

基于人群分类的城市公交走廊客流分配模型

狄 迪, 杨东援

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 在随机用户均衡理论基础上, 在静态均衡模型中引入时间变量及人群属性分类, 建立基于人群分类的城市公交走廊动态客流分析模型, 描述了走廊内出行者对于出发时刻和路径的选择问题, 并分析不同人群的行为差异. 给出了模型的基本假设及求解算法. 研究结果表明, 模型的动态化及人群分类特征, 不仅能够真实反映走廊内不同属性客流的时空分布情况, 还能够仿真不同交通措施的作用及效果. 算例通过采取错峰上班及调整票价, 使高峰时刻走廊断面客流下降24%; 选择轨道交通的客流由82%下降71%, 选择巴士交通的客流由11%提升至20%, 有效降低了公交走廊的交通负荷, 并使各方式分担率更加均匀. 此动态客流分析模型为城市公交走廊的功能优化提供了有力工具.

关键词: 公交走廊; 客流; 人群分类; 动态分配; 时空分布

中图分类号: U491

文献标志码: A

A Passenger-Classification Transportation Assignment Model for Urban Public Traffic Corridor

DI Di, YANG Dongyuan

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

Abstract: By classifying transport passengers, this paper proposed a dynamic traffic assignment model for urban public transport corridor. Based upon the stochastic user-equilibrium theory, the proposed model introduced temporal factors and passenger attributes into the existing static equilibrium model. The model aimed to simulate the travel behavior of different passengers, including their selection of the departure time and transit routes. The assumption of the proposed model and a solution algorithm were proposed. The result shows that the time-varying and passenger categorization of the model make it available not only to virtually reflect the temporal and spatial distribution of various passengers, but to investigate the efficiency of different improvement measures for corridors. The adjustments made in the working hour and

transit fare lead to a 24% reduction in the passenger flow during peak hours. The passengers of rail transit decrease from 82% to 71%, while the passengers of bus increase from 11% to 20%. These adjustments contribute to a significant reduction in the traffic loading and result in a more even utilization of transport modes. Therefore, the proposed model provides a useful tool for function optimization and efficiency enhancement of urban public transport corridors.

Key words: public traffic corridor; passenger flow; passenger classification; dynamic assignment; temporal and spatial distribution

在过去的数十年里, 伴随经济增长和人口膨胀, 许多亚洲城市的交通出行量快速增长, 交通拥堵情况日益严重. 为了应对这一问题, 这些城市通过设置以轨道交通为主体、常规巴士为辅助的公共交通走廊, 对客流进行快速疏解和分流. 因此, 提高公交走廊的运输效率已成为这些城市的重大课题, 对走廊内客流的合理分析成为制定改善措施的主要依据.

客流分析的目的是了解客流的时-空分布, 其本质是客流的分配问题. 最早的客流均衡分配起源于Wordrop所提出均衡分配原理; Dafermos研究了非对称型网络费用下的客流分配问题, 提出了非线性互余模型和变分不等式模型^[1]; Sheffi提出基于固定需求的分布-分配组合用户平衡模型^[3]; Magnanti等对静态非对称型网络客流分配问题进行深入研究, 给出了变分不等式的统一几何解法^[3]. 必须指出, 上述模型仅能研究静态交通网络的客流分配问题, 即只能反映客流在网络中的空间分布. 这是由于这些模型不含时间维度, 无法描述时间与客流出行的相互关系; 而现实中, 不同时段의客流出行分布差别极大.

因此, 关于动态客流分配的研究逐渐出现. 其数

收稿日期: 2015-01-19

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@tongji.edu.cn

学规划模型研究源于 Merchant 和 Nemhauser 提出的动态交通分配模型^[4]; Carey 证明该模型满足线性无关的约束,并将其改进为非线性凸规划模型^[5]; Birge 和 Ho 将 M-N 模型推广到随机的情形中^[6]; Ziliaskopoulos 提出了单一终点的随机动态线性规划模型^[7]. 与静态模型相比,现有动态分配模型能够描述客流在网络内的时-空分布,但未能考虑出行人群的分类问题,由此产生出行行为的差异化,使分配结果与现实存在较大误差.

