DOI：10.13334/j.0258-8013.pcsee.170201 文章编号：0258-8013 (2017) 13-3664-08 中图分类号：TM 73

区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望

杨德昌[1]，赵肖余[1]，徐梓潇[1]，李勇[2]，李强[2]

(1．中国农业大学信息与电气工程学院，北京市 海淀区 100083；
2．湖南大学电气与信息工程学院，湖南省 长沙市 410082)

Developing Status and Prospect Analysis of Blockchain in Energy Internet

YANG Dechang[1], ZHAO Xiaoyu[1], XU Zixiao[1], LI Yong[2], LI Qiang[2]

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Haidian District, Beijing 100083, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Energy internet has been considered as the effective solution to implement the energy transformation in China. The Blockchain is also widely recognized as the important technological supporting for construction of the energy internet. Under this circumstance, the current status and future application of Blockchain in energy internet were introduced in this paper. First of all, the basic concept and typical feature of Blockchain were summarized. The technological structure and transaction process of Blockchain were described in detail. Then, the developments of Blockchain in energy internet, including the emerging currencies, technological system and typical utilization, were analyzed from the perspective of country. Finally, the key problems and possible scenarios of Blockchain in energy internet in China were proposed combing with the power market reform and energy supplying side revolution.

KEY WORDS: energy internet; blockchain; typical application; developing status; prospect analysis

摘要：能源互联网建设是促进我国能源转型的重要手段，而区块链技术已被广泛认可为能源互联网建设的重要支持技术。在此背景下，该文在系统总结区块链在能源互联网中应用现状的基础上，对区块链在能源领域中未来可能的应用场景进行了分析。首先从区块链典型特征入手，分析了区块链的技术架构和区块链网络的交易过程；然后基于国内外区块链和能源系统的研究热点，从新兴货币、技术产业和典型应用等方面对区块链在能源系统中的应用进行了系统总结。最后对区块链技术在我国能源互联网建设和电力体制改革中的应用前景进行了展望。

关键词：能源互联网；区块链；典型应用；发展现状；前景展望

0 引言

作为我国能源供给侧改革和产业结构调整的重要内容，能源互联网的建设已经起步，大量的能源互联网相关的示范工程已经开始投入运行[1]。能源互联网的建设和电力体制改革的推进对能源系统的拓扑结构以及商业模式产生了根本性的影响，参与能量交易的角色趋于多样化，相应的交易模式也更加丰富和复杂，亟需引入新技术支撑能源互联网的建设[2-4]。

作为一种新兴技术，区块链的发展已经得到了全社会的广泛关注，且在金融领域已经有初步的应用。区块链在能源领域的应用已经开始了初步的探索，主要的理论研究成果可以分为 2 个方面。1）能源领域区块链技术特征分析方面：文献[5]在提出了能源系统中区块链的基本概念的基础上，简要概述了区块链在能源领域的研究现状，并从 P2P 交易、电动汽车充电、物理信息安全和能源互联网的商业模式等方面对区块链的未来应用进行了初步的展望；文献[6]阐述了区块链技术和能源互联网之间的特征匹配情况，提出了区块链在能源互联网建设中典型的应用场景；文献[7]结合区块链的典型特征，对区块链在能源互联网中的应用前景进行了初步的展望，提出区块链对于构建“互联网+”和物联网的去中心化价值新体系，重构商业生态圈具有重要意义；文献[8]分析了区块链在能源领域的发、输、配、用、储等环节的应用场景和业务模式，提出了我国在发展能源区块链时面临的问题和解决这些问题的建议；文献[9]在介绍区块链技术的基本原理和典型特征的基础上，从功能、主体、属性等 3 个维度对区块链技术在能源互联网中的应用进行了归纳和分析，从能量、信息以及价值的角度，阐述了区块链技术对能源互联网中源、网、荷、储

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等不同主体在计量认证、市场交易、协同组织、能源金融不同环节中发挥的作用，对区块链技术在我国能源转型中的典型应用进行初探和展望。2）能源领域的区块链应用模式分析方面：文献[10]提出了弱中心化管理电力交易的方法，其核心内容是利用区块链技术以智能合约的形式存储电力交易信息并自动执行资金转移，记录智能电表采集的电能数据，中心机构仅对达成的交易进行安全校核和阻塞管理；文献[11]设计了一种基于区块链的供需互动系统架构，提出了一个以区块链协议标准为支撑，以信息监控、采集、录入、统计为中心，以需求响应服务器、负荷集成商、用户群为框架的一体化信息平台设计思路；文献[12]提出一种区块链技术在辅助服务中的应用设想，并从共识记账、智能合约、业务交互等方面对区块链技术应用方式进行了分析，归纳了当前区块链技术在电力市场辅助服务领域应用的局限性；文献[13]提出了一种利用区块链技术实现能源互联网系统分布式决策和协同自治运行的机制框架，从区块链和能源互联网角度分别提出了区块链框架下能源互联网发展的关键技术。

