

城市公交系统内乘客出行动态均衡模型^①

田 琼, 黄海军

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

摘要: 通过引入城市公共交通工具内乘客的拥挤成本, 建立了基于乘客的出发时间选择的动态出行均衡模型, 并对具有不同运输能力的公交方式所导致的乘客出行差异进行了比较分析. 研究表明大容量公共交通能使沿线上下游站点乘客都收益, 而小容量公交车辆在高峰期会被远距离出行者优先挤占, 从而有可能加大下游站点乘客的出行成本. 算例结果支持了模型的结论. 这有助于加深对复杂交通行为的理解, 对改进公交规划与管理具有理论指导价值.

关键词: 公共交通; 拥挤成本; 交通行为

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1007-9807(2009)01-0001-08

0 引言

随着我国城市社会经济的发展和城市用地策略的改变, 居民生活地和工作地的空间布局与联系已经发生了质的变化. 在北京和上海等大城市, 越来越多的居民搬迁到城市中心的外面, 但工作地仍然位于城市内部, 这就使得大城市日常出行呈现大规模的聚集现象. 以北京为例, 根据《北京城市总体规划 2004 年—2020 年》^[1], 中心城人口规模将被严格控制, 现在是 650 万人, 2020 年将下降到 540 万人, 其中旧城居住人口将控制在 110 万人左右. 据相关调查, 仅占北京城市土地面积 5% 的旧城, 集中了全市 50% 以上的交通量和商业活动. 这导致了北京经济社会发展在空间上的压力几乎全部集中于市区. 然而旧城道路空间有限, 交通压力过大造成的功能性缺陷已无法简单通过修建一、两条道路来解决. 越来越多的人士认识到, 解决我国大城市交通问题的根本出路在于优先发展公共交通, 建立一个以轨道交通系统为骨架, 以常规公交为主体, 多种交通方式相互协调的综合交通体系.

然而, 当有关部门把注意力集中在通过发展

公共交通改善道路交通拥挤状况时, 却往往忽视了公共交通系统内因人流过度拥挤造成的外部不经济. 比如车厢内的身体过度接触造成的不便和站台上的长时间等待, 以及由于拥挤所导致的人们受到骚扰和丢失私人物品的风险增大等, 这些都是公共交通系统内的拥挤成本. 也以北京市为例, 据有关调查显示^[2], 乘客表示喜欢乘坐公交车出行的不到两成, 近半的受访者明确表示不喜欢. 而导致老百姓产生不满意的最主要的两个原因是“人太多, 车内拥挤”(47.1%)和“等车时间过长”(42.7%). 不喜欢却不得不选择搭乘公交车出行, 这说明乘坐公交车更多地是大家一种无奈的选择. 目前, 公共交通工具中虽然普遍提供座位, 但在高峰期, 更多的人要站立乘车, 这就导致了每班次的人数不确定, 搭乘人数多的班次较搭乘人数少的班次要更拥挤, 人们也就要承担更多的拥挤成本. 在地铁等大容量公共交通设施内, 高峰期过度拥挤, 距离车门远的乘客往往要提前数站挤到车门附近准备下车. 对于无轨电车和公共汽车等小容量公共交通设施, 在高峰期甚至可能因为车辆满员而被迫等待几班车. 如何优化利用

① 收稿日期: 2007-12-03; 修订日期: 2008-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70521001; 70801002); 国家 973 重大基础研究计划项目(2006CB705503).

作者简介: 田 琼(1981—), 男, 河北廊坊人, 博士, 讲师. Email: tianqiong@buaa.edu.cn

有限的资源、提高服务质量,发展公共交通系统,从而吸引更多的居民乐于选择公交出行就变得十分关键了。北京的大多数居民表示,买得起私家车就不会选乘公交,而香港的家庭几乎都买得起私家车,但却乐于使用大众交通工具,这很值得我们深思。

本文考虑高峰期公共交通系统的内部拥挤,对公交沿线乘客出行行为的差异展开深入研究,揭示人们出行的内在规律,有助于加深对复杂交通行为的理解,为优化发展公共交通方式、改进公交规划与管理、改善城市交通拥堵状况,提供科学依据。

1 国内外研究现状及分析

缓解城市道路交通拥挤,除了通过新建和扩建道路直接改善交通外,鼓励公交出行、进行交通需求管理也是重要的办法,这个问题引起了许多经济学家、交通运筹学家的关注^[3~18]。

