

基于区块链 + 物联网的汽车零部件全生命周期溯源研究

魏晓光^{1,2}, 仝青山², 崔 硕²

¹河北金融学院经济贸易学院, 河北 保定

²河北金融学院金融科技学院, 河北 保定

收稿日期: 2025年10月29日; 录用日期: 2025年11月27日; 发布日期: 2025年12月4日

摘 要

在汽车产业全球化与供应链层级深化的背景下, 传统零部件溯源模式面临中心化数据易篡改、多主体信息孤岛、质量问题追溯效率低及假冒伪劣品流入等痛点, 严重制约供应链透明度与信任体系构建。为解决上述问题, 本文设计并实现一种融合区块链、物联网与智能合约的汽车零部件全生命周期溯源系统。系统采用“前端-Vue.js + 后端-Go/Gin + 联盟链-FISCO BCOS”的分层架构, 通过“链上哈希存证 + 链下明细存储”策略平衡数据安全性与存储效率, 依托智能合约自动触发生产参数、质检结果、物流节点等关键数据上链, 实现汽车零部件全生命周期溯源, 同时构建多角色细粒度权限管控体系, 保障数据隐私与操作合规性。

关键词

区块链, 物联网, 汽车零部件, 供应链溯源

A Study on Full-Lifecycle Traceability of Automotive Components Based on Blockchain and IoT

Xiaoguang Wei^{1,2}, Qingshan Tong², Shuo Cui²

¹School of Economics and Trade, Hebei Finance University, Baoding Hebei

²School of Financial Technology, Hebei Finance University, Baoding Hebei

Received: October 29, 2025; accepted: November 27, 2025; published: December 4, 2025

Abstract

Under the backdrop of the globalization of the automotive industry and the increasing complexity

文章引用: 魏晓光, 仝青山, 崔硕. 基于区块链 + 物联网的汽车零部件全生命周期溯源研究[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(12): 43-57. DOI: 10.12677/csa.2025.1512320

of supply chain tiers, traditional component traceability models face challenges such as susceptibility to tampering of centralized data, information silos across multiple entities, low efficiency in quality issue tracing, and infiltration of counterfeit products. These issues severely hinder the establishment of supply chain transparency and trust systems. To address the above problems, this paper designs and implements a full-lifecycle traceability system for automotive components that integrates blockchain, the Internet of Things (IoT), and smart contracts. The system adopts a layered architecture of “Frontend: Vue.js + Backend: Go/Gin + Consortium Blockchain: FISCO BCOS”. By employing a strategy of “on-chain hash storage for proof + off-chain storage of detailed data”, it balances data security and storage efficiency. Leveraging smart contracts, the system automatically triggers the recording of key data—such as production parameters, quality inspection results, and logistics nodes—onto the blockchain, thereby achieving full-lifecycle traceability of automotive components. Simultaneously, it establishes a multi-role, fine-grained permission control system to ensure data privacy and operational compliance.

Keywords

Blockchain, IoT, Automotive Components, Supply Chain Traceability

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

1.1. 研究背景

在汽车产业全球化与模块化生产模式的驱动下，供应链网络已形成“多级供应商 - 制造商 - 整车厂 - 售后市场”的复杂体系。据中国汽车工业协会数据显示，一辆乘用车的零部件数量超 3 万个，涉及上游数百家供应商，供应链层级普遍达到 4~6 级。这种复杂性导致传统溯源模式面临多重挑战：其一，中心化数据库依赖单一机构维护，易遭受恶意攻击或人为篡改，造成重大安全隐患[1]；其二，信息孤岛现象突出，供应商、制造商、物流商的信息系统独立运行，数据交互依赖纸质单据或人工录入，追溯效率低下[2]；其三，假冒伪劣零部件通过非正规渠道流入市场，严重威胁整车安全与消费者权益。

区块链技术凭借分布式账本、哈希加密、时间戳与共识机制，为解决供应链溯源痛点提供了创新性方案。其去中心化特性可打破信息孤岛，实现多方参与的数据共享；不可篡改特性可确保数据从产生到存储的完整性；可追溯特性可构建“一物一码一档案”的全链条溯源体系。此外，智能合约的自动化执行能力可减少人工干预，提升溯源流程的标准化与效率；国密算法与非对称加密技术则为商业隐私保护提供了技术支撑。

1.2. 研究意义

1.2.1. 理论价值

从技术适配性角度，汽车零部件供应链具有参与主体多、环节繁杂、数据异构性强等特征，本文通过分析区块链技术与复杂供应链的耦合机制，探索了“区块链 + 物联网 + 大数据”的多技术协同应用模式，完善了区块链在工业级复杂场景下的应用理论。具体而言，本文提出的“链上哈希存证 + 链下明细存储”策略，解决了区块链存储容量有限与工业数据体量庞大的矛盾；设计的多角色权限控制模型，为区块链技术在多主体协同场景下的隐私保护提供了可复用框架，可为后续学者在航空航天、高端装备

制造等类似复杂供应链场景的研究提供理论参考。

从跨学科融合角度,本文整合计算机科学、管理学、工业工程等多学科理论,构建了技术驱动型供应链溯源体系,有助于解决管理学中“供应链数据滞后性”问题;通过区块链共识机制实现多方信任构建,弥补传统供应链管理中“信任依赖中心化机构”的缺陷,丰富了跨领域技术应用研究成果。

1.2.2. 实践价值

在行业应用层面,系统可为汽车供应链各参与方提供可信技术支撑:对供应商而言,可通过链上数据证明零部件质量,提升市场竞争力;对整车厂而言,可快速定位质量问题源头;对监管机构而言,可通过区块链浏览器实现“穿透式”监管,实时核查企业合规情况;对消费者而言,可通过扫码快速验证零部件真伪,降低维权成本。

