DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711072

考虑接运公交站点排队的通勤客流分配模型

张思佳[1,2], 贾顺平[1,2], 毛保华[1,2], 麻存瑞[1,2], 王瑜琼[1,2]

(1. 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室(北京交通大学), 北京 100044;
2.北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘 要: 为更加准确的描述接运轨道站点的公交网络内通勤乘客的出行选择行为,以典型通勤OD、固定乘客总需求下,接运轨道交通站点的各公交线路客流选择行为为研究对象,以早高峰通勤出行为例,考虑不同出发时刻的乘客实际到站时刻与车辆到达时刻间的关系,对乘客在接运公交线路站点的候车排队过程进行较为细致的定量描述,改进了既有出行广义费用中对站点候车时间的计算方法,建立了基于Logit-SUE的公交线路配流模型,并通过算例与既有研究进行对比,分析模型中时间步长 $\bar{t}$ 及乘客对路径阻抗感知系数 θ 对配流结果的影响.结果表明:模型中 $\bar{t}$ 的取值变化不会引发配流结果较大程度的改变. $\bar{t}$ 越小,对候车时间的计算越贴近现实情况,当 $\bar{t}$ 增大到乘客可在一个时间步长内全部出发时,配流结果与既有文献一致.同时,模型中,当 θ 较小时,乘客对路径阻抗的感知与实际存在一定差距,配流结果随机性较强; θ 越大,乘客对阻抗的感知越贴近现实,实际阻抗越小的线路选择概率则越大.

关键词: 城市交通; 接运公交; 站点排队; 客流分配; 通勤出行; 选择行为

中图分类号: U491.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2019)03-0121-06

Passenger flow assignment model considering the queuing process of commuters at feeder bus stations

ZHANG Sijia[1,2], JIA Shunping[1,2], MAO Baohua[1,2], MA Cunrui[1,2], WANG Yuqiong[1,2]

(1.MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To accurately describe features of passengers' route choice behaviors of feeder bus lines, this research took the commuting trips during morning peak period under a typical commuting OD as study object, and established a passenger flow assignment model based on Logit-SUE model, which considers the relationship between the actual arrival time of passengers and the arrival time of vehicles. This model proposed a detailed quantitative description of the passengers' queuing process at bus stations and improved the existing calculation method of waiting time at bus stations in the generalized travel cost measuring. Then the feasibility of the model was verified by comparison with previous studies, and the influences of the time step length $\bar{t}$ and passengers' perception coefficient of the path cost θ on the choice probabilities of different bus lines were analyzed. Results indicated that the modelling results will not have a big change when $\bar{t}$ changes. Smaller $\bar{t}$ leads to more accurate calculation results of waiting time. If all the commuters start at time $\bar{t}$, the model results in this paper correspond with that of the previous studies. However, when θ is small, there is a certain gap between the passenger perceived route costs and the actual costs. Big θ makes passengers feel closer to the reality of impedance so when θ is bigger, the choice probabilities of feeder bus lines with low costs are bigger.

Keywords: urban traffic; feeder bus; queuing process at stations; passenger flow assignment; commuting trip; choice behavior

随着我国大城市建设的不断推进,职住分离的现象越发普遍,通勤距离不断扩大,轨道交通和常规公交在通勤出行方式中逐渐占据主导地位.同时,新规划中居民住宅用地逐渐由分散化向集中化转移.因此,在城市交通拥堵问题日益凸显的背景下,研究典型大客流通勤OD间乘客在高峰时段对接运轨道交通的公交线路的选择行为特性,对于管理者通过运营手段最大化公交网络运输效率具有重要意义.

既有研究中,对公交线网中乘客出行费用的描述,均基于一个重要假设,即所有乘客在车站的等车时间均为发车间隔的一半或是选取随机数[1-4],不

收稿日期: 2017-11-14
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2017YJS092);
国家自然科学基金(71390332,71621001)
作者简介: 张思佳(1991—),女,博士研究生;
贾顺平(1963—),男,教授,博士生导师
通信作者: 贾顺平,shpjia@bjtu.edu.cn

考虑乘客在车站的排队现象,与实际可能存在一定偏差. 对公交车站的排队拥挤及能力限制的研究中,文献[5]最先考虑拥挤条件下公交车辆能力与乘客等车时间之间的关系,但其模型缺乏普适性. 文献[6-7]用不同的模型描述了拥挤条件下的公交配流问题,但其模型均假设乘客在车站的等车时间不受乘客流量的影响,并不能反映实际情况. 文献[8]等考虑了乘客在站点的排队延误时间,但未考虑出发时刻对延误时间的影响. 文献[9]考虑了车站排队拥挤现象,设非延迟乘客和延迟乘客在站点的等待时间分别为发车间隔的一半和 1.5 倍,未考虑乘客实际的到站时刻与车辆到达时刻间的动态关系. 本文在既有研究的基础上,考虑了不同出发时刻导致的乘客实际到站时刻与车辆到达时刻间的关系,对乘客在站点的排队等待过程较为细致的定量描述,并与既有研究进行对比,验证了模型的可行性和有效性.

