

短时预测下单点自适应公交信号优先控制方法

郭海锋¹, 周悦¹, 袁鑫良¹, 贡伟²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 杭州通悟科技有限公司, 浙江 杭州 310006)

摘要:为改善单点自适应公交信号优先控制存在的配时方案滞后问题,首先依据短时预测的交通流量计算交叉口各相位未来时段所需的最短绿灯时间;然后以公交车准点车头时距和公交车载客率为指标优化公交权重,并以最小化公交车平均等待时间为目标构建目标函数,既减少非执行相位增加的延误,又提高执行相位公交的优先通行率。仿真实验结果表明:通过短时预测方式,能够获得交叉口交通流发展趋势,合理分配各相位的最短绿灯时间,有利于优化相位配时模型的计算精度,减少交叉口人均延误和车均延误。

关键词:交通控制;公交信号优先;自适应控制;单点信号交叉口

中图分类号:U491.232

文献标志码:A

文章编号:1006-4303(2017)01-0023-09

Adaptive transit priority control of isolated intersection based on short-term prediction

GUO Haifeng¹, ZHOU Yue¹, YUAN Xinliang¹, GONG Wei²

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Hangzhou Tongwu Technology Co., Ltd., Hangzhou 310006, China)

Abstract: In order to improve the hysteresis problem of adaptive transit priority control of isolated intersection, the predicted minimum green split for each phase in each intersection is computed based on predicted traffic states firstly; then the punctual headway and the passenger occupancy rate are selected as indices to optimize the bus weight on each phase and the objective function is built with minimizing the average bus waiting time as the target. The proposed methods not only reduce delay of competitive phases, but also increase the rates of transit priority. The results show that the traffic trend can be captured through short-term prediction, which can be used to optimize green split for each phase, improve accuracy of phase model and decrease both person and vehicle delay for isolated intersection.

Keywords: traffic control; transit priority; adaptive control; isolated intersection

公交优先是提高公交运行效率、改善公交服务水平的有效方法。已有的公交优先措施有两种:道路空间优化和信号配时优化。前者主要通过设置公交专用道^[1-2]或双停止线^[3]等方式实现,但因其需要满足多方面的客观条件,所以在实施中经常受到限制;而后者由于简单易实现经常被采用。现有的信号配

时优化方式可划分为以下三类:1)被动公交优先^[4-5],是指信号机依据获取的历史交通运行数据(车均乘客数、小时流量等),分析公交车的到达规律,进而设计静态的配时来满足公交优先通行,但无法响应交通流实时变化;2)主动公交优先^[6-10],是指信号机根据反馈检测的公交车辆信息,采用延长

收稿日期:2016-01-05

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY14F030012);中国博士后基金资助项目(2012M511387)

作者简介:郭海锋(1977—),男,吉林松原人,副教授,博士,研究方向为智能交通系统,E-mail:guohf@zjut.edu.cn.

绿灯、早断红灯或相位跳跃等方法动态调整交叉口的信号配时,有利于公交通行;3) 自适应公交优先^[11-14],信号机动态的调整相位配时,满足公交车优先的同时优化整个系统的性能指标.在三类信号配时优化方式中,自适应公交优先能够平衡社会车辆和公交车辆的效益,更容易在实践应用中被接受和采纳.然而,已有的单点自适应公交优先方法通常是在既定相位相序情况下,以前几个信号周期获取的数据为基础,对当前信号周期进行优化,进而给出各相位的绿信比.该方法会使优化的配时方案滞后于交通流的发展变化,影响单点交叉口各相位公交优先控制的效果.

针对该问题,提出一种短时预测下的单点交叉口自适应公交优先控制策略与相位优化配时方法.依据城市道路交叉口的交通流特性,运用模糊卡尔曼滤波预测下一个15 min交通流量,计算预测的各相位所需的最短绿灯时间,满足各相位基本配时需求.然后依据采集的公交车载客率、车流状况等数据,通过相位优化配时模型,计算下一个执行相位的绿灯时间,确保公交车优先实时性.

1 公交优先信号控制策略

为提高交叉口车辆通行效益和体现公交优先原则,权衡社会车辆和公交车优先通行效益,采用滚动相位实时预测调整控制策略.该策略由短时流量预测下相位最短绿灯时间模型(简称相位最短绿灯时间预测模型)和相位优化配时模型组成.

相位最短绿灯时间预测模型是基于短时交通流量预测^[15]未来15 min交通流量数据,然后依据Webster最短信号周期计算公式^[16],预测得到最短信号周期,再根据各相位预测的关键车道流量比,预测各相位最短绿灯时间.

相位优化配时模型是以预测的相位最短绿灯时间为基础,综合考虑交叉口延误,并根据采集公交车载客人数,公交准晚点等数据,确定每辆公交车的权重.此外,相位优化配时模型受到以下条件约束:1) 相位绿灯时间不得大于相位最长绿灯时间;2) 相位绿灯时间不得小于预测的相位最短绿灯时间;3) 优先相位与非优先相位相比,前者减少的总延误必须大于后者增加的总延误.

公交优先自适应控制策略如下:

步骤1 采集各相位的公交车数量、社会车数量、公交车乘客人数以及公交车平均车速等参数数据.

步骤2 根据短时交通流预测算法^[15],预测各相位未来15 min的交通流量,然后计算预测的各相位最短绿灯时间.

步骤3 根据采集的上传数据,依据公交权重计算模块,计算公交车权重并分类汇总.

步骤4 利用相位优化配时模型,计算各相位优化后的绿灯时间,满足公交优先通行.

步骤5 当前执行相位绿灯时间结束时,检测该相位绿灯时间前已经排队而未通过交叉口的车辆数,反馈检测信息,优化计算下一周期该相位优化的绿灯时间.

控制策略流程如图1所示.

