

规划设计要素对城市轨道交通能耗的影响分析*

郭英杰¹ 陈小鸿² 刘皓冰²

(1. 同济大学交通学院城市交通研究院, 201804, 上海; 2. 同济大学交通学院, 201804, 上海)

摘要 [目的] 建立城市轨道交通能耗模型, 分析规划设计要素对轨道交通能耗的影响, 用以指导低碳节能视角下的城市轨道交通规划设计方案优化。[方法] 以单位运营里程列车牵引能耗和单位时间站点动力照明能耗为因变量, 并以相关规划设计要素、线路运营及客流强度为自变量, 通过结构方程模型和随机系数模型估计规划设计要素对城市轨道交通能耗的影响。[结果及结论] 规划设计要素对城市轨道交通能耗具有显著影响, 最高影响车公里牵引能耗的 35%; 同时, 对地下站点的能耗影响大于对高架站点的能耗影响, 对换乘站点的能耗影响大于对非换乘站点的能耗影响。忽略规划设计要素对能耗的间接影响会低估其对城市轨道交通能耗的影响。最大化城市轨道交通的节能潜力需在考虑城市用地空间的基础上, 最大化线路高架段比例和合理确定站间距。

关键词 城市轨道交通; 能耗; 规划设计要素; 列车牵引能耗; 动力照明能耗

中图分类号 F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.05.004

Impact Analysis of Planning and Design Elements on Urban Rail Transit Energy Consumption

GUO Yingjie¹, CHEN Xiaohong², LIU Haobing²

(1. Urban Mobility Institute, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] By establishing an energy consumption model for urban rail transit, the impact of planning and design elements on its energy consumption is analyzed, so as to guide the optimization of urban rail transit planning and design schemes from the perspective of low-carbon and energy conservation. [Method] Taking the train traction energy consumption per unit operating mileage and the power and lighting energy consumption of stations per unit time as dependent variables, and taking relevant planning and design elements, line operation, and passenger flow intensity as independent variables, the impact of planning and design elements on the energy consumption of urban rail transit is estimated through structural

equation models and random coefficient models. [Result & Conclusion] Planning and design elements have a significant impact on the energy consumption of urban rail transit, with the maximum impact reaching 35% of the traction energy consumption per vehicle-kilometer. At the same time, the above impact on the energy consumption of underground stations is greater than that on elevated stations, and the impact on the energy consumption of transfer stations is greater than that on non-transfer stations. Ignoring the indirect impact of planning and design elements on energy consumption will lead to an underestimation of their impact on the energy consumption of urban rail transit. To maximize the energy-saving potential of urban rail transit, it is necessary to maximize the proportion of elevated sections of the line and reasonably determine the station spacing on the basis of considering the urban land use space.

Key words urban rail transit; energy consumption; planning and design element; train traction energy consumption; power and lighting energy consumption

0 引言

城市轨道交通是一种运营期长、运行总能耗大的交通方式, 存在巨大的节能潜力。据中国城市轨道交通协会统计^[1], 2023 年城市轨道交通年总线路千米电耗超 220 万 kWh。随着新建设和新投运线路的不断增加, 总能耗不断增长, 其中 2023 年的相较 2022 年的增长了 9.59%。城市轨道交通的高能耗特征启发了对能耗影响要素的研究和节能减碳方案的分析。文献[2]采用基于纵向动力学和列车动力组件的物理仿真模型来进行能耗分析, 可以对列车各子系统能耗进行独立分析和实现较高时间颗粒度的能耗估计。文献[3]分析了优化列车运行调度和运行图设计对车公里牵引能耗的影响, 例如交路运行、区间运行等。文献[4-5]分析了列车行驶工况、列车满载率及环境温度等因素对城市轨道交通能耗的影响。但现有研究忽略了规划设计要

* 国家自然科学基金青年基金(C类)(52202420); 上海市 2023 年度“科技创新行动计划”“一带一路”国际合作项目(23210750500)

素对城市轨道交通能耗影响,例如站间距可通过影响动能回收效率影响车公里牵引能耗,同时也会通过影响列车速度进而影响能耗。上海城市轨道交通经过多年发展,已形成 19 条线路(不含磁浮线)、超过 800 km 的运营网络,线路规划设计方案多样,为分析规划设计要素对城市轨道交通能耗的影响提供了研究基础。

