

文章编号:1671-1637(2013)04-0070-09

换乘行为影响下的城市公交配流算法

曾 鸷^{1,2}, 李 军^{1,2}, 朱 晖^{1,2}

(1. 西南交通大学 经济管理学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学
服务科学与创新四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:针对中国大城市的工作生活模式与公交网络的特性,以成都市居民公交出行行为研究对象,提出了符合乘客路径选择行为的广义公交路径。考虑了公交出行的路段阻抗和站点阻抗,建立了公交路径阻抗函数,提出了有效路径的确定方法。基于改进的 Logit 模型,建立了一种换乘行为影响下的路径选择模型。以成都市部分公交网络为例,应用提出的配流算法进行实例验证。分析结果表明:当选定的 4 条公交线路高峰时段的最小发车间隔分别为 4、4、3、3 min,非高峰时段的最大发车间隔均为 10 min 时,对应的最小换乘步行时间和最大换乘步行时间分别为 0、6 min;当最大路径阻抗和最小路径阻抗分别为 71.5、51.5 min 时,对应的乘车时间分别为 60、48 min,路径选择比例分别为 5.53%、41.98%;当最大路径阻抗和最小路径阻抗分别为 52.5、48.5 min 时,对应的乘车时间分别为 42、39 min,路径选择比例分别为 13.40%、62.07%;考虑换乘行为时,配流结果与实际值的最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差分别为 16.46%、11.09%、14.42%,不考虑换乘行为时,最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差分别为 34.37%、11.38%、23.15%。考虑换乘行为的配流结果更贴近实际情况。

关键词:交通规划;公交配流;换乘行为;改进的 Logit 模型;公交路径;路径阻抗

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

Urban public traffic assignment algorithm under influence of transfer behavior

ZENG Ying^{1,2}, LI Jun^{1,2}, ZHU Hui^{1,2}

(1. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Key Laboratory of Service Science and Innovation of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the work and life modes and the particularities of public traffic networks of big cities in China, the public traffic trip behaviors of residents in Chengdu City were taken as study object, and the generalized public traffic route which could accord with the route choice behavior of passenger was put out. By considering the section impedance and station impedance during the public traffic trip, the impedance function of public traffic route was set up, and the determination method of effective path was proposed. Based on the improved logit model, a route choice model under the influence of transfer behavior was established. The part public traffic network of Chengdu City was taken as an example, the example verification was carried out by using proposed assignment algorithm. Analysis result indicates that when the minimum departure intervals of four designate public traffic lines during peak period are 4, 4, 3, 3 min respectively

收稿日期:2013-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(71090402);教育部人文社会科学研究项目(12YJA630057)

作者简介:曾 鸷(1985-),女,湖南邵阳人,西南交通大学管理学博士研究生,从事城市交通系统优化研究。

导师简介:李 军(1967-),女,四川资阳人,西南交通大学教授,管理学博士。

and all the maximum departure intervals during non-peak period are 10 min, the minimum and maximum transfer walking times are 0, 6 min respectively. When the maximum impedance and minimum impedance are 71.5, 51.5 min respectively, the riding times are 60, 48 min respectively, the route choice ratios are 5.53%, 41.98% respectively. When the maximum impedance and minimum impedance are 52.5, 48.5 min respectively, the riding times are 42, 39 min respectively, the route choice ratios are 13.40%, 62.07% respectively. When the transfer behavior is considered, the maximum relative error, the minimum relative error and the average relative error of assignment results and actual values are 16.46%, 11.09%, 14.42% respectively. When the transfer behavior is not considered, the maximum relative error, the minimum relative error and the average relative error are 34.37%, 11.38%, 23.15% respectively. The public traffic assignment result considering transfer behavior is in accord with actual situation. 2 tabs, 10 figs, 24 refs.

Key words: traffic planning; public traffic assignment; transfer behavior; improved logit model; public traffic route; route impedance

Author resumes: ZENG Ying(1985-), female, doctoral student, +86-28-87600171, zengying1001@139.com; LI Jun(1967-), female, professor, PhD, +86-28-87634706, lijun@home.swjtu.edu.cn.

0 引言

如何提高公共交通的客运能力与服务质量,以保持现有的用户与吸引其他更多的出行者选择公共交通已成为缓解城市交通拥堵最根本和最有效的措施。作为公共交通规划的关键技术之一,同时也是交通需求分析和交通运营管理中最重要的一环,公交配流问题近年来已引起众多学者的关注和重视^[1-2]。公交配流问题是指在公交网络结构和有关参数(运输能力、频率和车头时距分布)已知的情况下,通过模拟乘客在公交网络中的路径选择行为,推导出乘客在不同线网布局下的分布情况,从而得到各个公交路段(或公交线路)的客流量和其他一些指标^[3-4]。该问题的表象是乘客宏观出行现象,其结果是获得公交系统内各个公交路段(或公交线路)的客流量和其他一些指标,其核心则是如何描述乘客在公交网络中各个 OD 对之间的路径选择行为,其目的是为了了解各个 OD 对之间的客流量在公交网络中各个公交线路(或各个公交路段)上的流动情况,并据此为公共交通线网规划和场站布局提供重要的理论依据,因此,从本质上来看,公交配流模型就是在乘客路径选择的基准之上做出某种假设而进行的分析和求解。

目前,公交配流的相关研究已取得了重要成果和进展,Nuzzolo 等应用联合选择模型分析了乘客的出发时间、站点和线路选择,提出了基于时刻表的公交配流模型^[1];Cipriani 等分析了多模式公交网

