

# 城市轨道交通乘客出行路径精准分析算法研究<sup>\*</sup>

许 明 王锁平 刘 毅

(浙江众合科技股份有限公司, 310051, 杭州//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 乘客准确出行路径的计算是精准客流分析的关键, 而既有技术在路径计算准确性及出行链颗粒度、时效性和实现成本方面还没有形成完整的解决方案。基于人车耦合的技术理念, 构建不同换乘次数出行类型的时间序列, 并通过同时段不同出行路径重叠过程耗时的相互替代, 实现对出行路径详细时间序列的准确计算, 进而推算出乘客准确出行路径。基于大数据技术, 实现对海量乘客出行路径的快速分析计算, 能够以低成本方式为以客流为驱动的精准化行车组织、客运组织和个性化乘客服务等应用场景提供关键数据支撑。

**关键词** 城市轨道交通; 出行路径; 人车耦合; 时间序列

**中图分类号** U293.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.05.010

## Research on Accurate Analysis Algorithm of Urban Rail Transit Passenger Travel Path

XU Ming, WANG Suoping, LIU Yi

**Abstract** Accurate passenger travel path calculation is the key to accurate passenger flow analysis, however existing technical methods have not yet formed a complete solution in terms of path calculation accuracy, travel chain granularity, timeliness and implementation cost. Based on the technical concept of man-vehicle coupling, time series of different interchange trip types are constructed, and by replacing time consumption in the overlapping process of different travel paths during the same time periods, the accurate calculation of the detailed time series of travel paths is realized, and the accurate passenger travel paths are deduced. Based on big data technology, rapid analysis and calculation of mass passenger travel paths can be realized, and key data support for application scenarios such as passenger flow driven precise traffic organization, passenger transport organization and personalized passenger service in a low-cost way can be provided.

**Key words** urban rail transit; travel path; man-vehicle coupling; time series

**Author's address** Zhejiang Zhonghe Technology Co.,

Ltd., 310051, Hangzhou, China

城市轨道交通线网规模不断扩大, 对线网运营组织和乘客服务带来了巨大压力和挑战。以客流为驱动的精准运力投放、按需灵活调度、智能应急指挥辅助决策, 以及预见性的精准客流管控和个性化出行引导, 成为应对线网化问题的重要内容和发展方向<sup>[1]</sup>。精准的客流分析则是关键的共性基础, 其技术方法还处在应用探索过程中。

既有清分系统的客流分布计算方法, 是按照乘客出行最短路径, 或者通过有效路径的客流分配比例计算客流。该方法并不能准确真实地反应乘客实际出行路径, 仅能实现对历史客流的分析, 无法实现对时变客流分析。应用人工智能技术的客流预测方法, 能够基于历史客流数据样本, 实现一定时长范围的客流趋势预测, 但是因为缺少足够的样本, 无法解决异常运营情况下的客流统计和预测, 而异常情况下的客流预测恰恰是调度调整、客流管控等很多关键应用的基础。基于视频分析、Wi-Fi探针和手机信令数据的客流分布计算方法, 能够准确统计出局部客流分布情况, 甚至是乘客出行的实际准确路径, 但是也因存在建设运营成本高及无法在业务层面关联乘客和行车过程等问题, 不具备异常运营情况下的客流预测能力。

近年来, 随着电子支付比例的持续提升, 逐步形成了一人一卡/码的固定关系, 因此, 以乘车卡/码为对象, 通过关联乘客出行和列车运行轨迹, 以人车匹配的方式计算乘客准确出行路径, 进而描绘乘客出行习惯, 实现正常和异常运营情况下的客流分布统计和预测的技术理念成为了研究重点<sup>[2]</sup>。由于缺少乘客出行链中部分环节耗时的直接计算方法, 既有研究方法通常会采用阈值设定、人工采样补充, 或构建概率分布的方式进行近似计算<sup>[3]</sup>,

<sup>\*</sup> 浙江省省级重点研发计划项目(2021C01195)

