

# 基于 Hyperledger Fabric 的食品溯源系统设计与实现

段冉阳,周文辉,魏 晓,王 龙

(华北计算机系统工程研究所,北京 100083)

**摘 要:** 现有的传统食品安全溯源系统中存在共享数据较为匮乏和信息存储中心化、孤岛化等问题,利用区块链系统去中心化、防篡改、可信任等特性,提出了一种基于 Hyperledger Fabric 区块链的食品溯源系统;然后对 Hyperledger Fabric 区块链技术进行深入分析和研究,明确 Hyperledger Fabric 区块链技术的原理与技术特性,并综合食品安全溯源系统的实际使用,对基于 Hyperledger Fabric 区块链的食品溯源系统进行详细设计;最后对基于 Hyperledger Fabric 区块链的食品溯源系统进行了实际的搭建,并对该系统进行相关功能测试和性能测试,验证了整体方案的可行性与有效性。

**关键词:** 区块链;食品溯源;超级账本

中图分类号: TN929.5;TP311

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200303

中文引用格式: 段冉阳,周文辉,魏晓,等. 基于 Hyperledger Fabric 的食品溯源系统设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 55-60.

英文引用格式: Duan Ranyang, Zhou Wenhui, Wei Xiao, et al. Design and implementation of food traceability system based on Hyperledger Fabric[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(3): 55-60.

## Design and implementation of food traceability system based on Hyperledger Fabric

Duan Ranyang, Zhou Wenhui, Wei Xiao, Wang Long

(National Computer System Engineering Research Institute of China, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the traditional food safety traceability systems, there are many problems such as lack of shared data, centralization and islanding of information storage. Since blockchain systems have the characteristics of decentralization, tamper-resistance, and trustworthiness, this paper proposes a food traceability system based on Hyperledger Fabric blockchain. Then Hyperledger Fabric was described in detail. The technical principles and characteristics of Hyperledger Fabric blockchain technology was clarified. Comprehensive practical use of food safety traceability system and detailed design of food traceability system based on Hyperledger Fabric blockchain were expounded. Finally, the food traceability system based on the Hyperledger Fabric blockchain was set up, and the related functional test and performance test of the system verified the feasibility and effectiveness of the plan properly.

**Key words:** blockchain; food traceability; Hyperledger Fabric

### 0 引言

食品安全溯源体系是指在食品产供销的各个环节(包括种植养殖、生产、流通以及销售与餐饮服务)中,食品质量安全及其相关信息能够被顺向追踪(生产源头-消费终端)或者逆向回溯(消费终端-生产源头),从而使食品的整个生产经营活动始终处于有效监控之中<sup>[1]</sup>。但目前使用的食品溯源技术方案仍然以传统记录方式为主,存在以下几方面的问题:

(1)数据共享仍然缺乏<sup>[2]</sup>。目前食品安全溯源主要依托于物流网络等进行实现,但物流信息仅仅是整个供应链上的部分信息,供应链中如食品生产信息、包装信息等无法进行记录和追溯,而这些信息的完整性与真实性对于增加产品的可信度有着极大的帮助。更多的信息录入可以让消费者能够更完整、更直观地了解到产品从

产生到消费的全部流程,让更多的参与方加入进来,在提高产品溯源信息完整性的同时,加入更多的背书主体,提高产品溯源信息的真实性与可靠性。

(2)信息存储中心化<sup>[3]</sup>。在目前主流的产品溯源供应链中,主要采用中心化的信息存储模式,需要参与产品供应链上的某一方进行管理和维护。但是,不论是生产方、运输方还是销售方,均为产品供应链上的利益相关方,当不利于其自身的信息产生时,很有可能出现篡改账本或者谎称账本信息由于技术原因而丢失的情况出现,很难保证产品溯源信息的真实性和有效性。

(3)信息存储孤岛化<sup>[4]</sup>。目前主流的系统在整个商品供应链中,存在信息孤岛问题。通常情况下,参与产品供应链的各方具有多个不同的信息系统,各个信息系统之间很难进行交互,这会导致信息同步困难、信息核对繁

