

基于行程时间阈的城轨乘客乘车方案多维匹配推定模型

朱 炜^{1,2}, 范伟莉³, 徐昶悦^{1,2}, 徐瑞华^{1,2}

(1. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要: 基于城市轨道交通网络化运营过程中的自动售检票系统(AFC)票卡和列车自动监控系统(ATS)行车数据以及乘客走行时间参数数据, 提取乘客乘车方案行程时间阈, 分析乘客实际选择的影响因素, 提出基于行程时间阈的乘客乘车方案多维匹配推定模型。该模型实现了逐位票卡乘客推定至最可能的乘客方案上, 并具有较强的合理性和实用性。最后通过北京城市轨道交通网络实际案例验证了方法的可行性和有效性。

关键词: 城市轨道交通; 乘车方案; 行程时间阈; 多维匹配; 推定模型

中图分类号: U231+.92

文献标志码: A

Deduction Method of Passengers' Train Choices in Rail Transit Network Based on Travel Time Thresholds

ZHU Wei^{1,2}, FAN Weili³, XU Changyue^{1,2}, XU Ruihua^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Based on the automatic fare collection (AFC) data, automatic train supervision (ATS) data, and the passenger walking time data, travel time thresholds of train choices as well as the influence factors are analyzed in detail. Then a hierarchy deduction model of passengers' train choices is developed. The model is able to accurately deduce passengers' train choices one by one. Case studies on the Beijing metro network verifies

the good performance of the model.

Key words: urban rail transit; train choice; travel time threshold; hierarchy matching; deduction model

客流是城市轨道交通网络化运营管理的基础, 科学计算和分析客流在网络上的时空分布情况是进行票款清分清算、网络运营协调、列车运行图编制等一系列重要问题的前提和依据。网络客流分布是微观乘客个体出行选择结果的宏观涌现, 而乘客个体的出行选择包括了出行路径和乘车方案两方面, 出行路径是指乘客能够在某一起讫点之间通行抵达的路线, 而乘车方案还需要考虑在既定出行路径上的乘坐车次。其中乘车方案实际上决定了出行路径, 对其做出准确推定是上述网络客流时空分布计算及分析的关键^[1]。

在现有网络化运营的“一票换乘”模式下, 自动售检票系统(automatic fare collection, AFC)仅能记录乘客的进出站信息, 无法获取乘客的乘车车次及换乘信息, 乘客出行选择难以直接确定是运营管理部门进行网络客流时空分布计算及分析的主要困难。现阶段, 国内城市轨道交通系统广泛采用基于多路径出行概率选择的配流模型来计算网络客流分布情况, 并在此基础上进一步发展出“分配型+推定型”的综合分配流模型, 对原有模型系统进行了修订^[2]。上述方法在一段时期内为确定合理的网络客流分布提供了解决方案, 但随着城市轨道交通网络规模的不断扩大、网络结构的日益复杂和乘客出行

收稿日期: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(71701152, 72071147); 上海市科学技术委员会项目(18510745800)

第一作者: 朱炜(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通网络客流分析。

E-mail: zhuweimail@tongji.edu.cn

通信作者: 徐瑞华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通运营管理。

E-mail: rxu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

行为的更多样化,模型的计算结果与乘客的实际选择之间出现偏差的情况时有发生。针对上述问题,国内外学者在出行路径估计^[3-5]、列车车次推定^[6-8]、多源数据分析^[9-13]等方面进行了研究。但是,对乘客出行路径的估计仍以集计的概率分配为主,非集计地更精准推算个体乘客出行选择的研究仍显不足。对乘客所选车次的推定也主要基于列车车次被选择的概率,且在量化乘车方案选择概率的过程中大多对乘客走行时间分布进行假设或对留乘列车趟数的概率进行估计,而未能考虑乘客多样的出行行为。此外,基于多源数据的出行选择分析主要是涉及单一数据资源(如分别基于AFC、WIFI、手机信令等)的相关尝试,两种及以上数据资源的综合使用与融合分析也需要进一步地探索。

本文针对城市轨道交通乘客网络出行选择估计中关键的乘车方案推定问题,综合利用城市轨道交通网络化运营过程中的AFC票卡和列车自动监控系统(automatic train supervision, ATS)行车数据以及乘客走行时间参数等多源数据资源,从个体乘客角度出发,提取乘客所有可能乘车方案的行程时间阈,考虑乘客实际选择的多种影响因素,根据所有可能的O-D(起讫点)乘车方案行程时间阈推定乘客出行选择,包含出行路径与乘车方案信息,体现了乘客完整的出行过程。提出基于行程时间阈的乘客乘车方案多维匹配推定模型更具客观性,并通过北京城市轨道交通实际案例验证模型的可行性和有效性。

