

## 双碳背景下城市轨道交通列车灵活编组技术研究

田媛媛<sup>1</sup> 彭磊<sup>2</sup>

(1. 广州地铁集团有限公司, 510330, 广州; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

**摘要** [目的] 实现列车编组的灵活调整, 是城市轨道交通列车牵引节能的重要措施和发展方向。为了实现运能的精准投放, 降低运营能耗和成本, 需对双碳背景下城市轨道交通列车灵活编组技术开展研究。[方法] 对不同预测年限客流、周内客流、全日不同时段客流、高峰时段全线各区段客流等分布特征进行了分析。以运能与需求的最优匹配为出发点, 分析了列车灵活编组技术 3 种运行方案(列车固定编组运行、列车在线联挂/解编运行、列车虚拟编组运行)适用的运营场景, 并对不同运行方案下各系统的配置要求进行了阐述。[结果及结论] 3 种不同列车编组运行方案在不同的运营场景下均具有适用性和优势。列车在线联挂/解编运行方案、列车虚拟编组运行方案具有广阔的应用空间。

**关键词** 城市轨道交通; 列车灵活编组; 运能精准投放; 节能降耗; 列车在线联挂/解编运行; 列车虚拟编组运行

**中图分类号** U292.3<sup>\*1</sup>

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.09.051

## Research on Flexible Train Marshalling Technology for Urban Rail Transit under the Dual-carbon Background

TIAN Yuanyuan<sup>1</sup>, PENG Lei<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510330, Guangzhou, China; 2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

**Abstract** [Objective] The flexible adjustment of train marshalling is an important measure and development trend for urban rail transit train traction energy saving. In order to achieve precise delivery of transport capacity, reduce operational energy consumption and cost, it is necessary to study the flexible train marshalling technology in urban rail transit under the dual carbon (carbon peak and carbon neutrality) background. [Method] The distribution characteristics of passenger flows in different forecast years, weeks, daily periods, and in different sections of the whole line during peak hours are analyzed. Based on the optimum match between transport capacity and demand, the operation scenarios applicable to the three operation schemes (fixed train marshalling operation, train online coupling/de-marshalling operation, and virtual train marshalling operation) with flexible train marshalling technology are

analyzed. The configuration requirements of each system under different operation schemes are elaborated. [Result & Conclusion] All the three operation schemes with different train marshalling have their applicability and advantages under different operation scenarios. Both the train online coupling/de-marshalling operation scheme and the train virtual marshalling operation scheme have broad application space.

**Key words** urban rail transit; flexible train marshalling; precise delivery of transport capacity; energy saving and loss reduction; train online coupling and de-marshalling operation; train virtual marshalling operation

## 1 “双碳”背景下对牵引节能的要求

在“双碳”作为我国重大战略的时代背景下, 城市轨道交通牵引节能成为业内绿色低碳发展的重点。随着各城市线网规模的扩大及客运量的攀升, 城市轨道交通运营总能耗越来越大。据统计, 2020 年我国城市轨道交通运营总能耗约为 172 万 kWh, 同比增长了 13.3%, 其中牵引能耗占运营总能耗的 57% (见图 1)。

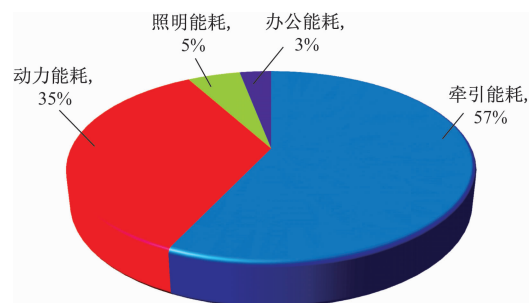


图 1 2020 年我国城市轨道交通运营总能耗占比情况  
Fig. 1 Energy consumption proportion breakdown in urban rail transit operation of China in 2020

