

# 基于 RFID 车载电子标签的公交优先控制策略研究

刘云翔<sup>1</sup>, 黄越<sup>1,2</sup>, 王浩<sup>1</sup>

(1. 上海应用技术学院 计算机科学与信息工程学院, 上海 201418;

2. 上海广电通信技术有限公司, 上海 200233)

**摘要:** 针对现有的信号控制系统不能对达到交通流做出精准预测, 只能被动适应交通流达到而无法主动引导交通流; 提出基于 RFID 车载电子标签车路通信环境, 引导公交车辆适时到达并通过交叉口; 以交叉口总延误最小化为目标, 综合考虑当前交通流运行状态, 建立公交信号优先控制模型, 最大限度降低交叉口的车均延误, 减少平均停车次数, 使绿灯的利用率最大化; 仿真实验表明, 控制模型的控制效益明显提高, 实现公交优先目标。

**关键词:** 车速引导; 公交优先; 优化模型

## Research on Bus Priority Control Strategy Based on RFID in Vehicle Electronic Tags

Liu Yuxiang<sup>1</sup>, Huang Yue<sup>1,2</sup>, Wang Hao<sup>1</sup>

(1. School of Computer science and Information Engineering, Shanghai College of applied Technology,

Shanghai 201418, China; 2. Shanghai Broadcast Communication Technology Co. Ltd., Shanghai 200233, China)

**Abstract:** In view of the existing signal control system can't achieve traffic flow to make accurate forecasts, the current state is: passively adapt to traffic flow, not actively guide the traffic flow. RFID-based vehicle electronic tag build car-communication environment, and guide timely arrival of buses through the intersection. In the intersection objective of minimizing the total delay, considering the current state of traffic flow, establish bus signal priority control model, to minimize the intersection average delay, reduce the average number of stops, in order to maximize the utilization of green. Simulation results show that the control model of control efficiency has improved significantly, to achieve public priorities.

**Keywords:** speed guide; bus priority; optimization model

## 0 引言

城市公交系统的持续良好发展对城市发展具有很重要的意义。只有采用系统工程的指导思想, 对各种交通控制方法进行整合, 以整个交通系统为研究的目标, 才能够充分发挥控制系统的运行效率。

2000年, 以 PeterG Furth 为代表, 分析交叉口有条件公交信号优先、完全公交信号优先和无公交信号优先 3 种控制方法的延误变化幅度, 研究证明有条件公交信号优先控制方法比其他两种优先控制方法造成的延误要小许多<sup>[1]</sup>。2000年, KevinN. Balke, 提出了含有车辆到达预测时间窗、优先权判断规则、优先策略选择和优先策略执行等模块的“主动的公交信号优先控制”的概念<sup>[2]</sup>。2004年, WonhoKim 基于公交停靠站时间模型, 提出了基于站点控制的公交信号优先控制方法<sup>[3]</sup>。2006年, 以 Head L 为代表, 参考“计划审批技术法”的项目管理方法, 建立多公交优先申请的控制模型, 研究证明该模型的所造成的车辆延误小于先到先服务的控制模型<sup>[4]</sup>。2013年, 以 He 等为代表, 基于车路协同技术, 建立了多公交

优先的混合非线性规划的数学控制模型, 仿真结果表明该模型可以获取更有的解<sup>[5]</sup>。

国内的研究人员鉴于国外的研究基础之上, 着重研究了单交叉口的公交信号优先配时的控制方法和实时修正信号配时方案的控制方法。2007到2009年, 同济大学以杨晓光为代表等人, 分别研究了单点公交信号优先控制方法和基于交叉口群的协同控制方法, 在此基础上提出了以交叉口总人均延误为目标函数的单交叉口公交信号优先的被动控制系统<sup>[6-7]</sup>。

本文基于构建的公交车载单元与路侧单元信息交互环境, 对公交车辆进行车速引导和交叉口信号配时等主动交通控制方式, 使公交以适当的车速行驶至交叉口并通过交叉口, 进而实现车辆的行程车速由控制模型的输入到控制模型的输出的转变, 发挥控制模型最大的效益。

