

泊位划分环境下公交站点延误模型

舒 波¹, 施翔匀², 刘小明², 谭璵元²

(1. 东北大学工商管理学院, 辽宁 沈阳 110004;

2. 北方工业大学电气与控制工程学院, 北京 100144)

摘要: 为准确测算公交车的站点延误时间, 建立公交站点延误模型. 根据公交车在站点的运行状态, 将公交站点延误分成三部分. 第一部分在泊位划分对公交进站延误影响的基础上, 综合考虑影响公交站点延误的因素, 通过建立仿真平台来计算公交进站延误时间. 第二部分与第三部分分别基于乘客数量和车头时距来建立公交进站和离站延误模型. 研究表明, 泊位划分和离站区域长度等因素对公交站点延误具有重要影响. 本模型可提高计算公交站点延误的准确性.

关键词: 站点延误; 泊位划分; 仿真平台; 离站区域

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)02-0257-08

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.02.011

Bus station delay model in berth assignment environment

Shu Bo¹, Shi Xiangyun², Liu Xiaoming², Tan Jiyan²

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. College of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to accurately calculate the bus station delay time, a bus station delay model is established. According to the running status of the bus at the bus stop, the bus stop delay is divided into three parts. In the first part, based on the influence of berth division on the delay of bus arrival, factors affecting the delay of bus stop are considered comprehensively, and the delay time of bus arrival is calculated by establishing a simulation platform. The second part and the third part are based on the number of passengers and the headway respectively to establish the bus arrival and departure delay model. The results show that factors such as berth allocation and length of departure area have important effects on the delay of bus stations. This model can improve the accuracy of calculating the delay of bus stations.

Key words: site delays; berth assignment; simulation platform; exit area

1 引 言

随着经济的快速发展, 城市越来越拥堵, 发展公共交通是缓解交通拥堵的重要方式. 由于北京市公交基础设施远远落后于计划^[1], 许多新增公交线路与现有公交线路共享同一站点, 公交车辆必须在站点外排队, 从而导致公交站点附近道路通行能力的显著下降.

在当前道路资源紧张的情况下, 通过改造公交站点和站点周边道路来缓解公交站点附近的拥堵, 需要相

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2018-01-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603005); 北京市自然科学基金资助项目(4164083).

当多的财务预算和施工时间成本. 因此本文在考虑泊位划分对公交站点延误时间影响的基础上, 结合站点延误的其他影响因素进行综合分析, 以提高公交车在站点的运行效率.

基于数据建模的角度研究公交站点延误时间. Levinson^[2]提出公交车在站点的延误时间主要受上下车乘客数的影响; Javy^[3]研究公交车车型和付费方式对公交停站延误的影响; 许秀华^[4]根据不同泊位数建立公交车站点停靠时间模型, 得出公交站点延误主要受公交站点泊位数、上下车乘客数、上下车人均时间及车门数的影响; 王江兰^[5]分析影响公交站点停靠延误的各种因素, 并通过调研数据及Vissim平台仿真详细研究各因素对公交车站点停靠延误的不同影响程度; Gu 等^[6]提出一种基于马尔科夫链的模型估计公交站点到达公交的最大数量; Koshy 等^[7]采用仿真的方法研究交通流与公交停站时间的关系; Bian 等^[8]提出用复合泊松服务时间估计模型估算路侧公交站点的服务时间; 李大铭等^[9]设计了基于支持向量机的公交旅行时间预测模型, 获得公交在下一站点的发车时间信息, 用于判断是否需要延长其停站时间. 从泊位划分的角度研究其与站点延误时间的关系, 这一方向研究成果较少. 其中 Wu 等^[10]研究如何设计最优的泊位划分计划. Tan 等^[11]提出一种寻求次优公交站点延误的泊位划分算法.

