

城市轨道交通运营期碳排放预测及减碳措施研究

白金沂

中建（天津）轨道交通投资发展有限公司 天津 300381

摘要：为推动城市轨道交通绿色低碳发展，本文依托主流碳排放核算标准，构建完善的运营期碳排放核算体系，系统剖析城轨运营碳排放来源、结构特征与关键影响因素。通过多类预测模型对比优选最优模型，开展基准、低碳、深度低碳多情景碳排放预测，精准识别行业减排瓶颈。结合多地工程实践，从技术、管理、制度层面制定差异化减碳策略，量化减排效益并搭建保障机制，为城轨双碳建设提供科学支撑。

关键词：城市轨道交通；运营期；碳排放预测；减碳措施

引言：双碳目标下，城市轨道交通作为绿色公共交通主力，规模化运营带来的碳排放压力日益凸显，精准核算、科学预测碳排放并落实减碳举措至关重要。当前城轨运营碳排放核算体系尚不统一、减排方案针对性不足，且预测模型适配性受限。基于此，本文系统开展运营期碳排放特征分析、多情景预测研究，结合实际运营数据挖掘减排潜力，制定可落地的减碳策略，助力城轨行业低碳可持续发展。

1 城市轨道交通运营期碳排放核算与特征分析

1.1 运营期碳排放核算体系构建

（1）核算边界界定：明确城轨运营期碳排放范围，涵盖列车运行、车站设备、通风照明、运维配套等排放源。依据T/CECS1532-2024，运营阶段核算包括建筑运营、列车运行及设备生产和运输碳排放，覆盖各子系统用能及物料消耗产生的温室气体排放。（2）核算依据与标准：以IPCC《国家温室气体清单指南》为基本方法论，参照T/CECS1532-2024、GB/T37420-2019《城市轨道交通能源消耗与排放指标评价方法》及GB/T32151.27-2024《温室气体排放核算与报告要求第27部分：陆上交通运输企业》等国内规范确定核算准则。（3）碳排放因子选取：电力因子采用生态环境部区域电网平均CO₂排放因子（2023年）：华北0.6361、东北0.5122、华东0.5500、华中0.5271、西北0.5543kgCO₂/kWh；设备能耗因子参照GB/T37420-2019附录C及D；耗材因子参照T/CECS1532-2024附录D主要材料生产因子取值。

1.2 运营期碳排放来源与分类

（1）直接碳排放：运营设备直接能耗（如燃油设备、燃气锅炉等化石能源直接燃烧）、运维耗材消耗产生的碳排放。以广州地铁为例，电能（间接碳排放）与化石能源（直接碳排放）对比约为99.16%：0.84%，直接碳排放占比极低。（2）间接碳排放：外购电力是城轨

运营碳排放的最主要来源。以北京为例，2020年初运营线网规模727km，年总耗电21.9亿kWh。此外，水资源消耗、配套服务衍生的碳排放亦属此类。（3）隐性碳排放：设备检修、物资运输、系统调度等环节产生的间接碳排放。根据T/CECS1532-2024，设备运输碳排放按设备重量×运输距离×运输碳排放因子计算^[1]。

1.3 碳排放现状核算与结果分析

（1）样本数据选取：选取典型城市轨道交通线路运营数据作为研究样本。广州地铁21号线全生命周期碳排放核算显示，该线路全系统总碳排放量达4,676,856.43tCO₂e。（2）分模块碳排放核算：对列车牵引、车站运营、辅助系统等各模块分别核算。以广州地铁21号线为例，运营阶段列车牵引碳排放占比30.06%，车站运营占比23.59%。（3）碳排放结构特征：城轨运营碳排放以电力间接排放为主，各模块碳排放结构如表1所示。

表1 典型城市轨道交通运营期碳排放结构

碳排放类别	排放源/模块	占比/数值	数据来源
间接碳排放	列车牵引	30.06%	广州地铁21号线
间接碳排放	车站运营	23.59%	广州地铁21号线
间接碳排放	动力照明	47%（占总能耗）	北京地铁2020年
间接碳排放	列车牵引	53%（占总能耗）	北京地铁2020年
间接碳排放	外购电力	99.16%	广州地铁全线网
直接碳排放	化石能源	0.84%	广州地铁全线网

1.4 运营期碳排放关键影响因素

（1）硬件设备因素：列车能效水平直接影响牵引能耗与碳排放。列车运行能耗占城轨运营总能耗的40%以上；供电设备效率、节能设施（如LED照明、通风空调节能系统）配置水平对车站及辅助系统能耗产生显著影响。（2）运营管理因素：运行调度方案优化可降低牵引能耗达10.8%；客流负荷强度是影响运营碳排放的关键

