

综合能源服务区块链的网络架构、交互模型与信用评价

龚钢军¹, 杨晟¹, 王慧娟¹, 刘林², 陆俊¹, 文亚凤¹, 杨海霞¹

(1. 北京市能源电力信息安全工程技术研究中心(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 国网大连供电公司, 辽宁省 大连市 116001)

Network Architecture, Interaction Model and Credit Evaluation of Integrated Energy Service Blockchain

GONG Gangjun¹, YANG Sheng¹, WANG Huijuan¹, LIU Lin², LU Jun¹, WEN Yafeng¹, YANG Haixia¹

(1. Beijing Engineering Research Center of Energy Electric Power Information Security (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;
2. State Grid Dalian Electric Power Supply Company, Dalian 116001, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: As a new energy service model, integrated energy service is also an optimum practice scenario for the research and application with energy internet and ubiquitous power internet of things. In order to build an integrated energy service system that meets diversified energy production and differentiated energy consumption. It is urgently needed to research on network architecture, interaction models and credit evaluation in integrated energy services. This paper analyzed the application of blockchain and integrated energy services. And it proposed a physical architecture and a master-slave multi-chain structure model about the integrated energy service system. They include the integrated energy layer, the dispatching transport layer and the integrated service layer. Then the logical information interaction model of the integrated energy service system was proposed. It is based on the design of the six-layer integrated energy service blockchain logic hierarchical architecture model. And it referenced the OSI standard network model definition. Simultaneously, it build a credit rating system that ensures the efficient operation of the integrated energy service blockchain. Finally, the paper verified the applicability and matching of the blockchain in the integrated energy service scenario. And it provides the reference for the application of blockchain technology in integrated energy services.

KEY WORDS: integrated energy service; master-slave multi-chain structure; information interaction model; credit

evaluation mechanism

摘要: 综合能源服务是一种全新的能源服务模式,也是能源互联网与泛在电力物联网研究与应用的最佳实践场景。为构建满足多元化能源生产与差异化能源消费的综合能源服务体系,亟需开展综合能源服务中网络架构、交互模型和信用评价的研究。该文基于区块链与综合能源服务的融合应用分析,提出包括综合能源层、调度传输层和综合服务层3层结构的综合能源服务系统物理架构和综合能源服务系统的主从多链结构模型;在设计了6层综合能源服务区块链逻辑层级架构模型的基础上,参考OSI标准网络模型定义,提出综合能源服务系统逻辑信息交互模型;构建了确保综合能源服务区块链有效运行的信用评价体系,并仿真验证了区块链在综合能源服务场景中的适用性和匹配性,为区块链技术在综合能源服务中的应用提供参考。

关键词: 综合能源服务;主从多链结构;信息交互模型;信用评价机制

0 引言

能源互联网的建设推动了整个能源系统的优化集成,目的在于构建一体化、智能化、开放共享的能源生态体系^[1],而综合能源服务作为“多源互补、泛在物联、信息互动、网络智能^[2]”的能源互联网和泛在电力物联网研究与应用的最佳实践场景,旨在促进电网企业改革,提升综合能源利用效率,强化以客户为主体的需求服务意识^[3],构建满足多元化能源生产和差异化能源消费的综合能源服务^[4],促进“三型两网”^[5]的建设。

基金项目: 国家能源局科技项目(2017BJ0166)。

Project Supported by the Science and Technology Project of National Energy Administration (2017BJ0166).

综合能源服务作为一种新的能源服务模式^[6],在现有电力体制改革和售电侧放开政策的推进下,电网公司及民营售电公司将成为提供综合能源服务的主要服务提供商。其中,电网公司在提供传统购售电及调度业务之际,可通过大力发展辅助性、精益化的综合能源服务业务,新增赢利点^[7]。

但作为集能源组合供应式、新技术融合式、一体集成式3种业务形态于一体的综合能源服务系统^[8],在全面推进过程中也面临着一些具体困难,如:1)为确保提供综合能源服务的电网公司和民营售电公司的公平竞争性,综合能源服务公司需在政府政策的引导与激励下,打破政策束缚以及省、市间的区域壁垒^[9];2)在全新的商业模式与竞争压力下,综合能源服务公司面临着经验缺乏导致的设备功能不足、服务实施不到位、服务监管难等问题;3)在综合能源服务系统中涉及多主体间的交互,如何保证交互过程中信息的安全性及主体间的去中心化值得进一步探讨。因此,解决以上困难,构建安全、稳定、可靠的综合能源服务场景尤为重要。

能源互联网作为第三次工业革命的代表性技术改变了现代社会的生活方式和经济发展模式,随着能源互联网的不断建设和发展,分布式可再生能源在能源系统中起着越来越重要的作用。区块链是具有强分布式特征的新兴技术,具有普适性的底层框架,其去中心化、透明性、公平性以及公开性与能源互联网分布式能源的理论相吻合,可为能源互联网协同优化提供技术支撑,实现能源互联网的深刻变革。区块链分布式、开放性等特点能给能源交易体系带来巨大的变革,可以降低能源交易的成本、提高交易效率,其在开展分布式能源交易方面具有先天优势。在产业界,已有不少区块链项目致力于开展分布式能源P2P(peer-to-peer)交易;在学术界,区块链在能源互联网,尤其在分布式能源交易领域中的应用前景正受到广泛关注。电力行业是关乎国计民生的国民经济重要支柱产业之一,将区块链技术引进电力系统可以推进智能电网建设,提高生产技术和经营管理水平,提高电力系统运行效率,为系统安全可靠运行和科学管理提供技术保障,而区块链技术中最为重要的便是去中心化的分布式系统,能够适应智能化发展过程中的电力各应用系统。区块链、物联网、大数据、云计算等技术的不断涌现,推动了能源互联网的建设,有利于构建智慧型能源生态体系和实现安全可靠的综合能

源服务场景,通过区块链技术的分布式记账、智能合约、防篡改等功能的应用,能够保障综合能源服务场景中交易的公开透明性,提高交易可靠性,解决目前面临的多种困难。目前,区块链技术应用与能源互联网、能源交易、电力系统等方面的研究已经开展,其中,文献[10-12]设计了基于区块链技术的能源互联网架构模型,融合智能合约于能源交易互联网,构建协同模式;文献[13-14]介绍了区块链的架构及其在能源互联网中的应用,并探究了能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法;文献[15-17]建立了用于能源交易的联盟区块链,提出了基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法,设计了基于区块链的主动配电网分布式电力交易系统;文献[18-19]提出基于分布式区块链的现代电力系统数据保护框架,概述了运行于区块链上的智能分布式电力能源系统的需求、概念、方法以及展望;文献[20-21]构建基于区块链的能源交易模型,探讨电力现货交易与分布式能源交易中的关键技术;文献[22]提出一种以凸优化证明共识机制为核心的新型能源区块链底层技术,解决了将区块链应用于电力系统复杂优化场景的技术瓶颈。

以上文献在能源互联网、能源交易和电力系统等方面开展了区块链技术与电力业务应用的匹配性研究,有利于将区块链技术引入到综合能源服务体系的建设中来。但由于综合能源服务目前尚处于起步阶段,缺乏较为深入的分析阐述综合能源服务运行体系以及区块链与综合能源服务体系融合应用的研究。因此,本文围绕综合能源服务在系统物理架构下探究其运行体系,从结构、逻辑层级和信息交互3个方面深入分析综合能源服务区块链模型架构,并引入信用评价体系保证综合能源服务的开展,验证区块链支撑的综合能源服务体系协商机制的高效性、交易安全性和服务实时性。

1 综合能源服务系统物理架构

随着互联网信息技术、可再生能源技术以及电力改革进程的加快,我国能源消费供给、能源结构转型和能源系统形态已呈现全新的发展趋势,因此开展综合能源服务已成为提升能源效率、降低用能成本的重要发展方向^[23],也成为各企业新的战略竞争和合作焦点。综合能源服务具有综合能源与综合服务两大功能,且包含两方面的内容:一是涵盖电力、燃气和冷热等系统的能源系统的规划、建设和

运行，为用户提供“一站式、全方位、定制化”的综合能源解决方案；二是综合能源服务的商业模式，涵盖用能设计、规划，能源系统建设，用户侧用能系统托管、维护，能源审计、节能减排建设等综合能源服务项目。

1) 综合能源打破了传统的电、热、冷、气、油等用能行业的壁垒^[24]，实现多能源的综合利用，并接入太阳能、地热能等多种可再生能源，进而形成了开放互联的综合能源系统。而电力系统中高比例可再生能源出力具有较强的不确定性和间歇性，通过需求侧的主动参与调控，实现供需两侧交易、能量、信息的有效互动，利用灵活的市场调控机制和信息互动技术，深入挖掘供需两侧的用户用能灵活性、多能源功能灵活性。另外电网公司售电侧的放开更加凸显出电网作为能源传输与调度的重要枢纽与管网作用^[25]，进一步加强了调度方面的管理。