在准确度方面和出行链完整方面还存在优化空间。本文算法将基于人车匹配理念,通过对出行链时间序列的准确计算,以确定性方式实现乘客准确出行路径的快速计算。

## 1 算法设计思路

算法以 AFC(自动售检票)系统刷卡记录数据和 ATS(列车自动监控)列车行车数据为输入,以确定性的方法推算出乘客在线网中出行的准确 OD(起讫点)路径。

乘客在线网中的出行路径总体可以分为三种类型:零次换乘、一次换乘和多次换乘。三种出行路径可以从时间序列的维度统一描述为: $\{t_{\text{进站刷卡时间}}, t_{\text{从闸机到站台的行走时间}}, t_{\text{站台候车时间}}, t_{\text{所乘列车运行时间}}, [t_{\text{换乘行走时间}}, t_{\text{换乘站台候车时间}}, t_{\text{所换列车运行时间}}]_{0, \dots, k}, t_{\text{出站行走时间}}, t_{\text{出站刷卡时间}}\}$ ,其中每项代表持续时长, $t_{\text{进站刷卡时间}}$ 和 $t_{\text{出站刷卡时间}}$ 时长为 0,仅用于表示出行链的完整性,序列中 $[t_{\text{换乘行走时间}}, t_{\text{换乘站台候车时间}}, t_{\text{所换列车运行时间}}]_{0, \dots, k}$ 子序列代表换乘过程, $k$ 表示换乘总次数。出行路径 $l$ 的总出行时长可表示为:

$$T_l = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

式中:

- $T_l$ ——出行路径 $l$ 的总出行时长;
- $i$ ——出行序列项编号;
- $t_i$ ——对应出行序列项的时长;
- $n$ ——出行序列项总数。

乘客在城市轨道交通线网中的出行路径多样。在叠加了列车晚点、大客流拥堵和突发事件等时间变化因素之后,上述时间序列中的阶段性过程耗时将成为不确定性的变量,很难基于 AFC 刷卡记录数据和 ATS 列车行车数据以正向计算的方式推算出乘客出行的准确 OD,因此不同时段和不同拥堵情况下的准确 $t_i$ 计算成为了关键点和难点。

通过对零次换乘、一次换乘和多次换乘出行轨迹的深入分析,本文提出了应用大数据算力优势、采用同时段不同出行轨迹重叠路径耗时相互替换的解决思路,即用能够准确计算出的零次换乘时间序列相关子过程耗时,替换与一次换乘同时段重叠的子过程耗时,从而避免了一次换乘时间序列中局部子过程耗时无法直接计算的问题,并以此类推,最终实现对多次换乘出行时间序列中每个子过程

耗时的准确计算。基于此,通过匹配刷卡交易时长与所有可能出行路径时长的方法,可推算出乘客的准确出行路径,即:

$$p_{OD} = \min\{t_{OD} - T_l\}_{l=1, \dots, m} \quad (2)$$

式中:

- $p_{OD}$ ——乘客准确出行路径;
- $t_{OD}$ ——刷卡交易时长;
- $m$ ——出行路径总数。

## 2 算法实现流程

### 2.1 算法输入内容

算法具体输入内容包括:

- 1) AFC 刷卡记录数据,包括闸机编号、位置和进出站刷卡时间;
- 2) ATS 列车行车数据,包含具体列车行走过程中在每站的到站时间、停站时间和发车时间。

### 2.2 零次换乘过程计算方法

在零次换乘情况下,能够基于 AFC 交易数据和 ATS 行车数据,通过逆序推算的方法,准确计算出时间序列和列车车次。计算过程如下(S1—S6 表示步骤序号):

S1: 计算出站刷卡时间。从 AFC 刷卡历史数据中读取准确的刷卡出站时间。

S2: 计算出站行走时间。该时间没有已知数据支持直接计算,考虑到不同客流量对乘客出站行走时间的影响较小,可以采用早间运营大行车间隔情况下零次换乘 OD 所对应子过程时间替代。早间运营时段的行车间隔通常较大,一般能够完全覆盖出站行走时间。对于特殊的综合超大换乘站,设有多个进站口,算法中综合考虑默认的设计输入和限制条件。之后,基于出站刷卡时间和出站行走时间,根据 ATS 行车数据,可准确推算出与出站时间临近的列车的到站时间,进而计算出出站行走时间,计算公式如下:

$$t_{\text{出站行走时间}} = t_{\text{出站刷卡时间}} - t_{\text{临近列车到站时间}} \quad (3)$$

S3: 计算所乘列车运行时间。用前一步骤中获取的该次列车在本站到站时间和在出发站的发车时间记录计算时长,计算公式如下:

$$t_{\text{所乘列车运行时间}} = t_{\text{列车到站时间}} - t_{\text{列车出发站发车时间}} \quad (4)$$

S4: 计算从进站到站台的行走时间。该时段的耗时没有直接的计算途径,但是考虑到进站和出站的行走时间基本一致,可以采用相同时段 OD 中从本站出站的行走时间替代进站行走时间,即:

$$t_{\text{进站走行时间}} = t_{\text{同时段OD本站出站走行时间}} \quad (5)$$

S5:计算站台候车时间。因为乘客在站台候车的情况复杂,无法基于已有数据进行直接计算,但可以通过前述步骤得到的列车到站时间和进站走行时间之差得到,即:

$$t_{\text{候车时间}} = t_{\text{列车到站时间}} - t_{\text{进站刷卡时间}} - t_{\text{进站走行时间}} \quad (6)$$

S6:计算进站刷卡时间。从 AFC 刷卡历史数据中,读取准确的刷卡进站时间。

通过上述步骤,能够准确计算出零换乘 OD 时间序列子过程耗时以及乘坐列车车次。在具体算法实现时,将根据大数据方法对上述计算步骤进行拆分,分批计算,共享计算结果,以减少重复运算,并避免前后数据循环依赖的问题。

### 2.3 一次换乘过程计算方法

一次换乘情况下的时间序列计算方法与零次换乘类似,其中无法直接计算的子过程耗时,将采用与零次换乘子过程重叠替换的方法实现,计算过程如下(S1—S9 表示步骤序号):

S1:计算出站刷卡时间。从 AFC 刷卡历史数据中,读取准确的刷卡出站时间。

S2:计算出站走行时间。用同时段零换乘的出站走行时间替代,该时间在零换乘 OD 计算中已得到,即:

$$t_{\text{出站走行时间}} = t_{\text{同时段零换乘出站走行时间}} \quad (7)$$

S3:计算换乘列车运行时间。与零换乘子过程计算方法相同,用与出站时间临近的列车作为换乘列车,计算从换乘站到终点站的列车走行时间,即:

$$t_{\text{换乘列车运行时间}} = t_{\text{换乘列车到站时间}} - t_{\text{换乘列车换乘站发车时间}} \quad (8)$$

S4:计算进站刷卡时间。从 AFC 刷卡历史数据中,读取准确的刷卡进站时间。

S5:计算进站到站台的走行时间。用同时段 OD 零换乘的进站走行时间替代,即:

$$t_{\text{进站走行时间}} = t_{\text{同时段OD本站进站走行时间}} \quad (9)$$

S6:计算站台候车时间。用同时段零换乘的本站候车时间替代,即:

$$t_{\text{候车时间}} = t_{\text{零换乘本站候车时间}} \quad (10)$$

S7:计算所乘坐列车运行时间。结合刷卡进站时间、进站走行时间和站台候车时间,正向推算出临近时段相匹配列车车次,并用该列车在对应 OD 进出站的行车记录计算时长,公式如下:

$$t_{\text{所乘坐列车运行时间}} = t_{\text{换乘站到站时间}} - t_{\text{列车出发站发车时间}} \quad (11)$$

S8:计算一次换乘走行时间。采用前述步骤中得到的乘坐列车车次和换乘列车车次进行推算,即:

$$t_{\text{换乘走行时间}} + t_{\text{换乘站候车时间}} = t_{\text{换乘列车出发时间}} - t_{\text{乘坐列车到站时间}} \quad (12)$$

由于换乘,乘客的站台候车时间和从该站出发的零换乘乘客的等待时间基本一致,可以用该时段零换乘的站台候车时间,替代换乘站台候车时间计算得出一次换乘走行时间,即:

$$T_{\text{一次换乘走行时间}} = t_{\text{换乘走行时间}} + t_{\text{换乘站候车时间}} - t_{\text{同时段零换乘站台候车时间}} \quad (13)$$

