

基于乘客 OD 间路径旅行时间的城市轨道交通 客流分布计算模型的适用性研究^{*}

朱 炜

(同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 针对目前城市轨道交通(以下简称“城轨”)线网客流分布计算模型的客流计算结果与实际客流存在偏差的现象,需基于 OD 间路径的实际旅行时间,对基于多路径概率分配的客流分布计算模型的适用性展开研究。[方法] 基于乘客 OD 间路径的实际旅行时间,分析揭示了现有城轨客流分布计算模型存在的主要问题;融合 AFC(自动售检票)系统和 ATS(列车自动监控)系统两类数据,构建并标定了基于乘客 OD 间路径旅行时间的城轨客流分布计算模型;对目前国内城轨系统广泛采用的基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型的适用性进行了分析与评价。[结果及结论] 现有城轨客流分布计算模型在路径选择集和路径选择比例上存在主要问题。通过基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型获取的路径分配比例,得到的旅行时间分布模拟结果均为单峰,无法重现从 AFC 票卡提取的实际旅行时间分布的多峰情况。当城轨线网较为简单时,基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型基本适用;当线网规模不断增加,线网结构进一步复杂,列车运行方式的多样性、乘客出行行为的差异性 etc 不断加大的条件下,该模型对于路径阻抗差异小的 OD 可能适用,而对于路径阻抗差异大的 OD 不适用。

关键词 城市轨道交通; 客流分布计算模型; 乘客 OD 间路径旅行时间

中图分类号 U293.1⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.002

Applicability of Passenger Flow Distribution Calculation Model in Urban Rail Transit Based on Passenger OD Travel Time

ZHU Wei

(College of Transportation Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Targeting the phenomenon of deviation between the passenger flow calculation results by current network passenger flow distribution calculation model in urban rail transit and the actual data, the applicability of passenger

flow distribution calculation model based on multi-path probability distribution needs to be studied based on the actual OD (origin and destination) travel time. [Method] Based on the actual OD travel time, the main problems in the existing passenger flow distribution calculation model in urban rail transit are analyzed and revealed. The data of AFC (auto fare collection) and ATS (automatic train supervision) are integrated to build and calibrate the calculation model of urban rail passenger flow distribution based on OD travel time. The applicability of calculation model based on multi-path probability distribution, which is widely used in China's urban rail transit at present, is analyzed and evaluated. [Result & Conclusion] The main problems of the present calculation model of passenger flow distribution in urban rail transit lie in route selection set and route selection proportion. The simulation result of travel time distribution through the route allocation ratio is unimodal, which is obtained by using a computer model of passenger flow distribution based on multi-path probability distribution, and cannot re-produce the multi-modal situation of actual travel time distribution extracted from AFC ticket card. When the urban rail transit network is relatively simple, the calculation model of passenger flow distribution in urban rail transit based on multi-path probability distribution is basically applicable. When the scale of the network is increasing and the structure of the network is further complicated, the diversity of train operation mode and the difference of passenger travel behaviors are intensifying, the model may be applicable to OD with small path impedance difference, but not to OD with large path impedance difference.

Key words urban rail transit; passenger flow distribution calculation model; passenger OD travel time

1 现有城轨客流分布计算模型概述

我国北京、上海两地的城市轨道交通(以下简

^{*} 国家自然科学基金项目(72071147);中央高校基本科研业务费项目(22120220628)

称“城轨”)系统建设早、规模大,且率先进入网络化运营管理阶段,其各自采用的城轨客流分布计算模型在国内具有代表性。其后建成的其他城轨系统也大多学习与借鉴了北京、上海两地的做法。上海和北京的城轨客流分布计算模型分别于 2007 年和 2008 年提出并建成应用系统,其基本思路一致,均采用基于多路径概率分配的客流分布计算模型^[1-2]:首先,以 K (有效路径数量最大值)短路算法基于城轨物理网络搜索 OD(起讫点)间的可行路

径,考虑有关约束对可行路径进行筛选形成有效路径集;然后,在有效路径集中考虑乘客出行路径的多样性,根据各路径的阻抗或效用进行概率分配。两套模型的差别主要在阻抗(时间或里程)的设定和参数的取值上。北京和上海城轨客流分布计算模型对比如表 1 所示。2012 年,北京城轨客流分布计算模型进行过一次升级,提出综合清分概念^[3],但仍然保留了基于多路径概率分配的模型;上海城轨客流分布计算模型则一直沿用原有模型至今。