络的拓扑结构,综合考虑各个公交方式之间的客流转移状况,设计了多模式公交网络的求解算法,并将其应用于复杂的大规模公交网络^[2];陈鹏等从理论上研究了轨道交通与常规公交换乘的优惠问题,根据福利经济学理论,以社会福利最大化为目标函数,建立了换乘优惠的非线性规划模型,并基于轨道交通与常规公交运营协调方向、换乘优惠率、同步发车间隔和车辆衔接富余时间等决策变量,给出了求解算法^[5];王镜等分析了换乘优惠政策的实施对公交出行的需求量和公交线网路径选择行为的影响,并对城市公交线网换乘优惠幅度的问题进行了研究^[6];Yu 等将换乘融入公交网络设计中,以最大化路径需求密度为目标函数,建立了公交网络优化设计模型,并运用蚁群优化算法求解^[7];Knoppers 等指出了最适合的换乘时间必须基于乘客到达换乘站点的时间在固定的时间范围之内的基础上^[8];Shafahi 等基于混合整数规划模型,以最小化换乘站点的等待时间为目标函数,研究了公交网络调度问题^[9];Anez 等运用二重图抽象复杂公交网络,以简化多个模式下各个公交方式之间的换乘与单一公交模式下各个线路之间的换乘^[10];Jolliffe 等分析了伦敦公交站点的乘客到达信息和车辆离站信息,指出随着公交车发车间隔的增加,乘客换乘等待时间的随机性将会减小^[11];Lozano 等分析了多式联运条件下的乘客换乘方式选择问题,采用标签校正技术寻求最短路径,指出最终路径的选定须依据乘客的个人偏好^[12];Poon 等假设所有乘客均能够根据

以往的出行经验得到准确的出行信息,建立了动态公交网络环境下的时刻表均衡分配模型,并利用仿真方法进行求解,得出容量限制条件下乘客的排队延误^[13];翁敏等针对公交网络的特殊性,以结点-弧段-有向线段描述了公交网络,提出了考虑换乘次数与换乘距离的出行路径选择模型,并设计了算法求解模型^[14];赵巧霞等以换乘次数最少为第 1 目标函数,途经站数最少为第 2 目标函数,建立了公交出行路径的双层优化模型,并设计了广度优先搜索算法确定最优公交线路序列^[15];苏爱华等针对公交网络换乘问题构造了公交网络模型,采用改进的 Dijkstra 算法进行求解^[16];侯刚等基于公交站点的空间关系,提出空间数据到拓扑模型再到搜索模型的公交网络双层建模方案,建立了以换乘次数最少为目标函数的公交网络路径模型,将最小换乘次数问题转化为两点间的最短路径问题,并用大连市的实际公交数据验证了模型和算法的有效性^[17];刘剑锋基于轨道交通的换乘因素,建立了城市轨道交通网络流量分配模型,并采用北京市轨道交通网络的实际数据对模型和算法进行了测算和分析^[18];董治等提出了交通管理公众参与机制概念,对城市交通管理公众参与机制要素进行了系统分析,指出了城市交通管理公众参与机制的参与者、组织者和工作程序是城市交通管理公众参与机制的基本要素^[19];李淑庆等分析了一体化公交网络的交通特性,基于一体化公交出行的路径特点,研究了公交出行时间与出行费用因素对出行阻抗的影响,考虑人流密度对步行速度的影响以及出行费用与时间的换算关系,将公交出行的路段阻抗、节点阻抗与费用阻抗统一换算为时间,建立了一体化公交网络的均衡配流模型,并通过 FW 算法对配流模型进行求解^[20]。

换乘行为对乘客出行决策带来的影响已引起学者们的关注和重视,但是大部分研究只是单纯地指出换乘行为给公交配流带来的影响重大,更多地是以换乘次数最少为目标函数进行建模优化,并未考虑由换乘行为带来的出行成本增加而引起的乘客路径选择的多样化和复杂化,这对量化评价换乘行为对配流的影响有很大的局限性。本文针对大城市“城外居住,城内上班”这一普遍存在的生活工作模式,结合公交网络的特殊性,立足换乘站点给出了符合乘客路径选择行为的广义公交路径定义,对城市公交配流问题进行拓扑建模,并基于改进的 Logit 模型研究换乘行为影响下的城市公交配流问题,并提出相应算法进行实例验证。

1 公交网络描述

1.1 基本描述

公交网络由站点与连接站点的线段(线段是指相邻 2 个站点之间的部分)组成,每条线段都有一组公交线路(简称线路)经过,各条线路均有一定的发车频率和服务类型,不同线路之间可能存在部分相同的线段,乘客只能在站点上下车或换乘其他线路,乘客从起点到达终点可能需要一次或多次换乘。

对于大规模公交网络而言,任意 OD 对之间连接的路径有多条,但乘客并非考虑所有路径,也不会总是单一地选择最短路径,路径选择过程见图 1。乘客有可能选择直达路径(换乘 0 次),也有可能选择需要换乘 1 次的路径(在站点 1 换乘),甚至可能选择需要换乘 2 次的路径(在站点 2 和站点 3 各换乘 1 次)。部分起点站离乘客的出发地较近,部分终点站离乘客的目的地相对较近,部分站点可搭乘的线路相对较多,这些也都是影响乘客路径选择行为的关键因素。

