面向售电侧开放的能源区块链技术

学生：王思棋　　导师：陈思捷

2019年06月12日

上海交通大學
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

目录 Contents

目录 Contents

泛在电力物联网

- 国家电网在2019年两会报告中提出建设世界一流能源互联网企业的基础是运营好“**两网**”，分别是一直强调的“**坚强智能电网**”和“**泛在电力物联网**”，实现枢纽型、平台型、共享性企业的“**三型齐举**”和“**两网并进**”。

- “**泛在电力物联网**”指的是建立无处不在、全面覆盖的新型能源信息网络，系统实时感知设备状态需求并响应，充分利用无线传输、自动控制等现代物联网技术，打造能量流、信息流与业务流一体化的能源互联网。

什么是区块链？

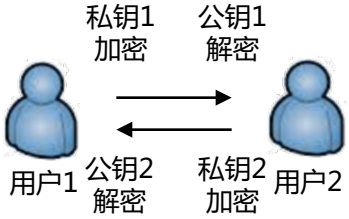
去中心化的数据记录、管理工具

- 去中心化、去信任化的方式集体维护可靠数据库的技术方案
- 表现形式：密码学技术 + 树状存储结构 + 共识算法 + 智能合约

多种技术的组合

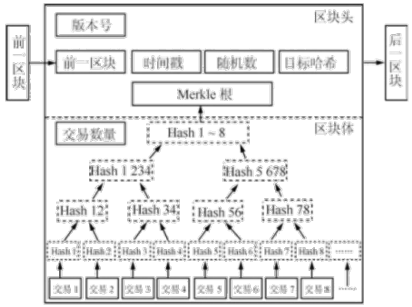
一、密码学技术

块链结构：链式哈希结构



公私钥加密通信

二、树状存储结构



- 难以篡改
- 易于验证

三、共识算法

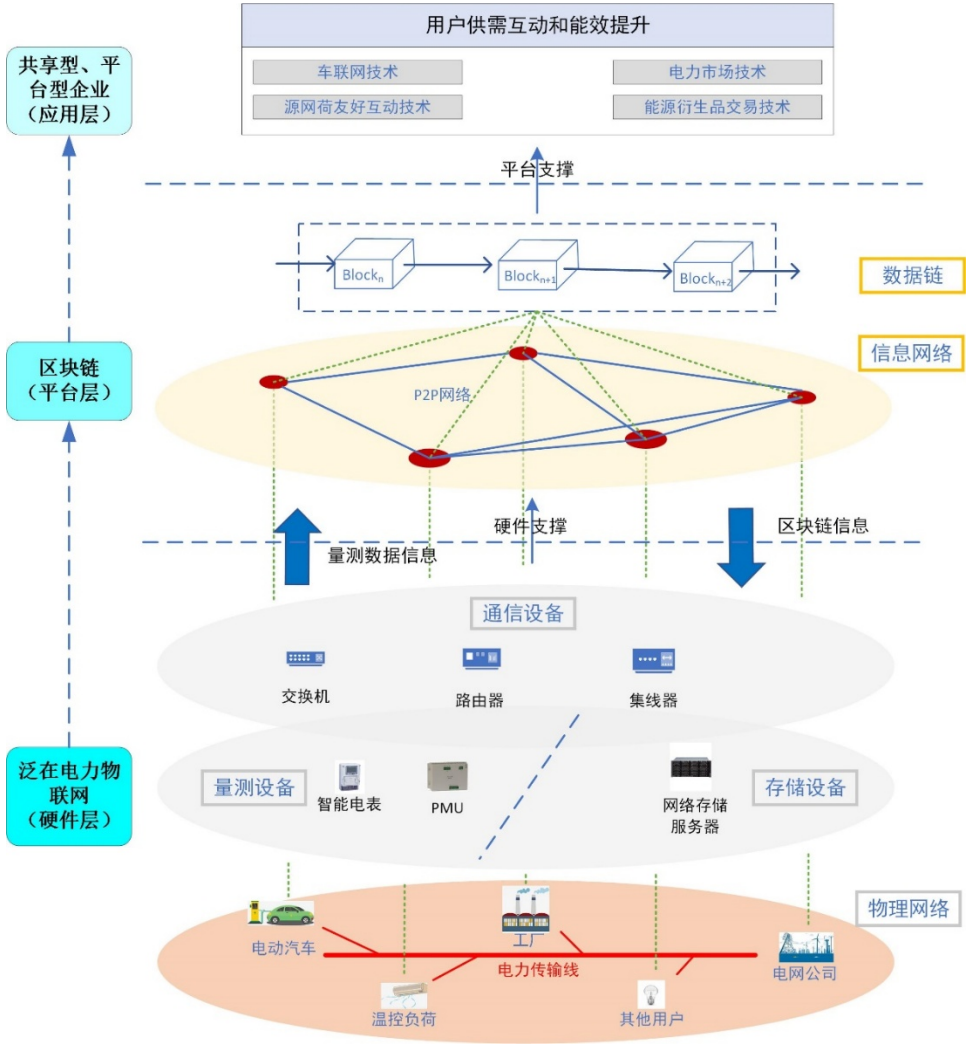
工作量证明：各节点同时求解一道数学难题，最快解决的节点获得该区块记账权。

- 去中心化记录
- 算力竞争保证数据一致性和共识安全性
- 单一时刻单一节点有权广播

四、智能合约

区块链对三型两网建设的价值

- **区块链的特点**
  - 基于区块链的多边协作范式
    - 信息对称
    - 安全透明
    - 多方监管、多方备份
    - 可扩展性强
    - 密码学原理确保可信任化
- **区块链对平台型、共享型企业建设的意义**
  - 多方制衡，多方监管
  - 信息共享，共同认证



区块链的应用场景

应用方向	应用需求	区块链的价值	潜在应用场景
能源市场交易	存在低价值、高频率的能源交易	可以降低交易成本、提高交易透明度	• 分布式电源P2P交易 • 天然气交易

面向售电侧放开基于Hyperledger的园区分布式能源交易系统

- ✓ 2017年国家发展改革委国家能源局关于开展分布式发电市场化交易试点的通知
- ✓ 2018年国家能源局综合司关于征求《可再生能源电力配额及考核办法（征求意见稿）》意见的函
- ✓ 2019年国家发展改革委国家能源局关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知
- ✓ 国家发展改革委办公厅国家能源局综合司关于公布2019年第一批风电、光伏发电平价上网项目的通知

目录 Contents

区块链分布式能源交易的开发平台

为什么使用超级账本(Hyperledger)？

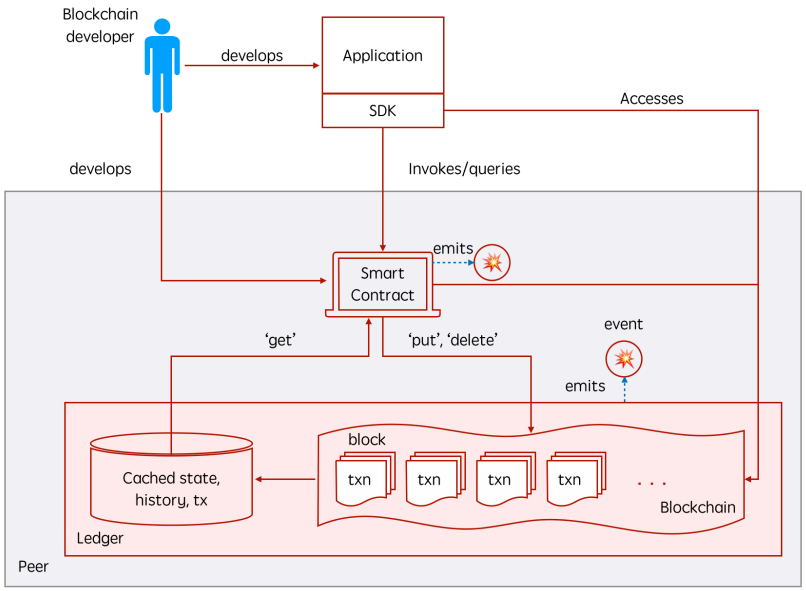
目前比较成熟的区块链开发平台有两种

以太网　　Hyperledger Fabric

- 以太网是公有链技术，本课题是一个联盟链的场景；
- 联盟链需要参与者通过授权加入网络并组成利益相关联盟，共同维护区块链，实现“部分去中心化”。本场景运行成员身份相对固定、数量不多，适合使用Hyperledger Fabric这一联盟链技术；
- 以太网对智能合约的响应慢，而Hyperledger平台快很多，可以达到2000tps (transactions per second)。

超级账本(Hyperledger Fabric)

超级账本（Hyperledger Fabric）是一个开放源代码的企业级许可分布式账本技术平台，它比其他流行的分布式账本或区块链平台提供了一些关键的差异化能力。Fabric是第一个分布式的总帐平台，用于支持以通用编程语言(如Java、GO和Node.js)编写的智能合约； Fabric平台与没有公共许可的网络不同，参与者彼此都是已知的，而不是匿名不受信任的。Hyperledger Fabric是当今在交易处理和交易成交延迟方面性能更好的平台之一，它支持事务的隐私和机密性以及实现它们的智能合约(“链码”)。



