

新基建下我国“区块链+用能互联网”工程建设现存难点综述及应对措施

魏之千¹, 华昊辰², 王同贺³, 曹军威⁴

(1. 浙江大学工程师学院, 杭州 310058; 2. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510665; 4. 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

Review of Difficulties in China's "Blockchain+Energy Internet" Project Construction and Corresponding Countermeasures Under the New Infrastructure Construction

WEI Zhiqian¹, HUA Haochen², WANG Tonghe³, CAO Junwei⁴

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510665, China;

4. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Energy-use Internet is the product of the high integration of Internet of consumers and Internet of industries. As a distributed infrastructure and computing paradigm, blockchain technology has the advantages of decentralization, openness, and transparency, and it can support the construction of Internet of energy consumption in the aspects of peer-to-peer transaction, privacy protection, trading market management, demand management and home energy management. With the development of blockchain technology in China, the combination of blockchain and Internet of Energy Use is expected to become the core and focus of China's energy system construction in the next stage. At present, pilot works of "Blockchain + Energy-use Internet" have been gradually launched in China, and their project construction has made phased achievements. However, the large-scale promotion of these projects has encountered the issues of lack of policies, difficult to supervise, and lack of standards. At this time of development, it is necessary to summarize and reflect on the previous work. Therefore, this paper reviews the demonstration projects of

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0140600); 国家自然科学基金资助项目(52107089); 中央高校基本业务费资助项目(B200201071)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFE0140600); the National Natural Science Foundation of China (52107089); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (B200201071) .

"Blockchain + Energy-use Internet" at home and abroad in recent years, analyzes their current situations, and points out the possible defects. This paper then analyzes the difficulties encountered in the large-scale promotion of the existing demonstration projects from the perspectives of policy, supervision, and technical standards. Finally, according to China's national conditions, this paper puts forward relevant suggestions on the construction of "Blockchain + Energy-use Internet" projects in the future. The work of this paper can not only provide reference for the improvement of current pilot works, but also provide reference for future large-scale commercial applications and the formulation of relevant policies and standards.

KEY WORDS : blockchain; Energy-use Internet; demonstration project; energy consumption; energy trading; energy blockchain

摘要: 用能互联网是能源消费互联网和产业互联网高度融合的产物。作为一种分布式的基础架构与计算范式, 区块链技术有着去中心化、公开、透明的优势, 能够支撑用能互联网在点对点交易、隐私保护、交易市场管理、需求侧管理和家庭能量管理等方面的建设。随着区块链技术的发展, 区块链与用能互联网的结合有望成为我国新基建下能源系统建设的核心与重点。目前国内“区块链+用能互联网”相关试点工作已经逐步展开, 工程建设取得了阶段性成就, 但在大规模推广时遇到了困境。值此发展之际, 有必要对以往工作展开总结和反思。区别于已有文献主要针

对区块链在能源交易方面的应用和优势展开综述,本文反其道而行之,将重点放在深层次剖析区块链应用的“缺陷”上,结合实际案例点明了当前相关工作的不足和隐患。需要指出的是,目前相关文献的分析多从技术角度出发,鲜有从政策法规、行业监管、开发标准等其他角度进行研究。因此,本文结合我国国情提出的一系列在“区块链+用能互联网”工程建设上的应对措施和相关建议可以作为该领域研究工作的补充,为未来大规模商业应用及相关政策标准的制定提供借鉴。

关键词： 区块链；用能互联网；示范工程；能源交易；能源消费

0 引言

2016年,由国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部联合出台的《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》进一步推动了能源互联网新技术、新模式和新业态的兴起^{[1]-[2]}。次年,北京延庆能源互联网综合示范区、上海城市综合智慧能源供应服务体系等55个示范工程被列入国家能源局“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目^[3],并于2018年底投入运营,为我国能源互联网产业生态的建设积累了实践经验。近年我国能源互联网相关政策内容也逐步完善。仅在2019年就有304项国家政策(含标准准则)发布,其中部门规章及中央规范性文件多达251项,政策内容覆盖光伏发电、风电、试点示范等

多个领域^[4]。如今,在已有示范工程经验和政策文件的指导下,我国能源互联网的发展已由试点示范逐步迈向多元化、规模化。

然而,作为能源的“产业互联网”,能源互联网的概念对于传统的用能用户来说仍然很陌生,这将难以带动用户参与的积极性。“用能互联网”将能源的“产业互联网”与用户熟悉的“消费互联网”进行高度融合,是用能侧能源生产与消费紧密耦合的产物^[5]。用能互联网以能量元为基础,以高效化、绿色化用能为首要目标,通过互联网、人工智能、区块链等前沿信息技术实现两个区域网络间的信息共享利用^{[7]-[8]},提高用户和电网的互动程度,达到以市场为主导的用能资源优化配置,最终实现生产部门高收益和用户高舒适度的双赢^[9]。

未来,用能互联网所注重的用能侧将逐渐趋于主体多元化、产品多样化、交易透明化、决策分散化,届时也将呈现能量流、信息流与价值流“三流”融合的趋势^[7]。用能互联网所注重的分布式能源交易、碳交易、用能权交易等新兴交易机制也将进一步推进国家“碳中和”战略的实施。目前国内也开展了许多体现用能互联网理念的相关研究,涵盖了其商业模式^{[10]-[11]}、体系设计和交易机制等多个方面^{[12]-[14]}。

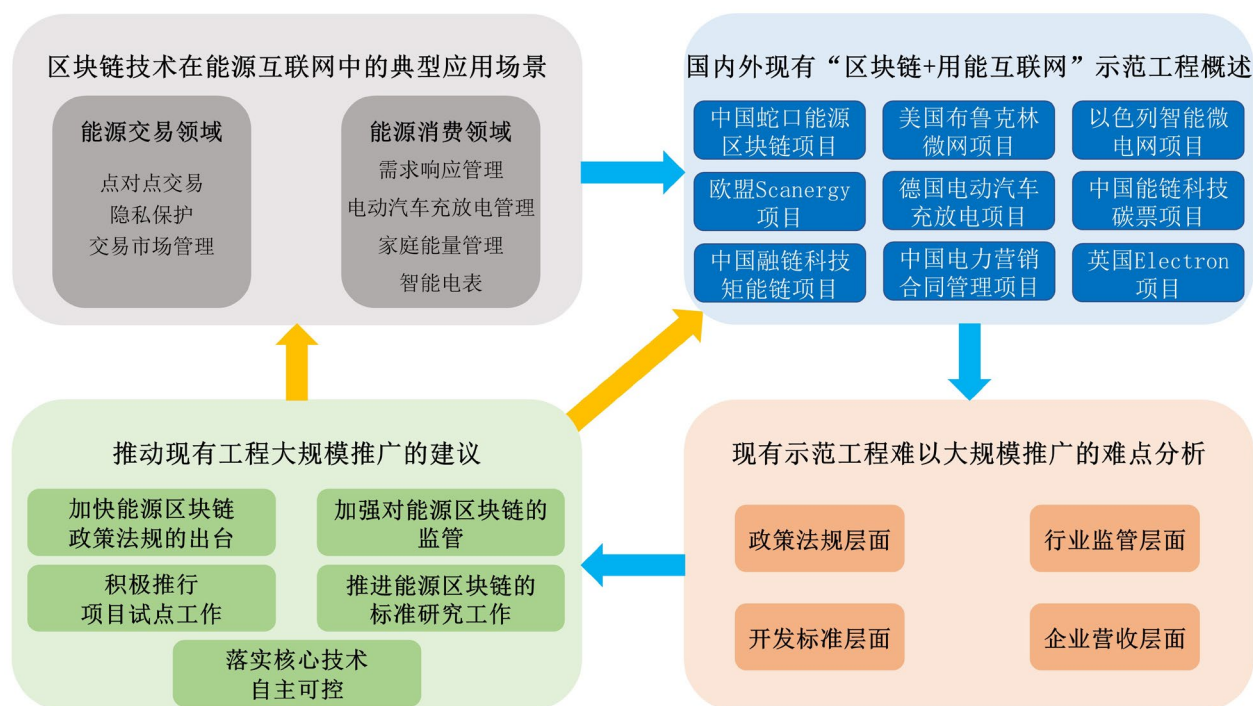


图1 本文架构

Fig. 1 Architecture of this paper

但从技术实现的角度来说，目前用能互联网体系的建设仍有诸多困难。例如，用能互联网所倡导的新兴交易模式和大量分布式能源的接入将使得供给端与负荷之间的互动频率呈指数级增长^[15]，调度端难以及时处理海量数据，这对传统的集中式交易方法来说将是一个严峻的挑战；当前的集中式系统通常需要高昂的建设与维护费用，这将给能源交易过程带来额外的成本，不利于还原能源的商品属性；在数据共享方面，集中式的系统可能出现数据不透明、数据共享难等问题，不利于提高用户的参与度。不仅如此，在系统安全性、通信时延、系统可靠性等方面，现有的集中式调度与交易方法都还难以适应用能互联网场景下的应用需求^{[16]-[17]}。

相较于在用能互联网场景下可能出现计算量庞大、成本高昂、信息泄露等缺陷的集中式交易方法^{[18]-[19]}，分布式方法以其强隐私性、可以容忍部分节点失效的高鲁棒性和低廉的建设与维护成本等优势^[20]，近年来在无功优化^[21]、协同调控^[22]、能源交易^[23]、需求响应^[24]等问题的解决上取得了很好的效果。区块链作为典型的分布式方法之一，目前已经被广泛应用于分布式交易与消费等领域。区块链技术能够很方便地实现点对点交易^[25]，打破能源市场中各个主体间的信任壁垒^[26]，提高交易的透明度，并且能够赋予各个主体平等的话语权，提高各方参与的积极性^[27]。业界普遍认为，区块链在用能互联网体系中的应用能够支持能源系统的开放互联，促进多方用户的广泛参与^[28]，降低系统的建设成本，提高系统的安全性^[29]。

通过共同维护可信任的账本，区块链技术能够实现能源交易中的能量流、信息流和价值流的有效融合^[30]，其在分布式能源交易、能源数据管理、碳排放权认证与绿色证书交易等领域有着广泛的应用前景。目前相关方面的工作已经取得了一定的进展^{[31]-[33]}，例如提高交易系统的灵活性^[34]、降低交易的管理和信任成本^[35]、增强能源供应商和需求侧用户的互动^[36]、设计碳排放权交易机制等^[37]。

然而，现有“区块链+用能互联网”的研究和试点工作距离大规模应用仍有一定的差距，大量技术仍停留在理论层面，缺乏应用经验。究其原因，除了区块链技术本身存在的一些技术缺陷

