文章编号：1003-1421(2026)08-0148-12
引用格式：宋绪扬，陈峥，贾琨，等.不依赖于OD数据的城市轨道交通单线客流态势推演方法研究[J].铁道运输与经济，2026，48(8)：148-159.
SONG Xuyang，CHEN Zheng，JIA Kun，et al. Research on Method of Trend Deduction of Passenger Flow on Single Urban Rail Transit Lines without Relying on OD Data[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(8)：148-159.

不依赖于OD数据的城市轨道交通单线客流态势推演方法研究

宋绪扬[1,2]，陈　峥[1]，贾　琨[3]，杨儒冬[4]，季　晨[5]

(1.佳都科技集团股份有限公司 中央研究院，广东 广州　510535；2.北京交通大学 计算机科学与技术学院，北京　100044；3.长沙穗城轨道交通有限公司，湖南 长沙　410000；4.卡斯柯信号有限公司，上海　200072；5.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)

摘　要：为实现不依赖于OD数据对城市轨道交通单线客流态势进行仿真推演，以断面客流数据、站台人数数据作为输入，建立单线客流态势推演模型；基于进出站数据提出车站客流-后续区间贡献度矩阵和计算方法，用于模拟客流输入改变条件下对后续区段的影响，再利用此矩阵，考虑客流远期需求变化、运力调整、突发大客流等多种影响因素对断面客流变化的作用关系，针对运力调整和单站突发大客流2种场景设计相关算法；在算法验证方面，基于精细化OD仿真模型的结果作为本模型的输入数据(站台人数数据、断面客流数据)进行态势推演计算，将精细化OD仿真模型得到的推演结果作为基线模型，将本模型计算的结果与基线模型进行对比验证，验证本模型的准确性和可行性。对比结果表明：针对运力调整场景，本模型可较为准确地推演此变化，最大的断面满载率误差为10.3%；针对单站突发大客流场景，本模型可以较好地预估施加单站大客流后后续断面区间的断面客流及满载率变化趋势，最大的断面满载率误差为5.5%。

关键词：城市轨道交通；客流态势推演；地铁客流预测；运力调整；突发大客流
中图分类号：U293.13　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250414001

Research on Method of Trend Deduction of Passenger Flow on Single Urban Rail Transit Lines without Relying on OD Data

SONG Xuyang[1,2]，CHEN Zheng[1]，JIA Kun[3]，YANG Rudong[4]，JI Chen[5]

(1. Central Research Institute, PCI Technology Group Co., Ltd., Guangzhou 510535, Guangdong, China; 2. School of Computer Science & Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Changsha Suicheng Rail Transit Co., Ltd., Changsha 410000, Hunan, China; 4. CASCO Signal Co., Ltd., Shanghai 200072, China; 5. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This study aims to simulate and deduce the single-line passenger flow situation of urban rail transit without relying on OD data. A single-line passenger flow trend deduction model was established, which took section passenger flow data and platform personnel data as inputs. Based on

收稿日期：2025-04-14　　**修订日期**：2026-04-14
基金项目：广州市重点领域研发计划项目(202206030007)

inbound and outbound data, a contribution matrix and calculation method for station passenger flow and subsequent sections were proposed to simulate the impact of passenger flow input changes on subsequent sections. Using this matrix, the relationships of section passenger flow changes under various influencing factors, such as long-term demand changes, capacity adjustments, and sudden large passenger flows, were comprehensively considered. Relevant algorithms were designed for scenarios of capacity changes and sudden single-station large passenger flows. In the aspect of algorithm validation, the results of the refined OD simulation model were used as the input data for this model, including platform personnel data and section passenger flow data, and trend deduction calculations were carried out. The deduction results from the refined OD simulation model served as the baseline model, and the calculated results of this model were compared and validated with the baseline model to verify the accuracy and feasibility of this model. The comparison results demonstrate that for the scenario of transportation capacity changes, this model can accurately deduce such changes, with a maximum error of approximately 10.3% in the section full-load rate; for the scenario of sudden single-station large passenger flows, this model can effectively estimate the trends of section passenger flow and full-load rate changes in subsequent sections after the occurrence of single-station large passenger flows, with a maximum section full-load rate error of about 5.5%.

Keywords: Urban Rail Transit; Passenger Flow Trend Deduction; Subway Passenger Flow Prediction; Capacity Adjustment; Sudden Large Passenger Flow

0　引言

在城市轨道交通网络化运营背景下，形成了乘客一票制“无缝衔接”换乘的局面，为乘客出行带来极大便利性。然而很多城市的轨道交通网络有多个运营主体，定时进行网络客流路径选择估计和票务清分[1]成了各地城市轨道交通运营主体每日必做的工作，通过清分系统能做到尽可能地还原各条线路上真实承载的客流，其必要条件是需要乘客的出行起讫点OD信息。运营主体的不一致和轨道交通清分中心系统数据的滞后性，导致在数据共享、线路实际承载客流数据获取等方面存在壁垒，给单线的运营仿真带来困难。

传统的线网运营仿真采用的仿真模型多为细粒度的列车–乘客交互仿真[2–3]，通常以网络客流OD数据和线网列车运行时刻表作为输入。其仿真机理在于，将乘客个体或集计群体、列车设计为多智能体，仿真其与列车运行之间的交互关系，目标是获取乘客个体的出行列车车次号以及相应列车的运行时刻。列车与乘客的交互仿真是基于系统动力学理论和智能体理论，利用计算机模拟列车内部以及列车与乘客之间的交互过程的技术，目的是模拟乘客在网络、车站、列车内的行为，例如乘客的上下车过程、在车站内的移动、对列车、闸机等设施的使用，能够较好地得到复杂网络多时空下的乘客及列车状态[4]。蒋熙等[5]研究不同粒度情况下的城市轨道交通仿真模型；冯佳平[6]研究离散事件仿真，以列车和乘客的运动过程为核心，构建了中观粒度下的城市轨道交通客流动态推演仿真系统，并以广州地铁为案例，进行了验证与分析；王祥进[7]、王芳盛[8]、尹浩东[9]、李伟等[10]研究了列车运行异常状态下的客流与行车间的交互，可以做到细粒度下的仿真，对异常变化下的网络列车运行和乘客间的交互进行了仿真评估。

然而，在现实运营生产中，由于轨道交通网络化运营获取乘客OD数据的滞后性，往往无法实时获取实时条件或短时条件下单线的精细化客流数据，从而无法完成线网级的细粒度仿真。另外聚焦于单线而言，每条线路都有4类客流：本线客流(本线进、本线出)，换入客流(他线进、本线出)，换出客流(本线进、他线出)，中转客流(他线进、他线出)。单线中涉及换乘的客流几乎占了客流量一半以上，实时或短时情况下很难获取本线的OD数据(只聚焦于本线出行过程的起讫点)。因此，本模型面向单线运营仿真推演场景，提出一种仿真推演方法，旨在不获取OD客流数据的情况下，以实时视频监控获取的站台人数数据、历史及短时预测所得断面客流数据为输入。

