

换乘效率对城市轨道交通分担率的影响研究

朱宇婷^{1,2}, 戎亚萍¹, 赵欣苗¹

(1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 奥本大学 土木工程系, 奥本 36849, 美国)

摘要: 为评估换乘效率对轨道交通分担率的影响, 引入拥挤感知系数、环境修正系数及换乘次数惩罚系数, 将客观换乘时间转化为感知换乘时间, 并以此为基础构建了轨道交通分担率模型. 利用北京市第4次出行调查数据对该模型进行标定, 探讨了轨道交通网络换乘效率改善对不同出行距离乘客分担率的影响. 结果表明: 换乘次数、换乘走行时间、换乘等待时间及换乘环境的改善能够有效地提高轨道交通的分担率, 尤其是对中短距离乘客的影响巨大; 换乘拥挤是影响中长距离乘客选择轨道交通的重要因素, 当换乘通道通过能力及换车站台容量较小时, 拥挤感知系数快速增加, 严重降低轨道交通网络的分担率.

关键词: 城市交通; 换乘效率; Logit模型; 分担率; 感知换乘时间; 出行距离

Impact of Transfer Efficiency on the Market Share of Urban Rail Transit

ZHU Yu-ting^{1,2}, RONG Ya-ping¹, ZHAO Xin-miao¹

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil Engineering, Auburn University, Auburn 36849, USA)

Abstract: To evaluate the impact of transfer efficiency on the market share of urban rail transit, perceived transfer time is proposed and obtained from objective transfer time by introducing parameters of crowding, environment, and transfer times. Based on the perceived transfer time, a market share model of urban rail transit is established. After estimating the model with the survey data in The Fourth Beijing Traffic Survey Report, changes of the market share of urban rail transit in different riding distance are discussed with the improving of transfer efficiency. Results show that factors, including transfer times, transfer walking time, transfer waiting time, and transfer environment, have a positive effect on improving the market share of urban rail transit, especially in the short-haul passenger market. While factors, which can reflect crowding, are mainly considered by passengers with middle-and-long distance travel. When the capacity of transfer channel or platform is very small, the perceived cost of crowding will increase quickly, and the market share of urban rail transit will reduce sharply.

Keywords: urban traffic; transfer efficiency; Logit model; market share; perceived transfer time; travel distance

收稿日期: 2016-07-22

修回日期: 2016-11-01

录用日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71390332, 71621001-3); 国家重点基础研究发展计划项目/National Key Basic Research Program of China (2012CB725406).

作者简介: 朱宇婷(1989-), 女, 江西南昌人, 博士.

*通信作者: 10121094@bjtu.edu.cn

0 引言

随着各大城市轨道交通网络日益完善,乘客出行可达性得到显著提高的同时,换乘也成为轨道交通出行必不可少的环节.根据北京市第4次交通综合调查可以发现,北京约30%的公共交通出行中至少需要进行一次换乘,其中,轨道交通出行换乘比例最高,约为78%,且平均换乘时间为9.5 min,占到平均总出行时耗的11.2%.因此,轨道交通换乘效率将直接影响轨道交通服务水平及其竞争力水平.

目前,公共交通网络换乘问题受到了众多领域研究学者的关注^[1-3].其中,换乘效率作为影响公共交通服务水平及乘客出行选择行为的重要因素,成为该领域的研究重点.部分学者采用数据调查等方法,以典型车站及路网为例,对换乘费用进行评估^[4-6].部分学者考虑了换乘走行时间、换乘等待时间等因素,构建了乘客换乘广义费用函数,研究换乘条件下的乘客出行选择行为^[7-9].Si等进一步引入换乘次数放大系数,对乘客换乘广义费用函数进行了完善^[10].然而,换乘是一个复杂的过程,Ortuzar等^[11]指出除客观换乘时间外,换乘舒适性、便捷性等均会对换乘费用产生影响,即乘客对换乘效率的评估更多的取决于其对换乘的主观感知.既有文献虽然能够在一定程度上反应乘客的感知换乘,但忽略了换乘拥挤及换乘环境等方面对乘客感知换乘的影响.本文在既有文献的基础上,综合考虑换乘走行时间、换乘等待时间及换乘次数对乘客换乘时间的影响,并通过引入拥挤感知函数、换乘环境感知系数及换乘次数惩罚系数等参数,对乘客的主观感知换乘时间进行描述.