2016 年 11 月 3 日，在荷兰举行的 EMART ENERGY 会议上，大量专家学者对区块链技术在能源系统中的应用进行了分析和展望，并就区块链和能源系统耦合的关键技术进行了初步的归纳[14]，为区块链技术在能源领域的应用前景进行了展望。在此背景下，本文从区块链典型特征入手，首先分析了区块链的技术架构和区块链网络的交易过程；然后基于国内外区块链和能源系统的研究热点，从新兴货币、技术产业和典型应用等方面对区块链在能源系统中的应用进行了系统总结。最后对区块链技术在我国能源互联网建设和电力体制改革中的应用前景进行了展望。

1　区块链相关知识介绍

区块链(Blockchain)是指通过去中心化和去信任方式集体维护一个可靠数据库的技术方案[15]。该技术方案让参与系统中的任意多个节点，把一段时间系统内全部事务通过密码学算法计算并记录到一个数据块(Block)，生成该数据块的 Hash 用于链接下个数据块，系统所有参与节点来共同检验记录是否为真，并且每个区块的内容都由后续子链上的区块来保证其内容不可被篡改。各个参与节点可以在新区块确认及奖励分配上达成共识，从而逐渐形成的一个庞大、去中心化的公开账本[16]。

从数据的角度来看：区块链是一种几乎不可能被更改的分布式数据库。这里的“分布式”不仅体现为数据的分布式存储，也体现为数据的分布式记录。

从技术的角度来看：区块链并不是一种单一的技术，而是多种技术(数据读取、数据存储、数据加密和数据挖掘等技术)整合的结果。这些技术以新的结构组合在一起，形成了一种新的数据记录、存储和表达的方式。

1.1　区块链特征分析

通过对区块链概念的分析，总结得出区块链的特征分为 4 个方面[16]：

1）开放、共识：任何人都可以参与到区块链网络，每一台设备都能作为一个节点，每个节点都允许获得一份完整的数据库拷贝。节点间基于一套共识机制，通过竞争计算共同维护整个区块链，任一节点失效，其余节点仍能正常工作。

2）去中心、去信任：区块链由众多节点共同组成一个端到端的网络，不存在中心化的设备和管理机构，节点之间数据交换通过数字签名技术进行验证，无需互相信任，只要按照系统既定的规则进行，节点之间不能也无法互相欺骗。

3）交易透明、双方匿名：区块链的运行规则是公开透明的，所有的数据信息也是公开的，因此每一笔交易都对所有节点可见。由于节点与节点之间是去信任的，因此节点之间无需公开身份，每个参与的节点都是匿名的。

4）不可篡改、可追溯：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，除非能保证整个网络中超过 51%的节点同时修改，但这几乎不可能发生。区块链中的每一笔交易都通过密码学方法与相邻两个区块串联，因此可以追溯到任何一笔交易的前世今生。

1.2　区块链分类

目前，区块链分为 3 类：公有区块链(public Blockchain)，联盟区块链(consortium Blockchain)，私有区块链(private Blockchain)[16]。

1）公有区块链：世界上任何个体或者团体都可以发送交易，且交易能够获得该区块链的有效确认，任何人都可以参与其共识过程。公有区块链是最早的区块链，也是目前应用最广泛的区块链，各大 Bitcoins 系列的虚拟数字货币均基于公有区块链，世界上有且仅有一条该币种对应的区块链。

2）联盟区块链：由某个群体内部指定多个预

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

选的节点为记账人，每个块的生成由所有的预选节点共同决定(预选节点参与共识过程)，其他接入节点可以参与交易，但不过问记账过程(本质上还是托管记账，只是变成分布式记账，预选节点的多少，如何决定每个块的记账者成为该区块链的主要风险点)，其他任何人可以通过该区块链开放的 API 进行限定查询。

3）私有区块链：仅仅使用区块链的总账技术进行记账，可以是一个公司，也可以是个人，独享该区块链的写入权限，权利完全控制在一个系统中，私有链与其他分布式存储方案没有太大区别。

需要说明的是，区块链存在“蒙代尔”不可能三角，即去中心化、安全和高效之间存在不可能三角，在实际应用中，要结合金融、贸易和能源等不同系统现实需求进行定制化设计区块链的种类[17]。