1　推演应用场景概述

近年来，随着AI技术的发展，在各类智能算

法和大数据技术的赋能下，多种技术被用于预测常态下的城市轨道交通短期客流，如支持向量机[5]、图卷积神经网络[11]、长短期记忆神经网络[12-14]、强化学习[15]等方法对城市轨道交通的进出站客流、OD客流、换乘客流进行短时预测，部分轨道交通运营公司也进行了生产应用[16]。

常态运营下的线路客流，在运力资源、客流需求无明显变化的条件下，通常依据历史数据进行时序预测就可以满足日常的客流预测需要和基本的运输需求。而在一些特殊的场景，如运力资源配置变化、单站突发大客流的场景下，常规的客流预测模型缺少相同条件下的历史数据输入，难以满足机器学习方法、回归预测方法的预测要求，在此类场景下，只能通过运输组织和客流量变化的机理来解决。因此本模型拟在不依赖于OD数据的条件下，依据断面客流、进出站客流、站台客流监测数据，进行特殊场景下的线路运营态势的宏观仿真推演方法研究。

城市轨道交通大力发展数字孪生技术，对于线路运行仿真提出了更高的要求，在离线或实时条件下进行特殊运营场景下客流态势推演，是运营管理人员关注的新目标、新需求。客流态势推演与常规的客流预测应用场景和侧重点不同，客流态势推演主要是指在特定的背景下(如突发事件、可预知非常态事件)，通过分析和模拟乘客运动的变化趋势，预测在一段时间内客流分布的变化情况。这种推演往往需要考虑复杂的外部因素，比如事件的性质、时间、地点，以及这些因素对乘客行为和客流分布的影响，所以客流态势推演更多地强调对特定事件响应下的客流动态变化和特定响应[17]。而通常的客流预测则更侧重于在常态条件下，基于历史数据和统计分析，预测未来某个时间段内的各类时间空间粒度下的乘客流量，这种预测方法通常会运用到各种统计学、机器学习等技术。

从调度指挥的现场实际需求出发，在无法获取本线客流OD的背景下，研究单条线路的客流态势推演模型，推演结果为断面客流及断面满载率，分为以下2种场景。

（1）运力资源变化场景。行车交路变化、区间限速、间隔调整、加减车作业、空车直达等列车运行调整措施，会导致不同断面的运输能力变化，从而进一步影响客流在站台的等待滞留情况，以及线路断面运能运量时空匹配情况，可以通过推演模型来预估此类变化。

（2）实时单站大客流场景。线路上的单车站爆发突发大客流，运力资源来不及做出应对时，大客流会对列车的能力进行占用，影响到后续运行方向上的车站和区间，需对断面客流变化进行推演。

2　单线客流态势推演模型及算法

2.1　基本模型设计

基本模型是指对单条线路的宏观客流仿真模型。设单条城轨线路由N个节点的集合构成：$\mathcal{N}=\{1，2，\cdots，N\}$，每个节点各自具有$d=\{\text{up}，\text{down}\}$2个运营方向的站台，共计$2(N-1)$个区间：$S=\{1，2，\cdots，s\}$，假设模型建立所在的时间粒度为1 h，该模型建立时段为$T=[T_1，T_2]$，运营仿真模型参数定义和说明如表1所示，不另外再对时间维度进行冗余参数定义和说明。

上述输入数据中，将站台平均滞留人数、平均排队人数作为输入数据，来代表站台的平均供需关系水平，相应地，站台平均滞留人数>0时，代表客流需求较大、能力不足。近年来，视频监控数据配合图像识别技术实现了人群密度预估，已经有多项较为成熟的应用研究：公交车厢拥挤度识别[18]、铁路车站人群密度估计[19]、地铁站台客流短时预测[20]、车站安全预警系统[21]等，因此可以运用此技术来估计站台的滞留人数和排队候车人数。

2.2　车站客流-后续区间贡献度矩阵计算方法

在某车站某方向站台，客流需求过剩、站台滞留的情况下，如果新增运力则该方向后续断面客流也会增加，后续各断面客流增加的幅度和以该车站为O，其他车站为D的客流贡献程度有关。理论情况下，从OD客流的角度来看，如果在N_0车站新增部分客流Num^{New}，则这部分客流可能前往后续的车站N_1，N_2，…，N_n，假设依据历史数据可以得到客流前往后续各车站的比例为P_1，P_2，…，P_n，客流贡献度示意图如图1所示。那么，对于任意车站N，经过其后续区间$N_i \rightarrow N_{i+1}$的客流量$Num^{\text{New}}_{N_i \rightarrow N_{i+1}}$为

表1　运营仿真模型参数定义和说明

Tab.1　Definition and explanation of operational simulation model parameters

名称	参数	解释	采集方式
原始站台平均滞留人数	$R_{N^d}^{\mathrm{Ori}}$	在车站N的d方向站台的小时平均滞留人数	视频监控获取
原始站台平均排队人数	$W_{N^d}^{\mathrm{Ori}}$	在车站N的d方向站台的小时平均排队(候车)人数	视频监控获取
推演后站台平均滞留人数	$R_{N^d}^{\mathrm{New}}$	在车站N的d方向站台的小时平均滞留人数	计算所得
推演后站台平均排队人数	$W_{N^d}^{\mathrm{New}}$	在车站N的d方向站台的小时平均排队人数	计算所得
历史断面客流	$PF_{N\to N-1}^{\mathrm{Ori}}$	常态下由车站N至车站$N-1$的区间，历史小时断面客流	由线网中心获取
推演断面客流	$PF_{N\to N-1}^{\mathrm{New}}$	该仿真场景下由车站N至车站$N-1$的区间，推演预测得到的小时断面客流	计算所得
原始断面能力	$C_{N\to N-1}^{\mathrm{Ori}}$	常态下由车站N至车站$N-1$的区间，历史小时断面能力	通过运行图计算获取
仿真断面能力	$C_{N\to N-1}^{\mathrm{New}}$	该仿真场景下由车站N至车站$N-1$的区间，运力调整下的新断面能力	推演计算获取
历史断面满载率	$F_{N\to N-1}^{\mathrm{Ori}}$	常态下由车站N至车站$N-1$的区间，历史小时断面满载率	由线网中心获取
推演断面满载率	$F_{N\to N-1}^{\mathrm{New}}$	该仿真场景下由车站N至车站$N-1$的区间，推演预测得到的小时断面满载率	推演计算获取
小时进站人数	In_N	历史或短时预测条件下车站N的小时进站人数，不区分方向	历史数据或短时预测所得
小时出站人数	Out_N	历史或短时预测条件下车站N的小时出站人数，不区分方向	历史数据或短时预测所得
限制满载率	φ	最大满载率限制，通常为100%~120%的固定参数	用户输入
车站客流-后续区间贡献度矩阵	A	车站新增乘车客流对后续区间流量的影响	计算获取

