

# 基于乘客个体属性的地铁客流分配算法及实证研究

陈伯阳<sup>1</sup>, 蒋明清<sup>1</sup>, 四兵锋<sup>1</sup>, 刘剑锋<sup>2</sup>

(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. 北京城建设计发展集团股份有限公司 北京 100037)

**摘要:** 针对城市地铁网络, 考虑了不同类型乘客在路径选择中对换乘费用的不同敏感程度, 提出了基于乘客类别的广义路径费用模型. 根据 logit 随机配流构造了考虑乘客分类的城市地铁网络客流分配模型, 并提出了相应的计算方法. 采用北京地铁网络为实证研究对象, 根据 SP 调查数据, 将乘客进行类别划分并对不同类型乘客进行了相应的参数估计. 基于地铁实际数据分别采用不同配流方法进行了验算, 并与实测数据进行了对比分析. 结果表明, 相对于不考虑乘客类型的地铁客流分配方法, 基于乘客属性的地铁客流分配算法的计算结果更接近实际.

**关键词:** 地铁网络; 流量分配; logit 模型; 个体属性

**中图分类号:** U239.5

**文献标志码:** A

## Individual attributes based assignment model and empirical research for urban subway network

CHEN Boyang<sup>1</sup>, JIANG Mingqing<sup>1</sup>, SI Bingfeng<sup>1</sup>, LIU Jianfeng<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing 100055, China)

**Abstract:** This paper focused on subway network and analysed the different path-choice behaviors among the subway passengers. The generalized travel cost function is formulated based on individual attributes. An individual attributes based logit model is presented for urban subway network flow assignment problem. The corresponding computational method is also proposed. By analysing the SP data for Beijing subway passengers, the major factors that impact the passenger's path choice are found and the differences between different passengers are also obtained. Beijing subway network is used as practical case. The classifications of subway passengers are analysed and the corresponding parameters are estimated. The different assignment methods are used for the same data. The case study has shown that the proposed individual attributes based assignment approach resulted in significantly improved estimation results with less error on the transfer flows than the single class assignment.

**Key words:** subway network; flow assignment; logit model; individual attribute

随着城市轨道交通线路的不断扩建, 网络规模越来越大, 城市居民乘坐地铁出行的比例快速上升.

目前, 国内城市地铁采用无缝换乘模式, 自动售检票系统无法记录乘客的换乘信息和路径信息. 在这种

收稿日期: 2015-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71571013, 71210001)

作者简介: 陈伯阳(1982—), 男, 辽宁法库人, 博士生, 研究方向为管理系统工程. email: 10114198@bjtu.edu.cn.

通信作者: 四兵锋(1972—), 男, 河北邢台人, 副教授, 博士. email: bfsi@bjtu.edu.cn.

条件下,准确估计地铁乘客的路径选择行为及网络客流分布状态,对于我国城市轨道交通发展和规划具有重要意义。

目前,国内外关于交通网络流量分配问题的研究主要集中在城市道路交通网络<sup>[1-4]</sup>及城市常规公交网络<sup>[5-7]</sup>上,而对城市轨道交通网络的流量分配问题的研究还相对较少。有些学者<sup>[8-11]</sup>将传统的交通网络配流方法应用在城市轨道交通网络中,然而,存在诸多问题:首先,道路网络配流研究车辆路径选择问题,通过分析不同车辆在路网的分布情况预测道路流量,而轨道交通网络配流则研究乘客路径选择问题,通过分析客流需求在地铁网络中的分布规律来预测线路流量和换乘流量;其次,道路网络配流在分析中主要考虑时间因素,而轨道交通网络配流考虑的因素除了时间外,还包括价格、换乘、拥挤度及乘客属性等。尽管有些研究<sup>[12-14]</sup>考虑了时间和换乘因素对城市轨道交通乘客路径选择行为的影响,然而缺少对乘客属性的研究。事实上,在城市轨道交通出行中,不同类型的乘客对于路径选择和换乘选择有不同的标准。如,非通勤乘客通常不希望选择换乘次数较多的路径,而通勤乘客则更希望选择总时间较小的路径。因此,不同类型的乘客对于同一条路径具有不同的理解,不同的乘客具有不同的路径选择偏好,城市地铁网络的流量分布实际上是不同类型的乘客在网络中选择乘车路径而产生的聚集结果。

本文作者将多用户交通网络流量分配方法应用在城市地铁网络中,考虑了不同类型乘客对换乘费用的不同敏感程度,提出了基于乘客类别包括乘车时间、换乘时间和换乘次数在内的广义路径费用,构造了基于乘客个体属性的城市轨道交通网络客流分配 logit 模型,并给出了计算方法。根据地铁乘客出行 SP 数据,以北京地铁网络为实证研究对象,对乘客进行了交叉分类并分别估计了其相应参数,采用不同的配流算法对地铁客流进行了网络分配,验证了本文所提出的算法的有效性。

## 1 基于乘客类别的广义路径费用

不同类别的乘客在地铁路径选择中存在不同偏好,划分乘客类别的主要依据包括年龄、职业及收入等。实际上,乘客对路径选择的差异性是通过广义路径费用中的相关参数体现的。在城市地铁网络中,影响乘客路径选择的因素包括时间和换乘,其中时间因素包括乘车时间、等车时间和换乘时间等,换乘因素包括换乘时间和换乘次数。