表 1 北京和上海城轨客流分布计算模型对比
Tab.1 Comparison of passenger flow distribution calculation models between Beijing and Shanghai

项目	北京城轨客流分布计算模型	上海城轨客流分布计算模型
不同之处	有效路径筛选时采用相对和绝对阈值进行约束	有效路径筛选采用相对阈值和 K 值进行约束
	综合出行阻抗为时间	阻抗为站间虚拟里程
	采用 Dijkstra 删除算法确定最短路径	采用 Floyd 删除算法确定最短路径
	换乘放大系数取值不同	换乘放大系数取值不同
相同之处	该模型为基于 OD 多路径的概率分配模型	该模型为基于 OD 多路径的概率分配模型
	采用正态分布函数进行 OD 路径客流分配比例计算	采用正态分布函数进行 OD 路径客流分配比例计算

但随着城轨线网规模及结构的复杂性、列车运行方式的多样性、乘客出行行为的差异性等不断加大,模型结果与实际客流之间出现偏差的现象时有发生^[4-5]。事实上,城轨运营管理部门在建成了客流分布计算模型及其应用系统的基础上,已开始注意到既有客流分布计算模型的适用性问题,并开始着手进行有关验证工作^[1,4],但所用的方法仍主要借助于传统的客流调查。

客流是城轨系统网络化运营管理的基础,现有的基于多路径概率分配的客流分布计算模型的适用性,究竟仅是参数需要标定更新还是模型本身已不再适用成为面向运营管理现场迫切需要解决的重要问题。为此,本文基于 OD 间路径的实际旅行时间分析,揭示现有模型存在的主要问题,融合 AFC(自动售检票)和 ATS(列车自动监控系统)数据对乘客 OD 间路径旅行时间进行建模,在此基础上利用仿真试验对现阶段国内基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型的适用性进行分析与评价。

2 OD 间路径的实际旅行时间分析

在城轨系统网络化运营条件下,乘客票卡保存了包括乘客进出站点及刷卡时分在内的历史出行信息,并在 AFC 系统、ATS 等城轨运营管理与软硬

件技术条件下,可以得到准确的 OD 间路径的实际旅行时间数据。由于 OD 间各条路径上的出行时耗不同,乘客旅行时间是其基于自身行为特征做出路径选择后的结果,而各条路径上的出行时耗又反过来影响着乘客关于路径选择的决策。OD 间不同路径下实际旅行时间与频数关系曲线如图 1 所示。由图 1 可见:OD 间路径的实际旅行时间与出行路径选择之间存在一定的关联。

将现有城轨客流分布计算模型的计算结果与实际客流统计数据进行对比后发现:

- 1) 路径选择集问题^[5]。城轨客流分布计算模型生成的路径选择集与乘客实际出行不吻合,包括路径的遗漏与多余,且尤以路径遗漏对乘客出行路径选择估计的影响最大,导致后续无法将乘客出行推定到正确的路径上,进而造成线网客流分布计算的明显偏差。
- 2) 路径选择比例问题^[6]。乘客在城轨线网中的出行路径选择受多种因素影响,包括旅行时间、换乘方便性和拥挤程度等,但在大规模复杂线网条件下,城轨客流分布计算模型得出的乘客路径选择比例与实际情况之间也常常存在偏差。

本文重点聚焦于 OD 间路径的选择比例问题,基于乘客旅行时间分析探讨现有基于多路径概率

分配的城轨客流分布计算模型的适用性。

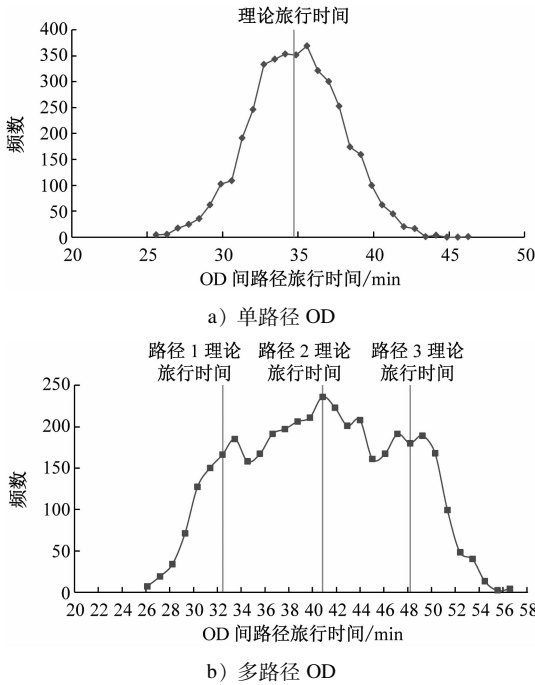


图1 不同OD间路径的实际旅行时间与频数关系曲线

Fig. 1 Relation curve of passengers' actual travel time and travel frequency for a given OD pair