本文主要工作

用户甄选售电公司的评分模型优点

- 采用多变量分析的方法量化电力套餐的价值
- 填补用户在售电公司提供准入机制下如何切换通道这一空白

支持多通道的区块链多边交易模型优点

- 通道间交易信息不共享的特点保证了交易的私密性
- 通道内为用户之间的电能交易、赠与带来了极高的自由度
- 减轻了小微用户与售电公司受偏差电量考核的负担
- 使具有一定发电能力的小微用户的电能销售多样化

基于Hyperledger Fabric的智能合约设计

- 分布式账本管理、双向拍卖和P2P交易

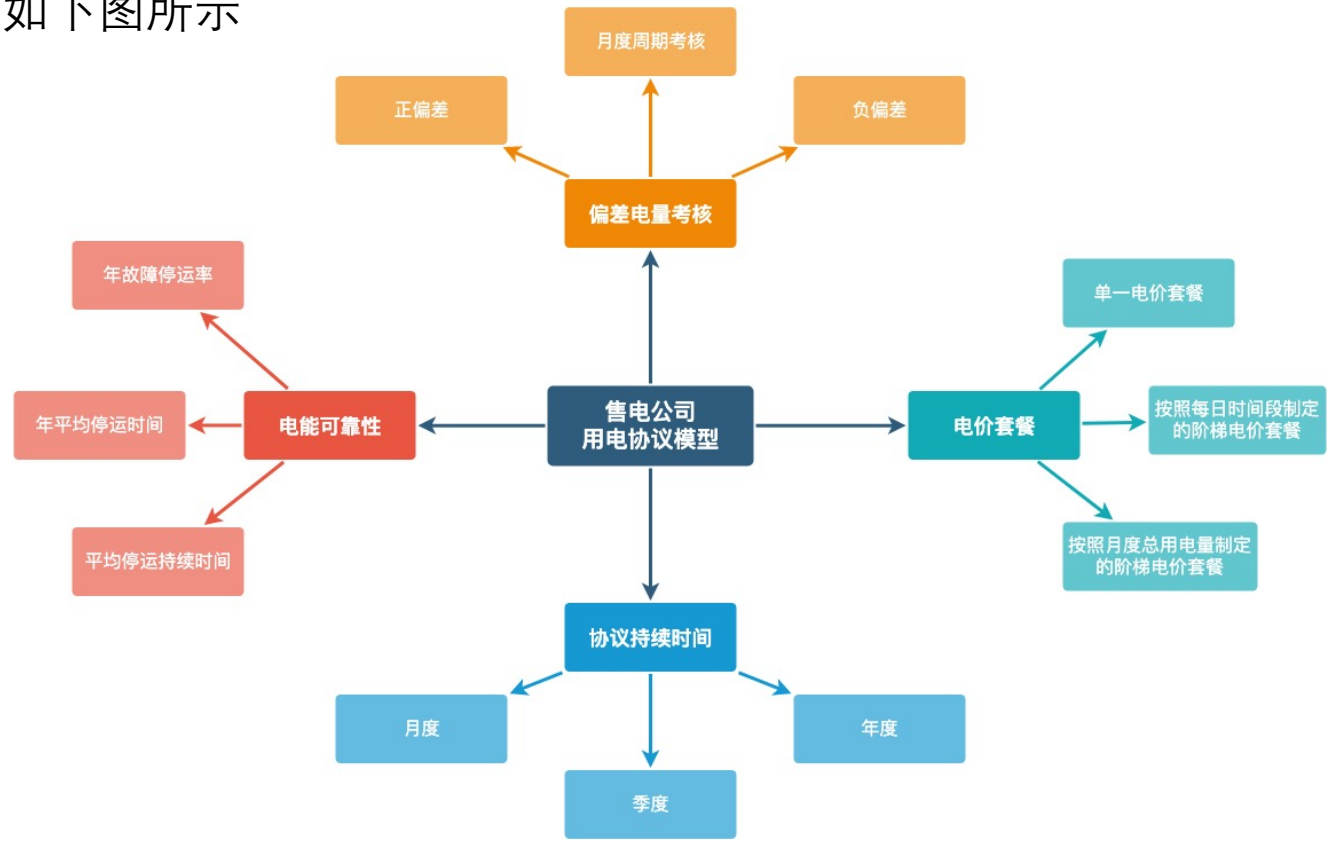
基于区块链的园区分布式电力交易系统测试

- 基于Hyperledger Fabric的分布式账本与智能合约测试
- 基于Hyperledger Composer的分布式电力管理网页界面开发

目录 Contents

用户甄选售电公司的评分模型

- 本文提出了考虑电能可靠性、价格套餐、偏差电量考核和用电协议持续期限的**用户甄选售电公司的评分模型**，帮助用户完成与售电公司配对的决策过程，模型结构如下图所示



用户选择售电公司提供用电协议的评分计算方法

- **可靠性指标PSRI**（Power Supply Reliability Index）
- **电价套餐指标SPI**（Sales Plan Index）
- **偏差电量考核指标PDPI**（Power Deviation Penalty Index）
- **协议持续时间指标ADI**（Agreement Duration Index）
- 用户A对套餐 i 评价的总得分$Score_i$依据下式计算：

$$Score_i = \alpha \times PSRI_i + \beta \times SPI_i + \gamma \times PDPI_i + \delta \times ADI_i$$

- 式中，α、β、γ、δ分别表示用户关心度系数

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma + \delta = 1 \\ \alpha, \beta, \gamma, \delta \ \epsilon \ [0,1] \\ PSRI_i, SPI_i, PDPI_i, ADI_i \ \epsilon \ [0,1] \end{cases}$$

- 有两个假设前提：其一，为了模型简化我们假定这四种指标相互独立；其二，$Score_i$与每种指标之间线性相关。

可靠性指标PSRI

- λ_k为过去第k年的年故障停运次数，R_k为过去第k年的平均停运持续时间，U为年均停运时间

$$\begin{cases} \lambda = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k \\ R = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} \lambda_k R_k}{\sum_{k=1}^{n} \lambda_k} = \dfrac{U}{\lambda} \\ U = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k R_k = \lambda R \end{cases}$$

- 期望缺供电量(Expected Energy Not Supplied, EENS)是评价可靠性的价值指标，对应的经济性指标是期望停电损失(Expected Damage Cost, EDC)，是指因停电造成的经济损失

$$E_{\mathrm{EENS}} = D \times U$$

$$C_{\mathrm{EDC}} = l \times E_{\mathrm{EENS}}$$

- 其中D为年平均负荷，U为年平均停运时间，l是单位停电损失。最终的对方案i的电能可靠性指标由下式得到

$$PSRI_i = \frac{\max\limits_i C_{\mathrm{EDCi}} - C_{\mathrm{EDCi}}}{\max\limits_i C_{\mathrm{EDCi}} - \min\limits_i C_{\mathrm{EDCi}}} = \frac{\max\limits_i U_i - U_i}{\max\limits_i U_i - \min\limits_i U_i}$$

- 归一化方法使指标 PSRI 为[0,1]内的小数，化简后 PSRI 与 l、D 值无关。

电价套餐指标SPI

- 将用户平均每月的总电价用Q表示，总用电量用w表示，单位电价用p表示，那么单一电价套餐的总电价计算公式为

$$Q = w \times p$$

- 按照每日时间区间制定的阶梯电价套餐平均每月总电价Q的计算公式为

$$Q = 30 \times \sum_k t_k p_k$$

式中t_k为一天内每段阶梯电价的时间区间长度，p_k为该时间区间内的单位电价。

- 按照每月的总用电量制定的阶梯电价套餐平均每月总电价Q的计算公式为

$$Q = \sum_k w_k p_k$$

式中w_k为平均每月内处于每段阶梯电价的数量区间内的用电量，p_k为该数量区间内的单位电价。则该特性下的电价套餐指标 SPI 计算公式为

$$SPI_i = \frac{\max_i Q_i - Q_i}{\max_i Q_i - \min_i Q_i}$$

偏差电量考核指标PDPI

- 将月度结算的偏差考核费用作为P表示，允许偏差范围为±s_0%，该月实际用电偏差为s%，月度出清价差单价为q，长期协议平均成交价差单价为q_0，月度竞价电s量为w，长期协议每个月成交电量为v，那么当该用电偏差为正偏差(实际用电量超出月度购买量)时，该月结算的偏差考核费用P的计算公式

$$\mathrm{P}_{+} = q \times (w+v) \times \frac{(s-s_0)}{100} - \frac{s_0}{100} \times (w+v) \times q$$

$$= q \times (w+v) \times \frac{(s-2\times s_0)}{100}$$

- 当该用电偏差为负偏差(实际用电量低于月度购买量)时，偏差电量按照该价差绝对值的n倍进行结算，则该月结算的偏差考核费用P的计算公式为

$$\mathrm{P}_{-} = q \times (w+v) \times \frac{(s-s_0)}{100} \times n + \frac{s_0}{100} \times (w+v) \times q$$

$$= q \times (w+v) \times \frac{(n\times s-(n-1)\times s_0)}{100}$$

- 假设每个月的用电量服从正负偏差概率相等的正态分布 N，则该月结算的偏差考核费用期望为

$$E(P) = \frac{P_{+}+P_{-}}{2} = \quad q \times (w+v) \times \frac{(n+1)}{2} \times \frac{(s-s_0)}{100}$$