1 乘客乘车方案行程时间阈

1.1 定义

运营管理阶段乘车方案推定的对象是已经完成了出行的实际乘客,目标是对这些乘客乘车方案选择情况的准确还原,并作为网络客流时空分布和票款清分清算的基础,本质上是一种“反演”推定。乘客乘车方案行程时间阈可以表述为:对于城市轨道交通网络上任一O-D对间某条出行路径上的某个可行乘车方案,计算登乘该方案完成出行乘客的进站时刻最大值与最小值、出站时刻最大值与最小值。这两组数值构成的集合即称为乘客在这一乘车方案上的行程时间阈(图1)。由上述定义容易理解,城市轨道交通网络上某位乘客的O-D实际行程时间由其所选择的具体乘车方案决定,并且取值必定落在该乘车方案的行程时间阈范围内。换句话说,由于乘

车方案行程时间阈是针对某条出行路径上的某个乘车方案计算的,故乘车方案行程时间阈与乘客乘车方案选择决策之间存在一定的对应关系。根据乘车方案行程时间阈可以获得对应的出行路径与乘车方案信息,确定了乘车方案行程时间阈可以基本确定乘客乘车方案选择的所有可能结果,为后续继续增加筛选维度、确定最终乘车方案提供了基础。

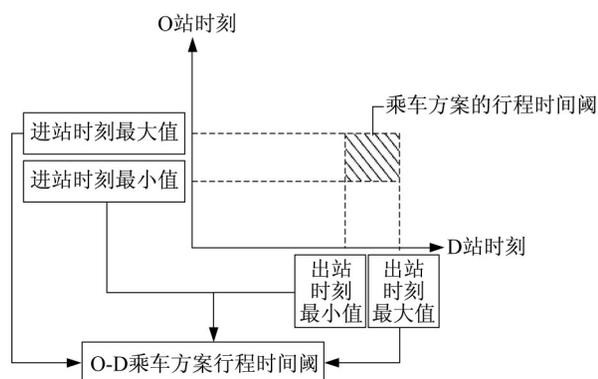


图1 乘客乘车方案行程时间阈

Fig. 1 Travel time threshold of train choice

根据上述乘车方案行程时间阈定义,其计算流程主要包含三个部分:筛选指定O-D间的出行路径、对每条路径搜索可能乘车方案,计算每条路径上每个乘车方案对应的行程时间阈。具体地,乘客在O-D对间的出行路径可分为无换乘路径和有换乘路径两类。

1.2 无换乘路径O-D乘车方案行程时间阈计算

无换乘路径的O-D乘车方案行程时间阈的计算主要基于AFC票卡数据、ATS行车数据以及乘客走行时间参数数据等三种数据资源,算法步骤如下:

- (1)根据指定的O站与D站信息,从路径信息数据中筛选出共计 n 条O-D对间的出行路径,设置路径序号 $i=1$,转入步骤(2);
- (2)判断路径序号 i 是否小于或等于路径总条数 n ,若是,则转入步骤(3),否则转入步骤(9);
- (3)判断O-D间的第 i 条路径 R_i 是否是无换乘路径,若是,则转入步骤(5),否则转入步骤(4);
- (4) $i=i+1$,转入步骤(2);
- (5)基于列车运行数据,获取停靠O站的 m 趟列车的运行信息,设置列车序号 $j=1$,转入步骤(6);
- (6)判断列车序号 j 是否小于或等于列车总趟数 m ,若是,则转入步骤(7),否则转入步骤(4);
- (7)结合走行时间数据与列车运行数据,计算第 i 条路径、第 j 趟列车对应的O-D乘车方案行程时间

阈 $TS_{i,j}$, 转入步骤(8);

(8) $j=j+1$, 转入步骤(6);

(9) 结束计算过程。

在上述计算流程中,步骤(1)、(5)、(7)分别对应筛选O-D间出行路径、搜索可行乘车方案、计算O-D乘车方案行程时间阈三个主要的计算部分,需要详细阐述。

(1) 筛选O-D间出行路径

根据指定O-D起点线路名称、起点车站名称、终点线路名称及终点车站名称4个筛选条件,从路径信息数据中提取该O-D间所有出行路径信息,包括路径序号、途径线路、途径换乘站、途径列车运行方向等。

(2) 搜索可行乘车方案

由于在无换乘路径上出行的乘客只需在O站登乘一次列车即可抵达D站,相应的乘车方案只包含在O站的登乘列车。因此,在列车运行数据中搜索所有停靠乘客上车站的列车,所有列车及其乘降车站构成该出行路径的所有可行乘车方案。其中,由于O站或D站可能为换乘站,为了明确乘降车站,乘客上车站代码需结合起点车站名称及出行路径中的途径线路确定,下车站代码由终点车站名称及途径线路确定。

