

面向碳中和目标的城市地铁绿色运营路径探索

罗超 杜岫 聂帅

成都地铁运营有限公司 四川成都 610000

摘要：在“双碳”战略背景下，城市地铁系统的绿色转型已成为交通领域实现碳中和目标的关键突破口。传统运营模式在能源消耗、设备效率等方面仍存在较大优化空间，亟需构建全生命周期的碳减排管理体系。探索覆盖列车牵引、车站环控、设备运维等环节的低碳技术集成应用路径，对推动轨道交通可持续发展具有战略意义。这项研究将为实现交通强国的绿色愿景提供重要支撑。

关键词：面向碳中和目标；城市地铁；绿色运营；路径

引言

地铁系统作为城市交通的能耗大户，其绿色运营水平直接影响碳中和目标的达成进度。当前在能源结构优化、能效提升、资源循环利用等方面仍面临技术与管理双重挑战。系统研究减碳措施的协同效应，开发智能化的能源管理系统，能够为地铁低碳运营提供系统解决方案。该领域探索不仅关乎行业自身转型升级，更是新型城镇化建设中绿色基础设施发展的重要实践。

一、绿色运营的理论基础

绿色运营的理论基础融合了低碳交通、可持续发展与循环经济等多学科理念，为城市地铁实现碳中和目标提供思想与方法支撑。低碳交通理论强调在运输过程中降低化石能源消耗与温室气体排放，倡导以高效率、低污染的运输方式替代传统高碳模式，地铁作为集约化公共交通，天然具备低碳优势，但其运营仍须在能源结构、设备能效与运维方式上持续优化。可持续发展理论要求在满足当代出行需求的同时，不损害后代的资源与环境承载能力，指导地铁在规划、建设与运营全周期平衡经济效益、社会福祉与生态影响。循环经济理论则推动资源高效利用与废弃物减量化，在地铁领域体现为设备延寿、材料回收与能源梯级利用。上述理论共同构成绿色运营核心理念：以系统性思维整合节能减排、清洁能源、智能管控与制度创新，形成贯穿运营各环节的低排放、高效率、环境友好的综合路径，为探索碳中和目标下的可行方案奠定坚实基础。

二、城市地铁运营碳排放现状与构成分析

1. 能源消耗结构与碳排放核算方法

城市地铁运营所需能源主要用于列车运行与车站

运转，牵引供电维系列车行进，车站用能支撑环境调控与乘行辅助设施。列车运行依赖持续电能驱动，其能耗随运行状态变化呈现明显波动，车站用能则受空间规模与功能配置影响，在环控与照明方面形成稳定负荷。核算碳排放需将各类能耗转换为排放当量，常用思路是从源头入手，结合能源使用环节与排放因子推算整体负荷。方法上既可从总量出发归结排放规模，也可拆解到具体设备与使用场景逐一计量，并延伸至设备全生命周期隐含排放，由此形成覆盖运行与维护的完整测算路径，为辨识排放热点与制定应对策略提供基础依据。

2. 牵引供电、车站用能及维护阶段的排放特征

牵引供电环节的排放与列车运行密切相关，启动与调速过程对电能需求集中，制动环节虽可回馈能量，但受系统条件限制未必全部利用，因此该阶段排放呈动态起伏并与运能强度呼应。车站用能排放相对稳定，却随客流峰谷与气候变动出现时段性升降，环控设备为维持环境舒适承担主要负荷，其排放形态具有可预期的时间节律。维护阶段的排放源自设施设备检修与物料更替，包含机械作业能耗与材料生产运输的间接排放，虽单次体量有限，却在长期累积中占据一定比重。各阶段排放特征显示，减排需贯穿运行操控、环境维持与资产维保全链条，方可形成持续压降效果。

3. 不同运营模式下的碳足迹比较

运营模式决定能源流转与利用方式，也塑造整体碳足迹的形态与强度。若仅维持既有供能与设备条件，运行过程直接映射为高排放状态。若在运行策略与设备调控上引入节能取向，则可压缩无效能耗，使同等运能下的排放水平下降，体现出策略优化对排放的抑制作用。

进一步在供能侧拓展清洁电力来源并配合系统调节，可使运行排放的结构强度显著减弱，形成以可再生能源为主导的低排放模式。比较可见，从既有模式向节能模式再向清洁供能模式递进，碳足迹逐步收敛，但每一步都需克服技术衔接与系统协调的制约。认识不同模式的排放轮廓，有助于在现实条件下规划由近及远的减排路径，使碳中和目标转化为可执行的分阶段任务。