2) 综合服务是一种新型的为满足终端客户多元化能源生产与消费的能源服务商业模式，其推动了电网公司的资源优化配置和企业经营模式的转型，提升企业的社会竞争力。该服务模式的建立鼓励用户参与电能服务交易，提高用户参与电能交易的积极性，实现可再生能源的高比例接入电网^[26-27]和促进大规模储能系统的发展。

结合综合能源与综合服务两大功能，可将综合能源服务系统按照其物理架构分为综合能源层、调度传输层和综合服务层 3 层，如图 1 所示。

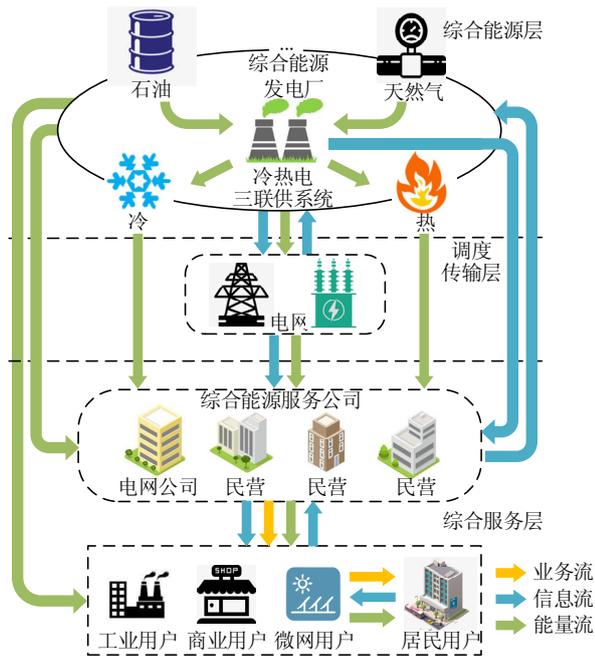


图 1 综合能源服务物理架构
Fig. 1 Integrated energy service model

1) 在综合能源层中，煤、石油、天然气、生物质能以及核能等一系列一次能源和以电能为主的二次能源支撑着整个综合能源系统的运行，为整个系统的运行提供能源保障。同时，一次能源在转化为二次能源时，会产生相应的冷、热等能源形式。冷热电三联供系统^[28]能够通过各种方式将一次能源和二次能源高效地转化成终端用户需要的多种能源形式，而综合能源服务公司能够将产生的能源合理高效地传输到每个需要不同形式能源的终端用户。

2) 对于调度传输层，由于售电侧的放开，电网公司在综合能源服务系统中的主要作用为进行能源的传输与调度。电网公司在保证系统稳定运行的基础上，对源端处电厂协同出力产生的电能进行合理调度与输配，满足服务侧的用户需求。调度传输层连接了综合能源层与综合服务层，是整个综合能源服务系统中的能量枢纽。

3) 对于综合服务层，各个用户将自身的需求以信息流的形式上传到综合能源服务公司，综合能源服务公司将用户需求进行汇总后传递到源端处，源端处的电厂与电网公司进行协商后确定输配方案并进行电能的传输，能量传输的同时也伴随着能量信息的传递。综合能源服务公司为各类用户提供综合服务。同时各类用户可以将自身的用电信息进行出售，综合能源服务公司能够将收集到的用电信息整合分析后再进行出售。微网用户与就近的居民用户进行电能交易并收集附近用户的用电信息。

综合能源服务的出现促进售电市场能源供应模式多元化，推动信息产业和能源产业的融合，使传统供能(供电、供热、供冷等)系统、各类型分布式可再生能源、储能设备、智能电网/微电网以及其他可控负荷之间实现协调优化控制，同时实现电力终端系统中局部系统的微平衡和局部系统之间的关联平衡，使得各种能源形式优化配置、互联互通，也催生出更多的消费模式和商业模式。

以综合能源服务系统中涉及到的热电联产技术为例说明系统能效的提高。目前对于天然气而言，其发电效率为 38%，热效率为 47%，锅炉效率为 90%。从图 2 所示的热电联产和热电分产能效示意图中可以看出，热电联产有效利用了热电分产中发电排走的热量，其能效相对于后者提高了 21%。而且，综合能源服务系统能使天然气等清洁能源和可再生能源替代化石燃料，同时利用能源转化过程中

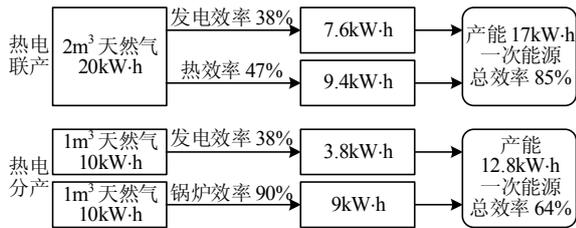


图2 热电联产和热电分产能效示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cogeneration and thermoelectric capacity

产生的冷、热等多种形式的能源,对用户侧提出的需求合理进行资源调配,有效地优化了资源配置。

2 综合能源服务区块链模型分析

2.1 综合能源服务系统的主从多链结构模型

综合能源服务是覆盖全电力环节、全业务类型的全新增值服务类型^[29-30],需要结合现有运营经验,采用新的模式、新的技术、新的方法来实现新的突破。而区块链在智能合约、分布决策、协同自治、拓扑形态、交易监管等方面与综合能源服务的需求有着天然匹配性,通过区块链技术可以保障综合能源服务信息的准确性、及时性,提高服务质量和效率^[31-32]。

在综合能源服务系统中,源端、电网公司、综合能源服务公司以及各类用户都可映射为区块链中的一类节点,如图3所示。各类节点采用主从多链结构,并以此结构为基础进行交互。其中主链节点承担着主从多链结构中主链的功能,为具有路由、交易、查询和验证功能的全节点,从链节点为具有部分功能的轻节点,承担着主从多链结构中从

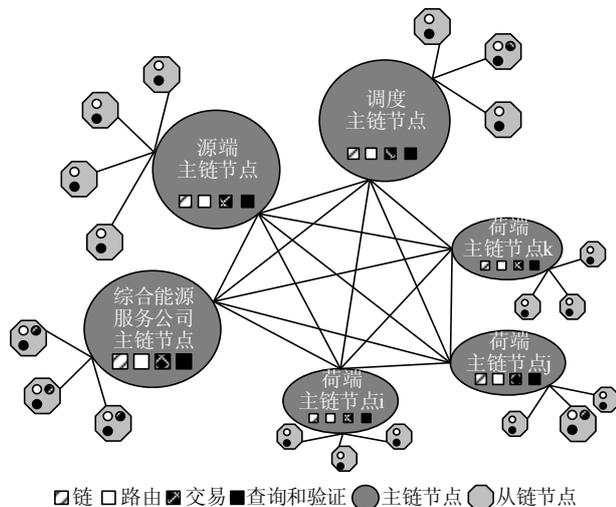


图3 综合能源服务系统的主从多链结构模型

Fig. 3 Master-slave multi-chain structure model of integrated energy service system

链的功能。

在系统中: 1) 荷端处的节点之间有信息的交互,例如微网用户购买附近用户的用电信息;荷端将各自的服务需求传递给综合能源服务公司节点;另外对于大型工业用户的直购电,荷端可与源端直接进行交互并达成交易。2) 综合能源服务公司节点的主要作用为接收荷端提出的服务需求信息,对于非供电类服务,荷端将各自的需求传递给综合能源服务公司主链节点,从链节点查询需求后与荷端点达成点对点共识后完成交易;对于供电类服务,主链节点将荷端需求发送到调度主链节点,并等待调度主链节点和源端主链节点完成协商后,将结果下发到荷端。3) 调度主链节点将接收到的需求信息发送给源端,并与源端进行协商,待协商完成后将结果进行下发。4) 源端主链节点收到调度主链节点发送的信息后,各从链节点查询信息并与调度主链节点进行协商,达成共识后将协商结果发送至调度主链节点。

在该主从多链模式下,从链只负责信息的上传与读取,主链只负责信息的发送与接收,其区块链结构如图4所示。主链的区块结构在传统区块链结构的基础上增加了注册表和扩充区块。注册表包含该主链下各从链的注册信息,其中注册信息包括从链的公钥地址、主链的公钥地址以及数据的名称和简介等。主链节点与从链节点间通过数字签名验证双方身份后进行互连。对于主链中的区块扩容,为了不增加区块的存储负担,保持区块原先的处理速度,不改变传统区块的结构,区块大小1M维持不变,只是附加了一个扩充区块,扩充区块大小为31M,用于暂存从链节点上传或其他主链节点发送的数