在20世纪70年代, Mohring^[3]利用公共产品边际成本定价原理建立了固定需求下公共交通方式的微观经济模型,并给出了最优的发车频率,发现了著名的“平方根法则”(最优发车频率与出行人数的平方根成正比)。Jansson^[4]简化了 Mohring 的模型,给出了最优站点距离的解析解,同时也验证了“平方根法则”。de Cea和 Fernandez建立了一个公交均衡配流模型^[5],考虑了公交线路容量的影响。在他们的模型中,引入了“有效频率”(effective frequency)的概念,考虑了因为换乘点人流拥挤的影响,导致乘客实际接受公交服务的频率变化。但是他们把这样的拥挤影响看作是流量的无上限单调递增凸函数,而没有在模型中对物理容量约束加以限制。

以上这些模型都把乘客流量视为外生变量,即研究静态公交配流,没有考虑乘客出发时间选择这样的动态行为。现实中,公共交通系统内人流量在一天内的变化差异往往很大,因此动态地研究公交系统内乘客的出行行为就变得尤为重要。进入1990年代,这一方向逐渐成为研究的热点。Sumi等^[6]提出了大容量公共交通系统下的出发时间和路径选择模型。Alfa和 Chen^[7]设计了一个算法考察高峰期通勤者出发时间选择问题,他们

将乘客的期望等车时间视为拥挤成本,由于计算过程复杂,不能给出模型的解析结果。Kraus和 Yoshida^[8]分析了与文献[7]类似的单线路模型,但侧重于经济分析与优化,他们用车站排队等待时间成本来反映公交拥挤,证明高峰期最优的发车频率与出行人数之间并不满足“平方根法则”,这也说明研究公交系统内的动态特性十分必要。Lam等人^[9,10]研究了由于公交系统内上下车的拥挤而引起公共交通实际服务频率的动态变化。

以上几个典型的动态模型都假设高峰期公交车厢内的乘客人数达到固定的上限值,没有考虑即使在高峰期,不同班次中的人数也可能存在变化。事实上,由于高峰期大量乘客站立乘车,车厢内不同班次之间的拥挤程度往往不同。Lam等人^[11]在香港的调查结果显示,车厢内的乘客数量是动态变化的,车厢内的拥挤和等车时车站上的拥挤会给出行者带来不便,这些不便会影响人们的交通模式选择和出发时刻选择。为了反映拥挤带来的不便影响,Huang等人^[12,13]使用一种不舒适度函数(Discomfort function)对公共交通的动态出行行为进行了研究,他们把乘客在车厢内经历的拥挤成本视为车内人数和乘车时间的单调增函数,研究了高峰期选择不同班次的乘客人数变化。随后,Huang等人^[14]又研究了在公共汽车与私家车混行的道路系统内,私家车对公共交通的影响,发现选择公共汽车的乘客数量在高峰期内呈“V”字形分布。进一步,Tian等人^[15,16]在多起点单讫点的网络上分别研究了不同站点乘客的班次选择行为差异和车厢容量对上下游乘客选择班次的影响。

本文同样考虑了公交系统内的拥挤成本,使用动态规划的建模方法对一种典型的公交系统(多起点单讫点)展开研究,考察高峰期的产生和消散,分析乘客的动态出行行为,并完成必要的模拟计算。应用本文提出的模型,可以评价公共交通规划与管理方案对乘客出行行为的影响。

2 均衡模型

由于高峰期车辆内往往存在站立的乘客,使得车厢内的人数为变量,从而导致不同班次车辆内的拥挤程度不同,厢内拥挤给人们造成的外部

成本可以表示成车内人数 n 的函数, 定义单位时间拥挤成本函数为 $g(n)$, 并对其作如下假设: (1) $g(n) \geq 0$ (2) $g(0) = 0$ (3) $g'(n) > 0, n \geq 0$ 假设 (1) 说明拥挤成本非负, 假设 (2) 说明当车内没有人时就不存在拥挤成本, 假设 (3) 说明拥挤成本为车内人数的增函数, 这些都符合基本的客观现象和物理条件.

