

基于交叉口相位裕量时间的公交准点控制模型

卢 凯^{1,2,3}, 夏小龙¹, 胡建伟¹, 林永杰¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210096;

3. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 为了提高公交准点率, 提出了一种利用上游交叉口信号配时方案调控公交车辆到达下游公交站时刻的方法。通过引入交叉口相位裕量时间, 调节公交车辆实际与计划驶离上游交叉口之间的时间偏差, 建立了基于交叉口相位裕量时间的公交准点控制模型; 通过优化干线交叉口的公共信号周期和相位差, 得到了面向准点率控制的公交计划到站时刻表制定方法。算例仿真实验结果表明, 该控制模型可以提升公交到站的准点性, 所确定的公交时刻表方案具有较好的控制效果。

关键词: 交通运输工程; 公交准点率; 相位裕量时间; 信号优化; 公交时刻表

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

Bus Punctuality Control Model Based on the Phase Margin Time at Intersections

LU Kai^{1,2,3}, XIA Xiaolong¹, HU Jianwei¹, LIN Yongjie¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210096, China; 3. State key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To improve the bus punctuality rate, this study presented a method to control bus arrival time to the downstream bus stop by optimizing the upstream intersection signal timing scheme. The deviation between bus actual and scheduled departure time at the upstream signalized intersection was adjusted by introducing the intersection phase margin time, and the bus punctuality control model based on the phase margin time was established. The bus arrival scheduled timetable was generated via a comprehensive optimization of common cycle length and offsets along the artery. The simulation results show that the developed control

model can guarantee the bus punctuality, and the bus timetable can get a good control effect.

Key words: transportation engineering; bus punctuality rate; phase margin time; signal optimization; bus scheduled timetable

公交车辆能否准点到站是城市居民决定是否选择公交出行的一个重要影响因素。研究发现, 出行者在不同出行目的和有无换乘情况下的候车时间价值将大于换乘时间价值和运行时间价值^[1], 等候公交车时间已取代步行至公交车站的时间成为影响居民出行方式选择的主要因素^[2]。目前, 由于公交车辆到站准点性较差, 已经严重影响了城市公交分担率^[3]。因此, 如何提升公交车辆到站准点率是发展公交战略亟待解决的一个关键问题。

近年来, 公交车辆到站时间预测与公交准点控制研究受到了国内外学者们的重视与关注, 取得了不少研究成果。在国外, Cathey 等^[4]根据车辆定位数据与历史数据, 利用卡尔曼滤波方法实现了对公交车辆到站时间的预测; Shalaby^[5]则进一步建立了公交车辆路段行程时间和停站时间模型; Koushki 与 Paul 等^[6-7]提出了一种公交重点站服务模式, 并基于车辆自动定位数据分析了重点站服务模式对保证行车准点率的影响。在国内, 温惠英等^[8]提出了基于灰色关联分析的路段行程时间实时预测算法; 卢凯等^[9]提出利用乘客乘车动态诱导方法, 建立了一种公交车辆停站时间控制模型; 周雪梅等^[10]给出了公交站间准点率的一种定义, 应用极值理论建立了公交站间准点率计算模型, 并对相邻站及重点站间的公交运行准时性进行了评价; 王菁^[11]给出了以线路与站点为基础的准点率关系模型, 研究了以站点为

收稿日期: 2019-03-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61773168, 61873098); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019ZD45)

第一作者: 卢 凯(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通控制、智能交通系统等。E-mail: kailu@scut.edu.cn

通信作者: 林永杰(1987—), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通控制、交通建模与数据挖掘等。

E-mail: linyjscut@scut.edu.cn

基础的公交运营相对及绝对准点率的相互关系。

然而,目前有关公交准点性研究主要还是集中在公交行程时间的可靠度分析方面,对于公交车辆在各站点间,特别是在信号交叉口的主动管控缺乏研究,因此如何建立交叉口信号配时方案与公交到站准点性能之间的相关关系,利用交叉口信号配时设计提高公交到站准点率值得进行深入分析研究。

1 原理分析

在图 1 中, r_1 为基于交叉口相位裕量时间(定义为车辆按计划运行抵达信号交叉口时的预期等待时间)控制的公交车辆计划运行时间位置轨迹线, T_1 、 T_2 为公交车辆到达站点 S_1 、 S_2 的准点时刻, t_{P1} 、 t_{P2} 为公交车辆到达站点 S_1 、 S_2 的准点允许时间范围, t_{M1} 、 t_{M2} 、 t_{M3} 为交叉口 I_1 、 I_2 、 I_3 的相位裕量时间。针对公交车辆到达交叉口 I_1 时间点的不同情况,分析各自行驶状况如下:

(1) 当实际行驶轨迹线如 r_2 时,在交叉口 I_1 ,由于实际到达时刻位于相位裕量时间所在的同一红灯时间段内,故在绿灯启亮后轨迹线 r_2 将回归计划运行轨迹线 r_1 ,从而保证后续到达站点 S_1 、 S_2 的准点性。

(2) 当实际行驶轨迹线如 r_3 时,在交叉口 I_1 ,由于实际到达时刻位于相位裕量时间段内,故在绿灯启亮后轨迹线 r_3 将回归计划运行轨迹线 r_1 ,从而保证后续到达站点 S_1 、 S_2 的准点性。

(3) 当实际行驶轨迹线如 r_4 时,在交叉口 I_1 ,尽管实际到达时刻与计划到达时刻之间的偏差大于准点允许时间范围,但由于相位裕量时间的作用,实际离开时刻与计划离开时刻之间的偏差将调节至准点允许时间范围内,从而保证到达站点 S_1 的准点性;在交叉口 I_2 ,由于实际到达时刻位于相位裕量时间段内,故可保证到达站点 S_2 的准点性。

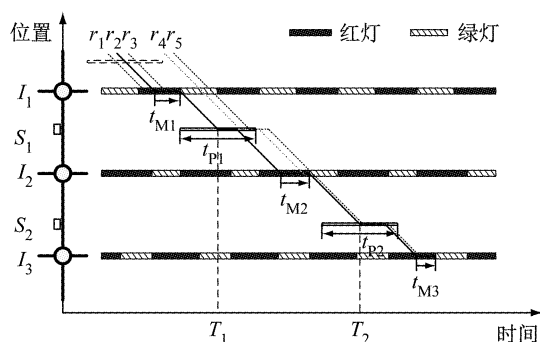


图 1 公交车到站准点性分析

Fig.1 Bus punctuality analysis at bus stops

(4) 当实际行驶轨迹线如 r_5 时,同样利用交叉口 I_1 及交叉口 I_2 的相位裕量时间,可将实际离开时刻与计划离开时刻之间的偏差逐步调小,从而保证到达站点 S_1 、 S_2 的准点性;在交叉口 I_3 ,由于实际到达时刻位于相位裕量时间段内,故可保证后续到站的准点性。

分析可见,交叉口相位裕量时间可以调控公交车车辆实际离开时刻与计划离开时刻之间的偏差,通过一个或多个信号交叉口的逐步调控,可以使得公交车车辆恢复准点运行。

2 模型方法

2.1 模型参数

假设以某一条公交线路作为控制对象,利用信号交叉口 I_1 、 I_2 、 \dots 、 I_n 对其下游公交站点进行准点率控制,如图 2 所示。定义交叉口 I_1 至交叉口 I_n 为上行方向,交叉口 I_n 至交叉口 I_1 为下行方向;上行方向上交叉口 I_1 、 I_2 、 \dots 、 I_n 的下游公交站点依次为 S_1^u 、 S_2^u 、 \dots 、 S_n^u ;下行方向上交叉口 I_1 、 I_2 、 \dots 、 I_n 的下游公交站点依次为 S_1^d 、 S_2^d 、 \dots 、 S_n^d ;上行方向与下行方向的始发站分别为 S_0^u 和 S_0^d 。

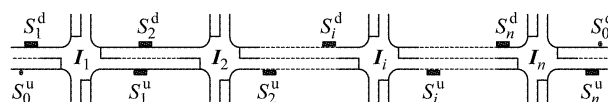


图 2 信号交叉口与公交站点布置情况

Fig.2 Layout of signalized intersections and bus stops

假若各交叉口的信号相位相序设计及绿信比分配方案固定,各交叉口执行公共信号周期以保证各班次公交车车辆准点率控制效果的稳定。忽略信号交叉口初始排队车辆影响,选取任意相邻信号交叉口 I_i 和 I_{i+1} 进行公交准点率建模分析,如图 3 所示。