琐、数据交互不均衡等问题,为日后的使用埋下诸多隐患。尤其是随着使用时间增长,产品溯源系统产生的数据量增多,对多个系统的重复审计成本也将大大增加。

区块链技术被认为是近年来最具颠覆性和革命性的创新之一<sup>[5]</sup>,已在金融、贸易<sup>[6]</sup>、物流<sup>[7]</sup>、征信<sup>[8]</sup>、公益、物联网、共享经济等诸多领域崭露头角<sup>[9]</sup>,其本质上是提供信任保障的技术,具有去中心、自动化和可信任的理念与特性,能提供较为有效的数据保护<sup>[10]</sup>,十分契合人们对新型食品安全溯源系统的需求。因此,为了解决上述传统食品溯源系统中存在的问题,本文提出一种基于区块链技术的食品溯源系统设计方案。

1 典型区块链技术比较与选型

1.1 区块链选型

区块链技术发展到现在,形成了多样的区块链体系,其中最具代表性的区块链体系有3个:比特币系统中使用的比特币(Bitcoin)区块链系统<sup>[11]</sup>、以太坊(Ethereum)区块链<sup>[12]</sup>和在2015年由Linux基金会发起的超级账本(Hyperledger Fabric)开源区块链项目<sup>[13]</sup>。下面将从区块链性质、共识算法及运行模式、智能合约和货币类型,综合食品安全溯源的实际使用需求,对上述3种区块链系统进行比较。3种区块链特点如表1所示。

表1 3种典型区块链特点对比表

类别	区块链		
	Bitcoin	以太坊	Hyperledger Fabric
区块链性质	公有链	公有链	联盟链
共识算法	PoW	PoW	兼容多种共识算法
身份认证模式	无授权	无授权 & 有授权	有授权
智能合约	不支持	支持(账本层面)	支持(链码层面)
货币类型	比特币	以太币	无货币
工作效率	较低	一般	较高

现今食品溯源系统中,数据种类十分复杂且数量庞大<sup>[14]</sup>,同时根据不同的食品,相关溯源信息需要不断变更,这要求使用的区块链系统具备较灵活的数据存储系统和智能合约系统,通过对不同种类食品的智能合约的编写,达到对食品数据的精确统计;同时,参与食品溯源系统中的各个参与方本身均为传统供应链上的合作方,在现实中存在一定的信任关系,有着一定程度的信任积累,且供应链上各个供应方相对固定,无需面对整个公共网络,存在恶意节点的可能性比较小;另外,由于供应链上参与方较多,各参与方需要写入和维护的数据比较复杂,因此需要更快的区块产生速度和更高效的区块链网络。

针对以上食品溯源系统的使用特点,综合3种区块链技术的特点进行分析,Hyperledger Fabric 区块链网络的特点和优势十分契合食品安全溯源体系的实际情况和使用需求。因此,本文采用 Hyperledger Fabric 区块链系统作为底层架构,对基于区块链的食品安全溯源系统进行设计与实现。

1.2 食品溯源样例选型原因

在区块链与溯源系统相结合的研究中,相关从业人员也进行了许多积极的尝试,但大都集中在贵重物品溯源与单一物品溯源中,首先信息量相对较小,同时需要管理的产品数量并不大,因此所有溯源信息往往在一个账本中进行维护。本文旨在利用 Hyperledger Fabric 的多账本、模块化等特性,对日常食品溯源系统进行构建,在一定程度上增加整个溯源系统的灵活性,提高整体溯源系统的效率和数据吞吐能力。

食品溯源系统的主要溯源对象为消费者经常购买的食物,选择的溯源食品种类应当对食品原材料来源、加工生产过程、运输条件等有较高要求。牛奶作为日常饮食的一种,深受各类人群,尤其是老年人和青少年的喜爱。但是由于目前生产鲜牛奶的厂商众多,目前市场流通的鲜牛奶品质良莠不齐,同时鲜牛奶容易变质,需要相对严格的存储和运输环境,当产生产品质量问题时,传统记录手段很难对相关责任人进行定位。因此,消费者对鲜牛奶的食品溯源有着极大的需求,下面就以某品牌鲜牛奶为例,构建基于 Hyperledger Fabric 区块链的食品溯源系统。