综上所述, 在研究公交站点延误时间方面, 目前大部分学者都是分析公交停站延误时间, 而较少考虑进站延误时间, 出站延误时间^[2-9]. 对于停站延误的影响因素, 大多数研究都只针对单个因素对公交停靠时间的影响, 未对各种影响因素进行综合考虑. Wu 等^[10]和 Tan 等^[11]研究泊位划分对于整个公交站点延误具有一定的影响, 未具体说明泊位划分影响公交进出站的哪个过程. 通过分析北京市某一典型港湾式公交站点视频数据, 建立公交站点延误模型, 运用仿真平台对影响公交站点延误时间的因素进行综合考虑. 本文在使施工时间成本与财务预算尽可能少的情况下, 调整泊位划分方案可使得公交进站延误时间变的更优, 从而进一步缓解公交站点附近的拥堵情况.

2 站点延误时间

大量研究^[2-9]表明影响公交站点延误的因素可以被分为三类: 交通状况(包括交通流量, 公交流量, 乘客流量), 公交站点类型(港湾式公交站或者直线式公交站、公交离站区域长度)和公交管理(泊位划分或者泊位流入率). 通过分析公交在站点的运行过程, 得到以下的关系如图1. 中心三部分代表公交站点各过程的延误(进站延误 t_q , 停站停靠时间 t_{pst} 和出站延误 t_d), 其余部分表示对各过程延误的影响因素. 虚线表示 t_q , t_{pst} 和 t_d 之间的相互作用. 实线表示公交站点延误与影响因素之间的相互作用.

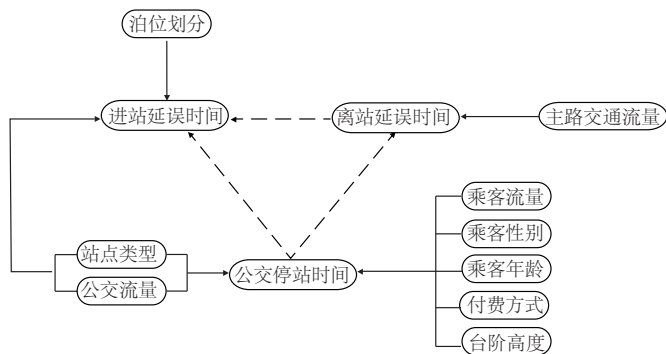


图1 公交延误与影响因素之间的相互作用图

Fig. 1 The interaction between bus delay and influencing factors

公交站点延误主要产生在三个方面: 公交减速进站; 乘客上下车; 公交加速离站. 站点延误受到多种因素的影响, 比如交通流、公交站点类型和泊位划分等. 因此很有必要对公交站点延误时间的计算进行讨论, 并分析影响公交站点延误的因素.

根据文献[12, 13]可知公交车在某一站点的延误时间为

$$T_{\text{delay}} = t_q + t_{\text{pst}} + t_d.$$

表1列出了文中变量的含义.

表1 变量说明
Table 2 Variable annotation

符号	描述
t_q	公交进站延误时间(s)
t_{pst}	公交停站延误时间(s)
t_d	公交离站延误时间(s)
T_{delay}	站点总延误时间(s)
q	主路机动车流量(veh/h)
T	到达时间间隔(s)
t_{dead}	公交车开关门时间(s)
t_{board}	乘客上下车平均时间(s)
h_i	目标车道上第 <i>i</i> 辆车和第 <i>i</i> +1辆车通过公交车观测位置的时间差值(s)
H	公交车进行换道所需的最小车头时距(s)

2.1 公交进站延误时间

公交进站延误影响因素众多, 其中主要分析公交离站区域长度, 公交管理与公交进站延误的关系, 公交管理主要涉及到泊位划分即泊位的流入率, 因此不对公交泊位数因素进行考虑. 泊位划分对公交进站延误有着很大的影响, 由于划分的不合理, 导致公交车进站秩序混乱, 进站延误时间增加. 合理划分公交泊位可有效减少站点延误时间.

前人研究公交进站延误时间主要基于排队论原理. 通常建立在公交排队等待空间无限; 公交到达过程为泊松过程, 服务服从 Erlang 分布^[14]; 服务规则采用先到先服务, 进站的公交尽可能往前开, 直至遇到前面等待乘客上下车的公交^[15].