1 构建乘客出行时空网络

1.1 通勤乘客出行网络

研究对象为大城市典型通勤 OD 间、需求为 Q 的通勤者群体. 高峰时段, Q 个个体均选择公交换乘轨道的方式,由 O 出发,选择接运范围内 m' 个轨道交通站点的 m 条接运公交线路,由于一个轨道交通站点可能存在多条接运公交线路,则 $m \geqslant m'$. 设个体由 O 点出发到达公交线路 k 的上车站点为 B_k, $k = 1,2,\cdots,m$, 下车站点为 $B_{\tilde{k}}$, $\tilde{k} = \tilde{1},\tilde{2},\cdots,\tilde{m}$, 与站点 $B_{\tilde{k}}$ 存在换乘的轨道交通站点为 $R_{k'}$, $k' = 1,2,\cdots,m'$. 由于 Q 个个体均来自同一方向,因此设所有个体均以同一轨道交通站点为 D 点. 通勤乘客出行网络如图 1 所示.

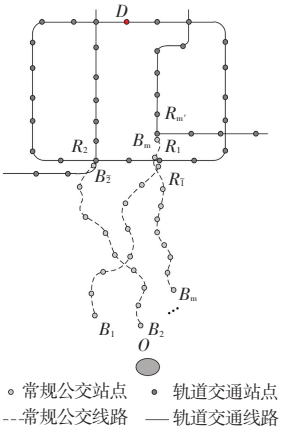

图 1 通勤出行网络示意图

Fig.1 Diagram of the commuting travel network

1.2 乘客出行时空路径

设 Q 个个体中,选择接运公交线路 k 的乘客数量为 q_k,则 $\sum_{k=1}^{m} q_k = Q$. 将 q_k 个个体按出发时刻先后分别编号为 n^k (如: 4^3 代表选择线路 3 且第 4 个从 O 点出发的个体),其中 $n = 1,2,\cdots,q_k$. 设 Q 个个体在时段 0 ~ T 中全部出发,且随时间出发的乘客数量服从正态分布规律,均值为 $0.5T$,方差为 δ^2. 个体 n^k 的出行路径如图 2 所示.

1) 网络中的重要节点. a) 初始节点 O 表示个体 n^k 的出发节点,设出发时刻为 $t_1^{n^k}$. b) 公交上车站点 B_k 表示个体 n^k 由 O 点出发后到达公交线路 k 的上车站点. 到达 B_k 的时刻为 $t_2^{n^k}$,离开 B_k 的时刻为 $t_3^{n^k}$. 将 $t_2^{1^k}$ 时刻后顺序到达 B_k 的公交车辆分别编号为 $b_1{}^k$, $b_2{}^k,\cdots,b_{n'}{}^k$, n' 为时段 0 ~ T 中可到达的公交车辆最大编号,由时段 0 ~ T、公交线路发车间隔 f_k 等因素决定. 将 $t_2^{n^k}$ 时刻后第 1 辆到达 B_k 的公交车辆编号为 $b_a{}^k$, $a = 1,2,\cdots,n'$. c) 公交下车站点 $B_{\tilde{k}}$ 表示个体 n^k 乘坐线路 k 的下车站点,设其到达 $B_{\tilde{k}}$ 的时刻为 $t_4^{n^k}$. d) 轨道交通换乘站点 $R_{k'}$ 表示个体 n^k 从站点 $B_{\tilde{k}}$ 下车后换乘到达的轨道交通站点,设由站点 $R_{k'}$ 乘坐轨道交通车辆出发的时刻为 $t_5^{n^k}$. e) 终到节点 D 表示个体 n^k 的目的轨道交通站点,到达时刻为 $t_6^{n^k}$.

