



L——发生事故的可能性大小；C——一旦发生事故会造成损失后果。

图4 轨道交通运营风险分级管控基本工作程序

5.2.2 LEC 评价法

城市轨道交通公共安全风险因素围绕“人-机-环-管”四方面的分析方法较多，常见的有：LEC（Likelihood-Exposure-Consequence）评价法、“六阶段安全评价”和概率风险评价法（Probability Risk Analysis, PRA）等。冯伟在基于 LEC 评价法的城市轨道交通运营安全评价研究中指出 LEC 评价法（L：事故发生的可能性、E：人员暴露在危险环境中的频繁程度和 C：一旦发生事故可能造成的后果）是最容易上手的安全评价方法，也是应用最广泛的安全评价方法，LEC 评价法通过三种因素指标值的乘积来评价风险性的程度。作者总结其优势是简单易行，危险程度等级划分比较清楚、醒目；缺点是三个因素分值依赖专家和工作人员打分，具有一定主观性和局限性。

5.2.3 细分领域管理研究

除以上两种重要方法外，众多城市轨道交通人员在不同的细分领域，立足本职工作，贡献出更为细致的经验与方法。马壮林等在城市轨道交通车站客流特征影响程度分析中运用多尺度地理加权回归（MGWR）模型构建客流特征分析模型对车站的客流特征影响程度做出分析；高志宝在基于某地铁的车站城市轨道交通疏散分析中对城市轨道交通疏散中换乘特点、客流特点和疏散过程做出分析，对提高安全疏散效率，具有重要的现实意义；顾雪景等在基于

事故树方法的城市轨道交通乘客坠落站台分析中对乘客坠落站台做出分析；孟萌等在基于数据驱动城市轨道交通客伤分析与对策研究中对轨道交通客伤做出详细分析并提出有效对策；王希萌等在轨道交通行车安全管理综述中基于“人-机-环-管”说明了轨道交通行车安全管理体系的组成等，细分领域的研究可以在更深层、更详细地加大对城市轨道交通公共安全的保障工作。

5.3 安全先进技术

为更好地促进轨道交通公共安全管理的发展，应积极尝试，让先进的技术带来更多可能性。以下列举促进城市轨道交通安全提升的先进技术：城市轨道交通安全监管大数据系统设计技术、信息化检测技术、BIM 与 GIS 结合的轨道交通安全检测与评估技术、城市轨道交通基于 Python 的大数据分析和可视化技术、数字孪生的城市轨道交通智慧管理技术，包括但不限于以上技术通过城市轨道交通研究人员的发展，大部分技术已在我国落地并应用，在城市轨道交通公共安全管理方面起到积极的先导作用。

6 结论与展望

综上所述，本文通过对城市轨道交通公共安全风险因素及管理对策的结构性和探讨，对城市轨道交通公共安全管理领域研究有一定积极的借鉴意义。未来发展可通过对安全管理体系的探索和完善、安全管理方法的发掘和应用、鼓励细分领域的深入探讨、先进现代化技术与城市轨道交通安全领域的融合和落地等方面，进一步推动城市轨道交通公共安全管理的发展和进步。

参考文献

- [1] 曾平利,张添.圆满收官 恢复增长 2023年春运中国内地主要城市地铁客运量总结[J].城市轨道交通,2023,(3):26-33.
- [2] 李政道,郭振超,苏栋,等.基于AHP-Fuzzy的地铁安全风险研究[J].建筑经济,2022,43(S1):318-322.
- [3] 周勇,于雯杰,唐雪梅,等.青岛地铁运营安全风险因素分析[J].山东交通科技,2023,(1):1-3+17.
- [4] 李晋,宋瑞,蒋金亮.基于模糊综合评价模型的轨道交通安全性评价[J].交通科学与工程,2011,27(2):91-95.
- [5] 李娜,凡志凤.基于BIM的城市轨道交通运营安全管理研究[J].技术与市场,2022,29(2):153-155.
- [6] 武晓炜,蔡小刚,郭海锋,等.基于DEMATEL的城市轨道交通运营关键影响指标研究[J].时代汽车,2022,(11):190-192.

Research on Carbon Cost Accounting and Control of Engineering Construction Projects under Low-Carbon Transformation

Lei Zhang

China Metallurgical Group Corporation SEDI Shanghai Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

Driven by the global "dual carbon" goals, the low-carbon transformation of the engineering construction industry is extremely urgent, and carbon cost control has become a core issue. This paper focuses on the entire life cycle of engineering construction projects, defines the composition and accounting boundaries of carbon costs, constructs a three-in-one carbon cost accounting system of "indicators - methods - models", analyzes the key internal and external influencing factors, proposes a phased control and multi-dimensional collaborative control path, and verifies its feasibility through empirical evidence. The research results have refined the theory of engineering carbon cost management, providing practical guidance for the precise accounting and efficient control of project carbon costs, and effectively facilitating the low-carbon transformation and achievement of emission reduction targets in the industry.