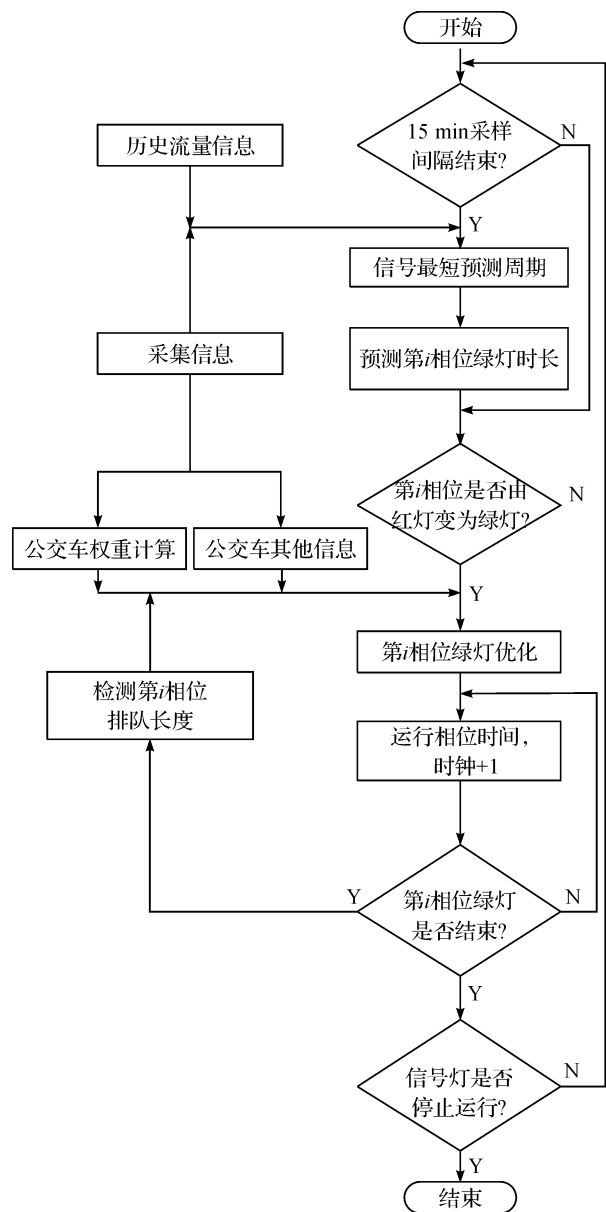


图1 控制策略流程图

Fig. 1 Flow of control strategy

2 相位最短绿灯时间预测模型

2.1 短时交通流量预测

前述短时交通流量预测是以检测器获取的实时数据和历史数据为基础,以 15 min 为时间间隔,采用文献[15]中提出的方法对交叉口各方向的交通流量进行预测,其预测模型为

$$\tilde{Q}_L(\tau+k) = \gamma \bar{Q}_L(\tau+k) + (1-\gamma)\hat{Q}_L(\tau+k) \quad (1)$$

式中: $\tilde{Q}_L(\tau+k)$ 为预测的 L 路段上的交通流量; $\bar{Q}_L(\tau+k)$ 为同时期 L 路段上的历史平均流量; $\hat{Q}_L(\tau+k)$ 为卡尔曼滤波预测的交通流量; γ 为历史值权重系数,通过模糊逻辑进行确定。

通过模糊卡尔曼滤波对各方向交通流量进行预测,然后以相位最短绿灯时间预测模型为基础,计算预测的各相位最短绿灯时间。

2.2 最短绿灯时间预测模型

根据预测各相位关键车道的交通流量,对所需的最短信号周期进行预测,以获取各相位所需的最短绿灯时间,用于后续优化计算。最短信号周期的计算采用文献[16]给出的 Webster 最短信号周期计算公式,然后按各相位关键车道预测流量中的最大流量比来分配各个相位的绿灯时间,此绿灯时间记为预测的相位最短绿灯时间。

根据短时交通流预测第 n 车道交通流量 q_n 与其饱和流量 S_n 之比,得第 n 车道预测流量比率 y_n ,即

$$y_n = \frac{q_n}{S_n} \quad (2)$$

相位 i 对应车道的预测流量比集合 $o_i = \{y_n, \dots, y_k \mid n, k \in i\}$,选取 o_i 中最大值作为关键车道相位 i 预测的最大流量比 $y_{i, \max}$,即

$$y_{i, \max} = \max\{y_n, \dots, y_k \mid y_n, y_k \in o_i\} \quad (3)$$

当满足条件 $Y < 0.6$ 时,借鉴 Webster 最短信号周期计算公式^[16],计算交叉口多相位最短预测周期 C_{\min} 为

$$C_{\min} = \frac{L}{1 - \sum_{i=1}^n y_{i, \max}} = \frac{L}{1 - Y} \quad (4)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n y_{i, \max} \quad (5)$$

式中 Y 为多相位交叉口的关键车道预测最大流量比率之和。

当满足条件 $Y \geq 0.6$ 时,Webster 最短信号周期计算公式计算结果与实际值偏差较大,会导致相位

最短预测周期偏差较大。因此,采用文献[17]的方法,计算交叉口多相位最短预测周期 C_{\min} 为

$$C_{\min} = 1.23Le^{(2.46-0.02L)Y} \quad (6)$$

式中 L 为交叉口信号损失时间(通常设置为每相位黄灯时间总和)。

由此可得预测的相位 i 最短绿灯时间 $g_{i, \min}$ 为

$$g_{i, \min} = \frac{y_{i, \min}}{Y_{\min}}(C_{\min} - L) \quad (7)$$

3 相位优化配时模型

首先,通过各相位最短绿灯时间预测模型,能够得到预测的各相位最短绿灯时间;然后,通过相位优化配时模型的优化计算来获得执行相位的绿灯时间。根据公交的自身属性,如车辆载客人数、车辆平均速度、车辆晚点状况等,给予各公交车自身权重,参与相位优化配时模型计算,分配相位优化绿灯时间,满足符合条件的公交优先通行,降低交叉口人均延误。

相位 i 绿灯可达区(图2)是指从进口道上游某处至停止线的区域 l_i ,当相位 i 显示绿灯时,进入该区域的机动车都能够顺利通过交叉口。相位 i 绿灯可达区域分为两个部分:1)相位 i 绿灯最短配时区 $l_{i, \min}$ (图2中 Green 区域);2)相位 i 绿灯延长区 $l_{i, \text{inc}}$ (图2中 Red 区域)。

