

濮雪祥,胡华,俞俊豪,等.地铁列车乘降时间估计模型[J].智能计算机与应用,2025,15(11):57-61. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24030901

地铁列车乘降时间估计模型

濮雪祥,胡华,俞俊豪,符雨竹,代梦丽
(上海工程技术大学 城市轨道交通学院,上海 201620)

摘要:为了提高城市轨道交通的运营效率,本文在采集城市轨道交通乘客上下车过程中的交通特性相关数据基础上,从乘客平均上下车时间及车门最大上下车客流量的角度出发,分别研究了乘客平均上下车时间及车门最大上下车客流量的影响因素,并建立了两个相应的估计子模型,在此基础上构造地铁列车乘降时间估计模型。以上海轨道交通车站乘降时间为例,对模型进行了标定及验证。实验结果表明:车厢满载率、行动障碍群体、车门处垂直扶手区域人数、列车编组数、站台楼扶梯布局模式、列车总上下车人数等6个因素对列车乘降时间具有显著影响。该估计模型能够较好地拟合列车乘降时间的分布情况,可为城市轨道交通停站方案的制定和优化提供理论支撑和实践指导。

关键词:城市轨道交通;车站;乘降时间;影响因素;估计模型

中图分类号:U231 文献标志码:A 文章编号:2095-2163(2025)11-0057-05

Estimation model of subway train boarding and alighting time

PU Xuexiang, HU Hua, YU Junhao, FU Yuzhu, DAI Mengli

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to improve the operational efficiency of urban rail transit, this paper, based on the collection of data related to the traffic characteristics of urban rail transit passengers in the process of boarding and alighting, from the point of view of the average boarding and alighting time of passengers and the maximum boarding and alighting flow of the door, studied the influencing factors of the average boarding and alighting time of passengers and the maximum boarding and alighting flow of the door, and established two corresponding estimation sub-models, and based on which constructed and formed the estimation model of the boarding and alighting time of metro trains. The model is calibrated and validated by taking the boarding and alighting time in Shanghai rail transit stations as an example. The results of the study show that six factors, such as the full load rate of the carriages, the mobility-impaired group, the number of people in the vertical handrail area at the doors, the number of train groups, the layout of escalators at the platforms, and the total number of people boarding and alighting from the train, have a significant impact on the train boarding and alighting time. The estimation model can fit the distribution of train boarding and alighting time better. The research results can provide theoretical support and practical guidance for the development and optimization of urban rail transit stopping schemes.

Key words: urban rail transit; station; boarding and alighting time; influencing factors; estimation model

0 引言

列车乘降时间作为城市轨道交通运行的重要组成部分,不仅影响列车的准点性和安全性,还关系到乘客的出行效率和满意度。乘降时间过长,会导致列车在车站停留时间增加,降低列车运行效率和线路的运力,增加运营成本和能耗;乘降时间过短,会造成列车运行不稳定和不安全,可能导致拥挤、冲突

和伤害,甚至引发事故和故障。因此,合理确定和优化列车的乘降时间对提高轨道交通运行效率具有重要意义。

目前国内对于城市轨道交通列车乘降时间与乘客上下车行为的研究取得一定的成果。曹守华^[1]研究了车门宽度在不同特定场景下对乘客上车人数及上车时间的影响,基于现场实际数据,建立了不同上车人数对应的时间分段函数;陈伽申等^[2]通过不

作者简介:濮雪祥(2002—),男,本科生,主要研究方向:交通运输。

通信作者:胡华(1979—),女,博士,教授,主要研究方向:轨道交通智慧运营。Email: 383755741@qq.com。

收稿日期:2024-03-09

同时间段的监控数据,计算出单个车门的乘客上下车流动率,使用回归分析做列车停站时间分析;何红等^[3]通过拆分列车停站时间,将影响因素分为司机因素、乘客因素和列车运行因素,并针对停站时间影响因素提出了提高列车运行准点率的优化建议;Jiang、张碧纯等^[4-5]基于调查的乘客上下车的情况和车门内站立乘客数据等,通过逐步回归分析,建立列车停站时间的模型;苗沁^[6]基于观测上下车人数占比,确定人均上下车时间范围。综上所述,对列车停站时间已有的研究中,未考虑到站台客流及车内设施布局对乘降时间带来的影响。

