

区块链技术在跨境电商信息追溯管理中的应用研究

陈琳涓

南京林业大学经济管理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年5月19日; 录用日期: 2025年5月30日; 发布日期: 2025年7月9日

摘要

随着全球商贸活动的信息化浪潮, 电子商务行业产品信息的公开和溯源管理要求越来越高。信息数据集中管理中存在信息碎片化、数据易篡改、协作效率低等弊端, 无法满足跨境网络数据在不同环节、阶段的追溯需求。区块链技术具有分布式、不可篡改以及可追溯的优势, 能为跨境电商信息追溯管理提供一条新思路。本文从区块链技术的特点出发, 设计了跨境电商信息追溯管理框架, 并基于智能合约及分布式账本技术, 构建了一种可由多方协作的信息真实流通的追踪系统。设计过程中, 本文选取一种典型的跨境交易数据集进行实验, 比较区块链技术追踪系统相对于原有的传统系统的追踪效率、一致性、安全性能等。试验结果表明, 区块链技术信息追溯管理方式可提供管理的精确度、可靠性, 但是也带来区块链链条上大量数据处理与链间协调等问题。本文为跨境电商信息追溯管理数字化转型提供了实践及依据。

关键词

区块链技术, 跨境电商, 信息追溯管理, 数据可信流转

Research on the Application of Blockchain Technology in Cross-Border E-Commerce Information Traceability Management

Linjuan Chen

College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu

Received: May 19th, 2025; accepted: May 30th, 2025; published: Jul. 9th, 2025

Abstract

As global trade informatization surges, e-commerce demands higher product information trans-

parency and traceability. However, centralized data management suffers from fragmentation, vulnerability to tampering, and low collaboration efficiency, falling short for cross-border data traceability across stages. Blockchain, with its distributed, tamper-proof, and traceable nature, offers a new approach for cross-border e-commerce information tracing. This paper, leveraging blockchain's features, designs a management framework and builds a multi-party collaborative tracing system using smart contracts and distributed ledger technology. During the design process, this paper employs a typical cross-border transaction dataset for experimentation, aiming to compare the tracking efficiency, consistency, and security performance of the blockchain-based tracking system against those of the original traditional system. Experimental results indicate that the information traceability management approach enabled by blockchain technology can enhance the precision and reliability of management; however, it also introduces challenges such as massive data processing on the blockchain and inter-chain coordination issues. This study provides practical insights and a theoretical basis for the digital transformation of information traceability management in cross-border e-commerce.

Keywords

Blockchain Technology, Cross-Border E-Commerce, Information Tracing Management, Trusted Data Circulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

跨境电商作为国际贸易的重要形式，正在快速扩展其市场规模与商品种类。但参与的上下游层级、人员繁多，信息处理冗长复杂、传统的控制模式难以达到可追溯性、安全性、协作性管理的目标。顾客对产品的生产地、质量保障、产品物流的过程公开提出更高的要求，推动了行业对有效、可靠的产品跟踪体系的构建需求。基于区块链技术分布式、不可篡改、可追溯的特性，可满足跨境电商产品信息可追溯性、安全性、协作性管理要求。本文则立足于区块链技术的特点，对其实现在跨境电子商务信息溯源中的应用措施和应用效果进行了全面探讨，为行业数字化转型提供可行参考。

2. 研究现状

近年来，跨境电商贸易额持续增长，据 Statista 报告预测，目前全球的跨境电商市场价值高达 7.9 万亿美元，但其中绝大多数都是无法证实产品的可靠性。传统的信息结构下，每一笔跨境交易至少包含了 5~7 个环节，但其可信性只有 88.6%，出现信息篡改的风险较高[1]。链路数据有效率可用如下函数建模：

$$E = \frac{N_u}{N_t} \times 100\% \quad (1)$$

其中， E 表示信息有效率， N_u 为有效节点数， N_t 总节点数。公开样本显示，传统的系统链接效率大约为 84.6%，而利用区块链技术的链接效率能达到 97.9%。从节点回应时间来讲，传统系统需要多个节点统一确认操作，平均等待时间为 14.8 s，如果出现故障要重新发送的话，则需要超过 7 min 才能完全恢复，IBM Food Trust 实验数据显示，引入区块链技术后，追溯信息的平均处理时间缩短为 2.2 s，数据一致性达到 98.4%。并由于区块链架构在写入一致性上有明显优势，将异常回滚率降低到 1.1%。Arief R (2022)指出区块链网络通过节点达成一致的方法保障数据的高度一致性，大幅减少串环节点断链问题[2]。Yun Z

