

公路桥梁全生命周期碳排放核算与低碳养护策略

黄文龙

江西省欣达工程质量检测有限公司 江西吉安 343100

摘要: 随着全球低碳发展理念的深入推进,公路桥梁作为基础设施建设的重要组成部分,其全生命周期的碳排放问题日益受到关注。本文聚焦公路桥梁全生命周期碳排放核算与低碳养护策略,首先阐述了公路桥梁全生命周期碳排放核算的重要意义,明确了核算需涵盖从原材料生产、建设施工、运营维护直至最终拆除处置的完整阶段。在此基础上,分析了各阶段碳排放的主要来源与特征,探讨了当前核算工作中面临的挑战。进而,围绕低碳养护这一核心,从养护理念更新、技术创新应用、管理模式优化等多个维度,系统提出了公路桥梁低碳养护的具体策略,旨在为降低公路桥梁全生命周期碳排放、推动基础设施领域的绿色可持续发展提供理论参考与实践指导。

关键词: 公路桥梁;全生命周期;碳排放核算

引言

在当前国家大力倡导“碳达峰、碳中和”战略目标的背景下,交通基础设施建设与运营的低碳转型已成为行业发展的必然趋势。公路桥梁作为连接区域经济、保障民生出行的关键载体,其在漫长的全生命周期内不仅消耗大量的资源能源,也会产生可观的碳排放,对生态环境造成潜在影响。传统的公路桥梁管理模式往往侧重于结构安全与功能保障,对碳排放的关注相对不足,难以适应新时代绿色发展的要求。因此,全面、准确地核算公路桥梁全生命周期的碳排放,并据此制定科学有效的低碳养护策略,对于优化资源配置、减少能源消耗、降低环境负荷具有至关重要的现实意义。开展此项研究,有助于推动公路桥梁工程从规划设计、建设施工到运营维护的全流程低碳化管理,促进交通行业向绿色、低碳、可持续方向转型升级,为实现国家整体的碳减排目标贡献力量。

1 公路桥梁全生命周期碳排放核算

1.1 碳排放核算的基本框架

公路桥梁全生命周期碳排放核算是指对桥梁从规划设计、材料生产、施工建造、运营维护到拆除处置全过程产生的温室气体排放进行系统量化。其基本框架遵循国际通用的生命周期评价(LCA)方法,以ISO 14040系列标准为指导,涵盖目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释四个阶段。目标与范围定义需明确核算目的(如评估桥梁碳足迹、制定减排策略)、系统边界(如是否包含材料运输、设备运行)

与功能单位(如每延米桥梁、每平方米桥面);清单分析需收集各阶段能源消耗与材料使用数据,计算直接排放(如燃料燃烧)与间接排放(如电力生产);影响评价将排放数据转化为全球变暖潜值(GWP),以二氧化碳当量(CO₂e)表示;结果解释则分析主要排放源与减排潜力,为低碳决策提供依据。该框架的建立为公路桥梁碳排放的科学核算提供了标准化流程,是实现碳减排目标的基础。

1.2 主要排放源与核算方法

公路桥梁全生命周期碳排放源可分为材料生产、施工建造、运营维护和拆除处置四个阶段。材料生产阶段是主要排放源,占全生命周期排放的40%~60%,主要包括水泥、钢材、沥青等建材的生产过程排放,其中水泥生产因石灰石煅烧与燃料燃烧产生大量CO₂,钢材生产因高炉炼铁与电弧炉炼钢消耗大量电力;施工建造阶段排放占20%~30%,主要包括施工机械(如挖掘机、起重机)燃料消耗、临时设施(如工棚、围挡)材料使用与运输过程排放;运营维护阶段排放占15%~25%,主要包括养护材料(如修补砂浆、防水材料)生产、养护设备(如铣刨机、摊铺机)运行与交通延误(如养护施工导致的车辆绕行)产生的排放;拆除处置阶段排放占5%~10%,主要包括拆除机械(如破碎机、切割机)燃料消耗与废弃物处理(如建筑垃圾填埋、回收)产生的排放。核算方法采用过程分析法与投入产出法相结合,过程分析法通过实测数据或文献数据计算各阶段排放,投入产出法则通过经济统计数据估算间接排放。排放因子选择需优先采用本

土化数据（如《中国建筑产品生命周期碳排放数据库》），国际数据（如 IPCC 排放因子数据库）作为补充。对主要排放源的精准识别与科学核算，可为公路桥梁碳减排提供明确方向^[1]。

