

# 基于车站客流密度系数监控及预警的 地铁线网客流联控研究\*

刘菊美

(广州地铁集团有限公司, 510330, 广州//高级工程师)

**摘要** 结合多样化的客流需求实施精准的客流控制,是当前城市轨道交通网络化运营管理亟需解决的重要问题。在传统的点线面客流控制方式的基础上,创新性地建立了基于车站客流密度系数和客流控制效率的线网客运组织联控策略,搭建了城市轨道交通线网客流控制应用平台。本研究实现了对车站客流的即时预警、精准溯源和精细控制,可用于指导线网客控分级预警机制的建立,以及线网联控策略的制定与实施,进而降低客运安全风险、提升客运服务水平。

**关键词** 城市轨道交通;线网客流联控;车站客流密度系数;客流控制效率;线网客流控制应用平台

**中图分类号** U293.1<sup>+</sup>3

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.07.002

## Joint Control of Metro Network Passenger Flow Based on Station Passenger Density Coefficient Monitoring and Early Warning

LIU Jumei

**Abstract** The implementation of accurate passenger flow control considering the diverse passenger flow demands is an important issue for network operation and management of current urban rail transit system. Based on the conventional 'station-line-network' mode for passenger flow control, an innovative joint control strategy for network passenger flow organization based on passenger flow density coefficient and passenger control efficiency in station is established, as well as an application platform. Research realizes real-time early warning, accurate traceability and fine control of station passenger flow, which can be used to guide the establishment of hierarchical early warning mechanism for network passenger control, as well as the formulation and implementation of network joint control strategy, so as to reduce passenger safety risk and to improve passenger service level.

**Key words** urban rail transit; joint control of network passenger flow; station passenger density coefficient; passenger

control efficiency; network passenger flow control application platform

**Author's address** Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510330, Guangzhou, China

广州地铁线网日均客运量 900 万人次已成为常态,在广州市公共交通客流中占比超过 50%。随着线网规模的不断扩大,路网的通达性增强,乘客组成更加多元化,乘客出行时间的跨度更长、换乘途径更多,客流时空分布的波动性更强,因而导致线网客流出行规律和出行特征更为复杂,也更难掌握<sup>[1]</sup>。目前,传统的以现场人员判断为主的客流控制方法由于对主观经验的依赖性较强,已难以满足网络化运营模式下对客流进行精准控制的要求。本文通过研究基于车站客流密度系数和客控效率的地铁网络客运组织联控方法,建立线网客流控制的分级预警机制及线网联控策略,实现对车站客流的即时预警、精准溯源、精细控制。

## 1 地铁客流控制措施概述

目前,广州地铁客流控制(以下简称“客控”)的方式主要分为单站级客流控制(以下简称“站控”)、单线级客流联控(以下简称“线控”)和线网级客流联控(以下简称“网控”)3 种。

站控是指为保障车站内站台、付费区、非付费区的客运安全,在客流持续增长的情况下,采取有效控制措施减缓乘客聚集数量,可分为一级客流控制、二级客流控制、三级客流控制。当单站级客控已无法满足客流疏导需要,需结合多站、多线联控实现对大客流的有效疏导。

在实际的运营管理中,一般选取一些大客流换乘站或高峰高断面车站作为客流的主要控制站(以

\* 广州地铁新一轮线网技术专题研究(运营类)运输服务项目(20K0054)

下简称“主控站”)。在此基础上再选取一些车站作为辅助控制站(以下简称“辅控站”),辅控站的进站客流通常对主控站高峰高断面的贡献度较大,多为主控站所在线路的前方车站或同主控站存在换乘关系的相邻线路车站。当主控站实施单站级客控后仍无法缓解客流压力时,可实施线网联控措施,即:在本线实施线控、在相邻线路实施网控。