在图 3 中, T_{Ai}^u 与 T_{Ai}^d 分别为交叉口 I_i 上行与下行方向的计划到达时刻; T_{Bi}^u 与 T_{Bi}^d 分别为交叉口 I_i 上行与下行方向的计划驶离时刻; T_{Gsi}^u 与 T_{Gsi}^d 为交叉口 I_i 上行与下行方向计划驶离时刻所在周期的绿灯启亮时刻; C 为公共信号周期; t_{Mi}^u 与 t_{Mi}^d 分别为交叉口 I_i 上行与下行方向的相位裕量时间; $\bar{t}_{T(i,j)}^u$ 与 $\bar{t}_{T(i,j)}^d$ 分别为交叉口 I_i 上行与下行方向路段 j 的平均行程时间, j 取 1 与 2 分别表示上游与下游; t_{Pi}^u 为交叉口 I_i 上行方向公交车到站准点允许时间范围, $t_{Pi}^u = t_{Pi}^{+u} - t_{Pi}^{-u}$, t_{Pi}^{+u} 与 t_{Pi}^{-u} 为交叉口 I_i 上行方向公交车到站准点允许正负偏差(正偏差表示晚到,负偏差表示早到); t_{Pi}^d 为交叉口 I_i 下行方向公交车到站准点允许正负偏差(正偏差表示晚到,负偏差表示早到); $t_{Pi}^d = t_{Pi}^{+d} - t_{Pi}^{-d}$, t_{Pi}^{+d} 与 t_{Pi}^{-d} 为交叉口 I_i 下行方向公交车到站准点允许正负偏差(正偏差表示晚到,负偏差表示早到)。

到站准点允许时间范围, $t_{P_i}^d = t_{P_i}^{d+} - t_{P_i}^{d-}$, $t_{P_i}^{d+}$ 与 $t_{P_i}^{d-}$ 为交叉口 I_i 下行方向公交车到站准点允许正负偏差; λ_i^u 与 λ_i^d 分别为交叉口 I_i 上行与下行方向的绿信比; $\Delta\lambda_i$ 为交叉口 I_i 上行与下行方向红灯中心时刻的时间差比率。

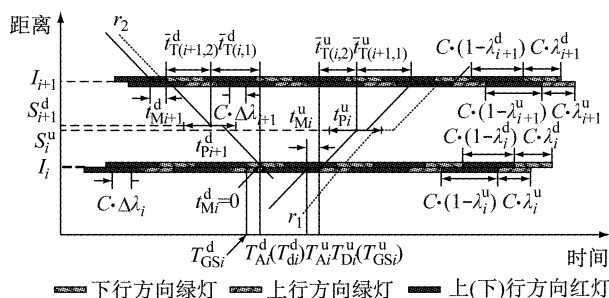


图 3 公交准点控制时距分析图

Fig. 3 Time-space diagram for bus punctuality control

2.2 到站时刻分析

2.2.1 上行方向

由于交叉口 I_1 的计划到达时刻 T_{A1}^u 为模型优化独立变量, 而交叉口 I_i ($i \geq 2$) 的计划到达时刻 T_{Ai}^u 由 T_{A1}^u 决定, 因此交叉口 I_1 与交叉口 I_i 的计划到达时刻需要分情况讨论。

(1) 交叉口 I_1

交叉口 I_1 的相位裕量时间 t_{M1}^u 计算公式为

$$t_{M1}^u = \begin{cases} T_{GS1}^u - T_{A1}^u, & T_{GS1}^u - T_{A1}^u \geq 0 \\ 0, & T_{GS1}^u - T_{A1}^u < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{GS1}^u 为交叉口 I_1 上行方向计划驶离时刻所在周期的绿灯启亮时刻, 其计算公式为

$$T_{GS1}^u = O_1^u + k_1^u \cdot C \quad (2)$$

式中: O_1^u 为交叉口 I_1 上行方向的绝对相位差; k_1^u 为整数。

由此可以计算计划驶离时刻 T_{D1}^u 与计划到站时刻 T_{S1}^u 如下:

$$T_{D1}^u = T_{A1}^u + t_{M1}^u \quad (3)$$

$$T_{S1}^u = T_{D1}^u + \bar{t}_{T(1,2)}^u \quad (4)$$

(2) 交叉口 I_i ($i \geq 2$)

