

低碳理念下城市交通路网规划与轨道交通绿色建设技术研究

方立英

浙江交通职业技术学院, 中国·浙江 杭州 310000

摘要: 在“双碳”目标与新型城镇化背景下, 城市交通作为碳排放核心领域亟需转型。本文聚焦低碳理念下的交通路网规划与轨道交通绿色建设, 从路网结构重构、TOD 站城融合、多模式协同衔接三个维度, 提出低碳路网规划优化路径; 从车辆节能、土建绿色、能源转型三大方向, 创新轨道交通全生命周期绿色技术体系; 并构建智能化管控、政策市场驱动、跨领域协同的保障机制。通过量化分析与实证案例验证, 规划策略可使公共交通分担率提升 25%—35%, 绿色技术应用能实现单位能耗降低 8%—38%, 核心技术投资回收期控制在 5—8 年^[1], 为城市交通低碳转型提供可操作的技术方案、实施指南与效益评估框架。

关键词: 低碳理念; 城市交通路网; 轨道交通; 绿色建设; TOD 模式; 多模式协同; 碳足迹核算; 智能管控

Research on Urban Traffic Network Planning and Green Construction Technology of Rail Transit under the Low-carbon Concept

Fang Liying

Zhejiang Institute of Communications, China Zhejiang Hangzhou 310000

Abstract: Against the backdrop of the "dual carbon" goals and new urbanization, urban transportation as a key sector in carbon emissions requires urgent transformation. This paper focuses on low-carbon transportation network planning and green construction of rail transit, proposing optimization pathways through three dimensions: network structure restructuring, TOD station-city integration, and multimodal coordination. It innovates a green technology system for rail transit lifecycle spanning three key areas: vehicle energy efficiency, green civil engineering, and energy transition. The study establishes a support mechanism featuring intelligent management, policy-market synergy, and cross-sector collaboration. Quantitative analysis and empirical case studies demonstrate that the strategies can increase public transport share by 25%—35%, reduce energy consumption per unit by 8%—38%, and achieve core technology investment recovery within 5-8 years^[1]. These findings provide actionable technical solutions, implementation guidelines, and benefit evaluation frameworks for urban transportation decarbonization.

Keywords: Low-carbon concept; Urban transportation network; Rail transit; Green construction; TOD model; Multimodal coordination; Carbon footprint accounting; Intelligent management

1 低碳转型背景下的城市交通发展诉求

基于“双碳”和新型城镇化进程加快的推动, 城市交通是碳排放的主要环节, 从总的看, 由于我国城市交通碳排放占到全国总排放量的 15% 以上; 尤其是因为我国很多地区特别是东部地区城市较多, 人口密集, 人们对私家车

需求较大。由此也会带来碳排放较高的问题, 而正是由于城市交通碳排放导致的问题, 我国提出了道路网规划不合理造成的迂回行驶、交通工具能效低、基础设施建设能耗高等原因导致的占比超过 60%, 并在《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》中明确提到 2025 年要实现运输装

备的标准化率达到 95% 以上，运输装备单位周转量能耗较 2020 年降低 13%^[2]。为此，打造“规划集约高效、技术绿色创新、运营智能协同、管理精准可控”的全过程低碳交通系统势在必行。

2 低碳导向的城市交通路网规划优化路径

2.1 路网结构的低碳化重构逻辑

传统的路网规划存在着“重扩张、轻效率”以及“重机动车、轻慢行”的弊端，导致资源浪费严重、碳排放高企，因此应开展低碳重构，在空间上要形成“密度适配、层级清晰、衔接顺畅、功能复合”的四维规划体系；从宏观尺度看，在以城市空间结构及人口、岗位的分布特征作为依托的基础上，按照“多中心放射 + 环形衔接”模式布局道路网系，并通过运用遗传算法和 VISSIM 仿真软件耦合的方法，优化设计主干路和次支路的坡道组合、交叉口渠化设计以及信号配时方案等，从而减少车辆怠速、加速