Johansson 等研究了出行者的社会经济属性、态度偏好等因素对选择交通方式的影响,并获得各因素的影响权重^[8]. Domarchi 等则针对大学教师这一特定出行人群,研究了影响其选择交通方式的因素,并与其他人群的选择行为进行了类比^[9]. Choo 和 Mokhtarian 则研究了不同人群的社会经济属性、生活态度等因素对其选择行为的影响^[10]. 不难看出,不同类别的出行者由于社会经济属性或性格偏好方面的差异,出行行为存在显著区别,这一影响因素难以忽视.

本文对以往研究成果做了进一步拓展,具体包括:① 在以往静态均衡模型中引入时间变量及人群属性分类,构建基于人群分类的动态客流分配模型;② 依据不同影响因素构造基于时刻选择和路径选择的负效用模型,并与现实情况一致;③ 设计了客流分析模型的基本假设和求解算法;④ 以客流分析模型作为工具,通过算例仿真客流在走廊的分配及改善措施的效果.

1 人群属性分类

城市公交走廊内的客流具有多样性,不同人群的出行行为千差万别. 因此,研究城市公交走廊内客流的时空分布及演化规律,需要依据不同属性将客流划分为多类人群.

划分人群类别的指标有很多,包含社会经济属性、性格偏好、出行目的等多个类别. 本文在结合实际问卷调查(轨道交通 700 份,常规巴士 300 份)的基础上,将工作类型、收入水平及出行目的作为人群分类的基本依据,这 3 个指标对人们在出发时刻、方式选择上有重要影响. 首先,工作类型决定出行者对于行程时间稳定性的要求,例如固定职业者与自由职业者相比,对于稳定出行时间的诉求要高得多. 其次,收入水平决定了出行者对于出行费用的承受能力,一般而言,低收入人群对于票价的敏感程度远高

于高收入人群. 再次,出行目的决定人们对于行程时间稳定性、舒适性等方面的敏感程度,在调查中可以得知,以通勤为目的的出行者往往极为追求行程时间的稳定性,而以旅行、购物为目的的出行者则将出行的舒适性放在首位. 基于以上分析,将出行人群分为蓝领工人、白领职员以及个体商人 3 类.

此次问卷调查发现,工作通勤客流在早高峰时段占出行客流的绝大多数,这与上海市公交客流统计情况一致,由此本文将研究聚焦于工作通勤人群,并以此分类. 但值得注意的是,如果需要考虑更全面的客流出行,可以将客流分为通勤、通学以及自由客流等大类;若按出行目的进行分类,客流还可以分为上班/学、旅行、购物人群等. 由此可知,人群分类的本质应由研究目的决定,并在之前的问卷调查中予以考虑.

2 模型建立

在建立客流分析模型前,需要明确两个基本概念. 在本文研究的公交走廊内,出行路径指乘客由起点至终点的出行轨迹,由一系列节点组成. 出行路径段指连接出行路径上任意两个连续节点的部分,即出行路径是由若干条出行路径段组合而成.

2.1 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 $t \in \{0, t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 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. 该假设已经被许多以前的相关研究所采用,如 Lam 等^[11]和 Li 等^[12].

轨道交通列车按图行车,行程时间及候车时间在本研究中假设是确定的;常规巴士受到道路交通环境影响,在本研究中假设其存在不确定性.

2.2 出行时刻选择模型

多项 Logit 模型经常被用来研究人们的出行行为^[13]. 因此,本文使用多项 Logit 模型来研究不同人群对出发时间的选择决策,有

$$q_{rs,m}(t) = q_{rs,m} \cdot \frac{\exp(-\lambda_m \cdot C_{t,m})}{\sum_{t \in T} \exp(-\lambda_m \cdot C_{t,m})},$$

$$\forall r \in R, s \in S, m \in M, t \in T \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} q_{rs,m}(t) = q_{rs,m}, q_{rs,m}(t) \geq 0,$$

$$\forall r \in R, s \in S, m \in M, t \in T \quad (2)$$

式中: T 为可能的出行时段; R 为出行起点集合; S 为出行终点集合; M 为出行人群分类的集合; $q_{rs,m}(t)$ 为任意 OD 对间第 m 类人选择 t 时刻出行的客流量; $q_{rs,m}$ 为第 m 类人在任意 OD 对间的总客流量; $C_{t,m}$ 为第 m 类人 t 时刻的出行负效用; λ_m 为第 m 类人对选择路径的熟悉程度和对出行负效用的理解水平。