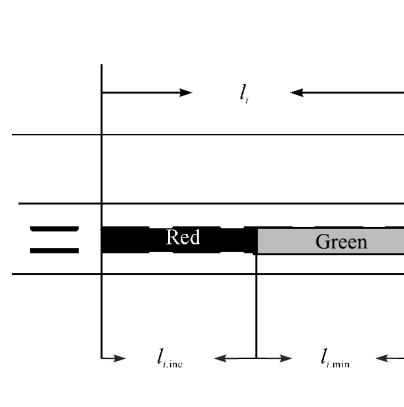


图2 交叉口直行相位 i 绿灯可达区

Fig. 2 Green time attainable district of intersection straight phase i

相位 i 绿灯可达区长度 l_i 定义为在执行相位 i 最长绿灯时间内,进入该区域的机动车可以通过交叉口的最大距离长度。相位 i 最短绿灯配时区长度 $l_{i, \min}$ 定义为在执行相位 i 最短绿灯时间内,进入该区域的机动车可以通过交叉口的最大距离长度。相位 i 绿灯延长区长度 $l_{i, \text{inc}}$ 定义为在执行相位 i 绿灯延长时间,进入该区域的机动车可以通过交叉口

的最大距离长度. 相位 i 最短绿灯配时区长度 $l_{i, \min}$ 为

$$l_{i, \min} = \frac{g_{i, \min} \cdot H_{h, w}}{t_d} \quad (8)$$

相位 i 绿灯延长区长度 $l_{i, \text{inc}}$, 根据不同环境状况, 可分为三类: 1) 相位 i 进口道上的车辆平均停车的最大长度在相位 i 最短绿灯配时区内, 即 $p_i \cdot t_d \leq g_{i, \min}$; 2) 相位 i 进口道上的车辆平均停车的最大长度在相位 i 绿灯延长区内, 即 $g_{i, \min} < p_i \cdot t_d \leq g_{i, \max} - g_{i, \min}$; 3) 相位 i 进口道上的车辆平均停车的最大长度在相位 i 绿灯延长区外, 即 $p_i \cdot t_d > g_{i, \max} - g_{i, \min}$. $l_{i, \text{inc}}$ 为

$$l_{i, \text{inc}} = \begin{cases} v_{i, \text{arr}}(g_{i, \max} - g_{i, \min}) & p_i t_d \leq g_{i, \min} \\ v_{i, \text{arr}}(g_{i, \max} - p_i t_d) + p_i H_{h, w} & g_{i, \min} < p_i t_d \leq g_{i, \max} - g_{i, \min} \\ (g_{i, \max} - g_{i, \min}) H_{h, w} / t_d & p_i t_d > g_{i, \max} - g_{i, \min} \end{cases} \quad (9)$$

相位 i 绿灯可达区长度 l_i 为

$$l_i = l_{i, \min} + l_{i, \text{inc}} \quad (10)$$

式中: t_d 为排队离散饱和平均车头时距; $g_{i, \max}$ 为相位 i 最长绿灯时间; $v_{i, \text{arr}}$ 为相位 i 车辆平均到达速率; p_i 为相位 i 车道上平均最大停车数量; $H_{h, w}$ 为停车车辆平均车头间距.

执行相位 i 绿灯前, 如果车辆位于相位 i 绿灯最短配时区内, 执行相位 i 的最短绿灯时间将满足该车辆通行; 如果车辆位于相位 i 绿灯延长区内, 执行相位 i 需要根据车辆具体位置延长相应的绿灯时间才能满足该车辆顺利通行; 如果车辆位于相位 i 可达区以外, 执行相位 i 不能通过延长绿灯时间的条件满足该车辆通行.

3.1 公交车权重计算

针对单点交叉口多相位公交优先控制方法, 采用了以下两类重要的指标计算公交车权重.

1) 计算公交车权重指标之一是公交车准点率. 相同线路公交车之间车头时距应与发车间隔相同. 因此, 公交车准点可以换算为 Nick Hounsell 提出乘客等待相同线路的公交车平均时间 d_w^n ^[18], 其表达式为

$$d_w^n = \frac{\sum_k H_k^2}{2 \sum_k H_k} \quad (11)$$

式中 H_k 为相同线路公交车之间的车头时距.

公交车乘客实际平均等待时间与公交车准点乘客平均等待时间之差作为公交晚点乘客平均多等待时间 EWT^[18], 其表达式为

$$\text{EWT} = \frac{\sum_k H_{\text{act}}^2}{2 \sum_k H_{\text{act}}} - \frac{\sum_k H_{\text{sched}}^2}{2 \sum_k H_{\text{sched}}} \quad (12)$$

将 EWT 简化后, 可得公交晚点乘客平均多等待指标系数 η_n ^[18] 为

$$\eta_n = 2P_n K_n (H_{n, \text{br}} - H_{n, \text{af1}}) \quad (13)$$

式中 K_n 为公交晚点乘客平均多等待系数 η_n 中的一个系数^[18], 其表达式为

$$K_n = \frac{1}{2(H_{n, \text{br}} + H_{n, \text{af1}} + H_{n, \text{af2}})} \quad (14)$$

2) 计算公交车权重指标之二是公交车载客率. 采用《美国公路 2000 手册》中计算公交车载客率 r_n 为

$$r_n = \frac{N_n}{N_{n, c}} \quad (15)$$

结合上述两个计算公交车权重指标, 计算公交车线路 n 的权重 w_n (《美国公路 2000 手册》) 为

$$w_n = \eta_n f_n r_n \quad (16)$$

式中 f_n 为影响公交线路 n 的其他影响因子, 如右转影响、BRT 和混合交通参数等影响因素.

随着新的可获取 WiFi 热点和蓝牙信号等各类传感器技术的出现, 将可以采集相对较多的参数数据, 如公交车载客人数, 公交车的前方实时路况等. 公交权重计算需要利用每辆公交车采集的数据信息, 运用式 (11 ~ 16) 计算各辆公交车权重. 检测器采集并上传公交车线路 n 的通讯信息, 如表 1 所示.