及减速次数。某省会城市经采用上述设计后的车辆高峰时段平均每车油耗下降了 12.3%，交叉口的通行延误降低了 27%。

2.2 多模式交通网络的协同衔接设计

低碳路网规划需打破交通方式间的割裂状态，构建“主骨架 - 次骨干 - 微循环”三级协同网络，实现各交通方式的优势互补与高效衔接。在骨干层，以轨道交通为核心串联城市各功能区，通过四阶段客流预测模型与 GIS 空间分析技术优化线路走向，减少线路重叠与迂回，确保主要客流走廊的轨道交通覆盖率达 100%；在接驳层，依托公交干线、快速公交（BRT）实现轨道交通与社区的紧密连接，采用动态调度系统根据轨道交通到站客流调整发车间隔，高峰时段发车间隔压缩至 3-5 分钟，平峰时段保持 5-8 分钟，同时在公交站点设置电子显示屏实时显示轨道交通到站信息；在微循环层，建设连续的自行车专用道与

表 1 低碳城市交通路网规划核心策略及实施效益

规划维度	核心策略	关键技术 / 方法	实施路径	低碳效益量化指标
路网结构优化	层级化路网密度管控	遗传算法优化纵断面、交叉口仿真模拟、VISSIM 仿真	核心区加密支路网（密度 8-12km/km ² ），郊区优化主干路布局，居住区构建四级路网	车辆平均能耗降低 10%—15%，通行效率提升 20%，交叉口延误减少 25%—30%
TOD 模式应用	站城融合三维开发（3D+1E）	容积率动态调节、功能混合度评估、GIS 空间分析	500 米核心区混合开发（混合度 ≥ 0.7），1 公里拓展区配套服务，绿地率 ≥ 30%	公共交通分担率提升 25%—35%，通勤距离减少 30%，年减碳 35—45 万吨
多模式衔接	三级交通网络构建	四阶段客流预测、动态调度算法、智能调度系统	建设自行车专用道（宽度 ≥ 4 米），优化公交接驳线路，实现票制互通	私家车使用率下降 18%—25%，碳排放减少 22%，公共交通分担率提升 15—20 个百分点
智能管控体系	动态交通流优化	毫米波雷达监测、深度学习调度、GIS 空间分析	实时调整信号灯配时，发布拥堵预警，公交 - 地铁信息实时联动	道路通行能力提升 15%，怠速能耗减少 28%，换乘效率提升 35%

表 2 轨道交通绿色建筑核心技术及应用成效

技术类别	技术名称	创新点	应用案例	量化指标
车辆节能技术	竹基复合车体材料	仿生梯度层积结构，可再生轻质阻尼，可生物降解	时速 350 公里高铁车厢底板	密度 0.9g/cm ³ ，能耗降低 8.2%，减震性提升 40%，隔音改善 15 分贝
	碳化硅变流器牵引系统	高效电能转换，多目标协同控制，轻量化设计	大连地铁 5 号线	转换效率 98.5%，加速能耗降低 12%，设备减重 25%，体积减小 30%
土建绿色技术	导光井自然采光系统	棱镜反射体系，光强自适应调节，导光效率 85%	上海地铁 14 号线豫园站	日间照明能耗减少 60%，年节电 120 万度，减碳 960 吨
	光伏 - 雨水集成高架顶棚	碲化镉薄膜电池，双功能模块集成，雨水净化回收	北京地铁亦庄线	发电效率 18.5%，年发电量 280 万度，年节水 3.2 万吨
能源转型技术	双向储能供电系统	制动能量回收，负荷削峰填谷，钒液流电池储能	广州地铁 3 号线	回收效率 92%，峰谷差减少 25%，年节约电费 1800 万元
	氢能源工程车	燃料电池动力，零排放作业，快速加氢	上海地铁龙阳路车辆段	续航里程 300km，加氢时间 15 分钟，年减碳 900 吨，运维成本降低 20%

步行系统, 自行车专用道采用彩色沥青铺装与物理隔离护栏保障通行安全, 在交叉路口设置自行车优先信号与二次过街设施, 步行道宽度不低于 3 米, 配套建设遮阳棚、休息座椅等便民设施(见表 1)。