^[38]，相关政策、标准和法规的缺失等也是不可忽视的因素。随着相关研究日益成熟，现存的政策少、监管难、标准缺等问题带来的后果愈发严重。首先，这些问题限制了新技术的商业化应用，部分应用的合法性得不到保证，新技术难以试点，难以大规模推广，难以积累应用经验，严重制约了新技术的落地发展。其次，监管的缺失使得部分新技术忽略了对用户权益的保证，如用户隐私、交易数据、买卖收益等方面，导致用户对新技术的信任度普遍偏低，用户参与不积极。最后，标准的缺失影响了能源区块链的跨链互联和产业合作，致使新兴的能源区块链市场乱象丛生，降低了公众对新技术的接受度。

在上述背景下，本文首先回顾了近年来“区块链+用能互联网”的研究工作，然后例举了国内外的示范工程项目，并对其优势和缺陷进行了分析；接下来从政策、标准等多角度剖析了我国“区块链+用能互联网”项目大规模应用时的困境；最后结合我国国情，提出了未来开展“区块链+用能互联网”项目建设的相关应对措施，以为未开展的项目提供借鉴。本文的架构如图 1 所示。需要说明的是，虽然区块链技术本身的缺陷也是现有工程难以大规模推广的原因之一，但考虑到已有相关研究做了全面的分析^{[38]-[42]}，因此本文主要是从国家政策、监管体系、行业标准等新角度进行阐述。

本文的主要贡献如下：

1) 本文系统地阐述了区块链技术在点对点交易、碳市场、需求响应管理、电动汽车充放电管理等典型用能场景中的作用，总结分析了区块链技术在解决用能互联网中相关问题的缺陷。区别于已有文献主要针对区块链在能源交易方面的应用和优势展开综述（如，[[[]]]），本文反其道而行之，将重点放在深层次剖析区块链应用的“缺陷”上，结合实际案例点明了当前相关工作的不足和隐患。

2) 目前针对“区块链+用能互联网”工程建设难点分析的文章多从“技术”角度出发，如文献[38]-[42]已有详尽的分析，但鲜有文章从“政策法规”、“行业监管”、“开发标准”等其他角度展开研究。区别于已有工作，本文首次从这些角度深层次剖析了现有示范工程在大规模推广时存在的难点。本文的工作可以作为对已有文献

[38]-[42]的补充研究，对我国现行的试点工作和未来的大规模商业应用有着十分重要的指导意义。

3) 针对目前“区块链+用能互联网”示范工程大规模推广时所遇到的新兴交易模式缺乏法律支撑、优势企业初期缺少政策扶持、对项目参与者的激励程度不够、试点工作规模较小、缺少政策平衡原有产业中各方的利益、能源改革进程缓慢等“政策少”的问题，本文提出了建立完善的分布式电力交易市场、扶持优势企业、激励用户积极参与新的能源交易体系等建议。

4) 针对现有工程的去中心化网络难以设立监管主体、匿名化网络难以认定法律主体、当前法律法规难以裁定部分纠纷和违法行为、区块链上电子数据的归属权难以明确等“监管难”的问题，本文提出了加快监管机制与法律法规的制定，规范化现有平台，推动行业评价体系建设等建议。

5) 针对目前相关标准制定缺乏可参考的成功案例、拟定草案缺乏验证平台、专业人才匮乏、行业标准的出台时机较难把握、能源区块链标准制定的工作量庞大等“标准缺”的问题，本文提出了优选典型应用场景，分步编写能源区块链标准体系等建议。

1 区块链技术在用能互联网中的应用

区块链将数据信息封装成一个个区块，并按顺序将这些区块连接成链表结构。区块链系统同时集成了点对点通信、数字加密、共识、智能合约等信息通信技术。由于区块链所具有的开放、去中心化、扁平化互网络等技术特征，和用能互联网倡导的对等、开放、互联的理念不谋而合，因而区块链与用能互联网的结合有着广阔的应用前景^{[43]-[44]}，其中区块链技术与用能互联网的交易和消费领域相结合是最典型的应用模式。本节仅针对这两部分的研究工作进行综述。

1.1 区块链技术在能源交易领域的应用

新能源交易是区块链技术在用能互联网中应用最多的场景^[45]。风电、光电（太阳能发电）等新能源交易的分布式网络具有准入门槛低^[46]、并发性和不确定性高^[47]、数据量大等特点，需要兼顾公平性、时效性等多个因素。随着新能源交易市场的迅速扩大，在新能源交易的分布式网络中继续采用传统的集中式交易方法会出现信息泄

露、运行成本高、交易过程不透明等问题^[48]。基于区块链技术的交易方法由于安全、便捷、公开透明等优势^{[49]-[50]}，逐渐成为了新能源交易中的热门研究方向。目前区块链技术在交易领域的典型应用场景包括：点对点交易、碳市场交易、交易过程隐私保护等。

点对点交易：如图 2 所示，基于区块链技术的分布式能源交易过程能对交易节点的身份实现脱敏处理，匿名化交易和扁平式互网络为点对点交易和双向互动机制提供了重要保障^[51]。在交易发生时只有生产者和消费者两方参与，无需第三方作为中间商^{[52]-[53]}。目前已有工作使用区块链技术实现了点对点交易模型，以支持各个节点之间的对等能源交易^{[54]-[56]}。这种点对点的交易模式不但降低了交易系统运营的成本，还可以实现利益及时结算、补贴及时发放等功能^[57]，未来能够被应用于微电网内部交易、能源金融、电费结算等场景^[58]。在用户双向互动方面，结合连续双边拍卖等方法^[59]，基于区块链的点对点交易模式在交易效率和双方收益上有着良好的表现。

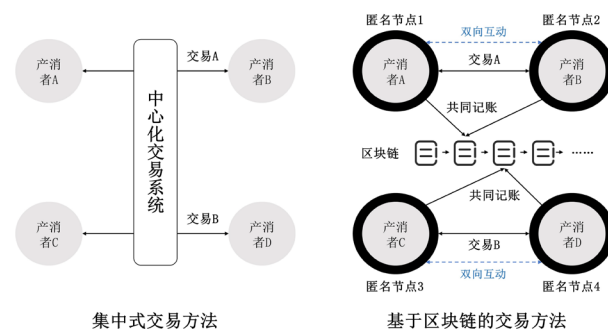


图 2 基于区块链的交易方法(右)和集中式交易方法的对比

Fig. 2 Comparison between blockchain-based trading method (right) and centralized trading method (left)

碳市场：为了扼制全球变暖的趋势，作为高速发展的碳排放大国，我国承诺将在 2060 年前实现碳中和的目标^[60]。为实现这一宏伟愿景，我国近年来大力发展绿色能源与绿色金融，加速关键行业的绿色转型，积极探索可持续的发展道路。用能互联网所提倡的“碳市场”机制作为引导实体企业绿色转型、促进绿色产业发展的重要手段之一，能够有效发挥市场机制在绿色低碳发展中的作用，推动实体企业注重温室气体减排，切实促进技术进步和产业结构升级。

“碳市场”即碳排放权（以下简称碳权）交

易市场，是一种基于市场机制的政策工具，包含碳排放份额分配与清缴、碳权登记、交易、结算、碳排放量报告与核查等多个步骤，旨在缓解由于经济发展而出现的各类环境问题^[61]。目前国内的碳权交易主要建立在中心化运行机制的基础上，碳权配额和交易过程易受中心节点的影响，可能出现配额不透明、定价不公平、交易不安全、互信难度大、交易流程复杂等问题，一定程度上提高了交易的成本，降低了交易效率^[62]。相比较而言，区块链技术能够实现数据的集体监督，具有数据防篡改、易共享和可追溯等特征，在碳权交易中有广泛的应用前景。

在数据采集和碳权分配阶段，结合先进的探测技术和传感器，可以借助区块链的智能合约技术，自动将采集到的各类气体数据直接上链，避免了排放数据作假的可能，为数据溯源、政府进行碳权分配、碳排放量核查等过程提供了可信的历史记录。

在碳权交易阶段，拥有多余碳权的企业可以在区块链上实现登记与认证，以防止信息造假。基于区块链的交易模式使得每笔交易信息都将被写入分布式的账本，由所有节点共同监督，避免了中心化系统可能出现的监守自盗问题。链上所有用户有权查看每笔交易的详细信息，增大了交易的公开性和透明性，改善了碳权价格信息不对称的问题，为碳权交易提供了一个更加透明互信的交易环境。利用智能合约的特性，满足条件的供需双方能够自主、安全地完成碳权交易，省去中心化模式的诸多中间环节，简化交易流程，降低交易所需的时间和额外成本，恢复碳权价格的市场性。区块链的去中心化能够进一步突破交易的区域限制，扩大交易范围，有助于统一碳权价格的形成。交易方将不再受时间和地域的限制，可以获取更多的市场信息，任何交易者都可以根据这些信息，基于自愿原则随时进行交易，最终使得碳权价格在市场机制的调节下趋于合理。

隐私保护：针对集中化交易系统可能出现的隐私保护机制复杂、信息篡改等信息安全问题^[60]，区块链技术本身的匿名化、不可篡改等技术特征在信息安全防护上面有着良好的优势^[64]。现有应用包括以下几种：

- 在交易过程中使用区块链技术实现匿名化协商和安全交易^[65]；

- 在不限制交易功能的前提下使用区块链技术避免隐私泄露^[66]；

- 在微电网中基于区块链建立隐私保护模型以减少用户间的数据共享等^[67]。

和传统的集中式方法相比，此类解决方案有着更好的安全性和隐私性。但由于区块链中记录的交易数据在网络中都是公开的，攻击者仍有可能通过数据挖掘、分析不同账户间的交易关系图谱等方法窃取用户的部分信息^[68]。对于此类攻击，现有工作通过在线验证机制^[69]、基于低密度校验码编解码技术^[70]、一对多的账户匹配机制^[68]等手段实现了对区块链中公开数据的隐藏，保护了用户隐私。

交易管理：得益于区块链中智能合约强制执行的技术优势，基于区块链的交易系统能够集成能源交易、可再生能源认证、信用管理等多种功能^[71]，克服了传统方案中不同部门各自独立处理分管业务导致的低效率问题，有效提高了协同效率，优化了业务流程。也有工作从区块链与微电网市场相似的分布式拓扑结构出发，利用区块链的可信账本，构建去中心化、透明公开、信息对称的市场化交易模型^{[72]-[73]}，并采用策略学习算法^[72]、改进蚁群优化算法^[73]等方法进行求解交易模型，在平衡多微电网中各主体的收益方面取得很好的结果。

1.2 区块链技术在能源消费领域的应用

区块链技术与能源消费领域的融合，能够实现多种能源的泛在交互^[74]以及电网与用户间的友好互动^[75]，提高能源消费领域的智能化水平。目前，区块链技术在消费领域典型的应用场景包括：需求响应管理、电动汽车充放电管理、家庭能量管理和智能电表等。