实验模拟是揭示乘客出行规律、加深对交通行为理解的重要手段,已经在交通领域得到了较为广泛的运用.刘天亮等通过实验模拟,探讨了交通信息公开和不公开两种情形下的乘客日常路径选择行为的变化情况^[12];尚华艳等通过仿真实验,模拟分析了不同可变信息标志位置对道路交通流的影响^[13].本文利用数值实验的方法,运用改进后的乘客感知换乘时间函数,模拟仿真换乘走行时间、换乘等待时间等不同因素变化时,常规公交和轨道交通相对分担率的变化情况,从而评估换乘

效率和换乘环境等对轨道交通网络分担率的影响,为相关部门提供决策依据.

1 城市公共交通分担率模型

1.1 感知换乘时间

换乘时间是指乘客从一条线路下车时起至另一条线路上车时止所花费的全部时间,主要包括换乘走行时间和换乘等待时间.然而,在实际换乘中,受换乘次数、拥挤、换乘环境等因素的影响,乘客感知到的换乘时间往往大于客观换乘时间,因此,需要引入相关变量对客观换乘时间进行修正.

本文选取换乘走行感知时间、换乘等待感知时间、换乘次数及换乘环境等要素对感知换乘时间进行描述.则乘客进行一次出行的感知换乘时间为

$$T_C = n^\alpha \cdot (T'_{\text{wait}} + T'_{\text{walk}}) \mu \quad (1)$$

式中: n 为平均换乘次数; α 为换乘次数惩罚系数,其值越大表示乘客对换乘次数越敏感; μ 为环境修正系数,其取值越大表示换乘环境越恶劣; T'_{wait} 和 T'_{walk} 分别表示平均换乘走行感知时间和平均换乘等待感知时间.

显然, T'_{wait} 和 T'_{walk} 不仅与换乘站自身能力有关,还与换乘流量密切相关,计算方法为^[14]

$$T'_{\text{wait}} = T_{\text{wait}} \cdot (1 + \phi_{\text{wait}}(q)) \quad (2)$$

$$T'_{\text{walk}} = T_{\text{walk}}(q) \cdot (1 + \phi_{\text{walk}}(q)) \quad (3)$$

式中: T_{wait} 为实际平均换乘等待时间,取值与列车运行计划相关; T_{walk} 为实际平均换乘走行时间,其不仅与换乘通道自身条件有关,还与换乘流量有关,可采用BPR函数进行描述.

$$T_{\text{walk}}(q) = t_{\text{walk}} \cdot [1 + 0.15 \cdot (q_{\text{tr}}/Q_{\text{walk}})^4] \quad (4)$$

式中: t_{walk} 为乘客自由流换乘走行时间; q_{tr} 为换乘客流量; Q_{walk} 为换乘通道通过能力.

$\phi_{\text{wait}}(q)$ 和 $\phi_{\text{walk}}(q)$ 为拥挤感知系数,分别描述了乘客在换乘等待及换乘走行过程中拥挤度对换乘时间的影响,与换乘流量呈正相关关系,其表达式为^[14-15]

$$\phi_{\text{wait}}(q) = \max\left(0, \frac{q_{\text{tr}} + q_{\text{untr}}}{Q_{\text{wait}}} - \delta\right) \quad (5)$$

$$\phi_{\text{walk}}(q) = \max\left(0, \frac{q_{\text{tr}}}{Q_{\text{walk}}} - \delta\right) \quad (6)$$

式中： q_{tr} 为换乘客流量； q_{untr} 为非换乘客流量； Q_{wait} 为换乘站站台容量； δ 为拥挤感知阈值，即超过该值时乘客产生拥挤惩罚。

1.2 分担率模型

在确定感知换乘时间的基础上，各方式的交通阻抗可通过广义费用函数来表示，如式(7)所示。

$$U_k = F_k + \vartheta \cdot (T_{\text{vehicle}}^k + T_C^k + T_{\text{out}}^k) + n_k \cdot c_k \quad (7)$$