为此,本文以上海轨道交通能耗为研究对象,建立了城市轨道交通运营的全链条能耗(列车和车站能耗)计算模型,提取其影响要素,重点关注规划设计要素的作用,以支撑规划设计方案优化。

1 数据和方法

1.1 数据

本文选取运营车型为 A 型车的上海轨道交通

线路为研究对象,共 12 条线路和 329 座车站(换乘站仅计算一次)。本文所使用的数据包括网络基本数据、线路详细数据、列车与车站的月总能耗数据等,具体包括 2017 年至 2021 年间各线路列车和站点逐月电耗、客运量、运营车公里等。本文又从相关平台统计归纳了相应年份的线路运营长度、站点数量、线路和站点地下段及高架段的分布信息、站点使用中的出入口数量和月平均气温等。

本文选取单位运营里程的列车牵引电耗(e_{tc} , 简称车公里牵引能耗)和单位时间的站点动力照明能耗(e_l)为分析对象。相关影响要素主要选择规划设计着重考虑的要素。此外,选择使用线路运营年数代表相关用电设备随时间折旧出现的效率降低进而对轨道能耗产生的影响。城市轨道交通能耗影响要素具体见表 1。

表 1 城市轨道交通能耗影响要素

Tab. 1 Elements influencing urban rail transit energy consumption

轨道交通能耗	影响要素	变量名称	变量单位	变量符号
单位运营里程车公里牵引能耗	线路敷设方式	线路地下段比例	%	R
		线路平均站间距	km	B_{4l}
	列车运行工况	列车平均速度	km/h	v
	客流	平均承载率	人·km/(车·km)	O
	环境	月平均气温	℃	T
		运营年数	年	Y
站点动力照明能耗	车站规模	在用的站点出入口数量	个	G_i
	车站型式	高架/地下,换乘站/非换乘站	—	—
	客流	车站乘降量	万人次	P_s
	环境	月平均气温	℃	T

不同线路和站点间的能耗差异性启发了对规划设计要素和运营管理要素的分析。如图 1 所示,车公里牵引能耗的中位数分布在 1.6 kWh/(车·km)和 4.2 kWh/(车·km)之间,体现了较大的差异性。在线路车型相同的前提下,合理推测这一差异性在线路敷设方式、列车工况及客流强度等要素有关。如图 2 所示,不同类型站点能耗差异显著,需要根据站点类型分析相关要素对站点能耗的影响。运营中的车站出入口数量是城市轨道交通规划设计中的重要变量,可以代表车站规模。地下车站平均能耗是高架车站的 2.5 倍左右,换乘车站能耗是非换乘车站的 3 倍以上。但将这些要素视为是相互独立地影响轨道能耗是不准确的^[7],正确构建

各要素之间的关系和分析其对轨道交通能耗的影响是本文的重点。

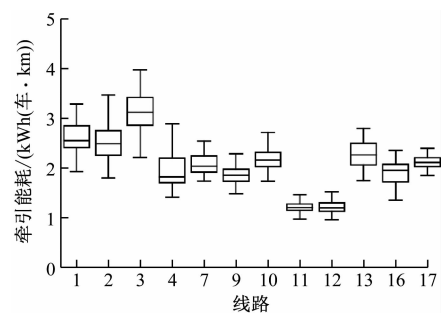


图 1 上海轨道交通车公里牵引能耗

Fig. 1 Traction energy consumption per vehicle-kilometer in Shanghai urban rail transit

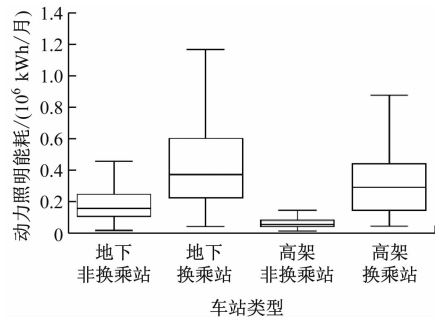


图 2 上海轨道交通站点能耗
Fig. 2 Energy consumption of Shanghai urban rail transit stations

1.2 研究框架

本文将城市轨道交通能耗分为车公里牵引能耗和站点动力照明能耗两部分进行分析。如图 3 所示,各线路列车和站点是城市轨道交通中两个重要且独立的耗能主体,有关要素对二者能耗的影响机理有较大的差异,因此针对车公里牵引能耗和车站动力照明能耗分别建模更符合实际且不会显著提升应用难度。车公里牵引能耗重点考虑了线路敷设方式对列车运行工况的限制并在此基础上估计其对车公里牵引能耗的影响。站点动力照明能耗