2) 时空节点间的弧段. a) 步行弧 $T_1{}^{n^k}$ 表示个体 n^k 从节点 O 至 B_k 的步行时间, $T_1{}^{n^k} = t_2^{n^k} - t_1^{n^k}$. b) 公交车站排队等待弧 $T_2{}^{n^k}$ 表示个体 n^k 在站点 B_k 的等待时间, $T_2{}^{n^k} = t_3^{n^k} - t_2^{n^k}$. c) 接运公交乘车弧 $T_3{}^{n^k}$ 表示个体 n^k 在站点 B_k 至站点 $B_{\tilde{k}}$ 的乘车时间, $T_3{}^{n^k} = t_4^{n^k} - t_3^{n^k}$. d) 换乘弧 $T_4{}^{n^k}$ 表示个体 n^k 由公交车站 $B_{\tilde{k}}$ 下车至由轨道站点 $R_{k'}$ 乘车离开的时间, $T_4{}^{n^k} = t_5^{n^k} - t_4^{n^k}$. e) 轨道交通乘车弧 $T_5{}^{n^k}$ 表示个体 n^k 在轨道线路内乘车时间, $T_5{}^{n^k} = t_6^{n^k} - t_5^{n^k}$.

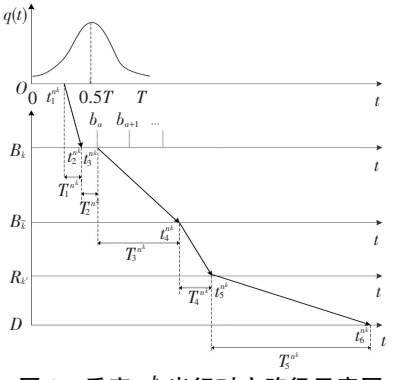

图 2 乘客 n^k 出行时空路径示意图

Fig.2 Diagram of the travel route of passenger n^k

2 考虑站点排队的路径费用模型

2.1 乘客出行路径费用组成

乘客 n^k 的出行费用 w^{n^k} 由时空网络中的 5 类弧段所对应的出行时间费用及票价费用组成,即由弧

段 $T_1^{n^k} \sim T_5^{n^k}$ 所对应的时间费用 $w_1^{n^k} \sim w_5^{n^k}$ 和公交与轨道交通综合票价费用 $w_6^{n^k}$ 组成，即

$$w^{n^k} = w_1^{n^k} + w_2^{n^k} + w_3^{n^k} + w_4^{n^k} + w_5^{n^k} + w_6^{n^k}.$$

式中：$w_1^{n^k}$ 由乘客从 O 至 B_k 的步行距离 $l_1^{\ k}$、乘客步行速度 v_1 及时间费用换算系数 λ 确定，即 $w_1^{n^k} = \lambda T_1^{n^k} = \lambda l_1^{\ k}/v_1$；$w_2^{n^k}$ 由 u 和时间费用换算系数 λ 确定，即 $w_2^{n^k} = \lambda T_2^{n^k} = \lambda u$，其中 u 为乘客在站点候车时间费用函数；$w_3^{n^k}$ 由乘客从站点 B_k 至 $B_{\tilde{k}}$ 间乘车距离 $l_2^{\ k}$、公交车旅行速度 v_2、乘客对乘车拥挤费用感知系数 ρ 及时间费用换算系数 λ 确定，即 $w_3^{n^k} = \lambda T_3^{n^k} = \lambda(1+\rho) l_2^{\ k}/v_2$，其中 ρ 与乘客在公交车上是否有座有关，$\rho = 0$ 表示上车有座，$\rho = \varepsilon$ 表示上车无座；$w_4^{n^k}$ 由 $B_{\tilde{k}}$ 下车至乘上 $R_k^{'}$ 离开的换乘时间 $t^{'k}$ 及时间费用换算系数 λ 确定，即 $w_4^{n^k} = \lambda T_4^{n^k} = \lambda t^{'k}$；$w_5^{n^k}$ 由乘客在轨道交通上的乘车距离 $l_3^{\ k}$、轨道交通旅行速度 v_3 及时间费用换算系数 λ 确定，即 $w_5^{n^k} = \lambda T_5^{n^k} = \lambda l_3^{\ k}/v_3$；$w_6^{n^k}$ 由乘客在常规公交和轨道交通上的票价费用 p_b^k 和 p_r^k 共同确定，即 $w_6^{n^k} = p_b^k + p_r^k$.