3 基于 AFC 和 ATS 数据融合的乘客 OD 间路径旅行时间建模

3.1 乘客 OD 间路径旅行时间解构

在城轨系统中,OD 间乘客一次出行的旅行时间 t 可定义为:乘客从起点站刷卡进站到终点站刷卡出站所耗费的时间。 t 主要包含以下部分:①从进站闸机到站台的行走时间 $t_{O,ewt}$;②从到达站台到乘上列车出发的候车时间 $t_{O,wt}$;③乘车时间 t_{OD} ;④从换乘起始线路下车到换乘目的线路站台的行走时间 $t_{ts,tswt}$;⑤从到达换乘目的线路站台到乘上列车出发的候车时间 $t_{ts,wt}$;⑥从目的站下车到出站闸机的行走时间 $t_{D,ewt}$ 。 t 的计算公式为:

$$t = t_{O,ewt} + t_{O,wt} + t_{OD} + t_{ts,tswt} + t_{ts,wt} + t_{D,ewt} \quad (1)$$

通过对 AFC 票卡和 ATS 行车数据的融合分析^[7],可以实现逐张票卡提取上述各段时间参数,并拟合相应分布函数。

3.2 乘客各段行程时间参数提取

3.2.1 行走时间

乘客在不同 OD 间路径旅行时间中的行走时间包括进站、出站及换乘等的行走时间。逐张使用票卡提取乘客行走时间的推算算法如下:

步骤 1 计算乘客出站行走时间。针对每张 AFC 票卡(对应一位个体乘客),判断其出行方向(即上下行)和出行时段。假定乘客 i 到达 d 站后不在站内逗留,可根据其 AFC 系统出站的刷卡时刻 $t_{i,out}(d)$,以及 ATS 数据中列车 j 沿该方向行驶在 d 站的到站时刻 $t_{j,d}$,推断出乘客出站行走时间 $w_i(d)$,由式(2)一式(3)表示:

$$t_{j,d} = \{ t_{j,d} \mid t_{i,out}(d) - \alpha_{F,d} \leq t_{j,d} \leq t_{i,out}(d) - \alpha_{S,d} \} \quad (2)$$

$$w_i(d) = t_{i,out}(d) - t_{j,d} \quad (3)$$

式中:

$\alpha_{F,d}$ ——沿该运行线路和方向上在 d 站出站最快的行走时间(可由调查得到);

$\alpha_{S,d}$ ——沿该运行线路和方向上在 d 站出站最慢的行走时间(可由调查得到)。

步骤 2 推算乘客进站、换乘的行走时间。假定乘客一次出行中在各站内的行走行为具有一致性,从 d 站反推得到的行走速度可以用于确定 o 站和换乘站的行走时间。行走速度可由 $w_i(d)$ 在出站行走时间阈值范围(可由调查得到)中的百分位 λ_i 表示。乘客 i 进站、换乘的行走时间为:

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{w_i(d) - \alpha_{F,d}}{\alpha_{M,d} - \alpha_{F,d}}, & \alpha_{F,d} \leq w_i(d) \leq \alpha_{M,d} \\ \frac{w_i(d) - \alpha_{M,d}}{\alpha_{S,d} - \alpha_{M,d}}, & \alpha_{M,d} < w_i(d) \leq \alpha_{S,d} \end{cases} \quad (4)$$

$$w_i(o) = \begin{cases} \lambda_i \alpha_{M,o} + (1 - \lambda_i) \alpha_{F,o}, & \alpha_{F,d} \leq w_i(d) \leq \alpha_{M,d} \\ \lambda_i \alpha_{S,o} + (1 - \lambda_i) \alpha_{M,o}, & \alpha_{M,d} < w_i(d) \leq \alpha_{S,d} \end{cases} \quad (5)$$

$$w_i(k) = \begin{cases} \lambda_i \alpha_{M,k} + (1 - \lambda_i) \alpha_{F,k}, & \alpha_{F,d} \leq w_i(d) \leq \alpha_{M,d} \\ \lambda_i \alpha_{S,k} + (1 - \lambda_i) \alpha_{M,k}, & \alpha_{M,d} < w_i(d) \leq \alpha_{S,d} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$w_i(o)$ ——乘客 i 的进站行走时间;