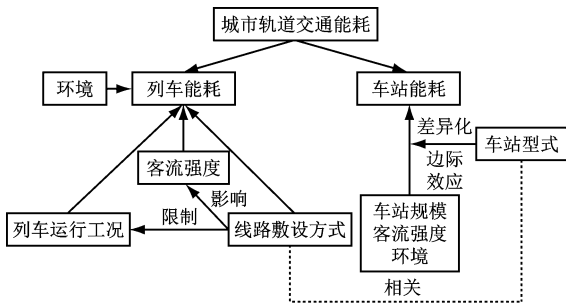


图 3 城市轨道交通能耗分析框架
Fig. 3 Energy consumption analysis framework for urban rail transit

主要考虑了环境、车站规模和客流强度对能耗的影响,并在不同车站型式中差异化估计各要素的边际效应。

2 城市轨道交通能耗影响要素分析

2.1 基于结构方程模型的车公里牵引能耗分析

2.1.1 模型结构

本文通过结构方程模型来估计平均站间距通过限制列车运行工况进而影响车公里牵引能耗的这一间接效应。为了突出这种间接效应的显著性,本研究同时构建了一个线性回归模型,在忽略间接效应的情况下估计相关要素对车公里牵引能耗的影响,并对比两个模型的估计结果。

$$v = \alpha_0 + \alpha_1 B_{4l} \tag{1}$$

$$e_{tc} = \gamma_0 + \gamma_1 R + \gamma_2 B_{4l} + \gamma_3 v + \gamma_4 T + \gamma_5 Y + \gamma_6 O \tag{2}$$

式中:

e_{tc} ——单位运营里程的列车牵引能耗;

$\alpha_0, \alpha_1, \gamma_0, \dots, \gamma_6$ ——模型参数。

线性回归模型直接采用式(2)进行参数估计。

2.1.2 模型结果

规划设计要素对城市轨道交通能耗除了直接影响,还存在间接影响,忽略间接影响会低估其对车公里牵引能耗的影响。如表 2 所示,平均站间距和平均承载率通过影响列车平均速度进而影响车公里牵引能耗。就总效应而言,平均站间距与车公里牵引能耗负相关,平均站间距对车公里牵引能耗的直接效应为负代表列车加减速时的额外能量损失。同时,地下段比例同车公里牵引能耗正相关,而线性回归模型低估了地下段比例对车公里牵引能耗的影响。

表 2 城市轨道交通车公里牵引能耗模型结果

Tab. 2 Results of the traction energy consumption per vehicle-kilometer model for urban rail transit

模型类型	效应类型	平均站间距/ km	地下段比例/ %	平均速度/ (km/h)	平均承载率/ (人·km/(车·km))	平均气温/ ℃	运营年数/ 年
结构方程模型	直接效应	-0.294	0.043	-0.042	0.003	0.018	0.031
	间接效应	-0.197	0.329	—	—	—	—
	总效应	-0.491	0.372	-0.042	0.003	0.018	0.031
线性回归模型	边际效应	-0.293	0.042	-0.041	0.003	0.018	0.031

列车平均运行速度并不与车公里牵引能耗正相关。列车低速运行代表更频繁和更剧烈的加减速,制动发热等要素会增加车公里牵引能耗。同

时,现代列车通常配备再生制动系统,可将制动能量转化为电能并反馈到电网。较高的列车运行速度往往出现在站间距较大的线路,意味着较长的减

速时间和距离,列车制动过程更加平稳,再生制动系统可以更有效地回收能量。列车在较高的运行速度下,滚动阻力影响相对较小。电动机在特定速度范围内效率更高,较高的列车运行速度可能使电动机工作在更高效的区间,降低每单位距离的能耗。