## 2 基于车站客流密度系数监控及预警的线网客流联控策略

目前,地铁车站的客控普遍存在启动时机对主观经验依赖性强、客控对乘客出行的影响程度评价难以量化等问题<sup>[2]</sup>,为此,本研究通过引入车站客流密度系数、客控效率等量化指标,结合现场数据进行分析验证,建立基于车站客流密度系数监控及预警的线网联控策略,如图 1 所示。在此理论模型的基础上搭建地铁线网客流控制应用平台(以下简称“线网客控应用平台”),根据计划性运力安排、历史客流规律及动态变化的客流数据,迭代更新线网联控方案,形成科学精细、灵活自纠的客控体系。

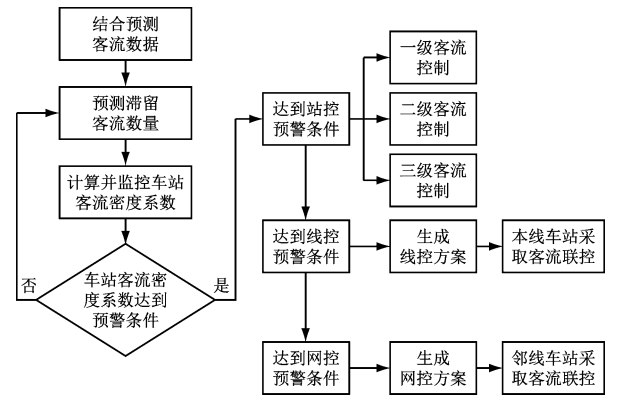


图 1 基于车站客流密度系数监控及预警的线网联控策略

### 2.1 车站客流密度系数的定义及计算

车站客流密度系数的定义为在一个统计周期

内,某车站实时滞留客流数量与有效容纳人数之比,用以表征车站的实时拥挤度<sup>[3]</sup>。车站滞留客流数为车站等候上车人数和可乘车人数的差值。在运力充足情况下,等候上车乘客均能够乘车离开,不存在滞留客流;当运力不足时,可乘车人数小于等候上车人数,则出现滞留客流。车站滞留客流数可通过接入相关客流数据系统,综合断面客流、进站客流、换乘客流等数据计算得到。

车站客流密度系数  $x$ 、车站滞留客流数  $p$  的计算式分别为:

$$x = p/s \tag{1}$$

$$p = Z - (D - C) \tag{2}$$

式中:

- $s$ ——车站区域有效面积内可容纳人数;
- $Z$ ——车站等候上车人数(换乘站包含换入客流);
- $C$ ——列车到达该站完成下客作业后的断面客流;
- $D$ ——列车驶离该站时的断面客流。

### 2.2 基于车站客流密度系数的客控预警机制

#### 2.2.1 单站级客控预警

综合考虑车站站台、站厅付费区(换乘区域、楼扶梯口等处)、非付费区(进闸机处、出入口通道等)设备设施布局 and 有效面积可容纳人数,预设车站客流密度系数,作为启动客控的警戒阈值  $x_0$ 。当线网客控应用平台检测到  $x$  大于  $x_0$  时,线网客控应用平台将自动触发,向车站发出相应级别预警,作为现场执行站控、线控、网控的决策依据<sup>[4]</sup>。

参考 John J. Fruin 博士在《行人规划与设计》中提出的 Los (Level of service, 服务水平) 分级标准,如表 1 所示,将排队空间站立密度分成 A ~ F 6 个等级<sup>[5-6]</sup>。

表 1 Los 分级标准

等级	含义	站立密度/(人/m <sup>2</sup> )
A	自由流水平	0 ~ ≤0.83
B	行人的移动方向不受限制,逆向人流以及交叉人流仅产生较小的冲突	>0.83 ~ ≤1.08
C	少量行人的移动受到周围其他人影响,逆向人流与交叉人流移动遇到困难	>1.08 ~ ≤1.54
D	大部分行人的移动方向受到限制,逆向人流与交叉人流移动非常困难	>1.54 ~ ≤3.59
E	所有行人的移动方向受到限制,逆向人流与交叉人流移动非常困难,需要中途停顿来避免冲突	>3.59 ~ ≤5.38
F	行人行走困难,行走过程中需要不断停顿	>5.38

