

文章编号: 2095-2163(2020)07-0234-06

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

考虑行人过街的被动式公交信号优先单点控制方法

邹瑞霖¹, 王嘉文¹, 韩 印¹, 邱 雯²

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

摘要: 传统公交优先往往因忽略行人过街延误, 导致行人滞留于交叉口。本文针对此问题, 提出一种考虑行人过街影响下的被动公交优先控制方法。对行人流量较大的二相位交叉口分别实施单相、二相位被动公交优先控制, 并对两者效益进行分析; 通过数值实验, 分析不同公交载客数及公交流量下人均延误的变化。结果表明: 被动公交优先的控制效益与优先相位数存在密切关系, 当实施一相位公交优先时, 公交乘客人均延误及行人延误均有所下降, 并且公交载客数越多, 流量越大时, 交叉口人均延误下降趋势更为明显; 实施二相位信号优先时, 各指标与无优先控制基本相同, 无明显优化效果。

关键词: 被动公交优先控制; 优先相位数; 行人过街; 二相位交叉口; 人均延误

Passive bus signal priority single-point control method considering pedestrian crossing

ZOU Ruilin¹, WANG Jiawen¹, HAN Yin¹, QIU Wen²

(1. School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 School of Transportation, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

[Abstract] Traditional bus priority often neglects pedestrian crossing delays, resulting in pedestrians being stranded at intersections. In response to this problem, this paper proposes a passive bus priority control method that considers the influence of pedestrian crossing; implement single-phase and two-phase passive bus priority control at two-phase intersections with large pedestrian traffic, and analyze the benefits of both. Through numerical experiments, the changes in per capita delays under different bus passenger numbers and bus flows are analyzed. The results show that the control benefit of passive bus priority is closely related to the number of priority phases. When a phase bus priority is implemented, the delays per person and pedestrian delays of bus passengers will decrease, and the more passengers the bus carries, the greater the traffic flow, the more obvious the downward trend of per capita delay at intersections is. When two-phase signal priority is implemented, the indicators are basically the same as those without priority control, and there is no obvious optimization effect.

[Key words] passive bus priority control; the number of priority phases; pedestrian crossing; two-phase intersection; per capita delay

0 引言

为缓解交通拥堵, 中国交通运输部在“十二五、十三五”期间先后创立了两批共 87 个公交都市, 确立了公共交通在城市交通系统中的主体地位^[1]。公交优先是解决中国交通拥堵的重要途径之一。为减少公交车行程时间, 提升其服务水平, 本文以信号配时为切入点, 研究基于公交优先的信号配时方法。

现有的公交优先信号配时方法大多应用单交叉路口的信号配时, 主要分为实时公交优先、主动公交优先和被动公交优先。在公交流量较小的情况下, 主动优先控制的效果较好; 但在公交车流量较大时, 频繁的绿灯延长或红灯早断, 容易扰乱交叉口正常的交通流。此外, 如果忽略行人过街延误, 易导致行人滞留在交叉口。相关研究表明, 当行人等待时长达到其可容忍最长等待时间 90s 时, 行人违章的概率

将大幅增加, 对车辆正常通行造成严重影响^[2]。

被动公交优先方面, Wu 指出较短的信号周期长度, 可以减少公交车的延误^[3]; Mirchandani 等认为当公交流量较大, 社会车流量较小时, 被动优先能取得较好成果^[4]。基于上述理论, 一些研究利用交叉口时空资源或是人均延误最小作为衡量指标, 以达到优化周期及绿信比的目的^[5]。

行人延误方面, 冯玉龙分析了车辆和行人的穿越特征, 描绘了行人聚集、离散的过程, 建立了行人平均延误的计算模型^[6]; 马万经分析了两种行人相位模式下(两相位控制及行人专用相位控制), 车辆与行人的延误情况^[7]; 赵靖对具有中央公交车道的大型交叉口进行研究, 分析在此交叉路口的通行和停车情况, 根据车辆和行人的延误对信号配时方案进行优化^[8]。

作者简介: 邹瑞霖(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通管理与控制。

收稿日期: 2020-05-03

综上,国内外学者对于被动公交优先和行人过街延误的研究已较为完备。然而,在被动公交优先研究方面,现有的研究成果未考虑优先措施下行人的过街需求;在行人延误方面,当前的研究仅考虑了常规的信号配时方案,未明确公交优先策略下对行人延误的影响。