2.2　考虑站点排队过程的候车时间函数 u 建立

2.2.1　既有文献对候车时间的描述

既有文献中对乘客在公交车站的候车时间的描述大多简化为发车间隔的一半.文献[9]假设乘客的到达时间服从均匀分布，当拥挤存在使乘客无法乘上即将到达的第 1 辆车，则其必可乘上第 2 辆车.定义可乘上第 1 辆公交车的乘客为非延迟乘客，其候车时间为 $0.5f_k$；因拥挤存在而仅能乘上第 2 辆车的乘客为延迟乘客，其候车时间为 $1.5f_k$，即

$$u(f_k) = \begin{cases} 0.5f_k, q^{'} = 0; \\ 1.5f_k, q^{'} \neq 0. \end{cases}$$

式中 f_k 为公交发车间隔，$q^{'}$ 为延迟乘客数量.

而在实际情况中，乘客到达时刻是不均匀的，乘客在车站的候车时间将与出发时刻、到达时刻、公交线路发车间隔、车站排队情况等有关，将候车时间简化为发车间隔的倍数，可能导致乘客出行费用与实际存在较大偏差.

2.2.2　本文对候车时间的描述

设乘客 1^k 到站点 B_k 时距离编号为 b_1^k 的公交车辆到达站点时间刚好为 $0.5f_k$. 当乘客步行到达站点 B_k 时，需判断该公交站点的节点状态，并以此对等车时间函数 u 进行如下描述.

1）车辆编号的判断.设个体 n^k 步行至站点 B_k 时距离时刻 $t_2^{1^k}$ 的时间为 Δt^{n^k}，$\Delta t^{n^k} = t_2^{n^k} - t_2^{1^k}$.乘客到达站点 B_k 时，需判断此时即将达到的公交车辆编号 b_a^k，如图 3 所示.

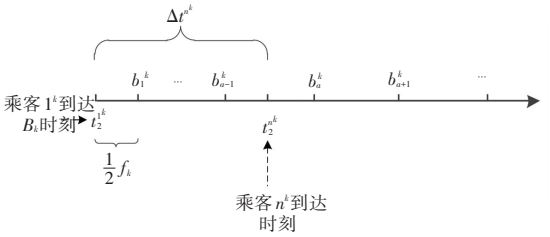

图 3　乘客 n^k 到达 B_k 站点状态示意图

Fig.3　Diagram of the note state when passenger n^k arrives at the bus station B_k

2）节点状态的判断.除车辆编号外，乘客到达时，还应判断该站点的节点状态，即乘客能够乘上即将到达的第几辆公交车.设 μ_a^k 为到达 B_k 的公交车 b_a^k 的满载率. N^{n^k} 为 0 至 $t_2^{n^k}$ 时刻到达站点 B_k 的乘客总数，包括之前时段 Q 个个体中选择线路 k 的人数及由其他出发源出发随机到达该站点的乘客人数.若公交车辆定员均为 Z，公交车辆最大满载率为 h，当乘客能够乘上第 1 辆即将到达的公交车 b_a^k 时，需满足 $N^{n^k} - (h-\mu_1^k)Z - (h-\mu_2^k)Z - \cdots - (h-\mu_{a-1}^k)Z \leqslant (h-\mu_a^k)Z$.则有节点状态判断过程如图 4 所示. 因此，得到 u 的计算公式为

$$u\left(\Delta t^{n^k}, f_k, a, N^{n^k}, \sum_{j=1}^{a-1}\mu_j^k, \mu_a^k, Z, h\right) =$$

$$\begin{cases} \dfrac{2a-1}{2}f_k - \Delta t^{n^k}, N^{n^k} - \sum\limits_{j=1}^{a-1}(h-\mu_j^k)Z \leqslant (h-\mu_a^k)Z; \\ \dfrac{2a+1}{2}f_k - \Delta t^{n^k}, N^{n^k} - \sum\limits_{j=1}^{a-1}(h-\mu_j^k)Z > (h-\mu_a^k)Z. \end{cases}$$

其中 $\dfrac{a-1}{2}f_k \leqslant \Delta t^{n^k} \leqslant \dfrac{a}{2}f_k$.