结合 GB 50157—2013《地铁设计规范》及实际运作经验,地铁高峰时段乘客站立密度与 D 级水平相近,因此,本文综合车站结构、设备布局等具体情况,选取 D 级中适合车站的预警站立密度与最大站立密度( $3.59\text{ 人/m}^2$ )之比作为  $x_0$ 。 $x_0$  可结合不同车站的实际情况进行适当调整。

结合高峰时段的乘客出行规律及计划运力安排,对车站客流进行 15 min 分时预测(为满足客流指标之间的可比性,广州地铁相关客流统计以 15 min 为基准单位),以此测算  $x$  和  $p$ 。当  $x$  大于  $x_0$  时,依次启动各级客流控制。单站级客控预警工作

流程如图 2 所示,其中: $x_1$  为站台客流密度系数,指站台滞留乘客与站台有效面积内可容纳人数之比; $x_2$  为付费区客流密度系数,指付费区滞留乘客与付费区有效面积内可容纳人数之比; $x_3$  为非付费区客流密度系数,指非付费区滞留乘客与非付费区有效面积内可容纳人数之比。当站台滞留乘客超过站台有效面积内可容纳人数时,则  $x_1$  大于  $x_0$ ,付费区出现乘客滞留,若预测滞留持续时间将超过 15 min,则需要实施一级客流控制。付费区、非付费区的情况类同。

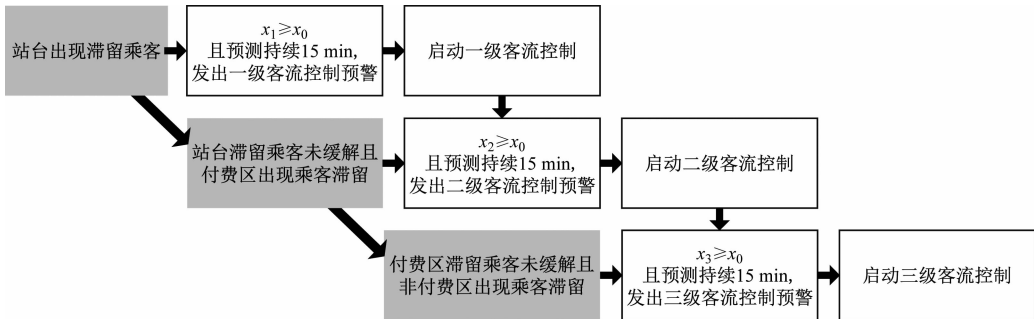


图 2 单站级客控预警工作流程示意图

2.2.2 线网级客控预警

当主控站为换乘站时,在主控站实施单站级客控后,客流压力仍未有效缓解,预测车站各区域客流密度系数仍达到警戒阈值,则可提高客控等级,

逐步实行线网联控。优先选取该主控站中客流压力相对大的线路实施线控;执行线控后,主控站客运压力仍未有效缓解,则在相邻线路实施网控。其工作流程如图 3 所示。

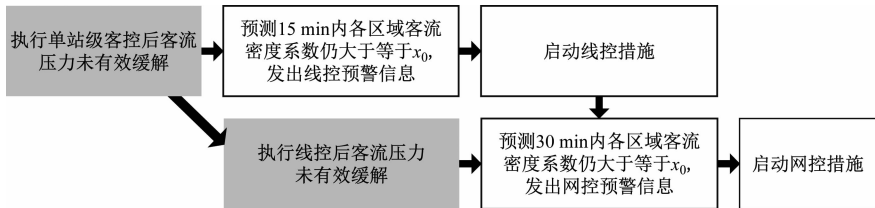


图 3 线网级客控预警工作流程示意图

2.3 引入客控效率的线网客流联控策略编制

在引入客控效率指标、科学选取辅控站的基础上,基于线网客流联控策略算法,线网客控应用平台将生成实时、动态的线网客流联控策略,为本线和邻线车站设置进站阈值,通过系统联动将线网客流联控启动时机及阈值等相关信息推送至各辅控站。线网客流联控计算步骤如下:

2.3.1 科学设定线网联控客流目标值

考虑到车站站台为客流高聚集区域,客流集散风险最大,因此将站台滞留乘客数量作为线网联控客流目标值  $M$ ,即:

$$M = p \tag{3}$$

$M$  也可通过设定列车满载率控制目标的方式进行计算。例如,当列车的目标满载率为 120%、实际的列车满载率为 130% 时,则  $M$  为需要削减的 10% 满载率所对应的线路运能。

2.3.2 综合选取辅控站

通过客流回溯,筛查对主控站大客流来源影响较大的车站,综合考虑对主控站大客流贡献程度、列车运行至主控站时间等多项因素,科学选取辅控站<sup>[7-8]</sup>。引入客控效率  $e$ ,其计算式如下:

$$e = \alpha e_0 + (1 - \alpha) e_1 \tag{4}$$

式中:

$e$ ——辅控站的客控效率;

$e_o$ ——辅控站的 OD(起讫点)贡献度,为该辅控站经过主控站的 OD 客流与所有备选辅控站经过主控站的 OD 客流总和之比;

$e_t$ ——辅控站的时间有效性;

$\alpha$ —— $e_o$  相对  $e_t$  的重要性。

式(4)中, $e_o$  的比例越高,则辅控站限流对主控站的效果越好;辅控站距离主控站越近,客控传递效果越好, $e_t$  的值越大。根据现场客控经验,设列车经由辅控站运行至主控站的时间为  $t_{运}$ ,当  $t_{运} \leq 5$  min 时, $e_t$  取 0.10;当  $5 \text{ min} < t_{运} \leq 10$  min 时, $e_t$  取 0.08;当  $10 \text{ min} < t_{运} \leq 15$  min 时, $e_t$  取 0.06;当  $t_{运} > 15$  min 时, $e_t$  取 0.04;因  $e_o$  较为关键,故本文中  $\alpha$  取 0.8,实际应用中  $\alpha$  可根据实际情况(如对 OD 贡献度、时效性的不同要求)灵活调整。综上可知, $e$  越大,辅控站的客控效能越高、联控效果越好。因此,可结合管控需要,按  $e$  的得分从高至低排序,依次选取一定数量的站点作为辅控站。

2.3.3 计算辅控站的进站阈值

辅控站进站阈值  $R$  是指所选取的辅控车站在统计周期内允许进站的乘客数量,可结合辅控站的 OD 客流分布、预测进站客流、主控站线网联控客流目标值  $M$  计算得出。 $R$  的计算式为:

$$R = E - N \tag{5}$$

$$N = EMY/G \tag{6}$$

式中:

$E$ ——辅控站的预测进站客流量;

$N$ ——辅控站的需要控制进站人数;

$Y$ ——该辅控站经过主控站的 OD 客流量与所有选定辅控站经过主控站的 OD 客流总量之比;

$G$ ——该辅控站经过主控站的 OD 客流量。

2.3.4 服务水平校验

为评估客控对乘客的出行影响,引入辅控站服务水平指标  $F$ ,其定义为辅控车站进站阈值与其预测进站客流量之比。 $F$  值越大,表示客控对乘客出行影响越少,服务水平越高,进而验证客控策略可行。结合广州地铁多年的客控实践经验,兼顾乘客对客控等候时长的接受度(根据乘客调研,客控等候时长不宜大于 10 min), $F$  的取值应不低于 80%。当  $F$  低于 80% 时,乘客客控等候时长大于 10 min,对乘客出行影响较大,乘客出行体验将降低。

