

· 专题一:区块链技术及应用 ·

## 区块链与综合能源系统:应用及展望

张妍<sup>1,2\*</sup> 王龙泽<sup>3</sup> 吴靖<sup>1</sup> 原蓉芳<sup>1</sup> 李美成<sup>3,4</sup>

(1. 华北电力大学 经济与管理学院,北京 102206;

2. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室,北京 102206;

3. 华北电力大学 可再生能源学院,北京 102206;

4. 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

**[摘要]** 本文基于区块链的技术特点,结合我国能源电力改革的发展方向,对区块链在综合能源系统的应用及发展前景进行探究。本文阐述了区块链技术在综合能源系统应用方面的现状和面临的挑战,分析了能源区块链系统构建中需要解决的关键科学问题,展望了基于区块链的未来综合能源的发展愿景。论文提出要构建适合我国经济发展的综合能源区块链系统,并在系统中实现协同化、智能化、数字化和低碳化。

**[关键词]** 区块链;综合能源系统;能源区块链;科学问题;前景展望

区块链具有去中心化、不可篡改、公开透明等特点,将成为下一轮技术创新的关键突破口,并以此推动数字金融、物联网、能源电力等领域的创新变革。习近平总书记在关于推动区块链技术和产业创新的讲话中强调:“要推动区块链底层技术服务和新型智慧城市相结合,探索在信息基础设施、智慧交通、能源电力等领域的应用<sup>[1]</sup>”。区块链技术的融合创新和功能拓展,将会为我国经济的发展注入新的动能。能源电力作为我国经济的支柱产业,也需要加快推进区块链技术在电力领域的创新应用,构建适合我国能源电力发展的综合能源区块链技术和应用框架。

### 1 区块链在综合能源系统中的应用:发展现状与挑战

建设清洁低碳、安全高效的能源体系,是我国能源改革的发展方向。到2030年,我国非化石能源发电量将占全部发电量的50%,到2050年,将实现能源消费总量基本稳定,非化石能源超过一半<sup>[2]</sup>。为实现这一目标,我们需要在能源电力的发展中不断提升可再生能源的占比、开展分布式能源利用、提高



**张妍** 管理学博士,毕业于中国人民大学商学院,英国剑桥大学访问学者,现任华北电力大学新能源管理与评估研究所所长。近年来主要从事新能源管理与评估、环境资源会计、微能源与综合能源系统等方面的研究工作,先后在国内外学术期刊发表研究论文60余篇,出版教材论著2部,主持国家自然科学基金、教育部博士点基金等科研课题十余项,担任多个学术团体任职和期刊的审稿专家。

能源使用效率,以建立适合我国能源电力发展的综合能源系统。区块链技术的出现,为我国电力的发展提供了新的契机,区块链技术的去中心化、去信任化、透明性、公平性和分布性决策的特点,非常切合电力改革的发展需求<sup>[3]</sup>。以区块链为代表的数字技术,与电力技术加速融合,将显示出强大的发展潜力,借助能源区块链技术,有望打造一个去中心化的能源电力市场新局面,推动我国综合能源系统的快速发展。

认识到区块链技术对未来能源电力发展的影响,很多国家开始在实践中进行探索,以期在新一轮能源技术竞争中占据主动权。近年来,美国、德国等发达国家在区块链技术的能源领域应用方面进行了

收稿日期:2019-12-31;修回日期:2020-02-10

\* 通信作者,Email: zhangyan8698@ncepu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(71974055)和北京节能与电力技术开发基金会项目(2019BJ0294)的资助。

很多尝试。2016年4月,美国纽约的布鲁克林建立了全球首个能源区块链交易系统,该系统将处于区块链网络中的五个家庭的屋顶光伏发电,直接出售给区块链交易系统的另外五组家庭,这个能源交易系统是由美国的能源公司(LO3公司)、西门子数字电网(Siemens Digital Grid)以及比特币开发公司(Consensus Systems)共同合作开发的。因此布鲁克林微电网的建立,标志着区块链技术在能源领域应用的开端<sup>[4]</sup>。