S9:计算一次换乘站台候车时间。换乘站台候车时间可以用零换乘的该站候车时间替代,即:

$$t_{\text{一次换乘候车时间}} = t_{\text{同时段零换乘候车时间}} \quad (14)$$

通过上述步骤,能够相对准确地计算出一次换乘中各子过程的耗时和乘坐及换乘列车车次。

### 2.4 多次换乘过程计算方法

基于零次换乘分析计算中得到的同时段进站走行时间、站台候车时间、出站走行时间数据,以及一次换乘分析计算中得到的一次换乘走行时间和一次换乘候车时间数据,就可以对多次换乘的子过程进行正向计算,通过和正向时间临近的列车车次匹配,计算出多次换乘情况下的出行时长和乘坐列车车次。详细过程参考一次换乘计算过程,不再赘述。

### 2.5 完整算法流程

在能够计算出各类出行路径时间序列的基础上,设计乘客实际出行路径计算完整算法。考虑到线网规模、客流量、不同应用场景下的实时性要求,以及不同出行路径重叠序列的查询需求,完整算法对算力有较高的要求。因此,完整算法将基于大数据技术实现过程数据存储和批量并行化计算。完整算法计算步骤如下(S1—S4 表示步骤序号):

S1:计算线网全部两站之间的所有可能出行路径,并构建不同换乘次数  $k$  的分类路径集合  $A_{0,\dots,k}$   $\{(s_{\text{start}}, [s_{\text{transfer}}]_{0,\dots,r}, s_{\text{end}})\}$ ,其中,  $s_{\text{start}}$  表示出行路径中的起始站,  $s_{\text{transfer}}$  表示出行路径中的换乘站,  $s_{\text{end}}$  表示出行路径中的终点站,  $r$  表示换乘站的总数。

S2:读取所有 AFC 刷卡交易记录,根据乘客卡号和交易时序构建交易配对,并通过交易记录中闸机所在的车站位置,与前步骤中的路径集合  $A$  进行关联查询,构建不同换乘次数的出行路径时序交易集合  $B_{0,\dots,k} \{(a_i, t_{\text{in}}, t_{\text{out}}, e_{\text{in}}, e_{\text{out}})\}$ ,其中,  $t_{\text{in}}$  表示进站时间,  $t_{\text{out}}$  表示出站时间,  $e_{\text{in}}$  表示闸机所在进站

口,  $e_{out}$  表示出站口。交易出行始末站之间所有可能的出行路径都会生成一个集合元素,  $a_i$  表示其中一条可能的出行路径。

S3: 依据前述换乘过程计算方法, 计算交易集合  $B$  中每个出行路径的时间序列, 形成集合  $C_{0, \dots, k}$   $\{(a_i, [ < t_{ij}, p_{ij}, k_{ij}, w_j > ]_{1, \dots, k})\}$ , 集合元素表示  $a_i$  路径中子过程位置  $p_{ij}$  在  $k_{ij}$  时刻的耗时  $t_{ij}$ , 对应车次是  $w_j$ , 子过程元素  $< t_{ij}, p_{ij}, k_{ij}, w_j >$  具备键值对属性, 方便实现快速的关联查询。出行路径时间序列计算流程如图 1 所示。