从广州地铁各线的牵引能耗看, 不同车型及编组对车公里牵引能耗影响较大。以 A 型车为例, 采用 8 节编组 A 型车 (以下简称“8A”) 的 13 号线的车公里牵引能耗是采用 6 节编组 A 型车 (以下简称“6A”) 的 2 号线的 1.02 倍, 前者的人公里牵引能耗

是后者的9.30倍。B型车和L型车也存在类似的相对关系。广州地铁线网不同车型及编组形式下线路能耗情况如表1所示。总体来看,不论采用何种车型,与大编组列车相比,小编组列车的单位牵引能耗指标均显著降低。因此,在满足客流需求最佳匹配的前提下,实现列车编组的灵活调整,是牵引节能的重要措施和发展方向。

表1 广州地铁线网不同车型及编组形式典型线路能耗情况

Tab. 1 Typical line energy consumption with different types of train and train marshalling in Guangzhou metro network

线路	车型及编组	车公里牵引能耗/(kWh/(车公里))	人公里牵引能耗/(万kWh/(万人公里))
13号线	8A	1.68	1 130
2号线	6A	1.64	121
3号线	6B	1.66	116
广佛线	4B	1.51	210
5号线	6L	2.39	186
4号线	4L	1.66	301

注:6B—6节编组B型车;4B—4节编组B型车;6L—6节编组L型车;4L—4节编组L型车。

## 2 城市轨道交通客流分布特征分析

受居民出行需求特征影响,城市轨道交通客流分布在时间和空间上均呈现出明显的分布不均衡特征。本文对不同设计年限预测客流、周内客流、全日不同时段客流、高峰时段全线各区段客流的分布特征进行分析。

### 2.1 不同设计年限预测客流分布

在城市轨道交通线路从开通运营至设计远期的25年时间内,客流一般经历从小到大的增长过程。特别是城市轨道交通线网尚未形成的线路,开通后往往经历较长时间的客流培养期。以某城市的首条轨道交通线路为例,该线路各设计年限的预测客流如表2所示。由表2可知:该线路开通后3~10年内,线路客运量和高峰小时最大断面客流仅为远期设计最大水平的30%~65%,客流需求在不同设计年限阶段存在量级上的差别。

### 2.2 周内客流分布

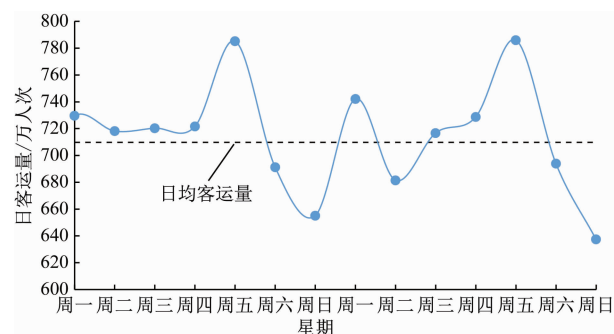
城市轨道交通线路在1个星期内的日客运量也具有一定的规律性。图2为2016年6月20日至2016年7月3日2个星期内广州地铁线网日客运

表2 某典型线路各设计年限客流预测情况

Tab. 2 Passenger flow forecast of a typical line in each design year

设计年限	日均客运量		高峰小时最大断面客流	
	预测值 (万人次/d)	占远期 比例/%	预测值 (万人次/h)	占远期 比例/%
初期	22.30	29.15	1.05	34.43
近期	38.50	50.33	2.01	65.90
远期	76.50	100.00	3.05	100.00

量分布情况。由图2可知:周五的日客运量达到波峰值,周六及周日的日客运量迅速下降至波谷,下个周一的日客流量会形成次高峰。与日均客运量相比,周内日客运量波动范围为-10.66%~10.24%。



注:起始日为2016年6月20日(周一),以此类推。

图2 广州地铁线网2周内日客运量分布情况

Fig. 2 Daily passenger volume distribution in Guangzhou metro network within two weeks