基于排队论原理的公交进站延误时间未曾考虑泊位划分方案, 其假设是在理想状况下进行研究的, 以双泊位公交站点为例, 若上游泊位公交乘客上下车时间远大于下游泊位乘客上下车时间, 那下游泊位的公交车就必须排队等待, 因此不同的泊位划分方案对公交进站延误有着重大的影响. 由于不能对公交泊位划分进行定量分析, 所以本文结合泊位划分影响因素, 运用仿真平台进行分析, 得到不同泊位划分方案下的公交进站延误时间.

2.2 公交停站延误时间

公交流量和公交站点布局不仅对公交进站有影响, 对公交停站延误也有一定的影响, 当离站区域过短, 公交流量过大, 从而形成排队使得公交在泊位的停靠时间增加. 公交站点延误还受公交车车型的影响, 不同的车型, 车门数、台阶高度及刷票系统可能不一样, 过高的台阶会造成额外的站点延误, 而过多的车门及自动刷票系统则会降低公交站点延误.

但在停站延误时间中乘客因素起着至关重要的作用. 乘客的数量、年龄和性别等都对延误有着影响. 其中乘客数量对公交停站延误影响最大. 当乘客流量过大, 乘客上下车阻力增大, 在这情况下将出现公交站点延误, 随着乘客流量的增大, 公交站点的延误也会随之增大. 本文研究北京市高峰期的公交站点延误, 因乘客上车的秩序有专人管理, 不存在混乱现象, 所以不对乘客上车的秩序因素进行考虑.

一般公交到达分布采用泊松分布, 因此本文公交到达分布也采用泊松分布. 假设每辆离开的公交车可以把在公交到达时间间隔内到达的乘客能全部带离, 上一辆同线公交车驶离时间记为第0 s, 因此可得公交车辆上车乘客数

$$n = \max \left\{ M \left| \sum_{i=1}^M t_i \leq T \right. \right\},$$

其中 t_i 为乘客到达时间间隔, T 为公交到达时间间隔.

此辆公交的站点延误时间主要取决于客运量, 可大致估算为

$$t_{\text{pst}} \approx 2t_{\text{dead}} + nt_{\text{board}},$$

其中 t_{dead} 是开关门最小时间, 一般为 $2\text{ s} \sim 3\text{ s}$, t_{board} 是乘客平均上下车时间, 受乘客年龄及售票系统的影响^[16], 一般为 $2\text{ s} \sim 4\text{ s}$.

公交站点平均停站延误时间为

$$\bar{t}_{\text{pst}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{pst}}^i,$$

其中 N 为公交流量, t_{pst}^i 为第 i 辆公交的停站延误时间.

2.3 公交离站延误时间

离站延误时间 t_d 主要受道路交通流的影响. 当交通流量增加, 公交车在保证安全距离情况下离站汇入主路将变得更加困难, 当公交车辆汇入主路时, 由于它的低速进入会形成一个集结波, 这会使接下来的公交车辆离站更加困难. 公交车辆汇入主路的决策过程可通过伯努利试验^[17]建模, 准备出站的公交车, 一旦观测到目标车道第 n 个车头时距 h_n (即第 n 辆车和第 $n+1$ 辆车的车头时距) 达到了换道所需的需求车头时距 H , 该公交车即可完成换道驶离公交泊位. 因此, 离站延误, 即公交车从完成上下客关闭车门到驶离公交泊位的时间, 近似为该公交车等待前 $n-1$ 个车头时距之和, 由此可得公交离站延误时间为

$$t_d \approx \sum_{i=1}^{n-1} h_i.$$

3 仿真研究

本文仿真研究案例选用北京市某典型公交站. 收集 10 d 的高峰小时(17:00~18:00) 公交站点视频数据. 开发一个可靠的替代测试平台去模拟公交车进出公交站点的行为. 在此平台上的公交驾驶行为主要包括公交进站、停靠、离站以及其他车辆改变车道以避免与离站公交发生冲突的行为. 仿真后, 平台以公交站点延误作为结果输出.

3.1 跟驰换道模型

建立仿真平台, 主要运用了车辆跟驰模型, 变道模型和公交进站/离站模型. 平台引入了 Leutzbach 等^[18]提出的模型作为车辆跟驰模型, 并应用 Kurata 等^[19]提出的模型作为车辆变道模型. 在公交车进站/离站模型下, 允许超车, 使得仿真更加真实.