三、绿色运营实施的障碍

1. 技术成熟度与投资成本制约

绿色运营需在能源供给、牵引驱动、环境调控与运维管理等方面引入新型技术与装备，然而许多关键技术尚处完善阶段，性能稳定性与适配性有待验证。技术更迭周期长与系统复杂度高，使全面替换或升级既存设施面临可行性挑战。同时，绿色技术初始投入普遍高于传统方案，涉及设备采购、改造施工与人员再培训等多项支出，给运营主体带来显著资金压力。在缺乏充足财政补贴或多元融资渠道的情况下，投资回报周期过长会削弱更新意愿。成本与技术的双重制约，令绿色转型在推进中易陷于局部试点而难以规模化铺开，需要在技术研发与商业模式上同步突破，方能为广泛实施创造条件。

2. 管理体制与跨部门协同不足

地铁绿色运营涉及规划、建设、运营、能源供应与环保监管等多领域，需各层级与部门形成目标一致且权责明晰的协作机制。然而现有管理体制常呈条块分割，不同主体在绩效导向与信息互通上存在壁垒，导致绿色方案在决策、执行与评估环节易脱节。运营管理侧重服务频次与安全稳定，对减排目标与能效提升的统筹不足，能源供应侧与用侧之间缺乏动态协调机制，难以及时响应运行负荷变化进行优化匹配。跨部门协同不足还会延缓标准统一与政策落地，使绿色运营在技术集成与流程再造上缺乏系统推力，影响整体实施效率与连续性。

3. 标准体系与绩效评价机制缺失

绿色运营的有效推进依赖清晰的标准体系与可操作的绩效评价机制，用以引导方向、检视进度与固化成果。当前相关标准在覆盖范围与指标细化程度上仍有欠缺，对不同气候区、不同运量线路的差异化要求缺乏针对性指引，评价标准亦未充分体现全生命周期与多维度综合效益。绩效机制若仅停留在能耗或排放的单一考核，易忽视节能措施对服务质量、乘客体验与运维成本的复合影响，导致执行主体倾向保守策略。标准与评价的缺位，使绿色转型缺少可衡量的参照与持续改进的动

力，也难以在横向比较中识别最佳实践并推广，进而拖慢整体进程。

4. 市场激励与公众参与不足

绿色运营的长远成效仰赖市场机制与公众力量的共同驱动，但现有激励措施在广度与深度上均有限。运营主体在减排行动中缺乏稳定的收益补偿与风险分担渠道，绿色投入难以在既有经营核算中获得充分认可，降低了内生动力。公众对于地铁绿色运营的认知多停留在概念层面，对其与个人出行体验及生态环境的联系缺乏直观感受，难以形成广泛的支持与监督氛围。市场激励不足限制了社会资本与创新要素的进入，公众参与缺位则使绿色理念在需求侧缺少反馈与助推。内外动力不足叠加，会使绿色运营在推广过程中遭遇阻力，需在政策设计与宣传引导上双向发力，构建良性互动的生态体系。

四、面向碳中和的绿色运营路径探索

1. 能源结构优化

面向碳中和的城市地铁绿色运营，首要路径在于优化能源结构，逐步引入可再生能源与清洁能源，降低对高碳电力的依赖。传统地铁运营以外部电网为主，若电网仍以化石能源发电为主体，即便运行环节节能，整体碳强度依然偏高。通过在车站屋顶、车辆段及沿线可用空间布设光伏装置，可利用太阳能直接为环控、照明与部分辅助设备供电；在条件允许时引入就近的风能或地热能，形成多能互补的本地化清洁供能体系。同时，可与清洁能源供应商签订绿电采购协议，确保牵引供电部分由低碳或零碳电力覆盖。能源结构优化的关键在于形成可控、可扩展的清洁供给体系，并在运行调度与储能配置上实现协同，平滑间歇能源波动对运营稳定性的影响，从而在源头上削减碳排放，构筑绿色运营的坚实基础。

2. 牵引系统节能改造与再生制动利用

牵引系统是地铁运营能耗与排放的核心环节，其节能改造是绿色运营的重点方向。可通过升级牵引控制算法，使列车在不同路况与客流状态下精准调节牵引与制动力度，减少无效功耗，提高整体能效。优化行车计划与运行曲线，减少频繁加减速，可在保证准点与服务频率的前提下降低能耗峰值。再生制动技术能将制动产生的电能回馈至接触网或储能装置，供其他列车或车站负荷使用，需完善能量回收接口与并网管理，提升实际回收率。还可引入轻量化车体与低阻轮轨系统，降低运行阻力，从而减少驱动能耗。牵引系统的综合改造不仅直