1.3 区块链基础技术架构

通过对特征和分类的分析，可以得出区块链的技术架构如图 1 所示[16]。

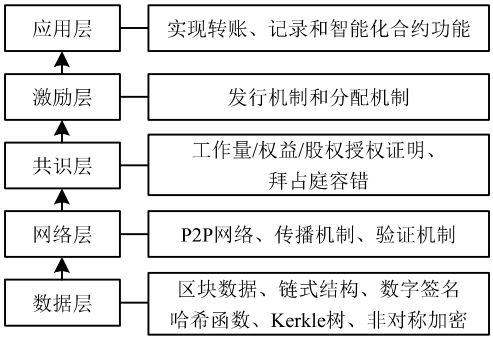


图 1 区块链的基础技术架构图

Fig. 1 Basic technological structure of the blockchain

结合图 1 的分析，技术架构各个层的功能分析如下：1）应用层主要由客户端完成转账、记账功能；2）激励层提出发行机制和激励机制；3）共识层用于共识机制的达成；4）网络层典型的为 P2P 网络，完成共识算法、加密签名、数据存储等工作；5）数据层以区块链的形式全量存储全部的交易数据和信息记录。

2 区块链在能源领域的进展

目前，区块链在能源领域应用已经开始初见端倪，部分欧美发达国家及少数高科技公司已经开始尝试将区块链技术应用到能源领域[18]，相关的研究成果和典型案例整理如下。

2.1 区块链和德国能源转型

2.1.1 区块链和能源交易

目前，区块链的概念和建设模式已经较为成熟，在能源利用的应用分析也已经取得一定的研究成果。文献[19]中指出，区块链在能源交易领域的应用应该围绕建立分布式交易和供应体系展开，具体的应用前景分析如图 2 所示。

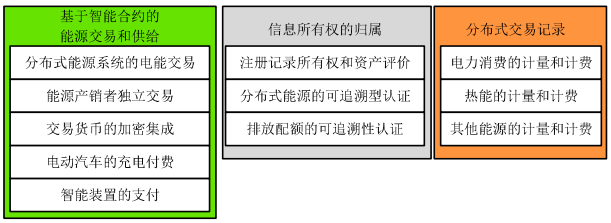


图 2 区块链技术在能源交易领域的可利用前景

Fig. 2 Overview of the possible application of block chain in energy trading area

在德国，部分报告和文献已经对区块链技术在能源交易中的应用进行了前景展望[19-21]。

1）在 2020 场景中：能源系统还处于转型的过程中，区块链相当于一个信息通道，涉及能源交易的所有角色都包含在其中。每一个角色都是一个节点，相当于构建一个“许可区块链”。区块链节点之间横向联系表示为信息的同步，区块链节点和交易系统之间纵向联系表征了两者之间的融合性；

2）在 2030 场景中：能源系统的转型已经基本完成，各种分布式电源的成本将会大幅度降低；另一方面，随着区块链技术的提高，基于区块链的能量交易平台已经非常完善。在文献[19]中，对区块链在能源交易中的前景进行了较为详细的分析展望，提出表征区块链交易货币的 Enercoin 可以代替欧元进行能源的交易，并对负荷和分布式电源变化引起的 Enercoin 需求变化及其对欧盟中央银行的货币调整政策的影响进行了定性的描述，提出的 Enercoin 的周期如图 3 所示。

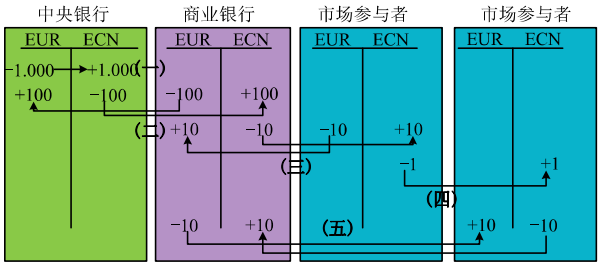


图 3 Enercoin 的循环示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Enercoin

在图 3 中，(一)表示 Enercoin 的初始化信息；(二)表示商业银行通过中央银行实现 Enercoin 和 Euro 之间的转化；(三)市场参与者通过商业银行利用交易账号管理系统将 Euro 换为 Enercoin；(四)市场参与方利用 Enercoin 购买电力或者从其他电力消费者得到 Enercoin；(五)如果需要，市场参与方可以将

