_j W_{2j}}{\sum_j T_{3j} p_{3j}} \quad (27)$$







$$E_1 = \frac{e_1}{\sum_j T_{3j} p_{3j}} \sum_i \lambda_i k_i \sum_j T_{3j} n_{ij} \quad (28)$$

3 案例研究

以一个四相位交叉口为例,由于绿灯提前和绿灯延长只对优先相位的前后相位有影响,因此,只需列出 3 个相关相位的参数,交叉口和车流的相关参数见表 1,交通量换算前、后单位分别为 veh、pcu。有轨电车需要穿过的交叉口宽度为 21 m,平均速度为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 交叉口和车流构成的相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of intersection and vehicle flow

相位	前一相位		优先相位		后一相位	
车道组车辆行驶方向						
红灯时长/s	91	91	85	85	97	97
信号周期/s	120	120	120	120	120	120
车辆到达率/(pcu · h ⁻¹)	268	288	1024	936	176	194
车辆离开率/(pcu · h ⁻¹)	1 800	1 800	5 400	5 400	1 800	1 800
小客车换算系数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
小客车到达率/(veh · h ⁻¹)	244	252	900	796	164	170
小客车载客人数/(人 · veh ⁻¹)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
大客车和公交车换算系数	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
大客车和公交车到达率/(veh · h ⁻¹)	12	18	32	40	6	12
大客车和公交车载客人数/(人 · veh ⁻¹)	30	30	30	30	30	30
有轨电车换算系数	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
有轨电车到达率/(veh · h ⁻¹)	0	0	12	12	0	0
有轨电车载客人数/(人 · veh ⁻¹)	100	100	100	100	100	100

3.1 两种策略的对比

根据绿灯提前和绿灯延长 2 种策略下的模型,得到非优先相位单个车辆的延误、非优先相位交叉口饱和度、交叉口整体效益分别见图 5~7。对于绿灯提前策略,图 5 中车辆延误随优先时长的增加而增加,在 A_1 点时单个车辆延误为 60.2 s,根据约束条件式(3),此时达到延误约束,因此,自变量 $t < 15 \text{ s}$ 。图 6 中非优先相位两车道组分别在横坐标为 16、17 s 时饱和度同为 1.6,根据约束条件式(4),此时超

过约束,因此,自变量 $t < 16 \text{ s}$,因此,由约束条件得到自变量的取值范围为 $t \in [0, 14]$ 。根据目标函数式(2),由图 7 可知在 $t \in [0, 14]$ 范围内当 $t = 13 \text{ s}$ 时交叉口的整体效益最大,因此 $t_{\max} = 13 \text{ s}$,绿灯提前时长的阈值应为 $0 \sim 13 \text{ s}$,意味着有轨电车绿灯提前的时间应该控制在 13 s 以内,如果超过该值,就会给其他相位的车辆造成较大延误。对于绿灯延长策略,由图 5 得 $t < 13 \text{ s}$,由图 6 得 $t < 12 \text{ s}$,因此,自变量的取值范围为 $t \in [0, 11]$,由图 7 可知当 $t = 11 \text{ s}$ 时

