

# 基于区块链的能源互联网中的 负荷控制及电量交易研究

(申请清华大学工程硕士专业学位论文)

培 养 单 位 : 自 动 化 系

工 程 领 域 : 控 制 工 程

申 请 人 : 尤 海 霞

指 导 教 师 : 曹 军 威 研 究 员

联 合 指 导 教 师 : 袁 仲 达 高 级 工 程 师

二〇二〇年七月

基于区块链的能源互联网中的负荷控制及电量交易研究

尤海霞

# **Research on Load Control and Electricity Trading in Energy Internet Based on Blockchain**

Thesis Submitted to

**Tsinghua University**

in partial fulfillment of the requirement

for the professional degree of

**Master of Engineering**

by

**You Haixia**

**(Control Engineering)**

Thesis Supervisor: Professor Cao Junwei

Associate Supervisor: Senior Engineer Yuan Zhongda

**July, 2020**



# 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：(1) 已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；(2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

**(保密的论文在解密后应遵守此规定)**

作者签名： \_\_\_\_\_

导师签名： \_\_\_\_\_

日 期： \_\_\_\_\_

日 期： \_\_\_\_\_

## 摘 要

能源互联网是一种把信息互联技术与能源技术，特别是可再生能源融合起来，在能源供应、传输、交易和消费上进行深度变革，实现去中心化、绿色低碳、价值驱动和用能民主的新型能源网络。区块链技术又是目前解决去中心化问题的较为出色的解决方案，并且使用区块链技术还能做到去信任，防篡改，数据信息可追溯，这极大地降低了在能源传输和能源管理中的成本。区块链技术特点与能源互联网的理念具有相似性，因此，将区块链技术应用到能源领域中是一次有价值的尝试。本文的研究重点是针对能源互联网场景中新能源社区用电需求，实现一种基于分时双向拍卖机制的电量交易模型和民用负荷控制策略。本文的主要贡献如下：

- 本文在区块链相关基础理论的基础上，通过研究能源互联网价值传递模式与模型，提出并解决了一类区块链技术与能源互联网的融合方式问题。通过分析能源互联网的架构特点、技术和价值属性，提出了能源互联网价值传递模式，以及在能源互联微网中的传递模型。
- 本文提出了一种基于智能合约的民用负荷控制策略，将用户负荷分为可转移负荷和不可转移负荷，通过管理和改变可转移负荷，即转移在用电高峰时段的负荷，以期达到减少购电费用的目的。
- 本文提出了一种基于分时双向拍卖定价机制和区块链的点对点电量交易模型与策略，分时电价有助于用户转移用电高峰时段的负荷，达到削峰填谷，保护电网安全稳定运行的目的，同时，出于最大化用户之间交易电量的目的，给出了一种交易匹配策略。

**关键词：**能源互联网；区块链；电量交易；负荷控制；Hyperledger Fabric

## Abstract

Energy Internet is a new type of energy network that integrates information interconnection technology with energy technology, especially with respect to renewable energy, and makes profound changes in energy supply, transmission, transaction and consumption, to realize decentralization, green and low-carbon, and value-driven and energy-using democracy. Blockchain technology is also an excellent solution to achieve decentralization at present. Besides, it can guarantee trusted, tamper-proof and traceable data information by using blockchain technology, which greatly reduces the cost in energy transmission and energy management. Characteristics of blockchain technology are similar to the concept of Energy Internet. Therefore, it is a valuable attempt to apply blockchain technology to the field of energy. This work is to implement an electricity trading and residential load control strategy based on time-sharing double auction mechanism for the energy demand of new energy communities in the Energy Internet scenario. The main contribution of this work is as follows:

- Based on the relevant basic theories of blockchain, this work proposes and solves a type of integration of blockchain technology and Energy Internet by studying the Energy Internet value transfer pattern and model. By analyzing the architectural characteristics, techniques and value attributes of Energy Internet, the Energy Internet value transfer pattern and the transfer model in the energy interconnection microgrid are proposed.
- This work proposes a residential load control strategy based on smart contract, which divides user loads into transferable loads and non-transferable loads. By managing and changing the transferable loads, that is, shifting the loads during peak power consumption, with a view to reducing the cost of electricity purchase.
- This work proposes a peer-to-peer electricity trading model and strategy based on time-sharing double auction pricing mechanism and blockchain. Time-sharing electricity price helps users to shift the load of peak electricity consumption period, achieve peak cut and fill valley, and protect the power grid for the purpose of safe and stable operation. At the same time, for the purpose of maximizing traded electricity amount between users, a transaction matching strategy is given.

**Key Words:** Energy Internet; blockchain; electricity trading; load control; Hyperledger Fabric

## 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 课题背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究水平综述 .....	2
1.3 论文研究内容及目标 .....	4
1.4 论文的组织结构 .....	5
1.5 本章小结 .....	7
第 2 章 区块链技术与能源互联网 .....	8
2.1 区块链技术概述 .....	8
2.1.1 区块链数据结构 .....	8
2.1.2 区块链类型 .....	9
2.1.3 区块链平台 .....	9
2.2 能源互联网价值传递模式及与区块链技术融合分析 .....	11
2.2.1 能源互联网的价值传递模式 .....	12
2.2.2 能源互联微网中的价值传递模型 .....	14
2.2.3 能源区块链与能源互联网价值传递 .....	16
2.3 实验环境搭建 .....	18
2.4 性能测试 .....	24
2.4.1 Hyperledger Caliper 测试环境搭建 .....	24
2.4.2 测试结果 .....	25
2.5 本章小节 .....	26
第 3 章 居民负荷控制策略研究与分析 .....	27
3.1 本章引论 .....	27
3.2 负荷控制模型介绍与分析 .....	27
3.2.1 系统模型 .....	27
3.2.2 目标函数 .....	30
3.3 实验仿真及分析 .....	32
3.4 本章小节 .....	33
第 4 章 一种点对点电量交易模型与分析 .....	36
4.1 本章引论 .....	36
4.2 基于区块链的电量交易模式及策略 .....	37

4.2.1 总体架构.....	37
4.2.2 分时双向拍卖机制.....	38
4.3 电量交易智能合约.....	39
4.3.1 报价合约.....	40
4.3.2 定价合约.....	40
4.3.3 交易匹配合约.....	42
4.4 实验仿真及分析.....	44
4.4.1 场景设计及参数设置.....	44
4.4.2 交易结果分析.....	49
4.4.3 双向拍卖对比.....	51
4.5 本章小节.....	53
第 5 章 总结与展望.....	54
5.1 论文工作总结.....	54
5.2 研究工作展望.....	54
参考文献.....	56
致 谢.....	59
声 明.....	61
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果.....	62

## 第1章 引言

### 1.1 课题背景及意义

随着传统能源的日益枯竭，越来越多的研究组织开始关注各种新能源研究<sup>[1-2]</sup>。随着新能源领域相关技术的发展，以微网（microgrid<sup>[3]</sup>）为基础的分布式能源解决方案成为发展和利用新能源的必要方式。同时，人们也在探索新的技术，新的理念来解决能源体系现如今存在的问题，而能源互联网（Energy Internet<sup>[4]</sup>）正是解决能源领域固有问题的一种新型解决方案，是一种新思路。能源互联网是把原有电力能源系统和现有的一些技术结合起来而形成的产物，如控制技术，计算机技术，现代通信技术等。能源互联网将现有的与之相关的系统连接起来，如交通网络、天然气网络、电力输送网络等。能源互联网也将各种能源参与主体，能源设备，智能电器等能源领域必不可少的元素有机的结合起来。

区块链<sup>[5]</sup>技术也是目前新兴的一项技术，由于其独特的特点受到了广泛关注，其核心的思想包括去中心化，去信任，实现分布式存储，集体维护，匿名等。区块链技术可以有效地解决传统中心机制的管理维护成本高，易于攻击，信任度低，效率低等问题。并且，能源互联网理念与区块链技术特点具有一定的内在一致性，都注重分布式管理，互联共享和安全高效。区块链技术有望在能源互联网的建设和发展中发挥重要作用。

能源互联网的目的是为了提供在能源领域便利且安全高效的运作模式，如实现可信、自动、快速的能源交易模式。本文的研究重点之一在于实现一种安全、可信、灵活的点对点电量交易模式，由于在能源互联网场景，交易的电量相较于传统的中心化的交易模式会变小，交易的频率也会相应变高，如果还采用传统的中心化机制，势必会增加交易管理成本，而且也无法保障用户的隐私安全，因此，基于区块链技术来实现一个无需第三方参与的点对点电量交易系统是一个有着巨大潜力的尝试。智能家居和智慧能源是能源互联网中不可或缺的两个重要方面，为了保护电网安全稳定运行和降低电力生产和输送成本，在满足自己用电需求的情况下，城市家庭用户如何有效地管理和控制自己的用电负荷是其中的一个重要研究方向，本文研究重点之二在于研究区块链技术在城市居民用户用电需求管理和负荷控制中的作用和角色。

目前，关注度较高的区块链平台有比特币（Bitcoin<sup>①</sup>）系统，以太坊（Ethereum<sup>②</sup>）

---

① <https://www.bitcoin.com/>

② <https://www.ethereum.org/>

和超级账本 (Hyperledger Fabric<sup>①</sup>)。比特币是一种加密货币交易系统, 由于其共识过程需要消耗巨大的算力, 并且, 为了保证交易的安全与可靠, 交易吞吐量很低, 交易确认时间也较长, 平均为 1 小时, 因此并不适用于能源互联网中的能源交易。以太坊也属于公有链, 并且也存在着挖矿机制, Hyperledger Fabric 较之以以太坊有较大的优势, Hyperledger Fabric 没有自身的加密货币, 并且还有很完善的成员服务, 身份验证机制, 更加适合用在真实的生产环境中。因此, 本文主要利用 Hyperledger Fabric 来实现本文提出的方法和策略。

## 1.2 国内外研究水平综述

能源互联网是能源领域的研究热点与发展方向。里夫金在《第三次工业革命》<sup>[6]</sup>一书中描绘了一个未来能源互联网场景。能源互联网将为人们提供绿色、低碳、高效与共享的能源新理念<sup>[7]</sup>。

能源互联网是信息技术与能源技术深度融合的能源供给形态, 信息与能源基础设施一体化是能源互联网的核心特征之一<sup>[8]</sup>。对能源互联网的探索中, 比较典型的有: 查亚兵等人<sup>[9]</sup>围绕可再生能源大规模应用问题, 在能源互联网架构下提出了六项关键技术, 此外, 初步分析了六项关键技术所涉及的科学问题。曹军威等人<sup>[10]</sup>从信息技术和能源领域基础设施层面分析了能源互联网的特征和理念。孙宏斌等人<sup>[11]</sup>从能源网络和互联网的视角分析了能源互联网的建设目标、基本特征和价值理念。王冰玉等人<sup>[12]</sup>提出一种基于信息物理融合的能源互联网模型, 考虑网络中信息系统与物理系统时空异构性和网络中量测数据不同步的问题, 表征了能源互联网优化控制中信息物理的交互过程。张勇军等人<sup>[13]</sup>分析了智能电网与能源网融合背景下, 能源互联网所构建的新一代信息能源系统 (CES) 的形态特征。林为民等人<sup>[14]</sup>提出一种能源互联网的通信架构, 并介绍了电网信息物理融合系统、感知控制、通信传输、数据集成、信息处理、安全保障等技术。

上述研究主要从信息与能源融合的角度研究了能源互联网的架构特征与关键技术。传统的能源供给形态是集中式供应, 供能主体在能源系统中起主导作用<sup>[15-16]</sup>。但是, 在能源互联网架构下, 用能主体有了更多的能源消费选择, 通过能源互联网的交易和运营管理, 可实现逆向的市场驱动型能源消费方式<sup>[17-18]</sup>, 这使得能源互联网的价值传递多样化, 更为丰富。能源互联网的整体架构可以分为能源层、信息层、业务层和价值层。以价值为导向, 通过业务层、信息层和能源层的相互配合, 实现能源互联网能量的精确调度与高效利用, 解决现有的能源和环境危机, 保障社会经济的正常运行<sup>[19-20]</sup>。

<sup>①</sup> <https://cn.hyperledger.org/projects/fabric/>

区块链技术是能源互联网信息技术属性的重要方面。区块链作为一种去中心化的分布式存储的对等可信网络，由于其独特的设计理念和网络架构<sup>[21-22]</sup>，可以解决目前中心机构系统存在的问题，将其应用到能源互联网中，是一种必然的发展趋势。一些国内专家已经展开了区块链技术在能源互联网中的技术框架和典型应用研究，全面阐述了区块链技术在能源互联网中的发展前景<sup>[23-24]</sup>。Andoni M<sup>[25]</sup>等对区块链技术在能源领域的应用进行了一个系统的综述，从项目范畴，实施平台和使用的分布式共识算法角度归类分析了大约 140 个现有的能源领域的区块链项目，同时还讨论了区块链对于能源应用的机遇，潜在的挑战和限制。

点对点分布式能源交易是指在没有一个中心化的机构参与的前提下，能源用户之间可以直接地进行交易。在能源互联网场景中，新型能源用户已不再是传统意义的单一化的能源消费者了，而是既可以购买能源，又可以产能的产消者（prosumer）了。能源产消者可以自己生产电能，比如说光伏发电，风能等。他们可以将自己剩余的电能卖给电网中的其他能源消费者来获得收益。

目前，已有越来越多的研究人员在研究基于区块链技术的分布式点对点能源交易。Morstyn T 等人<sup>[26]</sup>认为虚拟电厂（virtual power plants, VPP）和点对点（peer-to-peer, P2P）能源交易为电力产消者和电网提供了不同的价值来源，并且分别对其为未来产消者电力市场提出了不同的潜在结构。同时，智能合约可以为管理和执行能源交易提供一个安全的去中心化的协议，因此可以利用区块链的公有链搭建能源交易平台。Kang E S 等人<sup>[27]</sup>也提出了一个安全且可自动执行的分散式可再生能源交易平台。Alcarria R 等人<sup>[28]</sup>针对智能社区提出了一种基于区块链技术的安全可信的授权系统，该系统可以使得社区居民安全地访问消费者信息和进行资源消耗的监控和协调。Li Z 等人<sup>[29]</sup>提出了一个基于联盟链的安全的能源交易系统，并且可以将其应用到工业物联网（Industrial Internet of Things, IIoT）中的不同 P2P 能源交易场景中，如微电网，能源收集网络，V2G（vehicle-to-grid）等，此外，为了减少能源区块链交易确认延迟带来的交易限制，他们还提出了一种基于信用的支付方案来支持快速、频繁的能源交易。

由于在未来能源互联网场景中能源主体的多元化以及能源形式的多样化，用户需求响应在实现电力供需平衡，降低电能生产成本和提高能源利用率等方面的作用越来越明显，因此有必要开展这方面的研究工作，而区块链自身的技术特点使得其能很好的应用在需求响应业务中。需求响应或需求侧管理是指通过经济激励机制或价格因素刺激电力用户能够转移用电高峰时刻的电力需求，达到削峰填谷的目的，以期来维护电网安群稳定的运行状态。目前，在学术研究领域，已经开展了很多这方面的研究工作。Pop C 等人<sup>[30]</sup>提出了一种在智能电网场景下管理需

求响应业务的去中心化的解决方案，其中，业务逻辑由区块链智能合约实现，以一种经济激励的方式来调节用户电力需求，对于能源产出是根据当时的天气数据结合光伏、风电发电的一些相关的参数计算得出，并且根据电能消耗量的历史记录来制定一个电能需求基准，将其对计算得出的电能产出作比较，对于做出贡献的电力用户给出一定的经济补偿，反之则实行一定的经济惩罚。李彬等人<sup>[31]</sup>从需求响应业务的角度出发，提出了区块链技术在需求响应业务中的应用方案。杨晓东等人<sup>[32]</sup>则基于区块链技术，提出了一种适用于能源局域网储能系统的自动需求响应策略。武赓等人<sup>[33]</sup>提出了一种基于区块链技术的综合需求侧响应交易框架。Ghosh A 等人<sup>[34]</sup>提出了一个需求响应模型，其中某一时刻的能源价格取决于所有消费者的总需求。根据自己的用能需求，电能产消者必须选择他们想从电网或其他产消者处购买的电量，或他们想卖给其他产消者过剩能源的数量。其中，能源数量的设定借助一个区块链平台来实现。Inayat K 等人<sup>[35]</sup>提出了一种基于智能电网中的需求响应和高级计量基础设施安全性的分布式负载均衡交易框架。同时，采用了公用电网合同的方法来实现电网内的供需平衡，即引入了一个简单的奖励机制来激励消费者在用能高峰时刻减少使用电能。这个奖励机制是基于区块链的分布式工作量证明（proof-of-work, PoW）一致性算法实现的。Noor S 等人<sup>[36]</sup>提出了一种基于博弈论的电力需求侧管理模型，同时还考虑了在电能供应限制条件下如电力中断时的需求侧响应方式。文中还分析了三种不同类型用户（家庭用户，上班族以及大学生）的需求响应模式，此外，各种类型用户在是否有存储装置下的需求响应模式在文中也有比对分析。区块链技术则保证了该需求响应模型无缝和安全的实施。

在能源互联网方向，区块链技术的研究与应用仍处于小范围摸索实验阶段，目前国内外已有少数公司开始探索并实践区块链技术在能源互联网中的应用，如布鲁克林微电网项目、电动汽车充电项目、Filament 智能电网项目等。布鲁克林微电网项目，即 TransActive Grid 项目，该项目是由美国能源公司 LO3 Energy 与区块链创业公司 ConsenSys 共同开发完成的。TransActive Grid 是基于区块链平台以太坊实现的，居民可以通过屋顶太阳能发电将多余的电力卖给其他的居民，而不需要第三方的参与。

### 1.3 论文研究内容及目标

论文的研究目标是运用区块链技术来优化能源互联网中电量交易模型及民用负荷控制的策略，本论文的主要研究内容包括一种基于区块链技术的点对点电量交易模型和民用负荷控制策略研究。本课题的研究将主要从以下几个方面展开：

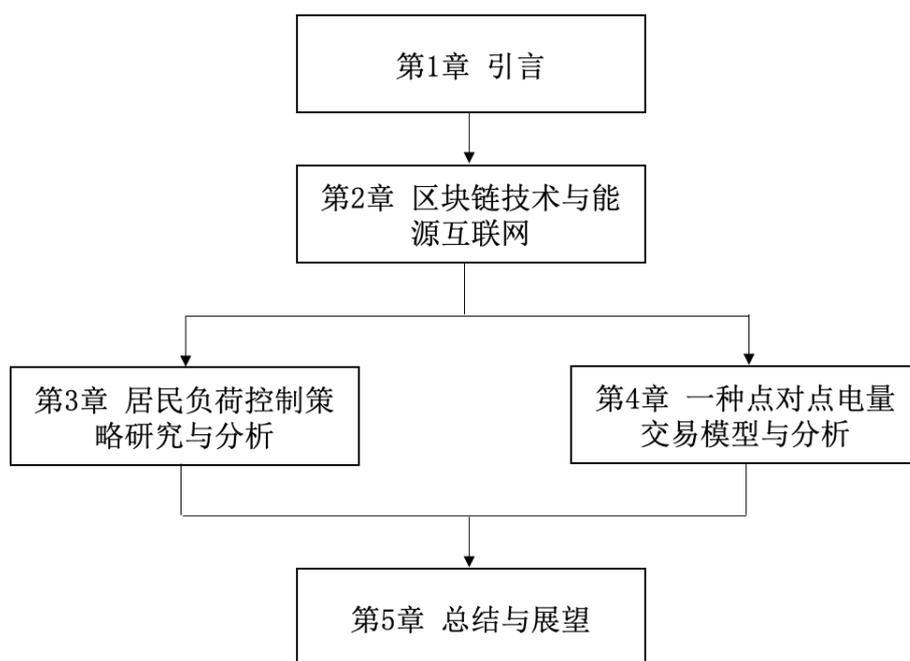


图 1.1 本文的结构

(1) 调研能源互联网研究现状和目前区块链技术在能源互联网能源中的应用实践，总结能源互联网中可以应用区块链技术的场景以及已有研究成果，通过研究能源互联网价值传递模式与模型，给出了能源区块链的定义和作用，提出并解决了一类区块链技术与能源互联网的融合方式问题；