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Enercoin 通过商业银行转化为 Euro。

2.1.2　区块链和电动汽车充放电管理

当前制约电动汽车大规模发展的主要因素有电动汽车充电设施数量较少、充电协议和计量模式多样、充放电互动性较差、充电过程不透明、充电协议不灵活等。针对存在的典型问题，RWE 和 Slock 合作提出利用区块链技术解决电动汽车的充电的一系列问题[21]，其核心思想是基于 Slcok 提供的智能合约和分布式账本技术实现公用充电桩的计费的透明化和信任化。主要的步骤如下：1）在电动汽车上安装智能充电插头；2）在手机上安装充电 APP；3）基于区块链的全自动支付系统。为了实现多样化电动汽车和充电模式的统一性交易，RWE 公司利用 BigchainDB(巨链数据库)，其基本的工作原理是将区块链技术和大数据技术进行整合，建立分布式大容量数据库，容量可扩展意味着具法律约束力的合同及证书都可储存在区块链上，权限控制系统意味着私人企业的区块链数据库以及公开的区块链数据库都可共存。公用电动汽车充电网络和 BigchainDB 在基础特征方面存在较多的融合点，因此电动汽车充电是区块链技术在能源系统中最早进行广泛利用的环节之一。

2.2　区块链和 NRGcoin–比利时

基于智能电网的物理结构和信息模型，比利时的区块链专家 Mike Mihaylov 在提出去中心化方式来促进点对点交易模式的同时，进一步提出了利用 NRGcoin 货币进行微电网的电力交易。主要的理念如图 4 所示[22-23]。

从图 4 可以看出，Mike Mihaylov 提出的基于 NRGcoin 的交易流程和核心内容如下：1）能源生产者 P 发出电量注入到配电网的物理模型中，并用 x 表示相关信息传输共享到全网络中；2）根据分布式合约，能源生产者 P 用 $f(x)$生成 NRGcoin，并更新公用记录；3）变电站 S 计量能源生产者 P 的发电量 t_p 和整个系统的用电量 t_c，同时用 $g(x, t_p, t_c)$从配电运营商传输 NRGcoin 到能源生产者，$g(\cdot)$是由配电运营商生成的价格函数。很显然能源生产者通过 $f(x)$和 $g(x)$得到 NRGcoin；4）能源生产者 P 出售 mNRGcoin 给市场交易方，并转化为欧元，同时能源消费者 C 利用欧元从市场交易方购买 nNRGcoin；5）能源消费者 C 利用 $h(y, t_p, t_c)$ NRGcoin 支付从变电站 S 获得 y 数据表征的能量，且 $h(\cdot)$也为配电运营商生成的价格函数；6）进行分布式对账，交易完成，并完整记录到区块链中。

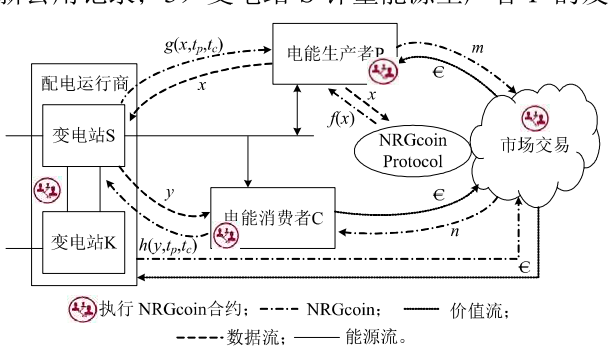


图 4　NRGcoin 在能源交易中理念

Fig. 4　Basic idea of nrgcoin in energy trading

通过以上的分析可以得出，利用 NRGcoin 的能源交易系统具有 3 个典型的优点：1）交易方式灵活简单，无需人工干预，能够激励能源生产消费者进入市场；2）能源交易价格由市场参与角色共同决定，能源价格控制在合理的范围内，不会使得市场价格过于混乱(1kWh 绿色电力等于 1 个 NRGcoin)；3）采用分布式货币代替欧元交易，各个参与角色不需要实质意义上的金钱交易，具有高度的信任化；

2.3　美国的 Tansactive 项目

位于美国纽约布鲁克林 Gowanus 和 Park Slope 街区的 TransActiveGrid 项目是世界上较早将区块链技术应用的能源系统的典型案例，该项目由美国能源公司 LO3 Energy 与比特币开发公司 Consensus Systems 合作完成，该项目的示意图如图 5 所示[24]。

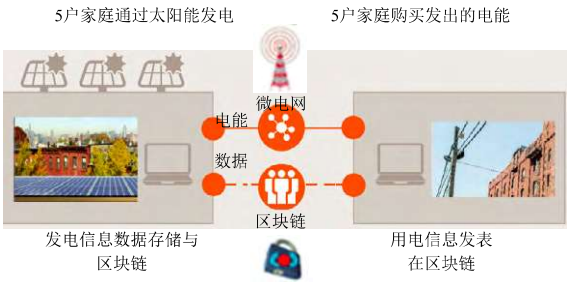


图 5　TransActiveGrid 项目交易示意图[25]

