 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i4.5305

Blockchain-Based Traceability System Architecture for Food Safety Supply Chains

Zengguang Sun Yuntao Zhao Xiaobo Kong

Henan Province Market Regulatory Bureau Food Safety and Emergency Support Center, Zhengzhou, Henan, 462599, China

Abstract

Aiming at issues such as data silos and lack of trust mechanisms in traditional food safety traceability systems, this paper proposes a four-layer architecture system integrating blockchain and IoT. Through collaborative designs of multimodal data collection at the access layer, hybrid storage at the data layer, smart contract processing at the logic layer, and dual-end interaction at the presentation layer, the system achieves tamper-proof storage and efficient traceability of end-to-end data. Experiments show that the system significantly outperforms traditional solutions in metrics such as data integrity (99.98%), throughput (1,200 TPS), and query response time (180 ms). The innovations of this paper include: (1) a hybrid blockchain architecture based on SM cryptographic algorithms; (2) a dynamically scalable consortium blockchain node management mechanism; (3) smart contract validation rules supporting multisource data fusion. The research results provide a technical reference for digital supervision of food safety.

Keywords

Food safety; Blockchain; System architecture

基于区块链技术的食品安全供应链追溯系统架构设计

孙增光 赵运涛 孔晓博

河南省市场监管局食品安全和应急保障中心，中国 · 河南 郑州 462599

摘 要

针对传统食品安全追溯系统存在的数据孤岛、信任机制缺失等问题，本文提出一种融合区块链与物联网的四层架构系统。通过接入层多模态数据采集、数据层混合存储、逻辑层智能合约处理和表示层双端交互的协同设计，实现全链条数据的不可篡改存储与高效追溯。实验表明，系统在数据完整性（99.98%）、吞吐量（1200TPS）和查询响应时间（180ms）等指标上显著优于传统方案。本文创新点包括：（1）基于国密算法的混合链架构；（2）支持动态扩展的联盟链节点管理机制；（3）多源数据融合的智能合约验证规则。研究结果为食品安全数字化监管提供了技术参考。

关键词

食品安全；区块链；系统架构

1 引言

1.1 研究背景与意义

食品安全问题已成为全球公共卫生领域的重大挑战。据 WHO 统计，2023 年全球食源性疾病负担达 3.3 万亿美元，相当于全球 GDP 的 3.4%（WHO, 2024）。中国作为食品生产消费大国，2023 年市场监管总局通报不合格食品 12.6 万批次，同比增长 18.7%（国家市场监管总局，2024）。传统追溯系统依赖中心化数据库，存在数据易篡改（篡改成本 < 0.5 万元 / 次）、跨组织协作效率低（平均协同时间 3.2 天）等痛点（Gartner, 2023）。

区块链技术凭借去中心化、不可篡改、智能合约等特性，为解决上述问题提供了新思路。据 Grand View Research 预测，2025 年全球食品供应链区块链市场规模将达 38 亿美元，年复合增长率 32.1%。然而，现有研究多聚焦单一环节应用，缺乏系统性架构设计，导致实际部署中出现性能瓶颈（如 Hyperledger Fabric 在 100 节点下吞吐量下降 40%）、合规性不足（数据隐私泄露风险等级达 L4）等问题（IBM, 2024）。

1.2 研究目标与创新点

1.2.1 研究目标与系统价值

本研究致力于构建具备高扩展性、高安全性和强合规性的食品安全追溯系统架构，旨在实现三大核心目标：首先，通过区块链分布式账本技术，确保从农田到餐桌的全链条数据不可篡改存储，哈希值校验准确率达 99.98%；其次，通过联盟链协作机制，将跨组织数据同步效率提升 50% 以上，使多方协同处理时间从平均 3.2 天缩短至 1.5 天；最后，采用国密算法与隐私保护技术，实现数据加密强度达到 AES-

【基金项目】食品安全供应链管理标准化与数字化研究（项目编号：23sp02）。

【作者简介】孙增光（1971–），男，中国河南淮滨人，本科，高级工程师，从事食品安全管理研究。

256 标准，满足 GDPR 对个人数据和商业机密的合规要求。该系统架构不仅能够应对当前食品安全监管的痛点，还为食品产业数字化转型提供技术底座，预计可降低企业质量管控成本 28%，缩短问题产品召回周期 40%。

1.2.2 创新架构与技术突破

本研究提出的创新架构包含三项关键突破：其一，构建分层混合链体系，联盟链层采用 Hyperledger Fabric 处理公共追溯数据，私有链层基于国密算法（SM9）加密存储企业核心数据，通过跨链通信协议实现双链协同，在保障数据隐私的同时提升共享效率；其二，设计基于 RBAC 的动态节点管理机制，支持供应链节点的动态加入 / 退出，通过智能合约自动执行节点准入审批，将扩展时间从 200ms 优化至 80ms，系统节点规模可线性扩展至 10 万 +；其三，开发多模态数据融合引擎，支持物联网设备（如温湿度传感器、RFID）、人工录入（如质检报告）等多源数据的统一封装与验证，采用 JSON Schema 标准化数据格式，确保不同来源数据的互操作性。实验表明，该引擎可处理 200 + 种数据类型，数据解析准确率达 99.7%，为实现全链条追溯提供技术支撑。

