文章编号：1003-1421(2026)02-0070-10
引用格式：魏荣华. 城市轨道交通潮汐客流特征下停站时间差异化设置研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(2)：70-79.
WEI Ronghua. Differentiated Setting of Dwell Time Based on Tidal Characteristics of Passenger Flow in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：70-79.

城市轨道交通潮汐客流特征下停站时间差异化设置研究

魏荣华

(厦门地铁运营有限公司 线网管控中心，福建 厦门 361022)

摘 要：目前，城市轨道交通停站时间设置极少考虑高峰期线路上下行方向的潮汐客流特征，有必要开展更加精细的分方向停站时间差异化设置研究。基于线网OD客流数据，通过建立分方向乘客上下车客流计算模型，将进出站时间与地点等点状数据还原为分方向乘客上下车客流数据，并综合考虑车厢拥挤度、乘客排队不均衡系数及携带大件行李系数等影响因素，创建多因子差异化停站时间设置模型，精准匹配线路潮汐客流特征，差异化设置列车在上下行方向的停站时间，以厦门地铁线网为例进行应用和验证。结果表明，模型可以大幅提高列车运行效率，线路单程运行时间最多减少55 s；更好地匹配乘客上下车需求，高峰大客流方向列车终到偏离程度平均改善56%；实现良好的绿色节能效果，高峰大客流方向列车赶点发生频率平均减少62%；有效保障乘客上下车安全性，夹人夹物事件数下降37%。

关键词：城市轨道交通；潮汐客流特征；OD；上下车客流；停站时间；差异化设置
中图分类号：U231.92 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250121001

Differentiated Setting of Dwell Time Based on Tidal Characteristics of Passenger Flow in Urban Rail Transit

WEI Ronghua

(Network Operating Control Center, Xiamen Metro Operation Co., Ltd., Xiamen 361022, Fujian, China)

Abstract: At present, the setting of dwell time in urban rail transit rarely takes into account the tidal characteristics of passenger flow in the up and down directions of the line during peak periods. Therefore, it is necessary to conduct more refined research on the differentiated setting of dwell time by direction. Based on the OD passenger flow data of the network, a boarding and alighting passenger flow calculation model was established by direction to convert point-type data such as entry/exit time and location into direction-specific boarding and alighting passenger flow data. Considering factors such as the crowding degree in the carriage, the imbalance coefficient of passenger queuing, and the coefficient of carrying large luggage, a multi-factor differentiated model was created for dwell time setting to accurately match the tidal characteristics of passenger flow in the up and down directions of the line. The platform dwell time of trains in the up and down directions was also set differentially. Finally, with the Xiamen subway operating network as a case study, the model was applied and verified. The results show that the model can significantly

收稿日期：2025-01-21

improve train operation efficiency, with one-way running time of the line reduced by up to 55 s. The boarding and alighting needs for passengers can be better met, with a 56% average improvement rate of the deviation degree of train arrivals in the direction of heavy passenger flow during the peak hours. The good green energy-saving effects can be achieved, and the average occurrence frequency of trains rushing to meet the schedule in the direction of heavy passenger flow during the peak hours has been reduced by 62%. The boarding and alighting safety of passengers can be effectively ensured, with the number of door entrapment incidents in the rail network decreased by 37%.

Keywords: Urban Rail Transit; Tidal Characteristics of Passenger Flow; OD; Boarding and Alighting Passenger Flow; Dwell Time; Differentiated Setting

0　引言

目前，城市轨道交通行业普遍采用上下行统一的停站时间设置策略，在潮汐客流时段易导致客流较小方向停站时间存在浪费，限制单程时间、旅行速度等参数的提升；客流较大方向停站时间不足，造成运行图实际执行偏离程度较大、列车赶点运行频率较高，同时引发夹人夹物、乘客二次候车及正线车公里牵引用电增加等问题。

国内外学者围绕城市轨道交通停站时间展开了诸多研究，主要聚焦于乘客行为、模型构建、效率与服务、节能等方向，形成了较为系统的理论体系。在乘客行为研究方面，Seriani 等[1]通过实验分析了上下车比率对乘客行为的影响；Peftitsi 等[2]探究车站布局等因素对车厢乘客分布的作用。在模型构建方面，Kim 等[3]、Tortainchai 等[4]、谢桂盛[5]、苗沁等[6]及何红[7]结合乘客数量、车站特性等因素，采用回归分析、数据包络分析等方法建立停站时间计算模型。在效率与服务优化方面，Yoo 等[8]提出一种基于停站预测的主动客流控制策略；陈伽申等[9]指出无效停站时间过长的问题；王通等[10]提出乘客乘降时间估计方法；王铭睿[11]、刘佳政[12]围绕停站方案优化与列车运行调整开展研究。在节能目标导向方面，李晓明等[13]、郑以宁等[14]、刘缘等[15]、何红[16]及李团社等[17]采用遗传算法、遗传模拟退火算法、微进化算法等建立以节能为目标的停站相关模型。

与以往研究相比，本研究首次显式地将分方向客流差异作为停站时间设置的基础逻辑，通过建立分方向乘客上下车客流计算模型差异化适配潮汐客流场景，并结合排队不均衡系数、拥挤度及携带行李系数等影响因素，创建区分上下行方向的多因子差异化停站时间设置模型，实现列车运行效率、服务、节能及安全等多维度目标协同优化，同时模型所有参数均实现量化，计算精准度高，应用简单、便捷。

1　停站时间设置研究

1.1　停站时间构成及影响因素分析

列车在站停站时间是指列车进站停稳至动车驶离站台的时间。在实际运行过程中，停站时间包括乘客上下车时间和乘客不可上下车时间 2 部分。其中，乘客上下车时间是指列车在站完全开门至关门灯闪铃响的时间，其余时间为乘客不可上下车时间。列车停站时间构成如图 1 所示。