Fig. 5　Energy trading of TransActiveGrid

TransActiveGrid 项目的典型特征分析如下：1）能源交易采用点对点的方式，5 户家庭通过太阳能发电将剩余的电力出售给另外的 5 户；2）参与的家庭通过智能仪表进行连接和数据共享，追踪记录家庭使用的电量以及管理邻居之间的电力交易；3）智能仪表数据，可以为 Consensys 管理系统创建代币，代表生产消费者太阳能电池板的剩余电量，这些代币就代表着可再生能源生产的一定数量的能源，可以通过区块链智能仪表钱包进行交易[25]；

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4）区块链网络连接交易，不依赖第三方交易平台；

2.4 能源区块链–中国

自 2016 年 5 月，成立全世界第一家能源区块链实验室以来[25]，国内的专家学者对区块链技术在我国能源领域的应用分析已经取得了较为丰硕的研究成果。

1）学术研究领域：在对区块链和能源互联网典型特征进行匹配分析的基础上，对区块链技术在能源互联网领域的应用模式进行了初探，提出了区块链在需求侧管理、电能的计量和市场交易、电力市场辅助服务等领域的应用场景。

2）研究团队建设方面：部分企业和科研院所已经建立了针对区块链在能源领域应用分析的实验室，例如北京能链众合科技有限责任公司建立的能源区块链实验室、大同市政府投资建立的北京大同区块链技术研究院[26]、浙江省电力公司电力科学研究院创立的能源区块链研究团队等。

目前，区块链在我国能源互联网建设的核心宗旨是在泛能源的物理网络和泛能源信息应用网络之间架构起的一个透明，广泛参与和全面信任的金融交易体系，通过这样的交易体系为绿色补贴、绿色运营和绿色金融做一个系统级的解决方案，让产业和金融之间实现无缝的数据纽带，实现能源的物理模型、互联网的信息模型和区块链的金融体系之间的立体化融合[27]，目前国内专家学者提出的基于区块链能源互联网的简要示意图如图 6 所示。

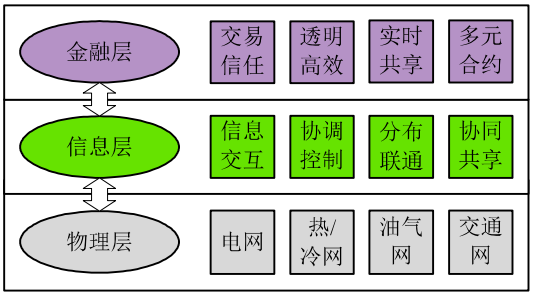


图 6 未来能源互联网的物理–信息–金融示意图

Fig. 6 Schematic diagram of future energy internet: physical-internet-finical

2.5 区块链在能源领域的发展现状

通过以上分析可以得出，国内外对区块链技术在能源领域的应用分析已经取得了初步的研究成果，本节从交易币种，参与的能源公司、新型技术企业和典型应用方面对区块链在能源领域的发展现状进行系统总结[20,28]。

通过对表 1 的分析，可以得出以下的结论：1）区块链和能源系统的耦合催生了多样化的交易币种；2）欧美部分能源公司已经开始利用区块链解决能源中存在的典型问题；3）区块链已催生了大量的新公司、新技术和新业务；4）区块链在能源领域的典型应用范围主要集中在交易模式革新以及电力辅助服务等领域。例如区域能源系统的交易和电动汽车充电支付等。

表 1 区块链在能源领域的发展现状

Tab. 1 Current status of blockchain in energy Area

类别	种类
交易币种	Ethereum, Solarcoin, NRGcoin, Enercoin, 绿币，碳票，Ecocoin
能源公司	RWE, Vattenfall, Entercity, Fortum, InviroHub, PowerLedger
新兴技术	Slock.it, One^{up}, Lo3ENERGY, ConsenSys, M-PYAG, Nasdaq, Bankymoon, XEnergy, Grid Singularity, PONTON, Powerpeer
典型应用	电动汽车充电，分布式能源系统，电力市场对等交易，LO3 Energy示范工程，布鲁克林微电网, Hackenergy

3 区块链技术能源互联网建设中应用前景

3.1 区块链和能源互联网耦合存在的问题

从能源互联网本身，区块链技术本身，能源互联网和区块链技术的耦合三个方面对当前区块链和能源互联网耦合存在的问题进行定性总结：

1）当前，能源互联网的概念还存在一定的分歧，其发展路径还不确定，存在较大的技术壁垒和产业限制，能源互联网本身的物理拓扑结构和信息通信平台的建设也存在一定的不确定性，因此相应的交易体系和价值流控更加难以形成固定的可借鉴的模式；