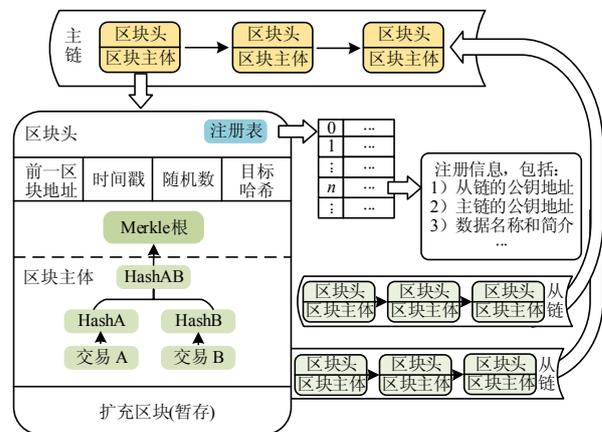


图4 主从多链模式下的区块结构

Fig. 4 Block structure in master-slave multi-chain mode

据，在完成数据发送或读取后清空扩充区块中的数据，原有的 1M 区块容量仅用于记录交易信息(主链发送与接收的记录和对应从链上传与读取的记录)，这样既能保证整体上区块的处理速度不变，又满足了主链中的区块对存储容量的要求。由于从链中的区块承载着存储交互数据的功能，且存储的数据大小不一，因此其对区块容量有差异化的要求，故在从链中设置 1、2 和 4M 3 种容量的区块，其他结构和传统的区块结构保持一致。在感知设备采集数据后，智能合约中的脚本根据感知设备端获得的数据

量大小选择对应容量的区块存储数据。

2.2 综合能源服务区块链逻辑层级架构模型

区块链的各种应用都是以其底层架构为基础设计的，其中区块链的底层架构可以分为 6 层，包括数据层、网络层、共识层、激励层、合约层、应用层^[33]。每一层分别完成一项核心的功能，各层之间互相配合，从而实现了一个去中心化的信任机制。因此从区块链层级架构模型入手，深入探究综合能源服务系统与区块链技术的适配性具有重要意义。综合能源服务区块链逻辑层级架构模型如图 5 所示。

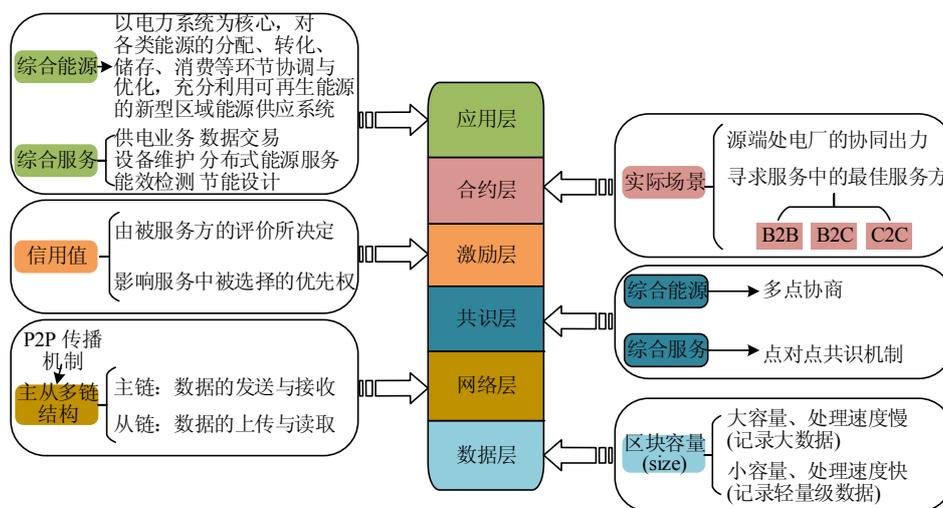


图 5 综合能源服务区块链逻辑层级架构模型

Fig. 5 Integrated energy service blockchain logical hierarchy model

1) 数据层：随着现有数据量的不断激增，越来越多的数据被加入到区块中，因此很多人认为区块的尺寸应该扩大，但增加区块大小将导致对处理能力的更高需求。由于综合能源服务系统中涉及一些交易的记录、数据的传输以及数据交易，数据量的大小不尽相同，因此在数据层中应设置不固定大小的区块。对于容量大的区块，虽然存储量大大提高，但是区块的生成与处理速度都相对较慢，因此适用于实时性较弱的大数据，例如数据交易中的数据。而对于容量小的区块则相反，适用于实时性较强的轻量级数据，例如居民用户与微网用户电能交易的记录。在综合能源服务系统中合理选择区块的容量，能够有效提高区块链在整个系统中的运行效率。

综合能源服务系统中采用主从多链结构去实现 P2P 的数据交互。实现方式如下：在系统中分别设置主链与从链，主链负责数据的发送与接收，从链负责数据的上传与读取，数据只在从链中记录，并且记录、上传与读取的速度与所使用区块的容量有关。主从多链结构通过定义主链与从链的功能，优化了系统的数据传播机制。

2) 网络层：在传统区块链中，各节点地位均等，全网所有节点在产生新的信息后，在第一时间就用 P2P 方式将新信息分发给其他各节点。在综合能源服务系统中，若采用与传统区块链相同的方式，会造成系统过于臃肿，影响其工作效率。故在

3) 共识层：在综合能源系统中应采用多点协商的共识机制，各电厂共同协商确定供电的出力占比，从而使各个节点达成一致。在综合服务系统中，采用点对点的共识机制，当有节点提出综合服务需求时，云端根据其要求为其寻找最优的服务方，使得双方达成一致。

4) 激励层：为了促使源端处的电厂、综合能源服务公司以及各类用户积极参与综合能源服务并提高服务质量，在综合能源服务系统中建立信用机制。提高综合服务质量从而赢得被服务方的好评能够使信用值增加，信用值直接影响各提供服务方在综合服务中被选择的优先程度。

5) 合约层: 合约层封装区块链系统的各类脚本代码、算法以及由此生成的更为复杂的智能合约。当合约层中的智能合约达到其约束条件时自动触发执行。例如, 当有数据需要在综合能源服务系统中传输时, 合约会根据数据量的大小以及及时性为其分配不同容量的区块; 当有用户提出服务需求时, 合约层根据实际应用场景, 例如 B2B(大型工业用户的直购电)、C₂C(居民用户向附近微网用户购电)和 B2C(综合能源服务公司向各类用户提供能效检测和节能设计), 采用具体的点对点共识机制为其寻找最优的服务方。合约层的存在保证了综合能源服务系统的去中心化, 提升了系统的自主决策功能。

6) 应用层: 综合能源服务系统的应用层中封装了综合能源与综合服务各种应用场景和案例, 系统可凭借已有类似案例对实际情况进行智能调整。就综合能源服务系统而言, 应用层中主要保存着综合能源系统中源端电厂出力分配和综合服务系统中供需双方匹配的实际案例, 旨在更高效地解决综合能源与综合服务两种场景下的实际问题。

2.3 综合能源服务系统逻辑信息交互模型

由 2.1 节的综合能源服务系统的主从多链结构模型中可知, 综合能源服务系统中节点之间的数据传输与协商至关重要, 因此建立综合能源服务系统逻辑信息交互模型有重要意义。

由于区块链的 6 层架构与 OSI 模型的 7 层架构有相同之处, 并且区块链节点间的协商与数据传输与 OSI 参考模型下的数据通信在功能上具有一定的相似性, 因此在综合能源服务区块链逻辑层级架构

模型的基础上建立类似于 OSI 参考模型逐层封装与解封的过程^[34]。

对于发送信息的节点, 信息在区块链中由应用层到数据层逐层封装, 每一层添加各自层级定义的信息; 对于接收信息的节点, 信息由数据层到应用层逐层解封, 每一层获得发送节点处对应层级的信息。以荷端的用户与综合能源服务公司之间的信息交互为例说明综合能源服务系统逻辑信息交互模型。如图 6 所示, 当荷端的用户提出具体的服务需求时, 区块链中的应用层从需求中提取出用户服务请求的类型, 并封装进区块, 传递给合约层; 合约层收到信息后, 根据服务的具体类型选择服务对应的合约, 将选择的合约封装进区块后传递给激励层; 激励层从需求信息中提取出用户对服务方信用值的要求, 封装进区块后传递给共识层; 共识层根据用户对服务方信用值的要求确定具体的共识机制, 封装后传递给网络层; 网络层确定发送需求信息的具体主链与从链, 并将该信息封装后传递给数据层; 数据层提取需求信息中的有用数据, 并将其封装进区块。至此荷端的区块信息已全部封装完毕并将其发送至综合能源服务公司端。