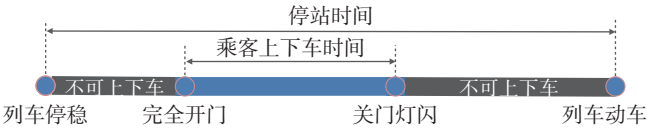


图 1　列车停站时间构成

Fig.1　Composition of train dwell time

对一个成熟的城市轨道交通系统来说，乘客不可上下车时间主要受车辆设备条件、司机操作标准等因素影响，与上下车乘客无关，一般较为固定，根据城市轨道交通运作实际客观取值即可。基于此，主要研究乘客上下车时间，即列车在站停车可供乘客上下的时间。乘客上下车时间主要受上车乘客数和分布在所有站台门的不均匀程度，下车乘客数和分布在所有车门的不均匀程度，以及车厢拥挤度、列车车型、上下车速率、携带大件行李等因素的影响。折返站(始发/终到站)停站时间受清客、等待乘客及折返冗余等因素影响，不在本研究范围内。

1.2　分方向乘客上下车客流计算模型

城市轨道交通客流数据中最直接、最可靠、最

精细的数据是AFC采集的刷卡数据，即单个乘客的OD数据，主要包括进出站的时间和地点信息。分方向乘客上下车客流计算模型将进出站时间与地点这种点状数据，通过模型算法还原为车站上行/下行站台乘客上下车客流数据。

1.2.1　非换乘站

中间站A简化站台到达/出发乘客示意图如图2所示。

列车停靠在i线j站(非换乘站)上行/下行站台的到达(下车)乘客数为

$$P_{ij}^{\mathrm{D}上行/下行}=\sum P_{\neg(ij)\to ij}^{\mathrm{D}上行/下行}=\sum P_{i\neg j\to ij}^{\mathrm{D}上行/下行}+\sum P_{\neg i\forall\to ij}^{\mathrm{D}上行/下行} \tag{1}$$

式中：$P_{ij}^{\mathrm{D}上行/下行}$为i线j站上行/下行站台到达(下车)乘客数，人次；$P_{\neg(ij)\to ij}^{\mathrm{D}上行/下行}$为线网除$i$线$j$站外任一车站出发上行/下行到达$i$线$j$站的乘客数，人次；$P_{i\neg j\to ij}^{\mathrm{D}上行/下行}$为$i$线除$j$站外任一车站出发上行/下行到达$i$线$j$站的乘客数，人次；$P_{\neg i\forall\to ij}^{\mathrm{D}上行/下行}$为线网除$i$线车站外任一车站出发换乘上行/下行到达$i$线$j$站的乘客数，人次。

列车停靠在i线j站(非换乘站)上行/下行站台的出发(上车)乘客数为

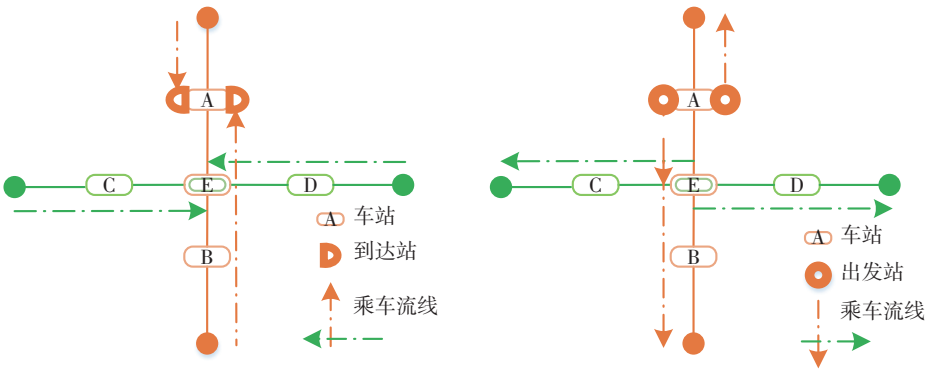
$$P_{ij}^{\mathrm{O}上行/下行}=\sum P_{ij\to\neg(ij)}^{\mathrm{O}上行/下行}=\sum P_{ij\to i\neg j}^{\mathrm{O}上行/下行}+\sum P_{ij\to\neg i\forall}^{\mathrm{O}上行/下行} \tag{2}$$

式中：$P_{ij}^{\mathrm{O}上行/下行}$为i线j站上行/下行站台出发(上车)乘客数，人次；$P_{ij\to\neg(ij)}^{\mathrm{O}上行/下行}$为$i$线$j$站上行/下行出发到达线网除$i$线$j$站外任一车站的乘客数，人次；$P_{ij\to i\neg j}^{\mathrm{O}上行/下行}$为$i$线$j$站上行/下行出发到达$i$线除$j$站外任一车站的乘客数，人次；$P_{ij\to\neg i\forall}^{\mathrm{O}上行/下行}$为$i$线$j$站上行/下行出发换乘到达线网除$i$线车站外任一车站的乘客数，人次。

1.2.2　换乘站

换乘站是指有2条及以上线路交会的车站，对于1个$M(M\geqslant 2)$线换乘站，M条线路在此站交汇，橙线换乘站E简化站台到达/出发乘客示意图如图3所示。