需求响应管理：随着能源系统的参与者越来越多元化，传统的管理模式和市场机制在需求响应业务的实践过程中存在运行成本高、用户参与不积极、用户与电网互动效果差的问题^[76]。区块链技术的协同自治、智能合约强制执行等特性与需求响应的业务存在的契合点^{[77]-[78]}，近年来受到了诸多学者的关注。例如，将区块链技术应用用于能源局域网储能系统的自动需求响应管理^[79]，能够在满足用能需求的同时协调系统内的可用储能资源，使负荷水平曲线最大程度跟踪新能源出力，改善供需平衡度，降低双边成本。

文献[80]提出的基于区块链的需求响应管理方案能够处理来源不同（如家庭、工业、电动汽车等）的能源交易请求，在保证系统安全的前提下自动做出较优的交易决策。目前也有工作对基于区块链技术的综合需求侧响应资源点对点交易框架做了研究^[81]，提出了未来基于区块链的综合需求响应资源交易体系中的诸多技术问题，为未来的相关研究方向提供了一定的参考。

电动汽车充放电管理：近年电动汽车的发展迈上了高速轨道，但与之相配套的充电基础设施建设却发展缓慢。这种不匹配的发展模式使得电动汽车经常面临“有车无桩”的尴尬处境^[82]。在用户体验方面，不同的充电服务商彼此间难以信任，需要用户在多个平台进行交易和操作，过程繁琐，用户体验差^[83]。充电桩共享虽能缓解上述矛盾，但不同主体间的利益诉求不同，缺乏相互信任，共享技术的实现较为复杂^[84]。

区块链技术的发展为信任问题的解决提供了可行的方案。通过在充电方和电桩拥有者之间建立一个联盟链^{[83][85]}或私链^[86]，利用区块链技术的去中心化和多方共同记账维护账本的特性，可以实现自动记账、多方认可、已记账目不可篡改等功能^[83]，打破双方的信任壁垒，解决不同充电运营商的相互不信任导致的支付方式各异、充电桩稀缺的难题。现有工作已经在隐私保护、交易处理速度等方面达到了实际的需求^[87]。此外，结合智能合约、拍卖机制等技术优势，基于区块链的电动汽车充放电平台能够集成查询、结算、评价等多个功能^{[85][86]}，促进了交易双方的友好互动，在价格、交易电量等方面达成二者共赢的局面。

家庭能量管理：家庭能量管理作为能量管理技术在用户侧的体现，能够满足用户的实时需求，同时也为电网调峰做出贡献^[88]。区块链技术在家庭能量管理中的应用主要有以下两个方向：

- 利用区块链点对点的交易模式，结合物联网技术建立家庭能量管理优化模型，提高能源局域网的整体效益^[89]；
- 利用区块链技术的分布式和不可篡改特性，为家庭能量管理过程中面临的安全和隐私问题提供解决方案^[90]。

智能电表：许多现有工作将区块链技术应用于智能电表的数据计量，通过利用区块链公开、

透明、不可篡改的特性，能够使得计量数据更为可信，减少欺诈和恶意攻击的发生^[91]。也有一些工作将区块链技术应用于智能电表的密钥管理，以提高密钥管理的安全性、存储效率和响应速度^[92]。

上述内容主要是对当前的理论研究进行综述，目前也有部分工作逐步走向了工程实践，本文将在下一节进行综述。

2 国内外基于区块链的用能互联网示范工程概况

作为“区块链+用能互联网”工程建设的先驱，中国蛇口能源区块链项目、欧盟 Scanergy 等项目在世界各地积极展开，为后续我国“区块链+用能互联网”工程的推进提供了典型的参考样例。本节综述了国内外在微电网能源交易、电动汽车充放电交易等领域中已有的示范工程。

2.1 分布式能源交易

1) **蛇口能源区块链项目^[93]：**该项目通过区块链和智能合约技术来实现清洁能源发电方和用电方的点对点交易。用户可以通过网络平台或手机 APP 查询屋顶电站的发电量并进行能源买卖。需要购买电能时，用户可以自由选择清洁能源或传统能源。选择清洁能源的用户能够得到由认证机构出具的电子证书来证明其使用的是清洁能源，以激励用户对清洁能源的使用。基于智能合约的交易平台能很方便地实现点对点自动交易，如图 3 所示。整个项目充分发挥了区块链技术的可追溯和去中心化等特性，对清洁能源的推广具有重要意义。

但目前仅有的电子证书仍然难以激励广大用户积极参与清洁能源的共享。大多数用户只关心电能的安全性、稳定性和价格，对是否清洁并无硬性要求，因此仅有的绿色证书对大多数用户来说并无太大吸引力。电网公司在该项目中的参与程度也比较低，用户难以享受电能质量管理、电能安全管理等更高级的服务。此外，整个项目的实验规模较小，初期只有 100 位用户参与，距离大规模应用仍有一定的距离。

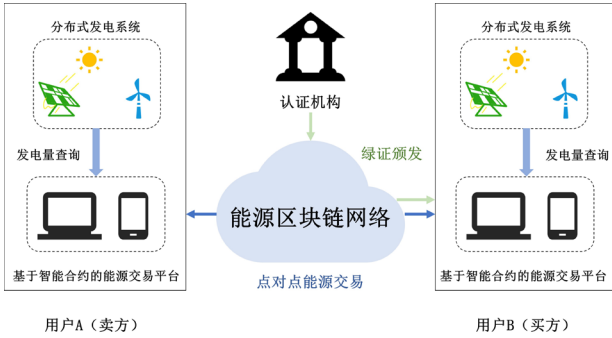


图3 用户A(卖方)和用户B(买方)之间的绿色能源交易模式

Fig. 3 Green energy trading model between user A (seller) and user B (buyer)

2) 美国纽约布鲁克林微网项目^{[94]-[95]}: 该项目在纽约市的布鲁克林社区实现了一个基于区块链的点对点能源交易平台“TransActive”。用户间可以在没有第三方的参与下,通过该平台进行点对点能源交易,并通过拍卖机制确定每千瓦时的电价。用户的发电、用电以及交易等信息都由智能电表进行采集,然后上传至区块链网络平台上,用户可以通过手机APP进行查询和交易等操作。通过该平台,社区用户能够以较低的价格获得清洁能源,多余的电能也能为用户增加收益。

但该项目的实验规模很小,在大规模电网中的性能和可靠性仍需验证。此外,由于纽约市禁止个人间的电力买卖,因此该项目曾一度被叫停。

3) 以色列智能微电网项目^[96]: 以色列现已建成一个基于区块链和人工智能的微电网试点工程。该项目利用区块链难以篡改、去中心化等特点,来实现绿色电力的来源认证、绿色证书的颁发、点对点交易等功能。人工智能算法主要对可再生能源发电、用户用电量等历史数据进行分析 and 预测,从而对能源市场、供能方和用能方之间的用能策略进行优化协调^[97]。该项目有效提高了新能源的利用率,参与各方也能获得良好的经济收益。

但整个项目仍处在起步阶段,功能较为单一,目前只实现了使用人工智能算法进行光伏发电预测和简单的能源交易功能,也并未进行大规模的实地应用。

4) 欧盟 Scanergy 项目^[74]: Scanergy 项目是一个基于以太坊的智能合约通用平台。如图4所示,电能生产者产生的多余绿色能源要首先出售

给配电网,配网运营商确认成功后智能合约会将相应的虚拟代币提供给绿色电能生产方。当购电方期望购买绿色清洁能源时,需使用虚拟代币从配网运营商处购买。虚拟代币也可以在外部市场通过美元或欧元交易,1 kW·h 的绿色电力被规定永久等价于1个虚拟代币。

该项目交易方式便捷,用户激励机制相对完善。电力的价格也被固定,避免了价格波动带来的交易市场混乱问题。但由于该项目涉及多个国家,监管法规统一的难度较大,目前的监管政策尚不明确,导致用户对该项目的可靠性有一定的担忧,阻碍了项目的推广。此外,该平台在安全性、隐私性上也仍有较大的问题。

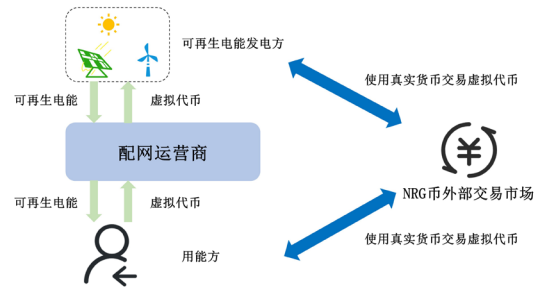


图4 Scanergy 项目示意图

Fig. 4 Illustration of Scanergy project

2.2 电动汽车充放电交易

1) 德国电动汽车 Share&Charge 项目^[98]: 该项目旨在通过区块链技术实现电动汽车充电桩的高效利用,解决电动汽车充电难的问题,促进电动汽车行业的发展。

通过区块链网络和智能合约,私人商业充电桩可以在 Share&Charge 平台上共享出租。如图5所示,充电桩的所有者可以设置充电价格、费率等信息。当电动汽车需要充电时,车主可以通过手机软件搜索附近的共享充电桩,查看电价等信息,然后支付费用并完成充电。整个过程中的所有交易数据都存储在区块链网络中,区块链技术公开透明的特性很好地实现了数据的可信化,消除了双方的信任壁垒。该项目不但有效缓解了电动汽车充电难的问题,而且通过点对点的交易显著降低了能源公司的运营成本。

但该平台的代币只能在 Share&Charge 上使用,流通性较差。此外,相关监管法规的缺失、私人密钥安全维护等政策和技术上的缺陷也阻碍

了该项目的推广。

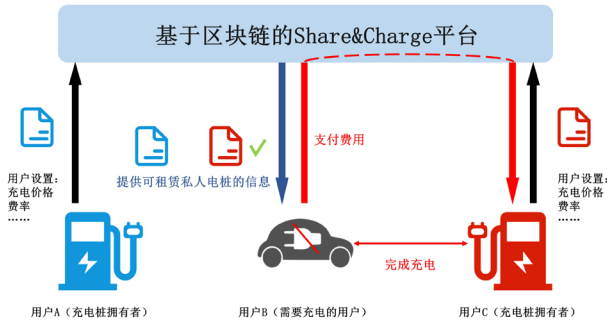


图 5 Share&Charge 平台交易过程

Fig. 5 Trading process on Share&Charge platform

2.3 碳排放权认证与绿色证书交易

1) 能链科技碳票项目^[99]: 该项目旨在对碳资产开发、绿色债券发行、绿色电力登记等服务进行统一的管理, 助力企业高效开发碳资产。

传统的碳资产开发需要业主依次完成项目咨询、项目审定、项目检测等多项流程, 耗时较长。如图 6 所示, 能链科技的碳票项目将业主、监管部门、交易所等机构集成在同一个区块链网络中, 共同维护分布式账本, 促使各个参与方更加无缝地协作, 大幅提高碳资产的开发和管理效率。同时借助区块链技术可追溯、公开透明的特性, 平台中每个节点的数据都有迹可循, 对链内成员透明可见, 从而省去了繁琐的公证过程。该项目将显著缩短当前碳资产 35%~60%的开发时间^[100], 降低 20%~30%的开发成本^[101]。