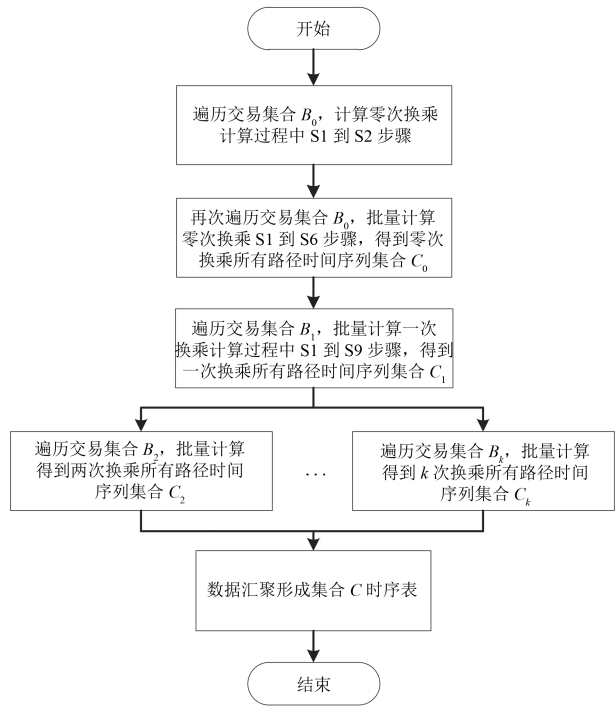


图 1 出行路径时间序列计算流程

Fig. 1 Calculation process of travel path time series

S4: 通过对集合  $C$  时序表搜索, 计算具体交易配对对所有出行路径的时间序列和出行时长, 选择与交易记录时长偏差最小的路径作为最终的准确出行路径。对于时间相近无法匹配的情况, 通过接续列车的衔接顺序冲突进行纠偏排除; 对于无法匹配的数据推送人工分析处置。乘客准确出行路径计算流程如图 2 所示。

3 算法优化改进

在上述算法设计中, 零换乘出站走行时间、一次换乘走行时间、各时段零换乘候车时间和各时段一次换乘候车时间是关键变量, 其计算准确性决定了二次换乘及以上的 OD 计算准确性。为了提升整

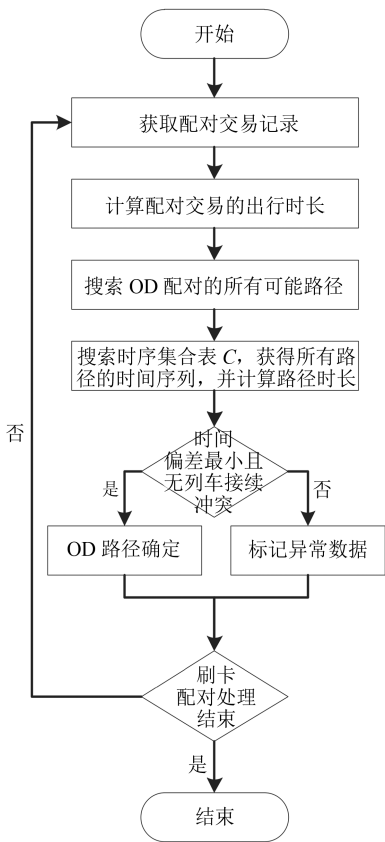


图 2 乘客准确出行路径计算流程

Fig. 2 Calculation process of passenger accurate travel path

体算法的计算准确性, 可借助人工智能随机视频跟踪采样方式获取走行子过程耗时, 或者通过拥挤度计算对计算模型进行修正, 以进一步提高计算准确性。

对不同应用场景可进行针对性优化, 从而提高算法的准确性。例如在异常运营情况下, 由于对客流预测、在线运营调整和乘客出行引导等有时间性要求, 但计算准确度要求相对降低, 可以通过大数据分析, 构建不同时段的子过程耗时时间概率分布, 实现快速时间计算。

4 结语

本文算法通过读取 AFC 刷卡交易记录数据和 ATS 行车记录数据, 应用大数据技术, 以确定性方式推算出完整乘客出行链时间序列, 实现低成本和高时效的乘客准确出行路径计算。该算法能够为以客流为驱动的精准化行车组织、应急处置和乘客优质服务等广泛应用场景, 提供涵盖正常和异常运行情况下的历史/实时精准客流时空分布关键数据, 并能结合行车计划的客流推演关键基础数据。

(下转第 64 页)

表 2 引入多种轨道交通系统制式的枢纽机场 GTC 布局特性

Tab. 2 Layout characteristics of hub airport GTC with multiple rail transit systems

