

基金项目: xxx 基金资助项目(基金编号); xxxx 研究项目(项目编号)。

## 能源互联网电力交易区块链中的关键技术

艾崧溥<sup>1</sup>, 胡殿凯<sup>2</sup>, 张桐<sup>3</sup>, 曹军威<sup>1</sup>

(1.清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京市海淀区清华园 100084; 2. 青岛理工大学, 山东省青岛市西海岸新区嘉陵江路 777 号 266520; 3.山东大学, 山东省青岛市即墨区滨海公路 72 号 266237)

**摘要:** 随着清洁可再生能源产业的迅速发展, 现有的能源架构难以满足能源产销的需要, 一场能源行业的革新势在必行。能源互联网作为一个学术与工业界看好的下一代能源基础设施的发展方向, 受到广泛关注, 其开放、互联、对等、分享的基本特征为未来能源发展勾勒出一个丰富的愿景。然而, 现有成熟的信息技术方案从设计思想到工程实施无法全面满足能源互联网的特征需求。区块链作为一种正在快速发展的技术, 具有分布式、平等、安全、可追溯等特性, 与能源互联网的设计思想高度契合, 有望成为能源互联网落地的关键技术。能源区块链是区块链与能源行业结合的产物, 它可以为能源互联网的各个层面提供安全保障和价值支撑。本文通过定位能源互联网中电力交易区块链中的关键技术, 详细地综述了现今能源电力交易区块链在共识机制、交易与智能合约设计、安全机制和其他领域技术等方面的研究进展, 并结合研究现状进行讨论与分析, 探讨目前各项技术领域存在的问题, 以及未来可能的研究方向, 为能源区块链的进一步研究与落地提供参考。

**关键词:** 区块链; 能源互联网; 电力交易; 共识机制; 智能合约; 安全

### Key Technologies of Electricity Transaction Blockchain in Energy Internet

AI Songpu<sup>1</sup>, HU Diankai<sup>2</sup>, ZHANG Tong<sup>3</sup>, CAO Junwei<sup>1</sup>

(1. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Qingdao University of Technology, No.777, Jialingjiang Road, West Coast New District, Qingdao, Shandong Province, 266520, China; 3. Shandong University, 72 Binhai Road, Jimo District, Qingdao, Shandong Province, 266237, China)

**ABSTRACT:** With the rapid development of clean and renewable energy industry, the existing energy structure is difficult to meet the needs of energy production and marketing. An energy industry innovation is imperative. As a promising development direction of the next generation energy infrastructure in academic and industrial circles, energy internet has been widely concerned. Its basic characteristics of openness, interconnection, equivalence and sharing provide a rich vision for future energy development. However, the existing matured information technology solutions can not fully satisfy the requirements of energy internet from design idea to project implementation. As a rapidly developing technology, blockchain has the characteristics of distribution, equality, security and traceability, which is highly consistent with the design idea of energy internet, and is expected to become the key technology for the implementation of energy internet. Energy blockchain is the product of the combination of blockchain and energy industry, which can provide security and value support for all levels of energy internet. By positioning the key technologies of power trading blockchain in the energy internet, this paper summarizes the research progress of the current power trading blockchain in the aspects of consensus mechanism, transaction and smart contract design, security mechanism and other fields of technology. Combined with the research status, this paper discusses and analyzes the problems existing in various technical fields and the possible future, and

provides a reference for further research and implementation of energy blockchain.

**KEY WORDS:** Blockchain; Energy internet; Power trading; Consensus mechanism; Smart contract; Security

中图分类号:

## 0 引言

近年来,能源行业形势日趋复杂,光、风、热等清洁能源迅速发展,现有的能源架构难以满足不断增长的能源消耗和多样化的能源产销需求,一场能源行业的革新势在必行。能源互联网作为“第三次工业革命”的重要标志之一[1],通过融合互联网技术和分布式可再生能源技术来构建新型能源供需架构,获得了广泛的关注。

能源互联网是一个学术与工业界看好的下一代能源基础设施的发展方向[2-5],其开放、互联、对等、分享的基本特征及蕴含的全新能源生产、使用理念和商业模式,对能源和信息的互联、共享提出了更高的要求。然而,现有的能源运营体系与成熟的技术堆栈难以满足全面实现能源互联网的设计思想。特别地,我国的能源,尤其是电力体系架构一直以来以中心化为主轴的设计思路难以为丰富的清洁能源分布式接入与多样化产销耦合提供灵活地架构支撑,随着用电负荷加大,在冬夏季高峰时可能出现故障甚至停运[6]。引入新的设计思路与技术堆栈,在现有能源体质下进行场景、业务、价值创新,建设分层分区域,多元接入的能源互联网架构成为当下学界与工业界研究的热点方向之一[7]。

区块链作为一种具有去中心化、点对点传输、可追溯、集体维护、可编程和安全可信等特点的技术堆栈,其设计思想核心即为区块链网络中各节点平等,网络中节点在互联的基础上相互合作、制约,共享信息,而整个架构由区块链网络中的节点共同维护的。可以发现,区块链技术与能源互联网的设计思想高度契合,很有可能会成为能源互联网真正落地的关键技术。区块链技术在能源互联网大量的用户之间建立安全自主的能源交易渠道,实现一个自组织、自调节的能源系统,将极大地提高能源使用效率、降低管理成本[8],实现能源互联网的高效运行。

在电力交易场景中,利用与场景耦合的

区块链共识机制、智能合约技术,通过点对点交易,可有效解决电力交易双方信息不对称导致的信任缺失问题[9]。同时,基于区块链的电力交易可从交易侧解决多方信息不对称带来的信任危机,构建多层次公平公开的电力交易市场化交易环境,提升电力交易市场主体的参与水平,实现市场交易效率的最大化。目前,已有一些文献对当前能源电力交易相关的区块链研究进行了综述[10-13]。然而,很多已有的综述文献多聚焦于能源互联网电力交易区块链的应用场景,对于电力交易区块链中的关键技术缺乏系统的分析和讨论,难以从技术的角度对电力交易区块链研究与发展提出有效的建议。于是,本文面向电力交易场景,通过定位电力交易区块链中的关键技术,对电力交易区块链共识机制、交易与智能合约设计、安全机制和其他领域技术等方面的研究进展进行综述,并结合发展现状进行深入地讨论与分析,探讨目前各项技术领域存在的问题,以及未来可能的研究方向,为能源区块链的进一步研究与落地提供参考。

## 1 相关背景

### 1.1 能源互联网

能源互联网的概念由美国学者杰里米·里夫金于2011年在其著作《第三次工业革命》中提出[1]。能源互联网是以互联网理念为基础构建的新型信息—能源融合网络体系,它以大电网为“主干网”,以微电网、分布式能源、智能小区等为“局域网”[14],以开放对等的信息—能源一体化架构为基础实现能源的双向按需传输和动态平衡使用,可以最大限度的适应新能源的接入。

构建开放、互联、对等、分享的能源互联网基础设施,各个设施主体在局域网和广域网的范围内广泛连接,能量自治单元之间地位平等,施行分散化的调度和管理,形成价值驱动、用户中心的能源互联网应用模式,是能源互联网的基本要求。能源互联网的组

成如图 1 所示。在能源互联网的场景中，信息与能量的高度流通，也催生了价值的流动。通过在分布式能源、局域微电网和公共电网等主体之间，建立起自由、灵活的能源市场，以满足能源的合理化配置；利用智能电表、能量路由器[15]等传感通信设备实现智能计量和实时决策，提升用户数据精确度和用户业务效率；采用自动化需求响应、线路阻塞管理和潮流约束等手段维持网络平稳运行；同时，结合大数据、人工智能等技术对能源交易数据进行分析，进一步发掘能源互联网的深层价值。

