

城市公共交通走廊动态客流分析模型

狄 迪, 杨东援

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 为了科学分析和评价城市公共交通走廊的客流流动规律, 研究了走廊内乘客对于出发时刻及交通方式选择的问题, 提出了城市公共交通走廊动态客流分析模型. 模型主要由乘客出发时刻和交通方式选择组合动态均衡分配模型, 以及乘客出行负效用模型两部分构成. 在此基础上, 设计了一套启发式算法求解该模型; 并以上海市的跨江公共交通走廊为案例, 验证所提出的模型和求解算法. 研究结果表明, 该模型能够真实反映城市公共交通走廊内客流的时空分布情况, 以及行程时间、拥挤度及出行费用等因素对乘客出行选择的影响. 所提出的模型可为城市公交走廊内各公共交通方式的合理搭配、运输组织模式优化提供决策支持.

关键词: 城市公交走廊; 动态客流分布; 出发时刻选择; 交通方式选择

中图分类号: U491

文献标志码: A

Dynamic Passenger Flow Analysis Model in Urban Public Transportation Corridor

DI Di, YANG Dongyuan

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For researching the discipline of passenger-flow in urban public transportation corridor, this paper focuses on the problem about passenger departure-time and mode choice behavior along this corridor. A dynamic passenger-flow analysis model is presented, which is composed of two parts. First, dynamic passenger flow equilibrium assignment sub-model, which refers to departure-time and path/mode choice of passenger, is established. Then, the paper proposes passenger travel disutility sub-model. And a heuristic solution algorithm is developed to solve these two sub-models. The paper chooses a real numerical example to illustrate the application of the dynamic passenger flow analysis model and solution algorithm. Based on the analysis result, this model can simulate the time-space distribution of passenger flow in

urban public transportation corridor with a consideration of some factors which influence travel disutility on the departure-time and mode choice behavior of passenger, such as travel time, in-vehicle crowding and so on. Obviously, this dynamic passenger flow analysis model can provide important support for improving the service level and efficiency of urban public transportation corridors.

Key words: urban public transportation corridor; dynamic distribution of passenger-flow; departure-time choice; mode choice

在过去数十年里, 由于经济的快速增长和人口的急速膨胀, 许多亚洲城市的规模扩大了几倍, 如北京、上海等. 与此伴随而来的是交通出行量的爆炸性增长, 交通拥堵情况日益严重. 为了应对这一情况, 这些城市通过设置以轨道交通为主体、常规公交为辅助的公共交通走廊, 对客流进行快速疏散和分流; 在这条如同人体动脉的公共交通走廊上, 集中了城市的重要对外枢纽和大多数客流集散点, 在城市交通中的地位极为重要. 因此, 寻找合理有效的途径, 提高城市公共交通走廊的运输效率, 对城市的发展有决定性意义.

对此, 前人做出了开拓性的研究工作. 研究的焦点首先集中在通过优化城市公共交通走廊内交通方式的设计变量, 如轨道线路长度、站点位置等来提高运输效率; 最早开始于 Vuchic 和 Newell 为优化轨道交通站距而开发的一种连续性分析模型^[1]; 之后, Hurdle 和 Wirasinghe 研究了在非弹性需求条件下城市交通走廊内设置巴士站点位置及站距, 使得系统综合运营费用最小化的相关模型^[2]; 此后, Wirasinghe 研究了非弹性需求条件下城市交通走廊内线路长度与运能最大化的相互关系及模型^[3]; 李志纯等研究了在一条轨道交通走廊设置站点、站距

收稿日期: 2013-12-05

基金项目: 上海市科委重大基础研究项目(12511509600)

第一作者: 狄 迪(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: didi02121226@163.com

通讯作者: 杨东援(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: yangdyk@yahoo.com.cn

使得运营商获得最大利润的方法与模型^[4]. 之后有许多学者试图通过研究公交走廊内交通方式的运输组织模式来提高交通走廊的运输效率,如宋健、徐瑞华等对市域交通走廊内的轨道交通线快慢车开行问题的研究^[5].