Keywords

Low-carbon transformation; Engineering construction projects; Carbon cost accounting

低碳转型下工程建设项目碳成本核算与控制研究

张磊

中冶赛迪上海信息技术有限公司, 中国 · 上海 200000

摘要

在全球“双碳”目标推动下,工程建设行业低碳转型迫在眉睫,碳成本管控成为核心议题。本文聚焦工程建设项目全生命周期,界定碳成本构成与核算边界,构建“指标-方法-模型”三位一体的碳成本核算体系,分析内外部关键影响因素,提出分阶段管控与多维度协同的控制路径,并通过实证验证其可行性。研究成果完善了工程碳成本管理理论,为项目碳成本精准核算与高效控制提供实操指导,有效助力行业低碳转型与减排目标实现。

关键词

低碳转型; 工程建设项目; 碳成本核算

1 引言

全球“双碳”目标的提出推动各国加速能源结构转型与产业低碳升级,我国相继出台《2030年前碳达峰行动方案》等政策,明确工程建设行业作为高耗能、高排放重点领域的减排责任,要求行业从传统建设模式向低碳化转型。当前工程建设项目全生命周期涵盖决策、设计、施工、运营及拆除回收等环节,其能源消耗、建材生产与运输、施工机械作业等过程碳排放占全社会总排放量的比重超 30%,成为低碳转型的关键攻坚领域。然而,行业普遍存在碳成本认知模糊、核算标准不统一、管控机制缺失等问题,多数项目仍以传统成本控制为核心,未将碳排放权交易成本、碳减排技术投入、碳监测核算等隐性碳成本纳入管控体系,导致碳成本与工程

成本脱节,制约了行业低碳转型的推进与减排目标的实现。

当前学界关于碳成本的研究多聚焦于工业、能源等领域,针对工程建设项目全生命周期的碳成本核算框架、计量方法及控制机制研究仍显零散,尚未形成系统体系。本研究立足工程建设项目的特殊性,明确碳成本构成与核算边界,构建全生命周期碳成本核算模型,丰富低碳经济与工程成本管理交叉领域的理论成果,为工程建设行业碳成本管控提供理论支撑。

在政策约束与市场竞争双重压力下,工程建设企业亟需可操作的碳成本管控方案。本研究提出的分阶段碳成本核算方法与多维度控制路径,能够帮助企业精准计量各环节碳成本,识别关键减排节点,通过技术优化、管理升级与政策衔接实现碳成本与工程成本的协同控制,既满足低碳转型政策要求,又能降低项目综合成本、提升市场竞争力,为工程建设项目全周期碳成本管控提供实操指导。

【作者简介】张磊(1980-),男,中国上海人,工程师,从事工程经济研究。

2 工程建设项目碳成本构成与核算边界界定

2.1 碳成本构成分析

从项目全生命周期视角，碳成本贯穿工程建设全流程并呈现阶段差异化特征：决策阶段碳成本聚焦低碳可行性研究、碳排放影响评估及低碳方案论证的人力与技术投入，还包括基于项目碳排放量预估的碳排放权预留成本；设计阶段核心是低碳设计优化、绿色建材选型调研及碳足迹测算的相关支出，以及为降低长期碳排放而增加的低碳技术设计溢价；施工阶段作为碳排放高峰，碳成本涵盖施工机械能耗碳排放对应的能源成本、绿色施工工艺升级投入、建筑垃圾减排与回收处理费用，以及现场碳排放监测设备购置与运维成本；运营阶段碳成本集中在建筑能耗（电力、燃气等）对应的碳排放权交易支出、节能设备更新维护费用、常态化碳排放监测与数据上报成本；拆除回收阶段则包括低碳拆解技术应用、建筑废弃物分类回收与资源化处理支出，以及拆除过程碳排放的核算与补偿成本。

按成本属性划分，工程建设项目碳成本可分为显性与隐性两类：显性碳成本包括碳排放权交易成本（按实际碳排放量购买碳排放权的支出）、碳减排技术投入成本（低碳设备购置、绿色建材采购溢价、工艺升级改造费用等）、碳监测与核算成本（监测设备购置、专业机构检测服务费、数据管理系统搭建费用）；隐性碳成本则涵盖未达减排目标的罚款支出、碳排放超标导致的品牌声誉损失、供应链低碳转型传导的成本增量，以及因碳成本管控缺失引发的项目合规风险成本。