式中： F_k 为第 k 种交通方式的票价； T_{vehicle}^k 为第 k 种交通方式的在车时间，可通过出行距离 L 及第 k 种交通方式的旅行速度 v_k 计算得到，即有 $T_{\text{vehicle}}^k = L/v_k$ ； T_C^k 为第 k 种交通方式的感知换乘时间，可采用公式(1)进行计算； T_{out}^k 为第 k 种交通方式的站外消耗时间，包括进站前走行时间和出站后走行时间； ϑ 为乘客的平均时间价值； n_k 为第 k 种交通方式的平均换乘次数； c_k 为第 k 种交通方式内换乘一次所需支付的货币费用。

则第 k 种交通方式的分担率 P_k 为

$$P_k = \frac{\exp(-\theta U_k)}{\sum_k \exp(-\theta U_k)} \quad (8)$$

式中： U_k 为交通方式的阻抗； θ 为待标定的系数； k 为交通方式，本文中 $k=tr$ 表示轨道交通， $k=b$ 表示常规公共交通。

公共交通网络客流是由乘客出行方式选择的聚集结果。通常，乘客总希望选择广义费用最小的出行方式，然而随着选择某种出行方式的乘客数量的增加，其拥挤度就会增加，导致出行广义费用上升，从而使乘客重新进行选择。因此，公共交通网络的客流分布是一种相互反馈的动态平衡机制，即平衡状态下选择第 k 种交通方式的客流量应满足

$$f_k = Q \cdot P_k \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_k f_k = Q \\ f_k \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： f_k 为第 k 种交通方式的客流量； Q 为出行总需求。

2 数值实验

2.1 实验参数

根据北京市第4次交通综合调查数据，出行总需求 $Q=7.69 \times 10^5$ 人/h，乘客时间价值 $\vartheta=24.23$ 元/h，轨道交通及常规公交基本参数如表1所示。

表1 参数取值

Table 1 Value of parameters

参数	$F_k/\text{元}$	$c_k/\text{元}$	$v_k/(\text{km/h})$	$n_k/\text{次}$	$T_{\text{out}}^k/\text{min}$	$t_{\text{walk}}/\text{min}$	$T_{\text{wait}}/\text{min}$	$Q_{\text{walk}}/(\text{人/h})$	$Q_{\text{wait}}/(\text{人/h})$	μ	δ	θ
轨道交通($k=tr$)	2.0	0.0	35	1.18	18.75	4.68	2.69	3×10^5	3×10^5	1	0	1
常规公交($k=b$)	0.4	0.4	20	0.51	14.04	3.23	6.22	5×10^5	5×10^5	1	0	1

以第4次综合调查得到的轨道交通和常规公交分担率数据为目标值，将上述参数代入分担率模型中，对感知换乘时间中的惩罚系数 α 进行标定。标定结果 α 为1.14，此时分担率模型对实际值拟合的决定系数 R^2 为0.918，调整 R^2 为0.843，与实际值的对比如图1所示。

2.2 灵敏度分析

为分析换乘效率对轨道交通分担率的影响，以标定好的分担率模型为基础，分别调整轨道交通的平均换乘次数、自由流换乘走行时间、实际平均换乘等待时间、换乘环境、换乘通道通过能力及站台容量，观察轨道交通分担率的变化情况。

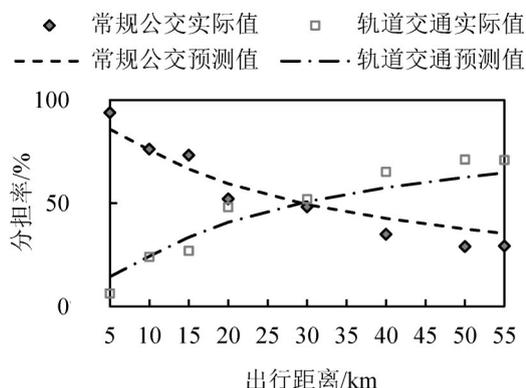


图1 2010年北京市公共交通实际及预测分担率
Fig. 1 The practical and forecast value of market share of Beijing public transportation in 2010

图2给出了轨道交通分担率随平均换乘次数 n_n 的变化情况。可以发现，随着平均换乘次数的增

加,轨道交通分担率呈下降趋势,且变化趋势逐渐减弱,当 $n_{tr}=0$ 时,在不同出行距离下,轨道交通分担率均达到80%以上;当 n_{tr} 增至1.5次时,轨道交通分担率快速下降,不同出行距离下的分担率均下降到50%以下,尤其是短距离出行($L=5$ km)的乘客,其分担率低于10%。这说明,换乘次数对轨道交通分担率具有较强的影响,为保证轨道交通的客流量,宜最大限度的保证主要客流方向的直达性。