(2) 针对多个城市居民用户，以降低用户用电成本和降低城市居民用电负荷的峰均比为目标，建立一个基于区块链技术的民用负荷控制模型；

(3) 通过分析现有电价定价策略和方法，同时借助区块链技术的特性来设计一个适用于能源互联网场景中新能源居民用户的定价机制与交易匹配规则，借助已有区块链平台 Hyperledger Fabric 搭建电量交易系统。

## 1.4 论文的组织结构

本文的研究重点在于，如何针对能源互联网场景中新能源社区用电需求，实现一种基于分时双向拍卖机制的电量交易模型和民用负荷控制策略。本文一共 5 章，论文的结构如图 1.1 所示，论文的技术路线如图 1.2 所示，就每章的主要内容总结如下：

第 1 章主要介绍了本课题的背景和研究意义，同时，调研分析了目前区块链技术在能源互联网领域应用研究现状，指出本课题的研究内容与重点。

第 2 章主要介绍了区块链技术相关理论，并且总结了目前区块链技术在能源互联网中的应用研究现状。重点概述了区块链在点对点分布式能源交易以及需求

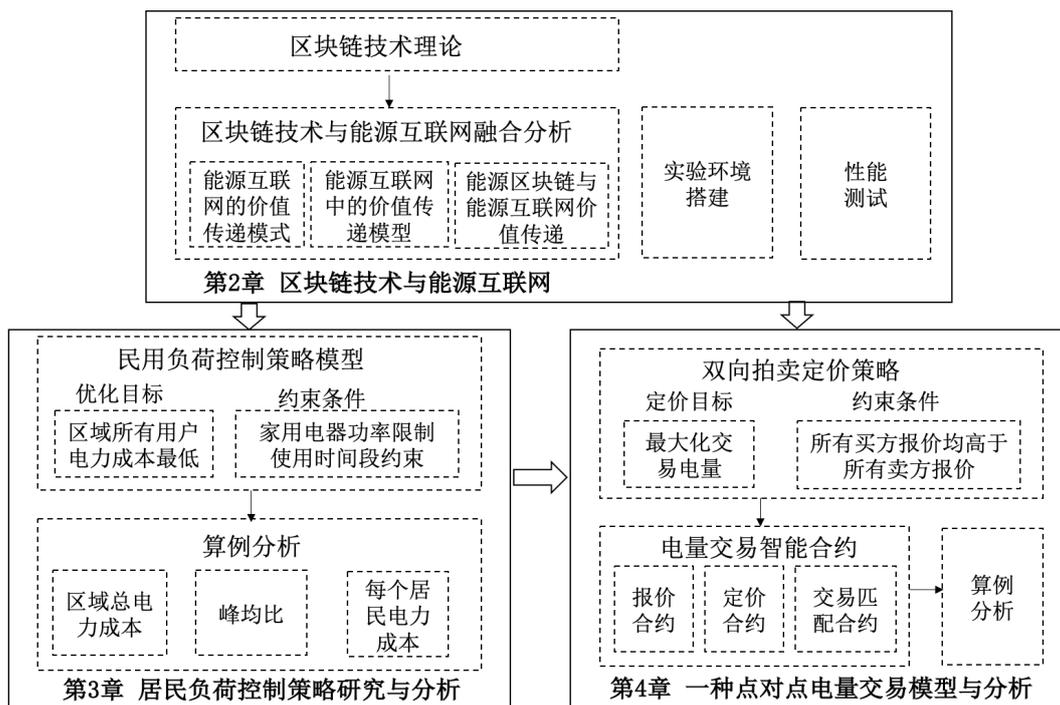


图 1.2 本文的技术路线

响应模型中的应用研究成果，为后文的研究做好理论准备。同时，研究了能源互联网价值传递模式与模型，给出了能源区块链的定义和作用，提出并解决了一类区块链技术与能源互联网的融合方式问题。

第 3 章提出了一种负荷控制策略，主要是关于城市居民的负荷控制策略，考虑到不同时段用电成本与该时段的用电负荷之间的关系，即在用电高峰时段，同样负荷情况下用电成本相应较高，用电低谷时段，同样负荷情况下用电成本相应较低的情况下，将用户负荷分为可转移负荷和不可转移负荷，通过管理和改变可转移负荷，即转移在用电高峰时段的负荷，以期达到削峰填谷和降低用电成本的目的。

第 4 章主要介绍了一种基于双向拍卖机制的点对点电量交易模型，以最大化每个时段的总成交量为目标，考虑到一天各个时段的不同用电需求，提出一种基于双向拍卖的分时定价策略，并介绍了具体的交易匹配规则，在此基础上利用区块链平台 Hyperledger Fabric 来搭建用于点对点电量交易的区块链网络仿真环境，通过仿真结果与比较分析，验证了本文提出的交易模型的可行性与适用性，并且通过与其他双向拍卖定价机制进行比较，分析得出本文提出的分时双向拍卖定价机制在相同的报价的情况下确实可以实现较大的成交量。

第 5 章简要地概括了本文的研究工作，并提出了本文研究中尚需解决的问题和未来可能的研究方向。

## 1.5 本章小结

本章主要介绍了以下内容：首先，在传统化石能源的日益枯竭的背景下，引入了能源互联网的概念，并分析了将区块链技术应用到能源互联网中的可能性和迫切性。然后，阐述了能源互联网研究现状以及区块链技术在能源互联网中的研究现状。最后，介绍了本论文主要的研究工作以及论文的组织结构。

## 第 2 章 区块链技术与能源互联网

### 2.1 区块链技术概述

区块链技术起源于中本聪在 2008 年所发表的论文《比特币：一种点对点电子现金系统》<sup>[37]</sup>一文中。严格来说，区块链不是一种新的技术，而是由多种已有技术（加密算法、分布式存储、共识算法、智能合约等技术）整合的结果。

区块链技术的核心特征包括去中心化、不可篡改、可追溯等。

**去中心化：**区块链由分布式网络节点组成，数据的记录与存储过程由网络节点共同完成，不再由单一固定节点操作，对于区块数据而言具有去中心化特征。

**不可篡改：**区块链技术使用了共识算法对数据进行合规性校验、结合数据哈希的链式结构和非固定时间的区块数据生成过程，使得区块链上数据具有非常高的抗攻击性，实现了数据的不可篡改。

**可追溯：**每次生成区块数据时，在区块头部均有生成次区块的时间戳，这些区块按生成的时间顺序依次链接，形成具有时间顺序的链式结构，具备可追溯能力。

#### 2.1.1 区块链数据结构

区块链技术采用了“区块+链”的数据结构，形成了当前“区块”到前一“区块”的链接，因此区块链技术定义了可以表达先后顺序的数据结构。区块链的数据结构如图 2.1 所示。同时区块链技术利用基于密码学的分布式协议构建端到端的网络，使得每一个节点的信息都能够被广播扩散到网络中的其他节点，且每一个节点都可以存储完整的信息。



图 2.1 区块链的数据结构

## 2.1.2 区块链类型

一般说来，区块链可分为私有链，联盟链，公有链三类。私有链是一个组织或一个企业内部的链，区块链读写权限被少数人所控制。

联盟链是由多个组织或多个团体共同维护的，进入区块链网络需要经过认证，获得许可方可进入，因此，允许进入网络的机制从某种意义上说已经算是对网络成员进行了一次安全检验，并且，为了维护自己的利益，存在作恶节点的概率较低。

公有链是指任何人都可加入的网络，随时可进可出，不受限制，因此，相比于联盟链，存在作恶节点的可能性相对而言就会更高。因此，为了保证安全，其对应的共识机制的设计就需要考虑作恶节点的存在，拿比特币系统来说，工作量证明（proof-of-work）就需要靠巨大的算力来保证网络的安全可靠。

## 2.1.3 区块链平台

### 2.1.3.1 比特币系统

区块链技术起源于比特币，比特币是一种加密货币。第一个区块也称为创世区块，由比特币的奠基者中本聪在2009年1月写的。创世区块中没有交易，数据头是由伦敦的一篇新闻报道组成的。比特币最小单位是1聪，1聪等于 $10^{-8}$ 比特币（BTC）。比特币来源于“挖矿”，即比特币的共识机制，工作量证明（Proof of work, PoW），所谓挖矿是指想要获得记账权的矿工需要做一道数学题，即寻找一个随机数字与现有区块做哈希运算，得到的结果需小于某一个特定的数，谁最先寻找到这个随机数，谁就能获得记账权，从而得到比特币奖励。而这个随机数不能通过计算获得，只能通过不断地尝试才能得到。而哈希运算的难度随着时间的变化会逐渐变大，因为随着计算机性能的提升，比特币系统全网的算力会不断变强，为保证10分钟出一个区块，难度会不断加大。比特币一个区块最多1M大小，大约包含4000笔交易。通常，生成3个区块后才能保证一笔交易确定完成。交易如果没有写入账本，交易会取消，对应的账户信息则会恢复到以前的状态。这种机制保证了比特币系统安全稳定的运行。

比特币中包含全节点和轻节点。全节点是指全账本，轻节点仅包含区块头和自己相关的交易。挖矿需要全部账本，因为挖矿需要验证，验证则需要知道相关交易中比特币的来源和去处。比特币中的奖励机制有两种，一种是区块奖励；二是交易费，任何交易的创造者都可以选择让交易的输出值比输入值小。在比特币网络中传播交易信息是需要成本的。每个节点传播交易信息，最后由一个矿工把这笔交易打包进一个区块，这些都是有代价的。设置交易费的目的是为了防止区

区块链被大量小额交易“污染”，而并不是为了准确地评估矿工处理交易的成本。比特币的交易包括元数据、输入和输出。元数据中包含输入的数量，交易总共的字节数和交易的哈希值。输入包含指向上一笔交易的输出（哈希指针）和该比特币拥有者的签名。输出包含输入的和以及输出的地址。

### 2.1.3.2 以太坊

以太坊（Ethereum）被称为区块链 2.0，因为相较于比特币系统，以太坊的独特之处在于加入了智能合约，智能合约是由计算机编程语言进行编写的。在一个区块链网络中，业务逻辑可以通过智能合约实现，并且在满足条件的情况下可以自动执行。

以太坊的工作量证明算法为 Ethash，不同于比特币的工作量证明（PoW），Ethash 是一种刚性内存解密算法，不仅仅依靠算力，而更多依靠的是内存。相比于比特币，以太坊有更小的区块，每个区块大约 2K，大概包含 70 笔交易。以太坊相比于比特币，还多了叔块，每挖出一个区块，奖励 5 个以太币，不像比特币，以太币奖励并不会减半，如果挖出叔块，可获得奖励的  $\frac{7}{8}$ ，即  $5 \times \frac{7}{8} = 4.375$  个以太币。并且还有叔块引用奖励，引用一次奖励 0.15 以太币。

### 2.1.3.3 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric 是一个企业级区块链应用平台，属于联盟链范畴。不同于公有链，如比特币和以太坊。Fabric 中的智能合约也称作链码（chaincode）。先介绍几个重要的概念。

节点：Hyperledger Fabric 中有三种节点，即 client，peer 和 orderer 节点，每个 client 节点与一个 peer 节点相连。Orderer 节点负责将交易排好序并打包成块，并广播到其他 peer 节点。Peer 节点有两类，即背书节点（endorsing peers）和确认节点（committing peers），二者有交集，背书节点是需要配置文件中配置的。确认节点是被 orderer 节点广播到的节点。

组织：Hyperledger Fabric 中有组织的概念，通常，一个组织是一个公司或一个机构，一个组织有一个 MSP（Membership Service Providers），一个组织也可以有自己的 CA 认证。

通道：通道的设计是 Hyperledger Fabric 的一个特点。只有加入这个组织才能获得这个组织内的数据。通道之间彼此是隔离的。

状态数据库：在 Fabric 中，链码读写的数据都是来源于状态数据库的，目前有两种，默认的是 LevelDB，数据是以键值对的形式存储的，另一种是 CouchDB，

需要在配置文件中配置，支持 json 形式数据存储，同时还支持富查询。

加入 Hyperledger Fabric 网络，需要经过认证，CA (Certificate Authority) 专门负责为新成员签发证书，同时，Hyperledger Fabric 还提供了一个工具 `cryptogen` 用来签发证书。首先需要配置 `crypto-config.yaml` 文件，此文件中包含组织名称与数量，每个组织 `peer` 节点数，需要生成的公私钥和证书的数量，每个组织 `peer` 节点对应的普通用户的数量。该文件配置完成后，就可以使用 `cryptogen` 工具读取这个文件来生成对应的证书和公私钥了。

之后，配置 `configtx.yaml` 文件，利用 `configtxgen` 工具生成创世区块（第一个区块）。`configtx.yaml` 文件中包含组织的信息，`orderer` 共识算法 (`solo`, `kafka` 或 `raft`)，区块大小，超时时间等信息。

接着需要配置 `docker-compose` 文件，改文件是配置 Fabric 环境的。之后执行这个文件，成功后会启动 Fabric 网络，即启动若干个 `docker` 容器，包括 `peer`, `orderer`, `couchdb`, `cli` 等容器。进入 `cli` 容器（用户与区块链网络交互的工具）后，需要进行以下步骤：

- (1) 创建通道；
- (2) 加入通道；
- (3) 安装链码；
- (4) 实例化链码。

之后便可以操作链码了。

## 2.2 能源互联网价值传递模式及与区块链技术融合分析

为了将区块链应用于能源互联网中，如何融合区块链与物联网、信息系统、业务形态构建基于区块链的安全可信自主对等的能源互联网环境，如何解决网络、系统与业务间的去中心化的共识问题，成为了当前急需解决的问题。为此，本小节梳理了能源互联网中的价值传递模式，建立了价值传递模型，并初步提出了区块链技术在能源互联网价值传递中的典型应用，以提升能源互联网运行效率和安全可信水平。

本小节通过研究能源互联网价值传递模式与模型，给出了能源区块链的定义和作用，提出并解决了一类区块链技术与能源互联网的融合方式问题。具体地，首先分析了区块链技术与能源互联网的融合需求，指出了区块链技术的应用意义；然后，通过分析能源互联网的架构特点、技术和价值属性，提出了能源互联网价值传递模式，以及在能源互联网中的传递模型；最后，研究了能源互联网与区块链技术的融合点和融合方式，给出了能源区块链的定义和作用分析。

## 2.2.1 能源互联网的价值传递模式

### 2.2.1.1 能源互联网的功能属性与价值来源

能源互联网的功能属性可以从三个角度来阐释，即信息互联、大电网和多能混合综合利用<sup>[19]</sup>，最终表现在能源、信息、业务和价值四类属性上。在能源互联网的不同发展阶段，随着时间的推移，四类属性在能源互联网中的权重会发生变化，越往上一层的属性，变得更加丰富。

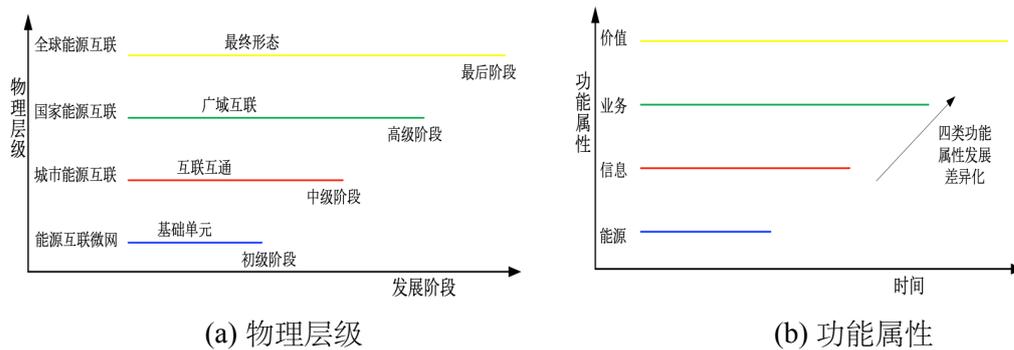


图 2.2 能源互联网功能属性架构

如图 2.2 所示，四类功能属性贯穿于能源互联网的四个物理层级，但在不同物理层级的属性程度存在差异。2.2(b) 中，随着时间的推移和能源互联网的发展，能源属性比重相对下降，信息、业务和价值属性相对增加。能源互联微网是能源互联网发展的初级阶段，也是物理架构 2.2(a) 的底层。能源互联网的价值来源如图 2.3。与传统能源价值相比，能源互联网有一些新的价值来源。主要来源于四个方面：1) 新型商业模式创造了新的市场价值；2) 新的能源管理方式带来了能效价值；3) 庞大的能源互联网产业链带来了能源金融价值；4) 数据中心和人工智能技术应用创造了新型社会服务价值。

### 2.2.1.2 价值主张与传递模式

对应于能源互联网的价值来源，能源互联网不仅能实现传统能源架构下的基本价值，还可以实现新出现的四类价值。从价值实现的物理操作过程来看，数据中心占据相对突出的位置，能源的交易、传输、存储、能效提升、能源金融波动和新型社会服务水平等，都依赖于数据中心提供的信息以及其分析与决策，传统以能源网为中心的价值实现已转变为以数据为中心的价值实现过程，而价值的内涵也限于供能的单一方面，已转化为包含多能、金融和新型社会服务等新内容的价值体系。因此，可从数据的角度主张如下价值传递模式。

综合型能源互联网价值传递模式。它不仅要体现能源供应侧、用能侧和网络



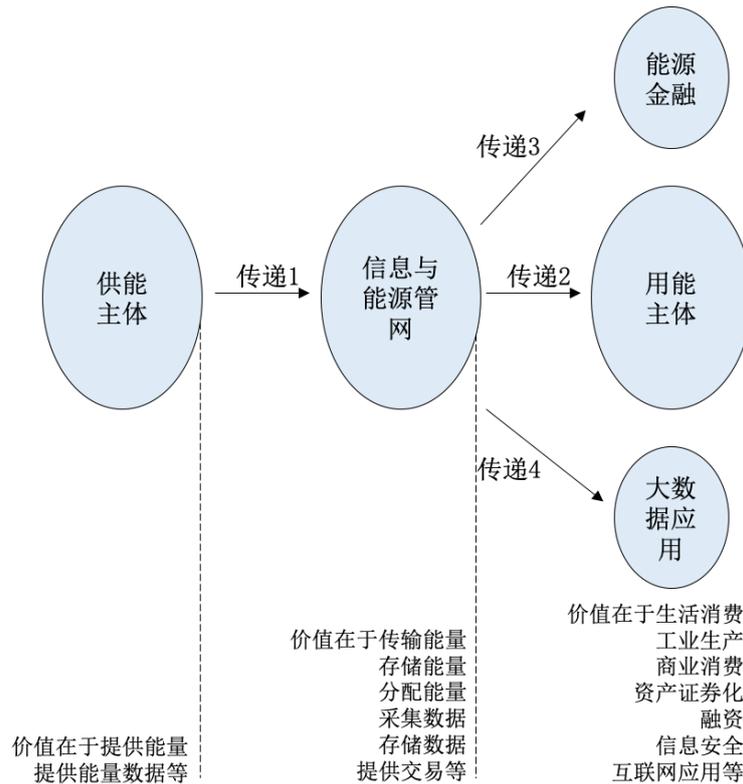
图 2.3 能源互联网价值来源

运营的价值，还需要体现节能降耗、环境保护、能源金融等方面的价值，需要大量数据及分析过程，因此，综合型价值传递模式也可称为数据型价值传递模式。在多方面综合价值体现的过程中，每一个参与主体都是依据能源信息网络运行数据来做出决策，制定自身的行为规律。数据成为科学判断的唯一依据。

用户型能源互联网价值传递模式。它是以能源消费侧为中心的价值体现，消费侧主体包括个人和各类组织。在价值体现过程中，主要包括两类情形，一类是用户经济性最佳，需要为用户节能降费，减少支出，这里需要引入需求侧管理等网络运营技术；另一类是用户体验最佳，用户具体情况不同，不是所有的用户都把经济性放在第一位。比如对电能质量敏感的工业用户，需要高质量的电力供应，而价格不是最关注的方面。