在社会效益层面,系统可推动汽车行业从“事后追责”向“事前预防”的质量管控模式转型,减少因零部件质量问题引发的交通事故;同时,通过区块链记录零部件全生命周期碳足迹,可为汽车行业“双碳”目标的实现提供数据支撑,具有显著的社会与环境效益。

2. 国内外研究现状

区块链技术凭借去中心化、不可篡改与可追溯的核心特性[3],已成为破解汽车零部件供应链“数据可信度低、多主体协同难、隐私保护弱”等痛点的关键技术路径。当前汽车零部件供应链溯源领域的研究,围绕技术适配性与场景需求形成了多维度探索方向,但不同方案在技术架构、问题解决范围及实际应用适配性上存在显著差异,需从技术方案的核心逻辑、适用边界及未覆盖需求等维度展开系统性分析。

在区块链与整车级数据管理的融合方向,相关研究构建基于联盟链的电动汽车智能化管理系统,聚焦整车运营过程中的关键状态数据上链存储[4],核心目标是解决整车级数据的篡改风险与生命周期状态追溯难题,在新能源汽车整车管理及动力电池溯源场景中具有一定应用价值。但这类方案的数据颗粒度以“零部件批次”为单位,仅能实现“批次级”追溯,无法覆盖汽车供应链中“单个零部件-原材料批次-生产设备”的细粒度关联需求,而汽车行业对质量问题的追溯往往需要定位至具体零部件的生产源头[5],因此难以满足精准溯源的实际需求。

区块链与标准化存证的结合是另一重要研究分支[6],相关方案借鉴农产品溯源领域的成熟架构,采用 Hyperledger Fabric 联盟链搭建零部件溯源系统[7],通过智能合约定义生产参数、质检报告的数据格式标准,实现供应链各环节数据的标准化上链。该类方案有效破解了传统供应链中因数据格式异构导致的信息孤岛问题[8],提升了质检结果、生产记录等静态数据的共享效率,适用于零部件静态数据存证场景。然而,其局限性在于未考虑汽车供应链的动态数据需求——如运输环节的温湿度、物流节点变更等实时数据仍依赖人工上传触发上链,导致动态数据的时效性不足;同时,权限设计仅采用“管理员-普通用户”二级架构,未区分供应商、制造商、监管机构等多角色的差异化数据访问需求,易引发商业敏感信息泄露或操作权限越权问题。

针对供应链敏感数据保护的需求,部分研究引入同态加密与访问控制列表(ACL)构建隐私保护模型[9],并尝试迁移至汽车零部件溯源领域。该类方案通过同态加密技术对供应商的生产工艺、原材料配方等敏感数据进行加密处理,仅允许授权主体在不解密的情况下完成数据验证,核心目标是避免商业秘密泄露,适用于发动机核心部件、自动驾驶芯片等高敏感零部件的溯源场景。但同态加密与解密过程的计算开销较大,耗时较高难以满足汽车供应链中物流节点变更、生产设备实时参数等高频动态数据的上链需求,导致其在实时性要求较高的场景中适用性受限。

在区块链与物联网的轻量融合研究中,行业实践类方案尝试集成 RFID 标签采集零部件身份信息,通过单链架构将零部件身份数据与物流节点数据直接上链,实现“零部件-物流节点”的关联追溯,显著提

升了仓储、运输环节的透明度[10]。该类方案的优势在于数据采集效率高,能够快速建立零部件与物流环节的对应关系,但存在两大核心问题:一是链上存储压力过大,高清质检视频、原始传感器数据等大体积文件无法直接上链,只能依赖链下存储,导致链下数据与链上记录缺乏可信关联;二是追溯链条不完整,仅覆盖“生产-物流”环节,未与原材料采购、整车装配环节的数据形成闭环,无法实现全生命周期的追溯。

针对跨企业协同的信任问题,部分研究基于双层博弈模型与 Hyperledger Fabric 构建分布式能源交易系统,并尝试迁移至汽车供应链跨域协同场景。该类方案通过博弈模型平衡供应链各主体的利益诉求,降低跨企业数据交互的信任成本,适用于供应商与制造商之间的订单确认、支付结算等协同场景。但其技术方案的核心局限在于“重信任构建、轻全链追溯”,未针对汽车零部件“原材料采购-生产制造-质量检测-物流运输-整车装配”的全链条设计数据关联机制,导致原材料批次与零部件、零部件与整车之间存在追溯断点,无法实现“从整车反查单个零部件来源”的精准追溯需求。

综合上述研究方向可见,当前汽车零部件供应链溯源领域的研究存在三大共性特征:其一,技术方案偏向“单一场景适配”,如聚焦隐私保护的方案忽略实时性需求,聚焦物流追溯的方案缺乏全链条覆盖,尚未形成兼顾“数据可信存储、实时动态采集、敏感信息保护、存储效率优化”的一体化架构;其二,数据颗粒度与供应链层级不匹配,多数方案以“批次”为追溯单位,无法满足汽车行业对“单个零部件-原材料-设备”的细粒度追溯要求,导致质量问题发生时难以精准定位责任环节;其三,角色权限管控精细化不足,现有方案的权限设计普遍较为简单,未充分考虑汽车供应链中“供应商仅提交数据、监管机构审计全链、消费者查询基础信息”的差异化权限需求,易引发数据安全风险。