然而,仅通过研究公交走廊内交通方式设计变量或运输组织的优化方法,希望从根本上提升城市公交走廊的运输效率是难以奏效的. 前者的研究往往应用于公交走廊的规划及建设阶段,其难以全面考虑到使用后所面临的新问题;而后的研究局限于解决问题的表象,未能触及到产生现象的根源. 基于以上原因,只有对城市公交走廊的客流在时间分布及空间流动这个二元问题做出定量的科学评价——即进行客流分析,探寻在不同时间和空间条件下,走廊内乘客的出行选择特点、不同交通方式的客流流动方向及分布密度等问题,才能找出问题的本质以及可能演化形式和趋势,采取对策从根本上提升公共交通走廊的运输效率. 为此,首先将城市公共交通走廊转化为交通网络形态,基于动态均衡分配理论,构造城市公共交通走廊的乘客出发时刻和交通方式选择的组合动态用户均衡分配模型;之后基于乘客出行选择行为的规律构造乘客出行负效用模型,并与前者组成基于多时段出行的城市公共交通走廊客流分析模型;最后设计了一套启发式算法来求解该模型. 模型将真实地反映公交走廊内客流拥挤的时空分布,以及行程时间、拥挤度及出行费用等因素对乘客出行选择的影响. 所提出的模型可为城市公交走廊内各交通方式的合理搭配、运输组织模式的优化提供决策支持.

1 模型建立

在建立客流分析模型之前,需要明确两个基本概念. 在公交走廊内,出行路径指在走廊内乘客由起点至终点的出行路径,其由一系列节点组成. 出行路径段指连接出行路径上两个连续节点的部分,出行路径是由若干条出行路径段组合而成.

1.1 模型基本假设

整个研究时域 $[0, T]$ 被分割成一系列等长度的时间间隔 $t_s \in \{0, t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 满足 $n(t_n - t_{n-1}) = T$. 其中, $t_n - t_{n-1}$ 是时间间隔长度, n 为时段个数. 假定 T 足够大,以便所有的出行者能够在时间区间 $[0, T]$ 内完成出行过程.

出行者对出发时间的选择是预出行决策,即出

行者在出发前选择出行时间. 该假设已经被许多的相关研究所采用^[6-7].

轨道交通因为有固定的行驶轨道及站点,其行程时间及候车时间在本文的研究中假设是确定的;常规公交受到道路交通环境影响,在本文的研究中假设其存在不确定性.

1.2 出行时刻与路径选择模型

多项式 LOGIT 模型经常被用来研究人们的旅行行为. 如 Ben-Akiva 等利用它来研究旅行者的出发时间和路径选择行为^[8], Bhat^[9] 使用多项式 LOGIT 模型研究交通工具和出发时间选择问题. 出行者到达目的地的时刻等于出发时刻再加上乘坐各种交通工具或步行耗费的时间,本文使用多项式 LOGIT 模型来研究乘客对出发时间的选择决策,有

$$q_{rs}(t) = q_{rs} \cdot \frac{\exp(-\lambda_t C_t)}{\sum_{t \in T} \exp(-\lambda_t C_t)}, \quad \forall r \in R, s \in S, t \in T \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} q_{rs}(t) = q_{rs}, q_{rs}(t) \geq 0, \quad \forall r \in R, s \in S, t \in T \quad (2)$$

式中: $q_{rs}(t)$ 为任意 OD 对间选择 t 时刻出行的客流量; λ_t 为出行者对选择路径的熟悉程度和对出行负效用的理解水平; C_t 为 t 时刻的出行负效用; R 为出行起点集合; S 为出行终点集合; T 为出行可能发生的时域.

接下来讨论时刻 t 出发的乘客对路径的选择,本文基于随机用户均衡分配^[10]建立如下乘客路径选择的流量分配模型:

$$P_a = \frac{\exp(-\theta_a \cdot C_a)}{\sum_{a \in A} \exp(-\theta_a \cdot C_a)}, \quad \forall a \in A \quad (3)$$

式中: P_a 为 OD 对间选择路径 a 的客流出行分担比; θ_a 为基于路径 a 的出行负效用的乘客期望变量,其值与乘客期望成反比; C_a 为路径 a 的出行负效用; A 为公交走廊内各 OD 对间出行路径集合. 且有

$$C_a = \sum_{l \in L} C_{la} \cdot \varphi_{la}, \quad \forall a \in A \quad (4)$$

当路径段 l 位于路径段 a 上时, $\varphi_{la} = 1$,否则 $\varphi_{la} = 0$. C_{la} 为路径段上 l 的出行负效用,得到各路径及路径段的客流分配模型. 其模型为

$$x_a = q_{rs} P_a, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

$$y_l = \sum_{r, s \in R, S} \sum_{a \in A} x_a \varphi_{la}, \quad \forall l \in L, r \in R, s \in S, a \in A \quad (6)$$

式中: q_{rs} 为任意 OD 对间的总客流量; y_l 为路径段 l 上的总客流量; x_a 为路径 a 上的客流量.

