DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251115003
引用格式: 王青瑜, 陈琴琴. 智能区块链在食品溯源系统的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(8): 93–105.
WANG QY, CHEN QQ. Research on the application of smart blockchain in food traceability systems [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 93–105. (in Chinese with English abstract).

智能区块链在食品溯源系统的应用研究

王青瑜*, 陈琴琴
(国研软件股份有限公司, 宁波 315000)

摘 要: 目的 研究智能区块链技术在食品溯源领域的应用。**方法** 本研究构建一个融合物联网(internet of things, IoT)数据采集、区块链分布式存储与智能合约自动执行的系统架构。设计并实现了用户验证、数据存储、交易更新等核心智能合约模块; 以乳制品供应链为案例, 在 Hyperledger Fabric 平台上进行部署与测试。**结果** 相较于传统关系型数据库(My Structured Query Language, MySQL)集群, 该系统将追溯响应时间从 68.2 h 缩短至 8.9 h(提升 86.8%), 在共识机制正常运行条件下保障了节点间数据 100%一致, 并将数据篡改风险从 22.1%降低至 0.7%(降低 96.8%)。此外, 为期 30 d 的稳定性测试显示系统日均故障低于 0.5 次, 节点同步成功率高于 99.9%。**结论** 此次研究提出的链上元数据索引与链下分布式存储协同方案, 平衡了数据可追溯性与系统存储扩展性; 通过模块化的智能合约设计, 实现了供应链数据的自动化、可信化流转, 为构建高效、透明、可信的食品溯源体系提供了具可行性的技术方案与实证依据。

关键词: 智能区块链; 食品溯源; 数据安全; 供应链管理; 智能合约

Research on the application of smart blockchain in food traceability systems

WANG Qing-Yu*, CHEN Qin-Qin
(*Guoyan Software Co., Ltd., Ningbo* 315000, *China*)

ABSTRACT: Objective To study the application of intelligent blockchain technology in the field of food traceability. **Methods** This study constructed a system architecture that integrates internet of things (IoT) data collection, blockchain distributed storage and automatic execution of smart contracts. The core smart contract modules such as user verification, data storage and transaction update were designed and implemented; taking the dairy product supply chain as a case, deployment and testing were carried out on the Hyperledger Fabric platform. **Results** Compared to traditional My Structured Query Language (MySQL) clusters, this system reduced the traceability response time from 68.2 h to 8.9 h (a reduction of 86.8%), ensured 100% consistency of data between nodes under normal consensus mechanism operation conditions and reduced the risk of data tampering from 22.1% to 0.7% (a decrease of 96.8%). In addition, a 30 d stability test showed that the system had less than 0.5 daily failures and a node synchronization success rate of over 99.9%. **Conclusion** From this, it can be seen that the collaborative solution of on chain metadata indexing and off chain distributed storage proposed in this study balanced data traceability and system storage scalability. Through modular smart contract design, the automation and trustworthy

收稿日期: 2025-11-15
第一作者/*通信作者: 王青瑜(1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为信息咨询、系统集成。E-mail: tian_ch7@163.com

flow of supply chain data has been achieved, providing feasible technical solutions and empirical evidence for building an efficient, transparent and trustworthy food traceability system.

KEY WORDS: smart blockchain; food traceability; data security; supply chain management; smart contracts

0 引 言

食品安全问题已成为全球关注的焦点，尤其是在食品供应链日益复杂的背景下，食品溯源的重要性愈加凸显。根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)统计，每年约有 6 亿人因食源性疾病就医，而供应链信息断层被认为是造成食品安全问题的重要原因之一[1]。食品供应链涵盖生产、加工、运输和销售等多个环节，不同环节的数据管理方式不统一，容易导致食品安全事故发生后难以追溯源头、责任不清，进而影响消费者权益和社会公共健康。因此，构建高效、透明、可信的食品溯源系统已成为保障食品安全的关键技术手段[2]。

现有的食品溯源系统仍面临诸多挑战。首先，传统的中心化数据库的脆弱性。数据存储高度集中，一旦遭受黑客攻击或系统故障，可能会导致数据篡改或丢失，影响食品供应链的信息安全[3]。其次，不同企业和供应链环节之间的数据壁垒严重，信息共享受限，形成“数据孤岛”问题，进而降低溯源系统的整体效能。同时，食品供应链涉及多方主体，部分企业可能基于商业利益对数据进行篡改或隐瞒，导致监管机构和消费者难以获取真实可靠的信息，影响食品安全治理的有效性。最后，传统溯源系统的追溯响应时间较长，通常需要多个中心化机构进行数据查询与核验，导致食品安全事件发生后溯源流程耗时较长，不利于快速干预和控制食品安全风险。例如，2023 年欧洲“毒鸡蛋”事件暴露出溯源系统的低效性，由于信息传递滞后，受污染的鸡蛋已广泛流入市场，最终引发大范围食品安全危机。基于以上困难和挑战，当前的食品溯源体系亟需引入创新技术，以提升供应链透明度、数据可信度和溯源效率。

智能区块链技术的引入为食品溯源系统提供了创新性解决方案[4−6]。本文旨在探讨智能区块链技术在食品溯源系统中的应用，分析其如何解决传统溯源系统中的数据篡改风险高、透明度低、信息孤岛严重、追溯响应速度慢等问题。通过研究智能区块链的技术特点及其在食品供应链中的应用，本文为构建高效、透明、可信的食品溯源系统提供理论支持和实践指导。

1 相关理论

1.1 区块链技术

区块链是一种去中心化的分布式账本技术，最早由中本聪在 2008 年提出，并在比特币系统中得以应用。区块链通过链式数据结构、密码学技术和共识机制，实现数据的透明、安全和不可篡改，确保交易的可信性和可追溯性。它摆脱了传统中心化管理模式，使各节点能够在无需信任的环境下协同工作[7]。区块链的核心技术包括链式结构、点对点网络(Peer-to-Peer, P2P)、共识机制[8]、加密算法和智能合约。其中，链式数据存储结构采用时间戳机制，保证信息的不可篡改性和可追溯性；P2P 网络确保数据在多个节点间传播和同步；工作量证明(proof of work, PoW)、权益证明(proof of stake, PoS)等共识机制使去中心化网络中的节点达成交易共识；加密算法则提供数据安全和隐私保护；智能合约支持自动执行预设规定，增强区块链的可编程性[9]。

区块链各层相互配合，实现安全、高效的数据管理和交易机制。作为一种去信任、不可篡改的技术方案，区块链已广泛应用于金融、供应链管理、医疗数据共享等领域，推动可信数据存储和数字经济的发展。区块链基础框架如图 1 所示。

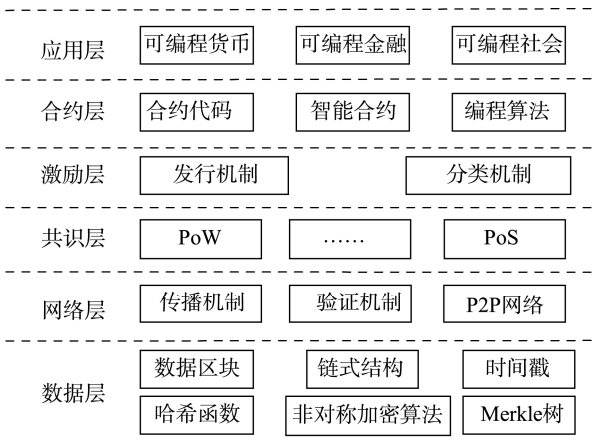


图 1 区块链基础框架

Fig.1 Basic framework of blockchain

1.2 智能合约

智能合约的概念最初由 NICK SZABO 在 1994 年提出[10]，其核心思想是设计一种能够自动执行合约条款的可编程交易协议[11]。通过将各方达成的共识以代码形式实现，智能合约能够在满足预设条件时自动触发并执行相关操作，使得合约在无需人工干预的情况下自动执行。

区块链为智能合约提供了运行环境，智能合约可以部署在区块链上，利用其去中心化、不可篡改的特性，确保交易的可信性和自动执行。智能合约被视为区块链技术的核心要素之一，它能够自动处理数据、存储和资产转移，