其他要素对城市轨道交通车公里牵引能耗均有显著影响。客流强度与车公里牵引能耗正相关,平均承载率越大列车质量越大,对应能耗也会更高;平均气温和车公里牵引能耗正相关,这是因为列车通风系统需要额外的电力供应,以给乘客提供舒适的出行环境,其中夏季平均能耗(3.2 kWh/(车·km))比春季平均能耗(2.6 kWh/(车·km))高出了约 23%;运营年数与车公里牵引能耗正相关,这一要素代表了列车随时间的折旧和效率降低,导致了平均能耗的逐年增长。

本文使用规划设计要素及其对车公里牵引能耗的边际影响的乘积占车公里牵引能耗的比例表示规划设计要素对车公里牵引能耗的影响。例如地下段比例对车公里牵引能耗的总效应为 0.37,而上海轨道交通 1 号线的地下段比例为 47.65%,因此地下段比例对 1 号线车公里牵引能耗的贡献为 0.176 kWh/(车·km)。对上海城市轨道交通系统来说,规划设计要素决定了车公里牵引能耗平均约 13%,最高超过了 35%。

为了降低城市轨道交通车公里牵引能耗,需要结合城市用地特征尽可能增大线路高架段的比例。除此以外,地铁线路纵向线型往往进行节能坡的设计,遵循“高站位,低区间”的设计原则,借助重力势能辅助列车加减速,缩短列车牵引时间,减少制动发热,从而达到节能的目的。但节能坡设计在地下段往往受限于土质环境和施工难度等,而在高架段往往更加灵活,可以充分发挥节能坡的节能效果。因此,地下段比例的增加会给列车牵引带来额外的能耗。同时,列车在地下隧道段行驶时,由于空气活塞效应而受到更大的空气阻力也会增加车公里牵引能耗。

适当增大站间距也会降低城市轨道交通车公里牵引能耗。每公里站点数量的增加会导致列车进出站次数的增加和加减速频繁,从而造成能耗的增加和浪费。虽然现有地铁系统往往配备刹车动能回收设备,但效率有限,无法完全避免加减速等剧烈工况下的能耗增加。但考虑到客流强度也会随站点密度而下降,因此需要综合城市交通结构和

轨道能耗水平进行权衡考量。

2.2 基于混合效应模型的站点动力照明能耗分析

2.2.1 模型结构

为了差异化估计站点规模对每一类城市轨道交通站点动力照明能耗的影响,本研究选用随机系数模型估计车站规模对站点能耗的影响。随机系数模型中考虑了数据中的层次结构,以捕捉组别间样本的差异性,并通过在模型中引入随机效应来代表同一组别样本的不确定性,提高了对群体差异和不确定性的估计。模型结构为:

$$e_i = \beta_{0j} + a_j T + b_j P_8 + c_j G_i + \epsilon_j \quad (3)$$

式中:

e_i ——车站动力照明能耗;

β_{0j} ——第 j 组的随机截距;

a_j, b_j, c_j ——第 j 组的随机斜率;

ϵ_j ——第 j 组的随机误差项。

2.2.2 模型结果

各类影响要素对不同类型站点的能耗的边际影响如表 3 所示。气温、出入口数量和车站乘降量均和站点能耗正相关。高温天气下站点通风空调系统消耗更多电能进行制冷以保持乘车环境的舒适;出入口数量代表了站点用电设施的规模,显然与站点电耗正相关;车站乘降量的增加提高了有关用电设施的负荷,例如扶梯、直梯、通风空调等,也会导致能耗的增加。此外,考虑到换乘站乘降量优势,其商业设施的规模和存活率也更高,这都会造成换乘站额外的能耗。

表 3 相关要素对站点动力照明能耗的边际影响

Tab. 3 Marginal impact of relevant elements on power and lighting energy consumption of stations

站点类型	温度边际影响/ (kWh/℃)	乘降量边际影响/ (kWh/万人次)	出入口数量 边际影响/ (kWh/个)
地下换乘站	20 284.86	2 753.56	44 314.47
地下非换乘站	9 073.91	1 239.27	21 847.10
高架换乘站	10 936.93	3 859.71	31 456.36
高架非换乘站	656.00	136.88	9 949.52

由表 3 可知,考虑相关要素对站点能耗的边际影响,地下站点的大于高架站点的,换乘站点的大于非换乘站点的。气温对地下换乘站点的能耗影响最大,对地下非换乘站点和高架换乘站点的影响相当,后者约占前者 50%;对高架非换乘站的影响最小,仅占气温对地下换乘站点能耗影响的约