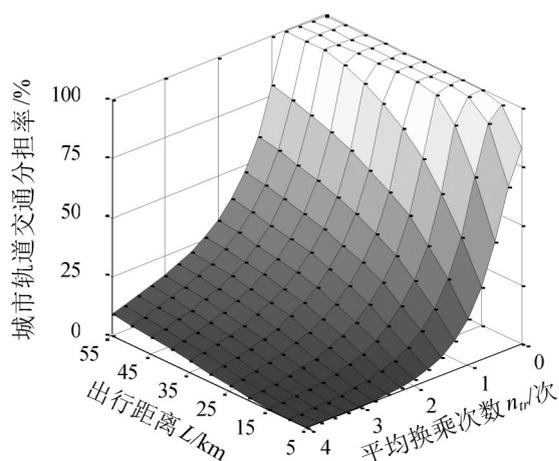


图2 轨道交通分担率与平均换乘次数的关系

Fig. 2 The relationship between the market share of urban rail transportation and average transfer times

图3给出了轨道交通分担率随自由流换乘走行时间及实际换乘等待时间的变化趋势。可以发现,随着自由流换乘走行时间及实际换乘等待时间的增加,地铁出行分担率呈现下降趋势;且当出行距离较短时(如 $L=5$ km),自由流换乘走行时间及实际换乘等待时间对轨道交通分担率的影响几乎相同;当出行距离较长时(如 $L=55$ km),自由流换乘走行时间对轨道交通分担率的影响大于实际换乘等待时间。因此,在修建地铁时,可优先减小换乘站内以中长距离客流为主的换乘距离,并在此基础上,通过改善列车接续方案,减少乘客等待时间。

图4出了轨道交通分担率随换乘环境的变化趋势。可以发现,随着换乘环境的逐步恶劣(即 μ 增加),轨道交通分担率呈下降趋势,且下降趋势逐渐减弱。这说明,说明换乘环境越好,轨道交通的分担率越大;反之,轨道交通的分担率会逐渐降低。因此,在各项基础设施修建完成后,仍可以通过改变灯光照明、墙面喷漆或增加步行辅助设施等措施,缓解乘客的换乘心理压力,提高轨道交通客流量。此外,从图4中可以发现,不同出行距离下换乘环

境对轨道交通分担率的影响也存在差异。计算环境系数 μ 由0.4上升至1.6时,客流分担率在不同出行距离下的变化幅度,如图5所示。可以发现,当出行距离在15 km左右时,分担率变化幅度最为明显,表明换乘环境对中短距离乘客影响最大,而对短距离和长距离的影响相对较小。

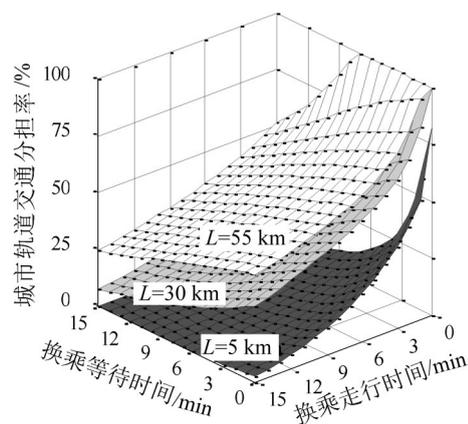


图3 轨道交通分担率与自由流换乘走行时间及平均换乘等待时间的关系

Fig. 3 The relationship between the market share of urban rail transportation and average transfer waiting/walking time

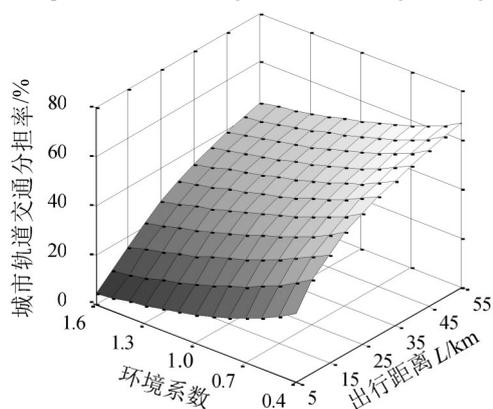


图4 轨道交通分担率与换乘环境的关系

Fig. 4 The relationship between the market share of urban rail transportation and transfer environment