表 1 上传公交线路 n 通讯信息

Table 1 Uploading communication message of bus route n

上传信息	符号
公交平均速率	v_n
公交载客人数	N_n
公交车实际座位数	$N_{n, c}$
公交距停车线的距离	L_n
相同线路公交与前车的车头时距	$H_{n, \text{br}}$
相同线路公交与后车的车头时距	$H_{n, \text{af1}}$
相同线路公交与第二辆后车的车头时距	$H_{n, \text{af2}}$
准点公交车的车头时距	P_n

上传的公交车通讯信息经公交车权重计算模块处理后, 针对不同相位的数据计算结果, 按与交叉口的距离排序并进行对应编号, 以供相位优化模块使用. 以相位 i 为例, 整理后相位 i 信息如表 2 所示.

表2 相位*i*信息
Table 2 Message of phase *i*

具体信息	符号
绿灯可达区中第 <i>n</i> 辆公交	n^i
第 <i>n</i> 辆公交平均速率	v_n^i
绿灯延长区中首辆公交车编号	k^i
第 <i>n</i> 辆公交离停车线距离	L_n^i
第 <i>n</i> 辆公交的权重因子	w_n^i
车辆排队长度	l_q^i

3.2 相位延误计算

公交优先控制针对不同相位产生的不同延误影响.其延误可分为:1) 优先相位减少的总延误;2) 非优先相位增加的总延误.

如果相位*i*不执行绿灯时间延长 Δt_i ,则该时间段内到达进口道的车辆需要等待下一次相位*i*的绿灯时间才能离开交叉口,因此有可能会产生相位*i*上的延误.图3中四边形阴影部分面积表示相位*i*没有延长绿灯时间 Δt_i 的延误,如果相位*i*绿灯延长 Δt_i 时间,则等同于相位*i*一个进口道*k*上减少的延误^[19],其表达式为

$$\Delta d'_{i,k} = \frac{\Delta t_i q_{i,k}}{2} \left[2r_i + \frac{\Delta t_i q_{i,k}}{q_{i,k}^s} - \Delta t_i \right] \quad (17)$$

式中: $q_{i,k}$ 为相位*i*第*k*进口道的车辆到达率; r_i 为相位*i*的红灯时间; $q_{i,k}^s$ 为相位*i*第*k*进口道的车辆离散率.

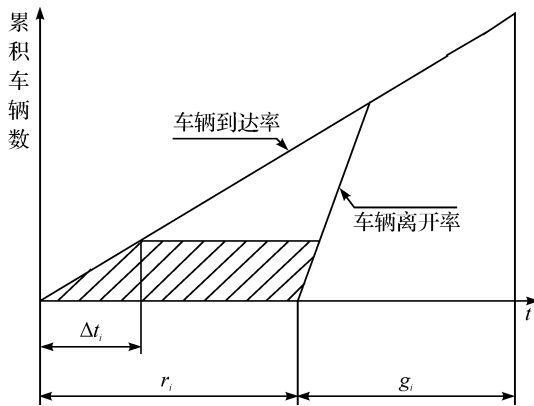


图3 优先相位*i*第*k*进口道车辆达到与离开过程

Fig. 3 Vehicle to arrive and leave process of the import road *k* of priority Phase *i*

式(17)计算结果为社会车辆减少车辆延误,然而,需要的是社会车辆位于相位*i*绿灯延长区减少人均总延误公式,对式(17)进行相应的修改,得到相位*i*绿灯延长时间 Δt_i 一个进口道*k*上减少的预测人均总延误,即

$$\Delta d_{i,k} = n_{i,k}^p \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i,k}}{2} \left[2r_i + \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i,k}}{q_{i,k}^s} - \Delta t_i \right] \quad (18)$$

式中: $n_{i,k}^p$ 为相位*i*进口道*k*上社会车辆平均载客人数; $\hat{q}_{i,k}$ 为相位*i*进口道*k*短时预测流量.

公交车的延误计算相对比较精确,计算公交车线路*n*位于相位*i*绿灯延长区内,利用延长相位*i*绿灯时间 Δt_i ,能够通过交叉口的公交车线路*n*的人均总延误,其表达式为

$$\Delta d_i^{bus,n} = N_n^i w_n^i (C_{T-1} - g_{i,\min} - L_n^i / v_n^i) \quad (19)$$

式中: C_{T-1} 为上一个信号周期时长; $g_{i,\min}$ 为短时最短绿灯预测时间.

交叉口设有*n*个相位,优先相位*i*执行延长绿灯时间 Δt_i ,且优先相位*i*绿灯最短配时区不受延长绿灯时间的影响,然而延长绿灯时间减少相位*i*绿灯延长区内的公交车辆与社会车辆的延误.优先相位*i*延长绿灯时间 Δt_i 减少人均总延误 $\Delta D^{priority}(i, \Delta t_i)$,其表达式为

$$\Delta D^{priority}(i, \Delta t_i) = \sum_{n \in h\{i\}} [N_n^i w_n^i (C_{T-1} - g_{i,\min} - L_n^i / v_n^i)] + \sum_{k \in o\{i\}} \sum_{\Delta=0}^{\Delta t_i} \left\{ n_{i,k}^p \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i,k}}{2} \left[2r_i + \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i,k}}{q_{i,k}^s} - \Delta t_i \right] \right\} \quad (20)$$

式中: $o\{i\}$ 为相位*i*进口车道的总集合; $h\{i\}$ 为位于相位*i*绿灯延长区内的公交车辆在绿灯延长时间 Δt_i 内能够通过交叉口的集合.