$F$  的计算式为:

$$F = R/E \tag{7}$$

3 广州地铁应用实例分析

广州地铁珠江新城站为 3 号线、5 号线换乘站。3 号线在工作日晚高峰时段上行方向的客运压力较大。本文以珠江新城站作为主控站,以珠江新城站 3 号线上行线控为例,对其单线联控策略编制过程进行阐述。

3.1 科学设定线控客流目标值

珠江新城站晚高峰 3 号线上行站台滞留客流情况如表 2 所示。结合现场实际客流情况,18:00 开始 3 号线上行需执行线控,将 18:00—18:15 时段的  $p$  值(372 人)作为  $M$  的第一个目标值。后续结合车站滞留客流量变化情况,对  $M$  进行动态更新。

表 2 珠江新城站晚高峰 3 号线上行站台滞留客流量计算表

时段	Z/人	D/人	C/人	p/人
18:00—18:15	3 907	9 502	5 967	372
18:15—18:30	4 089	11 148	7 620	561
18:30—18:45	3 820	10 949	7 417	288
18:45—19:00	3 893	9 213	5 776	456

3.2 筛选辅控站

3 号线上行列车从起点站开出后,经由 20 个车站后运行至珠江新城站,表 3 为按  $e$  由高至低排序的辅控站筛查列表。根据表 3 选取排名前 10 的车站作为辅控站。当线网客控应用平台自动触发珠江新城站 3 号线上行线控预警时,各辅控站需及时根据客控预案,采取本站的站控措施进行客流管控。

3.3 计算辅控站的进站阈值

将所选的 10 个辅控站点在 18:00—18:15 时段所对应的 OD 客流量、预测进站客流量、主控站线网联控客流量目标值分别代入式(5)、(6),得出各辅控站的进站阈值  $R$  及服务水平值  $F$ ,如表 4 所示。由表 4 可知,基于客控效率  $e$  进行优化筛选后,辅控站的服务水平均在 80% 以上,平均服务水平达 93%,从而验证了联控策略能够在确保联控效果的基础上,有效兼顾了辅控站的乘客出行感受。

广州地铁将此策略在全线网日常工作日及节假日期间的客流管控中予以深化应用,据此编制了工作日早、晚高峰常态化的线网联控方案。联控方案覆盖了广州地铁线网的 52 座车站,有效保障了工作日常态化的客运组织安全。同时,广州地铁非常

表 3 3 号线上行辅控站筛查表

序号	车站	G/人	$e_0$	$t_{\text{运}}/\text{min}$	$e_t$	$e$
1	体育西路站	1 339	0.205	5	0.10	0.184
2	石牌桥站	918	0.140	8	0.08	0.128
3	岗顶站	693	0.106	10	0.08	0.101
4	华师站	691	0.106	11	0.06	0.097
5	林和西站	682	0.104	13	0.06	0.095
6	广州东站	436	0.067	15	0.06	0.065
7	天河客运站	339	0.052	16	0.04	0.049
8	五山站	272	0.042	13	0.06	0.045
9	同和站	204	0.031	26	0.04	0.033
10	燕塘站	152	0.023	18	0.04	0.027
11	京溪南方医院站	136	0.021	24	0.04	0.025
12	永泰站	105	0.016	29	0.04	0.021
13	白云大道北站	84	0.013	31	0.04	0.018
14	梅花园站	73	0.011	21	0.04	0.017
15	龙归站	73	0.011	39	0.04	0.017
16	人和站	63	0.010	44	0.04	0.016
17	嘉禾望岗站	59	0.009	34	0.04	0.015
18	机场北站	45	0.007	51	0.04	0.014
19	机场南站	33	0.005	50	0.04	0.012
20	高增站	7	0.001	46	0.04	0.009