列车停靠在$i(i\in M)$线j站时上行/下行站台的到

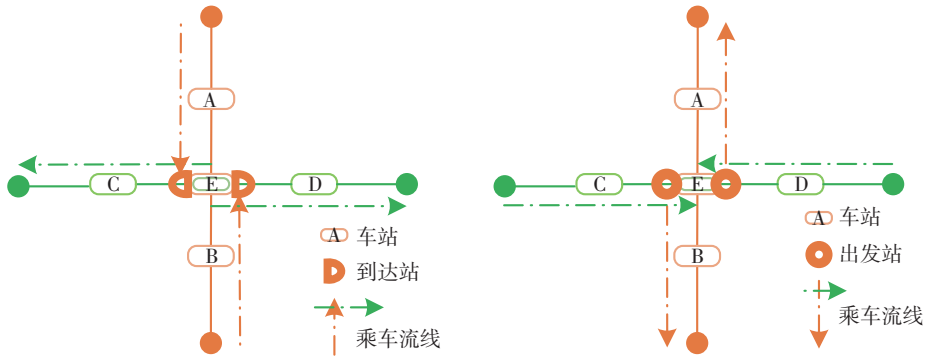


a　到达乘客
a　Arriving passengers

b　出发乘客
b　Departing passengers

图2　中间站A简化站台到达/出发乘客示意图

Fig.2　Simplified schematic diagram of arriving/departing passengers at the platform of intermediate station A



a　到达乘客
a　Arriving passengers

b　出发乘客
b　Departing passengers

图3　橙线换乘站E简化站台到达/出发乘客示意图

Fig.3　Simplified schematic diagram of arriving/departing passengers at the platform of orange line transfer station E

达(下车)乘客数为

$$P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}=\sum P_{\neg(ij)\to ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{ij_{\text{下行}\forall/\text{上行}\forall}\to ij\to\neg i\forall}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}=\sum P_{i\neg j\to ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{\neg i\forall\to ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{ij_{\text{下行}\forall/\text{上行}\forall}\to ij\to\neg i\forall(\neg i\in M)}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{ij_{\text{下行}\forall/\text{上行}\forall}\to ij\to\neg M\forall}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}\tag{3}$$

式中：$P_{ij_{\text{下行}\forall/\text{上行}\forall}\to ij\to\neg i\forall}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线中$j$站下行/上行方向的任一车站出发经$i$线$j$站到达线网除$i$线车站外任一车站的乘客数，人次；$P_{ij_{\text{下行}\forall/\text{上行}\forall}\to ij\to\neg i\forall(\neg i\in M)}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线中$j$站下行/上行方向的任一车站出发经$i$线$j$站且一次换乘到达衔接线路任一车站的乘客数，人次；$P_{ij_{\text{下行}\forall/\text{上行}\forall}\to ij\to\neg M\forall}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线中$j$站下行/上行方向的任一车站出发经$i$线$j$站且多次换乘(≥2次)到达非衔接线路任一车站的乘客数，人次。

列车停靠在$i(i\in M)$线j站时上行/下行站台的出发(上车)乘客数为

$$P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}=\sum P_{ij\to\neg(ij)}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{\neg i\forall\to ij\to ij_{\text{上行}\forall/\text{下行}\forall}}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}=\sum P_{ij\to i\neg j}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{ij\to\neg i\forall}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{\neg i\forall\to ij\to ij_{\text{上行}\forall/\text{下行}\forall}(\neg i\in M)}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}+\sum P_{\neg M\forall\to ij\to ij_{\text{上行}\forall/\text{下行}\forall}}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}\tag{4}$$

式中：$P_{\neg i\forall\to ij\to ij_{\text{上行}\forall/\text{下行}\forall}}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}$为线网除$i$线车站外任一车站出发经$i$线$j$站到达$i$线中$j$站上行/下行方向的任一车站的乘客数，人次；$P_{\neg i\forall\to ij\to ij_{\text{上行}\forall/\text{下行}\forall}(\neg i\in M)}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}$为衔接线路任一车站出发一次换乘且经$i$线$j$站到达$i$线中$j$站上行/下行方向的任一车站的乘客数，人次；$P_{\neg M\forall\to ij\to ij_{\text{上行}\forall/\text{下行}\forall}}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}$为非衔接线路任一车站出发多次换乘(≥2次)且经$i$线$j$站到达$i$线中$j$站上行/下行方向的任一车站的乘客数，人次。

1.3　多因子差异化停站时间设置模型

1.3.1　上下车乘客数

列车停靠在i线j站上行/下行站台的上下车乘客总数为

$$P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}=P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}+P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}\tag{5}$$

式中：$P_{ij}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线$j$站上行/下行站台上下车乘客数，人次。

对于整列列车而言，上下车乘客是不均匀分布在所有车门和车厢的，乘客上下车时间受到乘客上下车最慢对应车门的约束，即理论上受到上下车乘客数最多车门的约束，则列车停靠在i线j站上行/下行站台单个车门的最大上下车乘客数为

$$P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{\max}}=\max\left\{P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{1}},\ P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{2}},\ \cdots,\ P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{N}}\right\}\tag{6}$$

式中：$P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{\max}}$为$i$线$j$站上行/下行站台单个车门的最大上下车乘客数，人次；$P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{x}}$为$i$线$j$站上行/下行站台第$x$个车门的上下车乘客数，人次；$N$为1列车单侧车门总数，个。

1.3.2　乘客排队不均衡系数

（1）参数定义。乘客排队不均衡系数按照上下车场景区分，包括站台乘客排队上车不均衡系数及车厢乘客排队下车不均衡系数。其中，站台乘客排队上车不均衡系数表示站台排队候车乘客分布在所有站台门的不均匀程度，主要受站台候车乘客数、扶梯布局、站务引导及乘客习惯等因素的影响；车厢乘客排队下车不均衡系数表示车厢排队等候下车乘客分布在所有车门的不均匀程度，主要受等候下车乘客数、乘客集中上车区域、乘客习惯等因素的影响。假设站台排队上车乘客数最多的站台门与车厢排队下车乘客数最多的车门相对应，单个车门/站台门的最大上下车乘客数受两者叠加影响，则

$$P_{ij_{\text{上下}}}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{\max}}=\frac{\alpha_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}+\alpha_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}}{N}\tag{7}$$

