

基于区块链技术的建筑碳排放全生命周期管理机制研究

于莉洋 刘祎伊 邵甜甜 孙亚琦

北方工业大学, 北京 100043

摘要: 全球建筑业所产生的碳排放量在碳排放总量里占据了较大比例, 建筑业实现低碳化是我国达成“双碳”目标的关键领域之一, 本文借助区块链技术提出了全生命周期碳排放管理机制, 通过搭建数据层、网络层、区块链层以及应用层的分层架构, 运用技术协同机制达成各层次之间的协同优化。提出多源数据交叉验证的方法, 构建全生命周期追溯体系以实现建筑碳排放管理, 最后经过实证分析与案例验证, 证实该机制的有效性与可行性, 基于区块链技术的建筑碳排放全生命周期管理机制为解决建筑行业的碳排放问题提供了全新的思路与方法。

关键词: 建筑碳排放; 全生命周期管理; 区块链技术; 权限管理

DOI: 10.63887/fet.2025.1.2.23

1 引言

联合国环境规划署公布的数据说明, 建筑行业在全球范围内所占用的能源相关碳排放量占比为 34%, 其中施工阶段因动态排放监测缺失, 致使核算盲区出现, 依据公开数据, 2021 年中国建筑业的碳排放量达 50.1 亿吨, 此数据彰显出对低碳建筑技术开展研究与应用的迫切需求^[1]。

在全球气候变化挑战极为严峻的情况下, 中国住建部出台了强制性的建筑碳排放计算标准, 规定施工阶段要开展数字化监测工作。碳交易市场的建立使得对碳排放数据可信度的需求更加凸显, 区块链技术凭借其去中心化、不可篡改等特性, 在数据管理以及安全交易领域呈现出巨大潜力。与区块链技术相结合, 设计一套针对建筑碳排放的全生命周期管理机制, 借助技术创新来解决当前建筑碳排放管理中存在的众多难题^[2]。

2 技术架构设计

本文构建基于区块链技术的建筑碳排放全生命周期管理机制, 此系统能解决当前建

筑业碳排放管理里存在的数据滞后、可信度不高以及动态场景适应性差等问题, 系统设计囊括四个层次, 分别是数据层、网络层、区块链层与应用层, 并且系统设计时考虑了技术协同机制, 以此来优化系统性能与效率^[3]。

2.1 分层架构设计

数据层是 RFID 的物理信息绑定技术, 达成对物理实体的精准追踪, 并且对其信息展开实时监测, 这些数据对于追踪碳排放的来源以及轨迹而言, 有着相当关键的意义。网络层是布置架构节点来实时处理采集到的碳源数据, 这样的设计可改进数据传输延迟的状况, 依靠动态更新碳排放因子库, 可依据实际使用场景调整计算方法, 提升碳排放核算的精确程度。区块链层是搭建区块链来存储建筑信息模型以及动态计算得出的碳排放数据, 并且记录碳排放交易、资质审核等关键业务流程。应用层是用户可在该界面查看建筑项目的整体碳排放情形, 并且开展相关分析, 该层还承担着对接政府监管平台和

碳交易市场 API 的任务,以便有关部门对建筑全生命周期的碳排放量实施管理。

2.2 技术协同机制

2.2.1 异构数据源的整合与映射

在机制运行期间,数据来源所呈现出的多样性与异构性成为了一项颇为重大的挑战,针对此问题,本研究构建了一种高效的数据整合以及映射机制,这一机制囊括三个步骤,首先是数据采集步骤,借助物联网设备、传感器网络以及云计算平台来收集源自不同领域的原始数据,其中包含建筑设计、施工、运营以及废弃等各个阶段的数据。其次是格式转换步骤,运用中间件技术把这些数据从原始格式转变为统一的标准格式,以此便于后续的处理与分析,最后是语义匹配步骤,借助自然语言处理技术和知识图谱技术,对转换后的数据展开深度解析,达成数据间语义层面的匹配。

2.2.2 共识机制与智能合约的协同作用

共识机制作为区块链技术的关键所在,可保证网络里全部节点就交易数据达成统一。智能合约是一种可自动执行合同条款的程序,在围绕区块链展开的建筑碳排放全生命周期管理当中,这两者协同运作,一同保障数据有真实性与透明度,依靠共识机制,所有参与者都可对建筑碳排放数据的真实性给予验证^[4]。一旦数据获得认证,智能合约便可依据预先设定的条件和规则自动执行相关操作,像是调整碳排放配额或者计算碳税等,这种自动化的方式提升了效率,还降低了人为干预所带来的风险^[5]。智能合约还可处理复杂的业务逻辑,像自动审核以及更新建筑碳排放的数据记录,以此达成智能化管理。当有新数据要添加到链上时,共识机制保证该数据经过所有节点的确认,智能合约则承担执行相应存储操作的职责,维持数据的一致性。