2）区块链技术的广泛应用还存在一定技术瓶颈，在计算效率、去中心化、隐私和安全等方面还存在需要解决的技术问题[29]。例如，目前区块链的计算能力及响应速度还不能满足应用领域实时计算的要求；此外，区块链的交易记录和相关信息需要所有参与角色进行同步存储，这需要大容量存储系统(硬件和软件)进行支撑。

3）区块链技术在能源领域的应用还处于起步阶段，能源系统是世界上最复杂的系统，其优化运行涉及到能源之间的同步优化和实时转化。当前基于区块链的能源系统典型应用场景的描述都是基于理想的状态，缺乏实际的验证和示范工程的运行经验支撑；

3.2 区块链在能源系统中应用需关注的问题

尽管区块链技术在能源互联网中的应用研究在世界多数发达国家都已经起步，但是其在能源系

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

统中应用需关注以下 4 个方面：

1）区块链技术和区域能源系统的耦合应基于能源系统本身的物理模型：区块链技术侧重于区域能源系统中信息平台的金融应用，因此其应用不能脱离其本身的物理模型，尤其是当前以电力系统为核心的分布式能源系统物理模型还比较薄弱，不能盲目的夸大区块链技术在分布式能源交易层面的应用，而忽略了分布式能源系统本身的物理模型建设；

2）区块链技术在区域能源系统中的全面应用需要较长的时间跨度：在开始阶段，其应用不是全覆盖的，要从区块链技术体系中的某一个典型特征入手，分析区块链的某一项技术和区域能源系统某一个方面的结合，切实解决区域能源系统中存在的问题；

3）区块链技术需要不断完善和提升：当前国内教育界、企业界、金融界都在宣传区块链技术的广泛应用前景，事实上区块链技术本身也是一个不断完善和成熟的过程，当前区块链在计算效率方面难以满足能源系统产销实时性的要求[29]。此外，区块链技术差异化网络容错能力分析还存在一定的技术缺陷；

4）区块链技术必须要与大数据技术、云计算技术进行融合：当前能源系统的信息化和自动化水平以及对数据的分析处理能力，还不能满足实时的要求，这就需要区块链技术和大数据技术、云计算技术、信息通信技术等先进技术进行深度融合和协调发展。

为深入分析区块链在能源系统中的应用前景，本文对区块链和能源系统耦合的关键环节进行了系统的分析。

1）基于智能合约的能源系统：能源系统的物理模型及其能源生产和消费的功率平衡(平衡市场、微电网、虚拟电厂、储能设备等)均包含在智能化合约中。

2）分布式存储的交易记录：交易信息采用分布式存储机制，并基于公钥和私钥的数字验证，可用于能量存储的结算、分布式能源的追溯、电动汽车充放电管理和能量的交易；

3）可追溯性的交易记录：可用于排放物的配额追溯、分布式能源的绿色电力可追溯认证以及资产管理；

4）特殊的加密交易货币：为能源系统的能量流计量和价值流计费提供了一种新的方式和途径，使得交易更加便捷和安全。

3.3　区块链在能源互联网中的应用前景

基于区块链技术在能源互联网中的发展现状，结合区块链技术的完善和能源互联网建设的趋势，对于区块链在能源互联网中的应用前景总结如下。

1）在能源供给领域：分布式和集中式的结合是未来能源供给领域的典型模式，区块链的去中心化与分布式电源之间的物理特性具有较强的耦合性，而基于区块链技术的实时更新有助于实现集中式和分布式之间的实时信息共享，避免多种能源的重复建设，减小能源供给系统的浪费，可应用的场景包括：基于私有链的分布式能源多能互补之间的计量；基于联盟链的大型能源基地之间的打捆模式等。

2）在能源输送领域：参与能源输送的角色众多，且存在广义的博弈竞争，区块链技术能够实现多个角色之间的强制信任和角色之间交易的透明化，能够实现多种能源之间的协调和优化传输，提高系统的效率。典型的应用场景包括：基于私有链的能源传输系统的阻塞管理和损耗分摊计算；基于联盟链的能源传输系统的实时监测和协调控制等。

3）在能源分配领域：分布式能源的广泛接入改变了能源分配系统的拓扑结构，多种能源之间的交叉转化和时空耦合对能源系统的计量提出了新的要求。基于区块链技术的自动执行和广泛共享将会显著提升能源分配的合理性，典型的应用场景包括：基于联盟链区域能源系统的自动计量[30]，基于联盟链的储能系统的规划运行一体化分析等。