本文考虑客流、设施等影响因素,构建城市轨道交通乘降时间估计模型,并基于上海地铁实测数据证明模型的有效性及实用性。

1 列车乘降时间估计模型

本文分析了乘客上下车的影响因素,并建立了合理的数学模型。假设乘客上下车的总时间主要由两个方面决定:一是上下车人数最多的车门,二是所需乘降时间最长的车门。也就是说,如果有一个车门的上车人数或下车人数比其他车门都要多,或者有一个车门的上车时间或下车时间比其他车门都要长,那么这个车门就会成为乘客上下车的瓶颈,导致列车停站时间增加。因此,本文利用最大上车人数、最大下车人数和单个乘客的上下车时间来计算乘客上下车的总时间。遵循地铁的“先下后上”规则,本文将乘客的上下车时间分为两部分:上车时间和下车时间,乘降时间如下式:

$$t = t_{\text{up}} \cdot y_1 + t_{\text{down}} \cdot y_2 \quad (1)$$

其中, t 为列车停站时间,单位为 s; y_1 为最大上车人数,单位为人; t_{up} 为乘客平均上车时间,单位为 s; y_2 为最大下车人数,单位为人; t_{down} 为乘客平均下车时间,单位为 s。

本文采集上海地铁乘客乘降时间数据,分析乘客上下车的影响因素,并据此建立了列车乘降时间估计模型,包括乘客平均上下车时间估计子模型和车门上下车客流的估计子模型。

2 乘客平均上下车时间估计子模型

2.1 影响因素分析

1) 车厢满载率

客运列车车厢满载率是指车厢内实际乘坐的乘客人数与最大载客人数的比值。车厢满载率与乘客平均上车时间关系如图 1 所示,可以看出当车厢满

载率低于 10% 时,由于车厢空间占用较小,乘客可以自由选择座位或站立位置,在上车过程中,乘客不急于抢占座位,可自由缓慢上车,因此乘客平均上车时间增加;当车厢满载率处于 10%~50% 时,车厢内仍有部分空座位以及站立空间,乘客可能会抢占座位,因此乘客平均上车时间减少;当车厢满载率高于 55% 时,空座位稀缺,站立空间有限,乘客乘降过程拥挤,可能需要等待下一趟列车,因此乘客平均上车时间增加。乘客下车时,通常会在即将到站前走到列车门口等待下车,因此车厢满载率对乘客平均下车时间的影响较小,所以乘客平均下车时间在模型中不考虑。

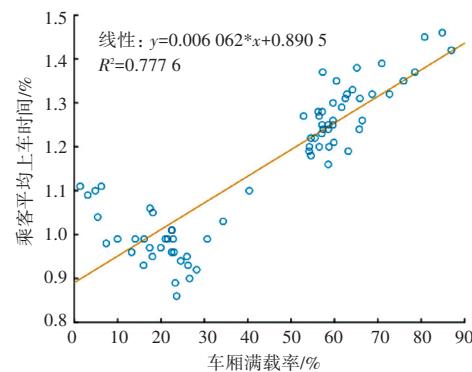


图 1 车厢满载率与乘客平均上车时间的关系

Fig. 1 Relationship between compartment occupancy and average passenger boarding time

2) 行动障碍群体

行动障碍群体包括携带大量行李的乘客、老年人、残疾人等。乘客平均上下车速度会受到群体中个别乘客的影响,比如说携带行李的乘客由于需要搬运行李而增加了上下车时间;行动不便的乘客可能需要额外的工具来辅助上下车,因此需要更多的时间和空间来完成上下车动作,与此同时其他乘客因为等待行动障碍群体完成上下车动作而延长了上下车时间^[7-8]。由此可见,当上下车过程中存在行动障碍群体时,乘客平均上下车时间会增加。

