

区块链赋能的水利工程供应链透明化管理机制研究

王子鹏

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6502

[摘要] 本文研究了区块链技术在水利工程供应链透明化管理中的应用。水利工程作为国家基础设施,其供应链涉及多参与方与复杂环节,传统管理存在信息孤岛、数据可信度低等问题。区块链以其分布式账本、数据不可篡改、全程可追溯及智能合约自动执行等特性,有效提升了供应链的信息透明度与信任水平。研究设计了包含物联网感知层、数据层、区块链层、服务层、应用层及用户层的分层架构,并提出了数据上链与确权、可追溯与审计、隐私保护与权限控制等核心机制。通过关键流程再造,实现了采购管理、材料溯源、施工质量监控及支付结算等环节的优化。研究表明,区块链技术能显著提升水利工程供应链的管理效率与信任度,推动管理模式向自动化、智能化演进。

[关键词] 区块链; 水利工程; 供应链管理; 透明化

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on Transparent Management Mechanism of Water Conservancy Engineering Supply Chain Empowered by Blockchain

Zipeng Wang

XPCC Surveying & Designing Institute Group Co., Ltd.

[Abstract] This article studies the application of blockchain technology in transparent management of water conservancy engineering supply chain. As a national infrastructure, water conservancy projects involve multiple stakeholders and complex links in their supply chain, and traditional management suffers from problems such as information silos and low data credibility. Blockchain, with its distributed ledger, tamper proof data, full traceability, and automatic execution of smart contracts, effectively enhances the information transparency and trust level of the supply chain. The research designed a layered architecture that includes the IoT perception layer, data layer, blockchain layer, service layer, application layer, and user layer, and proposed core mechanisms such as data on chain and authentication, traceability and auditing, privacy protection and permission control. Through key process reengineering, optimization has been achieved in procurement management, material traceability, construction quality monitoring, and payment settlement. Research has shown that blockchain technology can significantly improve the management efficiency and trust of water conservancy engineering supply chains, and promote the evolution of management models towards automation and intelligence.

[Key words] blockchain; Water conservancy engineering; supply chain management; Transparency

引言

水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,承担着防洪、灌溉、供水、发电、生态保护等多重关键职能,其建设与运行的质量、安全与效率直接关系到国计民生和经济社会的可持续发展。然而,现代水利工程往往规模宏大、周期漫长、技术复杂,涉及业主、设计、施工、监理、材料设备供应商、检测机构、政府监管部门等众多参与方,形成了一个结构复杂、环节众多、信息交互频繁的庞大供应链网络。

1 理论基础与关键技术

1.1 水利工程供应链管理理论

水利工程供应链涵盖了从项目规划、设计、材料设备采购、施工建设到竣工验收及后期运维的完整链条,涉及众多参与主体,具有参与方多、地域跨度大、建设周期长、技术要求高、资金密集、风险点多等特点。供应链的有效管理直接关系到工程的质量、安全、成本与进度。透明化管理是提升供应链效率与信任的关键,它要求供应链上的关键信息,如材料来源、质量检验报告、施工进度、资金流向、合同履行情况等,能够在授权范围内被相关方及时、准确、完整地获取与验证。传统管理模式

依赖中心化的信息系统或纸质文件,信息传递链条长,容易出现延迟、失真甚至篡改,难以满足现代大型水利工程对信息实时性、真实性和可追溯性的高要求。

1.2 区块链与供应链融合的理论基础

将区块链应用于供应链管理,其深层逻辑植根于信息经济学与组织理论。信息不对称理论指出,交易双方掌握的信息量不同,易导致逆向选择和道德风险。区块链通过共享账本,让所有授权方看到一致、真实的信息流,有效缓解了信息不对称问题。交易成本理论认为,监督、协调和执行契约会产生费用。区块链的智能合约能自动执行协议条款,减少协商、验证和纠纷处理的环节,显著降低交易成本。信任机制理论强调,在缺乏中央权威或历史信任不足的环境中,建立信任至关重要。区块链通过技术手段(密码学、共识)构建了“机器信任”,替代或补充了传统的人际或制度信任,为跨组织协作提供了新的信任基础。这些理论共同支撑了区块链作为供应链信任基础设施的可行性。