但由于中国碳市场交易刚刚启动, 区块链行业监管政策也较为严格, 能链科技碳票项目尚未进行大规模推广, 仅仅处于小规模实验阶段。



图 6 能链科技碳票项目示意图

Fig. 6 Illustration of Carbon Ticket Project of Nenglian

2) 融链科技矩能链项目^[102]: 该项目基于区块链的点对点交易和加密技术, 构建了一个集成绿证的生成、认证、转让等操作的新能源交易体

系, 如图 7 所示。通过该平台, 可以为新能源交易系统提供便捷可信的数字资产证书服务, 解决绿证当前面临的企业信任度不强和颁发流程繁琐的问题。新能源转化成了链上登记的资产, 可以进行拆分交易, 极大增强了新能源资产的流动性。绿证价格只受市场调控, 激发了新能源市场交易的活力。

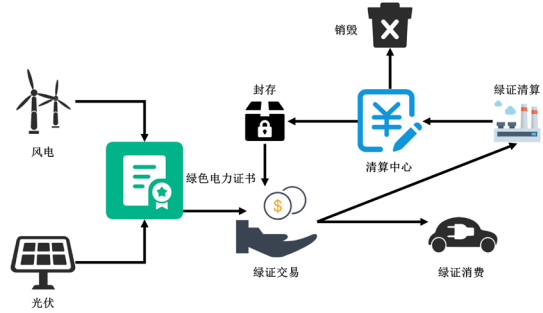


图 7 矩能链项目的绿证交易^[103]

Fig. 7 Green certificate trading in Junengchain Project

2.4 能源交易中的数据管理

1) 浙江电力营销合同管理应用项目^[96]: 在传统的集中化交易方法中, 所有的交易数据都由电网公司一家保存。为了避免该模式可能出现的权力滥用、数据篡改、丢失等问题, 国网浙江电力有限公司与国网信息通信产业集团共同开发了基于区块链的合同管理系统。如图 8 所示, 该系统以区块链技术为基础, 当电子合同签署后, 合同数据不仅会保存在电网公司, 还会同步转发至公证处和司法鉴定机构, 由这些机构为数据的真实性提供担保, 提高了数据的可信性和权威性。区块链技术在该项目中保证了各方存储数据的一致性。但是该项目对区块链的应用场景比较单一, 只涉及合同数据的管理, 暂时还未大规模推广。

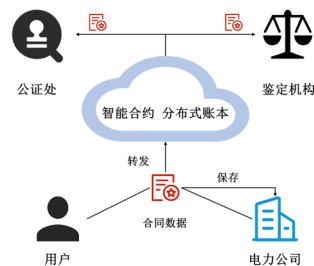


图 8 浙江电力营销合同管理应用项目示意图

Fig. 8 Zhejiang Electric Power marketing contract management application project

2) 英国 Electron 项目^[104]: Electron 平台使用区块链和智能合约技术, 以全自动的方式将能

表 1 现有示范工程总结

Tab. 1 Summary of existing demonstration projects

项目类型	项目名称	优势	缺陷
分布式能源交易	中国蛇口能源区块链项目 ^[93]	实现了点对点能源交易，用户侧操作简单，对清洁能源的推广具有重要意义	对参与用户的激励程度不够；电网公司参与度较小；用户数量较少，距离大规模应用仍有一定距离
	美国纽约布鲁克林微网项目 ^{[94]-[95]}	实现了点对点交易，对参与用户有较好激励机制	缺少政策保证点对点交易的合法性；用户数量较少，在大规模电网中的可靠性和安全性仍有待验证
	以色列智能微电网项目 ^[96]	实现了区块链技术与人工智能的结合，有效提高了新能源的利用率和参与各方的经济收益	目前功能仍较为单一，缺少大规模应用经验
	欧盟 Scanergy 项目 ^[74]	交易模式便捷，对用户的激励制度相对完善；电价固定，有效避免了电价大范围波动带来的电力市场混乱的问题	监管尚不明确；在安全性、用户隐私保护上仍有较大的问题
电动汽车充放电交易	德国 Share&Charge 项目 ^[98]	实现了电动汽车充电桩的高效利用，有效缓解了电动汽车充电难的问题	代币流通性差；监管制度与主体尚不明确；对用户的激励程度有限
碳排放权认证与绿色证书交易	中国能链科技碳票项目 ^[99]	有效缩短了碳资产开发消耗的时间，降低了开发成本	缺少政策保证部分过程的合法性；监管尚不明确；缺少大规模应用经验
能源交易中的数据管理	中国浙江电力营销合同管理应用项目 ^[96]	避免了中心化数据管理可能出现的权力滥用、数据篡改、丢失等问题	应用场景较为单一，缺少大规模应用经验
	英国 Electron 项目 ^[104]	有效提高了能源企业处理交易数据的效率，相比中心化管理系统来说建造成本更低	监管机制和市场规则的不完善，多个参与方合作较为困难

源系统中的交易、消费等信息记录在一个不可篡改的分布式账本里，使得能源企业能够高效地处理水电费管理、消费、能源市场交易中的各类数据。分布式的管理方法有效降低了建造中央控制系统的成本。对用户来说，使用 Electron 平台能够方便地查看个人数据，进行点对点能源交易。以前需要花费十几天才能完成的更换能源服务商的业务，在 Electron 上只需几分钟即可完成。但由于监管机制和市场规则的不完善，参与者想要在 Electron 平台中进行多方合作还较为困难，合作方面缺少需要共同遵守的准则。

2.5 现有项目简要总结

本节主要综述了国内外“区块链+用能互联网”的典型示范工程。为了方便读者阅读，本节在表 1 中总结了上述工程的优缺点。

虽然本文旨在分析我国“区块链+用能互联网”工程建设的现存难点并给出应对措施，但国外的示范项目和现存问题对我国未来“区块链+用能互联网”工程的发展规划仍有很高的借鉴价

值。从表 1 中可以看出，现有国内外工程虽然在点对点交易、电动汽车充电桩共享和碳资产开发等问题的解决上取得了不错的成效，但到目前为止几乎都是试点工作，仍未进行大规模的推广。本文在下一节将对上述问题和其他阻碍现有工程大规模推广的潜在因素进行分析。

3 现有工程大规模推广的难点分析

基于前文对国内外现有“区块链+用能互联网”示范工程的缺陷分析，本节结合我国国情，从政策、监管、标准等多个角度剖析了现有工程在国内大规模推广时遇到的难点。

3.1 政策法规层面

在我国，作为国家发展的重要支柱，能源行业的交易和管理需要政府机构的严格把关。然而到目前为止，我国依然缺少部分和能源区块链有关的政策与法律法规文件^[105]。这主要表现在以下几个方面：

首先，由于基于区块链的能源交易方法和传统的能源供给模式有一定的区别（例如点对点交

易、个人间的能源买卖等），目前国内仍然缺少相关法规保证这些行为的合法性。美国的布鲁克林微网项目就曾因为违反了纽约市禁止个人间电力买卖的规定而一度被叫停^[96]。值得注意的是，我国同样可能在未来的实践过程中出现此类问题。

其次，对于区块链来说，加密货币是一个难以被绕开的主题。作为区块链发明的最初目标，加密货币依赖区块链的去中心化来减少额外的交易费用^[106]。除此之外，区块链技术也可以为基于加密货币的交易提供匿名性和隐私性，因此很多研究和项目都选择使用加密货币（如比特币、以太坊等）作为分布式能源交易和可再生能源投资的媒介^{[107][109]}。

由此可见，各国政府对于加密货币的态度也会影响能源区块链项目的落地使用：

- 我国禁止金融机构和支付服务机构参与比特币等加密货币的交易，并在 2017 年停止了加密货币的融资活动，关闭了加密货币交易平台^[110]；
- 俄罗斯宣布将比特币等加密货币视为与卢布并行的货币加以使用是违法行为；
- 新加坡将比特币当做一种商品，允许买卖和交换；
- 日本于 2017 年取消了比特币交易的消费税，正式承认比特币为合法的支付方式^[111]。

在支持加密货币的市场环境下，能源区块链公司可以通过发行加密货币来融资^{[96][112]}，以促进项目初期的发展。然而，近年来发生的滥用加密货币的违法犯罪行为层出不穷（如 2017 年的 WannaCry 勒索病毒，通过劫持电脑文件索要比特币作为赎金），在世界范围内造成了巨大的经济损失和社会危害^[113]。国内目前仍对加密货币持谨慎态度，相关能源区块链项目的初期的启动可能会遭遇一定的阻力。

最后，能源区块链当前虽然取得了一定的成果，但距离大规模商业应用仍有一定的距离。原因之一在于当前产业中的既得利益者可能不愿参与^[114]，因为区块链的分布式商业模式将减少中间机构的既得利益。当前仍然缺少政策对此进行指引和调控。

3.2 行业监管层面

区块链本身去中心化、开放互联、匿名性等特性可能使得我国能源行业现有的监管模式面临“破窗性”的挑战：

1) 去中心化导致整个区块链交易网络中难以设立明确的监管主体^[115]。去中心化是区块链最重要的特质，是区块链在能源领域的研究和实践中得以广泛应用的主要因素，可以缓解传统中心化能源系统面临的单点错误、中心节点计算量大、系统复杂程度高、透明度低等各种问题^[116]。但是，集体维护数据库的模式使得监管主体不明确，从而导致监管标准难以制定，对网络中欺诈、盗窃等违法行为缺乏强有力约束。

监管的缺失对能源区块链项目会起到消极的影响。德国的 Share&Charge 项目、欧盟的 Scanergy 项目正是由于监管缺失，使得用户对自己在平台中的权益能否被保证产生质疑，导致用户参与不积极。我国如果在未来的大规模推广中缺少有效的监管机制，同样可能出现用户参与不积极的问题。

2) 区块链的匿名性使得相应的法律主体难以认定^[117]。区块链依靠账户地址和密钥来保证账户的匿名性，这种机制将区块链用户与现实世界种的个体分离，极大程度上避免了用户隐私的泄露^[118]。反过来，一旦在区块链应用中出现了问题和漏洞，很难明确责任人和弥补相关损失。例如，对能源区块链交易过程中出现的违规行为，现有技术和监管都难以进行善后工作，出现的损失很可能只能由用户自己承担。

对于当前能源区块链中的主流应用智能合约来说，合同效力的认定也在法律上存在极大的风险点。我国现有的《合同法》已经难以公平、统一地裁定智能合约中出现的种种权益问题^[119]，关于各类纠纷缺乏裁定标准。