### 2.3 全日不同时段客流分布

受通勤客流的影响,工作日不同时段客流分布具有规律性。图3为广州地铁线网典型线路某周五客运量的小时客流占比情况。由图3可知:工作日早晚高峰的客流峰值明显,早高峰的小时客流占比最大,约占12%左右;平峰时段的小时客流占比仅为早高峰时段的1/3左右。

### 2.4 高峰时段全线各区段客流分布

据统计,广州地铁5号线列车(编组形式为6L)在AW2(满座+6人/m<sup>2</sup>的额定载荷工况)下的列车定员为1402人/列。该线早高峰的开行对数为27对/h,由此可计算得到早高峰时段(08:00—09:00)该线下行各区间列车内乘客平均站立密度,如图4所示。由图4可知:由于各区间的高峰小时断面客流不同,列车内乘客平均站立密度也不相同,其最大值为6.8人/m<sup>2</sup>;列车内乘客平均站立密

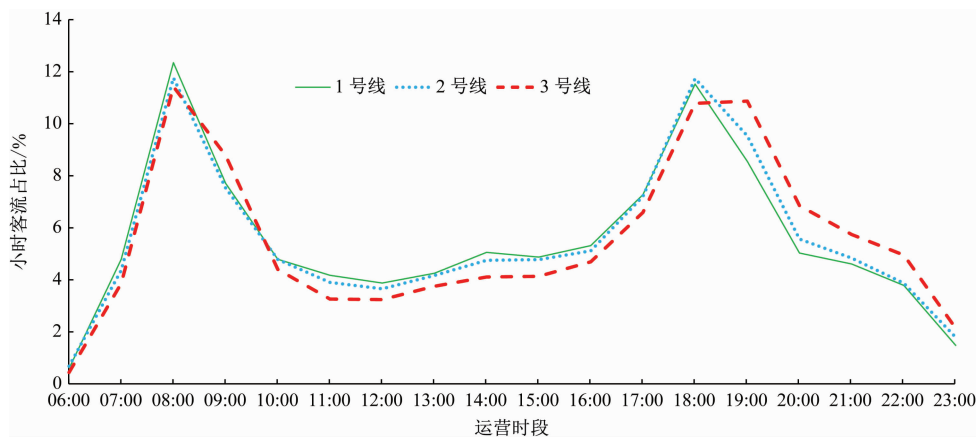


图3 广州地铁线网典型线路某周五客运量的小时客流占比情况

Fig. 3 Hourly distribution of a Friday passenger volume on typical lines of Guangzhou Metro network

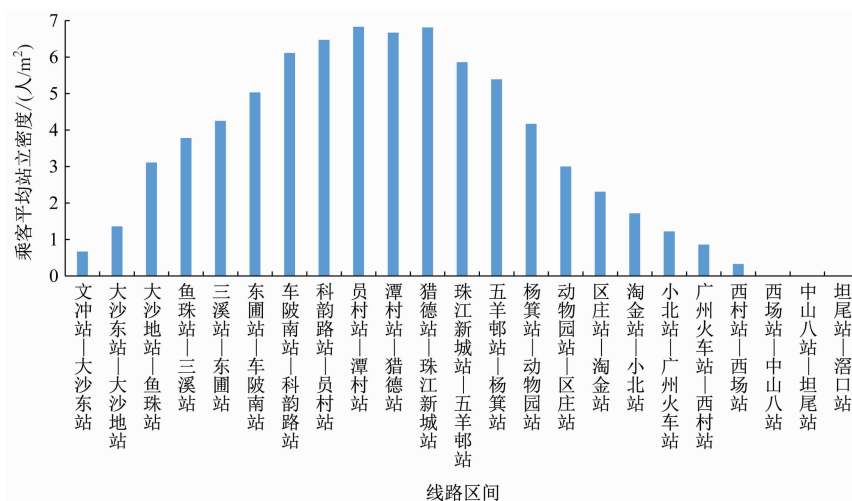


图4 广州地铁5号线某工作日早高峰下行各区间列车内的乘客平均站立密度

Fig. 4 Average passenger standing density distribution in each section down direction of Guangzhou Metro Line 5 during working day morning rush hours

