

基于三维激光扫描与区块链的智慧煤场动态库存建模与掺配协同优化研究

姜振华, 杜磊, 谢松星, 范学明

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/EPTSM.2025110006

摘 要 : 智慧煤场作为煤炭供应链关键节点, 其动态库存管理与掺配优化直接决定能源供应效率与质量稳定性。当前煤场管理面临库存数据滞后、掺配精度不足、多环节协同效率低等难题, 尤其在原料煤成分波动 (如硫分、热值等指标) 对下游生产的影响日益显著的背景下, 传统人工盘点与经验决策模式已难以满足现代化需求。三维激光扫描技术通过非接触式高精度三维建模, 可实时获取煤堆立体轮廓与体积数据, 其厘米级空间分辨率显著优于传统测量方法; 区块链技术则凭借分布式存储、不可篡改与可追溯特性, 为多主体协同提供可信数据管理框架。本研究构建三维激光扫描与区块链融合的智慧煤场模型, 突破传统数据孤岛与信息滞后瓶颈, 通过区块链智能合约实现掺配方案自主决策与全流程追溯, 推动煤场管理向数字化、智能化跃进。

关 键 词 : 三维激光扫描; 区块链技术; 智慧煤场; 动态库存建模

Research on Dynamic Inventory Modeling and Blending Cooperative Optimization of Smart Coal Yard based on 3D Laser Scanning and Blockchain

Jiang Zhenhua, Du Lei, Xie Songxing, Fan Xueming

China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As a key node in the coal supply chain, the dynamic inventory management and blending optimization of smart coal yard directly determine the efficiency and quality stability of energy supply. At present, the coal yard management is faced with problems such as lagging inventory data, insufficient blending accuracy, and low efficiency of multi-link coordination. Especially in the context of the increasingly significant impact of raw coal composition fluctuations (such as sulfur content, calorific value and other indicators) on downstream production, the traditional manual inventory and empirical decision-making mode has been difficult to meet the needs of modernization. 3D laser scanning technology can acquire three-dimensional contour and volume data of coal piles in real time through non-contact high-precision 3D modeling, and its centimeter-level spatial resolution is significantly better than traditional measurement methods. Blockchain technology, with its distributed storage, intamable and traceable characteristics, provides a credible data management framework for multi-subject collaboration. This study builds a smart coal yard model integrating 3D laser scanning and blockchain, breaks through the bottleneck of traditional data isolation and information lag, realizes autonomous decision-making and whole-process traceability of blending scheme through blockchain smart contract, and promotes the leap-forward of digital and intelligent coal yard management.

Keywords : 3D laser scanning; blockchain technology; smart coal yard; dynamic inventory modeling

引言

智慧煤场作为煤炭供应链中的核心节点, 其动态库存管理和掺配优化直接关系到能源供应效率与质量控制水平。随着煤炭行业数字化转型的加速, 传统人工盘点、经验决策的管理模式已难以满足现代化需求。当前煤场管理存在库存数据实时性不足、掺配精度低、多环节协同效率差等问题, 尤其在复杂市场环境下, 原料煤成分波动 (如铁、硫、挥发分等指标) 对下游生产稳定性的影响日益显著。例如, 广西某化肥厂因未严格控制原料煤质量导致生产困境的案例表明, 缺乏精准的库存动态监测与智能掺配策略将严重制约企业可持续发展^[1]。在此背景下, 构建基于三维激光扫描与区块链技术的智慧煤场模型成为关键突破方向。

三维激光扫描技术通过非接触式高精度三维建模，可实时获取煤场堆垛的立体轮廓与体积数据，其空间分辨率可达厘米级，显著优于传统人工测量或雷达探测方法。该技术与门式抓斗起重机等装卸设备的联动，能够实现库存状态的动态追踪与装卸作业的自动化调度，为库存优化提供可靠数据支撑。同时，区块链技术凭借其分布式存储、不可篡改和可追溯特性，可有效解决多主体协同中的信任问题。在煤场场景中，区块链可用于记录煤炭来源、成分检测、库存变化等全链条数据，为掺配优化提供可信依据。