2.2.3 跨链互操作与系统扩展性

跨链互操作解决了不同区块链间数据以及资产交换方面的问题,在整个研究进程里,跨链互操作让各个独立且有可能异构的区块链系统可共享信息与资源,借助应用先进的互操作框架,可有效降低数据孤岛现象,推动数据的流动性以及透明度,为保障系统有可扩展性,设计了一套灵活的架构方案,此方案可依据业务需求以及技术进步而轻松扩展。这覆盖采用模块化设计原则,保证新增功能或者组件不会对现有系统稳定性造成影响,运用容器化技术以及微服务架构提高了系统的灵活性与部署效率,使得新的特性与服务可快速集成并部署至生产环境^[6]。

3 数据模型核验与管理机制

3.1 多源数据交叉验证

在建筑碳排放全生命周期管理机制里面,实现多源数据的一致性校验是保证数据准确可靠的关键所在^[7]。此过程关联着从不同源头收集而来的大量数据,像传感器数据、手动记录的数据以及第三方服务提供的信息等都涉及其中,为了能有效整合这些数据,本研究给出了一种基于区块链技术的框架,借助透明且不可篡改的方式去验证数据的完整性与真实性^[8]。

实施多源数据交叉验证时首要任务是构建统一数据标准以及分类体系,保证所有数据来源都遵循一样的格式与质量要求,接着借助区块链智能合约功能自动执行数据同步及对比过程,检测并标记出不一致或者可疑的数据点,经过这个过程可有效识别数据里的误差与异常,保证数据集有一致性与准确性。最后运用本系统的动态碳排量监控模型提升数据验证效率,构建可靠的建筑碳排放全生命周期管理体系^[9]。

3.2 全生命周期追溯

3.2.1 全生命周期追溯体系架构

全生命周期追溯体系架构作为达成建筑碳排放管理的关键技术根基，借助融合区块链技术的特性及其应用，保障了从建筑规划、设计、施工、使用直至拆除的整个过程中数据的透明性以及可追溯性，此架构主要囊括三个核心构成部分，分别是数据采集层、区块链网络层以及应用服务层。

在数据采集层面，各种各样的传感器以及物联网设备被投入使用，以便实时收集有关建筑的碳排放数据以及与之相关的环境信息，这些数据之中有直接的碳排放量，还包含了影响碳排放的诸多因素，像能源消耗模式、材料使用状况等，区块链网络层作为整个追溯体系的关键部分，借助分布式账本技术以及智能合约来保障数据的真实性与不可篡改性。每一个碳排放事件都会被记录成一个单独的区块，各个区块借助加密算法相互连接，形成一条无法更改的数据链，智能合约则用来自动执行数据验证以及交易处理流程，以此降低人为干预所带来的风险。

3.2.2 数字孪生与时空数据可视化

数字孪生技术借助构建物理建筑的数字副本，可实时呈现建筑状态，依据这些信息对管理策略加以调整，以减少碳排放，当与时空数据可视化相结合时，能直观呈现建筑能耗、排放等数据随时间的变化走向，为决策者提供有力的数据支撑。

时空数据可视化涉及了静态的碳排放量分布图，还涉及动态的碳排放变化曲线，以及不同时间点的能耗情况对比，这种可视化手段能帮助管理者迅速找出高碳排放区域和时间段，采取相应优化举措，另外把建筑运营过程中的关键数据记录到区块链上，运用数字孪生进行实时更新，可有效提高管理效率与响应速度。

3.2.3 区块链时序存证机制

区块链时序存证机制乃是保证建筑碳排放数据精准无误以及不可篡改特性的关键举

措，此机制借助区块链的分布式账本技术，把全生命周期里的每一个碳排放数据节点依照时间先后顺序存储在链上，运用加密算法来处理数据，形成一个个无法逆向更改的记录，以此保障数据的真实性和完整性。

在区块链领域，每一笔交易都会被赋予一个独一无二的标识符，并且记录于多个节点之上，一旦有某个数据点被录入进去，任何试图篡改这一记录的行为都会被所有参与节点察觉，从而保障了数据的可靠性。该存证机制还支持跨链验证，也就是不同区块链之间的数据可互相验证，提升了系统整体的可信度。当需要追溯某一特定时间段内的碳排放数据时，可以借助查询相关区块，迅速获取准确的信息。