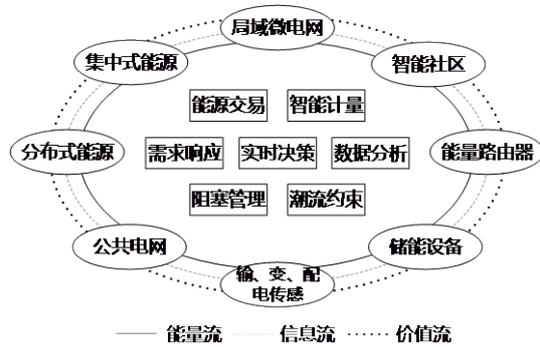


图 1 能源互联网组成示意图

Fig. 1 Composition of energy internet

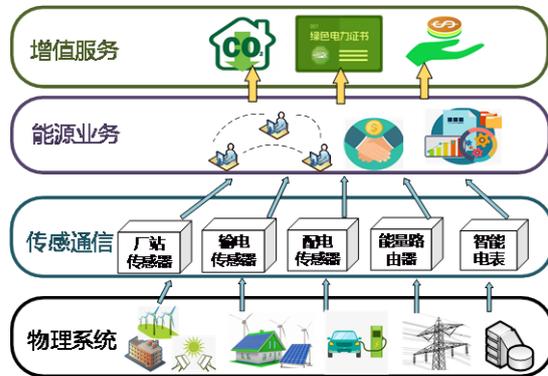


图 2 能源互联网层次功能图

Fig. 2 Function levels of energy internet

如图 2 所示，从层次功能来讲，能源互联网一般可以分为 4 个层次：第一层为物理系统层，主要包括组成能源互联网的基础设施，例如电厂、清洁能源发电设备、输变电设备、充电桩、储能装置和用电负荷，以及服务器、移动设备和基站等；第二层为传感通信层，主要包括厂站传感器、输电传感器、配电传感器、能量路由器和智能电表等设备，负责采集和传输物理系统层的数据与信息；

第三层为能源业务层，该层运行在各能量自治单元的终端之上，主要负责执行分散化的自治决策，满足用户产能、用能和交易的业务需求；第四层为增值服务层，主要为用户提供绿证、碳排放权等用能增值服务，以及能源金融产品等。

## 1.2 区块链

区块链是一种基于去中心化的分布式数据账本的技术，它由中本聪在比特币的构想中首次提出[19]。区块链网络由多个对等节点组成，所有节点共同维护一个公开的数据账本，账本中的记录按照时序严格排列，每个节点都完全拥有该账本，账本数据通过共识机制达成一致。

去中心化是区块链最主要的特征。作为一个分布式系统，一个区块链中可以没有任何的中心化机构，而实行分散自治的策略，引导用户自觉参与记账和执行事务。在合理机制的支持下，区块链系统比中心化系统更加稳定可靠，单一节点的故障问题不影响整个系统的平稳运行。高冗余度的分布式存储使得区块链具有防篡改、可追溯的特性，再结合数字签名等密码学算法，使得数据更加安全可靠。区块链集成了一系列的关键技术，包括共识算法、智能合约、密码学算法等，此外还包含激励机制、数据库和 P2P 通信等技术，是多个领域技术结合的产物。

共识算法负责解决节点在分散的情况下如何达成一致的问题。在区块链网络中，如果每个节点都同时记录数据，将会导致各节点的数据不一致，而共识算法设定了某种规则（共识），在某个时刻选出一位临时的记账节点，而其余节点要接受该节点的数据记录。经过共识后所有数据账本的记录将会保持一致，从而保证了分布式节点数据的一致性。

智能合约本质上是自动化执行的脚本程序，与普通程序所不同的是，其执行结果要经过所有节点共识，从而保障了程序执行的可靠性。区块链底层的分布式运行机制相当于一个“虚拟机”，为智能合约的执行提供稳定、可靠的环境，而智能合约则允许区块链实现更多的功能，拥有更加广阔的应用前

景。

区块链中应用的密码学算法包括哈希算法、数字签名、加密算法和默克尔树等，哈希算法主要用于对数据生成摘要，满足防篡改的要求，也是链式结构存储的关键技术之一；数字签名用于对区块链网络中的用户进行身份认证；加密算法允许用户将加密后的数据上传到区块链中；默克尔树则是用于提升事务处理效率，快速完成数据的验证。

根据侧重点不同，区块链发展出了多种类型，包括公链、联盟链和私链等。公链是区块链最早的形态，其对应的场景中用户之间完全没有信任，奉行完全去中心化、节点完全对等的原则，节点可以随意加入和退出公链网络，对节点数量也没有要求；联盟链是为具有一定信任基础的应用场景而设计的，共识过程由可信的、数量确定的一组节点完成，由于存在信任差距，内部的节点往往会在权限上有所区别，并非完全对等；私链则是某个单位或组织内部应用的系统，系统内所有节点均受同一个单位或组织的控制。

基于去中心化的设计理念和成熟的技术手段，区块链在数字资产、数据存储、数据鉴证、金融交易和可信计算等方面具有显著的作用[20]，可以帮助各行业解决相关问题，尤其是涉及到价值流动的应用场景，比如能源交易、供应链金融、版权认证和保险评定等。应用于能源互联网电力交易场景的区块链技术——电力交易区块链，是本文综述的主要内容。

## 2 电力交易区块链

欧盟工业界认为，能源区块链是区块链技术的一个重要应用场景[21]。能源互联网与区块链都具有分布式、去中心化的特征，能源互联网强调的开放、互联、对等和分享的设计理念与区块链去中心化、共同维护、地位平等和数据共享的特性高度契合。基于区块链技术的技术架构可以保证能源互联网中个体用户的地位平等，并实现用户之间的P2P能源及能源相关信息交易，从而实现能源互联网的价值驱动，建立新的能源价值体系。

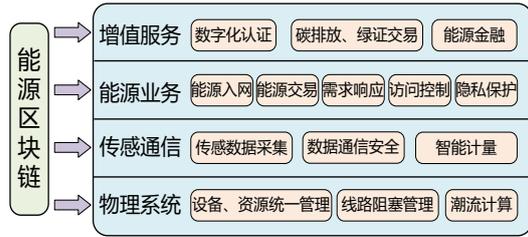


图3 能源区块链应用层次图

Fig. 3 Application levels of energy blockchain

本文认为，区块链可以帮助能源互联网的各个层次构建相关的应用，分别或联合地构建能源区块链，具体应用场景如图3所示。

作为能源区块链场景之一，电力交易属于能源互联网架构的第三层级——能源业务层。在绿色能源广泛去中心化接入电网，电动车反向供电等技术逐步成熟的趋势中，区域点对点交易需求日渐增多，构建去中心化点对点可信安全的区域交易平台是电力交易区块链的发展方向。同时，随着物联网技术传感通信控制技术的发展，电力系统在时间、空间维度上进行监管控制的粒度逐渐细化，将物联网、大数据、人工智能等技术以适当的方式嵌入电力交易区块链堆栈可以自动化、批量化地快速执行电力系统监管与控制，提升效率。从能源互联网的角度思考，电力交易需要用到传感通信层提供的数据，且需要使用区块链交易结果对物理系统层进行精细化管控制，在不同电网物理架构下，交易需求、特征复杂，为研究提供了丰富的场景。

在电力交易场景，已有不少与区块链相关的应用与研究。早期，LO3 Energy(New York, USA)和西门子(Munich, Germany)合作开发了基于区块链的交易型网格微电网交易平台[22]，用户可以在平台上自由地进行能源交易而不依赖于第三方机构，但是该平台没有适合交易方的竞价策略模型和基于区块链数据的直接结算功能。文献[23]介绍了区块链技术为提高能源交易处理效率方面的新进展，以及结合了区块链技术的分布式能源交易理论与实际应用；分析了国内外区块链技术在能源交易方面的研究现状，并给出了中国在区块链参与消纳分布式能源、建设需求响应管理等方面的建议。Luo等人基于区块链技术提出了一种代理者联

盟机制[24]，能源生产者形成电力交易联盟进行电力交易谈判，电力交易数据通过智能合约技术将电力交易数据上链存储，并基于区块链中的电力交易数据进行交易结算。这些项目和研究工作对于区块链技术在能源行业中应用来讲，无疑具有巨大的示范和推进作用，然而这些项目大多还处于理论和试验阶段，如何构建完善的能源区块链体系，还需要对实际应用中的问题进行深层次的考虑和研究。

现阶段，我国能源电力部门正在在电力交易区块链技术路线方向上逐步达成共识，基于电力交易对参与者准入，数据、信息、交易安全性等方面的特性，联盟链作为一种可实名、可监管的技术路线方向逐渐成为主流。