此外,很多国家和地区也相继开展了以区块链为底层技术的综合能源交易项目。如欧盟的Scanergy项目建立了基于以太坊的智能合约通用平台,将区块链技术应用到分布式能源的交易中。澳大利亚弗里曼特市采用区块链技术将光伏发电、电动汽车、区域水处理厂联系起来,形成智慧城市互联样板项目<sup>[5]</sup>。日本东京电力公司开发了区块链技术能源交易平台,可使供需双方通过P2P市场直接交易。德国在区块链的能源应用方面也做了很多尝试并取得了很好的进展,这些成果一方面源于德国政府对发展区块链技术较为支持,另一方面是因为德国的可再生能源发展较好,这些都为综合能源区块链的应用提供了很好的政策和技术支撑<sup>[6]</sup>。

区块链作为分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等技术的集成应用,可重塑行业信任方式的基础结构,有望成为下一轮技术创新和产业突破的突破口<sup>[7]</sup>。我们都有这样的共识:在全球新一轮科技革命和产业变革中,只有掌握了核心技术,才能在新的竞争中占据优势。这也是世界各国纷纷抢占技术高地,集中力量开展创新实践的原因。我国政府在这方面也表现出了很大的决心:强调要注重基础研究,提升原始创新能力,努力让我国在区块链这个新兴领域走在理论最前沿、占据创新制高点、取得产业新优势;强调推动协同攻关,加快核心技术突破,为区块链应用发展提供安全可控的技术支撑。可见我国在推动区块链技术的产业创新方面,已经形成了较好的政策支持环境。

在能源区块链的实践应用方面,我国也进行了积极的探索。2019年8月,国家电网成立了国网区块链科技公司,作为能源电力领域的世界级央企,正在借助该平台来实现区块链技术的研究、能源区块链产品开发、能源交易平台建设等方面的业务。此外,其他企业和研究机构,也在能源区块链方面进行了一些探索性工作,共同推动了区块链技术在综合

能源系统中应用的进程。例如,浙江电力公司电科院创立的能源区块链研究项目、北京大同区块链技术研究院项目、蛇口能源区块链社区公益项目、嘉兴“互联网+智慧能源”双创基地综合能源示范工程等。初期的能源区块链项目,大都尝试将区块链技术与综合能源系统建设相融合,在区块链电子合同、大数据征信系统、区块链金融风控架构、区块链电费核算等方面进行了一些技术融合,这些都为我国建立更加系统完整的综合能源区块链应用框架提供了经验。

基于区块链技术的独特优势,让我们对区块链与能源电力技术的融合充满期待。区块链技术是利用区块链式数据结构来验证与存储数据、利用分布式节点共识算法来生成和更新数据、利用密码学的方式保证数据传输和访问的安全、利用由自动化脚本代码组成的智能合约来编程和操作数据的一种全新的分布式基础架构与计算范式。这种分布式数据结构集合了去信任化、去中心化以及安全性的技术特点,与综合能源系统的未来发展需求非常契合。为了应对能源危机和环境污染,未来的能源发展要向着清洁、低碳、灵活和多元化方向转变。未来的能源系统,必然是一个融合了可再生能源等多种能源形式、集中式和分布式结合、泛在电力广泛物联的综合能源系统<sup>[8]</sup>。所以,将区块链与综合能源系统结合,构建适合我国经济发展的综合能源区块链系统,一定会极大地推动我国能源电力的长远发展。

## 2 综合能源区块链系统的特点与架构

迄今为止,区块链技术应用于综合能源的研究与实践尚处于起步阶段,区块链天然的分布式特征有助于构建综合能源的信息化网络平台,也能促进综合能源系统的供需平衡、需求侧响应及可再生能源消纳等问题的解决<sup>[9]</sup>。

综合能源区块链系统是基于区块链特有的分布式数据结构,将政府、能源供应企业、监管部门、能源用户、金融机构等各方作为节点,搭建点对点的能源信息传输网络,通过区块链技术建立协同化、智能化、数字化和低碳化的综合能源区块链网络,实现去中心化、去信任化、智能高效的能量管理。这一综合系统,既要实现系统内部多种能源的有效平衡和高效利用<sup>[10]</sup>,又要达到系统外部能源供需的广域互联和有效监管,其系统构架如图1所示。