3.2.4 智能合约驱动的质量闭环控制

智能合约主要在自动执行以及维护质量标准方面，借助编程的逻辑规则可自动对项目过程给予监控，并且在不符合定标准之时采取相应措施，这样的机制保证了从材料采购直至最终交付的所有环节均能达成预期的碳减排目标。质量闭环控制涉及以下几个关键步骤：数据采集、实时监控、决策分析与执行。智能合约会收集与之相关的数据然后加以分析，当检测到有任何偏差或者问题出现时，就会立刻触发预先设定好的应对措施，这些措施包含重新调整施工方案、改变原材料选择或者提高能源使用效率等，智能合约还可保证所有参与者依照协议来行动，以此推动整个建设项目高质量地完成。通过自动记录每一项活动和交易，可实现透明度的最大化和篡改可能性的最小化。

4 实证分析与应用

通过上海一个超高层项目的案例展开研究，证实了基于区块链技术构建的建筑碳排放全生命周期管理机制的有效性，案例验证表明，此机制可提升碳排放数据的准确性以及实时性，降低人工审核成本，还可以提高

碳排放核算的精确程度。

在该项目应用里,通过 2000 多个边缘节点的并发处理能力,实现了对建筑碳排放的高效监控,借助优化管理以及算法,人工审核成本降低了 42%,利用区块链技术保障数据的安全性与透明性,有效削减第三方审计费用,降低幅度为 60%。

经过实际应用验证,本研究提出的基于区块链技术的建筑碳排放全生命周期管理机制有良好的应用效果,该机制提升了建筑业碳排放管理的效率与精度,为其他大型复杂工程项目的碳排放管理树立了范例,项目经济效益评估显示,链上碳资产通证化能带来碳交易收益,还可凭借降低管理成本、提升透明度,推动项目经济和社会效益实现最大化。

5 挑战与展望

在本研究中,通过构建基于区块链技术的建筑碳排放全生命周期管理机制,我们已

经取得了显著的进展。但仍面临着诸多难题与挑战。

在技术瓶颈层面存在异构设备协议标准化难题,当下市场里机械制造商之间的接口标准各不相同,要保证不同制造商所生产的机械可毫无妨碍地集成到同一个系统之中,这是一项颇具难度的技术挑战。管理机制创新方面,智能合约与传统法律体系的衔接乃是实现链上数据管理及应用的新挑战。在建设工程合同的执行进程中,怎样保证智能合约得以有效施行,避免产生纠纷,这是一个值得深入研究探讨的问题。

针对当前所面临的诸多挑战,未来开展的研究工作将有必要进行跨学科的协作,把信息技术、法律学以及环境科学等多个领域所有的知识充分结合起来,共同探寻解决问题的方案,在实际的实践过程当中,也需要持续不断地对这一管理机制给予验证以及完善,以此来适应处于快速变化状态的建筑行业以及技术环境。

参考文献

- [1]王婷,高春艳,王骏.建筑全生命周期碳排放计算方法及案例应用研究[J].绿色建造与智能建筑,2024,(01):24-27.
- [2]王金裕.基于 BIM 的绿色建筑全生命周期碳排放计量与标杆管理研究[D].湖南工业大学,2019.
- [3]孔繁艺,熊海亭,严欢.基于节能设计的建筑全生命周期碳排放分析[J].四川建筑,2022,(03):59-61.
- [4]武彰纯,路萍,李婷婷.基于区块链的碳账户智能管理体系建设[J].财会月刊,2023,(12):54-59.
- [5]李春丽,高项荣.基于 BIM 技术的建筑生命周期碳排放计量分析[J].城市建筑,2023,(01):205-208.
- [6]李虎,罗智星.建筑生命周期能耗与碳排放控制途径研究[J].城市建筑,2019,(23):14-16.
- [7]严振亚,李健.基于区块链技术的碳排放交易及监控机制研究[J].企业经济,2020,(06):31-37.
- [8]马彩云,赖友宇,潘杰,陈静怡,孙华威.基于建筑信息模型的全生命周期碳排放测算及对策[J].牡丹江大学学报,2019,(08):130-135.
- [9]王长军,庞森,李浩,王健,王劲瑞,许丹丹.基于区块链的建筑企业碳排放统计与管理平台应用[J].项目管理技术,2023,(07):174-177.