基于此,本文选取市区临近商圈且行人流量较大的两相位交叉口作为研究对象,考虑行人的过街需求和延误情况,建立基于人均延误最小的信号配时优化方法;通过对算例进行验证,分别计算两相位交叉口实施单相、双相公交优先的控制效益,并对其应用条件、应用效果进行分析。最后,通过 VISSIM 仿真,验证该方法的有效性。

1 模型建立

1.1 优化目标的确定

传统信号配时方法以车均延误作为优化目标,以等饱和度的方法分配绿灯时间;此方法将公交车与社会车辆等同看待,无法体现“公交优先”。对此,选择交叉口的人均延误作为信号配时的优化目标,将行人延误考虑在内,凸显了“人”这一个体的重要性。

1.2 公交优先控制模型

1.2.1 周期时长优化方法

别一鸣研究发现,变人均延误与车均延误随信号周期化趋势相同,即基于车均延误的周期优化也适用于人均延误的被动公交信号优先^[9];因此,本文拟采用韦伯斯特公式计算车均延误。

根据韦伯斯特延误模型,各车道的车均延误计算方法(1)为^[10]:

$$d_{ij} = \frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-y_{ij})} + \frac{(x_{ij})^2}{2q_{ij}(1-x_{ij})} - 0.65 \frac{C}{(q_{ij})^2} \sqrt[3]{\frac{C}{(q_{ij})^2}} \times (x_{ij})^{(2+5\lambda_i)}, \quad (1)$$

式中, d_{ij} 为第 i 相位第 j 车道车辆的平均延误; C 为交叉口信号周期; λ_i 为相位 i 绿信比; x_{ij} 为第 i 相位第 j 车道饱和度; q_{ij} 为第 i 相位第 j 车道关键流量(辆/s); y_{ij} 为第 i 相位第 j 车道流量比。

由于公交车与社会车辆存在当量转化关系, q_i 的计算方法(2)为:

$$q_{ij} = q_{ij}^b \times n_v + q_{ij}^c, \quad (2)$$

式中, q_{ij}^b 为第 i 相位第 j 车道的公交车流量(辆/s); q_{ij}^c 为第 i 相位第 j 车道的社会车辆流量; n_v 为公交车对社会车辆的折算系数。

信号交叉口行人的控制延误计算公式(3)为:

$$d_i^r = \frac{r^2}{2C \times (1-y)}, \quad (3)$$

式中, d_i^r 为第 i 相位的行人延误; r 为行人禁行时间; y 为行人到达流率。

人车交互时,车辆的延误公式(4)为^[11]:

$$d_p^v = \frac{L}{v_0} - \frac{v_0 - \sqrt{v_0^2 + 2aL}}{a}. \quad (4)$$

式中, L 为人车交互时车辆减速位置的长度; v_0 为人车交互时车辆的初速度; a 为车辆减速时的加速度。

人车交互时,行人的延误公式(5)为:

$$d_p^v = \frac{(e^{q_i \tau} - q_i \tau - 1)}{q_i}. \quad (5)$$

式中, q_i 为转弯车流 i 的流率, τ 为行人通过最小间隔时间。

将以上各部分相加,可以得到交叉口交通参与者的总延误公式(6):

$$D_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} \times (P_b \times q_b \times C_0 + P_c \times q_c \times C_0) + d_i^r \times q_p \times C_0 + d_p^v \times M \times K_v + d_p^v \times M \times K_p. \quad (6)$$

式中, P_b 为公交车载客数; P_c 为社会车辆载客数; C_0 为观测时间长度; M 为观测时间 C_0 内;行人过街时的人车交互数; K_v 为车辆避让行人的概率; K_p 为行人避让车辆的概率。

则交叉口人均延误公式(7)为:

$$\bar{d}_t = \frac{D_t}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_b \times q_b \times C_0 + P_c \times q_c \times C_0 + \sum_{i=1}^n q_p \times C_0}. \quad (7)$$

设计公交优先的信号配时方案就是寻找在最大周期与最小周期范围内的最优周期时长,使交叉口人均延误最小。

1.2.2 绿信比优化方法

在绿信比优化方面,如果仅考虑人均延误指标,那么乘客数较多的相位将被分配较多绿灯时间,乘客数较少的相位分配的绿灯时间较短,造成前者绿灯时间的浪费,后者由于绿灯时间不足而产生过饱和现象。因此,本文所提出的绿信比分配原则为:首先保证交叉口交通流以及过街行人的正常通行,即在各相位不产生拥堵的基础上,为乘客量大的相位分配绿灯时间。