(3) 计算O-D乘车方案行程时间阈

根据定义,此步骤需要计算乘车方案对应的进站时刻最大值与最小值、出站时刻最大值与最小值。进站时刻最大值与最小值的取值范围需要结合进站走行时间的取值范围与乘客到达站台的时刻范围共同确定,同时受到最大留乘次数 l_c 的影响。对于第 j 趟列车,其从上车站站台离开的时刻 t_{OT}^j 及到达下车站站台的时刻 t_{DP}^j 可以根据列车运行数据确定。可以选择该趟列车的乘客在上车站站台的等待时间决定了其到达上车站站台的最小时刻 $t_{OP, \min}^j$ 及最大时刻 $t_{OP, \max}^j$ 。由此,第 j 趟列车的乘车方案对应的进站时刻最大值与最小值可按式(1)计算:

$$\begin{cases} t_{OP, \min}^j = \begin{cases} t_O^s, & j \leq l_c + 1 \\ t_{OT}^{j-(l_c+1)} - W_O^s, & j > l_c + 1 \end{cases} \\ t_{OP, \max}^j = t_{OT}^j - W_O^f \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_O^s 为O站的运营开始时刻; $t_{OT}^{j-(l_c+1)}$ 为第 $j-(l_c+1)$ 趟列车的离站时刻; W_O^s 为O站的慢速进站走行时间; W_O^f 为O站的快速进站走行时间。出站时刻最大值与最小值可按式(2)确定:

$$\begin{cases} t_{DP, \min}^j = t_{DP}^j + W_D^f \\ t_{DP, \max}^j = t_{DP}^j + W_D^s \end{cases} \quad (2)$$

式中: W_D^f 为D站的快速出站走行时间; W_D^s 为D站的慢速出站走行时间。

由此, O-D 乘车方案行程时间阈 $TS_{i,j} = \{t_{OP, \min}^j, t_{OP, \max}^j, t_{DP, \min}^j, t_{DP, \max}^j\}$, 按照计算流程可以生成指定O-D间所有无换乘路径上的全部乘车方案对应的O-D乘车方案行程时间阈。

1.3 有换乘路径O-D乘车方案行程时间阈计算

有换乘路径的O-D乘车方案行程时间阈计算流程与无换乘路径的主要区别体现在步骤(5)和步骤(7)中:有换乘路径的乘车方案包含两列及以上前后接续的登乘列车,相应的O-D乘车方案行程时间阈计算需考虑由登乘列车组合而成的乘车方案。

(1) 搜索可能乘车方案

搜索可能乘车方案的重点在于搜索所有可能的登乘列车方案,乘车方案中的乘降车站信息可根据起终点站(O站和D站)、途径线路、途径换乘站(T站)等信息确定。有换乘路径上的可能登乘列车方案搜索方法为:首先搜索停靠O站的所有列车,对于O站的每趟列车,搜索登乘O站列车的乘客在换乘站可以换乘的列车,并更新相应的登乘列车方案集,在此基础上继续搜索下一换乘站的列车、更新登乘列车方案集,直到将所有换乘站搜索完毕,输出最新的登乘列车方案集。

(2) 计算乘车方案行程时间阈

在搜索得到乘车方案确定后,乘客在各个T站的到站时刻及离站时刻可由列车运行数据确定。因此,影响进站时刻、出站时刻最大值与最小值的因素为乘客在O站、D站的走行与等待时间。这意味着,有换乘路径的O-D乘车方案行程时间阈计算可参照无换乘路径的计算过程。对于第 j 个乘车方案,假定在O站的登乘列车在所有 m_o 趟列车中的序号为 a , 最后停靠D站的列车号为 e , 则其从O站站台离开的时刻为 t_{OT}^a , 到达D站站台的时刻为 t_{DP}^e 。由此,第 j 个乘车方案对应的进站时刻最大值与最小值可按式(3)计算:

$$\begin{cases} t_{OP, \min}^j = \begin{cases} t_O^s, & a \leq l_c + 1 \\ t_{OT}^{a-(l_c+1)} - W_O^s, & a > l_c + 1 \end{cases} \\ t_{OP, \max}^j = t_{OT}^a - W_O^f \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t_{OT}^{a-(l_c+1)}$ 为第 $a-(l_c+1)$ 趟列车离开O站的时刻。出站时刻最大值与最小值可按式(4)确定:

$$\begin{cases} t_{D, \min}^b = t_{DP}^e + W_D^f \\ t_{D, \max}^b = t_{DP}^e + W_D^s \end{cases} \quad (4)$$

由此,乘车方案的行程时间阈 $TS_{i,j} = \{t_{O, \min}^b, t_{O, \max}^b, t_{D, \min}^b, t_{D, \max}^b\}$,按照计算流程可以生成有换乘路径上的全部乘车方案对应的行程时间阈。