3) 车门处垂直扶手区域人数

如图 2 所示,车门处垂直扶手区域内人数过多时,乘客的拥挤程度增加,导致乘降效率降低,乘客可能需要更长时间才能完成乘降动作。当列车车厢可坐位置低于 6 座时,便有乘客开始站立在垂直扶手处乘车,随后垂直扶手区域乘客会越来越多,从而加大乘客上下车所需时间。适中的人数密度有助于提高乘客的流动性,减少拥挤对乘客乘降时间的影响。由于车门垂直扶手处的具体影响范围与乘客分布及车厢满载率等因素有关,则此部分将放入影响

因素当中分析。



图 2 车门间垂直扶手位置示意

Fig. 2 Schematic location of vertical handrail between doors

2.2 模型建立

以车厢满载率、上(下)车行动障碍人数为自变量建立模型, 公式如下:

$$t_{\text{up}} = f(x_1, x_2) = 0.759 + 0.012x_1 + 0.038x_2 \quad (2)$$

$$t_{\text{down}} = f(x_3) = 1.030 + 0.061x_3 \quad (3)$$

其中, x_1 为列车满载率; x_2 为上车行动障碍人数; x_3 为下车行动障碍人数。

通过 SPSS 软件分析公式(2)(3)回归模型, 发现 R^2 拟合程度分别为 0.752 和 0.765, 说明以上两个回归方程能够解释 75% 以上的人均上下车变化情况。对回归方程的每个变量进行 t 检验, 均满足模型自拟合要求。

3 车门最大上下车客流量估计子模型

3.1 影响因素分析

1) 列车编组数

编组数量的增加会增加列车的载客量, 载客量增加可能导致上下客时间延长。列车编组数越大, 列车总长度也越长, 相应的站台长度也更长, 由于楼扶梯毗邻列车编组及车门的候车客流量更为集中, 而导致的列车车门上(下)车客流的不均衡分布也是间接影响列车停车时间的因素。基于实际采集数据分析见表 1, 列车编组数与车门最大上(下)车客流量、列车上(下)车总客流量呈显著正相关。

表 1 列车编组数与车门最大上(下)车人数相关性分析

Table 1 Correlation analysis between the number of train sets and the maximum number of people boarding (alighting) at the train doors

表征指标	最大车门下车人数	最大车门上车人数
列车编组数	0.735 **	0.723 **

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

2) 站台楼扶梯布局模式

如图 3 所示, 楼梯及下行扶梯是候车乘客从站厅层前往站台层各车门前候车区域的过渡通道。站台上候车客流分布在空间上呈现以站台楼扶梯为中

心的辐射式客流分布^[9]。因此, 站台楼扶梯布局模式对候车乘客不均衡分布情况影响较大。基于实际调查数据见表 2, 计算站台上楼扶梯的数量、运行方向与车门最大上(下)车客流量、列车总上(下)车客流量之间相关性系数, 发现下行扶梯的数量与车门最大上(下)车客流量之间存在显著相关性。

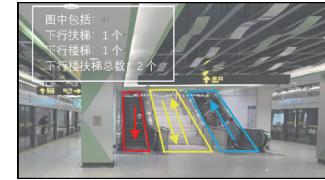


图 3 下行楼扶梯布局示例

Fig. 3 Example of downstairs escalator layout

表 2 楼扶梯布局模式与车门最大上(下)车人数相关性分析

Table 2 Correlation analysis between the escalator layout pattern and the maximum number of people boarding (alighting) at the train doors

表征指标	最大车门下车人数	最大车门上车人数
楼扶梯布局	-0.223	-0.213
楼扶梯个数	0.291	0.285
下行扶梯个数	0.686 **	0.768 **

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

车站扶梯的布局直接影响乘客的候车区域分布, 车站扶梯位置对于乘客选择上车车门位置起着关键的作用。乘客上车时所选择的车门位置, 在很大程度上决定了乘客下车时的车门选择, 因此下行扶梯的数量对于乘客乘降时间有着重要的影响。充分考虑车站的客流量, 科学合理地设置下行扶梯的数量, 可以有效降低乘客的乘降时间, 提高车站的运输效率和服务水平。

3) 列车总上下车人数

根据调查数据, 当车站站台面积及列车运输能力一定时, 车站上(下)车人数越多时, 列车各车门上(下)车人数越多, 见表 3。基于采集得到的数据, 通过皮尔逊相关系数及相关性分析, 可以发现二者之间存在显著的正相关关系。