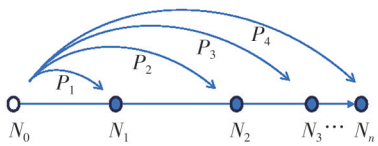


图1　客流贡献度示意图

Fig.1　Schematic diagram of passenger flow contribution

$$Num_{N_i\to N_{i+1}}^{\mathrm{New}} = Num_{\mathrm{New}} - \sum_{i=0}^{i} Num^{\mathrm{New}} \cdot P_i \tag{1}$$

对区间$N_i \to N_{i+1}$的贡献率$r_{N_i\to N_{i+1}}^{\mathrm{New}}$为

$$r_{N_i\to N_{i+1}}^{\mathrm{New}} = \frac{Num_{N_i\to N_{i+1}}^{\mathrm{New}}}{Num^{\mathrm{New}}} \tag{2}$$

在可获取OD间的历史流量的条件下，可由历史数据计算各车站的$r_{N_i\to N_{i+1}}^{\mathrm{New}}$集合，可反映一条线路某方向下各个入站客流的移动趋势和区间贡献程度。该参数可能会对后续的客流分布有较大的影响，是本模型较为主要的误差来源。假设某站进站客流的流向分布与历史该时段该车站乘客进站后前往车站的分布趋势一致，即可计算得到各车站的贡献度矩阵，以长沙地铁6号线上行(谢家桥->黄花机场T1T2)某时段客流数据为例，得到车站客流-后续区间贡献度矩阵表$\boldsymbol{A}$如表2所示。该客流贡献度矩阵可离线获取，存储为静态的结构化数据。

表2　车站客流-后续区间贡献度矩阵表A

Fig.2　Station passenger flow and subsequent section contribution matrix table A

贡献区间 / 起始车站	谢家桥—象鼻窝	象鼻窝—中塘	中塘—一师范西校区	一师范西校区—长庆	长庆—和馨园	和馨园—长丰	长丰—麓谷体育公园	麓谷体育公园—麓谷公园	麓谷公园—涧塘	…
谢家桥	1	0.956	0.927	0.878	0.746	0.688	0.645	0.625	0.595	…
象鼻窝	0	1	0.990	0.946	0.834	0.766	0.690	0.670	0.642	…
中塘	0	0	1	0.938	0.62	0.575	0.487	0.470	0.430	…
一师范西校区	0	0	0	1	0.957	0.870	0.761	0.734	0.677	…
长庆	0	0	0	0	1	0.850	0.692	0.643	0.597	…
和馨园	0	0	0	0	0	1	0.921	0.888	0.828	…
长丰	0	0	0	0	0	0	1	0.976	0.941	…
麓谷体育公园	0	0	0	0	0	0	0	1	0.951	…
麓谷公园	0	0	0	0	0	0	0	0	1	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	1

2.3　输入输出设计

在推演算法中，表2的车站客流–后续区间贡献度矩阵表$\boldsymbol{A}$可作为固定值，或根据出站总量历史情况或出站总量短时预测情况动态变化。由于客流输入、运力调整会引发线路多个区间断面客流的连锁反应，推演的线路客流态势目标即为线路断面客流量的变化情况、满载率变化情况。设计线路某方向推演算法的模型输入、输出，推演算法输入输出表B如表3所示。

2.4　算法设计

2.4.1　考虑因素

运力的调整，可能会带来断面客流的改变，这和原始供需关系的匹配程度有关。在车站N的d方向站台上，有2种客流监测指标，分别为站台平均排队人数W_{N^d}和站台平均滞留人数R_{N^d}，假设N站在上行的方向将驶向$N-1$站，若在N站的站台平均滞留人数>0时，意味着其前行方向断面$N \rightarrow N-1$存在接近满载的情况，列车能力被占满，导致乘客滞留。假设在获取小时平均站台滞留人数、站台排队人数、断面流量、断面满载率的基础上，利用上述4类输入数据，研究在运力调整状态、突发大客流情况下的线路客流态势推演算法，为单线的客流态势推演提供数据支持。

在推演中，重点考虑下列因素。

（1）运力调整导致的线路断面客流量、断面满载率的变化。

（2）客流承载量变化可能导致站台排队人数和滞留人数的变化。

（3）上游区间客流承载量变化对下游断面满足率产生的影响。

2.4.2　运力调整条件下客流态势推演算法

本算法模拟在运力调整下断面客流量与运能、滞留人数之间的匹配与变化关系，考虑2.4.1节中的因素分场景进行算法模拟。运力调整分为运力增大和运力减小，设推演研究时段共有i个，则每个研究时段i有相应的列车集合$train_list_i$，则有相应的输入输出表B_i，运力调整条件下推演算法如表4所示，推演运输能力提升和运力降低时，客流量随着运力调整而变化的情况。

2.4.3　单站突发大客流态势推演算法

假设大客流施加车站为S_{HPF}，客流扩增倍数为ω，大客流场景的客流贡献度分布与历史同期情况的客流贡献度分布一致。大客流车站的研究时段共有i个，则每个研究时段i有相应的列车集合$train_list_i$，共有$train_sum_i$个列车，则有相应的输入输出表B_i。单站大客流下推演算法如表5所示。

3　算法验证

本单线运营仿真模型不依赖于OD客流数据，模型推演目标旨在运力调整条件、大客流场景下对线路断面客流、断面满载率变化趋势进行合理推演。应用场景如下。①面临短时客流增长或远期客流增长下的客流，在实时监测情况下进行运力调整后线路的断面客流、断面满载率变化情况；②单站突发大客流，线路在大客流时段的断面客流、断面满载率变化情况。将本模型的测试结果与基于客流OD的精细化仿真模型的仿真结果进行对比，验证本轨道交通单线运营仿真模型在不依赖于OD客流数据条件下的准确性与可行性。

利用2022年9月14日长沙地铁6号线上行方向真实客流OD数据和列车时刻表数据进行微观个体仿真，输出小时断面客流、车站平均站台排队人数、车站平均站台滞留人数，依据此真实数据模拟在实际业务场景中所获取的非OD客流数据，作为本模型的输入，用于测试仿真模型的准确性，得到在不同客流量、运力调整情况下的模型推演值；与此同时，通过长沙地铁6号线精细化仿真模型仿真得到在不同客流量、运力调整情况下的模拟真实