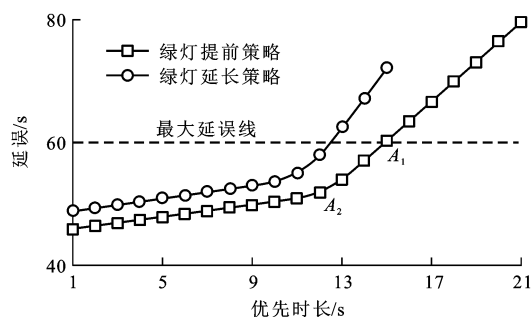


图5 两种策略下非优先相位单个车辆的延误

Fig. 5 Single vehicle delays of non-priority phase under two strategies

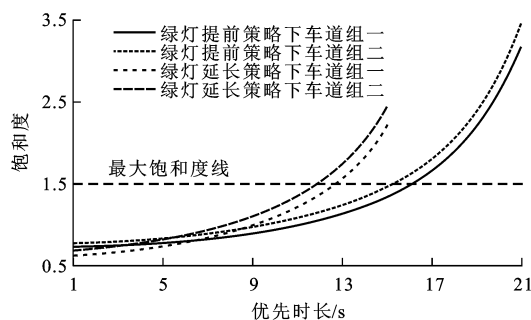


图6 两种策略下非优先相位交叉口的饱和度

Fig. 6 Intersection saturations of non-priority phase under two strategies

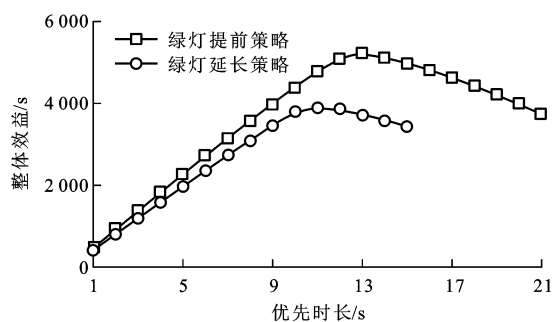


图7 两种策略下非优先相位交叉口的整体效益

Fig. 7 Intersection overall benefits of non-priority phase under two strategies

交叉口的整体效益最大,因此, $t_{\max} = 11$ s,由式(1)得 $t_{\min} = 5$ s,绿灯延长时间的阈值为5~11 s。

为了研究图5中车辆延误曲线在 A_2 点的增长率突然变大的原因,将各参数代入绿灯提前中的单个车辆延误公式(16),得到非优先相位单个车辆延误关于 t 的分段函数的斜率在 $t = 12$ s 时由 0.5 突然变为 2.8,因此,曲线在 A_2 点的增长率突然变大。同样地,图7中整体效益值在 $t = 13$ s 时达到最大,之后开始迅速下降。这与图2中涉及到的2种情况的分界值 $C - r_1 / (1 - p_{ij} / q_{ij})$ 有关,当 t 大于该值时,部分车辆需要等2次信号灯才能离开,车辆在交叉口的滞留会带来较大延误,造成交叉口整体效益

迅速下降,出现了计算结果在图上的拐点。

3.2 优先时长对滞留车辆数的影响

案例中共有4个车道组受信号优先的影响,其饱和度分别为0.69、0.74、0.59和0.65,以饱和度最大的车道组为例,研究优先时长对滞留车辆数的影响。假设在研究时段内绿灯提前策略仅执行一次,本周及随后周期该车道组在交叉口的滞留车辆数见图8。可以看出,当绿灯提前时长小于7 s时,该车道组所在相位的绿灯时长大于19 s,该车道组的车辆在本周期的绿灯时间内能够被清空。随着绿灯提前时长的增加,该车道组所在相位的绿灯时长不断减小,滞留车辆数不断增加。当优先时长增加到14 s时,车辆在下周期的绿灯结束时仍无法被清空。当优先时长为21 s时,该车道组所在相位的绿灯时长为5 s,达到最小绿灯时长限制,下周期绿灯结束时仍有一辆车没有顺利通过交叉口。绿灯提前时长的阈值为0~13 s,在优先时长不大于13 s的约束下,滞留车辆在下周期绿灯期间能够被完全清空。优先阈值的设置保证了信号优先不会对较多后续周期产生影响。