### 1) 乘车时间。

乘车时间包括列车运行时间和停站时间。很明显,这一因素与乘客类型没有相关性。一般情况下,地铁列车严格按照列车时刻表运行,因此,乘客乘车时间固定,可看作常数。假定用  $T_{ij}^l$  表示乘客在区间  $(i, j)$  的乘车时间,则:

$$T_{ij}^l = \begin{cases} t_{ij}^l & \text{站点 } i \text{ 为起始站} \\ s_i^l + t_{ij}^l & \text{否则} \end{cases} \quad \forall i, j \quad (1)$$

式中:  $t_{ij}^l$  为线路为  $l$  的列车在区段  $(i, j)$  上的开行时间;  $s_i^l$  为线路  $l$  的列车在车站  $i$  的平均停靠时间。

### 2) 换乘时间。

换乘时间由步行时间和等车时间组成,其中步行时间与乘客类型相关,例如,年龄较大的乘客步行时间较长,等车时间为乘客等待换乘列车进站的平均时间,可以取  $0.5f_m$  作为乘客平均等车时间,其中  $f_m$  表示线路  $m$  的列车平均发车间隔,则:

$$E_{i,n}^{l,m} = \frac{d_i^{l,m}}{s_n} + \frac{f_m}{2}, \quad \forall i, n, l, m \quad (2)$$

式中:  $E_{i,n}^{l,m}$  表示类型为  $n$  的乘客在换乘车站  $i$  从线路  $l$  换乘到线路  $m$  的总花费时间;  $d_i^{l,m}$  表示相应的换乘距离;  $s_n$  表示  $n$  类型乘客的平均步行速度。

### 3) 换乘次数。

在地铁出行中,出行者对时间和换乘具有不同的理解费用。例如,如果没有换乘,则出行费用没有换乘费用;如有一次换乘,可将实际换乘时间乘上惩罚系数来表示出行者对换乘时间的理解费用;如果有两次换乘,则第二次换乘的惩罚会高于第一次换乘的惩罚。考虑不同类型出行者对换乘敏感性不同,采用如下基于乘客类型的换乘理解费用模型:

$$\bar{E}_{i,n}^{l,m} = \alpha_n \cdot (e_{i,k}^w)^{\beta_n} \cdot E_{i,n}^{l,m}, \quad \forall i, n, l, m \quad (3)$$

式中:  $\bar{E}_{i,n}^{l,m}$  表示第  $n$  种类型的乘客在换乘站  $i$  从线路  $l$  换乘到线路  $m$  的感知费用;  $\alpha_n$  ( $\alpha_n > 1$ ) 表示第  $n$  种类型的乘客对换乘时间的惩罚系数;  $e_{i,k}^w$  表示 OD 对  $w$  之间的第  $k$  条路径上在换乘站  $i$  处发生的累计换乘次数;  $\beta_n$  为校正参数。

在地铁网络中,乘客出行路径由车站和区段组成,路径费用就等于组成该路径的所有区段的乘车时间、所有车站的停站时间及换乘费用之和。假定用  $C_{k,n}^w$  表示类型为  $n$  的乘客在 OD 对  $w$  之间第  $k$  条路径上可确定的广义费用,则

$$C_{k,n}^w = \sum_{i,j} T_{ij}^l \cdot \delta_{ij,k}^w + \sum_{i,l,m} \bar{E}_{i,n}^{l,m} \cdot \varphi_{i,k}^w \cdot \eta_{l,k}^w \cdot \eta_{m,k}^w, \quad \forall n \quad (4)$$

式中:  $\delta_{ij,k}^w$ 、 $\varphi_{i,k}^w$  和  $\eta_{l,k}^w$  分别为地铁网络中区段  $(i, j)$ 、车站  $i$ 、线路  $l$  等与 OD 对  $w$  间路径  $k$  的关联关系,如果

区段( $i, j$ )、车站 $i$ 和线路 $l$ 属于OD对 $w$ 间第 $k$ 条路径,则 $\delta_{ij,k}^w$ 、 $\varphi_{i,k}^w$ 和 $\eta_{l,k}^w$ 均取值为1,否则为0.

## 2 基于乘客属性客流分配模型及算法

在地铁出行中,乘客通常不会考虑所有的连通路径,而只考虑其中某些路径,可把这些路径称为有效路径.一般而言,乘客考虑的路径费用会在一定的范围内,如某条路径的费用超出这一范围,乘客则不会考虑,即有效路径的广义费用须满足以下条件:

$$C_{k,n}^w \leq H \cdot C_{\min,n}^w, k \in K_n^w \quad (5)$$

式中: $C_{\min,n}^w$ 表示OD对 $w$ 之间对于第 $n$ 类乘客的最小广义路径费用; $H$ 为非负常数,称为路径的扩展系数; $K_n^w$ 表示OD对 $w$ 之间有效路径集合.

在实际中,尽管乘客可以根据经验对路径费用进行判断,但很难准确估计,总会有一些不确定因素影响乘客对路径费用的判断.因此,广义路径费用存在随机误差,可用下式表示:

$$\tilde{C}_{k,n}^w = C_{k,n}^w + \varepsilon_{k,n}^w, k \in K_n^w \quad (6)$$

式中: $\tilde{C}_{k,n}^w$ 表示第 $n$ 类乘客在OD对 $w$ 之间有效路径 $k$ 上的随机广义费用; $C_{k,n}^w$ 为乘客根据经验可以确定的路径费用,可由式(4)计算; $\varepsilon_{k,n}^w$ 是随机项.

根据上面的描述,广义路径费用为随机变量,故乘客路径选择问题实际上就是概率问题.通常,乘客总是希望选择广义费用最小的路径.因此,路径选择概率可表示如下:

$$p_{k,n}^w = \Pr(\tilde{C}_{k,n}^w \leq \tilde{C}_{k,p}^w, p \neq k, k \in K_n^w) \quad (7)$$

式中: $p_{k,n}^w$ 表示OD对 $w$ 之间类型为 $n$ 的乘客选择路径 $k$ 的概率.