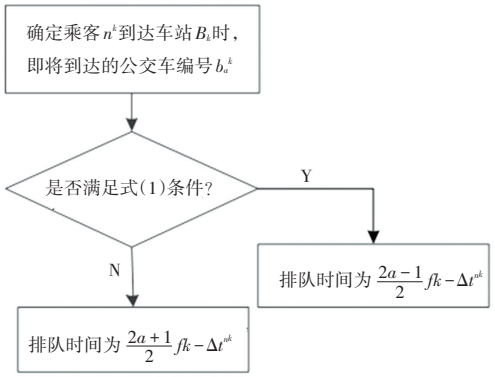

图 4　站点状态判断过程流程图

Fig.4　Flow chart of the judge process for the station state

为保证无法乘坐即将到达的第 1 辆公交车的乘客可乘上第 2 辆车，上式的约束条件为

$$N^{n^k} - (h-\mu_1^k)Z - (h-\mu_2^k)Z - \cdots - (h-\mu_a^k)Z \leqslant (h-\mu_{a+1}^k)Z. \quad (1)$$

3　基于 Logit-SUE 的公交线路配流模型

设乘客从出发源 O 点相继出发，设以 $\bar{t}$ 为时间步

长,将乘客划分为 I 份,分别对数量为 Q_i 的乘客进行 I 次配流,且 $i = 1,2,\cdots,I, Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_I = Q$.

高峰时期的每个乘客将根据自身经验选择自己认为出行费用最少的公交接驳线路,线路选择行为依然遵循 Wardrop 第一原理,设第 i 次配流时 OD 对间公交线路 k 被选择的概率为 α_k^i, 每条线路上分配的流量为 g_k^i, 则

$$g_k^i = \alpha_k^i Q_i, \forall k,i;\ \sum_{k=1}^{m} \alpha_k^i = 1, \forall i;$$

$$\sum_{k=1}^{m} g_k^i = Q_i, \forall i;\ \sum_{i=1}^{I} Q_i = Q.$$

运用 Logit 模型来描述乘客对常规公交线路的选择概率,即当达到平衡状态时,第 i 次配流时 OD 对间被选择的公交线路 k 上的乘客流量 g_k^i 满足

$$g_k^i = Q_i \times \frac{\exp(-\theta w_k)}{\sum_{j=1}^{m} \exp(-\theta w_j)}.$$

其中 θ 为描述乘客对网络中路径费用感知程度的系数, θ 取值越大,模型配流的随机性越小,当 θ 取值较大时,SUE 配流趋近于 UE 配流[10].

根据文献[10],构建基于 Logit-SUE 的公交线路配流模型为

$$\min\ Y = \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{m}\int_0^{g_k^i} w^{n^k}(g)\,\mathrm{d}g + \frac{1}{\theta}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{m} g_k^i \ln g_k^i. \tag{1}$$

$$\text{s.t.}: \sum_{k=1}^{m} g_k^i = Q_i, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{I} Q_i = Q, \tag{3}$$

$$g_k^i \geqslant 0. \tag{4}$$

其中优化模型(1)共分为两项,前一项是对各出行线路的出行费用函数积分求和;后一项与乘客感知相关.约束(2)为第 i 次配流的乘客总流量等于第 i 次配流中选择各路径的乘客流量之和;约束(3)为第 $1 \sim I$ 次配流的乘客流量总和等于系统总乘客流量 Q.

下面证明模型与 SUE 条件之间的等价性.首先构造模型的广义拉格朗日函数:

$$L(g,\kappa) = Y(g) - \sum_{i=1}^{I} \kappa_i \Big(\sum_{k=1}^{m} g_k^i - Q_i \Big). \tag{5}$$

可写出优化模型(1)~(4)Kuhn-Tucker 条件:

$$g_k^i \left(w^{n^k} + \frac{1}{\theta}(\ln g_k^i + 1) - \kappa_i \right) = 0, \tag{6}$$

$$w^{n^k} + \frac{1}{\theta}(\ln g_k^i + 1) - \kappa_i \geqslant 0,$$

$$\sum_{k=1}^{m} g_k^i = Q_i,\ g_k^i \geqslant 0.$$

其中 κ_i 为对应于式(2)的 K-T 乘子.

当 $g_k^i > 0$ 时,式(6)可化简为

$$w^{n^k} + \frac{1}{\theta}(\ln g_k^i + 1) - \kappa_i = 0, \forall i.$$

解得 g_k^i, 并代入式(2)中,可得到 Logit 模型为

$$g_k^i = Q_i \frac{\exp(-\theta w^{n^k})}{\sum_{k=1}^{m} (-\theta w^{n^k})}.$$

以步长时间 $\bar{t}$ 为单位,对乘客需求 Q 在出发总时间 T 内进行 $T/\bar{t}$ 次($T/\bar{t} = I$)配流,每次配流均遵循上述 SUE 配流模型,并运用 MSA 算法进行求解,最终得到乘客需求 Q 对 m 条线路的选择结果.