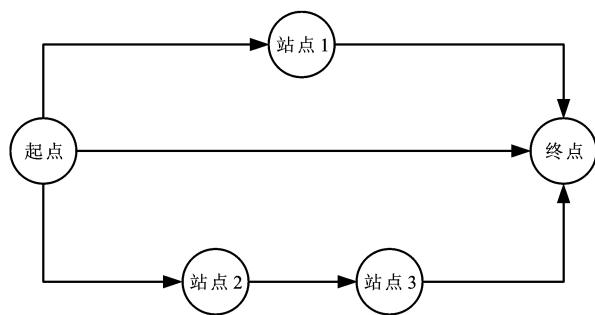


图 1 路径选择过程

Fig. 1 Route choice process

通常情况下,乘客被认为是目标导向的理性个体,在面临不同的交通环境时,有其各自不同的行为目标和行为准则。在出行过程中,他们不仅需对当前所处环境做出判断与估计,还需对未来的状态,比如如果需要换乘,则应事先考虑选择在哪个站点下车换乘更便捷或更省时,以求达到非合作情况下的个人目标最优,如最小化出行成本、最大化约束时间内到达的概率等,这就导致整个交通系统状态的不确定性和难以预测性^[21]。在这个实际背景下,本文基于换乘站点提出符合乘客路径选择行为的广义公交路径定义,立足乘客的路径选择行为,对公交配流问题进行拓扑建模。

1.2 换乘站点和广义公交路径

为避免降低可行换乘路径的搜索空间,本文综合考虑非同步换乘行为(乘客通过步行一段距离换

乘的情况)和同步换乘行为(在下车站点即可搭乘需换乘的线路),将一定步行距离内可能换乘的多个站点抽象为一个换乘站点对公交网络进行拓扑建模,不同距离下的非同步换乘站点见图2。

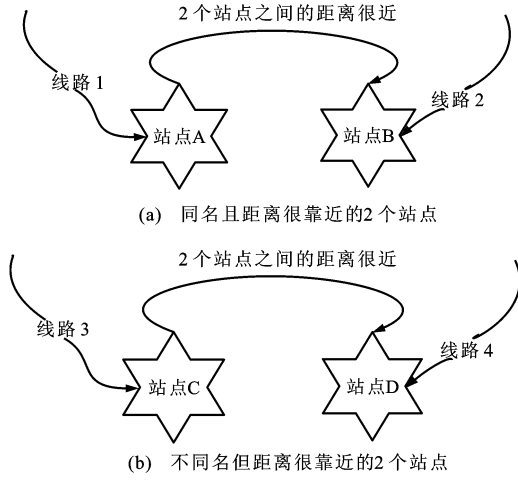


图2 非同步换乘站点

Fig. 2 Asynchronous transfer stations

针对公交网络的特殊性,结合本文提出的换乘站点含义,定义符合乘客路径选择行为的广义公交路径为乘客从起点到达终点所选择的换乘站点序列(简称路径)。路径上相邻2个换乘站点之间部分的为公交路段(简称路段),路段通常包含一条或多条不同的线段。

简单公交网络与广义公交路径分别见图3、4。由原来7条线路编码的公交网络经由路径编码后,仅用3条路径即可清晰描述,即经过站点1、4的路径、经过站点1、2、4的路径、经过站点1、3、4的路径。由路径编码的公交线网更加简单明了,对于大规模公交网络而言,该优势将更加明显。

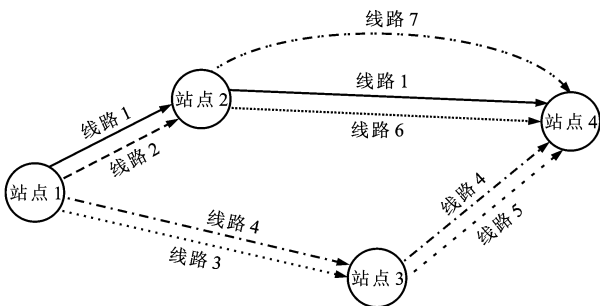


图3 简单公交网络

Fig. 3 Simple public traffic network

1.3 符号和假设

令城市公交网络为 $G=(S,A)$, S 为站点集合, A 为路段集合; L 为线路集合, $l \in L$; W 为所有乘客 OD 对集合, 且 $w \in W$; R_w 为 OD 对 w 间的有效路

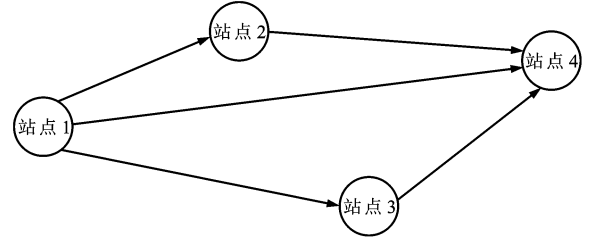


图4 广义公交路径

Fig. 4 Generalized public traffic path

径集合, 且路径 $r \in R_w$; q_w 为 OD 对 w 间的出行需求; f_w 为 OD 对 w 间路径 r 上的客流量, 即 OD 对 w 间路径 r 上的人数; $f_{s_i s_j}$ 为路段 $s_i s_j$ 上的客流量。为便于对后续问题的描述和建模, 本文不涉及混合交通配流问题, 即不考虑路网拥挤程度对公交车辆行驶时间的影响。