式中：$\alpha_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线$j$站上行/下行站台乘客排队上车不均衡系数；$\alpha_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线$j$站上行/下行到达列车的车厢乘客排队下车不均衡系数。

根据定义，乘客排队不均衡系数为

$$\alpha=\frac{P^{\max}}{\bar{P}}\tag{8}$$

式中：α为乘客排队不均衡系数；$P^{\max}$为单个车门/站台门的最大排队乘客数，人；$\bar{P}$为各车门/站台门的平均排队乘客数，人。

（2）参数推导思路。基于影响因素分析、相关性与显著性检验，建立线性回归模型推导参数计算公式。

影响因素分析。假设候车乘客数较多的车站均有站台/列车广播或安排站务人员分散乘车引导，结合车站现场调研，可知站台乘客排队上车不均衡系数主要受站台候车乘客数影响，车厢乘客排队下车不均衡系数主要受车厢等候下车乘客数影响，且呈负相关关系。

相关性检验。皮尔逊相关系数r用于衡量2个连续变量之间的线性相关程度，r为正值表示正相

关，r为负值表示负相关，其取值范围为[−1，1]；皮尔逊相关系数的平方r^2，又称决定系数或判定系数，用于衡量自变量对因变量的解释程度。

显著性检验。通过皮尔逊相关系数的P值判断变量间关系是否可靠。

线性公式推导。建立线性回归模型，利用最小二乘法对乘客排队不均衡系数进行线性估计，并结合站台门/车门数(N)对站台候车/车厢等候下车乘客总数的影响适当修正线性方程，最终得到乘客排队不均衡系数计算公式。

（3）参数计算公式。本研究通过视频数据采集并计算各站台门候车乘客人数/各车门等候下车乘客人数的总数、均值及最值，并剔除异常、无效数据影响，其中站台候车乘客数抽样厦门地铁500个有效样本数据，车厢等候下车乘客数抽样厦门地铁200个有效样本数据，为后续站台/车厢乘客排队不均衡系数的量化建模与拟合分析提供可靠数据支撑。

站台乘客排队上车不均衡系数。根据500个站台候车乘客数有效样本数据，绘制站台候车乘客总数与站台乘客排队上车不均衡系数散点图如图4所示。其中，皮尔逊相关系数r=0.796 7，P=2.678 1×10^{-11}，说明站台候车乘客总数与站台乘客排队上车不均衡系数强线性负相关且统计高度显著；决定系数r^2=0.634 8，表明拟合效果较好。

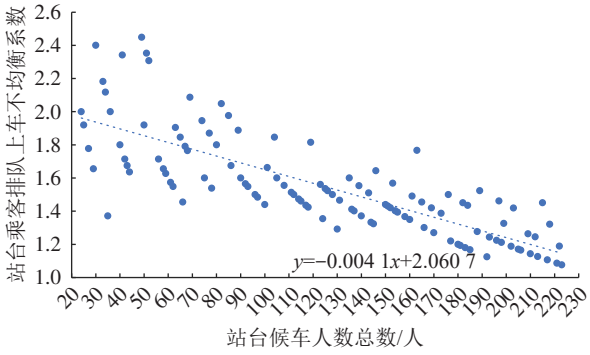


图4　站台候车乘客总数与站台乘客排队上车不均衡系数散点图

Fig.4　Scatter plot of total platform waiting passengers and imbalance coefficient of boarding passenger queues

根据车站站台视频观察统计，当某个车门排队人数>10人时，乘客主动移动至临近站台门的比例达78%(50个样本)；且当站台候车乘客总数≥240人(N=24)时，实际排队上车不均衡系数约为[1，1.1]，平均值约为1.06(30个样本)，近似按1取值，即认为当平均每个站台门排队候车乘客数超过10人时，站台候车乘客均匀分布在所有站台门。结合站台门数(N=24)对站台候车乘客总数的影响适当修正线性方程，则站台乘客排队上车不均衡系数为

$$\alpha_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}=\begin{cases}1+\dfrac{10N-P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}}{10N} & P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}\leqslant 10N\\ 1 & P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}>10N\end{cases}\tag{9}$$

车厢乘客排队下车不均衡系数。根据200个车厢等候下车乘客数有效样本数据，绘制车厢等候下车乘客总数与车厢乘客排队下车不均衡系数散点图如图5所示。其中，皮尔逊相关系数r=0.833 5，P=2.585 2×10^{-16}，说明车厢等候下车乘客总数与车厢乘客排队下车不均衡系数强线性负相关且统计高度显著；决定系数r^2=0.694 7，表明拟合效果较好。

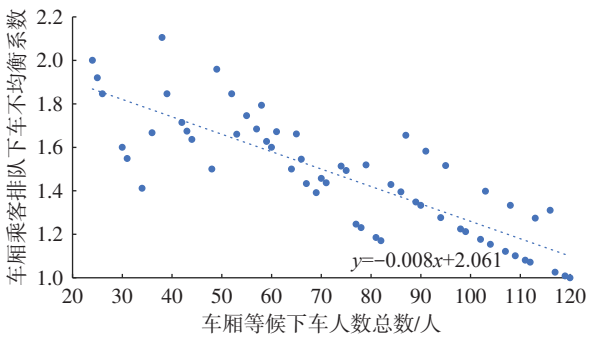


图5　车厢等候下车乘客总数与车厢乘客排队下车不均衡系数散点图

Fig.5　Scatter plot of total passengers waiting to alight in the train carriage and imbalance coefficient of alighting passenger queues