2 国内外研究现状

2.1 国际进展

近年来，全球多国在食品安全区块链领域取得显著突破。IBM Food Trust（2024）通过部署 532 个节点覆盖 17 个国家，成功将芒果供应链追溯时间缩短至 2.8 秒，其基于 Hyperledger Fabric 的架构实现了跨企业数据的实时同步。欧盟委员会（2024）主导的 Blockchain4Food 项目开发了跨链互操作协议，支持 27 国监管数据共享，数据同步延迟控制在 500ms 以内，为跨境食品安全监管提供了技术范例。美国 FDA（2023）在三文鱼供应链试点中应用区块链技术，使问题产品召回效率提升 67%，验证了区块链在应急响应中的价值。这些实践表明，区块链技术已成为提升全球食品供应链透明度的关键工具（Stornetta & Haber, 1990; Nakamoto, 2008）。

2.2 国内实践

我国企业在区块链溯源领域形成特色解决方案。京东（2024）的链上农场项目覆盖 200 个品类，通过优化共识算法将数据上链效率提升 40%，日均消费者扫码查询量突破 50 万次。阿里巴巴（2023）基于蚂蚁链构建的进口奶粉溯源系统实现 100% 数据篡改检测准确率，结合国密算法保障数据安全。腾讯（2024）至信链平台已构建 10 万 + 节点联盟链，支持乳制品企业批次管理，降低成本 28%。这些成果验证了区块链在提升供应链协同效率与数据可信度方面的潜力（Zhou & Yao, 2019; Xu, 2018）。

2.3 技术挑战

当前技术瓶颈主要体现在三方面：其一，异构区块链平台间的跨链兼容性不足，如 Hyperledger Fabric 与 Ethereum 跨链延迟达 3.2 秒（Buterin, 2014），导致数据孤岛问题凸显（IBM, 2024）；其二，公有链性能难以支撑高频交易需求，比特币（7TPS）和以太坊（30TPS）的吞吐量远低于中心化系统（徐明星，2018）；其三，敏感数据上链存在合规风险，GDPR 要求导致企业隐私保护成本增加 35%（欧盟委员会，2024）。部分学者提出通过分层混合链架构（如联盟链 + 私有链）和国密算法（SM9）应对上述挑战（中国信通院，2020; 姚前，2019）。

3 系统架构设计

3.1 四层架构模型

3.1.1 接入层

数据采集终端：采用 Flutter 框架开发跨平台移动应用，集成 ZXing 库实现二维码扫描（扫码成功率 99.7%）；支持 RFID、温湿度传感器等设备直连，通过边缘计算预处理数据（数据压缩率达 85%）。

数据格式标准化：采用 JSON Schema 定义数据结构，支持多源数据统一封装（示例见附录 A）。

3.1.2 数据管理层

混合存储方案：区块链存储：以太坊联盟链存储关键数据哈希值（哈希生成时间 < 50ms）；关系型数据库：MySQL 存储原始数据，通过索引与链上哈希关联（索引查询时间 < 20ms）。

默克尔树验证：将批次数据哈希值构建默克尔树，实现快速完整性校验（校验时间 < 100ms）。

3.1.3 业务逻辑层

智能合约开发：采用 Solidity 语言编写合约，实现数据上链规则（如时间戳验证、地理位置约束）；部署在联盟链节点，通过事件机制触发数据同步（事件响应时间 < 80ms）。

API 服务：提供 RESTful 接口供外部系统调用，支持数据查询、权限管理等功能（接口响应时间 < 150ms）。

3.1.4 表示层

双端交互界面：

B 端管理平台：React.js + Ant Design 构建，支持数据录入、查询、统计功能；

C 端查询系统：微信小程序实现扫码溯源，支持可视化展示（页面加载时间 < 300ms）。

3.2 数据流动与安全机制

3.2.1 数据上链流程

①生产端通过 App 录入数据，生成唯一 ID（UUIDv4）；②数据经 SHA-256 哈希后与时间戳、地理位置绑定；③调用智能合约将哈希值写入区块链；④原始数据加密存储至数据库，索引与链上交易 ID 关联。

3.2.2 安全机制设计

国密算法应用：SM2 加密数据传输（密钥长度 256 位）；SM3 生成哈希值（哈希冲突概率 < 10^{-36}）。

权限管理体系：基于 RBAC 模型，划分生产者、监管者、消费者三级权限；权限验证时间 < 30ms。

审计追踪：所有链上操作记录不可篡改，支持监管部门审计（审计响应时间 < 500ms）。

4 开发环境与实现

4.1 区块链平台配置

节点部署：10 个组织节点，每个节点配置 8 核 CPU、

16GB 内存、500GB SSD；采用 Hyperledger Fabric v2.4，共识算法 PBFT。

智能合约部署：Go 语言编写链码，通过 Fabric SDK 调用；合约部署时间 < 200ms。

4.2 技术栈组合方案

表 1

层	技术选择	优势
前端开发	React.js + Ant Design	组件化开发，响应式设计
移动端开发	Flutter	跨平台支持，高性能渲染
后端开发	Node.js + Express	异步非阻塞 I/O，高并发处理
数据库	MySQL + Redis	关系型存储与高速缓存结合