1.4 出行路径阻抗

在公交网络中, 由于同一路段会有多条线路, 且每条线路都有其固定的行车路线和发车频率, 受出行目的、出行时间、出行距离、出行费用、舒适度及出行习惯等的影响, 乘客往往只会考虑其中的一部分路径, 称这部分路径为有效路径。通过有效路径的选取, 将乘客为实现其物理位置转移而付出的时间和经济成本之和称为出行路径阻抗。

基于以上分析, OD 对 w 间路径 r 上的阻抗 T_{wr} 应为路径 r 上包含的所有路段 $s_i s_j$ 的 ($i, j=1, 2, \dots, n$) 乘车时间和所有站点 s_i 等待时间之和, 即

$$T_{wr} = \sum t_{s_i s_j} \lambda_{wrs_i s_j} + \sum t_{s_i} \eta_{wrs_i} \quad (1)$$

式中: $t_{s_i s_j}$ 为路段 $s_i s_j$ 的乘车时间(包括路段 $s_i s_j$ 之间的站点停靠时间); t_{s_i} 为站点 s_i 的等待时间, 若 s_i 为换乘站点, 还应包括换乘步行时间; $\lambda_{wrs_i s_j}$ 和 η_{wrs_i} 分别为路段 $s_i s_j$ 和站点 s_i 与路径 r 之间的关联系数, 当 OD 对 w 间的路径 r 经过路段 $s_i s_j$ 时, $\lambda_{wrs_i s_j}$ 为 1, 否则为 0; 当 OD 对 w 间的路径 r 经过站点 s_i 时, η_{wrs_i} 为 1, 否则为 0。

2 路径选择模型

2.1 有效路径与出行效用

通常情况下, 广义有效路径阻抗往往在乘客可承受的一定范围之内。由于乘客并不能完全了解城市交通网络的实际状况, 也无法准确预估各个备选路径的出行效用, 因此, 可将路径的效用视为一个随机变量。乘客出行行为在消耗时间成本和经济成本的同时, 定会给出行者带来效用, 本文引入转换系数 θ , 将路径阻抗转换为出行效用, 则有

$$T_{wl} \leq (1 + E) T_{wl} \quad (2)$$

$$U_{wr} = V_{wr} + \epsilon_{wr} \quad (3)$$

$$U_{wr} = -\theta T_{wr} + \epsilon_{wr} \quad (4)$$

式中: T_{wl} 为 OD 对 w 间的最小出行阻抗; E 为有效路径容忍系数; U_{wr} 为 OD 对 w 间路径 r 上的效用; V_{wr} 为效用的固定项; ϵ_{wr} 为效用的随机项。

2.2 路径选择模型

根据效用最大化原则, 乘客总会选择 OD 对之间效用最大的路径, 而效用 U_{wr} 又是一个随机变量, 因此, 乘客的路径选择问题实则是一个概率选择问题, 路径选择概率为该路径效用在所有可选路径中效用最大的概率, 即 OD 对 w 间路径 r 被选择的概率为

$$p_{wr} = P(U_{wr} \geq U_{wk}) \quad k \neq r, k \in R_w \quad (5)$$

若 ϵ_{wr} 服从二重指数分布, 路径 r 被选择的概率 p_{wr} 为

$$p_{wr} = \frac{\exp(V_{wr})}{\sum_{r \in R_w} \exp(V_{wr})} = \frac{\exp(-\theta T_{wr})}{\sum_{r \in R_w} \exp(-\theta T_{wr})} \quad (6)$$

转换系数 θ 也常用于反映乘客对公交网络的熟悉程度, 当 θ 趋近于 0 时, 乘客对网络是完全陌生的, 此时乘客在所有可选有效路径上呈均匀分布, 说明乘客的路径选择与路径效用无关, 各个路径被完全随机选取; 当 θ 趋近于 ∞ 时, p_{wr} 趋近于 1, 乘客对路网的熟悉程度相当高, 此时所有乘客均选择其感知成本最小的路径。

然而, 标准 Logit 模型的 IIA 特性是人们最常提及的 Logit 模型的问题之一。任意 2 个选择方案的选择概率的比值不受其他任何选择方案的效用函数的固定项的影响。对公交路径选择而言, 就是任意 2 条路径选择概率的比值不受其他任何路径效用函数固定项的影响, 这使得客流量的分配会产生一些不尽合理甚至错误的结果, 为避免这一现象, 本文采用改进的 Logit 模型, 即有

$$p_{wr} = \frac{\exp(-\theta T_{wr} / T_{wl})}{\sum_k \exp(-\theta T_{wk} / T_{wl})} \quad (7)$$

路径流量 f_{wr} 为

$$f_{wr} = q_w p_{wr} \quad (8)$$

各个线路流量 x_l 、各个路段流量 $x_{s_i s_j}$ 以及各个换乘站的换乘流量 $x_{s_i l m}$ ($m \in L$) 分别为

$$x_l = \sum_w \sum_{r \in R_w} f_{wr} \sigma_{wrl} \quad (9)$$

$$x_{s_i s_j} = \sum_w \sum_{r \in R_w} f_{wr} \lambda_{wrs_i s_j} \quad (10)$$

$$x_{s_i l m} = \sum_w \sum_{r \in R_w} f_{wr} \lambda_{wrs_i s_j} \eta_{wrs_i} \sigma_{wrl} \quad (11)$$

式中: σ_{wrl} 为 OD 对 w 之间线路 l 与路径 r 之间的对应关系系数, 如果对应线路属于 OD 对 w 之间的路径 r , 则 σ_{wrl} 取值为 1, 否则为 0。