2 基于 Hyperledger Fabric 的食品安全溯源系统设计

2.1 整体模型

基于上文的分析,利用 Hyperledger Fabric 联盟区块链技术构建基于区块链的食品安全溯源系统,系统的整体模型如图1所示。

在图1中,列举了直接参与牛奶食品供应链的食品生产方、运输方、加工方以及销售方,同时引入消费者和监管方进行实时的查询和监管等操作。每个参与方在实际的区块链网络体系中为一个组织(Org),每个组织中可以根据实际信息录入情况设置节点(Peer),每个组织中至少包含一个节点。各个节点负责对各自的相关信息,如原料采集信息、分装加工信息、物流信息以及销售信息等进行录入,录入的信息经智能合约判断合法后,通过区块链节点上链,各个区块链节点同步交易信息,进行区块生成,形成共识的区块链数据。消费者和相关监管部门利用区块链节点进行相关信息的管理、查询等操作,使整个食品供应链上的食品安全数据全过程真实、透明、不可篡改,达到食品安全信息可追溯、可查询、可信任的目的。

根据参与方分工的不同,各个参与方对应节点也具备不同的功能,并对牛奶溯源过程中的相关数据进行写入和维护。下面对各个参与方对应的组织和节点进行设置,同时定义各个组织需要写入和维护的数据信息。各个参与方对应的组织和节点如表2所示。

2.2 软件架构

根据上文所述的基于区块链的食品安全溯源系统整体模型,进行该系统软件架构设计。软件架构整体分为三大部分<sup>[15]</sup>,分别为基础层、数据层和应用层。基础层为 Fabric 区块链基础框架;数据层主要包括分布式数据

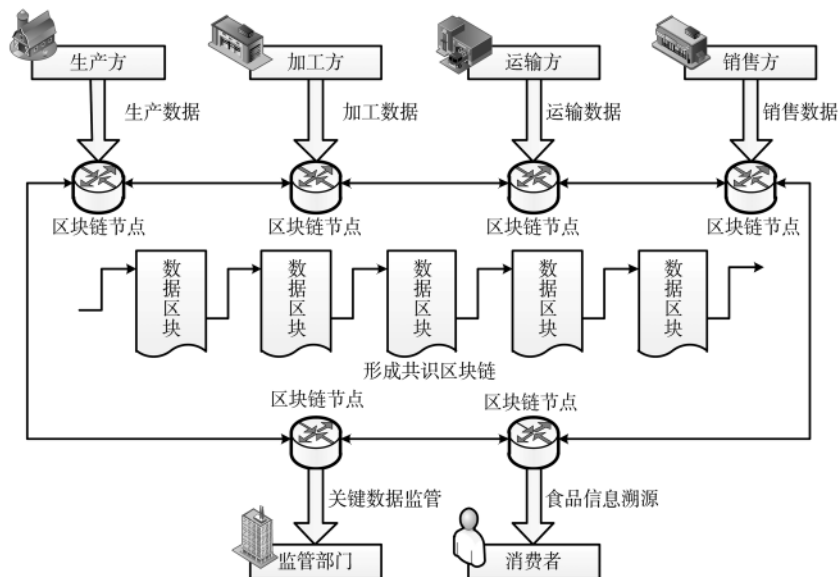


图1 基于Hyperledger Fabric区块链的食品安全溯源系统整体模型

表2 各参与方与组织对应关系表

参与方	组织名称	组织节点及节点域名
生产方	Org1	peer0.org1.sytnetwork.com
加工方	Org2	peer0.org2.sytnetwork.com
运输方	Org3	peer0.org3.sytnetwork.com
销售方	Org4	peer0.org4.sytnetwork.com

存储、共识机制、智能合约、链码以及相关交易数据,同时提供权限管理等功能;应用层主要利用 Fabric 区块链网络提供的各种语言版本的 SDK 进行功能的编写和调用,包括溯源信息录入、溯源信息查询、溯源信息监管等操作。食品溯源系统软件架构图如图2所示。

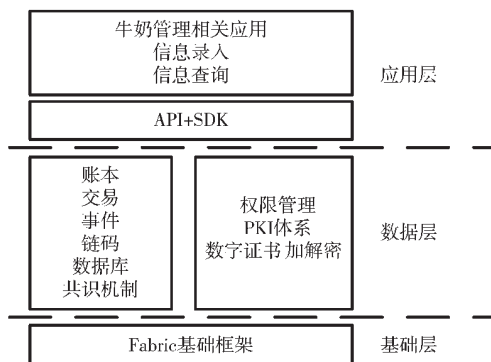


图2 食品溯源系统软件架构图

### 2.3 交互操作

基于上文所述的食品安全溯源系统的整体模型和软件架构,利用 Hyperledger Fabric 区块链技术的特点,可以实现相关食品安全信息的基本操作,包括信息录入、信息更新、信息监管以及信息查询等功能,各参与方根据实际需求,通过相关的管理应用与相应区块链系统进行交互,完成整体食品安全溯源系统的功能实现,食品溯源系统

