

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.08.029

早高峰公共交通廊道的均衡模型和算法

余月^{*1}, 石超峰², 张玺¹

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学期刊社, 重庆 400074)

摘要: 为了刻画早高峰公共交通乘客的动态出行行为, 揭示出行时间均衡分布规律, 缓解通勤廊道拥挤状态, 研究了早高峰公共交通廊道的均衡模型和算法, 建立了时间资源配置均衡模型并分析了均衡的等价性条件。将乘客分为有座位和无座位2类, 将公共交通廊道视为一个时空网格网络, 其中运载工具的时空轨迹可以表示为多条垂直和水平连接的路径。考虑因车厢拥挤而产生的乘客不满意度, 建立了通勤者出行的广义成本函数, 得到了时空网格网络流均衡条件与公共交通廊道问题均衡条件之间的等价关系, 进而基于方向搜索法给出了一种求解公共交通廊道均衡模型的算法。以重庆轨道3号线为例, 验证了模型和算法的可行性和有效性。结果表明: 时空网络均衡和公共交通廊道出行时间选择的均衡本质上是一致的, 因而网络均衡的计算分析方法同样适用于公共交通廊道出行时间选择均衡的计算; 在早高峰时段的公共交通时空网络中, 每位通勤者都面临着拥挤效应成本和早到惩罚时间成本之间的权衡, 通勤者出发时间的选择是影响出行成本的重要因素之一, 以通勤者住宅地与工作区的距离划分, 拥挤成本对职住距离较远的通勤者影响更大, 早到惩罚成本对职住距离较近的通勤者影响更大。

关键词: 城市交通; 用户均衡模型; 建模分析; 公共交通廊道; 交通配流

中图分类号: U121

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 08-0214-08

Equilibrium Model of Public Transport Corridor in Morning Peak and Its Algorithm

YU Yue^{*1}, SHI Chao-feng², ZHANG Xi¹

(1. School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Journal Press of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to depict the dynamic travel behaviors of public transport passengers in morning peak, reveal the equilibrium distribution rule of travel time, alleviate congestion in commuter corridor, the equilibrium model of public transport corridor and its algorithm in morning peak are studied, the time resource allocation equilibrium model is established, and the equivalence condition of equilibrium is analyzed. The passengers are divided into categories of “seated” and “unseated”, and the public transport corridor is regarded as a spatio-temporal grid network, in which the spatio-temporal trajectories of vehicles can be expressed as multiple vertical and horizontal connected paths. Considering the passenger dissatisfaction caused by congestion in carriage, the generalized cost function of commuters’ travel is established, and the relationship between the equilibrium condition of spatio-temporal grid network flow and the equilibrium condition of public transport corridor problem is obtained. An algorithm for solving equilibrium model of public transport corridor is further proposed based on the direction search method. Taking Line 3 of Chongqing rail transit for example, the feasibility and effectiveness of the model and algorithm are verified. The result shows that (1) The spatio-temporal network equilibrium and the equilibrium of travel time choice in public transport

收稿日期: 2021-11-25

基金项目: 国家社会科学基金项目 (16BJL121, 18XJL00); 重庆市重大示范项目 (cstc2015shms-ztx0180); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1705148); 重庆交通大学科研启动经费项目 (17JDKJC-A002)

作者简介: (* 通讯作者): 余月 (1998-), 女, 四川达州人, 硕士研究生. (605855074@qq.com)

corridor are essentially the same, so the calculation and analysis method of network equilibrium is also suitable for the calculation of the equilibrium of travel time choice in public transport corridor. (2) In the spatio-temporal network of public transport during morning peak, each commuter faces a tradeoff between the cost of congestion effect and the cost of early arrival penalty time, the choice of departure time of a commuter is one of the important factors influencing travel cost. Divided by the distance between commuters' residences and offices, crowding cost has greater influence on commuters who live far away from offices, while early arrival penalty cost has greater influence on commuters who live near.

Key words: urban traffic; user equilibrium model; modeling analysis; public transport corridor; traffic assignment

0 引言

破解大城市高峰期时段的交通拥堵问题不仅是修路修桥的工程技术问题,而更是一个数量庞大、关系复杂及可以诱导的人车路开放复杂系统的交叉学科问题。一直以来,人们做了大量的工作来检验廊道问题的均衡模式以及研究早高峰时段的通勤行为问题。Arnott等^[1]详细定义了廊道问题,尽管这一问题本身很复杂,但学者们在这一领域已经取得了不少进展;田琼等^[2]在考虑乘客对拥挤敏感程度有异质性的基础上分析了乘客早高峰出行成本构成;Gubins等^[3]建立了单中心城市的动态瓶颈模型并证明最优时间依赖性道路定价对缓解通勤时段拥堵有积极影响;Li等^[4]拓展了Arnott的工作,通过寻找封闭形式的系统最优解及出发和到达流的准解析用户均衡解来解决廊道问题;Takayama等^[5]研究了时变拥挤收费对通勤者居住地空间分布的影响,建立了包含通勤者位置选择的动态瓶颈模型;李志纯等^[6]采用基于活动的方法,研究了早通勤时段瓶颈处的最优动态收费和阶梯收费问题;尚华艳等^[7]结合瓶颈模型和基于活动的方法研究了公交枢纽晚高峰乘客的通勤行为以及通勤者在其活动和出行时间之间的分配问题;肖玲玲等^[8]从消除排队的角度探索了早高峰拼车通勤者出发时间选择和出行方式选择对用户效用的影响。