本文主要考虑了到达目的地的实际时间与预期

$$\varphi_{l,m}(T_s + T_w + \tau(t)) = \begin{cases} \beta_{1,m} p_m(t^* - \Delta_{s,m} - T_s - T_w - \tau(t)), & T_s + T_w + \tau(t) \leq t^* - \Delta_{s,m} \\ \beta_{2,m} p_m(T_s + T_w + \tau(t) - t^* - \Delta_{s,m}), & T_s + T_w + \tau(t) \geq t^* + \Delta_{s,m} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_m 为第 m 类人的单位时间早/迟到惩罚基准量; t^* 为上班的准点时间; $[t^* - \Delta_{s,m}, t^* + \Delta_{s,m}]$ 为第 m 类人可容忍延误惩罚的到达时间窗, 如图 1 所示; $\beta_{1,m}$ 和 $\beta_{2,m}$ 分别为第 m 类人早到和迟到的单位时间延误惩罚系数。

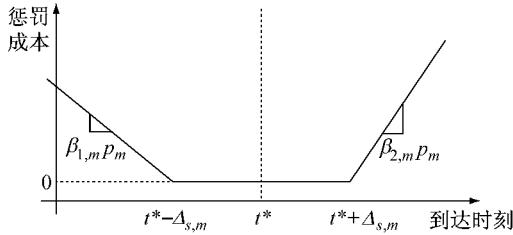


图1 出行者到达目的地时刻与惩罚成本关系

Fig.1 Arrival time of passengers vs penalty cost

2.3 出行路径选择模型

对于走廊内不同人群的路径选择问题, 本文基于随机用户均衡分配(SUE)的理论, 采用 Probit 模型构建出行路径选择模型, 包含路径选择、出行负效用两个部分。

2.3.1 路径选择

(1) 当选择路径为 2 条时, Probit 模型为

$$\begin{aligned} P_{1,m} &= \text{Prob}(C_{1,m} \geq C_{2,m}) = \\ &= \text{Prob}((C_{2,m} - C_{1,m}) \leq 0) \\ P_{1,m} &= \varphi\left(\frac{V_{2,m} - V_{1,m}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho_{12}\sigma_1\sigma_2}}\right), P_{2,m} = 1 - P_{1,m} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ρ_{12} 为两变量的相关系数; φ 为标准正态分布函数。

(2) 当选择路径数量大于 2 条时, 路径选择问题可以通过式(5)扩展得到

$$\begin{aligned} \max(C_{1,m}, C_{2,m}, \dots, C_{A,m}) &= \max\{\max \dots \\ &\max[\max(C_{1,m}, C_{2,m}), C_{3,m}] \dots C_{A,m}\} \end{aligned} \quad (6)$$

且有

时间的误差(早到或迟到)对于人们选择出发时刻的影响, 并以此构建基于出行时刻选择的负效用模型

$$C_{t,m} = \varphi_{l,m}(T_s + T_w + \tau(t)) \quad (3)$$

式中: $\varphi_{l,m}(T_s + T_w + \tau(t))$ 为时段 $T_s + T_w + \tau(t)$ 第 m 类人到达时刻误差(早到或迟到)造成的损失; T_s 为出行行程时间; T_w 为出行候车时间。到达时刻误差造成的负效用函数如下:

$$C_{A,m} = \begin{bmatrix} C_{1,m} \\ C_{2,m} \\ \vdots \\ C_{A,m} \end{bmatrix} \sim \text{MVN} \left[\begin{bmatrix} V_{1,m} \\ V_{2,m} \\ \vdots \\ V_{A,m} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1a} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2a} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{a1} & \sigma_{a2} & \dots & \sigma_a^2 \end{bmatrix} \right] \quad (7)$$

式中: A 为交通走廊内各 OD 对间出行路径集合; $P_{a,m}$ 为 OD 对间第 m 类人选择路径 a 的客流出行分担比; $C_{a,m}$ 为第 m 类人在路径 a 的出行负效用; $V_{a,m}$ 为出行负效用的固定项; σ_{aj} 为不同出行路径的负效用协方差; MVN 代表多维正态分布(multivariate normal distribution)。路径 a 的负效用 $C_{a,m}$ 为其各路段的负效用 $C_{l,a,m}$ 构成, 则各路径及路段的客流量为

$$x_{a,m} = q_{rs,m} \cdot P_{a,m}, \quad \forall m \in M, a \in A \quad (8)$$

$$\begin{aligned} y_{l,m} &= \sum_{r \in R, s \in S} \sum_{a \in A} x_{a,m} \cdot \varphi_{la}, \\ \forall l \in L, m \in M, a \in A \end{aligned} \quad (9)$$