可以推算交叉口 I_i 的计划到达时刻 T_{Ai}^u 为

$$T_{Ai}^u = T_{S(i-1)}^u + \bar{t}_{T(i,1)}^u \quad (5)$$

交叉口 I_i 的相位裕量时间 t_{Mi}^u 计算公式为

$$t_{Mi}^u = \begin{cases} T_{GSi}^u - T_{Ai}^u, & T_{GSi}^u - T_{Ai}^u \geq 0 \\ 0, & T_{GSi}^u - T_{Ai}^u < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_{GSi}^u 为交叉口 I_i 上行方向计划驶离时刻所在周期的绿灯启亮时刻, 其计算公式为

$$T_{GSi}^u = O_i^u + k_i^u \cdot C \quad (7)$$

式中: O_i^u 为交叉口 I_i 上行方向的绝对相位差, k_i^u 为

整数。

由此可以计算计划驶离时刻 T_{Di}^u 与计划到站时刻 T_{Si}^u 如下:

$$T_{Di}^u = T_{Ai}^u + t_{Mi}^u \quad (8)$$

$$T_{Si}^u = T_{Di}^u + \bar{t}_{T(i,2)}^u \quad (9)$$

2.2.2 下行方向

由于交叉口 I_n 的计划到达时刻 T_{An}^d 为模型优化独立变量, 而交叉口 I_i ($i \leq n-1$) 的计划到达时刻 T_{Ai}^d 由 T_{An}^d 决定, 因此交叉口 I_n 与交叉口 I_i 的计划到达时刻需要分情况讨论, 分析方法同上行方向。

2.3 交叉口准点域

根据公交车到站准点允许时间范围的要求, 可以反向推导上游交叉口准点域的计算方法。

(1) 准点域起始时刻

交叉口 I_i 上行方向的准点域起始时刻 T_{PSi}^u 为

$$T_{PSi}^u = \begin{cases} T_{RSi}^u, & T_{Di}^u + t_{P-i}^u < T_{GSi}^u \\ T_{Di}^u + t_{P-i}^u, & T_{Di}^u + t_{P-i}^u \geq T_{GSi}^u \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_{RSi}^u 为交叉口 I_i 上行方向计划驶离时刻之前的红灯启亮时刻, 其计算公式为

$$T_{RSi}^u = T_{GSi}^u - C \cdot (1 - \lambda_i^u) \quad (11)$$

(2) 准点域结束时刻

交叉口 I_i 上行方向的准点域结束时刻 T_{PEi}^u 为

$$T_{PEi}^u = \min\{T_{Di}^u + t_{P-i}^u, T_{GEi}^u\} \quad (12)$$

式中: T_{GEi}^u 为交叉口 I_i 上行方向计划驶离时刻之后的绿灯结束时刻, 其计算公式为

$$T_{GEi}^u = T_{GSi}^u + C \cdot \lambda_i^u \quad (13)$$

下行方向准点域的分析方法同上行方向。从而可得交叉口 I_i 上行方向的准点域为 $[T_{PSi}^u, T_{PEi}^u]$, 下行方向的准点域为 $[T_{PSi}^d, T_{PEi}^d]$ 。

2.4 目标函数

当上游交叉口准点域范围越大, 且其中心与计划到达时刻偏差越小, 则越有利于提高公交车到达下游公交站点的准点性。因此定义整个公交准点率控制模型的优化目标函数 P 为

$$P = \max \left[\alpha^u \cdot \min\{T_{PEi}^u - T_{Ai}^u, T_{Ai}^u - T_{PSi}^u\} + \alpha^d \cdot \min\{T_{PEi}^d - T_{Ai}^d, T_{Ai}^d - T_{PSi}^d\} \right] \quad (14)$$

式中: α^u 与 α^d 分别为上行与下行方向的准点性需求权重系数, 通常设置 $\alpha^u + \alpha^d = 1$ 。

2.5 优化变量约束条件

(1) 公共信号周期

公共信号周期 C 的优化空间应满足:

$$C \in [C_{\min}, C_{\max}] \quad (15)$$

(2) 相位差

交叉口 I_i 的上行相位差 O_i^u 与下行相位差 O_i^d 之间须满足约束条件:

$$O_i^u - \frac{C \cdot (1 - \lambda_i^u)}{2} + C \cdot \Delta \lambda_i = O_i^d - \frac{C \cdot (1 - \lambda_i^d)}{2} + k_i \cdot C \quad (16)$$

式中: $O_i^u \in [0, C]$; $O_i^d \in [0, C]$; k_i 为整数.