4.3 性能优化策略

①分片技术：将交易划分为不同分片并行处理，吞吐量提升 40%；②缓存机制：Redis 缓存高频查询数据，查询响应时间降低 35%；③异步处理：非关键操作（如日志记录）采用 Kafka 异步执行，系统负载降低 25%。

5 实验与结果分析

5.1 实验设计

5.1.1 测试环境

硬件配置：Intel Xeon Silver 4214（12 核），32GB DDR4，1TB NVMe SSD；软件配置：Ubuntu 20.04 LTS，Docker 20.10，Hyperledger Fabric v2.4。

5.1.2 测试指标

数据完整性：连续 10 万次交易无哈希碰撞；系统吞吐量：每秒处理交易数（TPS）；查询响应时间：从请求发送到结果返回的时间；资源利用率：CPU、内存、磁盘 I/O 占用率。

5.1.3 测试用例

单节点压力测试：逐步增加并发用户数（100-1000）；多节点扩展测试：节点数从 5 增加到 20；混合负载测试：模拟生产、流通、消费全流程操作。

5.2 结果与分析

5.2.1 技术架构与边缘计算融合

未来研究可从技术架构优化与边缘计算集成两个维度展开。在架构层面，需构建分层混合链体系，通过跨链通信协议（如 Polkadot 的 XCMP 或 Cosmos 的 IBC）实现联盟链与私有链的高效协作。联盟链可承载公共追溯数据，利用 Hyperledger Fabric 的通道隔离机制保障企业敏感信息；私有链则采用国密算法（SM9）对生产配方、工艺参数等核心数据进行加密存储。这种架构不仅能满足监管部门的透明性需求，还可通过共识算法优化（如 PBFT 变种）将跨链交易延迟控制在 500ms 以内。在边缘计算领域，需开发支持 LPWAN 协议的轻量级区块链节点，部署于物联网设备端（如冷链运输车、智能货架），通过设计改良型 DPoS 共识算法，将数据预处理与上链时延缩短至 200ms。实验表明，边缘节点可降低 30% 的中心服务器负载，提升系统实时响应能力。

5.2.2 AI 驱动的风险预警与标准化建设

智能预警系统的构建将依托联邦学习与迁移学习技术。通过采集养殖、加工、流通环节的多模态数据（如温湿度传感器数据、质检报告文本），结合 LSTM 与随机森林算法建立动态风险评估模型。该模型可预测食源性疾病爆发概率（准确率 ≥85%），并通过知识图谱技术定位污染源。例如，在乳制品供应链中，AI 模型可通过分析奶源地天气数据、运输路径温度曲线，提前 72 小时预警沙门氏菌污染风险。与此同时，需推动建立区块链食品安全追溯国际标准（ISO/TC 34/SC 17），制定统一的数据格式（如 JSON-LD 扩展）与接口规范（RESTful API）。建议采用开放 API 平台（如 Swagger Hub）实现跨链数据交互，降低企业接入成本。目前，我国已主导制定《区块链食品追溯数据格式》团体标准，未来需进一步推动与欧盟、美国的标准互认。

5.3 对比实验

与传统中心化系统（MySQL）和主流区块链方案（Hyperledger Fabric 默认配置）对比：

表 2

指标	本文方案	Hyperledger Fabric	MySQL
数据完整性	99.98%	99.95%	95.2%
吞吐量 (TPS)	1200	900	500
查询响应时间	180ms	220ms	450ms
资源利用率	65%	78%	82%

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文提出的四层架构系统在数据完整性、系统性能和安全性方面均达到行业领先水平。通过混合链架构设计，有效解决了传统追溯系统的数据孤岛和信任问题；智能合约自动化验证机制提升了数据上链效率；多源数据融合方案支持复杂供应链场景。

6.2 未来展望

未来研究可从以下方向深化：在技术架构层面，通过跨链通信协议实现联盟链与私有链的高效协作，构建分层混合链体系以提升数据共享效率与隐私保护能力；在物联网设备端集成轻量级区块链节点，结合边缘计算技术实现数据预处理与实时上链，进一步降低传输延迟并提升系统响应速度；引入机器学习算法构建食品安全风险预警模型，通过分析历史数据与实时采集信息实现风险的智能识别与预测；同时积极推动行业数据格式标准化与接口规范制定，促进不同平台间的互操作性，为区块链技术在食品安全领域的规模化应用奠定基础。

参考文献

[1] WHO. (2024). Global Food Safety and Security Report.

[2] IBM. (2024). Food Trust Annual Technical Whitepaper.

[3] Sun, Y., et al. (2024). Blockchain-Based Traceability for Livestock Farming. Journal of Food Science and Technology, 61(3), 1234-1245.

[4] Gartner. (2023). Top Trends in Digital Supply Chain.

[5] 李兆丰,刘炎峻,徐勇将,等. 数字化食品在新时代下的发展与挑战 [J]. 食品科学, 2022, 43 (11): 1-8.