式中: L 为路段的集合; $x_{a,m}$ 为第 m 类人在路径 a 上的客流量; $y_{l,m}$ 为路段 l 上的客流总量; 当路段 l 位于路径 a 上时 $\varphi_{la} = 1$, 否则为 0。

2.3.2 出行负效用

本文主要考虑了行程时间、候车时间、车内拥挤度及票价等方面对于人们路径选择的影响, 并以此构建基于出行路径选择的负效用模型

$$C_{a,m} = \alpha \cdot \chi_m Z + \beta \cdot T_s + \gamma \cdot T_w + \eta \cdot \gamma_m \mu P \quad (10)$$

式中: Z 为出行时的车内拥挤度; P 为乘车票价; χ_m , γ_m 分别为第 m 类人对于车内拥挤度、票价敏感系数; 为了计算方便, 本文的负效用统一换算到以时间为量纲, 则 μ_2 为时间-金钱换算系数; $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 均为各因素对于负效用影响权重参数。

(1) 车内拥挤度模型

根据 Wu 等^[14] 和 Lo 等^[15] 的研究, 车内拥挤度

与交通方式的发车频率及载客人数有关. 此处采用 BPR 函数计算, 并转换为时间单位

$$Z_{l,v} = T_{s1} \cdot \left(z_v + \delta_1 \cdot \left(\frac{y_{l,v} + \bar{y}_{l,v}}{K_v} \right)^{\rho_1} \right), \quad \forall l \in L, v \in V \quad (11)$$

式中: V 为走廊内各交通方式集合; $Z_{l,v}$ 为方式 v 在路径段 l 的车内拥挤度; z_v 为方式 v 的车内拥挤度基准量; $y_{l,v}$ 为在路径段 l 上乘坐方式 v 的客流; $\bar{y}_{l,v}$ 为乘坐方式 v 穿越路径段 l 的客流; K_v 为方式 v 的总客运容量; δ_1, ρ_1 为非负校核参数, 且有 $K_v = k_v \cdot f_v$; k_v 为方式 v 单位车额定载客量.

(2) 行程时间模型

本文的出行者行程时间由两部分构成, 即行驶时间和停站时间, 即 $T_s = T_{s1} + T_{s2}$, 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

$$T_{s1} = E(T_{s1}) + f(\xi_{s1}) \quad (12)$$

$$T_{s2} = E(T_{s2}) + f(\xi_{s2}) \quad (13)$$

式中: $E(T_{s1}), \xi_{s1}$ 和 $E(T_{s2}), \xi_{s2}$ 分别为 T_{s1}, T_{s2} 的均值和方差; $f(\xi_{s1}), f(\xi_{s2})$ 均为衡量服务水平不可靠性函数.

(3) 候车时间模型

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 de Cea 等^[16]和 Lo 等^[17]的研究, 采用 BPR 函数来构造候车时间负效用模型, 有

$$T_w = T_{wl} + \delta_2 \cdot \left(\frac{y_{l,v} + \bar{y}_{l,v}}{K_v} \right)^{\rho_2}, \quad \forall l \in L \quad (14)$$

$$T_{wl} = T \cdot \lambda / f_v, \quad \forall l \in L, \forall v \in V \quad (15)$$

式中: T_{wl} 为在交通方式 v 某一站点的平均等待时间; T 为研究的时域; $\lambda, \delta_2, \rho_2$ 为非负校核参数.