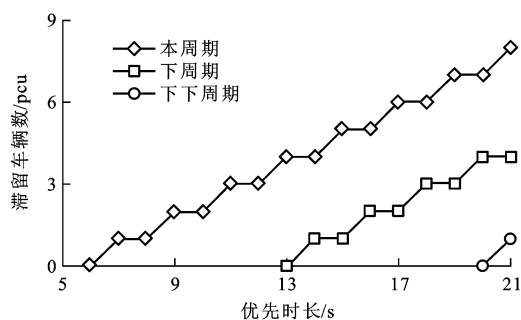


图8 不同优先时长的滞留车辆数

Fig. 8 Retention vehicles number in different priority times

3.3 公交车辆数对阈值的影响

影响优先时长阈值上限的因素包括车流构成、车辆到达率、饱和流率与信号配时等。为了研究各因素对 t_{\max} 的影响,以绿灯提前策略为例,以非优先相位的公交车辆数、车辆到达率与红灯时长为对象,设置多种情景进行分析。为对非优先相位的公交车辆数对阈值的影响进行分析,保持信号参数和车辆到达率、离开率等其他参数不变,令非优先相位平均每小时到达的公交车辆数 n 为变化量,得到公交车辆数分别为0、2、4、...、18 veh等10种情景下整体效益随优先时长的变化曲线见图9。可以看出,随着公交车辆数的增加,同样优先时长下的整体效益越来越小,但是使整体效益取最大值的优先时长基本不变,表明如果单纯考虑信号优先给出行者带来

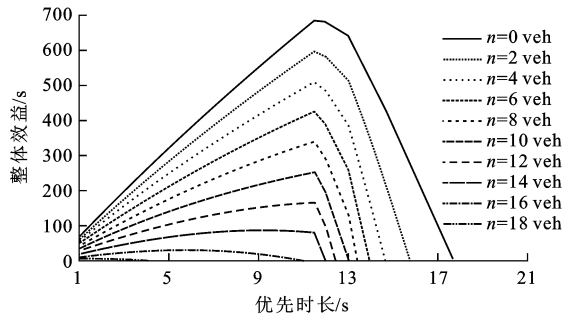


图9 不同公交车辆数下的整体效益

Fig. 9 Overall benefits with different bus numbers

的延误,公交车辆数对信号优先时长阈值的影响较小。但是,当公交车辆数不少于16时,整体效益趋于0甚至为负,表明非优先相位的公交车辆数存在临界值,公交车辆数小于临界值时公交车数量不影响信号优先时长阈值,但是大于该临界值时设置任何程度的信号优先都会给交叉口带来负效益,因此,在实际中如果与有轨电车相交道路上的公交车较多,若考虑以出行者为对象的交叉口整体效益,有轨电车不适合享有信号优先权。

图9中的多条曲线表明不同情景的整体效益差别很大,若以车辆为研究单元,此时整体效益只与车辆总的到达率有关,而与车流构成无关,则所有情景的整体效益曲线只有一条,进一步证明将出行者作为研究单元的必要性,因此,如果用车辆延误来衡量有轨电车优先对交叉口的影响,忽略公交系统里的乘客数量,对于乘坐公共交通的乘客有失公平。

3.4 车辆到达率对阈值的影响

为对非优先相位的车辆到达率对阈值的影响进行分析,令非优先相位各车道组的车辆到达率均为 p ,保持车辆构成等比例变化且其他参数不变,得到车辆到达率分别为 $0.040, 0.045, 0.050, \dots, 0.115 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ 等16种情景下整体效益随优先时长的变化曲线见图10。若不考虑车辆延误和交叉口饱和度的约束, t_{\max} 便是整体效益取最大值时的 t 。可以看出, t_{\max} 随着非优先相位车辆到达率的增加而减小,当 p 大于 $0.115 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ ($414 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)时, t_{\max} 趋于0,此时不再适合给有轨电车设置信号优先。

3.5 红灯时长对阈值的影响

为对非优先相位的红灯时长对阈值的影响进行分析,令非优先相位的红灯时长 r_1 分别为80、81、 \dots 、101 s,其他参数保持不变,得到这22种情景下整体效益随优先时长的变化曲线见图11。可以看出, t_{\max} 随着非优先相位红灯时长的增加而减小,当 r_1 大于101 s时, t_{\max} 趋于0,此时不再适合给有轨电车