基本交互操作示意图如图3所示。

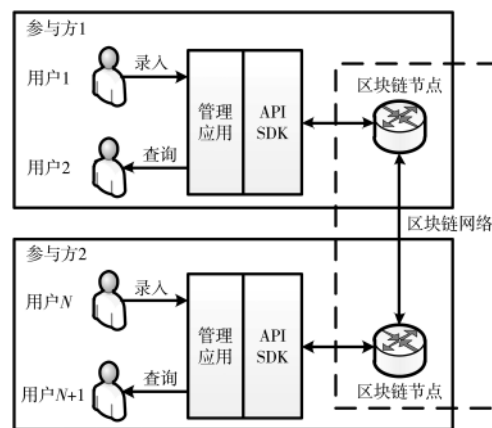


图3 食品溯源系统基本交互操作示意图

同时,利用 Hyperledger Fabric 区块链体系对智能合约的支持,可以根据实际的使用情况,对具体的应用场景进行专用的智能合约编写,相关参与方进行协商确定触发条件,利用智能合约自动执行的特点,自动化地执行相关信息的上联操作,简化工作步骤和 workflows,在提高整体工作效率的同时,降低人为参与的风险,提高数据的有效性。智能合约工作原理示意图如图4所示。

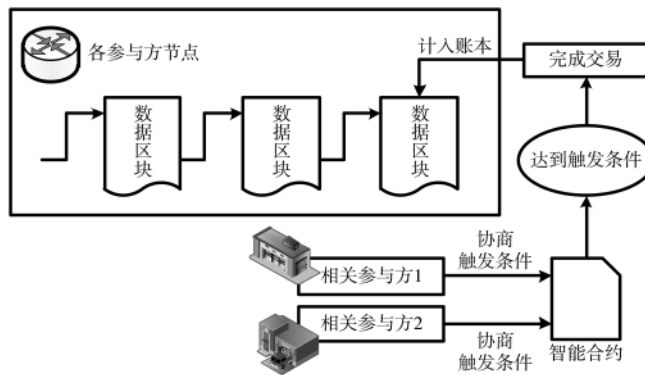


图4 智能合约工作原理示意图

## 3 基于Hyperledger Fabric的食品溯源系统设计

### 3.1 Hyperledger Fabric 基本组成及技术原理

Hyperledger Fabric 由五大核心模块组成,分别为 peer、orderer、cryptogen、configtxgen 以及 configtxlator。其中,peer 和 orderer 属于系统模块,主要构成 Hyperledger Fabric 的基础系统,直接参与系统的运行,并以守护进程的方式在后台长期运行;cryptogen、configtxgen 和 configtxlator 属于工具模块,主要负责区块链系统中的包括证书文件、创世区块等相关文件的生成以及完成相关区块链操作等工作,不直接参与系统运行。Hyperledger Fabric 五大核心模块的基本功能如表3所示。

利用上述五大核心模块,可以构建 Hyperledger Fabric 联盟区块链的基础区块链网络,该网络由 Fabric-CA、

表3 Hyperledger Fabric 核心模块基本功能表

模块名称	模块类型	主要功能
peer	系统模块	主节点模块, 负责存储区块数据, 运行维护代码
orderer	系统模块	交易打包、排序模块
cryptogen	工具模块	组织和证书生成模块
configtxgen	工具模块	区块和交易生成模块
configtxlator	工具模块	区块和交易解析模块

peer 节点和 orderer 节点 3 个基本组成部分构成, 各个 peer 节点可以根据功能不同细分为不同种类, 并组成组织(Org)。

peer 节点与 orderer 节点构成了基本的区块链网络之后, 下一步需要对相关交易数据进行处理和上链, 对已完成的交易和上链数据进行存储, 并保证每个 peer 节点的数据存储是一致的, 这一过程成为共识达成。Hyperledger Fabric 区块链系统中的共识达成基本过程如图 5 所示。