能效型能源互联网价值传递模式。它以能源监管侧为出发点，它主要目标是节能降耗，尽可能减少能源需求和消耗。能源互联微网运营商是实现能效型价值传递的主要载体，通过微网的能量管理和局域范围的调度，协调供能、用能、储能的供需对接，把能源需求和供应分解到不同时段和地域，从而实现降低能源总量的目标。

金融型能源互联网价值传递模式。它是一类资产证券化的价值体现形式。能源互联网产业链的各经济实体单位都可以进入金融领域，比如成为上市公司、融资等。一方面，实体单位的经营状况会反馈到金融领域，影响金融波动；另一方面，金融行为也会反馈到实体单位的经营，形成助力或负面影响。



## 2.2.2 能源互联微网中的价值传递模型

依据不同区域的具体特点，如存量供能结构、用户特征和存量电网等，微网可规划为不同类型。比较典型的，在供能侧，包括光伏、风电、火电和外部电网，以及燃气等组成多能混合结构；在用户侧，一般包括居民用户、工商用户和工业用户；在电网侧，一般包括存量电网、储能和新增电网。以综合利用价值为目标，从综合型价值传递模式对其进行分解。

### 2.2.2.1 价值传递模型

设每一个参与方都具有相应的价值能力，当传递到价值链的下端时，下端参与方会获得对应的价值感知。这种价值的传递存在一个传递效果问题，即传递指数。

设图 2.4 中的 5 个参与方的价值能力分别为：供能主体  $V_1$ 、信息与能源管网  $V_2$ 、用能主体  $V_3$ 、能源金融  $V_4$  和大数据应用  $V_5$ ；相应的价值感知为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  和  $R_5$ ；传递指数为  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  和  $H_4$ 。由图中传递方向可知， $R_1$  为 0。因此，有如下价值传递模型：

$$\begin{cases} H_i = \delta_i |V_i \rightarrow R_{i+1}|, i = 1, 2 \\ H_3 = \delta_3 |V_2 \rightarrow R_4| \\ H_4 = \delta_4 |V_2 \rightarrow R_5| \end{cases} \quad (2-1)$$

其中， $\delta$  表示传递效率。影响传递效率的因素很多，而不同类型的价值传递模式有不尽相同的影响因素。表 2.1 给出了综合型和用户型价值传递模式的影响因素，表 2.2 给出了能效型和金融型价值传递模式的影响因素。

表 2.1 综合型和用户型价值传递影响因素解析

综合型	影响因素	用户型	影响因素
传递 1	能源结构 能源质量	传递 1	能源结构 能源质量 能源价格
传递 2	传输存储和分配能量 采集存储和分析数据 多能协同 碳排放约束分析 需求侧管理	传递 2	传输存储和分配能量 交易平台
传递 3	衍生生活与信息服务 智能交易 社会安全分析	传递 3	投资收益 能源金融市场
传递 4	能源金融市场 融资 资产证券化	传递 4	用能便捷性

表 2.2 能效型和金融型价值传递影响因素解析

能效型	影响因素	金融型	影响因素
传递 1	能源结构 能源性价比	传递 1	能源属性 能源发展应用前景
传递 2	传输存储和分配能源 交易平台 过网费	传递 2	交易规模与经营效益 运营体增值服务水平
传递 3	产业链经营实体能效	传递 3	金融市场规模 投融资、资产证券化
传递 4	能量管理	传递 4	大数据分析

### 2.2.2.2 作用分析

不同类型价值传递体现了价值链的侧重点不同，由此影响能源互联网参与主体的决策倾向，由上表中的影响因素分析可以看出。各影响因素的在不同类型的价值传递模式中量化占比也会有所差异，会随着参与主体的主观意愿波动。模型内各价值传递过程中，沿着传递方向，总价值会有一个增值的过程。

能源互联网价值传递模式与模型的建立有三个主要作用，分别如下。

(1) 它从产业链和价值驱动的角度分析了能源互联网，有助于厘清产业链内各参与主体在价值体现中的角色与贡献权重，为宏观市场配置和利益分配提供参考。(2) 价值体现影响市场，从而可为不同情形的能源互联网应用场景采用不同运营管理模式提供依据。(3) 为能源互联网参与实体实现自身价值最大化提供借鉴，找到最佳定位。

### 2.2.3 能源区块链与能源互联网价值传递

#### 2.2.3.1 区块链技术与能源互联网的融合需求

区块链技术具有信息技术属性，而能源互联网具有信息和能源两种属性。在传统电网和智能电网中，计算机、电子通信、自动控制等信息技术得到了较多的应用，但是深度和广度趋于较低层次。在能源互联网的去中心化、价值驱动、供能和用能主体双重化等新的目标和功能要求下，信息技术在能源互联网中的功能权重、应用深度和广度、信息量和复杂度都大幅提升，更为高效、稳定的信息技术亟需引入。

区块链技术操作对象指数据，即对大量数据的存储和管理。在能源互联网中，需要使用数据的环节都涉及到区块链技术的应用。终端数据采集、局域能量管理、运营调度、供能与用能交易和定价机制等，是区块链技术应用的典型场景或环节。

与传统电网的统一定价和单向输电不同，能源互联网的价格开放，自由议价，且能量向上向下均可流动，这使得价值驱动成为能源互联网的核心特征之一。价值驱动的实现过程是从用户到交易中心、再到传输网络和供能体，每一个参与方都依据规则实现自己的最优价值，而规则的基础是数据。区块链技术在数据管理上提供了一个开放共享的数据平台，把价值链上的所有参与方都摆在了一个信息对等的位置。

#### 2.2.3.2 融合点与融合方式

区块链技术具有高度透明、去中心化、去信任、集体维护（不可更改）、匿名等鲜明特点。在应用到能源互联网领域时，融合点和融合方式是亟需解决的关键

问题。本质上，区块链技术的操作对象是去中心化的分布式存储的对等可信网络。在能源互联网中，可以将其理解为一组分布式数据中心构成的数据库网络。

对于能源互联微网而言，在网络架构上它与传统配电网的差异主要表现在两个方面：首先是出现了一个微网范围内的运营中心，它包含了独立电网的所有功能；第二是微网内原有的高压变电站转变为以能源路由器为核心的神经枢纽，既包含了原有的变电功能，也包含了局域数据中心、以及微网内的二级能量管理功能。其中，第二个差异即是能源互联微网与区块链技术的融合点。图 2.5 给出了能源互联微网到融合区块链技术的能源互联微网的转变过程。

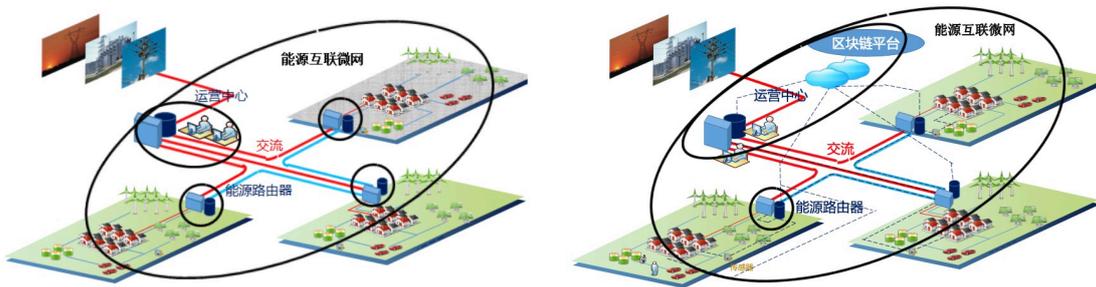


图 2.5 能源互联网到能源区块链的转变

比较传统能源网而言，信息技术在能源互联网领域具有显著的重要性，而区块链技术则是信息技术部分至关重要的数据管理技术。从区块链角度，可用能源区块链概念来分析能源互联微网。

### 2.2.3.3 能源区块链

结合区块链技术在能源互联微网中的应用需求和图 2.5 所示架构，给出能源区块链的定义如下：

从数据中心角度，一个能源互联微网可视为由一系列分布式数据中心组成的对等可信网络，而每一个数据中心存储管理某个确定区域的能源网运行信息。由于分布式数据中心从信息管理上把能源互联微网划分为若干个物理区域，或称为区块化划分，而区块链技术对分布式数据中心进行了有效管理，因此可把这种已经区块化划分的能源互联微网称之为能源区块链。

能源区块链很大程度上提升了能源互联网的信息技术属性，使得能源互联网明显地有别于智能电网或泛能源网。

能源区块链技术的作用对象是数据或数据中心，并通过数据分析影响或决定能源网络的运行。因此，能源区块链技术在能源互联网价值传递中发挥着基础作用。在四类价值传递模式中，参与主体都可以依托能源区块链技术，对所在数据中心进行数据的读取和上传操作，从而分析决策自身的价值需求与价值实现。

## 2.3 实验环境搭建

在本文的研究中，区块链网络是使用 Hyperledger Fabric 进行搭建的，现在已有越来越多的科研团队开始基于 Hyperledger Fabric 做能源交易的研究了<sup>[38]</sup>。本实验主要模拟实际能源互联网场景中的接入新能源（如光伏发电，风电等）的微网中电力产消者和电力消费者之间的电费结算，用户信息查询和用户加入网络等基础功能。下面将介绍基于 Hyperledger Fabric 的实验环境搭建过程，首先需要安装必要的工具，即 Git, cURL, Node.js, npm, Go, docker, docker-compose，在本例中，Hyperledger Fabric 版本为 v1.4.1，实验环境配置如下：

- (1) 操作系统：macOS Mojave 10.14.6，4 核，内存 16GB，2.2GHz Intel，Core i7；
- (2) Go：1.14.4；
- (3) Docker：18.06.0-ce；
- (4) Docker-compose：1.22.0；
- (5) Node.js：8.17.0；
- (6) npm：5.6.0。

配置好实验环境后，接着需要将所需的项目文件 fabric-samples<sup>①</sup>克隆到本地，在根目录下安装所需的二进制文件，即 configtxgen, configtxlator, cryptogen, discover, idemixgen, orderer, peer, fabric-ca-client, fabric-ca-server。首先启动 Hyperledger Fabric 网络，本实验中会启动 6 个 docker 容器，如图 2.6 所示。其中，第一个容器是链码运行的容器。

根据根目录下的 package.json 文件安装需要的包，成功注册 admin 和 user 的结果分别如图 2.7 和图 2.8 所示。运行客户端后，在浏览器上输入网址 <http://127.0.0.1:8000/> 后，便可以通过 WEB 用户界面与区块链网络进行交互。

初始化用户用能信息的 WEB 界面如图 2.9 所示，区块链网络返回的数据如图 2.10 所示。其中，各个字段的含义如表 2.3 所示。

查询某个用户的 WEB 界面如图 2.11 所示，区块链网络返回的查询的用户数据如图 2.12 所示。

添加新用户加入区块链网络的 WEB 界面如图 2.13 所示，添加到区块链网络的新用户的数据如图 2.14 所示。

从图 2.15 可以看出，这时状态数据库中用户用能信息的数目已经更新，区块链网络返回的更新后的用户用能信息如图 2.16 所示。

用户之间使用代币进行转账的 WEB 界面如图 2.17 所示，用户之间提交代币转

① <https://github.com/hyperledger/fabric-samples>

```

yhxdeMac:~ youhong$ docker ps
CONTAINER ID        IMAGE                                     COMMAND                  CREATE
D                    STATUS                                PORTS                   COMMAND                  CREATE
NAMES
99eae5702f3        dev-peer0.org1.example.com-energy-app-1.0-d09226df3dafb9ef6a1a1bab43e9266a74d8ec5c0bd0556eb05782b8e755313a    "chaincode -peer.add..." 18 min
utes ago           Up 18 minutes
dev-peer0.org1.example.com-energy-app-1.0
8416d10e1bae        hyperledger/fabric-tools              "/bin/bash"            19 min
utes ago           Up 19 minutes
cli
3e94a7a296a2        hyperledger/fabric-peer              "peer node start"      19 min
utes ago           Up 19 minutes           0.0.0.0:7051->7051/tcp, 0.0.0.0:7053->7053/tcp
peer0.org1.example.com
d3e3f8a143ea        hyperledger/fabric-couchdb           "tini -- /docker-ent..." 19 min
utes ago           Up 19 minutes           4369/tcp, 9100/tcp, 0.0.0.0:5984->5984/tcp
couchdb
a419f851559b        hyperledger/fabric-ca                "sh -c 'fabric-ca-se..." 19 min
utes ago           Up 19 minutes           0.0.0.0:7054->7054/tcp
ca.example.com
7e0685c48d5a        hyperledger/fabric-orderer           "orderer"              19 min
utes ago           Up 19 minutes           0.0.0.0:7050->7050/tcp
orderer.example.com
    
```

图 2.6 运行中的 docker 容器

```

yhxdeMac:energy-app youhong$ node registerAdmin.js
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully enrolled admin user "admin"
Assigned the admin user to the fabric client ::{"name":"admin","mspId":"Org1MSP",
"roles":null,"affiliation":"","enrollmentSecret":"","enrollment":{"signingIdent
ity":"c212a0c3bd4c29194609b6b458fd5a73d8a57f478f4dee94f21c576d79cb648c","identit
y":{"certificate":"-----BEGIN CERTIFICATE-----\nMIICAjCCAaigAwIBAgIUOGogeXFhtaH
CV670WWNLH25G10wCgYIKoZIzj0EAwIw\nczELMAkGA1UEBhMCVVMxEzARBgNVBAGTCkNhbmG1bm3JuaW
ExFjAUBgNVBAcTDVNH\nbiBGcmFuY2lzY28xGTAXBgNVBAoTEG9yZzEuZXhhbXBsZS5jb20xHDAaBgNV
BAMT\nE2NhLm9yZzEuZXhhbXBsZS5jb20wHhcNMjAwNzAxMTI0MTAwWhcNMjEwNzAxMTI0\nNjAwWjAh
MQ8wDQYDVQQLEwZjbG1lbnQxDjAMBgNVBAMTBWfkbWluMFkwEwYHKoZI\nnzj0CAQYIKoZIzj0DAQcDQg
AEeCSCNCrmN13Jt1n12VNBLGxG8ouPwCP2LhEZKvkD\n0qSPoeev32cftQGRbGJl930QgYQRvHkAlm8
NVc3g2/akqNsMGowDgYDVR0PAQH/\nBAQDAgeAMAWGA1UdEwEB/wQCMAAwHQYDVR0OBBYEFNqqWeKjxH
TPZl5AhKz7Xgn8\nCgQNMCSGA1UdIwQkMCKAIEI5qg3NdtruuLoM2nAYUdFFBNMarRst3dusalc2Xk18
\nMAoGCCqGSM49BAMCA0gAMEUCIQD7Vke9zEhPBljKt+NcTzIfBEWNq3lvfktK8pS+\nEV8HbAIGUzZb
yHpnvp51duHruoBgYSzub8Ya0414drss4e4RrsQ=\n-----END CERTIFICATE-----\n"}}}
    
```

图 2.7 注册 admin 的结果

```

yhxdeMac:energy-app youhong$ node registerUser.js
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded admin from persistence
Successfully registered user1 - secret:sLnNCQZNHzp
Successfully enrolled member user "user1"
User1 was successfully registered and enrolled and is ready to interact with the
fabric network
    
```

图 2.8 注册 user 的结果

Query All Energy

Query

ID	Timestamp	Owner	Address	Credits	Produced	Consumed
1	1504054225	0x67fd45eca78de	0x675432edda323	200	100	20
2	1504057825	0x6ed85fdcab456	0x7df45ecab7844	100	50	0
3	1493517025	0x7df54e9dcf7a7	0x6d5ec3367cdf8	50	0	0

图 2.9 初始化用户用能信息的 WEB 界面

```
getting all energy from database:
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded user1 from persistence
Query has completed, checking results
Response is [{"Key":"1", "Record":{"address":"0x675432edda323", "consumed":"20",
"credits":"200", "owner":"0x67fd45eca78de", "produced":"100", "timestamp":"1504054225"}}, {"Key":"2", "Record":{"address":"0x7df45ecab7844", "consumed":"0", "credits":
"100", "owner":"0x6ed85fdcab456", "produced":"50", "timestamp":"1504057825"}}, {"Key":"3", "Record":{"address":"0x6d5ec3367cdf8", "consumed":"0", "credits":"50", "owner":
"0x7df54e9dcf7a7", "produced":"0", "timestamp":"1493517025"}}]
```

图 2.10 区块链网络返回的用户用能数据

Query a Specific Energy

Enter a number:

Query

Timestamp	Owner	Address	Credits	Produced	Consumed
1504054225	0x67fd45eca78de	0x675432edda323	200	100	20

图 2.11 查询某个用户的 WEB 界面

```
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded user1 from persistence
Query has completed, checking results
Response is {"address":"0x675432edda323", "consumed":"20", "credits":"200", "owner":
"0x67fd45eca78de", "produced":"100", "timestamp":"1504054225"}
```

图 2.12 区块链网络返回的查询的用户数据

**Create Energy Record**

Enter id:

Enter credits:

Enter address:

Enter timestamp:

Enter owner:

Enter produced:

Enter consumed:

图 2.13 添加新用户加入区块链网络的 WEB 界面

```
submit recording of a energy:
[ '4',
  '0x7865adec345ed4',
  '4982342301',
  '0x65ab3cd4f3e32',
  '100',
  '100',
  '100' ]
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded user1 from persistence
Assigning transaction_id: bbd8eae037c2457480ead95f2d78a79fd4c68936f85cadcf1cd2a1a13fd25f9d
Transaction proposal was good
Successfully sent Proposal and received ProposalResponse: Status - 200, message - ""
```

图 2.14 添加到区块链网络的新用户的数据

表 2.3 WEB 界面中各个字段含义

字段	含义
ID	序号
Timestamp	时间戳
Owner	用户
Address	用户地址
Credits	用户代币数量
Produced	产能数量
Consumed	耗能数量

Query All Energy

Query

ID	Timestamp	Owner	Address	Credits	Produced	Consumed
1	1504054225	0x67fd45eca78de	0x675432edda323	200	100	20
2	1504057825	0x6ed85fdc4b456	0x7df45ecab7844	100	50	0
3	1493517025	0x7df54e9dcf7a7	0x6d5ec3367cdf8	50	0	0
4	4982342301	0x65ab3cd4f3e32	0x7865adec345ed4	100	100	100

图 2.15 添加新用户后的状态数据库中用户用能信息的 WEB 界面

账后区块链网络返回的成功信息如图 2.18 所示。

用户之间使用代币进行转账后的状态数据库中用户用能信息的 WEB 界面如图 2.19 所示，区块链网络返回的用户之间使用代币进行转账后的用户用能信息如图 2.20 所示。由图 2.15 和图 2.19 可以看出，ID 为 1 的用户向 ID 为 2 的用户转移 80 个代币后，ID 为 1 的用户代币数量由 200 变为 120，ID 为 2 的用户代币数量由 100 变为 180。

```
getting all energy from database:
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded user1 from persistence
Query has completed, checking results
Response is [{"Key": "1", "Record": {"address": "0x675432edda323", "consumed": "20", "credits": "200", "owner": "0x67fd45eca78de", "produced": "100", "timestamp": "1504054225"}}, {"Key": "2", "Record": {"address": "0x7df45ecab7844", "consumed": "0", "credits": "100", "owner": "0x6ed85fdc4b456", "produced": "50", "timestamp": "1504057825"}}, {"Key": "3", "Record": {"address": "0x6d5ec3367cdf8", "consumed": "0", "credits": "50", "owner": "0x7df54e9dcf7a7", "produced": "0", "timestamp": "1493517025"}}, {"Key": "4", "Record": {"address": "0x7865adec345ed4", "consumed": "100", "credits": "100", "owner": "0x65ab3cd4f3e32", "produced": "100", "timestamp": "4982342301"}}]
```

图 2.16 区块链网络返回的添加新用户后的用户用能信息

### Trade Energy

Enter a id between 1 and 3(sender):

Enter a id between 1 and 3(receiver):

Enter volume of trading energy credits:



图 2.17 用户之间使用代币进行转账的 WEB 界面

```
trade energy:
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded user1 from persistence
Assigning transaction_id: 64321bfa70b56f6d22dbe063e08d409083d959876f2e2bd3e776f3e50ab47106
Transaction proposal was good
Successfully sent Proposal and received ProposalResponse: Status - 200, message - ""
```

图 2.18 用户之间提交代币转账后区块链网络返回的成功信息

### Query All Energy

ID	Timestamp	Owner	Address	Credits	Produced	Consumed
1	1504054225	0x67fd45eca78de	0x675432edda323	120	100	20
2	1504057825	0x6ed85fdcab456	0x7df45ecab7844	180	50	0
3	1493517025	0x7df54e9dcf7a7	0x6d5ec3367cdf8	50	0	0
4	4982342301	0x65ab3cd4f3e32	0x7865adec345ed4	100	100	100

图 2.19 用户之间使用代币进行转账后的状态数据库中用户用能信息的 WEB 界面

```
getting all energy from database:
Store path:/Users/youhong/.hfc-key-store
Successfully loaded user1 from persistence
Query has completed, checking results
Response is [{"Key":"1", "Record":{"address":"0x675432edda323","consumed":"20","credits":"200","owner":"0x67fd45eca78de","produced":"100","timestamp":"1504054225"}}, {"Key":"2", "Record":{"address":"0x7df45ecab7844","consumed":"0","credits":"100","owner":"0x6ed85fdcab456","produced":"50","timestamp":"1504057825"}}, {"Key":"3", "Record":{"address":"0x6d5ec3367cdf8","consumed":"0","credits":"50","owner":"0x7df54e9dcf7a7","produced":"0","timestamp":"1493517025"}}, {"Key":"4", "Record":{"address":"0x7865adec345ed4","consumed":"100","credits":"100","owner":"0x65ab3cd4f3e32","produced":"100","timestamp":"4982342301"}}]
```

图 2.20 区块链网络返回的用户之间使用代币进行转账后的用户用能信息

## 2.4 性能测试

在这一小节中，将使用 Hyperledger 项目下的子项目 Hyperledger Caliper<sup>①</sup>来测试基于 Hyperledger Fabric 搭建的区块链网络的一些性能指标，包括交易（transaction）的吞吐量，延迟时间，包括最小延迟时间，最大延迟时间，平均延迟时间等。

Hyperledger Caliper 是一个区块链性能测试框架，它允许用户使用预定义的用例测试不同的区块链解决方案，并获得一组性能测试结果。目前支持测试的性能指标包括成功率、交易吞吐量，交易延迟（最小延迟、最大延迟、平均延迟）。

表 2.4 性能测试参数设置

round	name	fixed-rate	txNumber
1	init	20	50
2	init	40	50
3	init	80	50
4	init	20	20
5	init	20	40
6	init	20	80
7	query	20	50
8	query	40	50
9	query	80	50
10	query	20	20
11	query	20	40
12	query	20	80

### 2.4.1 Hyperledger Caliper 测试环境搭建

在这一小节，将介绍 Hyperledger Caliper 环境搭建的主要步骤。

第一步，将 Hyperledger Caliper 项目工程文件克隆到本地，代码：`git clone https://github.com/hyperledger/caliper.git`;

第二步，在项目根目录/caliper 下，安装项目运行时需要的包，代码：`npm install`;

第三步，将 Hyperledger Caliper 项目的基准测试项目文件克隆到本地，代码：`git clone https://github.com/hyperledger/caliper-benchmarks.git`;

第四步，根据测试需要编辑性能测试配置文件以及区块链网络配置文件。

在本测试中，Hyperledger Fabric 版本为 v1.4.1，配置参数与 2.3 小节一致。

<sup>①</sup> <https://hyperledger.github.io/caliper/>

## 2.4.2 测试结果

表 2.4中是本测试的参数，表 2.5是当有 10 个客户端时的性能测试结果，表 2.6是当有 20 个客户端时的性能测试结果。表 2.4中，round 是指测试的轮数，fixed-rate 是指交易输入到区块链网络的速率，单位为 TPS (transactions per second)，txNumber 是指测试的交易的个数。从表 2.5和表 2.6中可以看出，客户端个数越多，最小延迟时间，最大延迟时间，平均延迟时间都会相应增加，但是发送率与吞吐量都会提高，并且最低吞吐量约为 20tps，这在接下来要进行的微网中的居民负荷控制和点对点电量交易的研究中是满足实际应用需求的。

表 2.5 性能测试结果-10clients

Name	txNumber	Send Rate (TPS)	Max Latency (s)	Min Latency (s)	Avg Latency (s)	Throughput (TPS)
init	40	26.2	0.14	0.09	0.12	24.7
init	40	51.3	0.12	0.08	0.10	46.6
init	40	100.8	0.22	0.09	0.15	81.8
init	20	37.3	0.13	0.08	0.11	31.5
init	40	26.2	0.13	0.08	0.10	24.9
init	80	22.8	0.13	0.08	0.10	22.2
query	40	26.4	0.11	0.08	0.10	24.9
query	40	52.3	0.11	0.08	0.10	46.3
query	40	101.8	0.17	0.09	0.11	83.3
query	20	38.2	0.13	0.11	0.12	31.5
query	40	26.3	0.12	0.07	0.10	25.0
query	80	22.7	0.16	0.08	0.12	21.9

表 2.6 性能测试结果-20clients

Name	txNumber	Send Rate (TPS)	Max Latency (s)	Min Latency (s)	Avg Latency (s)	Throughput (TPS)
init	40	36.8	0.27	0.15	0.23	31.4
init	40	70.7	0.26	0.12	0.18	52.2
init	40	125.8	0.25	0.17	0.21	76.0
init	20	208.3	0.23	0.16	0.20	77.8
init	40	37.7	0.26	0.19	0.23	31.3
init	80	26.1	0.22	0.12	0.18	24.8
query	40	37.3	0.24	0.14	0.19	32.8
query	40	71.4	0.23	0.15	0.19	53.0

续下页

续表 2.6 性能测试结果-20clients

Name	txNumber	Send Rate (TPS)	Max Latency (s)	Min Latency (s)	Avg Latency (s)	Throughput (TPS)
query	40	133.3	0.23	0.12	0.17	90.7
query	20	363.6	0.25	0.17	0.21	77.5
query	40	34.9	0.21	0.10	0.18	32.2
query	80	26.2	0.23	0.13	0.17	24.9

## 2.5 本章小节

本章介绍了区块链技术的概念，特点，数据结构和分类，同时对主流的区块链平台比特币系统，以太坊和 Hyperledger Fabric 也有一个简单的介绍。同时，本章还分析了能源互联网价值传递模式及与区块链技术融合问题。通过研究能源互联网价值传递模式和模型，以及区块链技术与能源互联微网的融合方式，给出了能源区块链的定义及其在能源互联微网价值传递中的作用分析。能源区块链融合了区块链技术和能源互联网技术，它深度提升了能源互联网的信息技术属性，为能源路由器的研究和应用提供了合适的载体。这项研究仍有一些重要问题需要研究，例如，价值传递在能源互联网中属于顶层的属性，它影响着能源互联网的市场开放化程度，区块链技术和价值传递模式如何驱动能源互联网的完全市场化是一个有研究意义的课题。本章最后进行了实验环境搭建和性能测试，这为后续能源互联网中多能主体的微网中的居民负荷控制与点对点电量交易研究奠定了一定的基础，性能测试的结果表明基于 Hyperledger Fabric 进行居民负荷控制与点对点电量交易是可行的。

## 第3章 居民负荷控制策略研究与分析

### 3.1 本章引论

本章主要介绍了一种居民用户侧的负荷控制模型。将居民用户负荷分为可转移负荷和不可转移负荷，通过管理和改变可转移负荷，即转移在用电高峰时段的负荷，以期达到降低电力生产和输送成本的目的。负荷控制终端用户的类型主要有三种，即城市居民用户、商业用户和工业用户，本章主要讨论城市居民用户侧的负荷控制方式<sup>[39]</sup>。

### 3.2 负荷控制模型介绍与分析

本章中，将介绍一种民用负荷控制模型，其系统网络图如图 3.1 所示。

假设每个用户都配备了智能电表，用户和智能电表均与区块链平台相连。首先，用户制定个性化的用电计划，并将用电计划提交到区块链网络。为了降低电力供应成本，每个用户根据其他用户来管理或调节自己的用电需求。在所有用户完成相应的用电需求调节后，电力公司可以从区块链平台获取所有居民用户的用电需求，然后按预定时间供电。文献 [40] 介绍了一种基于博弈论的负荷控制模型，该模型包含两个优化问题，一是减小峰均比 (peak-to-average ratio, PAR)，二是减小电力成本。下面将以文献 [40] 中提出的模型进行介绍和分析。

#### 3.2.1 系统模型

文献 [40] 中提出了一个电力系统模型，该模型假设在一个微电网中，有若干个电力用户，他们从电力公司获得所需电力。这里，主要考虑的是居民用户。假设每个居民用户家里有若干个家用电器，其中部分家用电器的使用时间可以调整，如洗碗机、洗衣机、电动汽车等，还有部分家用电器的使用时间不可以调整，如电

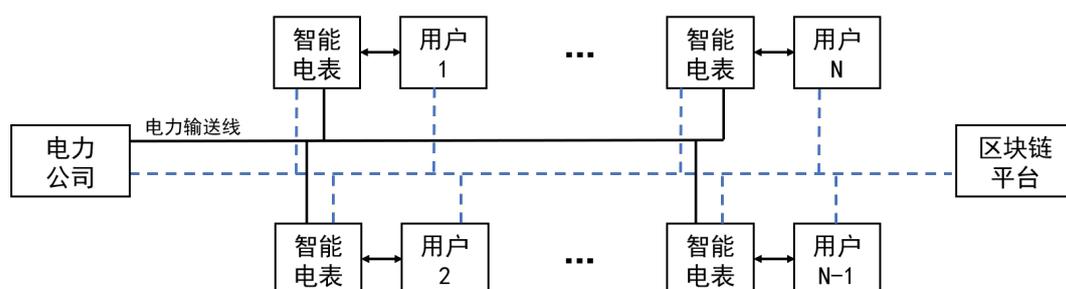


图 3.1 基于区块链技术的民用负荷控制模型系统网络图

视机、电烤箱、电冰箱、电灯等。

本文中， $\mathbb{N}$  表示用户的集合，每个用户  $n \in \mathbb{N}$ ， $l_n^h$  表示在时间  $h$ ，用户  $n$  的总负荷，其中， $h \in \mathbb{H} \triangleq [1, 2, \dots, H]$ ， $H = 24$ 。在不失一般性的前提下，可以假设时间粒度为 1 小时。用户  $n$  的日负荷表示为  $l_n \triangleq [l_n^1, \dots, l_n^H]$ 。基于以上定义，在时间  $h \in \mathbb{H}$  所有用户的总负荷可表示为：

$$L_h \triangleq \sum_{n \in \mathbb{N}} l_n^h \quad (3-1)$$

日负荷峰值和日负荷均值可分别表示为：

$$L_{peak} = \max_{h \in \mathbb{H}} L_h \quad (3-2)$$

和

$$L_{avg} = \frac{1}{H} \sum_{h \in \mathbb{H}} L_h \quad (3-3)$$

因此， $PAR$  为：

$$PAR = \frac{L_{peak}}{L_{avg}} = \frac{H \max_{h \in \mathbb{H}} L_h}{\sum_{h \in \mathbb{H}} L_h} \quad (3-4)$$

定义电力成本函数为  $C_h(L_h)$ ，其表示在每个时间点  $h \in \mathbb{H}$  发电或配电的成本。一般情况下，在每天的不同时刻，同样负荷的成本也会不同。比如说，晚上的成本会低于白天的成本。在本文中，需做出以下两个假设。

假设 1：电力成本函数是增加的，即对于每个  $h \in \mathbb{H}$ ，下面的不等式成立：

$$C_h(\hat{L}_h) < C_h(\tilde{L}_h), \quad \forall \hat{L}_h < \tilde{L}_h \quad (3-5)$$

从式 (3-5) 可以看出，如果总负荷增加，那么电力成本也会增加。

假设 2：电力成本函数是严格凸的，即对于每个  $h \in \mathbb{H}$ ，任意  $\hat{L}_h, \tilde{L}_h \geq 0$ ， $0 < \theta < 1$  均满足：

$$C_h(\theta \hat{L}_h + (1 - \theta) \tilde{L}_h) < \theta C_h(\hat{L}_h) + (1 - \theta) C_h(\tilde{L}_h) \quad (3-6)$$

满足以上两条假设的电力成本函数有许多，文献 [40] 采用的是传统的二次函数，即：

$$C_h(L_h) = a_h L_h^2 + b_h L_h + c_h \quad (3-7)$$

式 (3-7) 中， $a_h > 0$ ， $b_h, c_h \geq 0$ ，对任意  $h \in \mathbb{H}$ 。

文献 [40] 中, 为了简化模型, 令  $b_h = c_h = 0$ , 在早上 8 点到晚上 12 点这段时间,  $a_h = 0.3$ , 在晚上 12 点到第二天早上 8 点这段时间,  $a_h = 0.2$ 。

文献 [41] 中提出了一种新型的电力成本函数, 即:

$$C_h(L_h) = \alpha L_h \log(L_h + 1) \quad (3-8)$$

式 (3-8) 中,  $\alpha$  是需要自定义的价格参数。

文献 [40] 和文献 [41] 中的电力成本函数都仅考虑了电力公司或发电端的电力生产和传输成本, 并未考虑终端用户因转移负荷而面临的不舒适成本。文献 [36] 中的电力成本函数的设定考虑了这方面的成本, 该成本反映了用户转移负荷的意愿程度, 舒适成本越大, 说明用户越不愿意转移此类负荷。

对于每个用户  $h \in \mathbb{N}$ ,  $\mathbb{A}_n$  表示由家用电器 (如电冰箱、洗衣机、洗碗机、空调等) 组成的集合。对于每个家用电器  $a \in \mathbb{A}_n$ , 定义一个电能消耗向量如下:

$$x_{n,a} \triangleq [x_{n,a}^1, \dots, x_{n,a}^H] \quad (3-9)$$

其中, 标量  $x_{n,a}^h$  表示用户  $n$  在小时  $h$  对于电器  $a$  计划的一个小时内的电能消耗。显然, 用户  $n$  在对应时间  $h$  内的总负荷可表示为:

$$l_n^h = \sum_{a \in \mathbb{A}_n} x_{n,a}^h, \quad \forall h \in \mathbb{H} \quad (3-10)$$

对于每个用户  $h \in \mathbb{N}$ , 每个电器  $a \in \mathbb{A}_n$ ,  $E_{n,a}$  表示其对应的预定的每日总电能消耗。文献 [40] 中模型的作用不是为了改变电能消耗量, 而是为了系统的管理和改变电器使用的时间。实际上, 电器设备  $a$  可以设定的工作时间间隔内消耗的电量等于其所需的预定日耗电量, 即:

$$\sum_{h=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^h = E_{n,a} \quad (3-11)$$

以及

$$x_{n,a}^h = 0, \quad \forall h \in \mathbb{H} \setminus H_{n,a} \quad (3-12)$$

其中,  $H_{n,a} \triangleq [\alpha_{n,a}, \dots, \beta_{n,a}]$ 。对于每一个电器设备, 由用户提供的使用时间间隔应该大于或等于这个电器设备正常情况下完成一轮操作的时间间隔。例如, 如果一辆电动汽车正常情况下的充电时间是 3 小时, 那么需要满足  $\beta_{n,a} - \alpha_{n,a} \geq 3$ 。从式 (3-11) 和式 (3-12) 可以看出, 系统在一个周期 24 小时内, 所有电器消耗的总能

量等于所有电器或负荷一天能量消耗的总和。因此，可以得到以下能量平衡关系：

$$\sum_{h \in \mathbb{H}} L_h = \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in \mathbb{A}_n} E_{n,a} \quad (3-13)$$

一般情况下，有些家用电器的使用时间是不便调整的，这类家用电器可能具有严格的能源消耗约束，如电冰箱需要一天 24 小时都处于运行状态，即  $\alpha_{n,a} = 1$ ,  $\beta_{n,a} = 24$ 。因此，所设计的负荷控制策略对这类负荷是没有影响的。

对于每个家用电器  $a \in \mathbb{A}_n$ ，将最小待机功率表示为  $\gamma_{n,a}^{\min}$ ，最大功率表示为  $\gamma_{n,a}^{\max}$ ，最小待机功率是指一个家用电器处于待机状态时的功率。因此，可以得到以下不等式：

$$\gamma_{n,a}^{\min} \leq x_{n,a}^h \leq \gamma_{n,a}^{\max}, \quad \forall h \in H_{n,a} \quad (3-14)$$

对于每个用户  $n \in \mathbb{N}$ ，引进向量  $x_n$  表示对所有  $a \in \mathbb{A}_n$  的家用电器的电能消耗计划向量  $x_{n,a}$  的累加，即：

$$x_n = \sum_{a \in \mathbb{A}_n} x_{n,a} \quad (3-15)$$

在这方面，可以定义一个与用户相对应的可行的能耗调度集如下：

$$\begin{aligned} \mathbb{X}_n = \{x_n \mid & \sum_{h=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^h = E_{n,a}, \forall a \in \mathbb{A}, \\ & \gamma_{n,a}^{\min} \leq x_{n,a}^h \leq \gamma_{n,a}^{\max}, \forall a \in \mathbb{A}, \forall h \in H_{n,a}, \\ & x_{n,a}^h = 0, \forall a \in \mathbb{A}, \forall h \in \mathbb{H} \setminus H_{n,a}\} \end{aligned} \quad (3-16)$$

因此，在对于所计算出的电能消耗计划向量都需要满足式 (3-16)，即对于用户  $n$ ，需满足  $x_n \in \mathbb{X}_n$ 。

### 3.2.2 目标函数

在本文的假设中，每个用户一天的总负荷是固定的，如果假设所有用户负担的电力费用与电力成本相等，并且一个用户所负担的电力费用与其电力消耗在总电力消耗中所占的比例成正比，对于每个用户  $n \in \mathbb{N}$ ， $p_n$  表示用户  $n$  所承担的电力费用， $p$  表示所有用户的总费用，则有下列关系式：

$$\frac{p_n}{p} = \frac{\sum_{h \in \mathbb{H}} l_n^h}{\sum_{h \in \mathbb{H}} L_h} \quad (3-17)$$

于是，如果总的电力成本减少，那么每一个用户承担的电力费用也会相应减少。通过使居民用户改变自己的用电需求来降低电力生产与输送成本。因此，目标函数为：

$$\min_{x_n \in \mathbb{X}_n, \forall n \in \mathbb{N}} \sum_{h=1}^H C_h(L_h) \quad (3-18)$$

由  $L_h$  的定义，可以得到：

$$\min_{x_n \in \mathbb{X}_n, \forall n \in \mathbb{N}} \sum_{h=1}^H C_h \left( \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{a \in \mathbb{A}_n} x_{n,a}^h \right) \quad (3-19)$$

一般情况下，相同负荷的成本在一天的不同时刻是不同的。在本文的设计中，每个用户是根据在某一时间间隔内其他所有的用户的电力需求来调节自己的电力需求的，以期来降低电力生产与输送成本。因此，对于每个用户  $n \in \mathbb{N}$ ，式 (3-18) 可以改写为：

$$\min_{x_n \in \mathbb{X}_n, \forall n \in \mathbb{N}} \sum_{h=1}^H C_h \left( \sum_{a \in \mathbb{A}_n} x_{n,a}^h + \sum_{m \in \mathbb{N} \setminus \{n\}} l_m^h \right) \quad (3-20)$$