30%。客流对高架换乘站点的能耗影响最大,其次是对地下换乘站点的能耗影响,其影响约为高架换乘站点的70%;再次是对地下非换乘站点的能耗影响,其影响约为高架换乘站点的30%。出入口数量对地下换乘站点的能耗影响最大,对高架换乘站点的的影响其次,其影响约占地下换乘站点的70%;再次是对地下非换乘站点的能耗影响,其影响约占地下换乘站点的50%;对高架非换乘站点的能耗影响最小,其影响约占地下换乘站点的20%。

增加城市轨道交通线路的高架段比例是相对节能的设计方案,原因是高架站点的能耗水平普遍低于同规格地下站点的。但由于受城市用地限制,城市轨道交通线路往往不能完全自由选择线路敷设方式,本文的结论指明了一种节能低碳的设计方向。

虽然换乘站点的能耗同样普遍高于非换乘站点,但换乘站点对城市轨道交通网络可达性和客流强度存在正向影响,进而能降低城市轨道交通的人均能耗。因此,在规划设计实践中需要综合考虑客流强度和人均能耗的变化,选择相对节能的方案。

3 结语

本文基于上海轨道交通月度能耗数据,分析了规划设计要素对列车和站点能耗的影响,着重考虑了规划要素对车公里牵引能耗的间接影响和对不同类型站点能耗的差异化影响。

研究结果表明,城市轨道交通线路敷设方式不仅对车公里牵引能耗存在直接影响,同时还通过影响列车平均速度进而间接影响车公里牵引能耗。线路敷设方式最多可以决定35%的车公里牵引能耗水平。规划设计要素和环境要素对不同类型站点的能耗影响差异显著,一般而言对地下站点的能耗影响大于对高架站点的能耗影响,对换乘站点的能耗影响大于对非换乘站点的能耗影响。

本文对城市轨道交通规划设计要素的分析可以支撑低碳节能视角下的规划设计方案优化。为了最大化城市轨道交通的低碳节能水平,需要综合考虑城市用地来最大化线路高架段的比例,充分发挥高架段节能坡设置的自由度优势和高架类站点的能耗优势;同时需要权衡能耗水平和客流强度合理确定线路站点密度,因为站点密度对客流强度和能耗的影响是相反的。

本文使用的数据包括2020与2021年疫情期间

上海轨道交通能耗与客流数据,相比于2022年,此时段的客流量虽受到一定影响但仍然保持了一定的规模,因此基于这两年数据的相关结论仍有一定的普适性。而在交通管控下,客流对管控措施的响应与交通运营(如班次等)对管控措施的响应间往往存在差异,盲目将相关数据纳入分析范围可能会导致对影响要素的错误判断。

本文还有许多不足,例如部分研究在描述站点规模时使用的是出入口数量,而如果使用建筑面积等指标会更加直接。后续需要进一步研究如何更精确衡量规划设计要素对城市轨道交通能耗的影响。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通2023年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2024.
China Association of Metro. China Urban Rail Transit 2023 Annual Statistical and Analytical Report[R]. Beijing: China Association of Metro,2024.
- [2] 焦源,原萍,陆鑫源,等. 上海轨道交通2号线列车运行能耗仿真及优化[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(9):145.
JIAO Yuan, YUAN Ping, LU Xinyuan, et al. Simulation and optimization of train running energy consumption on Shanghai metro line 2[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(9): 145.
- [3] 李波涛. 城市轨道交通车辆牵引能耗的影响因素[J]. 节能技术,2014,32(4):377.
LI Botao. Analysis of influencing factors of the traction energy consumption of rail transit vehicles[J]. Energy Conservation Technology, 2014, 32(4): 377.
- [4] 杨臻明,岳继光,王晓保,等. 基于回归模型的城市轨道交通能耗预测[J]. 城市轨道交通研究,2010,13(12):22.
YANG Zhenming, YUE Jiguang, WANG Xiaobao, et al. Prediction of urban rail transit power consumption based on regression model[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(12): 22.
- [5] 徐小海,李得伟,周玮腾,等. 考虑动态客流的城市轨道交通综合运营能耗精细化测算方法[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(8):109.
XU Xiaohai, LI Dewei, ZHOU Weiteng, et al. A refined calculation method for comprehensive operation energy consumption of urban rail transit considering dynamic passenger flow[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 109.
- [6] 沈小军,曹戈. 地铁车辆再生制动能量利用率影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(11):1648.
SHEN Xiaojun, CAO Ge. Factors influencing the utilization rate of regenerative braking energy of urban rail transit vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(11): 1648.

