

市政道路工程低碳化设计与数字化评估系统研究

陈子豪

江西佳源丰建设工程有限公司，江西抚州，344000；

摘要：“双碳”目标推动下，市政道路工程的低碳转型成为城市绿色发展的重要课题。市政道路作为城市基础设施的关键构成，其全生命周期内的碳排放问题日益突出。低碳化设计是控制道路工程碳足迹的核心手段，而数字化技术的应用则为低碳效果评估提供了精准支撑。本文围绕市政道路工程低碳化设计与数字化评估系统展开研究，梳理道路工程各阶段碳排放特征，明确低碳设计方向。构建包含材料、结构、施工的低碳设计体系，挖掘各环节减排潜力。依托数字化技术搭建评估系统，实现碳排放实时测算与动态监控，为市政道路绿色低碳转型提供理论与技术参考。

关键词：市政道路工程；低碳化设计；数字化评估；全生命周期；碳足迹

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.072

引言

市政道路是保障城市功能运转的重要基础设施，其建设与运维过程伴随着大量能源消耗和碳排放，在城市碳减排任务中占据重要地位。传统道路工程设计多以功能和成本为核心，对碳减排需求重视不足，导致全生命周期碳排放偏高。同时，碳排放评估多采用事后核算方式，缺乏高效的数字化工具，难以在设计阶段实现精准预判与优化。随着BIM、大数据等技术与工程领域的深度融合，为低碳设计体系构建和数字化评估系统开发提供了可能。开展相关研究，对推动市政工程碳减排、提升建设绿色化水平具有重要现实意义。

1 市政道路工程低碳化设计的理论基础与核心原则

1.1 全生命周期碳排放特征

市政道路工程碳排放贯穿全生命周期，各阶段特征存在显著差异。规划设计阶段虽直接碳排放量较低，但决策将影响后续环节减排空间，如路线选址会决定土地占用和材料运输距离。建设阶段是碳排放集中期，建材生产、运输及现场施工均产生大量排放，其中水泥、沥青等材料生产占比最高。运维阶段碳排放具有长期性，道路养护、照明及交通疏导相关能耗持续产生。废弃阶段碳排放主要来自拆除作业和建材处理，若实现建材回收再利用可大幅降低排放。明确各阶段特征是开展低碳设计的前提，可为精准减排提供靶向依据。

1.2 低碳设计理论与内涵

市政道路低碳化设计的理论支撑涵盖循环经济、全

生命周期评价等多学科理论。循环经济理论强调资源高效利用和循环再生，指导道路工程实现建材回收复用；全生命周期评价理论则为碳排放核算提供系统方法，实现各阶段排放的全面考量。其内涵并非单纯降低某一个环节碳排放，而是通过统筹规划，实现全生命周期碳足迹最小化。低碳设计需兼顾技术可行性、经济合理性与环境友好性，在满足道路使用功能的基础上，通过科学决策将低碳理念融入各环节，最终实现工程效益与生态效益的协同统一。

1.3 低碳设计原则与框架

市政道路低碳化设计需遵循系统性、经济性、可行性和前瞻性原则。系统性原则要求统筹各阶段碳排放，避免局部优化导致整体排放增加；经济性原则强调在低碳改造中控制成本，实现减排与效益平衡；可行性原则确保设计方案符合现有技术水平和施工条件；前瞻性原则则需考虑未来技术发展和减排要求。实施框架应包括目标设定、碳排放核算、方案设计、优化调整四个环节，通过明确减排目标，依托科学核算方法，设计多元低碳方案，最终结合评估结果完成方案优化，形成闭环设计流程。

2 市政道路工程低碳化设计的关键技术路径

2.1 低碳材料选型与应用

低碳环保材料选型是道路低碳设计的关键环节，需优先选用低碳排放、可回收利用的材料。在面层材料选择上，可采用温拌沥青替代热拌沥青，其通过添加温拌剂使拌和温度降低30–60°C，大幅减少燃油消耗和CO₂排放，同时在高温稳定性、水稳定性等路用性能上与热

拌沥青持平。基层材料可推广使用工业废渣再生骨料，如粉煤灰、矿渣等，这些工业废弃物的资源化利用不仅能减少堆存带来的固体废弃物污染，还能省去天然骨料开采及新型建材生产环节的大量排放。此外，新型低碳水泥基材料、高性能混凝土等也可应用于道路结构，通过优化配比提升材料强度和耐久性，有效延长道路使用寿命，减少后期维修重建带来的二次碳排放，间接实现减排目标。材料应用中需结合当地资源禀赋，优先选用本地易得的低碳材料，确保供应稳定性和施工适应性，降低材料运输成本与碳排放。