根据车厢视频观察统计，当站台候车乘客总数≥120人时，实际排队下车不均衡系数约为[1，1.2]，平均值约为1.07(30个样本)，近似按1取值，即认为当平均每个车门排队下车乘客数超过5人时，车厢下车乘客均匀分布在所有车门。结合车门数(N=24)对车厢等候下车乘客总数的影响适当修正线性方程，则车厢乘客排队下车不均衡系数为

$$\alpha_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}=\begin{cases}1+\dfrac{5N-P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}}{5N} & P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}\leqslant 5N\\ 1 & P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}>5N\end{cases}\tag{10}$$

1.3.3　车厢拥挤度

断面拥挤度影响乘客上下车速率的主要原因是车上站立乘客对上下车乘客造成的干扰，本研究在排除座客载荷影响的前提下，聚焦车厢站立乘客的

拥挤程度，并结合车厢排队等候下车乘客分布在所有车门的不均匀程度影响，通过车厢乘客排队下车不均衡系数对影响乘客上下车速率的程度作了上浮处理，为实际乘客上下车时间预留了一定的富余时间。根据上述假设，列车停靠在i线j站上行/下行站台的单个车厢最大拥挤度为

$$Y_{ij}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{\max}}=\begin{cases}\alpha_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}\dfrac{D^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}_{(ij-1\rightarrow ij)_{\text{区间}}}-nAW1}{n(AW2-AW1)} & \\ D^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}_{(ij-1\rightarrow ij)_{\text{区间}}}\geqslant nAW1 & \\ 0\quad D^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}_{(ij-1\rightarrow ij)_{\text{区间}}}<nAW1 & \end{cases}\tag{11}$$

式中：$Y_{ij}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{\max}}$为$i$线$j$站上行/下行站台单个车厢最大拥挤度，%；$AW1$为座客载荷，人；$AW2$为定员载荷，人；$n$为通过列车数，列；$D^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}_{(ij-1\rightarrow ij)_{\text{区间}}}$为列车到达$i$线$j$站上行/下行站台前一个区间的断面客流，人次。

1.3.4　车门通行能力

（1）车门基准通行能力。车门基准通行能力是指在理想状态下(乘客流动顺畅、上下车秩序良好、未携带行李等无干扰情形)，1个车门单位时间内能够通过的上下车乘客数，是衡量停站时间设置和车门客流疏散效率的重要参数，主要受门开宽度等因素的影响。根据定义，车门基准通行能力为

$$R^0_{\text{上下}}=\frac{w_{\mathrm{d}}/w_{\mathrm{p}}}{t_{\mathrm{p}}}\tag{12}$$

式中：$R^0_{\text{上下}}$为车门基准通行能力，人/s；w_{d}为门开宽度，m；w_{p}为单人通行宽度，m/人；t_{p}为单人通过车门用时，s。

在理想状态下乘客通过车门需要移动2步，实际测量每步用时约0.71 s。根据《中国成年人人体尺寸》(GB/T 10000—2023)，18~70岁成年男性静态肩最大宽中位数为449 mm，在此基础上增加必要的活动、着装等余量，单人通行宽度取0.55 m，以行业内应用最广泛的B型车的标准门开宽度(1.3 m)为例，可以计算得出车门基准通行能力约1.66人/s，与实测数据基本吻合。

（2）车门实际通行能力。车门实际通行能力，是指在实际运营情况下，1个车门单位时间内能够实际通过的上下车乘客数，在车门基准通行能力基础上，主要还受到车厢拥挤度、乘客携带行李等因素的影响，且呈负相关关系，即乘客实际上下车平均用时与车厢拥挤度呈正相关关系，控制其他变量保持不变，根据1.3.2的参数推导思路研究两者间的关系式。

本研究通过AFC系统、视频数据采集并计算单个车厢最大拥挤度与上下车乘客数最多车门/站台门的乘客实际上下车平均用时，并剔除异常、无效数据影响，抽样厦门地铁100个有效样本数据，绘制车厢拥挤度与乘客实际上下车平均用时散点图如图6所示。其中，皮尔逊相关系数r=0.747 1，P=4.467 7×10^{-19}，说明车厢拥挤度与乘客实际上下车平均用时强线性正相关且统计高度显著；决定系数r^2=0.558 1，表明拟合效果较好。

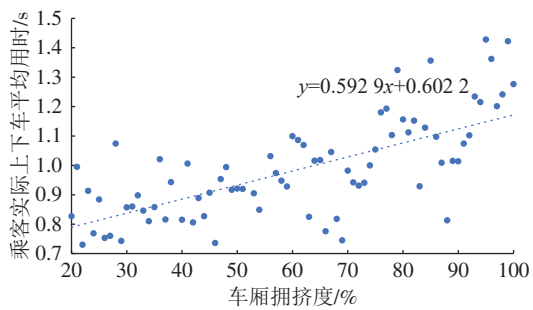


图6　车厢拥挤度与乘客实际上下车平均用时散点图

Fig.6　Scatter plot of train carriage crowding degree and passengers' actual average boarding and alighting duration

结合乘客额定上下车平均用时($t^0_{\text{上下}}=1/R^0_{\text{上下}}\approx$0.6)适当修正线性方程并变形，则车门实际通行能力为

$$R_{\text{上下}}=\frac{1}{t_{\text{上下}}}=\frac{R^0_{\text{上下}}}{1+Y_{ij}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}^{\max}}}\tag{13}$$