1.3 核算结果的应用价值

公路桥梁全生命周期碳排放核算结果具有多方面的应用价值，为行业低碳转型提供科学支撑。在政策制定方面，核算结果可为政府部门制定桥梁碳排放标准（如单位桥面面积碳排放限值）、碳减排政策（如低碳建材推广、绿色施工激励）提供依据，推动行业碳达峰与碳中和目标实现；在设计优化方面，核算结果可识别高排放环节（如混凝土用量过大），指导设计人员采用低碳结构（如钢混组合结构）、低碳材料（如再生骨料、低碳水泥）与低碳工艺（如预制拼装技术），从源头降低碳排放；在施工管理方面，核算结果可优化施工方案（如减少机械空转、提高材料利用率），推广绿色施工技术（如太阳能照明、电动机械），降低施工阶段排放；在养护决策方面，核算结果可评估不同养护策略的碳排放影响（如预防性养护 vs. 修复性养护），优先选择低碳养护方案（如裂缝注浆 vs. 板块更换），延长桥梁使用寿命，减少全生命周期排放；在碳交易市场方面，核算结果可为桥梁项目参与碳交易提供数据支持，通过碳减排量交易实现经济效益与环境效益双赢。核算结果的系统应用，可推动公路桥梁行业从传统高碳模式向低碳模式转变，为实现国家“双碳”目标贡献力量。

2 低碳养护策略研究

2.1 传统养护策略的碳排放问题

传统公路桥梁养护策略以功能修复和结构安全为核心，往往忽视碳排放控制，存在显著的低碳化不足问题。首先，传统养护方式以高能耗、高排放的修复性养护为主，如大面积混凝土更换、钢结构重涂防腐层等，这些工艺不仅消耗大量水泥、钢材等高碳材料，还依赖重型机械设备，导致施工阶段碳排放集中且强度高。其次，养护决策多基于经验判断或短期经济性，缺乏对全生命周期碳排放的系统评估，导致养护频率过高或方案选择不当，如频繁更换可修复构件、过度依赖新材料而非再生材料，进一步加剧了资源消耗与碳排放。此外，传统养护过程中能源结构单一，主要依赖化石燃料驱动的机械设备，施工过程中的能源利用效率低，间接增加了碳排放强度。这些问题的存在，使得传统养护模式在满

足桥梁功能需求的同时，也带来了显著的碳足迹，难以适应“双碳”目标下的绿色发展要求^[2]。

2.2 低碳养护策略的主要方向

低碳养护策略旨在通过技术创新与管理优化，在保障桥梁安全与功能的前提下，最大限度降低养护过程中的碳排放。其主要方向包括：一是推广预防性养护，通过定期检测与早期干预（如裂缝封闭、表面防水处理），延缓结构性能退化，减少大规模修复需求，从而降低材料消耗与施工排放；二是优先采用低碳材料，如使用再生骨料混凝土、低碳水泥、高性能复合材料等，减少原生材料开采与生产过程中的碳排放；三是优化养护工艺，如采用预制拼装技术、冷再生技术等，减少现场作业量与机械使用时间，提高施工效率并降低能源消耗；四是提升能源利用效率，如引入电动或混合动力施工设备、利用太阳能等可再生能源供电，减少化石能源依赖；五是建立基于全生命周期碳排放的养护决策机制，通过量化评估不同养护方案的碳排放影响，优先选择低碳高效方案。这些方向共同构成了低碳养护策略的核心框架，为公路桥梁养护的绿色转型提供了系统性路径。

2.3 策略实施的关键技术与路径

低碳养护策略的实施需依托关键技术创新与系统性路径规划。关键技术方面，一是低碳材料应用技术，包括再生骨料混凝土配合比设计、低碳水泥制备工艺、高性能复合材料（如碳纤维布、玻璃纤维筋）在桥梁加固中的应用，这些技术可显著降低材料生产阶段的碳排放；二是智能化检测与监测技术，如无人机巡检、光纤传感、无损检测等，实现桥梁状态实时精准评估，为预防性养护提供数据支撑，避免不必要的修复作业；三是低碳施工技术，如预制构件标准化生产与快速拼装技术、冷再生沥青路面技术、水性环保涂料技术等，减少现场施工能耗与排放；四是数字化管理技术，如基于 BIM 的养护模拟与优化平台、碳排放核算软件等，实现养护方案的全生命周期碳排放动态评估与优化。实施路径方面，需分阶段推进：第一阶段开展低碳养护技术试点，验证技术可行性与减排效果；第二阶段制定低碳养护技术标准与碳排放核算规范，明确技术要求与评价方法；第三阶段建立低碳养护激励机制，如政府补贴、碳交易优惠等，推动技术应用与行业转型；第四阶段构建全生命周期碳排放数据库，为养护决策提供持续数据支持。通过关键技术与实施路径的协同推进，可实现公路桥梁养护从高碳模式向低碳模式