接削减运行排放，还能延长设备寿命、降低维护负荷，为持续低碳运行提供技术支撑。

3. 车站与设备能效提升及智能管控

车站与站内设备是除牵引外的重要耗能单元，其能效提升与智能管控构成绿色运营的关键节点。可对照明系统进行全LED化改造，并配光感应与分时调光，使光照强度随客流与自然光变化自动优化。通风空调系统可引入变频驱动与智能算法，根据实时温湿与CO₂浓度动态调节风量，避免过度制冷制热。电梯扶梯在空闲时转入低耗待机，高峰按需提速运行。站内配电与监控网络可集成能耗感知元件，实现对各回路负荷的可视化与异常预警。智能管控平台汇聚多系统数据，运用预测与优化模型统一调度设备运行，形成跨系统的能效协同。通过设备升级与智慧联动，可在保障乘客舒适度的同时最大限度压缩能耗，从源头降低间接碳排放。

4. 绿色建设与运维、低碳材料与循环经济模式

绿色运营不仅体现于运行阶段，也需延伸至建设与日常维护环节，通过低碳材料应用与循环经济模式减少全生命周期排放。在新建或改造工程中优先选用低碳水泥、再生钢材与环保隔热材料，降低建材生产运输环节的隐含碳排放。施工过程推行模块化装配与预制构件，缩短现场作业时间并减少扬尘与能耗。运维阶段建立设备全生命周期档案，推行预防性维护与状态检修，延长关键部件使用寿命，减少更换频次与废料产生。对退役车辆、轨道与电气设备进行分类回收与再制造，将可用材料重新引入生产链。运维废物按可回收、有害、惰性分类处置，争取在站点内部实现资源化利用。

5. 碳抵消与碳交易机制的应用探索

即便在能源与能效优化后，完全消除碳排放仍存难度，因此需探索碳抵消与碳交易机制作为补充路径。可依托地铁沿线及车辆段空间开展植树造林或湿地修复等生态项目，形成可核查的碳汇，用于冲抵剩余排放。也可投资经过认证的农林或可再生能源碳信用项目，实现跨领域的排放转移与中和。在政策条件允许时，将地铁运营纳入区域碳交易市场，通过市场化方式为减排努力获取经济回报，同时以交易价格信号引导内部持续优化。应用碳抵消与交易机制，不仅有助于实现碳中和目标，还能促使运营主体将排放管理纳入日常决策，形成减排与效益并重的长效机制，为绿色运营注入持续动力与制度保障。

6. 多路径协同与分阶段实施策略

面向碳中和的绿色运营并非单一措施的孤立应用，而需在能源结构优化、牵引系统改造、车站能效提升、绿色建运与碳抵消机制之间建立协同关系，形成互为支撑的综合体系。能源结构优化为全系统提供低碳基底，但若牵引与环控环节仍沿用高耗模式，则减排潜力受限；牵引系统改造与车站智能管控直接削减运行能耗，是降低实时排放强度的关键抓手；绿色建设与运维通过控制隐含碳排放与推动循环使用，减少全生命周期负荷；碳抵消与交易机制则为难以完全消除的剩余排放提供柔性缓冲。各路径在数据平台与调度系统的贯通下可实现联动优化，例如根据清洁电力供给预测动态调整行车与环控策略，或在设备更新周期中同步考虑能效与材料碳足迹。实施上应采取分阶段策略，先期聚焦投资回报快、技术成熟的节能改造与局部清洁能源试点，中期扩展至系统级能效协同与再生能源规模化接入，后期完善碳抵消与交易机制并持续优化标准与绩效体系，使绿色运营在技术与制度层面稳步迈向碳中和目标。

结束语

综上所述，面向碳中和的地铁绿色运营路径研究为城市交通低碳转型提供了理论框架和技术指引。通过技术创新与管理优化的双轮驱动，可实现经济效益与环境效益的均衡发展。未来应着力构建全链条碳排放监测体系，深化可再生能源应用，使地铁系统真正成为城市绿色交通的典范。这项探索不仅具有行业引领价值，更为全球城市轨道交通可持续发展贡献了中国方案。

参考文献

- [1] 罗廷, 吴凡. 基于云计算的地铁大数据分析方法探究[J]. 软件, 2023, 44(06): 122-124.
- [2] 杜修力, 张洋, 缪惠全, 李洋, 钟紫蓝, 蒋录珍, 侯本伟. 韧性城市视角下地铁系统安全运营评价指标体系[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(03): 1-13.
- [3] 袁健. 城市地铁车站运营系统脆弱性评价研究[D]. 南昌大学, 2023.
- [4] 王一凡. 人因视角下的城市地铁车站抗洪韧性识别、度量及提升[D]. 东南大学, 2023.
- [5] 吴祥彬. 基于双融合模型 Entropy-Blending 城市地铁短时客流量预测研究[D]. 东华理工大学, 2023.