2.2 核算边界界定

空间边界需明确核算的地理范围，核心边界为项目建设与运营的物理区域（如施工场地、建筑本体），延伸边界涵盖供应链关联环节（建材生产厂、运输路径）及废弃物处理场所，避免因边界过窄导致碳排放遗漏或过宽增加核算难度；时间边界以项目全生命周期为基准，从决策阶段启动至拆除回收阶段结束，确保各阶段碳成本的连续性核算，同时可根据研究需求细化各子阶段的时间节点（如施工阶段按基础、主体、装饰装修细分）。

核算范围需全面覆盖项目全流程碳排放对应的成本，具体包括：能源消耗碳排放（施工机械、运营设备的化石能源消耗，建筑照明、空调的电力消耗）、材料生产与运输碳排放（建材生产过程能耗、原材料开采与加工碳排放，建材从生产地到施工现场的运输能耗）、施工过程碳排放（现场搅拌、焊接、吊装等作业产生的直接碳排放，临时设施搭建与拆除的间接碳排放）、运营阶段碳排放（建筑使用过程中的能耗碳排放、维护修缮产生的碳排放），以及拆除回收阶段的拆解作业碳排放与废弃物处理碳排放。

2.3 核算对象与核算原则

核算对象包括工程建设项目整体及各细分环节：项目整体作为核心核算对象，用于衡量项目全生命周期碳成本总

量；细分环节涵盖决策、设计、施工、运营、拆除回收各阶段，以及能源消耗、材料使用、机械作业、废弃物处理等关键流程，同时延伸至供应链中的建材供应商、运输企业等关联主体，实现碳成本的精准溯源与责任划分。

核算原则需保障核算结果的科学性与实用性：相关性原则要求聚焦与项目碳排放直接相关的成本，排除无关支出；完整性原则确保全生命周期、全流程的碳成本无遗漏，涵盖显性与隐性成本；可操作性原则强调核算方法与数据获取符合行业实际，避免过于复杂的计量逻辑；一致性原则规定核算边界、方法、指标在项目不同阶段或不同项目间保持统一，确保核算结果具有可比性与可验证性。

3 低碳转型下工程建设项目碳成本核算体系构建

3.1 核算指标体系设计

核心指标聚焦碳成本与减排成效核心维度：各阶段碳排放量（以吨二氧化碳当量为单位，量化各环节排放强度）、单位产值碳成本（碳成本总额与项目产值比值，反映低碳经济效益）、碳减排成本（实现单位碳减排目标的投入金额，衡量减排性价比）。辅助指标用于精准溯源影响因素：能源碳强度（单位能源消耗对应的碳排放量）、材料碳足迹（单位建材全生命周期碳排放量）、机械作业碳强度（单位施工机械台班的碳排放量）、碳成本占比（碳成本与项目总投资的比值），形成“核心+辅助”的立体化指标体系。

3.2 核算方法选择与应用

基础核算方法按需组合：排放因子法用于快速核算能源消耗、材料使用等常规碳排放成本；物料衡算法适用于施工过程中物料消耗与废弃物产生的碳排放核算；LCA法贯穿全生命周期，实现各阶段碳成本的系统量化。各阶段核算流程差异化设计：设计阶段结合方案比选，通过LCA法预估不同设计方案的碳成本总量；施工阶段采用排放因子法与动态监测结合，实时核算能源、材料、机械等环节碳成本；运营阶段依托智能化监测系统，常态化跟踪能耗碳排放及碳成本变化。

3.3 核算模型构建

构建全生命周期碳成本核算模型，参数设定涵盖各阶段排放因子、低碳技术投入系数、碳排放权价格等关键变量。模型公式推导为：
$$\text{全生命周期碳成本} = \sum (\text{各阶段碳排放量} \times \text{碳排放权价格}) + \sum \text{各阶段碳减排技术投入成本} + \sum \text{碳监测与核算成本}$$
，通过明确参数取值标准与数据来源，确保模型计算的精准性与可操作性，为碳成本量化提供工具支撑。

4 工程建设项目碳成本影响因素分析

4.1 内部影响因素

项目设计方案是碳成本控制的源头核心，低碳技术应用（如光伏建筑一体化、节能幕墙技术）可显著降低运营阶段碳排放，而绿色建材选型（如低碳混凝土、再生建材）直