总体来讲，目前已有的电力交易区块链技术研究，既包含区块链技术应用模式的探索，也包含面向应用过场景的对区块链技术的深入研究[8]。这反映出当前区块链技术堆栈在电力交易领域研究的阶段性特征，即具体应用业务场景还需明确，特征性价值框架还未建立，且区块链作为一个技术堆栈本身还需要丰富并需要针对电力交易场景进行针对性创新。

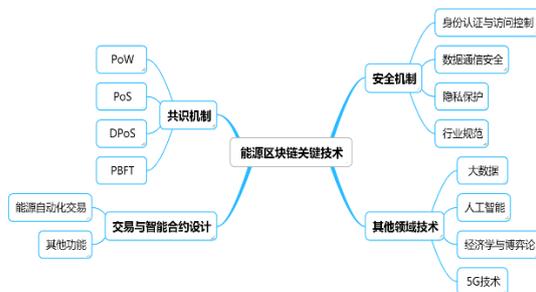


图4 能源区块链关键技术构成

Fig. 4 Key technologies of energy blockchain

本文从区块链的技术特征角度出发，结合当前的研究现状，认为目前电力交易区块链堆栈的关键技术探索主要有以下四个方向：共识机制，交易与智能合约设计，安全机制和其他领域技术，具体技术要点如图4所示，共识机制主要包括PoW、PoS、DPoS和PBFT等4种，交易与智能合约设计主要包括能源自动化交易和其他功能等2方面，安全机制主要包括身份认证与访问控制、数

据通信安全、隐私保护和行业规范等4方面，其他领域技术主要包括大数据、人工智能、经济学与博弈论和5G技术等4方面。接下来本文将从这四个方向出发，分析当前能源区块链的发展现状和问题，以及探讨各技术领域下一步的研究趋势。

### 3 能源区块链中的共识机制

基于分布式的特性，能源互联网经历了从最初的中心化系统到去中心化系统的发展，根据特征性场景针对性设计，又衍生出微电网、区域能源互联网等能源网络。区块链作为分布式账本，与能源互联网分散化的拓扑结构高度契合，各能源主体可通过共识机制来保证能源交易数据的一致性。

共识机制作为区块链技术的一部分，也符合能源互联网的发展脉络。目前基于区块链的能源项目研究所采用的共识机制主要包括PoW、PoS、DPoS和PBFT等几种，以及在其基础上改进的共识机制。针对能源互联网的发展，采用的共识机制主要分为3个阶段，(1)：针对能源互联网去中心化的特征，采用PoW、PoS、DPoS等通用性的共识机制，保证了各能源节点中交易数据的一致性；(2)：针对微电网中的特性节点，采用PBFT及其改进的共识机制，在抵抗拜占庭攻击的同时，也提高了共识效率；(3)：在未来区域能源互联网、能源互联网等特定能源网络场景中，需要制定针对性共识机制，以保证能源交易的共识效率和存储准确性。

#### 3.1 PoW

在能源区块链共识机制第一阶段，重点在于保证分布式场景中节点数据的一致性，多采用通用性的共识机制。例如：文献[25-27]采用PoW共识能源交易数据，保证各节点记账的平等性和节点数据的一致性，但是PoW耗费大量算力，造成能耗问题。针对PoW的能耗问题，部分研究通过转移算力计算目标[28]或减少共识节点[29]的方式来解决，前者中未获得记账权的节点依旧会消耗大量算力，并没有从根本上解决PoW的能耗问题；后者降低了系统的去中心化程度，少数节点保存能源交易数据，不适用于未来特定能源网络的场景。

### 3.2 PoS 与 DPoS

针对 PoW 的能耗问题,部分研究采用 PoS 共识机制来解决。例如:文献[30]基于 PoS 提出了 ESCA、ETCA 和 EICA 三种共识机制,分别对应存储三种不同能源交易数据的区块链;文献[31]基于 PoS 将交易量和交易金额作为“权益”代替币龄,由调度中心节点进行共识;文献[32]基于交易模式的不同,提出了适用于综合能源服务场景的权益分享证明(PoSS)共识机制。针对 PoW 的共识效率问题,部分研究采用 DPoS 共识机制牺牲部分去中心化程度以换取共识效率[33][34],例如:文献[35]将能源交易量作为“权益”,选取交易量大的账户轮流担任记账节点;文献[36]将碳排放权或绿证作为“权益”,选取超级节点进行记账。

以上共识机制,虽然避免了 PoW 的能耗问题,但是,交易数据分散共识、分链存储,增大了存储空间和数据溯源的难度。此外,“权益”积累降低了系统的去中心化程度,易形成超级节点,易造成节点间权利不对等,削弱了能源互联网的去中心化程度,可能导致能源互联网退化为中心化系统。

### 3.3 PBFT

在能源区块链共识机制第二阶段,针对某些特定的能源应用场景,例如微电网等,其中能源主体数量较少且无监管中心[37][38],能源交易量较少,选用 PBFT 共识机制,在所有能源节点地位平等的前提下,提高了能源交易的共识效率;某些微电网中可能存在默认可信节点,例如:需要能源监管主体[38]对能源交易进行监管,或通过数据中心[39]总览数据,则其对应的节点必然是可信节点,部分研究针对此类微电网场景[40],将可信节点作为共识节点,基于 PBFT 机制对能源交易数据进行共识,该方式减少了共识节点的数量,极大地提高了能源交易数据的共识效率。

在无默认可信节点的微电网中,随着能源接入主体的增多,因 PBFT 机制 3 段式的频繁交互,导致共识效率的显著下降,因此, PBFT 机制的应用仅局限于节点数量较少的微电网场景。

在具有默认可信节点的微电网中,选取定量可信节点参与共识,在一定程度上减缓了因节点数量增加导致的 PBFT 共识效率降低的问题,但是,公开确定的节点易成为被攻击的目标,并且预先指定共识节点的方法,不仅牺牲了能源互联网去中心化的特性,也难以保证共识节点的长期可信。

针对 PBFT 机制中节点的可信性问题,文献[41]采用 BP 神经网络构建区块链节点信用模型并选举信用最高的节点作为主节点,降低了拜占庭节点作为主节点的概率,但是该方法同样面临节点增多导致共识效率降低的问题。

### 3.4 区域能源互联网共识机制研究

在能源区块链共识机制第三阶段,针对未来区域能源互联网、能源互联网等大型能源网络场景,共识机制的设计应考虑节点数目、去中心化程度、数据一致性和共识效率等因素,现阶段迫切需要一种在能源主体增多时,能保证共识效率的去中心化共识机制,并且同时能够保证共识结果的一致性。

PBFT 共识机制具有拜占庭容错的性能,能够很好地避免节点作恶,因此,笔者的研究是基于 PBFT 共识机制进行。考虑到节点增多必然对共识节点产生影响,笔者的研究借鉴信誉模型[41]的方法,结合随机值对共识节点进行全局选取,所有信誉值合格节点均可能被选为共识节点,在保证去中心化特性的同时,减少了共识节点的数量,进而减少了 PBFT 机制 3 段式交互的次数,从而保证能源交易数据的共识效率。信誉值与随机值相结合的选举方式,一定程度地保证了共识节点的高概率可信性,为共识结果的一致性提供了保障。针对能源交易场景的不同,将能源交易分为微电网内部交易与外部交易,笔者研究依据交易场景的不同,更改共识节点的选举范围,使得能源交易由相关节点共识决定,并且支持多组共识节点同时进行共识,降低了共识节点被攻击的可能性,缓解了固定共识节点的共识压力。

## 4 能源区块链中的智能合约

现阶段在能源互联网中,如何进行满足用户需求的能源相关信息交互是重中之重。

一方面,大量个体发电用户涌现并加入能源互联网,电力能源类型逐渐增多,能源相关信息的交互逐渐从单一的集中交易、集中管控发展为多元化的综合能源交易[42];另一方面,需要考虑各种类型能源的特点,如传输成本和环保标准等,尽可能实现能源就近消纳,降低传输成本,增加清洁能源的使用比例。此外,还需考虑能源数据溯源、自动化结算、偏差/损耗处理等问题,使得能源区块链中的信息记录及交互能够更好地满足能源互联网中各类角色的不同需求。