2 乘车方案多维匹配推定模型构建

2.1 乘客乘车方案匹配推定的影响因素

基于1.2节和1.3节计算得到的乘车方案行程时间阈,便可以根据乘客的O-D实际行程时间来推定其可能的乘车方案。然而,现实场景中仅仅依据乘车方案行程时间阈还不能完全匹配推定所有乘客的实际乘车方案,故还需结合其他考虑因素推定乘客最终的乘车方案选择情况。根据轨道交通的出行特征和既有的研究^[14-16]概括起来,影响乘客乘车方案匹配推定的主要影响如下:

(1) 进出站时刻

乘客的进站及出站时刻是判断其进入及离开城市轨道交通系统的主要依据,且可以唯一地确定乘客的O-D实际行程时间。由于O-D实际行程时间与乘客乘车方案选择之间存在强关联的特性,O-D实际行程时间可以作为影响乘客乘车方案匹配推定的首要因素。但同时,由于O-D实际行程时间与乘客乘车方案选择之间波动特性的存在。一方面,个体乘客的差异及扰动因素的存在使得O-D实际行程时间产生波动;另一方面,乘客乘车方案的多样性也给两者之间的对应带来了波动。乘客的进站及出站时刻又可能难以唯一推定乘客的乘车方案选择,故还需考虑其他因素进行多维度的匹配推定。

(2) 乘车班次

城市轨道交通列车容量是有限的,当有限的列车运能无法满足车站较大的客流需求时(如早晚高峰期间),满载率较高的列车到达站台后可以输送的乘客数量将极其有限,站台上的乘客会出现无法登乘下一班列车的情况,进一步导致站台上乘客的积压。未能成功登上当前班次列车的乘客需要等待后续列车的到来,甚至需要等待数班列车,从而出现“留乘”现象。因此,乘客在上车站能否登乘当前列车班次是影响其后续登乘列车选择判断的直接因素,继而影响对乘客最终乘车方案的匹配推定。

(3) 换乘次数

在城市轨道交通网络乘客的出行过程中,换乘

次数也是影响其出行选择的因素之一。一般来说,乘客对换乘次数少的乘车方案的心理感觉时间更短,同时换乘次数的增加往往会降低乘客的出行舒适度,故为了追求出行时效性和舒适性,乘客更倾向于选择换乘次数少的出行乘车方案,这在对乘客乘车方案的匹配推定中应被充分考虑。

(4) 走行特征

乘客的走行特征是影响其乘车方案匹配推定的又一因素。对于城市轨道交通个体乘客来说,其走行习惯在一次出行过程中的短时间内不会轻易改变。这意味着乘客在进站、换乘、出站过程中,其走行速度的步幅、步长等行为特征是大致稳定的。但乘客的走行速度也会受到客流情况和车站环境等因素的影响,因此,个体乘客在整个出行过程中的走行速度绝对值会有所不同,但在整个客流中的相对位置应当处于同一水平^[17],即同一乘客在进站、换乘、出站过程中的走行速度水平具有一致性。为此,满足走行速度水平一致性的乘客乘车方案匹配推定结果更符合实际出行情况。

2.2 乘客乘车方案匹配推定的基本思路

乘车方案行程时间阈计算了O-D对间各个乘客可能乘车方案对应的进站及出站时刻的最大值与最小值。若乘客选择某个乘车方案完成其出行,则其进站及出站时刻必须符合相应的乘车方案行程时间阈要求。因此,乘车方案行程时间阈是推定乘客实际乘车方案的主要依据。

同时,为了从所有乘客可能乘车方案中匹配推定最终结果,还需要进一步结合乘车班次、换乘次数和走行特征等影响因素。为此,提出基于乘车方案行程时间阈的乘客乘车方案多维匹配推定方法,其基本思路为:乘客乘车方案的匹配推定以其行程时间阈为主,并进一步辅以乘车班次、换乘次数和走行特征等因素进行多维度匹配推定(图2)。

2.3 基于乘车方案行程时间阈的多维匹配推定模型

根据2.2节思路,乘客乘车方案的多维匹配推定模型如图3所示,主要包含三个模块:计算乘车方案行程时间阈、基于行程时间阈筛选可能乘车方案、考虑乘车班次、换乘次数及走行特征匹配推定最终方案。