3 求解算法

基于弧段的公交配流算法和基于路径的公交配流算法是最常见的 2 种满足 Logit 模型的配流算法。前者由于不需要记录路网中的路径信息而具有较高的运算效率, 但对有效路径的定义过于严格, 从而限制了广泛应用^[21]; 后者需要记录路网中各个 OD 对之间的有效路径, 较适用于规模相对较小的交通网络。结合本文提出的广义公交路径定义和路径选择模型, 采用基于路径的配流算法对模型进行求解, 算法流程见图 5, 具体的算法步骤如下。

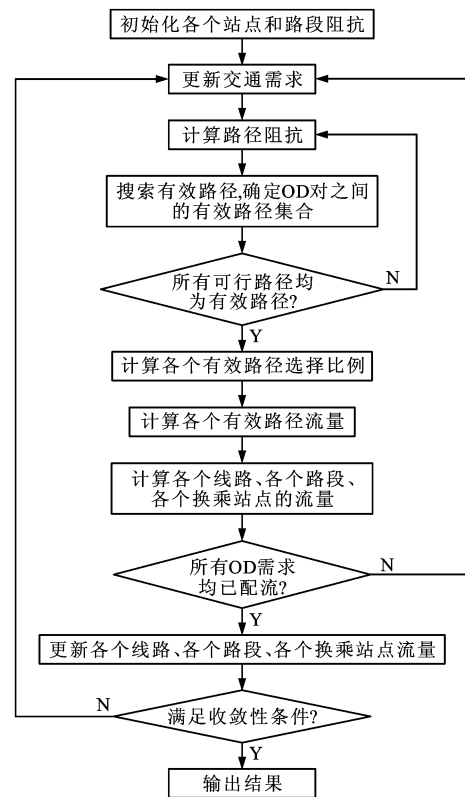


图 5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flow

Step 1: 初始化。对初始公交网络进行一次全有全无分配, 得到各个线路、各个路段以及各个换乘站点的流量。

Step 2: 更新所有的路径阻抗, 搜索有效路径。

Step 3: 计算各个有效路径的选择比例。

Step 4: 计算各个有效路径流量。

Step 5: 在获取有效路径流量之后,分别计算各个线路流量、各个路段流量以及各个换乘站点的换乘流量。

Step 6: 收敛性检验。给定一个可接受的容忍水平 τ , 如果所有被选路径的最大阻抗和最小阻抗之差连续若干次均不超过该容忍水平 τ , 则停止计算, 否则返回 Step 2。

4 计算结果分析

4.1 基本状况描述

成都市交通网络为典型的“井+环”式环形放射式路网。目前的道路维修和扩建基本上还是强化该结构和功能, 公交路网正是依托该道路网而建立的,

本文选取 4 条较具代表性的线路来检验模型及算法的合理性和有效性, 公交网络实例见图 6。绕一环路通行的 27 路、绕二环路通行的 51 路、南北走向的 16 路(上行)、东西走向的 8 路(上行)共 138 个公交站点, 其中包括火车北站、人民北路、人民北路二段北、清水河、高升桥、锦江宾馆、一环路南二段、一环路东三段、万年场、倪家桥 10 个换乘站点。

4.2 计算结果

4 条线路 8 路、16 路、27 路和 51 路的首班车和末班车发车时刻分别为早上 6:30 和晚上 22:00, 在早高峰(7:00~8:30)和晚高峰(17:00~19:00)的发车间隔最小, 分别为 4、4、3、3 min, 在 6:30~7:00 和 19:00~22:00 的发车间隔最大, 均为 10 min, 在 8:30~17:00 的平均发车间隔均为 7 min。

