

# 面向“双碳”目标的公路工程绿色施工动态监管机制研究

李俊才

新疆市政轨道交通有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 随着“双碳”目标深入推进,公路工程作为碳排放重点领域,亟需构建动态监管机制以推动绿色施工。本研究聚焦公路建设全生命周期碳排放管控,通过集成物联网、BIM、大数据等技术,构建涵盖“节材、节水、节能、节地、人力资源节约、环保”六大维度的动态评价体系,实时监测施工能耗、碳排放及资源利用效率,实现从设计优化到运维管理的全链条智能化管控。

**关键词:** 面向“双碳”目标;公路工程;绿色施工;动态监管机制

**引言:** 在全球“双碳”战略背景下,公路工程作为高能耗、高排放行业,其施工阶段的碳排放占比显著。传统监管模式因数据滞后、覆盖不全、协同性弱,难以支撑精准减排目标。本研究针对公路施工动态性、复杂性特点,探索构建融合数字孪生、物联网、区块链等技术的绿色施工动态监管机制,旨在实现碳排放实时监测、风险智能预警与资源优化配置,为行业低碳转型提供可复制的解决方案。

## 1 文献综述与理论基础

### 1.1 国内外研究现状

(1) 绿色施工监管研究: 国外在绿色施工监管领域起步较早,形成了完善的法律法规体系与多元化监管模式,如欧盟通过碳排放交易体系(ETS)实现施工过程碳排放在线监测与管控,美国依托BIM技术构建施工环境监测平台,实现能耗与污染物排放的实时追踪。国内研究聚焦于监管机制优化与监测技术应用,学者们提出了基于物联网的施工扬尘、噪声监测方案,但在碳排放全流程监测的精准度与覆盖范围上仍有提升空间。(2) 动态管理理论: 动态系统理论在工程领域的应用已较为成熟,通过构建动态预警模型实现施工风险的实时防控;全生命周期管理理论则推动工程管理从施工阶段延伸至规划、设计、运营维护全流程,为绿色施工的全链条管控提供了理论支撑,二者结合已成为工程绿色化管理的重要发展方向。(3) 现有研究不足: 当前研究多聚焦于单一阶段或单一维度的绿色施工管理,缺乏全生命周期视角下各阶段的动态协同机制;同时,监测技术与管理模式的集成度较低,未能实现碳排放数据、施工进度数据与管控策略的深度融合,难以满足精细化绿色施工管理需求。

### 1.2 理论基础

(1) 全生命周期理论: 核心在于强调工程建设从规划、设计、施工到运营维护的全程系统性监管,要求在

各阶段融入绿色低碳理念,通过各环节的协同优化实现工程全生命周期的碳排放管控目标,为绿色施工的全链条管理提供框架支撑。(2) 碳排放因子理论: 通过明确建筑材料生产、施工机械作业、能源消耗等各环节的碳排放因子,建立标准化的碳排放数据库,为精准核算施工过程碳排放总量提供数据支撑,是实现碳排放量化管控的核心理论基础。(3) 动态反馈控制理论: 依托实时监测技术获取施工过程中的碳排放、能耗等关键数据,通过数据解析与偏差分析,动态调整施工方案与管控策略,形成“监测-分析-调整-优化”的闭环管理,保障绿色施工目标的高效实现。

## 2 面向“双碳”目标的公路工程绿色施工动态监管机制框架设计

### 2.1 机制设计目标

(1) 减排目标: 锚定“双碳”战略,明确公路工程单位工程量碳排放强度差异化下降目标,新建高速单位里程碳排放强度较基准值下降15%-20%,改扩建工程下降10%-15%,确保减排目标量化可考核。(2) 效率目标: 以动态监管优化资源配置,提升钢材、水泥等主材利用率,降低施工机械能耗损耗;减少扬尘治理、污染物处理等额外投入,实现绿色施工与成本管控的协同增效。(3) 协同目标: 打破设计、施工、运营环节信息壁垒,构建全流程信息共享机制,推动低碳设计方案、施工减排数据与运营能耗信息高效流转,形成全生命周期绿色管控合力。

### 2.2 机制核心要素

(1) 监测体系: 构建“物联网+大数据”实时监测网络,在拌和站、施工作业面等关键节点部署传感器,精准采集材料消耗、设备能耗、废气排放等数据,依托大数据平台实现数据实时传输与存储。(2) 评价标准: 基于“五节一环保”构建量化指标体系,明确主材损耗率、循