假定式(6)中的随机误差项 $\varepsilon_{k,n}^w$ 相互独立,且服从Gumbel分布,那么,路径选择概率 $p_{k,n}^w$ 可表示为如下Logit形式:

$$p_{k,n}^w = \frac{\exp(-\theta_n C_{k,n}^w)}{\sum_{p \in K_n^w} \exp(-\theta_n C_{p,n}^w)}, k \in K_n^w \quad (8)$$

式中: $\theta_n$ 为待定参数.

对于式(8),分子和分母同除以 $\exp(-\theta_n C_{k,n}^w)$ ,显然,式(8)可写为如下形式:

$$p_{k,n}^w = \frac{1}{\sum_{p \in K_n^w} \exp\{-\theta_n(C_{p,n}^w - C_{k,n}^w)\}}, k \in K_n^w \quad (9)$$

由于传统的logit模型存在IIA特性<sup>[1]</sup>,使得该模型在求解实际交通问题时出现两类缺陷,其一是路径选择概率是由不同路径间的广义费用绝对差决

定的,这样logit模型在处理不同距离的OD配流时就有可能得出不合常理的结果;其二是当备选路径存在较大的相似性,就会过高评价具有相似性的选择路径,导致预测偏差.一些专家学者提出了相对较为复杂的模型来避免上述问题<sup>[15-16]</sup>,然而这些模型在实际计算中,需要复杂的参数估计和计算过程.在本文中,提出了一种较为简单的方法来避免传统logit模型的IIA特性,即采用相对广义费用而不是绝对费用来进行选择概率计算,模型如下:

$$p_{k,n}^w = \frac{\exp(-\theta_n C_{k,n}^w / C_{\min,n}^w)}{\sum_{p \in K_n^w} \exp(-\theta_n C_{p,n}^w / C_{\min,n}^w)}, k \in K_n^w \quad (10)$$

基于乘客个体属性的地铁客流分配的基本思路为:根据乘客属性对所有乘客进行类别划分,对于每一类型乘客,确定OD间的最短路径及有效路径,根据logit模型(10)计算各条路径的选择概率,将该类型乘客的OD量加载到地铁网络中,得到不同类型乘客的路径流量,将各类型乘客流量进行累加,得出最终的路径流量.最后,根据地铁网络拓扑关系,计算出线路流量、区段流量和换乘流量.具体计算过程如下:

Step 1: 根据乘客不同属性将地铁OD需求进行交叉分类.用 $d_n^w$ 表示OD对 $w$ 之间第 $n$ 类型乘客所占比例, $q_w$ 表示OD对 $w$ 之间总的乘客出行需求,则OD对 $w$ 之间第 $n$ 类型的乘客需求为

$$q_n^w = q_w d_n^w, \forall w, n \quad (11)$$

Step 2: 针对OD对 $w$ 之间的第 $n$ 类型的乘客,寻找最短路径,计算最小广义费用 $C_{\min,n}^w$ .根据式(5),采用图论中遍历算法确定OD对 $w$ 之间第 $n$ 类型的乘客的有效路径集合 $K_n^w$ ,计算各条有效路径上的广义费用 $C_{k,n}^w, k \in K_n^w$ .

Step 3: 根据式(10)计算OD对 $w$ 之间第 $n$ 类型乘客的路径选择概率 $p_{k,n}^w, k \in K_n^w$ .

Step 4: 根据 $p_{k,n}^w$ 将OD需求 $q_n^w$ 分配到每条有效路径上,即:

$$f_{k,n}^w = q_n^w p_{k,n}^w, k \in K_n^w, \forall w, n \quad (12)$$

式中: $f_{k,n}^w$ 表示在OD对 $w$ 之间选择有效路径 $k$ 的第 $n$ 类型乘客数量.

Step 5: 对于OD对 $w$ ,判断是否所有类型乘客都进行了计算.如果是,则计算该OD之间路径上的总客流 $f_k^w$ ,即

$$f_k^w = \sum_n f_{k,n}^w, \forall w, k \quad (13)$$

并转入下一步;否则,转Step 2.

Step 6: 判断是否所有OD对都进行了计算.如果是,转Step 7;否则,转Step 1.

Step 7: 根据路径流量  $f_k^w$ , 按照下式计算线路流量、区段流量及换乘流量:

$$x_l = \sum_w \sum_k f_k^w \cdot \eta_{lk}^w, \quad \forall l \quad (14)$$

$$x_{ij} = \sum_w \sum_k f_k^w \cdot \delta_{ij}^w, \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$x_i^{lm} = \sum_w \sum_k f_k^w \cdot \varphi_{ik}^w \cdot \eta_{lk}^w \cdot \eta_{mk}^w, \quad \forall i, l, m \quad (16)$$

式中:  $x_l$ 、 $x_{ij}$  和  $x_i^{lm}$  分别表示地铁网络中线路  $l$  上的流量、区段  $(i, j)$  的流量及在换乘车站  $i$  的线路  $l$  和  $m$  之间的换乘流量。

### 3 地铁乘客路径选择行为调查及分析

2010 年对北京地铁乘客进行了路径选择行为 SP 调查. 调查主要包括 3 部分: 个人信息、出行信息和路径选择意愿信息. 其中个人信息包括性别、年龄、职业和收入水平等; 出行信息包括出行路线、出行目的、路网熟悉程度及影响因素等; 路径选择意愿主要考虑了出行时间、换乘时间和换乘次数对乘客路径选择的影响. 本次调查采用车站问卷分发形式, 共获得有效样本 4 900 多份, 样本的年龄分布、职业分布以及个人收入水平分布如表 1 所示.