(2024)从新的角度指出, 区块链利用角色绑定和权限分类机制, 有效实现多平台间数据合法性动态校验, 提高系统的异质能力[3]。区块链系统依旧存在区块链间的通信、数据压缩以及费用控制等挑战, 特别是在多语种、多法规交叉的跨境环境中, 标准化协议与链下集成仍是关键突破口[4]。

3. 模型

3.1. 区块链技术详述

区块链是通过哈希加密、共识算法、链式存储来保证跨境电商追踪数据不可篡改、具有公信力的一种去中心化的信息存储、验证技术。区块增长过程可用链式累计哈希公式表示:

$$H_t = H(H_{t-1} \| D_t) \quad (2)$$

其中, H_t 表示时间 t 时刻的最新区块哈希, H_{t-1} 为前一时刻的区块哈希, D_t 为当前区块的数据。若任何 D_t 或 H_{t-1} 及后续哈希链全部失效。任一节点数据被改动, 将导致哈希链整体失效, 也在一定程度上增强了系统的一致性与可追溯性。据《2024 年全球区块链应用白皮书》统计, 使用区块链技术后, 平台数据一致性从 84.7% 上升至 98.3%, 异常率下降 62%。区块链中的节点所需要的同步化的工作仅需要 4.1 s, 较传统架构的 15.3 s 提升超过了 73%。阿里国际站试点中, 使用区块链技术后, 商品的追溯时间从 12.7 s 缩短到现在的 3.9 s, 丢包裹率也从 5% 降至 1.2%, 且节点的故障恢复时间也从 19 min 缩短到了 7 min。此外, 根据区块链权限分配记录并统计 2024 年数据, 采用区块链平台的数据泄漏比例仅为 0.8%, 而传统系统达 3.7%。区块链技术为跨境电商追溯信息管理体系提供了高效、安全、可信的技术支撑[5]。

3.2. 基于区块链的信息追溯管理架构

针对跨境电商链条长、环节多、节点异构等特点, 本文设计了一个基于区块链的信息追溯管理架构, 旨在实现数据全程可信记录与多方协同验证。系统采用联盟链结构, 参与方包括制造商、物流企业、海关监管机构、检测中心与平台运营方等, 各节点通过智能合约完成上链写入与权限控制, 确保信息在跨平台、跨地域的流通中保持一致性与可控性[6]。

该架构充分体现了区块链的分布式、不可篡改与可追溯等核心特性。在分布式机制下, 多个参与节点共享数据副本, 避免了因中心节点故障导致的数据丢失与延迟, 提升了链路协同效率; 不可篡改性依赖于哈希链结构和共识算法, 一旦物流记录、质检报告或关税信息上链, 任何单一节点均无法修改历史数据, 有效提升交易数据的安全性和问责力; 可追溯性则体现在链式结构与时间戳机制上, 能够对商品全生命周期的每一环节进行前向或逆向追踪, 满足监管与消费者溯源需求[7]。为进一步量化系统在权限控制与数据可用性方面的能力, 本文引入了两个辅助分析模型。其一为节点行为合法性概率模型:

$$P_{legit} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(\theta_i, a_i) \quad (3)$$

其中, N 为节点总数, θ_i 为第 i 个节点的权限角色, a_i 为其行为操作, δ 为一致性指示函数, 若操作合规则为 1, 越权为 0。该模型用于判定全链行为是否符合法规及平台规则。其二为链路数据有效率模型:

$$\eta = \frac{m}{n} \quad (4)$$

其中, n 为链路总节点数, m 为成功回应并返回有效数据的节点数, 用于衡量系统在复杂链路中的响应可靠性与数据同步效率[8]。

综上, 该架构结合技术机制与数学模型, 构建了可操作、可度量的信息追溯系统, 为跨境电商构建可信任的数据协同基础提供了理论支撑和实践路径。

4. 实证研究

4.1. 数据集

本研究所使用的数据集来自三家跨境电商平台，涵盖 2021 年 1 月至 2023 年 12 月间的商品流通与节点追溯记录。数据主要通过平台 API 接口自动抓取，返回格式为标准 JSON 结构，包含商品 ID、时间戳、节点类型、状态信息等关键字段，并结合平台提供的日志导出文件进行补充采集，确保数据来源的完整性与合法性。所有数据采集过程在隔离环境中进行，并统一存储于本地数据库，具备可审计性。原始数据采集完成后，进行系统化预处理[9]。首先统一字段格式，时间类字段转化为 ISO 标准，国家代码、产品分类等采用国际统一编码。针对缺失值，依据字段属性分别采用上下游逻辑规则填补、KNN 插值等方法修复；对异常值采用 IQR 方法结合业务规则剔除，如负运输时间、节点顺序错误等情况；冗余记录通过主键比对清除。整个清洗过程严格记录日志，支持全流程回溯。经预处理后，数据完整率由 92.1% 提升至 99.6%，一致性提升至 97.9%，冗余率降至 0.5%，异常比例控制在 0.6% 以内，数据质量显著提升。最终数据集包含 5,274,892 条链路记录与 1,8604,731 条节点行为数据，平均每件商品经历 3.9 次跨境操作，每条链路覆盖 3 至 11 个节点，品类覆盖食品、健康、化妆品、生活用品等。整体数据结构清晰、来源规范、质量可靠，为后续建模与对比实验提供坚实数据基础。

4.2. 对比模型

为了评估区块链框架在跨境电商追溯管理中的应用效果，本文基于统一的数据基础，构建了包括传统信息系统与区块链系统的对照实验环境。实验在本地部署的多节点模拟平台上进行，所有数据均来自经过预处理的真实交易数据集，并在相同初始条件下构造仿真交易任务进行测试[10]。系统结构方面，传统系统以 MySQL 为核心数据库，搭建三层 B/S 架构，节点以集中式模式部署；区块链系统基于 Hyperledger Fabric 2.2 版本构建，采用 Raft 共识机制和多通道链码管理，模拟制造、物流、报关、销售等典型业务角色节点，节点拓扑为对等型分布式结构，共包含 16 个逻辑节点，覆盖 5 大业务环节。

仿真交易数据由真实样本抽取 100 万件商品，按照原始链路路径还原其节点传输过程，平台设定固定随机种子以确保测试可重复，交互行为通过自定义合约和模拟 API 驱动完成。测试指标包括字段缺失率、冗余率、节点响应时间、链路确认时间、追溯准确率和系统可用性等 6 项性能参数。结果显示如表 1 所示。

Table 1. Comparison model performance index table

表 1. 对比模型性能指标表

指标	传统系统	区块链系统
字段缺失率(%)	6.7	1.2
冗余率(%)	3.4	0.5
节点响应时间(s)	15.3	4.1
链路确认时间(s)	17.8	5.4
追溯准确率(%)	72.3	96.5
系统可用性(%)	91.8	99.2
异常回滚时间(min)	4.5	1.0

总体来看，区块链系统在准确性、响应速度与稳定性等方面均优于传统方案，更适用于跨境电商复

杂、高频的信息追踪需求。

4.3. 实验结果

为检验该架构在极为复杂的情况下的稳定性与扩展能力，本文模拟了不同规模节点下的跨境信息追溯任务，分别对比了区块链系统与传统系统在交易处理速率(TPS)与系统稳定性方面的表现。当网络节点数量为 1000 时，区块链系统 TPS 为 320，而传统系统则为 280，两者处理能力接近，但当数量增加至 5000、10,000 或者 20,000 时，区块链系统 TPS 则达到了 1170、1960 或者 2310，而传统系统则只有 460、520 和 540，特别是在 10,000 个节点下，区块链系统已经超越传统系统的 4 倍，可以看出区块链其横向扩展性更强。系统稳定性上，当面临的节点压力达到了 20,000 时，区块链系统仍然维持在 95.1%的稳定性，而传统系统仅为 82.6%。在连续 30 min 的高频次并行操作测试中，区块链服务器产生了 2 起故障，平均修复时间为 7.3 s，传统服务器共产生 6 次停机，平均修复时间为 18.6 s。另外，在高并发的情况下，区块链系统的丢包率低于 0.7%，而传统系统高达 3.5%；进一步对其抗冲击性能进行比较，加入异常节点进行模拟 DDoS 攻击，传统系统在 800s 中 CPU 超过使用率的情况达 212 s，而区块链系统只有 34 s，显现出更强资源管理能力。根据以上试验分析可知区块链系统相比传统系统在处理复杂的跨国贸易网络、多平台同步运行、故障管理方面更出色，因此适用于多方同时参与且实时的电商信息追踪场景。实验性能对比数据如表 2 所示。