表 3 列车总上(下)车人数与车门最大上(下)车人数相关性分析

Table 3 Correlation analysis between the total number of people boarding (alighting) in a train and the maximum number of people boarding (alighting) in a platform door

表征指标	最大车门下车人数	最大车门上车人数
列车总下车人数	0.894 **	0.455 **
列车总上车人数	0.405 **	0.780 **

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

3.2 模型建立

以列车总上(下)车人数、列车编组数、下行扶梯个数为自变量,建立模型,公式如下:

$$y_1 = 4.513 + 0.05\varphi_1 - 0.348\tau_1 - 0.174\tau_2 \quad (4)$$

$$y_2 = 5.745 + 0.05\varphi_2 - 0.514\tau_1 - 0.257\tau_2 \quad (5)$$

其中, φ_1 为列车总上车人数; φ_2 为总下车人数; τ_1 为列车编组数(单位:辆); τ_2 为下行楼扶梯个数。

通过 SPSS 分析公式(4)、(5)回归方程,发现 R^2 拟合程度分别为 0.848 及 0.755,说明以上两个回归方程能够解释 75% 以上的客流量变化情况。

对回归方程中的每个变量进行 t 检验,均满足模型自拟合要求。

4 案例分析

通过采集上海轨道交通部分车站的车厢满载率、列车上(下)车参考统计客流量、行动障碍人数、站台楼扶梯布局以及列车总上下车人数等数据,运用有序样本聚类算法,对各车站的运营时段进行划分,具体划分结果见表 4。将数据代入式(1)~(5),可计算得到各车站不同时段停站列车所需的乘降时间估计值。

表 4 车站运营时段划分及相关数据

Table 4 Division of station operation period and related data

车站名称	运营时段	车厢满载率	上车障碍人数	下车障碍人数	列车总上车参考	列车总下车参考	列车编组数	下行扶梯数
		x_1	x_2	x_3	客流量 $\varphi_{185}^{(j)}$	客流量 $\varphi_{285}^{(j)}$	τ_1	τ_2
衡山路(1号线)	5:27~7:00	5.39	3	3	10	8	8	4
	7:00~9:20	48.34	4	2	102	98	8	4
	9:20~16:30	11.88	4	2	13	12	8	4
	16:30~19:20	18.10	3	3	60	54	8	4
	19:20~23:14	6.28	4	1	14	13	8	4
莲花路(1号线)	5:34~6:40	24.92	5	3	61	55	8	2
	6:40~10:20	45.33	6	2	248	223	8	2
	10:20~15:30	9.77	4	3	52	47	8	2
	15:30~20:00	12.57	5	4	81	73	8	2
	20:00~23:30	5.23	3	1	32	29	8	2
上海南站(3号线)	5:20~7:20	4.36	2	3	64	58	6	2
	7:20~9:20	15.73	4	7	219	197	6	2
	9:20~17:00	2.75	5	4	25	23	6	2
	17:00~19:00	8.67	6	8	208	205	6	2
	19:00~23:52	1.24	3	5	12	11	6	2
宜山路(3号线)	5:30~7:40	9.24	3	2	5	5	6	3
	7:40~10:30	37.84	7	5	157	143	6	3
	10:30~17:10	4.99	4	4	14	13	6	3
	17:10~19:40	15.68	5	5	104	112	6	3
	19:40~23:43	10.11	4	6	5	5	6	3
东川路(5号线)	5:55~6:50	4.68	3	2	29	26	4	3
	6:50~9:00	6.62	4	4	70	63	4	3
	9:00~17:10	12.95	4	4	11	10	4	3
	17:10~19:40	24.21	5	3	17	15	4	3
	19:40~22:56	15.32	3	3	7	6	4	3
春申路(5号线)	5:52~7:00	3.89	3	1	32	29	4	2
	7:00~9:00	17.29	2	2	80	76	4	2
	9:00~17:10	14.74	3	4	14	13	4	2
	17:10~19:30	28.27	3	3	52	50	4	2
	19:30~22:42	21.50	2	2	5	5	4	2