式中：$R_{\text{上下}}$为车门实际通行能力，人/s；$t_{\text{上下}}$为乘客实际上下车平均用时，s/人。

1.3.5　乘客携带大件行李系数

将乘客携带的行李大致分为2类，一类为可随身携带的小件行李，例如双肩包、斜挎包、手提包、公文包等，携带这类行李乘客的通行宽度基本维持不变，即对车门实际通行能力的影响可忽略不计；另一类为不可随身携带的大件行李，例如行李箱、大件购物袋、婴儿车、折叠自行车等，这类行李明显增加了乘客的通行宽度，对车门实际通行能力影响较大，因此有必要引入乘客携带大件行李系数作为衡量乘客上下车时间的重要影响因素之一，

i线j站乘客携带大件行李系数为

$$\beta_{ij}=\frac{k_{ij}(w_p+w_{ij}^{1})+(1-k_{ij})w_p}{w_p}-1 \tag{14}$$

式中：β_{ij}为i线j站乘客携带大件行李系数；k_{ij}为i线j站乘客携带大件行李比例，%；w_{ij}^{1}为i线j站乘客携带大件行李影响通行宽度，m。

根据车站衔接地点的核心功能，可划分为交通枢纽型、居住区通勤型、商业配套型、产业区接驳型及文旅服务型等类型车站。根据厦门地铁各车站安检机数据统计，居住区通勤型、产业区接驳型车站携带大件行李比例约在2%~5%，商业配套型车站、文旅服务型车站携带大件行李比例约7%~10%，上述非交通枢纽型车站携带大件行李的比例均不足10%，且乘客携带大件行李以行李箱为主，占比超过50%，按照常见的24寸行李箱(约64 cm×41 cm×26 cm)估算，非交通枢纽型车站乘客携带大件行李对车门通行能力的影响小于7.5%，为适当简化模型，本研究忽略非交通枢纽站乘客携带大件行李对车门通行能力的影响，β_{ij}均按照0取值。对于交通枢纽型车站，乘客携带大件行李比例通常超过60%，且行李数量更多、尺寸更大，这将明显影响到此类型车站车门实际通行能力，因此针对此类型车站需重点考虑乘客携带大件行李系数，并结合车站现场调研取值辅助计算。

1.3.6　中间站乘客上下车时间

理论乘客上下车时间等于单个车门的最大上下车乘客数与相应车门实际通行能力的比值，代入上述多个影响因子，可得列车停靠在i线j站(中间站且含换乘站)上行/下行站台的理论乘客上下车时间(开门时长)为

$$t_{ij}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}=\frac{P_{ij}^{\mathrm{P}^{\max}_{\text{上行/下行}}}}{R_{\text{上下}}}=\frac{\alpha_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}P_{ij}^{\mathrm{O}_{\text{上行/下行}}}+\alpha_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}P_{ij}^{\mathrm{D}_{\text{上行/下行}}}}{\dfrac{R_{\text{上下}}^{0}}{\left(1+Y_{ij}^{\mathrm{P}^{\max}_{\text{上行/下行}}}\right)\left(1+\beta_{ij}\right)}N} \tag{15}$$

式中：$t_{ij}^{\mathrm{P}_{\text{上行/下行}}}$为$i$线$j$站上行/下行站台理论乘客上下车时间，s。

2　模型应用及效果分析

选取厦门地铁近期线网OD客流数据，利用分方向乘客上下车客流计算模型还原成车站上行/下行站台乘客上下车客流及相应断面客流等基础客流数据，结合线网实际车辆参数、通过列车数等其他参数数据，应用多因子差异化停站时间设置模型推算线网各中间站分方向停站时间，并在厦门地铁全线网(1，2，3号线)全面落地应用。

2.1　模型应用

2.1.1　基础客流数据

通常情况下，工作日高峰期潮汐客流特征最为明显，因此本研究模型应用以工作日高峰期为例。排除大型活动、设备故障等客流数据异常日期影响，选取各线路近期早/晚高峰最大15 min OD客流数据，应用分方向乘客上下车客流计算模型得到多因子差异化停站时间设置模型所需的基础客流数据，即各车站分方向上车和下车的客流数据，以及相应的断面客流数据，采用峰值数据以保证覆盖高峰期各时段上下车客流需求，并为实际停站预留了一定的富余时间。其中，厦门地铁1号线工作日早高峰15 min最大客流数据如表1所示。

2.1.2　其他参数数据

(1) 车辆参数。厦门地铁1，2，3号线均使用B型车，其中$AW1$座客载荷240人，$AW2$定员载荷1 460人，列车单侧车门总数24个，均为1.3 m宽车门，车门基准通行能力取1.66人/s。

(2) 通过列车数。厦门地铁1，2，3号线工作日高峰行车间隔分别为4 min10 s，2 min50 s~5 min30 s，4 min55 s，根据OD客流相对应的行车间隔计算得到通过列车数。

(3) 乘客携带大件行李系数。交通枢纽型车站乘客携带大件行李系数需结合现场调研取值辅助计算。厦门北站、厦门火车站乘客携带大件行李比例分别可达约79%，72%，乘客携带大件行李影响通行宽度分别约为66 cm，70 cm，计算可得乘客携带大件行李系数分别约为0.95，0.92。

(4) 乘客不可上下车时间。综合考虑厦门地铁车辆设备条件、司机实际开关门作业效率等因素，乘客不可上下车时间取21 s，其中列车停稳到完全开门时间约7 s，关门灯闪到列车动车时间约12~15 s。

(5) 最短停站时间。为保证必要的乘客上下车时间，并综合考虑厦门地铁司机站台作业用时标准，最短停站时间设置为30 s。

表1　厦门地铁1号线早高峰15 min最大客流数据　人次
Tab.1　Maximum 15-min passenger flow data during the morning peak period of Xiamen Metro Line 1