Hyperledger Fabric 区块链系统共识达成过程分为以下 4 个基本步骤:

(1) 由区块链中的一个节点 peer0(领导节点)发起交易, 交易中含有相关交易内容以及 peer0 的数字签名, 交易信息会根据该交易定义的相关节点(这里假设相关节点为 peer1、peer2 以及 peer3)信息进行广播;

(2) 相关背书节点 peer1、peer2 以及 peer3 对交易的内容以及 peer0 的签名进行验证, 保证该交易的有效性和合法性;

(3) peer0 等待交易的背书结果, 当结果满足交易要求时, peer0 向 orderer 节点集群提交该笔交易, 排序节点根据相关排序算法对交易进行排序;

(4) 一段时间后, orderer 节点集群将这段时间内的所有交易排序打包, 形成交易区块并进行广播, 所有提

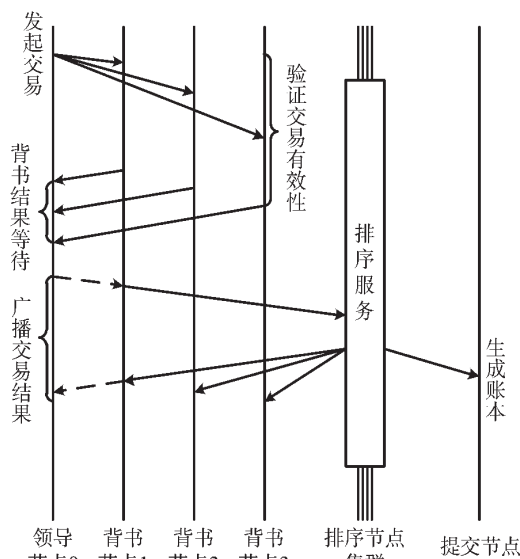


图5 Hyperledger Fabric 区块链系统共识达成过程

交节点接收交易区块并生成账本信息, 实现交易数据的上链操作。

### 3.2 食品溯源系统设计

对基于 Hyperledger Fabric 的食品溯源系统的设计共分为三部分, 分别为网络模块设计、智能合约模块设计以及接口模块设计。

网络模块设计主要建立牛奶溯源系统的区块链内部逻辑, 牛奶溯源系统的区块链内部逻辑结构如图 6 所示。

参与到整个牛奶溯源系统中的参与方分别为生产方、加工方、运输方以及销售方, 每个参与方用一个组织进行代表, 每个组织中设置一个节点模拟实际工作情况, 对牛奶溯源相关数据进行维护和修改等操作。各参与方与区块链组织对应关系如表 2 所示。