相位 i 饱和度计算公式(8)为:

$$x_i = \frac{y_i}{\lambda_i} = \frac{q_i C}{S_i g_i}, \quad (8)$$

式中, q_i 为相位 i 关键车道流量; S_i 为相位 i 饱和流量(辆/h); g_i 为相位 i 绿灯时间。

设交叉口的临界饱和度为 x_p , 若饱和度超过 x_p , 则交叉口将发生拥堵, 为使交叉口不发生拥堵, 相位 i 的最小绿灯时间公式(9)为:

$$g_i^{\min} = \frac{q_i C}{S_i x_i}. \quad (9)$$

同样地, 相位 i 的绿灯时间还需满足行人过街, 满足行人过街的最小绿灯时间公式(10)为:

$$g_i^{\min} = 7 + \frac{L_0}{v^p} - I. \quad (10)$$

式中, L_0 为相位 i 各进口行人过街最大长度(m); v^p 为行人过街速度; I 为绿灯间隔时间。

因此, 为了使相位 i 不发生拥堵, 该相位所分配的最小绿灯时间公式(11)为:

$$g_i^{\min} = \max\left\{\frac{q_i C}{S_i x_i}, 7 + \frac{L_0}{v^p} - I\right\}. \quad (11)$$

由上式可推出交叉口各关键相位的最小绿灯分配时间之和公式(12):

$$g_a = \sum_{i=1}^n g_i^{\min}. \quad (12)$$

则易得到交叉口总绿灯富余时间公式(13):

$$g_f = (C - L) - g_a, \quad (13)$$

式中, L 为交叉口绿灯损失时间。

当 $g_f < 0$ 时, 说明当前交叉口交通需求较大, 无剩余的绿灯时间用以分配; 当 $g_f = 0$ 时, 说明交叉口的交通供给恰好满足交通需求; 当 $g_f > 0$ 时, 说明交叉口处于畅通状态, 有剩余的绿灯时间。

当交叉口有富余绿灯时间时, 需要将富余绿灯时间分配给各个相位, 分配时间的多少取决于优先相位的公交车数量, 第 i 相位所分配的绿灯时间公式(14)为:

$$g_{if} = g_f \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i}. \quad (14)$$

式中, ρ_i 为第 i 相位公交车流量。需要指出的是, 当第 i 相位不采取信号优先措施时, 令 $\rho_i = 0$, 即富余绿灯时间不分配予此相位; 因此, 参与富余绿灯时间分配的相位 i 的绿灯时间公式(15)为:

$$g_i = g_i^{\min} + g_{if}. \quad (15)$$

由于在城市交通中, 公交车的载客数远大于社会车辆的载客数, 因此上述绿灯时间分配的方法可

以减少公交乘客的延误, 是基于公交优先的一种绿信比分配方法。

1.2.3 配时模型

综上所述, 可以得到目标函数(16):

$$\min \bar{d}_i. \quad (16)$$

式中, \bar{d}_i 为人均延误时间。

约束条件(17)为:

$$\begin{aligned} C_{\min} &\leq C \leq C_{\max}, \\ \sum_{i=1}^n g_i + L &= C, \\ g_i^{\min} &\leq g_i, \\ g_i &= g_i^{\min} + g_{if}. \end{aligned} \quad (17)$$

式中, C_{\min} 和 C_{\max} 分别为交叉口的最小与最大周期, g_i 为相位 i 的有效绿灯时间。

2 算例分析

2.1 案例介绍

本文选取上海市马当路-太仓路交叉口作为研究对象, 调查了交叉口渠化情况及高峰小时流量, 现状渠化图如图1所示, 现状流量见表1。

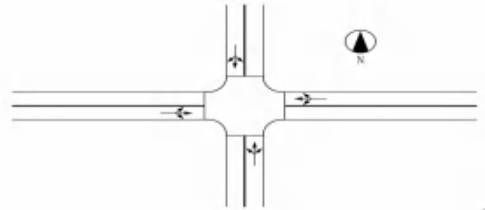


图1 交叉口现状渠化图

Fig. 1 Current channelization diagram of intersection

表1 交叉口流量调查表

Tab. 1 Intersection flow survey form

进口道	车道功能	社会车辆流量	公交车流量	行人流量
南进口	直行+左转+右转	496	33	
北进口	直行+左转+右转	538	17	596
西进口	直行+左转+右转	323	24	
东进口	直行+左转+右转	320	9	584