智能合约作为区块链 2.0 的标志性特征,能够使区块链系统完成更加复杂的程序和计算,并保证程序运行的自动化和正确性,能够很好地实现能源互联网中复杂的多元化综合能源交易。智能合约在能源交易中的应用主要分为 3 个阶段,(1):针对能源交易结果制定智能合约,将交易结果上链存储,保证交易结果的不可篡改;(2):针对能源交易的阶段结果制定智能合约,将价格制定、交易结果和资金转账等数据上链存储,保证阶段数据的准确溯源;(3):针对能源交易双方需求制定智能合约,为交易双方提供需求信息发布、电力匹配、电力结算和偏差处理等一体化服务,保证了交易流程的自动化执行,避免了人为因素对电力交易过程的干扰。

#### 4.1 能源自动化交易

目前,已有较多采用智能合约实现能源互联网电力自动化交易的研究[31,43-47],交易过程主要包括价格制定、需求信息发布、电力匹配、资金结算和偏差处理等环节。

针对电力交易价格的制定,主要有三种方法:自由制定价格[48]、通过智能合约自动化调整价格[35][46]、密封售价机制[49][50]。方法一,用户可以自由定价,但是能源市场价格波动频繁,恒定的价格不利于电力的售卖。方法二,依据市场行情,通过智能合约实时调整电价,有利于电力售卖。因电价是影响电力匹配的重要因素之一,公开的电价易被竞争者作为参考,方法三,通过智能合约保证电价在匹配之前的密封性,有效防止了电价被作为参考的问题。未来电价制定,既要保证其密封性,又要充分参考

市场行情,为卖家获取最大化的利益。

为满足买卖双方需求,应为用户提供自主发布需求信息的功能。现阶段,部分研究采用智能合约已实现用户需求信息的自动化发布[31][43][44]。例如:文献[51]设计了电力多边交易的智能合约,合约第一步便是交易信息投标。在市场中,交易者依据自身喜好和实际需求,发布满足自身需求的购电、售电信息,能够更好地进行电力匹配,激发用户参与电力交易的积极性,促进电力市场的蓬勃发展,同时,用户在发布需求信息时应充分参考市场行情,避免电力供需失衡。

针对复杂的多元化综合能源交易场景,多种电力交易匹配机制被提出,大致可以总结为 P2P 撮合匹配[47][48]、双边拍卖匹配[1,50-54]和多因素电力交易匹配等三种。

文献[55]提出了一种基于用户偏好的去中心化匹配方法,采用智能合约实现了基于用户偏好的 P2P 能源撮合匹配,但是在交易数量大、匹配要求多的能源交易场景下,单个用户的匹配方式匹配效率较低。针对大量的电力交易,现阶段多采用双边拍卖匹配能源交易。例如:文献[56]采用双边拍卖匹配机制为社区用户进行电力匹配,有效减少了整体社区的高峰需求;文献[57]提出了一种综合能源交易机制,将匹配过程分为集中匹配和双边拍卖两个阶段。双边拍卖匹配主要参考电力价格,缺少对能源类型、传输损耗等因素的考虑,不利于清洁能源的售卖,并且远距离传输易造成不必要的传输损耗,增大传输成本。

针对电力交易匹配,应充分考虑电价、交易量、传输损耗、能源类型和环保指标等多种因素,侧重用户具体需求进行匹配,有利于为用户匹配相对最合适的电力交易。例如:文献[58]提出了一种基于区块链的分布式多因素电力交易匹配机制,并在文献[59]实现应用,实验结果表明该机制在满足用户需求的同时,还提高了清洁能源的消售比例,并降低了电力传输损耗,是较为适合多元化综合能源交易场景的一种匹配机制。

针对电力交易结算,现有研究主要采用以下两种方式:依据交易计划的同步结算[35,43,45,48,49,51]和依据实际数据的异步

结算[60]。前者是先付款后用电，依据交易计划中的购电量等信息利用智能合约进行自动结算；后者是先用电后付款，通过智能电表等设备获取实际的电力供耗数据，并采用智能合约实现异步结算。前者在结算的同时也导致了计划电量偏差处理的问题，后者有效避免了电力偏差浪费和费用预支的问题，较为适合分布式电力交易结算。

针对电力交易中的偏差，主要分为计划电量偏差处理和实际传输偏差处理。前者指的是实际需求与计划交易量的偏差处理，可通过智能合约向周边用户提交偏差电量交易申请，周边用户更改计划量，进而消除偏差量[49][51]，该偏差大多因计划交易量不够准确造成，不存在经济处罚；后者指的是实际传输电量与购买电量的偏差处理，造成原因主要是不良卖家少供电，通过对比智能电表采集的实际电量传输数据与区块链中的计划交易数据，得出偏差量，并依据奖惩机制，对违规者进行处罚[48][50]。

#### 4.2 其他功能

智能合约技术在电力交易过程中除以上功能之外，还包括能源主体注册[50][61]、密钥遗忘处理[35]、计量监管碳排放权[11][43]、电力交易确权溯源等功能。能源主体注册是能源主体参与能源交易的前提，通知智能合约提交注册信息，进而获得对应的区块链节点和唯一的公私钥，区块链节点保证了能源主体之间的能源交易，公私钥保证了电力交易信息的来源准确性；密钥遗忘处理功能主要帮助丢失密钥的用户找回密码，是能源区块链系统必不可少的功能；计量监管碳排放权功能在一定程度上限制了化石燃料的使用，有利于促进清洁能源的推广；电力交易确权溯源主要包括售电和购电信息[26][35][55]、电力匹配记录[1,58-60]、结算记录[51,58,59]以及碳排放权和绿证交易记录[43]的确权和溯源，通过智能合约实现以上信息的自动化上链存储，保证了交易数据的不可篡改和可溯源查询，此外，也为电力结算提供了准确的参考数据，推动了自动化结算功能的实现。

现阶段，应用于能源互联网中的区块链

框架主要为 Hyperledger Fabric[62]，多采用联盟链的方式部署能源互联网网络，智能合约多采用 Golang 语言编写，智能合约能够保证程序的自动化运行，避免人为因素对电力交易过程的干扰，区块链技术具体细节过于琐碎，在此不进行细节描述。未来，智能合约技术完善能源交易的自动化执行，可能面临的问题主要包括：自动化运算存储效率、轻量化运行、大批量交易等几方面，笔者在未来将针对以上几方面进行进一步研究。

### 5 能源区块链中的安全机制

能源区块链的一个重要的作用就是为能源互联网提供安全保障，因此能源区块链的安全机制也倍受关注。文献[63][64]讨论了区块链所面临的安全风险，并对当前存在的一些改进手段进行评价。这些研究更加侧重于对区块链本身进行分析和讨论，然而能源互联网面临的问题更加复杂，包括身份认证与访问控制、数据通信安全、隐私保护和行业规范等。

#### 5.1 身份认证与访问控制

身份认证可以保证系统内的交易、数据等更加公开透明，提升用户和系统的可信度；而访问控制是系统通过对用户进行认证，从而控制用户访问系统内资源的手段，防止用户非法使用系统资源。能源互联网中用户参与交易或其他业务一般是通过真实身份来进行，而能源系统中也存在多种类型的用户，如管理员用户、电厂用户、分布式能源用户等，他们各自所有拥有的权限是不同的，需要进行严格的控制。

在最早的区块链系统中，用户只需要通过椭圆曲线(ECC)等算法生成一对公私钥，就可以加入系统参与交易。用户可以对自己的交易进行数字签名，其他节点可以通过他的公钥来验证，公钥就是用户的“身份”。这种公钥认证机制的优势在于灵活便捷，但由于缺乏审查和准入机制，系统无法甄别用户是否可靠。能源互联网中的用户入网往往需要满足一定的注册条件，比如真实身份、信用状况等，而单纯使用公私钥难以保证这一点。此外，由于用户之间没有权限分别，系统难以进行访问控制。