度在  $3 \text{ 人}/\text{m}^2$  以下的线路区间数占全线区间总数的 52% ;高峰小时客流在全线不同区间断面上分布的差异性明显。

### 3 列车灵活编组技术及其应用场景

若要减少运营车公里以降低牵引能耗,需要通过列车灵活编组技术予以实现。结合上文所述的客流分布特点,列车灵活编组主要从 3 个方面考虑:一是根据线路初、近期与远期预测客运量的差异,设计相应的列车固定编组运行方案;二是考虑周期客流及全日不同时段客流的需求差异,在线路上组织可灵活联挂/解编的列车运行方案;三是针对全线不同区段的客流差异,在大小交路上开行不同编组的列车,以实现各线路区段运能的精准匹配。

#### 3.1 列车固定编组运行方案

列车固定编组运行方案是指线路行车组织采用大编组和小编组 2 种列车固定编组方式上线运行,列车不进行解编或联挂。该模式广泛应用于不同设计年限运能需求差异较大的线路。例如,可在初期采用小编组列车(4 节编组)上线运行,在远期改为大编组列车(6 节编组)上线运行,从初期向远期过渡阶段采用大、小编组同时上线混跑的运行方案。

目前,重庆轨道交通 2 号线、北京地铁大兴机场线、上海轨道交通 5 号线等均采用了列车固定编组运行方案。以某条采用 B 型车的线路(线路长度为  $20 \text{ km}$ )为例,表 3 为该线在设计初期 2 种列车编组方式下的参数值对比。由表 3 可看出:在相同配属

车辆数及运输能力前提下,小编组模式可缩短行车间隔,降低全日运营车公里,年牵引能耗可降低25%。

表3 某B型车线路在设计初期2种列车编组方式下的参数值对比

Tab.3 Comparison of parameter values of a B-type train line under two train marshalling modes at the initial design stage

列车编组形式	高峰小时最大断面客流/(万人次/h)	列车定员/(人/列)	列车开行对数/(对/h)	高峰小时运能/(万人次/h)	配属车辆数/辆	全日运营车公里/(万车公里)	年牵引能耗/(万 kWh)
4B	1.050	960	12	1.152	72	0.96	630.72
6B	1.050	1 460	8	1.168	72	1.20	788.40

对于从初期向远期过渡的阶段,可采用大小编组同时上线混跑的运行方案,还可结合线路情况在不同时段或不同线路区段组织不同编组列车混合运行,以匹配客流在时间和空间上的不同需求。图5为大小编组列车分区段混跑运行示意图。

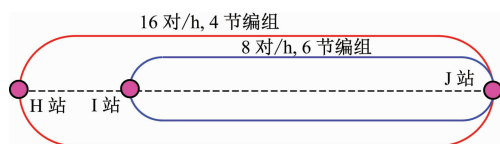


图5 大小编组列车分区段混跑运行示意图

Fig.5 Schematic diagram of mixed running of big and small marshalling trains in different sections

### 3.2 列车在线联挂/解编运行方案

列车在线联挂/解编运行方案是指列车在线运营过程中,通过解编的方式将大编组列车实时分解为2组小编组列车,解编后小编组列车即时投入正

线运营。根据客流的分时段分布特征,一般在早高峰时段采用大编组列车运行,早高峰结束时完成列车在线解编,平峰时段采用小编组列车运行,然后在晚高峰时段到来前再将小编组列车在线联挂为大编组列车。与列车固定编组运行方案相比,该方案更具有灵活性,可随时适应线路不同时间段的运能需求,达到更为精准的节能效果。