同时保证合约的执行和反馈过程不受人为干预。合约的执行依赖于条件触发机制，类似于编程中的条件语句，满足条件后会自动完成合约事务，并反馈执行结果[12]。

智能合约的创建过程通常包括 3 个阶段：构建、部署和执行。智能合约的创建与触发如图 2 所示。首先，智能合约可以由任何区块链节点构建，或通过多个节点协作完成并编码；接着，通过 P2P 网络发布智能合约，经过验证后写入区块链；最后，智能合约根据预设的条件在触发事件发生时执行。这些条件可以是各种外部事件，一旦满足，合约将自动执行预定义的操作。

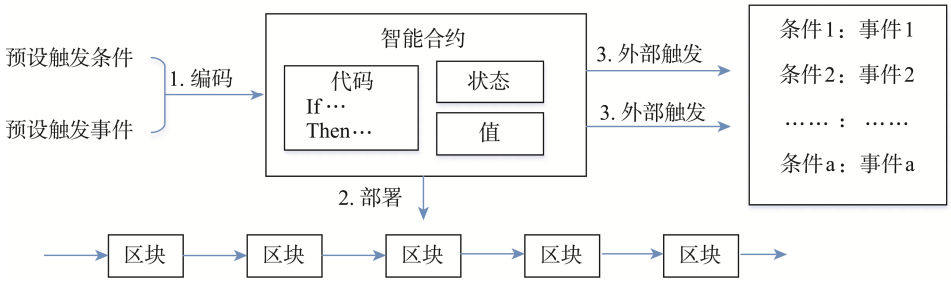


图 2　智能合约的创建与触发

Fig.2　Creation and triggering of smart contracts

1.3　Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric 是一个开源的企业级区块链平台，专为构建分布式账本应用而设计。它支持模块化架构，允许开发者根据需求定制区块链网络，Hyperledger Fabric 框架图如图 3 所示。Fabric 的核心特点包括可插拔的共识机制、权限管理和隐私保护，适用于复杂的商业场景[13]。

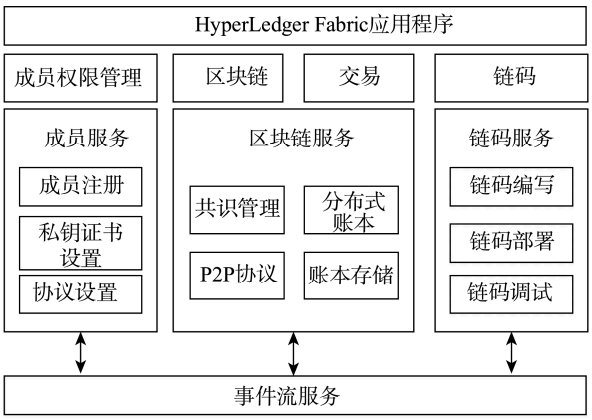


图 3　Hyperledger Fabric 框架图

Fig.3　Framework diagram of Hyperledger fabric

2　基于智能区块链的食品溯源模型设计

随着食品安全问题的日益突出，食品供应链的透明性和可追溯性成为保障食品安全的关键。传统的食品溯源系统存在信息不透明、数据易篡改、追溯效率低等问题[14]，难以满足现代食品供应链的复杂需求，传统供应链架构如图 4 所示。

2.1　基于智能区块链的食品溯源模型需求分析

基于区块链技术的食品溯源系统可以提供一种去中心化、不可篡改、高度透明的信息追溯机制[15]，解决传统供应链架构中存在的问题。

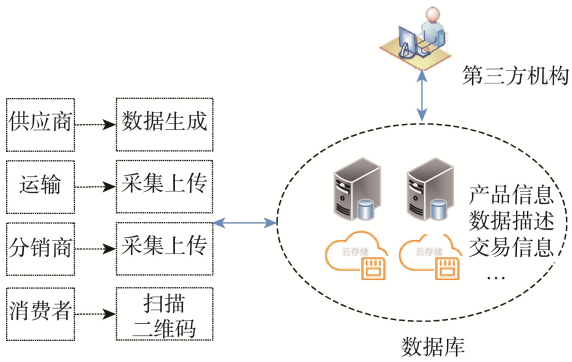


图 4　传统供应链架构图

Fig.4　Architecture diagram of traditional supply chain

本文提出的智能区块链食品溯源方案旨在满足以下需求：(1)数据完整性。在食品供应链的各个环节中，数据的完整性是确保信息有效性的基础。区块链技术通过分布式账本和共识机制，确保每个节点在添加信息时必须录入完整的数据，任何不完整或无效的数据都无法写入区块链。这种机制保证了食品从原材料到最终消费者的全流程信息完整，避免了数据丢失或篡改。(2)信息连续性。在区块链系统中，每个参与节点在注册时都会获得唯一的地址，每笔交易也会生成唯一的交易哈希值。这些哈希值具有不可篡改的特性，确保了食品流通过程中的每个环节都可以被唯一标识和追溯。此外，食品在生产过程中会被赋予唯一的标识码和生产批号，确保每个追溯单元的唯一性，避免了信息冲突和重复。这种唯一性为食品溯源提供了可靠的凭证，确保了追溯信息的准确性和可信度。(3)多方参与协同。食品供应链涉及多个角色，包括供应商、生产商、分销商、零售商、监管机构和消费者。区块链技术通过智能

合约和分布式账本, 实现了多方参与和协同工作。每个角色都可以在区块链上记录和查询信息, 确保信息的实时共享和协同管理。这种多方参与机制不仅提高了供应链的效率, 还增强了各方的责任意识, 确保食品安全问题的快速响应和处理。(4)高效性与可扩展性。区块链技术通过分布式存储和共识机制, 确保了系统的高效性和可扩展性。

2.2 系统架构设计

基于智能区块链的食品溯源模型通过多层次架构设计, 实现了食品供应链全流程的透明化、可追溯性和高效管理。该模型的核心设计框架包括数据接入层、数据存储层、区块链基础层和应用查询层, 各层之间通过智能合约和分布式账本技术实现无缝衔接, 确保了数据的完整性、连续性和不可篡改性。基于智能区块链的食品溯源模型架构如图 5 所示。

2.2.1 数据接入层

数据接入层负责从食品供应链的各个环节(如生产、加工、运输、销售等)实时采集数据。全量数据通过标准化的接口接入系统, 确保信息的及时性和准确性。数据接入层的设计使得供应链中的每个节点都能够实时上传和更新信息, 为后续的数据存储和区块链处理提供基础。

2.2.2 数据存储层

数据存储层包括溯源数据库和数据接口, 负责存储和管理从数据接入层获取的原始数据。通过高效的数据存储和索引机制, 确保数据的快速检索和访问。数据存储层与区块链基础层通过智能合约进行交互, 确保数据的完整性和一致性。

2.2.3 区块链基础层

区块链基础层是整个系统的核心, 由分布式账本、智能合约、共识算法和密码算法组成。分布式账本确保了数据的去中心化存储和不可篡改性, 智能合约实现了自动化数据处理和业务逻辑执行, 共识算法保证了数据的一致性和系统的安全性, 密码算法则提供了数据加密和身份验证功能。区块链基础层通过接口与数据存储层和应用查询层进行交互, 确保数据的透明性和可追溯性。

2.2.4 应用查询层

应用查询层为监管部门和消费者提供了便捷的查询接口。监管部门可以通过该系统实时监控食品供应链的动态, 快速定位和解决食品安全问题。消费者可通过系统查询食品的完整信息, 涵盖原料来源、生产加工环节及物流动态等, 从而提升其对食品安全性的信任度。

2.3 数据采集与存储机制

2.3.1 溯源数据采集

在基于智能区块链的食品溯源系统中, 数据采集与存储机制的设计至关重要。该机制的核心目标是确保食品信息在供应链中的透明、实时、准确以及不可篡改性。通过整合物联网技术与区块链技术, 本系统能够在确保数据完整性和真实性的基础上, 为食品供应链各环节提供全程追溯能力。以下将详细阐述物联网技术在数据采集中的应用及数据真实性保障措施。