一、研究方法

（一）区块链技术在数据安全与共享中的应用

区块链技术通过其独特的分布式账本、加密算法和共识机制，为智慧煤场的动态库存建模与掺配优化提供了安全可靠的数据管理基础。在数据安全层面，基于区块链的分布式存储架构可有效防止单点故障与恶意篡改。其核心在于将煤场的三维激光扫描数据、库存状态信息及掺配参数等关键数据以哈希值形式存储于链式区块中，每个区块通过时间戳和前向哈希链接形成不可逆的记录链条。这种设计确保了即使部分节点遭受攻击或失效，全网共识机制仍能维持数据的真实性和完整性，从根本上解决了传统中心化数据库易被篡改的缺陷^[2]。

在数据共享方面，智能合约技术被应用于煤场多方协同场景。通过预设的业务逻辑规则，区块链系统可自动验证参与方的身份权限，并依据数据确权规则动态分配访问权限。例如，当煤场运营商需要向监管机构或供应链伙伴共享库存实时数据时，智能合约将自动核验对方的资质证书，确保数据仅在授权范围内流通。该机制不仅降低了人工审核成本，还通过零知识证明等隐私保护技术实现了数据可用不可见，平衡了数据开放与隐私保护的需求。

区块链技术在智慧煤场中的数据安全架构采用双链抗毁设计——主链存储库存哈希摘要（SHA3256），辅链备份原始点云切片（IPFS分布式存储索引），即使遭遇区域性网络分区仍可保持数据可用性。核心突破在于动态共识机制切换：正常运行时采用高效的Kafka排序服务（吞吐量3800TPS），当检测到节点异常时自动切换至Raft共识（容忍1/3节点失效），使拜占庭故障恢复时间缩短至8.6秒。数据隐私保护层引入零知识范围证明（zkSNARKs），监管方可验证热值数据（如“ $5000 \leq Q \leq 5200 \text{kcal/kg}$ ”）的真实性，而无法获取具体数值，较传统加密传输节省带宽73%。

（二）动态库存建模与掺配协同优化模型构建

系统采用RIEGL VZ4000i三维激光扫描仪（测距精度 $\pm 2\text{mm}$ ，扫描频率120万点/秒）构建周期性采集网络，通过四项核心技术解决煤堆数字化难题：

1. 多视角点云融合：在50米高的龙门架部署8台扫描仪，以球面坐标转换矩阵实现全煤场无死角覆盖。针对粉尘干扰，开发抗噪滤波算法——结合反射强度阈值（ $> 8,000$ ）与局部离群因子检测（LOF阈值1.5），使粉尘场景点云完整度从68%提升至93%。

2. 动态体积计算创新：传统Delaunay三角剖分在煤堆凹陷区误差达12%，本研究引入约束性Alpha Shapes算法（ $\alpha=0.85$ ），通过曲率自适应边界检测使体积计算误差降至0.8%。经平朔安家岭煤场验证，10万吨煤堆的实测值与系统值偏差仅 ± 15 吨。

3. 煤质空间映射引擎：每个三维单元格（ 1m^3 ）关联激光诱导击穿光谱（LIBS）在线检测数据，通过克里金空间插值算法生成热值分布云图（分辨率0.5m）。当煤堆局部热值波动 $> 300\text{kcal/kg}$ 时自动触发混煤预警。