在优先相位*i*执行延长绿灯时间 Δt_i 时,非优先相位的车辆需要多等待 Δt_i 时间才能通行,因此增加了非优先相位的延误.图4中四边形阴影部分面积表示非优先相位*i+1*由于优先相位*i*绿灯延长 Δt_i 时间产生的延误,相当于相位*i+1*延长了绿灯时间 Δt_i ,使非优先相位在该段内的相位延误减少(图3).其非优先相位*i+1*进口道*k*上增加的人均延误^[19],其表达式为

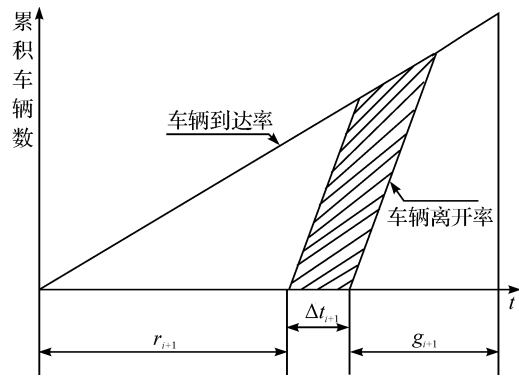


图4 非优先相位*i+1*第*k*进口道车辆达到与离开过程

Fig. 4 Vehicle to arrive and leave process of the import road *k* of non-priority phase *i+1*

$$\Delta d'_{i+1,k} = \frac{\Delta t_i q_{i+1,k} q_{i+1,k}^s}{2(q_{i+1,k}^s - q_{i+1,k})} (2r_{i+1} + \Delta t_i) - \frac{\Delta t_i q_{i+1,k}}{2} \left[2r_{i+1} + \frac{\Delta t_i q_{i+1,k}}{q_{i+1,k}^s} - \Delta t_i \right] \quad (21)$$

式(21)计算结果为非优先相位*i+1*的社会车辆增加车辆延误,需要根据非优先相位*i+m*绿灯可

达区的范围,对社会车辆增加人均总延误公式进行分类,计算由于优先相位 i 延长绿灯 Δt_i 时间,非优先相位 $i+m$ 增加的人均预测总延误. 根据其绿灯可达区的范围,计算延误分为两类:

1) 车辆排队长度 $l_q^{i+m} < l_{i+m}$ 时,相位 $i+m$ 延误 $\Delta D_{i+m}^{\text{non-priority}}(\Delta t_i)$,其表达式为

$$\Delta D_{i+m}^{\text{non-priority}}(\Delta t_i) = \sum_{n \in e(i+m)} \{N_n^{i+m} \omega_n^{i+m} [\Delta t_i - (L_n^{i+m} - l_q^{i+m})/v_n^{i+m}]\} + \sum_{n \in s(i+m)} N_n^{i+m} \omega_n^{i+m} \Delta t_i - \sum_{n \in h(i)} \left[\sum N_n^{i+m} \omega_n^{i+m} (C_{T-1} - g_{i+m, \min} - L_n^{i+m}/v_n^{i+m}) \right] + \sum_{k \in o(i+m)} n_{i,k}^p \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i+m,k}^s q_{i+m,k}^s}{2(q_{i+m,k}^s - \hat{q}_{i+m,k}^s)} (2r_{i+m} + \Delta t_i) - \sum_{k \in o(i+m)} \sum_{\Delta t = \Delta t_i} \left\{ n_{i,k}^p \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i+m,k}^s}{2} \left[2r_i + \frac{\Delta t_i \hat{q}_{i+m,k}^s}{q_{i+m,k}^s} - \Delta t_i \right] \right\} \quad (22)$$

式中: $e\{i+m\}$ 为非优先相位 $i+m$ 的公交车在相位 i 绿灯延长 Δt_i 内,由行驶状态变为等候状态的公交车编号集合; $s\{i+m\}$ 为非优先相位 $i+m$ 的公交车在相位 i 绿灯延长时间段 Δt_i 内,停车等待 Δt_i 的编号集合; $h\{i+m\}$ 为位于非优先相位 $i+m$ 绿灯延长区内的公交车在绿灯延长时间 Δt_i 内能够通过交叉口的集合; $o\{i+m\}$ 为非优先相位 $i+m$ 所有进口车道的总集合.

式(22)中的第一项为非优先相位 $i+m$ 的公交车在相位 i 绿灯延长时间段 Δt_i 内由行驶状态变为停车状态增加的停车时间延误;第二项为非优先相位 $i+m$ 的公交车在相位 i 绿灯延长时间段 Δt_i ,停车多等候 Δt_i 的延误;第三项为由于相位 i 绿灯时间延长了 Δt_i 导致相位 $i+m$ 的绿灯时间也延长了 Δt_i ,从而减少了公交车在该延长时段通过交叉口的延误;第四项为由于相位 i 绿灯延长时间 Δt_i 导致相位 $i+m$ 上社会车辆的延误;第五项为由于相位 i 绿灯延长时间 Δt_i 导致相位 $i+m$ 延长绿灯时间 Δt_i ,社会车辆在该延长时间通过交叉口而减少社会车辆的延误.

2) 车辆排队长度 $l_q^{i+m} \geq l_{i+m}$ 时,车辆排队长度已经溢出绿灯可达区,简化相位 $i+m$ 延误计算,只考虑绿灯可达区中车辆延误,相位 $i+m$ 延误 $\Delta D_{i+m}^{\text{non-priority}}(\Delta t_i)$,其表达式为

$$\Delta D_{i+m}^{\text{non-priority}}(\Delta t_i) = \sum_{n \in s(i+m)} N_n^{i+1} \omega_n^{i+1} \Delta t_i + n_{i+m}^p l_q^{i+m} \Delta t_i / H_{h,w} \quad (23)$$

式(23)中,第一项表示非优先相位 $i+m$ 的公交车在相位 i 绿灯延长时间段 Δt_i ,停车多等候 Δt_i 的延误;第二项表示在非优先相位的绿灯可达区内,社会车辆停车多等待 Δt_i 的延误.