(3) 到达时刻

交叉口 I_i 的上行计划到达时刻 T_{Ai}^u 与下行计划到达时刻 T_{Ai}^d 可在以下区间取值.

$$T_{RSi}^u \leq T_{Ai}^u < T_{GEi}^u \quad (17)$$

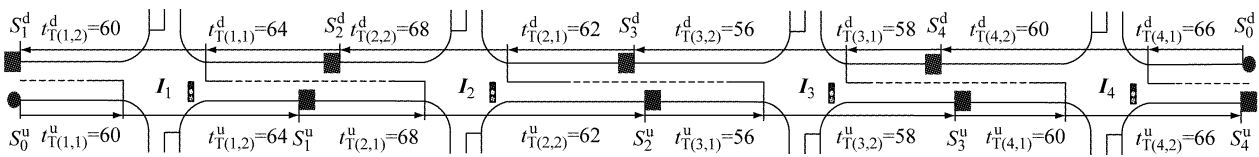


图 4 公交站点布置及各路段平均行程时间(单位:s)

Fig.4 Layout of bus stops and average travel time of each section(unit: s)

假若公交线路上交口的公共信号周期 $C \in [130, 150]$ s, 各个交叉口的信号配时基本参数要求如表 1 所示. 假定 $t_{p-i}^u = t_{p-i}^d = -20$ s, $t_{p+i}^u = t_{p+i}^d = 60$ s, 为同时保证双向公交线路的准点性, 取准点性需求权重系数 $\alpha^u = \alpha^d = 0.5$.

表 1 各交叉口信号配时基本参数

Tab.1 Basic parameters of signal timing at each intersection

	交叉口序号			
	I_1	I_2	I_3	I_4
上行绿信比/%	34	34	28	32
下行绿信比/%	30	28	32	28
红灯中心时间差比率/%	8	-4	0	4

利用交互式的线性和通用优化求解器 (linear interactive and general optimizer, LINGO) 对本例模型进行编程求解, 解得最佳公共信号周期为 150 s, 各交叉口上下行方向的相位差与相位裕量时间设置如表 2 所示, 模型的目标函数优化值为 74.

表 2 公交准点最优控制方案

Tab.2 Optimal control scheme for bus punctuality

	交叉口序号			
	I_1	I_2	I_3	I_4
上行方向绝对相位差	99	105	106	100
下行方向绝对相位差	114	104	103	109
上行方向相位裕量时间	24	24	33	26
下行方向相位裕量时间	29	33	26	34

注: 绝对相位差参照同一个基准点取值.

根据表 2 所示的公交准点最优控制方案, 并结

$$T_{RSi}^d \leq T_{Ai}^d < T_{GEi}^d \quad (18)$$

整合约束条件、目标函数以及优化变量取值空间关系式, 可以建立公交准点控制模型.

3 算例分析

假设某公交线路沿线经过 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 共 4 个信号交叉口, 交叉口 I_1 至交叉口 I_4 为上行方向, 交叉口 I_4 至交叉口 I_1 为下行方向, 公交站点的布置和节点间各路段的平均行程时间如图 4 所示.

合已知公交车辆运行条件, 绘制出相位裕量时间控制下的公交车辆计划运行时距图, 如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 上下行方向各公交站点的上游交叉口准点域大小均接近于一个公共信号周期, 达到了通常情况下的理论极限值, 控制方案可以使得一定时间范围内的公交车辆均能在到站准点允许时间范围内抵达下游公交站点.

假定下行方向第一频次的公交车辆发车时刻为 7:00:00, 公交发车间隔取 10 min. 以上下行方向各 2 个频次的公交运行情况为例, 根据公交准点最优控制方案可以确定公交车辆计划到站时刻表如表 3 所示. 采用本文模型优化得到的公交准点控制方案, 将能够最大程度地保证公交车辆在表 3 所示的计划到站时刻附近到达相应的公交站点.