3 轨道交通绿色建设的关键技术创新

3.1 车辆系统的节能化升级技术

减少运营能耗和节能降耗工作, 需要以列车车体的轻量化和节能化为落脚点, 重视保障安全和舒适。传统碳钢车体密度达 $7.85\text{g}/\text{cm}^3$, 若运用中空铝型材框架, 再配以碳纤维增强复合材料面板的复合车体, 车体密度可以降到 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 以下^[1], 经拓扑优化设计、仿生结构仿真, 减重可达 30%, 但能保证车体刚度及抗冲击能力, 并保证列车行车安全和乘坐舒适感。中工国环投资有限公司自主研发的竹基复合材料底板已经投入 350 公里时速动车组制造。竹基复合材料底板用到“竹纤维-环氧树脂-碳纤维”的梯度层积结构, 其密度是铝合金的 60%, 即 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$, 减振率达 40%, 隔声量提高了 15dB(A), 使得列车能耗降低 8.2%; 另外竹基材料为可生物降解材料, 优于传统材料。

3.2 土建工程的绿色化建造技术

线路规划与土建施工的协同节能是轨道交通绿色建设的重要环节, 需实现“规划-设计-施工-运维”全流程的低碳化。地下车站创新导光井设计, 通过棱镜反射体系与光强自适应调节系统将自然光引入站厅层与站台层, 导光效率达 85% 以上, 可减少日间照明能耗 60% 以上, 上海地铁 14 号线豫园站采用该技术后, 年节电达 120 万度, 相当于减少碳排放 960 吨。盾构施工推广泥水平衡与土压平衡双模切换技术, 根据砂层、黏土层、卵砾石层等不同地质条件动态调整推进参数, 配备渣土改良系统与泥浆回收装置, 较传统施工降低能源消耗 23%, 减少泥浆排放量 40%, 渣土资源化利用率提升至 75% (用于道路垫层与制砖)(见表 2)。

4 低碳交通体系的协同发展保障机制

4.1 智能化管控体系的支撑作用

大数据和人工智能技术是低碳交通实施精准调控的有效抓手, 构建从“感知-分析-决策-执行”的全链条智能管控。以列车群协同调度系统为例, 其运用深度强化学习算法, 对多车的速度、距离、能耗的耦合关系实时计算,

并生成全局最优节能运行图, 在北京地铁使用之后, 列车正点率达到 99.98%, 空驶率下降 15%, 牵引能耗下降 8%。将设备健康管理系统中建立的“振动-温度-电流-能耗”四参数融合诊断模型通过物联网传感器采集风机、水泵、空调等设备的运行状态数据, 再采用机器学习算法预测设备能效劣化的趋势, 从而设备故障率降低 40%、维护成本降低 28%, 避免了因为设备故障而引发的大面积停机造成的耗能激增现象。

交通综合监测平台实现多模式网络的协同管控。通过毫米波雷达、视频分析、地磁传感器等设备构建全要素客流密度感知系统^[4], 动态监测轨道交通站点、公交场站、道路交叉口的客流分布, 上海虹桥交通枢纽应用该技术后, 换乘通道拥堵时长减少 60%, 换乘效率提升 35%。开发乘客碳账户系统, 将地铁出行里程、公交出行次数、骑行时长等自动折算为减碳数值^[5], 用户可通过减碳积分兑换乘车优惠、地铁周边商户优惠券等, 深圳已累计注册用户 230 万人, 带动绿色出行比例提升 12 个百分点, 年额外减少碳排放 3.6 万吨。