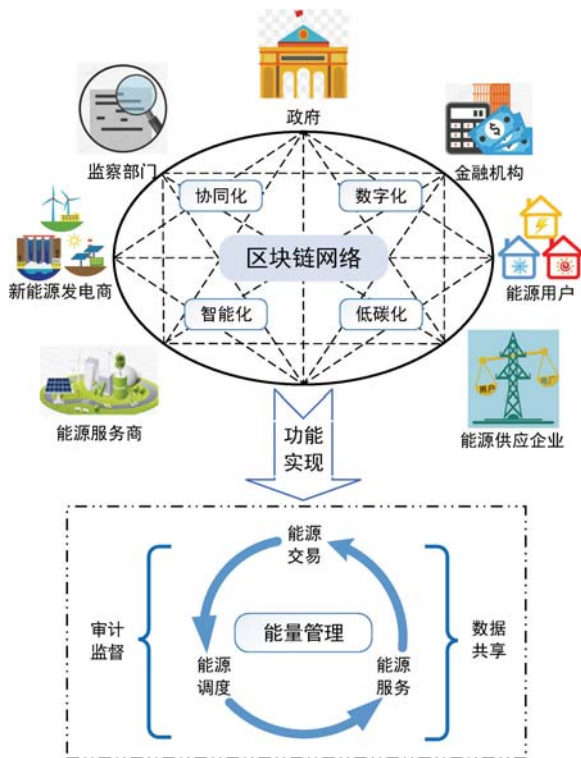


图1 综合能源区块链系统架构图

综合能源区块链系统的能量管理是利用区块链技术去信任化、去中心化以及安全性等方面的特点,在能源供应企业、能源用户、能源服务商、监管部门各个节点之间构建能源区块链网络,来实现能源交易、能源调度、能源服务、监督审计与数据共享等功能。进而实现综合能源系统内部各种能源之间更加高效安全的相互连结和耦合,能源供给更加高效、柔性、多元和互补,并最终提高能源利用效率和可再生能源的利用比例。

综合能源区块链系统在能源买卖交易中,各主体平等分散决策,直接进行能源交易,进而减少了不必要的能源传输损耗,使资源成本和交易成本降到最低。综合能源区块链系统主要通过参与主体各自的决策与博弈,来实现能源供需平衡<sup>[11]</sup>;同时,不同区域之间也可进行发电权与售电权的交易,进而实现跨区域的能源交互,以达到能源的广域互联,这种分散式的能源调度方式可促进各主体参与程度,拓展可再生能源的消纳途径,提高能源利用效率。在能源服务方面,基于区块链特有的共识机制,使综合能源系统“源—网—售—荷”全环节的信息保持一致性,有助于综合能源服务的运行管控体系构建<sup>[12]</sup>,提升综合能源服务协商机制的高效性、交易的安全性和服务的实时性<sup>[13]</sup>。另外,将区块链技术应用于

综合能源系统之中,也可以提升系统的监管能力和数据共享功能。系统中每个节点都有权限访问数据信息并储存于本地,个别能源供需主体的恶意行为不会对系统造成影响,提高综合能源系统的数据安全性,有助于国家相关组织机构对能源电力运行进行管理监督,数据共享也有利于促进分布式协作的能源互联网发展。

总之,将区块链技术应用先进综合能源系统,有望重构能源产业的各个环节,实现能源电力与信息技术的有机融合、实体经济与数字经济的有机融合、传统能源与可再生能源的有机融合,进而提高综合能源系统的能源使用效率,提高可再生能源的应用比例,进一步推动电力技术创新和能源产业的发展。

### 3 综合能源区块链应用中的科学问题

目前可实现的区块链实体应用案例相对较少,由于区块链技术自身的特点,以及综合能源系统本身具有的物理结构复杂、数据吞吐量大、广域协调困难等特征,使区块链技术在综合能源系统的应用还面临很多挑战。这些具有挑战性的科学问题,主要表现在以下四个方面。

#### 3.1 综合能源系统物理复杂性对现有区块链网络架构的挑战

综合能源系统通常包括煤炭、石油、天然气、电能、热能等多种能源,通过“源—网—售—荷”全环节的能源交互,满足各类用户的电、热、冷等用能需求,单一能源信息(如电力负荷、新能源发电预测、智能电表、电价信息等)也将转变为多种信息相互融合,物理结构复杂多样。目前已成熟的比特币、以太坊等公有链,可根据不同的应用场景建立相应的智能合约进行买卖交易与信息交互,但如何实现综合能源发、供、用的瞬时平衡,仍是值得探究的技术难题。