1.3 出行负效用模型

1.3.1 出行负效用一般性模型

基于乘客选择行为的一般规律,将行程时间、候车时间、车内拥挤舒适度、票价及到达时刻误差造成的损失等作为影响出行负效用的主要因素,在建立出行负效用一般性模型的基础上,后文将建立行程时间、候车时间及拥挤舒适度评价模型.对于乘客出行时刻选择模型,其负效用应考虑所有影响因素的作用;对于路径和出行方式选择模型,其负效用不包含到达时刻误差损失这一项造成的影响.出行负效用的一般性模型为

$$C = T_s + T_w + \chi Z_m + \gamma \mu_1 P_l + \mu_2 \varphi_l(T_s + T_w + \tau(t)) \quad (7)$$

式中: T_s 为在路径段 l 上的行程时间; T_w 为在路径段 l 上的候车时间; Z_m 为在路径段 l 的车内拥挤舒适度; P_l 为在路径段 l 的乘车票价; χ, γ 分别为出行者对于车内拥挤舒适度、票价的敏感度系数; μ_1, μ_2 为时间-金钱换算系数; $\varphi_l(T_s + T_w + \tau(t))$ 为时段 $T_s + T_w + \tau(t)$ 出行者从起始点到达目的地的早到或迟到引起的损失效用,并将其转换为时间单位.到达时刻误差造成的负效用函数如下:

$$\varphi_l(T_{s1} + T_{w1} + \tau(t)) = \begin{cases} \beta_1 p(t^* - \Delta_s - T_s - T_w - \tau(t)), & T_s + T_w + \tau(t) \leq t^* - \Delta_s \\ \beta_2 p(T_s + T_w + \tau(t) - t^* - \Delta_s), & T_s + T_w + \tau(t) \geq t^* + \Delta_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: p 为出行者的单位时间早到或迟到惩罚基准量; t^* 为上班的准点时间, $[t^* - \Delta_s, t^* + \Delta_s]$ 为出行者可容忍延误惩罚的到达时间窗,如图 1; β_1 和 β_2 分别为出行者早到和迟到的单位时间延误惩罚系数.

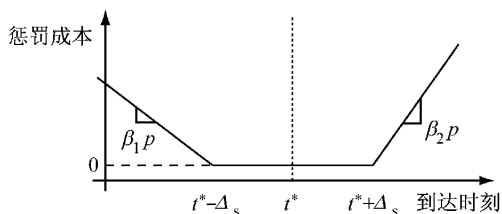


图 1 出行者到达目的地时刻与惩罚成本关系
Fig.1 The relationship between arrival time and punishment cost

1.3.2 基于行程时间负效用的考虑

一般而言,出行者行程时间由两部分构成,即行驶时间和停站时间,即 $T_s = T_{s1} + T_{s2}$. 其中: T_s 为总行程时间, T_{s1} 为行驶时间, T_{s2} 为停站时间. 此处,轨

道交通行驶时间及停站时间确定,可参照运营时刻表;常规公交行驶时间及停站时间存在不确定性,有

$$T_{s1} = E(T_{s1}) + f(\xi_{s1}) \quad (9)$$

$$T_{s2} = E(T_{s2}) + f(\xi_{s2}) \quad (10)$$

式中: $E(T_{s1}), E(T_{s2})$ 分别为 T_{s1}, T_{s2} 的均值; ξ_{s1}, ξ_{s2} 分别为 T_{s1}, T_{s2} 的方差; $f(\xi_{s1}), f(\xi_{s2})$ 为衡量服务水平不可靠性函数,其具体形式根据实际情况确定.