## 1 问题描述

城市公交站点位于交叉口上游, 公交车辆在公交站点上下完乘客离开站点驶向交叉口, 由于现实的行驶过程中驾驶人无法获知前方交叉口的信号状态, 只能凭经验来决定行驶车速, 则公交车辆在达到交叉口是会遇到以下 3 种情况 (不考虑二次排队), 见图 1。

1) 停车排队, 待绿灯亮起后通过停车线。公交车辆在  $t_1$  时刻驶离站点, 待公交达到交叉口时绿灯已亮起, 但前方进口道累积的排队车辆未消散完, 公交需停车加入当前的车辆排

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-09-06。

基金项目: 上海市科委重点支撑项目(12510503800)。

作者简介: 刘云翔(1964-), 男, 上海人, 教授, 工学博士, 主要从事人工智能、计算机软件与理论、信息融合、智能信息处理等方向的研究。

队, 跟随消散车队通过停车线。

2) 以平均行驶车速顺利通过停车线。公交车车辆在  $t_2$  时刻驶离站点, 待公交达到交叉口时绿灯已亮起, 前方的排队车辆已消散, 公交以平均行驶车速顺利通过停车线。

3) 停车排队, 待下一周期通过停车线。公交车车辆在  $t_3$  时刻驶离站点, 待公交达到交叉口时红灯已亮起, 公交需减速停车进入排队, 待下一周期绿灯亮起后通过停车线。

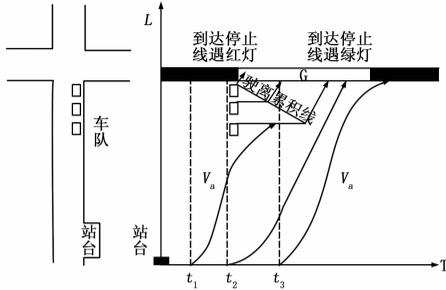


图 1 公交车辆常规行驶时空图

## 2 车速引导策略

基于 RFID 车载电子标签构建的车路通信环境, 本文提出通过驻站停留控制或速度引导以避免上述停车排队问题。

假设具有最高优先级  $P$  的公交车辆上下乘客后准备驶离站点的时刻为  $T_R$ , 且以公交相位红灯亮起时刻作为初始参照点, 则当公交行驶相位红灯亮起时, 交叉口进口道的车辆将会排队累积, 待绿灯亮起排队车辆将逐渐消散。具体情况 (见图 2) 如下:

1) 速度引导。  $T_L$  时刻公交从站台驶出后, 通过速度引导加速至较低的速度  $v_1$ , 最后不停车适时到达并通过交叉口。如图 2 中曲线 2。

2) 驻站控制。公交车推迟驶出站台, 在站台内停留  $t_w$  时长, 最后不停车适时到达并通过交叉口。如图 2 中曲线 3。

3) 绿灯延长。  $t_b$  时刻公交从站台驶出, 在本相位绿灯信号结束之前无法正常通过交叉口, 但基于车路通信, 使绿灯信号延长  $T_{del}$  秒, 推迟绿灯信号的结束时间, 使得公交车辆适时到达并顺利通过交叉口。如图 2 中曲线 4。