文献[18]的跟驰模型一旦后车驾驶员认为其车与前车之间的距离小于安全距离时, 后车驾驶员开始减速. 由于后车驾驶员无法准确判断前车车速, 后车车速会在一段时间内低于前车车速, 直到前后车间的距离达到安全距离时, 后车驾驶员开始缓慢地加速, 由此周而复始, 形成一个加速、减速的迭代过程, 并可以模拟出自发产生的堵塞现象以及拥挤交通情况下的走走停停等.

车辆换道时, 参考文献[20, 21]中的换道规则. 本文制定了以下三点规则. 只要符合以下三点中的任意一点, 车辆则换道成功.

1) 当前目标车辆的速度大于前一辆车速度的 1.2 倍, 且两车之间的距离小于 4 倍的安全距离, 则驾驶员考虑换道; 换道后, 本车与前车的距离大于 2 倍的安全距离且与后车的距离大于安全距离时, 表明换道成功.

2) 考虑换道的条件与上述规则相同, 但换道成功则需换道后的本车速度小于前车速度, 且与换道后的前后车距离大于安全距离.

3) 本车与前车距离小于 2 倍安全距离时, 驾驶员考虑换道, 换道后, 当本车与前车距离大于换道前的本

车与前车距离, 且与后车距离大于安全距离时, 表明换道成功.

3.2 仿真模型路网建立

把实际路况输入仿真平台中, 道路为单向两车道, 公交站点有一条辅道, 图2描述了该特定的仿真场景.

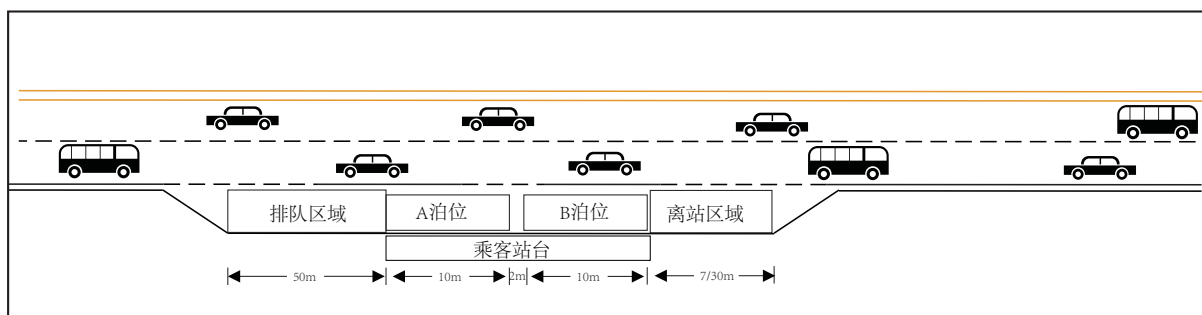


图2 仿真现状

Fig. 2 Simulation status

公交站点距离道路开始 550 m 处, 道路全长 1 000 m. 公交站点具有两个停靠泊位, 一个排队区域, 一个乘客站台. 每个泊位 10 m 长, 泊位间距为 2 m, 排队区域长度为 50 m, 确保有足够的空间存储公交队列. 如果公交排队超过 50 m, 接下来到来的公交将排队等待在主路上.

3.3 仿真模型的校准

公交站点的平均延误是评价公交车运行效率的一个重要衡量指标. 做一个可靠的仿真模型, 需要确保实际观测到的公交站点延误与仿真得到的公交站点延误遵循相同分布. 因此, 校准过程中需要使用实际数据来量化模型参数.

使用 Kolmogorov-Smirnov 检验法检验实际公交站点延误分布与仿真公交站点延误分布的差异. $F_{n_1}(x)$ 和 $F_{n_2}(x)$ 分别是样本量为 n_1 的实际公交站点延误累积经验分布函数和样本量为 n_2 的仿真公交站点延误累积经验分布函数, 检验的原假设为 $H_0: F_{n_1}(x) = F_{n_2}(x)$, 其统计量 D 为

$$D = \max_{-\infty < x < +\infty} |F_{n_1}(x) - F_{n_2}(x)|.$$

给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 得到临界值 $D_a = 1.36\sqrt{(n_1 + n_2)/(n_1 n_2)}$. 在校准中, 采用 610 个实际观测站点总延误与 425 个仿真站点总延误数据进行检验. 检验结果如图3所示, $D_a = 0.0859$, $D = 0.081 < D_a$, 因此在置信水平为 0.95 的情况下, 接受 H_0 .