$w_i(k)$ ——乘客 i 在换乘站 k 的换乘行走时间;

$\alpha_{M,d}$ ——乘客 i 在 d 站以中速出站的行走时间(可由调查得到),同理可得 $\alpha_{S,o}$ 、 $\alpha_{M,o}$ 、 $\alpha_{F,o}$ 、 $\alpha_{M,k}$ 、 $\alpha_{F,k}$ 、 $\alpha_{S,k}$ 。

3.2.2 等待时间

基于上述得到的乘客行走时间,结合 AFC 数据中的进站刷卡时刻 $t_{o,in}(o)$,根据已知路径和 ATS 行车数据,可进一步推定该位乘客的乘车班次。乘客 i 在起始站和换乘站的等待时间 φ_i 可记作:

$$\varphi_i(o) = t_{j,o} - w_i(o) \quad (7)$$

$$\varphi_i(k) = t_{j,k} - w_i(k) \quad (8)$$

式中:

$t_{j,o}$ ——列车 j 到达 o 站的时刻;
 $t_{j,k}$ ——列车 j 到达换乘站 k 的时刻;
 $w_i(o)$ ——乘客 i 的进站走行时间;
 $w_i(k)$ ——乘客 i 的换乘走行时间。

3.3 乘客各段行程时间参数分布

3.3.1 走行时间

图2—图4分别为乘客进站、出站及换乘走行时间概率密度图。由图2—图4可见:通过对乘客进站、出站及换乘走行时间分布规律的分析,发现其概率密度函数图存在明显的峰值和右偏现象,且采用对数正态分布拟合得到的拟合优度较高。

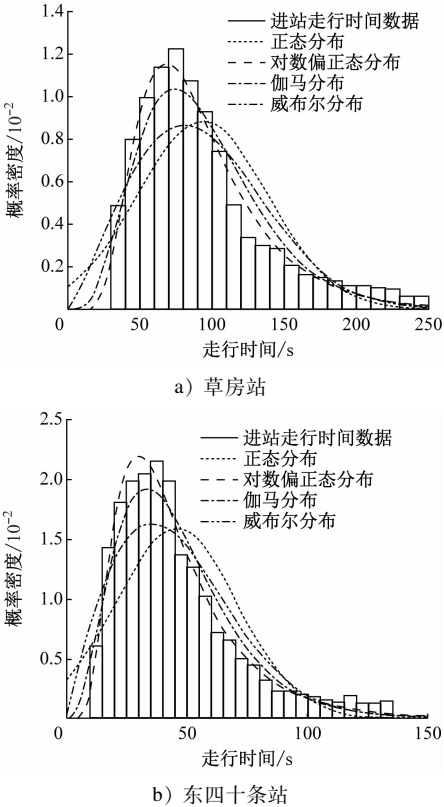


图2 乘客进站走行时间概率密度图

Fig.2 Graph of passengers' inbound walking time/probability density

3.3.2 等待时间

乘客等待时间直方图见图5。通过对乘客进站及换乘等待时间的提取及其分布规律的分析,发现其概率密度函数图无明显的峰值和波动,乘客的等待时间近似满足 $[0,H]$ 的均匀分布, H 为发车间隔。

3.4 乘客 OD 间路径旅行时间分布建模

乘客 OD 间路径旅行时间为上述各段时间之和,其分布可以表示为各段时间分布的卷积。乘客 OD 间路径旅行时间的均值 $E(t)$ 和方差 $V_{ar}(t)$ 为:

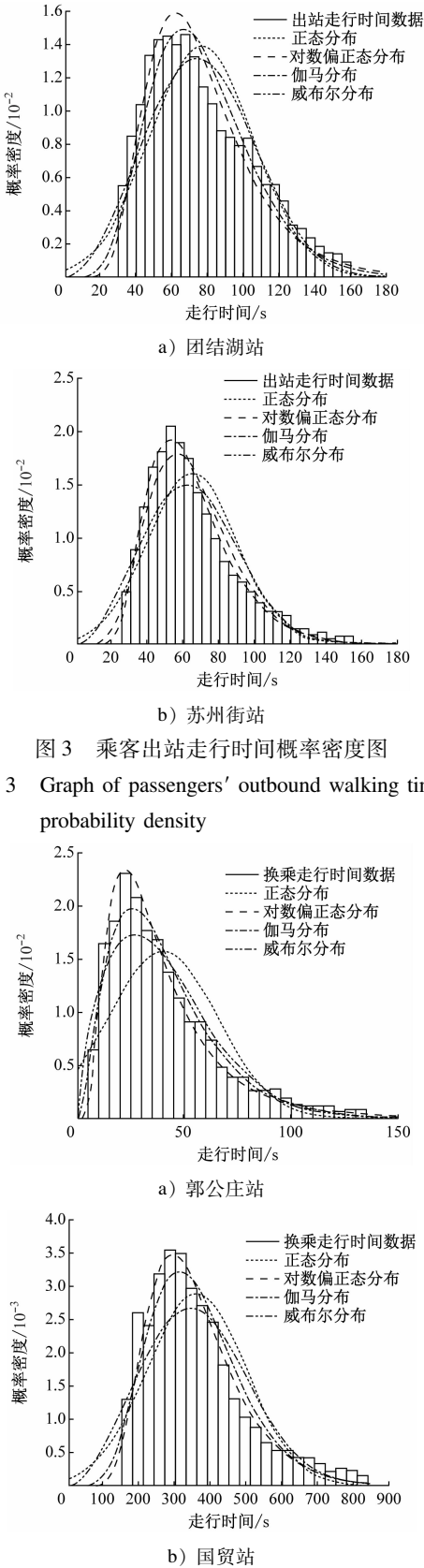
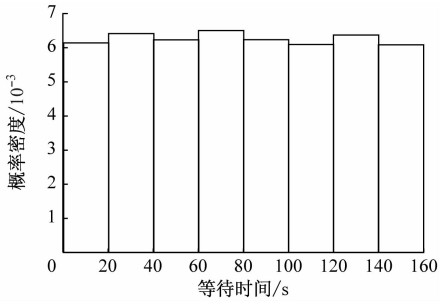


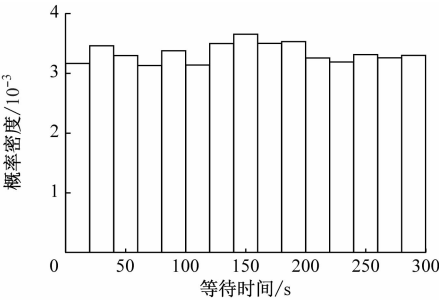
图4 乘客换乘走行时间概率密度图

Fig.4 Graph of passengers' transfer walking time/probability density



注: H 为 2.5 min。

a) 八角游乐园站



注: H 为 6.0 min。

b) 十里堡站

图 5 乘客等待时间直方图

Fig. 5 Passenger waiting time histogram

$$E(t) = E(t_{O,ewt}) + E(t_{O,wt}) + E(t_{OD}) + E(t_{ts,tswt}) + E(t_{ts,wt}) + E(t_{D,ewt}) \quad (9)$$

$$V_{ar}(t) = V_{ar}(t_{O,ewt}) + V_{ar}(t_{O,wt}) + V_{ar}(t_{ts,tswt}) + V_{ar}(t_{ts,wt}) + V_{ar}(t_{D,ewt}) \quad (10)$$

4 基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型的适用性分析

单路径 OD 承担了 100% 的客流比例,根据上述研究的乘客 OD 间路径旅行时间分布,其近似满足对数偏正态分布。

本文重点聚焦于多路径 OD,分析探讨基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型的适用性。具体地,针对上述乘客 OD 间路径旅行时间分布函数,选取两对代表性的 OD 间路径进行仿真模拟试验:一对 OD 间路径间阻抗接近(差异较小),且波动性存在一些差异性;另一对 OD 间路径间阻抗差异较大,且波动性差异显著。