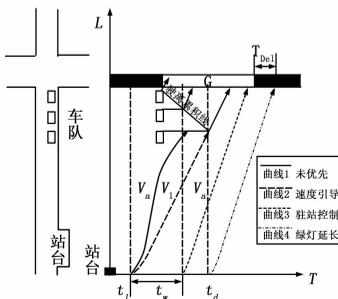


图 2 基于引导的公交行驶时空图

## 3 模型建立与求解

### 3.1 基本假设

本研究是建立在以下的基本假设条件基础之上。

1) 研究以单交叉口为例, 交通流处于非饱和状态, 每个进口道交通流基于历史平均, 以固定流率均匀到达, 且不考虑

相邻交叉口的影响。

2) 假设公交站台位于交叉口上游。

3) 公交车辆能够完全服从车速引导策略, 引导车速需服从最高最低速度限制。

4) 不考虑行人、非机动车的干扰。

### 3.2 优化模型目标函数

基于电子标签 RFID 信息交互的公交优先控制模型的目标函数为交叉口总延误最小, 以总延误为信号控制方案的评价指标, 其计算公式为

$$MinD = \delta D_b + \tau D_c \quad (1)$$

式中,  $D$  为交叉口总延误;  $\delta, \tau$  分别为公交延误和社会车辆延误的加权系数;  $D_b, D_c$  分别为公交的车均延误和社会车辆的车均延误。

#### 3.2.1 公交延误模型

公交车辆的延误可由下式计算得到:

$$D_b = \epsilon_r D_{b1} + \epsilon_s D_{b2} + \epsilon_c D_{b3} \quad (2)$$

式中,  $D_{b1}, \epsilon_r$  分别为驻站延误和驻站延误的加权系数;  $D_{b2}, \epsilon_s$  分别为信号延误和信号延误的加权系数;  $D_{b3}, \epsilon_c$  分别为控制延误和控制延误的加权系数。

对于驻站延误可表示为:

$$D_{b1} = t_L - t_R \quad (3)$$

式中,  $t_L$  为公交车辆离开站点的时刻;  $t_R$  为公交车辆上下完乘客后准备驶离站点的时刻。

对于信号延误可表示为:

$$D_{b2} = t_g - t_r \quad (4)$$

式中,  $t_r$  为公交车辆在遇红灯交叉口停车排队的时刻;  $t_g$  为公交车辆遇绿灯重新启动的时刻。

对于控制延误可表示为:

$$D_{b3} = L_b/V_a - L_b/V_{max} \quad (5)$$

#### 3.2.2 社会车辆延误模型:

假设进口道 1 (含公交站点) 和进口道 2 的车辆到达率为  $q_1$  和  $q_2$ , 则进口道 1 和进口道 2 的社会车辆总延误时间等于:

$$D_{c1} = \frac{q_1 s t_{r1}^2}{2(s - q_1)} \quad (6)$$

$$D_{c2} = \frac{q_2 s t_{r2}^2}{2(s - q_2)} \quad (7)$$

式中,  $s$  为进口道 1 和进口道 2 的饱和流量;  $t_{r1}, t_{r2}$  分别为进口道 1 和进口道 2 的红灯时长。

从而可以推得交叉口社会车辆的平均延误时间  $D_c$  等于:

$$D_c = \frac{D_{c1} + D_{c2}}{C(q_1 + q_2)} \quad (8)$$

### 3.3 约束条件

为了分析优先控制模型效益, 结合图 3, 依据设立的引导区, 可知模型的优化过程是从公交车辆上下完乘客后准备驶离站点的时刻开始, 假设此时刻点为  $T_R$ , 根据  $T_R$  值的变化可把公交驶离时刻分为 A (包含  $A_1$  和  $A_2$  时间段)、B、C 和 D 四种情况, 且以公交相位红灯亮起时刻作为初始参照点。

1) 情景 A:

此情境下, 公交即使通过驻站停留也会遇到红灯信号为停车, 此时公交需在上下完乘客后立即驶离公交站点, 可以在前方排队中处于靠前位置, 降低排队延误。故, 应满足以下约束:

$$T_R + t_{\max} < t_R^A \quad (9)$$

2) 情景 B:

此情景下, 通过车速引导或者驻站都可以使公交行驶至最大排队长度处时, 最后一辆排队的车辆正好开始前进, 公交将跟着前面车队一起通过交叉口, 不会经历停车, 如图 3 所示。故应满足以下约束:

$$T_R + t_{\max} > t_R^A \quad (10)$$

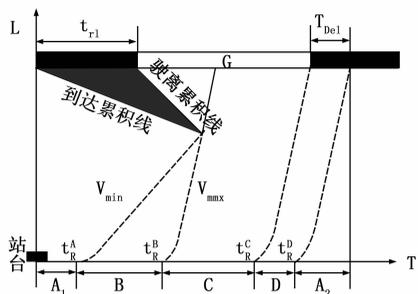


图 3 公交在引导下驶离站点的不同情景

3) 情景 C:

此情境下不需要对公交车辆实施优先控制, 公交都可以顺利通过交叉口, 因此只需要满足以下约束条件:

$$T_L + \frac{L}{V} < C \quad (11)$$

4) 情景 D:

此情境下, 公交相位的绿灯时间不能无限延长, 不能超过冲突相位服务社会车辆所需的绿灯时间, 故, 应满足以下约束:

$$0 < T_{Del} < T_b \quad (12)$$

式中,  $t_b = t_{g2} - t'_{g2}, t_{g2}$  为冲突相位的绿灯时间;  $t'_{g2}$  为冲突相位消散社会车辆交通流所需要的时间。

### 3.4 模型求解

模型求解过程见图 4。

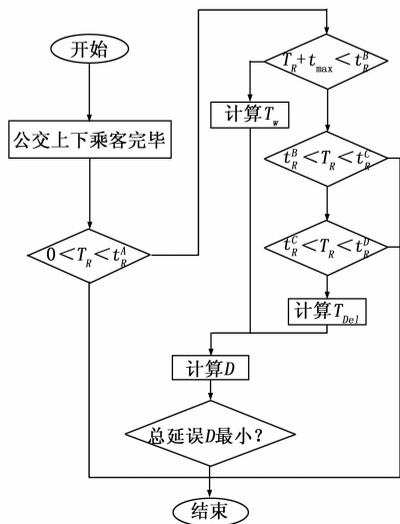


图 4 模型求解过程示意图

上述优化模型为多变量非线性方程求极值问题, 模型的变量为当前公交相位的绿灯延长时间  $T_{Del}$  和驻站时间  $t_w$ , 考虑避免公交乘客出现情绪焦虑, 驻站时间可能取值为 0 到 15 秒

之间的整数, 而实际信号控制系统中绿灯时间通常以 1 s 为基本单位, 故  $T_{Del}$  可能取值为 0 到  $t_b$  之间的整数。为得到全局最优解, 采用牛顿迭代法对模型求解, 遍历变量  $T_{Del}$  和  $t_w$  全部值, 计算对应的总延误  $D$  的值, 得出最优解。

## 4 仿真与分析

为验证主动控制方法的有效性, 基于 VISSIM 微观仿真软件, 对其 VISSIM-COM 接口进行二次开发设计了仿真平台。该仿真平台包括以下功能: 1) 站台处能够实时获取车辆位置和是否晚点信息、路段和信号灯配时等信息; 2) 能够对公交车辆进行速度引导; 3) 依据协调规则可以实时改变信号配时方案; 4) 能够对控制模型的输出的相关参数进行评价。分别对比分析基于电子标签 RFID 信息交互的公交信号优先控制模型、无优先的常规控制模型、只有信号优先的控制模型。

### 4.1 实验环境

综合考虑, 以一个最基本的两进口道的交叉口为例, 对模型的效益进行对比分析。交叉口的基本情况见图 5 所示, 交叉口由两个进口道组成, 每个进口道包含两条车道。此处, 交叉口设置最基本的两相位相序控制。

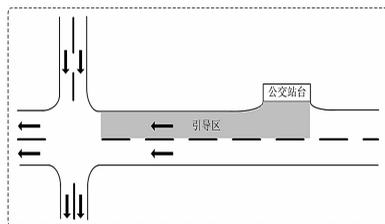


图 5 仿真交叉口

公交站点距交叉口停车线的距离为引导区, 公交站点与交叉口都布设 RFID 读写器, 公交车辆上安装 RFID 车载电子标签, 公交车辆控制时间间隔为 1 s。在只有信号优先的控制方法中, 单位绿灯延长时区 3 s, 绿灯延长时  $T_{Del}$  取 15 s, 本文模型和模型 2 的最小和最大绿灯时间均为 10 s 和 40 s。