表3　推演算法输入输出表B

Tab.3　Deduction algorithm input/output table B

输入	输入	输入	输出	输入	输入	输入	输入	输出	输出
区间名称 Sectionname	时段内列车数 $train_sum_i$	原始断面客流 $PF^{Ori}_{N\rightarrow N-1}$	计算断面客流 $PF^{New}_{N\rightarrow N-1}$	原始断面能力 $C^{Ori}_{N\rightarrow N-1}$	仿真断面能力 $C^{New}_{N\rightarrow N-1}$	原始站台平均滞留人数 $R^{Ori}_{N^d}$	原始站台平均排队人数 $W^{Ori}_{N^d}$	推演后站台平均滞留人数 $R^{New}_{N^d}$	推演后站台平均排队人数 $W^{New}_{N^d}$
区间n									

表4　运力调整条件下推演算法

Tab.4　Deduction algorithm under capacity adjustment conditions

遍历输入输出表B_i：

按序输入推演算法输入输出表B_i中每一行数据：

*if*该行数据中，$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}$ ！ = 0，则令：

$$PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}=PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}$$

*if*运输能力提升时：

if $PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}<C^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}\times\varphi$ and $R^{\mathrm{New}}_{N^d}$==0(当原始断面客流小于运能时)：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}\div\dfrac{C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}}{C^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}$

$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=0$

else(当原始客流量等于运能时或站台有滞留时)：

if $C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}\times\varphi>=PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}+R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}+R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$

$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=0$

$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}-R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$

else：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}\times\varphi$

$$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}\times\left[1-\frac{PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}{PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}\right]$$

$$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}\times\left[1-\frac{PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}{PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}\right]$$

if $PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}>PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$(在上游流量增加后，同时也给后续区间带来客流)：

$deltaPF=PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

遍历后续n个断面*sectionname*和矩阵$\boldsymbol{A}$中的贡献度值$r^{N}_{N_k\to N_{k-n}}$：

使后续断面的$PF^{\mathrm{New}}_{N_k\to N_{k-n}}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N_k\to N_{k-n}}+deltaPF\times r^{N}_{N_k\to N_{k-n}}$

更新推演算法输入输出表中后续区间的$PF^{\mathrm{New}}_{N_k\to N_{k-n}}$

else：运力降低时

if $PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}<C^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}\times\varphi$ and $R^{\mathrm{New}}_{N^d}$==0(当原始断面客流小于运能时)：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}\div\dfrac{C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}}{C^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}$

$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=0$

else(当原始客流量等于运能时或站台有滞留时)：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}\times\varphi$

if $R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}>0$：

$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}+\left|C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}\times\varphi-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}\right|\times0.5$

$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}+\left|C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}\times\varphi-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}\right|\times0.5$

else：

$$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}\div\frac{C^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}}{C^{Ori}_{N\to N-1}}$$

$$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=\left|\frac{PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}}{PF^{Ori}_{N\to N-1}}\right|\times W^{\mathrm{New}}_{N^d}$$

if $PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}<PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$：

$deltaPF=PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

遍历后续n个断面*sectionname*和矩阵$\boldsymbol{A}$中的贡献度值$r^{N}_{N_k\to N_{k-n}}$：

使后续断面的$PF^{\mathrm{New}}_{N_k\to N_{k-n}}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N_k\to N_{k-n}}+deltaPF\times r^{N}_{N_k\to N_{k-n}}$，并更新后续区间的$PF^{\mathrm{New}}_{N_k\to N_{k-n}}$

计算中间量$R^{\mathrm{delta}}_{N^d}=R^{\mathrm{New}}_{N^d}-R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$，将本轮输入输出表$B_i$中的每一行的$R^{\mathrm{delta}}_{N^d}$，与次轮输入输出表$B_{i+1}$中的$R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$相加、更新为$R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$作为次轮的输入。

最终输出本轮输入输出表B_i中的计算断面客流$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}$

值，与模型推演值进行对比，测试验证流程如图2所示。

3.1　输入数据集

进行验证所需客流类型如下。①断面客流类：分方向小时断面客流；②车站客流类：分方向站台平均排队人数、分方向站台滞留人数；③时刻表类：计划运行图时刻表数据。为验证模型算法的有效性及适用性，研究对象为长沙地铁6号线上行方

表5　单站大客流下推演算法

Tab.5　Deduction algorithm under single-station large passenger flow

遍历输入输出表B_i

按序输入推演算法输入输出表B_i中每一行数据：

*if*该行数据中，断面的初始车站！=大客流施加车站S_{HPF}，则令：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

$W^{\mathrm{New}}_{N^d}=W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$

$R^{\mathrm{New}}_{N^d}=R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$

*if*该行数据中，断面的初始车站==大客流施加车站S_{HPF}，则大客流添加开始：

对于该大客流施加车站S_{HPF}：

区间剩余能力$RC^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}=C^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}-PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$，

需求客流$DPF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}=(W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}-R^{\mathrm{Ori}}_{N^d})\times\omega\times train_sum_i$，

后续区间集合$\{sectionname\}_i$，

该断面实际增量$add^{\mathrm{Act}}_{N\to N-1}=0$，

if $DPF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}<=RC^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=PF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}+DPF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

$add^{\mathrm{Act}}_{N\to N-1}=DPF^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

else：

$PF^{\mathrm{New}}_{N\to N-1}=C^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

$add^{\mathrm{Act}}_{N\to N-1}=RC^{\mathrm{Ori}}_{N\to N-1}$

if $add^{\mathrm{Act}}_{N\to N-1}>0$：(增加的断面客流要给后续的区间都加上客流)

*foreach*后续区间*after_sec*在$\{sectionname\}_i$中的：

在矩阵表$\boldsymbol{A}$中找到S_{HPF}对*after_sec*的贡献程度$r^{S_{HPF}}_{after_sec}$

理论新增客流$add^{\mathrm{ex}}_{after_sec}=add^{\mathrm{Act}}_{N\to N-1}\times r^{S_{HPF}}_{after_sec}$

if $RC^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}\geqslant add^{\mathrm{ex}}_{after_sec}$：

$PF^{\mathrm{New}}_{after_sec}=PF^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}+add^{\mathrm{ex}}_{after_sec}$

$W^{\mathrm{New}}_{after_sec}=W^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}$

$R^{\mathrm{New}}_{after_sec}=R^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}$

else：

后续断面满载，导致后续车站$S_{HPF}+n$原计划能上车的人不能上车$PF^{\mathrm{New}}_{after_sec}=RC^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}$