表 3 公交车辆计划到站时刻表

Tab.3 Scheduled timetable of bus planned arrival

	公交站点				
	S_0^u	S_1^u	S_2^u	S_3^u	S_4^u
第一频次	7:00:06	7:02:34	7:05:08	7:07:35	7:10:07
第二频次	7:10:06	7:12:34	7:15:08	7:17:35	7:20:07
	公交站点				
	S_0^d	S_1^d	S_2^d	S_3^d	S_4^d
第一频次	7:00:00	7:02:40	7:05:00	7:07:43	7:10:16
第二频次	7:10:00	7:12:40	7:15:00	7:17:43	7:20:16

4 仿真实验

假设公交车辆平均行驶速度为 $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 在

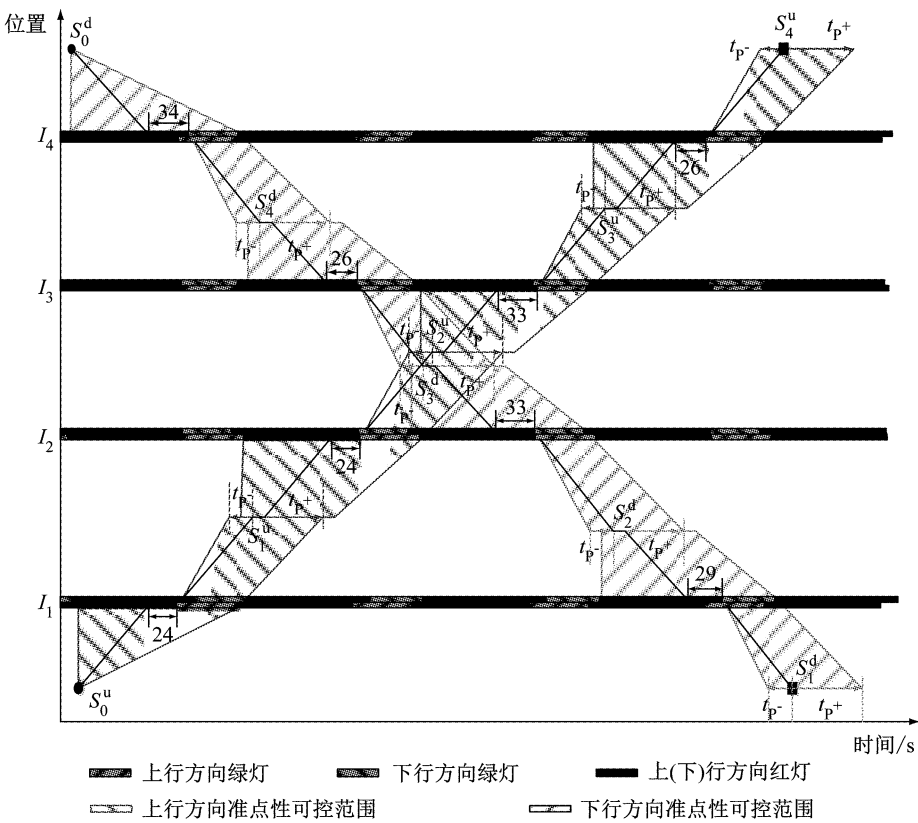


图 5 公交车辆计划运行时距图

Fig.5 Time-space diagram of bus traveling schedule

速度区间 $[24,48] \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 内服从均匀分布;利用交通仿真软件 VISSIM 建立第 3 节算例的仿真路网模型.

公交线路车辆的发车间隔时间设置为 600 仿真秒,通过在相应位置设置行程时间检测器,对公交车辆行程时间进行统计,仿真时长取 999 999 s;运行得到公交车辆从始发站到达各站点的行程时间原始数

据. 对比公交到站准点范围,通过统计分析得到各公交站点的准点车辆数及准点率,具体结果如表 4 所示.

通过编程可以计算得到,在公交准点最优控制方案运行下,保证公交到站准点的最低与最高准点车速如表 5 所示.

表 4 各公交站点的准点率

Tab.4 Punctuality rate of each bus stop

	公交站点							
	S_1^u	S_2^u	S_3^u	S_4^u	S_1^d	S_2^d	S_3^d	S_4^d
准点车辆数/辆	1 667	1 571	1 500	1 420	1 667	1 631	1 511	1 451
所有车辆数/辆	1 667	1 667	1 666	1 666	1 667	1 667	1 666	1 666
仿真准点率/%	100	94.2	90.0	85.2	100	97.8	90.7	87.1