非优先相位以车辆的排队长度作为参考,依据上述两类条件,将其分类,符合(1)类的非优先相位集合为 α ,符合(2)类的非优先相位集合为 β ,对所有非优先相位求和即非优先相位增加延误总和,其表达式为

$$S_{\text{delay}}^{\text{non-priority}}(i, \Delta t_i) = \sum_{\substack{a \neq i \\ a \in \alpha}} \Delta D_a^{\text{non-priority}}(\Delta t_i) + \sum_{\substack{b \neq i \\ b \in \beta}} \Delta D_b^{\text{non-priority}}(\Delta t_i) \quad (24)$$

3.3 相位优化绿灯时间模型

考虑优先相位绿灯延长区的公交车辆与社会车辆延误减少情况,与非优先相位绿灯可达区中公交车辆与社会车辆延误增加情况,优先相位 i 延长 Δt_i ,减少总延误定义为 $\Delta D_{\text{delay}}(i, \Delta t_i)$,其表达式为

$$\Delta D_{\text{delay}}(i, \Delta t_i) = \Delta D_{\text{priority}} - S_{\text{delay}}^{\text{non-priority}}(i, \Delta t_i) \quad (25)$$

提出的算法以公交优先通行能力为主,建立最优目标函数 $J(i, \Delta t_i)$,优化执行优先相位的绿灯延长时间,同时降低对非优先相位延误增加的影响,保障优先相位公交车辆优先通行,降低交叉口的总体延误. 此算法采用滚动相位实时控制,对即将要执行的绿灯相位进行实时预测并计算各个权重值,以确定该相位所需最优的绿灯延长时间,得到优化的该相位绿灯时间. 在此过程中对各相位的公交优先请求进行处理,不会出现公交优先请求冲突的情况. 此外模型还具有自适应性. 首先,利用短时流量预测的结果确定各相位最短绿灯预测时间,然后,利用相位优化配时模型确定相位最优绿灯配时时间,其目的是保障交叉口自适应性.

目标函数 $J(i, \Delta t_i)$ 为

$$\begin{aligned} \max J(i, \Delta t_i) &= \Delta D_{\text{delay}}(i, \Delta t_i) - \Delta D_{\text{delay}}(i, \Delta t_i - 1) \\ g_{i, \min} &\leq \Delta t_i + g_i \leq g_{i, \max} \\ \text{s. t. } C_{T-1} &= \sum_{j=1}^n (g_{i, \text{last}} + L) \\ J &> 0 \\ \Delta t_i &\geq 1 \end{aligned} \quad (26)$$

利用相位绿灯时间优化模型,计算出绿灯最优延长时间 Δt_i . 由此得到优先相位优化绿灯时间 $g_{i, \text{best}}$ 为

$$g_{i, \text{best}} = g_{i, \min} + \Delta t_i + \epsilon \quad (27)$$

优化绿灯时间计算公式中又引入反馈调节参数 ϵ ,其目的是增加模型鲁棒性,减少模型不稳定性增加交叉口的延误,其表达式为

$$\epsilon = \varphi(l_{q, \text{last}}^i) \quad (28)$$

$$\varphi(l_{q, \text{last}}^i) = \frac{l_{q, \text{last}}^i t_d}{H_{h,w}} \quad (29)$$

式中 $l_{q, \text{last}}^i$ 为上个周期相位 i 执行绿灯时间内未通过

交叉口剩余车辆的排队长度。

3.4 模型算法的实现

1) 初始化. 根据交叉口每个相位短时流量预测未来 15 min 的交通流量, 用其确定预测的相位最短绿灯时间。

2) 判断相位 i 是否即将获得通行权, 如果是, 进行 3) 步, 否则, 继续执行原方案。

3) 利用相位优化模型计算相位 i 优化的绿灯时间。

4) 信号机执行相位 i 优化的绿灯配时。

5) 判断相位绿灯是否结束, 结束进行 6), 否则返回 2)。

6) 检测未通过在此相位 i 执行绿灯时间的剩余车辆排队长度。

模型算法流程如图 5 所示。

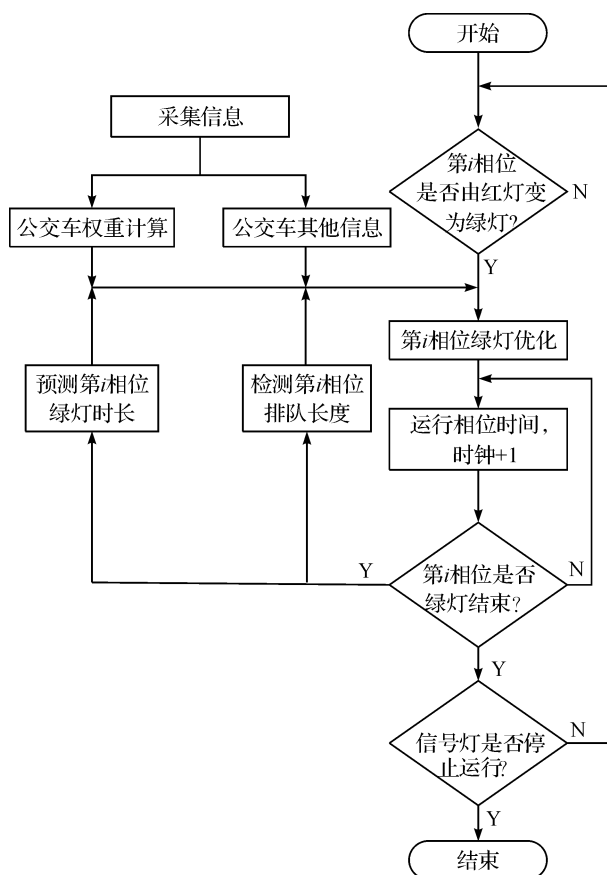


图 5 模型算法流程图

Fig. 5 Flow of model algorithm

4 仿真实验

4.1 实验方案设计

实验基于 VISSIM 仿真环境, 通过 VISSIM 提供的 COM 接口, 采用 VS C++ 2008 编程实现。以杭州市庆春路—中河路典型 4 相位交叉口为实验路网(图 6), 交通背景数据如表 3 所示。