4 算例分析

4.1 模型参数

算例中,通勤出行网络包含 4 条接运公交线路,即 $m = 4$,如图 5 所示,各出行路径基本信息见表 1.

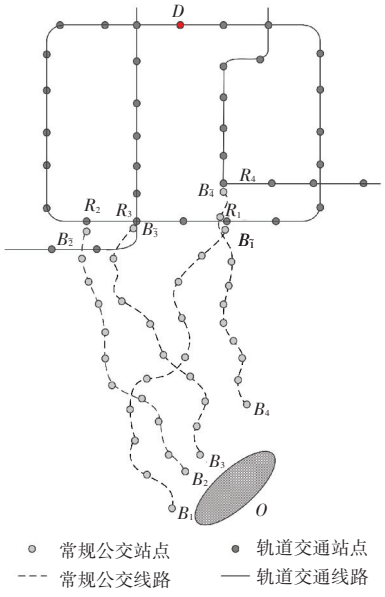

图 5 算例中接运网络示意图

Fig.5 Diagram of the feeder bus network in the case

表 1 4 条出行路径信息表

Tab.1 Input data of the four routes

k	f_k /min	l_1^k /m	l_2^k /m	t'^k /min	l_3^k /m	$(p_b^k + p_r^k)$ /元
1	5	402	3 000	12	6 500	5
2	10	521	2 100	8	6 050	5
3	8	677	2 200	9	5 000	4
4	9	705	1 800	6	5 500	4

根据实地调研结果和文献[11-12],模型中 $v_1 = 1.5$ m/s, $v_2 = 22$ km/h, $Z = 75$ 人, $T = 30$ min. 以 $\bar{t} = 5$ min 为例,则 $I = 6$;参考既有文献,算例中, $v_3 = 35$ km/h[13], $h = 1$[13]; $\theta = 2$[10], $\lambda = 0.2$ 元/min[13], $\varepsilon = 0.4$[14].

4.2　结果与分析

分别按本文及文献[9]提出的方法对典型 OD 下的 200 个通勤乘客进行流量分配，由于车辆达到站点的满载率及每个步长内从其他出发源到达站点的乘客数量均是随机的，因此对此公交出行网络分别进行 100 次流量分配，选取 100 次仿真结果的平均值见表 2.

表 2　乘客对不同公交线路的选择概率统计表

Tab.2　Passenger choice probabilities of different bus lines

模型	选择概率/%			
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
本文模型	30.2	18.0	26.2	25.6
文献[9]模型	19.5	23.5	26.5	30.5

从表 2 可知，本文方法相比既有方法得到的乘客对 4 条公交线路的选择概率不同，分别相差 −10.7%、5.5%、0.3%、4.9%.以 f_k = 9 min 为例，分析选择概率出现差异的原因.假设乘客在时刻 5 到达线路 4 的公交站点，则两种方法得到的站点候车时间如图 6、7 所示.

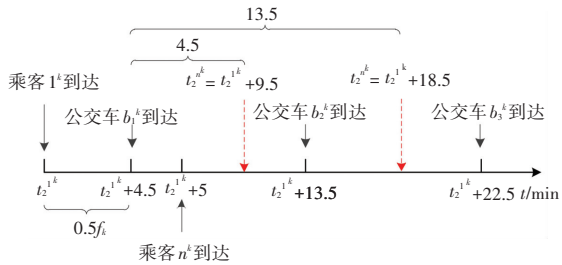

图 6　f_k=9 min 时文献[9]中站点候车时间示意图

Fig.6　Diagram waiting time at station in Ref. [9] (f_k = 9 min)

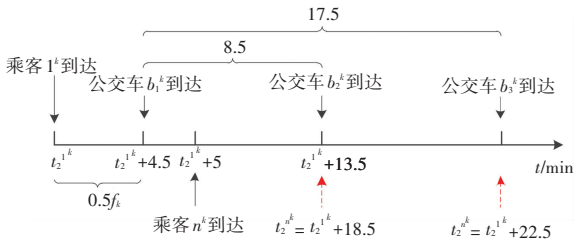

图 7　f_k=9 min 时本文站点候车时间示意图

Fig.7　Diagram of waiting time at station in this research (f_k = 9 min)