另一种缓解交通拥堵的方式是由交通科学中的交通分配理论方向驱动的。近年来,为了更好地在长期交通规划和项目评估中预测未来交通流和出行时间,学者们对交通分配模型的优化展开研究。Zhao等^[9]在有限理性的基础上建立了考虑乘客期望水平的有限理性路径选择模型;Xu等^[10]建立了一种考虑出行者现状的路径选择模型,该模型在一定程度上改善了由于旅客误解和偏好不对称等因素导致的特定路径选择惯性;张玺等^[11]构建了一个以路段

变量为研究对象的日变交通分配模型,该模型能够表征有限理性的出行者在不确定风险环境中的决策行为以及面对风险时的主观心理特征;杜玲丽等^[12]在出行者获取信息不完全的假设下,建立了理解行程时间及其更新模型,并通过Dogit模型将理解行程时间和路径偏好共同纳入出行者的路径选择决策;Temelcan^[13]研究了利用模糊参数最小化去模糊出行总时间的方法,将BPR函数进行模糊化,建立了一种交通分配模型—SOTAP;赖元文等^[14]在参考依赖理论的基础上,选取出行时间和费用2个影响因素建立单次出行的路径选择模型,说明了出行者对时间损失的敏感度比费用损失的高。这些文献在计算复杂度和真实性上各有不同。

虽然目前有很多学者在廊道问题和交通分配问题2个领域分别进行了大量的研究,但未对2类问题之间的联系进行深入的研究。从本质上说,这2类问题都具有一些与经济学中产生的均衡概念高度相关的特征,都试图找到交通系统与其用户之间相互作用的均衡模式。廊道问题对应的是一种偏离平衡模式,描述了沿廊道或小尺度廊道网络的交通系统及其用户在时空维度上的关系。交通分配问题通常在空间尺度上涉及跨区域交通网络的所谓路径选择均衡模式。由于这2种均衡模式都是交通运输系统供需相互作用产生的结果,因此两者之间必然存在着某种联系。本研究试图探索一种新的方法来建立2种均衡之间的联系,从而更好地理解2种运输相关的问题及探索2种问题求解方法的互通性。

1 离散廊道均衡模型

1.1 公共交通廊道

在Aronott^[1]的廊道定义基础上给出公共交通廊道定义:考虑一条公共交通廊道 $\bar{t}$,它的终点站位于一个中央商务区,中间站连接几个居民区。如图1所示,直线上有 m 个站点,它们的索引是一个以 m 为

终点站的序列 $M=[1, 2, \dots, m]$, I 为运载工具 $I=[1, 2, \dots, i]$ 。假设每位乘客同质, 即乘客预期上班时间相同, 时间价值相同, 每天早上都从居住地步行到最近的车站 (如果乘客可以到达多个最近的车站, 乘客更喜欢离中央商务区更近的一个), 然后乘坐运载工具去中央商务区上班。乘客不被允许到

达公司或机构的时间比预期的时间晚, 预期时间用 t 表示。通勤者可能因为出行时间不同存在早到的现象, 但达到均衡时, 没有通勤者可以依靠改变自身的出行时间来获取更低的出行成本。 N_k 为到达 k 站并乘坐运载工具的乘客人数, 且 N_k 是严格正整数, $k=1, 2, \dots, m$ 。

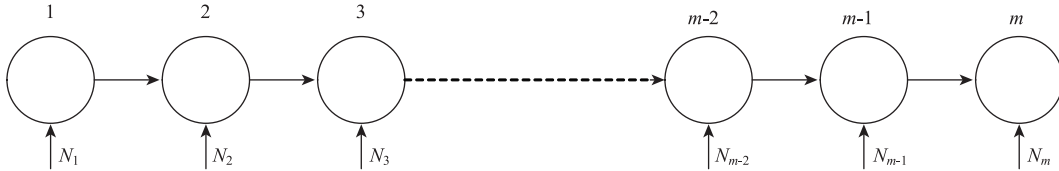


图1 公共交通廊道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of public transport corridor