断面流量差额$Gap^{\mathrm{New}}_{after_sec}=PF^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}+add^{\mathrm{ex}}_{after_sec}-RC^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}$

车均差额$Gap^{\mathrm{train}}_{after_sec}=Gap^{\mathrm{New}}_{after_sec}\div train_sum$

$W^{\mathrm{New}}_{after_sec}=W^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}+Gap^{\mathrm{train}}_{after_sec}$

$R^{\mathrm{New}}_{after_sec}=R^{\mathrm{Ori}}_{after_sec}+Gap^{\mathrm{train}}_{after_sec}$

寻找*after_sec*的后续区间$\{sectionname\}_{more}$，遍历集合中个区间的贡献度$r^{S_{HPF}+n}_{more_after_sec}$

使后续断面流量减少：$PF^{\mathrm{Ori}}_{more_after_sec}=PF^{\mathrm{Ori}}_{more_after_sec}-Gap^{\mathrm{New}}_{after_sec}\times r^{S_{HPF}+n}_{more_after_sec}$

计算中间量$R^{\mathrm{delta}}_{N^d}=R^{\mathrm{New}}_{N^d}-R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$，$W^{\mathrm{delta}}_{N^d}=W^{\mathrm{New}}_{N^d}-W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$

将本轮输入输出数据表B_i中的每一行的$R^{\mathrm{delta}}_{N^d}$和$W^{\mathrm{delta}}_{N^d}$，与次轮输入输出表B_{i+1}中的$R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$和$W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$相加、更新为$R^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$和$W^{\mathrm{Ori}}_{N^d}$作为次轮的输入

最终输出本轮输入输出表B_i中的计算断面客流$PF^{New}_{N\to N-1}$

向谢家桥—黄花机场T1T2，仿真粒度为小时，为不同场景的测试设计不同数据集。

（1）在运力调整场景下分别测试模拟早高峰不同客流情况下(原始客流、未来客流增长、远期客流增长)、不同运力调整措施下(运力增长、下降)的客流随运力调整而变化的情况，运力调整场景测试数据集如表6所示。

（2）为模拟在实时条件下发生的单站突发大客流场景，分别测试不同车站、不同时段、不同增长倍数情况下，大客流的发生对线路断面流量及满载率的影响情况，单站突发大客流场景测试数据集如表7所示。

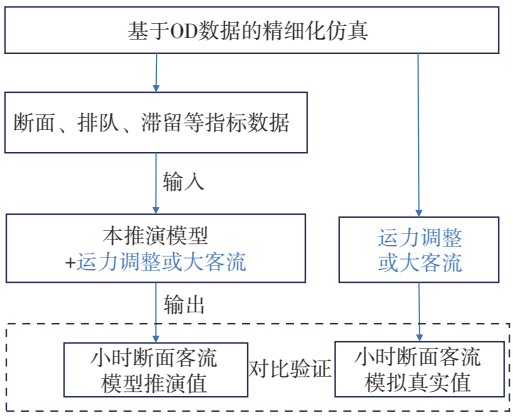


图2　测试验证流程

Fig.2　Verification process of test

3.2　结果验证

3.2.1　运力调整场景

长沙地铁6号线上行方向区间序号对照表如表8所示。

分别对原始客流、未来客流增长、远期客流增长3种客流场景下的早高峰客流进行仿真推演，得到断面客流和断面满载率，早高峰原始客流验证情况如图3所示，早高峰–未来客流增长验证情况如图4所示，早高峰–远期客流验证情况如图5所示，其中蓝色折线代表原始客流，橙色折线代表模型推演值(本模型所得)，绿色折线代表模拟真实值(OD客流仿真模型所得)。

在客流量较小且运力均有富余的情况下，运力的变化不会引起断面客流量的变化，满载率随运力调整而变化，断面客流量的原始客流、模型推演值、模拟真实值均不发生变化，结果如图3所示，3种折线重合。

模拟客流量较大、运力不足的场景下，由于部分客流在站台排队、滞留，运力调整会导致可乘车乘客的数量发生变化，从而导致断面客流量及满载

表6　运力调整场景测试数据集

Tab.6　Test dataset for changes in capacity adjustment scenario

测试样例序号	数据集		
	客流时段	客流量状态	运力调整测试
1	早高峰时段(7:30—8:30)	原始客流情况(2022年9月14日客流)	运力增长为原运力的2倍
2			运力减少为原运力的0.8倍
3		未来客流增长情况(全线客流扩增为原客流的1.7倍)	运力增长为原运力的2倍
4			运力减少为原运力的0.8倍
5		远期客流增长情况(全线客流扩增为原客流的3倍)	运力增长为原运力的2倍
6			运力减少为原运力的0.8倍

表7　单站突发大客流场景测试数据集

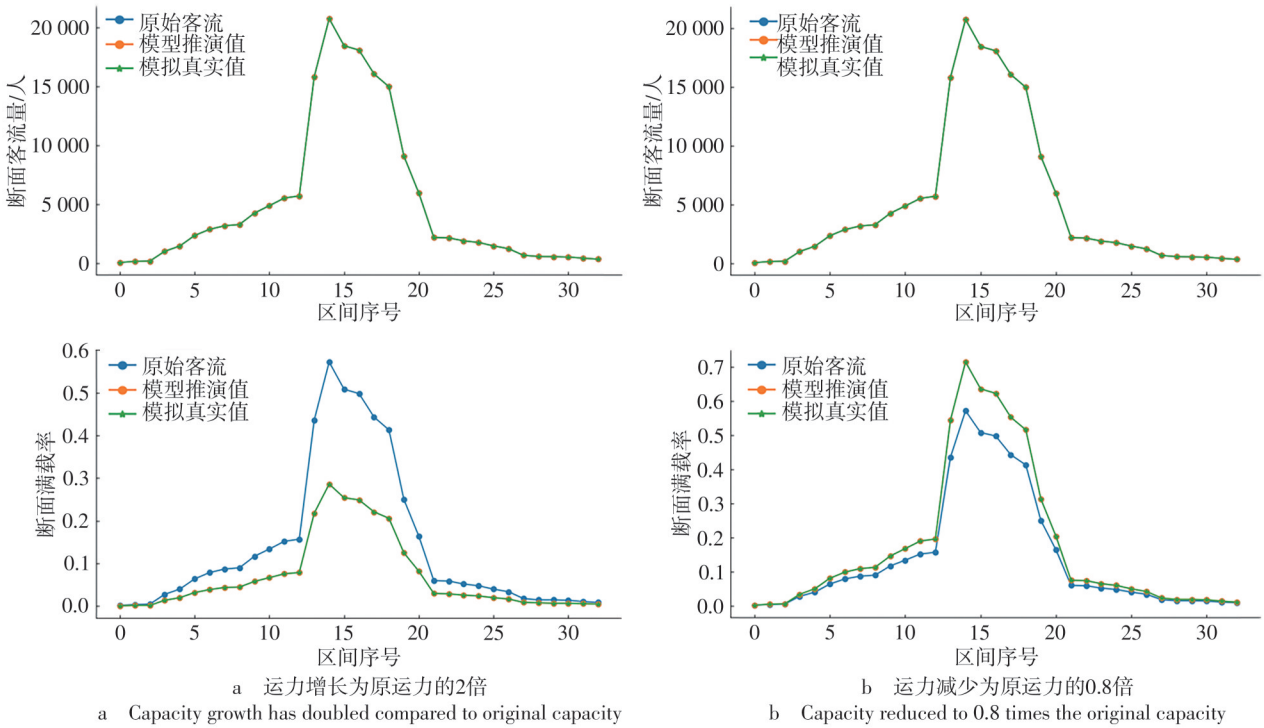
Tab.7　Test dataset for sudden single-station large passenger flow scenario