偏差电量考核指标PDPI

- 则该特性下的偏差电量考核指标PDPI计算公式为

$$PDPI_i = \frac{\max\limits_i E(P)_i - E(P)_i}{\max\limits_i E(P)_i - \min\limits_i E(P)_i} = \frac{\max\limits_i B_i - B_i}{\max\limits_i B_i - \min\limits_i B_i}$$

- 其中

$$B_i = (n_i + 1)(s - s_i)$$

- 归一化使指标PDPI为[0,1]内小数，其中平均每月偏差考核费用最高的套餐PDPI 为0，最低的 PDPI 为1。

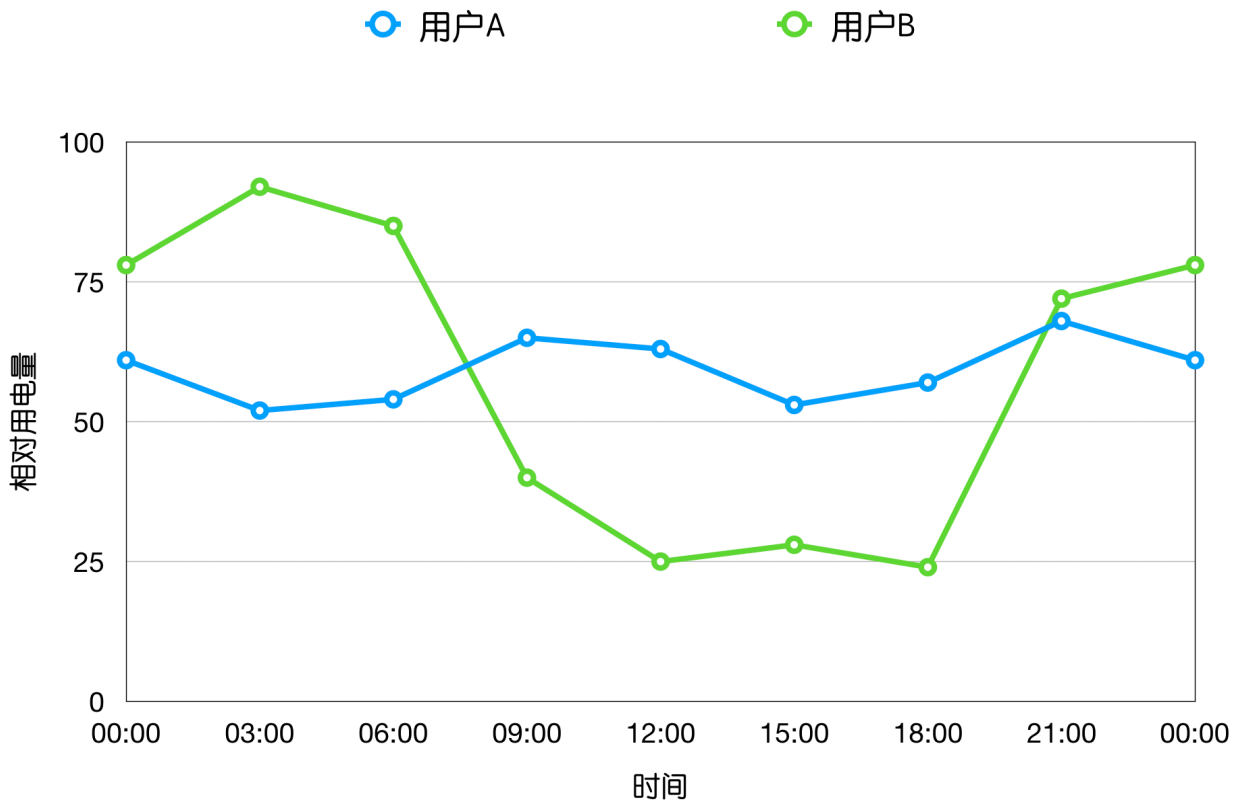
协议持续时间指标ADI

- 由于售电协议签署的时间愈长，用户的灵活度愈低，所承担用电情况发生变化的风险愈大，因此本模型简单地认为协议持续时间指标与持续时间T呈负相关，因此对方案 i 的协议 持续时间指标ADI的计算方法为

$$ADI_i = \frac{\min\limits_i T_i}{T_i}$$

案例分析

- 用户A和用户B的日相对用电量分布



案例分析

- 用户A为以某互联网公司为例的办公用户，A对电能可靠度有极高的需求因故障停电的损失极大，月度用电量比较平稳。此外结合支持多通道的区块链多边交易模型，通道内对小额电量基于智能合约的交易机制缓解了偏差电量考核的负担，因此在本模型中γ均可取较小值。日用电量分布如上页图中所示，每个月平均用电量为5000kWh，平均用电偏差为6%，相比低价A更看重电能可信赖度，因该组织发展稳定可签署长期协议。综上，用户A的关心度系数$(\alpha,\ \beta,\ \gamma,\ \delta)$可定为$(0.6,\ 0.2,\ 0.1,\ 0.1)$。
- 用户B为一个小型仓库管理和物流工厂，停电故障对工厂B造成的损失较低，相比电能可信赖度工厂B电价成本。由于工厂特点，用户B在夜间用电量较高参与物流自动化分配工作，而白天用电量较低。因小型工厂发展处于起步阶段，每个月平均用电量为7000kWh，平均用电偏差为15%，更希望可以签署灵活度较高的短期协议。综上，用户B的关心度系数$(\alpha,\ \beta,\ \gamma,\ \delta)$可定为$(0.15,\ 0.5,\ 0.1,\ 0.25)$。

案例分析

- **售电公司1**的电能来源为光伏，供电稳定性不高，平均每年因电能质量低而停电6次，平均每次停运持续时间5小时；其推出的电价套餐为单一电价套餐，因电能质量低导致每度电售价较低为0.57元；偏差电量月度考核，允许偏差范围为±5%，负偏差时偏差电量按照月度竞价价差的2倍进行结算；协议持续时间为半年。
- **售电公司2**的来源为水力发电，供电稳定性较高，平均每年因电能质量低而停电2次，平均每次停运持续时间6小时；其推出的电价套餐为按照每月的总用电量3000kWh以下0.60元/度，3000~6000kWh之间0.57元/度，6000kWh以上0.54元/度的价格出售电能；偏差电量月度考核，允许偏差范围为±2%，负偏差时偏差电量按照月度竞价价差的3倍进行结算；协议持续时间为1年。
- **售电公司3**的来源为风力发电，供电稳定性一般，平均每年因电能质量低而停电3次，平均每次停运持续时间3小时；其推出的电价套餐为按照每天日间(06:00~18:00)电价0.62元/度，夜间(18:00~第二天06:00)电价0.54元/度；偏差电量月度考核，允许偏差范围为±3%，负偏差时偏差电量按照月度竞价价差的3倍进行结算；协议持续时间为4个月。
- **售电公司4**的来源为煤炭发电，供电稳定性很高，平均每年因电能质量低而停电0次；其推出的电价套餐为单一电价套餐，因电能质量高导致每度电售价较高为0.61元；偏差电量月度考核，允许偏差范围为±3%，负偏差时偏差电量按照月度竞价价差的2倍进行结算;协议持续时间为半年。
- **售电公司5**的来源为风力发电，供电稳定性不高，平均每年因电能质量低而停电4次，平均每次停运持续时间5小时；其推出的电价套餐为单一电价套餐，每度电售价为0.59元；偏差电量的月度考核较宽松，允许偏差范围为±5%，负偏差时偏差电量按照月度竞价价差的 1倍进行结算；协议持续时间较短为2个月。