1.2 廊道均衡模型的建立

假设公共交通运输工具通常是按预定的时刻表准时运行, 即以固定时间行驶, 则运载工具 $i \in I$ 在车站的发车时间和到站时间都是在给定的时刻表中预先确定的。设定列车在每个车站为乘客上车而停留的时间可以看作是列车在 2 个车站之间旅行时间的一部分, 这样才能保证车辆到站时间在时间表上可以表示为一个点, 保证了时空网络的连续性。所以对于任意站 $k=1, 2, \dots, m$, 到达时间和出发时间都可以记为 t_k^i , 其中 t_1^i 为 i 次车在首站的出发时间, t_m^i 为 i 次车到达终点站的时间。 T_k^i 为 i 次车从 k 站到 m 站的行程时间, 如图 2 所示。

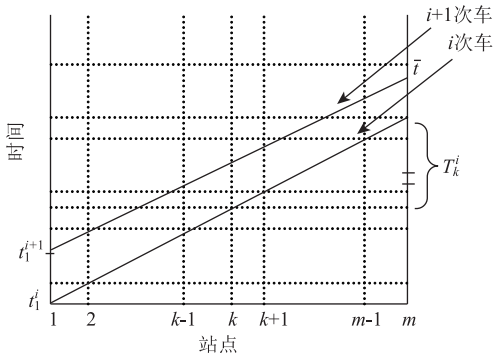


图2 时间表上连续运载工具之间的关系

Fig. 2 Relationship among successive vehicles on schedule

令 $\Delta t_x = \bar{t} - t_k^x - T_k^x$, x 表示车次。则在车站 k 乘坐 i 次车的乘客的一般成本可表示为:

$$c_k^i = (\alpha^i + 1)T_k^i + \beta\Delta t_i, \quad (1)$$

式中, α^i 为乘坐公共交通的乘客因同一车厢的拥挤而产生的乘客不满价值系数; β 为早到时间价值系数。各车站不满意成本总和表示为:

$$D = \alpha_0^i T_0^i + \alpha_1^i T_1^i + \dots + \alpha_{m-1}^i T_{m-1}^i = \sum_{k=0}^{m-1} \alpha_k^i T_k^i. \quad (2)$$

乘坐公共交通的乘客总行程时间表示为:

$$T = T_0^i + T_1^i + \dots + T_{m-1}^i = \sum_{k=0}^{m-1} T_k^i. \quad (3)$$

则 α^i 可表示为各车站乘客不满意成本的平均值:

$$\alpha^i = \frac{D}{T}, \quad (4)$$

$$\alpha_0^i = f(n_0^i - s), \quad (5)$$

$$\alpha_k^i = f(n_0^i + n_1^i + \dots + n_k^i - s), \quad (6)$$

式中, α_k^i 为在 k 站登上 i 次车的乘客不满意值, 与车厢上的乘客人数有关; s 为车厢的座位容量; n_k^i 为在 k 站登上 i 次车的乘客人数。

令 i 次列车在 2 个站点之间的运行时间 $\mu = t_k^i - t_{k-1}^i$, 则假设乘客的不满意成本为:

$$\alpha_k^i = \frac{1}{T_k^i} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\mu H_k^i + \mu \alpha_k^i V_k^i}{H_k^i + V_k^i}, \quad (7)$$

式中, V_k^i 为车厢内没有座位而站立的乘客数量; H_k^i 为车厢内有座位的乘客数量。乘客的总数保持不变, 则有关乘客的守恒式为:

$$\sum_i n_k^i = N_k, \quad k=1, \dots, m, \quad (8)$$

式中 n_k^i 为到达 k 站并乘坐第 i 次车到达目的地中央商务区的乘客人数。公共交通离散廊道问题是寻找满足以下均衡条件的乘客离场均衡模型:

$$c_k^i = c_k^j \quad i \neq j; \quad i, j \in I; \quad k \in M. \quad (9)$$

将式 (1) 代入式 (9) 可得:

$$(\alpha^i + 1)T_k^i + \beta\Delta t_i = (\alpha^j + 1)T_k^j + \beta\Delta t_j. \quad (10)$$

由于运载工具运行时间表是给定的, 则:

$$T_k^i = T_k^j = T_k \quad i \neq j; \quad i, j \in I. \quad (11)$$

然后将式 (11) 代入式 (10) 得到平衡条件:

$$\alpha^i - \alpha^j = \frac{\beta}{T_k} (t_k^i - t_k^j) \quad i \neq j; \quad i, j \in I; \quad k \in M. \quad (12)$$