综合能源服务公司端将收到的区块信息逐层解封, 每层接收对应层封装进的数据。数据层读取区块信息中的需求数据后将其传送到网络层, 网络层读取发送数据的主从链的信息, 并进一步确定接收数据的主从链信息, 从而确定数据的传输方向, 完成上述步骤后将区块信息传递至共识层; 共识层读取对应层的信息, 应用其选择的共识机制去寻找最佳服务方, 并将区块信息继续传递至激励层; 激

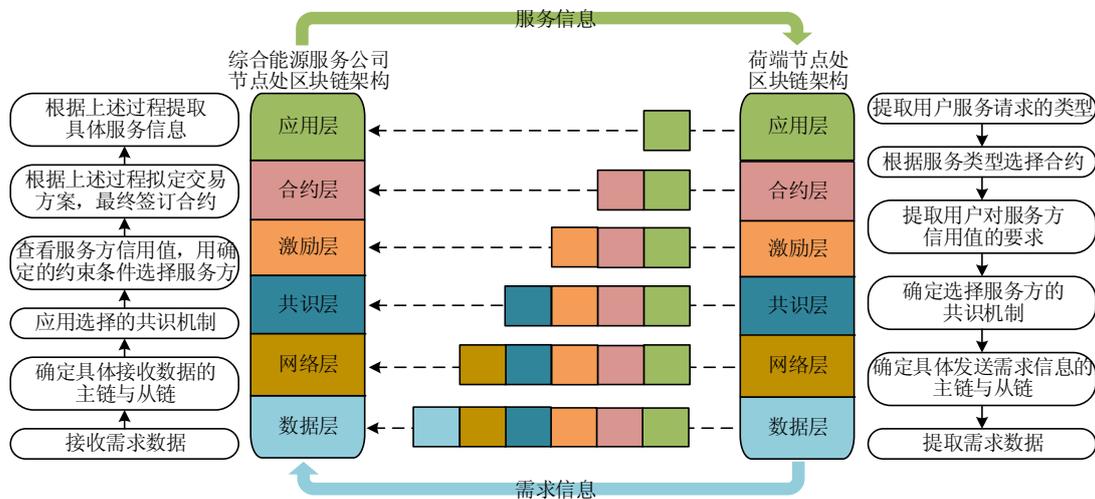


图 6 综合能源服务系统逻辑信息交互模型

Fig. 6 Integrated information service system logical information interaction model

励层读取对应层中用户对服务方信用值的要求，并以此为依据建立约束条件，使用共识机制完成寻找最佳服务方的过程，之后将区块信息传递给合约层；合约层读取对应层的合约信息，并结合上述寻找最佳服务方的内容签订服务方的智能合约，完成上述步骤后将区块信息传递至应用层；应用层读取对应层的服务请求类型信息，并将协商达成的具体服务信息发送至荷端提出服务请求的用户。至此完成荷端的用户与综合能源服务公司之间的信息交互的全过程。

3 基于综合能源服务的信用评价体系

在构建与分析了综合能源服务区块链模型后，综合能源服务系统的运行模式已经明确，但由于该系统的网络架构中涉及多节点间的信息交互，为保证节点间的去中心化并解决其信用问题，建立基于综合能源服务的信用评价体系。该信用评价体系能够增加用户与企业之间的互动，设置信用机制以增强企业和各类用户在电力市场中的活力^[35-36]。对于电厂、综合能源服务公司以及各类用户，在其提供综合能源服务后，被服务方有权根据服务质量对其进行评价，进而更新其信用值^[37]。信用值直接关系到企业和各类用户在具体某项综合能源服务中被选择的优先程度。

1) 供电业务和分布式能源服务。

对于综合服务中的供电业务和分布式能源服务，当电厂和微网用户的发电量在供大于求时，电厂和微网用户可将供电意愿以及期望的电价 M (已将电能质量、电能波动导致的网络损耗以及供电过程中的传输距离产生的费用考虑在其中) 和交易预计达成的及时性 R (供电业务和分布式能源服务的达成会存在一定的延时，交易预计达成的及时性是某些用户考虑的重要因素) 上传至云端，等待交易。当大型工业用户或附近的居民用户向云端提出需求申请时，云端应参考电厂或微网用户该项服务的信用值 C_1 、给出的价格 M 以及交易预计达成的及时性 R 3 个指标为需求方提供相对较优的选择，并进一步结合需求方的要求为其做出最优选择。在交易结束后，需求方根据交易达成前咨询情况满意度评价、电能使用情况满意度评价、服务过程中咨询情况满意度评价 3 个评价指标对供应方进行评价，评价结果直接影响到供应方处的信用值。按照以上要求给出了这些考虑因素下的数学描

述，其中 C_1 为某服务方供电业务(分布式能源服务)的信用值， D 为该服务方最近 s 次交易达成前咨询情况满意度评价的算数平均值， E 为最近 s 次电能使用情况满意度评价的算数平均值， F 为最近 s 次服务过程中咨询情况满意度评价的算数平均值， x_1 、 y_1 、 z_1 为评价对应的权重。数学描述如下：

$$C_1 = x_1 D + y_1 E + z_1 F \quad (1)$$

2) 设备维护、能效检测和节能设计。

对于设备维护、能效检测和节能设计，与式(1)相同，各个综合能源服务公司可以将近期可提供的综合服务项目、综合能源服务公司预计到达时间 T 以及相应的价格 M 上传至云端。云端应参考综合能源服务公司该项服务的信用值 C_2 、给出的价格 M 以及综合能源服务公司预计到达时间 T 3 个指标并结合需求方要求进行寻优。在服务结束后，需求方根据服务质量评价、服务耗时的评价、该项服务的满意度 3 个评价指标对供应方进行评价。按照以上要求给出了这些考虑因素下的数学描述，其中 C_2 为某综合能源服务公司设备维护服务(能效检测服务或节能设计服务)的信用值， G 、 H 、 I 为最近 s 次相应评价的算数平均值， x_2 、 y_2 、 z_2 为评价对应的权重。数学描述如下：

$$C_2 = x_2 G + y_2 H + z_2 I \quad (2)$$

3) 数据交易。

对于数据交易，与式(1)相同，卖方可将期望出售的数据量 B 以及相应的价格 M 上传至云端。云端参考卖方的信用值 C_3 、给出的价格 M 以及数据量 B 3 个指标并结合买方的要求为其做出最优选择。在交易结束后，买方根据数据有效性的评价、数据完整性的评价、该项服务的满意度 3 个评价指标对供应方进行评价。按照以上要求给出了这些考虑因素下的数学描述，其中 C_3 为某卖方数据交易服务的信用值， J 、 K 、 L 为最近 s 次相应评价的算数平均值， x_3 、 y_3 、 z_3 为评价对应的权重。数学描述如下：

$$C_3 = x_3 J + y_3 K + z_3 L \quad (3)$$

由于熵值法是一种利用信息熵评价所获信息的变异程度，从而确定指标权重的客观赋权法，它可以降低人为因素对评价过程的干扰^[38-39]。因此对于上述各项综合服务中的评价指标，可以采用熵值法确定其权重。

在给定 n 个评价对象、 m 个评价指标的问题中，第 j 个指标的熵值定义为：

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \tag{4}$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \tag{5}$$

式中： E_j 为第 j 个指标的熵值， $j=1,2,\dots,m$ ； x_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个指标的标准值，并假设当 $f_{ij}=0$ 时， $E_j=0$ 。那么第 j 个指标的权重定义为

$$w_j = \frac{1-E_j}{m-\sum_{j=1}^n E_j} \tag{6}$$

式中 w_j 即为第 j 个指标的熵权值。

假定对于具体某项服务在某一区域范围内共有 n 个服务方，计算每个服务方最近 s 次评价值的算数平均值，对 n 个服务方的 3 个评价值的算数平均值用熵值法确定其评价值指标的权重。其中各类服务方的各种评价范围均为 0~100。

用户在选择各类服务方时，通常优先考虑价格，但单纯从价格考虑又不能全面体现出服务方的服务质量，因此提出基于综合能源服务的信用评价体系。该体系旨在通过各类用户的多项评价生成信用值，以信用值作为选择时的重要指标更能全面体现服务方的服务质量，进而建立一种综合考量机制。对于一般的用户来说，价格是其主要参考指标，但对于有特殊要求的用户，信用值以及其他指标也是其重要参考依据。故该综合考量机制以价格为主要指标、以其他因素为次要指标、以信用值为参考指标，辅助用户做出考量更加全面的选择。