图6和图7分别给出了轨道交通分担率随换乘通道通过能力及换乘站站台容量的变化趋势。可以发现,当换乘通道通过能力及换乘站站台容量相对较小时,换乘拥挤产生的额外费用成为制约乘客选择轨道交通的关键性因素,此外,随着换乘通道及站台能力的逐渐增大,轨道交通分担率呈上升趋势,但上升趋势逐渐减弱。这说明,过小的换乘通道及站台容量会严重影响换乘效率,降低轨道交通分担率;而过大的换乘通道及站台容量并

不会快速提高换乘效率,反而会造成建设成本急剧增加.因此,换乘站应根据换乘流量合理规划换乘通道及站台容量.

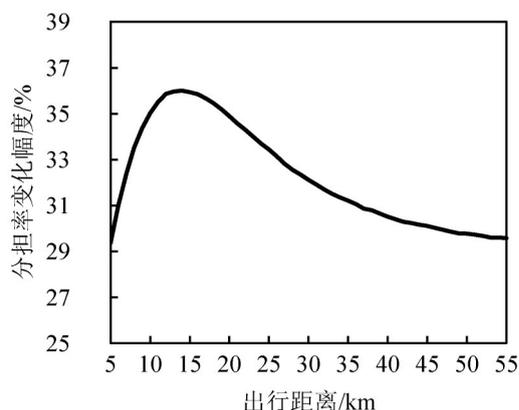


图5 不同出行距离下分担率随换乘环境变化的变化幅度

Fig. 5 The range ability of the market share of urban rail transportation in different travel distance

由图6和图7还可以发现,随出行距离的增加,换乘通道通过能力及换乘站站台容量对轨道交通分担率的影响增强;当 $L=55\text{ km}$ 时,随换乘通道通过能力及换乘站站台容量的增加,轨道交通分担率分别上升了97.6%和54.4%;当 $L=5\text{ km}$ 时,随换乘通道通过能力及换乘站站台容量的增加,轨道交通分担率均仅上升了15.9%和15.3%.这说明,换乘拥挤是影响中长距离乘客进行出行方式选择的重要因素;针对以长距离出行为主的轨道交通线网,应该重点改善换乘通道及站台的服务水平,减少乘客的拥挤感知.

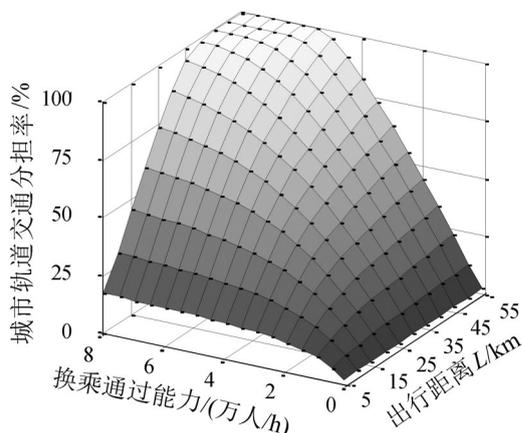


图6 轨道交通分担率与换乘通过能力的关系

Fig. 6 The relationship between the market share of urban rail transportation and transfer trafficability

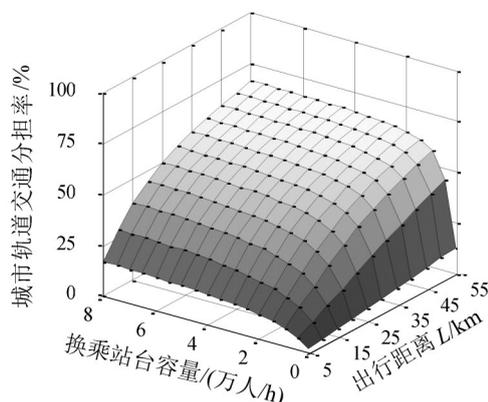


图7 轨道交通分担率与换乘站台容量的关系
Fig. 7 The relationship between the market share of urban rail transportation and the capacity of transfer platform

3 结论

本文在轨道交通广义费用函数中,引入拥挤感知函数、换乘环境感知系数及换乘次数惩罚系数等对乘客主观感知换乘时间进行描述;通过改变平均换乘次数、自由流换乘走行时间、换乘等待时间等,研究换乘效率和环境的改变对不同出行距离乘客分担率的影响,得到的主要结论和建议如下:

换乘次数、换乘走行时间、换乘等待时间及换乘环境的改善能够有效地提高轨道交通的分担率,尤其是对中短距离乘客的影响巨大.因此,针对以中短距离出行为主的轨道交通线网,应该重点改善步行时间长、换乘环境差、线路列车时刻表衔接不到位的车站,提高主要客流方向的直达性.