1.3.3 基于车内拥挤舒适度负效用的考虑

根据文献[11-13]的研究,车内拥挤舒适度与对应交通方式的发车频率及载客人数有关,可以采用 BPR 函数(美国联邦公路局路阻函数)来计算各路段的车内拥挤舒适度,并将其转换为时间单位,有

$$z_{l,m} = T_{s1} \left(z_m + \delta_1 \left(\frac{y_{l,m} + \overline{y_{l,m}}}{K_m} \right)^{\alpha_1} \right), \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (11)$$

式中: $z_{l,m}$ 为交通方式 m 在路径段 l 的车内拥挤舒适度; z_m 为交通方式 m 的车内拥挤舒适度基准量; $y_{l,m}$ 为在路径段 l 上乘坐交通方式 m 的客流; $\overline{y_{l,m}}$ 为乘坐交通方式 m 穿越路径段 l 的客流; δ_1, α_1 为非负校核参数; K_m 为交通方式 m 的总客运容量; $K_m = k_m f_m$, k_m 为交通方式 m 单位车额定载客量; f_m 为交通方式 m 的发车频率.

1.3.4 基于乘客候车时间负效用的考虑

乘客在站点的平均候车时间由两部分构成:车辆正常到达等待时间,因客流过大造成的推迟延误时间.类似于文献[14-15]的研究,基于乘客候车时间负效用,通过采用 BPR 函数来构造各路段流量-延误函数,有

$$T_w = T_{w1} + \delta_2 \left(\frac{y_{l,m} + \overline{y_{l,m}}}{K_m} \right)^{\alpha_2}, \quad \forall l \in L \quad (12)$$

$$T_{w1} = T\eta / f_m, \quad \forall m \in M \quad (13)$$

式中: T_{w1} 为在某一站点的平均等待时间; η, δ_2, α_2 为非负校核参数.另外,常规公交到站情况受交通环境影响,则乘客的候车等待时间存在不确定性,有

$$T_{w1} = E(T_{w1}) + f(\xi_{w1}) \quad (14)$$

式中: $E(T_{w1}), \xi_{w1}$ 分别为 T_{w1} 的均值和方差; $f(\xi_{w1})$ 为衡量服务水平不可靠性函数.

2 模型求解

本文设计了一个启发式的算法来求解模型,而此模型求解的问题可分解为出发时刻选择与路径选择两个子问题.对于出发时刻选择、路径选择子问题,均可以采用相继平均法 MSA (method of successive averages) 的算法.具体步骤如下:

步骤1 初始化. 令 $i=1$, 设置 OD 对间的初始需求模式 $\{q_n^{(i)}(t) | q_n^{(i)}(t) = q_n/n\}$.

步骤2 进行路径选择循环迭代.

步骤2.1 (1)根据交通走廊内各交通方式的设置及运行情况, 寻找 OD 对间的有效路径;

(2) $C_a^{(0)} = C_a(0)$, $\forall l$, 令 $m=1$, 此时路径流量 $\{x_a^{(1)}\}=0$; 根据式(3)将初始 OD 需求加载到各 OD 间的有效路径上, 得到初始路径附加客流量 $\{d_a^{(1)}\}$.

步骤2.2 由 MSA 算法, 令: $x_a^{(m+1)} = x_a^{(m)} + \frac{1}{N}(d_a^{(m)} - x_a^{(m)})$, $\forall a \in A$.

步骤2.3 计算 $C_a^{(m)} = C_l(x_a^{(m)})$, 根据公式(3)得到路径附加客流量 $\{d_a^{(m)}\}$.

步骤3 如果满足收敛性准则 $\sum_{m=1}^n \frac{\sqrt{(x_l^{(m)} - x_l^{(m-1)})^2}}{x_l^{(m-1)}} \leq \epsilon$, 则停止迭代, 然后执行步骤4; 否则令 $m=m+1$, 然后转到步骤2.1.

步骤4 根据式(1), 将迭代平衡完成后交通走廊服务网络上任意 OD 对间在各时段的最小出行负效用加载其中, 得到各时段 OD 对间的附加出行需求模式 $d_n^{(i)}(t)$.

步骤5 由 MSA 算法得到 OD 对间的附加出行需求模式, 令

$$q_n^{(i+1)}(t) = q_n^{(i)}(t) + \frac{1}{N}[d_n^{(i)}(t) - q_n^{(i)}(t)],$$

$$\forall r \in R, s \in S$$

步骤6 如果满足收敛性准则 $\sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(q_n^{(i)}(t) - q_n^{(i-1)}(t))^2}}{q_n^{(i-1)}(t)} \leq \epsilon$, 则停止迭代; 否则令 $i=i+1$, 重新执行步骤1, 直到最终得出交通走廊服务网络上各时段的客流分布情况.