4 可行性验证

4.1 节点间信息交互验证

在构建综合能源服务区块链的网络架构、交互模型以及信用评价过程中，节点间信息的交互起着关键性的作用。在 2.1 和 2.2 节中提到，利用主从多链的结构进行节点间信息的传递，故在此详述节点间信息传递的过程，验证前文中构建模型的可行性。

如图 7 所示，当节点 1 希望发送信息至节点 2 时，节点 1 将信息打包成区块加入所在从链，从链将其信息上传至主链 1，主链 1 将区块信息发送至节点 2 所在的主链 2，主链 2 接收区块信息后，节

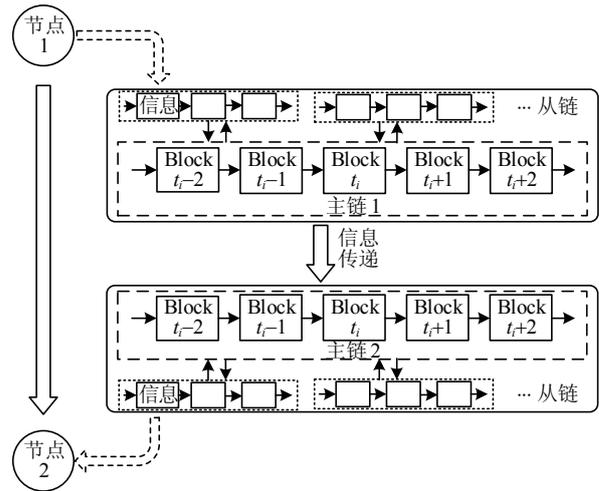


图 7 主从多链结构信息传递模型

Fig. 7 Master-slave multi-chain structure information transfer model

点 2 所在的从链从主链 2 上读取信息，由此完成信息的传递。在该主从多链模式下，从链只负责信息的上传与读取，主链只负责信息的发送与接收，从而提升了信息传递的效率，优化了系统性能。

为验证基于区块链的主从多链结构下的综合能源服务模型提升了信息交互的效率，在 Multichain 平台环境下进行能源节点间数据交互的仿真实验。

配置网络环境如下：

下载配置 Multichain 演示文档，基于 xampp 平台建立 PHP 的运行环境并进行软件配置以及区块链环境搭建。通过两台系统配置为 64 位 4G 运行内存的 windows 10 电脑来实现在主从多链结构下能源节点的建立、连接以及信息交互，并通过对比实验验证主从多链结构下节点间信息交互效率的提升。

节点建立与连接具体操作如下：

在 xampp 运行的条件下，分别配置 2 台电脑的区块链网络环境，通过命令窗口进行能源节点的创建及配置。在 2 台电脑上分别创建及配置 TestChain 链下的 2 个能源节点 chain1(位于电脑 1，IP 为 192.168.1.1)和 chain2(位于电脑 2，IP 为 192.168.1.2)，chain2 通过指令 multichaind TestChain@192.168.1.1:8363 -daemon 发出与 chain1 的连接申请，chain1 节点端输入回执完成连接。具体过程如图 8—11 所示。

节点间信息交互对比实验如下：

实验 1：将 2 台电脑(IP 分别为 192.168.1.1 和 192.168.1.2)直接通过 ping 指令进行数据交互，其中数据包的大小为 32Byte，如图 12 所示。

实验 2：1) 在 chain1 节点处发布数据量为

```

C:\Users\Administrator>cd C:\multichain-windows-1.0.6
C:\multichain-windows-1.0.6>multichaind TestChain -daemon
MultiChain 1.0.6 Daemon (latest protocol 10011)
Looking for genesis block...
Genesis block found
Other nodes can connect to this node using:
multichaind TestChain@192.168.1.1:8363
Node ready.
  
```

图 8 TestChain 链中能源节点的建立

Fig. 8 Establishment of energy nodes in the TestChain

```

C:\Users\Y>cd C:\multichain-windows-1.0.6
C:\multichain-windows-1.0.6>multichaind TestChain@192.168.1.1:8363 -daemon
MultiChain 1.0.6 Daemon (latest protocol 10011)
Retrieving blockchain parameters from the seed node 192.168.1.1:8363 ...
Blockchain successfully initialized.
Please ask blockchain admin or user having activate permission to let you connect and/or transact:
multichain-cli TestChain grant INuEMVsgokvRBGjGc3fXGvw73sTteMPkrfUH5g connect
multichain-cli TestChain grant INuEMVsgokvRBGjGc3fXGvw73sTteMPkrfUH5g connect, send, receive
C:\multichain-windows-1.0.6>
  
```

图 9 Chain2 节点发出连接请求

Fig. 9 Chain2 node sends a connection request

```

C:\Users\Administrator>cd C:\multichain-windows-1.0.6
C:\multichain-windows-1.0.6>multichain-cli TestChain grant INuEMVsgokvRBGjGc3fXGvw73sTteMPkrfUH5g connect, send, receive, issue
(method: grant, params: ["INuEMVsgokvRBGjGc3fXGvw73sTteMPkrfUH5g", "connect, send, receive, issue", "id": "50021660-1573971956", "chain_name": "TestChain"])
fa1f5da210d687e2431f1ad12659becca8e05d6f3f4f597c6464f1bf394ad1f4
C:\multichain-windows-1.0.6>
  
```

图 10 Chain1 节点回复请求回执

Fig. 10 Chain1 node replies to request receipt

能源节点权限

节点名称	节点IP	节点地址	节点权限
chain1	192.168.1.1:8363	1Rf1ccsaBvfbp4uqjVrj04bnRzKzXpzwntwe	区块发布权限, 超级管理员权限, 管理区块, 连接, 发送, 接收, 资产发布权限, 资产管理
chain2	192.168.1.2:8363	INuEMVsgokvRBGjGc3fXGvw73sTteMPkrfUH5g	连接, 发送, 接收, 资产发布权限

权限更改

需要更改的链接节点:

操作: 增加 移除

权限: 连接 发送 接收 资产发布权限 管理区块

图 11 能源节点连接成功

Fig. 11 Energy node connection succeeded

```

C:\Users\Y>ping 192.168.1.1
正在 Ping 192.168.1.1 具有 32 字节的数据:
来自 192.168.1.1 的回复: 字节=32 时间=1ms TTL=128
来自 192.168.1.1 的回复: 字节=32 时间=2ms TTL=128
来自 192.168.1.1 的回复: 字节=32 时间=4ms TTL=128
来自 192.168.1.1 的回复: 字节=32 时间=2ms TTL=128

192.168.1.1 的 Ping 统计信息:
数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
往返行程的估计时间 (以毫秒为单位):
最短 = 1ms, 最长 = 4ms, 平均 = 2ms
  
```

图 12 通过 ping 指令进行数据交互

Fig. 12 Data interaction through ping command

32Byte 的数字资产，从 chain2 节点处接收，并查看 chain2 节点处的相应时间，其中的主要操作如下所示。式(1)在 chain1 节点处发布 32Byte 的数字资产如图 13 所示，图 14 为图 13 方框处的放大图。

2) 在 chain2 节点处查询并接收该数字资产，如图 15 所示。

3) 在 chain2 节点处查看响应时间，如图 16 所示，图 17 为其方框处的放大图。

数字资产发布

发布者: 1Rf1ccsaBvfbp4uqjVrj04bnRzKzXpzwntwe

数字资产名称: example

资产价值: 0

选择文件: D:\example.txt 浏览...

资产属性:

数字资产大小	32 Byte
资产哈希值	b1d5dfefc47e8a012e68355021c96efc
发布时间	2019-11-17
数据来源	机侧数据

图 13 Chain1 节点发布数字资产

Fig. 13 Chain1 node releases digital assets

选择文件: D:\example.txt 浏览...