2 交通分配均衡模型

2.1 时空网格网络

实际上,图1可以表示为一个时空网格网络,在这个时空网格网络中,运载工具的时空轨迹可以表示为由多个垂直和水平链路组成的路径。该时空网格网络有多条到达时空目的地的路径(即 t 时刻的 m 站),路径的数量由到达时间、首次列车发车时间和相邻列车之间的间隔时间决定。每个乘客选择其中一条路径到达时空目的地,如图3所示。

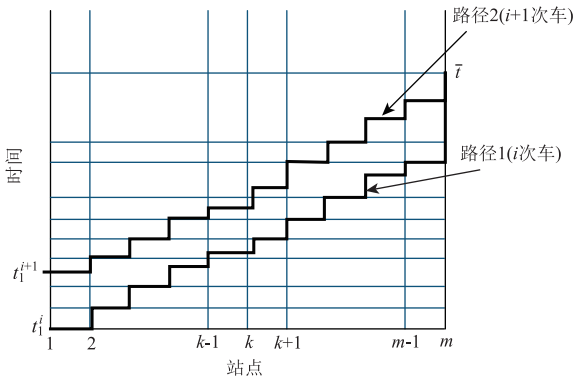


图3 时空网格网络时刻表

Fig. 3 Schedule of spatio-temporal grid network

2.2 时空网格网络均衡模型的建立

假设广义成本由2部分组成,一部分是出行时间价值,另一部分是早到时间价值。所有乘客被分成2组,一组是在车厢内有座位的,另一组是在车厢内没有座位而站立的。因此制定了乘坐公共交通运输工具的乘客的一般成本,函数为:

$$c(t_k^i) = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\mu H_k^i + \mu \alpha_k^i V_k^i}{H_k^i + V_k^i} + \beta \Delta t_i, \quad (13)$$

式中, V_k^i 为 k 站上车没有座位而站立的乘客数量; H_k^i 为 k 站上车有座位的乘客数量。一般来讲,列车的拥挤程度对站立乘客的乘车体验感的影响较大,而有座位的乘客感受到的拥挤感较小,所以将有座位的乘客的拥挤不满意度近似为零。客流守恒函数为:

$$\sum_i (H_k^i + V_k^i) = N_k, \quad k = 1, \dots, m. \quad (14)$$

当运载工具从一站行驶到另一站时,出于对顺序车辆的安全考虑,运载工具的实际速度是变化的。设 $v(x)$ 表示线路任意位置的车辆速度,则任意2个车站的行驶时间为:

$$t_k^i - t_{k-1}^i = \int_{k-1}^k \frac{1}{v(x)} dx. \quad (15)$$

时空网格网络的平衡条件为:

$$\begin{cases} c(t_k^i) = c_k^* & H_k^i > 0, V_k^i \geq 0 \\ c(t_k^i) \geq c_k^* & H_k^i = 0, V_k^i > 0 \\ i \in I; k \in M \end{cases}, \quad (16)$$

式中 c_k^* 为各使用路径的均衡广义成本。时空网格网络的均衡是在均衡状态下乘客使用的所有路径的成本均等于均衡广义成本,未使用的路径的成本均大于或等于均衡广义成本。

3 等效平衡

3.1 等价型证明

基于定理“时空网格网络的流平衡条件等价于公共交通离散廊道问题的流平衡条件”表述平衡等价性,设:

$$B^i = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\mu H_k^i + \mu \alpha_k^i V_k^i}{H_k^i + V_k^i}. \quad (17)$$

则这种广义成本也代表了时空网络的路径阻抗,可以重新表述如下:

$$c(k, t_k^i) = B^i + \beta \Delta t_i. \quad (18)$$

假设有另一车次 j 也可以在期望时间 $\bar{t}$ 之前运送乘客到中央商务区,根据时空网格网络的平衡条件,必须有:

$$\begin{cases} c(k, t_k^i) = c(k, t_k^j) = c_k^* \\ i \neq j; i, j \in I; k \in M \end{cases}. \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)可得:

$$B^i + \beta \Delta t_i = B^j + \beta \Delta t_j. \quad (20)$$

同样,运载工具时间表是给定的,则有:

$$T_k^i = T_k^j = T_k. \quad (21)$$

将式(21)代入式(20),可得:

$$B^i + \beta \Delta t_i = B^j + \beta \Delta t_j, \quad (22)$$

$$\frac{B^i - B^j}{t_k^i - t_k^j} = \beta. \quad (23)$$

如式(12), (19), (23)成立,则满足等价条件,证明完成。

3.2 求解算法

基于实际考虑给出一种求解通勤者离场平衡模式的算法。借鉴交通分配的均衡算法^[15-16],给出廊道问题均衡解的算法,将乘客的平均出行成本分为乘车票价、旅行时间价值、早到时间价值和拥挤成本4部分,于是重新计算如下:

$$c_k^i = p_k + ST_k^i + \beta_k \Delta t + G_k^i, \quad (24)$$

式中, c_k^i 为乘客从 k 站上车乘坐 i 次列车的总出行成本; p_k 为从 k 站上车到达终点站 m 的票价; S 为出行时间价值系数; β_k 为在 k 站上车的通勤者的单位