案例分析

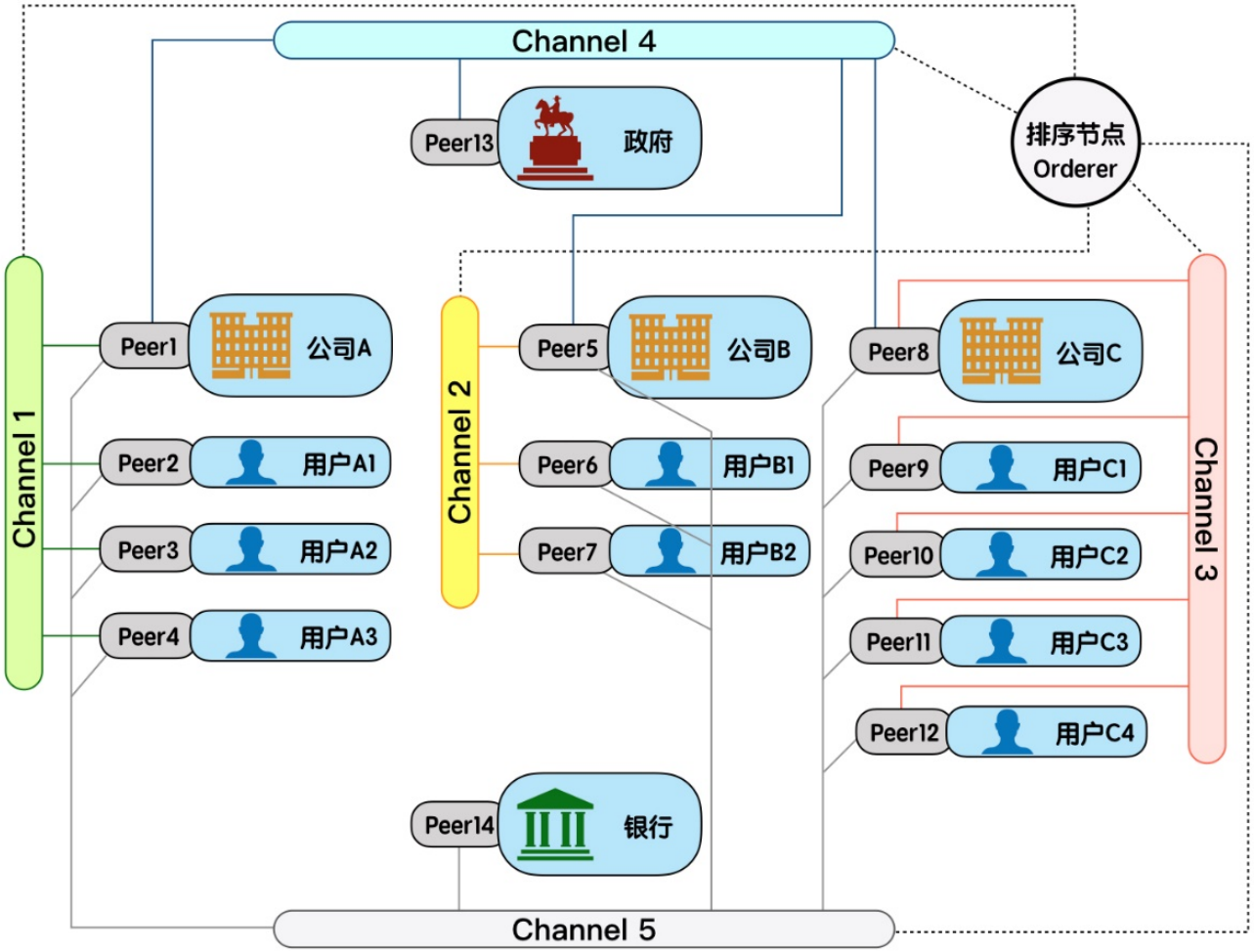
- 用户A与用户B对5家售电公司的用电协议打分表

用户-售电公司	PSRI	SPI	PDPI	API	*Score*
A-1	0	1	0.93	0.33	0.326
A-2	0.60	0.55	0	0.17	0.487
A-3	0.70	0.75	0.29	0.50	0.649
A-4	1	0	0.50	0.33	0.683
A-5	0.33	0.50	1	1	0.498
B-1	0	0.78	0.69	0.33	0.5415
B-2	0.60	0.68	0	0.17	0.4725
B-3	0.70	1	0.13	0.50	0.743
B-4	1	0	0.50	0.33	0.2825
B-5	0.33	0.43	1	1	0.6145