3 模型求解

本节设计了一个启发式算法来求解客流分析模型, 模型求解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, 将所有 OD 对间的客流按人群属性分类;

步骤 2 令 $i=1$, 设置各类人群在各 OD 对间、不同时段 of 的初始出行量 $\{q_{rs,m,i}(t) | q_{rs,m,i}(t) = q_{rs,m}/n\}$;

步骤 3 开始对各类人群进行路径选择的循环迭代;

步骤 3.1 ①根据交通走廊内各交通方式的设置及运行情况, 寻找各 OD 对间的有效路径;

② $C_{a,m,0} = C_{a,m}(0), \forall l$, 令 $i=1$, 此时路径流量 $\{x_{a,m,1}\} = 0$; 根据公式(5)和(6)将各 OD 对间的初始出行量加载到各自有效路径上, 得到各路径初始客流量 $\{d_{a,m,1}\}$;

步骤 3.2 由 MSA 算法, 令 $x_{a,m,i+1} = x_{a,m,i} + \frac{1}{N}(d_{a,m,i} - x_{a,m,i}), \forall a \in A$;

步骤 3.3 计算 $C_{a,m} = C_{a,m}(\sum_{m \in M} x_{a,m})$, 根据公式(5)和(6)得到各路径附加客流量 $\{d_{a,m}\}$;

步骤 4 如果满足收敛性准则 $\sum_m \frac{\sqrt{(x_{l,m,i} - x_{l,m,i-1})^2}}{x_{l,m,i-1}} \leq \epsilon$, 则停止迭代, 得到第 m 类人在某一时段、各 OD 对间所有有效路径的客流量, 然后执行步骤 5; 否则令 $i=i+1$, 转到步骤 3.1;

步骤 5 路径选择迭代完成后, 计算各 OD 对间基于出发时刻的负效用, 并加载于式(1), 得到各类人群不同时段各 OD 对间的附加出行量 $d_{rs,m,i}(t)$;

步骤 6 由 MSA 算法得到各 OD 对间不同时段 of 的修正附加出行量, 令

$$q_{rs,m,i+1}(t) = q_{rs,m,i}(t) + \frac{1}{N}[d_{rs,m,i}(t) - q_{rs,m,i}(t)],$$

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

步骤 7 如果满足收敛性准则 $\sum_i \frac{\sqrt{(q_{rs,m,i}(t) - q_{rs,m,i-1}(t))^2}}{q_{rs,m,i-1}(t)} \leq \epsilon$, 则停止迭代; 否则令 $i=i+1$, 重新执行步骤 1, 直到最终得到各类人群在不同时段 of 的客流出流量.

有效路径的选择遵循以下原则: ①对于走廊内的任意 OD 对, 完成 1 次出行的换乘(包含同方式及不同方式)次数不得超过 3 次; ②在 1 次出行中, 不得重复使用同一线路.

4 算例分析

以上海市公共交通走廊(含轨交 2 号线及沿线的常规巴士)作为模型应用区域进行实例研究, 以验证客流分析模型及其算法的有效性.

4.1 研究区域概况

上海轨交 2 号线全长 60 km, 共有 30 个车站, 连接机场及高铁站等大型交通枢纽. 同时, 轨交沿线存

在相当数量的常规巴士线路,在中段、西段和东段与之并列或共线的巴士线路分别有7条、4条和2条。

本文选取早上7:30至9:00为研究时段,以15 min为间隔将这一时段划分为6个部分;假设通勤者的上班时间为早上8:30。算例进行以下设定:①在走廊中段、西段和东段的常规巴士线路分别以公

交1线、2线、3线表征,以发车频率间接表征线路的数量,但站点与实际一致;每一个轨道站点或巴士站点均为OD点;②走廊沿线的部分常规巴士站点与轨交站点相距较近,算例中将步行距离5 min以内的轨道站点、公交站点合并为一个OD点,如图2所示。