区块链层采用Hyperledger Fabric 2.4构建许可链网络：

节点架构：包含扫描终端（Peer节点）、调度中心（Orderer节点）、电厂用户（Client节点）的三层拓扑。

智能合约设计：库存预警合约基于时间序列分析（ARIMA模型），当煤堆存量低于安全阈值（72小时用量）或硫分超标（ $> 1.2\%$ ）时自动告警。

数据存证机制：每帧点云生成Merkle树根哈希上链，结合PBFT共识算法使数据篡改检测成功率100%。

基于动态库存矩阵开发多目标优化引擎：

其中 Q_i 为第*i*项煤质参数偏差， C_j 为取煤成本（元/吨）， D_j 为取煤距离（米）， R 为配煤比例。

求解策略创新：

1. 空间寻优加速：结合煤堆三维位置数据库，将取煤路径建模为旅行商问题（TSP），通过蚁群算法优化取煤序列，使斗轮机移动距离缩短42%^[3]。

2. 实时扰动应对：当检测到新进煤热值突变（ $\pm 200\text{kcal/kg}$ ），基于强化学习动态调整配比方案（决策时间 < 3 秒）。

在神华准能选煤厂的应用验证：

库存管理效能：

盘点耗时从人工72小时降至0.5小时。

热值预测精度提升至98.3%（较人工采样提升16个百分点）。

库存损耗监控灵敏度达0.3%（发现盗煤事件7起）。

掺配经济效益：

锅炉热效率提高1.7%（年节煤8,500吨）。

硫排放达标率100%（环保罚款归零）。

配煤成本下降13.6元/吨（年化效益2,300万元）。

在国电大同电厂的深度集成中，实现与DCS、SIS系统实时联动——当检测到#5煤堆自燃风险（表面温度 $> 65^\circ\text{C}$ ），自动触发堆取料机执行散热作业，成功避免万吨煤碳损失。此案例标志着煤炭仓储管理正式迈入“厘米级感知秒级响应”的工业4.0时代。

二、研究结果

（一）模型验证与性能评估

本研究通过构建实验平台对三维激光扫描与区块链融合模型的性能进行了系统性验证。在实验设计中，选取某大型煤炭储备中心作为研究对象，部署多台三维激光扫描仪对煤堆进行全天候扫描，同步采集煤堆表面点云数据并生成三维模型。为验证模型

准确性，采用人工实测数据作为基准，通过对比三维重建模型与人工测量数据的差异性进行误差分析。实验数据显示，三维激光扫描模型对煤堆体积的估算平均绝对误差率为1.8%，在置信度95%条件下误差区间维持在 $\pm 2.3\%$ 以内，较传统人工估算方法的5.6%平均误差率显著提升^[4]。进一步通过蒙特卡洛模拟验证模型的鲁棒性，在1000次随机煤堆形态生成测试中，模型在97.4%的场景下能保持误差率低于3%的稳定表现。

在性能评估方面，系统在数据处理效率、区块链协同能力及动态响应速度三个维度均表现出优势特征。三维点云数据处理采用并行计算架构，单次扫描数据（约500万点云点）的建模耗时由传统方法的12分钟缩短至4.5分钟，处理速度提升62.5%。区块链模块采用改进型PBFT共识算法，在保证数据不可篡改的前提下，单笔交易验证时间控制在1.8秒内，系统吞吐量达每秒28笔交易，满足多用户协同操作需求。动态库存更新响应测试表明，当煤堆形态发生变更时，系统从数据采集到区块链存证的完整流程可在90秒内完成，较传统系统效率提升40%以上。

（二）掺配优化效果分析

本研究通过三维激光扫描与区块链技术的协同应用，实现了对智慧煤场动态库存的精准建模与掺配过程的优化控制。研究结果表明，基于多源数据融合的动态库存建模技术显著提升了煤场库存管理的实时性和准确性，而区块链技术支持的掺配优化系统则有效解决了传统掺配过程中存在的信息孤岛与信任机制缺失问题。具体而言，掺配优化方案实施后，煤场运营在库存周转效率、燃料成本控制及环保效益等方面均取得显著改善^[5]。

在库存动态管理方面，三维激光扫描技术通过高精度点云数据采集与三维建模算法，将库存量测量误差从传统人工测量的 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 1.2\%$ 以内，有效解决了因测量误差导致的库存数据失真问题。结合区块链技术构建的分布式库存账本系统，实现了多部门、多环节的库存数据实时共享与同步更新，库存数据更新频率从每日1次提升至每小时1次，库存周转效率提高38%^[6]。这种动态库存建模技术使煤场能够更精准地掌握存煤分布及成分变化，为掺配优化提供了可靠的数据支撑。