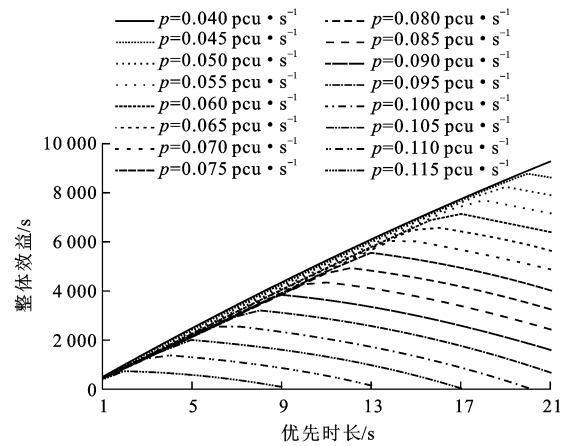


图10 不同到达率下的整体效益

Fig. 10 Overall benefits with different arrival rates

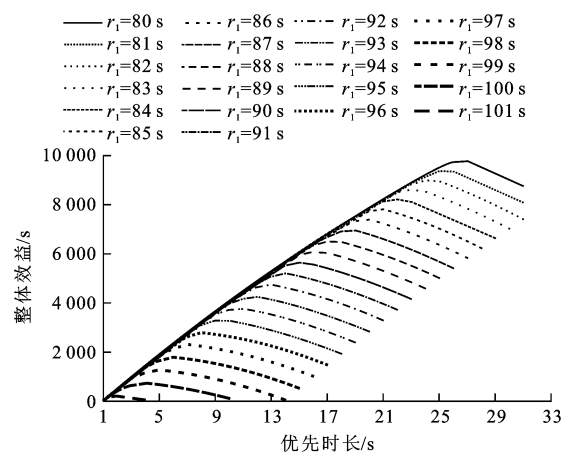


图11 不同红灯时长下的整体效益

Fig. 11 Overall benefits with different red times

设置信号优先。

4 结 语

(1)本文借鉴了以出行者为研究单元和韦伯斯特图解法计算延误的方法,提出了确定有轨电车信号优先时长阈值的优化模型,分车道组进行延误计算,提高了准确度。

(2)信号优先会引起非优先相位的车辆滞留,优先时长控制在阈值范围内能够保证滞留车辆在下一周期被清空。非优先相位的车流构成变化对信号优先时长阈值的影响不大,但是非优先相位的公交车辆数大于临界值时有轨电车信号优先会给交叉口交通状况造成较大影响。信号优先时长阈值的上限随着非优先相位车辆到达率和红灯时长的增大而减小,本文提出的模型可以求出二者的临界值,非优先相位车辆到达率和红灯时长超过临界值时,不再适合给有轨电车设置信号优先。

(3)由于韦伯斯特图解法的局限性,无法反映车

辆到达不均匀的情况,因此,后续研究可以根据车辆到达的时空特性进一步细化车辆到达过程。

参考文献:

References:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2014 年度统计分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2015.
China Association of Metros. Annual statistical analysis report of urban rail transit in 2014 [R]. Beijing: China Association of Metros, 2015. (in Chinese)
- [2] 王舒祺. 现代有轨电车交叉路口优先控制管理方法研究综述[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(6): 17-22.
WANG Shu-qi. Study on signal priority control of modern tramcar at intersection[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(6): 17-22. (in Chinese)
- [3] SERMPIS D, PAPADAKOS P, FOUSEKIS K. Tram priority at signal-controlled junctions[J]. Transport, 2012, 165(2): 87-96.
- [4] GATENBY M, FEDZIN S. Traffic signal network operation within the Nottingham Express Transit system[J]. Traffic Engineering and Control, 2004, 45(2): 44-49.
- [5] SHALABY A, ABDULHAI B, LEE J. Assessment of streetcar transit priority options using microsimulation modelling[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, 30(6): 1000-1009.
- [6] MATSUMOTO S, KUMAGAO Y, KAWASGIMA H. A study on the traffic signal strategy in city traffic consideration of streetcar[J]. Japan Society of Civil Engineers, 2004, 21: 677-685.
- [7] JEONG Y, KIM Y. Tram passive signal priority strategy based on the MAXBAND model [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(5): 1518-1527.
- [8] ZHOU Yang-fan, JIA Shun-ping, MAO Bao-hua, et al. An arterial signal coordination optimization model for trams based on modified AM-BAND [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016, 2016: 1-10.
- [9] 张 伟, 王军利, 王瑞斌. 快速公交信号优先控制研究[J]. 中国人民公安大学学报: 自然科学版, 2010, 16(4): 28-31.
ZHANG Wei, WANG Jun-li, WANG Rui-bin. Study on signal priority control for bus rapid transit[J]. Journal of Chinese People's Public Security University: Science and Technology, 2010, 16(4): 28-31. (in Chinese)
- [10] WEI Li-ying, ZHANG Li-li, WANG Zhi-long. A cellular automata model on bus signal priority strategies considering resource constraints[J]. Practical Applications of Intelligent Systems, 2014, 279: 689-698.
- [11] 马万经, 吴明敏, 韩宝新, 等. 考虑可变速度调节的单点交叉口公交信号优先控制方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 127-133.
MA Wan-jing, WU Ming-min, HAN Bao-xin, et al. Bus signal priority control method for isolated intersection based on dynamic variable speed adjustment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 127-133. (in Chinese)
- [12] MIRCHANDANI P B, LI J Q, HICKMAN M. A macroscopic model for integrating bus signal priority with vehicle rescheduling[J]. Public Transport, 2010, 2(3): 159-172.
- [13] KIM S, PARK M, CHON K S. Bus signal priority strategies for multi-directional bus routes [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(5): 855-861.
- [14] KOEHLERL A, KRAUS W J. Simultaneous control of traffic lights and bus departure for priority operation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(3): 288-298.
- [15] BAGHERIAN M, MESBAH M, FERREIRA L. Using delay functions to evaluate transit priority at signals[J]. Public Transport, 2015, 7(1): 61-75.
- [16] 杨远舟, 毛保华, 张建鹏, 等. 基于元胞自动机模型的快速公交信号优先仿真研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 90-95, 106.
YANG Yuan-zhou, MAO Bao-hua, ZHANG Jian-peng, et al. Research on signal priority simulation for bus rapid transit using cellular automaton model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 90-95, 106. (in Chinese)
- [17] AHMED F, HAWAS Y E. An integrated real-time traffic signal system for transit signal priority, incident detection and congestion management [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 60: 52-76.
- [18] ZHOU Guang-wei, GAN A, SHEN L D. Optimization of adaptive transit signal priority using parallel genetic algorithm [J]. Tsinghua Science and Technology, 2007, 12(2): 131-140.
- [19] HU Jia, PARK B B, LEE Y J. Coordinated transit signal priority supporting transit progression under connected vehicle technology[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 55: 393-408.
- [20] WAHLSTEDT J. Impacts of bus priority in coordinated traffic signals[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2011, 16: 578-587.
- [21] LIU Hong-chao, ZHANG Jie, CHENG Ding-xin. Analytical approach to evaluating transit signal priority[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(2): 48-57.
- [22] 朱晓宁, 隆 冰. 多路公交优先交叉口配时优化的双层规划模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 103-111.
ZHU Xiao-ning, LONG Bing. Bi-level programming model of timing optimization for multiple bus priority intersection[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 103-111. (in Chinese)
- [23] 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): 859-864.
SUN Xu, LU Hua-pu. 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): 859-864. (in Chinese)
- [24] 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(增): 101-104, 108.
YANG Xiao-guang, LIN Yu, HANG Ming-sheng. Study of solution for transit priority signal[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(S): 101-104, 108. (in Chinese)