有效路径的选择遵循以下原则: ①对于交通走廊内的任意 OD 对, 完成一次出行的换乘(包含轨道与常规公交的换乘、常规公交不同线路的换乘)次数不得超过三次; ②在一次出行中, 不得反复使用同一线路.

3 算例分析

本节以上海跨江公共交通走廊——上海轨道交通2号线及其沿线常规公交线路, 作为模型应用区域进行实证研究, 以验证模型及其算法的有效性. 这主要包括验证模型求解算法的收敛性、模型解的质量及仿真度, 而模型解的质量及仿真度主要基于三个方面进行验证: ①公共交通走廊沿线乘客对于出

行时刻选择的差异性; ②相同出行时刻、不同出行距离的乘客对于出行路径和交通方式的偏好程度; ③相同出行距离、不同出行时刻的乘客对于出行路径和交通方式的偏好程度.

3.1 研究区域概况

上海跨江公共交通走廊是以上海轨道交通2号线为主体, 以若干并列或共线的常规公交线路为补充共同构成. 上海轨道交通2号线全长60 km, 共有30个车站, 横跨上海5个城区, 连接上海虹桥机场、浦东机场及虹桥火车站三个超大型交通枢纽, 截止2012年已成为国内单线运营里程最长, 客流量最大的轨道交通线路. 在轨道交通2号线沿线的不同区域, 常规公交线路分布密度存在区别, 其中在中段、西段和东段与之并列或共线的公交线路分别有7条、4条和2条.

本文选取早上7:30至9:00为研究时段(含早高峰时段), 时间间隔设为15 min, 假设通勤客流的上班时间在早上8:30. 另外, 算例进行以下设定: ①与轨道交通并列或共线的常规公交线路较多, 难以全部列举, 因此算例中在轨道交通沿线东段、中段、西段各设置一条常规公交线路, 其实际分布密度的不同在算例中以发车频率进行区分, 但主要站点与实际一致; ②部分交通走廊沿线的常规公交站点与轨道交通站点相距较近, 算例中将步行距离5 min以内的轨道站点、公交站点视为同一个 OD 点. 如图2所示.

3.2 输入参数设置

算例对模型中的参数作如下设定: 乘客期望变量 $\lambda_r = 0.9$; $\theta_a = 0.9$; 非负修正参数 $\eta = 0.5$; 轨道交通及3条常规公交线路的拥挤度基准量 $z_R = 0.2$, $z_{B1} = 0.15$, $z_{B2} = 0.20$, $z_{B3} = 0.15$; 非负校核参数 $\delta_1 = 0.15$, $\alpha_1 = 3.0$, $\delta_2 = 0.15$, $\alpha_2 = 3.0$; 出行者敏感度系数 $\chi = 1$, $\gamma = 1$; 单位换算系数 $\mu_1 = 2$, $\mu_2 = 2$; 单位时间惩罚基准量 $p = 1$; 早到惩罚系数 $\beta_1 = 1.5$; 晚到惩罚系数 $\beta_2 = 5$; 时间窗长度 $2\Delta_s = 600$ s. 交通走廊沿线客流出行 OD 数据来自上海交通数据研究中心(其数据为2013年6月11日统计的实际数据).

3.3 输出结果及分析

本文用 MATLAB 编程仿真, 对模型进行优化求解. 图3表明随着迭代次数的增加, 求解结果的误差值不断下降. 在经过42次左右的迭代之后, 解的误差值小于0.001, 数值解已经达到了一个满意的精度. 以下对求解结果进行分析.