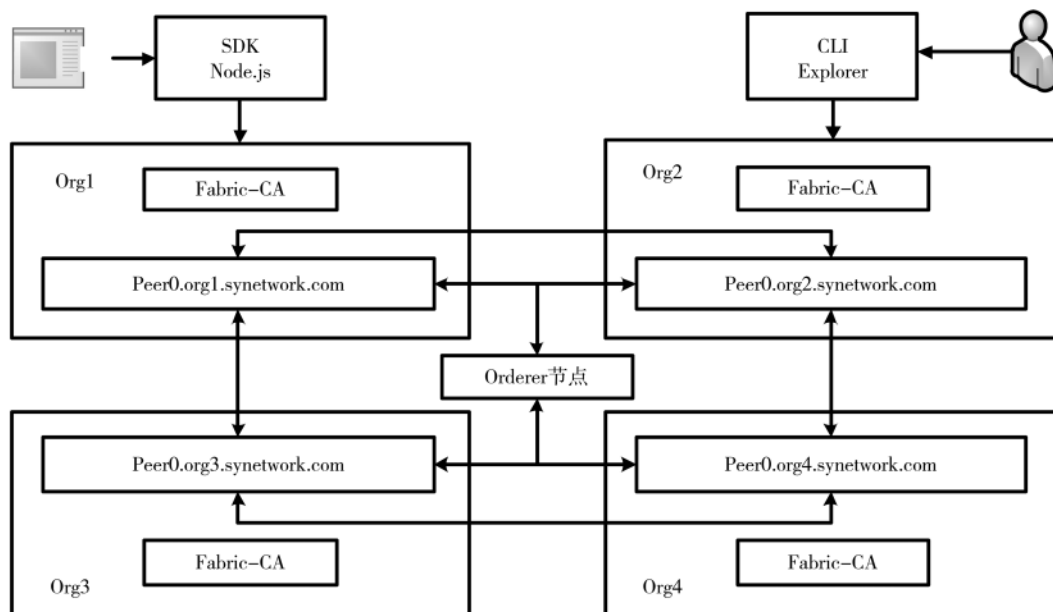


图6 牛奶溯源系统的区块链内部逻辑结构图



智能合约模块设计主要包括各参与方的链码名称命名及工作内容确定。首先根据牛奶溯源系统中的实际环境和工作内容,设置溯源系统中的各个参与方需要维护的牛奶信息种类,确定智能合约的名称,具体对应关系如表4所示。

表4 各参与方维护信息对应表

参与方名称	链码名称	维护信息
生产方	farm-cc.go	奶牛品种、牛奶产地
加工方	machining-cc.go	灭菌记录、有效期
运输方	transport-cc.go	运输状态、运输温度
销售方	sale-cc.go	销售信息

在本系统中,共需要记录牛奶的7项信息。确定了智能合约的名称和对应功能,对智能合约实现功能进行设计,主要设计以下几个功能:

(1)queryMilk():该功能实现对牛奶溯源信息的查询,需要传入1个参数,参数为牛奶编号(如Milk1),查询结果返回Milk1对应的相关信息;

(2)createMilk():该功能需要传入共8个参数,第一个参数为需要创建的牛奶编号,其余7各参数分别对应牛奶溯源系统中的7项数据;

(3)changedata():该功能实现对指定牛奶相关信息的修改,需要传入3个参数,第1个参数指定需要修改的牛奶编号,第2个参数指定需要修改的信息标签,第3个参数为具体修改的值;

(4)getMilkHistory():该功能实现对指定牛奶的所有历史信息进行查询,包括信息录入或修改的记录,实现对该牛奶的溯源需求,需要传入1个参数,指定想要查询的牛奶编号。

接口模块设计主要通过Fabric-Nodejs-SDK进行实现,主要分为两个部分,分别为query.js脚本与invoke.js脚本。query.js脚本主要调用queryMilk()和getMilkHistory()两种功能;invoke.js脚本主要调用createMilk()和changedata()两种功能。

#### 4 食品溯源系统实现及测试

##### 4.1 食品溯源系统实现

Hyperledger Fabric的牛奶溯源系统搭建的硬件环境采用Ubuntu虚拟机完成,利用Docker容器模拟多机环境进行封装,具体性能如表5所示。

表5 系统搭建硬件环境

处理器	内存/GB	硬盘/GB	操作系统
i7-6700HQ	4	40	Ubuntu18.04

系统搭建的软件环境如表6所示。

环境搭建完成后,利用Hyperledger Fabric提供的5个核心模块对牛奶溯源系统进行实际搭建。

##### 4.2 原型系统测试

基于Hyperledger Fabric的牛奶溯源系统搭建完成

表6 系统搭建软件环境

软件名称	软件版本
Go语言	1.10.4
Fabric	1.3.0
Docker	18.09.7
Docker-compose	1.17.1
Node.js	8.10.0

后,以Milk1为例,对相关功能进行测试。

(1)createMilk():创建Milk1,并对Milk1中的所有溯源信息置空;

(2)queryMilk():对Milk1进行查询,结果如图7所示,可以看出Milk1已经被创建,且所有溯源信息均为空;

```
root@ubuntu:/opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar# node query-milkinfo.js
Store path: /opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar/hfc-key-store
(node:5987) DeprecationWarning: grpc.load: Use the @grpc/proto-loader module with
  h grpc.loadPackageDefinition instead
Successfully loaded user1 from persistence
Query has completed, checking results
Response is { "CowVariety": " ", "Disinfectdata": " ", "Exp": " ", "Productionarea": " ",
  "Saleinfo": " ", "TransportTemp": " ", "Transportstatus": " " }
root@ubuntu:/opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar#
```

图7 Milk1查询结果(未录入)