有研究通过单独构造身份链的方式进行身份认证[65]，但该方案实际上是将受攻击的风险转移到了另一条链，而没有缩减这种风险。

联盟链 Fabric 通过引入数字证书颁发机构（CA）来保障系统用户的质量。CA 负责对系统内的用户进行身份管理，用户的公私钥需要在 CA 中注册才能使用，用户的审查也会交给 CA 来处理。而且 CA 可以给不同的用户授予不同的权限，将用户分为管理员和普通用户。这种方式与能源互联网的实际状况比较符合，但值得注意的是，CA 是一个中心化的机构，一旦 CA 受到攻击，整个系统的身份管理将会不受控制。

由此可以看出，如何在尽可能去中心化的情况下，完善身份认证和访问控制机制，是解决能源区块链身份认证和访问控制问题的重要方向。此外，对于能源互联网内基础设施来说，则应尽可能地控制其权限，防止产生漏洞或被恶意攻击。文献[66]通过智能合约实现物联网中设备的访问控制，对能源区块链也具有一定的参考价值。该方案中设定了访问控制合约、注册合约和判定合约，对设备进行严格的管理，并能够诊断设备的非法操作，当然在效率上相对于中心化的管理会有所下降。

## 5.2 数据通信安全

能源区块链的通信安全要求包括保密性、完整性和可用性三个要素[26]，其中保密性指的是通信数据不被破译，完整性表示发送与接收数据一致，没有受到篡改，而可用性要求系统可以持续正常运行。

基于分散化的节点分布，区块链使用 P2P 通信协议在节点之间进行通信，节点与节点之间直接建立连接传输数据，节点广播的信息也会通过泛洪机制传播到整个网络。然而 P2P 网络往往缺少身份认证、数据验证、网络安全管理等机制，使得攻击者有机会发送非法内容对网络进行攻击[67]，如日蚀攻击、女巫攻击、DDoS 攻击等。

文献[26]提出将数据分发服务（DDS）作为区块链的底层数据传播技术，结合智能合约对数据进行校验，防御虚假数据攻击。

DDS 采用发布/订阅体系架构，并提供服务质量策略，各个节点在逻辑上无主从关系，与区块链的架构相类似，提高了通信数据的质量，但也没能解决底层节点的验证和授权问题。

Fabric 基于自身严格的身份认证和访问控制机制，使用安全传输层协议（TLS）进行节点之间的安全通信。TLS 会在两个节点之间建立安全连接，包括身份确认和数据加密传输，避免了伪造节点和虚假数据的问题。当然，TLS 的安全性也是由 CA 机构进行保证的。

总的来讲，数据通信安全与系统内身份认证机制紧密相关，身份认证较强的联盟链网络中，通信安全更容易得到保障；而身份认证较弱的公链系统容易遭受攻击。在讨论解决方案时，研究者对于这两方面的安全问题应当一起考虑。

## 5.3 隐私保护

能源互联网中包含了大量的用户交易数据，随之带来的是用户的隐私保护问题。区块链去中心化的结构不仅提升了整个系统的安全保障，也让用户隐私保护成为可能。P2P 网络结构和去中心化特征在隐私保护上具有一定的优势，但也面临着一些问题[68]，这些问题主要分为数据隐私问题和身份隐私问题。

### 5.3.1 数据隐私

区块链中的数据是公开透明的，攻击者能够通过分析交易记录获得有价值的信息，例如资金流向和交易内容等，而用户往往不希望这些信息被其他人探知。

基于 UTXO 模型的区块链系统具有一定的匿名性，用户可以选择使用多个账户来隐藏自己的交易行为。但仅仅通过多重账户的方法是不够的，攻击者依然可以通过交易溯源和账户聚类等技术获取到有用信息。文献[25] [69]试图通过动态随机数、相邻账户隐藏和账户映射算法等手段完善多重账户机制，以避免数据挖掘算法的攻击。然而多重账户机制会给审计和监管带来不便，增加系统的不可控性。

通过多链结构来保护数据隐私也是一

种常见的手段。多链结构是区块链的一种独特的结构，多个区块链各自拥有一部分节点群体，且链与链之间存在节点交集。例如一个多链结构可以包括账户链和交易链[35]，分别存储不同类型的数据，只有参与其中的账户有权查询。文献[65]将交易分为了公有交易和私有交易，私有交易不进行全网共识，而是由一组可信任的监管节点进行验证和记录，因此可以实现对部分隐私数据的保护。这在本质上还是一种包含了“私有交易链”和“公有交易链”的多链。多链结构实质上是通过对用户群体来保护部分数据的隐私，但难以作用于所有用户都参与的数据集。

此外，鉴于能源区块链中大多数据将会频繁参与计算，保护能源数据在计算过程中的隐私也将会是一项重要的课题。目前已经有研究提出将 SGX[70][71]、安全多方计算[72][73]和同态加密[74]等技术与区块链相结合，使得区块链中的数据在参与某些处理和计算仍能够保证隐私，可以为能源区块链提供改进思路。

### 5.3.2 身份隐私

区别于传统的中心化数据存储，区块链去中心化的网络分布结构难以阻断交易数据的传播和外泄，其隐私保护会更加侧重于保障用户的匿名性，也就是身份隐私。

目前关于能源区块链匿名性的研究比较稀缺。文献[75]使用多重签名结合匿名信息流实现匿名的能源交易。该方案的难点在于快速验证，如何提高匿名信息流的处理效率是一个不小的难题。此外，像结合群签名[76]、环签名[77]、零知识证明[78]等密码学技术来保障区块链匿名性的相关研究已有很多，下一步需要考虑结合能源交易中的匿名需求做出更多的尝试。

## 5.4 行业规范

在全世界范围内，区块链拥有庞大的开发社区和众多的开源项目，例如比特币、以太坊、超级账本 Fabric 等等，而能源区块链的相关研究也都会基于这些开源项目进行实验和试运行。然而能源区块链要想在我国真正落地并发挥作用，还需要遵守相应的行业规范。

区块链中包含了大量的密码学算法，大多数开源项目使用的是主流密码学算法，比如 SHA256、secp256k1 等。而我国密码行业技术委员会颁布了一套密码行业推荐标准，包括各类算法以及使用规范，这些国密算法经过专业的设计和证明，相较于主流算法而言具有更好的安全性和适用性。目前其他领域已经存在国密算法相关的区块链设计[79][80]，可以为能源行业提供参考。

监管问题也是能源区块链所面临的重要问题。当前能源区块链相关法律法规尚未健全[81]，导致国内外的能源区块链项目普遍规模较小且应用场景过于理想，无法进行广泛地应用[13]。文献[65]和[39]都通过在系统中设置监管节点的方式完成系统的监管；文献[30]采用实时监听的方式，获取用户节点的交易行为；而文献[35]在多链体系中设置了监管区块链，对用户的诚信和违规行为进行记录，达到以链治链的效果。对于监管问题，一方面相关部门应该继续严格相关法律法规，引导能源行业对区块链技术进行正确地使用；另一方面研究者应当积极探索更多的技术监管手段，例如节点追踪、穿透式监管、主动探测和以链治链等。

## 6 能源区块链中的其他领域技术

在能源互联网的相关研究中，许多其他领域的技术例如大数据、人工智能、经济学与博弈论、5G 技术等，被用于促进能源互联网的进一步提升。这些其他领域的技术与区块链技术相互促进、相互融合，从而发挥出“1+1>2”的效果。目前许多研究都在尝试着将其他领域的技术与区块链进行结合，以构建出更符合实际需求的能源区块链体系。

### 6.1 大数据

大数据技术可以有效地提升能源互联网的数据整合与分析能力，在能源互联网领域具有广泛的应用[16]，包括负荷预测、分布式能源接入、系统安全和态势感知等方面。

主流的大数据技术都采用分布式存储的方式，与能源区块链的结构较为符合。区块链能够为大数据提供安全可靠的数据来源，也可以对大数据分析的结果进行认证

[82]。此外，应用大数据技术可以为能源互联网数据的处理提供更丰富的选择，例如结合边缘计算[83]可以为本地用户提供高吞吐量、及时的数据处理服务等。

## 6.2 人工智能

人工智能算法如神经网络、深度学习等为能源互联网的设计、模拟、优化和用户分类等提供了强大的工具[18]，而区块链可以为人工智能技术提供安全的执行平台，以保护这些关键的能源数据。