为检验本文乘降模型精度,在各车站各时间段分别采集 10 列列车停站时间,对实测值、模型计算值及现状计划值的偏差进行分析如图 4 所示。

如图 4 所示,列车运行图计划值与实测值的最大误差为 22 s,最大偏差率为 64%;模型计算值与实测值的最大误差为 15 s,最大偏差率为 38%,表明本文模型可有效优化实际乘降时间,解决停站时间浪费与不足的问题,进而提升乘客地铁出行安全性及列车运行效率。

如图 4 所示,列车运行图计划值与实测值的最

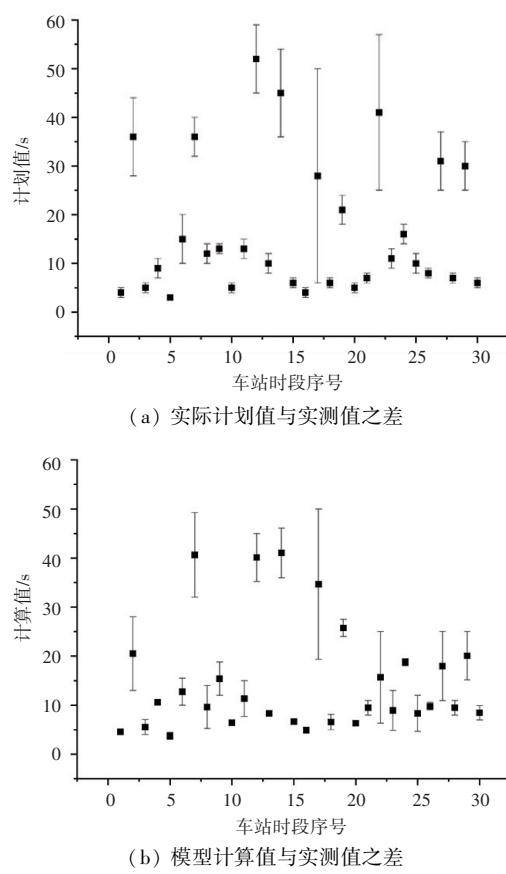


图 4 乘降时间实际计划值/模型计算值与实测值之差

Fig. 4 Difference between the planned value/calculated value of the model and the measured value

5 结束语

城市轨道交通列车运行图中, 停站时间的规划占据核心地位。优化停站时间不仅能提升列车的运

行流畅性, 还能显著减少相关安全风险。本文通过实地考察和数据收集, 针对乘客上下车及车门客流量等关键因素, 构建了乘客上下车时间估计子模型及车门最大上(下)车客流量估计子模型, 可以显著提升列车运行效率、乘客出行体验, 并对运营成本和能耗进行有效优化, 为城市轨道交通停站方案的制定和进一步优化提供了坚实的理论支撑和实践指导。未来将深入探讨乘客在站台的滞留等复杂情况, 更准确地把握停站时间与乘客行为之间的内在联系, 进一步提升模型的预测精度。

参考文献

- [1] 曹守华. 城市轨道交通乘客交通特性分析及建模[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [2] 陈伽申, 蒲琪, 涂颖菲. 城市轨道交通乘客上下车行为与停站时间研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(1): 61-64.
- [3] 何红, 曾险峰. 城市轨道交通列车停站时间影响因素的研究[J]. 科技与创新, 2019(14): 22-23.
- [4] JIANG Z, XIE C, JI T, et al. Dwell time modelling and optimized simulations for crowded rail transit lines based on train capacity[J]. Promet - Traffic & Transportation, 2015, 27 (2): 125-135.
- [5] 张碧纯, 卢弋. 城市轨道交通停站时间建模研究[J]. 交通与运输, 2011(2): 48-52.
- [6] 苗沁, 潘琢. 城市轨道交通列车停站时间研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 37-40.
- [7] 何红. 基于调研数据的城市轨道交通列车停站时间规律分析及预测模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [8] 张鹏, 张国武. 城市轨道交通乘客下车时间特性分析与建模[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(11): 80-82.
- [9] 王澄斐. 楼扶梯布局对地铁站台子区客流分布的影响研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.