

# 基于车均延误的快速公交停靠站布设位置

付晶燕<sup>1</sup>, 赵 靖<sup>2</sup>

(1. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 为了提高快速公交(BRT)系统的运行效率, 对 BRT 停靠站在交叉口的布设位置进行了研究. 针对 BRT 停靠站设置在交叉口进口道和出口道两种情况, 分别建立了车均延误模型(该延误包括信号控制延误、停靠站上下客时间以及车辆在停靠站等候服务的延误)和绿灯末排队长度模型, 并通过仿真验证了模型的准确性. 一系列算例分析表明, 车流量较小时, 停靠站设置在进口道和出口道就延误而言没有区别, 但当车流量较大时, 应将停靠站设置在交叉口进口道.

**关键词:** 快速公交停靠站; 车均延误; 排队长度; 仿真

**中图分类号:** U492.1

**文献标志码:** A

## Optimal Layout of Bus Rapid Transit Stops at Intersections Based on Delay Analysis

FU Jingyan<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>2</sup>

(1. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100037, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to enhance the operation efficiency of the bus rapid transit (BRT) system, the optimal layout of BRT stops at intersections was discussed. Theoretical models were established for estimating the delay and queue length at the end of the green time with the consideration of signal control delay, dwell time and the waiting time for boarding and alighting service. Two scenarios of BRT stop locations, near-side and far-side bus stops were taken into account. The models were tested by VISSIM simulation. Results of extensive numerical analysis show that the position of the BRT stop has no effect on delay when the volume of BRT vehicles is low and the bus stops should be disposed at the intersection approach when the volume is high.

**Key words:** bus rapid transit stops; average vehicle delay; queue length; simulation

快速公交(bus rapid transit, BRT)停靠站是快速公交系统的重要组成部分, 应对其设计位置进行系统的考虑, 否则便可能造成公交车延误的增加、停靠站超长排队影响主线交通通行、停车站成为交通瓶颈等不利影响, 降低了公交服务水平, 增加了发生交通阻塞的可能性及事故隐患, 同时还会制约公交优先控制的实施. 因此, 对于公交停靠站设置位置, 在宏观层面, 应根据公交线路网规划的要求, 充分考虑道路性质、沿线两侧用地性质、换乘便利性、临近路段和交叉口交通状况及用地可能条件, 进行合理布局; 在中观层面, 停靠站的布设与其合理站距和服务半径有关; 在微观层面, 停靠站的布设与公交专用道的形式、停靠站的容量服务、停靠公交线路数、客流需求等密切相关.

从微观层面而言, 在利用 BRT 出行的起点和终点, 乘客一般要通过步行到达和离开 BRT 系统, BRT 停靠站的设置应使乘客步行时间最短. 交叉口是各个方向人流汇聚和消散最为便捷的地方, 因而交叉口附近是 BRT 停靠站布置的理想位置. 本研究将重点讨论快速公交停靠站在交叉口范围的布设, 基于车均延误和绿灯末排队长度的评价, 研究停靠站设置在交叉口进口道和出口道两种情况下的快速公交运行效率.

## 1 研究综述

公交停靠站的布设是公交系统设计的基础问题, 以往就常规公交停靠站的规划布局<sup>[1]</sup>、站间距<sup>[2-3]</sup>、设置位置<sup>[4-5]</sup>、设置形式<sup>[6-8]</sup>等问题已有了较为深入的探讨.