3) 区块链的开放性可能会导致监管办法难以落实到真正的违法者身上。区块链本身并无对参与者的审核机制，导致任何人都可以注册账号并参与区块链网络。这种特性一方面鼓励用户积极参与到区块链系统中，保持系统的活力；但另一方面也将区块链数据向所有参与者公开，难免为少数别有用心的人恶意利用。

现有监管办法只能对从事了恶意活动的账号

进行处罚，账号的使用者仍可以继续注册其他账号进出能源区块链交易网络，甚至进行恶意活动，处罚办法难以落实到真正的违法者身上，这给能源区块链网络的监管带来了很大的挑战。

以上所描述的几种冲突也导致我国目前仍然缺少相关的法律法规、监管文件等。交易模式是否违法，违法后怎么处罚都缺少衡量标准。在这种情况下，相关技术的开发、交易模式的制定都缺少明确的指导，不利于能源区块链技术的发展。

3.3 开发标准层面

能源区块链技术虽然只经历了几年的发展，但发展势头极为迅猛。相关标准的缺失不但影响了能源区块链的跨链互联和产业合作，还导致了新兴的能源区块链市场乱象丛生。参考架构和标准的制定有助于统一行业对能源区块链的认识，对能源区块链平台建设、应用开发具有重要的指导意义。

然而我国当前能源区块链标准的制定仍有着如下四点阻力：

1) 目前国内多数能源区块链项目还处于概念或落地初期，各类应用还有待成熟，缺乏大规模应用的成功案例，标准的制定难以找到有用的参考，拟定的草案也缺少验证和实践的平台。

2) 能源区块链涉及共识机制、加密算法、分布式存储与计算、用户隐私保护等多个领域，需要专用芯片、数据库、操作系统等多项硬件设备的支持。目前国内能源区块链的标准化工作刚刚起步，缺少区块链、密码学和能源互联网等相关领域的人才，核心技术攻关进程较为缓慢。

3) 能源区块链行业标准制定的时机也较难把握。现有研究指出^[120]：标准介入过早，可能会使得技术开发者受制于一种长远来看并不是最好的框架中，扼杀了技术发展过程中的创新性；标准出台太晚又可能错过将技术效益最大化的机遇。在我国当前能源区块链技术发展仍不成熟的阶段，标准的出台时间也需要仔细考量。

4) 由于区块链技术在用能互联网中的应用十分广泛，涉及电动汽车、能源交易、需求管理等多个领域，因此很难用一套标准规范所有的项目^[121]。未来需要有针对性为各类应用场景制定标

准，建立能源区块链标准体系，这大大增加了能源区块链标准编写的工作量和难度。

3.4 项目发展层面

将区块链技术引入能源行业，参与者的营利能力将影响其参与的积极程度。对一般个体用户来说，区块链的点对点交易模式使得用户能够出售多余的绿色能源，获取额外的收入，有助于激励用户参与分布式能源交易。但对从事能源区块链开发与维护的企业来说，在去中心化、点对点自组织之后，此类企业靠什么营利则是项目发展的主要问题之一。

目前全球绝大部分的能源区块链企业都是靠发行加密货币融资，并通过加密货币的增值营利。这种模式严重依赖于国家的货币和金融管理政策^[122]，并非一种通用的方法。如果此类企业希望通过区块链的去中心化售电营利，还需要思考合法具体的方案。

4 加快现有工程大规模推广的措施

“区块链+用能互联网”工程的建设是一项复杂的系统工程，涉及政策、经济、社会等多个方面。结合上一节对现有工程在国内大规模推广时的难点分析，本文对未来“区块链+用能互联网”工程建设提出了几项建议性应对措施。

4.1 加快能源区块链政策法规的出台

完善我国能源政策体系，充分发挥能源行业的多元化优势。依托政府机关、行业协会、行业参与者等主体，加快能源区块链激励政策和法律法规的出台。具体应包括如下几个方面：

1) 能源区块链项目的大规模推广需要较为完善的分布式能源交易市场。新出台的政策法规应使得一般个体或者企业都有机会成为售电主体，还原能源的商品属性，完善能源价格形成机制，规范化、合法化个体间的能源买卖，加强能源市场的公平性监管。为基于区块链的点对点电力交易、绿证交易等行为创造政策条件，引导能源区块链向好向上发展。目前国外已有部分能源交易市场的试点项目，例如欧盟的 SunContract^[123]、新加坡的 Senoko^[124]等，可以作为国内试点工作的参考案例。

2) 加大对优势初创企业的扶持力度。受我

国对加密货币的态度影响，当前国内能源区块链初创企业难以复制国外类似企业的发展模式，在项目初期的融资可能较为困难。为了助力我国能源区块链初创企业起步，促进区块链和用能互联网的融合，各地方政府应在充分评估企业社会价值与科研潜力的前提下，给予优势企业一定的扶持，如通过优惠税收、投资奖补、专项资金等方式；鼓励有条件的地区设立区块链产业基金，如杭州雄岸全球区块链创新基金、赣江新区区块链产业发展基金等；搭建资源对接平台，广泛吸引风险投资、产业投资等金融资源，加强对能源区块链企业的落户、业务经营、平台建设等方面的支持力度；鼓励企业积极挖掘能源市场的潜在需求，率先抢占技术高地，解决行业发展的具体问题。

3) 深入推进能源区块链行业的“放管服”改革，加强能源区块链企业的主体地位。加大简政放权的力度，在合法合规的前提下，按照“能简则简、能放则放”的原则审核能源区块链项目；鼓励“区块链+用能互联网”新产业、新项目、新模式的尝试；针对可能的出错，提高对试错的容忍度。目前我国已有多地出台了此类政策，例如2021年上海市人民政府发布的《上海市战略性新兴产业和先导产业发展“十四五”规划》提出要推动区块链在能源领域的示范应用；云南省发展和改革委员会发布的《云南省支持区块链产业发展若干措施实施细则（试行）》对新兴区块链项目给予了多项资金和政策扶持。

在投资方面，应精简能源区块链投资项目的前置许可，优化审核流程，畅通企业融资渠道，加强事前事中事后监管，引导社会资本对能源区块链行业的投资积极性。成立区块链产业联盟，由政府牵头平衡各方利益，出台政策助力原有交易中介转型，适应新一代能源交易体系；建立行业评估体系，加快推动产业改革。

4.2 加强对能源区块链的监管

加快完善我国能源区块链监管框架，尝试法律监管为主、行业自律为辅的结合。对“区块链+用能互联网”工程中的点对点交易、绿证交易、碳资产开发和数据管理等行为进行监管，保障参与各方的合法权益。

法律监管层面，政府机构应积极介入能源区

区块链的交易与管理，完善现有的法律条文，出台具有针对性的监管措施和法律法规。具体应包括如下几个方面：

1) 要明确能源区块链中国各类合法与违法行为，避免法律“灰色地带”的出现，规范化现有工程的交易和资产管理等行为，避免行业乱象的出现。强化政府在能源区块链行业中的带领引导地位，建立事前事中事后监管机制，创新监管模式，从单纯的违规处罚转向合规引导，从传统单一监管工具使用转向行业共治，推进能源区块链治理体系和治理能力现代化。

2) 应从技术层面或政策层面确定能源区块链中责任主体，一定程度上可以弱化区块链的去中心化、匿名性、开放性，在区块链网络中设立监管方，通过技术手段加强账号和现实世界的使用者的关联，保证奖惩措施能够真正执行到责任人身上；落实“以链治链、依法治链”，引导能源区块链技术积极、健康发展。

行业自律方面，根据我国《区块链信息服务管理规定》第4条^[125]，现有政策鼓励区块链行业组织加强行业自律，以建立健全行业自律制度和行业准则，推动行业信用评价体系建设。能源区块链行业也应积极建立相应的行业自律规范协会，促进行业准则和评价体系的建设；同时通过协会加强和政府监管部门的沟通，促使政府监管部门能够实时把握行业现状，避免“不管则乱、一管则死”的困境。

4.3 积极推行“区块链+用能互联网”项目的试点工作

优选典型的应用场景和已有技术，由政府机构提供前期支持，在居民社区、工业园区和商业园区等地积极开展小范围、小规模的能源区块链试点工作，并为优秀项目提供需求对接，帮助其拓宽市场。在积累项目经验、探索相关技术的同时，为政策、标准、法律法规等文件的制定提供经验参考和实践平台，促进行业草案的完善与落地。

持续推动能源行业的数字经济发展，挖掘区块链技术在数字产业化等领域的应用潜力；推进能源区块链技术与其他行业的交流与合作，促进产业对接，鼓励建设不同应用场景的区块链研究中心，拓宽能源区块链的应用范围；加强区块链知识的宣传普及，积极举办各类区块链论坛，引

导公众客观、正确地看待区块链技术，为能源区块链技术的试点工作提供良好环境。

4.4 快速推进能源区块链的标准研究工作

通过试点应用及相关验证，结合国内外较为成功的应用案例，相关政府机构和企业应发挥现有资源优势，以当前的地方标准、团体标准、行业标准为切入点，加强能源区块链标准化研究，推动能源区块链标准体系的建设，分步完成电动汽车、能源交易、绿证交易等领域的标准编写工作，助力国内能源区块链向好、向上发展。同时，我国应积极参与制定能源区块链国际通用标准，提高国家在能源区块链领域内的国际话语权，建立能源区块链的国际基本体系标准，促进国际能源区块链的跨链互联和产业合作。

4.5 落实核心技术自主可控

区块链技术包括共识机制、密码学、隐私保护、智能合约、分布式存储于计算等核心关键技术。相关科研院所应结合我国实际需求，密切跟踪国际区块链的发展动态，加快推进我国能源区块链核心关键技术的攻关及应用，如电网优化控制与管理、分布式能源交易方案设计、绿证及碳交易、资产管理、网络安全、能源监管等方面，以期形成具有自主知识产权的能源区块链成果。同时相关机构应积极参与区块链开源社区的建设，加强对前沿技术的跟踪和掌握，探索发展新方向（如智能硬件^[126]、后量子密码^[127]、差分隐私^[128]等）。此外，能源产业作为国家的战略产业，能源区块链相关技术的自主、可控是必然的要求。目前国内各种区块链底层系统的密码算法仍以国外的为主，未来推行国密系列算法在区块链中的使用可能是大势所趋。

5 总结

现阶段我国“区块链+用能互联网”工程建设虽然取得了一定的进展，但在大规模推广时仍有诸多问题尚未得到明确的解决。为此，本文回顾了近年来国内外典型的示范工程，通过分析研究，总结出了国内“区块链+用能互联网”工程在试点、推广和商业化时存在的几类主要问题：

政策法规层面：1) 新兴交易模式缺乏法律支撑，合法性较难保证；2) 优势企业初期缺少政策扶持，起步较难；3) 对项目参与者的激励程度不够，试点工作规模较小；4) 缺少政策平衡原有产业中各方的利益，能源改革进程缓慢。