的系统性转变，为交通领域碳减排提供重要支撑^[3]。

3 低碳养护策略的实施效果评估

3.1 评估指标体系构建

评估指标体系需围绕公路桥梁低碳养护的核心目标，从碳排放、结构性能、经济性三个维度构建，确保指标的科学性与可操作性。碳排放维度核心指标包括养护阶段碳减排量、单位养护里程碳排放强度、低碳材料（如再生沥青、再生混凝土）应用比例，其中碳减排量需以传统养护工艺的碳排放均值为基准值，计算实施低碳策略后的实际差值，单位养护里程碳排放强度按养护作业总碳排放量与养护桥梁里程的比值确定；结构性能维度指标涵盖桥梁承载能力保留率、桥面平整度达标率、构件耐久性提升年限，承载能力保留率通过养护前后桥梁荷载试验数据对比计算，耐久性提升年限依据混凝土碳化深度、钢筋锈蚀速率等检测数据推算；经济性维度指标包含低碳养护技术增量成本回收期、全生命周期养护成本降低比例，增量成本回收期按低碳技术额外投入与年均碳减排收益、养护成本节约额的比值计算。指标权重采用层次分析法确定，结合公路工程、碳排放核算、养护技术领域专家意见，确保各维度指标对评估结果的贡献度合理，为后续效果评估提供统一、规范的量化依据^[4]。

3.2 策略实施对碳减排的贡献

低碳养护策略的碳减排贡献体现在养护全流程的关键环节。材料环节，采用再生骨料替代原生骨料时，可减少骨料开采、破碎、运输环节的碳排放，如再生沥青应用于桥面铺装时，每万吨再生沥青可减少原生沥青炼制相关碳排放约 800 吨；施工环节，模块化养护工艺（如预制拼装式桥面修补）可缩短现场作业时间，降低施工机械（如压路机、摊铺机）的能耗碳排放，对比传统现场浇筑工艺，单位桥面修补作业的机械碳排放可降低 25%~30%；运营环节，智能养护监测系统（如基于物联网的桥梁应力、位移监测设备）可实时捕捉结构损伤趋势，避免过度养护导致的重复作业碳排放，同时优化养护作业频次，减少不必要的设备调度与材料运输碳排放。此外，低碳养护策略还能通过延长桥梁构件使用寿命，减少桥梁全生命周期内的养护次数，间接降低多次养护累积的碳排放，形成全流程、持续性的碳减排效应，推动公路桥梁养护环节向低能耗、低排放模式转型。

3.3 实施中面临的主要挑战

低碳养护策略实施面临技术、经济、管理层面的多重

挑战。技术层面，部分低碳材料的性能稳定性仍需长期验证，如高掺量再生混凝土在桥梁承重构件中的长期抗裂性、抗冻性，需更多长期监测数据支撑其在复杂服役环境（如高温、高湿地区）的适用性，且部分低碳养护技术（如碳纤维布加固技术）的施工工艺要求较高，对现场作业人员的操作精度要求严格，易因施工偏差影响碳减排效果与结构性能。经济层面，低碳养护技术的初始投入普遍高于传统工艺，如智能监测设备的采购、安装成本，低碳型粘结剂、涂料的材料成本，均会增加养护项目的前期支出，部分地方公路养护部门受预算限制，难以大规模推广应用。管理层面，跨部门协同机制不完善，碳排放核算需养护部门、环保部门、材料供应商共享数据（如材料生产碳排放因子、施工机械能耗数据），现有数据共享平台建设滞后，导致碳排放计量精度受影响；同时，基层养护人员的低碳养护意识与技术能力不足，对新型低碳设备的操作、低碳材料的施工规范掌握不充分，需系统培训提升，否则易制约策略实施效果^[5]。

4 结语

公路桥梁全生命周期碳排放核算与低碳养护策略的研究，为交通领域的绿色转型提供了重要的理论支撑和实践路径。通过系统化的碳排放核算框架，能够精准识别各阶段的主要排放源，为制定科学的减排措施奠定基础。同时，低碳养护策略的提出不仅优化了传统养护模式中的高碳环节，还通过技术创新和管理升级实现了显著的碳减排效果。然而，策略的全面推广仍需克服技术稳定性、经济可行性以及管理协同性等多方面挑战。未来，应进一步加强低碳技术的研发与应用，完善相关政策支持体系，推动行业向低碳化、智能化方向迈进，从而助力实现国家“双碳”目标及可持续发展愿景。

参考文献：

- [1] 李新航. 基于全生命周期的风电系统碳排放核算与分析[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(6):5.
- [2] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(8):15.
- [3] 陶源, 刘伟军. 大型公共建筑工程 LCA 模型下的碳排放敏感性分析[J]. 中国建筑金属结构, 2022(009):000.
- [4] 赵伟祥. 装配式建筑物化阶段碳排放核算模型与低碳化路径研究[D]. 安徽建筑大学, 2022.
- [5] 李岳岩, 张凯, 李金璐. 居住建筑全生命周期碳排放对比分析与减碳策略[J]. 2021.