随着公交专用道及快速公交技术的产生和推广, 对其停靠站最佳设置位置的研究也逐渐深入. 主要针对不同类型专用道条件下, 停靠站在路段上横

向、纵向布置方式的优缺点及适用性进行分析<sup>[9-10]</sup>,以及停靠站与交叉口的相对位置关系和相应的公交优先信号控制方法<sup>[11-12]</sup>。

对于交叉口附近的公交停靠站,以往研究主要集中于以下几个方面。一是公交停靠站本身的通行能力,考虑了公交停靠站型式(直线型或港湾式)、位置和交叉口信号配时的影响<sup>[13-16]</sup>。二是公交停靠站对交叉口通行能力的影响,包括美国公共交通通行能力手册<sup>[17]</sup>、道路通行能力手册<sup>[18]</sup>在内的研究成果<sup>[19-20]</sup>中,都对公交停靠站设置位置(进口道或出口道)、设置形式、交叉口信号配时、公交到达分布等条件下的交叉口通行能力作了深入分析,建立了评价模型,提出了不同位置的公交停靠站各自的优缺点。

综上所述,目前对于交叉口附近的公交停靠站布置研究,主要是将公交车辆停靠延误时间作为主要的评价标准,鲜有将公交在交叉口和停靠站受到的阻滞综合考虑。本研究将针对快速公交系统,在公交享有专用路权、乘客快速上下车、高效率收费系统等条件下,对其停靠站的最佳布置位置进行研究,并将 BRT 车辆在交叉口和停靠站的车均总延误和排队长度作为将停靠站设置在交叉口进口道或出口道的评价指标。通过定量的比较分析,从理论上给出合理建议。

## 2 基本假定及参数定义

### 2.1 基本假定

(1) BRT 车道条件: BRT 专用道与社会车道采用物理隔离, BRT 车辆不受社会车辆干扰,且 BRT 专用道采用无超车道形式,任意方向只有一条专用道,所有到达的 BRT 车辆在停靠站依次停靠,不允许超车。

(2) BRT 停靠站与交叉口距离: 当停靠站设置在进口道时,停靠站与交叉口距离满足 BRT 车辆红灯排队的需求,红灯排队车辆不会对 BRT 车辆靠站产生影响;当停靠站设置在出口道时,停靠站与交叉口距离满足 BRT 车辆进站排队的需求,不会发生超长排队延伸至交叉口内部,影响相交道路正常通行的情况。

(3) BRT 车流条件: BRT 车辆到达率及在停靠站的停靠时间在研究时间段内稳定不变,且均为直行车辆,不考虑转弯车流。

### 2.2 参数定义

参数定义如下:  $q$  为 BRT 车辆到达率,  $\text{veh} \cdot$

$\text{s}^{-1}$ ;  $s$  为 BRT 专用进口道饱和流率,  $\text{veh} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $t_s$  为 BRT 车辆停靠时间,  $\text{s}$ ;  $c$  为信号周期,  $\text{s}$ ;  $g$  为有效绿灯时间,  $\text{s}$ ;  $r$  为有效红灯时间,  $\text{s}$ ;  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别表示 BRT 车辆的信号控制延误、停靠站上下客时间和车辆在停靠站等候服务的延误,  $\text{s}$ ;  $d_i$  为 BRT 车辆车均总延误,  $\text{s}$ ;  $i=1$  表示停靠站设置在进口道的情况,  $i=2$  表示停靠站设置在出口道的情况;  $N$  为绿灯末停靠站等候车辆数(不包括正在停靠的车辆),  $\text{veh}$ ;  $M$  为公交停靠站容量,  $\text{veh}$ 。

## 3 模型建立

如表 1 所示,根据停靠站物理条件、交通条件的不同,进行分类讨论,给出不同情况下停靠站设置在进口及出口时的车均总延误和绿灯末期排队长度的计算图示。在此基础上,建立了车均总延误和绿灯末期排队长度的计算模型,分别见表 2 和表 3。

表 1—3 中,“/”表示:在这几种情况下, BRT 车辆的到达超出了停靠站的服务能力,车辆将在停靠站前累积,排队长度也随时间的增长而不断增加。本文不对此给出定量的计算模型,仅进行粗略的定性分析。无论停靠站设置在进口道还是出口,都会发生车辆在停靠站处排队等候进站,因此在设计 BRT 停靠站的泊位数时要充分考虑车辆的到达要求,尽量避免这种情况。表 2 中,  $d_i$  为停靠站设置在进口道的车均延误,  $d_{ch}$  为停靠站设置在出口道的车均延误。