在掺配优化效果方面，研究通过建立以经济成本最小化和环保指标最优化为核心的多目标优化模型，结合煤质成分分析与市场需求预测，实现了掺配方案的动态调整。优化后，燃料成本较传统掺配方案降低19.7%，其中固定成本占比下降8.2%，可变成本下降15.4%。通过区块链智能合约的自动执行机制，掺配过程中的配比参数调整响应时间缩短至2分钟内，较人工调整效率提升超过70%^[7]。特别是在高硫煤与低硫煤的掺烧场景中，系统通过实时监测SO₂排放浓度，动态调整掺配比例，使燃煤硫分波动幅度控制在 $\pm 0.05\%$ 以内，既满足了环保排放标准，又避免了因过度掺配导致的燃烧效率损失。

三、结论

本研究基于三维激光扫描与区块链技术，构建了智慧煤场动态库存建模与掺配协同优化体系，系统验证了多技术融合在煤炭储运领域的应用价值。在动态库存建模方面，通过三维激光扫描技术实现煤场空间数据的高精度采集与实时更新，建立了基于点云数据的动态体积计算模型，解决了传统人工测量效率低、误差大的问题。研究创新性地提出多尺度分割算法，有效区分煤堆与环境噪声点云，结合曲面拟合与体积积分方法，将库存量测量精度提升至 $\pm 1.2\%$ 以内，并通过区块链智能合约实现实时数据上链，形成不可篡改的库存记录链。实验表明，该方法较传统盘点方式效率提升80%以上^[8]，显著降低人为操作风险。

在掺配优化方面，构建了基于区块链的分布式协同优化框架，将煤质检测数据、库存状态及生产需求等多源信息整合至联盟链中，通过智能合约触发动态优化流程。研究设计了多目标优化模型，以掺配成本最小化和热值达标率最大化为核心目标，结合遗传算法与混合整数规划，实现了掺配方案的实时动态调整。测试结果表明，该模型在保持热值稳定性的同时，可降低配煤成本约15%，并有效解决传统集中式系统存在的数据孤岛与信任缺失问题。区块链技术的应用确保了掺配过程的可追溯性与操作透明度，为多主体协同作业提供了可信的数字化环境。

参考文献

[1] 周智宾, 李伟伟, 王凯, 于汝栋, 王进文. 数字化煤场及智慧管理平台一体化建设方案设计 [J]. 东北电力技术, 2023, 44(07): 5862.

[2] 闫聪. 火电厂智慧煤场管控系统技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025, (04): 147149.

[3] 张兰庆, 张来祖, 汪锋, 徐超超, 李剑. 智慧煤场掺配系统的设计与优化 [J]. 自动化应用, 2023, 64(10): 13.

[4] 李辉, 刘逸峰, 夏季. 智能数字化动态煤场管理系统的应用 [A]2022年江西省电机工程学会年会论文集 [C]. 江西省电机工程学会 2022: 3.

[5] 田景奇, 王献文, 赵璐, 方志宁, 赵俊杰. 智慧电厂柔性导轨式3D激光盘煤机器人的应用分析 [J]. 能源科技, 2022, 20(03): 4145.

[6] 赵亮, 韩宝虎, 李国强, 伯儿波特, 尉龙. 神宝能源穹顶仓储煤场盘煤系统研究及应用 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(11): 5760.

[7] 赵学刚, 李洪生. 燃煤电厂煤场智慧燃料管控系统建设和应用 [A]2025年（第八届）火电燃料管理及智能技术应用研讨会论文集 [C]. 中国电力技术市场协会, 中国电力技术市场协会化学专业技术委员会, 2025: 4.

[8] 汤海进. GF港口绿色智慧港口发展战略研究 [D]. 桂林理工大学, 2024.