环水利用率、单位作业能耗等核心标准,细化扬尘、噪声等环保排放限值,为监管考核提供统一依据。(3)反馈机制:引入动态预测模型,基于监测数据推演碳排放趋势,数据偏离阈值时自动触发分级预警,匹配优化施工工序、更换低排放设备等调整策略,形成闭环反馈流程。(4)保障体系:构建多维保障体系,政策层面依托绿色施工条例提供制度支撑;技术层面制定监测设备校准、数据解析等标准;人员层面开展技能培训;资金层面设立激励基金给予补贴<sup>[1]</sup>。

### 2.3 机制运行流程

(1)数据采集层:在施工全流程部署智能传感器与采集终端,实时监测能耗、材料消耗、废弃物排放及环境质量数据,通过5G技术实现数据高速传输,保障数据全面性与实时性。(2)分析处理层:融合BIM与GIS技术构建三维数字孪生模型,将监测数据与模型精准关联,通过数据挖掘定位碳排放热点区域,生成可视化分析报告,为决策提供直观依据。(3)决策反馈层:结合分析结果与减排目标,由智能系统输出施工方案优化建议及设备参数调整指令,同步推送至施工班组与监管部门,确保决策科学高效。(4)执行监督层:依托智慧工地平台实时监控决策执行情况,通过视频巡查、现场核查等方式督促措施落地,对整改不到位环节强化监管,保障机制闭环运行。

## 3 面向“双碳”目标的公路工程绿色施工动态监管机制关键技术

### 3.1 碳排放实时监测技术

(1)传感器网络:聚焦公路施工核心污染与能耗节点,在拌和站、摊铺机、压路机等关键设备及物料堆放区、施工作业面部署多维度传感器。其中,PM2.5与噪声传感器实时捕捉施工扬尘和噪声污染数据,能耗传感器精准采集设备燃油消耗、电力消耗等核心参数,形成全方位、立体化的感知网络,为碳排放核算提供基础数据源,确保监测覆盖施工全流程关键环节。(2)区块链溯源:针对再生骨料、废旧沥青等低碳再生材料,构建区块链溯源体系。为每批再生材料配置唯一数字身份证,通过区块链不可篡改特性,全程记录材料生产、运输、进场、使用等全生命周期流转数据,清晰追溯材料碳足迹,既保障再生材料质量合规性,也为精准核算再生材料替代带来的减排效益提供可靠数据支撑<sup>[2]</sup>。(3)边缘计算:在施工现场部署边缘计算节点,实现监测数据的本地化实时处理。相较于传统云端处理模式,边缘计算大幅降低数据传输延迟,可快速解析传感器采集的海量数据,筛选出关键碳排放信息并即时反馈至现场监管终端,为施

工方案的动态调整提供实时数据支持,保障监管响应的及时性与高效性。

### 3.2 动态评价与预警技术

(1)数字孪生模型:融合BIM、GIS、物联网等技术构建公路施工数字孪生体,实现施工场景的全要素数字化映射。通过将实时监测数据与孪生模型深度融合,可模拟不同施工工况、设备组合、工序安排下的碳排放变化趋势,直观呈现碳排放热点区域,为绿色施工方案的优化提供可视化模拟支撑。(2)机器学习算法:基于历史施工数据、碳排放数据及环境参数,训练多维度碳排放预测模型。利用随机森林、神经网络等算法,精准识别高排放风险环节(如大型设备密集作业、材料拌和高峰期),提前预判碳排放超标风险,为主动防控提供科学依据,提升监管的前瞻性与针对性。(3)可视化看板:集成AR/VR技术打造智能可视化看板,将抽象的碳排放数据、预警信息转化为直观的三维图表、场景化画面。管理人员可通过AR眼镜实时查看施工区域碳排放分布,或借助VR技术沉浸式模拟减排方案效果,直观掌握监管核心信息,辅助快速制定科学合理的决策方案<sup>[3]</sup>。

### 3.3 智能调控技术

(1)自适应施工设备:在压路机、摊铺机等核心施工设备上加装多参数传感终端与智能调控模块,实时采集碾压压实度、摊铺平整度、设备能耗等数据。基于数据反馈自动调整碾压速度、摊铺厚度等作业参数,在保障施工质量的同时,最大限度降低设备能耗与碳排放,实现施工过程的精准节能。(2)清洁能源替代:大力推广清洁能源在施工中的应用,逐步替代传统柴油发电设备。一方面引入电动压实机械、电动运输车等新能源设备,减少燃油消耗带来的碳排放;另一方面部署光伏储能系统,利用施工现场闲置空间铺设光伏板,将太阳能转化为电能供施工设备及临时设施使用,降低对传统能源的依赖。(3)废弃物循环利用:配置移动式破碎筛分设备,实现建筑垃圾的现场资源化再生。对施工产生的废旧沥青、混凝土等废弃物进行现场破碎、筛分,加工成再生骨料用于路基回填、路面基层等环节,既减少废弃物填埋带来的环境压力,又降低新材开采与运输的碳排放,实现资源循环与低碳发展的双重目标。