从汽车零部件供应链的实际运营需求来看,现有研究仍存在四大未解决的核心局限性:一是链上链下数据协同矛盾,全量数据上链会导致区块链存储压力剧增,而单纯链下存储又无法保障数据可信度,缺乏“关键数据上链+明细数据链下可信关联”的平衡机制;二是动态数据实时性不足,多数方案依赖人工触发数据上链,未实现“物联网采集-边缘计算清洗-智能合约自动上链”的闭环,导致运输环境、生产设备实时参数等动态数据上链延迟,影响质量问题的追溯效率;三是跨环节追溯断点,现有方案多覆盖单一或两个环节,未建立“原材料批次号-零部件唯一标识(UID)-整车VIN码”的双向绑定关系,无法实现全生命周期的连贯追溯;四是隐私保护与效率平衡难题,采用同态加密等强隐私保护技术的方案计算开销过大,难以满足实时质检判定、物流异常预警等高频操作的效率需求。

本文针对汽车零部件供应链“多层级、高动态、强隐私”的独特需求,系统性分析现有研究在存储效率、实时性、全链条覆盖、隐私保护上的核心痛点,形成“可信、高效、安全、全覆盖”的一体化溯源体系,为汽车零部件全生命周期溯源提供了更贴合行业实际的技术路径。

3. 研究内容与研究方法

3.1. 研究内容

本研究的核心目标是构建基于区块链的汽车零部件全生命周期溯源系统,解决传统供应链中数据可信度低、追溯链条断裂、质量监管滞后、假冒伪劣零部件难以识别等问题。具体包括:

(1) 全流程关键数据整合与可信存证。针对汽车零部件生产、质检、运输等环节的数据异构性问题,明确各环节核心数据维度。通过智能合约将上述数据标准化后上链,确保数据从产生到存储的不可篡改性,解决传统模式下“数据伪造”“数据缺失”问题。

(2) 供应链全链条协同与精准追溯。为每个零部件分配全球唯一标识码,通过智能合约将标识码与原材料批次号、生产批次号绑定,实现“原材料-零部件-整车”的双向追溯。

(3) 多角色权限管控与安全防护体系构建。针对汽车供应链中供应商、制造商、监管机构、消费者等多角色的差异化需求,设计细粒度权限控制模型:供应商仅可提交本厂生产数据,不可查看其他供应商

信息；制造商可查看零部件装配信息，不可修改质检结果；监管机构拥有全链条数据审计权限，可生成合规报告；消费者仅可查询所购车辆零部件的基础溯源信息，不可访问商业敏感数据。

3.2. 研究方法

(1) 技术架构搭建。采用“前后端分离 + 联盟链”的技术架构。应用 Go 语言与 Gin 框架搭建后端服务，依托 FISCO BCOS 联盟链实现数据存证；通过 JWT (JSON Web Token)实现多角色权限控制，利用 GORM 框架管理生产批次、质量检测、运输记录等结构化数据。

(2) 数据处理机制。通过智能合约自动触发关键数据上链，集成条形码扫描技术与物联网传感器实时采集运输环境数据；采用国密算法(SM2/SM3/SM4)对敏感信息加密，借助区块链浏览器接口实现链上数据验证。

4. 系统分析与设计

4.1. 需求分析

汽车零部件溯源系统的需求分析需聚焦供应链痛点解决与各参与方核心诉求满足。汽车产业链包含多级供应商体系，传统模式依赖纸质单据与分散信息系统，导致数据孤岛严重、质量问题追溯效率低，且存在假冒零部件通过非正规渠道混入的风险。因此，系统需构建覆盖原材料采购、生产制造、质量检测、物流运输至整车装配的全链条数字化追溯体系，破除信息壁垒，实现数据可信存证与高效共享。

4.1.1. 功能需求

功能需求按供应链环节拆解如下表 1 所示。

Table 1. System functional requirements
表 1. 系统功能需求

流程	需求
生产环节	1. 记录生产厂商资质、与生产设备信息； 2. 采集原材料来源； 3. 自动生成零部件 UID 与生产批次号； 4. 支持生产数据批量导入与实时上传； 5. 对生产批次进行状态管理。
质量检测	1. 预设行业标准检测模板； 2. 记录检测设备编号、检测人员 ID、检测项目与结果； 3. 自动判定检测结果，不合格品标记后禁止流入物流环节； 4. 支持质检报告上传与链上存证。
运输流程	1. 记录从生产厂商到整车厂的运输信息； 2. 记录中转站、仓储信息等； 3. 将运输关键节点信息上链； 4. 记录零部件被装配到哪些整车上； 5. 建立零部件与整车的关联关系； 6. 实现整车 - 零部件双向追溯。
终端溯源	1. 支持整车厂、监管机构通过批次号查询全流程溯源信息； 2. 支持消费者通过扫码查询零部件基础信息； 3. 提供链上数据验证功能，支持哈希值比对。

4.1.2. 技术需求

(1) 安全需求：采用国密算法保障信息安全，其中 SM4 算法用于敏感数据加密，SM3 算法用于生成

数据指纹；

- (2) 兼容性需求：兼容现有工业协议，适配车载诊断标准及跨国供应链合规要求；
- (3) 存储与查询需求：设计链上链下协同机制，原始业务数据本地加密存储，关键哈希值上链，兼顾查询效率与防篡改能力。

4.2. 系统设计目标与原则

4.2.1. 设计目标

构建基于区块链的汽车零部件全生命周期溯源平台，实现零部件从生产、质检、运输到装配的全流程可信追溯；通过整合供应链各环节数据并上链存证，保障数据真实性与不可篡改性，解决传统供应链的信息孤岛、追溯效率低、质量监管滞后等问题。