2.2 道路结构优化设计

道路结构优化通过合理调整结构层厚度和组合形式，在保证承载能力与使用性能的前提下显著降低碳排放。基于道路通行荷载特征，运用有限元等力学计算模型精准优化各结构层参数，明确不同车道、不同路段的荷载差异，避免因设计冗余导致的材料过度使用。对于住宅小区、支路等轻交通路段，可采用沥青稳定碎石等柔性基层替代部分水泥稳定基层，大幅减少水泥用量，降低水泥生产过程中的高碳排放。在路基设计中，推广使用智能压实度优化技术，通过传感器实时监测压实效果，精准控制压实参数，既提升路基稳定性和承载能力，又减少因路基沉降导致的后期养护需求与碳排放。

2.3 低碳施工工艺创新

通过技术革新降低能源消耗。在沥青路面施工中，采用沥青再生技术，将旧沥青混合料回收加工后重新利用，减少新料消耗和废弃料处理排放。推广机械化协同施工模式，优化施工流程，减少设备闲置时间，提高能源利用效率。引入绿色施工管理体系，对施工过程中的能耗、排放进行实时监控，及时调整施工方案。此外，模块化施工技术可缩短现场作业时间，减少施工扬尘和噪音污染，同时降低因施工周期过长带来的间接碳排放，提升施工阶段的低碳水平。

3 市政道路工程数字化评估系统的构建基础

3.1 数字化评估技术支撑

数字化评估系统的支撑体系以BIM技术为核心，融合大数据、物联网、云计算等前沿技术。BIM技术可构建道路工程三维模型，实现各阶段数据的集成与可视化，为碳排放核算提供精准数据支撑。大数据技术用于处理工程全生命周期的海量数据，通过数据挖掘分析碳排放规律，为评估提供依据。物联网技术通过在施工设备、材料上安装传感器，实现能耗和排放数据的实时采

集。云计算技术则为系统提供强大的存储和计算能力，保障评估过程的高效运行，实现多用户协同工作和数据共享，提升评估效率和准确性。

3.2 评估指标体系构建

评估指标体系构建需遵循科学性、系统性、可操作性原则，涵盖道路全生命周期各阶段。指标体系包括规划设计阶段的路线合理性、低碳材料占比；建设阶段的能耗指标、废弃物回收利用率；运维阶段的养护频率、照明能耗；废弃阶段的建材回收率等。各指标需明确计算方法和数据来源，采用层次分析法确定指标权重，突出核心减排环节的重要性。同时，指标体系应具备动态调整能力，可根据不同区域、不同类型道路工程的特点，优化指标内容和权重，确保评估结果的针对性和可靠性。

3.3 评估系统功能需求

数字化评估系统的核心功能需求包括数据管理、碳排放核算、方案评估、结果展示等。数据管理功能需实现工程各阶段数据的录入、存储、查询和更新，支持多种数据格式导入导出。碳排放核算功能应内置标准化核算模型，根据输入数据自动计算各阶段碳排放量。方案评估功能可对比不同设计方案的碳排放水平，生成减排效益分析报告。结果展示功能采用图表、报表等可视化形式呈现评估结果，直观反映碳排放分布特征。此外，系统还需具备权限管理、日志记录等辅助功能，保障数据安全和系统稳定运行。

4 市政道路工程数字化评估系统的设计与实现

4.1 系统架构与模块划分

数字化评估系统采用B/S架构设计，实现客户端零安装，方便用户通过浏览器访问。系统架构分为数据层、服务层和应用层。数据层负责存储工程基础数据、碳排放数据及评估结果数据，采用关系型数据库保证数据一致性。服务层包含数据服务、核算服务和分析服务，提供数据处理、碳排放计算及评估分析等核心服务。应用层划分为数据管理模块、碳排放核算模块、方案评估模块、结果展示模块和系统管理模块，各模块功能独立又相互关联，通过统一接口实现数据交互，确保系统整体功能的协调运行。

4.2 碳排放量测算模型

碳排放量测算模型的构建以全生命周期理论为基础，参考相关行业标准和碳排放核算指南。模型涵盖建材生产、运输、施工、运维及废弃五个阶段，针对各阶段碳排放来源建立计算子模型。建材生产阶段根据材料