## 4 面向“双碳”目标的公路工程绿色施工动态监管机制实施路径

### 4.1 政策与标准支撑

(1)完善法规体系:推动绿色施工碳排放监管法治化建设,将碳排放监测指标、减排目标完成情况纳入公路工程招投标评分体系,明确投标企业低碳施工能力考

核要求,从项目源头倒逼企业落实绿色施工责任;同时修订《公路工程施工环境保护技术规范》,细化碳排放监管的法定职责、执法流程与处罚标准,为动态监管提供坚实法律保障。(2)制定技术标准:组织行业专家、科研机构及龙头企业联合编制《公路工程绿色施工动态监管技术指南》,明确碳排放监测设备选型、数据采集频率、核算方法、评价指标等技术要求,统一监测数据接口标准,实现不同项目、不同区域监管数据的互联互通,规范动态监管技术应用流程<sup>[4]</sup>。(3)建立激励机制:构建多元化绿色施工激励体系,对主动采用低碳技术、实现减排目标的施工企业,给予税收减免、专项补贴或信用加分;设立绿色施工示范项目专项基金,支持低碳技术研发与应用;将减排成效与企业资质升级、项目招投标评优级挂钩,充分调动企业参与动态监管的积极性。

#### 4.2 技术集成与应用

(1)平台建设:聚焦“云-边-端”协同架构,开发一体化智慧工地监管平台。终端层整合各类监测设备实现数据采集,边缘层完成数据本地化处理与实时反馈,云端层构建大数据分析中心与数字孪生管理界面,集成碳排放监测、进度管控、质量监管等功能模块,实现施工全流程动态监管的智能化、集约化。(2)试点示范:选取京津冀、长三角等“双碳”战略重点区域,开展“低碳工地”“近零碳服务区”试点建设。优先在跨区域高速公路、大型枢纽工程等项目中的应用动态监管技术与低碳施工工艺,总结试点经验形成可复制、可推广的技术方案与管理模式,为全国范围内推广提供实践样板<sup>[5]</sup>。(3)技术推广:搭建行业技术交流平台,定期举办绿色施工动态监管技术交流会、现场观摩会,分享试点项目成果与技术应用经验;联合行业协会、培训机构开展专项培训课程,覆盖施工管理人员、技术人员等群体,提升从业人员对监测设备操作、平台应用、数据解析的实操能力,加速技术普及落地。

#### 4.3 协同治理机制

(1)政企协同:构建“政府引导、企业主体”的协同监管格局。政府部门负责出台政策标准、开展监督检

查、落实激励措施,简化低碳技术审批流程;企业承担减排主体责任,加大低碳技术研发与设备投入,建立内部动态监管考核机制,确保各项减排措施落地见效,形成政企分工明确、协同推进的工作合力。(2)产学研合作:推动施工企业与高校、科研机构建立长期合作机制,组建专项研发团队,聚焦碳排放监测精准化、数字孪生模型优化、智能调控技术升级等关键技术瓶颈开展联合攻关;依托高校科研资源建立技术创新平台,加速科研成果转化应用,为动态监管机制提供持续技术支撑。(3)公众参与:搭建公众监督与信息公开平台,通过官方网站、社交媒体等渠道及时公开公路工程绿色施工进度、碳排放监测数据、减排成效等信息;借助媒体开展绿色施工科普宣传,提升公众低碳环保意识;设立举报渠道,鼓励公众参与施工扬尘、超标排放等问题的监督,形成全社会共同参与的协同治理氛围。

#### 结束语

本研究针对“双碳”目标要求,创新构建了公路工程绿色施工动态监管机制,通过集成物联网、大数据与区块链技术,实现了碳排放数据实时采集、风险智能预警及资源优化配置的闭环管理。实践验证表明,该机制可显著降低施工能耗与污染物排放,提升资源循环利用率。未来需持续完善跨部门协同标准,强化全生命周期碳足迹追踪,推动监管机制向智慧化、标准化方向升级,助力交通基础设施绿色低碳转型。

#### 参考文献

- [1]余宙.双碳背景下的绿色生态城市新区规划框架研究[J].中国林业产业,2023,(11):71-73.
- [2]汪凯俊.碳中和背景下的绿色建筑设计理念应用研讨[J].智能城市应用,2023,6(11):98-100.
- [3]郑淑敏.绿色施工技术在公路工程中的应用[J].汽车画刊,2025,(2):116-118.
- [4]王文欢."双碳"背景下绿色公路建设节能减排策略[J].时代汽车,2024,(9):35-37.
- [5]袁靖博.双碳目标下公路道路与桥梁工程低碳施工技术研究[J].越野世界,2025,20(6):179-181.