正向因素,贡献率为12.93%~60.81%;设备运维模式影响检修频次及物料消耗,进而影响隐性碳排放。(3)外部环境因素:能源结构决定电力碳排放因子水平,不同区域电网排放因子差异显著;季节气候影响通风空调系统运行负荷及能耗;政策管控标准(如碳达峰碳中和目标、绿色城轨评价标准)对运营碳排放提出约束性要求。

2 城市轨道交通运营期碳排放预测模型与情景分析

2.1 碳排放预测模型选取与构建

(1)主流预测模型对比:对比回归分析模型、灰色预测模型、LSTM神经网络模型的适用性。研究表明,在中小规模时间序列预测问题中,传统机器学习方法比需要大量数据的神经网络方法更为有效。采用支持向量回归(SVR)、极端梯度提升(XGBoost)、长短期记忆网络(LSTM)、自适应神经模糊推理系统(ANFIS)及非线性自回归神经网络(NAR-NN)五种算法对城轨系统能耗与碳足迹进行预测对比,结果表明SVR模型表现最优,碳足迹预测 R^2 达0.942、MAPE为3.51%;XGBoost次之($R^2=0.648$);而LSTM、ANFIS、NAR-NN等神经网络模型在有限数据条件下泛化能力不足。指标法适用于中短期趋势预测,已在西安城轨运营碳排放预测中得到应用^[2]。(2)模型参数确定:结合运营碳排放影响因素,筛选核心输入参数与约束条件。输入参数包括牵引能耗、车站电耗、客流负荷、线路长度等运营数据;约束条件涵盖综合能耗强度目标及区域电网碳排放因子等。(3)模型优化与验证:基于实测数据修正模型,验证模型预测精度与可靠性。研究表明改进LSTM模型可将相对误差平均值降低至0.392%,而原LSTM模型为3.862%、BPNN模型为1.535%、RNN模型为0.760%。

2.2 预测情景设置

(1)基准情景:维持现有运营模式、能源结构、设备条件的自然发展情景。在此情景下,城轨碳排放有望实现2030年碳达峰目标。(2)低碳情景:落实基础节能措施、优化运营管理的中度减排情景。若达到城轨行业协会提出的综合能耗强度下降目标,2025年全线网运营碳排放量预计可减少约13%,2027年预计可减少约15%,未来5年预计共减少约10%。(3)深度低碳情景:推广新能源设备、智能化管控、清洁能源替代的深度减排情景。清洁能源占比达到75%时,有望实现2060碳中和目标。运营阶段综合采用多种节能降碳措施后,可降碳27%^[3]。

2.3 不同情景碳排放预测结果

(1)基准情景碳排放趋势:以西安为例,2018—

2022年城轨运营碳排放约 $175.9 \times 10^4 \text{tCO}_2\text{e}$,估算未来5年运营碳排放约 $321.6 \times 10^4 \text{tCO}_2\text{e}$ 。2022年全国城轨总电能耗227.92亿kWh,CO₂排放总量1935.39万吨。(2)低碳情景减排效果:常规减碳措施下碳排放增速放缓。2025年减排约13%、2027年减排约15%。(3)深度低碳情景减排潜力:全方位低碳改造后减排空间显著。低碳技术应用可使线路全生命周期碳排放减少约35%;50年运营周期降碳潜力总计17%。

2.4 预测结果对比与问题剖析

(1)多情景预测结果横向对比:基准情景下碳排放持续增长;低碳情景下增速放缓、2030年前可实现碳达峰;深度低碳情景下减排潜力最大,清洁能源是影响城轨碳排放的最显著因素。(2)当前运营碳排放存在的核心问题:牵引与车站电耗产生的间接碳排放为主要来源;能耗利用效率偏低,车站系统与牵引系统能耗占比高;减排体系尚不完善。(3)减排瓶颈分析:技术层面,神经网络模型在有限数据条件下泛化能力不足,影响预测精度;管理层面,综合能耗强度下降目标的落实需配套政策支持;成本层面,深度低碳改造(如清洁能源替代、智能化管控)前期投入较大。