测试样例序号	数据集		
	车站客流时段	大客流车站	大客流强度
1	早高峰时段(8:00—9:00)	六沟垅	原始进站流量的10倍
2	午平峰时段(14:00—15:00)	湘雅三医院	原始进站流量的20倍
3	晚高峰时段(18:00—19:00)	文昌阁	原始进站流量的15倍

表8　长沙地铁6号线上行方向区间序号对照表

Tab.8　Comparison of section numbers in upward direction of Changsha Metro Line 6

序号	区间名	序号	区间名	序号	区间名
0	谢家桥—象鼻窝	11	白鸽咀—湘雅三医院	22	花桥—隆平水稻博物馆
1	象鼻窝—中塘	12	湘雅三医院—六沟垅	23	隆平水稻博物馆—农科院农大
2	中塘—一师范西校区	13	六沟垅—文昌阁	24	农科院农大—东湖
3	一师范西校区—长庆	14	文昌阁—湘雅医院	25	东湖—韶光
4	长庆—和馨园	15	湘雅医院—烈士公园南	26	韶光—龙华
5	和馨园—长丰	16	烈士公园南—迎宾路口	27	龙华—檀木桥
6	长丰—麓谷体育公园	17	迎宾路口—窑岭湘雅二医院	28	檀木桥—曹家坪
7	麓谷体育公园—麓谷公园	18	窑岭湘雅二医院—朝阳村	29	曹家坪—龙峰
8	麓谷公园—润塘	19	朝阳村—芙蓉区政府	30	龙峰—大路村
9	润塘—湖南工商大学	20	芙蓉区政府—人民东路	31	大路村—木马墩
10	湖南工商大学—白鸽咀	21	人民东路—花桥	32	木马墩—黄花机场T1T2



a　运力增长为原运力的2倍
a　Capacity growth has doubled compared to original capacity

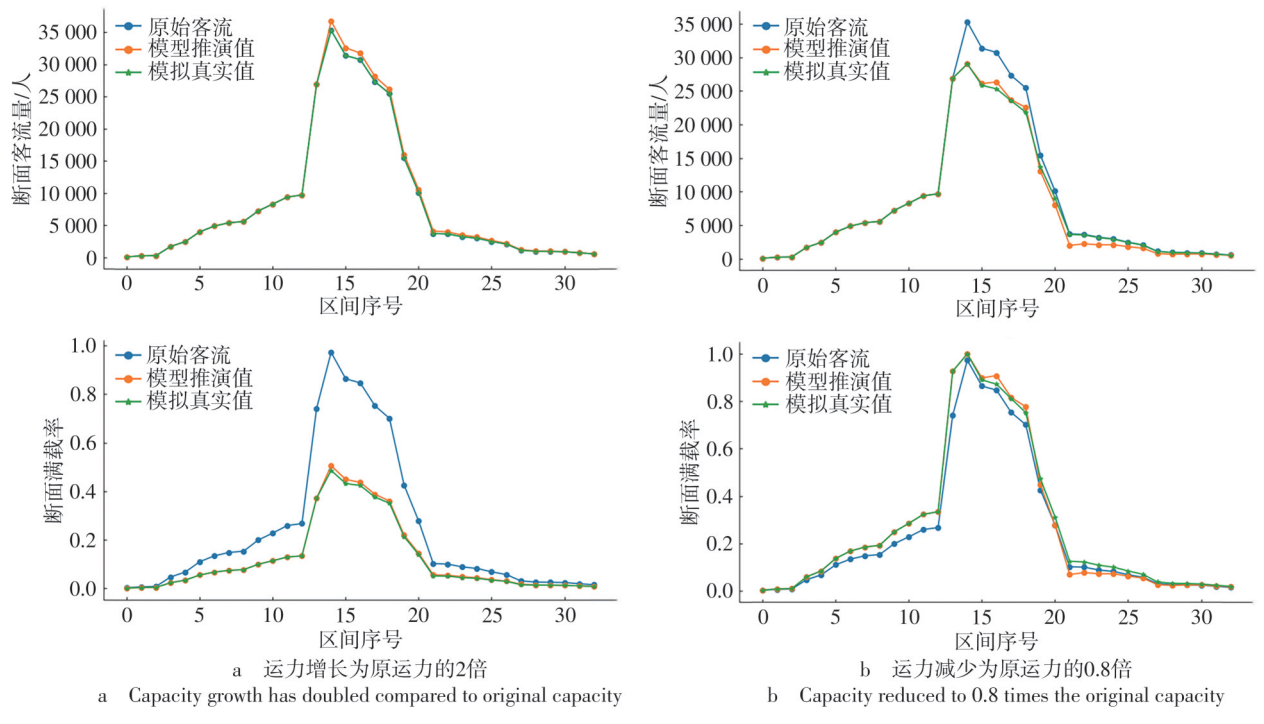
b　运力减少为原运力的0.8倍
b　Capacity reduced to 0.8 times the original capacity

图3　早高峰原始客流验证情况

Fig.3　Verification of original passenger flow during morning rush hours

率的变化，图4中，出现的最大断面满载率误差在5.1%。

模拟远期客流，继续增加线路整体客流，假设客流量变为常态客流水平的3倍，已经发现部分车站的乘客产生大量滞留。在此场景下，测试运力调整后线路断面客流及满载率的变化情况，如图5早