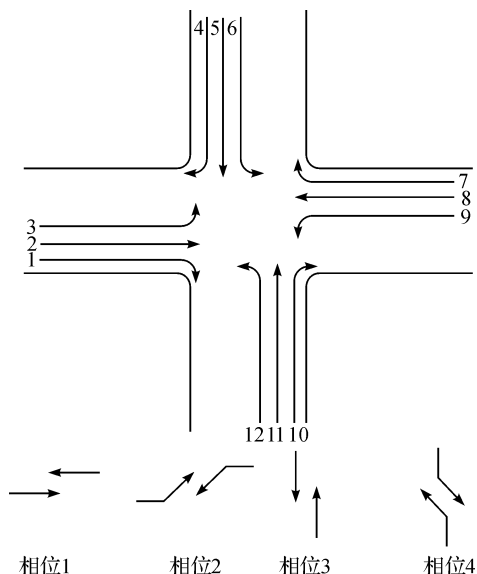


图 6 典型交叉口示意图

Fig. 6 A classic intersection

表 3 各方向饱和流率

Table 3 Values of saturation flow data in each direction

进口方向	转向	车道数	饱和流率 / (veh · h ⁻¹)
西进口	右	1	1 550
	直	3	4 950
	左	2	3 100
北进口	右	1	1 550
	直	3	4 950
	左	1	1 550
东进口	右	2	3 100
	直	2	3 300
	左	1	1 550
南进口	右	1	1 550
	直	3	4 950
	左	1	1 550

仿真总共 3 h, 共 14 400 仿真秒。仿真期间路网的流量呈泊松分布的随机分布状态, 车辆的期望速度为 40 km/h。各进口方向流量分布如表 4 所示。

表 4 仿真期间交通流量分布

Table 4 The distribution of traffic flow in the simulation time

时间	方向流量 / (veh · h ⁻¹)			
	西进口	南进口	东进口	北进口
07:00—08:00	1 576	1 280	1 586	1 434
08:00—09:00	1 636	1 346	1 684	1 434
09:00—10:00	1 505	1 139	1 467	1 267
10:00—11:00	1 399	1 024	1 350	1 254

4.2 实验结果分析

实验中的信号配时分别采用笔者提出的单点交叉口自适应公交优先方法和单点交叉口固定配时, 其中, 单点交叉口固定配时方案已经根据获取的各个相位实际交通流量, 得到了单点最优配时方案, 配

时方案如表 5 所示. 黄灯时间为 3 s, 即各相位损失时间 3 s, 公交车随机分配载客人数. 实验一是多相位输入公交车辆, 各相位输入公交车辆状况如表 6 所示. 实验二是单相位输入公交车辆, 公交车辆输入只有西进口直行方向, 公交车输入频率分别为 30, 60, 90, 120 s/次, 延误时间 0 ~ 120 s.

表 5 单交叉口固定配时

Table 5 Fixed time plan of crossing s

固定配时	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
绿灯时间	17	12	12	12

表 6 各方向公交车输入状况

Table 6 Values of bus input in each direction

进口方向	转向	公交车频率/(min · 次 ⁻¹)	延误时间/s
西进口	右	6	0 ~ 100
	直	9	0 ~ 120
	左	7	0 ~ 100
北进口	右	6	0 ~ 100
	直	9	0 ~ 120
	左	6	0 ~ 100
东进口	右	6	0 ~ 100
	直	5	0 ~ 120
	左	5	0 ~ 100
南进口	右	6	0 ~ 100
	直	9	0 ~ 120
	左	6	0 ~ 100

标定实验所需要的参数. 影响公交线路的影响因子 $f_n = 1.0$, 各相位社会车辆平均载客人数 $n_i^p = 2$ 人/车, 各相位最短绿灯时间 $g_{\min} = 7$ s, 各相位最长绿灯时间 $g_{\max} = 55$ s, 最大周期为 $C_{\max} = 150$ s. 实验一中自适应公交优先控制方法中各相位配时时间变化如图 7 所示, 与固定配时控制方法对比结果如表 7 所示. 实验二的公交车输入频率为 30 s/次时, 自适应公交优先控制方法中各相位配时时间变化如图 8 所示, 与固定配时控制方法对比结果如表 8 所示. 相同环境, 公交车输入频率不同, 相同相位绿灯配时的变化如图 9 所示, 对比结果如表 9 所示.

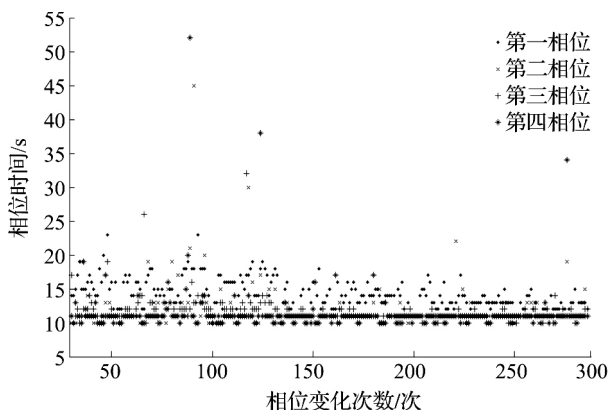


图 7 多相位公交输入相位时间变化图

Fig. 7 Variation figure of phase time of multiphase bus input

表 7 多相位公交输入的两种方法延误对比

Table 7 The average delay comparison between two methods of multiphase bus input

延误	方案	
	固定配时	优化算法
公交车总延误/s	5 508	3 762
公交车均延误/s	22.667	16.146
车均延误/s	22.103	17.600
车均停车数/次	0.928	0.916
人均延误/s	10.336	8.251

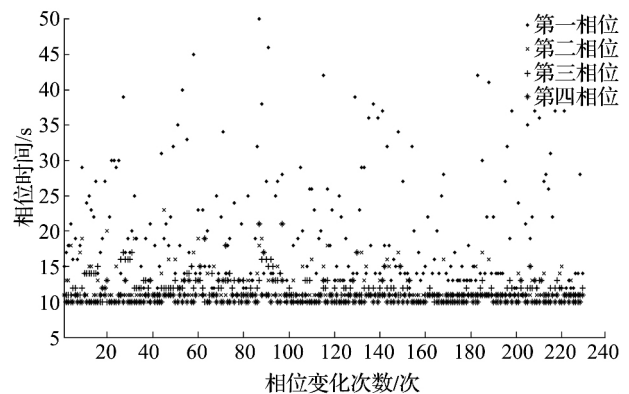


图 8 单相位公交输入频率 30 s/次相位时间变化图

Fig. 8 Variation figure of phase time of single phase bus input rate 30 s/times

表 8 单相位公交输入频率 30 s/次的两种方法延误对比

Table 8 The average delay comparison between two methods of single phase bus input rate 30 s/time