4.2.2. 设计原则

- (1) 可信性原则：以区块链技术为底层支撑，通过智能合约实现关键数据自动上链与权限控制，确保数据可验证、过程可追溯，构建供应链各参与方间的信任基础；
- (2) 模块化原则：采用前后端分离架构，后端依托 Go 语言高并发特性与 Gin 框架保障性能，前端通过 Vue.js 组件化开发提升扩展性；
- (3) 安全性原则：结合国密算法对敏感信息加密，利用 FISCOBCOS 联盟链实现企业级隐私保护。

4.3. 系统架构设计

本系统采用分层架构设计，分为前端交互层、后端服务层、区块链存证层与数据存储层四个部分，各层功能与交互逻辑如下：

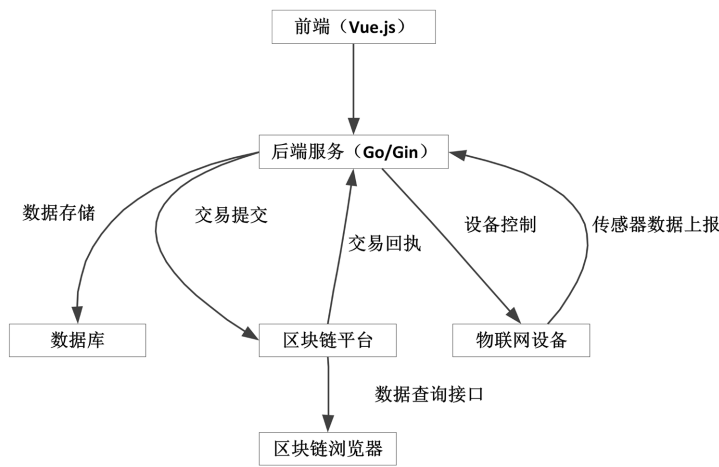


Figure 1. System architecture design diagram
图 1. 系统架构设计图

- (1) 前端交互层
基于 Vue.js 框架搭建可视化界面，结合 Element Plus 组件库实现用户认证、生产记录管理、运输追踪等功能模块；集成 ECharts 图表工具生成质量统计图表与供应链地图，支持用户通过扫码查询零部件全生命周期数据。
- (2) 后端服务层
采用 Go 语言开发，依托 Gin 框架提供 RESTful API 接口；通过 GORM 框架操作 MySQL 数据库，

管理厂商信息、生产批次等结构化业务数据；借助 FISCO BCOS Go SDK 与区块链平台交互，将质检结果、物流节点等关键数据写入智能合约并完成上链存证。

(3) 区块链存证层

采用 FISCO BCOS 联盟链架构，部署多节点共识机制保障数据不可篡改；通过定制智能合约定义数据上链规则、链上哈希验证逻辑及隐私数据加密方案(采用 SM2/SM3 算法)；开放区块链浏览器接口，支持用户查询链上存证信息。

(4) 数据存储层

结合关系型数据库 MySQL 与区块链分布式账本：MySQL 存储业务操作明细，区块链存储链上摘要信息；通过链上链下协同机制提升数据查询效率。

各层之间通过 HTTPS 协议通信，结合 JWT 令牌实现供应商、制造商、监管机构等多角色的权限隔离，确保系统在安全性、可扩展性与追溯可信度之间的平衡。系统架构如图 1 所示。

4.4. 功能模块设计

系统核心功能围绕汽车零部件全生命周期管理展开，包含用户认证、生产管理、质量检测、物流追踪、区块链存证五大模块，各模块功能与交互逻辑如下：

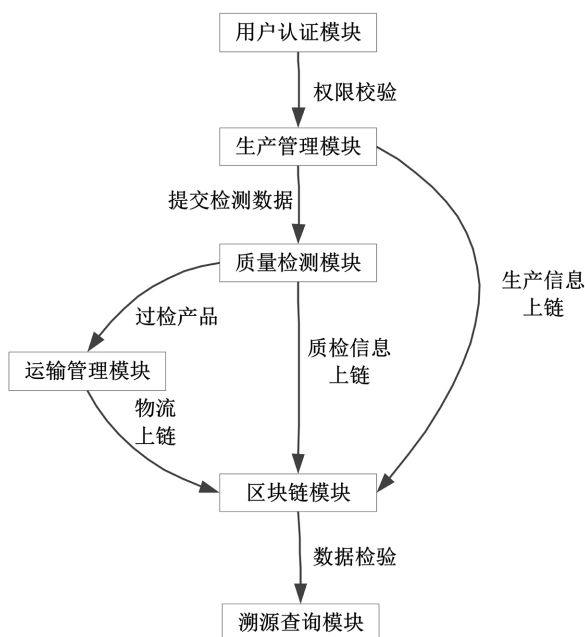


Figure 2. Interaction diagram of system functional modules

图 2. 系统功能模块交互图

(1) 用户认证模块

基于 JWT 技术实现供应商、制造商、监管机构三类角色的权限分级控制：供应商仅可提交本厂生产数据；制造商可查看零部件装配信息，管理整车与零部件的关联关系；监管机构拥有全链条数据审计权限，可生成合规报告。

(2) 生产管理模块

通过 GORM 框架操作 MySQL 数据库，维护零部件供应商基础数据与详细生产参数；与批次管理子模块协同，自动生成唯一批次编号及关联零部件清单，确保生产数据可追溯至单个零件。

(3) 质量检测模块

内置标准化检测流程，支持上传检测报告并自动判定合格状态；通过智能合约将检测结果推送至 FISCOBCOS 区块链，同时触发运输模块状态更新；记录检测设备信息与检测人员电子签名，确保检测过程可追溯。

(4) 物流追踪模块

整合 GPS 定位与物联网传感器数据，记录运输路径、中转站操作、仓储信息；将出库签收、异常报警等关键节点数据实时上链存证；支持通过批次号查询完整物流轨迹，建立物流数据与生产、质检数据的关联关系。