- 最终用户A选择与售电公司4签署协议，用户B选择与售电公司3签署协议。

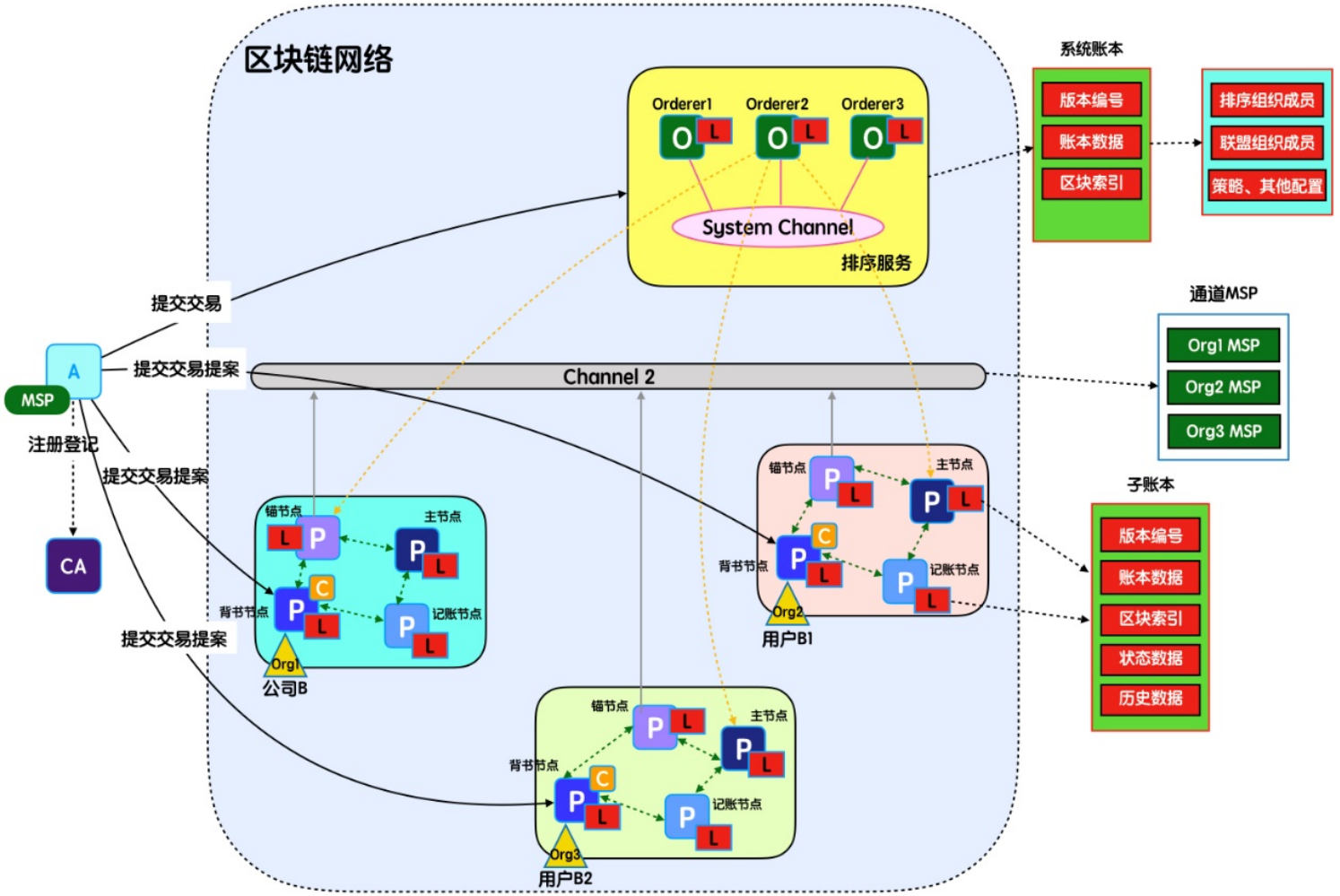
目录 Contents

支持多通道的区块链多边交易模型

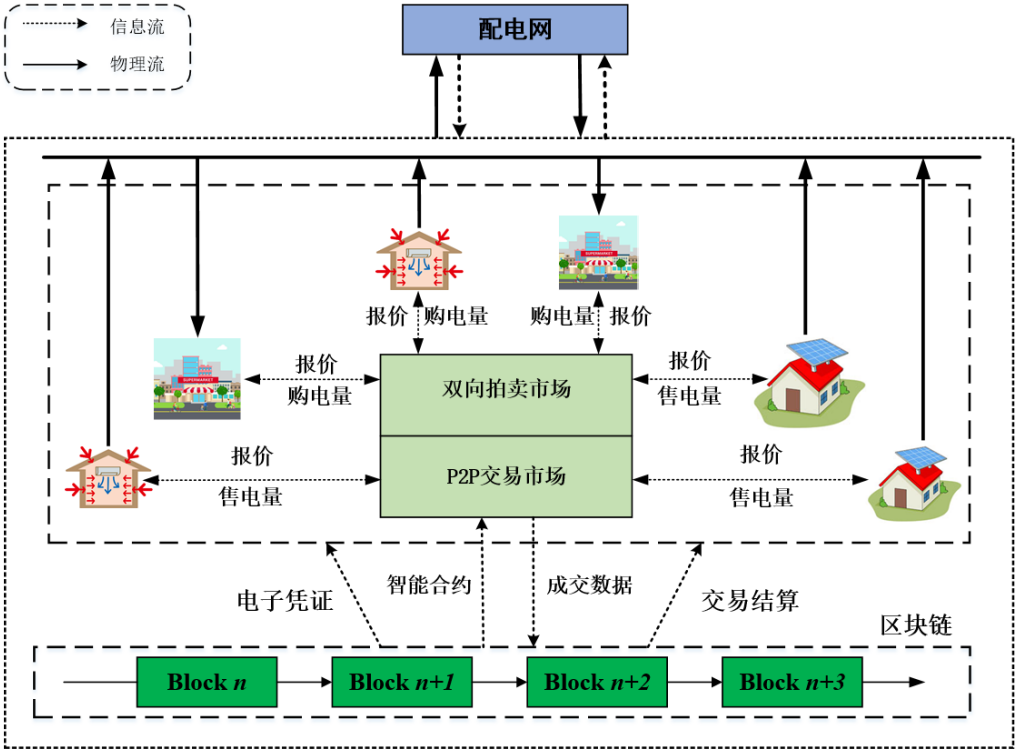


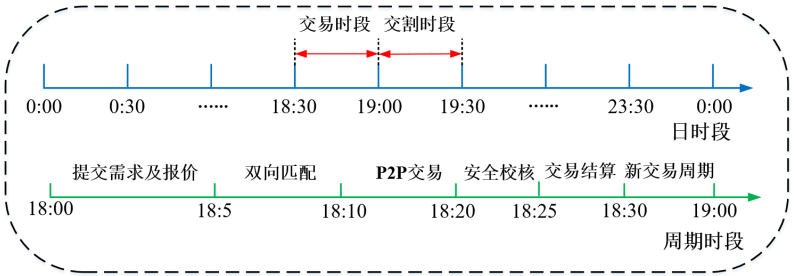
- ✓ **通道(Channel)**：一个在两个或多个特定网络成员间的专门以私人和机密的交易为目的而建立的私有“子网络”。
- ✓ **一个通道中包含**：成员(组织)、每个成员的锚节点、 共享帐本、链码、应用程序和排序服务节点。
- ✓ **节点(Peer)**：存放区块链数据的节点，主要负责通过执行链码(Chaincode)实现对账本的读写操作。
- ✓ **排序节点(Orderer)**：排序服务节点接收包含背书签名的交易，对未打包的交易进行排序生成区块，并广播给Peer节点。

区块链网络细节


区块链网络
Orderer1
Orderer2
Orderer3
System Channel
排序服务
系统账本
版本编号
账本数据
区块索引
排序组织成员
联盟组织成员
策略、其他配置
通道MSP
Org1 MSP
Org2 MSP
Org3 MSP
提交交易
A
MSP
注册登记
CA
提交交易提案
Channel 2
锚节点
主节点
背书节点
记账节点
Org1
公司B
Org2
用户B1
Org3
用户B2
子账本
版本编号
账本数据
区块索引
状态数据
历史数据

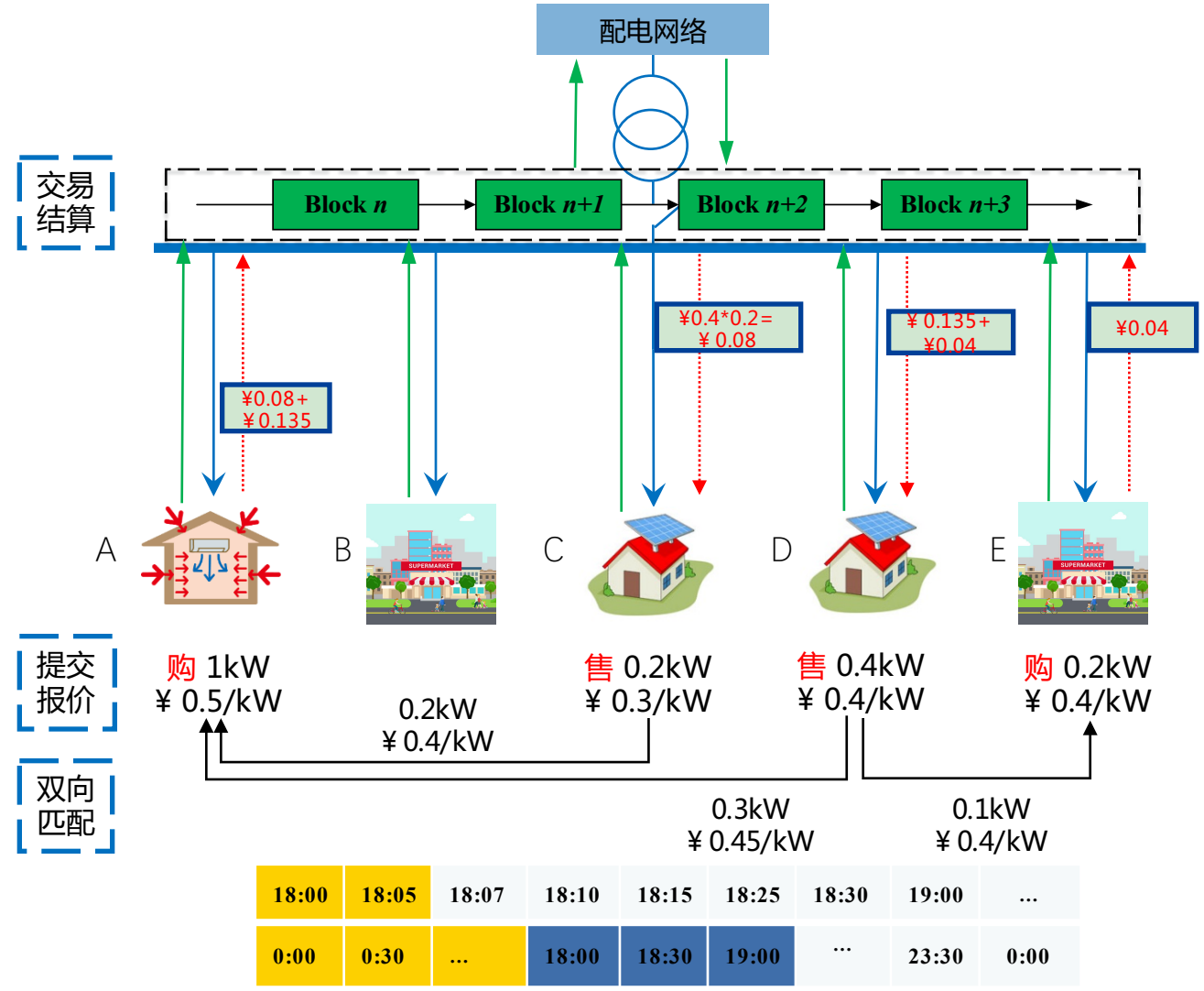
通道内去中心化的电力余量交易机制



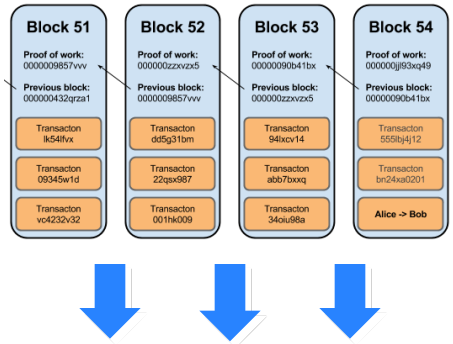


- 基于双向拍卖与P2P交易的电力余量交易机制。将双向拍卖及P2P市场交易机制作为激励手段，促进园区内电力产消者的自主高效余量交易
- 基于区块链的电力余量交易技术。将区块链作为协调级，解决电力余量交易的信任、监管、安全、透明性问题

电力余量双向拍卖交易流程



交易协调者：
各通道内成员共同维护的区块链



电能余量交易投标

双向拍卖匹配

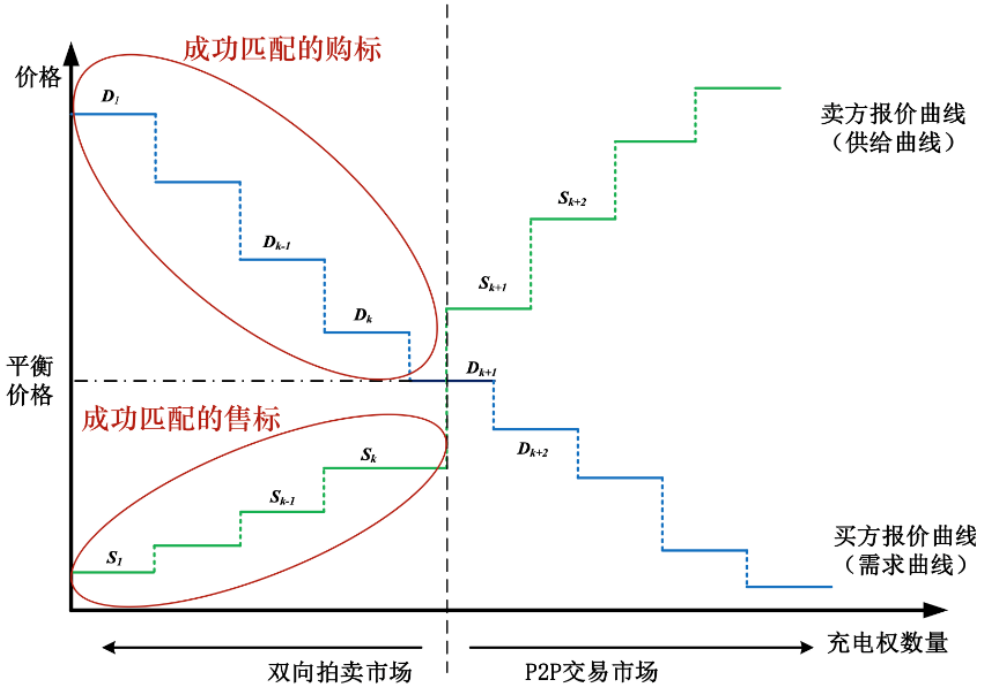
上报电力交易信息

安全校核

区块链进行交易结算

电力余量P2P交易

电力交易的两种机制



P2P交易的三种交易行为

- **限价交易**：买方/卖方指定成交价格及电量，出现大于等于该价格的卖方/买方报价则成交，价格取为两者报价的平均值
- **市价交易**：买方/卖方价格不指定但电量指定，以当前市场报价中最优买方/卖方报价成交
- **撤单**：放弃电能的购买/出售，将自己的报价信息清除