4.1 场景一:OD 间路径阻抗差异小

以北京地铁线网中动物园站—车公庄西站区间为例,在其路径清分表中,该区间共有 3 条有效路径,如表 2 所示。

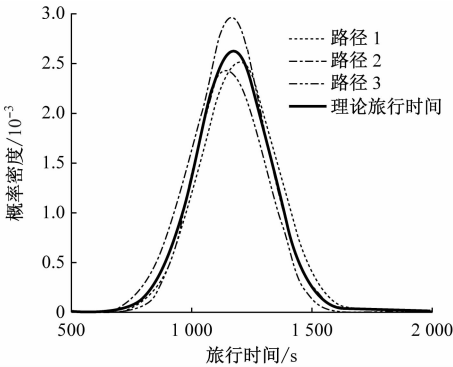
表 2 动物园站—车公庄西站区间路径信息表

Tab. 2 Information of routes between Zoo Station and West Chegongzhuang Station

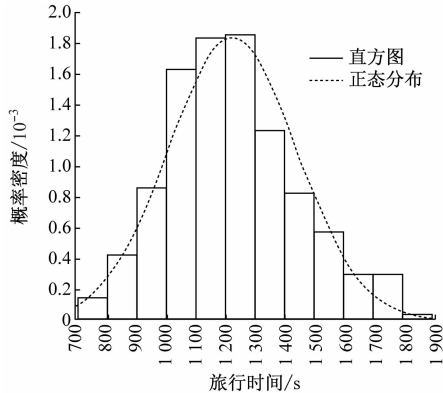
路径序号	经过线路	换乘站	乘车时间/s
1	4 号线—2 号线—6 号线	西直门站、车公庄站	360
2	4 号线—6 号线	平安里站	580
3	4 号线—9 号线—6 号线	国家图书馆站、白石桥南站	480

同时,根据前述提出的各阶段时间要素的提取方法,基于历史数据采用极大似然估计方法得到参数取值。动物园站—车公庄西站区间旅行时间参数取值如表 3 所示。

对于该路径 OD,以基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型的计算结果作为分配比例选取的依据,以旅行时间作为阻抗,得到各条路径的分配比例分别为 0.330 2、0.334 4、0.335 4。动物园站—车公庄西站乘客旅行时间仿真数据和实际 AFC 票卡数据对比,如图 6 所示。



a) 仿真数据



b) 实际 AFC 票卡数据

图 6 动物园站—车公庄西站乘客旅行时间仿真数据和实际 AFC 票卡数据对比

Fig. 6 Comparison of simulated travel time data and actual AFC ticket data between Zoo Station and West Chegongzhuang Station

表 3 动物园站—车公庄西站区间旅行时间参数取值

Tab.3 Travel time parameters between Zoo Station and West Chegongzhuang Station														单位:s	
路径	车站名称	$t_{O,ewt}$		$t_{O,wt}$		$t_{ts,tswt}$		$t_{ts,wt}$		$t_{D,cwt}$		t			
		均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差		
路径 1	动物园站	32.9	487.4	120	4 800										
	西直门站					184.9	1 057.0	135	6 075						
	车公庄站					138.2	1 523.8	180	10 800						
	车公庄西站									45.7	484.0				
	合计											1 196.6	25 227.1		
路径 2	动物园站	32.9	487.4	120	4 800										
	平安里站					217.7	1 501.8	180	10 800						
	车公庄西站									45.7	484.0				
	合计											1 166.3	18 073.1		
路径 3	动物园站	32.9	487.4	120	4 800										
	国家图书馆站					43.2	865.5	150	7 500						
	白石桥南站					91.8	2 426.5	180	10 800						
	车公庄西站									45.7	484.0				
	合计											1 143.6	26 928.3		

综上,对于这类多路径且阻抗接近的 OD,通过基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型计算所得的各路径的分配比例较为均衡,且仿真得到的乘客 OD 间路径旅行时间分布为一个明显的波峰。这与现场情况也较为吻合,即便选择了不同的路径,乘客的出行时间也较为集中和均匀地变动,且呈现近似正态分布。

4.2 场景二:OD 间路径阻抗差异大

以北京地铁线网中和平西桥站—西二旗站区间为例,在其路径清分表中,该区间共有 3 条有效路径,如表 4 所示。

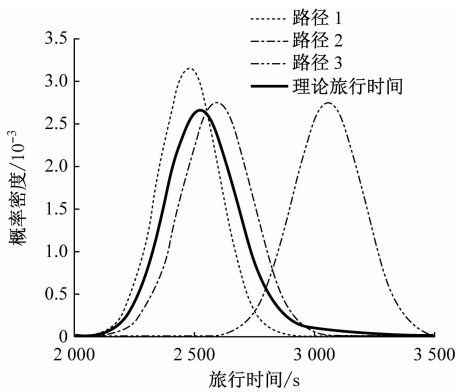
表 4 和平西桥站—西二旗站区间路径信息表
Tab.4 Information of routes between Hepingxi Station and Xi'erqi Station