(5) 区块链存证模块

通过定制智能合约定义数据上链规则；开放区块链浏览器接口，供终端用户扫码查询零部件全生命周期链上摘要；结合哈希校验技术验证数据真实性，形成“业务操作 - 链上存证 - 终端验证”的闭环追溯体系。

系统功能模块交互如图 2 所示。

4.5. 数据库设计

4.5.1. 区块链数据表

区块链数据表存储链上区块核心信息，包含区块高度、区块哈希、父区块哈希、区块生成时间等属性。如表 2 所示。

Table 2. Blockchain data table
表 2. 区块链数据表

字段名	数据类型	允许 Null	主键/外键	说明
ID	int(11)	否	主键	自增 ID
block_number	int(20)	否	唯一键	区块高度
block_hash	char(64)	否	唯一键	区块哈希
parent_hash	char	是		父区块哈希
created_at	timestamp	否		区块生成时间

4.5.2. 工厂信息表

工厂信息表存储工厂的基本信息，如工厂 ID、名称、地理位置和资质证书哈希。如表 3 所示。

Table 3. Factory information table
表 3. 工厂信息表

字段名	数据类型	允许 null	主键/外键	说明
F-id	int(11)	否	主键	工厂 ID
name	varchar(50)	否	外键	名称
location	varchar	否		地理位置
certificatehash	varchar(100)	否		资质证书哈希

4.5.3. 产品批次表

产品批次表关联产品批次与生产工厂，记录批次的详细信息如产品类型、生产时间和数量等。如表

4 所示。

Table 4. Product batch table

表 4. 产品批次表

字段名	数据类型	允许 null	主键/外键	说明
B-id	int(11)	否	主键	批次 ID
Batch_number	varchar(30)	否	唯一键	批次号
product_type	varchar(30)	否		产品类型
produc_time	datetime	否		生产时间
quantity	int(10)	否		批次数量
factory_id	int(11)	否	外键	关联生产工厂 ID
block_id	int(11)	否	外键	关联区块链数据表

4.5.4. 零部件生产表

零部件生产表主要记录记录零部件生产明细，如数量，生产时间，完成时间等，如表 5 所示。

Table 5. Component production table

表 5. 零部件生产表

字段名	数据类型	允许 null	主键/外键	说明
id	bigint(20)	否	主键	生产记录 ID
part_uid	varchar(50)	否	唯一键	零部件唯一标识码
banch-id	int	否		关联批次表 id
factory_id	int	否		生产工厂 id
factory_name	varchar	否		生产工厂名称
quantity	int	否		数量
production_date	datetime	否		生产时间
completion_date	datetime	否		完成时间

4.5.5. 质检记录表

质检表记录零部件质量检测数据，见表 6。

Table 6. Quality inspection record table

表 6. 质检记录表

字段名	数据类型	允许 null	主键/外键	说明
id	int(11)	否	主键	质检记录 ID
batch_id	int(11)	否	外键	关联批次表 ID
inspector_id	varchar(20)	否		检测人员 ID
result	tinyint(1)	否		质检结果
inspection_date	datetime	否		质检日期
block_id	int(11)	否	外键	关联区块链数据表 ID

4.5.6. 物流记录表

物流记录表跟踪零部件运输信息，包括物流单号、始发地、目的地、启运和签收时间等。如表 7 所示。

Table 7. Logistics record table
表 7. 物流记录表

字段名	数据类型	允许 null	主键/外键	说明
id	int(11)	主键	主键	物流记录
logisticnumber	varchar(30)	否	唯一键	物流单号
batch_id	int(11)	否	外键	关联批次表 ID
origin	varchar(100)	否	外键	始发地
destination	varchar(100)	否		目的地
departuretime	datetime	否		启运时间
receipttime	datetime	是		签收时间
status	tinyint(1)	否		物流状态
block_id	int(11)	是	外键	关联区块链数据表 ID

4.6. 安全设计

系统安全架构围绕数据可信性、操作合规性与隐私保护三大核心要点构建，采用分层防护策略保障全链路安全。

4.6.1. 身份认证与权限控制

基于 JWT 令牌实现多角色细粒度权限管控，结合 RBAC (基于角色的访问控制)模型界定角色操作边界；物联网设备接入采用双向证书认证，留存完整操作日志供审计追溯，符合汽车行业安全合规要求。

4.6.2. 数据传输与存储安全

数据传输阶段采用 TLS1.3 协议加密通信，防止生产参数、质检报告等敏感数据被窃听或篡改；数据存储层对 MySQL 业务数据库实施字段级加密，关键隐私信息采用 SM2 非对称加密存储；区块链层依托 FISCO BCOS 隐私交易模块实现链上数据可见性与权限分离。

4.6.3. 智能合约与操作安全

智能合约代码经形式化验证与第三方审计，预设防重放攻击机制，确保质检结果上链等操作的不可抵赖性；关键操作需经多角色签名确认，避免单一角色恶意操作；定期对系统进行安全漏洞扫描，及时修复潜在风险。

5. 系统实现

5.1. 系统功能实现概述

本系统通过区块链技术与多源数据融合，构建端到端的数字化流程，确保供应链各环节数据可验证、可审计。在生产端，部署工业级 RFID 标签与智能传感器，实时采集零部件加工参数与质检结果；边缘计算节点对原始数据进行清洗、特征提取与格式标准化后，采用轻量级加密算法生成数据摘要，通过 FISCO BCOS 联盟链的 RPC 接口调用智能合约完成链上写入。