#### 3.2.1 新建线路拟实施列车在线联挂/解编运行方案的效果分析

仍以上文长度为20 km的线路为例,预测该线远期的高峰小时客流断面为3.5万人次/h,平峰时段客流断面最大值为1.2万人次/h,拟在高峰时段实行列车固定编组运行方案,在平峰时段实行列车在线联挂/解编运行方案。

表4为该线平峰时段实施列车在线联挂/解编运行方案的效果分析。

表4 某B型车线路平峰时段实施列车在线联挂/解编运行方案的效果分析

Tab.4 Effect analysis of the train online coupling and de-marshalling operation scheme implementation on a B-type train line during off-peak hours

运行方案	列车编组形式	列车定员/(人/列)	小时断面客流/(万人次/h)	列车开行对数/(对/h)	小时运力/(万人次/h)	列车开行间隔/min	配属车辆数/辆	全日运营车公里/(万车公里)	年牵引能耗/(万 kWh)
列车固定编组	6B	1 460	1.200	12	1.752	5	108	3.84	2 522.88
列车在线联挂/解编	3B	730	1.200	20	1.460	3	90	2.76	1 813.32

由表4可知,因采用了列车在线联挂/解编运行方案,平峰时段运行小编组列车可更好地实现运力运能精准匹配:列车运行间隔由解编前的5 min缩短至3 min,配属车辆数由解编前108辆降低至90辆,全日运营车公里及牵引能耗也较解编前降低了28%。

#### 3.2.2 既有线路应用列车在线联挂/解编运行方案的效果分析

上海轨道交通16号线于2021年11月起在部分列车实施线上联挂/解编作业,取得了良好的运

营效果。图6为上海轨道交通16号线列车在线联挂作业流程。

列车在线联挂/解编作业过程中,列车须以RM(人工驾驶模式)运行。2列列车完成车钩连挂后,系统还需确认这2列列车的电气及控制系统的配置,整个联挂作业过程耗时约2 min。在列车开行间隔较小的情况下,2 min的联挂作业时间相对较长,会对后续的列车追踪产生一定影响,因此,列车联挂/解编作业建议优先考虑在停车线或正线外的到发线上进行。



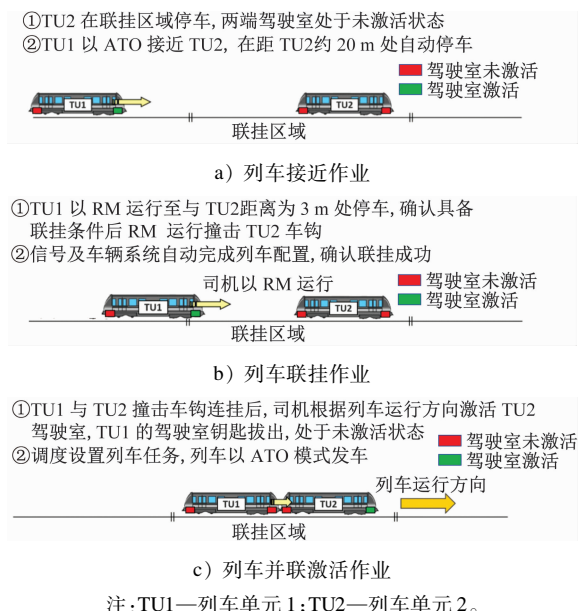


图 6 上海轨道交通 16 号线列车在线联挂作业流程

Fig. 6 Working process of train online coupling on Shanghai Metro Line 16

### 3.2.3 列车在线联挂/解编运行方案下各系统的配置要求

1) 土建规模方面, 车站站台、到发线及停车线长度需满足联挂后大编组列车的停放要求。

2) 车辆系统方面, 需配置适用于联挂的全自动车钩, 列车联挂后的电气及系统网络需能贯通前后列车, 并采用统一的控制平台。设计初期需考虑大小编组列车联挂前后车门与站台门的对应关系。