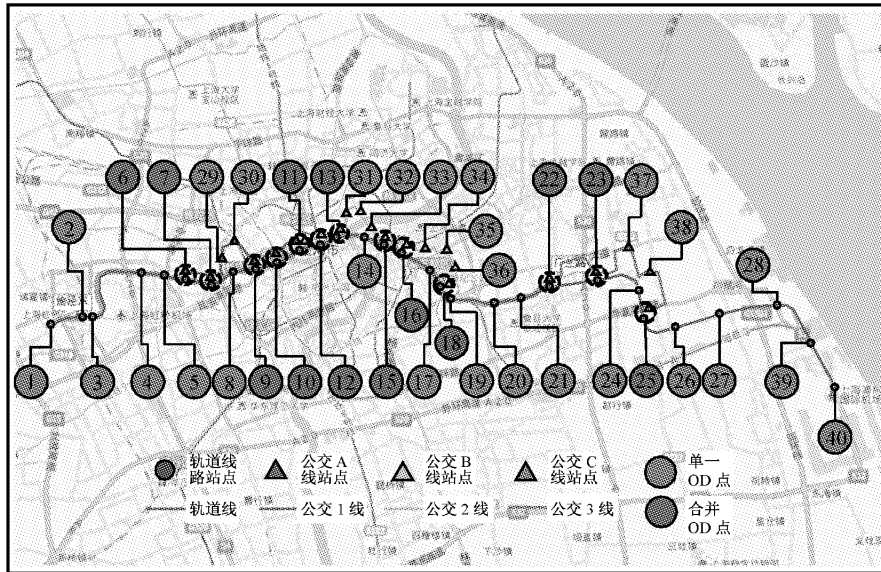


图 2 上海轨道交通 2 号线、沿线常规公交及出行 OD 点分布图

Fig.2 Metro Line 2, Bus Line1/2/3 and OD pairs distribution along the corridor

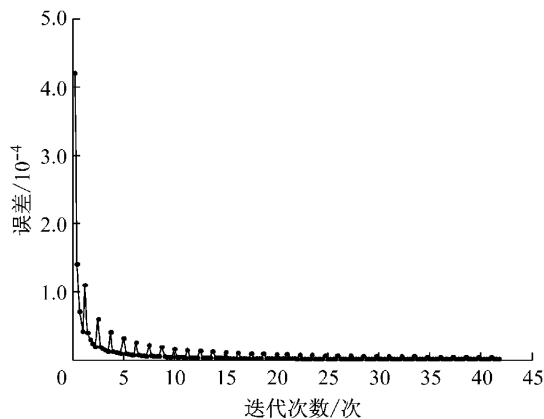


图 3 迭代收敛曲线

Fig.3 Convergence curves of iteration

(1)分析在公交走廊沿线客流的时域分布情况,研究乘客对于出行时刻选择的差异性.由于算例中包含了多达 40 组 OD 对,此处仅选取了 5 组 OD 对进行分析,分别表示近距离出行(8-10、10-12)、中距离出行(7-11、12-18)、远距离出行(4-18),如图 4 所示.从图 4 可以看到:①对于近距离和中距离出行的乘客,大多数出行客流集中在距 8:30(上班时间)之前较近的时段,并随着时间推移逐步增加,在 8:30 之后客流人数随时间推移显著减少;尽管趋势类似,但二者在出行高峰时刻、出行客流分布密度存在区别,相对于中距离出行,近距离出行的流量高峰更接近于 8:30,且客流出行密度在较短时段内更大;②与近距离和中距离出行相比,远距离出行的客流高峰集中在距 8:30 之前的较早时段,且出行客流密度的时域分布较为均匀,这是由于远距离出行导致行程

时间较长所决定,在实际情况中,大量的远距离出行客流导致了在城市部分区域交通早高峰时段较上班时间大大提前.

从分析结果可以看到,出行时刻选择模型能够真实反映不同时段公交走廊沿线的客流出行分布情况:首先,在相同上班时间的前提下,出行距离往往影响乘客对于出行时刻的选择,并由此导致不同 OD 对之间的出行客流密度的时域分布、出行高峰时刻均存在差异;其次,当出行高峰时段的出行负效用过高时,如特别拥挤等,客流可能会选择临近的时段出行,表现为出行客流随着接近、远离高峰时段出现明显的增加和衰减的趋势.

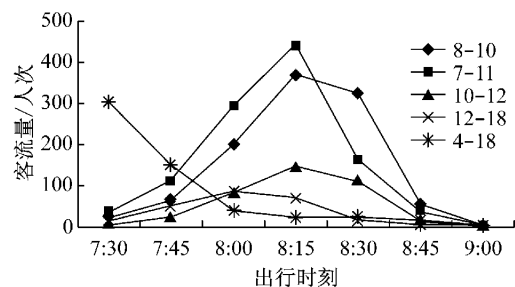


图 4 不同 OD 对在不同时刻的出行客流分布

Fig.4 The distribution of passengers during different departure-time between OD pairs

(2)分析早高峰时段公交走廊沿线不同 OD 对之间的客流分布情况,研究相同出行时刻、不同出行距离乘客对于路径及交通方式选择的偏好.此处选取了 3 组 OD 对进行分析,分别表示近距离出行(9-11)、中距离出行(12-18)、远距离出行(7-18),且这 3