表 4 3 号线上行辅控站 R、F 计算列表

序号	车站	E/人	M/人	Y/%	G/人	R/人	N/人	F/%
1	体育西路站	3 983	372	23.4	1 339	3 724	259	93.4
2	石牌桥站	1 497	372	16.0	918	1 400	97	93.5
3	岗顶站	1 607	372	12.1	693	1 503	104	93.3
4	华师站	1 525	372	12.1	691	1 426	99	93.8
5	林和西站	1 934	372	11.9	682	1 808	126	93.6
6	广州东站	2 931	372	7.6	436	2 741	190	93.5
7	天河客运站	1 341	372	5.9	339	1 254	87	93.2
8	五山站	978	372	4.8	272	914	64	93.0
9	同和站	688	372	3.6	204	643	45	93.0
10	燕塘站	782	372	2.7	152	731	51	93.4

关注客控对辅控站乘客的影响程度,通过定期评估现场乘客配合度、舆情反馈等方式确保客控策略既能有效保障客运组织安全,同时兼顾辅控站乘客的出行感受。针对计划性节前晚高峰、大型活动、展会等带来的大客流冲击,广州地铁在此客控策略基础上编制专项线网联控方案,以有效保障大客流情况下的客运安全。

目前,广州地铁线网的客运强度位居全国第

一,整体线网客运组织安全、有序。2019 年 12 月 31 日,广州地铁线网客运量达到历史最高值(1 156.9 万人次),当日的晚高峰线网共有 12 座主控站执行线网联控,另有共计 70 座辅控站合力缓解主控站的客运组织压力,有效保障了地铁线网超大客流压力下的客运组织安全。

4 广州地铁线网客控应用平台开发

线网客控应用平台构建思路如图 4 所示,其主要模块包括:

1) 车站客流密度系数监控及预警。通过接入线网车站客流数据系统及设备系统等,实现了车站客流密度系数的实时监控,可科学设定线网联控目标、合理选取辅控车站,精细分配辅控站进站阈值、保障辅控站的乘客服务水平。

2) 客控策略适配更新。基于客控预警,综合分析 OD 客流量、预测进站客流量、主控站线网联控客流目标值等数据,动态更新线网联控策略,为本线和邻线辅控站设置进站阈值,并将相关信息推送至各辅控车站,形成科学精细、灵活自纠的客运管控策略。

3) 模块化集成联动。通过采用数字化、系统化方式,实现了客控策略与客运设施的系统联动,针对不同的客流控制模式,可快速联动闸机、导向等客运设施,调整客流流线,并通过车站广播、乘客信息系统、手机应用程序等渠道集成发布客运引导信息,实现了模式化的客运集成联控<sup>[9]</sup>。

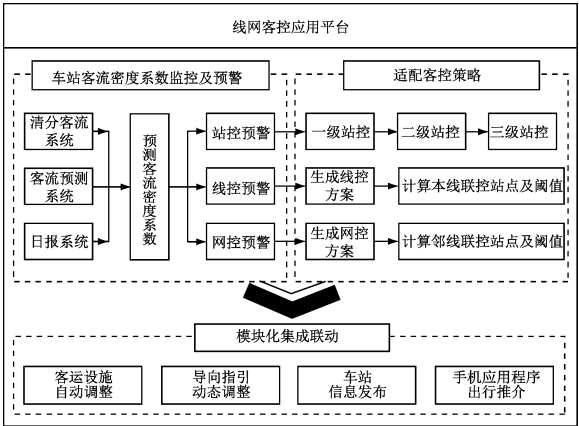


图 4 广州地铁线网客控应用平台的构建思路

5 结语

本文通过创新性地引入车站客流密度系数、客控效率等参数,结合广州地铁线网的客流规律和时

空分布特性,从系统最优的角度,为车站现场客流控制提供了科学的启动时机、制定了精准的联控策略,有效保障了客运安全、提高了管控成效、提升了乘客出行体验。后续将在此基础上,深化自适应客运组织体系的研究,推动线网客控应用平台的运用。

## 参考文献

- [1] 蔡昌俊.城市轨道交通网络化运输组织[M].北京:人民交通出版社,2020:11.
- [2] 姜彦麟,张文韬.西安地铁客流监控预警信息系统可行性研究及分析[J].都市快轨交通.2018(2):8.
- [3] 黄丹芮.基于离散事件仿真优化的城市轨道交通车站客流联动控制系统研究[D].西安:西安交通大学,2019.