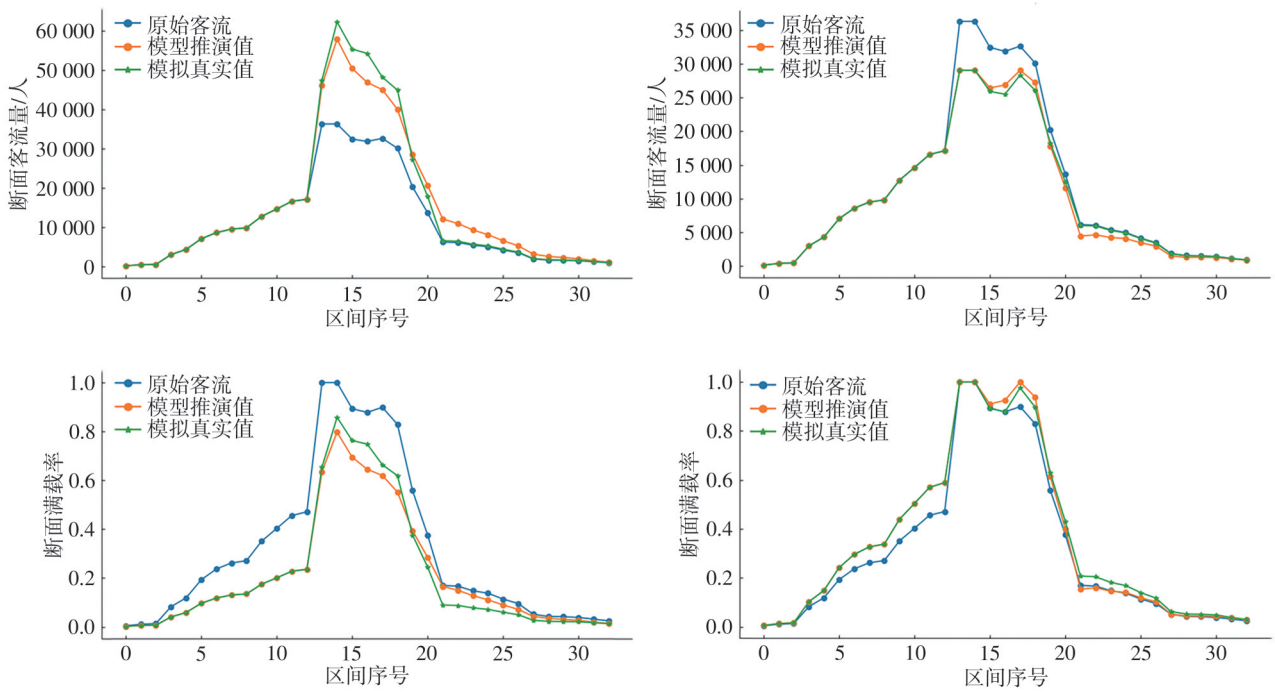


a　运力增长为原运力的2倍
a　Capacity growth has doubled compared to original capacity

b　运力减少为原运力的0.8倍
b　Capacity reduced to 0.8 times the original capacity

图4　早高峰-未来客流增长验证情况

Fig.4　Verification of morning rush hours and future passenger flow growth



a　运力增长为原运力的2倍
a　Capacity growth has doubled compared to original capacity

b　运力减少为原运力的0.8倍
b　Capacity reduced to 0.8 times the original capacity

图5　早高峰–远期客流验证情况

Fig.5　Verification of morning rush hours and long-term passenger flow

高峰–远期客流验证情况，线路区间断面出现的最大断面满载率误差在10.3%。

3.2.2　大客流场景

测试3个客流较大的车站六沟垅、湘雅三医院、文昌阁，早高峰–六沟垅站大客流断面满载率推演情况如图6所示，午平峰–湘雅三医院站大客流断面满载率推演情况如图7所示，晚高峰–文昌阁站大客流断面满载率推演情况如图8所示，结果显示最大误差不超过5.5%。

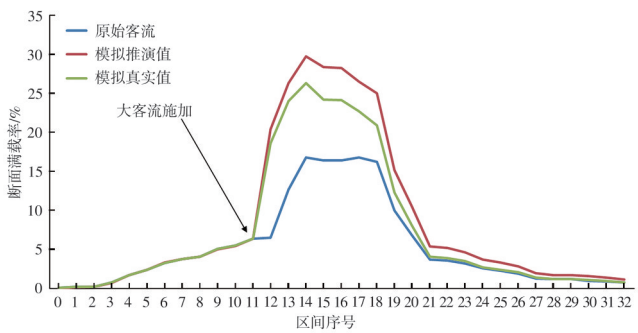


图7　午平峰–湘雅三医院站大客流断面满载率推演情况

Fig.7　Deduction of section full-load rate under high passenger flow in Xiangya Third Hospital Station at afternoon off-peak hour

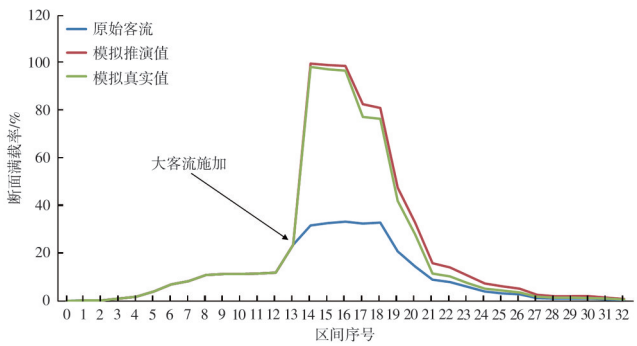


图6　早高峰–六沟垅站大客流断面满载率推演情况

Fig.6　Deduction of section full-load rate under high passenger flow in Liugoulong Station at morning rush hour

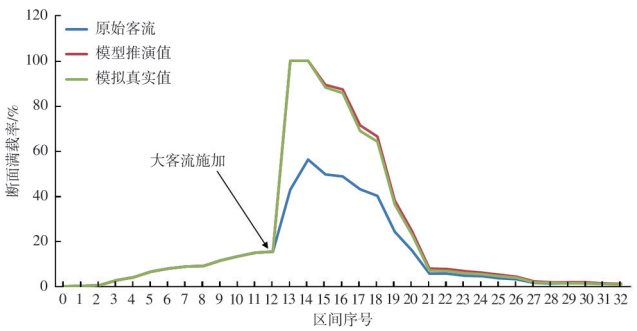


图8　晚高峰–文昌阁站大客流断面满载率推演情况

Fig.8　Deduction of section full-load rate under high passenger flow in Wenchang Pavilion Station at night peak hour

4　结论

面向单线运营仿真推演场景，提出不依赖于OD客流数据的仿真推演方法，以站台人数数据、断面客流数据作为输入，在特殊运营场景下对线路运营趋势进行推演，经过算法验证测试，可以得到以下结论。