车站	上行(镇海路→岩内)			下行(岩内→镇海路)		
	出发(上车)	断面客流	到达(下车)	出发(上车)	断面客流	到达(下车)
中山公园	223	415	19	7	1 703	539
将军祠	251	619	14	44	1 789	129
文灶	272	857	45	90	2 242	544
湖滨东路	113	1 083	187	329	2 205	292
莲坂	230	1 009	81	97	2 706	599
莲花路口	167	1 159	113	144	3 055	493
吕厝	944	1 212	665	623	4 096	1 664
乌石浦	224	1 491	151	402	4 017	323
塘边	129	1 565	103	325	3 793	101
火炬园	511	1 591	355	658	4 016	881
殿前	194	1 747	171	766	3 362	112
高崎	106	1 770	161	417	3 035	90
集美学村	107	1 715	123	506	2 549	21
园博苑	408	1 699	122	921	1 649	21
杏林村	322	1 986	15	203	1 453	6
杏锦路	533	2 293	62	551	914	12
官任	50	2 765	458	149	830	64
诚毅广场	44	2 357	410	218	671	59
集美软件园	3	1 992	1 571	132	854	315
集美大道	11	423	65	467	389	3
天水路	2	369	123	158	233	2
厦门北站	3	249	181	135	104	7

2.1.3　停站时间计算

根据上述厦门地铁实际基础客流数据及其他参数数据，应用多因子差异化停站时间设置模型(公式(15))计算各车站理论乘客上下车时间，并为实际运营预留3 s的富余量，计算得出最终图定停站时间设置建议值，计算结果以5 s为最小单位向上取整。其中，厦门地铁1号线工作日高峰时段图定停站时间设置建议值如表2所示。

2.2　效果分析

2.2.1　列车运行效率提升

模型应用后，线路单程运行时间最多减少55 s，约占中间站停站总时长的6%，线网大部分时段旅行速度提高，运行效率明显提升；同时各线路高峰期理论全周转时间平均缩短30 s，最大缩短65 s，加速车底周转，部分情况下用车数减少，例如2号线工作日最大上线列车数减少1列，有效缓解高峰期用车紧张。其中，厦门地铁1，2，3号线工作日高峰时段停站时间变化情况如表3所示。

表2　厦门地铁1号线工作日高峰图定停站时间设置建议值 s
Tab.2　Recommended values for scheduled dwell time during peak hours on weekdays for Xiamen Metro Line 1

车站	早高峰		晚高峰		备注
	上行方向	下行方向	上行方向	下行方向	
中山公园	30	30	35	30	—
将军祠	30	30	30	30	—
文灶	30	35	35	35	—
湖滨东路	30	35	35	35	换乘站
莲坂	30	35	35	35	—
莲花路口	30	35	35	35	—
吕厝	40	55	50	45	换乘站
乌石浦	30	40	40	35	—
塘边	30	35	35	30	—
火炬园	35	45	40	40	换乘站
殿前	30	40	35	35	—
高崎	30	35	35	30	—
集美学村	30	35	35	35	—
园博苑	35	35	35	35	—
杏林村	30	30	30	30	—
杏锦路	35	30	30	35	—
官任	30	30	30	30	—
诚毅广场	30	30	30	30	—
集美软件园	40	30	30	30	—
集美大道	30	30	30	30	—
天水路	30	30	30	30	—
厦门北站	30	30	35	35	交通枢纽型车站
合计	695	760	755	735	—

2.2.2　乘客上下车需求精准匹配

模型应用后，更加精准地匹配了乘客上下车需求，模型应用前后各选取1个月的工作日高峰期ATS实际统计数据，各线路高峰期大客流方向终到偏离程度(即列车到达终点站运行图实际运行线偏离计划线的时间差)平均改善约56%，有效提升了乘客乘车准点率和舒适性。其中，厦门地铁1号线工作日晚高峰18:00—19:00时段，模型应用前后大客流方向终到偏离情况实例(工作日晚高峰18:00—19:00)如图7所示。此实例图显示，模型应用前，列车终到最小偏离9 s，最大偏离65 s，平均偏离约43.72 s；模型应用后，列车终到最小偏离0 s，最大偏离13 s，平均偏离约2.86 s(提前到达视作偏离0 s)；模型应用前后，终到偏离程度改善约93.46%。

表3　厦门地铁1，2，3号线工作日高峰停站时间变化情况汇总

Tab.3　Changes in dwell time during peak hours on working days of Xiamen Metro Lines 1, 2 and 3

线路	峰期	方向	中间站停站总时长			
			现行/s	调整后/s	变化值/s	变化率/%
1号线	早高峰	上行	740	695	−45	−6.08
		下行		760	20	2.70
	晚高峰	上行		755	15	2.03
		下行		735	−5	−0.68
2号线	早高峰	上行	950	940	−10	−1.05
		下行		895	−55	−5.79
	晚高峰	上行		905	−45	−4.74
		下行		930	−20	−2.11
3号线	早高峰	上行	630	610	−20	−3.17
		下行		635	5	0.79
	晚高峰	上行		625	−5	−0.79
		下行		615	−15	−2.38

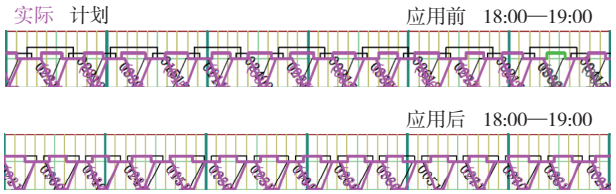


图7　模型应用前后大客流方向终到偏离情况实例(工作日晚高峰18:00—19:00)

Fig.7　Case examples of the deviation of train arrivals in the direction of heavy passenger flow before and after the model application (From 18:00 to 19:00 during the evening peak hours on weekdays)