IoT 技术在食品溯源中的应用, 主要体现在通过智能传感器、射频识别(radio frequency identification, RFID)标签和定位系统等设备的集成, 实现食品信息的自动采集与实时上传。物联网技术的引入, 不仅提高了数据采集的效率, 也确保了信息的准确性和实时性。

实时数据采集: 通过温湿度传感器、气体监测仪、RFID 标签等设备, 系统能够实时采集食品在生产、加工、运输等各个环节的关键信息。例如, 在运输过程中, 温湿度传感器可以实时监控食品存储环境, 确保其符合规定的储存条件; RFID 标签则为每一件食品分配唯一标识, 便于追踪和验证食品的来源及流向。然而, 这些数据可能面临人为篡改、设备故障和数据丢失等问题。为了保证数据的真实性, 本研究引入了基于区块链的多方数据验证机制,

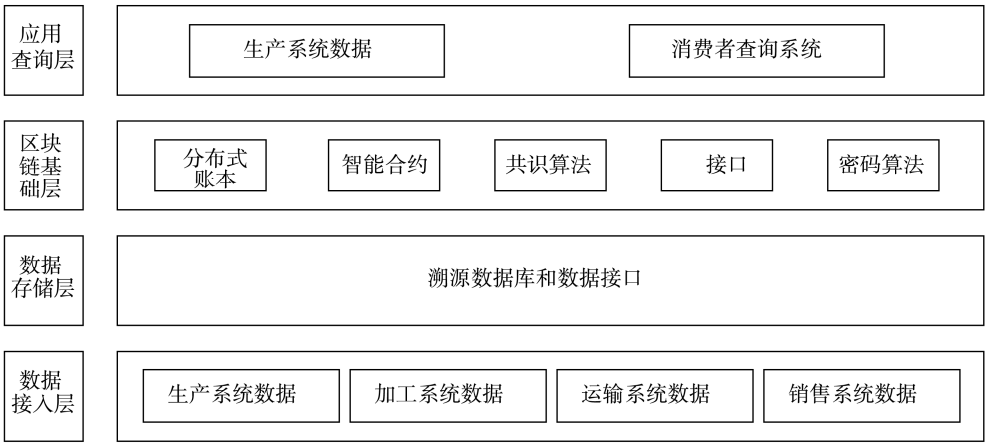


图 5 基于智能区块链的食品溯源模型架构

Fig.5 Architecture of a smart blockchain-based food traceability model

包括数据签名、时间戳和共识机制。此外，结合零知识证明(zero-knowledge proof, ZKP)等密码学方法，确保数据隐私的同时验证数据的真实性。

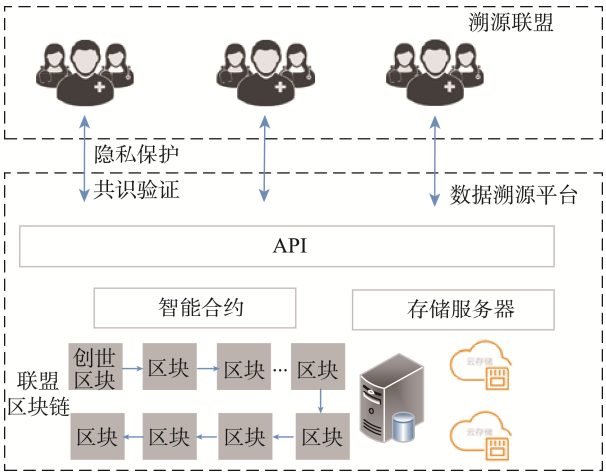
位置追踪与运输监控：物联网技术通过全球定位系统(global positioning system, GPS)，对食品的流通路径进行实时追踪。在运输过程中，系统能够记录每一批次食品的地理位置，确保食品的每一次转移都可以追溯，减少了物流中的信息断层，提高了溯源的完整性。

环境监控与智能决策：物联网传感器不仅能够提供实时环境数据，还能通过与区块链智能合约的集成，在检测到异常时自动触发响应。例如，当运输温度超出安全范围时，系统可以自动发出警报，要求采取必要的补救措施，确保食品安全。

2.3.2　溯源数据存储

为有效解决数据隐私与安全问题，设计了一种基于智能区块链的数据存储方案。该方案以区块链技术为基础架构，为食品供应链各参与方打造了一个去中心化、透明化且可追溯的数据环境，确保数据的可溯源性与可靠性。通过优化区块结构设计，有效缓解区块链系统的高频访问压力。

如图 6 所示的数据存储架构图详细阐述了食品溯源方案的设计框架，其核心组成部分主要包括以下 5 个方面。(1)联盟区块链。作为整个方案的基础设施核心，联盟区块链主要负责存储食品数据的摘要信息及交易记录，同时支持智能合约的执行。为了提升数据检索效率，本研究在传统区块结构的基础上进行了优化，引入了基于 Bloom Filter 技术的扩展区块头设计。这一创新性的改进显著提高了数据检索的速度和准确性。(2)食品供应链参与方。包括生产商、加工商、物流商和零售商等，他们是联盟区块链的节点，共同参与数据的共享与交互。这些参与方在食品供应链中扮演着多重角色，既是数据的生产者也是数据的消费者。生产商在食品生产完成后，会通过去中心化的平台发布数据，将食品的描述信息、访问权限等关键信息上传至区块链，而原始数据则在加密处理后存储于分布式数据库或云存储服务中。(3)食品数据存储服务器。为了确保数据的安全性和隐私性，原始数据以密文形式存储于分布式数据库或云存储服务中。解决了数据分散存储的问题，有效减轻了区块链的存储压力，确保了数据在传输和存储过程中的安全性。(4)服务接口层。该层为食品供应链参与方提供了智能合约调用和数据存储的 API 接口，支持高效的数据访问与交易处理。通过这些接口，参与方可以方便地访问区块链上的数据，进行数据的共享和交互。(5)智能合约。智能合约在食品溯源方案中发挥着至关重要的作用。它负责实现参与方的身份注册与验证，以及食品数据共享、溯源等业务逻辑。各参与方通过智能合约申请加入联盟区块链网络，完成身份验证后成为网络节点。这些节点通过 P2P 网络连接，实现了数据的高效共享和交互。



注：应用程序编程接口(application programming interface, API)。

图 6　数据存储架构图

Fig.6　Data storage architecture diagram

关于食品数据共享的基本流程，可以进一步阐述如下：首先，各参与方需要依据智能合约的规定申请加入联盟区块链网络。在申请过程中，他们需要提供必要的身份验证信息，以确保其合法性和可信度。一旦身份验证通过，这些参与方将成为联盟区块链网络的节点，并与其他节点建立点对点的连接。其次，生产商等参与方会在食品生产或处理完成后，通过去中心化的平台发布数据。他们将食品的描述信息、访问权限等关键信息上传至区块链，并将原始数据以密文形式存储于分布式数据库或云存储服务中。这些数据将作为食品溯源的重要依据。最后，各参与方可以通过服务接口层提供的 API 访问区块链上的数据，进行数据的共享和交互。智能合约将确保数据的访问和交互过程符合预定的业务逻辑和规则，从而保障食品溯源方案的可靠性和有效性。

综上所述，如图 7 和图 8 所示的食品溯源数据存储方案在科学合理、客观真实的基础上，通过层次清晰、逻辑完整的设计，实现了食品数据的高效共享和溯源。

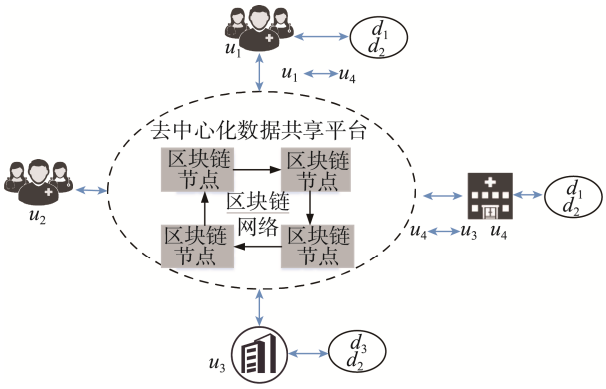


图 7　数据流图

Fig.7　Data flow diagram

为应对区块链系统中随着区块高度增加而导致的存储压力问题，本文提出了一种基于元数据的存储方案。传统方案要求每个节点存储完整数据副本，虽能保障数据一致性和不可篡改性，但存储成本高且可扩展性差。本文借鉴 MetaDisk 等分布式文件存储系统的设计思路，将链上存储内容最小化，仅保留食品数据的摘要信息(如哈希值、时间戳等)和交易记录，而原始数据经对称加密后存储于分布式数据库或云存储中，由参与方共同维护。链上元数据作为索引，确保数据的可追溯性和完整性，链下分布式存储则高效管理大规模原始数据。该方案通过分离链上链下存储，显著降低了节点的存储负担，同时兼顾数据安全性和系统扩展性，为区块链技术在大规模数据场景中的应用提供了可行的解决方案。具体存储模式如图 8 所示，展示了链上元数据与链下分布式存储的协同工作机制。