组 OD 对间均同时存在轨道及常规公交两种方式。从表 1 可以看到:①对于近距离出行的乘客,较多客流选择轨道交通,但同时也有相当客流选择常规公交,这是由于在较近的出行距离内两种交通方式的负效用相差不大,乘客依照习惯进行选择;②对于中距离出行的客流,绝大部分客流(82%)选择轨道交通,小部分客流(13%)选择乘坐一站常规公交后换乘轨道交通,而几乎没有乘客会选择常规公交出行,

同时选择两种交通方式换乘模式的客流也可忽略不计,不难看出,轨道交通在中距出行时具有常规公交难以比拟的快捷性和稳定性,与此同时,乘客难以容忍换乘模式带来的负效用增加;在现实中,换乘将使得出行过程的便捷性大大降低;③远距离出行的情况与中距离出行类似,绝大部分客流选择了轨道交通,小部分客流(15%)选择乘坐小段常规公交后换乘轨道交通,选择常规公交、换乘模式的客流几乎没有。

表 1 不同 OD 对之间可选路径及客流分布情况

Tab.1 The volume distribution of passengers in probable paths between different OD pairs

9-11			12-18			7-18		
可选路径	客流量/人次	分担率/%	可选路径	客流量/人次	分担率/%	可选路径	客流量/人次	分担率/%
s9-11	760	64	s12-18	720	82	s7-18	1150	80
s9-10a10-11	60	5	b12-13s13-18	100	13	s7-16b16-18	20	1
a9-10s10-11	40	3	2b12-15s15-18	20	2	a7-9s9-18		150
			s12-13b13-18	20	2	a7-10s10-18		70
a9-11	330	28	s12-15b15-18	<1	<1	a7-11s11-18	30	3
			b12-18	<1	<1	a7-11b11-18	<1	<1
总计	1 190	100	总计	860	100	总计	1 400	100

注:s 表示轨道线路;a,b 表示公交 a,b 线。

从分析结果可以看到,路径选择模型能够真实反映在公交走廊内客流分布的情况:首先,乘客对于路径和交通方式选择与出行的距离相关,距离越远,选择轨道交通的客流比例越大;其次,一般情况下,乘客更偏爱选择单一的交通方式出行,而非换乘模式。此外,乘客出行负效用模型能够真实还原乘客在城市公共交通走廊的路径和交通方式选择行为,即乘客对于各种影响出行负效用因素在不同的出行路径和交通方式的感知程度存在差异。

(3)分析公交走廊沿线同一 OD 对之间在不同时段的客流分布情况,研究相同出行距离、不同出行时刻的乘客对于出行路径和交通方式选择的偏好。此处选取 OD 对 9-11 进行分析,列举了在 3 个出行时段路径和交通方式选择的偏好及客流分担率。从

表 2 可以看到:①在 3 个出行时段中,大部分客流选择轨道交通,但同时仍有相当客流选择了常规公交,其总体趋势相同,符合前文分析的结论;②当出行时刻越接近客流出行高峰时刻,更多的客流放弃常规公交转而选择轨道交通,不难理解,越接近高峰时刻,乘客往往更倾向于轨道交通的准时性与可靠性,同时往往会忽略由于客流增加造成舒适性下降等问题。

从分析结果可以看到:首先,路径选择模型能够真实反映在公交走廊内客流分布的情况,即客流总是优先选择出行负效用更小的路径和交通方式;其次,乘客出行负效用模型能够真实还原乘客在城市公共交通走廊的路径和交通方式选择行为,即在不同出行时刻,乘客对于影响出行负效用的因素的感知程度存在差异。

表 2 OD 对 9-11 之间不同出发时段的可选路径及客流分布情况

Tab.2 The volume distribution of passengers in different departure-time between OD 9-11

可选路径	7:45~8:00		8:00~8:15		8:15~8:30(高峰)	
	客流量/人次	分担率/%	客流量/人次	分担率/%	客流量/人次	分担率/%
s9-11	123	58	426	60	760	64
s9-10a10-11	6	3	36	5	60	5
a9-10s10-11	4	2	21	3	40	3
a9-11	80	37	227	32	330	28
总计	213	100	710	100	1 190	100

4 结论

本文旨在研究基于动态条件下的城市公交走廊

客流分布规律,并建立了相应的客流分析模型,由两部分组成:①基于动态均衡分配理论,建立乘客出发时刻和路径选择的组合动态用户均衡分配模型,以此作为乘客出行时刻、路径和交通方式选择的依据;