(3)changedata():对Milk1中的相关数据进行写入,并再次进行queryMilk()操作,结果如图8所示,可以看出Milk1的相关信息已经改变,溯源信息不再为空;

```
root@ubuntu:/opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar# node query-milkinfo.js
Store path: /opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar/hfc-key-store
(node:14167) DeprecationWarning: grpc.load: Use the @grpc/proto-loader module with
  th grpc.loadPackageDefinition instead
Successfully loaded user1 from persistence
Query has completed, checking results
Response is { "CowVariety": "Chinese Holstein", "Disinfectdata": "Finish", "Exp": "45
  days", "Productionarea": "Inner Mongolia", "Saleinfo": "On-sale", "TransportTemp": "1
  0C", "Transportstatus": "arrived" }
root@ubuntu:/opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar#
```

图8 Milk1查询结果(已录入)

(4)getMilkHistory():对Milk1的历史信息进行查询,部分结果如图9所示。

```
2a6bf442745f8692b9d0852ccd3c39b", "Value": { "CowVariety": "Chinese Holstein", "Pro
  ductionarea": "Inner Mongolia", "Disinfectdata": "Finish", "Exp": "45 days", "Transpor
  tstatus": "arrived", "TransportTemp": " ", "Saleinfo": " ", "Timestamp": "2020-03-25
  09:39:17.126 +0000 UTC", "IsDelete": "false" }, { "Txid": "1ed35c74ebcca7a90e21bc404b
  2ab1c2668c8150316fee35a23a52fcb2b00ce7", "Value": { "CowVariety": "Chinese Holstein
  ", "Productionarea": "Inner Mongolia", "Disinfectdata": "Finish", "Exp": "45 days", "Tr
  ansportstatus": "arrived", "TransportTemp": " ", "Saleinfo": "On-sale", "Timestamp":
  "2020-03-25 09:40:12.612 +0000 UTC", "IsDelete": "false" }, { "Txid": "8d75156fcccc9
  a01d76f8cb92d0a58423b05e036cef68cee8ba87a9b403f24", "Value": { "CowVariety": "Chin
  ese Holstein", "Productionarea": "Inner Mongolia", "Disinfectdata": "Finish", "Exp":
  "45 days", "Transportstatus": "arrived", "TransportTemp": "10C", "Saleinfo": "On-sale"
  }, "Timestamp": "2020-03-25 09:42:11.82 +0000 UTC", "IsDelete": "false" } ]
root@ubuntu:/opt/hyperledger/fabric-samples/fabcar#
```

图9 Milk1历史记录查询结果(部分)

完成基本功能测试后,对本文设计的牛奶溯源系统进行性能测试,利用多次读写的方式对牛奶溯源系统进行测试。

编写脚本对本系统进行重复写入操作,写入次数500次,实测区块生成平均时长均小于3s;编写脚本对牛奶溯源信息进行重复读取操作,读取次数500次,未发生错误,具备一定的可用性。

#### 5 结论

本文研究了一种基于Hyperledger Fabric区块链的食品溯源系统,分析了目前的食品溯源系统存在的问题;

同时,对现今主流的区块链系统进行筛选,选定 Hyperledger Fabric 联盟区块链平台构建食品溯源系统并进行实际搭建;搭建完成后对食品溯源系统中的相关功能进行了模拟测试,并对整个系统进行了简单的性能测试。

根据测得的结果,本文提出的基于 Hyperledger Fabric 区块链的食品溯源系统基本满足当前消费者对食品溯源系统的需求,解决了传统食品溯源系统中存在的数据量缺乏、存储信息中心化等问题,保证了食品溯源数据的完整性、有效性与不可篡改性。

#### 参考文献

- [1] 孙志国.区块链、物联网与智慧农业[J].农业展望,2017,13(12):72-74.
- [2] 赵嫻,陈佳豪.基于区块链技术的农产品供应链信息优化研究[J].供应链管理,2020,1(3):25-34.
- [3] 孙明.基于物联网的食品溯源系统设计及实现[D].北京:中国科学院大学,2015.
- [4] 周雄,郑芳.基于区块链技术的农产品质量安全溯源体系构建探究[J].中共福建省委党校学报,2019(3):113-117.
- [5] 王元地,李粒,胡谋.区块链研究综述[J].中国矿业大学学报(社会科学版),2018,20(3):74-86.
- [6] 李超,戴炳荣,王泓机,等.基于区块链的数字版权保护与交易系统[J].现代计算机(中旬刊),2018(10):80-84.
- [7] 徐春波,闫龙.区块链技术在物流与供应链领域的应用分析[J].物流工程与管理,2019,41(6):66-68.
- [8] 王明生,曹鹤阳,李佩瑶.基于区块链的去中心化信贷系

统及应用[J].通信学报,2019(8):169-177.