随着未来能源系统不断向着多种能源的集成化发展,系统将涵盖更多的风力发电、光伏发电等可再生能源,而可再生能源显著的间歇期和不确定性形成了更为复杂的能源供给方式;另一方面,如吸收式热泵、余热回收等各类节能降耗技术的集成应用,提高了综合能源系统能源利用效率的同时,也进一步提高了系统的复杂程度,给区块链技术的应用拓展带来挑战。

#### 3.2 能源信息高吞吐、高并发对区块链高效运行的挑战

综合能源系统的能源交互信息具有动态性、实

时性,数据吞吐量明显多于交易结算的区块链应用场景,给系统高效运行造成困难,甚至出现通讯延迟与信息阻塞现象。例如比特币网络每秒大约处理7笔交易,以太坊的信息处理速度为每秒20~30笔<sup>[14]</sup>,这相比于目前集中式商业网络的信息处理速度还相差甚远。

随着未来综合能源系统不断向着规模化发展,系统中参与的能源供需的主体显著增多,不同区域的综合能源系统也可通过区块链网络进行跨区域的能源交互,使系统必须具备较高的并发性能,以满足综合能源的各类业务需求;同时,新能源汽车、相变储能等技术不断发展,在综合能源系统中的占比逐步增多,储能设备可根据系统信息实时调整能源供需策略,且各设备位置相对分散,对区块链网络的高并发运行形成挑战。

### 3.3 能源交易方的复杂性对能源区块链信息安全的挑战

区块链网络中单个甚至多个节点对数据库的修改无法影响其他节点的数据库,攻击者必须控制系统中至少51%的数据节点才能实现数据篡改,这使得区块链网络具有很好的安全性和容错性。我国目前的能源系统以集中式为主,供给主要由电网等少数企业承担,当未来分布式能源占比逐渐提升的时候,能源交易方会更加复杂多变,大型能源供给企业将可能控制系统内较多的能源供应节点,利用区块链技术的“隐匿性”特征实施技术标准垄断或是促成垄断协议的达成,并基于自身垄断优势掌握普通用户隐私信息<sup>[15]</sup>,对于综合能源系统的网络与数据安全构成影响。

随着未来综合能源系统不断向着多元化发展,能源供给方式复杂多样,还需要构建统一的能源协调机制,以促进能源的有效利用;其次,各类用户对于可靠稳定的用能需求日渐提高,需要降低断电、断气等风险,以提高综合能源区块链系统的安全与稳定;最后,随着能源需求侧响应与参与程度的提升,大量信息被分布式存储在区块链网络之中,保障每个能源用户的隐私也对开源式的区块链网络提出挑战。

### 3.4 区块链分布式共识机制对资源环境的挑战

区块链特有的共识机制可在无需可信第三方中介的情况下,实现综合能源系统“源—网—售—荷”全环节的信息一致性,促进各参与主体的可信任能源交

互。但是,区块链的分布式共识机制,需要以大量算力为支撑,将数据在所有节点中进行确认、传输、存储等过程,也会消耗一定的能源。综合能源的开发建设主要目的之一就是降低整体能源消耗,综合能源区块链系统节能降耗与算力耗电还没有相应的评价技术,需要科学全面地衡量系统的能源利用效率。

随着未来综合能源系统不断向着全球化发展,各个国家、各个区域的能源系统有望实现稳定高效的互通互联,打破区域能源供需壁垒,构建绿色低碳的能源互联网。在广域的分布式能源交互中,区块链的共识机制在发挥信息一致性优势的同时,也可能消耗更多的资源以完成数据的全网络储存与处理,如何降低区块链网络运行的能源消耗、如何评价系统的节能降耗指标是区块链技术应用的挑战之一。