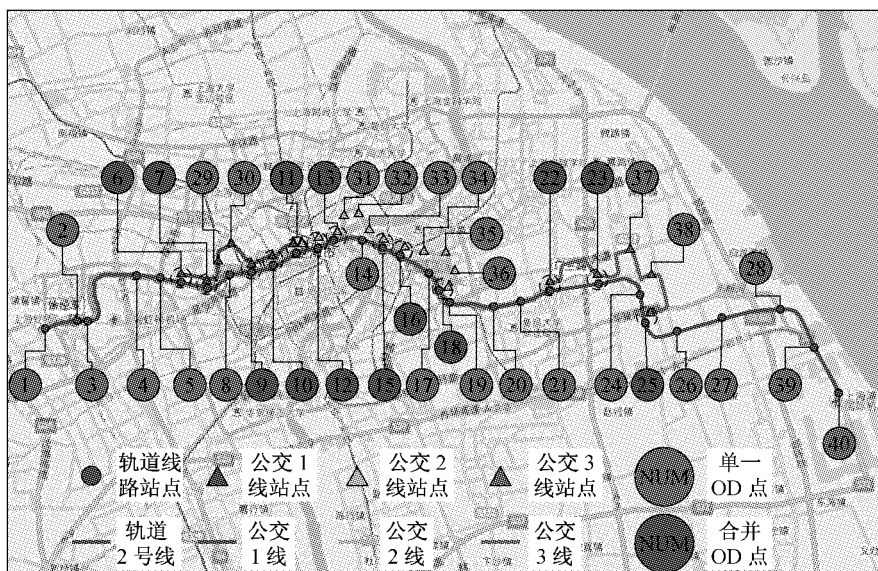


图2 走廊沿线交通方式及站点分布图

Fig.2 Traffic lines and stations along the corridor

4.2 输入参数设置

算例对模型参数设置如下:乘客期望变量 $\lambda_w = 0.8$ (与通勤客流对出行环境的熟悉程度相匹配),轨道交通及3条常规公交线路的拥挤度基准量 $z_R = 0.2$, $z_{B1} = 0.15$, $z_{B2} = 0.20$, $z_{B3} = 0.15$ (与实际拥挤程度相适应)。算例中蓝领工人、白领职员以及个体商

人的比重依次为50%、40%和10%,且与人群属性设定相关的参数来源于问卷调查结果,如表1所示。客流出行OD数据来自上海交通大学数据中心(2013年6月12日的实际数据),轨道交通及常规巴士的行程时间来源于上海申通集团及各巴士公司的发车时刻表。

表1 基于3类人群属性的模型参数设置

Tab.1 Model parameters for three types of passengers

人群属性	参数									
	χ_m	γ_m	$\beta_{1,m}$	$\beta_{2,m}$	λ_m	α	β	γ	η	时间窗长度/s
蓝领工人	1.0	3.0	1.2	3.0	0.8	0.3	0.4	0.2	0.4	600
白领职员	2.5	1.0	2.0	5.0	0.8	0.5	0.4	0.4	0.2	420
个体商人	2.0	1.5	1.0	1.5	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2	1 800

4.3 输出结果及分析

本文利用MATLAB软件对模型进行优化求解,如图3所示。随着迭代次数的增加,求解结果的误差值不断下降,在经过多次迭代之后,解的误差小于0.001,已经达到满意精度。以下分析算例结果。

首先,分析公交走廊沿线出行人群对于出发时刻的选择,以OD(7-11)进行说明,如图4所示。可以看到:①绝大部分出行者均会选择在其上班时间之

前的某一时段内出发,人们选择最多的时刻即为出发高峰时刻,且出行距离越远,出发高峰时刻出现越早;在现实中,交通早高峰出现的时刻较上班时间总是大大提前。②不同属性的人群对于出发时刻的选择存在显著差异,在上班时间相同的等距离出行条件下,蓝领工人的出发高峰时刻到来得最早,白领职员稍晚,个体商人则无明显出发高峰;这一差异可能是由于人群对应的经济水平或工作属性不同所致,

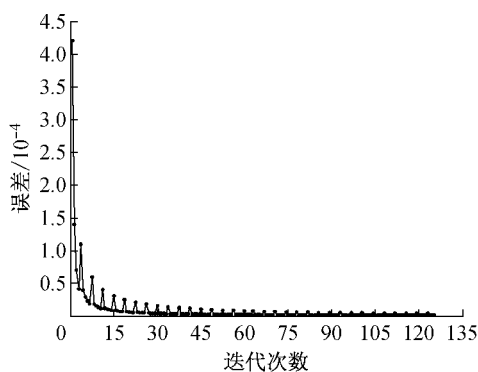


图 3 误差迭代收敛曲线

Fig.3 Solution error vs iteration

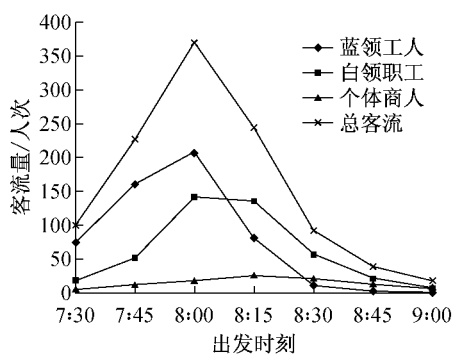


图 4 基于多属性人群的客流出发时刻分布图

Fig.4 Distribution of passenger volume at different departure time based on passengers attributes