乘坐公共交通工具, 在高峰期都要承受车厢内的拥挤成本, 但不同的公交工具又有不同的特点. 比如在地铁、轻轨等大容量公共交通系统内, 每一班次所运载的乘客数量可以达到数百甚至上千. 出于安全考虑, 车厢的容量都设计得比较大, 正是因为设计容量大 (当然, 设计容量还是小于极限的物理容量), 可以被挤压的潜力也大, 就可能出现这样的乘车现象: 在车内人数达到设计容量之前, 人们很介意拥挤的程度, 发现拥挤后能够自动选择别的班次; 当车内人数超过设计容量时, 有部分乘客还能够继续上车 (除非物理容量也达到了). 靠近站点的人乐于搭乘虽然拥挤、但延误时间很少的班次, 对他们来说, 不愿过早或很晚地赶到车站登上可以早到或很晚达到 W 的列车, 因此拥挤不可避免. 对这类公共交通工具而言, 容量约束是相对软性的.

对于公共汽车、无轨电车和双层巴士等小容量的交通工具而言, 下游站点的乘客就要考虑到达的班车是否满员, 若满员了, 他们就不得不等待下一班车. 小容量交通工具的挖潜空间十分小. 在高峰期, 小容量公共交通工具的站台上往往会形成长长的等待队列, 因此, 对小容量交通工具来说, 车内容量是一个不可以被突破的强约束. 对等待队列中的人们来说, 即使愿意忍受车内拥挤, 也上不了车. 如何刻画不同公共交通工具车内拥挤所导致的出行分布差异, 就是本文所要研究的核心内容.

2.1 模型描述

城市高峰期出行具有很强的集聚性, 本文研究如图 1 所示的公交系统, 列车由生活区 H_1 出发, 途经 H_2, \dots, H_{k-1}, H_k 等站, 开往工作区 W . 每天早晨, 有 N_1, N_2, \dots, N_k 个出行者, 分别从 H_1, H_2, \dots, H_k 出发去 W 上班 (中途无人下车). 列车的容量有限, 为 N_0 . 如果某一班次列车达到某一站点前, 其车内人数达到了最大容量, 该班车就不

能搭载新的乘客, 该站点的乘客只能等待后面到达的不满员班次列车.

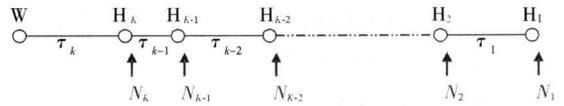


图 1 多起点单终点公共交通系统出行示意图

Fig 1 The transit line with multiple origins and a single destination

本文将车厢容量视作约束条件, 只有这样才能描述出行者上车的先后顺序, 这种顺序影响下游站出行者的策略集合 (因为满员的车辆不能再搭载新乘客), 导致不同站点的乘客有不同的上车优先权, 这就是, 上游站点的乘客 (先上车) 比下游站点的乘客 (后上车) 具有更多的优先选择班次的机会. 当列车到达某一站点时, 可能还有一定的接纳乘客空间, 但不能满足该站当时所有乘客的搭乘要求, 这列即将满员的车辆就拥有了“稀缺资源”, 车站上的某些乘客要得到“稀缺资源”, 就必须付出额外成本, 假设列车按照“先到先上”的规则服务乘客, 这笔额外成本就表现为排队等待时间.

在不失一般性的前提下, 假设所有出行者同质, 即具有相同的上班时间, 相同的时间价值, 对拥挤有着相同的敏感性. 出行者经过长期的实践和认识, 将拥有完备的发车信息, 对上游来的列车的载客情况也有了充分的认识, 他们会调整自己的到站时刻, 避免不必要的站台等待时间. 因此, H_i 处乘客乘坐第 j 班列车的出行总成本是

$$TC_j^i = p_i + \alpha T^i + C_j^i + \delta(j) + \theta_j^i, \quad 1 \leq i \leq K, j \in Z \quad (1)$$

其中: 右边第 1 项 p_i 为 H_i 处的上车票价, 本文设 p_i 为常数; 右边第 2 项为乘客的车上时间成本, α 为乘客的单位车上时间成本, T^i 为自 H_i 处上车的乘客的总乘车时间, 假设列车以恒定的速度行驶, 每班车从 H_1 到 W 所经过各区段的行驶时间 (包含车站停靠时间) 是固定的, 分别为 $\tau_k, \tau_{k-1}, \dots, \tau_1$,

则有 $T^i = \sum_{m=i}^K \tau_m$; 右边第 3 项 C_j^i 为 H_i 处乘客乘坐第 j 班车的车内拥挤成本. 根据假设, 有

$$C_j^i = \sum_{s=i}^K [g(\sum_{m=1}^s n_j^m) \tau_s], \quad 1 \leq i \leq K, j \in Z \quad (2)$$