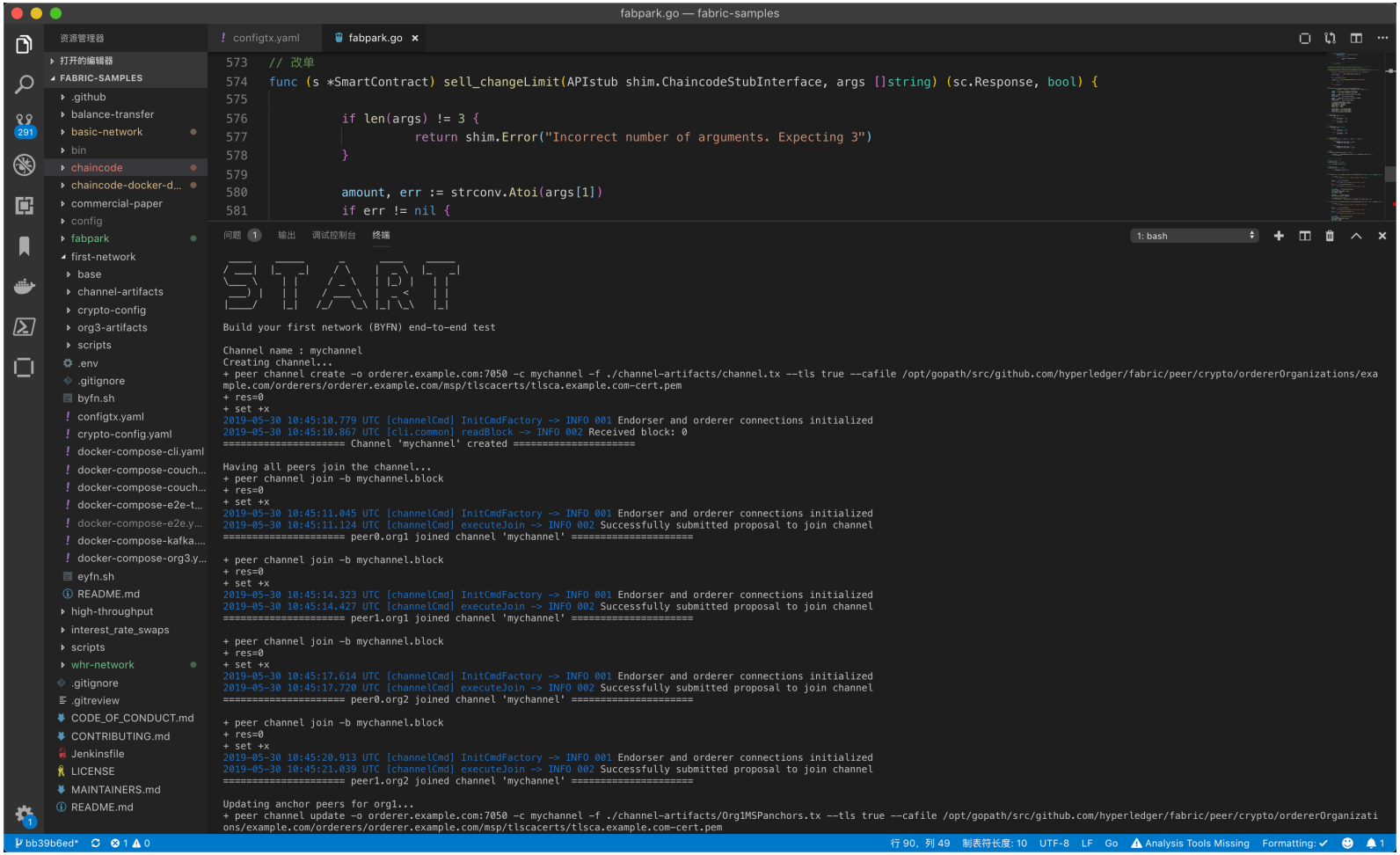
目录 Contents

基于Hyperledger Fabric的分布式账本与智能合约测试

- 测试过程分别为生成初始区块、生成应用通道的配置信息、生成锚节点配置更新文件、操作网络、创建和加入通道、进入Docker容器、创建通道、加入通道、安装链码（智能合约）、实例化链码、查询用户信息、交易完成及更新用户电量和余额的过程，最终清理网络。
- 测试操作系统为macOS Mojave 10.14。

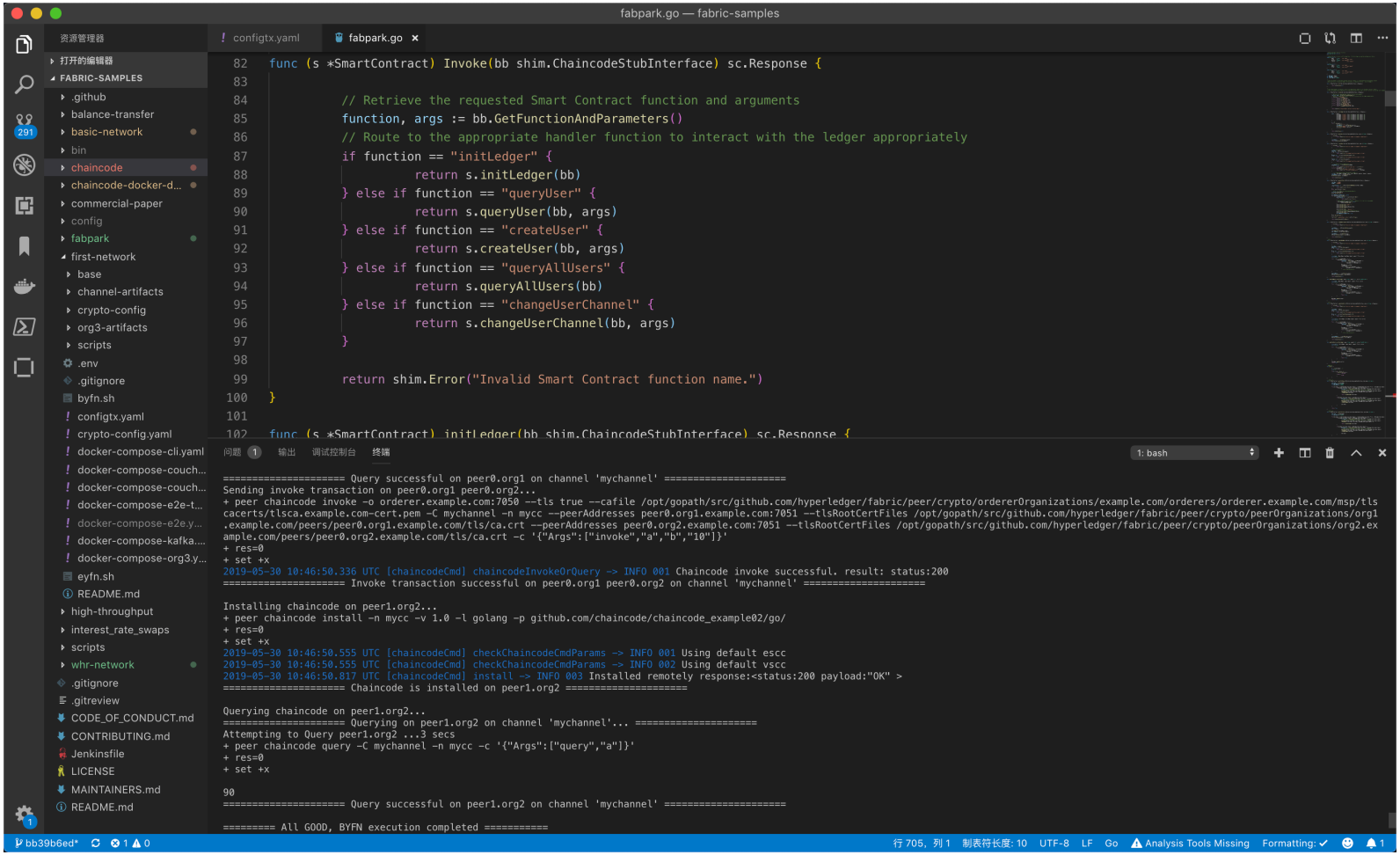
基于Hyperledger Fabric的分布式账本与智能合约测试

- Hyperledger Fabric创建并加入通道过程的终端响应



基于Hyperledger Fabric的分布式账本与智能合约测试

- 在Peer节点上实例化链码及查询成员信息过程的终端响应



测试结果

- 双向拍卖投标和竞标参数

用户名称	购买数量/(kW•h)	卖出数量/(kW•h)	报价/(token/kW•h)
A	—	76	36
B	125	—	22
C	159	—	28
D	—	131	20
E	72	—	18
F	—	145	16