- [4] 马媛.基于流体排队模型的地铁车站客流预警研究与动态性能分析[D].成都:西南交通大学.2016.
- [5] 孙元广,杨乃莲,史聪灵,等.基于行人仿真技术的轨道交通多线换乘车站设计研究——以广州天河公园站为例[J].中国安全生产科学技术,2014(10):106.
- [6] 史海欧,孙元广.地铁系统能力和服务水平的若干设计标准探讨[J].城市轨道交通研究,2012(6):23.
- [7] 豆飞,姚向明,张文强,等.大规模城市轨道交通网常态限流方案编制[J].北京工业大学学报,2019(10):988.
- [8] 邹庆茹.城市轨道交通网络高峰客流拥挤管控研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [9] 丁建隆.新时代城市轨道交通创新与发展(广州2019)[M].北京:人民交通出版社,2019:44.

(收稿日期:2021-02-09)

(上接第3页)

有限,另一方面是城市轨道交通企业对基于云平台的业务管理优势还在逐步认知和探索的过程中。因此,基于诸方建立共识认知后的整体大数据云价值体系的闭环构建才是关键。

### 3.5 规划、设计及咨询的定位

设计、咨询从业人员是数字化、智能化运维应用价值目标认知以及新基建信息技术理解的双重交汇点,是城市轨道交通数字化转型中的重要环节。设计、咨询从业人员的服务价值,就是成为城市轨道交通企业和信息化供应商之间的桥梁,既了解一定的业务流程,也同时兼顾一定的技术能力。他们应以复合型、综合型人才服务进行服务输出,方能提出最合理的方案。

城市轨道交通运维方案,是结合当地企业特点的长期定制化服务,其设计、咨询人员应具备归纳需求、提炼标准、整合业务、建立场景的综合梳理策划能力,为企业提供顶层、长期、宏观数字化运营解决方案,起到承上启下、内外融通的作用。当前具备这样能力的信息化咨询、设计人才还比较稀缺,尚需要挖掘和培养。

## 4 结语

在当前国家、社会、城市的数字化转型整体趋势下,如何运用新基建信息技术,切实提高城市轨道交通运行及维护体系的效率,是重要课题。当下的很多创新实践在节能、预测维修、高效运行等业务场景方面做了很多有益的尝试,取得了一定的进展。但笔者认为:技术架构已不是当前首要关键因素,更重要的是跨专业、体系化、宏观级的策划和管理思路 and 理念。这是新基建体系支撑下城市轨道交通企业精细化管理和可持续发展的关键。

## 参考文献

- [1] 王晓倩.城市轨道交通全自动运行线路运营控制中心管理模式创新[J].城市轨道交通研究,2019(增刊2):16.
- [2] 庞颖,朱微维,朱串串.城市轨道交通车辆基地智能诊断技术研究[J].城市轨道交通研究,2019(增刊2):39.
- [3] 刘宇平.城市轨道交通机电工程施工动态管理技术研究[J].低碳世界,2019(11):230.
- [4] 宋晓悦.基于城市轨道交通客流分析平台研究[D].北京:北京交通大学,2017.

(收稿日期:2021-02-12)

## 《城市轨道交通研究》官方网站网址变更公告

根据同济大学对所属单位官方网站管理的统一要求,从2021年7月15日起,《城市轨道交通研究》官方网站网址(原网址:www.umt1998.com)变更为:https://umt1998.tongji.edu.cn。给各位读者、读者带来不便,敬请谅解。

上海铁大城市轨道交通研究杂志社有限公司

2021年7月1日