其中: $n_j^m \geq 0$ 表示从 H_m 站搭乘第 j 班车的人数, Z 是所有列车班次的集合, $Z = \{ \dots, 5, 4, 3, 2, 1$

0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 ...}, 正数表示提前到达 W 的列车, 负数表示晚到的列车 (早到和晚到是相对于上班时间而言的). 式 (1) 右边第 4 项 $\delta(j)$ 为乘坐第 j 班车到达终点 W 的乘客所承受的早到或晚到惩罚成本, 可以表示为

$$\delta(j) = \begin{cases} j\beta t & j > 0 \\ 0 & j = 0 \\ |j| \gamma t & j < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: β 和 γ 分别为早到和迟到的单位时间惩罚成本, t 是发车时间间隔. 式 (1) 右边第 5 项为前面提到的排队时间成本.

对于在同一个车站 H_i 上车的所有乘客而言, $p_i + \alpha t^i$ 是相同的, 不会导致决策差异. 因此, 不失一般性, 可以假设 $p_i + \alpha t^i = 0$ 在同一站上车的乘客将在拥挤成本、早到 / 晚到惩罚成本和排队时间成本之间做出比较, 通过乘坐班次的选择, 使个人出行成本最小. 假设所有乘客的班次选择是在信息公开、不合作博弈规则下进行的, 则经过长期的调整, 存在一种所谓的用户均衡状态 (User Equilibrium), 人们的总出行成本是相同的, 没有人可以通过单方面改变乘坐班次来减少个人成本, 即

$$\begin{cases} TC_j^i = TC^i, n_j^i > 0 \\ TC_j^i \geq TC^i, n_j^i = 0 \end{cases} \quad j \in Z, i = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

其中: TC^i 是均衡状态下、站点 H_i 处乘客的个人出行成本. 上式表明, 当有乘客选择第 j 班列车时, 乘坐该班车的成本等于均衡成本, 如果没有乘客选择第 j 班列车, 乘坐该班次的成本将不小于均衡成本.

2.2 等价的数学规划问题

由于存在硬性的容量约束, 不同站点的出行者将因为他们的空间位置不同而在长期的均衡博弈中处于不同的地位, 当列车的载客量接近最大容量时, 距离 W 比较远的站点的乘客比距离 W 比较近的站点的乘客更容易得到上车机会. 在给定发车时间间隔 t 的前提下, 寻找满足均衡条件 (4) 的乘客出行分布等价于同时求解下面的 K 个极小值问题

$$\min L(n^i) = \sum_{s=1}^K \left[\sum_{j \in Z} G \left(\sum_{m=1}^s n_j^m \right) \right] \tau_s + \sum_{j \in Z} \left(\sum_{m=1}^K n_j^m \right) \delta(j), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

约束条件

$$\sum_{j \in Z} n_j^i = N_i \quad (6)$$

$$n_j^i \geq 0 \quad j \in Z \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^i n_j^s \leq N_0, \quad j \in Z \quad (8)$$

其中: $G(x) = \int_0^x f(\omega) d\omega$, $n^i = \{n_j^i | j \in Z\}$. 目标函数式 (5) 是所有乘客拥挤成本函数的积分和与他们所承受的所有延误时间成本之和, 优化变量 n^i 为站点 H_i 处搭乘各班次的人数. 与经典的用户均衡配流问题类似, 目标函数中的 $G(x)$ 并没有直接的经济意义. 式 (6) 是站点 H_i 处乘车人数的守恒条件, 式 (7) 是人数的非负条件, 式 (8) 是车厢容量约束条件, 表示列车离开站点 H_i 后车内人数不超过极限容量.