延误	方案	
	固定配时	优化算法
公交车总延误/s	8 611	4 762
公交车均延误/s	22.424	15.411
车均延误/s	21.945	19.189
车均停车数/次	0.919	0.892
人均延误/s	9.502	8.299

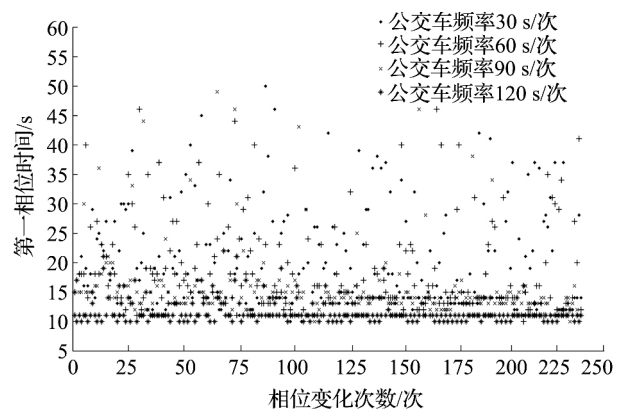


图 9 公交输入频率不同第一相位时间变化图

Fig. 9 Variation figure of first phase time of bus input of different ratio

表9 公交输入频率不同的延误对比

Table 9 The average delay comparison among bus input of different ratio

延误	公交输入频率			
	30 s/次	60 s/次	90 s/次	120 s/次
公交车均延误/s	15.411	10.531	16.461	14.827
车均延误/s	19.189	17.913	16.961	16.398
车均停车数/次	0.892	0.869	0.885	0.868
人均延误/s	8.299	8.328	8.008	7.872

从仿真结果可知:自适应公交优先控制方法适用于多相位公交车到达情况,其控制效果十分满意.与固定配时控制方法相比,其人均延误和车均延误均得到了降低.自适应公交优先控制方法也适用于单相位上公交车以不同频率抵达的情况,其控制效果也比较令人满意,除公交车到达频率为90 s/次以外,自适应控制方法降低了公交车均延误,车均延误和人均总延误.并且人均延误随着公交单向到达频率降低而降低.

提出的自适应控制方法在降低车均延误和人均延误上效果明显.其原因一是采用了滚动相位绿灯优化控制,降低了计算优化周期的时间复杂度,提高了相位优化绿灯时间的实时性;二是采用模糊卡尔曼滤波预测短时流量,掌握未来15 min的流量趋势,保证了预测的相位最短绿灯时间的准确性;三是相位优化模型运用各自公交车属性权重,并且掌握各辆公交车在交叉口中的运行情况,使满足条件公交车优先通行,从而降低整个交叉口的延误.

5 结 论

通过模糊卡尔曼滤波预测交通流量,能够反映未来15 min的交通流变化趋势,合理分配相位最短绿灯预测时间,同时依据采集公交车实时属性的数据,准确计算公交车的自身权重,有利于相位优化配时模型的计算精度.此外,以相位作为控制步长,能够降低模型的时间复杂度,减少交通环境不确定性因素的干扰,提高模型的鲁棒性.此方法综合权衡公交优先与社会车辆增加延误的利弊,有效提高相位绿灯时间的利用率,减少交叉口的人均延误和车均延误.

参考文献:

[1] VEGAS J, LU B. The intermittent bus lane signals setting within an area[J]. Transportation research part C, 2004, 12 (6): 453-469.

[2] 陆建, 王伟, 陈学武. 公交专用车道设置条件与效益分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1998, 28(3): 103-107.

[3] 何必胜, 宋瑞, 何世伟. 交叉口公交预信号感应控制策略仿真实验[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(9): 1909-1944.

[4] 别一鸣, 朱慧, 王殿海. 一种单点被动公交优先控制算法及其效益评价[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(4): 522-528.

[5] XU H F, ZHENG M 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: 953-965.

[6] 张卫华, 陆华普, 石琴, 等. 公交优先的信号交叉口配时优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2004(4): 49-53.

[7] LUIZ A K, WERNER J. Simultaneous control of traffic lights and bus departure for priority operation[J]. Transportation research part C, 2010, 18: 288-298.

[8] MICHAEL E, CARLOS F D. Bus lanes with intermittent priority: strategy formulae and evaluation[J]. Transportation research part B, 2006, 40: 731-744.

[9] HESHAM R, ZHANG Y H. Sensitivity analysis of transit signal priority impacts on operation of a signalized intersection [J]. Journal of transportation engineering, 2004, 130: 796-804.

[10] MA W J, YE X C. Optimal offline cycle length model based on online bus priority demand[J]. Journal of transportation engineering and information technology, 2013, 13: 124-129.

[11] 王正武, 夏利民, 罗大庸. 单交叉口自适应公交优先控制[J]. 中国公路学报, 2010, 23: 84-90.

[12] ZHOU G W, GAN A, SHEN L. Optimization of adaptive transit signal priority using parallel genetic algorithm[J]. Tsinghua science and technology, 2007, 12: 131-140.

[13] SHEN G J, KONG X J. Study on road network traffic coordination control technique with bus priority[J]. IEEE transaction on systems, man, and cybernetics-part C: application and reviews, 2009, 39: 343-351.

[14] CHANG X M, ZHEN Y. Bus-priority intersection signal control system based on wireless sensor network and improved particle swarm optimization algorithm[J]. Sensor letters, 2012, 10: 1823-1829.

[15] 郭海锋, 方良君, 俞立. 基于模糊卡尔曼滤波的短时交通流量预测方法[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(2): 218-221.

[16] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 95-103.

[17] 蒋金勇, 云美萍, 杨佩昆. 基于 HCM 2000 延误模型的最佳周期时长估算公式[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37 (8): 1024-1028.

[18] NICK H, BIRENDRA S. A new approach for cooperative bus priority at traffic signals[J]. IEEE transaction on intelligent transportation systems, 2012, 13: 6-14.

[19] 张卫华, 石琴, 刘强. 公交优先信号交叉口延误计算与配时优化方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(4): 30-33.

(责任编辑: 陈石平)