4）在能源消费领域：基于分布式账本和智能化合约的区块链技术的应用，将会极大的提升能源消费侧和能源供给侧的透明度，从而改变区域能源系统的用能需求曲线，实现多种能源之间的合理利用和泛在交互。典型的应用场景包括：基于私有链的需求侧管理、家庭能量管理、电动汽车充放电电智能支付系统等

5）在能源交易领域：结合国内外现状的分析，区块链将会率先在能源交易领域得到应用，典型的场景包括：基于私有链的电费结算；基于联盟链的微电网中多元化角色的内部交易[31]；基于公有链的分布式能源系统内部各种多样化能源之间的交易；基于公有链的国家之间的能源交易体系和商业模式等；

通过以上的分析可以得出，区块链在能源互联网中的应用路径框架图如图 7 所示。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

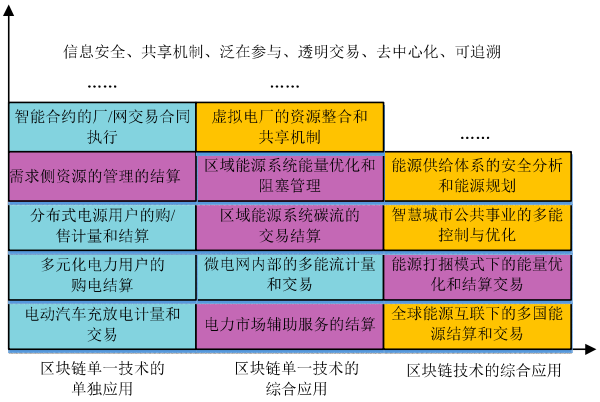


图 7 区块链在能源互联网中的应用路径示意图

Fig. 7 Roadmap of block chain in energy internet

4 结论

以电力市场和能源供给侧改革为时代背景，本文首先总结归纳了区块链技术的基本概念和典型特征，在详细分析各国区块链技术发展现状的基础上，对区块链在能源系统应用的关键问题和典型场景进行了展望，结合我国能源互联网建设的实际情况，对区块链技术在我国能源转型中的应用提出了建议，并进一步构建了区块链在能源互联网中的应用路径示意图，本文的理论分析成果对区块链在能源系统中的实际应用将会起到一定的推动作用。

参考文献

[1] 田世明，栾文鹏，张东霞，等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3482-3494.
Tian Shiming，Luan Wenpeng，Zhang Dongxia，et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(14)：3482-3494(in Chinese).

[2] 董朝阳，赵俊华，文福拴，等. 从智能电网到能源互联网：基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化，2014，38(15)：1-11.
Dong Zhaoyang，Zhao Junhua，Wen Fushuan，et al. From smart grid to energy internet：basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems，2014，38(15)：1-11(in Chinese).

[3] 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).

[4] 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).

[5] 颜拥，赵俊华，文福栓，等. 能源系统中的区块链：概念、应用与展望[J]. 电力建设，2017，38(2)：12-20.
Yan Yong，Zhao Junhua，Wen Fushuan，et al. Blockchain in energy systems：concept，application and prospect [J]. Electric Power Construction，2017，38(3)：12-20(in Chinese).

[6] 曹寅. 能源区块链与能源互联网[J]. 风能，2016(5)：14-15.
Cao Yin. Energy block chain and energy internet[J]. Wind Energy，2016(5)：14-15(in Chinese).

[7] 栾昊，赵简. 区块链在能源互联网应用的前景展望[J]. 能源，2016(8)：70-72.
Luan Hao，Zhao Jian. The prospect of block chain application in the Energy Internet[J]. Energy，2016(8)：70-72(in Chinese).

[8] 王安平，范金刚，郭艳来. 区块链在能源互联网中的应用[J]. 电力信息与通信技术，2016，14(9)：1-6.
Wang Anping，Fan Jingang，Guo Yanlai. Application of blockchain in energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology，2016，14(9)：1-6(in Chinese).

[9] 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)：4011-4022.
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)：4011-4022(in Chinese).

[10] 李彬，张洁，祁兵，等. 区块链：需求侧资源参与电网互动的支撑技术[J]. 电力建设，2017，38(3)：1-8.
Li Bin，Zhang Jie，Qi Bing，et al. Block chain：supporting technology of demand side resources participating in grid Interaction[J]. Electric Power Construction，2017，38(3)：1-8(in Chinese).

[11] 李彬，曹望璋，祁兵，等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术，2017，41(3)：736-744.
Li Bin，Cao Wangzhang，Qi Bing，et al. Overview of application of block chain technology in ancillary service market[J]. Power System Technology，2017，41(3)：736-744(in Chinese).