当前信号控制相位相序简述如下: 第一相位为南北方向放行, 第二相位为东西方向放行。

2.2 信号控制模型计算

根据前面所给的相关公式及交叉口几何条件, 可以确定上述案例的信号配时参数。各相位的临界饱和度 x_p 可取 0.95, 最小信号周期 C_{\min} 为 40 s, 最大周期 C_{\max} 为 160 s, 车辆启动的损失时间为 3 s, 黄灯时间为 3 s, 全红时间为 1 s, 交叉口绿灯损失时间为

8 s,饱和流率可取 1 200 标准辆/h,公交的车辆转换系数 n_p 取 2,公交车平均载客数取 40 人/辆,社会车辆人均载客数取 1.5 人/辆;在 1 h 观测内,共观测到 75 次人车交互行为,其中行人避让车辆次数为 18 次,行人避让率为 0.24,车辆避让行人次数为 57 次,车辆避让率为 0.76。

将以上的参数代入固定信号配时模型中(信号

表 2 两种优化方案下的配时结果及效益对比

Tab. 2 Timing results and benefit comparison under the two optimization schemes

优化方法	C/s	g1/s	g2/s	人均延误	社会车辆人均延误	公交人均延误	行人人均延误
无优先相位	79	43	28	29.81	32.99	33.86	11.65
一相位优先	73	41	24	28.53	40.53	23.19	10.98
二相位优先	80	44	28	30.07	33.09	34.25	11.83

通过分析表 2 的数据,可以得到如下结论:

(1)对比无优先的韦伯斯特配时方法,优先相位数越少,控制效益越佳;反之,优先相位数越多,各项评价参数基本相同,无明显优化效果。

当两相位交叉口仅有一相位实施信号优先时,此时信号周期缩短,公交乘客人均延误有所下降,行人过街延误也有小幅下降,说明这种被动公交优先配时具有较好的控制效果。

一般来说,在保证各相位不超过临界饱和度的情况下,富余绿灯时间较短,仅有几秒到十几秒;当两个相位按公交车数量分配富余绿灯时间时,各相位之间所分配所得绿灯时间的差异非常小;因此,当实施多相位优先时,其评价参数与无优先时基本相同。

(2)提高优先相位绿信比、减少交叉口信号周期时长是被动优先控制较为有效的方法。

提高绿信比可以增加公交车在交叉口遇到绿灯的概率,减少停车延误。当仅采取一相位优先时,周期的缩短既可减少公交车的延误,也可小幅减少行人延误;虽然一相位优先时所产生的富余绿灯时间较少,但此时较少的绿灯富余时间可提高优先相位的绿信比,并减少该相位下交通参与者的延误。

2.3 模型灵敏度分析

为分析本模型相关参数的灵敏度,按应用需求分别设置模型各参数。在本次灵敏度分析过程中,实施无相位优先、一相位优先以及二相位优先,同时不同载客数、不同公交流量的情况下,分析公交平均载客数分别为 20、30、40 及 50 时,交叉口人均延误的变化情况,如图 2 所示。

配时需取整计算),使用 MATLAB 软件编程求解,得到的结果见表 2。需要说明的是,单相位公交优先指的是仅为相位 1 提供信号优先,两相位公交优先为 2 个相位的公交都提供信号优先;另外,在计算交叉口人均延误时,为体现优先相位与非优先相位的区别,将非优先相位的公交作为社会车辆看待,即公交车的载客人数为当量小汽车的载客人数。

根据图 2,本研究得出以下结论:

(1)公交平均载客数越多,流量越大,实施一相位优先时交叉口人均延误显著降低。

实施一相位优先时,优先相位的车辆延误下降幅度较小,无优先相位的车辆延误以相对较大幅度上升。因公交载客数多,车流量大,此时交叉口的人均延误显著降低。

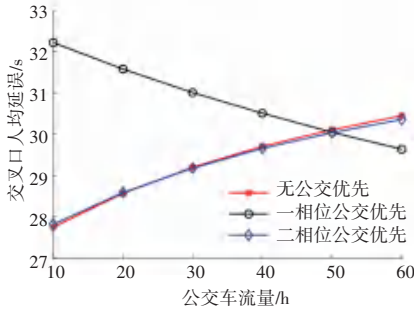
(2)公交平均载客数越少,流量越低,实施一相位优先时交叉口人均延误不降反升。

与(1)相对应,由于此时公交载客数少,车流量小,相位优先时以较小幅度下降的延误小于优先相位下以相对较大幅度上升的延误,因此交叉口内延误不降反升。

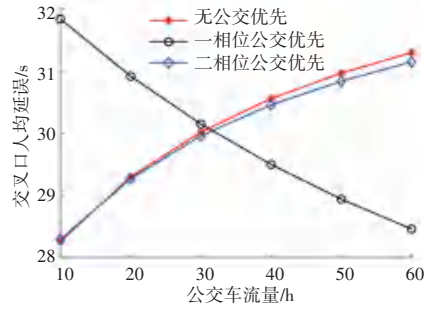
3 仿真实验

根据上述案例,选取公交载客数为 40 的情况,根据该交叉口的交通量、几何条件及计算得到的信号配时方案,利用其数据对该交叉口进行 VISSIM 仿真,并对人均延误、社会车辆人均延误等指标进行对比,以此验证优化模型的有效性,如图 3~图 6 所示。

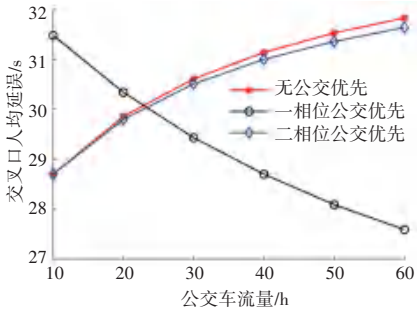
通过图 3~图 5,可得到与表 2 类似的结果。针对图 6,需要说明的是“不考虑载客数的人均延误”指公交车、社会车辆载客数均为 1 时的人均延误,“考虑载客人数的人均延误”是前述参数折算所得的人均延误。从上述情况中发现,对于被动公交优先的信号配时问题,考虑车辆载客数的人均延误所得到的配时方案更优,证明上述配时方法的有效性。



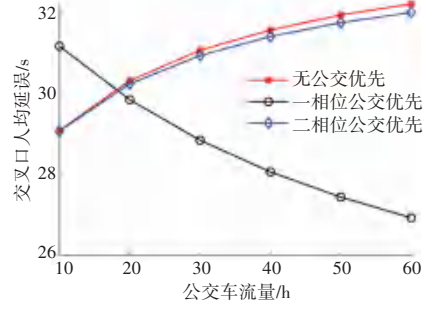
(a) 载客数为 20
(a) The number of passengers carried is 20



(b) 载客数为 30
(b) The number of passengers carried is 30



(c) 载客数为 40
(c) The number of passengers carried is 40



(d) 载客数为 50
(d) The number of passengers carried is 50

图 2 不同载客数下人均延误的变化情况

Fig. 2 Changes in per capita delays under different number of passengers

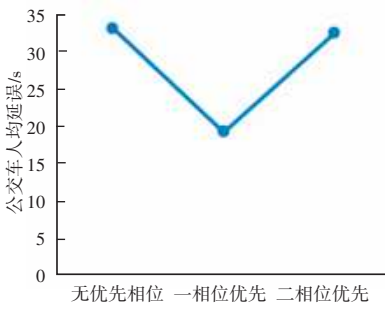


图 3 公交车乘客人均延误对比

Fig. 3 Comparison of per capita delays of bus passengers

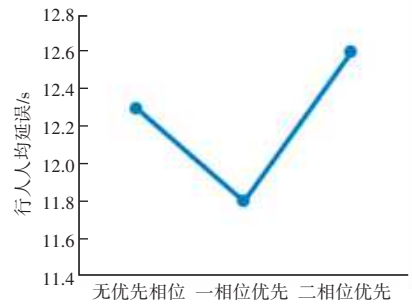


图 5 行人人均延误对比

Fig. 5 Comparison of delays per person for pedestrians

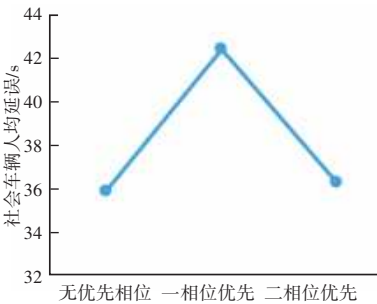


图 4 社会车辆乘客人均延误对比

Fig. 4 Comparison of per capita delays of social vehicles

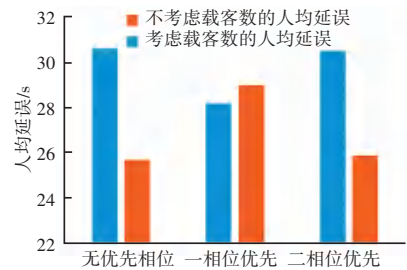


图 6 是否考虑载客人数的延误对比

Fig. 6 Comparison of delays for the number of passengers