用量和碳排放因子计算排放；运输阶段结合材料运输距离、运输方式及能耗数据核算；施工阶段考虑设备能耗和燃料消耗；运维阶段纳入养护材料消耗和能源使用；废弃阶段则计算拆除能耗和废弃物处理排放。模型嵌入系统后，可根据用户输入的工程参数自动调用对应子模型，实现碳排放快速精准测算。

4.3 系统界面与操作优化

系统界面设计遵循简洁直观、操作便捷的原则，采用模块化布局呈现核心功能。主界面分为导航区、数据输入区和结果展示区，导航区清晰列出各功能模块，方便用户快速切换；数据输入区提供表单式输入界面，支持批量数据导入，减少手动输入工作量；结果展示区采用柱状图、折线图、饼图等多种图表形式，直观展示碳排放数据及评估结果。操作流程优化方面，通过设置引导式操作步骤、添加数据验证提示和错误预警功能，降低用户操作难度。同时，支持操作日志查询，便于用户追溯操作过程和排查问题。

5 低碳化设计与数字化评估的协同应用机制

5.1 设计与评估动态联动

设计方案与评估系统的动态联动模式通过数据接口实现两者的无缝对接。在设计阶段，低碳设计方案的相关参数可实时同步至数字化评估系统，系统自动调用测算模型进行碳排放评估，并将结果反馈至设计平台。当设计参数发生调整时，评估系统可实时捕捉变化数据，重新计算碳排放并生成更新后的评估报告。这种联动模式打破了设计与评估的信息壁垒，避免了传统设计中评估滞后的问题，使设计人员能够及时掌握方案的低碳效果，为设计优化提供实时依据，提升设计与评估的协同效率。

5.2 评估结果导向优化路径

基于评估结果的设计方案优化路径以减排效益最大化为目标，针对评估中发现的高碳排放环节制定优化策略。若评估结果显示建材生产阶段排放偏高，可优化材料选型，增加低碳环保材料用量；若施工阶段排放突出，可调整施工工艺，采用再生技术和节能设备。优化过程中，通过评估系统对调整后的方案再次进行碳排放测算，对比优化前后的减排效果。形成“设计-评估-优化-再评估”的循环优化机制，确保最终设计方案在满足功能要求的前提下，实现碳排放量最小化。

5.3 协同应用保障措施

低碳化设计与数字化评估协同应用的保障措施包括技术、管理和人才三方面。技术保障需建立数据标准体系，规范设计与评估数据的格式和内容，确保数据交互顺畅；定期对评估系统进行升级维护，提升系统性能和安全性。管理保障需制定协同工作制度，明确设计人员与评估人员的职责分工，建立高效的沟通机制。人才保障则通过开展专业培训，提升相关人员的低碳设计理念和数字化工具操作能力，使其掌握协同应用的核心方法。同时，鼓励企业与科研机构合作，推动技术创新和成果转化，为协同应用提供持续支撑。

6 结论

本文围绕市政道路工程低碳化设计与数字化评估系统展开系统研究，明确了市政道路全生命周期各阶段的碳排放特征，构建了以理论支撑、原则框架为基础的低碳化设计体系。从材料选型、结构优化、施工工艺三个维度提出了具体的低碳技术路径，为工程实践提供了可操作的减排方案。基于BIM、大数据等技术搭建了数字化评估系统，设计了系统架构和功能模块，嵌入了全生命周期碳排放测算模型，实现了设计方案碳排放的实时评估。建立了设计与评估的协同应用机制，形成了“设计-评估-优化”的闭环流程。研究成果丰富了市政道路低碳设计理论，其开发的评估系统为低碳方案决策提供了技术工具，对推动市政道路工程绿色低碳发展具有重要实践价值。未来可进一步优化测算模型，提升系统在复杂工程场景下的适用性。

参考文献

- [1] 李佳慧, 刘辉, 刘耀坤. 基于工程量清单的市政道路工程碳排放研究[J]. 公路与汽运, 2023, (04): 153-158.
- [2] 王博, 白清源, 霍旭挺. 低碳理念下的市政道路规划、设计思考——以富锦合作园区富辰八路市政工程为例[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(07): 20-22.
- [3] 刘王磊. 基于海绵城市建设理念下的市政道路设计要点分析[J]. 建筑监督检测与造价, 2023, 16(02): 46-50.
- [4] 何佳, 朱晓东, 张兴宇, 等. 基于可拓云模型的绿色生态型市政道路综合评价方法应用研究[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(01): 102-107.
- [5] 曹智军. 谈市政道路工程建设施工管理与质量控制[J]. 门窗, 2019, (15): 168-169.