[12] 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，doi：10.13334/j.0258-8013.pcsee.162432. (in Press)
Zeng Ming，Cheng Jun，Wang Yuqing，et al. The primarily research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework [J]. Proceedings of the CSEE，doi：

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

10.13334/j.0258-8013.pcsee.162432(in Chinese).

[13] 邰雪，孙宏斌，郭庆来．能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]．电网技术，2016，40(12)：3630-3638.
Tai Xue，Sun Hongbin，Guo Qinglai．Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]．Power System Technology，2016，40(12)：3630-3638(in Chinese).

[14] EMART Energy．2016-Europe's flagship event for energy traders[EB/OL]．(2016-11-3)．http://www.emart-energy.com/blockchain.

[15] Melanie Swan M．Blockchain: blueprint for a new economy[M]．USA：O'Reilly，2015.

[16] 谭磊，陈刚．区块链 2.0[M]．北京：电子工业出版社，2016.

[17] 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(4)：481-494.
Yuan Yong，Wang Feiyue．Blockchain：The state of the art and future trends[J]．Acta Automatica Sinica，2016，42(4)：481-494(in Chinese).

[18] 陈一稀．区块链技术的“不可能三角”及需要注意的问题研究[J]．浙江金融，2016(2)：17-20，66.
Chen Yixi．Research on the “Impossible Trinity” of Block Chain technology and the problems should pay attention to[J]．Zhejiang Finance，2016(2)：17-20，66(in Chinese).

[19] Burger C，Kuhlmann A，Richard P，et al．Blockchain in the energy transition：a survey among decision-makers in the Germany energy industry[M]．Berlin：Deutsche Energie-Agentur GmbH(Dena)-German Energy Agency Energy Systems and Energy Services，ESMT European School of Management and Technology GmbH，2016：5-40.

[20] Burgwinkel D，Michael M．Potential of the blockchain technology in energy trading[M]//Burgwinkel D．Blockchain Technology Introduction for Business and IT Managers．de Gruyter，2016：2-43.

[21] Schwieters N，van Hoof J，Etheridge D，et al．Blockchain－an opportunity for energy producers and consumers?[EB/OL]．(2016-11-04) http://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf.

[22] Mihaylov M，Jurado S，Moffaert K V，et al．NRG-X-change：A novel mechanism for trading of renewable energy in smart grids[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Grids and Green IT Systems．Barcelona，Spain，2014：101-106.

[23] Mihaylov M，Jurado S，Avellana N，et al．NRGcoin：virtual currency for trading of renewable energy in smart grids[C]//Proceedings of the 11th International Conference on the European Energy Market．Krakow：IEEE，2014：1-6.

[24] Nguyen C．An indie，off-the-grid，blockchain-traded solar power market comes to Brooklyn[EB/OL]．(2016-03-18)．https://motherboard.vice.com/en_us/article/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar.

[25] 曹寅．能源区块链实验室曹寅：能源+区块链，美好未来还是题材炒作[EB/OL]．(2016-05-14)．http://www.tmtpost.com/2435687.html.

[26] 北京大同区块链技术研究院．基于区块链技术的智能微电网交易系统[EB/OL]．(2016-09-12)．http://www.uni-ledger.com/micro-grid.html.

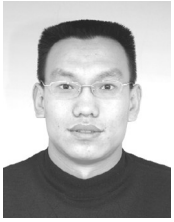
[27] 林乐．中国电动汽车百人会-区块链推动电动车产融结合进入高级状态[EB/OL]．(2017-01-14)．http://auto.gasgoo.com/topic/bairenhui/.

[28] Mattila J，Seppälä T，Naucler C，et al．Industrial blockchain platforms：an exercise in use case development in the energy industry[R]．ETLA Working Papers No.43，ETLA，2016：1-19.

[29] 沈鑫，裴庆祺，刘雪峰．区块链技术综述[J]．网络与信息安全学报，2016，2(11)：11-20.
Shen Xin，Pei Qingqi，Liu Xuefeng．Survey of block chain[J]．Chinese Journal of Network and Information Security，2016，2(11)：11-20(in Chinese).

[30] Munsing E，Mather J，Moura S．Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks[EB/OL]．UC Berkeley：Energy，Controls，and Applications Lab．http://escholarship.org/uc/item/80g5s6df.

[31] 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，2016，doi：10.1109/TDSC.2016.2616861.



杨德昌

收稿日期：2017-02-03。

作者简介：

杨德昌(1983)，男，副教授，硕士生导师，主要研究方向为主动配电网状态估计和区域能源系统的规划分析，yangdechang@cau.edu.cn

赵肖余(1994)，男，硕士研究生，主要研究方向为交直流混合配电网的潮流计算和稳定控制，1044968376@qq.com。

(编辑　乔宝榆)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net