- 双向拍卖竞标结果

用户名称	成交价/(token/kW•h)	中标者	中标数量/(kW•h)	中标收益/(token)	结余/(kW•h)
A	—	—	—	—	76
B	21	D	117	−2457	8
C	22	F	145	−3190	0
	24	D	14	−336	
D	24	C	14	336	0
	21	B	117	2457	
E	—	—	—	—	72
F	22	C	145	3190	0

测试结果

- P2P交易阶段中的交易行为与成交结果

用户名称	交易行为	中标者	中标数量 /(kW•h)	中标收益 /(token)
A	调整招标价格到 20 token/ kW•h 挂单出售 76kW•h	E	72	1440
B	剩余 8 kW•h 撤单	—	0	0
C	—	—	0	0
D	—	—	0	0
E	市价收购 76kW•h	A	72	−1440
F	—	—	0	0

测试结果

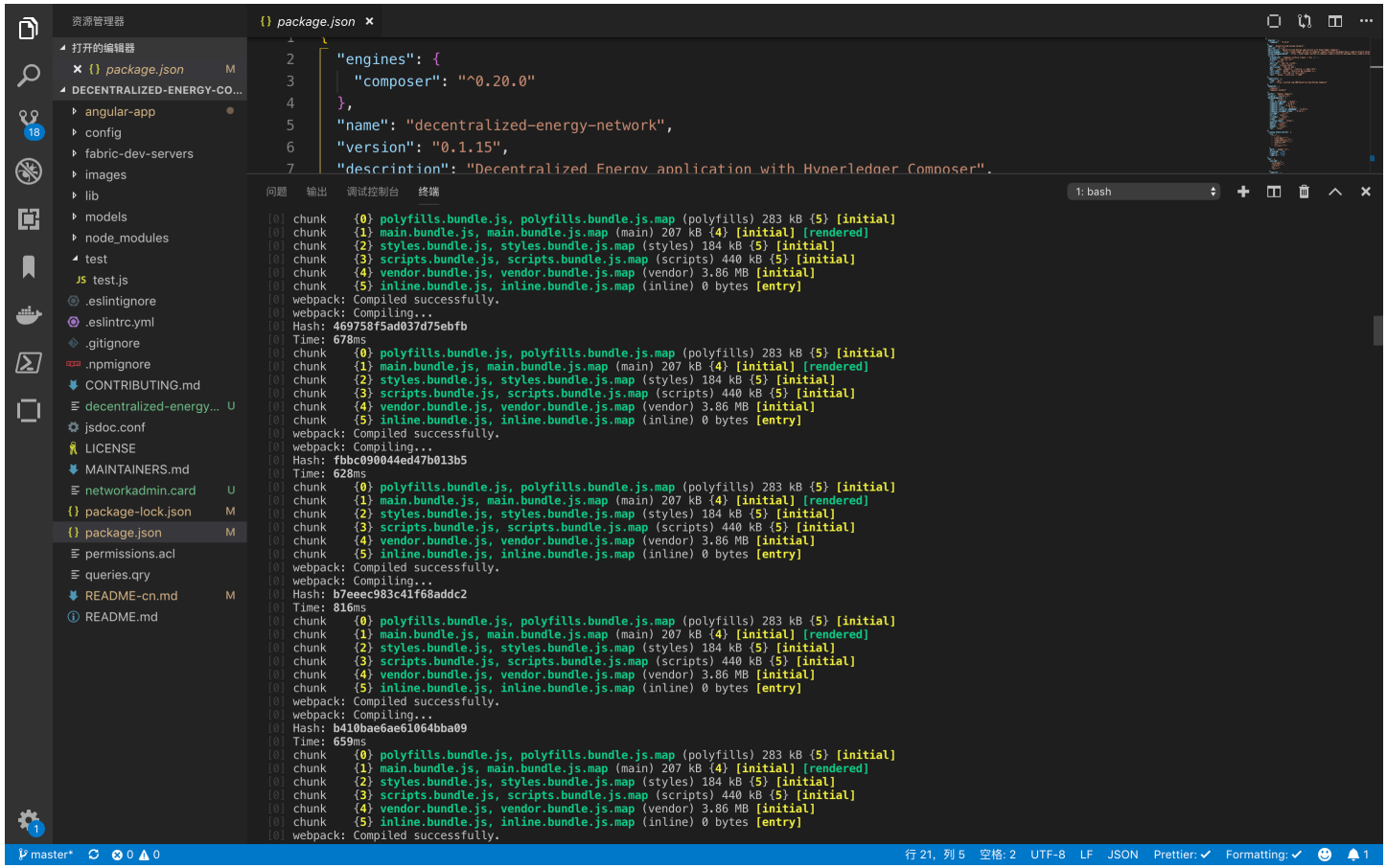
- 各成员交易完成后的收益结算

用户名称	购买数量/(kW•h)	卖出数量/(kW•h)	收益结算/(token/kW•h)
A	—	72	1440
B	117	—	-2457
C	159	—	-3526
D	—	131	2793
E	72	—	-1440
F	—	145	3190

- 通过区块链能够对数字资产展开交易结算的特性，将电能作为数字资产所带来的经济激励可以促进通道内包含售电公司在内成员的分散自主决策，将用电协议外的电量需求或剩余通过智能合约的执行参与到小额的交易结算中。实现自身效益最大化，完成了帕累托改进。

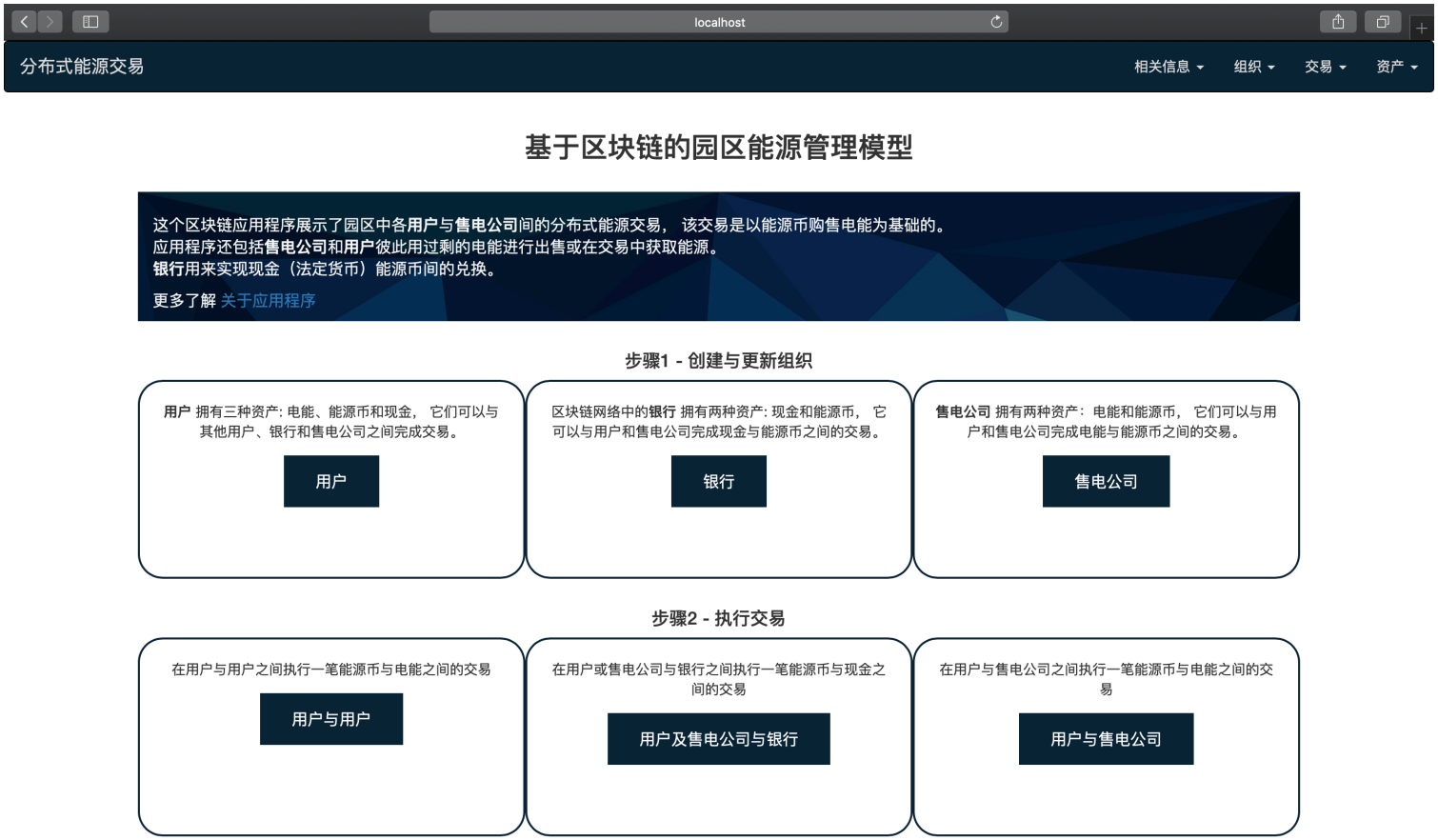
基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用运行终端页面图，应用程序在http://localhost:4200位置运行