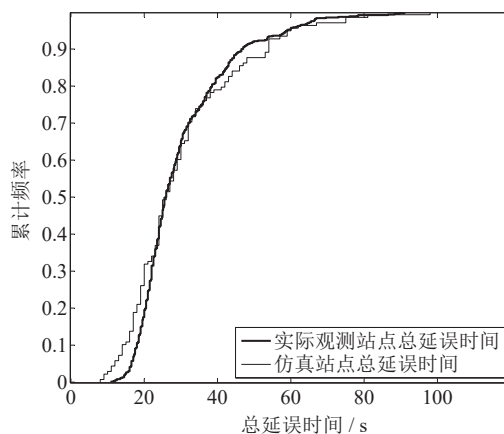


图3 总延误累积分布函数

Fig. 3 CDF of total delay

4 仿真算例

从 10 d 的高峰时段的视屏数据中,统计了到站公交的线路及流量(见表 2),并把公交流量参数输入仿真,开始进行仿真运算.

表 2 公交流量
Table 2 Bus volume

线路	307	319	331	355	375	438
高峰小时平均流量(veh/h)	51	53	41	69	29	21
线路	562	628	656	731	957	110
高峰小时平均流量(veh/h)	52	27	31	35	22	39

经过仿真,可以得到不同泊位划分方案下的公交进站延误时间,从中可以看出:在不同的离站区域长度情形下,如表 3,离站延误时间都是明显随泊位流入率的变化而变化,如图 4.

表 3 典型的情形
Table 3 Typical case

情形	道路交通量(veh/h)	乘客流量(人/h/线路)	离站区域长度(m)
1	1 400	60	7
2	1 400	60	30

注:情形 1: $y = 0.0011x^4 - 0.059x^3 + 1.1x^2 - 6.2x + 70$.
情形 2: $y = 0.00096x^4 - 0.048x^3 + 0.89x^2 - 6.87x + 37.78$.

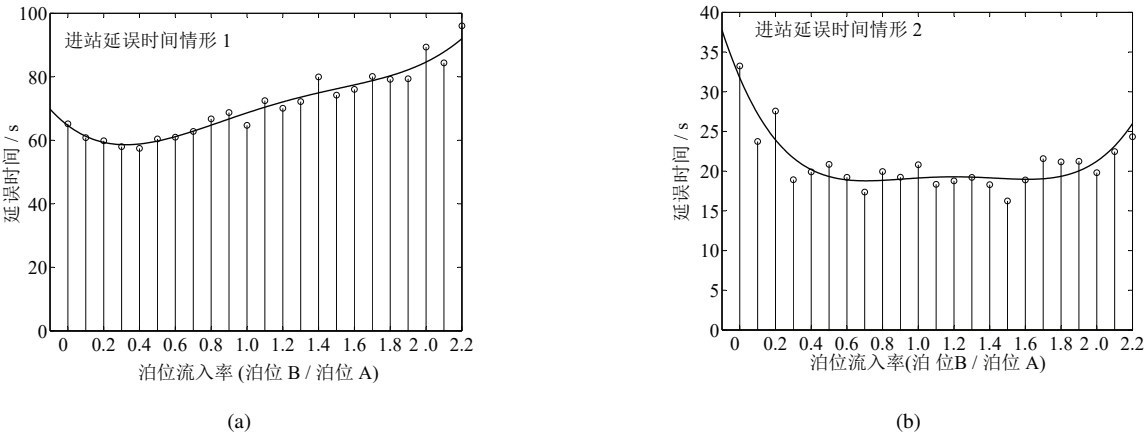


图 4 进站延误时间图
Fig. 4 Arrival delay time

从图中可以看出,离站区域长度为 7 m 时,公交延误较优的情况出现在泊位流入率为 0.4 附近;离站区域长度为 30 m 时,公交延误较优的情况出现在泊位流入率为 1.1 附近.接着对其进行拟合可得到不同离站区域下,泊位流入率与离站延误的相关方程.