## 4 基于区块链的综合能源系统前景展望

鉴于综合能源区块链技术应用的主要挑战性科学问题,未来的理论与项目实践将重点围绕区块链网络架构、高并发能源交易、能源数字身份认证及减低资源消耗等方面开展。

### 4.1 开发多种能源去中心化自治协同的区块链网络架构

从能源改革的趋势来看,区块链去中心化的网络架构与综合能源分布式的发展模式相吻合,构建多种能源自治协同的区块链综合能源系统,可有效解决可再生资源、化石能源、储能与节能设备等各类能源生产主体信息不对称的问题,促进系统多种能源梯级高效利用。由于现有的公有链网络架构主要针对金融交易设计开发,网络的运行效率与可拓展性较差,难以适用于综合能源复杂多样的物理结构。因此,也可以构建以联盟链为底层架构,针对综合能源系统量身打造符合物理特性的区块链网络,联盟链相对松散的共识机制使各节点达成共识时间更短,系统运行效率明显提高,有助于综合能源系统能源发、供、用的瞬时平衡。

联盟链灵活的网络架构一定程度上提高了区块链技术在综合能源系统中的适用性,但也使各个综合能源系统形成封闭式网络,不利于各系统供需节点的互通互联。因此,可以从以下方面进行探索和研究:一方面,开发通用的能源联盟链平台,充分结合可再生资源与各类节能设备的运行机理,建立可

模块化调用的能源设备智能合约,缩短能源区块链网络的建设周期,降低系统开发成本,有助于区块链技术在能源领域的推广实践;另一方面,充分发挥公有链的开源、开放特性,研究并搭建专属于能源领域的公有链底层架构,实现区块链技术与能源电力技术,尤其是再生能源综合利用技术、储能技术,电网技术等的有效融合,实现不同区域的能源供需系统大规模互通互联。

#### 4.2 打造高并发、智能化的能源交易平台

与传统交易方式相比,综合能源区块链平台可在无中心机构管理的情况下自动运行,开展可信交易,这种交易模式弱化了传统售电公司的中心枢纽功能,降低了能源领域的整体交易成本,也为各类用户带来更多自由交易的选择。基于区块链的综合能源系统将构建适合“源—网—售—荷”全环节的能源交易平台,对各类能源供需方进行能量管理和提供交易服务。通过“代码即合同”“代码即法律”的智能合约技术,采用连续双边拍卖等机制进行点对点交易,有效解决能源交易双方信息不对称导致的信任缺失问题,为可再生能源就近消纳与有效利用提供新路径的同时,降低了能源交易过程中的人力、时间和沟通成本。

为持续打造高并发、智能化的能源交易平台,以能源交易带动综合能源系统的发展完善,使各参与主体利益最大化,可以在以下方面进行探索和研究:首先,鼓励不同技术路线的科技研发,持续提高能源区块链交易平台的信息处理速度与并发效率,以满足更多的参与主体进行点对点的能源交易;其次,研发先进的多区块链信息交互技术,通过侧链锚定、分布式私钥控制等技术手段,破解各能源区块链网络之间无法进行数据交互与交易结算的难题,促进综合能源区块链网络的跨区域交易,以多元化市场交易机制带动能源的供需平衡;最后,发掘区块链与人工智能、物联网、大数据、5G等技术深度融合应用的可能途径,在区块链与其他新兴科技之间搭建可持续发展的技术桥梁,完善综合能源系统的各项功能,提高能源区块链交易平台的智能化水平。

#### 4.3 实现综合能源系统的数字认证

区块链的不可篡改特性是降低社会信用成本的重要特征,也是网络安全的重要保障。区块链的加密算法技术可将大量的能源数据分布式的存储在每个能源供需主体之中,有效降低了价值信息被恶意

篡改的可能性,能源信息的安全性大为提高。另外,为推进我国已实施的可再生能源配额机制,可将区块链技术用于绿色证书交易市场,充分发挥区块链的信息公开透明、可追溯等优势,简化绿色证书的认证与交易流程,激励清洁能源交易,促进节能减排。在综合能源区块链点对点能量传输与交易结算的框架下,第三方的约束与监管较少,区块链的数字技术将发挥更大作用,促进各参与单元达成共识<sup>[16]</sup>,并有助于建立透明、公正、平等的能源市场。

为实现综合能源系统的数字身份认证,推动能源行业向数字化产业转型升级,要加强能源区块链数字技术的研发,通过加密通信、电子签名等技术,给予能源供需主体相应的数字化身份,将不同属性的能源供应节点、能源使用节点、能源传输与转换节点进行数字化表征,给予物理能源相应的数字化身份,提供去中心环境下的信任机制<sup>[17]</sup>,为数据安全保障提供技术保证;另一方面,加强能源区块链技术,与储能、节能等能源新技术融合,推动能源技术的数字化水平。