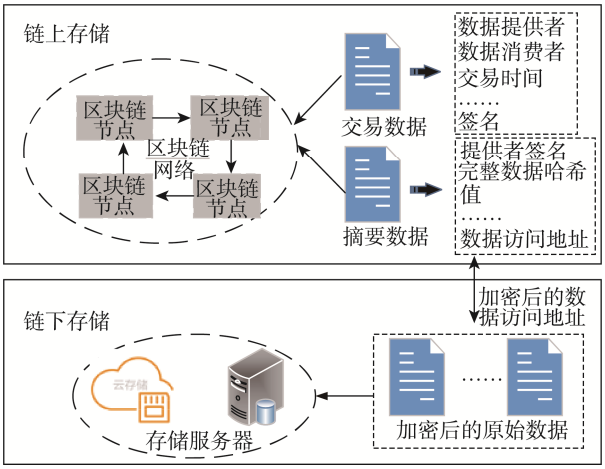


图 8 数据存储模式图

Fig.8 Data storage model diagram

2.4 智能合约设计与实现

在基于区块链的食品溯源系统中，智能合约是实现数据存储、交易更新和信息查询的核心组件[16]。通过智能合约，系统能够自动化处理食品供应链中的生产、加工、运输和销售等环节，确保数据的透明性、不可篡改性和可追溯性。智能合约的功能设计需覆盖供应链全生命周期，其结构设计强调模块化和可扩展性，以适应不同场景需求。在具体应用中，智能合约通过预设规则自动执行数据验证和交易更新，例如验证生产者资质、监控运输条件、确认产品真伪等，从而提升供应链透明度并增强消费者信任。此外，智能合约需兼顾安全性与性能优化，采用权限控制、数据加密和高效算法，确保系统安全稳定运行。通过科学合理的设计与实现，智能合约为食品溯源提供了可靠的技术支持，有效保障食品安全。合约关系图进一步展示了各模块间的交互关系和数据流向，如图 9 所示。

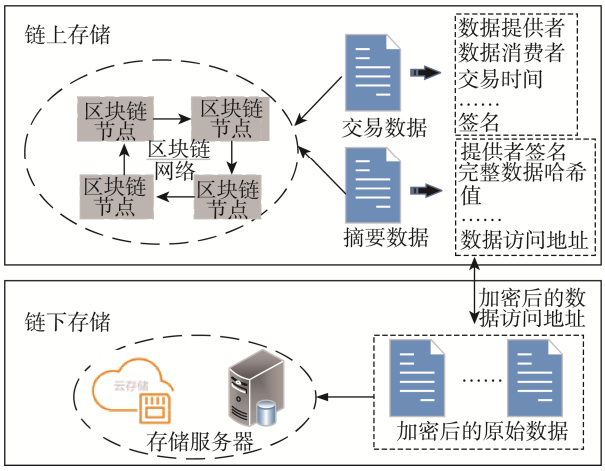


图 9 合约关系图

Fig.9 Contract relationship diagram

2.4.1 智能合约功能设计

智能合约在食品溯源系统中扮演着至关重要的角色，承担着数据存储、交易更新和信息查询等核心功能。为了确保系统的完整性、安全性和高效性，本研究设计了以下 4 个关键智能合约，以支持食品供应链的全流程管理。

(1)用户验证合约。该合约是系统的基石，用于管理供应链中各参与方的身份信息和权限分配。每个参与方(包括供应商、生产商、分销商、零售商等)在加入系统时，必须通过该合约完成身份注册。注册过程中，系统会为每个用户分配唯一的账户地址，并根据其角色赋予相应的权限。合约内置的权限控制机制确保只有经过严格验证的用户才能参与交易和数据上传，从而有效防止未经授权的访问和操作。用户验证合约的具体设计如表 1 所示。

表 1 用户验证合约表

Table 1 Contract table of user verification

序号	角色	文件标识	区块链账户地址	注册日期	数据存储合约地址
1	供应商	Ky3…Gpc	0x14…60C	2020-01-02	0x47…Feb7
2	零售商	ubQ…VA5	0x58…225	2020-03-01	×
3	生产商	tQ3…H3s	0x4d…4Cb	2020-04-10	0x4f…g67

注：序号为唯一标识每个合约的顺序编号；角色为节点在食品溯源系统中的身份，包括供应商(供应原材料)、零售商(销售产品)、生产商(加工产品)等；文件标识为关联每个节点的文件信息或标识符，用于确认该节点与相应的数据；区块链账户地址为每个节点在区块链网络中的唯一地址，用于标识节点身份；注册日期为节点在系统中注册的日期，记录节点加入网络的时间；数据存储合约地址为节点数据存储的智能合约地址，指示该节点使用的合约地址，确保数据存储和访问的安全性，如果该节点没有对应的存储合约则显示“×”。

(2)数据存储合约。数据存储合约用于存储食品生产全流程的关键信息, 如原材料来源、生产批次、质检报告等。合约采用加密技术保障数据安全, 并将数据哈希值存储于区块链, 确保数据的不可篡改性。任何数据修改都会导致哈希值变化, 从而被系统检测并记录, 防止篡改行为。通过结构化的数据管理, 合约提升了系统的可操作性和可扩展性。数据存储合约表(表 2)详细记录了产品关键信息, 支持高效查询与分析, 增强了食品供应链的透明度与可信度, 为消费者和监管机构提供了可靠的数据保障。

(3)交易更新合约。该合约用于记录食品在供应链中的流转信息。每次交易完成后, 卖方通过该合约更新交易记录, 确保食品的流通过程可追溯。合约通过哈希链技术, 将每次交易与前一次交易关联, 形成完整的追溯链条。如表 3 所示。

表 2　数据存储合约表

Table 2　Contract table of data storage

所有者地址	产品编号	产品名称	文件信息	交易更新合约地址	时间
0x14…60C	692…92	面粉	9KN…NzRz	0x54…2dc	2024-01-03
0xF3…d4F	695…34	包装食品	A1C…sT0	0x4f…2dc	2024-03-09
0xF1…60C	693…92	冷冻肉类	L8J…ZnB	0x5e…7d2	2024-02-14

注: 序号为每个产品信息记录的唯一标识编号; 所有者地址为该产品在区块链上的所有者地址, 通常为生产商、供应商或销售商的账户地址; 品编号为该产品的唯一编号, 用于标识产品; 产品名称为产品的名称, 描述该产品类型或类别; 文件信息为与该产品相关的文件信息(如数字签名或文件指纹), 确保文件的真实性和不可篡改性; 交易更新合约地址为记录每次交易或产品更新时的智能合约地址, 确保每次产品信息更新都可以追溯; 时间为产品交易或信息更新的时间戳, 表示产品信息何时被添加或更新。

表 3　交易更新合约表

Table 3　Contract table of transaction update

交易哈希	买方	卖方	前次交易产品批号	交易时间
0x14…60C	0x84…2dc	0x3F…335	0x35…2d6	2024-01-03
0xF4…34g	0x4a…34g	0x67…f67	692…21	2024-02-05
0x1C…f67	0x1A…34g	0x54…21	0x4b…f76	2024-03-10

注: 序号为唯一标识每一条交易记录的编号; 交易哈希为该字段记录每一笔交易的哈希值, 用于唯一标识交易; 买方为参与该交易的买方账户地址; 卖方为参与该交易的卖方账户地址; 前次交易产品批号为该笔交易涉及的上一笔产品的批号; 交易时间为记录交易发生的日期和时间。