（1）针对运力调整场景，在不同客流需求的背景下，本推演模型能依据不同运力调整措施，准确预估线路断面客流变化趋势。①客流量较小场景下，断面客流不会依据运力调整而发生变化，满载率随运力调整而变化；②客流增长场景下，由于部分客流在站台排队、滞留的原因，运力调整会导致可乘车乘客的数量发生变化，从而导致断面客流量及满载率的变化，本模型可较为准确地预估此变化，最大的断面满载率误差在10.3%。

（2）针对单站突发大客流场景，本模型可以较好地预估施加单站大客流后后续断面区间的断面客流及满载率变化趋势，最大的断面满载率误差在5.5%。

本模型及相应算法，可以适用于不依赖于实时OD数据条件下的轨道交通单线运营仿真，可结合综合视频监控和站台密度人数估计算法获得站台人数，较依赖于OD数据的推演方法具有优势，可以完成对运力调整后或发生单站大客流后的线路运营状态进行合理化推演。

未来还有2个可以继续优化的方向：①可以结合实时条件下的客流预测结果，掌握大客流站的客流去向分布，对于线路的仿真推演效果更好；②算法同样适用于15 min粒度及30 min粒度下的推演，但推演效果的鲁棒性不及60 min粒度。

参考文献：

[1] 朱　炜，田一含，张炜晗. 城市轨道交通网络清分理论与实践发展综述[J]. 铁道运输与经济，2025，47(9)：44-57.
ZHU Wei，TIAN Yihan，ZHANG Weihan. Development of Theory and Practice in Fare and Passenger Flow Clearing for Urban Rail Transit Networks：A Review[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(9)：44-57.

[2] 蒋秋路，马　驷. 基于Anylogic的城市轨道交通线网客流推演仿真[J]. 综合运输，2022，44(10)：84-89，152.
JIANG Qiulu，MA Si. Anylogic-Based Passenger Flow Simulation Method for Urban Rail Transit Networks[J]. China Transportation Review，2022，44(10)：84-89，152.

[3] 姚向明，赵　鹏，乔　珂. 城市轨道交通网络客流分布仿真模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2012，12(6)：52-59.
YAO Xiangming，ZHAO Peng，QIAO Ke. Modeling Dynamic Passenger Flow Distribution of Urban Rail Transit Network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2012，12(6)：52-59.

[4] XU R H，SONG X Y，WANG F S，et al. Assessment Method for Dynamic Impact of Large Passenger Flow on Urban Rail Transit Network：A Case Study on Chengdu East Railway Station[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2022，2676(4)：296-307.

[5] 蒋　熙，苗建瑞，刘　军. 面向城市轨道交通网络规划的多粒度仿真建模[J]. 铁道工程学报，2014，31(9)：115-120.
JIANG Xi，MIAO Jianrui，LIU Jun. Multi-Resolution Modeling and Simulation for Urban Rail Transit Network Planning[J]. Journal of Railway Engineering Society，2014，31(9)：115-120.

[6] 冯佳平. 实时AFC数据接入下城轨路网客流动态分布建模与仿真[D]. 北京：北京交通大学，2018.

[7] 王祥进. 突发事件下城轨列车运行调整及客流动态推演研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[8] 王芳盛. 城市轨道交通网络列车开行方案协同优化与调整[D]. 上海：同济大学，2022.

[9] 尹浩东. 运营中断条件下城市轨道交通乘客出行行为建模与客流诱导优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2017.

[10] 李　伟，徐瑞华. 突发事件下地铁网络乘客出行行为仿真模型[J]. 华东交通大学学报，2015，32(2)：46-53.
LI Wei，XU Ruihua. Simulation of Passenger Travel Behaviors on Urban Rail Transit in Emergency[J]. Journal of East China Jiaotong University，2015，32(2)：46-53.

[11] SUN Y X，LENG B，GUAN W. A Novel Wavelet-SVM Short-Time Passenger Flow Prediction in Beijing Subway System[J]. Neurocomputing，2015，166：109-121.

[12] LIU H R，WANG Z，FANG Z M. Integrating Hybrid Deep Learning and Path Allocation for Real-Time Inbound Passenger Flow Prediction and Anomaly Detection in Urban Rail Transit[J]. Information Sciences，2025，692：121621.

[13] ZUO J，HE M，YU Z，et al. Short-Term Passenger Flow Prediction of Urban Rail Transit on Bayesian Optimization-

Bidirectional Long Short-Term Memory with Causal Temporal Pattern Attention[J]. International Journal of Transportation Science and Technology，2026(21)：109-124.

[14] YANG X，XUE Q C，DING M L，et al. Short-Term Prediction of Passenger Volume for Urban Rail Systems：A Deep Learning Approach Based on Smart-Card Data[J]. International Journal of Production Economics，2021，231：107920.

[15] WU J X，HE D Q，LI X W，et al. A Time Series Decomposition and Reinforcement Learning Ensemble Method for Short-Term Passenger Flow Prediction in Urban Rail Transit[J]. Urban Rail Transit，2023，9(4)：323-351.

[16] LENG B，ZENG J B，XIONG Z，et al. Probability Tree Based Passenger Flow Prediction and Its Application to the Beijing Subway System[J]. Frontiers of Computer Science，2013，7(2)：195-203.

[17] 凌　晨，许心越，叶子扬，等. 城市轨道交通短时客流预测研究综述及展望[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：44-55.
LING Chen，XU Xinyue，YE Ziyang，et al. Review and Prospects of Short-Term Passenger Flow Prediction in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：44-55.

[18] 张力丹. 公交车厢内拥挤度和站台候车人数检测算法研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.

[19] 李　瑞，李　平，代明睿，等. 基于铁路客站视频多视角特征图投影融合的人群密度估计模型[J]. 中国铁道科学，2022，43(3)：182-192.
LI Rui，LI Ping，DAI Mingrui，et al. Crowd Counting Estimation Model Based on Multi-View Projection Fusion of Railway Passenger Station Video[J]. China Railway Science，2022，43(3)：182-192.

[20] 张金雷，陈　瑶，杨立兴，等. 基于计算机视觉的轨道交通站内客流识别与预测[J]. 铁道科学与工程学报，2023，20(10)：3696-3704.
ZHANG Jinlei，CHEN Yao，YANG Lixing，et al. Computer Vision-Based Detection and Prediction Model for Passenger Flows Inside Urban Rail Transit Stations[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2023，20(10)：3696-3704.

[21] 晏小芬. 基于智能视频分析技术的车站客流监测及预警系统研究[J]. 绿色建造与智能建筑，2023(11)：106-110.
YAN Xiaofen. Research on Station Passenger Flow Monitoring and Early Warning System Based on Intelligent Video Analysis Technology[J]. Green Construction and Intelligent Building，2023(11)：106-110.

(责任编辑　魏　然)