(1) 计算乘车方案行程时间阈

首先分析城市轨道交通乘客的出行过程以及所需要用到的不同数据资源,包括:路径信息数据、列车运行数据、走行时间参数数据等。由于O-D对间

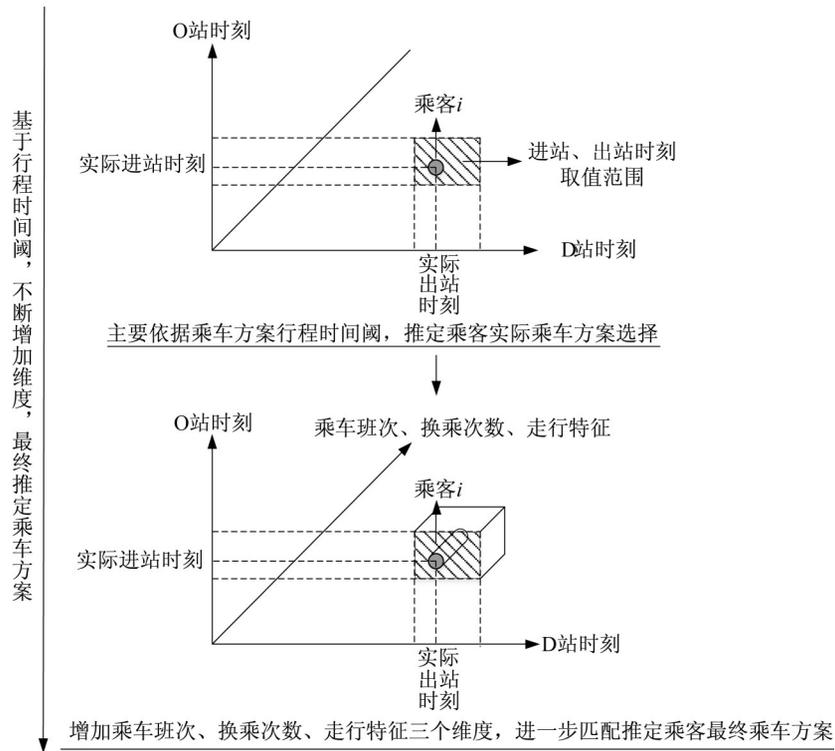


图 2 乘车方案匹配推定的基本思路

Fig. 2 Basic idea for deducing passengers' train choices

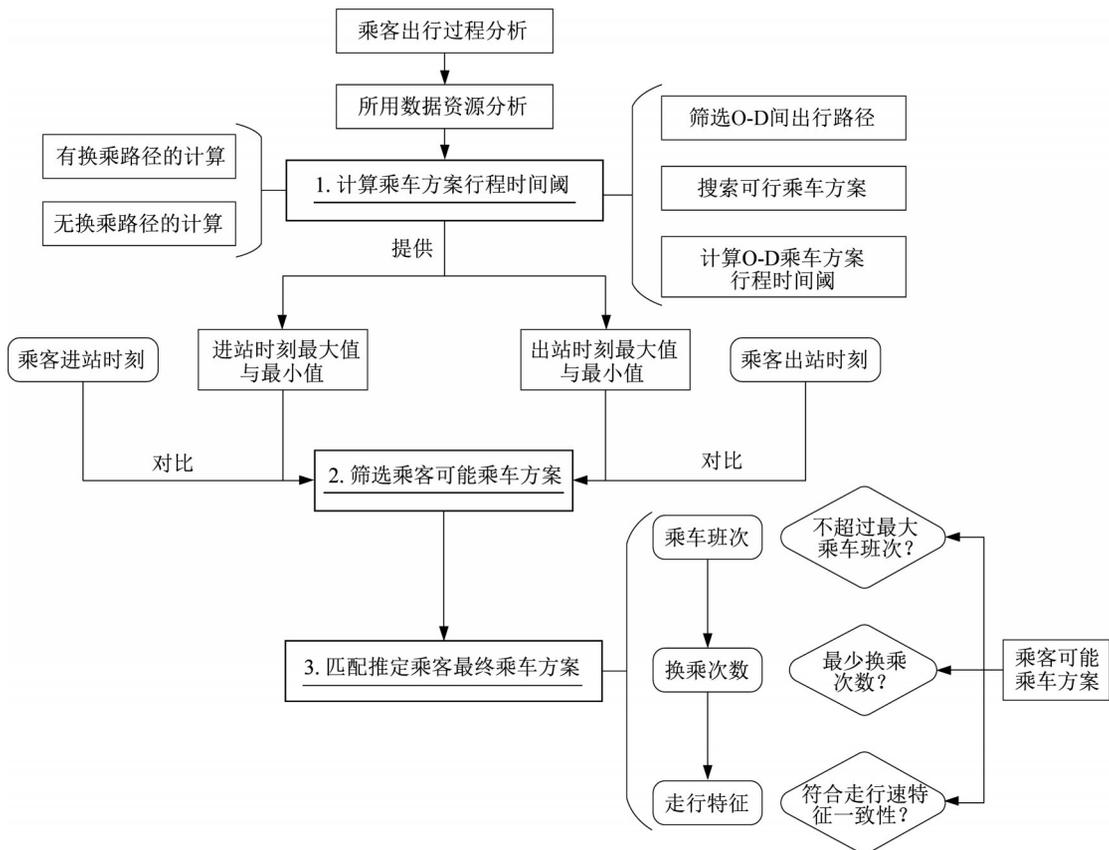


图 3 基于行程时间阈的乘客乘车方案多维匹配推定

Fig. 3 Procedure of deducing passengers' train choices based on travel time thresholds