2.2.3　绿色节能列车运行图

模型应用后，因列车实际运行线及计划线延误偏离30 s以上导致的列车赶点运行现象发生的频率大幅下降，模型应用前后各选取1周的工作日高峰期ATS实际统计数据，各线路高峰期大客流方向列车赶点运行发生频率(即1列次列车赶点运行的时间占单程运行时间的比例)平均减少约62%，正线车公里牵引用电相应下降，实现良好的绿色节能效果，产生一定的运营经济效益。

2.2.4　保障乘客上下车安全性

排除寒暑期异常客流月份数据影响，按照月度客流强度、全日开行列次、运营交路及行车间隔等差异均较小的原则，各选取模型应用前后3个月的车站现场实际统计数据进行对比，线网列车夹人夹物事件数由17件/月下降至10.67件/月，降幅37%，有效保障乘客上下车安全性。

3　结束语

深度挖掘潮汐客流引起的上下行差异化停站需求，立足分方向的多因子精细化停站时间设置模型，构建以客流特征精准匹配为导向的运营参数设置思路，推动运输策划体系向差异化、精准化、精细化转型。通过模型在厦门地铁线网的实际应用，验证了模型可以较大幅度提高运营效能、提升服务质量、创造经济效益、保障乘客安全，对企业运营及乘客出行体验均具有重要现实意义，为城市轨道交通行业提供了可复制、可推广的停站时间优化方案，具有非常良好的实际应用价值。后续可进一步深化研究停站时间模型影响因素的设置，考虑引入站台布局、车型尺寸等有关参数，更深层次丰富模型应用场景。

参考文献：

[1] SERIANI S，FERNANDEZ R，LUANGBORIBOON N，et al. Exploring the Effect of Boarding and Alighting Ratio on Passengers' Behaviour at Metro Stations by Laboratory Experiments[J]. Journal of Advanced Transportation，2019，2019(1)：6530897.

[2] PEFTITSI S，JENELIUS E，CATS O. Determinants of Passengers' Metro Car Choice Revealed through Automated Data Sources：A Stockholm Case Study[J]. Transportmetrica A：Transport Science，2020，16(3)：529-549.

[3] KIM K M，LIM N Y. Study on Necessary Dwell Time According to Number of Boarding and Alighting Passengers[J]. Journal of the Korean Society for Urban Railway，2018，6(3)：151-157.

[4] TORTAINCHAI N，WONG H，WINSLETT D，et al. Train Dwell Time Efficiency Evaluation with Data Envelopment Analysis：Case Study of London Underground Victoria Line[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2022，2676(3)：728-739.

[5] 谢桂盛. 基于乘客上下车行为的城市轨道交通列车停站时间研究[D]. 南昌：华东交通大学，2023.

[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.
MIAO Qin，PAN Zhuo. Research of Urban Rail Transit Train Dwelling Time at Station[J]. Urban Mass Transit，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] YOO S，KIM H，KIM W，et al. Controlling Passenger Flow to Mitigate the Effects of Platform Overcrowding on Train Dwell Time[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems，2022，26(3)：366-381.

[9] 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)：61-64，78.
CHEN Jiashen，PU Qi，TU Yingfei. On the Relation between Passenger Boarding Behavior and Train Dwelling Time[J]. Urban Mass Transit，2017，20(1)：61-64，78.

[10] 王　通，郝妍熙，胡　华，等. 地铁乘客乘降时间分析与优化[J]. 智能计算机与应用，2020，10(1)：84-88.
WANG Tong，HAO Yanxi，HU Hua，et al. Analysis and Optimization of Metro Passenger Boarding and Landing Time[J]. Intelligent Computer and Applications，2020，10(1)：84-88.

[11] 王铭睿. 城市轨道交通列车停站方案优化[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[12] 刘佳政. 基于停站时间模型的城轨列车运行调整问题研究[D]. 北京：北京交通大学，2015.

[13] 李晓明，李海龙，刘晓磊，等. 基于再生制动的城轨列车停站时间节能优化研究[J]. 现代计算机，2020(18)：23-27.
LI Xiaoming，LI Hailong，LIU Xiaolei，et al. Research on Energy-Saving Dwelling Time Optimization of Urban Rail Train Based on Regenerative Braking[J]. Modern Computer，2020(18)：23-27.

[14] 郑以宁，何世伟，迟居尚. 考虑能耗的城市轨道交通列车停站方案研究[J]. 综合运输，2024，46(8)：64-71.
ZHENG Yining，HE Shiwei，CHI Jushang. Train Stopping Scheme of Urban Rail Transit Considering Energy Consumption[J]. China Transportation Review，2024，46(8)：64-71.

[15] 刘　缘，黄慧芳，朱丹坤，等. 考虑乘客服务水平的城市轨道交通平峰期节能运行图研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(9)：154-161.
LIU Yuan，HUANG Huifang，ZHU Dankun，et al. Energy Saving Train Working Diagram Considering Passenger Flow during Off-Peak Periods[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(9)：154-161.

[16] 何　红. 基于运营成本的城际铁路列车编组和停站方案综合优化研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(3)：36-42.
HE Hong. Research on Comprehensive Optimization of Train Formation and Stop Scheme of Intercity Railway Based on Operation Cost[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(3)：36-42.

[17] 李团社，李宇迪，吕苗苗，等. 既有地铁线非站站停列车开行方案与越行站设置协同优化研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(7)：179-189.
LI Tuanshe，LI Yudi，LYU Miaomiao，et al. Collaborative Optimization of Non-all Station-Stop Train Operation Schemes and Overtaking Station Settings of Existing Subway Lines[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(7)：179-189.

(责任编辑　刘宁馨)