GTC 布局模式		布局特性	适用范围	典型案例机场
竖向错层式	并行错层式	不同类型的轨道交通可独立运营,轨道交通线路一般平行于航站楼设置	现有航站楼主楼前的改扩建	贵阳龙洞堡国际机场、西宁曹家堡国际机场、温州龙湾国际机场、南宁吴圩国际机场
	交叉错层式	不同轨道交通系统制式的站台分离,易受电梯等垂直换乘设施的容量限制,轨道交通线路可同时下穿机场跑道和主航站楼	航站区规划、建设和运营三者同步	成都天府国际机场、昆明长水国际机场、长沙黄花国际机场、重庆江北国际机场、天津滨海国际机场 T3 航站楼
同层集中式	平行主航站楼	场站采用就近布设,顺向设置,与轨道交通车站走向一致,避免轨道交通设施对航站区的影响	对称式双主楼布局的航站区	兰州中川国际机场、西安咸阳国际机场 T5 航站楼、上海浦东国际机场
	垂直主航站楼	可最大程度抵近航站楼,进出人流集中于主航站楼,同时还可服务周边其他航站楼	多航站楼呈围合式布局的航站区	北京大兴国际机场、广州白云国际机场、郑州新郑国际机场、青岛胶东国际机场、武汉天河国际机场、厦门翔安国际机场
同层分离式		可分期建设和运营,各部分相对独立,便于管理;有专属通道设施连接各轨道交通车站	航站区分期新建或改扩建	杭州萧山国际机场、北京首都国际机场、深圳宝安国际机场、福州长乐国际机场、宁波栎社国际机场

的地面综合交通中心设计方案。

参考文献

[ 1 ] 唐怀海,潘昭宇. 枢纽机场与多层次轨道交通体系的衔接布局[J]. 城市交通,2020,18(4): 79.  
TANG Huaihai, PAN Zhaoyu. Connecting layout between hub airport and multilevel rail transit system[J]. Urban Transport of China,2020,18(4): 79.

[ 2 ] 孙一兵. 我国机场综合交通枢纽换乘中心建筑设计浅析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.  
SUN Yibing. Explore the architectural design of the comprehensive transportation hub airport transfer center in China[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2014.

[ 3 ] 欧阳杰,李相志,邓海超. 机场陆侧交通设施竖向布局模式研

究[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(10): 53.  
OUYANG Jie, LI Xiangzhi, DENG Haichao. On the vertical layout pattern of airport land transit facilities[J]. Urban Mass Transit,2017,20(10): 53.

[ 4 ] 欧阳杰,胡艳霞,张振飞. 枢纽机场航站区陆侧车道边布局模式研究[C]//工业建筑杂志社有限公司. 2020 年工业建筑学术交流会议论文集(中册). 北京:工业建筑杂志社,2020: 60.  
OUYANG Jie, HU Yanxia, ZHANG Zhenfei. Research on landside driveway section layout mode of hub airport terminal area[C] //Industrial Construction Magazine. Proceedings of 2020 Industrial Construction Academic Exchanges Forum (Second Volume). Beijing: Industrial Construction Magazine Agency Co., Ltd., 2020: 60.

(收稿日期:2021-01-14)

(上接第 54 页)

[ 6 ] 王志强,赵祥. 南阳膨胀土膨胀特性的试验研究[J]. 中国水能及电气化,2013(4): 24.  
WANG Zhiqiang, ZHAO Xiang. Experimental study of expansion characteristics of Nanyang expansive soil[J]. China Water Power & Electrification, 2013(4): 24.

[ 7 ] 于佳丽. 冻融循环下钢渣粉改良膨胀土工程力学特性试验研

究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.  
YU Jiali. Experimental study on engineering mechanical properties of expansive soil improved by steel slag powder under freeze-thaw cycles[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.

(收稿日期:2020-10-15)

(上接第 58 页)

参考文献

[ 1 ] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通,2020(4): 8.  
China Association of Metros. Development outline of smart city rail transit in China[J]. China Metros, 2020(4): 8.

[ 2 ] 牛惠民,田小鹏,高如虎,等. 时变客流驱动的城市轨道交通客流匹配与时刻表调整方法: 201711340512.2[P]. 2018-05-29.

NIU Huimin, TIAN Xiaopeng, GAO Ruhui, et al. Passenger flow matching and timetable adjustment of urban rail transit driven by time-varying passenger flow: 201711340512.2[P]. 2018-05-29.

[ 3 ] 孙舒森,赵嘉伟,张宁. 轨道交通路网仿真中乘客出行路径的确定[J]. 铁路通信信号工程技术,2020(12): 41.  
SUN Shumiao, ZHAO Jiawei, ZHANG Ning. Determination of passenger travel path in rail transit network simulation[J]. Railway Signalling & Communication Engineering,2020(12): 41.

(收稿日期:2022-11-14)