有换乘路径的行程时间包含换乘等待时间与换乘走行时间,与无换乘路径有所不同,需要分别计算两种路径下的O-D乘车方案行程时间阈。计算过程主要包含以下三部分:①筛选O-D对间出行路径;②搜索可行乘车方案;③计算O-D乘车方案行程时间阈。由此计算得到的O-D乘车方案行程时间阈与乘客出行选择一一对应,可以提供登乘列车及乘降车站等乘车方案信息,途径线路及换乘站(如果存在换乘)等出行路径信息也可以从中获取。

(2) 基于行程时间阈筛选乘客可能乘车方案

O-D乘车方案行程时间阈提供了该O-D对间每一乘车方案对应的进站及出站时刻的最大值与最小值。对于在O-D对间出行的某一城市轨道交通乘客,将AFC数据提供的该乘客的进站和出站时刻分别与所有乘车方案的行程时间阈最大值与最小值逐一对比,若进站及出站时刻均在相应的取值范围内,则将其对应的乘车方案列入乘客的可能乘车方案集合中。

(3) 基于乘车班次、换乘次数及走行特征匹配推定乘客最终乘车方案

此步骤基于步骤(2)确定的乘客所有可能乘车

方案集合,若乘车方案不唯一,则可在进站及出站时刻推定维度的基础上,继续增加乘车班次、换乘次数及走行特征三个维度,做进一步的匹配推定直至唯一乘车方案。根据筛选得到的乘客可能乘车方案集合,判断该出行选择对应的实际乘车班次是否不超过最大乘车班次、其路径上的换乘次数是否为合理换乘次数、其对应的乘客出行过程是否符合走行特征一致性。经过上述步骤的匹配推定过程,最终确定城市轨道交通乘客的实际乘车方案选择情况。

3 实例分析

以北京城市轨道交通网络为例,选取三对典型O-D(表1)对2.3节模型进行实例应用与分析,其中:O-D_①仅存在1条无换乘的出行路径;O-D_②的2条出行路径均为有换乘路径且换乘次数相同;O-D_③的三条出行路径均为有换乘但换乘次数不同,这三对O-D的出行路径代表了各类可能的情况,可作为典型O-D。所用数据为北京地铁提供的AFC票卡数据、ATS行车数据及分时段走行时间数据(表2—4)。

表1 三对典型O-D信息表

Tab. 1 Three samples of typical O-D pairs

字段含义	O-D					
	O-D _①	O-D _②		O-D _③		
起点线路名称	1号线	5号线	5号线	1号线	1号线	1号线
起点车站名称	王府井	天通苑北	天通苑北	五棵松	五棵松	五棵松
终点线路名称	1号线	10号线	10号线	2号线	2号线	2号线
终点车站名称	大望路	知春路	知春路	西直门	西直门	西直门
路径序号	1	1	2	1	2	3
途径线路	1号线	5号线—10号线	5号线—13号线	1号线—2号线	1号线—9号线—4号线	1号线—4号线
途径换乘站		惠新西街南口	立水桥	复兴门	军事博物馆—国家图书馆	西单
途径列车运行方向	2	1—2	1—2	2—1	2—2—1	2—2

表2 车站乘客走行时间数据示例(按O-D整理)

Tab. 2 Samples of passenger walking time data in station for O-D pairs

字段含义	O-D							
	O-D _①	O-D _②			O-D _③			
车站名称	王府井	惠新西街南口	立水桥	复兴门	军事博物馆	国家图书馆	西单	西直门
时段	1	2	4	3	3	5	2	1
走行起点	0	1	1	2	2	2	2	2
走行终点	2	2	2	1	2	1	2	0
快速走行时间/s	19	154	179	80	173	63	136	112
中速走行时间/s	67	265	226	206	285	95	239	180
慢速走行时间/s	141	325	283	320	367	143	330	225

以北京地铁某工作日实际数据为例,对上述三对典型O-D间乘客实际乘车方案的匹配推定结果见表5—7。

由表5—7可以看出,本文研究提出的基于行程时间阈的乘客乘车方案多维匹配推定模型能够对95%以上的实际出行乘客做出唯一匹配推定,并在

表 3 AFC 数据示例(按 O-D 整理)
Tab. 3 Samples of AFC data for O-D pairs

字段含义	O-D								
	O-D _①			O-D _②			O-D _③		
起点线路名称	1 号线	1 号线	1 号线	5 号线	5 号线	5 号线	1 号线	1 号线	1 号线
起点车站名称	王府井	王府井	王府井	天通苑北	天通苑北	天通苑北	五棵松	五棵松	五棵松
进站刷卡时刻/s	35 580	43 320	66 360	44 100	45 240	72 780	58 020	63 720	73 500
终点线路名称	1 号线	1 号线	1 号线	10 号线	10 号线	10 号线	2 号线	2 号线	2 号线
终点车站名称	大望路	大望路	大望路	知春路	知春路	知春路	西直门	西直门	西直门
出站刷卡时刻/s	36 363	44 358	67 264	46 870	47 680	75 402	60 093	65 468	75 557