表 1 调查样本的分布情况

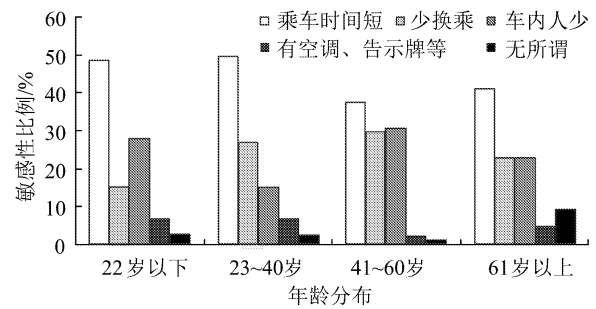
Tab. 1 Summary statistics of the sampled passengers

属性	分类	比例/%
年龄	22 岁以下	24
	23 ~ 40 岁	64
	41 ~ 60 岁	10
	61 岁以上	2
职业	政府	4
	企事业单位	51
	学生	21
	离退休	2
	自由职业	11
	短暂来京	3
	其他	8
收入	1 500 元以下	29
	1 501 ~ 3 000 元	30
	3 001 ~ 5 000 元	24
	5 001 ~ 8 000 元	11
	8 000 元以上	6

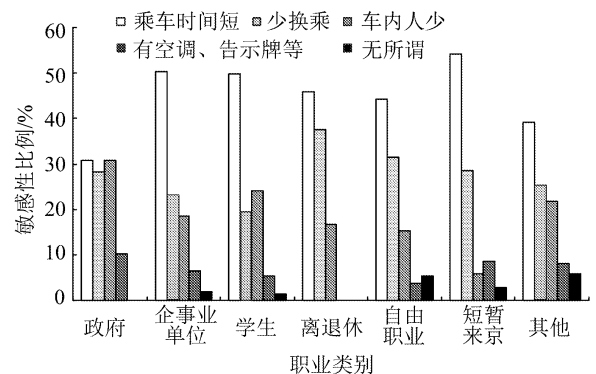
可以看出, 23 ~ 40 岁之间的乘客比例最高, 这说明地铁乘客中主要为工作适龄人群; 企事业单位人员和学生比例较高, 短暂来京人员和离退休人员比例最低, 说明地铁乘客主要由企事业单位人员和学生组成; 月收入在 1 501 ~ 3 000 元之间的比例最高, 而收入在 8 000 元以上比例最低.

根据地铁乘客出行的特点, 分别对不同属性乘客在地铁出行中路径选择的影响因素进行了分析. 图 1 给出了不同年龄、不同职业、不同收入水平的乘

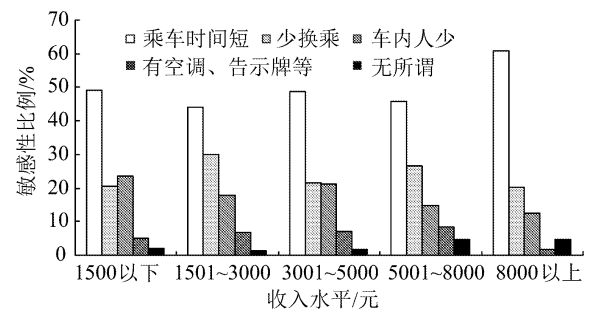
客在地铁出行中考虑不同影响因素的分布情况.



(a) 不同年龄分组



(b) 不同职业分组



(c) 不同收入分组

图 1 乘客对影响因素的敏感性

Fig. 1 Sensitivities of different passengers on factors

可以看出, 40 岁以下的乘客更重视乘车时间, 而 40 岁以上的乘客则对换乘因素更加关注; 政府工作人员对乘车时间、换乘次数、车内拥挤程度的关注度基本相同, 而企事业单位工作人员、学生等最关注的因素为乘车时间; 高收入乘客更关注乘车时间.

本次 SP 调查的核心问题是关于乘客对选路径选择意愿. 在调查中, 可选择路径分为三类, 分别为: 路径 1、路径 2 和路径 3. 这三类路径的特征如下:

路径 1: 总花费时间最长, 但没有换乘或换乘时间最少;

路径 2: 总花费时间最少, 但换乘次数最多或换乘时间最长;

路径 3: 总花费时间较长, 换乘次数较少或换乘时间较少.