- [9] BO Y, WANG H. The application of Cloud computing and the Internet of Things in agriculture and forestry[C]. International Joint Conference on Service Sciences, 2011.
- [10] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016(4):481-482.
- [11] 郭彬,于飞,陈劲.区块链技术与信任世界的构建[J].企业管理,2016(11):110-113.
- [12] LARIMER D. Delegated proof-of-stake white paper[EB/OL]. (2014-04-13)[2020-04-14]. <http://8btc.com/doc-view-151.html>.
- [13] IBM. Hyperledger Fabric[EB/OL]. (2017-xx-xx)[2020-04-14]. <https://www.hyperledger.org/>.
- [14] 于建明.我国食品安全现状与食品检测发展方向的理性思考[J].食品安全导刊,2017(15):50.
- [15] CACHIN C. Architecture of hyperledger blockchain Fabric[C]. Workshop on Distributed Crypto Currencies and Consensus Ledgers, 2016.

(收稿日期:2020-04-14)

#### 作者简介:

段冉阳(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:区块链技术。

周文辉(1973-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:信息安全技术。

魏晓(1990-),男,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向:计算机技术。

(上接第54页)

#### 参考文献

- [1] 楼平,岳灵平,李龙.新型激光除异物技术在特高压输电线路的应用[J].浙江电力,2018,37(6):6-9.
- [2] 隆晨海,杨森,何龙飞,等.带电处理异物新方法研究及工器具研制[J].电气时代,2016(10):63-67.
- [3] 刘明亮,杨厚峰.导线易漂浮物清除工具的研制与应用[J].自动化博览,2011(S2):185-187.
- [4] 雷冬云,白剑锋,温智慧,等.基于无人机的10 kV 架空配电线路漂浮异物清除装置设计[J].湖南电力,2020,40(5):78-81,86.
- [5] 严伟佳,徐欣,席晓强,等.无人机高压输电线路异物清除装置[J].电力安全技术,2017,19(8):61-63.
- [6] 马永增,齐以涛.新型输电线路接地线除障装置研制与应用[J].浙江电力,2018,37(6):10-13.
- [7] 吴志成,高领军,李向军,等.便携式输电线路异物清除装置的研制[J].科技资讯,2017,15(10):114,116.
- [8] 曹燕军.输电线路异物清除机器人机构设计与分析[D].沈阳:沈阳理工大学,2015.
- [9] 梁伟,陈杰,刘洋,等.清除架空线路异物的新型装置及其试验研究[J].中国电机(技术版),2015(9):57-59.
- [10] 梁伟,陈杰,周志成,等.电网异物激光清除器对导线的

安全性研究[J].工业安全与环保,2017,43(8):26-30.

- [11] 周维维,樊卫华,姜姍.激光异物清除器装置研究[J].计算机测量与控制,2018,26(7):123-127.
- [12] 李华,王雅斌,孙闻浩,等.用于小型化激光异物清除装置的激光聚焦系统设计与应用[J].自动化应用,2018(12):7-9.
- [13] 陈杰,梁伟,张志坚,等.架空线路异物激光清除技术研究[J].激光技术,2017,41(5):659-663.
- [14] 李晨,蒋林,刘思平.基于 STM32 与 Lwip 协议栈的高效通信技术[J].电子技术与软件工程,2019(19):27-28.
- [15] Raspberry Pi(Trading) Ltd. Compute module 3+datasheet [EB/OL]. (2019-01-28)[2020-06-01]. [https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/datasheets/rpi\\_DATA\\_CM3plus\\_1p0.pdf](https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/datasheets/rpi_DATA_CM3plus_1p0.pdf).

(收稿日期:2020-06-01)

#### 作者简介:

杨波(1984-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:自动化控制、射频通信、嵌入式系统。

刘传利(1985-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:无线通信技术与标准研究、无线通信产品测试、测试系统设计与开发。

吴英迪(1993-),男,本科,助理工程师,主要研究方向:通信系统、物联网技术。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所