由于乘客 1^k 到达该节点的时刻为 $t_2^{1^k}$，当 f_k = 9 min时，公交车 b_1^k 到达站点的时刻为 $t_2^{1^k}$ + 4.5，公交车 b_2^k 到达站点的时刻为 $t_2^{1^k}$ + 13.5，公交车 b_3^k 到达站点的时刻为 $t_2^{1^k}$ + 22.5，以此类推.考虑站点排队及公交车上的乘客满载率前提下，当乘客在时刻 $t_2^{1^k}$ + 5 到达时，文献[9]方法：对于非延迟乘客，其在站点的候车时间为 $0.5f_k$，即 4.5 min；对于延迟乘客，其在站点的候车时间为 $1.5f_k$，即 13.5 min. 本文方法：考虑了乘客到达站点的实际时刻与车辆到达时刻间的动态关系，若乘客可乘上即将到达的第 1 辆公交车，其在站点的候车时间实际为8.5 min；若由于站点及公交车容量限制导致其仅能乘上第 2 辆公交车时，其在站点的候车时间则实际为 17.5 min.

对于既有方法，忽略了乘客在公交站点的实际到站时刻与车辆达到时刻间的关系，采用 $0.5f_k$（或 $1.5f_k$）简化代替车站等待时间，即削弱了发车间隔对乘客选择概率的影响程度.本文方法更加细致的刻画了乘客在站点的实际等待时间，配流结果更符合实际情况.由表 2 可知，本文方法得到的 4 条接运线路的选择概率 $p_1 > p_3 > p_4 > p_2$，而 $f_1 < f_3 < f_4 < f_2$，可知乘客更倾向于选择发车间隔更小的线路.

4.3　重要参数灵敏度分析

1）$\bar{t}$ 对选择概率的影响.改变 $\bar{t}$ 的取值，研究本文方法中时间步长对接运公交线路乘客选择概率的影响，如图 8 所示.当 $\bar{t}$ 由 5 min 逐渐增加至 30 min 时，乘客对接运公交线路的选择概率整体变化较小，4 条接运常规公交线路乘客选择概率随 $\bar{t}$ 变化的标准差值分别为 0.042、0.016、0.006、0.024，均小于 0.05，$\bar{t}$ 的取值不会引发配流结果较大程度的改变.文中假设乘客在 30 min 内全部出发，因此，当 $\bar{t}$ 较小时，得到更加细化的配流结果，而当 $\bar{t}$ 增加至 30 min 时，配流结果与文献[9]一致，证明了模型的准确性.

2）θ 对选择概率的影响.在乘客流量分配模型中，参数 θ 是描述乘客对网络中路径费用感知程度的变量，其值越大，乘客的感知结果与实际的路径费用越贴近. θ 对接运公交线路乘客选择概率的影响如图 9 所示.由图可知，当 θ 较小时，乘客感知到的各接运线路的路径阻抗与其实际阻抗存在一定差距，配流结果随机性较强；而随着 θ 的逐渐增大，乘客对路径阻抗的感知与现实越来越贴近，乘客均倾向于选择实际阻抗较小的接运线路，阻抗较小的线路选择概率逐渐增大，而阻抗相对较大的线路选择概率则存在逐渐减小的趋势.

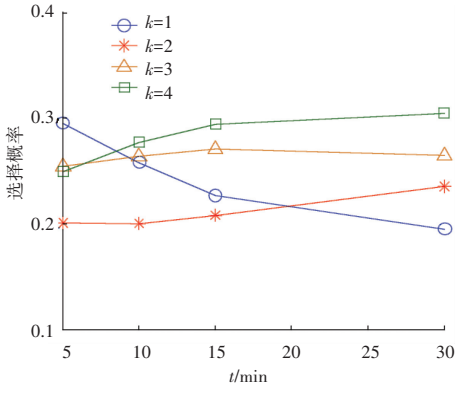

图 8　$\bar{t}$ 对乘客选择概率的影响

Fig.8　Effect of $\bar{t}$ on choice probabilities

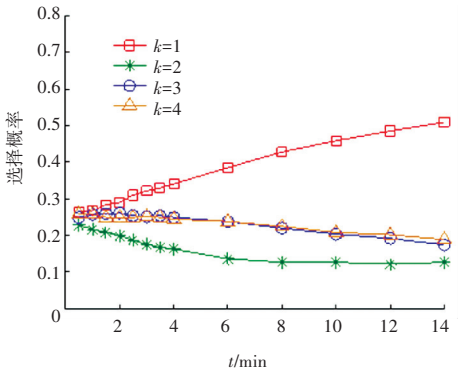

图 9 θ 对乘客选择概率的影响

Fig.9 Effect of θ on choice probabilities

5 结 论

1)模型在大城市典型通勤 OD 间具有较为广泛的适用性,考虑乘客在公交站点的排队情况,从而更加细致地计算乘客在公交站点的等待时间,将有助于得到更精确的客流分配结果,为公交管理者更好的规划接运公交线路提供理论依据.