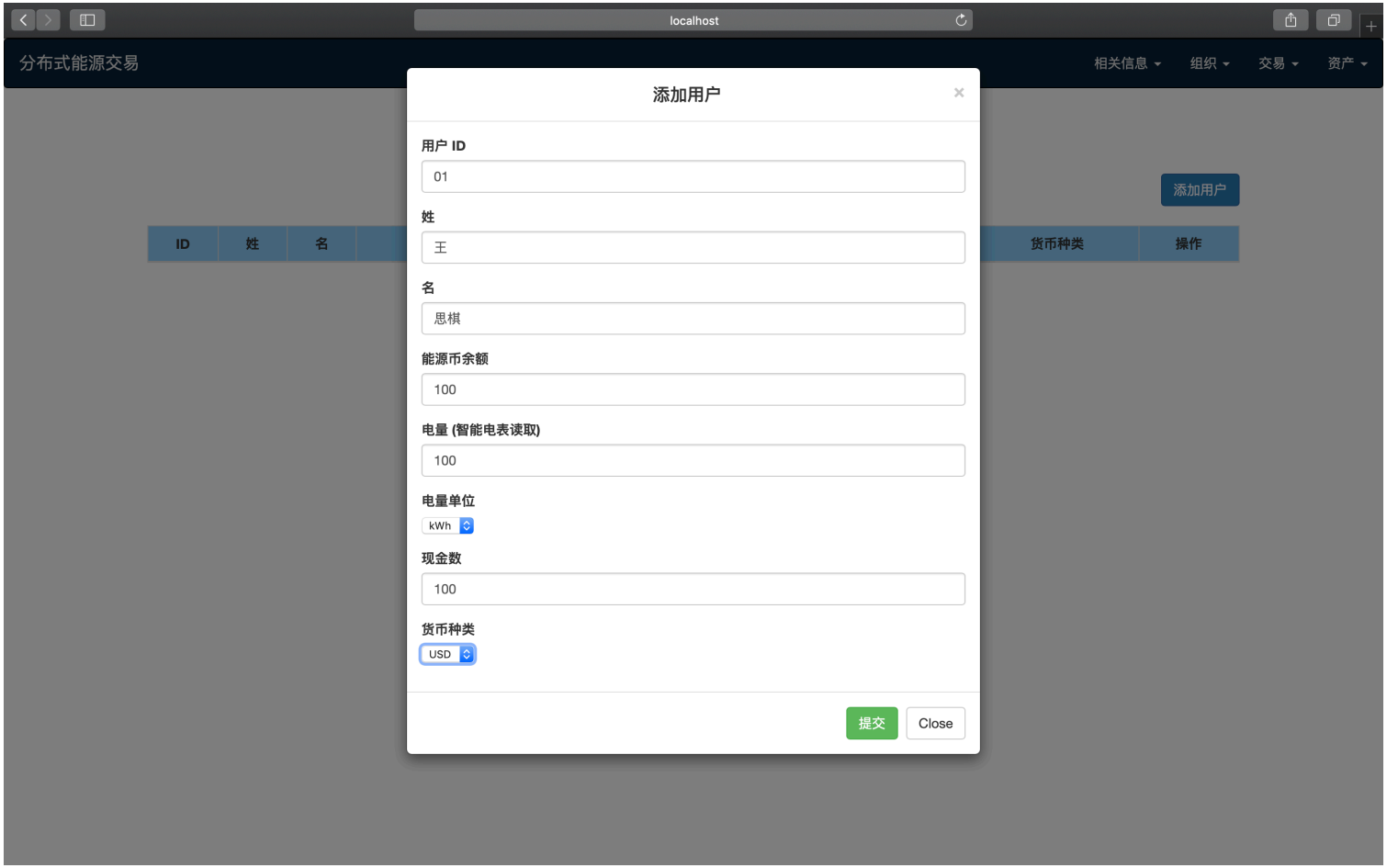
基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 应用网页主界面



基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 添加区块链中的组织成员



基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 发起交易（用户与用户、用户与售电公司、用户及售电公司与银行）

基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 组织成员管理界面（用户、售电公司、银行）

基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 资产管理界面（能源币、现金、电能）

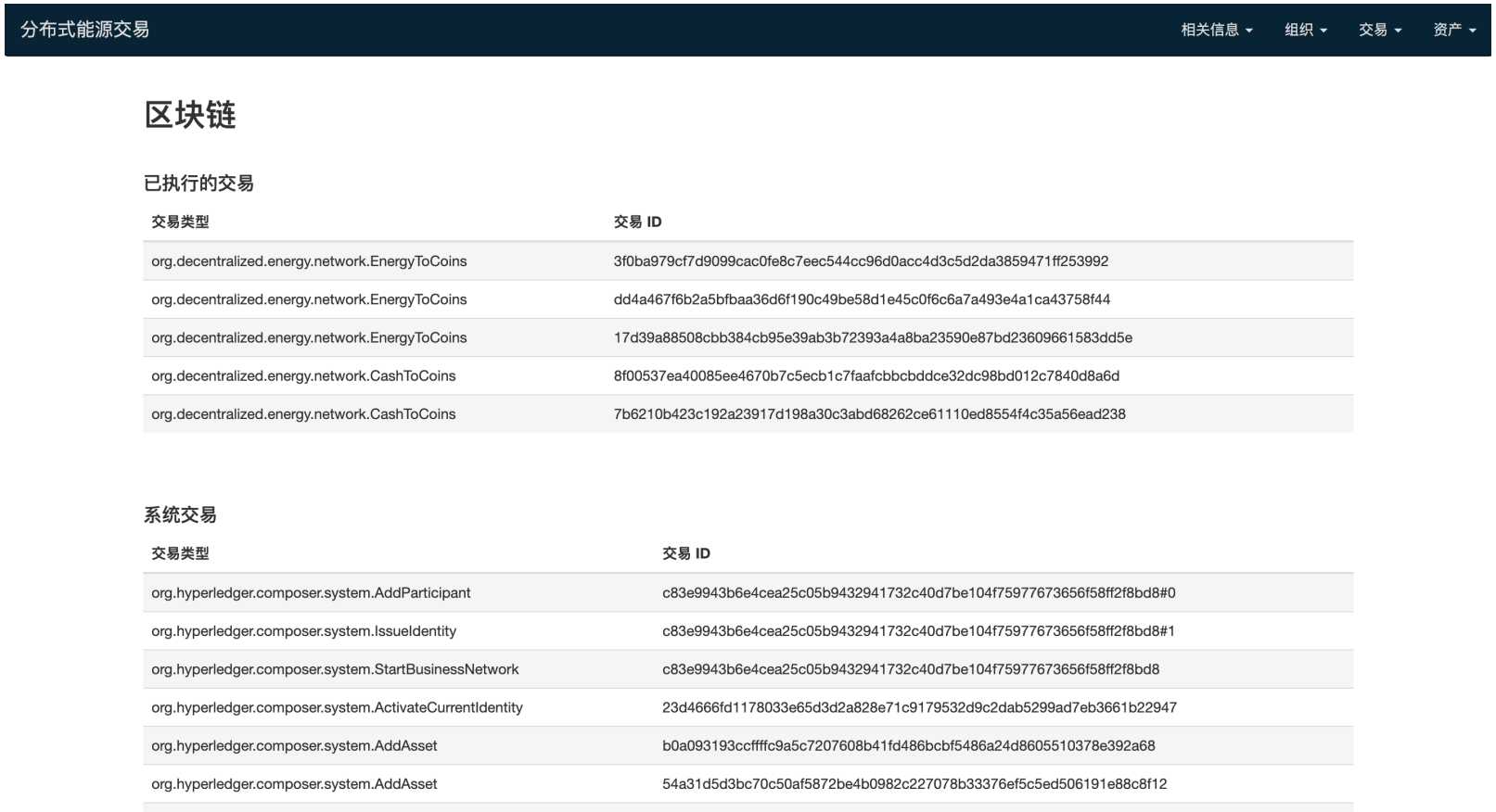
分布式能源交易 相关信息 组织 交易 资产

能源币资产

能源币 ID	所有者 ID	所有者属性	值
CO_0001	0001	Resident	209
CO_001	001	Bank	10000
CO_01	01	Resident	181
CO_02	02	Resident	50
CO_111	111	Resident	50
CO_123	123	UtilityCompany	1000
CO_222	222	Bank	10000
CO_567	567	Bank	10000
CO_589	589	Bank	800
CO_789	789	UtilityCompany	100
CO_987	987	UtilityCompany	210

基于Hyperledger Composer的分布式电力管理应用开发

- 区块链交易信息管理界面



总结与展望

本文创新点

- 本文是首个利用Hyperledger平台实现的分布式园区能源交易
- 本文提出了首个使用多通道的区块链模型，提升了通道间交易信息的私密性、通道内交易的灵活性
- 为用户如何选择最适合的售电公司设计了决策评价模型
- 完成了具备园区分布式电力管理功能的可视化界面

未来工作展望

- 真实场景下售电公司和用户在通道内不应视为无差异的个体
- 真实的电力套餐价值评估情景需要更全面的数据调查和模型计算

谢谢聆听！

学生：王思棋　　学号：5150219102 71