#### 4.4 优化共识机制,减少资源消耗

区块链特有的共识机制使能源系统各主体的数据信息保持高度一致,实现综合能源系统能量管理的稳定、高效,并促进多系统的广域协调。未来基于区块链的综合能源系统,要在满足多元化供能和用能需求的同时,使多方达成共识机制,并减少资源消耗,提高能源使用效率。

要优化综合能源区块链网络的运行方式,不断提高综合能源系统的经济效益、环境效益、社会效益,我们可以在以下方面进行探索和研究:积极探索适用于能源领域的共识机制,在保障区块链去中心化、公开透明、安全可信、信息可追溯和不可篡改等技术优势的前提下,考虑将区块链网络从算力驱动转变为能源驱动,优化共识机制,提高综合能源系统的低碳属性;建立区块链应用的科学评价体系,全面考虑区块链网络运行的安全、效率、经济、环保等指标,搭建可量化的评价系统,通过科学、全面的评价方法衡量各区块链项目的经济效益与环境效益,指导未来基于区块链的综合能源系统建设发展;从技术融合发展到理念融合,以区块链互信共享的共识机制为基础,探索建立融合新科学技术、新商业模式、新共享范式的综合能源互联网,实现能源绿色低碳的可持续发展。

## 5 结 语

区块链技术主要特征在于去中心化,通过分布式数据结构、共识机制、非对称加密等技术组合应用,在促进数据共享、优化业务流程、降低运营成本、提升协同效率、建设可信体系等方面发挥积极作用。要加快推动区块链技术和产业创新发展,积极推进区块链和经济社会融合发展,要提高区块链技术在灵活性、并发性、安全性和环保性等四个方面的性能。即挖掘区块链机理,采用灵活可扩展的技术架构,实现多领域的区块链项目落地;充分融合其他新兴技术,研究多种链式结构,实现区块链网络的高并发运行;采用数字身份识别技术保护参与主体信息,合理监管区块链数据信息,实现区块链的数据安全与隐私保护;采用合理的共识机制,在保障去中心化数据交互的同时,实现区块链的低能耗运行。

基于区块链的综合能源系统要充分考虑能源信息交互的特殊性,在未来综合能源系统中实现四化,即协同化、智能化、数字化和低碳化:将区块链技术灵活应用到能源系统之中,构建自下而上的能源管理架构,实现多种能源去中心化自治协同;要充分挖掘区块链等新兴技术优势,打造稳定高效的区块链网络,实现各类能源供需主体的智能化交易;要采用先进的技术手段,将能源的物理属性赋予数字化身份,实现综合能源系统的信息可追溯和不可篡改;要优化区块链技术应用形式,充分发挥综合能源节能低碳的优势,实现能源工业的绿色可持续发展。

将区块链技术与综合能源系统相结合,构建适合我国经济发展的综合能源区块链系统,促进区块链技术与能源技术不断融合、创新和实践,一定会极大推动我国能源改革的进程,并为我国经济社会的发展提供源动力。