上述 K 个极小值问题的物理意义是, K 个不同站点的乘客在其他站点乘客出行选择已经确定的情况下各自做出自己的用户均衡决策. 这 K 个极小值问题的目标函数相同, 在其凸可行域内为有下界的连续函数, 所以必存在下确界. 另外, 由于每一个优化问题的解空间都是凸集, 且目标函数为凸函数, 使得每一步优化问题都可以得到唯一的最优解, 多次迭代优化后将收敛到唯一的均衡解. 这就说明了我们所建立模型的存在性和唯一性. 下面证明与最优化问题 (5) ~ (8) 等价的一阶条件满足前面定义的用户均衡条件 (4). 对于 H_i 站, 一阶最优性条件是

$$n_j^i [C_j^i + \delta(j) + \beta_j - v^i] = 0 \quad j \in Z \quad (9)$$

$$C_j^i + \delta(j) + \beta_j - v^i \geq 0 \quad j \in Z \quad (10)$$

$$\beta_j (N_0 - \sum_{s=1}^i n_j^s) = 0 \quad (11)$$

$$\beta_j \geq 0 \quad j \in Z \quad (12)$$

和约束 (6) ~ (8). 其中 v^i 和 β_j 是对应于约束条件 (6) 和 (8) 的拉氏乘子. 式 (9) 和 (10) 说明, 如果 H_i 处有人搭乘第 j 班列车, 即 $n_j^i > 0$ 那么乘客的出行成本等于常数 v^i , 如果 H_i 处没有人搭乘第 j 班列车, 即 $n_j^i = 0$ 那么乘客的出行成本将不小于常数 v^i . 因此 v^i 就是 H_i 处乘客出行的均衡成本 TC^i . 式 (11) 和 (12) 说明, 若列车离开 H_i 处还没有满员, 在 H_i 处就没有发生排队等待成本, 所以 $\beta_j = 0$ 否则, 从该处上车的乘客就是使用了“稀

缺资源”,要付出额外的排队等待成本,即 $\rho \geq 0$ 因此 ρ 就是 H_i 处乘客搭乘第 j 班车的排队等待成本
 可见,对每个车站而言,模型 (5) ~ (8) 的一阶最优性条件等价于用户均衡条件 (4),即乘客在其选择搭乘的班次中都将承担相同的也是最低的出行成本,同时满足列车极限容量约束条件.

3 求解算法

本节设计一个算法,求解均衡状态下的乘客班次选择分布.为了保证乘客能在高峰期内自由选择列车班次,列车标号集合 $Z = \{\xi \dots, \xi - 4, \xi - 3, \xi - 2, \xi - 1, \xi, \xi + 1, \xi + 2, \xi + 3, \xi + 4, \dots, \xi + \zeta\}$ 应该足够大,但过大又不利于提高计算效率.下面给出一个估计 ξ 和 ζ 上限的简单算法.求解下面的优化问题 (13) ~ (16),通过试算的方法找到合适的 ξ^* 和 ζ^* ,使其满足条件 $n_{\xi^*}^1 = 0$ 和 $n_{-\zeta^*}^1 = 0$ 且 $n_{\xi^*-1}^1 > 0$ 或 $n_{-(\zeta^*-1)}^1 > 0$

$$\min L(\mathbf{n}^1) = \sum_{s=1}^K \tau_s \cdot \sum_{j \in Z} G(n_j^1) + \sum_{j \in Z} n_j^1 \cdot \delta(j) \quad (13)$$

约束条件

$$\sum_{j \in Z} n_j^1 = \sum_{i=1}^K N_i \quad (14)$$

$$n_j^1 \geq 0 \quad j \in Z \quad (15)$$

$$n_j^1 \leq N_0, \quad j \in Z \quad (16)$$

注意到, (13) ~ (16) 其实是优化问题 (5) ~ (8) 的一个特例,相当于将所有的出行者都集中到始发站.假设所有出行者都承受最长的拥挤时间 $\sum_{s=1}^K \tau_s$,由此得到的 ξ^* 和 ζ^* 显然满足 $\sum_{i=1}^K n_{\xi^*}^i = 0$ 且 $\sum_{i=1}^K n_{-\zeta^*}^i = 0$ 即,能够保证乘客在高峰期内自由选择列车班次.

在确定了可选择班次集合 Z 后,求解均衡流量分布的算法如下:

步骤 1 初始化.

$$\text{令 } \mathbf{n}^{(0)} = \{n_j^i = \frac{N_i}{\xi + \zeta + 1} \mid j \in Z, 1 \leq i \leq K\}$$

计算 $L(\mathbf{n}^{(0)})$, 置迭代次数 $r = 1$

步骤 2 用户均衡分配:

步骤 2.1

基于 $\mathbf{n}_{(-1)}^{(r-1)} = \{n_j^i \mid j \in Z, 1 \leq i \leq K, \text{ 且 } i \neq 1\}$, 求解第 1 站的优化问题 (5) ~ (8), 得到该站新的乘客流量分布 $\mathbf{n}^{(r)1}$, 更新 $\mathbf{n}^{(r-1)1} = \mathbf{n}^{(r)1}$.