为实现零部件全生命周期唯一标识,系统为每个零部件分配全球唯一标识码(UUID),通过智能合约将 UUID 与生产商数字证书、原材料批次号、首检报告哈希值深度绑定,构建不可分割的“数字孪生”档案。在物流环节,车载物联网设备实时上传运输轨迹与环境数据;智能合约自动校验物流节点与预设路线的合规性,若监测到异常,立即触发预警合约,冻结该批次零部件流转权限,并将异常事件日志经 PBFT 共识机制验证后永久上链,为后续责任追溯提供依据。

消费者端功能通过 H5 页面实现:用户扫描零部件条形码后,前端调用 WeBASE-Web3SDK 向区块链网络发起查询请求;智能合约解析 UUID 后,返回关联的生产时间、供应商资质、环保认证、物流历史等核心数据。对于链下存储的高清质检视频、原材料检测报告等大体积文件,系统通过 IPFS 分布式存储网络保存,仅将文件内容标识符(CID)与 SM3 哈希值上链;用户点击“验证”按钮时,系统实时计算链下文件哈希值并与链上哈希比对,确保文件未被篡改。

在供应链协同层面,系统集成电子签名服务,采购订单、质检报告经供需双方私钥签名后上链存证;当到货验收条件满足,智能合约自动执行预付款释放操作,减少人工对账成本与支付延迟。数据分析引擎从链上抓取供应链网络拓扑数据,采用 Neo4j 图数据库构建多级供应商依赖模型,结合时序预测算法识别潜在断供风险,并通过 ECharts 可视化面板向管理层推送风险预警与优化建议。

隐私保护方面,系统采用零知识证明(ZKP)协议,支持一级供应商向整车厂证明零部件符合碳排放标准,且无需公开原材料配方、生产工艺等敏感信息;通过同态加密技术,在密文状态下完成质量统计分析,避免数据泄露。跨链互操作性通过 WeCross 中间件实现:将零部件碳足迹数据经多方签名后同步至环保监管链,参与政府绿色积分激励计划;从电池回收链获取电池历史健康状态数据,为二手车残值评估提供可信依据。

5.2. 模块实现

5.2.1. 生产管理模块

生产管理模块的核心逻辑通过 Solidity 语言开发智能合约实现,针对汽车供应链场景设计双数据管控体系,深度融合区块链与工业物联网技术,构建零部件制造的数字化孪生体系。

在批次初始化阶段,系统为每个生产批次生成含区块链特征的全局唯一标识码,该编码通过随机数生成算法确保不可预测性与唯一性;通过智能合约将标识码与原材料供应商区块链地址、工艺参数模板双向绑定,形成生产数据溯源的基础链路。



Figure 3. Production management module
图 3. 生产管理模块

生产过程中，冲压机、焊接机器人等设备的实时运行数据以结构化数据包形式传输至边缘节点；边缘节点完成数据清洗后，采用 AES-256 算法加密，再通过 FISCO BCOS 节点共识验证后写入分布式账本。为平衡数据可信度与系统效率，模块创新采用“生产数据沙盒机制”：原始生产数据存储于 IPFS 网络，与关键元数据通过智能合约上链存证，既降低区块链存储压力，又确保核心数据不可篡改。

生产管理模块界面示例如图 3 所示，界面支持生产记录查询、批次信息查看、新增生产任务等操作，并通过数据卡片实时展示总生产线数、零件种类、预计产量等核心指标，提升用户操作便捷性。

5.2.2. 质量检测模块

质量检测模块以“数据不可篡改、流程可追溯”为核心，通过智能合约与检测设备联动，实现质检全流程数字化管控。模块详细记录零部件的批次号、产品名称、检测人员 ID、检测设备编号、检测项目及检测结果，并自动生成带时间戳与电子签名的质检报告。

为建立质检与生产、物流环节的关联，模块创新性采用“批次号双向绑定机制”：既可通过检测 ID 追溯原始生产批次的工艺参数、原材料来源及生产设备状态，也可依据生产批次反向查询所有质检记录与不合格品处理结果，形成闭环溯源链条。

在数据存储设计上，模块通过智能合约的映射表(Mapping)与数组(Array)结合，实现高效数据检索：为检测记录与运输记录分别设立独立的链上存储空间，通过 batchTransports 映射表建立“批次号 - 运输记录 ID”的关联关系，支持快速查询某一批次的物流数据。同时，模块设计 InspectionStored 事件触发机制，每次质检数据上链时自动触发该事件，外部系统可监听事件并实时获取质检信息，为质量预警系统提供数据支撑。

针对物联网设备采集的复杂监控数据，模块采用 JSON 格式序列化存储方案：将非结构化数据转换为标准化 JSON 字符串后上链，既维持区块链的轻量化特征，又通过时间戳锚定确保数据完整性。质量检测模块界面示例如图 4 所示，界面支持质检报告上传、检测结果查询、不合格品标记等功能，直观展示检测项目达标情况与链上存证状态。