为对比分析本文优先控制方法的效益, 选取不同交通流量 (在 250~2 250 veh/h 之间以 250 veh/h 为间隔), 分别对应 0.1 到 0.9 的饱和度。

### 4.2 仿真建模

以交通仿真软件 VISSIM 4.3 为仿真平台, 利用 Visual Basic 2010 编程软件通过 COM 接口对其进行二次开发, 以实现公交车辆的引导。通过 COM 接口函数可以导出车辆的编号、位置、速度、加速度、目标车道和信号相位时间等一系列信息, 便于用户进行数据分析, 并可通过 signalgroup 对象的 Amler、Greenend 和 Redend 属性对信号控制参数进行动态优化和调整, 从而实现基于电子标签 RFID 信息交互的公交信号优先控制系统的仿真。

每次仿真总时间 4 500 s, 考虑仿真初始阶段数据可能存在较大误差, 本文选取仿真时间 900 s 到 4 500 s 区间的数据进行分析。仿真精度为 1 步/s, 仿真过程中以 1 s 的时间间隔记录路网中每辆车的行驶速度、轨迹、交叉口进口道排队长度以及信号灯状态等信息, 便于后续结果分析工作的进行。

步骤 1, 初始化; 在仿真软件中构建交叉口模型, 设置 NEMA 控制模块的基本参数和交通流量。

步骤 2, 运行仿真; 通过 VISSIM 中 COM 接口导入编译好的 C 程序, 开始运行仿真。当仿真运行到滚动时间窗的滚动步长点, 转换到步骤 3;

步骤 3, 获取实时参数; 保存当前路段公交车相位的信号状态 (包含当前信号状态执行的时间和当前信号灯色的标志), 保存公交车辆的速度、位置、是否晚点等信息。

步骤 4, 优化控制模型并求解; 在 C 编程中取 1 秒作为步长, 对当前周期和下一周期所有可能满足条件的信号控制方案进行循环, 包含绿灯开始时刻、持续时间, 最大绿灯延长时时间、最大红灯缩短时时间等参数, 结合公交到达时时间窗与通行时时间窗, 计算与信号控制方案协调的最佳引导车速, 并计算在此控制方案下的车辆平均延误与平均停车次数, 在此基础上选择车辆平均延误与平均停车加权最小的信号与车速协调控制方案, 当做下一个时时间窗滚动优化步长所要去执行的控制方案。

步骤 5, 执行控制方案; 包含最优车速引导方案和信号控制方案。通过 COM 接口中 NEMA 信号控制模块的 “Detection” 去执行信号控制方案; 通过 COM 接口中 “Desire Speed” 去制定最优车速引导方案。执行完此步骤进入步骤 2。

#### 4.3 控制方案对比分析

将采用与常规感应控制方案进行对比分析的方法, 去验证基于车速引导的主动控制方法的有效性 & 参数的敏感性, 相应的交通参数进行如下的设置:

通过车载电子标签构建车路协同环境, 获取实时的信号状态与车辆信息, 以此来对公交车车辆进行速度引导以优先通过交叉口; 交叉口两个相位的红灯时时间设置为 3 s, 黄灯时时间设置为 4 s, 相应的最小绿灯时时间设置为 5 s, 最大绿灯时时间设置为 35 s; 最高引导速度为 60 km/h, 最低引导速度为 25 km/h; 同时设置时时间滚动时时间窗的滚动步长为 10 s, 公交站台设在交叉口上游 400 m 处, 即引导长度为 400 m。

常规感应控制模型: 常规的感应控制方案, 即将感应线圈设置在交叉口每个进口道停车线前, 线圈长度约 20 m; 交叉口各相位的最小绿灯时时间设置为 5 s, 最大绿灯时时间设置为 35 s; 相应的红灯时时间取 3 s, 黄灯时时间取 4 s。