表 2 OD 7-11 客流高峰时段分布情况

Tab.2 Distribution of peak passenger volume

可选路径	蓝领工人		白领职员		个体商人		总客流	
	客流吸引量/ 人次	客流分担率/ %	客流吸引量/ 人次	客流分担率/ %	客流吸引量/ 人次	客流分担率/ %	客流吸引量/ 人次	客流分担率/ %
s7-11	169	81.0	121	85.0	16	67	306	82
s7-10a10-11	4	2.0	4	2.5	3	13	10	3
s7-9a9-11	3	1.5	3	2.0	1	4	7	2
a7-9s9-11	2	1.0	3	2.0	1	4	7	2
a7-10s10-11	1	0.5	1	0.5	1	4	3	1
a7-11	28	14.0	10	8.0	2	8	40	11
总计	207	100.0	142	100.0	24	100	373	100

最后,比较 7:30~8:15 时段内,OD(9-11)乘客出行特征,如表 3 所示.可以看出:人群属性对其出行选择影响显著.当出行时刻越接近上班时间,蓝领工人和白领职员选择轨道交通的比例就越大,而个体商人的选择却刚好相反.原因在于前两者都强调上班的准时性,即当出行时刻越晚,其对交通方式的可靠性要求越高;而后者由于职业自由度高,在面对高峰时段轨道交通极为拥挤的情况,宁愿选择可靠性低但更舒适的交通方式.

从以上分析可以看出,基于多属性人群的客流分析对于分析公交走廊沿线的客流情况乘客出行行

造成其对于交通方式的选择及时间价值的认知存在较大区别.由以上结论可以看到,客流分析模型能够准确反映人群在公交走廊沿线的出行时域特征,与静态模型相比,动态化的客流分析能够有效确定出发高峰时刻,而基于多属性人群的客流分析能够比较不同出行者对于出发时刻选择的差异性.

其次,分析公交走廊沿线的出行人群在出行高峰时段对于交通方式的选择,以 OD(7-11)进行说明,如表 2 所示.表中,s 表示轨道线路,a 表示公交线路.可以看到:① 绝大部分出行者选择全程以轨道交通作为出行方式,较少部分出行者选择全程以巴士作为出行方式,而选择两种交通方式换乘模式出行的客流几乎可以忽略不计;可见交通换乘对乘客出行选择的影响难以忽视.② 乘客对于交通方式的选择与距离有关,通过多组 OD 对比,出行距离越长,选择轨道交通的客流越大,此处不一一列举;轨道交通与巴士相比,往往更加快捷、准点,这一优势随着出行距离的增加更加明显.

不难看出,客流分析模型能够真实反映出出行者在公交走廊沿线对于交通方式的选择,表明模型中对于出行负效用影响因素的考虑与实际情况相符合;同时,通过对人群属性的分类,能够细致分析不同类别出行者对于交通方式选择的差异性.

为具有重要意义;同时,动态化的分析模型能够反映不同时间长度区间内客流的时空分布.

4.4 改善措施及结果

通过对算例结果的分析可知,上海市公共交通走廊在高峰时刻交通负荷极大,且不同交通方式的分担极不平衡.由于人群属性对其出行行为有直接影响,因此通过采取必要管理措施可以有效缓解以上问题.首先,通过调整不同属性人群的上班时间,可以实现高峰时段错峰出行;其次,通过调整公交票价,可以在一定程度上改变人们对于交通方式的选择.

表3 不同时间区间内的客流分布情况
Tab.3 Distribution of passenger volume in different time periods %

人群属性	出行时段	客流分担率				总计
		s9-11	s9-10a10-11	a9-10s10-11	a9-11	
蓝领工人	7:45~8:00	52	2	2	44	100
	8:00~8:15	59	2	2	37	100
	8:15~8:30	65	3	2	40	100
白领职员	7:45~8:00	72	7	8	13	100
	8:00~8:15	75	8	8	9	100
	8:15~8:30	81	5	6	8	100
个体商人	7:45~8:00	73	6	5	16	100
	8:00~8:15	65	6	5	24	100
	8:15~8:30	55	5	6	34	100