路径序号	经过线路	换乘站	乘车时间/s
1	5 号线—13 号线	立水桥站	1 860
2	5 号线—10 号线—13 号线	惠新西街南口站、知春路站	1 800
3	5 号线—10 号线—13 号线	惠新西街南口站、芍药居站	2 280

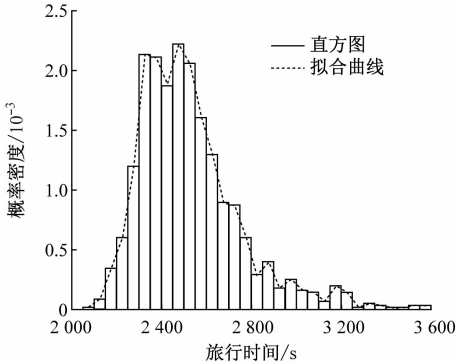
和平西桥站—西二旗站区间旅行时间参数取值,如表 5 所示。

针对和平西桥站—西二旗站区间,同样以基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型计算出各条路径的分配比例分别为 0.513 6、0.458 1、0.028 3。和平西桥站—西二旗站区间旅行时间仿真

数据和实际 AFC 票卡数据对比,如图 7 所示。



a) 仿真数据



b) 实际 AFC 票卡数据

图 7 和平西桥站—西二旗站区间旅行时间仿真数据和实际 AFC 票卡数据对比

Fig.7 Comparison of simulated travel time data and actual AFC ticket data between Hepingxiqiao Station-Xi'erqi Station

表 5 和平西桥站—西二旗站区间旅行时间参数取值

Tab.5 Travel time parameters between Hepingxiqiao and Xierqi Station interval

单位:s

路径	车站名称	$t_{O,ewt}$		$t_{O,wt}$		$t_{ts,tswt}$		$t_{ts,wt}$		$t_{D,ewt}$		t	
		均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
路径 1	和平西桥站	47.8	552.0	120	4 800								
	立水桥站					184.9	1 057.0	150	7 500				
	西二旗站									117.8	2 105.7		
	合计											2 480.4	16 014.7
路径 2	和平西桥站	47.8	47.8	120	4 800								
	惠新西街南口站					49.3	481.0	120	4 800				
	知春路站					190.4	753.7	150	7 500				
	西二旗站									117.8	2 105.7		
	合计											2 595.3	20 992.5
路径 3	和平西桥站	47.8	552.0	120	4 800								
	惠新西街南口站					47.2	504.3	120	4 800				
	芍药居站					175.5	819.0	150	7 500				
	西二旗站									117.8	2 105.7		
	合计											3 058.2	21 080.9

综上,对于这类多路径阻抗值存在显著差异的 OD,通过基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型计算所得的路径 1 与路径 2 的分配比例较为均衡,与路径 3 的分配比例差异也较大,而仿真模拟得到的乘客 OD 间路径旅行时间分布为一个明显的波峰,与实际数据统计中所呈现的两个波峰存在差异。

5 结论

- 1) 通过对北京、上海城轨海量 AFC 票卡数据提取的乘客 OD 间路径实际旅行时间分析发现,OD 间路径的实际旅行时间分布存在波峰现象,表明 OD 间路径的实际旅行时间与出行路径选择之间存在一定的关联。
- 2) 通过对 AFC 票卡和 ATS 行车数据的融合分析,可以非集计地逐张使用票卡推定乘客在 OD 间各段的行程时间(进站走行、进站等待、换乘走行、换乘等待、出站走行等),通过集计地统计拟合与检验发现乘客走行时间分布与对数偏正态分布最为吻合,等待时间分布则较为符合均匀分布规律,并在此基础上可进一步卷积得到乘客 OD 间路径旅行时间分布函数。
- 3) 若基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型有足够的适用性,则经计算可获取 OD 间路径分配比例,结合上述乘客 OD 间路径旅行时间分