(4)交易合约。该合约负责处理供应链中的交易逻辑, 包括原材料的采购、食品的生产、分销和零售等环节。交易合约通过调用其他合约, 确保交易的合法性和数据的完整性。如表 4 所示。

表 4　交易合约表

Table 4　Contract table of transaction

函数名称	函数功能
purchaseMaterial()	原料采购
sellMaterial()	原料销售
orderProductFromManufacturer()	产品采购
dispatchProductToDistributor()	产品发货
orderProductFromDistributor()	供应商采购
dispatchProductToRetailer()	产品转售
receiveMaterial()	原料接收
receiveProduct()	产品接收
traceProduct()	产品追溯

2.4.2　智能合约的实现

智能合约基于 Hyperledger Fabric 平台设计, 采用 Chain code(链码)编写, 遵循模块化原则, 确保功能单一且易于维护[17]。

(1)用户验证链码。用户验证链码通过 add User()函数添加新用户, 并为其分配角色权限(如供应商、生产商、分销商、零售商等)。链码内置权限控制机制, 仅允许监管机构添加或修改用户信息。用户信息包括区块链账户地址、角色类型、注册时间等, 确保系统参与方的身份真实可信。通过严格的权限管理, 链码有效防止了未经授权的访问和操作, 为系统的安全性奠定了基础。(2)数据存储链码。数据存储链码通过 add Product()函数添加食品生产全流程的关键信息, 如原材料来源、生产批次、质检报告等。每次添加数据时, 链码会生成唯一的哈希值并存储于区块链, 确保数据的不可篡改性[18−19]。同时, 链码采用加密技术保障数据的隐私性, 只有经过授权的用户才能访问详细信息。这种设计不仅提高了数据的安全性, 还增强了系统的可追溯性和透明度。(3)交易更新链码。交易更新链码通过 updateTransaction()函数更新交易记录。每次交易完成后, 卖方调用该函数, 将交易双方的信息、交易时间、交易哈希等记录在区块链上。链码采用哈希链技术[20−22], 确保每

次交易与前一次交易关联，形成完整的追溯链条。这种设计使得食品供应链的每一笔交易都可追溯，有效提升了系统的可信度和监管能力。(4)交易链码。交易链码通过 buy Material ()和 sell Product ()等函数处理供应链中的交易逻辑。每次交易时，链码会调用用户验证链码和数据存储链码，验证交易的合法性和数据的完整性。交易完成后，链码会自动更新交易记录，并将相关信息存储在区块链上。通过这种设计，交易链码实现了供应链全流程的自动化管理，确保了数据的一致性和可追溯性。

通过以上设计，智能合约(链码)不仅实现了食品供应链的高效管理，还为系统的安全性、透明度和可追溯性提供了强有力的技术支撑。

2.4.3 信息存储和交易更新

在本设计中，数据存储合约被原材料供应商和生产商用来管理和录入产品信息。供应商：登记原材料的相关数据；生产商：记录每批生产的食品信息以便其他系统节点能够访问。消费者：可通过食品标识和批号，查询合约中记录的信息了解食品的来源。如图 10 所示。

交易信息更新通过专门的交易合约管理[23–24]。每当食品从生产商流通至市场时，交易记录将被智能合约写入区块链，确保溯源信息的完整性。构建交易记录流程如图 11 所示。更新交易信息伪代码如图 12 所示。

```
输入:
发送者地址(msg.sender)
产品编号(productCode)
产品名称(productName)
加密哈希值(CrHash)
当前时间戳(now)
数据存储合约地址(contractAddress)
产品数量(productCount)
输出:
交易哈希
区块高度
1: FUNCTION addProject(msg.sender, productCode, productName, CrHash, now, contractAddress, productCount)
2:    IF msg.sender ∈ AL THEN
3:       IF productCode NOT EXISTS THEN
4:          ADD(msg.sender, productCode, productName, CrHash, now, contractAddress)
5:        productCount++
6:          RETURN transaction hash, block height
7:       ELSE
8:          REVERT CONTRACT STATE
9:          SHOW ERROR “Product code already exists”
10:    ELSE
11:       REVERT CONTRACT STATE
12:       SHOW ERROR “Unauthorized access”
```

图 10 添加产品信息 addProject()函数

Fig.10 Adding product information with the addProject() function

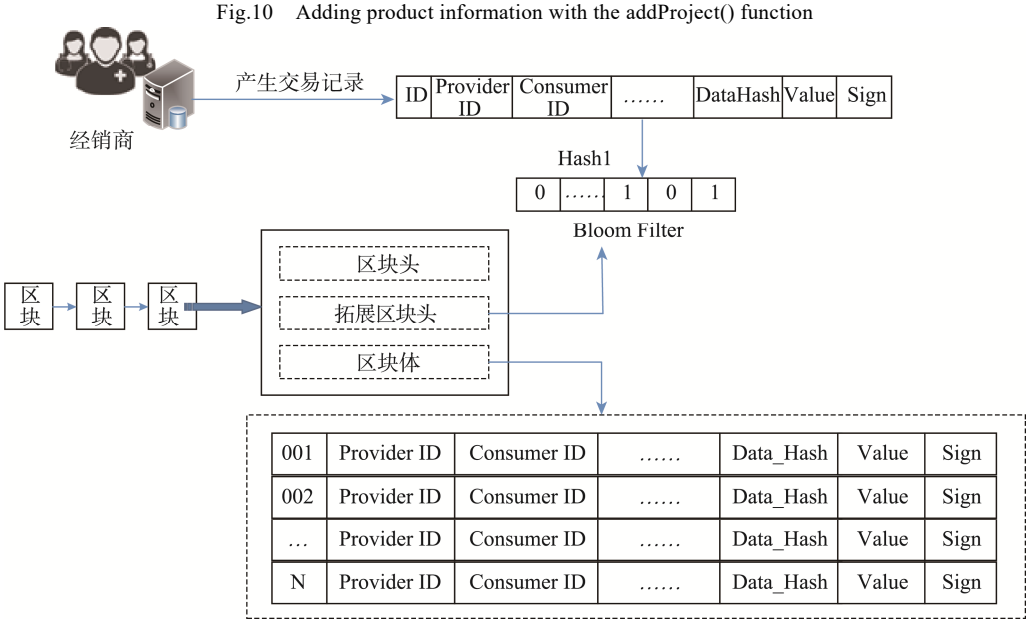


图 11 构建交易记录流程

Fig.11 Building transaction record process

```
输入:
发送者地址(msg.sender)
接收者地址(receiverAddress)
当前时间戳(now)
当前交易哈希(currentTrHash)
上一笔交易哈希(previousTrHash)
交易计数(trCount)
输出:
交易哈希
区块高度
1: FUNCTION updateTr(msg.sender, receiverAddress, now, currentTrHash, previousTrHash, trCount)
2:    IF msg.sender ∈ AL AND receiverAddress ∈ UL THEN
3:       IF previousTrHash IS VALID THEN
4:          ADD(currentTrHash, msg.sender, receiverAddress, previousTrHash, now)
5:          trCount++
6:          RETURN transaction hash, block height
7:       ELSE
8:          REVERT CONTRACT STATE
9:          SHOW ERROR "Invalid previous transaction hash"
10:   ELSE
11:      REVERT CONTRACT STATE
12:      SHOW ERROR "Unauthorized user or receiver"
```

图 12　更新交易信息伪代码

Fig.12　Pseudo code for updating transaction information

2.4.4　智能合约的部署与调用

智能合约基于 Hyperledger Fabric 平台设计。合约编写完成后, 使用 Fabric SDK 进行编译和部署。合约部署过程中, 通过 Fabric SDK 将合约部署到 Hyperledger Fabric 网络。合约部署完成后, 系统通过 Fabric SDK 与区块链网络进行交互, 调用合约中的函数, 实现数据存储、交易更新和信息查询[25−27]。使用 Fabric SDK, 可以与 Peer 节点进行交互, 提交交易请求, 验证区块链上的数据以及查询历史记录。合约逻辑与链上数据的交互通过 Chaincode API 实现, 确保操作的安全性和数据的一致性。