②建立乘客出行负效用模型,分别将行程时间、车内拥挤度、平均候车时间、票价及到达时刻误差造成的损失作为影响乘客出行负效用的主要因素。

基于建立的客流分析模型,设计了一个启发式的算法来求解该模型。通过上海市跨江公交走廊作为研究案例,利用 MATLAB 程序对案例进行仿真求解并得出结果,其结论主要有:①对于相同的上班时刻,不同 OD 对之间的客流出行时刻及高峰时刻是不同的,与出行距离密切相关,出行距离越短,其客流出行高峰时刻越接近上班时刻,且客流在较短的时段内出行密度更大,反之亦然;②在相同出行时刻,不同出行距离的客流对于路径和交通方式的选择受到出行距离影响,虽然大多数客流在不同距离的出行中始终更偏向选择轨道交通,但出行距离越短,客流选择常规公交出行的相对比例越高;③对于相同出行距离,不同出行时刻的客流在对于路径和交通方式的选择上存在差异,越接近出行高峰时刻,选择轨道交通出行的客流比例越高。

通过以上结论可以得出,基于多时段出行的公交走廊客流分析模型对实际案例的仿真结果与现实情况相符合,对城市公交走廊管理水平和运营效率的提升有现实意义。主要建议有:①基于不同时段,合理安排公交走廊内轨道交通、常规公交的运营时刻表,提高运输效率;②基于出行距离的远近,科学搭配轨道交通与常规公交的运输组织模式,合理分担客流;③进一步提高各交通方式服务水平,行程时间可靠性、行程舒适性及出行费用等因素都将大大影响人们的选择行为。

参考文献:

- [1] Vuchic V R, Newell G F. Rapid transit interstation spacing for minimum travel time [J]. *Transportation Science*, 1968, 2 (4): 303.
- [2] Wirasinghe S C, Ghoneim U S A. Spacing of bus-stops for many to many travel demand [J]. *Transportation Science*, 1981, 15 (3): 210.
- [3] Wirasinghe S C, Seneviratne P N. Rail line length in an urban transportation corridor [J]. *Transportation Science*, 1986, 20 (4): 237.
- [4] Li Z C, William H K L, Wong S C. Design of a rail transit line for profit maximization in a linear transportation corridor [J]. *Transportation Research Part E*, 2012, 48(1): 50.
- [5] 宋键,徐瑞华,缪和平. 市域快速轨道交通线开行快慢车问题的研究 [J]. *城市轨道交通研究*, 2006(12): 23.
SONG Jian, XU Ruihua, MIAO Heping. Problems of operating the express/slow train on the regional urban rail transit line [J]. *Urban Mass Transit*, 2006(12): 23.
- [6] William H K L, Li Z C, Huang H J, et al. Modeling time-dependent travel choice problems in road networks with multiple user classes and multiple parking facilities [J]. *Transportation Research Part B*, 2006, 40(5): 368.
- [7] Li Z C, William H K L, Wong S C, et al. Reliability evaluation for stochastic and time-dependent networks with multiple parking facilities [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2008, 8(4): 355.
- [8] Ben-Akiva M, de Palma A, Kanaroglou P. Dynamic model of peak period traffic congestion with elastic arrival rates [J]. *Transportation Science*, 1986, 20(2): 164.
- [9] Bhat C R. Analysis of travel mode and departure time choice for urban shopping trips [J]. *Transportation Research Part B*, 1998, 32(6): 361.
- [10] Sheffi. *Urban transportation networks* [M]. New York: Prentice-Hall, 1985.
- [11] Spiess H, Florian M. Optimal strategies: a new assignment model for transit networks [J]. *Transportation Research Part B*, 1989, 23(2): 83.
- [12] Wu JH, Florian M, Marcotte P. Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms [J]. *Transportation Science*, 1994, 28(3): 193.
- [13] Lo H K, Yip C W, Wan K H. Modeling transfer and non-linear fare structure in multi-modal network [J]. *Transportation Research Part B*, 2003, 37(2): 149.
- [14] De Cea J, Fernandez E. Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model [J]. *Transportation Science*, 1993, 27(2): 133.
- [15] Lo H K, Yip C W, Wan K H. Modeling competitive multi-modal transit services: a nested logit approach [J]. *Transportation Research Part C*, 2004, 12(3): 251.