监管层面：1) 去中心化的网络中难以设立监管主体，缺乏监管机制；2) 匿名化网络难以认定法律主体、追究法律责任；3) 现有法律法规难以裁定所有纠纷和违法行为；4) 区块链上电子数据的归属权难以明确。

标准层面：1) 标准制定缺乏可参考的成功案例，拟定草案缺乏验证平台；2) 专业人才匮乏；3) 行业标准的出台时机较难把握；4) 能源区块链的应用范围广，标准制定的工作量十分庞大。

基于以上发现，结合我国国情和国外可参考的案例，本文提出如下建议：

- 为了加快“区块链+用能互联网”工程的规模化和商业化应用进程，未来我国应尽快出台政策平衡原有产业各方利益，建立完善的分布式电力交易市场；扶持优势企业，激励用户积极参与新的能源交易体系。
- 相关机构要多进行试点验证工作，加快监管机制与法律法规的制定，规范化现有平台，推动行业评价体系建设，保障参与者的合法权益。
- 政府机构和能源区块链企业要加强能源区块链的标准化研究工作，优选典型应用场景，分步编写能源区块链标准体系。同时积极参与制定能源区块链国际通用标准，提高我国在能源区块链领域内的国际话语权。

参考文献

- [1] 国家能源局：关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. 2016[2020-8-10]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
- [2] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(03): 681-691.
Zeng Ming, Yang Yongqi, Li Yuanfei, et al. The Preliminary Research for Key Operation Mode and Technologies of Electrical Power System With Renewable Energy Sources Under Energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(03): 681-691(in Chinese).
- [3] 国家能源局：首批“互联网+”智慧能源（能源互联网）示范项目评选结果公示[EB/OL]. 2017[2020-8-10]. http://www.nea.gov.cn/2017-03/06/c_136106972.htm.
- [4] 2020 年国家能源互联网发展年度报告[R]. 北京：能源互联网专委会，2020.
- [5] 陈星莺. 用能互联网：城市能源变革的重要载体[J]. 能源评论, 2017, 000(V00): 102-105.
Chen Xingying. Internet of Energy Consumption: an important

- carrier of urban energy reform[J]. *Energy Review*, 2017, 000(V00): 102-105 (in Chinese).
- [6] 张粒子, 何勇健, 凡鹏飞, 等. 我国能源市场体系建设的目标框架与路径模式[J]. *价格理论与实践*, 2011(7): 33-35.
Zhang Lizi, He Yongjian, Fan Pengfei, et al. Target framework and path model of China's energy market system construction[J]. *Price: Theory & Practice*, 2011(7): 33-35 (in Chinese).
- [7] Hua H, Hao C, Qin Y. Internet thinking for layered energy infrastructure[M], in: Zobia A, Cao J (eds), *Energy Internet: Systems and Applications*, Springer Nature Switzerland AG, 2020: 421-437.
- [8] Cao J, Hua H, Ren G. Energy use and the Internet[M], *The SAGE Encyclopedia of the Internet*. Newbury Park, CA, USA: Sage, 2018: 344-350.
- [9] 蔡金棋, 李淑贤, 樊冰, 等. 能源互联网中基于区块链的能源交易[J]. *电力建设*, 2017, 38(09): 24-31.
Cai Jinqi, Li Shuxian, Fan Bing, et al. Blockchain Based Energy Trading in Energy Internet[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(09): 24-31(in Chinese).
- [10] 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)[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3050-3056.
Chen Qixin, Liu Dunnan, Lin Jin, et al. Business Models and Market Mechanisms of Energy Internet (1) [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [11] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3057-3063.
Liu Dunnan, Zeng Ming, Huang Renle, et al. Business Models and Market Mechanisms of E-Net(2) [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3057-3063(in Chinese).
- [12] 刘凡, 别朝红, 刘诗雨, 等. 能源互联网市场体系设计、交易机制和关键问题[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 108-117.
Liu Fan, Bie Zhaohong, Liu Shiyu, et al. Framework Design, Transaction Mechanism and Key Issues of Energy Internet Market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 108-117(in Chinese).
- [13] 曾鸣, 张晓春, 王丽华. 以能源互联网思维推动能源供给侧改革[J]. *电力建设*, 2016, 37(04): 10-15.
Zeng Ming, Zhang Xiaochun, Wang Lihua. Energy Supply Side Reform Promoting Based on Energy Internet Thinking[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(04): 10-15(in Chinese).
- [14] 向恩民, 高红均, 刘畅, 等. 基于供需双侧博弈互动的园区多能运营商能源交易优化决策[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-13[2020-10-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191954>.
Xiang Enmin, Gao Hongjun, Liu Chang, et al. Optimal Decision of Energy Trading for Community Multi-energy Operator Based on Game Interaction with Supply and Demand Sides[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-13[2020-10-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191954>(in Chinese).
- [15] 李庆生, 唐学用, 赵庆明, 等. 弱中心化的区块链技术在能源互联网交易体系中的应用分析[J]. *电力大数据*, 2019, 22(06): 22-27.
Li Qingsheng, Tang Xueyong, Zhao Qingming, et al. Analysis of applying weak — centralized blockchain technology in energy trading system of energy internet[J]. *Power Systems and Big Data*, 2019, 22(06): 22-27(in Chinese).
- [16] 张彦, 张涛, 孟繁霖, 等. 基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度研究[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-17[2020-10-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162133>.
Zhang Yan, Zhang Tao, Meng Fanlin, et al. Model Predictive Control Based Distributed Optimization and Scheduling Approach for the Energy Internet[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-17[2020-10-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162133>(in Chinese).
- [17] Tushar W, Saha T K, Yuen C. Peer-to-Peer Energy Trading With Sustainable User Participation: A Game Theoretic Approach[J]. *Access IEEE*, 2018, 6: 62932-62943.
- [18] Yazdanian M, Mehrizi-Sani A. Distributed Control Techniques in Microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(6): 2901-2909.
- [19] Zhang H, Li Y, Gao D W Z, et al. Distributed Optimal Energy Management for Energy Internet[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3081-3097.
- [20] Ye M, Wen G, Xu S, Lewis F. Global Social Cost Minimization with Possibly Nonconvex Objective Functions: An Extremum Seeking-based Approach[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2020, DOI: 10.1109/TSMC.2020.2968959.
- [21] Zhang W, Liu W, Wang X, et al. Distributed Multiple Agent System Based Online Optimal Reactive Power Control for Smart Grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(5): 2421-2431.
- [22] 殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. *电网技术*, 2018, 42(05): 1359-1369.
Yin Shuangrui, Ai Qian, Zeng Shunqi, et al. Challenges and Prospects of Multi-Energy Distributed Optimization for Energy Internet[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(05): 1359-1369(in Chinese).
- [23] Li M, Hu D, Lal C, et al. Blockchain-Enabled Secure Energy Trading With Verifiable Fairness in Industrial Internet of Things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(10): 6564-6574.
- [24] Mosaddegh A, Cañizares C A, Bhattacharya K, et al. Distributed Computing Architecture for Optimal Control of Distribution Feeders With Smart Loads[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(3): 1469-1478.
- [25] 颜拥, 赵俊华, 文福拴, 等. 能源系统中的区块链:概念、应用与展望[J]. *电力建设*, 2017, 38(02): 12-20.