## 4 模型检验

采用 Vissim 4.30 仿真软件,对表 2 中车均总延误模型进行检验。由于仿真结果有一定的随机性,因此在检验过程中对于每一个检验数据点,分别取不同的随机参数进行 6 次仿真实验,并取其平均值作为最终仿真结果。仿真基本参数条件为:停靠站上下客时间取 20 s,信号周期取 120 s,绿灯时间取 40 s,饱和流率为 1 800  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,其余参数均取为默认值。

检验结果如图 1 所示,对于停靠站容量为 1 和 2 的情况,其平均误差分别为 4.35% 和 4.62%。表明模型计算所得的结果与仿真结果相差不大,可以认为模型检验基本满足。

## 5 模型分析

通过仿真检验证明模型具有较高的准确度,深

表 1 不同情况下停靠站设置在进口道及出口道时的车均总延误和排队长度计算图示

Tab.1 Total BRT vehicle delay and queue length computational diagram for near-side and far-side bus stops

分类情况		停靠站设置在进口道		停靠站设置在出口道	
情况 1	$M=1, q \leq 1/c$				
情况 2	$M=1$ $1/c < q \leq 1/ts$				
情况 3	$M=1, q > 1/ts$	/a 同情况 1		/a 同情况 1	
情况 4	$M > 1, q \leq M/c$				
情况 5	$M > 1$ $M/c < q \leq 1/ts$				
情况 6	$M > 1$ $1/ts < q \leq M/ts$				
情况 7	$M > 1, q > M/ts$	/a		/a	

入研究表 2—3 中模型,分析 BRT 停靠站设置位置对车辆延误和排队长度的影响程度与周期时长、交通量等因素之间的相互关系,对 BRT 停靠站设置在进口道和出口道的优劣进行分析。分析中,饱和流率取  $0.2 \text{ veh} \cdot \text{s}^{-1}$ ;停靠站上下客时间取  $20 \text{ s}$ ;信号周期时长取  $120 \text{ s}$ ;有效绿灯时间取  $40 \text{ s}$ ;停靠站容量为 1 时,情况 1 到达率取  $0.005 \text{ 辆} \cdot \text{s}^{-1}$ ,情况 2 到达率取  $0.02 \text{ 辆} \cdot \text{s}^{-1}$ ;停靠站容量为 2 时,情况 4 到达率取  $0.01 \text{ 辆} \cdot \text{s}^{-1}$ ,情况 5 到达率取  $0.025 \text{ 辆} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

情况 6 到达率取  $1/15 \text{ 辆} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 5.1 车均延误

图 2、图 3 显示了在停靠站容量为 1 和  $M$ (这里取  $M=2$ )的情况下,停靠站设置在进口道和出口道时车均总延误随周期时长和 BRT 车流量的变化关系。

通过图中的曲线变化趋势,可以得出结论:

(1) 无论停靠站设置在进口道还是出口道, BRT 车均总延误随周期和车流量的增大而增大。

表 2 不同情况下停靠站设置在进口道及出口道时的车均总延误模型

Tab.2 Model of total BRT vehicle delay for near-side and far-side bus stops

分类情况	延误模型
情况 1 $M=1, q \leq 1/c$	$d_j = d_{ch} = \frac{r^2 s}{2c(s-q)} + t_s$
情况 2 $M=1$ $1/c < q \leq 1/t_s$	$d_{ch} = \begin{cases} d_j \text{ 同情况 1} \\ \frac{r^2}{2c(1-qt_s)} + t_s, \frac{1}{c} < q \leq \frac{c-r}{t_s c} \\ \frac{qc t_s + 2r - c}{2} + t_s, \frac{c-r}{t_s c} < q \leq \frac{1}{t_s} \end{cases}$
情况 3 $M=1, q > 1/t_s$	/ <sup>a</sup>
情况 4 $M > 1, q \leq M/c$	同情况 1
情况 5 $M > 1$ $M/c < q \leq 1/t_s$	$d_{ch} = \begin{cases} \frac{r^2 s}{2c(s-q)} + t_s, & \frac{qsr}{s-q} \leq M \\ \frac{\int_0^{\frac{M}{q}} (r - \frac{s-q}{s} q_t) dt + \int_{\frac{M}{q}}^{\frac{2M}{q}} (r + \frac{M-1}{s} + t_s - t) dt + \dots + \int_{\frac{2M}{q}}^C (r + \frac{M-1}{s} + m_s - t) dt}{c} + t_s, \frac{qsr}{s-q} > M \end{cases}$
情况 6 $M > 1$ $1/t_s < q \leq M/t_s$	$d_j = \frac{r^2 s}{2c(s-q)} + t_s + \frac{(t_s - \frac{1}{q})^2 q}{2M}$ $d_{ch} = \frac{\int_0^{\frac{M}{q}} (r - \frac{s-q}{s} q_t) dt + \int_{\frac{M}{q}}^{\frac{2M}{q}} (r + \frac{M-1}{s} + t_s - t) dt + \dots + \int_{\frac{2M}{q}}^C (r + \frac{M-1}{s} + m_s - t) dt}{c} + t_s$
情况 7 $M > 1, q > M/t_s$	/ <sup>a</sup>

表 3 不同情况下停靠站设置在出口道时的绿灯末排队长度模型

Tab.3 Model of queue length at the end of the green time for far-side bus stop

分类情况	绿灯末排队长度模型
情况 1 $M=1, q \leq 1/c$	0
情况 2 $M=1$ $1/c < q \leq 1/t_s$	$N = \max \left[ qc - (c-r) \frac{1}{t_s}, 0 \right]$
情况 3 $M=1, q > 1/t_s$	/ <sup>a</sup>
情况 4 $M > 1, q \leq M/c$	0
情况 5 $M > 1$ $M/c < q \leq 1/t_s$	$N = \max \left[ qc - \left( \frac{c-r-M}{t_s} + 1 \right) \cdot M, 0 \right]$
情况 6 $M > 1$ $1/t_s < q \leq M/t_s$	同情况 5
情况 7 $M > 1, q > M/t_s$	/ <sup>a</sup>

(2) 在车辆到达率相对较小时(即情况 1、情况 4、情况 5),停靠站设置在进口道和出口道的车均总延误相同。

(3) 当车辆到达率相对较大时(即情况 2、情况 6),停靠站设置在出口道的车均总延误大于设置在进口道,并且随流量的增加二者的差值逐渐增大。

(4) 对于停靠站容量为 1 的情况,当 BRT 车流量为  $30 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$  时,停靠站设置在出口道的车均总延误曲线有一个突变,该点是情况一和情况二的临界点。

这是由于车均总延误对交通流量和周期时长的敏感性较高。BRT 车辆流量较小时,红灯期间所积聚的 BRT 车辆数目小于停靠站容量,绿灯起亮后不

会产生车辆排队进站等候服务的现象,此时 BRT 车均总延误都为信号控制延误及停靠站的停靠延误之和。随着 BRT 车流量的增大,红灯期间所积聚的 BRT 车辆数目超过了停靠站容量,使得绿灯起亮后 BRT 车辆排队进站等候服务。此时若停靠站设置在交叉口出口道,BRT 车均总延误等于信号控制延误、停靠站停靠延误及停靠站等候服务延误之和,而设置在进口道时的车均总延误只有信号控制延误和停靠站停靠延误。虽然随着流量的继续增加,停靠站等候服务的现象也会在停靠站设置在交叉口进口道发生,使得设置在进口道和出口道的延误都为前述三项延误之和,但停靠站设置在进口道时等待的车辆数远远小于红灯期间所积聚的 BRT 车辆,因此,停靠站设置在进口道的车均总延误小于设置在出口道的。