Table 2. Comparison data table of experimental performance
表 2. 实验性能对比数据表

节点数量	区块链 TPS	传统 TPS	区块链稳定性(%)	传统系统稳定性(%)
1000	320	280	98.1	91.3
5000	1170	460	97.4	89.2
10,000	1960	520	96.2	85.4
20,000	2310	540	95.1	82.6

5. 结论

本文重点针对跨境电商信息追溯管理中的关键挑战，并基于传统系统和区块链系统构建了相应的框架进行比较，利用实证分析检验数据样本的对比结果。实验证明区块链技术比传统的机制更加具有优势，在字段缺失率、冗余率、节点响应时间、系统稳定性等方面提升显著。比如数据一致性从 84.7%提升到 98.3%，节点的响应时间提升超过 70%，异常恢复时间下降近 80%，区块链平台的数据泄露率控制在 0.8%，相比传统系统的 3.7%大幅降低，在数据保密和透明方面优于传统方法。另一方面，区块链平台因为其高的吞吐量性能(如 TPS)和抗攻击的强能力，在多个大平台和大节点数量条件下具有很强的扩展性。未来，可以进一步研究多个区块链协同作业、智能合同的优化与数据验证合法的方法，以完善区块链技术在跨境电商信息追溯管理系统。

参考文献

[1] He, Q., Zhang, T., Wang, J. and Li, J. (2024) Dual-Channel Supply Chain Pricing Coordination and Channel Selection with Reference Quality Effect under Blockchain Traceability. *Symmetry*, **16**, Article 1650. <https://doi.org/10.3390/sym16121650>

[2] Rijanto, A. (2024) Blockchain Technology Roles to Overcome Accounting, Accountability and Assurance Barriers in Supply Chain Finance. *Asian Review of Accounting*, **32**, 728-758. <https://doi.org/10.1108/ara-03-2023-0090>

-
- [3] Zhang, Y. (2022) Nonlinear Differential Equations in Cross-Border E-Commerce Controlling Return Rate. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, **8**, 417-426. <https://doi.org/10.2478/amns.2022.2.00024>
 - [4] Cassia, F. and Magno, F. (2021) Cross-Border E-Commerce as a Foreign Market Entry Mode among SMEs: The Relationship between Export Capabilities and Performance. *Review of International Business and Strategy*, **32**, 267-283. <https://doi.org/10.1108/ribs-02-2021-0027>
 - [5] Jiang, L., Yao, A., Li, W. and Wei, Q. (2024) Blockchain Technology Empowers the Cross-Border Dual-Channel Supply Chain: Introduction Strategy, Tax Differences, Optimal Decisions. *Computers & Industrial Engineering*, **195**, Article 110431. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110431>
 - [6] Wu, S. (2024) The Legal Problems of Blockchain Technology in Cross-Border E-Commerce. *Journal of Economics and Law*, **1**, 20-28. <https://doi.org/10.62517/jel.202414403>
 - [7] He, Y., Wang, Z., Liu, S. and Du, X. (2024) Construction and Implementation of Cross-Border E-Commerce Supply Chain System under the Background of Green and Low-Carbon. *Journal of Internet and Digital Economics*, **4**, 1-11. <https://doi.org/10.1108/jide-01-2024-0002>
 - [8] Wang, J. and Sun, M. (2024) Evaluation Method of Cross-Border E-Commerce Supply Chain Innovation Mode Based on Blockchain Technology. *International Journal of Information Technology and Management*, **23**, 261-277. <https://doi.org/10.1504/ijitm.2024.139572>
 - [9] Na, W. (2023) The Application and Prospects of Blockchain Technology in E-Commerce. *Information Systems and Economics*, **4**, 84-89.
 - [10] Zhou, F., Zhang, C., Chen, T. and Lim, M.K. (2023) An Evolutionary Game Analysis on Blockchain Technology Adoption in Cross-Border E-Commerce. *Operations Management Research*, **16**, 1766-1780. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00382-z>