- Yan Yong, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Blockchain in Energy Systems: Concept, Application and Prospect[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(02): 12-20(in Chinese).
- [26] 喻小宝, 郑丹丹. 区块链技术在能源电力领域的应用及展望[J]. 华电技术, 2020, 42(08): 17-23.
- Yu Xiaobao, Zheng Dandan. Application and exploration of blockchain technology in energy and electricity[J]. Huadian Technology, 2020, 42(08): 17-23(in Chinese).
- [27] 沈翔宇, 陈思捷, 严正, 等. 区块链在能源领域的价值、应用场景与适用性分析[J/OL]. 电力系统自动化: 1-12[2020-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200910.1709.005.html>.
- Shen Xiangyu, Chen Sijie, Yan Zheng, et al. Analysis on Value, Application Scenarios and Applicability of Blockchain in Energy Field[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-12[2020-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200910.1709.005.html>(in Chinese).
- [28] 宁晓静, 张毅, 林湘宁, 等. 基于物理-信息-价值的能源区块链分析[J]. 电网技术, 2018, 42(07): 2312-2323.
- Ning Xiaojing, Zhang Yi, Lin Xiangning, et al. Energy Blockchain System Based on Integrated Physical-Cyber-Value Perspectives[J]. Power System Technology, 2018, 42(07): 2312-2323(in Chinese).
- [29] 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.
- Cui Jindong, Wang Shengwen, Xin Yechun. Research on Technical Framework of Smart Grid Data Management From Consortium Blockchain Perspective[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(03): 836-848(in Chinese).
- [30] 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.
- Ding Wei, Wang Guocheng, Xu Aidong, et al. Research on Key Technologies and Information Security Issues of Energy Blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(04): 1026-1034+1279(in Chinese).
- [31] Hassija V, Chamola V, Garg S, et al. A Blockchain -Based Framework for Lightweight Data Sharing and Energy Trading in V2G Network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 47047-47062.
- [32] Wang T, Guo J, Ai S, et al. RBT: A distributed reputation system for blockchain-based peer-to-peer energy trading with fairness consideration[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117056.
- [33] Liu C, Chai K K, Zhang X, et al. Adaptive Blockchain-Based Electric Vehicle Participation Scheme in Smart Grid Platform[J]. IEEE Access, 2018, 6: 25657-25665.
- [34] 王丹, 苏朋飞, 桂勋, 等. 售电侧市场开放环境下微网端对端电能交易关键技术综述及展望! [J]. 电力建设, 2019, 40(01): 112-122.
- Wang Dan, Su Pengfei, Gui Xun, et al. Overview and Prospect of Key Technologies of Peer-to-Peer Energy Trading in Micro-Grid Under Power-Sales-Side Market Liberalization! [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(01): 112-122(in Chinese).
- [35] 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.
- Zhang Ning, Wang Yi, Kang Chongqing, et al. Blockchain Technique in the Energy Internet: Preliminary Research Framework and Typical Applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023(in Chinese).
- [36] 沈巍, 王丹. 基于区块链的分布式能源市场化交易架构及应用机制[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2019(02): 28-38.
- Shen Wei, Wang Dan. Distributed Energy Market Trading Architecture and Application Mechanism Based on Blockchain[J]. Journal of North China Electric Power University(Social Sciences), 2019(02): 28-38(in Chinese).
- [37] 吉斌, 昌力, 陈振寰, 等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易应用与市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210209.1701.010.html>.
- Ji Bin, Chang Li, Chen Zhenhuan, et al. Blockchain Technology Based Design and Application of Market Mechanism for Power Carbon Emission Allowance Trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210209.1701.010.html> (in Chinese).
- [38] 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, 43(14): 53-64.
- Wang Beibei, Li Yachao, Zhao Shengnan, et al. Key Technologies on Blockchain Based Distributed Energy Transaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64(in Chinese).
- [39] Di M L, Gallo S P, Ippolito M G, et al. A Technical Approach to the Energy Blockchain in Microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 4792-4803.
- [40] Monrat A A, Schelén O, Andersson K. A Survey of Blockchain From the Perspectives of Applications, Challenges, and Opportunities[J]. IEEE Access, 2019, 7: 117134-117151.
- [41] Ferrag M A, Derdour M, Mukherjee M, et al. Blockchain Technologies for the Internet of Things: Research Issues and Challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 6(2): 2188-2204.
- [42] 斯雪明, 徐蜜雪, 苑超. 区块链安全研究综述[J]. 密码学报, 2018, 5(05): 458-469.
- Si Xueming, Xu Mixue, Yuan Chao. Survey on Security of Blockchain[J]. Journal of Cryptologic Research, 2018, 5(05): 458-469(in Chinese).
- [43] 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).
- [44] Khalid R, Javaid N, Almogren A, et al. A Blockchain -Based Load Balancing in Decentralized Hybrid P2P Energy Trading Market in Smart Grid[J]. IEEE Access, 8: 47047-47062.
- [45] 谢开, 张显, 张圣楠, 等. 区块链技术在电力交易中的应用与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 19-28.
Xie Kai, Zhang Xian, Zhang Shengnan, et al. Application and Prospect of Blockchain Technology in Electricity Trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 19-28(in Chinese).
- [46] 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+7487.
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+7487(in Chinese).
- [47] Hua H, Qin Y, Hao C, et al. Optimal energy management strategies for energy Internet via deep reinforcement learning approach[J]. Applied Energy, 239: 598-609.
- [48] 徐嘉辉, 马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(08): 17-22+30.
Xu Jiahui, Ma Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(08): 17-22+30(in Chinese).
- [49] 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+7129.
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+7129(in Chinese).
- [50] 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.
Wang Dewen, Liu Zhiqian. Regional Energy Transaction Model and Experimental Test Based on Smart Contract[J]. Power System Technology, 2019, 43(06): 2010-2019(in Chinese).
- [51] 王云泽, 王秋瑾, 马欣欣. 基于区块链技术的能源互联网交易方案设计[J]. 华电技术, 2020, 42(08): 83-89.
Wang Yunze, Wang Qiujin, Ma Xinxin. Design of energy internet trading system based on blockchain technology[J]. Huadian Technology, 2020, 42(08): 83-89(in Chinese).
- [52] 王胜寒, 郭创新, 冯斌, 等. 区块链技术在电力系统中的应用: 前景与思路[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 10-24.
Wang Shenghan, Guo Chuangxin, Feng Bin, et al. Application of Blockchain Technology in Power Systems: Prospects and Ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 10-24(in Chinese).
- [53] 何永远, 庞进. 区块链技术在电力行业的应用展望[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(03): 39-42.
He Yongyuan, Pang Jin. Application Prospect of Block Chain Technology in Electric Power Industry[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(03): 39-42(in Chinese).
- [54] 穆程刚, 丁涛, 董江彬, 等. 基于私有区块链的去中心化点对点多能源交易系统研制[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2020-10-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200392>.
Mu Chenggang, Ding Tao, Dong Jiangbin, et al. Development of Decentralized Peer-to-Peer Multi-Energy Trading System Based on Private Blockchain Technology[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2020-10-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200392>(in Chinese).
- [55] Wang S, Taha A F, Wang J, et al. Energy Crowdsourcing and Peer-to-Peer Energy Trading in Blockchain-Enabled Smart Grids[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(8): 1612-1623.
- [56] 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(05): 1278-1290.
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(05): 1278-1290(in Chinese).
- [57] 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.
Li Bin, Qin Qiuyue, Qi Bing, et al. Design of Distributed Energy Trading Scheme Based on Blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(03): 961-972(in Chinese).
- [58] 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.
Yang Dechang, Zhao Xiaoyu, Xu Zixiao, et al. Developing Status and Prospect Analysis of Blockchain in Energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3664-3671(in Chinese).
- [59] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072-5084+5304.
Wang Jian, Zhou Niancheng, Wang Qianggang, et al. Electricity Direct Transaction Mode and Strategy in Microgrid Based on Blockchain and Continuous Double Auction Mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5072-5084+5304(in Chinese).
- [60] 杨长进, 田永, 许鲜. 实现碳达峰、碳中和的价税机制进路[J]. 价格理论与实践, 2021, 01: 20-26.
Yang Changjin, Tian Yong, Xu Xian. The path of price and tax mechanism to achieve carbon peak and carbon neutrality[J]. Price:Theory & Practice, 2021, 01:20-26

- [61] 陈志斌, 孙峥. 中国碳排放权交易市场发展历程——从试点到全国[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(02): 28-36.
Chen Zhibin, Sun Zheng. Development history of carbon emission rights trading market in China: from pilots to national[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(02): 28-36.
- [62] 吉斌, 刘妍, 朱丽叶, 等. 基于联盟区块链的电力碳权交易机制设计[J]. 华电技术, 2020, 42(08): 32-40.
Ji Bin, Liu Yan, Zhu liye, et al. Design of carbon emission permit trading mechanism in power industry based on consortium blockchain[J]. Huadian Technology, 2020, 42(08): 32-40.
- [63] 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.
Lv Linjie, Li Gang, Hu Jingya, et al. Research on Support Environment of User Side Peer-to-Peer Transaction in Energy Block Chain[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(05): 38-47(in Chinese).
- [64] 何蒲, 于戈, 张岩峰, 等. 区块链技术与应用前瞻综述[J]. 计算机科学, 2017, 44(04): 1-7+15.
He Pu, Yu Ge, Zhang Yanfeng, et al. Survey on Blockchain Technology and Its Application Prospect[J]. Computer Science, 2017, 44(04): 1-7+15(in Chinese).
- [65] Aitzhan N Z, 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, 2018, 15(05): 840-852.
- [66] Gai K, Wu Y, Zhu L, et al. Permissioned Blockchain and Edge Computing Empowered Privacy-Preserving Smart Grid Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(05): 7992-8004.
- [67] Albaker A, Majzoob A, Zhao G S, et al. Privacy-preserving optimal scheduling of integrated microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163(Part A): 164-173.
- [68] 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.
Long Yangyang, Chen Yuling, Xin Yang, et al. Secure energy transaction scheme based on alliance blockchain[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(06): 1668-1673(in Chinese).
- [69] Li D, Yang Q, An D, et al. On location privacy-preserving online double auction for electric vehicles in microgrids[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 5902-5915.
- [70] 明阳阳, 曹军威. 基于 LDPC 的能源互联网数据隐私保护研究[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(11): 16-21.
Ming Yangyang, Cao Junwei. Research on Data Privacy Protection in Energy Internet Based on LDPC [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2017, 15(11): 16-21(in Chinese).
- [71] 沈泽宇, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的分布式能源交易技术[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2020-10-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200060>.
Shen Zeyu, Chen Sijie, Yan Zheng, et al. Distributed Energy Trading Technology Based on Blockchain[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2020-10-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200060>(in Chinese).
- [72] 周步祥, 杨明通, 史述青, 等. 基于区块链的微电网市场博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(07): 15-26.
Zhou Buxiang, Yang Mingtong, Shi Shuqing, et al. Blockchain Based Potential Game Model of Microgrid Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(07): 15-26(in Chinese).
- [73] 马天男, 彭丽霖, 杜英, 等. 区块链技术下局域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.
Ma Tiannan, Peng Lilin, Du Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(05): 191-203(in Chinese).
- [74] 谢敬东, 陆池鑫, 孙欣, 等. 区块链技术在能源与电力系统领域的应用和展望[J/OL]. 电测与仪表: 1-12[2020-08-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200706.1606.008.html>.
Xie Jingdong, Lu Chixin, Sun Xin, et al. Blockchain for energy and power systems: state of the art and prospects[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-12[2020-08-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200706.1606.008.html>(in Chinese).
- [75] 陈冠廷, 张利, 刘宁宁, 等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(08): 9-17.
Chen Guanting, Zhang Li, Liu Ningning, et al. Blockchain-based transaction mechanism for residential users demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(08): 9-17(in Chinese).
- [76] 宫飞翔, 田世明, 李德智, 等. 基于区块链的需求响应系统设计[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(06): 82-88.
Gong Feixiang, Tian Shiming, Li Dezhi, et al. Design of Demand Response System Based on Blockchain[J]. Design of Demand Response System Based on Blockchain, 2020, 18(06): 82-88(in Chinese).
- [77] 李彬, 魏吟斌, 侯萌, 等. 支撑综合能源广义需求响应的区块链技术研究[J]. 供用电, 2020, 37(07): 18-23.
Li Bin, Wei Yinwu, Hou Meng, et al. Research on Blockchain Technology Supporting Generalized Energy Demand Response[J]. Distribution&Utilization, 2020, 37(7): 18-23(in Chinese).
- [78] Silvestre M L D, Gallo P, Sanseverino E R, et al. Aggregation and Remuneration in Demand Response With a Blockchain-Based Framework[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(04): 4248-4257.