2 水利工程供应链透明化需求分析与区块链适配性评估

2.1 水利工程供应链典型场景与流程剖析

水利工程的供应链活动贯穿项目全生命周期。在前期,涉及设计图纸、技术规范的确定以及主要材料设备的招标采购。采购环节需要筛选合格供应商,签订采购合同,明确材料规格、质量标准和交货期。随后进入物流阶段,原材料和大型设备从厂家或仓库运往工地,途中需监控运输状态、温湿度等环境参数,确保物资完好。到达施工现场后,材料需经过严格的进场检验和抽样复检,合格后方可入库或投入使用。施工建设是核心环节,包括土石方、混凝土浇筑、金属结构安装等,涉及施工日志、质量检测报告、隐蔽工程验收记录的实时生成与归档。同时,工程进度、劳动力投入、机械使用等信息需要持续更新。在资金流方面,依据合同约定和工程进度,需要进行工程款支付、材料款结算等操作。项目竣工后,所有质量、安全、进度、投资等资料需完整归档,为后期运维和审计提供依据。这些环节环环相扣,信息流复杂,任何一个节点的信息缺失或失真都可能影响整体。

2.2 透明化管理的核心痛点与需求识别

当前供应链透明化管理中的痛点集中体现在信息层面。材料溯源困难,无法快速准确地查证某批次钢筋或水泥的生产厂家、出厂检验报告、运输记录和现场使用部位,一旦发现质量问题,追责耗时耗力。数据真实性存疑,纸质报告或电子文档易被伪造或事后修改,各方对数据的信任度不高。多方协作效率低,业主、监理、施工方之间信息传递依赖邮件、会议或传统系统,沟通成本高,进度更新、问题反馈不及时。合同执行与支付流程繁琐,需要人工核对大量单据,容易出错且存在舞弊风险。监管机构难以实时掌握项目真实情况,往往依赖定期报告或现场检查,监管滞后。因此,迫切需要建立一个能够确保数据从源头到末端全程真实、不可篡改、随时可查的透明化体系。核心需求包括:关键数据(如质检报告、物流单、施工记录)的即时上链与防伪;全链条、跨环节的物料与信息追溯能力;基于可信数

据的自动化业务流程(如支付);为所有参与方提供统一、实时的信息视图;以及满足政府监管的在线审计要求。

2.3 区块链技术对透明化需求的匹配度分析

区块链技术的特性与上述透明化需求高度契合。其分布式账本和共识机制确保了所有参与方共同维护一份唯一的、一致的数据记录,任何数据的写入都需要网络验证,从根本上杜绝了单方面篡改的可能,满足了数据真实防伪的需求。每个数据变更都带有时间戳并链接到前序记录,形成完整的、不可分割的追溯链条,轻松实现从成品到原料的正向追踪和从问题到源头的反向溯源。智能合约可以将合同条款、验收标准、支付条件等规则代码化,当预设条件(如收到经多方确认的验收报告)达成时,自动触发付款或通知,提升流程效率与公正性。

2.4 应用可行性与挑战分析

尽管技术前景广阔,实际应用仍面临挑战。技术集成方面,需要将区块链系统与现有的项目管理软件、ERP系统、物联网设备等有效对接,确保数据顺畅流转,接口标准和系统兼容性是难点。组织与管理层面,各参与方需要改变传统工作习惯,接受新的协作模式,初期投入成本(硬件、开发、培训)和协调难度不容忽视,建立多方共识的治理规则至关重要。数据标准不统一是另一障碍,不同来源的数据格式各异,需要制定统一的上链数据规范。隐私与性能的平衡也需考量,完全公开不符合商业逻辑,而复杂的隐私保护技术可能影响系统效率。法律法规方面,电子签名、链上数据的法律效力、责任认定等尚需更明确的司法解释和行业规范支持。

3 区块链赋能的水利工程供应链透明化管理机制设计

3.1 总体架构设计

为实现水利工程供应链的透明化管理,设计一个分层的区块链系统架构。该架构自下而上包含:物联感知层,利用传感器、RFID标签、GPS定位等设备,自动采集材料状态、设备运行、物流位置、环境参数等物理世界数据;数据层,负责存储原始业务数据、物联网采集数据以及链上生成的交易和状态信息,其中核心的、需验证的数据哈希值及关键元数据上链,大文件或非关键数据可存于链下并建立关联;区块链层,作为信任基石,采用联盟链形式,由项目业主、主要承包商、监理单位、核心供应商及监管机构等作为共识节点,共同维护分布式账本,执行共识机制(如Raft或PBFT),部署和运行智能合约,确保数据不可篡改与流程自动化;服务层,提供核心功能接口,包括身份认证与权限管理、数据上链服务、智能合约调用、追溯查询、审计报告生成、风险预警推送等;应用层,面向不同用户角色(如项目经理、采购员、质检员、监理工程师、财务人员、监管人员)开发友好的Web或移动端应用,提供数据可视化、流程操作、信息查询、预警提示等功能;用户层,则是所有参与系统的角色。各层通过标准化API接口实现松耦合连接,确保系统的灵活性与可扩展性。