文献[84][85][86]探讨了区块链和人工智能技术在实现能源互联网的自动化和现代化的作用。人工智能支持的区块链可以更好地分析和处理包含数千个变量（频率、负载和电压变化等）的数据集，来实现传输路径优化、入侵检测和交易数据识别等功能。由于计算量过大不适合直接使用智能合约，这些方案大多采用“链上结合链下”的手段，人工智能分析系统与区块链系统往往各自独立运行。

群体智能算法则能够与智能合约更好地进行融合，例如蚁群优化（ACO）算法。ACO 算法与区块链技术共同存在的去中心化特征，通过个体间的沟通协作可实现整体寻优。文献[44]利用改进的 ACO 算法来处理各能源市场主体竞争的多目标优化问题，还将该优化算法与其他类型的优化进行比对，以证明该算法的全局搜索能力和收敛能力更强、求解效率更高。

此外，还可以考虑将人工智能技术与区块链进行深度融合，例如利用深度学习等对能源区块链底层结构进行分析，辅助能源互联网中设施的调整和优化，如分析各个节点的数据吞吐量，以实现节点之间的快速响应和分布式系统负载均衡[87][88]等。

## 6.3 经济学与博弈论

经济学和博弈论相关的知识常被应用在能源市场领域，用以分析各市场主体的行为，促进能源市场发展。区块链本身蕴含着一定的经济学原理，例如激励机制和代币发行，而能源市场情况更加复杂和多样化，电网能够通过调整电价对用户施加影响，还能通过发放补贴[44]、绿证等行为促进用户参

与能源交易。

文献[34][89]都提到了使用代币来作为用户参与能源区块链记账的奖励，而单一的挖矿激励机制却无法起到促进用户参与能源市场的作用。文献[44]根据可再生能源利用率设计了新的激励机制，即以可再生能源利用率高于平均的程度来发放奖励，甚至还设计了碳排放相关的惩罚机制，对于用户多余的碳排放量给予惩罚。

能源金融化也是一个热门趋势，区块链能促进能源市场中的权益转化为金融产品[36]。通过区块链的担保，能源金融产品可以在其他平台进行转让和交易，从而增加能源市场的流动性和积极性，优化市场资源的配置。

能源市场常常会涉及到各方之间的博弈，区块链和智能合约能够帮助用户自动化地获取市场信息并执行最优策略，从而在能源交易中获益。根据场景设定的不同，许多研究采用合作博弈模型[39]或非合作博弈模型[44][52][90]来预测市场的形式和均衡问题。博弈模型首先要考虑的问题就是是否存在均衡状态，文献[52]采用势博弈保证了纯策略均衡解的存在，不需要讨论均衡的存在性，有利于推进博弈模型的进一步应用。文献[44]分析了微电网运营商、大用户和分布式聚合商的市场需求，建立了市场竞争博弈模型，并验证了在三者获益区域内并不存在帕累托最优点，说明电力市场各方主体之间具有明显的竞争关系。

此外，用户制定市场策略时除了考虑参与交易所带来的收益最大化之外，还有可能考虑行为偏好、环保效益等，以及能源市场的附加产品所带来的额外收益，这些也需要在设计博弈模型时加以考虑，进行定量的分析。

## 6.4 5G 技术

作为新型基础设施建设的关键技术之一，5G 技术能够为能源互联网电力交易中的数据通讯提供有力的保障。区块链本身存在一定的效率和性能缺陷，而 5G 通信技术包含了 5 个方面的基本特征，即高速率、高容量、高可靠性、低时延与低能耗[91]，能

有效提升能源区块链的综合效率，创新能源区块链的应用模式。

5G 能够连接海量设备，每平方公里可以支撑 100 万个移动终端，使得能源区块链可以将更多的基础设施纳入管理范围，实现能源互联网中更加精确、密集的信息互联。

5G 高速率、低时延的特性可以显著提升能源区块链中交易广播和区块同步的效率，从而能够在根本上提升共识机制的效率，有利于能源区块链选取可靠性更高的共识机制和数据传输手段。

5G 支持网络切片技术[92]，可以根据能源互联网中不同业务的差异性选择不同的网络，比如超高可靠性超低时延、海量机器通信接入和增强带宽等。

对于层次式的能源区块链结构来说，5G 技术能够帮助区块链系统更加快速、精准地从传感设备收集数据，以实现电网内物理设施的有效控制。凭借在物联网通信中的巨大优势，5G 技术将会促进电力系统更好地与物联网融合，形成“5G+物联网+区块链”的能源区块链一体化格局。

当然 5G 技术目前也存在一些不足，例如通信能效问题。5G 时代的通信基站密度将会达到 4G 时代的 10 倍以上，大容量、高速率、低时延的代价将会是能效的降低。因此，如何能在更加节能环保的基础上融合 5G 技术，是能源互联网未来将要面对的问题。此外，区块链模式在 5G 通信中的深度结合也是一个值得讨论的话题，与当前 5G 技术提升区块链性能和效率的结合方式不同，区块链有助于在底层机制上实现点对点的安全高效通信。

## 7 能源区块链未来研究方向

能源区块链正处在一个飞速发展的阶段，然而目前存在诸多因素制约能源区块链的发展。一方面，现今关于能源区块链的研究中，缺少对区块链前沿技术的深入探究与应用；另一方面，多数能源区块链方案停留在设计和原型阶段，缺少有效的实践反馈。基于现有的研究状况和问题，未来能源区块链设计的研究重心可能会集中在高性能、高安全、高可扩展和高可监管等几个方面。

### 7.1 高性能

能源区块链想要真正落地，必须要解决性能问题，区块链自身性能瓶颈和在能源场景应用产生的额外性能需求是当前制约能源区块链性能提升的主要因素。

针对区块链自身的性能瓶颈，需从区块链底层的设计机制出发，提升现有的性能水平。例如，共识机制可靠性与效率之间的矛盾尚未解决，需要设计出满足能源区块链大规模节点场景，且具有良好的容错性的高效共识算法；智能合约的效率难以支撑复杂的人工智能算法或数据分析，需要从合约底层的执行引擎入手提升计算效率；去中心化账本中的冗余数据太多导致存储效率低下，可以尝试结合分布式存储方案，如 IPFS[93][94]等，更高效地存储海量数据。

而针对区块链具体应用时产生的额外需求，需要考虑具体应用的影响采取相应的措施。例如，应用密码学技术保护系统安全和隐私的同时，也会降低系统业务的处理速度，需要设计信息冗余度更小、更加简洁的安全和隐私保护机制；能源互联网大规模物理设备接入和海量数据搜集，会涉及到硬件设施的性能瓶颈问题，需要广泛应用 5G、大数据等技术来有效地管理能源设备与数据。

### 7.2 高安全

针对现有的能源区块链关于安全机制的研究，可以做到的提升有以下几方面：

进一步加强对用户的身份认证和访问控制，继续探究去中心化的公钥认证机制和权限控制机制，同时依靠有效的身份认证机制来提升节点间数据通信安全，避免系统因验证和管理缺失而遭受攻击；充分考虑能源场景的隐私保护需求，防止因隐私泄露而造成安全问题，结合可信执行环境 SGX、安全多方计算和同态加密等技术保障数据的私密性，结合群签名、环签名和零知识证明等技术保障分布式能源用户在交易中的匿名性；采用更加安全可控的密码学标准，如在能源区块链的构建中使用国密算法代替主流密码学算法，以从基础上获取更可靠的安全保障。

### 7.3 高可扩展

良好的可扩展性对于能源区块链的可用性、易用性等方面具有重要影响。随着未来能源互联网的发展,势必会对能源区块链的可扩展性提出更高的要求。

首先是对规模可扩展的要求,需要积极探索高可扩展的共识算法,发展区块链分片、跨链、多链等技术,以保证更大规模区块链网络的事务处理能力,满足更广泛的能源—信息互联需求。

此外还有对于能源互联网业务和应用的扩展要求,一方面需要完善能源区块链的平台化建设,构建整个能源互联网应用的社区和生态;另一方面可以考虑对智能合约引擎的扩展功能进行改进,支持更多种类的编程语言。