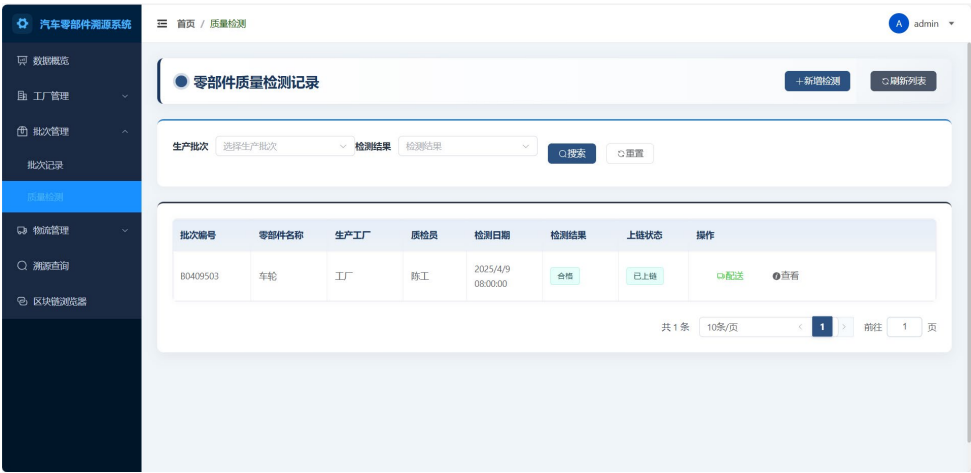


Figure 4. Quality inspection module
图 4. 质量检测模块

5.2.3. 物流运输与物流追踪模块

物流运输与物流追踪模块通过“设备实时采集 - 智能合约校验 - 异常自动预警”的全流程设计，实现零部件运输环节的透明化管控。生产线完成零部件质量检测后，若检测结果合格，检测设备通过 API

接口自动调用智能合约的 `storeInspection` 函数，将质检结果上链；链上数据验证通过后，系统自动触发物流系统启动，生成唯一物流单号并与零部件批次号绑定。

运输过程中，车载物联网设备通过 `storeTransportData` 函数实时上传环境数据与位置信息。为支持高效追溯，模块设计 `getTransportIdsByBatch` 函数，监管部门、整车厂等授权角色输入批次号后，可快速获取该批次的所有运输记录；结合链下 MySQL 数据库存储的详细轨迹数据，可还原完整物流图谱，实现质量问题的精准回溯与责任认定。

物流追踪模块界面示例如图 5 所示，界面展示物流单号、关联零件批次、物流公司、出库时间、预计到达时间、实际到达时间、上链时间、区块哈希等核心信息，通过地图可视化呈现运输路径，并标注关键节点的时间与状态，支持点击“验证上链数据”跳转至区块链浏览器查看交易详情。

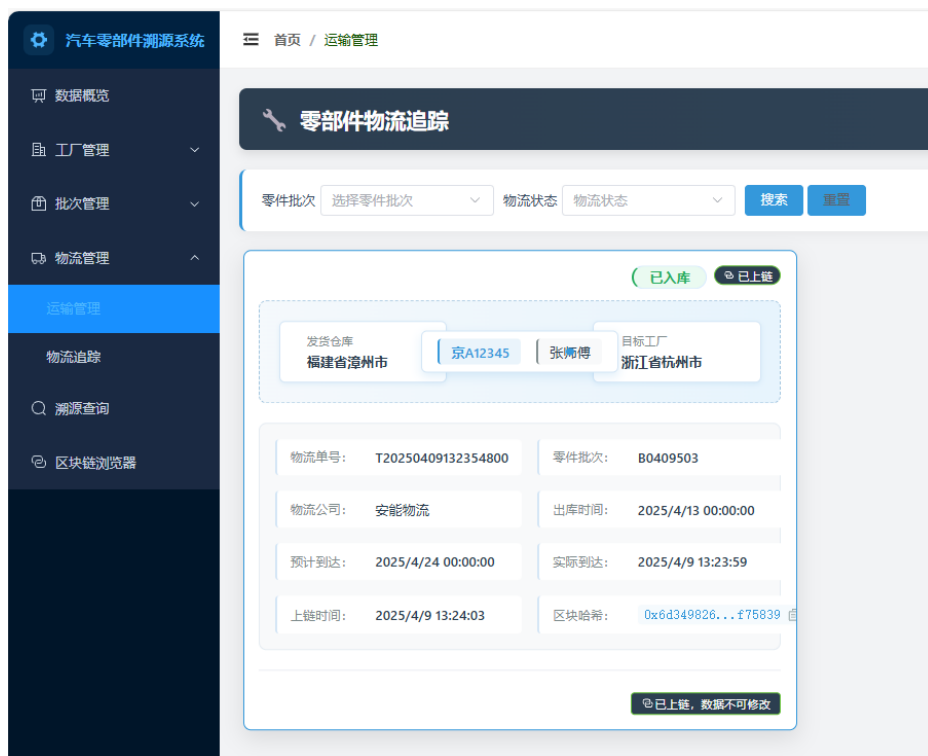


Figure 5. Logistics transportation and tracking module

图 5. 物流运输与物流追踪模块

5.2.4. 信息上链

信息上链是系统实现数据可信存证的核心环节，通过“数据校验 - 链上写入 - 隐私保护 - 性能优化”的全流程设计，确保零部件数据可靠上链与高效验证。如图 6 所示。

数据预处理与校验：当用户通过前端界面提交生产批次号或扫描零部件条形码时，系统首先进行数据预处理：对于条形码识别场景，采用 ZXing 开源库完成图像解码，提取含批次标识的字符串；通过正则表达式校验批次号格式，并借助 SM3 算法生成数据指纹，确保原始信息未被篡改。

链上写入流程：若查询到有效批次信息，后端服务调用 FISCO BCOS Go SDK 的 `InvokeContract` 方法，触发部署在联盟链上的 `TraceContract` 智能合约，执行 `storeBatchInfo` 函数。该函数将零部件关键元数据与物联网传感器采集的环境数据封装为结构化数据，经联盟链节点 PBFT 共识验证后打包上链，生成包含区块高度、交易哈希、时间戳的存证凭证；上链完成后，合约返回交易回执，前端界面更新上链状