资产属性:

数字资产大小	32 Byte
资产哈希值	b1d5dfefc47e8a012e68355021c96efc
发布时间	2019-11-17
数据来源	机侧数据

图 14 数字资产详情

Fig. 14 Digital asset details

发布者: 1Rf1ccsaBvfbp4uqjVrj04bnRzKzXpzwntwe 发布时间: 2019-11-17

序号	资产名称	数字资产价值	发布者	数字资产大小	资产哈希值	发布时间	数据来源	所属区块号	下载
1	example	0	1Rf1ccsaBvfbp4uqjVrj04bnRzKzXpzwntwe (local)	32 Byte	b1d5dfefc47e8a012e68355021c96efc	2019-11-17	机侧数据	71	下载文件

图 15 Chain2 节点查询并接收数字资产

Fig. 15 Chain2 node queries and receives digital assets

区块链信息

区块链名称	节点IP	区块数	已连接的能源节点数
TestChain	192.168.1.1:8363	81	1

主能源节点

节点名称	节点IP	节点区块地址	节点权限
chain1 查看详情	192.168.1.1:8363	1Rf1ccsaBvfbp4uqjVrj04bnRzKzXpzwntwe	连接, 发送, 接收, 资产发布权限, 资产管理, 区块发布权限, 超级管理员权限, 管理区块

能源子节点

节点名称	节点IP	节点区块地址	响应时间
chain2 查看详情	192.168.1.2:8363	INuEMVsgokvRBGjGc3fXGvw73sTteMPkrfUH5g	0.96 ms

图 16 Chain2 节点响应时间

Fig. 16 Chain2 node response time

响应时间

0.96 ms

图 17 响应时间详情

Fig. 17 Response time details

通过对比实验 1、2 结果可得出: $t_1=2ms$, $t_2=0.96ms$, 其中实验 2 进行多次实验, 响应时间均小于 2ms, 故验证了基于区块链的主从多链结构下节点间的信息交互效率有所提升。

4.2 算法仿真验证

在综合能源服务中，由于在选择服务方时涉及

多种目标,故选择参考基于粒子群算法的多目标搜索算法解决多目标优化问题^[40],以多目标搜索算法对服务方案进行最优的搜索来实现基于区块链的综合能源服务的最优服务方案^[41]的制定。

解决多目标优化问题通常可先设定多个目标函数、决策变量参数和约束条件,再由随机解经过迭代计算来完成寻求最优解的目的。粒子寻优后产生非劣解,该过程包括初始筛选非劣解和非劣解集更新,要求在粒子更新前从非劣解集中随机选择一个粒子作为群体的最优。其中粒子的更新公式如下:

$$V^{k+1} = \omega V^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X^k) \quad (7)$$

$$X^{k+1} = X^k + V^{k+1} \quad (8)$$

式中: V 为粒子速度; k 为当前迭代次数; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为常数; r_1 、 r_2 为区间 $[0, 1]$ 的随机数; P_{id}^k 为个体最优粒子位置; P_{gd}^k 为全局最优粒子位置; X 为粒子位置。

通过这种多目标搜索算法,以数据交易为例进行算法仿真寻求最优服务方案。假设某综合能源服务公司,期望购买某区域一季度内电厂与各类用户发用电数据中的有价值数据,用户共四类,分别为工业用户、商业用户、微网用户与居民用户。其中电厂与四类用户中又分别包括4个具体的电厂与用户。各个电厂与用户的报价 M 、数据量 B 与信用值 C 都不尽相同。综合能源服务公司希望购得价格尽可能低、数据量尽可能大并且信用值方面有所保障的数据,其中所得数据量越大,说明卖方的记录设备越精密、记录数据越详细,数据量大且细化的数据便于综合能源服务公司进行数据分析、负荷预测等。故基于多目标粒子群算法建立数据交易过程的数学模型,其中以 M 表示各卖方的报价, B 表示各卖方提供数据的数据量, C 表示各卖方的信用值,设定的目标函数与约束条件如下:

$$\min M_x = \sum_{i=1}^5 M_i \cdot X \quad (9)$$

$$\max B_x = \sum_{i=1}^5 B_i \cdot X \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{5} \geq 85 \quad (11)$$

式中: M_x 为买方的总支出; B_x 为买方获得数据的数据量; X 为所选择的卖方,方案选择的约束平均信用值为85。该数学模型旨在以信用值作为约束的条件下在整体数据中挑选数据量和价格的最佳组合

方案。

假定提供数据交易的电厂和各类用户的报价、数据量以及信用值如表1—3所示。其中 $i=1$ 代表微网用户、 $i=2$ 代表商业用户、 $i=3$ 代表工业用户、 $i=4$ 代表电厂、 $i=5$ 代表居民用户(以小区为单位); A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$)代表一类卖方(例如工业用户这类卖方)中的具体某个卖方($i=3$ 代表工业用户, A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 代表工业用户这类卖方中包含的4个具体卖方)。其中交易数据如1—3所示。

表1 5类卖方中具体卖方的报价表

Tab. 1 Quotation form for specific sellers in

category 5 sellers

千元

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	3	4.0	5	3.0
2	4	6.0	7	5.0
3	9	8.0	10	10.0
4	15	10.0	12	13.0
5	2	2.5	3	2.8

表2 5类卖方中具体卖方的数据量表

Tab. 2 Data scale of specific sellers among

the five types of sellers

兆

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	0.2	0.25	0.30	0.30
2	0.3	0.35	0.37	0.32
3	0.4	0.38	0.50	0.45
4	0.6	0.45	0.50	0.60
5	0.1	0.15	0.20	0.20

表3 5类卖方中具体卖方的信用值表

Tab. 3 The credit value table of the specific seller among

the 5 types of sellers

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	95	65	87	77
2	83	75	88	79
3	74	92	85	78
4	72	86	78	92
5	78	85	77	88

对表格中数据的含义进行举例说明:表1中 $i=1$ 列中的数据代表4个不同的微网用户 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 所售数据的报价分别为3000、4000、5000、3000元;表2中 $i=2$ 列中的数据代表4个不同的商业用户 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 所售数据的数据量分别为0.3兆、0.35兆、0.37兆、0.32兆;表3中 $i=3$ 列中的数据代表4个不同的工业用户 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 的信用值分别为74、92、85、78。

通过多目标粒子群算法在上表的数据中寻找最佳数据交易方案,得到图18的仿真结果。Matlab

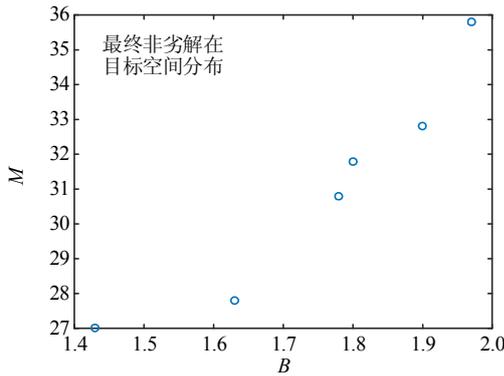


图 18 Matlab 仿真结果图

Fig. 18 The chart of Matlab simulation results

仿真非劣解结果中，纵轴为该非劣解下的总支出，横轴为该非劣解下总数据量。

云端筛选出的非劣解方案对应表 4，共包含 6 种非劣解，即云端可提供 6 种方案供买方选择。举例说明：方案 1 代表买方选择微网用户 D_1 (微网用户共包含 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 4 个用户，方案 1 选择了 D_1 用户)、商业用户 C_2 (商业用户共包含 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 4 个用户，方案 1 选择了 C_2 用户)、工业用户 C_3 、电厂 D_4 、居民用户 D_5 。

表 4 云端筛选出的非劣解方案表

Tab. 4 Non-inferior solution list filtered by the cloud

方案	卖家				
	微网用户	商业用户	工业用户	电厂	居民用户
方案 1	D_1	C_2	C_3	D_4	D_5
方案 2	D_1	A_2	C_3	D_4	D_5
方案 3	D_1	A_2	B_3	D_4	D_5
方案 4	D_1	D_2	B_3	D_4	D_5
方案 5	D_1	A_2	B_3	B_4	D_5
方案 6	A_1	A_2	B_3	B_4	A_5