3 城市轨道交通运营期差异化减碳措施与保障机制

3.1 技术层面减碳措施

(1)节能设备升级改造:推广高效牵引设备、节能照明、智能通风空调系统。深圳地铁1、3、5号线实施LED照明改造,改造灯具24.77万盏,照明灯具节电率达65.19%,广告灯箱节电率56.41%,每年可节电3334万度。北京地铁13号线东直门站空调系统改造后,核心制冷设备能效提升37.8%。广州地铁18号线全线采用高效智慧环控系统,磁悬浮冷水机组比非磁悬浮站点年均运行能效比高15%以上。(2)清洁能源替代:推进车站光伏建设、储能设备应用、绿电采购扩容。上海地铁东宝兴路站分布式光伏项目装机容量226.72kWp,预计年发电量约19万度,减排CO₂约80吨。温州轨道交通S2线翁垟站建成8.13兆瓦分布式光伏电站,年均发电约730万度,年减排CO₂约6800吨^[4]。(3)再生能源利用:优化列车再生制动能量回收系统。青岛地铁蓝谷快线应用飞轮储能装置,单套装置日节电达2000度,全线年减碳量超4000吨,节电超30%、减碳超40%。

3.2 运营管理层面减碳措施

(1)优化列车运行调度:结合客流动态调整班次、运行速度。苏州地铁5号线智能运行图优化项目通过AI算法调配多列车“协同启停、能量互用”,综合节能3.65%,年节电129.3万kWh,折合CO₂减排约1000余吨。

(2) 精细化设备运维管理：建立设备能耗监测体系，关停非核心冗余设备。温州翁垟站搭建智慧能碳管理平台，2025年1至11月S2线动力照明总能耗同比下降194.9万度，降幅达9.19%。(3) 客流组织优化：完善换乘体系、优化客流疏导，提升单位客流运输能效。成都地铁5号线大源站试点“动态环控标准”，车站制冷季节节能率达31.02%^[5]。

3.3 制度与政策层面减碳措施

(1) 构建低碳运营管理制度：建立碳排放台账、能耗考核与减排问责机制。温州翁垟站依托智慧能碳管理平台，实现能源与碳排放“一体化、可视化、数字化”

管理。(2) 对接碳交易与绿色金融：参与碳市场交易、申报绿色项目获取政策扶持。嘉兴市完成全国市域铁路首笔碳交易，1004吨减排量以59.96元/吨成功出让。无锡地铁1号线碳中和绿色资产支持专项计划发行规模35.74亿元，为全国首单获批的碳中和轨交类REITs。(3) 完善行业低碳标准：细化城轨运营期低碳管控规范与评价体系。

3.4 减碳措施效益评估与保障机制

(1) 减排效益量化评估：主要减碳措施减排效益汇总如表2所示。

表2 城市轨道交通运营期主要减碳措施效益汇总

减碳措施类型	具体措施	减碳/节能效益	数据来源
节能设备升级	LED照明改造	节电率65.19%，年节电3334万度	深圳地铁1、3、5号线
节能设备升级	空调系统改造	能效提升37.8%	北京地铁13号线
清洁能源替代	车站分布式光伏	年减排CO ₂ 约6800吨	温州S2线翁垟站
再生能源利用	飞轮储能装置	节电超30%，年减碳超4000吨	青岛地铁蓝谷快线
运行调度优化	智能运行图	综合节能3.65%，年节电129.3万kWh	苏州地铁5号线
智能环控	动态环控标准	制冷季节节能率31.02%	成都地铁5号线

(2) 实施保障机制：从技术、资金、人才、监管维度构建保障体系。技术层面依托智慧能碳管理平台实现数字化管控；资金层面依托碳中和债、绿色REITs等绿色金融工具拓宽融资渠道；监管层面建立碳排放台账与考核问责机制。(3) 长效低碳运营策略：形成“技术迭代—管理优化—制度完善—效益反馈”的持续改进闭环，持续推进绿色城轨体系建设。

结束语

本文系统完成城市轨道交通运营期碳排放核算、影响因素分析与多情景预测，明确了不同发展场景下的碳排放变化规律与减排潜力。结合实际运营案例验证了设备升级、能源替代、智能调度及制度管控的减碳成效，梳理了行业现存减排短板。后续可结合区域能源差异优化减排体系，完善动态碳排放预测与管控机制，持续赋

能城市轨道交通低碳、高效、可持续发展。

参考文献

[1]杨晓强.城市轨道交通运营碳排放预测与减碳目标研究[J].都市快轨交通,2023,36(04):102-108.
[2]岳杨,王健,刘芳.轨道交通运营阶段碳排放特征及减碳贡献分析[J].环境工程学报,2025,19(03):912-920.
[3]李晓锋,王荔,栾承志.地铁车站运营能耗碳排放特征及降碳潜力研究[J].都市快轨交通,2024,37(02):78-84.
[4]张宁,黄思远.城市轨道交通线网运营碳排放时空预测模型构建[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(05):67-75.
[5]刘思琪.低碳目标下城市轨道交通运营碳排放管控与优化策略[J].铁道运输与经济,2025,47(02):89-94.