下面按不同类型乘客, 对乘客路径选择概率进

行分析,图 2 分别给出调查样本中,不同年龄、职业及收入水平的乘客在进行路径选择的统计情况。

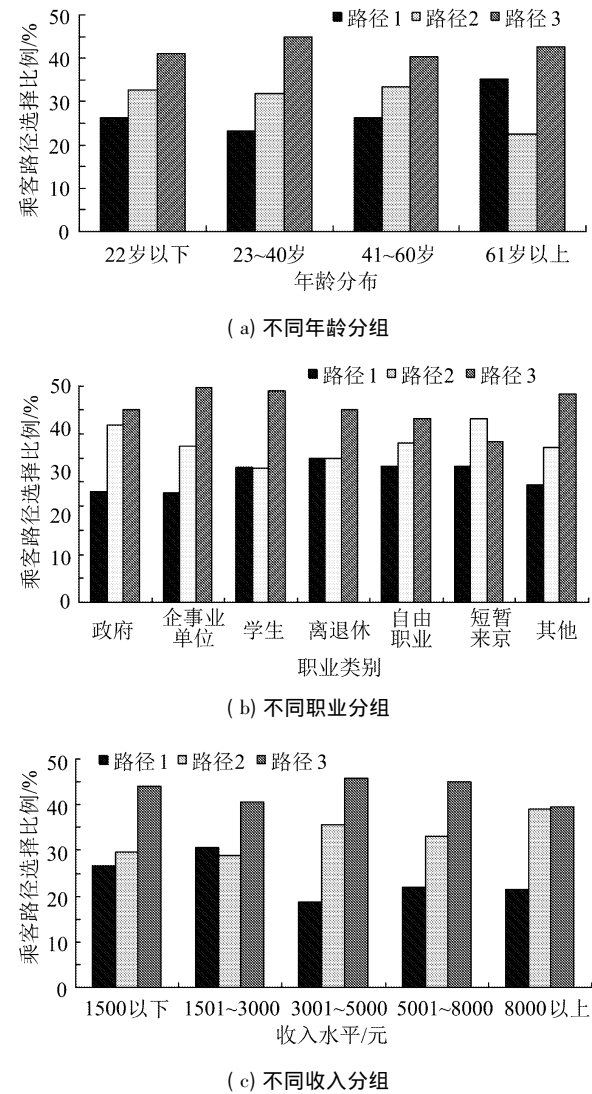


图 2 几种影响因素对乘客路径选择的分析

Fig. 2 Analysis of passenger path choice behavior

可以看出,在这三类路径中,路径 3 的选择概率最大,说明乘客在总时间相差不大的条件下,更倾向于选择换乘次数或换乘时间少的路径;此外,不同乘客在路径选择上存在明显不同,比如,61 岁以上的乘客选择路径 1 的比例明显高于 60 岁以下乘客;而对于乘客的职业属性而言,相对于其他职业,短暂来京乘客选择路径 2 的比例最高,对于收入来说,收入水平高的乘客则更愿意选择总时间最少的路径。

根据乘客路径选择行为 SP 调查的统计分析可以看出,不同类型的乘客在路径选择中具有不同的偏好。根据前面的分析,乘客对路径选择的差异性是通过配流模型中的相关参数来体现的,这些参数包括广义费用模型(4)中的  $\alpha_n$  和  $\beta_n$ ,以及 logit 模型(10)中的  $\theta_n$ 。首先,根据问卷中设定的乘客属性进行交叉分类,通过乘客属性与路径选择之间的相关性分析发

现,对乘客路径选择行为有明显相关性的属性只包括职业、收入和出行目的。因此,在乘客的交叉分类中,可只考虑这三类属性。同时,本文考虑了这三类属性各自分类之间的乘客路径选择行为差异的显著性,将这些分类进行了有效的合并。最后,经过统计分析和差异性检验,将乘客类型简化为五类,如表 2 所示。需要指出的是,本文所得到的乘客分类只是基于调查数据,是一种统计结果,统计结论往往带有偏差。如果调查样本足够多,则这种偏差会降低。由于篇幅所限,在此没有给出数据的统计分析过程。

通过对调查数据进行统计分析,采用 SPSS 软件对相应参数进行回归估计,同时,不同类型的乘客,其平均步行速度  $s_n$  也存在差异。表 3 给出了不同属性乘客所对应的相关参数取值。

表 2 乘客类型及样本数  
Tab. 2 Classification of passengers

类别	出行目的	职业	收入	样本数	样本比例/%
一	上班、上学、回家、其他	政府、企事业单位、学生、其他	8 000 元以下	2 627	45.7
二	上班、上学、回家、其他	政府、企事业单位、学生、其他	8 000 元以上	126	2.2
三	回家、其他	离退休、自由职业、短暂来京	—	434	7.5
四	公务、购物旅游、探亲访友	政府、企事业单位、学生、其他	—	1 768	30.7
五	公务、购物旅游、探亲访友	离退休、自由职业、短暂来京	—	796	13.8

表 3 各乘客属性分类参数值  
Tab. 3 Calibrated route choice parameters

乘客类型	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\theta_n$	$s_n/(m/s)$
一	1.62	1.81	1.09	1.2
二	1.31	1.36	2.52	1.2
三	1.15	5.26	1.04	0.8
四	1.61	1.78	1.09	1.0
五	1.85	1.70	0.61	0.8

4 实证分析

4.1 基本数据

为验证本文所提出的配流算法的有效性,采用 2008 年的北京地铁网络对模型及算法进行计算。

在算例中,输入数据包括各换乘站不同方向的换乘距离、各线路列车的区段开行时间、平均发车间隔及各站点之间的 OD 量等 4 个方面。具体取值:①发车间隔。根据统计,北京地铁列车的平均发车间隔为 5 min。②各换乘站不同方向的换乘距离由表 4 给出。③各区段列车开行时间则通过北京地铁公司网站获取。④列车在车站的平均停站时间为 2 min。

⑤ 由北京地铁公司提供 2008 年中 1 d 的站间 OD 量. ⑥ 模型中的相关参数由表 3 给出.

表 4 各换乘站不同方向的换乘距离

Tab. 4 Basic information of Beijing subway lines

换乘站	起	止	步行距离/m	换乘站	起	止	步行距离/m
建国门	1 号线	2 号线	100	崇文门	5 号线	2 号线	200
	2 号线	1 号线	200		2 号线	5 号线	200
复兴门	1 号线	2 号线	100	立水桥	13 号线	5 号线	400
	2 号线	1 号线	400		5 号线	13 号线	400
雍和宫	2 号线	5 号线	200	西直门	2 号线	13 号线	580
	5 号线	2 号线	200		13 号线	2 号线	580
东单	1 号线	5 号线	200	东直门	2 号线	13 号线	950
	1 号线	10 号线	200	惠新西街南口	5 号线	10 号线	200
国贸	10 号线	1 号线	200		10 号线	5 号线	200
	10 号线	13 号线	200	宣武门	2 号线	5 号线	200
芍药居	13 号线	10 号线	200		5 号线	2 号线	200
知春路	10 号线	13 号线	200	四惠	1 号线	八通线	200
	13 号线	10 号线	200		八通线	1 号线	200

#### 4.2 计算结果

以 OD 对苹果园 - 天通苑北为例, 根据上述已知的条件采用前面提出的基于乘客属性的配流算法, 可以计算得到该 OD 之间的有效路径以及各路径上的换乘次数、乘车时间、广义费用、配流比例等数据, 表 5 给出了相应的计算结果.