态并展示区块哈希。

隐私保护策略：系统采用“链上链下协同存储”策略：原始质检报告、高分辨率生产视频等大体积文件存储于 IPFS 网络，仅将文件 CID 与 SM3 哈希值上链；用户验证时，系统通过 CID 从 IPFS 获取文件，实时计算哈希值并与链上哈希比对，确保文件完整性。针对敏感数据，采用国密 SM4 算法进行字段级加密，结合 FISCO BCOS 的权限管理模块，实现数据可见性分级控制。

区块信息				
搜索区块高度				
区块高度	区块哈希	时间戳	打包节点	操作
5	0xb143b54ad8096aecbca5c776af3d3ca01c33e94cab1ae8eb32f65d360a8a16de	2025-04-09 13:24:03	0	详情
4	0xc090b8ba486a904d5b3d77a37f44a1c470f6bf0988a919371b9016ba13bfc898	2025-04-09 13:24:02	3	详情
3	0x3ab4cedb9b6aeafb8c8bd267cee3e18fa5adbbee6134db4e33983c01536e1756f	2025-04-09 13:22:20	2	详情
2	0xcb3df664ff875f0a568803c1f46f1869a2c3ae5e5ba0014514748be87926052b	2025-04-09 13:22:19	1	详情
1	0x317aa8f2d23b2c59b76a697a5b8b0a6b0495037a1f58f0ff952aaid539bf34f5	2025-04-08 22:48:58	2	详情

共 5 条 10条/页 < 1 > 前往 1 页

Figure 6. On-chain information test results
图 6. 信息上链测试结果

6. 研究总结与未来展望

6.1. 研究工作总结

本研究聚焦汽车零部件供应链的溯源痛点，构建了基于区块链的汽车零部件全生命周期溯源系统，通过分层架构设计(前端交互层、后端服务层、区块链存证层、数据存储层)与多技术协同(区块链、物联网、智能合约、国密算法)，实现了供应链全流程数据的不可篡改性与可追溯性，有效解决了传统中心化模式下的信息孤岛、数据篡改、信任缺失等问题。

在技术实现层面，系统通过联盟链保障数据可信存证，借助智能合约自动触发生产、质检、物流关键数据上链，结合物联网设备实现实时数据采集，利用 JWT 与国密算法构建多维度安全防护体系。实验验证显示：系统可将零部件信息查询响应时间控制在毫秒级别，通过零知识证明技术实现敏感数据“可用不可见”。

本研究的理论价值在于：参考了区块链在无人驾驶船舶信息交互安全领域的实践经验，其分布式节点共识机制的设计为本文系统架构提供了关键启发；通过探索区块链与物联网、大数据在汽车供应链中的协同应用模式，完善了区块链技术在复杂行业场景下的应用理论，为跨行业区块链溯源系统设计提供了实证案例。在实践价值方面，系统为汽车行业供应链管理提供了可信技术方案，可提升行业合规性、降低消费者维权成本，具有显著的社会效益。

6.2. 未来研究展望

未来研究将围绕以下方向展开：

完善动态数据采集与验证：构建动态可验证的数据采集框架，集成物联网设备可信执行环境(TEE)，强化边缘端数据完整性校验，支持离线数据加密存储与联网后自动同步上链。

优化节点身份认证与隐私保护：设计基于行为模式的节点信誉评估体系，结合节点历史上链数据准确性、响应速度、合规性等指标，动态调整节点权重；引入轻量级同态加密算法与安全多方计算模型，

降低隐私保护方案的计算开销,提升系统扩展性。

提升跨链互操作性与生态构建:探索基于侧链中继的异构数据桥接协议,实现系统与 ERP、MES 等企业系统的无缝对接;结合区块链与联邦学习技术,构建供应链参与方动态信用画像,为供应链金融、绿色溯源提供支撑,形成更具弹性与扩展性的汽车零部件溯源生态。

基金项目

河北金融学院“揭榜挂帅”课题“区块链供应链金融创新应用路径研究”(课题号:JB2025049)。

参考文献

- [1] 何沛军, 郭志远. 有机融合与双向升级: 区块链技术下的个人信息保护研究[J]. 广西社会科学, 2023(9): 138-148.
- [2] 王岩庆, 周均, 丛若晨, 等. 区块链技术在电动汽车智能化管理中的研究现状与发展[J]. 南方电网技术, 2022, 16(11): 55-67.
- [3] 陈卓, 孙鑫宇, 郑晓龙, 等. 数智技术赋能金融发展的进展及研究前沿[J]. 中国科学基金, 2025, 39(4): 615-634.
- [4] 付新华. 论智能网联汽车数据的治理之道[J]. 法制与社会发展, 2024, 30(1): 147-163.
- [5] 陆一可, 祝锡永. 运用区块链技术的再制造汽车零部件溯源系统设计[J]. 物流科技, 2024, 47(13): 33-36.
- [6] 李怡冰, 李明佳, 孙耀杰. 基于 Hyperledger Fabric 区块链和双层博弈的分布式能源交易系统的设计与应用[J]. 复旦学报(自然科学版), 2025, 64(3): 340-349.
- [7] 韩纪光, 张世君, 刘海杰, 等. 汽车智能制造技术及全生命周期质量控制体系研究[J]. 汽车工艺师, 2025(8): 59-64.
- [8] 马易雯, 许方敏, 高昌龙, 等. 工业互联网标识解析体系中的缓存策略研究[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(17): 308-317.
- [9] 胡坦, 罗颂. 供应链在区块链环境下的隐私安全溯源应用研究[J]. 保密科学技术, 2025(1): 34-40.
- [10] 欧阳艳敏, 杨春立, 梁媛, 等. 新能源汽车产业链可信数据空间框架构建研究[J]. 数字经济, 2025(8): 12-16.