#### 7.4 可监管

能源是关系到国计民生的重要领域,能源区块链在设计上必须做到严格监管,能够保证事前能预防、事中可止损、事后要追责。一方面要通过技术手段加强对能源互联网内各主体的监管,明确各个主体的权责问题,积极探索节点追踪、穿透式监管、主动探测和以链治链等监管技术;另一方面要加强对能源市场的审计和监管,尤其是在对用户的隐私进行保护的同时,要为市场监管留有余地,严格遵守相关的信息管理规定。

### 8 总结

本文通过定位能源互联网中电力交易区块链中的关键技术,从共识机制、交易与智能合约设计、安全机制和其他领域技术等四个角度,详细地综述了现今电力交易区块链在各项技术方面的研究进展,并结合发展现状进行更加深入地讨论与分析,指出目前各项技术领域存在的问题,以及未来可能的研究方向,以期为能源互联网电力交易区块链的进一步研究提供参考。

可以看出,区块链对于能源互联网的提升是全方位、多维度的,构成电力交易区块链的多种关键技术能够自底向上的发挥其作用,有望从根本上解决目前电力交易面临的种种挑战。不过,目前能源互联网电力交易区块链仍然有很长一段路要走,要想真正地实现落地应用,除了从技术理论方面展开

更加深入的研究,还需要在行业中进行更加广泛的实践。

### 4 参考文献

- [1] 杰里米.里夫金. 第三次工业革命[M]. 新华社, 2013.
- [2] 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[A]. 中国农机工业协会风能设备分会《风能产业》编辑部.《风能产业》(2016年第2期)[C]:中国农业机械工业协会风力机械分会,2016:7.
- [3] 原凯,李敬如,宋毅,等.区域能源互联网综合评价技术综述与展望[J].电力系统自动化,2019,43(14):41-52+64.
- [4] 周孝信,曾嵘,高峰,等.能源互联网的发展现状与展望[J].中国科学:信息科学,2017,47(02):149-170.
- [5] 中华人民共和国国务院新闻办公室.《新时代的中国能源发展》白皮书(全文)[R/OL].(2020-12-21)[2020-12-22].
- [6] 新华网.部分地区电力供应紧张多部门紧急保供[R/OL].(2020-12-21)[2020-12-22].  
[http://www.xinhuanet.com/energy/2020-12/21/c\\_1126885539.htm](http://www.xinhuanet.com/energy/2020-12/21/c_1126885539.htm).  
<http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>.
- [7] AI Songpu, RONG Chunming, CAO Junwei. Energy Internet [M]. Cham: Springer, 2020: 297-320.
- [8] 蔡文军,朱艳.应用于能源系统的区块链技术研究进展[J].智能电网(汉斯),2018,008(003):P.205-212.
- [9] 国网区块链科技公司.第一届能源区块链生态大会在京召开——发布国家电网区块链十大应用场景构建区块链数字新生态[R/OL].(2019-12-19)[2020-12-22].  
[http://www.sgcc.com.cn/html/sgec/col2019111312/2019-12/20/20191220151634802982063\\_1.html](http://www.sgcc.com.cn/html/sgec/col2019111312/2019-12/20/20191220151634802982063_1.html)
- [10] Andoni M, Robu V, Flynn D, et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 100: 143-174.
- [11] 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[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4011-4023.
- [12] 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[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3664-3671.
- [13] 周洪益,钱苇航,柏晶晶,等.能源区块链的典型应用场景分析及项目实践[J].电力建设,2020,41(02):11-20.
- [14] 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[J].南方电网技术,2014,8(04):1-10.
- [15] 曹军威,孟坤,王继业,等.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014.

- [16] 曹军威, 袁仲达, 明阳阳, 等. 能源互联网大数据分析技术综述[J]. 南方电网技术, 2015,9(11):1-12.
- [17] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016,40(12):3655-3662.
- [18] 肖泽青, 华昊辰, 曹军威. 人工智能在能源互联网中的应用综述[J]. 电力建设, 2019,40(05):63-70.
- [19] Nakamoto, S.. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Technical report (2008).
- [20] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016,42(04):481-494.
- [21] Nascimento S., Pólvoira A., and Lourenço J. #Blockchain4EU: Blockchain for industrial transformations[R]. Ispra, Italy: Europe Commission, Joint Research Centre, 2018.
- [22] Mengelkamp, Esther, Gaertner, et al. Designing microgrid energy markets A case study: The Brooklyn Microgrid[J]. Applied Energy, 2018.
- [23] 王蓓蓓, 李雅超, 赵盛楠, 等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 043(014):53-64.
- [24] Luo F, Dong Z Y, Liang G, 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.
- [25] 龙洋洋, 陈玉玲, 辛阳, 等. 基于联盟区块链的安全能源交易方案[J]. 计算机应用, 2020,40(06):1668-1673.
- [26] 郭鹤旋, 鲁斌. 基于交叉区块链的能源互联网信息物理安全防御框架[J]. 电脑知识与技术, 2018,14(23):7-9.
- [27] 唐学用, 李庆生, 和远航, 等. 基于区块链技术的电力交易系统安全建模及性能分析[J]. 南方电网技术, 2019,13(05):77-83.
- [28] 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(01):108-116+378.
- [29] 祁兵, 夏琰, 李彬, 等. 基于区块链激励机制的光伏交易机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019,43(09):132-139+153+140-142.
- [30] 余维, 顾志豪, 杨晓宇, 等. 异构能源区块链的多能互补安全交易模型[J]. 电网技术, 2019,43(09):3193-3201.
- [31] 余维, 杨晓宇, 胡跃, 等. 基于联盟区块链的分布式能源交易认证模型[J]. 中国科学技术大学学报, 2018,48(04):307-313.
- [32] 龚钢军, 王慧娟, 杨晟, 等. 区块链技术下的综合能源服务[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(05):1397-1409.
- [33] 朱兴雄, 陈绍真, 何清素. 基于区块链的微电网系统[J]. 电子技术与软件工程, 2018, 000(001):P.157-159.
- [34] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(13):3737-3745.
- [35] 吕凛杰, 李刚, 呼静雅, 等. 能源区块链中用户侧点对点交易支撑环境研究[J]. 电力建设, 2019,40(05):38-47.
- [36] 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[J]. 电网技术, 2019,43(03):961-972.
- [37] 崔金栋, 王胜文, 辛业春. 区块链联盟链视角下智能电网数据管理技术框架研究[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(03):836-848.
- [38] 王莉鑫. 基于区块链共识机制的能源互联网协同优化研究[D]. 华北电力大学, 2019.
- [39] 黄虹, 文康珍, 刘璇, 等. 泛在电力物联网背景下基于联盟区块链的电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(03):22-28.
- [40] 周国亮, 吕凛杰, 李刚. 基于区块链共识机制的能源互联网交易[C]. 中国电机工程学会电力信息化专业委员会. 数字中国 能源互联——2018 电力行业信息化年会论文集. 中国电机工程学会电力信息化专业委员会: 人民邮电出版社电信科学编辑部, 2018:236-239.
- [41] 张维忠, 徐步尘, 高飞. 对用电信息保护的拜占庭容错联盟链共识算法[J]. 电气时代, 2020(01):75-78.
- [42] Chen S, Liu C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Modern power systems, 2017, 5(1): 10-19.
- [43] 魏彬, 刘晓锋, 苟航. 基于公有链的分布式链上能源交易模式探究[J]. 长春师范大学学报, 2020,39(02):41-47.
- [44] 马天男, 彭丽霖, 杜英, 等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备, 2018,38(05):191-203.
- [45] 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.
- [46] 李刚, 孟欢, 周国亮, 等. 基于区块链技术的微网能量管理探析与方案设计[J]. 电力建设, 2018,39(02):43-49.
- [47] Pee S J, Kang E S, Song J G, et al. Blockchain based smart energy trading platform using smart contract[C]// 2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). 2019. 322-325.
- [48] 韩冬, 张程, 正浩, 等. 基于智能合约的分布式能源交易体系架构研究[C]// 中国电机工程学会电力市场专业委员会 2018 年学术年会暨全国电力交易机构联盟论坛论文集. 2018:238-243.
- [49] 平健, 陈思捷, 张宁, 等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(13):3682-3690.