对于每个用户  $n \in \mathbb{N}$  用  $l_n$  表示用户  $n$  的日负荷向量， $l_{-n}$  表示除了用户  $n$  其他所有用户的负荷向量集合，即：

$$l_{-n} \triangleq [l_1, \dots, l_{n-1}, l_{n+1}, \dots, l_N] \quad (3-21)$$

本文设计的基于区块链技术的负荷控制的框架图如图 3.2 所示，首先，用户提前一天通过后端提交自己的用电需求，即当天需要使用的电器，包括负荷可转移电器和负荷不可转移电器，以及负荷不可转移电器的具体使用时间，负荷可转移电器需要使用的时段，之后后端服务将数据通过 `sdk` 存储到区块链状态数据库中，当执行优化算法时，后端服务会向模块 2 发送请求，模块 2 调用模块 1 解决需要求解的优化问题，结果由模块 2 返回给后端，后端再将每个用户的结果通过 `sdk` 更新到区块链状态数据库中。具体的优化算法如表 3.1 所示。

接下来将解释所提出的算法是如何工作的。在第 1 行，每个用户初始化  $l_n$  并从区块链网络得到  $l_{-n}$ 。也就是说，每个用户在开始的时候都会根据各自的需求制定一个初始的用能计划。初始化后，区块链网络可以更新所有用户的日负荷向量。然后，执行第 3 行到第 7 行中的循环，直到算法收敛为止。在这个循环中，每个用户分别调用 Python 中的 `cxvpy` 模块来解决自己的优化问题（式 (3-20) 所示）。

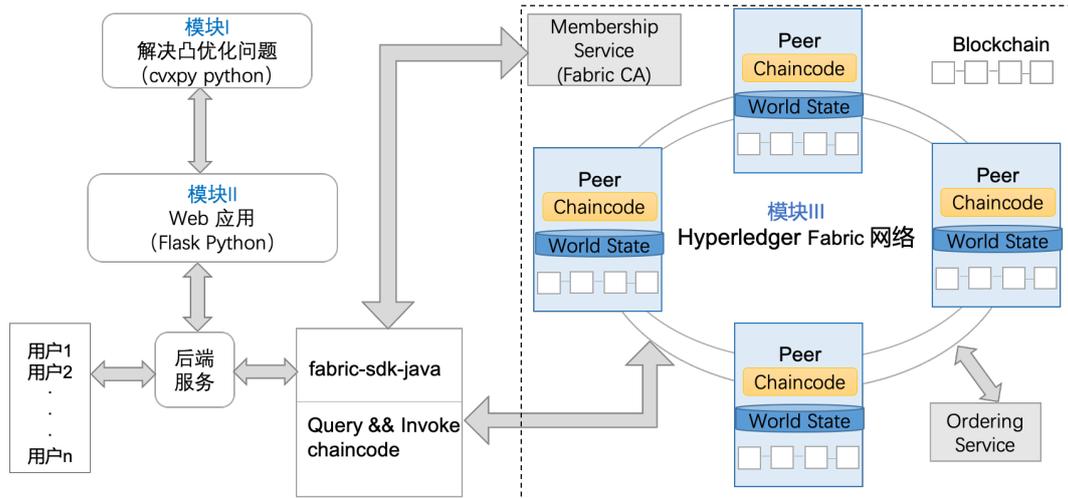


图 3.2 基于区块链技术的负荷控制框架图

表 3.1 基于区块链的优化算法

<p><b>算法 1:</b> 对于每个用户 <math>n \in \mathbb{N}</math></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1: 初始化 <math>l_n</math>, 从区块链平台得到 <math>l_n</math></li> <li>2: <b>Repeat</b></li> <li>3:     调用 <code>cvxpy</code> 解决凸优化问题 (3-20)</li> <li>4:     <b>If</b> 计算得出的结果导致 <math>x_n</math> 改变 <b>Or</b> <math>l_n</math> 更新 <b>Then</b></li> <li>5:         根据计算得出的结果更新 <math>x_n</math></li> <li>6:         将由 <math>x_n</math> 得到的 <math>l_n</math> 更新到区块链平台</li> <li>7:     <b>End</b></li> <li>8: <b>Until</b> <math>l_n</math> 不再更新</li> </ol>
---

### 3.3 实验仿真及分析

本文的仿真是基于 Hyperledger Fabric 实现的，在本节中，给出了负荷控制仿真结果。在本文的系统中，有 10 个电力用户，即： $N = 10$ 。每个用户有 10 到 15 个负荷不可转移的家用电器以及 4 到 8 个负荷可转移的家用电器。在仿真模型中，假设每个用户的家用电器都是有可移动和不可移动负荷的组合，对于那些可移动负荷，则表明其对应家用电器可以在一天的不同时间内使用，具体电器的运行时间有限制。电力成本函数为二次函数，如式 (3-7) 所示。为简单起见，假设  $b_h = c_h = 0$ 。在晚上 11 点到早上 8 点之间， $a_h = 0.04$ ，早上 8 点到下午 6 点之间， $a_h = 0.05$ ，下午 6 点到晚上 11 点之间， $a_h = 0.06$ 。每个电器的日常使用数据汇总在表 3.2 中。

表 3.2 中仅列出了几种固定的家用电器，在实际仿真中，会为每个用户随机分配 3 到 5 样其他电器，如咖啡机、电吹风、路由器等。初始负荷和经调节后的负荷日分布情况如图 3.3 所示。

电力成本的变化情况如图 3.4 所示。优化前后各用户的电力成本变化如图 3.5 所

示。

表 3.2 电器的日常使用数据

电器名称	负荷策略	额定功率 (kw)	最大功率 (kw)	日需求量 (kwh)
电动车	可转移	3.30	3.30	9.90
洗碗机	可转移	1.44	1.44	1.44
洗衣机	可转移	1.94	1.94	1.94
干衣机	可转移	2.50	2.50	2.50
咖啡机 (早)	可转移	1.20	1.20	1.20
咖啡机 (晚)	可转移	1.20	1.20	1.20
电吹风	可转移	2.00	2.00	2.00
微波炉	可转移	1.50	1.50	3.00
充电器	可转移	0.07	0.07	0.14
电熨斗	可转移	1.00	1.00	1.00
电灯	不可转移	0.15	—	1.80
加热器	不可转移	0.40	—	9.60
电冰箱	不可转移	0.06	—	1.44
电炉	不可转移	1.95	—	3.90
电视机	不可转移	0.12	—	0.60
电脑	不可转移	0.06	—	0.60
电烤箱	不可转移	1.20	—	1.20
路由器	不可转移	0.01	—	0.24

由图 3.4, 可以看出, 最初的电力成本为 673.84 元。当算法收敛后, 电力成本降到 369.61 元, 下降了 45.15%。通过计算, PAR 也从 3.28 降到了 2.16, 下降了 34.1%。这表明用户负荷从高峰时段转移到了非高峰时段。电力成本降低, 因此, 每个用户所承担的购电费用也相应的降低了。

### 3.4 本章小节

本章主要介绍了一种居民用户侧的负荷控制模型, 将用户负荷分为可转移负荷和不可转移负荷, 在一天的不同时刻, 电力成本是不同的, 通常, 用电高峰时刻电力成本也会较高, 因此, 通过转移在用电高峰时刻的负荷可以降低电力成本。

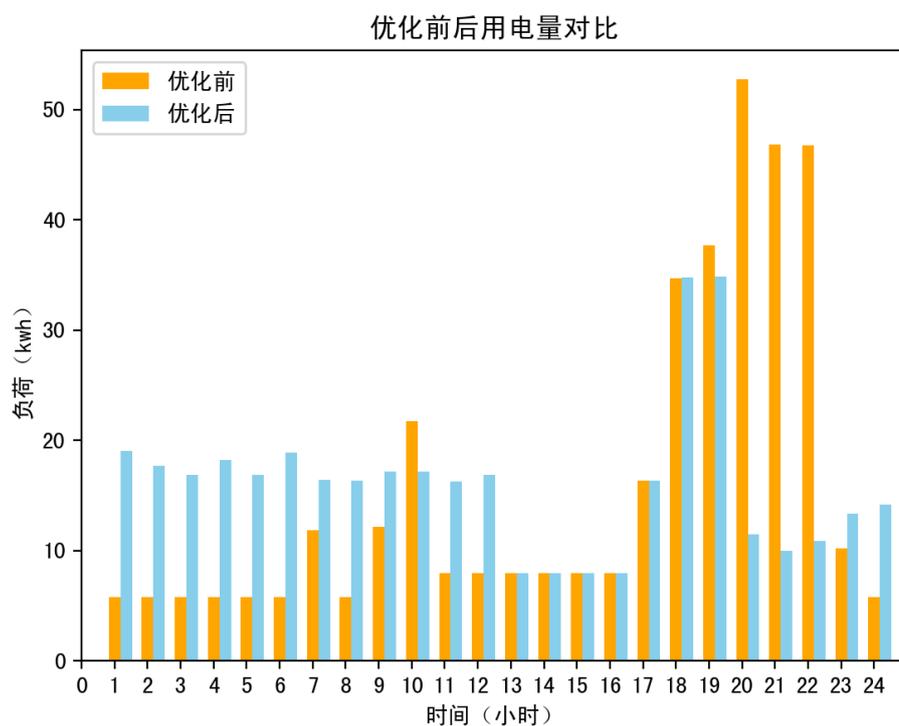


图 3.3 优化前后用电量对比

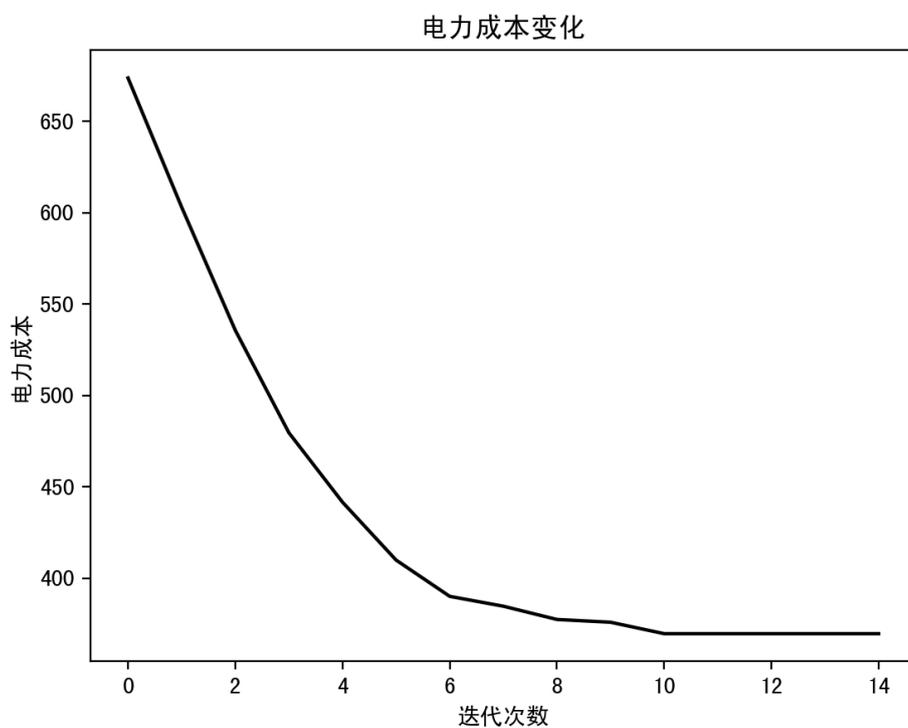


图 3.4 总的电力成本变化情况

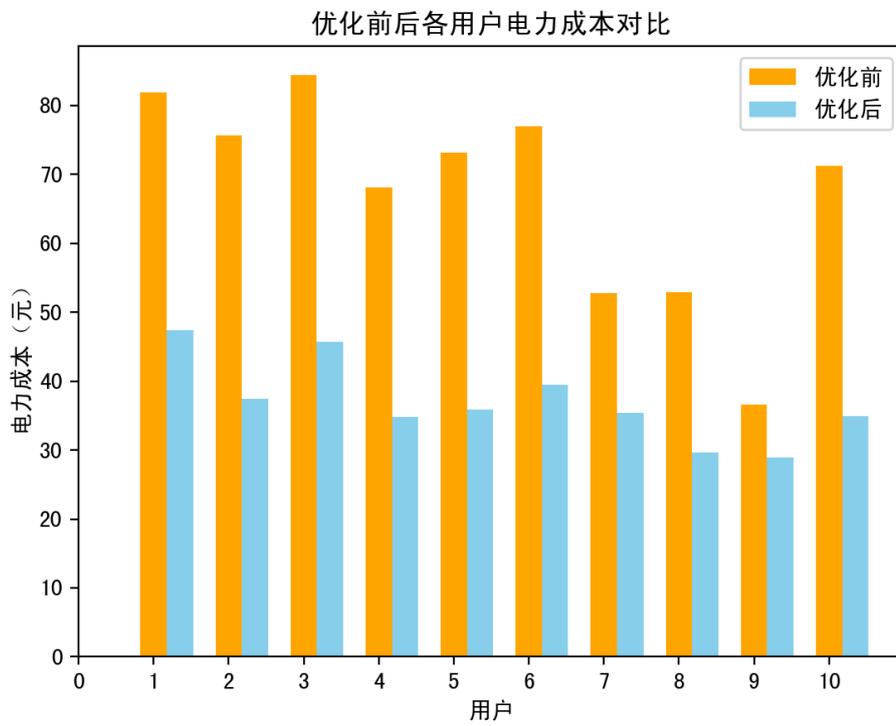


图 3.5 优化前后各用户的电力成本对比

## 第4章 一种点对点电量交易模型与分析

### 4.1 本章引论

能源互联网中,由于能源的形式多样化,参与能源交易的角色日趋多元化,并且交易的频率会变高,交易的电量也相对较小,如果还采取传统的中心化的交易方式,交易成本较高,并且用户隐私还无法得到保障。并且,随着新能源的技术的发展,有条件的用户可以自行发电,可将多余的电量卖给附近其他的用户,这样不仅可以获得收益,并且也有利于资源的合理的利用,这种交易方式也是我国目前急需研究的点对点电量交易的重要组成部分。国家发展改革委和国家能源局于2017年下发了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》<sup>[42]</sup>。通知中提到了3种交易模式,第一种是采取直接交易的模式,即电力产消者与电力消费者直接进行交易,运营配电网的电网企业为其提供输电服务,而需要电力产消者支付一定的“过网费”;第二种是电力产消者委托电网企业代售电模式;第三种是电网企业按一定的电价进行的收购模式。

文献[43]提出了一个包含4层的点对点电量交易架构,包括电网物理层,通讯层,控制层和业务层,并且还设计了一个电量交易平台 Elecbay。参与电量交易的主体包括卖电方,买电方,供应商,配电系统运营商(Distribution System Operators, DSOs)等。卖电方通过 Elecbay 列出他们半小时内的出售的多余电量的信息,买电方通过 Elecbay 浏览这些信息然后下订单,同时,卖电方也能通过 Elecbay 浏览买电方列出的信息。交易双方需要自己进行匹配,无法实现自动匹配。

文献[44]提出了一种基于区块链技术的电力现货交易模型,并给出了调度链,交易链和政府监管链的运行机制。文献[45]基于区块链技术,设计了一种分布式能源交易方案,包含结算机制设计,基于区块链的分布式能源交易架构和交易流程,并且还进行了分布式能源交易中信息通信技术支撑分析和局限性分析,但是并没有给出具体的实现方式。

文献[46]在双向拍卖定价机制的基础上,设计了一个基于区块链技术的智能配售电交易平台,该平台可以实现具有分布式发电能力的产消者和公共电网的直接点对点交易,但是并不能保证在每个交易周期的交易量的最大化。

本文的研究是基于新能源社区进行的,随着新能源技术的发展,新能源在能源市场的占比会逐渐增加,在某个阶段,新能源会与传统能源并存。为了简化所提出的模型,新能源以光伏发电为主,传统能源主要是指电力公司为居民提供电力输配电服务。

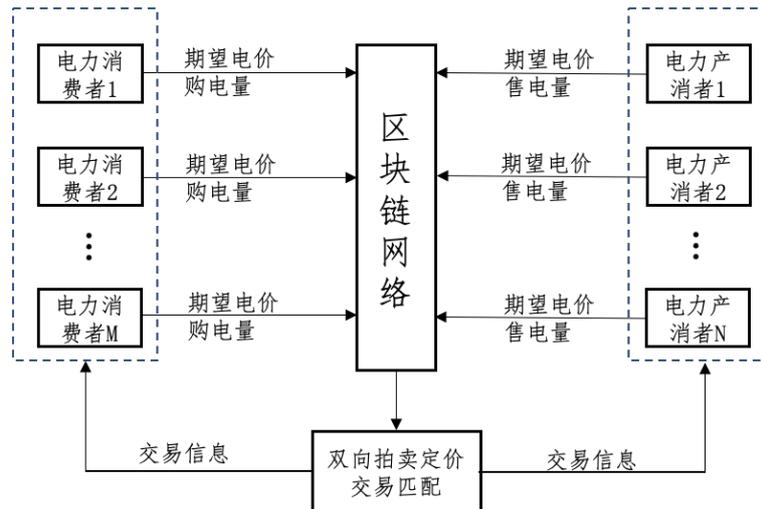


图 4.1 交易模型总体架构

在本文研究中，借助了区块链技术来实现点对点电量交易，可以实现一种分布式的系统结构。如果采用传统的中心化方式，对于中心式的负荷控制模型，保证高效率的同时，难以保证数据安全，对于点对点电量交易模型则需要分布式的方式，因此，中心式的方式难以实现，如果采用分布式系统来实现，那么对于可信，不易篡改的交易匹配来说就难以实现了，因此，在保障了分布式的结构，自动安全可信的系统方面，借助区块链技术就能轻易实现。

## 4.2 基于区块链的电量交易模式及策略

在本文设计的电量交易场景中，除了电力消费者和电力产消者的参与，还需要电网企业的参与，电网企业需要为电力消费者和电力产消者提供输配电服务，电力产消者向电网企业支付一定的费用。

### 4.2.1 总体架构

本文中电量交易的方式采取直接交易模式，大致分为以下几个步骤：

- 电力消费者和电力产消者提前一天进行报价；
- 采用双向拍卖机制定价；
- 交易匹配；
- 交易结算。

总体的交易架构如图 4.1所示。

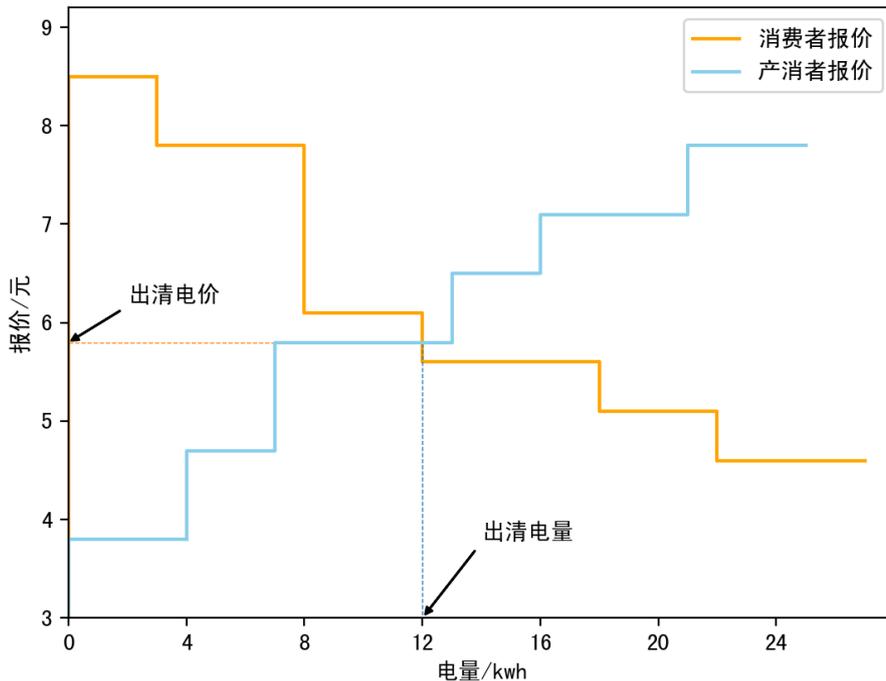


图 4.2 双向拍卖

#### 4.2.2 分时双向拍卖机制

本文主要采用双向拍卖定价机制<sup>[47]</sup>，电力产消者和电力消费者需要提前一天进行分时报价，即每个时段内期望交易电价和期望交易电量，再将相同时段的所有电力消费者和电力产消者的报价根据双向拍卖机制确定市场出清电价（Market Clearing Price, MCP）和出清电量，即成交价和该时段总的成交量。如图 4.2 所示。在每一时段，将所有电力消费者的期望电价根据报价的高低由高到低进行排序，同时还需要考虑每个电力消费者所报的电量，将所有电力产消者的期望电价根据报价的高低由低到高进行排序，同时还需要考虑每个电力产消者所报的电量，由此找到一个交点，这个交点满足交点左侧的电力消费者的报价均高于电力产消者的报价，这一部分的电力消费者和电力产消者可以根据各自所报的电价和电量进行点对点交易，交点右侧的电力消费者的报价均低于电力产消者的报价，这部分电力消费者和电力产消者竞价失败，因此不能进行点对点交易。