2)模型中,$\bar{t}$ 的取值变化不会引发配流结果较大程度的改变,$\bar{t}$ 越小,乘客候车时间的计算结果越贴近现实情况,当 $\bar{t}$ 增大到步长时间内乘客可全部出发时,配流结果与既有文献一致.

3)模型中,当 θ 较小时,乘客对阻抗的感知与实际存在一定差距,配流结果随机性较强; θ 越大,乘客对阻抗的感知越贴近现实,实际阻抗越小的线路选择概率则越大.

参考文献

[1] 巫威眺,靳文舟,魏明,等.配合区间车的单线公交组合调度模型[J].华南理工大学学报(自然科版),2012,40(11):147
WU Weitiao, JIN Wenzhou, WEI Ming, et al. Mixed scheduling model of single-line bus for zonal vehicles[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(11):147.DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2012.11.022

[2] 赵淑芝,刘华胜,张晓亮,等.轨道与常规公交局域换乘网络站点优化模型[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(12):96
ZHAO Shuzhi, LIU Huasheng, ZHANG Xiaoliang, et al. Station optimization in local transfer network of rail transit and bus[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(12):96. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2014.12.016

[3] 宗芳,王琳虹,贾洪飞.综合客运枢纽内各方式协调调度模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(3):53
ZONG Fang, WANG Linhong, JIA Hongfei. Heuristic algorithm to solve vehicle routing problem with split pickups and deliveries[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010,38(3):53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2010.03.010

[4] 曾鹦,李军,朱晖.换乘行为影响下的城市公交配流算法[J].交通运输工程学报,2013,13(4):70
ZENG Ying, LI Jun, ZHU Hui. Urban public traffic assignment algorithm under influence of transfer behavior[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4):70. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2013.04.011

[5] LAST A, LEAK S E. Transportation :a bus model[J].Traffic Engineering and Control,1976(6):14

[6] SPIESS H, FLORIAN M. Optimal strategies: a new assignment model for transit network[J].Transportation Research, 1989, 23B: 83

[7] NGUYEN S, PALLOTINO S. Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks model[J]. European Journal of operation research, 1988, 37: 176

[8] 宋一凡,高自友.能力限制条件下的公交平衡配流模型和求解算法[J].铁道学报,1999,1(5):10
SONG Yifan, GAO Ziyou. A transit equilibrium assignment model and algorithm under the condition of capacity constraint[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 1(5):10. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8360.1999.05.003

[9] 高自友,任华玲,林兴强.拥挤条件下公交系统的拟动态均衡配流模型[J].交通运输系统工程与信息,2002,2(2):38
GAO Ziyou, REN Hualing, LIN Xingqiang. A time-dependent transit equilibrium assignment model for congested transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2002, 2(2):38.DOI:10.3969/j.issn.1009-6744.2002.02.010

[10] 李远,四兵锋,杨小宝,等.考虑换乘费用的城市公交网络随机用户均衡配流模型及算法[J].系统工程理论与实践,2014,34(8):2127
LI Yuan, SI Bingfeng, YANG Xiaobao, et al. A stochastic user equilibrium model and algorithm for urban transit network with transfer cost[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2014, 34(8):2127. DOI: 10.12011/1000-6788(2014)8-2127

[11] 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
LI Shuqing, LI Zhe, ZHU Wenying. Equilibrium assignment model of integrated transit network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2013.01.010

[12] 城市建设研究院.城市公共交通分类标准[M].北京:中国建筑工业出版社,2007
Urban Construction Design & Research Institute. Standard for classification of urban public transportation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007

[13] 孙杨,孙小年,孔庆峰,等.轨道交通新线投入运营下常规公交网络优化调整方法研究[J]. 铁道学报, 2014,36(3):1
SUN Yang, SUN Xiaonian, KONG Qingfeng, et al. Methodology of bus network optimization and adjustment under operation of new urban rail transit line[J]. Journal of the China Railway Society, 2014,36(3):1.DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.03.001

[14] 邵敏华,李田野,孙立军.常规公交乘客对车内拥挤感知阻抗调查与建模[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(7):1031
SHAO Minhua, LI Tianye, SUN Lijun. Survey method and model of passengers' cost perception of crowding level in bus[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40 (7): 1031. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.012

(编辑 魏希柱)