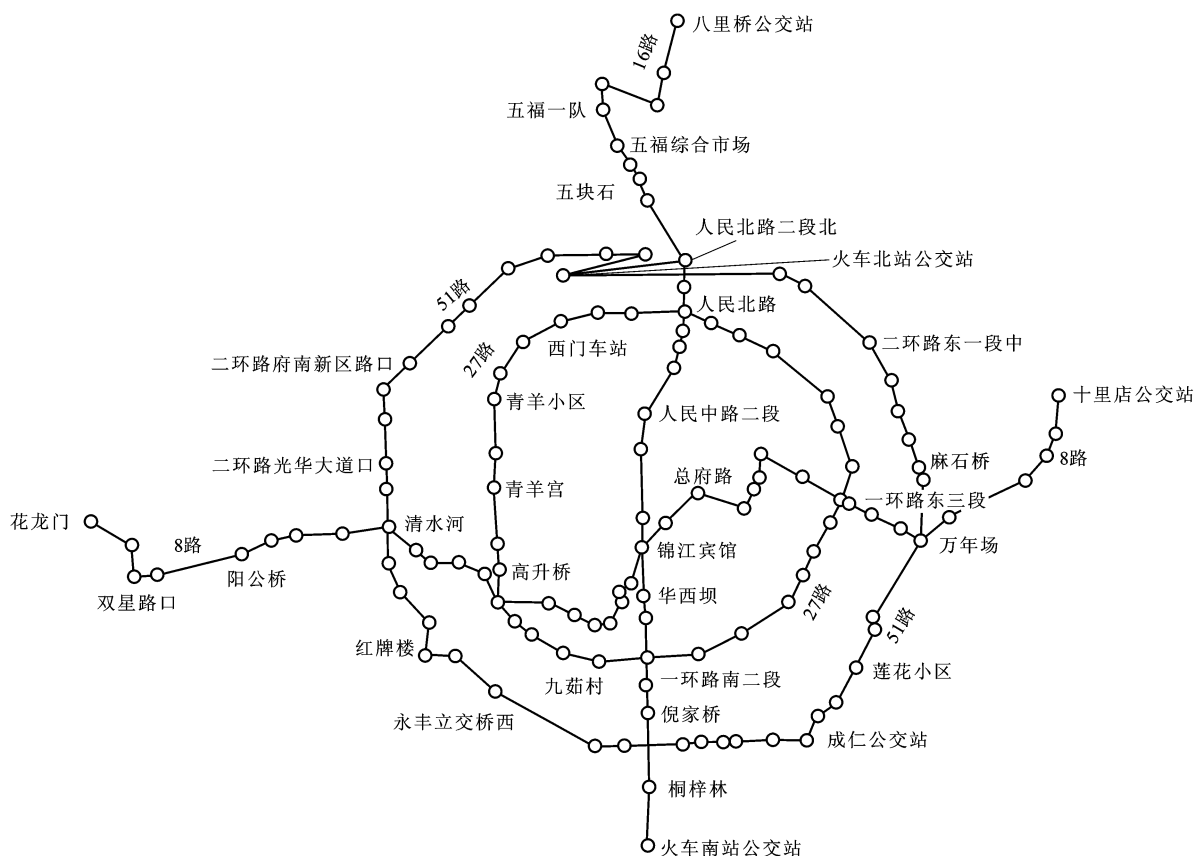


图 6 公交网络实例

Fig. 6 Example of transit network

各个换乘站点换乘不同线路的步行时间见表 1, 换乘方案均指公交车辆之间的换乘, 为简洁起见, 表 1 中仅注明线路编号(下同)。早高峰时段, 任意 2 个相邻站点之间的行驶时间均值为 3 min, 阳公桥至火车北站公交站之间和桐梓林至万年场之间的这 2 条路径的最小阻抗分别为 51.5、48.5 min。

由于成都市公交 IC 卡可在 2 h 内免费换乘 3

次, 且对调查结果进行统计分析可知, 乘客对票价并不敏感, 故可不考虑票价影响。

通过对成都 IC 卡的刷卡消费数据分析, 令 E 与 θ 分别为 0.5、1, 经过计算可得阳公桥至火车北站和桐梓林至万年场的公交配流结果, 见表 2。由表 2 可知, 随着乘车时间和路径阻抗的逐渐递增, 各个有效路径的被选择比例相应减少, 这与实际情况

表 1 步行时间
Tab. 1 Walking times min

换乘站点	换乘方案	步行时间
人民北路	16→51	4
	51→16	4
	51→27	0
	27→51	0
火车北站	51→27	0
	27→51	0
一环路南二段	16→27	5
	27→16	5
清水河	8→51	0
	51→8	0
一环路东三段	8→27	5
	27→8	5
人民北路二段北	16→51	4
	51→16	4
锦江宾馆	8→16	0
	16→8	0
倪家桥	16→51	6
	51→16	6
高升桥	8→27	0
	27→8	0
万年场	8→51	0
	51→8	0

表 2 配流结果
Tab. 2 Assignment results

阳公桥至火车北站公交站				
换乘次数	换乘站及换乘方案	乘车时间/min	路径阻抗/min	选择比例/%
1	清水河(8→51)	48	51.5	41.98
1	高升桥(8→27)	54	62.5	34.27
1	一环路东三段(8→27)	57	65.5	12.28
2	锦江宾馆(8→16) 人民北路(16→27)	60	70.5	5.93
2	锦江宾馆(8→16) 人民北路二段北(16→51)	60	71.5	5.53
桐梓林至万年场				
换乘次数	换乘站及换乘方案	乘车时间/min	路径阻抗/min	选择比例/%
1	倪家桥(16→51)	39	48.5	62.07
1	锦江宾馆(16→8)	51	55.0	24.53
1	人民北路二段北(16→51)	42	52.5	13.40
2	一环路南二段(16→27) 一环路东三段(27→8)	65	74.5	

相符。通常情况下,人们往往会先考虑可以直达的线路,少部分情况下才会考虑换乘,如必须换乘,或不赶时间,或换乘行为并不会带来时间和费用的增加等情况。需要注意的是,不存在换乘行为的路径,路径流量、路段流量和线路流量均相同,不涉及换乘站点配流;而存在换乘行为的路径,相邻换乘线路的流量和路径流量、路段流量与换乘站点的流量相同。

由于成都公交 IC 卡刷卡消费数据中没有站点名字,且乘客下车不刷卡,因而不能从现有的刷卡数据库中准确获悉各个 OD 对之间的客流量。为进一步验证本文提出的配流模型,对有无考虑换乘行为情况下的配流结果进行对比分析,结果分别见图 7、8。