3.2 核心机制设计

机制设计是系统运行的核心。数据上链与确权机制规定,水利工程供应链的关键业务数据(如采购订单、质检报告、验收

单、支付凭证)需经相关方数字签名后,其哈希值及关键字段摘要写入区块链,确保数据来源可溯、内容防伪。分布式账本由预选的联盟成员节点共同维护,采用适合高吞吐量场景的共识算法,保障交易确认的效率与最终一致性。智能合约是自动化引擎,预先编写并部署在链上,例如,当物流信息和现场签收记录在链上被确认后,触发材料入库流程;当监理方在链上提交质量合格的电子报告,自动启动对应工程款的支付审批流程;设定规则对异常数据(如温度超标、进度严重滞后)进行自动识别并发出预警。可追溯与审计机制允许授权用户通过物料编码、批次号、时间范围等条件,一键查询其全生命周期信息流,包括生产、检验、运输、使用、验收等所有链上记录,形成完整证据链。隐私保护与权限控制机制至关重要,利用加密技术对敏感信息(如商业报价、个人身份信息)进行处理,通过细粒度的访问控制策略,确保用户只能查看其权限范围内的数据,实现“该公开的公开,该保密的保密”,在透明与隐私间取得平衡。

3.3 关键流程再造

基于上述架构与机制,对传统业务流程进行重塑。在水利工程供应链的采购与合同管理流程中,招标文件、中标通知、采购合同等关键文件上链存证,合同条款中的关键执行条件(如交货期、付款节点)由智能合约监控,减少履约争议。材料与设备溯源流程实现变革,从供应商发货起,物流单据、运输状态、到货签收等信息实时上链,现场使用时,通过扫描二维码或RFID标签,将材料批次与具体施工部位(如某坝段、某桩号)关联记录,建立从源头到应用的完整映射。水利工程施工质量与进度监控流程中,现场采集的检测数据、影像资料、施工日志经质检人员和监理方确认后即时上链,形成不可篡改的质量档案,工程进度更新也同步记录,为各方提供实时、可信的项目视图。支付与结算流程得到显著优化,当链上智能合约验证到满足付款条件(如验收报告已确认、发票已匹配),可自动触发支付指令或生成支付申请,大幅缩短结算周期,降低人工操作错误和舞弊风险。这些流

程再造旨在利用区块链的特性,构建一个更高效、更可信、更自动化的供应链协同新范式。

4 结论

本研究围绕区块链赋能的水利工程供应链透明化管理机制展开,系统探讨了技术应用的理论基础、需求匹配、架构设计与实践路径。研究表明,针对水利工程供应链中存在的信息孤岛、数据可信度低、追溯困难、协同效率不高等核心痛点,区块链技术凭借其分布式账本、数据不可篡改、全程可追溯及智能合约自动执行等特性,能够有效构建一个多方参与、高度可信的协同管理环境。通过设计包含总体架构、核心机制与关键流程再造的完整管理机制,并结合案例分析验证,证实了该模式在提升信息透明度、保障数据真实性、优化业务流程效率、强化风险管理以及增强参与方间信任方面具有显著成效。区块链不仅为解决供应链管理中的信任难题提供了技术支撑,更推动了管理模式向自动化、智能化方向演进。尽管在技术集成、标准统一、成本投入与治理协调等方面仍面临挑战,但其应用前景广阔。

参考文献

- [1]徐媛媛.基于区块链的供应链多元信号传递策略研究[D].华北水利水电大学,2024.
- [2]王爱领,左一鸣,孙少楠.TOE理论框架下我国水利工程区块链技术实施障碍影响因素研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(05):228–239.
- [3]李亚娟,张金芳,贾冬青.区块链技术在供应链管理中的应用研究[J].数字通信世界,2021,(01):191–192.
- [4]钱峰,成建国,张志远.区块链技术在水利行业应用场景的分析[J].水利信息化,2020,(05):1–6.

作者简介:

王子鹏(1996—),男,汉族,河南省驻马店市上蔡县人,本科,初级职称,研究方向:灌区农田规划。