表 5 各公交站点的准点车速范围

Tab.5 Punctual speed range of each bus stop

	公交站点							
	S_1^u	S_2^u	S_3^u	S_4^u	S_1^d	S_2^d	S_3^d	S_4^d
仿真车速范围/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$[24,48]$	$[24,48]$	$[24,48]$	$[24,48]$	$[24,48]$	$[24,48]$	$[24,48]$	$[24,48]$
最低准点车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	21.4	25.1	26.0	27.0	20.5	24.0	25.8	26.7
最高准点车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	52.7	54.0	55.4	52.7	54.0	56.6	51.7	54.0
理论准点率/%	100	95.4	91.7	87.5	100	100	92.5	88.8

对比表 4 与表 5 可以看到,上、下行方向各站点的仿真准点率与理论准点率相差均在 3%以内,考虑

到条件设置误差以及 VISSIM 软件自身局限,由此验证了本文模型的可靠性,也说明本文模型对于公交准点率控制的有效性。

5 结语

本文针对公交准点控制需求,利用交叉口相位裕量时间,找到了交叉口信号配时设计与公交准点到站控制之间的结合点,建立了以上游信号交叉口准点域最大为控制目标的公交准点控制模型;通过优化干线交叉口的公共信号周期和相位差,得到了面向准点率控制的交叉口信号协调优化方案,提出了一种公交到站时刻表的制定方法;最后通过 VISSIM 仿真验证了模型的可靠性,为提升公交准点率提供了一种新的解决思路与方法。

参考文献:

- [1] 陈旭梅,刘巧仙,杜光. 基于 SP 调查的城市公共交通出行时间价值估计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(4): 77. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2011.04.027.
CHEN Xumei, LIU Qiaoxian, DU Guang. Estimation of travel time values for urban public transport passengers based on SP survey[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(4): 77. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2011.04.027.
- [2] 云美萍,刘广洋,刘芳. 公交服务质量变化对出行方式选择行为的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 119. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.07.015.
YUN Meiping, LIU Guangyang, LIU Fang. Influence of change of public transportation service quality on travel mode choice behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(7): 119. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.07.015.
- [3] 周雪梅,石云林,刘梅,等. 城乡公交服务质量评价方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 1031. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.07.011.
ZHOU Xuemei, SHI Yunlin, LIU Mei, et al. Evaluation of rural public transit service quality [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(7): 1031. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.07.011.
- [4] CATHEY F W, DAILEY D J. A prescription for transit arrival/departure prediction using automatic vehicle location data[J]. Transportation Research Part C (Emerging Technologies), 2003, 11(3/4): 241. DOI: 10.1016/s0968-090x(03)00023-8.
- [5] SHALABY A. Prediction model of bus arrival and departure times using AVL and APC data [J]. Journal of Public Transportation, 2004, 7(1): 41. DOI: 10.5038/2375-0901.7.1.3.
- [6] KOUSHKI P A, ALSALEH O I, ALLUMAIA M. On management's awareness of transit passenger needs [J]. Transport Policy, 2003, 10(1): 17. DOI: 10.1016/S0967-070X(02)00025-2.
- [7] PAUL R T, EL-GENEIDY A M. Estimating bus run times for new limited-stop service using archived AVL and APC data[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2010, 44(6): 390. DOI: 10.1016/j.tra.2010.03.009.
- [8] 温惠英,徐建闽,傅惠. 基于灰色关联分析的路段行程时间卡尔曼滤波预测算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 66. DOI: 10.3321/j.issn:1000-565X.2006.09.014.
WEN Huiying, XU Jianmin, FU Hui. Estimation algorithm with Kalman filtering for road travel time based on grey relation analysis [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(9): 66. DOI: 10.3321/j.issn:1000-565X.2006.09.014.
- [9] 卢凯,吴焕,张孜,等. 面向 BRT 车队形成的站台乘车诱导控制模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(3): 657. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.03.034.
LU Kai, WU Huan, ZHANG Zi, et al. Bus station boarding guidance model oriented to BRT platoon formation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(3): 657. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.03.034.
- [10] 周雪梅,林南南,许旭,等. 基于车辆自动定位系统的公交站准点率计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 687. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.05.009.
ZHOU Xuemei, LIN Nannan, XU Xu, et al. Adjacent sites punctuality rate computation based on automatic vehicle location data [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(5): 687. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.05.009.
- [11] 王菁. 城市公交准点率的研究[D]. 大连: 大连交通大学交通运输工程学院, 2013.
WANG Jing. A study on the punctuality rate of urban transit [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University. School of Transportation Engineering, 2013.