- [50] 韩冬, 张程, 正浩, 等. 基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计[J]. 电力系统自动化, 2019,43(07):89-99.
- [51] 杨选忠, 张浙波, 赵申轶, 等. 基于区块链的含安全约束分布式电力交易方法[J]. 中国电力, 2019,52(10):31-39.
- [52] 周步祥, 杨明通, 史述青, 等. 基于区块链的微电网市场势博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2020,44(07):15-26.
- [53] 王德文, 柳智权. 基于智能合约的区域能源交易模型与实验测试[J]. 电网技术, 2019,43(06):2010-2019.
- [54] Wang J, Wang Q, Zhou N, et al. A Novel Electricity Transaction Mode of Microgrids Based on Blockchain and Continuous Double Auction[J]. *Energies*, 2017, 10(12).
- [55] 杨晓宇. 基于区块链的分布式能源调度与多元用户交易方法研究[D]. 郑州大学, 2019.
- [56] Saxena S, Farag H, Brookson A, et al. Design and Field Implementation of Blockchain Based Renewable Energy Trading in Residential Communities[J]. 2019.
- [57] Zhao S, Wang B, Li Y, et al. Integrated Energy Transaction Mechanisms Based on Blockchain Technology[J]. *Energies*, 2018, 11(9).
- [58] Distributed Multi-Factor Electricity Transaction Matching System based on Blockchain
- [59] A Blockchain based Distributed Controllable Electricity Transaction Matching System.
- [60] S. Ai, D. Hu, T. Zhang, et al. Blockchain based Power Transaction Asynchronous Settlement System[C]. 2020 The IEEE Vehicular Technology Society(VTS), 2020.
- [61] 陈爱林, 田伟, 耿建, 等. 跨国电力交易的区块链存证技术[J]. 全球能源互联网, 2020,3(01):79-85.
- [62] E. Androulaki, A. Barger, V. Bortnikov, et al., "Hyperledger Fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains," in european conference on computer systems, 2018.
- [63] Li X, Jiang P, Chen T, et al. A Survey on the Security of Blockchain Systems[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2017:S0167739X17318332.
- [64] 丁伟, 王国成, 许爱东, 等. 能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(04):1026-1034+1279.
- [65] 田秀霞, 陈希, 田福粮. 基于区块链的社区分布式电能安全交易平台方案[J]. 信息安全学报, 2019(01):51-58.
- [66] Ullah I, Sultana T, Javaid N. Data Sharing System Integrating Access Control Mechanism using Blockchain-Based Smart Contracts for IoT Devices[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2):488.
- [67] 韩璇, 袁勇, 王飞跃. 区块链安全问题:研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2019,45(01):206-225.
- [68] 祝烈煌, 高峰, 沈蒙, 等. 区块链隐私保护研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2017,54(10):2170-2186.
- [69] Gai K, Wu Y, Zhu L, et al. Privacy-Preserving Energy Trading Using Consortium Blockchain in Smart Grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019:3548-3558.
- [70] Ayoade G, Karande V, Khan L, et al. Decentralized IoT Data Management Using Blockchain and Trusted Execution Environment[C]// 2018:15-22.
- [71] Luo Y, Fan J, Deng C, et al. Accountable Data Sharing Scheme Based on Blockchain and SGX[C]// 2019 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). 2019.
- [72] Raman R K, Vaculin R, Hind M, et al. Trusted multi-party computation and verifiable simulations: A scalable blockchain approach[J]. *arXiv preprint arXiv:1809.08438*, 2018.
- [73] 朱岩, 宋晓旭, 薛显斌, 等. 基于安全多方计算的区块链智能合约执行系统[J]. 密码学报, 2019,6(02):246-257.
- [74] Zhou L, Wang L, Sun Y, et al. BeeKeeper: A Blockchain-Based IoT System With Secure Storage and Homomorphic Computation[J]. *IEEE Access*, 2018: 43472-43488.
- [75] Zhumabekuly Aitzhan N, Svetinovic D. Security and Privacy in Decentralized Energy Trading Through Multi-Signatures, Blockchain and Anonymous Messaging Streams[J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2016:840-852.
- [76] Zhang Y, Wu S, Jin B, et al. A blockchain-based process provenance for cloud forensics[C]// 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2017.
- [77] Noether S. Ring Signature Confidential Transactions for Monero[J]. *IACR Cryptol. ePrint Arch.*, 2015, 2015: 1098.
- [78] Yunsen W, Alexander K. Designing confidentiality-preserving Blockchain-based transaction processing systems[J]. *International Journal of Accounting Information Systems*, 2018, 30:1-18.
- [79] 章建聪, 邱云翔, 金泓键. 超级账本Fabric平台 SDK 国密改造方案研究[J]. 网络安全技术与应用, 2020(03):37-39.
- [80] 邓建球, 方轶, 丛林虎, 等. 基于改进国密算法与区块链的数据登记系统[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(01):122-125+129.
- [81] 陈纯. 联盟区块链关键技术与区块链的监管挑战[J]. 电力设备管理, 2019(11):20-21+28.

- [82] 薄林, 颜中原, 李翼铭, 等. 数据挖掘和区块链技术的电力营销信息平台[J]. 信息技术, 2020,44(06):60-65.
- [83] 方俊杰, 雷凯. 面向边缘人工智能计算的区块链技术综述[J]. 应用科学学报, 2020,38(01):1-21.
- [84] Mylrea M. AI enabled blockchain smart contracts: Cyber resilient energy infrastructure and IoT[C]//2018 AAAI Spring Symposium Series. 2018.
- [85] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 等. 基于撮合交易的能源互联网最小网损路由算法[J]. 电力系统自动化, 2018,42(14):172-179.
- [86] Rathore S, Pan Y, Park J H. BlockDeepNet: A Blockchain-Based Secure Deep Learning for IoT Network[J]. Sustainability, 2019, 11.
- [87] 曹怀虎, 张艳梅, 王坚, 等. DAG 区块链中基于确定性退火技术的融合分割遗传任务调度算法[J]. 中国科学:信息科学, 2020,50(02):261-274.
- [88] 孙凯俐, 李晖, 陈梅. 面向区块链节点负载预测的 ARIMA 组合预测方法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(08):180-182.
- [89] 邵炜晖, 许维胜, 徐志宇, 等. 基于区块链的虚拟电厂模型研究[J]. 计算机科学, 2018,45(02):25-31.
- [90] 陈绍真, 王俊生, 伍燕. 基于古诺模型的能源互联网电能产品定价与交易模型研究[C]. 中国电机工程学会电力信息化专业委员会. 数字中国能源互联——2018 电力行业信息化年会论文集. 中国电机工程学会电力信息化专业委员会: 人民邮电出版社电信科学编辑部, 2018:206-213.
- [91] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019,43(05):1575-1585.
- [92] 夏旭, 朱雪田, 梅承力, 等. 5G 切片在电力物联网中的研究和实践[J]. 移动通信, 2019,43(01):63-69.
- [93] Zheng Q, Li Y, Chen P, et al. An innovative IPFS-based storage model for blockchain[C]//2018 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI). IEEE, 2018: 704-708.
- [94] Kumar R, Tripathi R. Implementation of Distributed File Storage and Access Framework using IPFS and Blockchain[C]//2019 Fifth International Conference on Image Information Processing (ICIIP). IEEE, 2019: 246-251.

---

收稿日期: yyyy-mm-dd

#### 作者简介:

曹军威, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为能源互联网、智能电网, E-mail: [jcao@tsinghua.edu.cn](mailto:jcao@tsinghua.edu.cn);

艾崧溥, 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为区块链在能源互联网中的应用, E-mail: [aisp@tsinghua.edu.cn](mailto:aisp@tsinghua.edu.cn);

胡殿凯, 男, 硕士, 主要研究方向为区块链, E-mail: [hudk@mingbyte.com](mailto:hudk@mingbyte.com);

张桐, 男, 硕士, 主要研究方向为区块链与隐私保护, E-mail: [zhangtong2018@mail.sdu.edu.cn](mailto:zhangtong2018@mail.sdu.edu.cn).

(编辑 \*\*\*)