(下转第29页)

4 结语

本文分析了大型活动诱发性城市轨道交通大客流的影响因素,提出了一种基于滚动数据驱动的XGBoost算法,预测了大型活动散场的OD客流量。所提算法模型在OD层面、线路层面、进站量层面取得了较好的预测精度,为车站客流管控和网络运营调整提供了决策依据,提高了预测数据在现场工作组织中的适应性和实用性。

此外,本文未提出具体且有针对性的车站客流管控措施和网络运营调整策略,这将是未来研究的重点方向。

参考文献

- [1] 梁强升. 大型活动期间地铁车站客流预测方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 196.
LIANG Qiangsheng. Study on metro station passenger flow forecast during big events [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 196.
 - [2] 董春娇, 刘晓珂, 常乃心, 等. 基于网络搜索引擎的大型活动客流规模预测[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(4): 52.
DONG Chunjiao, LIU Xiaoke, CHANG Naixin, et al. Passenger flow prediction for large-scale events based on network search engine [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(4): 52.
 - [3] GUO Z, ZHAO X, CHEN Y, et al. Short-term passenger flow forecast of urban rail transit based on GPR and KRR[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(9): 1374.
 - [4] ESSIEN A, PETROUNIAS I, SAMPAIO P, et al. A deep-learning model for urban traffic flow prediction with traffic events mined from twitter[J]. World Wide Web, 2021, 24(4): 1345.
 - [5] 杨静, 代盛旭, 张红亮, 等. 大型活动散场期间地铁车站短时进站客流预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 2042.
YANG Jing, DAI Shengxu, ZHANG Hongliang, et al. Prediction of short-term passenger flow of metro station in the period of planned special events[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5): 2042.
 - [6] JIN K, SUN S, LI H, et al. A novel multi-modal analysis model with Baidu Search Index for subway passenger flow forecasting [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 107: 104518.
 - [7] LI W, SUI L, ZHOU M, et al. Short-term passenger flow forecast for urban rail transit based on multi-source data [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2021, 2021(1): 9.
 - [8] 付宇, 翁剑成, 钱慧敏, 等. 基于XGBoost算法的大型活动期间轨道进出站量预测[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(5): 832.
FU Yu, WENG Jiancheng, QIAN Huimin, et al. Prediction of metro passenger flow during large-scale activities based on XGBoost algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(5): 832.
 - [9] 郑云霄. 大型活动下城市轨道交通进出站客流短时预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHENG Yunxiao. Study on short-term prediction of passenger flow in and out of urban rail transit station under large-scale activities [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
 - [10] CHEN T, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system [EB/OL]. (2016-03-09) [2023-03-11]. <https://arxiv.org/pdf/1603.02754v1>.
 - [11] 门元昊, 吴亮, 刘晓双, 等. 基于XGBoost模型的地铁列车运行状态仿真方法[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 102.
MEN Yuanhao, WU Liang, LIU Xiaoshuang, et al. A metro train running state simulation method based on XGBoost model [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 102.
- 收稿日期:2023-04-05 修回日期:2023-05-10 出版日期:2025-05-10
Received:2023-04-05 Revised:2023-05-10 Published:2025-05-10
- 第一作者:周峰,高级工程师,zhoufeng24@tongji.edu.cn
通信作者:王文昱,硕士研究生,24042113r@connect.polyu.hk
- ©《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
-
- (上接第23页)
- [7] PAN H, LI J, SHEN Q, et al. What determines rail transit passenger volume? Implications for transit oriented development planning[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 57: 52.
- 收稿日期:2024-10-23 修回日期:2024-12-18 出版日期:2025-05-10
Received:2024-10-23 Revised:2024-12-18 Published:2025-05-10
- 第一作者:郭英杰,博士研究生,guoyingjie@tongji.edu.cn
通信作者:陈小鸿,教授,tongjicxh@163.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