其中 6 种方案对应的总数据量、总支出与平均信任值对应图 19—21。

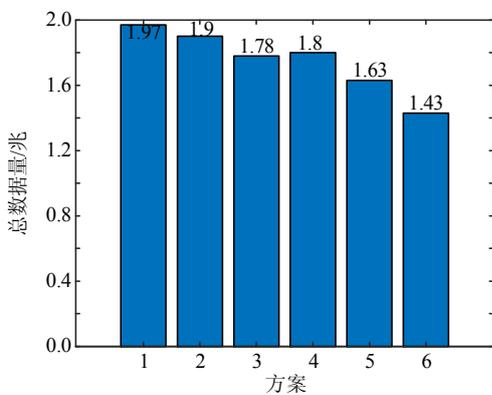


图 19 各方案对应的总数据量图

Fig. 19 Total data amount map corresponding to each plan

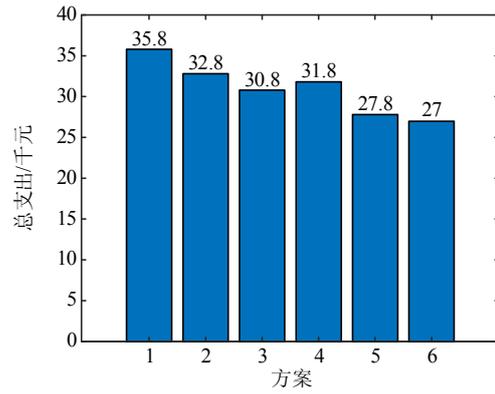


图 20 各方案对应的总支出图

Fig. 20 Total expenditure map corresponding to each plan

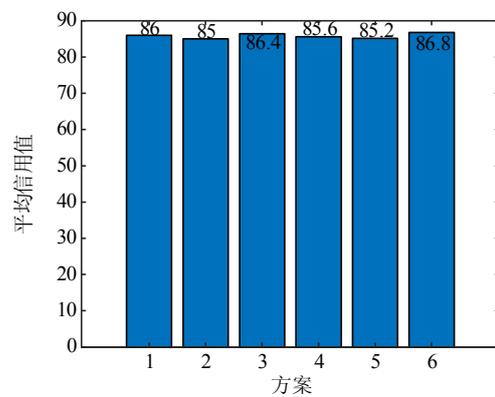


图 21 各方案对应的平均信用值图

Fig. 21 Average credit value map corresponding to each plan

云端将筛选出的非劣解方案通过综合考量机制进行排序，即将 6 种方案以总支出升序进行排列，并提供相应的总数据量指标和平均信用值指标辅助选择，生成如表 5 所示的云端推荐的数据交易方案表，其中表格按云端的推荐程度排列(方案位于表格越上端代表云端越推荐该方案)。对于一般的买方，总支出是其最关心的指标，因此按照云端的推荐顺序进行选择即可，但对于总数据量(数据量越大，说明卖方的记录设备越精密、记录数据越详细，数据量大且细化的数据便于买方进行数据分析、负

表 5 云端推荐的数据交易方案表

Tab. 5 Table of recommended data trading schemes in cloud

方案	总支出/千元	总数据量/兆	平均信用值
方案 6	27.0	1.43	86.8
方案 5	27.8	1.63	85.2
方案 3	30.8	1.78	86.4
方案 4	31.8	1.80	85.6
方案 2	32.8	1.90	85.0
方案 1	35.8	1.97	86.0

荷预测等)和信用值(信用值越高,说明以往的买家对其评价越好)有特殊要求的买家,其可按照自身的需求进行选择。故云端将该表格提供给买方,由买方根据自身的需求向云端进行反馈,进而确定最佳数据交易方案。

5 结论

综合能源服务是覆盖全电力环节、全业务类型的全新增值服务类型,需要结合现有运营经验,采用新的模式、新的技术、新的方法来实现新的突破;而区块链在智能合约、分布决策、协同自治、拓扑形态、交易监管等方面与综合能源服务的需求有着天然匹配性。本文在分析区块链技术 with 综合能源服务系统特点的基础上,搭建了综合能源服务系统的主从多链结构模型,设计了主从多链模式下的区块链结构,通过区块链技术保障了综合能源服务信息的准确性、及时性,提高了服务质量和效率,并建立了综合能源服务区块链逻辑层级架构模型,在此基础上探究了综合能源服务系统的逻辑信息交互模式,同时建立了基于综合能源服务的信用评价体系,解决了综合能源服务场景下多节点间的信用问题,增强了企业和各类用户在电力市场中的活力,最后通过仿真验证了综合能源服务区块链和基于综合能源服务的信用评价体系的可行性与有效性。目前针对区块链与综合能源服务的研究尚处于初级阶段,望本文能为未来深入探究综合能源服务场景提供参考。

参考文献

- [1] 张勇军,李立涅,陈泽兴,等.互联网与能源系统的融合形态与技术[J].中国工程科学,2018,20(2):79-85.
Zhang Yongjun, Li Licheng, Chen Zexing, et al. Fusion between internet and energy system: morphology and technology[J]. Engineering Science, 2018, 20(2): 79-85(in Chinese).
- [2] 连家玉,王月男.物联网视野下的智能电网建设[J].信息记录材料,2018,19(1):53-54.
Lian Jiayu, Wang Yuenan. The construction of smart grid in the perspective of internet of things[J]. Information Recording Materials, 2018, 19(1): 53-54(in Chinese).
- [3] 刘东旗,刘新中,任宇春,等.创新服务模式满足客户需求[J].农村电工,2017,25(4):11-12.
Liu Dongqi, Liu Xinzhong, Ren Yuchun, et al. Innovative service mode to meet customer needs[J]. Rural Electrician, 2017, 25(4): 11-12(in Chinese).
- [4] Gaspari M, Lorenzoni A, Frías P, et al. Integrated Energy Services for the industrial sector: an innovative model for sustainable electricity supply[J]. Utilities Policy, 2017, 45: 118-127.
- [5] 孟庆强.瞄准“四个一流”奋力推进“三型两网”建设[N].国家电网报,2019-05-16(003).
Meng Qingqiang. Aiming at the "four first-class" efforts to promote the construction of "three-type two networks"[N]. State Grid News, 2019-05-16(003)(in Chinese).
- [6] Ko W, Kim J. Generation expansion planning model for integrated energy system considering feasible operation region and generation efficiency of combined heat and power[J]. Energies, 2019, 12(2): 226.
- [7] 范为.电力改革新形势下的电网企业成本精益管理探析[J].中国集体经济,2017(36):112-113.
Fan Wei. Analysis on cost lean management of power grid enterprises under the new situation of power reform[J]. China Collective Economy, 2017(36): 112-113(in Chinese).
- [8] Rodrigues T, Moreira R, Strbac G. Coordinated operation of distributed energy storage in low carbon networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017.
- [9] 王美惠.浅谈我国电力体制改革下电力市场的发展[J].中国设备工程,2018(13):193-195.
Wang Meihui. Discussion on the development of electric power market under the reform of china's electric power system[J]. China Plant Engineering, 2018(13): 193-195(in Chinese).
- [10] 周国亮,吕凛杰.区块链技术在能源互联网中的应用[C]//2016电力行业信息化年会论文集.天津:中国电机工程学会,2016:332-335.
Zhou Guoliang, Lv Linjie. Application of blockchain technology in energy internet[C]//Proceedings of the 2016 Annual Conference on Power Industry Informationization. Tianjin: CSEE, 2016: 332-335(in Chinese).
- [11] 曾鸣,程俊,王雨晴,等.区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3672-3681.
Zeng Ming, Cheng Jun, Wang Yuqing, et al. Primarily research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681(in Chinese).
- [12] 龚钢军,张桐,魏沛芳,等.基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1278-1289.
Gong Gangjun, Zhang Tong, Wei Peifang, et al. Research

- on intelligent trading and cooperative scheduling system of energy internet based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1278-1289(in Chinese).
- [13] Wu Lijun, Meng Kun, Xu Shuo, et al. Democratic centralism: a hybrid blockchain architecture and its applications in energy internet[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Beijing: IEEE, 2017.
- [14] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [15] Li Zhetao, Kang Jiawen, Yu Rong, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [16] 平健, 严正, 陈思捷, 等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7137-7145.
Ping Jian, Yan Zheng, Chen Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145(in Chinese).
- [17] Luo Fengji, Dong Zhaoyang, Liang Gaoqi, et al. A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multi-agent coalition and blockchain[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 4097-4108.
- [18] Liang Gaoqi, Weller S R, Luo Fengji, et al. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3162-3173.
- [19] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
Zhang Jun, Gao Wenzhong, Zhang Yingchen, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554(in Chinese).
- [20] 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[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6955-6966.
Gong Gangjun, Wang Huijuan, Zhang Tong, et al. Research on electricity market about spot trading based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6955-6966(in Chinese).
- [21] 陈启鑫, 王克道, 陈思捷, 等. 面向分布式主体的可交易能源系统: 体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 1-7, 31.
Chen Qixin, Wang Kedao, Chen Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: architecture, mechanism design and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7, 31(in Chinese).
- [22] 平健, 陈思捷, 严正. 适用于电力系统凸优化场景的能源区块链底层技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 108-116.
Ping Jian, Chen Sijie, Yan Zheng. A novel energy blockchain technology for convex optimization scenarios in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 108-116(in Chinese).
- [23] 封红丽. 综合能源服务转型探析[J]. 能源, 2018(6): 77-83.
Feng Hongli. Analysis of the transformation of integrated energy services[J]. Energy, 2018(6): 77-83(in Chinese).
- [24] Clegg S, Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part II: transmission network analysis and low carbon technology and resilience case studies[J]. Energy, 2019, 184: 191-203.
- [25] 杨素, 马莉, 武泽辰, 等. 日本售电侧市场放开的最新进展及启示[J]. 南方电网技术, 2018, 12(4): 56-59.
Yang Su, Ma Li, Wu Zechen, et al. Latest development and enlightenment of electricity retail choice in Japan[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(4): 56-59(in Chinese).
- [26] 张程铭, 程浩忠, 柳璐, 等. 高比例可再生能源接入的输电网结构适应性指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 55-61.
Zhang Chengming, Cheng Haozhong, Liu Lu, et al. Adaptability index and evaluation method for power transmission network structure with integration of high-penetration renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 55-61(in Chinese).
- [27] 王耀华, 焦冰琦, 张富强, 等. 计及高比例可再生能源运行特性的中长期电力发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 9-16.
Wang Yaohua, Jiao Bingqi, Zhang Fuqiang, et al. Medium and long-term electric power development considering operating characteristics of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 9-16(in Chinese).
- [28] 李伟, 章维维, 杨慧霏. 基于用户需求不确定性的冷热电三联供系统运行经济性及灵敏度分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 25-29.
Li Wei, Zhang Weiwei, Yang Yifei. Operation economy and sensitivity analysis of CCHP system based on users