表 5 苹果园 - 天通苑北之间配流结果

Tab. 5 Comparison of effective paths for different classes of users between PGY and TTYB

乘客类型	路径描述	换乘次数	换乘站	途经站数	行程距离/km	车内时间/s	总时间/s	选择概率/%
一	国贸→惠新西街南口	2	国贸、惠新西街南口	37	57.6	3 929	6 639	18.85
	建国门→雍和宫	2	建国门、雍和宫	33	51.2	3 561	7 075	17.14
	东单	1	东单	33	51.2	3 458	4 979	27.12
	复兴门→雍和宫	2	复兴门、雍和宫	34	52.8	3 700	7 288	16.36
	复兴门→崇文门	2	复兴门、崇文门	34	52.8	3 577	6 248	20.54
二	国贸→惠新西街南口	2	国贸、惠新西街南口	37	57.6	3 929	6 135	10.15
	国贸→芍药居→立水桥	3	国贸、芍药居、立水桥	34	52.8	3 913	7 086	6.23
	建国门→雍和宫	2	建国门、雍和宫	33	51.2	3 561	6 211	9.76
	建国门→东直门→立水桥	3	建国门、东直门、立水桥	30	46.4	3 662	6 755	7.38
	东单	1	东单	33	51.2	3 458	4 902	19.13
	西单→宣武门→崇文门	3	西单、宣武门、崇文门	34	52.8	3 613	7 038	6.38
	复兴门→建国门→东单	3	复兴门、建国门、东单	36	56	3 827	7 093	6.20
	复兴门→雍和宫	2	复兴门、雍和宫	34	52.8	3 700	6 424	8.75
	复兴门→东直门→立水桥	3	复兴门、东直门、立水桥	31	48	3 801	6 968	6.61
	复兴门→崇文门	2	复兴门、崇文门	34	52.8	3 577	5 732	12.49
三	复兴门→西直门→立水桥	3	复兴门、西直门、立水桥	27	41.6	3 800	6 882	6.91
	东单	1	东单	33	51.2	3 458	4 862	100.00
	国贸→惠新西街南口	2	国贸、惠新西街南口	37	57.6	3 929	6 609	18.85
	建国门→雍和宫	2	建国门、雍和宫	33	51.2	3 561	7 022	17.22
	东单	1	东单	33	51.2	3 458	4 976	26.96
四	复兴门→雍和宫	2	复兴门、雍和宫	34	52.8	3 700	7 235	16.43
	复兴门→崇文门	2	复兴门、崇文门	34	52.8	3 577	6 217	20.54
	国贸→惠新西街南口	2	国贸、惠新西街南口	37	57.6	3 929	6 756	19.46
五	建国门→雍和宫	2	建国门、雍和宫	33	51.2	3 561	7 251	18.33
	东单	1	东单	33	51.2	3 458	5 036	23.97
	复兴门→雍和宫	2	复兴门、雍和宫	34	52.8	3 700	7 464	17.86
	复兴门→崇文门	2	复兴门、崇文门	34	52.8	3 577	6 374	20.38
	复兴门→崇文门	2	复兴门、崇文门	34	52.8	3 577	6 374	20.38

可以看出, 对于不同人群, 从苹果园去天通苑北的有效路径数是不同的, 第一类乘客到第五类乘客对应的有效路径数分别为: 5、11、1、5 和 5, 其中第二类乘客的有效路径数为 11, 明显高于其他类乘客的有效路径数; 相反, 第三类乘客的有效路径数为 1, 明显低于其他类乘客的有效路径数. 这是因为第二

类乘客为收入较高的通勤出行者, 这类乘客对时间比较敏感, 而对换乘不敏感, 因此对应的参数  $\beta_2 = 1.36$ ; 而第三类乘客为离退休及短暂来京人员, 这类乘客对换乘较敏感, 也就是说, 他们一般不喜欢选择换乘次数多的路径, 因此, 这类乘客所对应的参数  $\beta_3 = 5.26$ .