表 4 ATS 数据示例(按 O-D 整理)
Tab. 4 Samples of ATS data for O-D pairs

字段含义	车站名称									
	王府井	天通苑北	惠新西街南口	立水桥	五棵松	复兴门	军事博物馆	国家图书馆	西单	
线路代码	1	5	10	13	1	2	9	4	4	
车次号	2193	1007	2078	2109	2302	1144	2199	1S519	2P122	
车次内顺序	16	1	24	7	6	16	10	10	9	
到站时刻/s	48 616	19 361	29 224	37 192	64 563	48 916	73 226	67 737	30 305	
离站时刻/s	48 651	19 424	29 268	37 230	64 613	48 966	73 276	67 785	30 353	
列车运行方向	2	1	2	2	2	1	2	1	2	

表 5 典型 O-D 乘客乘车方案匹配推定结果(部分)
Tab. 5 Samples of train choice deduction results for typical O-D pairs

字段含义	O-D					
	O-D _①	O-D _②	O-D _③		O-D _④	
乘客编号	乘客 0653	乘客 0008	乘客 0395		乘客 0109	
起点线路名称	1 号线	5 号线	1 号线		1 号线	
起点车站名称	王府井	天通苑北	五棵松		五棵松	
终点线路名称	1 号线	10 号线	2 号线		2 号线	
终点车站名称	大望路	知春路	西直门		西直门	
实际进站时刻/s	20 940	27 240	58 620		28 380	
实际出站时刻/s	21 722	29 800	60 613		30 740	
路径序号	1	2	3		1	
途径线路	1 号线	5 号线-13 号线	1 号线-4 号线		1 号线-2 号线	
途径换乘站		立水桥	西单		复兴门	
途径列车运行方向	2	1-2	2-2		2-1	
登乘列车方案	2013	1053-2052	2257-2P424		2075-1050	
上车站代码	118	521-1339	108-453		108-204	
离站时刻/s	21 055	27 316~27 911	58 676~59 892		28 944~30 238	
下车站代码	123	527-1325	115-443		114-201	
到站时刻/s	21 705	27 697~29 615	59 663~60 471		29 794~30 623	

表 6 各 O-D 对间乘客乘车方案推定情况统计
Tab. 6 Analysis of train choice deduction results for typical O-D pairs

字段含义	O-D		
	O-D _①	O-D _②	O-D _③
乘客数	1 025	125	531
匹配率/%	95.9	96.8	95.4

此基础上可以获取全天不同时段乘客在 O-D 对间不同路径上的出行选择比例及其动态变化情况。

此外,也仍有少数实际出行乘客未能得到唯一

匹配推定(如表 5 中的乘客 0109 推定存在两种可能乘车方案),则可能是由于实际数据中存在的一些异常情况导致,例如:乘客进出闸机时刷卡异常,导致实际行程时间计算出现偏差;北京地铁闸机进站刷卡时刻只能精确到分钟(出站刷卡时刻可以精确至秒);乘客在车站(起终点及换乘站)内无故逗留等。也可能是由于其他原因或亦是合理结果,如两条径路的实际情况相同等,这些将在未来做进一步的分析研究。

表7 各O-D对间分时段乘客乘车方案情况统计

Tab. 7 Analysis of train choice deduction results in different periods for typical O-D pairs

O-D	出行路径 序号	途径换乘站	时段1 匹配率/%	时段2 匹配率/%	时段3 匹配率/%	时段4 匹配率/%	时段5 匹配率/%	全天平均 占比/%	平均行程 时间/s
O-D _①	1		100	100	100	100	100	100	938
O-D _②	1	惠新西街南口	54.5	67.7	70.3	100	60	67.8	2 609
	2	立水桥	45.5	32.3	29.7	0	40	32.2	2 875
O-D _③	1	复兴门	67.9	67.5	62.8	74.4	76.2	66.8	1 918
	2	军事博物馆—国家图书馆	10.7	6.0	11.7	6.4	4.8	8.8	2 070
	3	西单	21.4	26.5	25.5	19.2	19.0	24.4	2 188

4 结论

城市轨道交通乘客个体的出行选择是网络客流分布的微观基础,包括了出行路径和乘车方案两方面,其中乘车方案本质上决定了出行路径,对其做出准确推定是网络客流时空分布计算及分析的关键。在现有“一票换乘”模式下AFC系统仅能记录乘客的进出站信息,乘客实际乘车方案情况难以直接确定是运营管理部门进行网络客流精细化计算及分析的主要困难。本文综合利用了城轨网络化运营过程中的AFC票卡和ATS行车数据,以及乘客走行时间参数数据等,在分析乘客乘车方案行程时间阈基础上,充分考虑影响乘车方案匹配推定的乘车班次、换乘次数及走行特征等各项主要因素,提出了基于行程时间阈的乘客乘车方案多维匹配推定模型,并给出实例应用及分析。该模型已被北京城市轨道交通运营管理部门采用,并应用于对现有网络清分模型系统的验证与改进工作中。模型中对少数异常数据的处理及推定等未来将进一步研究解决,并且也会继续考虑模型在特殊情况中如拥挤情况下的适用情况,以及与其他既有模型方法进行实际匹配效果的对比。