文献 [46] 使用的是另外一种双向拍卖机制，如图 4.3 所示，具体实施过程如下：

- 电力消费者和电力产消者提前向交易平台申报下一个交易周期的期望电价和需求电量；
- 电力消费者所报的价格按价格高低从高到低进行排序，得到买方报价序列，电力产消者所报的价格按价格高低从低到高进行排序，得到卖方报价序列；

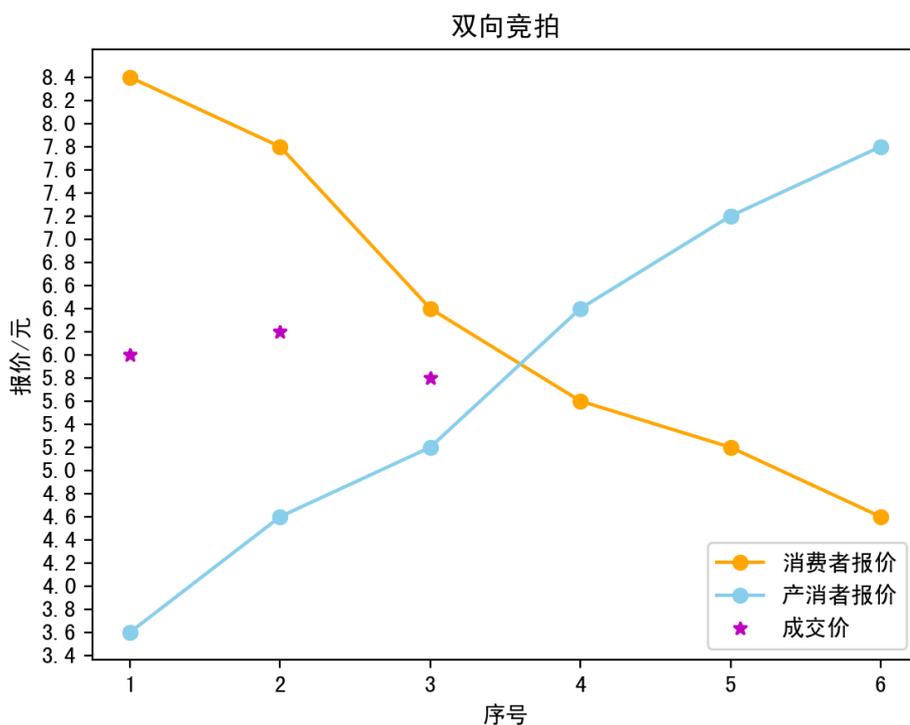


图 4.3 双向拍卖

- 买方报价序列和卖方报价序列一一对应，进行比较，当电力消费者的期望电价高于电力产消者的期望报价时，二者进行交易，成交价是二者期望电价的平均值，成交量是二者需求电量的最小者，依次进行比较，满足上述条件时进行交易，直到电力消费者的期望电价低于电力产消者的期望电价。

### 4.3 电量交易智能合约

在区块链网络中，业务逻辑由智能合约来实现，并且在满足条件时会自动执行，无需人为干预，从而可以保证系统的安全性和可靠性。智能合约是由计算机编程语言组成的。区块链除了网络搭建外的核心工作就是智能合约的编写，智能合约是是为了实现业务逻辑，所以下面会用算法图来表示智能合约的逻辑。本文使用 Hyperledger Fabric 作为区块链平台，智能合约使用 Go<sup>①</sup> 语言进行编写，下面就电量交易中重要的合约的实现进行具体说明。

① <https://golang.org/>

### 4.3.1 报价合约

根据设定,所有电力消费者和电力产消者需提前一天进行分时段报价,报价包含该时段期望电价,期望交易电量和期望交易时段,不失一般性,本文一个交易时段设为1小时,后文如无特殊说明,均表明一个时段为1小时,如果一个电力消费者或电力产消者期望在一天各个时段进行交易,那么该电力消费者或电力产消者需要进行24次报价。报价合约是指电力消费者或电力产消者向区块链网络提交的报价具体内容。

以下将电力消费者或电力产消者统称为用户。其中一个报价时段的用户报价合约的参数如表4.1所示,其中,类型中“string”代表字符串类型,“float64”代表64位浮点型数,“int8”代表有符号8位整型。

表4.1 报价合约的参数

参数名称	类型	含义
Uid	string	用户ID
Type	string	用户类型, seller表示电力产消者, buyer表示电力消费者
Price	float64	用户期望交易的电价
Amount	float64	用户期望交易的电量
DeliveryTime	int8	用户期望交易时段,用1,2,3,...,24来分别表示第1至24个时段,下文用1h表示在第一个时段

### 4.3.2 定价合约

为了最大化每个时段电力消费者和电力产消者的交易电量,本文采用的是第4.2.2小节中的定价机制,采用该双向拍卖定价机制可以使得满足交易条件的电力消费者和电力产消者根据所报的期望交易电量进行交易,除了报价最低的电力消费者和电力产消者。因此,可能出现一个电力消费者和多个电力产消者进行交易的情况,也可能出现一个电力产消者和多个电力消费者进行交易的情况。

定价合约的功能主要包含以下几点:

- 按照交易时段和用户类型将从区块链网络中得到的报价进行分类;
- 计算出清电价及出清电量,即每个时段的成交价和总成交量。

为方便表述,下面以一个时段交易匹配合约为例,每个交易时段的交易逻辑一致。电力消费者的个数记为 $M$ ,电力产消者的个数记为 $N$ , $\{b_{p1}, b_{p2}, \dots, b_{pM}\}$ 表示电力消费者期望电价集合,不失一般性,假设 $b_{p1} \geq b_{p2} \geq \dots \geq b_{pM}$ , $\{b_{v1}, b_{v2}, \dots, b_{vM}\}$ 表示对应的电力消费者的需求电量集合, $\{b_{vs1}, b_{vs2}, \dots, b_{vsM}\}$ 表

示对应的电力消费者的需求电量累加集合，满足：

$$b_{usi} = \sum_{j=1}^i b_{vj}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4-1)$$

用  $\{s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{pN}\}$  表示电力产消者期望电价集合，不失一般性，假设  $s_{p1} \leq s_{p2} \leq \dots \leq s_{pN}$ ， $\{s_{v1}, s_{v2}, \dots, s_{vN}\}$  表示对应的电力产消者的需求电量集合， $\{s_{vs1}, s_{vs2}, \dots, s_{vsN}\}$  表示对应的电力产消者的需求电量累加集合，满足：

$$s_{vsi} = \sum_{j=1}^i s_{vj}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4-2)$$

由于根据实际情况，对于一个买方而言，其报价越高，则越具有优先交易资格，反之，对于一个卖方而言，其报价越低，则越具有优先交易资格，在满足电力消费者的报价均高于电力产消者的报价时，又要保证每个时段的成交量的最大化，如图 4.2 所示，在某个时段，总成交量为报价最高的若干个电力消费者的需求电量的总和或者是若干个电力产消者的期望售出电量的总和， $\mathbb{H}$  表示一天中各个交易时段的集合，对于每个时段  $h \in \mathbb{H}$ ，用  $mcp_h$  表示时段  $h$  的成交价，用  $amount_h$  表示时段  $h$  的成交量，由上述分析可以得出需计算的最大成交量需满足：

$$amount_h = \max_{m \in \mathbb{M}, n \in \mathbb{N}} (\min(b_{vsm}, s_{vsn})) \quad (4-3)$$

s.t.  $b_{pm} \geq s_{pn}$

因此可以得出如表 4.2 所示的计算出清电价及出清电量的算法，其对应的算法流程图如图 4.4 所示。

表 4.2 计算出清电价及出清电量

算法 1: 计算出清电价及出清电量	
1:	在每个时段
2:	<b>Repeat</b>
3:	<b>For each</b> $b_{pi}, i \in [1, 2, \dots, M]$
4:	<b>For each</b> $s_{pj}, j \in [1, 2, \dots, N]$
5:	<b>If</b> $b_{pk} \geq s_{pl}$ <b>and</b> $s_{vs(l-1)} \leq b_{vsk} \leq s_{vsl}$
6:	$mcp = s_{pl}$
7:	$amount = b_{vsk}$
8:	<b>End</b>
9:	<b>If</b> $b_{pk} \geq s_{pl}$ <b>and</b> $b_{vs(k-1)} \leq s_{vsl} \leq b_{vsk}$

续下页

续表 4.2 计算出清电价及出清电量

**算法 1:** 计算出清电价及出清电量

```

10:           $mcp = b_{pk}$ 
11:           $amount = s_{vsl}$ 
12:          End
13:          If  $b_{pk} < s_{pl}$ 
14:              break
15:          End
16:          End
17:          End
18: End
    
```

表 4.2 中,  $mcp$  表示此时段的市場出清电价, 即成交价,  $amount$  表示此时段的市場出清电量, 即总成交量。

### 4.3.3 交易匹配合约

交易匹配合约主要为了实现电力消费者和电力产消者点对点交易的匹配, 即竞价成功的某个电力消费者可以与哪几个电力产消者进行点对点交易, 以及交易的时段、交易的电价和交易的电量, 竞价成功的某个电力产消者可以与哪几个电力消费者进行点对点交易, 以及交易的时段、交易的电价和交易的电量。

为方便表述, 下面以一个时段交易匹配合约为例, 每个交易时段的交易逻辑一致。电力消费者的个数记为  $M$ , 电力产消者的个数记为  $N$ ,  $\mathbb{B}_p = \{b_{p1}, b_{p2}, \dots, b_{pM}\}$  表示电力消费者期望电价集合, 不失一般性, 假设  $b_{p1} \geq b_{p2} \geq \dots \geq b_{pM}$ ,  $\mathbb{B}_v = \{b_{v1}, b_{v2}, \dots, b_{vM}\}$  表示对应的电力消费者的需求电量集合,  $\mathbb{B}_{uv} = \{b_{uv1}, b_{uv2}, \dots, b_{uvM}\}$  表示对应的电力消费者的需求电量中的已匹配的电量, 初始情况满足:

$$b_{uvi} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4-4)$$

用  $\mathbb{S}_p = \{s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{pN}\}$  表示电力产消者期望电价集合, 不失一般性, 假设  $s_{p1} \leq s_{p2} \leq \dots \leq s_{pN}$ ,  $\mathbb{S}_v = \{s_{v1}, s_{v2}, \dots, s_{vN}\}$  表示对应的电力产消者的需求电量集合,  $\mathbb{S}_{uv} = \{s_{uv1}, s_{uv2}, \dots, s_{uvN}\}$  表示对应的电力产消者的需求电量中已匹配的电量, 初始情况满足:

$$s_{uvi} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4-5)$$

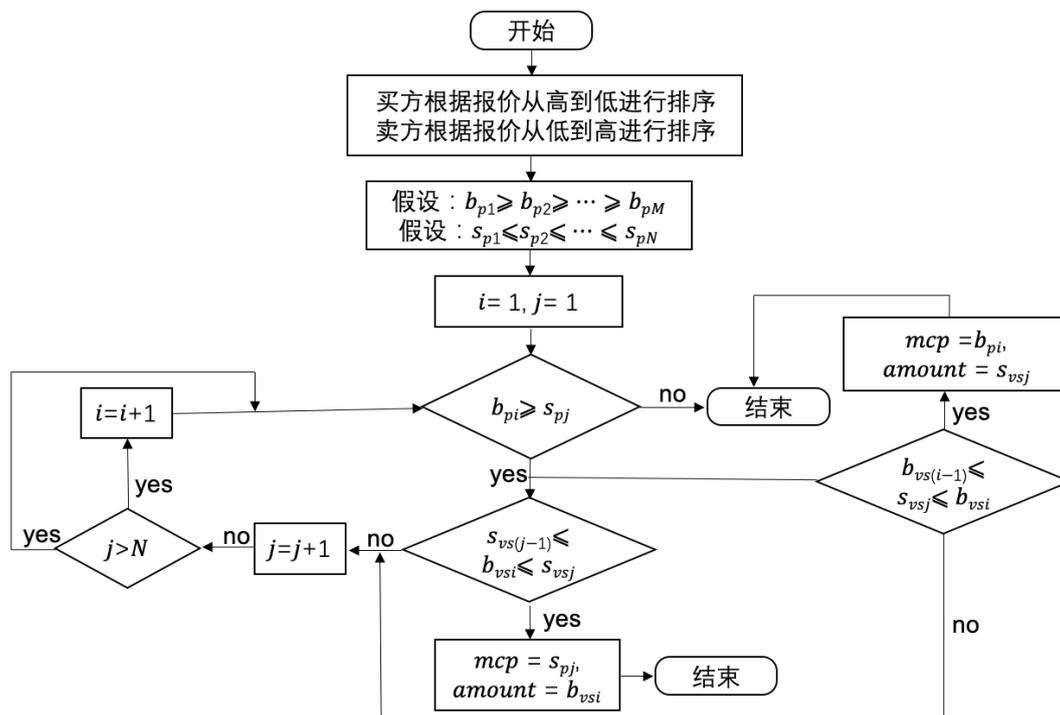


图 4.4 计算出清电价及出清电量的算法流程图

根据第 4.3.2 小节定价合约的逻辑，可以得知，定价合约的输出结果是对应时段的成交价和总成交量，因为电力消费者和电力产消者的总成交量相等，因此根据电力消费者和电力产消者各自的优先的交易顺序，即对于电力消费者而言，报价越高，其优先交易顺序越靠前，对于电力产消者而言，报价越低，其优先交易顺序越靠前，然后再由各自期望交易电量一一进行比较，如果一个电力消费者（电力产消者）未达到其期望交易的电量，再跟剩余未进行交易匹配的电力产消者（电力消费者）中交易顺序最靠前的电力产消者（电力消费者）进行交易匹配，具体的交易匹配的具体步骤如图 4.5 所示，由此可得到交易匹配的算法如表 4.3 所示，其对应的算法流程图如图 4.6 所示。图 4.5 中，方框内的小括号内的  $mcp$  表示成功匹配的电力消费者和电力产消者的交易电价，右侧元素表示双方交易的电量。 $B_i(i = 1, \dots, M)$  表示第  $i$  个电力消费者， $S_j(j = 1, \dots, N)$  表示第  $j$  个电力产消者。

表 4.3 交易匹配合约逻辑

算法 2: 交易匹配	
1:	在每个时段，已知 $mcp, amount$
2:	<b>Repeat</b>
3:	<b>For each</b> $s_{pj}, i \in [1, 2, \dots, N]$
4:	<b>For each</b> $b_{pj}, j \in [1, 2, \dots, M]$
5:	<b>If</b> $s_{pk} \leq mcp$ <b>and</b> $b_{pl} \geq mcp$

续下页

续表 4.3 交易匹配合约逻辑

## 算法 2: 交易匹配

---

```

6:          If  $s_{vk} - s_{uvk} = 0$ 
7:              break
8:          End
9:          If  $(b_{vl} - b_{uvl}) \geq (s_{vk} - s_{uvk})$ 
10:              $b_{uvl} = b_{uvl} + (s_{vk} - s_{uvk})$ 
11:              $s_{uvk} = s_{vk}$ 
12:             prosumer  $k$  sell consumer  $l$  with  $(s_{vk} - s_{uvk})$  volume energy
13:         End
14:         If  $(b_{vl} - b_{uvl}) < (s_{vk} - s_{uvk})$ 
15:              $b_{uvl} = b_{vl}$ 
16:              $s_{uvk} = s_{uvk} + (b_{vl} - b_{uvl})$ 
17:             prosumer  $k$  sell consumer  $l$  with  $(b_{vl} - b_{uvl})$  volume energy
18:         End
19:     End
20: End
21: End
22: End

```

---

## 4.4 实验仿真及分析

按照本文假设, 电力消费者和电力产消者提前一天对各个用电时段分别进行报价, 包含期望电价和需求电量。由于每一天按照居民用电规律存在用电高峰和用电低谷时期, 因此假设电力消费者和电力产消者会根据一天负荷分布合理报价, 即在用电高峰期, 报价会相对较高, 在用电低谷期, 报价会相对较低。在本实验环节, 将一天分为 24 个时段, 即一个小时为一个时段。因为分布式能源交易刚刚兴起, 所以现在并未有做分布式交易的公开的数据集, 因此, 本实验中的买卖双方的初始报价是根据一个关于居民能耗按每小时分布的真实数据集<sup>[2]</sup> 随机生成的。依据是在用电高峰时期报价会相对较高, 并且二者期望交易的电量也会相应较多, 在用电低谷时期报价会相对较低, 二者期望交易的电量也会相应较少。

### 4.4.1 场景设计及参数设置

在仿真实验中, 所模拟的场景是最小交易单位, 即一个包含 20 户居民用户的社区。采用区块链平台 Hyperledger Fabric 来搭建区块链网络, 采用 raft 共识机制, 一个区块链网络里的电力消费者和电力产消者在同一个社区进行点对点电量交易,