4.2 政策与市场的双轮驱动机制

完善的政策体系为低碳交通发展提供制度保障。制定轨道交通碳足迹核算地方标准, 明确建设期建材生产、运输、施工与运营期电力消耗、设备维护的碳排放计量规则, 规范数据采集、核算方法与报告格式, 目前江苏、广东已出台地方实施细则, 实现碳排放的精准量化与管理。设立绿色技术应用补贴基金, 对永磁牵引、智能照明、光伏一体化等成熟低碳技术给予设备更新补贴(补贴比例不超过设备投资额的 30%), 中央财政 2024 年安排补贴资金达 85 亿元, 带动社会资本投入超 300 亿元。推行合同能源管理(EMC)和节能效益分享机制, 鼓励第三方节能服务机构投资车站节能改造、可再生能源应用等项目, 在保证地铁运营安全的前提下, 按照节能效益共享原则进行合作, 合作周期为 5-8 年。杭州地铁与节能企业合作改造 12 个车站空调及照明系统, 已实现节能 70% 以上。

市场化的手段有助于加快动力转换。如改善绿电消纳机制, 推动轨道运营企业和风电、光伏企业签订长周期的直购电协议。目前, 国家电网建设有跨区域绿电交易平台, 2024 年, 轨道运营行业绿电交易电量为 280 亿度, 占轨

道运营行业用电总量的 18%，和传统火电相比减少碳排放 2240 万吨；建立行业级能效监测、评价、排行、对标等制度。陆续对各地市开展了单位周转量能耗、碳排放强度等方面的监测排名工作，并对外公布了若干批次示范线网的榜单，对能效水平先进者，予以政策倾斜及荣誉奖励，在行业内形成“比学赶超”的良好氛围，使得全国地铁单位能耗相较 2020 年平均降低约 18%，其中上海地铁 10 号线，深圳地铁 11 号线等标杆线路单位能耗降幅达到 25% 以上。

4.3 跨领域协同创新的生态构建

成立轨道交通节能产业联盟的技术突破路径，需要汇聚车辆、电气设备、新材料研发、高校及科研院所等资源力量，打造集产学研用一体示范基地，加快前沿技术工程验证和产业化应用进程，目前已经培育形成了“大连交通大学 - 中车集团 - 华为技术有限公司”“西南交通大学 - 中国铁建 - 比亚迪”等创新联合体，实现了智能调度、新材料、氢能动力等领域 23 项关键技术突破，竹基复合材料、碳化硅牵引变流器等 5 项技术实现大规模应用。同时，还可以借鉴其他国家轨道交通的发展经验，引入德国模块化变电站、新加坡数字孪生运维、日本节能制动系统等国外先进技术和理念，并针对我国自身的地质条件、客流特征等实际情况加以改造利用，例如广州地铁借助于新加坡地铁在数字化运营管理上的经验，研制出了通过数字孪生运维系统的设备预测性维修预警率达到 90%、设备维修效率提升了 45%、设备维修成本下降了 30% 的成果。

5 结语

低碳理念下，城市的交通发展模式从单一的技术应用进入到系统协同创新时代，呈现出“规划低碳化、技术绿色化、运营智能化、管理市场化”的特点。城市交通路网规划由“以车为本”转向“以人为本”，空间上通过优化城市路网结构、运用 TOD 模式和多方式衔接等实现由城市交通慢行道路网向慢行轨道共同支撑城市交通路网体系转变；从技术层面看，轨道交通绿色建筑技术在车辆节能、土建环保和能源转型等方面取得了突破性进展，形成一个全生命周期的低碳技术体系，两类表格所展现的规划策略与技术参数能够成为实践应用时可以量化的行动指南。

参考文献：

- [1] 祝涛. 绿色低碳理念下改善现代城市交通规划的措施[J]. 智能城市, 2021,7(16):103-104.
- [2] 夏佳, 郑晏群. 低碳理念下城市交通规划措施研究[J]. 河南科技, 2021,40(20):98-101.
- [3] 邵力. 绿色低碳理念下的现代城市交通规划措施分析[J]. 工程建设与设计, 2020,(24):52-53.
- [4] 龚昌游, 龚大卫. 绿色低碳理念下现代城市交通规划策略[J]. 城市住宅, 2020,27(12):130-131.
- [5] 刘卫国. 绿色低碳理念下现代城市交通规划措施分析[J]. 住宅与房地产, 2020,(32):195-196.

作者简介：方立英（1978-），女，汉族，河北景县人，硕士研究生，高级工程师，研究方向：交通智能化。