相较而言,换乘拥挤对长距离乘客的影响更为显著.当换乘通道通过能力及换乘站站台容量较小时,拥挤感知系数会随换乘通道通过能力或换乘站站台容量减小而快速增加,从而严重降低轨道交通的分担率,此时需要重点改善换乘通道及站台容量,以保证轨道交通客流量;当换乘通道通过能力及换乘站站台容量较大时,拥挤感知对乘客出行选择的影响效果下降,此时应从减少平均换乘次数、换乘走行时间等方面入手,提高轨道交通的分担率.

参考文献:

[1] 蒋玉琨.城市轨道交通线网形态对换乘便捷性

- 的影响[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 126-130. [JIANG Y K. The impact of the line network forms of the urban rail transit on the transfer convenience[J]. China Railway Science, 2010, 31(2): 126-129.]
- [2] LEE J Y, LAM W H. Levels of service for stairway in Hong Kong underground stations[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(2): 196-202.
- [3] 李明高, 杜鹏, 朱宇婷, 等. 城市轨道交通换乘节点与网络运行效率关系研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 48-53. [LI M G, DU P, ZHU Y T, et al. Effect of urban rail transit transfer nodes on network performance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2015, 15(2): 48-53.]
- [4] LIU R, PENDYALA R M, POLZIN S. Assessment of intermodal transfer penalties using stated preference data[J]. Transportation Research Record, 1997(1607): 74-80.
- [5] WARDMAN M. A review of British evidence on time and service quality valuations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2001, 37(2): 107-128.
- [6] GUO Z, WILSON H M. Assessing the cost of transfer inconvenience in public transport systems: A case study of the London Underground[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(2): 91-104.
- [7] HAMDOUCH Y, LAWPHONGPANICH S. Schedule-based transit assignment model with travel strategies and capacity constraints[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(7): 663-684.
- [8] 徐瑞华, 罗钦, 高鹏. 基于多路径的城轨交通网络客流分布模型及算法研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 110-114. [XU R H, LUO Q, GAO P. Passenger flow distribution model and algorithm for urban rail transit network based on multi-route choice[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 110-114.]
- [9] 刘剑锋, 孙福亮, 柏赟, 等. 城市轨道交通乘客路径选择模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 81-86. [LIU J F, SUN F L, BAI Y, et al. Passenger flow route assignment model and algorithm for urban rail transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2009, 9(2): 81-86.]
- [10] SI B, ZHONG M, LIU J, et al. Development of a transfer-cost-based logit assignment model for the Beijing rail transit network using automated fare collection data[J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(3): 297-318.
- [11] ORTUZAR J DE D, WILLUMSEN L G. Introduction in modeling transport (3rd) [M]. West Sussex: John Wiley, 2004.
- [12] 刘天亮, 黄海军. 日常择路行为的多智能体模拟[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6321-6325. [LIU T L, HUANG H J. Multi-agent simulation on day-to-day route choice behavior[J]. Acta. Physica Sinica, 2007, 56(11): 6321-6325.]
- [13] 尚华艳, 黄海军, 高自友. 基于元胞传输模型的可变信息标志选址问题研究[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4342-4347. [SHANG H Y, HUANG H J, GAO Z Y. Locating the variable message signs by cell transmission model[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4342-4347.]
- [14] 四兵锋, 毛保华, 刘智丽. 无缝换乘条件下城市轨道交通网络客流分配模型及算法[J]. 铁道学报, 2007, 29(6): 12-18. [SI B F, MAO B H, LIU Z L. Passenger flow assignment model and algorithm for urban railway traffic network under the condition of seamless transfer[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(6): 12-18.]
- [15] HAMDOUCH Y, LAWPHONGPANICH S. Schedule-based transit assignment model with travel strategies and capacity constraints[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(7): 663-684.