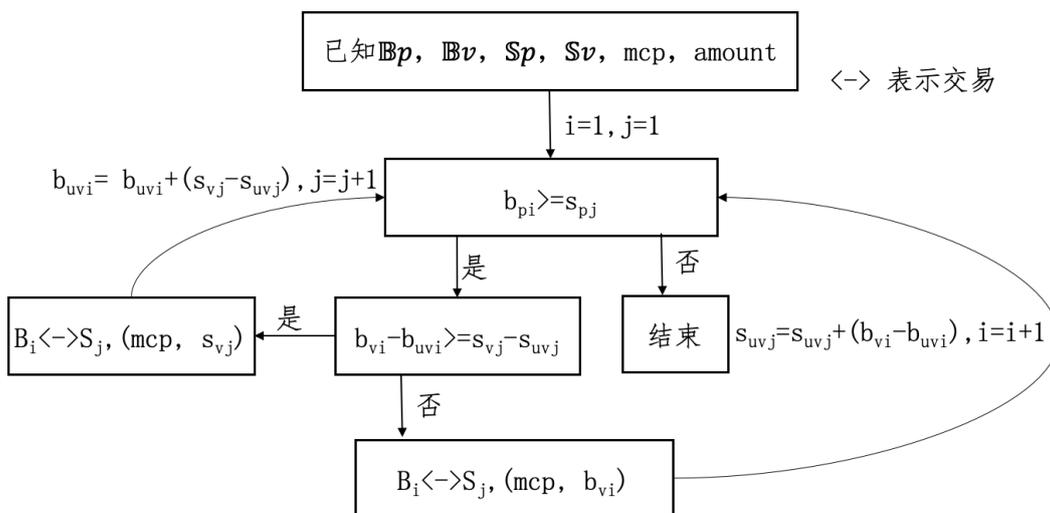


图 4.5 交易匹配步骤

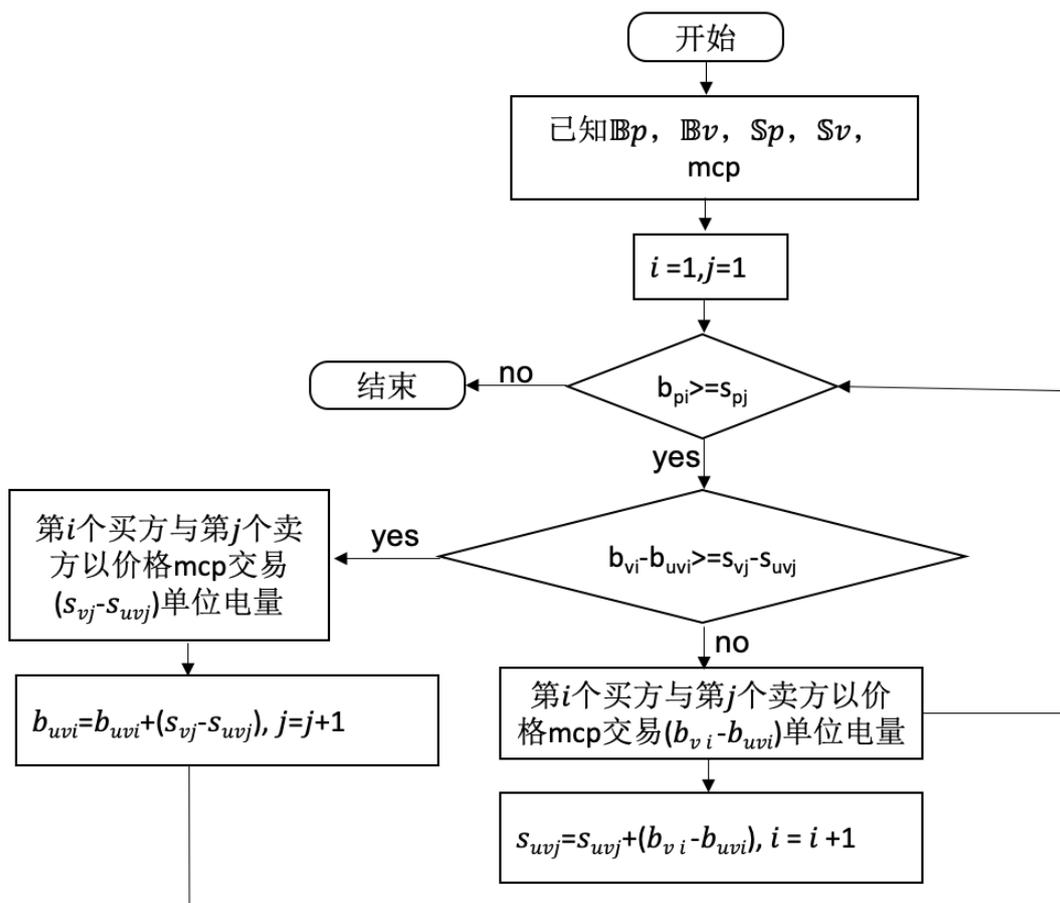


图 4.6 交易匹配算法流程图

表 4.4 区块链网络参数

参数名称	数量
organization	1
channel	1
peer	4
orderer	5

具体的参数如表 4.4所示。搭建该区块链网络需要 5 台虚拟机，4 个 peer 节点分别是 peer0, peer1, peer2 和 peer3。在本小节的实验中，假设有 10 个电力消费者和 10 个电力产消者在各个时段分别进行报价，其中，5 个电力消费者通过 peer0 向区块链网络提交报价合约，5 个电力消费者通过 peer1 向区块链网络提交报价合约，5 个电力产消者通过 peer2 向区块链网络提交报价合约，5 个电力产消者通过 peer3 向区块链网络提交报价合约。在每天的用电高峰时期，所申报的期望电价会相应较高，在用电低谷时期所申报的期望电价会相对较低。

表 4.5 电力消费者的期望电价

时段	$b_{p1}$	$b_{p2}$	$b_{p3}$	$b_{p4}$	$b_{p5}$	$b_{p6}$	$b_{p7}$	$b_{p8}$	$b_{p9}$	$b_{p10}$
1h	3.4	4.6	3.9	4.8	4.9	2.7	2.5	5.7	3.4	3.3
2h	6.2	4.1	5.5	4.1	4.8	2.8	4.7	5.7	4.3	5.2
3h	4.9	2.5	5.2	4.6	3.4	2.3	5.7	4.1	5.1	5.7
4h	5.2	6	3.9	5.5	4.1	6	5.8	2.7	2.8	3.2
5h	6.3	4.1	4.9	3.6	4.4	3.9	3.8	4.7	4.7	6
6h	5.6	6.6	6.3	6.9	5.6	3.6	6.3	6.8	6.5	5.2
7h	7.4	5.3	7.8	6.8	5.6	4.8	7.9	8.5	4.9	7.7
8h	6.3	5.3	5.9	7.8	8.2	4.9	7.2	4.9	7.6	6
9h	7.8	8.2	6.3	8.3	5.5	4.6	6.7	4.4	5.1	5.9
10h	6.1	4.3	3.9	7.2	5	7.5	7.3	5.2	5.5	5.8
11h	6.3	6.1	5.9	6.2	7.5	5.7	5.4	6.6	4.7	4.9
12h	7.4	5.6	5.7	3.5	5.2	5.8	3.6	6	6	3.7
13h	5.5	4.9	5.7	4.4	5.8	6	3.1	3.2	5.7	6.9
14h	3.6	4.4	5	3.9	4.1	3.9	4.1	5	3.8	4.1
15h	5.6	2.6	4.8	5.4	3.7	3.4	5.7	3.5	3.2	4.2
16h	5.4	3	3.9	3.9	5.9	4.4	6	3.3	3.9	5.2
17h	6.8	5.1	4.2	3.8	5.4	4.1	6.5	6.7	4	4.4
18h	8.1	7.5	8.1	6.3	5.4	6.1	8.1	6	6.3	6.6
19h	7.1	7	9.1	6	5.4	9.2	8.9	9.3	7.1	9.2
20h	9	6.2	8.3	8.6	8	7.4	6.5	6.7	6.2	5.6

续下页

续表 4.5 电力消费者的期望电价

时段	$b_{p1}$	$b_{p2}$	$b_{p3}$	$b_{p4}$	$b_{p5}$	$b_{p6}$	$b_{p7}$	$b_{p8}$	$b_{p9}$	$b_{p10}$
21h	7.4	6.1	8.2	5.2	8.6	7.8	8.7	8.6	8.6	7.3
22h	4.8	7.7	5.4	5.9	7.4	6.8	6.4	8.5	7.1	6.1
23h	5.1	7.5	6	7.2	5.5	4.9	6.2	7.4	4.8	7.3
24h	7.2	6.7	6.8	3.5	6	7	3.7	4.6	4.6	5.6

表 4.6 电力消费者的需求电量

时段	$b_{v1}$	$b_{v2}$	$b_{v3}$	$b_{v4}$	$b_{v5}$	$b_{v6}$	$b_{v7}$	$b_{v8}$	$b_{v9}$	$b_{v10}$
1h	6	6	2	2	5	5	4	3	4	4
2h	4	2	3	3	4	5	5	4	3	3
3h	2	2	3	3	3	5	4	4	2	2
4h	3	2	4	6	4	2	5	5	5	5
5h	5	5	3	6	6	2	5	5	4	4
6h	4	6	4	6	4	6	6	4	5	6
7h	7	6	5	6	7	5	8	5	8	6
8h	8	7	7	7	7	7	6	5	7	8
9h	7	4	7	7	8	5	7	4	7	5
10h	4	7	4	6	7	4	4	7	5	6
11h	3	5	4	6	4	7	3	6	3	4
12h	6	4	4	6	5	3	7	4	3	5
13h	5	5	3	4	3	4	6	5	6	6
14h	6	5	4	3	5	3	2	4	6	3
15h	4	3	4	2	6	3	4	3	2	4
16h	3	2	2	3	2	5	4	6	6	6
17h	4	5	4	5	5	6	6	4	5	5
18h	5	5	6	5	8	6	5	6	6	6
19h	8	7	7	8	6	9	9	8	7	8
20h	8	6	7	8	6	6	9	7	7	9
21h	7	6	9	6	5	8	5	6	8	8
22h	5	6	6	7	5	7	5	6	6	8
23h	4	7	5	6	5	6	7	5	4	4
24h	3	7	6	7	6	3	6	6	6	5

表 4.7 电力产消者的期望电价

时段	$s_{p1}$	$s_{p2}$	$s_{p3}$	$s_{p4}$	$s_{p5}$	$s_{p6}$	$s_{p7}$	$s_{p8}$	$s_{p9}$	$s_{p10}$
1h	2.3	1.8	3	2	1.7	3	5.1	4.6	4.5	2.3
2h	3.3	2.3	1.9	1.6	2.1	4.9	4.5	4.4	4.4	2
3h	2.4	3.7	4.1	4.6	4.7	1.5	3.6	3.9	3.2	1.9
4h	3.2	1.7	5	4.8	3.5	2.5	4.9	3.6	4.8	4.7
5h	3.4	3.1	3.8	3.1	2	2.6	4.7	1.6	1.6	3.9
6h	3	4	3.8	3.3	5.9	2.7	3.6	2.7	4.4	3
7h	4.9	6.5	4.8	5.7	7.1	3.9	3.7	4.4	6.6	6
8h	4.6	5	4.4	5.5	3.9	6.5	7.3	7.5	6.6	7.5
9h	3.4	4.5	7.2	6.4	4.9	7.1	5.8	6.6	4.5	4.1
10h	4.5	3.2	4.2	6.5	4	2.7	2.9	3.4	5.8	4.2
11h	3.9	3.1	6.6	4.4	3.5	2.9	2.9	3.4	5.4	3.3
12h	2.7	4.5	3.5	6.5	3	4.6	5.6	4.1	6.5	4.4
13h	3	3.6	2.1	3.7	3	5.6	5.3	4	2.1	3
14h	2.6	2.4	2.5	5.1	2.2	1.8	5.3	3.9	5.6	3.2
15h	5.1	4.1	4.7	4.5	3.5	1.9	2.3	5	5.1	5.2
16h	2.9	4.2	4.8	4.2	4.9	3.7	4.2	4.3	2.7	5.3
17h	6.1	2.6	6.2	6.1	5	2.5	5.9	2.8	6.2	5
18h	4.1	4.6	6.4	6.2	6.9	7.6	4.8	3.9	7.6	4
19h	7.9	4.9	7.6	7.5	7.9	6.6	7.9	5.2	7.1	5.7
20h	7.9	7.4	6.2	6.4	4.4	4.4	6.7	6.3	7.8	6.7
21h	4.6	5.5	7.1	6.1	4	7.4	7.3	4.3	6.2	5.5
22h	6.8	4.9	4.6	5.6	7.6	4.1	4.2	6.2	7.2	5.7
23h	4.8	6.5	6.2	3.4	6.6	3.9	4.3	6.4	4.8	6.3
24h	3.2	6	3.2	3.1	4.5	3.9	4.7	6.1	5.3	2.5

表 4.8 电力产消者的需求电量

时段	$s_{v1}$	$s_{v2}$	$s_{v3}$	$s_{v4}$	$s_{v5}$	$s_{v6}$	$s_{v7}$	$s_{v8}$	$s_{v9}$	$s_{v10}$
1h	2	5	5	3	4	4	4	5	2	2
2h	5	3	5	1	3	4	2	5	5	2
3h	2	4	5	3	2	3	2	2	3	4
4h	3	3	2	3	3	2	5	4	4	2
5h	6	5	2	3	5	5	6	3	5	4
6h	4	5	6	6	4	5	3	3	6	4
7h	5	7	7	7	6	6	6	7	6	6
8h	7	5	5	7	9	7	6	5	7	9
9h	7	6	8	5	6	8	6	6	5	6

续下页

续表 4.8 电力产消者的需求电量

时段	$s_{v1}$	$s_{v2}$	$s_{v3}$	$s_{v4}$	$s_{v5}$	$s_{v6}$	$s_{v7}$	$s_{v8}$	$s_{v9}$	$s_{v10}$
10h	7	3	7	7	7	6	7	5	6	5
11h	4	7	6	4	5	5	5	5	6	6
12h	6	5	3	4	4	5	7	6	6	6
13h	4	6	5	3	3	3	6	4	3	5
14h	3	2	3	4	3	3	5	4	3	4
15h	2	3	3	3	2	5	4	3	4	5
16h	2	2	3	5	3	5	5	4	3	6
17h	6	5	4	5	4	5	4	5	3	4
18h	9	8	6	8	6	9	8	7	6	5
19h	9	6	9	9	8	6	9	9	8	8
20h	7	7	6	8	7	6	6	8	7	7
21h	6	8	9	5	6	6	9	8	6	6
22h	7	8	8	6	8	7	7	9	6	8
23h	4	5	7	5	7	6	7	5	5	5
24h	7	6	7	7	4	5	4	3	3	7

#### 4.4.2 交易结果分析

表 4.5和表 4.6分别是 10 个电力消费者的初始报价，即 24 个时段的期望电价与需求电量，表 4.7和表 4.8分别是 10 个电力产消者的初始报价，即 24 个时段的期望电价与需求电量。表 4.5，表 4.6，表 4.7和表 4.8中， $b_{pi}(i = 1, 2, \dots, 10)$  表示第  $i$  个电力消费者在各个对应时段的期望电价，单位为元， $b_{vi}(i = 1, 2, \dots, 10)$  表示第  $i$  个电力消费者在各个对应时段的需求电量，单位为  $10kW \cdot h$ ， $s_{pi}(i = 1, 2, \dots, 10)$  表示第  $i$  个电力产消者在各个对应时段的期望电价，单位为元， $s_{vi}(i = 1, 2, \dots, 10)$  表示第  $i$  个电力产消者在各个对应时段的需求电量，单位为  $10kW \cdot h$ 。在每个时段的成交价和成交量如图 4.7所示。

下面以 6h 时段为例用数据来说明匹配的结果，6h 时段 10 个电力消费者与 10 个电力产消者的期望电价和需求电量分别如表 4.5，表 4.6，表 4.7和表 4.8所示，匹配方式如图 4.8所示。其中， $b_i(i = 1, 2, \dots, 10)$  表示电力消费者， $s_i(i = 1, 2, \dots, 10)$  表示电力产消者。

如图 4.8所示，根据电力消费者的期望电价由高到低进行排序，电力产消者的期望电价由低到高进行排序，得到的成交价是 5.2 元，该时段总的成交量是  $420kW \cdot h$ 。对电力消费者而言，报价越高越具有优势，对电力产消者而言，报价越低越具有优势，因此电力消费者  $b_4$  优先与电力产消者  $s_6$  进行交易匹配，电力消费者  $b_4$  的

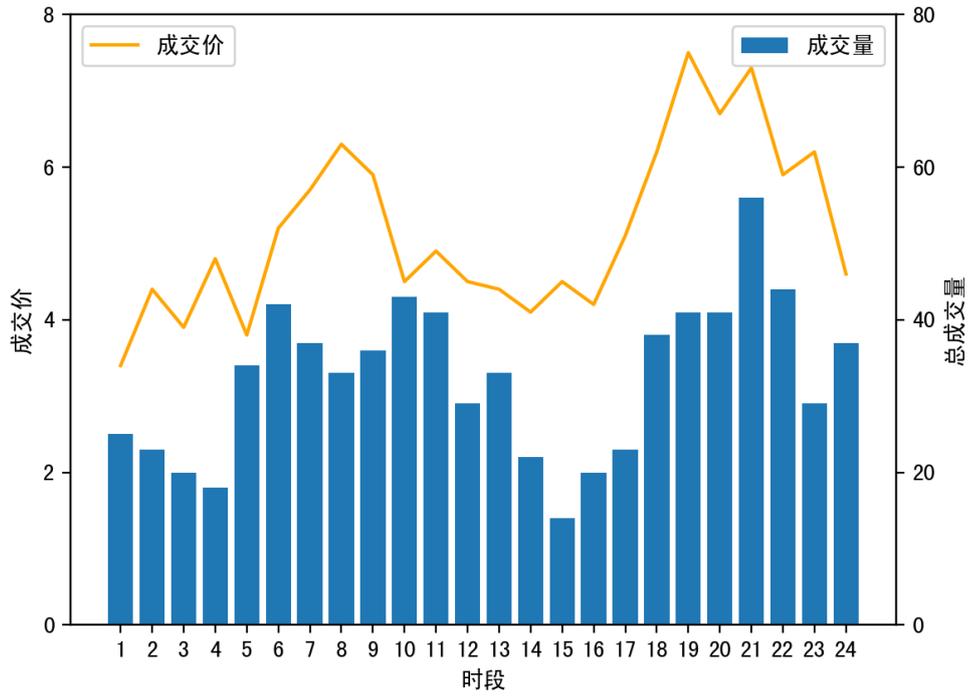


图 4.7 各个时段的成交价和成交量

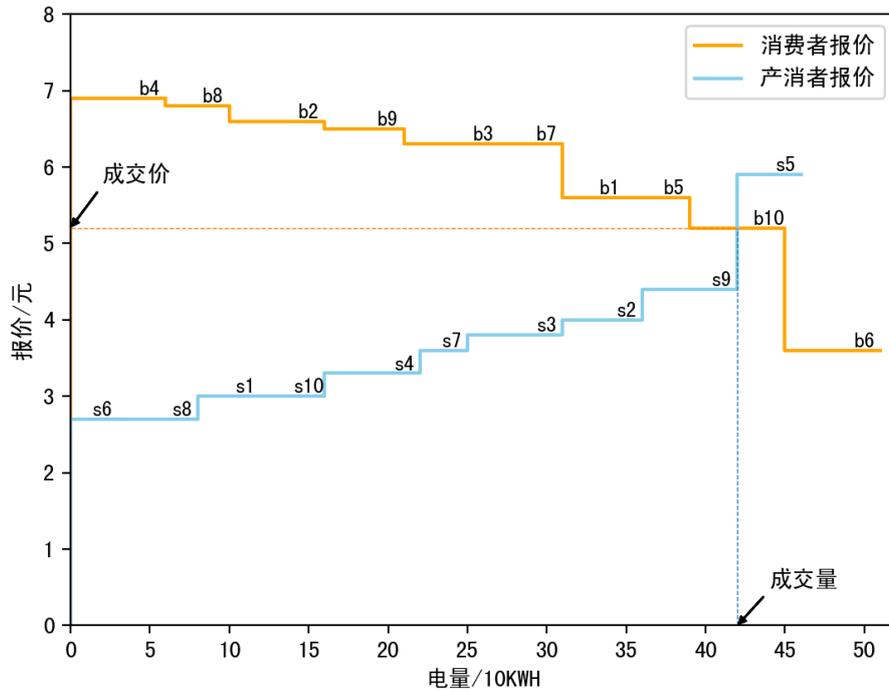


图 4.8 6h 时段匹配方式

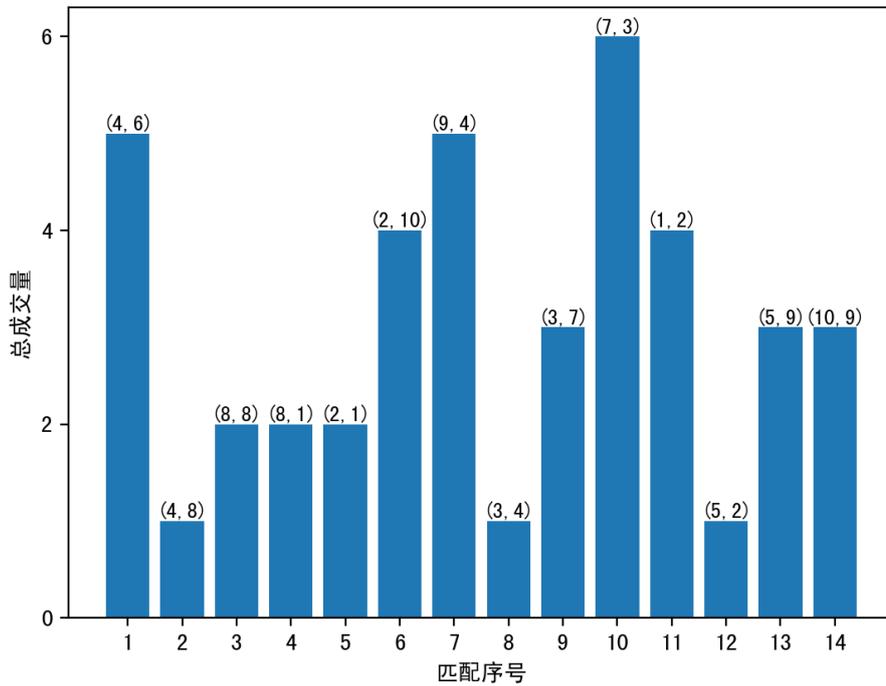


图 4.9 6h 时段匹配结果

需求电量是  $60kW.h$ ，电力产消者  $s_6$  的需求电量是  $50kW.h$ ，因此电力消费者  $b_4$  可以先从电力产消者  $s_6$  那购买  $50kW.h$ ，剩下所需的  $10kW.h$  则需要从下一个最具有优势的电力产消者  $s_8$  那里进行购买，按这样的匹配方式依次类推，可以得到所有竞价成功的电力消费者和电力产消者最终的匹配结果如图 4.9 所示。其中，柱状图上方括号内的数字分别表示成功匹配的电力消费者和电力产消者的序号。