早到惩罚时间成本,与通勤者个人的收入息息相关,而通勤者居住地的平均房价可近似反映通勤者的平均工资水平,于是有:

$$\beta_k = \ln\left(\frac{R_k}{R_m} \times S\right), \quad (25)$$

式中 R_k , R_m 为 k 地和 m 地的平均房价。

$$\Delta t = \bar{t} - t_k^i - T_k^i, \quad (26)$$

$$G_k^i = D_k \times \frac{\sum_{a=1}^k N_a}{n_c} \times T_k^i, \quad (27)$$

式中, D_k 为从 k 地到 m 地的单位时间出租车费用,其数值大小是 k 地到 m 地的出租车费用和 k 地到 m 地的出租车行驶时间之比; n_c 是列车车厢容量。

已知,票价 p_k 和 S 是常数。平均房价 R_k 和 R_m 相对稳定,故 β_k 是常数。规定上班时间、列车发车时刻相对稳定,故 Δt 是常数。所以 c_k^i 的大小只与 G_k^i 有关, G_k^i 的大小由每站上车人数 N_a 的大小决定,且 $G_k^i = G(N_a)$ 是单调递增的函数。将 p_k , ST_k^i , $\beta_k \Delta t$ 之和记作 c_k^0 , 则:

$$\gamma_k = \frac{D_k \times T_k^i}{n_c}, \quad (28)$$

$$c_k^i = c_k^0 + \gamma_k \cdot \sum_{a=1}^k N_a. \quad (29)$$

假设轨道站的离场人数需求是固定的,在平衡条件下,轨道拥挤网络中乘客流量的自动调节方式是使得所有线路中被使用的线路都有最小且相等的路径成本。轨道乘客离场平衡问题可等价于下列数学规划:

$$\min Z(x) = \sum_k \int_0^{x_k} c_k^i(x) dx. \quad (30)$$

从 k 站到 m 站的总流量为 q_k , 则路径 i 上的流量与 q_k 满足以下关系:

$$\begin{cases} q_k = \sum_{i \in I} f_k^i, & i \in I \\ f_k^i \geq 0, & i \in I \end{cases}. \quad (31)$$

式 (29)~(31) 是一个凸规划问题,最优目标函数值唯一,于是可以使用方向搜索法求解此问题,具体步骤如下:

(1) 寻找初始可行解,即时空路径 i 和 k 站上车人数 x_k 的解。

(2) 利用每站上车人数 x_k 计算乘客选择时空路径 i 的出行成本 (即时空路径 i 的路径阻抗)。

(3) 寻找所有对于 k 站上车乘客的最短时空路径 i 。

(4) 将需求全部分配给最短时空路径 i (全有全无分配法),记本次搜寻到的时空路径为 $\hat{i}$ 以及上车乘客人数为 $\hat{x}_k$ 。

(5) 如果得到的结果接近最优解就停止迭代,否则根据以下规则重新调整上车人数: $x_k^{n+1} = \lambda_n \hat{x}_k^n + (1-\lambda_n)x_k^n$, $k=1, 2, \dots, m$, $\lambda_n \in [0, 1]$, 使用区间二分法求解迭代步长 λ_n 。

(6) 定义求解出的最短时空路径 i 的出行成本为 $SPTT = \sum_{i \in I} \hat{x}_k^i c_k^i$, 已知第 n 次迭代后的 $TSTT = \sum_{i \in I} x_k^n c_k^i$, 当 $\frac{TSTT}{SPTT} - 1 \rightarrow 0$, 迭代终止。此时得到的解 x_k^n 可近似为最优解。

4 数值算例

以重庆轨道 3 号线鱼洞至南坪段为例,对轻轨廊道乘客早通勤均衡模式进行实例分析。以鱼洞站、金竹站、学堂湾站、花溪站、九公里站、六公里站、南坪站 7 个站点为研究站点,见图 4。

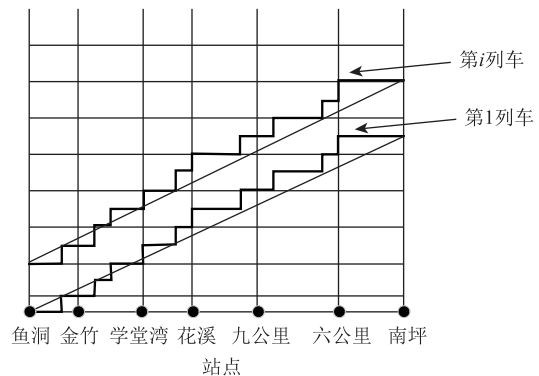


图 4 站点时空网络示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spatio-temporal network of stations