## 5.2 排队长度

图 4 显示了在停靠站容量为 1 和  $M$ (这里取  $M=2$ )的情况下,停靠站设置在出口道时绿灯末平均排队长度随 BRT 车流量的变化关系。

由图可得,在 BRT 车流量较小时,绿灯末平均排队长度为 0,随着车流量的增大,排队长度逐渐增大,这时排队长度随车流量呈线性增长。

这是由于绿灯末平均排队长度的大小与 BRT 车流量和停靠站容量密切相关。当 BRT 车辆流量较小时,红灯期间所积聚的 BRT 车辆数目小于停靠站容量,绿灯起亮后不会产生车辆排队进站等候服务

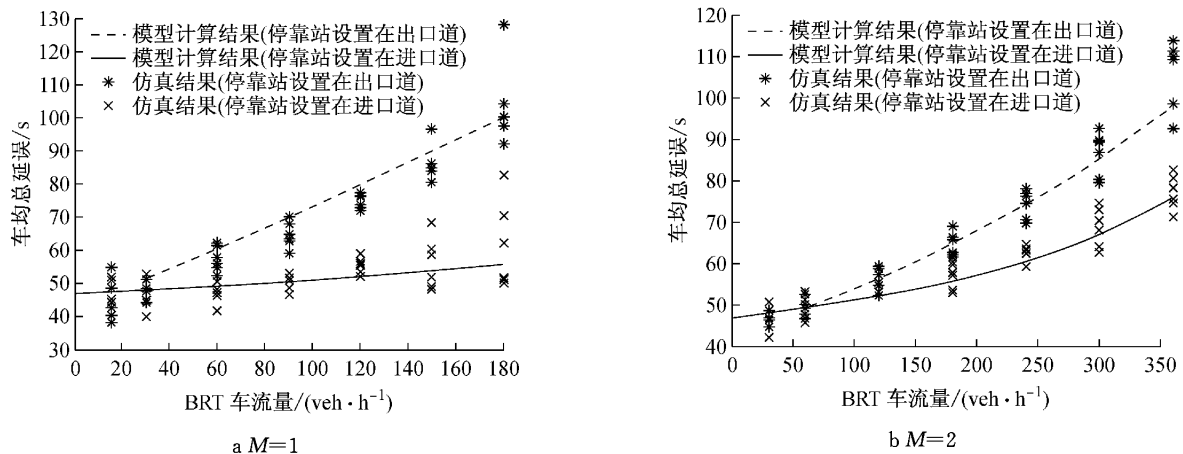


图 1 模型仿真检验

Fig.1 Model simulation test

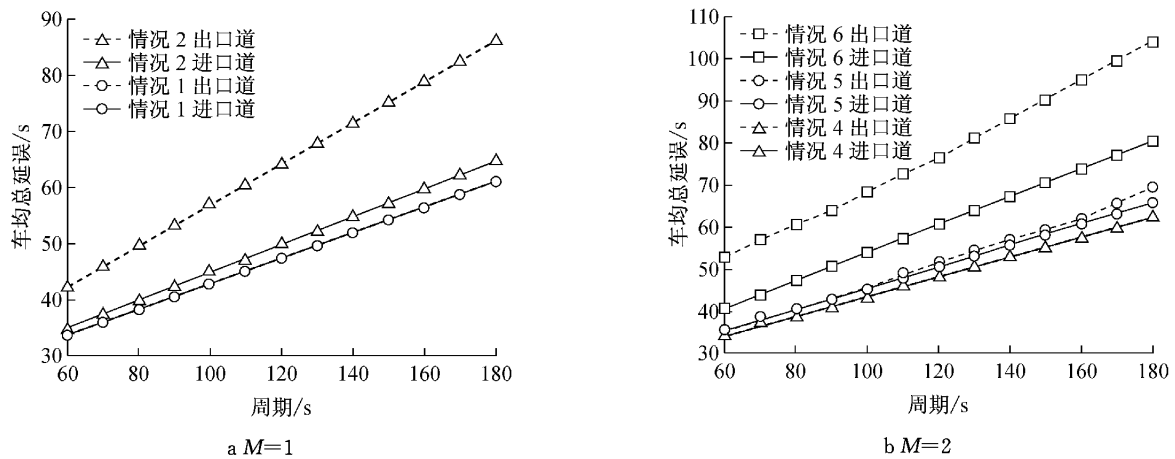


图 2 车均总延误随周期变化趋势图

Fig.2 Variation of total BRT vehicle delay with signal cycle