#### 4.4.3 双向拍卖对比

本文采用的双向拍卖定价机制与文献 [46] 中略有不同，采用本文中的定价及交易匹配方法，在每个时段只有一个统一成交价，而采用文献 [46] 中的定价及交易匹配方法，每个时段有多个成交价，成交价的个数与交易匹配的个数相等，为了便于比较，下面以文献 [46] 中每个时段的平均成交价与本文中方法得到的每个时段的成交价进行比较，比较结果如图 4.12 所示，其中，方法 1 表示文献 [46] 中的定价及交易匹配方法，方法 2 表示本文中的定价及交易匹配方法。买方成交个数对比如图 4.10 所示，卖方成交个数对比如图 4.11 所示。

从图 4.10 和图 4.11 中可以看出，文献 [46] 定价方法得到的买方成交个数普遍高于本文定价方法得到的买方成交个数，同样，文献 [46] 定价方法得到的卖方成交个数普遍高于本文定价方法得到的卖方成交个数，说明文献 [46] 中的定价方法

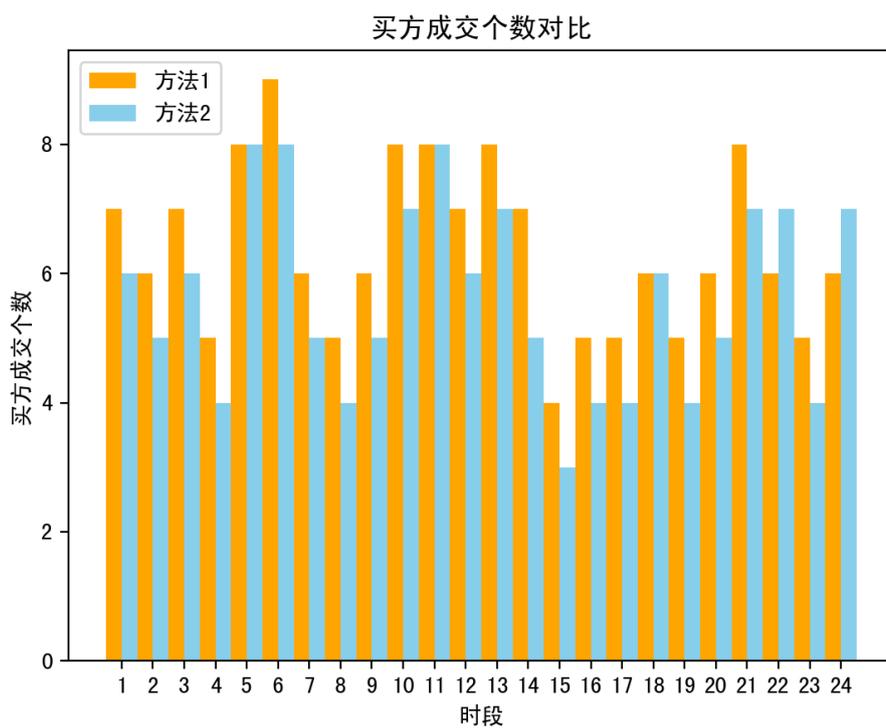


图 4.10 买方成交个数比较

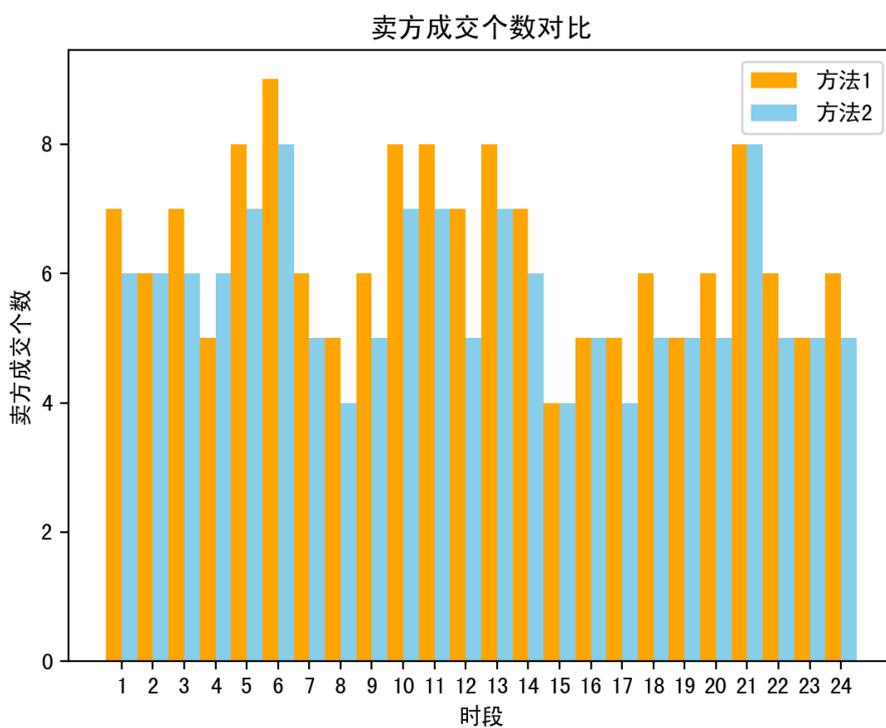


图 4.11 卖方成交个数比较

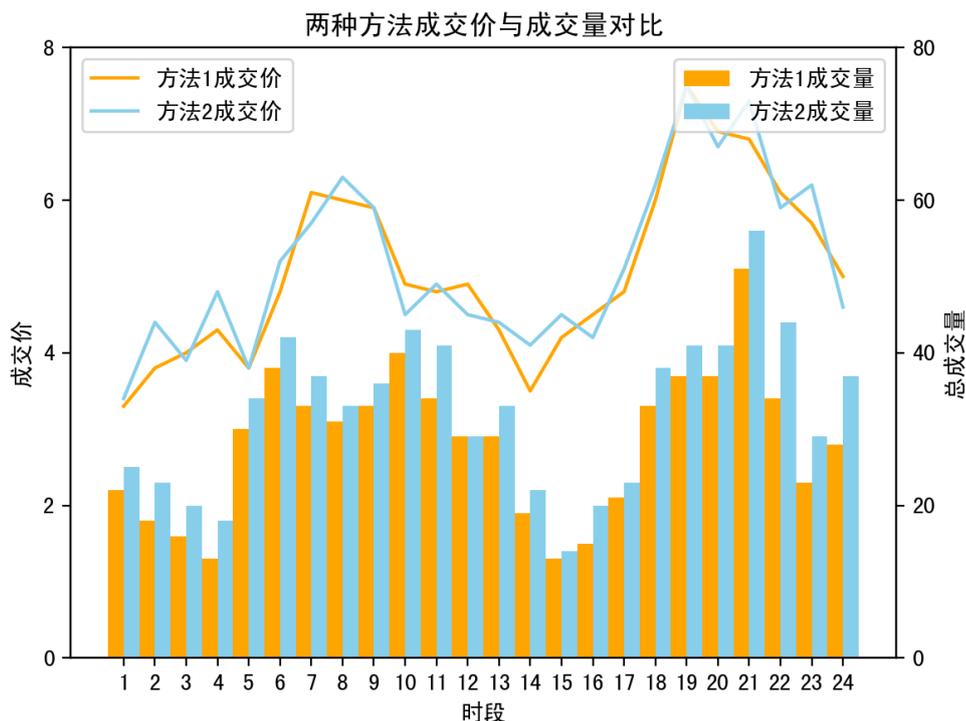


图 4.12 两种方法成交价与成交量对比

在交易个数方面优于本文中的定价方法。从图 4.12 中可以看出，本文方法得到的成交量均高于文献 [46] 定价方法得到的成交量，本文定价方法得到的成交价可能低于文献 [46] 定价方法得到的成交价，也可能高于后者定价方法得到的成交价，因为由本文的定价方法得到的成交价与电力消费者和电力产消者的期望电价和需求电量均有关系，在每一个时段仅有一个统一的成交价，而由文献 [46] 中定价方法得到的成交价只与电力消费者和电力产消者的期望电价有关，并且每个时段会有多个成交价，该成交价与每组交易双方的期望电价都有关系，因为每一个成交价是由交易双方的期望电价的平均值得到的。由此可以看出，从成交量这个角度来看，本文采用的定价方法有一定的优势，并且也与点对点直接交易的意图相吻合。

#### 4.5 本章小节

本章主要介绍了一种基于区块链的点对点电量交易的模型与策略，包括双向拍卖定价机制以及交易匹配方式，同时，通过与其他的双向拍卖的定价方法相比较，说明了本文所选用的定价方法在最大化交易匹配数量上的优势与有效性，仿真表明本文提出的交易模型的适用性与可行性。

## 第5章 总结与展望

### 5.1 论文工作总结

本文通过关于区块链技术在能源互联网中的应用研究现状调研，梳理了区块链技术在能源互联网中的价值传递模式和概括归纳了二者结合的理论依据。就目前区块链技术在能源领域的两大应用场景，即点对点分布式能源交易和自动需求响应模型进行了重点研究。本文的主要贡献总结如下：

(1) 分析了区块链技术与能源互联网的融合需求，指出了区块链技术的应用意义。同时，通过分析能源互联网的架构特点、技术和价值属性，提出了能源互联网价值传递模式，以及在能源互联微网中的传递模型，并且，给出了能源区块链的定义和作用分析。

(2) 以城市居民用户为例，提出了一种基于区块链技术的民用负荷控制策略。通过将区块链技术与负荷控制相结合，基于智能合约实现负荷控制逻辑，可以实现一种无需第三方参与的自动化负荷控制，从而可以降低居民用户的用电成本，同时还可以保障居民用户的隐私安全。

(3) 本文提出了一种基于分时双向拍卖定价机制和区块链的点对点电量交易模型与策略，分时电价有助于用户转移用电高峰时段的负荷，达到削峰填谷，保护电网安全稳定运行的目的，采用本文提出的双向拍卖定价机制可以实现在同样报价的情况下，最大化该时段的总成交量的目标，同时也给出了一种具体的交易匹配策略。

### 5.2 研究工作展望

本文只是针对于城市居民用户进行了负荷控制及电量交易研究，因此，对于更进一步的研究与实践还有待继续，针对本文所研究的课题，接下来的重点可以放在以下几个方面。

(1) 价值传递模型的深化：本文研究的能源互联网价值传递模型考虑的能源参与主体有限，未来的研究可以将能源互联网中涉及到的更多的角色引入此价值传递模型之中。

(2) 负荷控制策略的优化：本文提出的负荷控制策略主要是针对城市居民用户的用电行为进行开展的。也可以根据商业用户和工业用户的用电行为，进一步研究基于这两类典型电力用户用电行为的负荷控制策略。此外，本文的模型是基于

一个供电公司，多个用户搭建的，未来也可研究多供电公司，多用户模型。

(3) 电量交易模型的优化：本文对报价策略没有做过多研究，在未来的研究中，可以加入这方面的研究，使得交易系统更加高效。

## 参考文献

- [1] Bilgen S, Kaygusuz K, Sari A. Renewable energy for a clean and sustainable future. *Energy sources*, 2004, 26(12):1119-1129.
- [2] Mathiesen B, Lund H, Connolly D, et al. Smart energy systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Applied Energy*, 2015, 145:139-154.
- [3] Lasseter R H, Paigi P. Microgrid: A conceptual solution // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551). IEEE, 2004.
- [4] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 99(1): 133-148.
- [5] Swan M. *Blockchain: Blueprint for a new economy*. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [6] Rifkin Jeremy. *The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy*. New York: Palgrave MacMillan, 2011.
- [7] 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命. *广西电业*(12):86-89.
- [8] 慈松, 李宏佳, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(6):762-773.
- [9] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(6):702-713.
- [10] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网—信息与能源的基础设施一体化. *南方电网技术*, 2014, 8(4):1-10.
- [11] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望. *电力系统自动化*, 2015, 39(19):1-8.
- [12] 王冰玉, 孙秋野, 马大中, 等. 能源互联网多时间尺度的信息物理融合模型. *电力系统自动化*, 2016, 40(17):13-21.
- [13] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网. *电力自动化设备*, 2016, 36(9):1-7,16.
- [14] 林为民, 余勇, 梁云, 等. 支撑全球能源互联网的信息通信技术研究. *智能电网*, 2015, 3(12): 18-23.
- [15] 郭培源. *电力系统自动控制新技术*. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网. *电网与清洁能源*, 2009, 25(1):7-11.
- [17] 周海明, 刘广一, 刘超群. 能源互联网技术框架研究. *中国电力*, 2014, 47(11):140-144.
- [18] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架. *电力系统自动化*, 2014, 38(15):1-11.
- [19] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14):3495-3502.
- [20] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制 (一). *电网技术*, 2015, 39(11): 66-72.
- [21] 谭磊, 陈刚. *区块链 2.0*. 北京: 电子工业出版社, 2015.

- [22] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望. 自动化学报, 2016, 42(4):481-494.
- [23] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探. 中国电机工程学报, 2016, 36(15):4011-4022.
- [24] 杨德昌, 赵肖余, 徐梓潇, 等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3664-3671.
- [25] Andoni M, Robu V, Flynn D, et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 100: 143-174.
- [26] Morstyn T, Farrell N, Darby S J, et al. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nature Energy*, 2018, 3(2):94-101.
- [27] Kang E S, Pee S J, Song J G, et al. A blockchain-based energy trading platform for smart homes in a microgrid // 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Nagoya, Japan: IEEE, 2018: 472-476.
- [28] Alcarria R, Bordel B, Robles T, et al. A blockchain-based authorization system for trustworthy resource monitoring and trading in smart communities. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(10):1-30.
- [29] Li Z, Kang J, Yu R, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(8):3690-3700.
- [30] Pop C, Cioara T, Antal M, et al. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(1):1-21.
- [31] 李彬, 卢超, 曹望璋, 等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3691-3702.
- [32] 杨晓东, 张有兵, 卢俊杰, 等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3703-3716.
- [33] 武赓, 曾博, 李冉, 等. 区块链技术在综合需求侧响应资源交易中的应用模式研究. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3717-3728.
- [34] Ghosh A, Aggarwal V, Wan H. Exchange of renewable energy among prosumers using blockchain with dynamic pricing. *arXiv preprint arXiv:1804.08184*, 2018.
- [35] Inayat K, Hwang S O. Load balancing in decentralized smart grid trade system using blockchain. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2018:1-11.
- [36] Noor S, Yang W, Guo M, et al. Energy demand side management within micro-grid networks enhanced by blockchain. *Applied Energy*, 2018, 228:1385-1398.
- [37] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Cryptography Mailing list at <https://metzdowd.com>*, 2009.
- [38] 铭数科技(青岛)有限公司. 能源交易 demo [EB/OL]. <http://demo.bcilab.mingbyte.com/>.
- [39] 施泉生. 面向智能电网的需求响应及其电价研究. 上海财经大学出版社, 2014.
- [40] Mohsenian-Rad A, Wong V W S, Jatskevich J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3):320-331.
- [41] Fadlullah Z M, Quan D M, Kato N, et al. Gtes: An optimized game-theoretic demand-side management scheme for smart grid. *IEEE Systems Journal*, 2014, 8(2):588-597.

- [42] 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 [EB/OL]. (2017-10-31)[2017-10-31]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm).
- [43] Zhang C, Wu J, Zhou Y, et al. Peer-to-peer energy trading in a microgrid. *Applied Energy*, 2015, 220:1-12.
- [44] 龚钢军, 王慧娟, 张桐, 等. 基于区块链的电力现货交易市场研究. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23):6955-6966.
- [45] 李彬, 覃秋悦, 祁兵, 等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述. *电网技术*, 2019, 43(3):228-239.
- [46] 韩冬, 孙伟卿, 张巍, 等. 基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计. *电力系统自动化*, 2019, 43(7):89-96.
- [47] Gutierrez G, Quinonez J, Sheble G. Market clearing price discovery in a single and double-side auction market mechanisms: Linear programming solution // 2005 IEEE Russia Power Tech. IEEE, 2005: 1-5.

## 致 谢

在清华的研究生生涯就快要结束了。在这宝贵的时间里我收获了很多宝贵的知识财富，获得了珍贵的友情，同窗同学之情。我衷心感谢我的导师曹军威老师在这几年来对我的耐心指导。他使我认识到了自己很多的不足之处，在曹老师的鼓励下，我进步了很多，感谢曹老师在我论文研究工作中的指导和建议。曹老师对学生有耐心又有责任心，他总是时常关心我的科研和学习进度，为我排忧解难，关心我的专业实习和日常生活。同时也特别感谢张华老师对我的鼓舞和帮助，在张华老师的开导中，我获益良多，让我终身受用。

感谢李秀老师对我的照顾和指导，给我提供了一个良好的学术研究环境，并且让我在深圳收获了很多宝贵的友情。感谢袁博老师，王好谦老师，郭振华老师，刘厚德老师，杨余久老师在我学习期间对我的关心和指导。感谢黄凌燕老师的辛勤工作和对我日常学习的支持。感谢郝婧、尚敏、门畅、谢露露、王慧敏师姐和汤友华、崔作鹰、杨志雄、范琦、秦红伟师兄在科研及生活中对我的指导和帮助；感谢实验室尹帮户、赵泽宇、金坤、龙如蛟、李子寅研一时期对我的帮助与鼓励；感谢实验室工程师陈柏良在技术上对我的指导和帮助。

感谢在挪威斯塔万格大学进行交换学习期间，容淳铭老师在学术上对我的耐心指导，感谢实验室的小伙伴 Faraz, Jayachander, Russel, Kaya, Cristina, Antorweep, Nikita, Albana 和 Aida 在科研和生活中给与我的帮助，很开心能认识你们。

感谢北京实验室杨刚和赵兵兵师兄，张婉璐师姐，郝传统同学，秦钰超，秦兆铭和李宇童师弟在科研及生活中的鼓励和帮助。感谢王同贺、任光、杨洁、郭健、肖泽青、明阳阳、梁宏几位博士后在学术研究方面给我提出的宝贵建议。在我论文写作过程中，感谢任光博士后给了我很多支持。非常感谢袁仲达师兄在我毕业论文撰写中给我的建议。感谢实验室合作工程师孙博在实验中给与我的支持。特别感谢华昊辰师兄和艾崧溥博士后在我学术研究中对我的帮助和鼓励，我的科研成果离不开华师兄和艾博士的耐心指导。

感谢两位漂亮和善的室友许海华和孙井花在这几年里的陪伴。我在你们的吐槽中茁壮成长，希望我们友谊长存。感谢全体信研班级的同窗和伙伴，与你们相遇是缘分也是我的幸运，谢谢你们与我一同渡过这幸福的三年。感谢研一在社团活动中认识的小伙伴们，是你们让我的研一生活收获了一份珍贵的回忆。

最后感谢我亲爱的家人对我的支持和爱护，感谢亲爱的爸爸妈妈对我的关心和培养，是你们一直支持着我，做我坚强的后盾。

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_

## 个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历

1990年6月1日出生于新疆省新源县那拉提农场一队。

2008年9月考入北京化工大学信息科学与技术学院自动化专业，2012年7月本科毕业并获得工学学士学位。

2016年9月考入清华大学自动化系攻读控制工程硕士学位至今。

### 发表的学术论文

- [1] You H, Hua H, Cao J. A smart contract-based energy trading strategy in energy Internet [C]// 3rd IEEE Int. Conf. on Energy Internet, Nanjing, China, 20-24 May, 2019. (EI 检索, 检索号: 20193607393016.)