- [79] 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[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3703-3716.
Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Lu Junjie, et al. Blockchain-based Automated Demand Response Method for Energy Storage System in an Energy Local Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3703-3716(in Chinese).
- [80] Jindal A, Auja G S, Kumar N, et al. GUARDIA-N: Blockchain-Based Secure Demand Response Management in Smart Grid System[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2020, 13(04): 613-624.
- [81] 武庚, 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[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3717-3728.
Wu Geng, Zeng Bo, Li Ran, et al. Research on the Application of Blockchain in the Integrated Demand Response Resource Transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728(in Chinese).
- [82] 齐林海, 李雪, 祁兵, 等. 基于区块链生态系统的充电桩共享经济模式[J]. 电力建设, 2017, 38(09): 1-7.
Qi Linhai, Li Xue, Qi Bing, et al. Shared Economy Model of Charging Pile Based on Block Chain Ecosystem[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(09): 1-7(in Chinese).
- [83] 张富宝, 李国, 王滔滔. 基于区块链技术的电动汽车充电链[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(04): 161-166.
Zhang Fubao, Li Guo, Wang Taotao. Electric Vehicle Charging Chain Based on Blockchain Technology[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(04): 161-166(in Chinese).
- [84] 王浩然, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的电动汽车充电站充权交易: 机制、模型和方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(02): 425-436.
Wang Haoran, Chen Sijie, Yan Zheng, et al. Blockchain-enabled Charging Right Trading Among EV Charging Stations: Mechanism, Model, and Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(02): 425-436(in Chinese).
- [85] 金志刚, 吴若茜, 李根, 等. 基于联盟区块链的电动汽车充电交易模型[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4362-4370.
Jin Zhigang, Wu Ruoqian, Li Gen, et al. Transaction Model for Electric Vehicle Charging Based on Consortium Blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4362-4370(in Chinese).
- [86] Liu H, Zhang Y, Zheng S, et al. Electric Vehicle Power Trading Mechanism Based on Blockchain and Smart Contract in V2G Network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 160546-160558.
- [87] 张哲宁, 张心语, 龚钢军. 基于区块链的电动汽车电能现货交易研究[J]. 控制与信息技术, 2019(06):63-66+70.
Zhang Zhening, Zhang Xinyu, Gong Gangjun. Research on Electric Spot Trading of Electric Vehicles Based on Block Chain[J]. Control and Information Technology, 2019(06):63-66+70(in Chinese).
- [88] 傅质馨, 李满逸, 朱俊澎, 等. 基于马尔科夫决策过程的家庭能量管理智能优化策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(07): 141-152.
Fu Zhixin, Li Xiaoyi, Zhu Junpeng, et al. Intelligent optimization strategy of home energy management based on Markov decision process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(07): 141-152(in Chinese).
- [89] Park L W, Lee S, Chang H A. Sustainable home energy prosumer-chain methodology with energy tags over the blockchain[J]. Sustainability, 2018, 10(3): 658.
- [90] Zhou Y, Han M, Liu L, et al. Improving IoT services in smart-home using blockchain smart contract[C]. 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), Halifax, NS, Canada, 2018.
- [91] Wang G, Shi Z J, Nixon M, et al. SMChain: A scalable block-chain protocol for secure metering systems in distributed industrial plants[C]. Proceedings of the International Conference on Internet of Things Design and Implementation, New York, the United States, 2019.
- [92] 翟峰, 杨挺, 曹永峰, 等. 基于区块链与 K-means 算法的智能电表密钥管理方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(08): 38-46.
Zhai Feng, Yang Ting, Cao Yongfeng, et al. Key management method of smart meter based on blockchain and K-means algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(08): 38-46(in Chinese).
- [93] 蛇口能源区块链项目落地, 定点向社区提供清洁能源[J]. 宁波化工, 2018(01): 49.
Shekou energy blockchain project was launched to provide clean energy to the community[J]. Ningbo Chemical Industry, 2018(01): 49 (in Chinese).
- [94] Zia M F, Benbouzid M, Elbouchikhi E, et al. Microgrid Transactive Energy: Review, Architectures, Distributed Ledger Technologies, and Market Analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8: 19410 - 19432.
- [95] 张子立, 张晋宾, 李云波. 国际能源区块链典型项目应用及分析[J]. 华电技术, 2020, 42(08): 75-82.
Zhang Zili, Zhang Jinbin, Li Yunbo. Application and analysis of blockchain applied in typical global energy projects[J]. Huadian Technology, 2020, 42(08): 75-82(in Chinese).
- [96] 赵曰浩, 彭克, 徐丙垠, 等. 能源区块链应用工程现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(07): 14-24+58.
Zhao Yuehao, Peng Ke, Xu Bingyin, et al. Status and Prospect of Pilot Project of Energy Blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(07): 14-24+58(in Chinese).
- [97] 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.
Xiao Zeqing, Hua Haochen, Cao Junwei. Overview of the

- Application of Artificial Intelligence in Energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(05): 63-70(in Chinese).
- [98] Share&Charge[EB/OL]. [2020-09-05]. <http://shareandcharge.com>.
- [99] 能连科技：能链科技与 IBM 使用区块链技术助力低碳未来[EB/OL]. 2016[2020-09-07]. <https://www.nenglian.com/insight/2055.html>.
- [100] 金色财经：能源区块链实验室利用区块链技术发行数字资产碳票[EB/OL]. 2017[2020-09-07]. https://www.jinse.com/news/blockchain_business_news/86717.html.
- [101] 金色财经：能源区块链：让曙光照进全球能源互联网(二)[EB/OL]. 2018[2020-09-07]. <https://www.jinse.com/blockchain/205496.html>.
- [102] 融链科技：矩能链[EB/OL]. [2020-09-15]. <https://www.mixislink.com/mixislink.html>.
- [103] 融链科技：北京融链科技有限公司矩能链白皮书(V1.0)[EB/OL]. [2020-09-15]. <https://junchain.com/#/whitePaper>.
- [104] 金色财经：Electron 首席运营官介绍区块链能源应用[EB/OL]. 2017[2020-09-21]. <https://www.jinse.com/news/blockchain/59610.html>.
- [105] 王娜. 国内外能源区块链政策的实践与启示[J]. 上海节能, 2020(06): 506-513.
Wang Na. Policy Practice and Enlightenment of Energy Blockchain at Home and Abroad[J]. Shanghai Energy Conservation, 2020(06): 506-513(in Chinese).
- [106] Shanmugam B, Azam S, Yeo K C, et al. A critical review of Bitcoins usage by cybercriminals[C]. 2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). 2017.
- [107] Gurmani M U, Sultana T, Ghaffar A, et al. Energy trading between prosumer and consumer in p2p network using blockchain[C]. International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, 2019.
- [108] The ECO coin [EB/OL]. [2021-08-17]. https://uploads-ssl.webflow.com/5c1b58255c613376879c2558/5c4970105b4d237571564f43_ECOcoin_white_paper_v1.0.pdf
- [109] ImpactPPA [EB/OL]. 2018[2021-08-17]. https://www.impactppa.com/wp-content/uploads/2018/03/ImpactPPA_WP_v1.2WEB.pdf.
- [110] 漆彤, 卓峻帆. 加密货币的法律属性与监管框架——以比较研究为视角[J]. 财经法学, 2019(04): 126-141.
Qi Tong, Zhuo Junfan. Legal Attribute and Regulatory Framework of Cryptocurrency in Comparative Perspective[J]. Law and Economy, 2019(04): 126-141(in Chinese).
- [111] 孙梦龙. 针对中外区块链加密货币法律监管的比较分析[J]. 学理论, 2020(07): 75-76.
Sun Menglong. Comparative analysis on legal supervision of blockchain cryptocurrency between China and foreign country[J]. Theory Research, 2020(07): 75-76 (in Chinese).
- [112] 链门户：太阳能光伏产业利用区块链技术发行 Solar-Coin 加密货币来融资[EB/OL]. 2020[2020-09-17]. <http://www.lianmenhu.com/blockchain-18348-1>.
- [113] Reynolds M. Ransomware attack hits 200,000 computers across the globe [EB/OL]. 2017[2021-08-17]. <https://www.newscientist.com/article/2130983-ransomwareattacks-hits-200000-computers-across-the-globe/>.
- [114] 刘哲, 郑子彬, 宋苏, 等. 区块链存在的问题与对策建议[J]. 中国科学基金, 2020, 34(01): 7-11.
Liu Zhe, Zheng Zibin, Song Su, et al. Problems in Blockchain and Suggestions for Counterplan[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(01): 7-11(in Chinese).
- [115] 朱婉菁. 区块链作为治理机制的内在逻辑、风险挑战与政策回应[J]. 探索, 2020(04): 76-87.
Zhu Wanjing. Blockchain as A Governance Mechanism: Internal Logic, Risk Challenge and Policy Response[J]. Probe, 2020(04): 76-87(in Chinese).
- [116] Hua H, Wei Z, Qin Y, et al. Review of distributed control and optimization in energy internet: From traditional methods to artificial intelligence - based methods[J]. IET Cyber-Physical Systems Theory & Applications, 2021(6): 1-17.
- [117] 赵磊, 石佳. 依法治链：区块链的技术应用与法律监管[J]. 法律适用, 2020(03): 33-49.
Zhao Lei, Shi Jia. Managing Blockchain According to Law: Technology Application and Legal Supervision of Blockchain[J]. Journal of Law Application, 2020(03): 33-49(in Chinese).
- [118] Béres F, Seres I A, Benczúr A A, et al. Blockchain is Watching You: Profiling and Deanonimizing Ethereum Users[J]. arXiv e-prints, 2020.
- [119] 周润, 卢迎. 智能合约对我国合同制度的影响与对策[J]. 南方金融, 2018(05): 93-98.
Zhou Run, Lu Ying. The Influence and Countermeasures of Smart Contract on China's Contract System[J]. South China Finance, 2018(05): 93-98(in Chinese).
- [120] Rand: Understanding the landscape of Distributed Ledger Technologies/Blockchain: Challenges, opportunities, and the prospects for standards[EB/OL]. 2017[2020-09-20]. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2223.html.
- [121] 刘永相. 能源区块链：标准要先行[J]. 能源评论, 2020(1): 42-45.
Liu Yongxiang. Energy blockchain: standards should go ahead[J]. Energy Reviews, 2020(1): 42-45 (in Chinese).
- [122] 张庆立. 区块链应用的不法风险与刑事法应对[J]. 东方法学, 2019(03): 72-86.
Zhang Qingli. Illegal Risk of Blockchain Application and Criminal Law Response[J]. Oriental Law, 2019(03): 72-86(in Chinese).

- [123] SunContract Whitepaper [EB/OL]. 2017[2021-08-18].
<https://suncontract.org/wp-content/uploads/2020/12/whitepaper.pdf>
- [124] About Senoko Energy [EB/OL]. [2021-08-18].
<https://www.senokoenergy.com/about-us>.
- [125] 中华人民共和国国家互联网信息办公室：区块链信息服务管理规定 [EB/OL]. 2019[2020-09-27]. http://www.cac.gov.cn/2019-01/10/c_1123971164.htm.
- [126] 刘乐. 基于区块链的智能硬件信任模型设计与研究[D]. 江苏科技大学, 2019.
- [127] 邓枕涛, 毛向杰. 后量子密码技术在区块链系统中的应用[J]. 信息通信, 2018, 192(12):59-61.
Deng Longtao, Mao Xiangjie. The Application of Post-quantum Cryptography in Blockchain Sysytem[J]. Information & Communications, 2018, 192(12):59-61. (in Chinese)
- [128] Fotiou N , Pittaras I , Siris V A , et al. A privacy-preserving statistics marketplace using local differential privacy and blockchain: An application to smart-grid measurements sharing[J]. Blockchain: Research and Applications, 2021.
-

作者简介：

魏之千 (1997), 男, 硕士, 从事区块链技术、计算机系统与应用安全相关的工作, wzqlen@163.com;

华昊辰 (1988), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 从事需求侧灵活资源调度、电力市场与经济、用能互联网方面的研究, huahc16@tsinghua.org.cn;

王同贺 (1990), 男, 助理研究员, 博士, 从事分布式计算、能源区块链方面的研究, tonghewang@tsinghua.edu.cn。