设定通勤者的期望到达时间为早上 9:00, 从 7:40 开始至 8:10, 鱼洞站共发出 6 班列车, 调查了最初的乘客离场模式, 如表 1 所示。经调研, 各站点至南坪站的票价 $p = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\} = \{5, 5, 4, 4, 3, 2\}$, 由 2020 年重庆市在岗职工年平均工资 98 380 元可近似得到乘客旅行时间价值系数为 33.7 元, 列车在每个相邻站点之间的运行时间为 3 min, 则 $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6\} = \{0.7, 0.65, 0.55, 0.45, 0.35, 0.15\}$, 各站点附近的平均房价 $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_m\} = \{9\ 000, 9\ 000, 12\ 000, 12\ 000, 13\ 000, 1\ 300, 15\ 000\}$, 各站点至南坪站的单位时间出租车费用为

73元/h,重庆轻轨3号线采用的是跨座式单轨,早高峰时段均为6节编组,最大载客量为969人,求解得到一个近似均衡的乘客通勤模式,如表2所示。

表1 初始乘客通勤分布(单位:人)

Tab. 1 Distribution of initial commuters (unit: person)

列车次序	站点					
	鱼洞	金竹	学堂湾	花溪	九公里	六公里
1	162	71	168	78	116	96
2	241	91	96	122	100	81
3	381	180	216	220	134	140
4	425	176	210	180	156	118
5	323	161	178	146	152	105
6	345	148	100	121	93	81

表2 近似均衡的乘客通勤分布(单位:人)

Tab. 2 Distribution of approximately equilibrated commuters (unit: person)

列车次序	站点					
	鱼洞	金竹	学堂湾	花溪	九公里	六公里
1	247	109	168	78	147	104
2	443	168	144	122	100	122
3	416	180	161	220	153	153
4	439	176	142	233	156	127
5	272	122	243	133	152	95
6	333	148	121	121	83	63

比较表1和2可以得出,实际调查的初始乘客通勤模式与近似均衡的乘客通勤模式有一定程度的差异,即乘客自主选择的通勤模式是非均衡的,求解出的近似均衡的乘客通勤模式在乘客需求上进行了重新分配^[17]。

在近似均衡后的模式中,首发站鱼洞站首班列车离场人数增多,而越靠近期望上班时间的班次离场人数逐渐减少,说明在鱼洞站乘车前往南坪站的乘客对于早到惩罚时间价值的敏感性较小,乘客被期望在早高峰通勤时段缩减在住宅地滞留时间以提前出发乘车。相反,较靠近终点站的站点在越靠近期望上班时间的班次离场人数逐渐增多,说明居住地离终点站较近的乘客更被期望在早高峰通勤时段晚点出发,原因是这些乘客对内部拥挤带来的价值损耗敏感度较低。

重庆轨道3号线作为贯穿重庆南北的重要轨道线路,早高峰时段庞大的客流数量给线网运输造成巨大压力,线网客流的非均衡性也日益突出,通过算法得出的近似均衡的乘客通勤模式可以使得3号线早高峰通勤时段的乘客出行成本更接近于均衡成本,且不会因为某一位乘客出行时间选择的改变而

影响网络流均衡。大数据时代下,出行信息诱导会对出行者决策产生极大影响^[18],使用本研究的算法,根据出行时间均衡解,通过站点情报板显示建议出行时间。如图5所示,为情报板提供数据来源的服务器是通过前端感知设备检测实时上车人数并加以识别和计算的云平台^[19],乘客到达站台后可根据情报板上提供的建议出行时间改变出行决策,有效地将客流分散并帮助通勤者调整次日的通勤出行时间。这项应用有助于减少整个轨道3号线的交通负荷,起到平衡轨道网络通勤流量的作用,同时提高列车车厢的利用率,改善通勤者的出行质量,以此实现轨道交通的可持续发展。

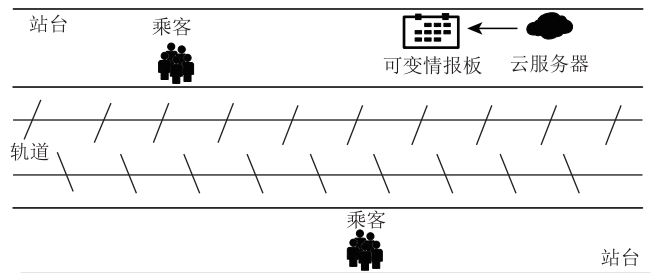


图5 轨道站台可变情报板示意图

Fig. 5 Schematic diagram of variable message sign on railway platform

5 结论

连接城市中心和周边地区的廊道空间必然会引发一些交通问题,这些问题是由2个区域之间产生的交通需求造成的,这些需求导致了人口、商品和服务之间的流动。通过对均衡条件等价性的证明,探索出了一种建立廊道问题和交通分配问题两类均衡之间联系的新方法,并利用现场调查数据对重庆市轨道3号线进行了实例分析,结论如下:

(1) 廊道问题是时间资源均衡,交通分配问题是空间资源均衡,将廊道问题视为时空网络,则时空网络中的交通均衡和通常意义下的交通均衡本质上是一致的,都是探寻交通系统和用户之间的相互作用关系得出的。通过研究早高峰公共交通廊道的时间资源配置均衡模型,证明在给定的公共交通廊道中时空网络网络的流平衡条件等价于公共交通离散廊道问题的流平衡条件,证明2类问题的求解方法可以互相借鉴。

(2) 在早高峰通勤时段的公共交通时空网络中,早到惩罚时间价值对职住距离较近的通勤者比职住距离较远的通勤者影响更大,起因是越靠近工作区

住房价格越贵。职住距离较远的通勤者对运载工具内部的拥挤效应更敏感,因为通勤时间较长。

(3) 本研究建立的模型和算法可用于求解给定离散运输廊道的近似均衡的乘客通勤模式。此结果不仅可以刻画早高峰时段通勤者的动态出行行为,揭示出行时间均衡分布规律,还可以科学地控制和调节通勤需求,削减不合理的通勤需求,分解、转移相对集中的通勤需求,从而使通勤供需达到相对平衡,以保证早高峰时段公共交通系统的有效运行,改善城市生态环境和通勤者乘车质量,达到缓解交通拥堵的目的。更重要的是可以为构建先进的出行者信息系统(ATIS)提供理论支持,给予公共交通运营企业、交通管理部门等更多的公共交通运输规划参考。

参考文献:

References:

- [1] ARNOTT R, DEPALMA E. The Corridor Problem: Preliminary Results on the No-toll Equilibrium [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45 (5): 743-768.
- [2] 田琼, 刘鹏. 基于乘客异质性的高峰期公交出行均衡研究 [J]. 管理科学学报, 2013, 16 (3): 82-87.
TIAN Qiong, LIU Peng. Equilibrium Properties of Peak-period Commuting in Mass Transit System with Heterogeneous Passengers [J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16 (3): 82-87.
- [3] GUBINS S, VERHOEF E T. Dynamic Bottleneck Congestion and Residential Land Use in the Monocentric City [J]. Journal of Urban Economics, 2014, 80: 51-61.
- [4] LI C Y, HUANG H J. Morning Commute in a Single-entry Traffic Corridor with Early and Late Arrivals [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 97: 23-49.
- [5] TAKAYAMA Y, KUWAHARA M. Bottleneck Congestion and Residential Location of Heterogeneous Commuters [J]. Journal of Urban Economics, 2017, 100: 65-79.
- [6] 李志纯, 丁晶. 基于活动方法的瓶颈模型与拥挤收费问题研究 [J]. 管理科学学报, 2017, 20 (8): 93-101.
LI Zhi-chun, DING Jing. Activity-based Bottleneck Model and Congestion Toll Pricing Issues [J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20 (8): 93-101.
- [7] 尚华艳, 王闪, 黄海军, 等. 基于活动的瓶颈模型: 公交枢纽晚高峰居民通勤研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40 (3): 679-690.
SHANG Hua-yan, WANG Shan, HUANG Hai-jun, et al. Activity-based Bottleneck Model: Modeling the Evening Commute Problem at Bus Transit Hub [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2020, 40 (3): 679-690.
- [8] 肖玲玲, 吴玉雪, 郭名. 基于活动的拼车通勤行为及效用均衡分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41 (6): 1496-1506.
XIAO Ling-ling, WU Yu-xue, GUO Ming. Activity-based Carpool Commuting Behavior and Utility Equilibrium Analysis [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41 (6): 1496-1506.
- [9] ZHAO C L, HUANG H J. Experiment of Boundedly Rational Route Choice Behavior and the Model under Satisficing Rule [C] // 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Qingdao: IEEE, 2014.
- [10] XU H L, YANG H, ZHOU J, et al. A Route Choice Model with Context-dependent Value of Time [J]. Transportation Science, 2017, 51 (2): 536-548.
- [11] 张玺, 赵新朋, 杨达, 等. 考虑出行者有限理性的日变交通分配模型 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (7): 93-99.
ZHANG Xi, ZHAO Xin-peng, YANG Da, et al. A Day-to-day Traffic Assignment Model Considering Travelers' Bounded Rationality [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (7): 93-99.
- [12] 杜玲丽, 胡骥, 赵怀明, 等. 考虑出行者偏好和经验的路径选择行为研究 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (5): 138-144, 151.
DU Ling-li, HU Ji, ZHAO Huai-ming, et al. Study on Route Choice Behavior Considering Traveler's Preference and Experience [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (5): 138-144, 151.
- [13] TEMELCAN G, KOCKEN G H, ALBAYRAK I. Fuzzy Modelling of Static System Optimum Traffic Assignment Problem Having Multi Origin-destination Pair [J]. Socio-economic Planning Sciences, 2021, 77 (4): 101024.
- [14] 赖元文, 胡亮, 林力. 基于参考依赖理论的出行者路径选择模型研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (7): 131-137.
LAI Yuan-wen, HU Liang, LIN Li. Study on Traveler's Route Choice Model Based on Reference Dependence

- Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (7): 131-137.
- [15] ZHANG X, MAHADEVAN S. A Bio-inspired Approach to Traffic Network Equilibrium Assignment Problem [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48 (4): 1304-1315.
- [16] 梁蕾蕾. 基于活动的高峰期通勤模式均衡分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- LIANG Lei-lei. Equilibrium Analysis of Commuting Pattern in Rush Hours Based on Activity Approach [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [17] 韩烈, 张宁. 单起点多讫点公共交通系统早高峰乘车均衡性质研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34 (7): 1847-1856.
- HAN Lie, ZHANG Ning. Equilibrium Properties of the Morning Peak-period Commuting in a One-to-many Mass Transit System [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34 (7): 1847-1856.
- [18] 何娇娇. 基于活动的异质出行者出发时间选择研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
- HE Jiao-jiao. Research on Activity-based Departure Time Choice of Heterogeneous Travelers [D]. Suzhou: Soochow University, 2016.
- [19] 杨珍珍. 基于拥堵传播规律的交通事件信息发布方法 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (5): 121-129, 137.
- YANG Zhen-zhen. A Method for Disseminating Traffic Incident Information Based on Rule of Congestion Propagation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (5): 121-129, 137.

(上接第206页)

- WEI Tao. Discussion on the Application of H. 264 Video Encoding and Decoding Technology in Expressway [J]. China Public Security, 2011, 10 (6): 159-160.
- [11] 杨春辉, 孙鹏, 程凯. 基于5G技术的动车组车载数据传输及监控系统研究 [J]. 铁路计算机应用, 2021, 30 (5): 23-25, 36.
- YANG Chun-hui, SUN Peng, CHENG Kai. Research on Data Transmission and Monitoring System of Multiple Unit Based on 5G Technology [J]. Railway Computer Application, 2021, 30 (5): 23-25, 36.
- [12] 王伟杰. 5G技术在智慧高速公路中的应用场景初探 [J]. 海峡科学, 2021, 37 (11): 93-95.
- WANG Wei-Jie. Exploration of Application Scenarios of 5G Technology in Smart Expressway [J]. Straits Science, 2021, 37 (11): 93-95.
- [13] 汪国辉. 面向5G超实时网络传输技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- WANG Guo-hui. 5G Oriented Research on Ultra Low Latency Network Transmission Technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [14] 杨永琛. 基于5G超实时的网络传输技术探析 [J]. 网络安全技术与应用, 2021, 251 (11): 72-73.
- Yang Yong-chen. Network Transmission Technology Based on 5G Ultra Real Time [J]. Network Security Technology and Application, 2021, 251 (11): 72-73.
- [15] 向朝参, 程文辉, 张昭, 等. 基于边缘智能计算的城市交通感知数据自适应恢复 [J]. 计算机研究与发展, 2023, 60 (3): 619-634.
- XIANG Chao-can, CHENG Wen-hui, ZHANG Zhao, et al. Intelligent Edge Computing-empowered Adaptive Urban Traffic Sensing Data Recovery [J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60 (3): 619-634.
- [16] 李洪祥. 语音、图像、数据三网合一技术在高速公路信息接入传输上的应用 [J]. 公路交通技术, 2008 (增2): 114-118.
- LI Hong-xiang. Application of Syncretic Technique of Audio, Video and Data Networks in Information Access Transmission [J]. Technology of Highway and Transport, 2008 (S2): 114-118.
- [17] 杨伟文, 孙德强. 基于高速公路逃费信息共享的车辆通行信用平台 [J]. 中国交通信息化, 2016, 187 (1): 70-72.
- YANG Wei-wen, SUN De-qiang. A Vehicle Credit Platform Based on Expressway Escape Information Sharing [J]. China ITS Journal, 2016, 187 (1): 70-72.
- [18] 吴帆. 浅谈联网收费模式下稽核体系建设 [J]. 中国交通信息化, 2022, 271 (增1): 257-258.
- WU Fan. Discussion on the Construction of Audit System under the Online Charging Mode [J]. China ITS Journal, 2022, 271 (S1): 257-258.