3) 信号系统方面, 需在所有小编组列车上设置全套信号车载设备, 并额外增加列车路由器, 在联挂或解编后均能通过列车路由器建立相应的车载网络。

4) 站台门方面, 需在联挂前实现全部站台门开闭, 在联挂后实现小编组列车车门对应的站台门开闭功能。对位隔离功能由信号系统根据进站列车的类型进行转换。

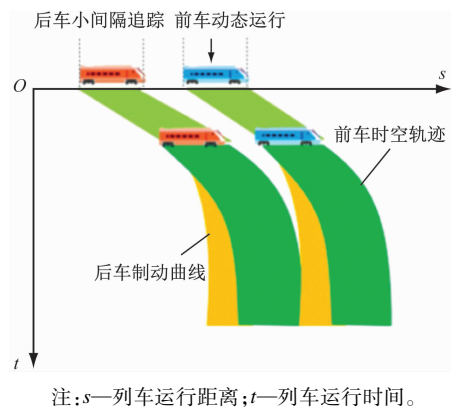
5) 车站 PIS (乘客信息系统) 方面, 需增加列车联挂或解编状态及对应的车组号, PIS 通过不同的列车编组信息向乘客发布乘降区域相应的信息提示。

### 3.3 列车虚拟编组运行方案

列车虚拟编组运行方案是指列车通过无线链路进行耦合, 基于协同控制实现不依赖于物理车钩的多车编组运行。北京地铁 11 号线开展的列车虚拟编组示范工程已完成了基于列车虚拟编组的系

列平台建设, 未来将实现全线列车虚拟编组运行。

列车虚拟编组运行方案与列车在线联挂/解编运行方案在运营组织实施效果上一致, 但采用的列车控制方式不同。列车在线联挂/解编运行方案通过物理车钩的连接实现 2 列列车的整合统一, 联挂后由统一的控制单元对列车进行控制, 而列车虚拟编组运行方案则是各单元列车之间基于无线通信实现实时交互, 采用基于列车相对速度追踪的车车通信安全防护模型 (见图 7), 控制前后车小间距同步追踪运行。



注:  $s$ —列车运行距离;  $t$ —列车运行时间。

图 7 基于列车相对速度追踪的车车通信安全防护模型  
Fig. 7 Vehicle-vehicle communication security protection model based on train relative speed tracking

图 8 为列车虚拟编组运行方案的应用场景。基于车车通信的列车虚拟编组运行方案, 可在前后车停稳后 5 s 内建立联挂。与列车在线联挂/解编运行方案相比, 列车虚拟编组运行方案具有响应快、对后续列车追踪影响小的特点。虚拟编组后的列车仍为 2 个独立单元, 编组前后 2 个列车单元的间距在停车状态下约为 5 m, 在高速运行状态下约为 70 ~ 150 m, 因此, 在车站站台及停车线设置时, 需考虑列车虚拟联挂后的列车长度增加问题。

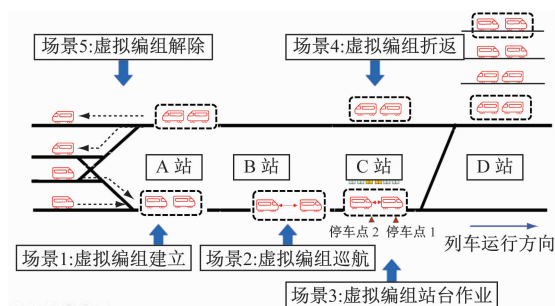


图 8 列车虚拟编组运行方案的应用场景

Fig. 8 Application scenario of train virtual marshalling operation scheme

(下转第 297 页)

功能可显著降低列车对定位信标的依赖,为TACS下采用车车通信方式的列车提供了经济且升级空间较大的自主定位方案。下一步将考虑把列车惯性导航设备融入该自主定位系统中,并研究轨面波磨导致雷达测速误差的消除方法,以获得更为精确的列车自主定位效果。