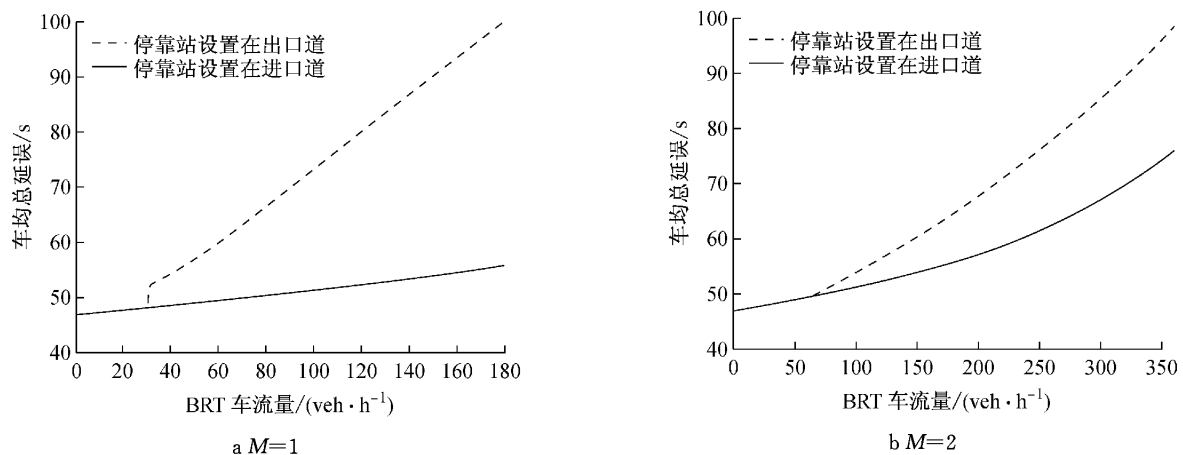


图 3 车均总延误随 BRT 车流量变化趋势图

Fig.3 Variation of total BRT vehicle delay with volume

的现象,此时绿灯末平均排队长度为 0.随着 BRT 车流量的增大,红灯期间所积聚的 BRT 车辆数增多,甚至超过了停靠站容量,导致这些车辆无法在本周期绿灯时间内在停靠站完成停靠,即产生了车辆排

队进站等候服务的现象.若排队延伸至交叉口内部,将对下一相位的通行造成影响,影响交叉口的正常运行.

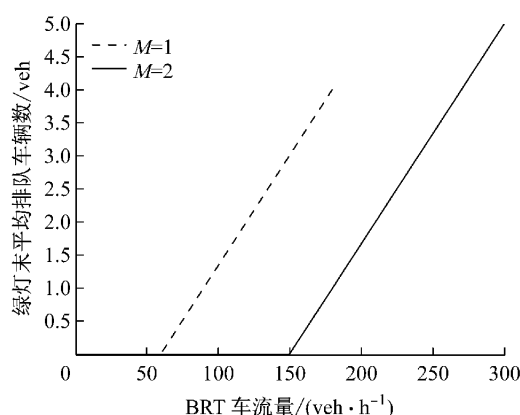


图 4 排队长度随 BRT 车流量变化趋势图

Fig. 4 Variation of queue length at the end of the green with BRT vehicle volume

## 6 结论

基于车均延误和绿灯末排队长度分析,对 BRT 停靠站在交叉口最佳布设位置进行了研究,主要结论如下:

(1) 当车辆到达率小于停靠站的服务能力时,对于 BRT 车均总延误和绿灯末平均排队长度这两个指标而言,车流量较小时,停靠站设置在进口道和出口道没有区别,但当车流量较大时,停靠站设置在出口道的延误大于进口道,并且停靠站设置在出口道绿灯末车辆排队进站不利于相交道路的正常通行,在这种情况下,应将停靠站设置在交叉口进口道。

(2) 当车辆到达率大于停靠站的服务能力时,无论停靠站设置在进口道还是出口道,车辆都将在停靠站前累积,排队长度也随时间的增长而不断增加,对 BRT 的运营都是不利的,因此在设计 BRT 停靠站的泊位数时要充分考虑车辆的到达要求,尽量避免这种情况。

研究讨论了单个快速公交停靠站布设情况,重点对比了停靠站设置在进口道和出口道的优劣,但对于停靠站在通道、网络上的布局情况,有待进一步研究。同时,后续研究中还应考虑停靠站设置与交叉口短车道、路段短连线等特殊道路条件的影响。

## 参考文献:

[1] 王伟,杨新苗,陈学武.城市公共交通系统规划方法与管理技术[M].北京:科学出版社,2002.  
WANG Wei, YANG Xinmiao, CHEN Xuewu. City public transportation system planning and management[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[2] Wirasinghe S C, Ghoneim N S. Spacing of bus-stops for many to many travel demand[J]. Transportation Science, 1981, 15(3): 210.  
[3] Saka A A. Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(3): 195.  
[4] Rajbhandari R, Chien S I, Daniel J R. Estimation of bus dwell times with automatic passenger counter information [J]. Transportation Research Record, 2003, 1841: 120.  
[5] Saka A A. Effect of bus-stop spacing on mobile emissions in urban areas [C/CD]//82nd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2003.  
[6] Dejeamrnes M, Coffin F, Ladreyt T, et al. Bus stop design and automated guidance for low-floor buses [J]. Transportation Research Record, 1999, 1666: 85.  
[7] 彭春露,彭国雄.一种新的城市主干道公交停靠站布置方法探讨[J].土木工程学报,2003,36(1):64.  
PENG Chunlu, PENG Guoxiong. Discussion about a new method of bus stop on arterial streets [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(1): 64.  
[8] 徐辉,朱荣军,王文达,等.港湾式公交停靠站设计模式和优化设计方法[J].中国市政工程,2012,1:9.  
XU Hui, ZHU Rongjun, WANG Wenda, et al. A research of design models & optimized design method of bus stop[J]. China Municipal Engineering, 2012, 1: 9.  
[9] 阴炳成.面向专用道的公共汽车交通优先控制方法研究[D].上海:同济大学,2004.  
YIN Bingcheng. Bus priority control method research for bus lanes[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.  
[10] 杨晓光,阴炳成.公共汽车交通专用道及其停靠站最佳布置方法[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(7):901.  
YANG Xiaoguang, YIN Bingcheng. Bus lanes and suitable disposals layout method [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(7): 901.  
[11] 吴志周,马万经,杨晓光.考虑信号优先的相邻公交停靠站最佳布置方法[J].公路交通科技,2008,25(1):146.  
WU Zhizhou, MA Wanjin, YANG Xiaoguang. Best adjacent bus stops layout method at signal priority [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2008, 25(1): 146.  
[12] 马万经,谢涵洲.考虑远端停靠站的交叉口公交优先控制方法[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(4):524.  
MA Wanjin, XIE Hanzhou. Bus signal priority strategy for isolated intersection with far-side bus stop[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(4): 524.  
[13] 刘伟玲.城市公交停靠站通行能力研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
LIU Weiling. Bus stop capacity research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.  
[14] 韩璧璘.公交停靠站延误的影响因素分析及缩减策略研究[D].北京:北京交通大学,2011.  
HAN Bilin. Analysis factors on bus station and strategies for reduction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.  
[15] SUN Feng, WANG Dianhai, MA Dongfang, et al. Method for calculating the capacity of bus bay [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2012, 28(4): 485.