3　乳制品溯源案例

3.1　实施场景

乳制品供应链的溯源系统是一个复杂的过程, 涉及多个环节和参与者。为了提升乳制品的质量管理和可追溯性, 本案例中实施了基于智能区块链的食品溯源系统。本案例涉及的供应链结构包括: (1)牧场(5 家)。负责提供乳制品的原料(生奶), 确保生奶的质量和安全。(2)加工厂(2 家)。负责将生奶加工为各种乳制品, 如牛奶、酸奶、奶粉等, 并进行质量控制和产品包装。(3)物流(3 家)。负责乳制品在各环节之间的运输和配送, 确保产品在运输过程中的质量保持。(4)零售商(200+家)。通过零售商将最终产品推向市场, 直接与消费者接触, 确保产品的供应与分销。(5)数据规模。在乳制品的生产和流通过程中, 日均处理的数据量非常庞大。每天需要处理的传感数据大约为 12 万条, 这些数据主要来自生产、加工和运输过程中安装的传感器, 如温度、湿度、气体浓度等环境监控数据。(6)批次流转记录。每天处理约 500 个批次的流转记录, 包括乳制品从生产到零售的每一步信息。

3.2　效能对比

3.2.1　HyperLedger Fabric 环境部署

HyperLedger Fabric 作为企业级区块链平台, 其架构设计采用了模块化组件, 这在一定程度上增加了系统部署的复杂性。为优化这一过程, 平台创新性地采用了容器化技术解决方案, 通过 Docker 容器为每个功能模块创建独立的运行环境。用户可以通过编写 Docker-Compose 配置文件来定义各服务组件间的协同关系, 从而显著降低系统部署难度。

该平台还设计了独特的通道机制, 允许网络参与者根据业务需求建立专属通信通道, 不仅实现了交易数据的分区管理, 还能针对不同业务场景配置专属智能合约, 有效保障了商业数据的隐私性和安全性。从部署模式来看, Fabric 主要支持两种配置方案, 适用于研发测试阶段的单机多节点模式, 以及面向生产环境的多机分布式部署方案。本文从开发和测试的角度出发, 部署单机多节点的区块链网络。实验相关环境介绍如表 5 所示。

表 5　实验所需环境配置表

Table 5　Environmental configuration table required for the experiment

软/硬件	版本/型号
操作系统	Ubuntu 20.04 LTS
内存大小	16GB RAM
硬盘大小	512GB SSD
区块链环境	Hyperledger Fabric 2.5
Docker	Docker 23.0

区块链网络的部署实施流程如下:

在物理主机上安装 Ubuntu 20.04 LTS 版本的操作系统作为基础运行环境。

根据 Fabric 网络的具体需求, 安装指定版本的 Docker 容器引擎、Go 语言运行环境以及 Node.js 开发框架等必备软件。

(3)本方案采用 HyperLedger 官方发布的标准化镜像文件进行部署。在完成上述环境配置后, 通过 Docker 命令从官方仓库拉取所需的 Fabric 组件镜像。随后启动 Docker 服务, 完成智能合约的部署和初始化工作。

(4)网络部署完成后, 可以通过执行 Docker PS 指令验证各节点的运行状态。

3.2.2 实验数据采集方式

(1)传统方式数据。搭建 MySQL 8.0 集群环境, 采用主从复制架构, 主节点负责写操作, 从节点负责读操作。集群包含 3 台服务器, 每台服务器配置为 Intel Xeon 处理器、32 GB 内存、1 TB 硬盘[28–31]。

拟乳制品供应链的业务流程, 通过编写脚本生成交易数据。例如, 模拟牧场向加工厂供应生奶、加工厂进行生产加工、物流进行运输配送以及零售商销售等环节的交易。在生成数据时, 记录每个交易的开始时间和结束时间, 用于后续计算交易响应时间。对于数据一致性测试, 通过编写查询脚本, 在不同时间点对主从节点进行数据查询, 统计出现脏读的次数, 计算数据一致性比例。对于故障恢复时间测试, 模拟主节点故障, 记录从节点切换为主节点并开始提供服务的时间, 多次测试取平均值。对于追溯响应时间测试, 随机选取一批次产品, 记录从发起追溯请求到获取完整追溯信息的时间, 多次测试取平均值。

(2)区块链数据。基于前面部署的 Hyperledger Fabric 单机多节点区块链网络, 智能合约采用 Chaincode 开发, 使用 Go 语言编写。在智能合约中定义不同的交易类型, 如原料供应、生产加工、运输配送、销售等。通过调用智能合约执行这些交易, 并记录每个交易的执行时间。同时, 记录传感数据和批次流转记录的上链时间。对于数据一致性, 由于区块链的共识机制和 Merkle Tree 验证, 所有节点数据实时同步且不可篡改, 因此数据一致性为 100%。对于故障恢复时间, 模拟节点故障, 记录新 Leader 选举完成并开始处理交易的时间, 多次测试取平均值。对于追溯响应时间, 与传统方式类似, 随机选取一批次产品, 记录从发起追溯请求到获取完整追溯信息的时间, 多次测试取平均值。测试数据集统计特征如表 6 所示。

表 6 测试数据集统计特征

Table 6 Statistical characteristics of the test dataset

数据类型	记录规模	字段数	平均单条大小/kb
传感数据	120000 条/日	15	2.4
批次记录	500 条/日	32	8.7
历史追溯请求	1200 次	-	-

注: -表示不适用或不存在, 表 10 同。

(3)真实数据集验证: 为进一步验证系统在真实场景中的有效性, 引入约 5000 条记录的食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)公开食品召回数据集进行追溯测试。模拟数据生成规则如下: 传感器数据基于正态分布生成, 批次记录服从泊松分布, 各环节数据上传延迟不超过 2 s。

3.2.3 智能合约安全性测试与统计方法说明

为验证智能合约的安全性与实验结果的可信度, 按照下述方式, 完成安全性测试与统计分析。

(1)智能合约安全性测试: 在 Hyperledger Fabric 网络中模拟恶意节点攻击与权限越权访问场景。通过部署含有漏洞的测试链码, 模拟攻击者尝试越权调用数据存储合约与交易更新合约。测试结果显示, 系统内置的权限验证机制有效拦截所有非授权访问, 未发生数据篡改或泄漏事件。此外, 采用 Fabric CA 进行节点身份管理, 确保节点加入网络时的身份真实性。

(2)统计方法说明: 实验样本量基于每日乳制品供应链实际数据流量(传感数据 120000 条/日、批次记录 500 条/日)确定, 置信水平设为 95%, 允许误差范围为±5%。采用 t 检验对传统系统与区块链系统的效能指标进行显著性分析, $P<0.05$ 视为差异显著。具体检验流程包括: 数据正态性检验(Shapiro-Wilk 检验)、方差齐性检验(Levene 检验), 随后执行独立样本 t 检验。

3.2.4 效能对比结果

采用 JMeter 进行并发请求测试, 每组实验执行 1000 次交易。统计数据一致性、故障恢复时间和追溯响应时间, 并对比传统方式的数据。实施前后系统的效能对比, 如表 7 所示。

表 7 效能对比表

Table 7 Comparison table of performance

测试指标	MySQL 8.0 集群	Hyperledger Fabric	改善幅度/%
数据一致性/%	99.3±0.4	100±0	0.70
故障恢复时间/s	218±35	19±4	91.30
追溯响应时间/h	68.2±5.7	8.9±1.2	86.80
数据篡改风险	22.1% (SQL 注入攻击, 成功注入 23/100 次)	0.7%(需同时攻破≥3 节点)	96.80

基于区块链的智能溯源系统在乳制品供应链中展现了显著优势, 与传统系统相比, 在追溯效率、数据安全性和成本控制方面实现了全面提升。

(1)追溯响应时间。传统系统因数据分散和查询机制低效, 追溯某一批次产品需 68 h。而区块链系统通过去中心化和实时数据更新, 将追溯时间缩短至 9 h, 效率提升 86.8%, 显著提高了供应链的透明度和响应能力。