作者贡献声明:

朱炜:建立系统架构,论文审阅与修改。

范伟莉:建模及算法设计,论文撰写。

徐昶悦:算例分析,论文撰写及修改。

徐瑞华:研究方法指导。

参考文献:

- [1] 朱炜,韦锦,洪玲,等. 基于旅行时间分析的城轨乘客路径集验证方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(1):56.
ZHU Wei, WEI Jin, HONG Ling, *et al.* Validation method of passenger route choice set based on travel time analysis for

urban rail transit [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(1): 56.

- [2] 同济大学交通运输工程学院. 基于乘客出行时间与列车运行的清分统计模型与演示系统研究[R]. 上海:同济大学,2014. School of Transportation Engineering, Tongji University. Research on statistical model and demonstration system of sorting based on passenger travel time and train operation [R]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [3] 毛保华,四兵锋,刘智丽. 城市轨道交通网络管理及收入分配理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2007. MAO Baohua, SI Bingfeng, LIU Zhili. Theory and method of urban rail transit network management and income distribution [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] 牛新奇,潘荫荣. 轨道交通系统中清分算法的研究[J]. 计算机时代,2005(2):17. NIU Xinqi, PAN Yinrong. Research on sorting algorithm in rail transit system[J]. Computer Era, 2005(2): 17.
- [5] 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. WU Xiangyun, LIU Canqi. Traffic equilibrium assignment model specially for urban railway network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(9): 1158.
- [6] 许帆,韩宝明,郑盼,等. 基于时间匹配度的城市轨道交通乘客乘车方案辨识研究[J]. 都市轨道交通,2019,32(4):60. XU Fan, HAN Baoming, ZHENG Fen, *et al.* Method to identify passenger boarding plan in an urban rail transit network based on time matching degree[J]. Urban Rail Transit, 2019, 32(4): 60.
- [7] ZHU Y W, KOUTSOPOULOS H N, WILSON N H M. A probabilistic passenger-to-train assignment model based on automated data [J]. Transportation research Part B, 2017, 104: 522.
- [8] KUSAKABE T, IRYO T, ASAKURA Y. Estimation method for railway passengers' train choice behavior with smart card transaction data[J]. Transportation, 2010, 37: 731.
- [9] CHAN J. Rail transit OD matrix estimation and journey time reliability metrics using automated fare data [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [10] SUN L J, JIN J G, LEE D H, *et al.* Characterizing network travel time reliability and passenger route choice in metro

- systems [C]//93th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: Transportation Research Board, 2014:32-44.
- [11] 蔡昌俊,姚恩建,张永生,等. 基于AFC数据的城轨站间客流量分布预测[J]. 中国铁道科学,2015,36(1):126.
CAI Changjun, YAO Enjian, ZHANG Yongsheng, *et al.* Forecasting of passenger flow's distribution among urban rail transit stations based on AFC data[J]. China Railway Science, 2015,36(1):126.
- [12] 丁敬安,张欣海. 基于手机信令数据的地铁乘客路径识别研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2019,14(11):1194.
DING Jingan, ZHANG Xinhai. Research on subway passenger path identification based on mobile phone signaling data [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019,14(11):1194.
- [13] 赖见辉,陈艳艳,钟园,等. 基于手机定位信息的地铁乘客出行路径辨识方法[J]. 计算机应用,2013,33(2):583.
LAI Jianhui, CHEN Yanyan, ZHONG Yuan, *et al.* Travel route identification method of subway passengers based on mobile phone location data [J]. Journal of Computer Applications, 2013,33(2):583.
- [14] HU Yongkai, YANG Binbin. Deriving travel behavior data of urban subway passengers from mobile phone network [C]//Changsha: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2014: 396-405.
- [15] CHEN X, ZHOU L, YUE Y, *et al.* Data-Driven method to estimate the maximum likelihood space - time trajectory in an urban rail transit system[J]. Sustainability, 2018, 10(6):1752.
- [16] 韩宇,韩宝明,李得伟. 地铁站乘客上下车效率影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(7):43.
HAN Yu, HAN Baoming, LI Dewei, *et al.* Analysis of boarding/alighting efficiency in metro station[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(7):43.
- [17] ZHOU F, XU R H. Model of passenger flow assignment for urban rail transit based on entry and exit time constraints [J]. Transportation Research Record, 2012(2284): 57.