### 4.3 算法分析

为了进一步对模型及算法进行验证,分别采用考虑乘客属性和不考虑乘客属性<sup>[12]</sup>的配流方法进行计算,得到不同换乘站的换乘流量,并以实测换乘

流量数据为参考对象,对算法的有效性进行分析。图3给出了不同算法得出的换乘流量与实测值之间的对比,很明显,考虑乘客属性的配流方法所得到的换乘流量更接近实测流量。

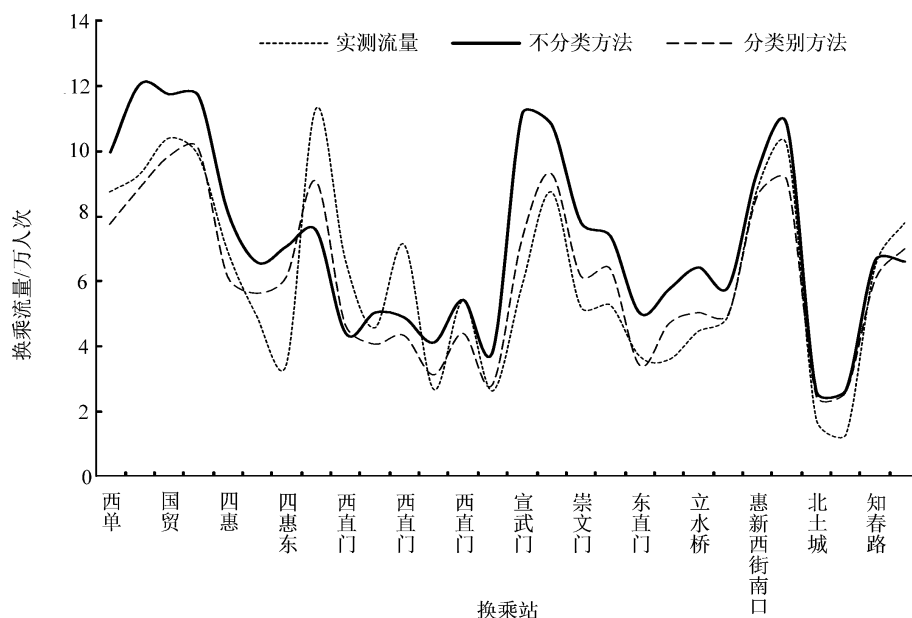


图3 不同算法的计算效果

Fig. 3 Comparison of observed and estimated transfer flows by different methods

为了更好对本文提出的模型及算法的有效性进行验证,采用平均相对百分比误差作为计算结果的评价指标,其计算公式为

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (17)$$

式中:  $N$  为样本个数;  $y_i$  为换乘流量的实测值;  $\hat{y}_i$  为估计值。

根据计算结果,不考虑乘客属性方法的各换乘站换乘流量 MAPE 的均值为 35.39%,而考虑乘客属性方法的 MAPE 为 20.38%,考虑乘客属性的配流方法明显优于不考虑乘客属性的配流方法,图4给出了不同算法得出的换乘流量 MAPE 的对比。

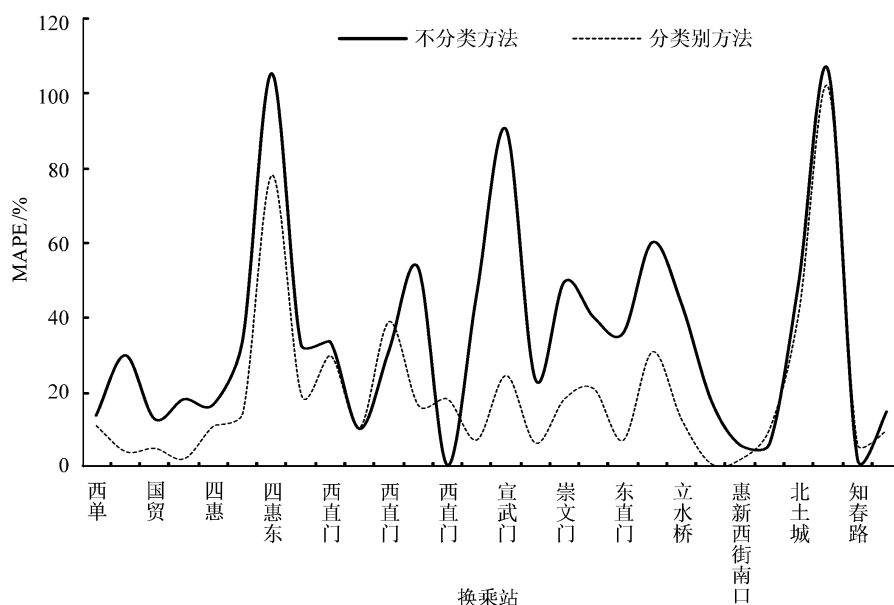


图4 不同算法的 MAPE 值

Fig. 4 MAPE of estimated transfer flows at different stations

下面分析有效路径的范围对计算结果的影响. 根据式(5), 路径扩展系数  $H$  的大小决定着 OD 之间有效路径数量的多少. 假定模型中其他条件均保持不变, 有效路径判定条件(5)中扩展系数  $H$  分别取 1.0、1.5 和 2.0 时, 采用本文所提出的分配方法得到的各换乘站的换乘流量, 图 5 给出了计算结果的相对误差情况.

可以看出,  $H$  值对计算结果有明显影响, 当  $H = 1.5$  时, 各站点的换乘量误差为最小, 而  $H$  取值为 1.0

和 2.0 时, 计算结果的相对误差较大. 这是由于, 当  $H = 1.0$  时, 任意 OD 之间的有效路径仅为最短路径, 显然不符合乘客出行的实际情况, 因此误差较大; 而当  $H = 2.0$  时, OD 之间的有效路径数将增加, 此时, 会将乘客在实际中不会考虑的路径也纳入有效路径范围内, 使计算结果与实际结果有较大偏差. 结果说明 OD 之间有效路径的范围不能过大也不能过小, 而是在一定的范围内才可能得到较好的计算效果.