## 参 考 文 献

- [1] 人民网. 把区块链作为核心技术自主创新重要突破口加快推动区块链技术和产业创新发展[2019-10-26]/[2019-12-18]. <http://hi.people.com.cn/n2/2019/1026/c231187-33475095.html>.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893—1904.
- [3] 胡伟, 姚文慧. 基于区块链的能源电力供需网调度优化模型. 系统管理学报, 2019, 28(6): 1134—1142.
- [4] Mengelkamp E, Gärttner J, Rock K, et al. Designing microgrid energy markets a case study: the Brooklyn Microgrid. Applied Energy, 2018, 210: 870—880.
- [5] 赵曰浩, 彭克, 徐丙垠, 等. 能源区块链应用工程现状与展望. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 14—24.
- [6] Andoni M, Robu V, Flynn D, et al. Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 100: 143—174.
- [7] 郑观, 范克韬. 区块链时代的信任结构及其法律规制. 浙江学刊, 2019, (5): 115—123.
- [8] Pan ZG, Guo QL, Sun HB. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow. Applied Energy, 2016, 167: 230—243.
- [9] Noor S, Yang WT, Guo M, et al. Energy demand side management within micro-grid networks enhanced by blockchain. Applied Energy, 2018, 228: 1385—1398.
- [10] 李彬, 覃秋悦, 祁兵, 等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述. 电网技术, 2019, 43(3): 961—972.
- [11] Sikorski JJ, Haughton J, Kraft M. Blockchain technology in the chemical industry: machine-to-machine electricity market. Applied Energy, 2017, 195: 234—246.
- [12] 龚钢军, 王慧娟, 杨晟, 等. 区块链技术下综合能源服务研究. 中国电机工程学报: 1—13[2019-12-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190062>.
- [13] 闫庆友, 米乐乐. 综合能源服务商业模式分析—基于商业模式画布. 技术经济, 2019, 38(5): 126—132.
- [14] 邵奇峰, 金澈清, 张召, 等. 区块链技术: 架构与进展. 计算机学报, 2018, 41(5): 969—988.
- [15] 孙晋, 袁野. 区块链技术应用的反垄断隐忧及应对. 学习与实践, 2019, (9): 81—90.
- [16] Ahl A, Yarime M, Tanaka K, et al. Review of blockchain-based distributed energy: implications implications for institutional development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 107: 200—211.
- [17] 罗文华. 规则与共识: 从电子签名到区块链. 中国政法大学学报, 2019, 70(2): 48—59+206.

## Blockchain and Integrated Energy System: Application and Prospect

Zhang Yan<sup>1,2</sup> Wang Longze<sup>3</sup> Wu Jing<sup>1</sup> Yuan Rongfang<sup>1</sup> Li Meicheng<sup>3,4</sup>

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206;

2. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, Beijing 102206;

3. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206;

4. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Beijing 102206)

**Abstract** Based on the technical characteristics of the blockchain, combining the development direction of China's energy and power reform, the application and development prospect of block chain in integrated energy system are explored. This paper analyzed and outlined the development status and challenges of the blockchain technology used in the integrated energy system, and analyzed the key scientific problems to be solved in the construction of energy blockchain system, and charted the development vision of future integrated energy system based on the blockchain. This paper proposes to build an integrated energy blockchain system suitable for China's economic development and achieve the synergy, intellectualization, digitization and low carbonization in the system.

**Keywords** blockchain; integrated energy; energy blockchain; scientific problems; prospect forecast

(责任编辑 齐昆鹏)

· 资料信息 ·

## 我国学者在碳氢键的精准转化研究中取得新突破

在国家自然科学基金项目(批准号:21821002,21761142010)的资助下,中国科学院上海有机化学研究所刘国生课题组在碳氢键的精准官能团化研究中取得了新突破,发展了复杂烯烃的烯丙位碳氢键精准氧化反应,并与香港科技大学林振阳课题组合作揭示了金属调控氮自由基选择性攫氢的新机制。相关研究成果以“Site-specific Allylic C-H Bond Functionalization with A Copper-bound N-centred Radical”(基于铜配位氮自由基的烯丙位碳氢键的定点官能团化反应)为题,于2019年10月24日在*Nature*(《自然》)上在线发表。论文链接:<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1655-8>。

碳氢键的直接官能团化是实现烃类高效转化的方法之一。其中氢原子转移是实现碳氢键官能团化最有效的途径。由于自由基的高活性,对于有机分子中多个结构相似的碳氢键如何实现自由基的选择性攫氢,以及如何控制攫氢后碳自由基的反应选择性是亟待解决的两个关键科学问题。刘国生课题组在研究中发现,当烯烃分子含有多个烯丙位的氢原子或者生物活性分子中存在多个烯烃时,铜催化剂表现出优秀的位点选择性自由基攫氢能力,反应能以高区域、立体和对映体选择性得到单一的碳氢键氧化产物,实现烯丙位的不对称氧化反应。该反应具有广泛的底物普适性和官能团兼容性,同时还适用于复杂药物分子的后期精准修饰。通过与香港科技大学林振阳课题组的合作,首次揭示了金属铜物种与含磺酰胺的氮自由基配位从而调控氮自由基选择性攫氢的新机制,为未来研究碳氢键的精准转化提供了新的思路。

(供稿:化学科学部 康强 付雪峰 陈拥军)