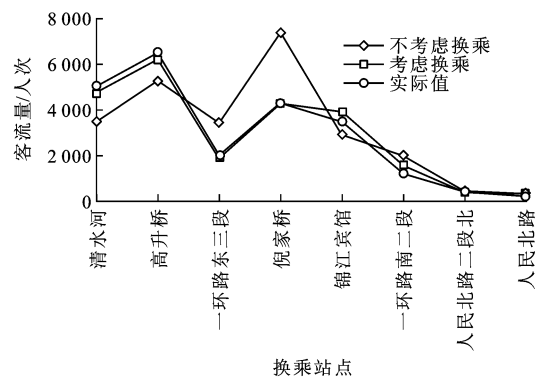


图 7 实际值与理论值比较

Fig. 7 Comparison of theoretical values and actual values

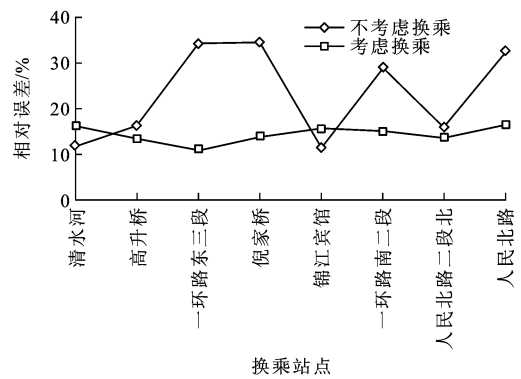


图 8 相对误差比较

Fig. 8 Comparison of relative errors

由图 7 可知,考虑换乘的配流结果更接近实际值,能更好地刻画城市公交网络运营状况下的乘客路径选择行为。由图 8 可知,考虑换乘行为时,配流结果与实际值的最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差分别为 16.46%、11.09%、14.42%。不考虑换乘行为时,最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差分别为 34.37%、11.38%、23.15%。换乘因素对乘客路径选择行为决策的影响不容忽视。

4.3 参数敏感性分析

为了更精准地把握因参数值的变化而引起配流结果的变化趋势,对有效路径容忍系数 E 和路网熟悉度 θ 进行敏感性分析。

4.3.1 有效路径容忍系数

保持其他条件不变,当 E 分别取 0.1、0.2、0.3、0.5 时,将不同 E 值下的分配结果与实际值进行分析比较,结果见图 9。

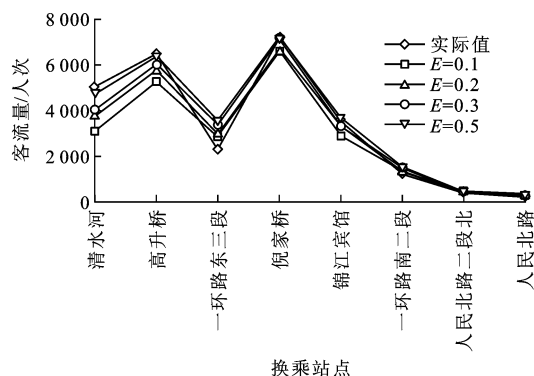


图9 不同有效路径容忍系数对配流结果的影响

Fig. 9 Influences of different values of E on public traffic assignment results

4.3.2 路网熟悉度

保持其他条件不变,当 θ 分别取 1、2、5、10 时,将不同 θ 值下的配流结果与实际值进行分析比较,结果见图 10。

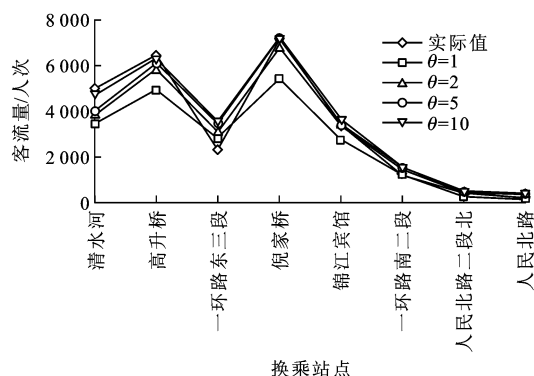


图10 不同路网熟悉程度对配流结果的影响

Fig. 10 Influences of different values of θ on public traffic assignment results

由图 9、10 可知,尽管 E 和 θ 二者的变化会对公交配流的结果产生影响,但均不显著。有效路径范围随着 E 的增大而扩大,包含不同换乘站点的有效路径也将增多;乘客对网络的熟悉程度 θ 将影响其在特定环境下选择换乘费用最小的有效路径。随着网络规模的不断扩大,乘客即使不能选择当前换乘费用最小的有效路径,也能通过其他换乘站点实

现 OD 对之间的成功出行。

5 结 语

公交配流是城市公交规划的重要研究内容,本文针对大城市“城外居住、城内上班”的工作生活模式,结合公交网络的特殊性,考虑换乘因素对公交配流问题进行拓扑建模,并设计了算法,为公交网络规划提供了一定的理论基础。但是,模型的抽象化和实际问题的复杂化使得本文的研究存在一些不足之处,若能综合考虑各种公交方式,如文献[20-24]提出的一体化公交方式,将轨道交通、地面公交及其他公交方式整合为一体。在此环境下,研究考虑换乘行为的一体化公交网络配流,可使理论研究更具现实指导意义,深入分析和研究该问题是下一步需要进行的工作。

参考文献:

References:

- [1] NUZZOLO A, CRISALLI U, ROSATI L. A schedule-based assignment model with explicit capacity constraints for congested transit networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 20(1): 16-33.
- [2] CIPRIANI E, GORI S, PETRELLI M. Transit network design: a procedure and an application to a large urban area[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 20(1): 3-14.
- [3] WAHBA M, MILATRAS; microsimulation learning-based approach to transit assignment[D]. Toronto: University of Toronto, 2008.
- [4] 雷全胜,唐祯敏.城市公交平衡配流研究的几个关键问题综述[J].系统工程学报,2003,18(1):62-66,70.
LEI Quan-sheng, TANG Zhen-min. Several key problems about the study of equilibrium assignment for urban transit network: a survey [J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(1): 62-66, 70. (in Chinese)
- [5] 陈 鹏,严新平,李旭宏,等.轨道交通与常规公交换乘优惠模型[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(5):85-90.
CHEN Peng, YAN Xin-ping, LI Xu-hong, et al. Transfer benefit model between rail transit and bus transit[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5): 85-90. (in Chinese)
- [6] 王 镜,邵春福,毛科俊.公交换乘优惠的双层规划模型[J].中国公路学报,2008,21(2):93-97.
WANG Jing, SHAO Chun-fu, MAO Ke-jun. Bi-level programming model for transfer benefit of public transportation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 93-97. (in Chinese)
- [7] YU Bin, YANG Zhong-zhen, JIN Peng-huan, et al. Transit route network design-maximizing direct and transfer demand

- density[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 22(10): 58-75.
- [8] KNOPPERS P, MULLER T. Optimized transfer opportunities in public transport[J]. *Transportation Science*, 1995, 29(1): 101-105.
- [9] SHAFABI Y, KHANI A. A practical model for transfer optimization in a transit network: model formulations and solutions[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2010, 44(6): 377-389.
- [10] ANEZ J, BARRA D L, PEREZ B. Dual graph representation of transport networks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1996, 30(3): 209-216.
- [11] JOLLIFFE J K, HUTCHINSON T P. A behavioural explanation of the association between bus and passenger arrivals at a bus stop[J]. *Transportation Science*, 1975, 9(3): 248-282.
- [12] LOZANO A, STORCHI G. Shortest viable path algorithm in multimodal networks[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(3): 225-241.
- [13] POON M H, WONG S C, TONG C O. A dynamic schedule-based model for congested transit networks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38(4): 343-368.
- [14] 翁 敏, 毋河海, 杜清运, 等. 基于公交网络模型的最优出行路径选择的研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2004, 29(6): 500-503.
- WENG Min, WU He-hai, DU Qing-yun, et al. An optimal route choice based on public traffic network model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(6): 500-503. (in Chinese)
- [15] 赵巧霞, 马志强, 张 发. 以最小换乘次数和站数为目标的公交出行算法[J]. *计算机应用*, 2004, 24(12): 136-137, 146.
- ZHAO Qiao-xia, MA Zhi-qiang, ZHANG Fa. Algorithms for public transit trip with minimal transfer times and stops[J]. *Computer Applications*, 2004, 24(12): 136-137, 146. (in Chinese)
- [16] 苏爱华, 施法中. 公交网络换乘问题的一种实现[J]. *工程图学学报*, 2005(4): 55-59.
- SU Ai-hua, SHI Fa-zhong. Optimal route choice of public traffic network based on shortest path searching[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2005(4): 55-59. (in Chinese)
- [17] 侯 刚, 周宽久. 基于换乘次数最少的公交网络最优路径模型研究[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(1): 44-47.
- HOU Gang, ZHOU Kuan-jiu. Research for public traffic network model of optimum route with minimal transfer times[J]. *Computer Technology and Development*, 2008, 18(1): 44-47. (in Chinese)
- [18] 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 Jian-feng. Transfer-based modeling flow assignment with empirical analysis for urban rail transit network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [19] 董 治, 李林波, 王艳丽. 城市交通管理公众参与机制的要素[J]. *长安大学学报: 社会科学版*, 2009, 11(1): 38-41, 49.
- DONG Zhi, LI Lin-bo, WANG Yan-li. Elements in public participation mechanism of urban traffic management[J]. *Journal of Chang'an University: Social Science Edition*, 2009, 11(1): 38-41, 49. (in Chinese)
- [20] 李淑庆, 李 哲, 朱文英. 一体化公交网络均衡配流模型[J]. *交通运输工程学报*, 2013, 13(1): 62-69.
- LI Shu-qing, LI Zhe, ZHU Wen-ying. Equilibrium assignment model of integrated transit network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(1): 62-69. (in Chinese)
- [21] LAM W H, HUANG Hai-jun. A combined trip distribution and assignment model for multiple user classes[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1992, 26(4): 275-287.
- [22] 石 琼, 吴群琪. 拥挤收费为主导缓解城市交通拥挤可行性研究[J]. *长安大学学报: 社会科学版*, 2004, 6(3): 38-42.
- SHI Qiong, WU Qun-qi. Feasibility research on congestion pricing for our urban traffic congestion[J]. *Journal of Chang'an University: Social Science Edition*, 2004, 6(3): 38-42. (in Chinese)
- [23] 王元庆, 王瑶文, 孙传姣. 城市交通技术援助项目特点及效果[J]. *长安大学学报: 社会科学版*, 2008, 10(1): 38-42.
- WANG Yuan-qing, WANG Yao-wen, SUN Chuan-jiao. Characteristics of technical assistance for urban transportation and effect[J]. *Journal of Chang'an University: Social Science Edition*, 2008, 10(1): 38-42. (in Chinese)
- [24] 赵建有, 俞礼军. 城市交通可持续发展状态量化评价方法[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2004, 24(4): 63-66.
- ZHAO Jian-you, YU Li-jun. Quantitative assessment method of sustainable development state for urban transport system[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2004, 24(4): 63-66. (in Chinese)