.....

步骤 2 k

基于 $\mathbf{n}_{(-k)}^{(r-1)} = \{n_j^i \mid j \in Z, 1 \leq i \leq K, \text{ 且 } i \neq k\}$, 求解第 k 站的优化问题 (5) ~ (8), 得到该站新的乘客流量分布 $\mathbf{n}^{(r)k}$, 更新 $\mathbf{n}^{(r-1)k} = \mathbf{n}^{(r)k}$.

.....

步骤 2 K 步

基于 $\mathbf{n}_{(-K)}^{(r-1)} = \{n_j^i \mid j \in Z, 1 \leq i \leq K, \text{ 且 } i \neq K\}$, 求解第 K 站的优化问题 (5) ~ (8), 得到该站新的乘客流量分布 $\mathbf{n}^{(r)K}$, 更新 $\mathbf{n}^{(r-1)K} = \mathbf{n}^{(r)K}$.

步骤 3 收敛性检验:

计算 $L(\mathbf{n}^{(r)})$, 若满足 $[L(\mathbf{n}^{(r-1)}) - L(\mathbf{n}^{(r)})] < \varepsilon$ (其中 ε 是迭代精度), 则停止, 输出 $\mathbf{n}^* = \mathbf{n}^{(r)}$, 此即均衡流量分布; 否则, 令 $r = r + 1$ 转步骤 2

4 数值实验

下面给出一个算例,一方面验证本文的理论分析结果,另一方面考察最大容量约束对不同居住地的出行影响.模型的输入参数是: $K = 8$ (站), $(\beta, \gamma) = (10, 30)$ (元/h), $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k\} = \{0.2, 0.3, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.15, 0.1\}$ (h), $N = \{N_1, N_2, \dots, N_K\} = \{200, 200, 300, 300, 300, 300, 300, 300\}$ (人), 车内的线性拥挤成本函数 $g(n) = 0.05n$ (元/h), 发车间隔 $t = 0.05$ (h). 图 2 ~ 图 5 是不同容量约束下均衡状态的乘客出行分布图.

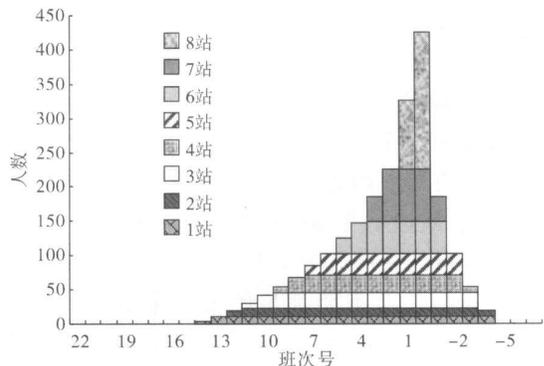


图 2 容量约束为 500(人/班车)时的流量分布图

Fig. 2 Boarding flows when the physical capacity is 500

图 2 中的容量约束为 500(人/班车), 在均衡状态, 准时到达班次的车内人数小于 450 可以看作是大容量公共交通工具, 比如地铁. 图 2 显示, 除最接近 W 的站点(第 8 站)外, 其余站点的乘客流量在高峰期基本是稳定的, 第 8 站的乘客在两个班次之间的分布变化比较大, 但这两个班次的载客量仍未达到物理极限, 这充分反映了大容量公共交通工具的基本特性.

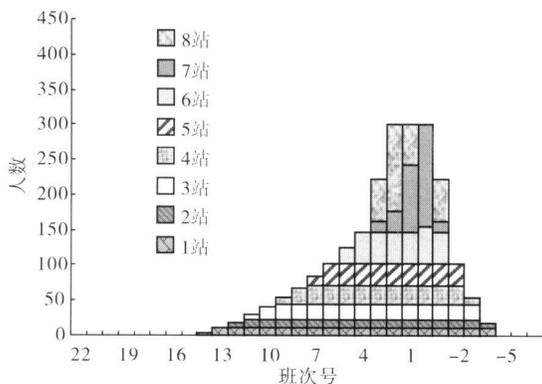


图 3 容量约束为 300(人/班车)时的流量分布图

Fig. 3 Boarding flows when the physical capacity is 300

图 3 中的容量约束为 300(人/班车), 可以看出, 能够准时到达 W 的列车在到达第 8 站之前已经满员, 第 8 站的人们已经没有机会实现准时上班, 他们必须在早到与迟到之间做出选择, 多数选择了可以早到的列车(共 3 列), 少数选择了一列迟到的班次. 不仅第 7 站饱和期的乘客分布出现波动, 而且第 6 站饱和期的乘客分布也存在些微波动, 第 1 至第 5 站的流量分布是稳定的. 可以将城市轻轨看作这类交通工具. 这里, 上游乘客可以优先上车的选择优势已经有所反映了.