对不同公交流量下的停站延误时间进行了分析,公交到站车头时距服从泊松分布,乘客到达时间间隔服从均匀分布.因此按照算法进行了数值计算,并将结果与仿真结果进行比较,如图 5.

当公交流量为 80 veh/h 时,两种计算方式的相对误差为 6.87%;当公交流量为 150 veh/h 时,其相对误差为 5.97%.由此可以得出:通过简单的数值计算可替代复杂的仿真平台运行的结果.

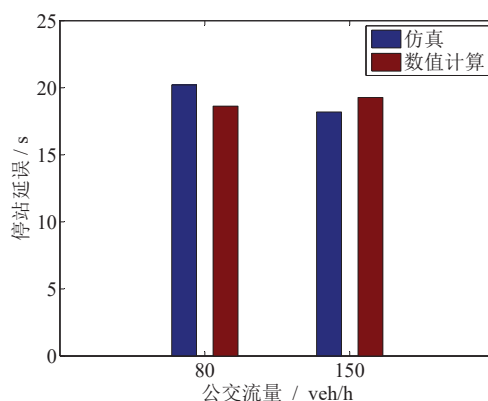


图5 停站延误时间对比图

Fig. 5 Stop delay time comparison chart

主路车流车头时距服从泊松分布, 通过仿真和数值计算, 可以得到不同流量下的公交离站延误时间, 如图6. 通过对比发现, 两种方法的离站延误与主路交通流量都成指数关系. 当主路交通流量小于 800 veh/h, 数值计算与仿真结果误差较低.

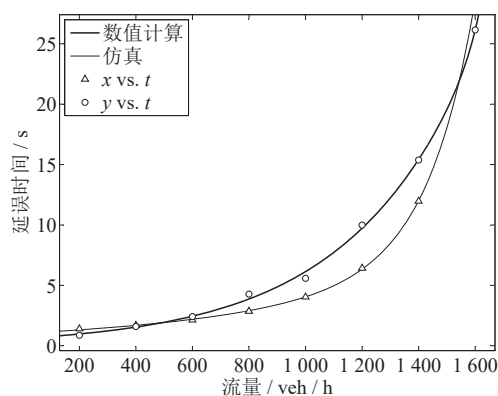


图6 不同交通流量下的公交离站延误时间

Fig. 6 Bus departure time delay under the different traffic flow

5 结束语

本文以北京市某一公交站为例, 研究公交站点延误时间模型. 通过分析影响公交站点延误时间的各个因素, 把公交站点延误分成三部分, 并分别提出算法, 建立相关仿真平台及模型, 并对其进行分析.

经研究发现, 不同泊位划分方案和公交站点离站长度对公交进站延误有显著的影响, 因此在计算公交站点较优泊位划分方案时, 需考虑离站长度等影响因素. 同时, 运用仿真平台及公式计算得到道路流量和离站延误的关系发现其具有一定规律, 由此可以根据道路交通流量推算出公交离站延误时间. 文中研究算法具有一定的合理性, 研究成果可结合路段行车时间应用于公交到站时间的预测. 本文研究对象是港湾式公交站点, 对于其他类型的公交站点, 该模型是否符合是接下来要研究的内容.

参考文献:

- [1] 季朗超. 北京公交场站基础设施现状问题及对策研究. 上海: 中国土木工程学会城市公共交通学会, 2009: 15–22.
Ji L C. Research on the Status Quo and Countermeasures of Infrastructure in Beijing Bus Station. Shanghai: Council of Urban Public Transport Society of China Civil Engineering Society, 2009: 15–22. (in Chinese)