此处将公司白领的上班时间延后至 8:45,而其他两类人群保持不变;同时,将轨道交通票价提升 10%,巴士票价下调 10%。以 OD(7-11)进行说明,如图 5 和表 4 所示。可以看到:调整后客流出行的幅度较为平缓,出行高峰时刻的客流下降 24%,大幅缓解公共交通走廊的交通负荷;调整后有相当部分客流由选择轨道交通转向常规巴士,且蓝领工人的转变趋势尤为明显,使得交通方式的分担率更加均衡。

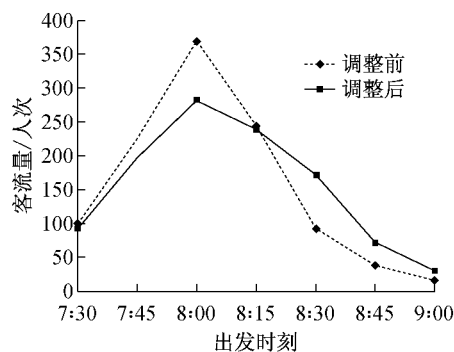


图5 政策调整前后总客流出行时刻分布对比

Fig.5 Comparison of distribution of passenger flow before and after adjustment

表4 政策调整前后 OD 7-11 客流高峰时段分布情况对比
Tab.4 Comparison of peak passenger distribution with and without adjustment %

人群属性	调整前后	客流分担率					
		s7-11	s7-10a10-11	s7-9a9-11	a7-9s9-11	a7-10s10-11	a7-11
蓝领工人	调整前	81	2.0	1.5	1	0.5	14
	调整后	69	2.0	3.0	2	1.0	23
白领职员	调整前	85	2.5	2.0	2	0.5	8
	调整后	81	2.0	3.0	2	1.0	11
个体商人	调整前	67	13.0	4.0	4	4.0	8
	调整后	60	14.0	5.0	5	5.0	11
总客流	调整前	82	3.0	2.0	2	1.0	11
	调整后	71	3.0	3.0	2	1.0	20

5 结论与展望

(1)本文在随机用户均衡分配的理论基础上,在静态均衡模型中引入时间变量及人群属性分类,建立了基于人群分类的城市公交走廊动态客流分析模型,描述了走廊内出行者对于出发时刻和路径的选择问题。模型的基本假设规定了模型的适用条件和范围,并设计了模型的求解算法。

(2)通过基于现实条件下的算例,初步展现了该模型对于客流分析的应用。动态化的分析模型能够研究出行者对出发时刻的选择偏好;通过人群属性分类,模型能够考虑不同人群出行行为的差异。

(3)模型不仅能够反映走廊内不同属性客流的时空分布情况及存在问题,还能够模拟并比较不同改善措施的作用及效果,这得益于客流分析模型具有动态化及人群分类的特征。因此,该模型为探究城市公交走廊的功能优化及效率提升提供了有力工具。

(4)本文建立的模型只是简单描述了城市公交走廊内客流的时空分布情况,并对人群进行了简单分类,之后的研究可以在此基础上扩展。如进一步完善影响乘客出行负效用的因素;或是进一步细化人群分类,不仅从职业上分类,还可以从性格偏好等方面分类。

参考文献:

- [1] Dafermos S, Nagurney A. Sensitivity analysis for the asymmetric network equilibrium problem [J]. Mathematical Programming, 1984, 28(2): 174.
- [2] Sheffi Y. Urban transportation networks [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
- [3] Magnanti T L, Perakis G. A unifying geometric solution framework and complexity analysis for variational inequalities [J]. Mathematical Programming, 1995, 12(3): 327.
- [4] Merchant D K, Nemhauser G L. A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems [J]. Transportation Science, 1978, 12: 183.
- [5] Carey M. Optimal time-varying flows on congested networks [J]. Operations Research, 1987, 35(1): 58.
- [6] Birge J R, Ho J K. Optimal flows in stochastic dynamic networks with congestion [J]. Operations Research, 1993, 41(1): 203.
- [7] Ziliaskopoulos A K. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem [J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 37.
- [8] Johansson M V, Heldt T, Johansson P. The effect of attitudes and personality traits on mode choice [J]. Transportation Research: Part A, 2006, 40(6): 507. (下转第 275 页)