从图 4 可以看到, 当容量约束降为 150(人/班车)时, 更多的列车在到达终点站前满员, 只有始发站的流量分布是稳定的, 第 4~8 站没有人能够搭上准时达到 W 的那班车, 这时的交通运输资源处于短缺状态, 或者说需求相对运力过大. 稍大容量的公交汽车可以看作这类交通工具的代表. 大多数下游站点因为公交容量的限制不能搭上期望的班次, 被迫承受很高的延误时间成本.

当容量约束降为 80(人/班车)时, 准时到达的那班列车甚至不能满足始发站乘客的出行要求. 如图 5 所示, 对于第 1 站, 早上车的乘客有机会搭乘时间延误少的班次, 否则只能提前或延后出发以获得上车的机会. 中、小型公共汽车可以看作

这类交通工具的代表. 显然, 距离终点越近的乘客将承受越多的早到和迟到成本, 这将导致距离终点近的乘客在高峰期不愿意选择小容量的公共交通工具, 而是选择大容量的交通工具.

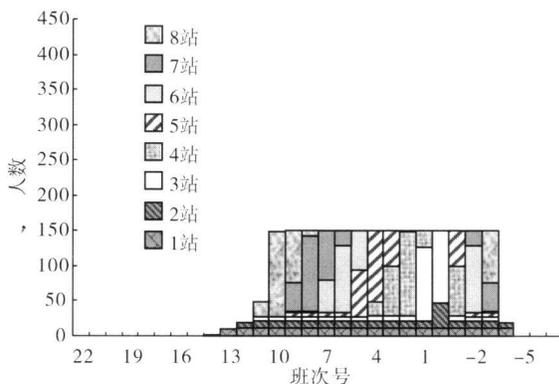


图 4 容量约束为 150(人/班车)时的流量分布图

Fig. 4 Boarding flows when the physical capacity is 150

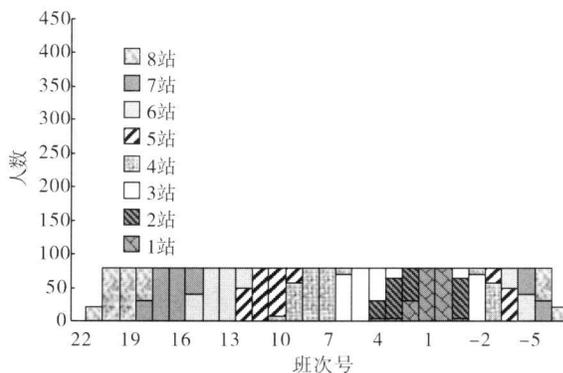


图 5 容量约束为 80(人/班车)时的流量分布图

Fig. 5 Boarding flows when the physical capacity is 80

5 结 论

本文将公交车辆内的拥挤成本纳入到模型之中, 在多起点单终点的公交网络上建立了可以产生动态用户均衡出行流量分布(指选择各班次的乘客数量)的等价最优化问题, 并且证明了均衡解的存在性和唯一性. 数值试验结果表明, 不同站点的乘客在选择不同容量的交通工具时, 行为是不相同的. 因为车厢容量的限制, 距离终点越近的公共交通出行者更倾向于选择大容量的公共交通工具; 距离终点越远的乘客因为享有上车的优先权而偏好选择小容量的交通工具.

本模型的研究使我们对高峰期公共交通系统内乘客的出行行为有了更深刻的认识, 可以辅助

决策如何根据实际需求布局恰当的公共交通工具 合理的公交票价和分析公交与私家车之间的竞争
来提供更好的服务. 接下来的工作包括如何确定 以综合的优化公共交通体系^[17, 18].