- demand uncertainty[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 25-29(in Chinese).
- [29] 杨锦成, 骆建波, 康丽惠, 等. 区域能源互联网构架下的综合能源服务[J]. 上海节能, 2017(3): 137-146.
Yang Jincheng, Luo Jianbo, Kang Lihui, et al. Comprehensive energy service under regional energy internet structure[J]. Shanghai Energy Conservation, 2017(3): 137-146(in Chinese).
- [30] 武志宏, 郑永义, 杨子成. 关于综合能源服务业务的开展研究[J]. 山西电力, 2018(2): 58-61.
Wu Zhihong, Zheng Yongyi, Yang Zicheng. Research on integrated energy service business[J]. Shanxi Electric Power, 2018(2): 58-61(in Chinese).
- [31] Xie Junfeng, Tang Helen, Huang Tao, et al. A survey of blockchain technology applied to smart cities: research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2794-2830.
- [32] Fotiou N, Siris V A, Polyzos G C. Interacting with the internet of things using smart contracts and blockchain technologies[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Security, Privacy and Anonymity in Computation, Communication and Storage. Melbourne, NSW, Australia: Springer, Cham, 2018: 443-452.
- [33] 王蕴韬, 李彦婷. 对区块链技术的基本解读和认识[J]. 现代电信科技, 2017, 47(2): 31-34.
Wang Yuntao, Li Yanting. Interpretation and understanding of blockchain technology[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2017, 47(2): 31-34(in Chinese).
- [34] 吴克河, 王继业, 朱亚运. 基于 OSI 的能源互联网模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 685-695.
Wu Kehe, Wang Jiye, Zhu Yayun. Study of energy internet model based on OSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 685-695(in Chinese).
- [35] 崔树银, 陆奕, 常啸. 考虑信用评分机制的电力碳排放交易区块链模型[J]. 电力建设, 2019, 40(1): 104-111.
Cui Shuyin, Lu Yi, Chang Xiao. Research on model of blockchain-enabled power carbon emission trade considering credit scoring mechanism[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 104-111(in Chinese).
- [36] Wang Zhongfeng, Yu Haifei, Liu Jun, et al. Evaluation of electric power sales company's credit under new power market reformation[C]//Proceedings of 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang: IEEE, 2018.
- [37] 陈晓东, 田琳, 甘倍瑜, 等. 美国电力批发市场的信用额度评估机制分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 98-105.
Chen Xiaodong, Tian Lin, Gan Beiyu, et al. Appraisal mechanism analysis on credit limit quantification of wholesale electricity markets in the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 98-105(in Chinese).
- [38] Cañizo J A, Carrillo J A, Pájaro M. Exponential equilibration of genetic circuits using entropy methods[J]. Journal of Mathematical Biology, 2019, 78(1-2): 373-411.
- [39] 周虎兵, 王玉磊, 张曼, 等. 熵值法赋权的智能变电站二次设备效能模糊综合评价[J]. 电测与仪表, 2018, 55(3): 73-79.
Zhou Hubing, Wang Yulei, Zhang Man, et al. Comprehensive fuzzy evaluation of effectiveness of secondary equipment in smart substation based on entropy method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(3): 73-79(in Chinese).
- [40] Zaro F R, Abido M A. Multi-objective particle swarm optimization for optimal power flow in a deregulated environment of power systems[C]//Proceedings of the 2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Cordoba, Spain: IEEE, 2011.
- [41] 孙可, 段光, 李晓春, 等. 综合能源服务系统结构描述及设计优化[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 33-39.
Sun Ke, Duan Guang, Li Xiaochun, et al. Structural description and design optimization for integrated energy service system[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 33-39(in Chinese).



龚钢军

在线出版日期: 2020-04-01.

收稿日期: 2019-07-10.

作者简介:

龚钢军(1974), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, gong@ncepu.edu.cn;

杨晟(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, yangsheng18hebut@163.com;

王慧娟(1994), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, wang594292080@163.com.

(责任编辑 李泽荣)

Network Architecture, Interaction Model and Credit Evaluation of Integrated Energy Service Blockchain

GONG Gangjun¹, YANG Sheng¹, WANG Huijuan¹, LIU Lin², LU Jun¹, WEN Yafeng¹, YANG Haixia¹
 (1. North China Electric Power University; 2. State Grid Dalian Electric Power Supply Company.)

KEY WORDS: integrated energy service; master-slave multi-chain structure; information interaction model; credit evaluation mechanism

As a new energy service model, the integrated energy service is also an optimum practice scenario for the research and application with energy internet and ubiquitous power internet of things. In order to build an integrated energy service system that meets diversified energy production and differentiated energy consumption. It is urgently needed to research on network architecture, interaction models and credit

evaluation in integrated energy services.

Therefore, this paper builds the physical architecture of the integrated energy service system and applies blockchain technology to the integrated energy service system. At the same time, a master-slave multi-chain system structure is designed, and an integrated energy service blockchain is designed based on this, as shown in Fig. 1.

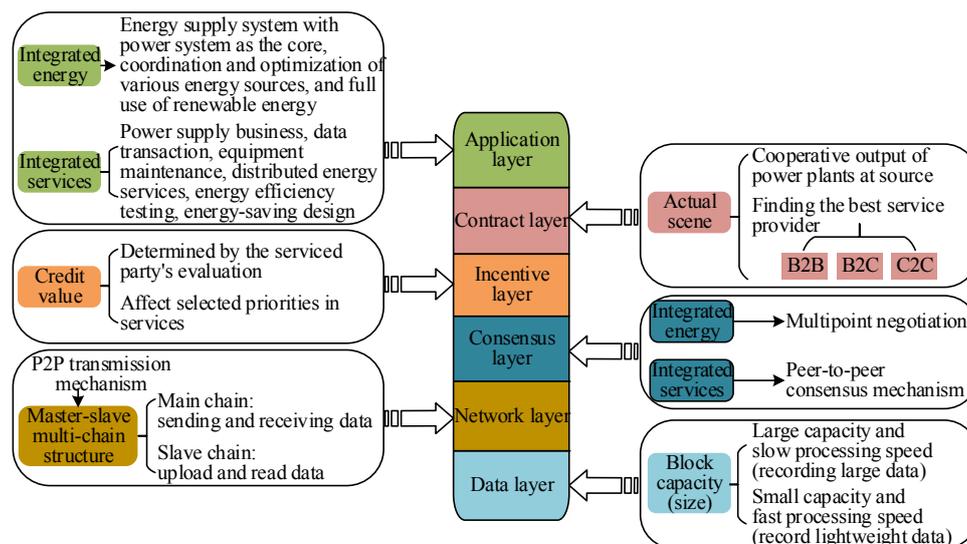


Fig. 1 Integrated energy service blockchain logical hierarchy model

Because the six-layer architecture of the blockchain has the same features as the seven-layer architecture of the OSI model, the negotiation and data transmission between blockchain nodes are functionally similar to the data communication under the OSI reference model. Therefore, based on the integrated energy service blockchain, a process similar to the OSI reference model for layer-by-layer encapsulation and decapsulation is established.

The network architecture of the system involves information exchange between multiple nodes. In order

to ensure decentralization between nodes and solve their credit problems, a credit evaluation system based on integrated energy services is established. The system aims to generate credit value through multiple evaluations of various users and use it as a reference index when selecting service providers, and then establish a comprehensive consideration mechanism.

Finally, the paper verifies the applicability and matching of the blockchain in the integrated energy service scenario. And it provides the reference for the application of blockchain technology in integrated energy services.