(2)数据篡改风险。传统系统中, 数据篡改风险高达 22.0%, 主要源于集中化数据库的脆弱性。区块链系统利用其不可篡改特性, 将篡改风险降至 0.7%, 提升幅度达 96.8%, 确保了数据的真实性和可信度。

数据一致性。传统系统因采用主从异步复制机制, 在节点故障或网络分区时存在数据不同步风险, 实测一致性为 99.3%, 即每 1000 次查询出现 7 次脏读。区块链系统在网络分区未发生、共识机制正常运行的条件下, 通过共识机制和 Merkle Tree 验证, 实现节点间数据 100%一致。传统系统追溯响应时间长达 68.2 h, 主要原因是其依赖多中心化数据库人工串联查询, 且存在数据孤岛问题; 而区块链系统通过去中心化账本与智能合约自动触发查询, 大幅提升追溯效率。

(4)故障恢复时间。传统系统的故障恢复依赖主备切换和日志重放, 平均需 218 s, 且恢复后存在 3.2%数据丢失风险(如未同步的运输温度记录)。区块链系统通过分布式节点快速选举新 Leader (Raft 共识), 恢复时间缩短至 19 s, 提升幅度达 91.3%, 且无数据丢失。

对表 7 中的效能指标进行独立样本 t 检验, 结果显示: 数据一致性(t=12.34, P<0.001)、故障恢复时间(t=18.92, P<0.001)、追溯响应时间(t=25.67, P<0.001)及数据篡改风险(t=30.15, P<0.001)均达到统计显著性水平, 表明区块链系统相较于传统系统具有显著改善。

综上所述, 基于区块链的智能溯源系统在提升追溯效率、保障数据安全和降低纠纷成本方面表现卓越, 为乳制品供应链的高效管理和质量保障提供了可靠的技术支持。

3.2.5　系统长期稳定性测试

为进一步验证系统在连续运行中的工程可用性, 部署系统并持续运行 30 d, 记录关键指标如表 8 所示。

表 8　系统长期运行稳定性数据

Table 8　Long term stability data of system operation

运行天数/d	日均故障次数	平均数据传输延迟/ms	节点同步成功率/%
1~10	0.2	125±12	99.98
11~20	0.3	128±15	99.96
21~30	0.4	130±18	99.94

由表 8 可知, 系统在 30 d 连续运行中表现稳定, 故障率低于 0.5 次/d, 数据传输延迟略有上升但保持可控范围, 节点同步成功率始终高于 99.9%, 具备良好的工程可用性。其中, 日均故障次数在 1~10 d 较低, 可能是由于系统初始运行阶段, 各组件处于较为稳定的新状态, 硬件和软件层面的潜在问题尚未充分暴露。随着运行时间的延长, 在 11~20 d 和 21~30 d, 日均故障次数有所上升, 这或许是因为系统长时间运行后, 硬件设备如服务器、网络设备等因持续工作产生了一定的损耗, 同时软件层面可能因长期处理大量数据和复杂逻辑, 出现了一些潜在的漏洞或冲突。而数据传输延迟的略微上升, 一方面可能与网络带宽的动态变化有关, 随着系统运行, 网络中的其他流量可能增加, 对数据传输产生了一定的干扰; 另一方面, 系统内部的数据处理压力逐渐增大, 也可能导致数据在传输过程中的排队等待时间增加。节点同步成功率始终保持在极高水平, 这得益于区块链的共识机制和分布式架构, 各节点通过共识算法不断同步数据, 即使出现个别节点的短暂故障或网络波动, 也能快速恢复并重新同步, 确保了整个系统的数据一致性和稳定性。

3.2.6　多规模供应链适配性与智能合约性能分析

为验证系统在不同规模供应链中的适用性, 测试中小型供应链(节点数不超过 10)与单一环节(仅生产端)场景。同时, 细化智能合约执行效率指标。结果如表 9 和表 10 所示。

表 9　多规模供应链适配性数据

Table 9　Adaptability data of multi scale supply chain

供应链规模	节点数	日均交易数	追溯响应时间/h	数据一致性/%
大型	200+	1200	8.9±1.2	100
中小型	10	300	2.1±0.3	100
单一环节	3	100	0.8±0.1	100

表 10　智能合约执行效率

Table 10　Execution efficiency of smart contract

合约类型	单次调用响应时间/ms	多合约协同延迟/ms
用户验证合约	45±6	-
数据存储合约	62±8	120±15
交易更新合约	58±7	110±12

注: –表示未有相关数据。

由表 9 和表 10 可知, 系统在中小型及单一环节场景中仍保持高效追溯能力, 智能合约响应时间均在百毫秒级, 满足实时性要求。在大型供应链中, 日均交易数高达 1200, 追溯响应时间为(8.9±1.2) h, 虽然相对较长, 但考虑到其庞大的节点数和复杂的业务逻辑, 能在这样的规模下保持数据一致性达到 100%且实现有效追溯, 体现了系统强大的扩展性和稳定性。这是因为大型供应链中, 区块链的分布式架构和共识机制能够有效地协调众多节点之间的数据交互和同步, 尽管交易量大, 但通过合理的分区管理和智

能合约的优化，依然可以保证数据的准确性和可追溯性。中小型供应链节点数较少，日均交易数为 300，追溯响应时间大幅缩短至(2.1±0.3) h，这主要是因为节点数量少使得数据传输和处理的路径更短，减少了中间环节的延迟和复杂度，同时智能合约在相对简单的业务场景下能够更快速地执行和响应。单一环节场景下，节点数仅为 3，日均交易数 100，追溯响应时间最短为(0.8±0.1) h，这是由于单一环节的业务逻辑最为简单，数据流转路径清晰，智能合约无需处理复杂的跨环节业务，能够以极快的速度完成数据存储和查询等操作。对于智能合约执行效率，用户验证合约单次调用响应时间较短，这是因为其功能相对单一，主要是进行身份验证和权限分配等基础操作。数据存储合约和交易更新合约单次调用响应时间稍长，且多合约协同存在一定延迟，这是因为它们涉及更复杂的数据处理和状态更新操作，需要与区块链账本进行更多的交互和验证，尤其是在多合约协同工作时，需要确保各个合约之间的数据一致性和业务逻辑的正确性，因此会产生一定的延迟，但整体仍在可接受的范围内，满足系统实时性的要求。

4 讨论与结论

本研究通过构建基于智能区块链的食品溯源系统，有效解决了传统食品溯源系统中存在的数据篡改风险高、信息不透明、追溯效率低等问题。研究结果表明，智能区块链技术的应用显著提升了食品供应链的透明度、数据可信度和追溯效率，降低了质量纠纷成本，为食品安全保障提供了强有力的技术支持。

4.1 技术局限性与适配场景讨论

尽管本研究验证了智能区块链在食品溯源中的显著优势，但其在实际落地中仍面临以下挑战:

(1)成本与复杂度瓶颈。区块链节点的部署、存储扩容与日常维护需要持续的硬件与人力投入，对中小企业构成显著经济压力。同时，链码开发、网络配置与共识机制调优需要专业的区块链开发与运维知识，提高了技术门槛。

(2)实验环境的局限性。本研究的数据采集基于模拟脚本，虽引入了 FDA 公开数据集进行补充验证，但仍无法完全复现真实供应链中设备故障、人为中断等突发异常，可能对性能评估产生偏差。此外，实验基于单机多节点环境进行，与生产级多机分布式部署在网络延迟、负载均衡和容灾能力上存在差异，结论的工程适用性需进一步在生产环境中验证。

(3)与现有研究的对比及本文贡献。相较于文献[4]等聚焦于区块链溯源理论框架的研究，本文的贡献在于提出了包含链上链下协同存储的具体系统架构，并给出了智能合约的详细模块化设计。与文献[3]相比，本文不仅实现了溯源功能，更通过实验提供了追溯效率提升 86.8%、数据篡改风险降低 96.8%等量化效能对比，为技术选型提供了实证依据。

4.2 未来研究方向与具体技术路径

本研究构建的系统有效解决了传统溯源中的数据篡改、不透明与低效问题。为推进该技术的成熟与落地，未来研究可从以下具体路径展开:

(1)隐私保护的可落地方案。为解决数据透明与商业隐私的矛盾，可设计基于 ZKP 的链上数据查询框架。在该框架下，验证者无需获取原始数据，仅通过 ZKP 即可验证其类该批次产品农药残留达标或流转路径合规等声明是否真实，从而在保障溯源可信的同时保护敏感信息。

(2)能耗优化的适配性设计。针对能耗问题，可在联盟链场景中研究并适配 PoS 或其变体共识机制。通过依据节点质押权益或历史可信度来选举记账节点，替代高耗能的算力竞争，从而大幅降低系统运行能耗，使其更适用于对成本敏感的农产品溯源场景。

(3)跨链互操作的技术实现。为支持多区域、多供应链体系的溯源信息互通，需探索基于跨链桥或原子交换协议的互操作方案。例如，设计一套标准化跨链智能合约，使本系统的溯源摘要信息能够安全、可信地同步至其他区域的区块链溯源网络，从而支撑全球性食品溯源查询需求。

(4)降低落地门槛的综合策略。推动“联盟链+云服务”的轻量化部署模式，为中小企业提供节点即网络即服务(Network-as-a-Service, NaaS)；开发智能合约模板库以降低开发难度；并呼吁政策层面提供试点补贴与标准引导，以加速技术的规模化普惠应用。

总之，智能区块链技术在食品溯源系统中的应用已展现出坚实的核心价值与广阔前景。本研究通过架构创新与量化验证，为行业提供了从理论到实践的有力参考，后续工作将继续围绕上述技术路径深化研究，推动食品安全保障体系的智能化演进。

参考文献

[1] 孙颖. 区块链技术在食品行业中的应用现状[J]. 食品安全导刊, 2024(18): 173–175.
SUN Y. Application status of blockchain technology in the food industry [J]. Journal of Food Safety Guide, 2024(18): 173–175.

[2] 王少华, 孙传恒, 罗娜, 等. 面向预制食品溯源的隐私数据加密共享方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 405–418.
WANG SH, SUN CH, LUO N, *et al*. Research on privacy data encryption and sharing methods for prefabricated food traceability [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 405–418.

[3] 刘光惠, 陈虹谷, 张吉印, 等. 基于区块链的食品溯源存储检索方法应用研究[J]. 现代信息科技, 2024, 8(3): 64–68.
LIU GH, CHEN HG, ZHANG JY, *et al*. Research on the application of blockchain-based food traceability storage and retrieval methods [J]. Modern Information Technology, 2024, 8(3): 64–68.

[4] LI K, LEE JY, GHAREHGOZLI A. Blockchain in food supply chains: A literature review and synthesis analysis of platforms, benefits and challenges [J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(11): 3527–3546.

[5] ODEH A, KESHTA I, AL-HAIJA QA. Analysis of blockchain in the healthcare sector: Application and issues [J]. Symmetry, 2022, 14(9): 1760.

[6] LB K. Survey on the applications of blockchain in agriculture [J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1333.

[7] VIGLIOTTI MG. What do we mean by smart contracts open challenges in smart contracts [J]. Frontiers in Blockchain, 2021, 3: 553671.

[8] 林哲旭, 陈汉林, 刘漳辉, 等. 基于 Hyperledger Fabric 的数据可信共享平台[J]. 小型微型计算机系统, 2025, 46(1): 189–199.
LIN ZX, CEN HL, LIU ZH, *et al*. A data trusted sharing platform based on hyperledger fabric [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2025, 46(1): 189–199.

[9] 高威, 刘丽华, 和斌涛, 等. 区块链共识机制与改进算法研究进展[J]. 计算机应用, 2025, 45(9): 2848–2864.
GAO W, LIU LH, HE BT, *et al*. Research progress on blockchain consensus mechanisms and improved algorithms [J]. Journal of Computer Applications, 2025, 45(9): 2848–2864.

[10] 冯盼, 刘文粘. 区块链技术在食品溯源领域的研究现状[J]. 现代食品, 2023, 29(19): 86–88.
FENG P, LIU WZ. Research status of blockchain technology in the field of food traceability [J]. Modern Food, 2023, 29(19): 86–88.

[11] 吴旭阳. 基于区块链的农产品溯源数据存储优化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
WU XY. Research on optimization of agricultural product traceability data storage based on blockchain [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.

[12] LI W, FENG C, ZHANG L, *et al*. A scalable multi-layer PBFT consensus for blockchain [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 32(5): 1146–1160.

[13] 向世刚. 基于区块链的农产品可信溯源平台的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
XIANG SG. Design and implementation of a trusted agricultural product traceability platform based on blockchain [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

[14] 殷珍贵. 区块链技术应用于食品溯源的法律问题研究[D]. 重庆: 西南政法大学, 2022.
YIN ZG. Research on legal issues of blockchain technology applied to food traceability [D]. Chongqing: Southwest University of Political Science and Law, 2022.

[15] SAMO Z. 区块链技术对零售供应链可持续发展的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
SAMO Z. Research on the impact of blockchain technology on the sustainable development of retail supply chains [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024.

[16] ZHENG Z, XIE S, DAI HN, *et al*. An overview on smart contracts: Challenges, advances and platforms [J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 105: 475–491.

[17] RIJANTO A. Blockchain technology adoption in supply chain finance [J]. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, 2021, 16(7): 3078–3098.

[18] MERDASSI I, GHAZEL C, SAIDANE L. A novel location and time privacy-preserving approach for mobile cloud based on blockchain [J].The Journal of Supercomputing, 2025, 81(1): 1–33.

[19] DHUMANE AV, RANJAN N, TAMBOLI M, *et al*. A secure data sharing framework with AESMO enabled key generation in consortium blockchain based E-government system [J]. Knowledge-Based Systems, 2025, 317: 113160.

[20] HUANG Y, WANG B, ZHANG Q. Research on ciphertext speech biohashing authentication based on chaotic system and improved public chain [J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 80(5): 6661–6698.

[21] SARAVANAKUMAR R, KOPERUNDEVI G, BANUMALAR K. Realistic choice-based decision-making mechanism in electric vehicles and secure energy transaction using ethereum blockchain [J]. Electrical Engineering, 2024, 106(3): 2447–2467.

[22] GARAY J, KIAYIAS A, LEONARDOS N. The bitcoin backbone protocol: analysis and applications [J]. Journal of the ACM, 2024, 71(4): 25.1–25.49.

[23] KSHETRI N. Building trust in AI: How blockchain enhances data integrity, security, and privacy [J]. Computer, 2025, 58(2): 63–70.

[24] WANG J, SHI Y, ZHAO C, *et al*. Impact of pricing leadership on blockchain data acquisition efforts in a circular supply chain [J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(21): 7248–7262.

[25] ZHANG Q, ZHAO Z. Distributed storage scheme for encryption speech data based on blockchain and IPFS [J]. Journal of Supercomputing, 2023, 79(1): 897–923.

[26] ZHANG J, LI S, PEI H. Blockchain-enabled one-stop efficient data retrieval privacy protection mechanism industry 4.0 [J]. Journal of Supercomputing, 2025, 81(13): 1252.1–1252.28.

[27] JIANG R, ZHANG H, SONG Z, *et al*. T-BFL model based on two-dimensional trust and blockchain-federated learning for medical data sharing: T-bfl model based on two-dimensional trust and blockchain [J]. Journal of Supercomputing, 2025, 81(2): 378.1–378.44.

[28] ZHANG H, ZHANG X, ZHANG Y, *et al*. Blockchain-based proxy-oriented data integrity checking mechanism in cloud-assisted intelligent transportation systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(11): 17366–17381.

[29] GANESH NSG, BALASUBRAMANIAN V, PRASAD DVV, *et al.* Deep learning-based user authentication with hybrid encryption for secured blockchain-aided data storage and optimal task offloading in mobile edge computing [J].Wireless Networks, 2024, 31(3): 2389–2417.

[30] LIU Y, ZHAO Y. A blockchain-enabled framework for vehicular data sensing: Enhancing information freshness [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(11): 17416–17429.

[31] QI S, YANG X, YU J, *et al*. Blockchain-aware rollbackable data access control for IoT-enabled digital twin [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(11): 3517–3532.

(责任编辑：韩晓红　蔡世佳)