参 考 文 献:

- [1]北京市人民政府编. 北京城市总体规划(2004年—2020年)[J]. 北京规划建设, 2005, (2): 45
Beijing Government. Beijing Overall Urban Planning (2004—2020)[J]. Beijing Planning Review, 2005, 19(2): 45. (in Chinese)
- [2]零点调查指标数据. 大型调查: 搭乘城市公交车, 你最不满意的是什么[DB/OL]. [2005-04-14]. <http://culbook.sina.com.cn/c/2005-04-14/1445121426.html>
Horizonkey Data Survey: What do you dislike most about urban transit? [DB/OL]. [2005-04-14]. <http://culbook.sina.com.cn/c/2005-04-14/1445121426.html> (in Chinese)
- [3]Mehring H. Optimization and scale economies in urban bus transportation[J]. American Economic Review, 1972, 62(4): 591—604
- [4]Jansson J O. A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size[J]. Journal of Transport Economics and Policy, 1980, 14(1): 53—80
- [5]de Cea J, Fernandez J E. Transit assignment for congested public transport systems: An equilibrium model[J]. Transportation Science, 1993, 27(2): 133—147.
- [6]Sumi T, Matsumoto Y, Miyaki Y. Departure time and route choice of commuters on mass transit systems[J]. Transportation Research Part B, 1990, 24(2): 247—262
- [7]Alfa A S, Chen M. Temporal distribution of public transport demand during the peak period[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 83(2): 137—153.
- [8]Kraus M, Yoshida Y. The commuter's time of use decision and optimal pricing and service in urban mass transit[J]. Journal of Urban Economics, 2002, 51(2): 170—195.
- [9]Lam W H K, Gao Z Y, Chan K S, Yang H. A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks [J]. Transportation Research B, 1999, 33(3): 351—368
- [10]Lam W H K, Zhou J, Sheng Z H. A capacity constraint transit assignment with elastic line frequency[J]. Transportation Research B, 2002, 36(9): 919—938
- [11]Lam W H K, Cheung C Y, Lam C F. A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations[J]. Transportation Research A, 1999, 33(4): 401—415.
- [12]Huang H J, Tian Q, Yang H, Gao Z Y. Modeling the equilibrium bus riding behavior in morning rush hour[A]. In Proceedings of The 9th Annual Conference of the Hong Kong Society of Transportation Studies, 2004, 434—442
- [13]Huang H J, Tian Q, Gao Z Y. An equilibrium model in urban transit riding and fare policies[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3521: 112—121
- [14]Huang H J, Tian Q, Yang H, Gao Z Y. Modal split and commuting pattern on a bottleneck constrained highway[J]. Transportation Research Part E, 2007, 43(5): 578—590
- [15]Tian Q, Huang H J, Yang H. Equilibrium properties of the morning peak-period commuting in a many-to-one mass transit system[J]. Transportation Research Part B, 2007, 41(6): 616—631
- [16]Tian Q, Huang H J, Yang H. Commuting equilibria on a mass transit system with capacity constraints[A]. Transportation and Traffic Theory, 2007, 361—384
- [17]黄海军, 田 琼, 杨 海, 高自友. 高峰期公交车乘车均衡模型与竞争分析[J]. 管理科学学报, 2005, 8(6): 1—9
Huang Haijun, Tian Qiong, Yang Hai, Gao Ziyou. Equilibrium bus riding behavior in rush hours and system configuration for providing bus services[J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(6): 1—9. (in Chinese)
- [18]田 琼, 黄海军, 杨 海. 瓶颈处停车换乘的 logit 随机均衡选择模型[J]. 管理科学学报, 2005, 8(1): 1—6
Tian Qiong, Huang Haijun, Yang Hai. Mode choice models based on logit stochastic equilibrium in transportation systems with park-and-ride option[J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(1): 1—6. (in Chinese)

Dynam ic m odel for passengers' equilibrium commuting in urban transit system s

TIAN Q iong, H UAN G H ai-jun

School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract This paper presents a mathematical model to formulate how crowding effect existing in the public transport system affects the passengers' commuting behavior. Commuters are assumed to choose their optimal time-of-use decision from various stops/ham e= locations to a single destination (workplace) by trading off the travel time and in-vehicle crowding cost against the schedule delay cost. Several situations with various transit capacities are investigated to show the differences of commuting equilibriums in a many-to-one transit networks. It is found that in transit systems with larger capability, nearly all passengers along the line have the same benefits, while in systems with lower capability, passengers from up-stream station will suffer less travel cost.

Key words public transport, congestion cost, travel behaviors