布,得到的 OD 间旅行时间分布应与实际旅行时间分布一致。但通过仿真发现,对于多路径 OD,无论是 OD 间路径出行阻抗相近,还是 OD 间路径出行阻抗差异显著,通过基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型获取的路径分配比例,得到的旅行时间分布模拟结果均为单峰,无法重现从 AFC 票卡提取的实际旅行时间分布的多峰情况。

4) 当城市轨道交通线网较为简单时,基于多路径概率分配的城轨客流分布计算模型基本适用。当线网规模不断增加,线网结构进一步复杂,列车运行方式的多样性、乘客出行行为的差异性等不断加大的条件下,该模型对于路径阻抗差异小的 OD 可能适用,而对于路径阻抗差异大的 OD 不适用。该问题不单依靠参数标定及模型修正就可以解决,还需在城轨大规模复杂网络化运营条件下,结合当前新的技术和数据环境继续探索。

参考文献

[1] 徐瑞华,朱炜. 上海地铁网络清分模型验证及优化研究[R]. 上海:同济大学,2014.
XU Ruihua, ZHU Wei. Validation and optimization of Shanghai metro network clearing model [R]. Shanghai: Tongji University, 2014.

[2] 杜世敏,赵路敏. 北京城市轨道交通清分方法及结果应用[J]. 城市轨道交通研究,2014,17(2):106.

- ways[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 11.
- [2] 张强锋. 城际客运专线列车开行方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- ZHANG Qiangfeng. Research on the train running scheme of the dedicated passenger railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [3] 杨博, 武晋飞. 兰州轨道交通列车开行方案优化研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(4): 114.
- YANG Bo, WU Jinfei. Study on optimization of city railway train operation plan for metro of Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(4): 114.
- [4] CHEN D, NI S, XU C A, et al. High-speed train stop-schedule optimization based on passenger travel convenience[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1.
- [5] 冯榆涵, 吕红霞, 黄建辛, 等. 市域铁路与城市轨道交通过轨运输列车开行方案研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(2): 96.
- FENG Yuhuan, LYU Hongxia, HUANG Jianxin, et al. Train planning for through operation between subway and suburban railway[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(2): 96.
- [6] RICH J, VANDET C A. Is the value of travel time savings increasing? Analysis throughout a financial crisis[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 124: 145.
- [7] 侯云仙, 杨善奇. 交通方式选择与旅客时间价值研究: 以北京—太原客运通道为例[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2016, 15(2): 80.
- HOU Yunxian, YANG Shanqi. The value of travel time and transportation mode choice: a case study on Beijing-Taiyuan passenger transport[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2016, 15(2): 80.
- [8] 李博, 赵鹏, 宋文波. 基于旅客时间价值的高速铁路差别定价[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(4): 98.
- LI Bo, ZHAO Peng, SONG Wenbo. Differential pricing for high-speed railway based on the time value of passengers[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(4): 98.
- 收稿日期:2021-08-19 修回日期:2021-11-20 出版日期:2024-03-10
Received:2021-08-19 Revised:2021-11-20 Published:2024-03-10
- 第一作者: 罗晋, 硕士研究生, luojin1995@foxmail.com
通信作者: 朱海燕, 副教授, 709174250@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 12 页)

- DU Shimin, ZHAO Lumin. Clearing method and its application in Beijing urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(2): 106.
- [3] 徐瑞华, 朱炜. 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.
- XU Ruihua, ZHU Wei. Research on clearing statistical model and demonstration system based on passenger travel time and train operation[R]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [4] 徐瑞华, 朱炜. 北京城市轨道交通清分模型综合验证及优化评估技术研究[R]. 上海: 同济大学, 2018.
- XU Ruihua, ZHU Wei. Research on comprehensive verification and optimization evaluation technology of Beijing urban rail transit clearing model[R]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [5] 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.
- [6] ZHU W, WEI J, FAN W D. Data fusion approach for evaluating route choice models in large-scale complex urban rail transit networks[J]. Journal of Transportation Engineering Part A-Systems, 2020, 146(7): 56.
- [7] ZHU W, FAN W D, WEI J, et al. Complete estimation approach for characterizing passenger travel time distributions at rail transit stations[J]. Journal of Transportation Engineering Part A-Systems, 2020, 146(1): 31.
- 收稿日期:2022-01-30 修回日期:2022-05-07 出版日期:2024-03-10
Received:2022-01-30 Revised:2022-05-07 Published:2024-03-10
- 作者: 朱炜, 研究员, zhuweimail@tongji.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com