每次仿真时时间为 3 600 s (60 分钟), 为防止仿真误差, 仿真预热期取前 900 s, 不作为仿真效益。车辆的平均延误与平均停车次数在时时间段 900~3 600 s 之间的 45 min 的时时间段内进行统计分析。取每类仿真试验 10 次仿真平均值进行分析, 仿真结果如图 6 与图 7 所示。

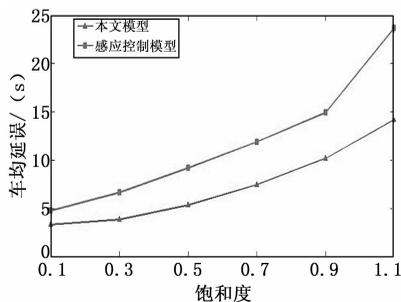


图 6 不同饱和度下的车均延误对比

结合图 6 与图 7 进行分析可以获知, 伴随饱和度的递增, 优先控制模型与常规的感应控制模型的车均延误和车均停车次数都随之增大。但在不同的饱和度下, 对于控制效益两种模型

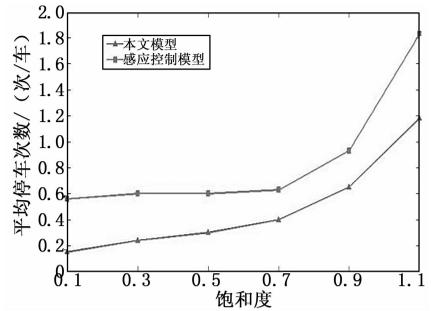


图 7 不同饱和度下的平均停车次数对比

都有一定的作用, 其中车均停车次数相应的降低了 28.0%~76.4%, 车均延误相应的降低了 36.3%~53.0%, 并且从数据中可以分析出本文模型的控制效益比常规的感应控制模型的控制效益更加明显。

## 5 总结

在单交叉口层面, 结合延误预测模型、停车次数预测模型提出了同时优化公交车速与信号控制方案的集成优化模型。模型输出信号配时方案与公交流到达即行驶车速数据, 并对提出的优化模型进行仿真实验。仿真结果表明, 本文控制模型的控制效益明显提高, 实现了将公交的行程车速从控制模型的输入到模型输出的转变, 最大限度地发挥模型的执行效率, 达到了公交车车辆在交叉口优先通行的目标。

#### 参考文献:

- [1] Furth P G, Muller T H L. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption [J]. Transportation Research Board, 2000 (1731): 23-30.
- [2] Kevin N. Balke, Conrad L. Dudek, Thomas Urbanik. Development and evaluation of an intelligent Bus Priority Concept [J]. Transportation Research Board, March 27, 2000, P25.
- [3] Kim Wonho. An improved bus signal priority system for networks with nearside busstops [D]. Texas A&M University Department of Civil Engineering, 2004.
- [4] Head L, Gettman D, Wei Z. Decision Model for Priority Control of Traffic Signals [J]. Transportation Research Board, 2006, 1978: 169-177.
- [5] He Q, Head K L, Ding J. Heuristic algorithm for Priority Traffic signal Control [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2259: 1-7.
- [6] 阴炳成, 杨晓光. 交叉口单点公共汽车交通优先控制方法研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (12): 123-126.
- [7] 马万经, 杨晓光, 云美萍. 考虑公交车频率的信号优先控制方法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2007, 35 (11): 1470-1475.
- [8] 李元元, 巨永锋. 城市信号交叉口公交优先及模糊控制策略 [J]. 现代电子技术, 2006, 15: 155-157.
- [9] 路庆昌, 龙科军, 邓海龙. 被动公交优先的交叉口信号周期优化模型研究 [J]. 中国市政工程, 2007, 3: 9-12.
- [10] 张卫华, 石琴, 刘强, 等. 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 (城市科学版), 2004, 21 (4): 30-33.
- [11] 张卫华, 陆化普, 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 (3): 49-53.
- [12] 李瑞敏, 陆化普. 公交优先的交通信号多屋模糊控制模型 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2006, 46 (9): 1509-1513.