- [2] Levison H S. Analyzing transit travel time performance. *Transportation Research Record*, 1983, 915(1): 1–6.
- [3] Awan J, Solomom N. *Highway capacity manual 2000*. 4th Edition. Washington: Transportation Research Board, 2000: 9–10.
- [4] 许秀华. 公交车在公交停靠站的停靠时间研究. 北京: 北京交通大学, 2015.
Xu X H. Research on Bus Stopping Time at the Bus Stop. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [5] 王江兰. 常规公交站点停靠延误影响因素分析. 西安: 长安大学, 2014.
W J L. Analysis on Factors Affecting Delay on Regular Bus Stop. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [6] Gu W, Cassidy M J, Li Y. Models of bus queueing at curbside stops. *Transportation Science*, 2015, 49(2): 204–212.
- [7] Koshy R Z, Arasan V T. Influence of bus stops on flow characteristics of mixed traffic. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, 131(8): 640–643.
- [8] Bian B, Zhu N, Ling S, et al. Bus service time estimation model for a curbside bus stop. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2015, 57(1): 103–121.
- [9] 李大铭, 于滨. 公交运营的协控准点滞站调度模型. *系统工程学报*, 2012, 27(2): 248–255.
Li D M, Yu B. Coordinated schedule-based holing model for bus operation. *Journal of Systems Engineering*, 2012, 27(2): 248–255. (in Chinese)
- [10] Wu X, Li Z, Li L, et al. Berth assignment planning for multi-berth bus stops//*Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. New York: IEEE Pres, 2011: 1519–1524.
- [11] Tan J, Li Z, Li L, et al. Berth assignment planning for multibus stops. *Journal of Advanced Transportation*, 2015, 48(7): 750–765.
- [12] Awan J, Solomom N. *Highway Capacity Manual*. 4th Edition. Washington: Transportation Research Board, 2000: 28–31.
- [13] Board T. *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. 2nd Edition. Washington: Transportation Research Board, 2003: 1–18.
- [14] 葛宏伟. 城市公交停靠站点交通影响分析及优化技术研究. 南京: 东南大学, 2006: 7–16.
Ge H W. Traffic Effect Analysis and Optimization Techniques of Bus Stop. Nanjing: Southeast University, 2016: 7–16. (in Chinese)
- [15] Gu W, Cassidy M J. Maximizing bus discharge flows from multi-berth stops by regulating exit maneuvers. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2013, 56(9): 254–264.
- [16] Tirachini A. Bus dwell time: The effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Ransportmetrica*, 2013, 9(1): 28–49.
- [17] Meng Q, Qu X. Bus dwell time estimation at bus bays: A probabilistic approach. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2013, 36(36): 61–71.
- [18] Leutzbach W, Wiedemann R. Develop and aoplication of traffic simulation model at karlsruhe institut fur verkehrwesen. *Traffic Engineering and Control*, 1986, 2(10): 270–278.
- [19] Kurata S, Nagatani T. Spatio-temporal dynamics of jams in two-lane traffic flow with a blockage. *Physica A: Statistical Mechanics Its Applications*, 2003, 318(3): 537–550.
- [20] 张发, 宣慧玉, 赵巧霞. 换道行为对交通流宏观特性的影响. *系统工程学报*, 2009, 24(6): 754–758.
Zhang F, Xuan H Y, Zhao Q X. Effects of lane-changing on the characteristics of traffic flow. *Journal of Systems Engineering*, 2009, 24(6): 754–758. (in Chinese)
- [21] 谭满春. 基于 Agent 与模糊逻辑的车辆换道仿真模型. *系统工程学报*, 2007, 22(1): 40–45.
Tan M C. Simulation model of vehicle lane-changing based on agent and fuzzy logic. *Journal of Systems Engineering*, 2007, 22(1): 40–45. (in Chinese)

作者简介:

舒波(1981—), 女, 辽宁沈阳人, 博士生, 研究方向: 智能公交调度策略, Email: shengushubo@126.com;

施翔匀(1993—), 男, 浙江湖州人, 硕士生, 研究方向: 智能交通系统, Email: bfsxy1218@163.com;

刘小明(1974—), 男, 河北唐山人, 教授, 研究方向: 交通控制与管理; Email: tslxm@sina.com;

谭璠元(1986—), 男, 河南许昌人, 讲师, 研究方向: 智能交通系统, Email: tanjy@ncut.edu.cn.