## 参考文献

- [1] 陶汉卿. 一种低成本的城市轨道交通列车组合定位方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 138.  
TAO Hanqing. A low-cost urban rail transit train combination positioning scheme[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 138.
- [2] 李杰. 基于组合定位的下一代列车自主定位系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 93.  
LI Jie. Research on the next generation train autonomous positioning system based on combined positioning[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 93.
- [3] 陶汉卿, 蔡焯, 吴昕慧. 基于GPS和里程计的列车定位方法[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 144.  
TAO Hanqing, CAI Xuan, WU Xinhui. Train positioning method based on GPS and ODO[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 144.
- [4] 赵启超, 吴文启, 张礼廉, 等. 跨距与运动约束的隧道内列车惯性导航方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(3): 120.  
ZHAO Qichao, WU Wenqi, ZHANG Lilian, et al. Inertial navigation for trains in tunnel with catenary span and motion constraints[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(3): 120.
- [5] 蒋先进, 范建伟, 蒋淮申. 新型地铁列车自主定位及主动防

(上接第292页)

列车虚拟编组运行方案对信号系统的要求较高,且要求车辆系统具有较高的指令(如列车牵引、制动等)协同响应水平。列车虚拟编组运行方案对站台门、PIS等系统的要求与列车在线联挂/解编运行方案基本相同。

## 4 结语

双碳背景下列车灵活编组技术对制定城市轨道交通牵引节能策略具有重要意义。本文所述的3种不同列车编组运行方案,在不同运营场景下均具有适用性和优势。列车在线联挂/解编运行方案、列车虚拟编组运行方案目前尚处于技术创新和探索阶段,未来具有广阔的应用空间。随着当前区域一体化和多网融合协同运营的发展要求,列车灵活编组技术不仅可以在城市轨道交通上发挥优势,在市郊铁路、城际铁路等领域也可望有广泛的应用。在后续的研究工作中,应将列车灵活编组技术与实时客流预测、列车运行动态调整技术进一步融合,

- 护系统研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(4): 64.  
JIANG Xianjin, FAN Jianwei, JIANG Huaishen. Research on new metro train self-positioning and active protection system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(4): 64.
- [6] 王强, 史学森, 詹洁, 等. 城市轨道交通多普勒雷达测速算法研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 140.  
WANG Qiang, SHI Xuesen, ZHAN Jie, et al. Research on velocity measurement based on Doppler radar for urban rail transit[J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(3): 140.
  - [7] 刘佳, 李克, 付连著, 等. 一种基于轨道约束特性的地图匹配算法[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(7): 7.  
LIU Jia, LI Ke, FU Lianzhu, et al. A map matching algorithm based on track constraint characteristics[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(7): 7.
  - [8] 鲍鹏宇, 陈志强, 王建敏, 等. 基于粒子群优化的列车制动曲线分段方法研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(7): 8.  
BAO Pengyu, CHEN Zhiqiang, WANG Jianmin, et al. Research on segmentation method of train braking curve based on particle swarm optimization[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(7): 8.

· 收稿日期:2022-01-27 修回日期:2022-03-04 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-01-27 Revised:2022-03-04 Published:2024-09-10  
· 通信作者:张智奕,助理工程师,897968343@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

以实现轨道交通网络的高质量运营。

## 参考文献

- [1] 袁江, 彭磊. 广州地铁运营客流分布特征研究与应用[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(4): 63.  
YUAN Jiang, PENG Lei. Research and application of passenger flow distribution characteristics of the Guangzhou metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(4): 63.
- [2] 李兆龄, 严业智. 城市轨道交通信号系统灵活编组关键技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(12): 72.  
LI Zhaoling, YAN Yezhi. Key technologies of flexible marshalling in signaling system for urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(12): 72.

· 收稿日期:2022-05-05 修回日期:2022-08-26 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-05-05 Revised:2022-08-26 Published:2024-09-10  
· 第一作者:田媛媛,高级工程师,tianyanyuan@gzmttr.com  
通信作者:彭磊,高级工程师,penglei@dzsjy.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