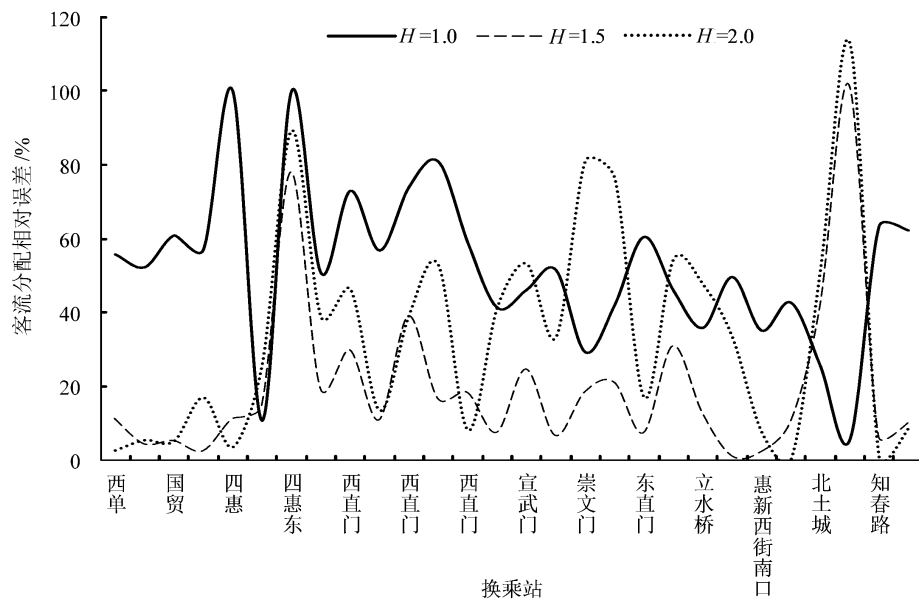


图 5 不同  $H$  值的客流分配相对误差

Fig. 5 MAPE of modeled transfer flows with different  $H$  values

## 5 结论

乘客的社会经济特征是影响地铁网络客流分配的重要因素. 本文基于调查数据, 对乘客的社会经济特征进行了交叉分析并以此对乘客进行了类别划分, 考虑了不同类型乘客对换乘费用的不同敏感程度, 提出了基于乘客类别的广义路径费用, 构造了基于乘客属性的地铁网络客流分配模型, 以北京地铁网络为实证研究对象, 对模型及算法进行了验证和分析. 计算结果表明: ①相对于传统的配流方法, 本文所提出的考虑乘客属性的地铁网络客流分配方法, 可以得到更加符合实际的配流结果; ②OD 对之间的有效路径范围并不是越大越好, 而是在一定的范围内, 可得到更符合现实的计算结果.

尽管本文提出了考虑乘客属性的地铁客流分配模型及算法, 并通过实证数据对模型进行了测算, 但所提出的模型仍存在一些不足. 例如, 在所提出的模型中没有考虑车内拥挤因素, 此因素是影响乘客路径选择的重要因素; 本文所采用的有效路径搜索方

法是基于图的遍历算法, 该算法适合于规模较小的网络. 对大规模网络而言, 其计算效率很低; 在所提出的模型中, 站间 OD 需求是已知且固定的, 事实上, 地铁 OD 需求会随着出行费用的变化而变化. 因此, 在今后的研究中, 如何构建更加符合实际的地铁客流分配模型, 并提出更加有效的计算方法, 都是需要进一步研究的内容.

## 参考文献 (References):

- [1] Sheffi Y. Urban Transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [2] Patriksson M. The traffic assignment problem: models and methods [M]. Utrecht: VSP BV, 1994.
- [3] 黄海军. 城市交通网络平衡分析-理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.  
HUANG H J. Urban traffic network equilibrium analysis: theory and practice [M]. Beijing: China Communications Press, 1994. (in Chinese)
- [4] Bell M G H, Iida Y. Transportation network analysis [M].



- England: John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [5] De Cea J, Fernández E. Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model[J]. *Transportation Science*, 1993, 27(2): 133–147.
- [6] Spiess H, Florian M. Optimal strategies: a new assignment model for transit networks[J]. *Transportation Research-B*, 1989, 23(2): 83–102.
- [7] SI B F, ZHONG M, GAO Z Y. Urban transit assignment model based on augmented network with in-vehicle congestion and transfer congestion[J]. *Journal of System Science and Systems Engineering*, 2011, 20(2): 155–172.
- [8] 吴祥云, 刘灿齐. 轨道交通客流量均衡分配模型与算法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(9): 1158–1162.
- WU X Y, LIU C Q. Traffic equilibrium assignment model specially for urban railway network [J]. *Journal of Tongji University( Natural Science)*, 2004, 32(9): 1158–1162. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] 徐瑞华, 罗钦, 高鹏. 基于多路径的城市轨道交通网络客流分布模型及算法研究[J]. *铁道学报*, 2009, 31(2): 110–113.
- 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): 110–113. (in Chinese)
- [11] 刘剑锋, 孙福亮, 柏 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 and Information Technology*, 2009, 9(2): 81–86. (in Chinese)
- [12] 林湛, 蒋明清, 刘剑锋 等. 城市轨道交通客流分配的改进 Logit 模型及方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(6): 145–151.
- LIN Z, JIANG M Q, LIU J F, et al. Improved logit model and method for urban rail transit network assignment [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2012, 12(6): 145–151. (in Chinese)
- [13] 刘剑锋. 基于换乘的城市轨道交通网络流量分配建模及其实证研究[D]. 北京: 北京交通大学 2012.
- LIU J F. Transfer-based modeling flow assignment with empirical analysis for urban rail transit network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [14] SI B F, ZHONG M, LIU J F, et al. Development of a transfer-cost based logit assignment model for Beijing rail transit network using automated fare collection data [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2013, 47(3): 297–318.
- [15] Prashker J N, Bekhor S. Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: a review[J]. *Transport Reviews*, 2004, 24: 437–463.
- [16] Prato C G. Route choice modeling: past, present and future research directions[J]. *Journal of Choice Modeling*, 2009, 2(1): 65–100.